

การศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติของสายไฟฟ้าชนิดฉนวนครอสลิงค์
โพลีโอเลฟิน เพื่อประยุกต์ใช้ในรถยนต์ไฟฟ้า

THE STUDY AND ANALYSIS OF CROSS-LINKED POLYOLEFIN CABLE
FOR ELECTRIC VEHICLES APPLICATION



จักรวาล สิงหสิวานนท์
JAKAWAN SINGHASIVANON

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2565

KMITL-2022-EN-D-018-073

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE STUDY AND ANALYSIS OF CROSS-LINKED POLYOLEFIN CABLE
FOR ELECTRIC VEHICLES APPLICATION



JAKAWAN SINGHASIVANON

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTORAL OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2022
KMITL-2022-EN-D-018-073

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2022

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติของสายไฟฟ้าชนิดฉนวนครอสลิงค์โพลีเอเลฟิน เพื่อประยุกต์ใช้ในรถยนต์ไฟฟ้า
นักศึกษา	นายจักรวาล สิงห์ควานนท์
รหัสประจำตัว	63601242
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2565
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.นิรุช จิรสวรรณกุล

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติของสายไฟฟ้าชนิดฉนวนครอสลิงค์โพลีเอเลฟิน (XLPO) เพื่อประยุกต์ใช้ในรถยนต์ไฟฟ้า งานวิจัยมีกรณีศึกษาดังนี้ ศึกษาคุณสมบัติผลตอบสนองของเนื้อฉนวนครอสลิงค์โพลีเอเลฟินและการดิสชาร์จบางส่วน, ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีของเนื้อฉนวนครอสลิงค์โพลีเอเลฟินด้วยวิธีการทดสอบ Scanning Electron Microscope (SEM), Fourier-transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) และ Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence (WD-XRF) เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของสายไฟฟ้าที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยกรรมวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ และศึกษาการประยุกต์ใช้สายไฟฟ้าชนิดฉนวนครอสลิงค์โพลีเอเลฟินในรถยนต์ไฟฟ้า สำหรับการศึกษาคูณสมบัติและผลตอบสนองของเนื้อฉนวนครอสลิงค์โพลีเอเลฟินและการดิสชาร์จบางส่วน ทดสอบโดยการวัดค่าความเป็นฉนวน, วัดค่าแรงดึงและการยึดตัวของฉนวน, วัดค่ากระแสความนำและกระแสโพลาร์ไซเซชันดีโพลาร์ไซเซชันที่อุณหภูมิและค่าสนามไฟฟ้าต่างๆ, วัดค่าดิสชาร์จบางส่วนที่อุณหภูมิและค่าความโค้งงอของสายไฟฟ้าต่างๆ ในส่วนของการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีของเนื้อฉนวนครอสลิงค์โพลีเอเลฟินด้วยวิธีการทดสอบ SEM, FT-IR และ WD-XRF เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของสายไฟฟ้าที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยกรรมวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ ทดสอบโดยศึกษาลักษณะพื้นผิวเนื้อฉนวน XLPO ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อการครอสลิงค์ 8% ที่ผ่านการเร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C, 110°C, 125°C เป็นระยะเวลา 24, 120, 240, 360 และ 480 ชั่วโมง ด้วย SEM, วัดค่าการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของเนื้อฉนวน XLPO ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อการครอสลิงค์ 8% ที่ผ่านการเร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C, 110°C, 125°C เป็นระยะเวลา 24, 120, 240, 360 และ 480 ชั่วโมง ด้วย FT-IR, วัดค่าการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของเนื้อฉนวน XLPO ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อการครอสลิงค์ 8% ที่ผ่านการเร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C, 110°C, 125°C เป็นระยะเวลา 24, 120, 240, 360 และ 480 ชั่วโมง ด้วย WD-XRF และวัดค่าแรงดันเบรกดาวน์ของเนื้อฉนวน

XLPO ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อการครอสลิงค์ 8% ที่ผ่านการเร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นใบเขียวระบุชื่อหน้าเอกสารนี้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตั้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

100°C, 110°C, 125°C เป็นระยะเวลา 24, 120, 240, 360 และ 480 ชั่วโมงตามลำดับ จากการศึกษาวิเคราะห์คุณสมบัติผลตอบสนองของเนื้อฉนวนครอสลิงค์โพลีเอเลฟินพบว่าฉนวน XLPO ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อการครอสลิงค์ 8% มีค่าความเป็นฉนวนและค่าคงทนต่อแรงดึงมากที่สุด ซึ่งสายไฟฟ้าที่นำมาประยุกต์ใช้ในรถยนต์ไฟฟ้าพบว่า ในส่วนของผลตอบสนองไดอิเล็กตริกที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าที่ค่าสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้เกิดการโพลาริซชันของเนื้อฉนวนมากขึ้นและทำให้กระแสความนำเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ การดิสชาร์จบางส่วนที่อุณหภูมิและค่าความเค้นงอของสายไฟฟ้าต่างๆพบว่า ขนาดของการดิสชาร์จและรูปแบบการเกิดซ้ำเพิ่มสูงขึ้นเมื่อทำการโค้งงอสายไฟฟ้ามากขึ้น ในการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีของฉนวน XLPO ที่อุณหภูมิและระยะเวลาในการเร่งอายุขัยเนื้อฉนวนต่างๆ ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อการครอสลิงค์ 8% ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ที่แรงดันเบรกดาวนพบว่าอุณหภูมิและระยะเวลาในการเร่งอายุเนื้อฉนวนมากขึ้นทำให้แรงดันเบรกดาวนลดลง 3.54 - 8.58% เมื่อนำสายไฟฟ้าฉนวน XLPO ที่ไม่มีซิลล์และมีซิลล์ที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นเพื่อประยุกต์ใช้ในรถยนต์ไฟฟ้าโดยเป็นสายส่งกำลังจากอินเวอร์เตอร์ไปยังมอเตอร์พบว่าประสิทธิภาพการซิลล์เพิ่มมากขึ้นที่ความถี่สูงขึ้นและทรานเฟอร์อิมพีแดนซ์ลดลง 11.5% - 15.25% ที่ความถี่ตั้งแต่ 200Hz ขึ้นไป เมื่อเปรียบเทียบกับสายไฟฟ้าที่ไม่มีซิลล์ จากการศึกษาพบว่าเทคนิคต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์เนื้อฉนวนดังที่ได้กล่าวไปนั้น สามารถใช้ในการวิเคราะห์และประเมินสภาพของเนื้อฉนวนได้จริง อีกทั้งยังสามารถเป็นแนวทางนำไปประยุกต์ใช้กับรถยนต์ไฟฟ้าเพื่อต่อยอดทางอุตสาหกรรมในอนาคตต่อไปได้ และผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะในการต่อยอดงานวิจัยด้วยการปรับเปลี่ยนองค์ประกอบของธาตุและสารประกอบทางเคมีในสารเร่งปฏิกิริยาทางเคมี เพื่อให้สามารถผลิตสายไฟฟ้าที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาในอัตราส่วนที่สูงกว่า 8% ได้ และเพิ่มความหนาชั้นผิวดีบุกที่เคลือบลวดตัวนำทองแดง เพื่อให้ทนต่อสภาวะแวดล้อมและลดผลของสัญญาณรบกวนได้ดียิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ II อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	The Study and Analysis of Cross-linked Polyolefin Cable for Electric Vehicles Application
Student	Mr. Jakawan Singhasivanon
Student ID.	63601242
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2022
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Nirudh Jirasuwankul

ABSTRACT

This dissertation proposes the study and analysis of cross-linked polyolefin cable (XLPO cable) for electric vehicles application. The research consists of 3 parts. First, studying the physical properties, dielectric response, and partial discharge of XLPO cables. Second, studying the changing of surfaces, chemicals, and molecular anatomy of XLPO cables by using Scanning Electron Microscope-SEM, Fourier-transform Infrared Spectroscopy-FTIR and Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence-WDXRF. These will be compared with the electrical breakdown voltage of aging XLPO cables under an electric field and heat flux. Third, for application, XLPO cable with and without a shield in an electric car. In the case study of physical properties, dielectric response and partial discharge, researchers have tested as follows. Insulation resistance testing, tensile and elongation measurement, polarization and depolarization measurement under an electric field and temperature variation, partial discharge of XLPO cable in different types of bending radii under temperature variations and heat flux. In the case study of changing surfaces, chemicals, and molecular anatomy of XLPO cables by using SEM, FT-IR and WD-XRF methods for comparison with the electrical breakdown voltage of aging XLPO cables under temperature variation and heat flux. Testing the surface anatomy of an XLPO with 8% catalyst insulator by using SEM at the condition as follows. Aging the insulator at 100 °C, 110 °C, 125 °C for 120hrs, 240hrs, 360hrs and 480hrs respectively. Chemical changing measurement of 8% catalyst XLPO cable by using FT-IR and WD-XRF method in the same conditions.

In case of an application, Experiment results show that an XLPO insulation cable with 8% catalyst have the best physical properties. Dielectric response's results show that higher electric field and temperatures can cause the conductivity current and

polarization current to increase. Partial discharge inception voltage and magnitude are related to temperature and the bending radii. The results of FT-IR and WD-XRF have no significant difference. A long aging timing and high temperature decreased breakdown voltage 3.54-8.58%. The application results from installation of the XLPO cable between a high-power train system and inverter. The results indicate that the cable operates properly in the frequency above 200 Hz, transfer impedance decreasing between 11.5% to 15.25%, induces the SE and reduces the current ripple in the higher frequency range with unshielded cable compared. This dissertation reveals that the techniques used in the analysis of insulators that have been presented previously, can be used to analyze, and evaluate the actual insulating material condition. It can also be applied to electric vehicles for further industrialization in the future. Researchers have suggestions for further research by modification the composition of chemical elements and chemical compounds in chemical catalysts. To be able to produce Electrical cables containing catalysts at a ratio higher than 8%. Moreover, Increasing the thickness of Tin-coated annealed copper conductor for better environment resistance and reduce the effect of noise.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจาก ผศ.ดร.นิรุจ จิรสวรรณกุล อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา คำชี้แนะแนวทางการแก้ปัญหา ตลอดจนให้ความรู้ และประสบการณ์ต่างๆที่ดีแก่ข้าพเจ้าเสมอมา จนวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณ คุณภาณุพงศ์ สิงห์ศิวานนท์ และคุณปาริชาติ สิงห์ศิวานนท์ บิดามารดาและ ครอบครัว ที่เป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

ขอขอบคุณ ดร.ประพิณ อภินรเศรษฐ์ กรรมการผู้จัดการ บริษัทยาวาต้า (ประเทศไทย) จำกัด และบริษัท ไทรแค็บ (ประเทศไทย) จำกัด, คุณสุมนา อภินรเศรษฐ์ ประธานที่ปรึกษา บริษัทยาวาต้า (ประเทศไทย) จำกัด และบริษัท ไทรแค็บ (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้การสนับสนุนเอื้อเฟื้อตัวอย่าง สายไฟฟ้าและเครื่องมือวิเคราะห์ในการทดสอบ

ขอขอบคุณ ทพญ.กมลวรรณ สิงห์ศิวานนท์ ภรรยาที่คอยเป็นกำลังใจ รวมไปถึงให้ความช่วยเหลือในการจัดทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอขอบคุณ คุณฉลวย ศิริบาล, คุณสุจินต์ ศิริบาล, คุณปณิดา ศิริบาล คุณตาคุณยายและคุณ น้าที่ให้คำแนะนำในการแบ่งเวลาใช้ชีวิตและเวลาวิจัยเสมอมา

ขอขอบคุณ คุณศักดา วิริยะภาพ ผู้จัดการฝ่ายวางแผนการผลิต บริษัทยาวาต้า (ประเทศไทย) จำกัด, คุณวิศณุกร ชุ่มเย็น ผู้ช่วยผู้จัดการฝ่ายวางแผนการผลิต สำหรับการสนับสนุนและคำแนะนำใน ด้านต่างๆ

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้แก่บิดามารดา และครอบครัว ซึ่งเป็นที่รักเคารพยิ่ง ตลอดจนจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา ความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

จักรวาล สิงห์ศิวานนท์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 สายไฟฟ้า.....	6
2.1.1 โครงสร้างพื้นฐานของสายไฟฟ้า.....	6
2.1.2 พอลิเมอร์ในวัสดุฉนวนสายไฟฟ้า.....	28
2.2 กัล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	29
2.3 เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี.....	30
2.4 เครื่องเอ็กซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ แบบกระจายความยาวคลื่น.....	31
2.5 การดิสซาร์จบางส่วน.....	32
2.6 การโพลาริเซชันในเนื้อฉนวน.....	32
2.7 พารามิเตอร์ในฉนวนไฟฟ้า.....	33
2.8 การผลิตสายฟ้า.....	34
2.9 การตรวจสอบคุณภาพสายไฟฟ้า.....	40
2.10 สายไฟฟ้าชนิดพิเศษ.....	47
2.11 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าและการป้องกัน.....	52
2.12 ยานยนต์ไฟฟ้า.....	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VI อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การทดสอบ.....	59
3.1 การศึกษาคุณสมบัติผลตอบสนองของเนื้อฉนวนครอสลิงค์โพลีเอเลฟิน และการดิสชาร์จบางส่วน.....	59
3.1.1 การทดสอบค่าความเป็นฉนวน.....	59
3.1.2 การทดสอบค่าแรงดึงและการยืดตัวของฉนวน.....	61
3.1.3 การทดสอบค่ากระแสความนำและกระแสโพลาริเซชันโพลาริเซชัน ที่อุณหภูมิและค่าสนามไฟฟ้าต่างๆ.....	64
3.1.4 การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนที่อุณหภูมิและค่าความโค้งงอ ของสายไฟฟ้าต่างๆ.....	66
3.2 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีของเนื้อฉนวนครอสลิงค์โพลีเอเลฟิน ด้วยวิธีการทดสอบ Scanning Electron Microscope-SEM, Fourier-transform Infrared Spectroscopy-FTIR และ Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence-WDXRF เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของสายไฟฟ้าที่มีการเสื่อมสภาพจาก ความร้อน ด้วยกรรมวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ.....	70
3.2.1 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของเนื้อฉนวนครอสลิงค์ โพลีเอเลฟินด้วย Scanning Electron Microscope-SEM.....	70
3.2.2 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของเนื้อฉนวนครอสลิงค์โพลีเอเลฟินด้วย Fourier-transform Infrared Spectroscopy-FTIR.....	74
3.2.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของเนื้อฉนวนครอสลิงค์โพลีเอเลฟินด้วย Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence (WD-XRF).....	76
3.2.4 การศึกษาแรงดันเบรกดาวน์ของเนื้อฉนวนครอสลิงค์โพลีเอเลฟิน.....	78
3.3 การประยุกต์ใช้สายไฟฟ้าชนิดฉนวนครอสลิงค์โพลีเอเลฟินในรถยนต์ไฟฟ้า.....	81
บทที่ 4 ผลการทดสอบ.....	84
4.1 ผลการทดสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติ, ผลการตอบสนองของเนื้อฉนวนครอสลิงค์ โพลีเอเลฟินและการดิสชาร์จบางส่วน.....	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีของเนื้อฉนวนครอสลิงค์ โพลีเอเลฟินด้วยวิธีการทดสอบ Scanning Electron Microscope-SEM, Fourier transform Infrared Spectroscopy-FTIR และ Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence-WDXRF เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบแรงดันเบรกดาวนซ์ของ สายไฟฟ้าที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยกรรมวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิ ต่างๆ.....	94
4.3 ผลการทดสอบการประยุกต์ใช้สายไฟฟ้าชนิดฉนวนครอสลิงค์โพลีเอเลฟินในรถยนต์ ไฟฟ้า.....	174
บทที่ 5 วิเคราะห์และสรุปผลการศึกษา.....	179
เอกสารอ้างอิง.....	183
ภาคผนวก.....	192
ภาคผนวก ก ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	193
ภาคผนวก ข PDC Specifications.....	213
ภาคผนวก ค FE-SEM Specifications.....	215
ภาคผนวก ง FT-IR Specifications.....	220
ภาคผนวก จ Insulation and Voltage Tester Specifications.....	223
ประวัติผู้เขียน.....	226

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VIII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 1 พื้นที่หน้าตัดและค่าความเค้นแรงดึงของตัวนำไฟฟ้าชนิดอลูมิเนียมเส้นเดี่ยว.....	7
ตารางที่ 2 พื้นที่หน้าตัดและค่าความเค้นแรงดึงของตัวนำไฟฟ้าชนิดอลูมิเนียมแบบตีเกลียว.....	8
ตารางที่ 3 พื้นที่หน้าตัดตัวนำไฟฟ้า, ค่าความต้านทานทองแดงและอลูมิเนียม Class 1.....	8
ตารางที่ 4 พื้นที่หน้าตัดตัวนำไฟฟ้า, ค่าความต้านทานทองแดงและอลูมิเนียม Class 2.....	9
ตารางที่ 5 พื้นที่หน้าตัดตัวนำไฟฟ้า, เส้นผ่านศูนย์กลาง, ค่าความต้านทานที่ 20°C Class 5.....	10
ตารางที่ 6 พื้นที่หน้าตัดตัวนำไฟฟ้า, เส้นผ่านศูนย์กลาง, ค่าความต้านทานที่ 20°C Class 6.....	11
ตารางที่ 7 ตัวประกอบปรับแก้ทุกชนิดตัวนำ ที่ค่าความต้านทานกระแสตรงที่อุณหภูมิ 20°C.....	12
ตารางที่ 8 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตัวนำทองแดงเส้นเดี่ยวไม่ตีเกลียว และ ตัวนำไฟฟ้า Flexible....	13
ตารางที่ 9 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำสุดและสูงที่สุดของตัวนำทองแดง, อลูมิเนียม Class 2.....	14
ตารางที่ 10 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำสุดและสูงที่สุดของตัวนำทองแดง, อลูมิเนียม Class 1.....	15
ตารางที่ 11 ประเภทวัสดุและชนิดของสารประกอบ.....	16
ตารางที่ 12 ชนิดของสารประกอบฉนวนแบบเชื่อมขวางอุณหภูมิการใช้งานปกติ และ อุณหภูมิลัดวงจรของชนิดสารประกอบฉนวน.....	18
ตารางที่ 13 ข้อกำหนดในการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนชนิดต่างๆ.....	19
ตารางที่ 14 ข้อกำหนดในการทดสอบคุณสมบัติทางกลของฉนวนชนิดเชื่อมขวาง.....	19
ตารางที่ 15 ชนิดของเปลือกนอกชนิดเชื่อมขวางและชนิดของสารประกอบ.....	22
ตารางที่ 16 ข้อกำหนดในการทดสอบคุณสมบัติทางกลของเปลือกนอกชนิดเชื่อมขวาง.....	23
ตารางที่ 17 ชนิดของเปลือกนอกเทอร์โมพลาสติก.....	25
ตารางที่ 18 ข้อกำหนดในการทดสอบคุณสมบัติทางกลของเปลือกนอกชนิดเทอร์โมพลาสติก.....	26
ตารางที่ 19 ความหนาของฉนวนไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC 60092-353:2016.....	27
ตารางที่ 20 ระดับพิภักต์แรงดันสายไฟฟ้าในการทดสอบ.....	40
ตารางที่ 21 ผลการทดสอบค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้าอัตราส่วนผสมตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อการครอสลิงค์ 3% 5% 8%.....	84
ตารางที่ 22 ผลการทดสอบค่าแรงดึงและการยืดหดตัวของเนื้อฉนวน อัตราส่วนผสมตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อการครอสลิงค์ 3% 5% 8%.....	86
ตารางที่ 23 ค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่ 50Hz ค่าสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิต่างๆ.....	91
ตารางที่ 24 ค่าพลังงานการกระตุ้นของฉนวน XLPO ที่สนามไฟฟ้าค่าต่างๆ.....	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ IX อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 1 Zeiss Auriga Scanning Electron Microscope (FE-SEM).....	30
รูปที่ 2 เครื่องมือวิเคราะห์ Fourier Transform Spectroscopy (FT-IR).....	31
รูปที่ 3 เครื่องมือทดสอบ Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence-WDXRF.....	31
รูปที่ 4 ฉนวน XLPO ที่ไม่เกิดการปลดปล่อยก๊าซในกลุ่ม Halogen เมื่อเกิดการเผาไหม้.....	36
รูปที่ 5 การร้อยสายตัวนำไฟฟ้าเข้าไปในชุดล้อรีดและชุดลูกรีด.....	36
รูปที่ 6 การรีดลดขนาดตัวนำไฟฟ้าทองแดง 0.3 มม. เป็น 0.15 มม.....	37
รูปที่ 7 การนำตัวนำไฟฟ้าทองแดงขึ้นเตรียมสำหรับการตีเกลียวรวมกลุ่ม.....	37
รูปที่ 8 การตีเกลียวรวมกลุ่มสายไฟฟ้าเพื่อให้ได้ขนาดพื้นที่หน้าตัดตามที่ต้องการ.....	38
รูปที่ 9 การนำตัวนำไฟฟ้าทองแดงหุ้มด้วยฉนวนไฟฟ้าชนิด XLPO.....	38
รูปที่ 10 การถักหุ้มสายไฟฟ้าด้วยตัวนำไฟฟ้าทองแดง, ทองแดงชุบตีบุขนาดพื้นที่หน้าตัด เส้นลวดตัวนำ 0.15 มม.....	39
รูปที่ 11 การหุ้มเปลือกนอกของสายไฟฟ้า.....	39
รูปที่ 12 การพิมพ์รายละเอียดและชนิดของสายไฟฟ้า.....	40
รูปที่ 13 การทดสอบ Routine Test High Voltage ตามมาตรฐาน IEC-60092-350:2014.....	41
รูปที่ 14 แสดงถึงเครื่องมือการทดสอบ Spark Test ระหว่างกระบวนการผลิต.....	41
รูปที่ 15 ปรากฏการณ์ผลเนื่องจากความใกล้เคียง (Proximity Effect).....	43
รูปที่ 16 การทดสอบ D.C. Conductor Resistance.....	43
รูปที่ 17 การทดสอบ Cable Dimensional.....	44
รูปที่ 18 ตัวอย่างการทดสอบ Cable Dimension.....	44
รูปที่ 19 เครื่องมือการทดสอบ Tensile & Elongation Before and After aging.....	45
รูปที่ 20 ตู้อบอุณหภูมิสูงเพื่อทำการ Aging สายไฟฟ้า.....	46
รูปที่ 21 การทดสอบค่าความเป็นฉนวนของสายไฟฟ้า โดยเป็นไปตามมาตรฐาน IEC-60092-360.....	46
รูปที่ 22 การทดสอบการลามไฟ โดยเป็นไปตามข้อกำหนดของ IEC 60332-1-2.....	47
รูปที่ 23 สายไฟฟ้าชนิดทนไฟ (Fire Resistant Cable).....	48
รูปที่ 24 ลักษณะการใช้งานของสายไฟฟ้าทนไฟ (Fire Resistant Cable).....	49
รูปที่ 25 สายไฟฟ้าชนิดงานใต้น้ำ (Submersible Cable).....	49
รูปที่ 26 ลักษณะการใช้งานของสายไฟฟ้าชนิดงานใต้น้ำ (Submersible Cable).....	50
รูปที่ 27 สายไฟฟ้าชนิดงานในเหมืองแร่ (Mining Cable).....	50
รูปที่ 28 ลักษณะการใช้งานของสายไฟฟ้าชนิดงานในเหมือง (Mining Cable).....	51
รูปที่ 29 สายไฟฟ้าชนิดงานเรือและชายฝั่ง (Marine and Offshore Cable).....	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ X อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 30 ลักษณะการใช้งานของสายไฟฟ้าชนิดงานเรือและชายฝั่ง (Marine and Offshore Cable).....	52
รูปที่ 31 สเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า.....	52
รูปที่ 32 สัญลักษณ์ FCC Standards และ IEC Standards.....	54
รูปที่ 33 ระบบยานยนต์ไฟฟ้า	56
รูปที่ 34 Traction motor, Construction of Induction Motor and Permanent Magnet AC Motor ที่ใช้ในรถยนต์ของบริษัท GM	58
รูปที่ 35 แบบร่างรถยนต์ไฟฟ้าและตำแหน่งติดตั้งแบตเตอรี่ (3D model of Electric Vehicles and high voltage battery pack).....	58
รูปที่ 36 แบบเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน (Lithium-ion-batteries) ติดตั้งภายในรถยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicles).....	58
รูปที่ 37 ตัวนำไฟฟ้าทองแดงเส้นฝอยยอบอ่อน.....	59
รูปที่ 38 ตัวนำไฟฟ้าทองแดงเส้นฝอยยอบอ่อนตีเกลียวและวัสดุผลิตฉนวนสายไฟฟ้า.....	60
รูปที่ 39 ขั้นตอนการฉีดยุติสายไฟฟ้าและสายไฟฟ้าสำเร็จรูป.....	60
รูปที่ 40 การทดสอบวัดค่าความเป็นฉนวน.....	61
รูปที่ 41 ขนาดตัวอย่างทดสอบชนิด Dumb-bell สำหรับทดสอบ อ้างอิงจาก IEC 60811-501.....	62
รูปที่ 42 การเตรียมตัวอย่าง Dumb-bell สำหรับทดสอบ.....	62
รูปที่ 43 การทดสอบแรงดึงและการยืดหดตัวของฉนวน XLPO.....	62
รูปที่ 44 Hung TA Instrument Tensile Strength Tester.....	63
รูปที่ 45 แบบจำลองสายไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ.....	64
รูปที่ 46 ตัวอย่างสายไฟฟ้าทดสอบหุ้มด้วยอลูมิเนียมเทปเพื่อทำหน้าที่เป็นกราวด์ของระบบ.....	65
รูปที่ 47 วงจรการวัดกระแสความนำและกระแสโพลาริเซชันดีโพลาริเซชัน.....	65
รูปที่ 48 การวัดค่ากระแสความนำและกระแสโพลาริเซชันดีโพลาริเซชันที่อุณหภูมิและค่าความเข้มสนามไฟฟ้าต่างๆ.....	66
รูปที่ 49 แบบจำลองสายไฟฟ้าชนิดฉนวน XLPO ขนาดพื้นที่หน้าตัดตัวนำ 2.5 มม.....	67
รูปที่ 50 ตัวอย่างสายไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบค่าความโค้งงอที่ 50 มิลลิเมตร.....	67
รูปที่ 51 ตัวอย่างสายไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบค่าความโค้งงอที่ 5 มิลลิเมตร.....	67
รูปที่ 52 วงจรการวัดการดิสชาร์จบางส่วนของสายไฟฟ้า.....	68
รูปที่ 53 หม้อแปลงทดสอบสายไฟฟ้าขนาดพิกัดใช้งาน 30kVA.....	68
รูปที่ 54 การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนสายไฟฟ้าชนิดฉนวน XLPO.....	69
รูปที่ 55 ทำการ Aging เพื่อเตรียมตัวอย่างทดสอบ.....	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้เพื่อใช้ประกอบการเรียนการสอนเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ท่านไปใช้ประโยชน์ท่านควร

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ XI อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 56 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทำการ Aging ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นระยะเวลา 24, 120, 240, 360 และ 480 ชั่วโมงตามลำดับ.....	71
รูปที่ 57 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทำการ Aging ที่อุณหภูมิ 110°C เป็นระยะเวลา 24, 120, 240, 360 และ 480 ชั่วโมงตามลำดับ.....	71
รูปที่ 58 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทำการ Aging ที่อุณหภูมิ 125°C เป็นระยะเวลา 24, 120, 240, 360 และ 480 ชั่วโมงตามลำดับ.....	72
รูปที่ 59 Zeiss Auriga Scanning Electron Microscope (FE-SEM).....	72
รูปที่ 60 เครื่องมือวิเคราะห์ Fourier Transform Spectroscopy (FT-IR).....	74
รูปที่ 61 การเตรียมตัวอย่างฉนวน XLPO เพื่อทำการทดสอบ Wavelength Dispersive X-ray.....	76
รูปที่ 62 เครื่องมือทดสอบ Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence (WD-XRF).....	77
รูปที่ 63 สายไฟฟ้าชนิดฉนวน XLPO สำหรับทดสอบแรงดันเบรกดาวน์.....	79
รูปที่ 64 วงจรทดสอบระดับแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวน XLPO.....	79
รูปที่ 65 แบบจำลองการติดตั้งสายไฟฟ้าชนิดฉนวน XLPO ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีเพื่อการครอสลิงค์ 8% และขนาดตัวนำไฟฟ้าการถัก 0.15 มม.....	81
รูปที่ 66 Lithium-ion Battery pack from ADVISOR 456.5 Volt 130Ah 16 packs in series, PMSM, 37 kW by 3 in 1 BYD series	82
รูปที่ 67 เครื่องมือเพื่อศึกษาคุณสมบัติประสิทธิภาพของสายไฟฟ้า Digital Storage Oscilloscope GDS-1074B วัดผลการทดสอบที่ตำแหน่ง ตำแหน่งระบบต้นกำลัง และระบบอินเวอร์เตอร์ ด้วย EMI Near Field Probe.....	82
รูปที่ 68 รถยนต์ไฟฟ้าที่ติดตั้งสายไฟฟ้าชนิดฉนวน XLPO เสร็จสมบูรณ์.....	83
รูปที่ 69 กระแสโพลาร์ไรซ์เซชันและดีโพลาร์ไรซ์เซชัน ที่ $E_0 = 0.25$ kV/mm และอุณหภูมิต่างๆ.....	88
รูปที่ 70 กระแสโพลาร์ไรซ์เซชันและดีโพลาร์ไรซ์เซชัน ที่ $E_0 = 0.50$ kV/mm และอุณหภูมิต่างๆ.....	88
รูปที่ 71 กระแสโพลาร์ไรซ์เซชันและดีโพลาร์ไรซ์เซชัน ที่ $E_0 = 1.00$ kV/mm และอุณหภูมิต่างๆ.....	88
รูปที่ 72 ค่าความนำไฟฟ้ากระแสตรง ที่ $E_0 = 0.25$ kV/mm และอุณหภูมิค่าต่างๆ.....	89
รูปที่ 73 ค่าความนำไฟฟ้ากระแสตรง ที่ $E_0 = 0.50$ kV/mm และอุณหภูมิค่าต่างๆ.....	89
รูปที่ 74 ค่าความนำไฟฟ้ากระแสตรง ที่ $E_0 = 1.00$ kV/mm และอุณหภูมิค่าต่างๆ.....	89
รูปที่ 75 ค่าเปอร์มิตติวิตีฉนวน XLPO ที่ค่าสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิต่างๆ.....	90
รูปที่ 76 แพกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวน XLPO ที่ค่าสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิต่างๆ.....	90
รูปที่ 77 ค่าความนำไฟฟ้าด้วยการพลอตของสมการอาร์เรเนียสของฉนวน XLPO ที่ค่าสนามไฟฟ้า และอุณหภูมิต่างๆ.....	90

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 78 ค่าความนำไฟฟ้าของฉนวน XLPO ในฟังก์ชันของสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิต่างๆ.....	91
รูปที่ 79 แพกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวน XLPO ที่อุณหภูมิ 25°C, 50°C, 70°C.....	91
รูปที่ 80 ผลการทดสอบแรงดันเริ่มเกิดดิสชาร์จบางส่วนของตัวอย่าง R ₁ , R ₂ ที่ค่าความโค้งงอ 50, 5 มม. ตามลำดับ.....	92
รูปที่ 81 ผลการทดสอบแรงดันเริ่มเกิดดิสชาร์จบางส่วนและพลอตกราฟของตัวอย่าง R ₁ , R ₂ ที่ค่าความโค้งงอ 50, 5 มม. ตามลำดับ ภายใต้อุณหภูมิต่างๆ.....	92
รูปที่ 82 ผลการทดสอบขนาดและรูปแบบของการดิสชาร์จบางส่วน ที่อุณหภูมิต่างๆ ของตัวอย่าง R ₁ ที่ค่าความโค้งงอ 50 มม.....	93
รูปที่ 83 ผลการทดสอบขนาดและรูปแบบของการดิสชาร์จบางส่วน ที่อุณหภูมิต่างๆ ของตัวอย่าง R ₂ ที่ค่าความโค้งงอ 5 มม.....	93
รูปที่ 84 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่ยังไม่ได้เร่งอายุขัยฉนวน ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 50 เท่า.....	94
รูปที่ 85 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่ยังไม่ได้เร่งอายุขัยฉนวน ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 100 เท่า.....	95
รูปที่ 86 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่ยังไม่ได้เร่งอายุขัยฉนวน ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 300 เท่า.....	95
รูปที่ 87 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่ยังไม่ได้เร่งอายุขัยฉนวน ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 500 เท่า.....	96
รูปที่ 88 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่ยังไม่ได้เร่งอายุขัยฉนวน ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 1000 เท่า.....	96
รูปที่ 89 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 50 เท่า.....	97
รูปที่ 90 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 100 เท่า.....	97
รูปที่ 91 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 300 เท่า.....	98
รูปที่ 92 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 500 เท่า.....	98
รูปที่ 93 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 1000 เท่า.....	99

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 139 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 50 เท่า.....	122
รูปที่ 140 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 100 เท่า.....	122
รูปที่ 141 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 300 เท่า.....	123
รูปที่ 142 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 500 เท่า.....	123
รูปที่ 143 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 1000 เท่า.....	124
รูปที่ 144 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 50 เท่า.....	124
รูปที่ 145 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 100 เท่า.....	125
รูปที่ 146 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 300 เท่า.....	125
รูปที่ 147 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 500 เท่า.....	126
รูปที่ 148 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 1000 เท่า.....	126
รูปที่ 149 ผลการทดสอบทางเคมีของเนื้อฉนวน XLPO ที่ยังไม่เร่งอายุขัยฉนวน ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปฏิกิริยาเคมีสเปกโทรสโคปีแบบ FT-IR.....	127
รูปที่ 150 ผลการทดสอบทางเคมีของเนื้อฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปฏิกิริยาเคมีสเปกโทรสโคปีแบบ FT-IR.....	127
รูปที่ 151 ผลการทดสอบทางเคมีของเนื้อฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปฏิกิริยาเคมีสเปกโทรสโคปีแบบ FT-IR.....	128
รูปที่ 152 ผลการทดสอบทางเคมีของเนื้อฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปฏิกิริยาเคมีสเปกโทรสโคปีแบบ FT-IR.....	128
รูปที่ 153 ผลการทดสอบทางเคมีของเนื้อฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปฏิกิริยาเคมีสเปกโทรสโคปีแบบ FT-IR.....	129

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ XVII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 154 ผลการทดสอบทางเคมีของเนื้อฉนวน XLPO เร่งอายุชั้ยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปฏิกิริยาเคมีสเปกโตรสโคปีแบบ FT-IR.....	129
รูปที่ 155 ผลการทดสอบทางเคมีของเนื้อฉนวน XLPO เร่งอายุชั้ยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปฏิกิริยาเคมีสเปกโตรสโคปีแบบ FT-IR.....	130
รูปที่ 156 ผลการทดสอบทางเคมีของเนื้อฉนวน XLPO เร่งอายุชั้ยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปฏิกิริยาเคมีสเปกโตรสโคปีแบบ FT-IR.....	130
รูปที่ 157 ผลการทดสอบทางเคมีของเนื้อฉนวน XLPO เร่งอายุชั้ยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปฏิกิริยาเคมีสเปกโตรสโคปีแบบ FT-IR.....	131
รูปที่ 158 ผลการทดสอบทางเคมีของเนื้อฉนวน XLPO เร่งอายุชั้ยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปฏิกิริยาเคมีสเปกโตรสโคปีแบบ FT-IR.....	131
รูปที่ 159 ผลการทดสอบทางเคมีของเนื้อฉนวน XLPO เร่งอายุชั้ยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปฏิกิริยาเคมีสเปกโตรสโคปีแบบ FT-IR.....	132
รูปที่ 160 ผลการทดสอบทางเคมีของเนื้อฉนวน XLPO เร่งอายุชั้ยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปฏิกิริยาเคมีสเปกโตรสโคปีแบบ FT-IR.....	132
รูปที่ 161 ผลการทดสอบทางเคมีของเนื้อฉนวน XLPO เร่งอายุชั้ยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปฏิกิริยาเคมีสเปกโตรสโคปีแบบ FT-IR.....	133
รูปที่ 162 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์มวลสารของธาตุแต่ละชนิด ของฉนวน XLPO ที่ยังไม่ได้เร่งอายุชั้ยฉนวน ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรเมทรี WD-XRF.....	134
รูปที่ 163 ผลการทดสอบตำแหน่ง Peak ของแต่ละองค์ในธาตุแต่ละธาตุ ของฉนวน XLPO ที่ยังไม่ได้เร่งอายุชั้ยฉนวน ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรเมทรี WD-XRF.....	135
รูปที่ 164 ผลการทดลองเพื่อหาความเข้มข้นของธาตุแต่ละธาตุ ในฉนวน XLPO ที่ยังไม่ได้เร่งอายุชั้ยเนื้อฉนวนด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรเมทรี WD-XRF....	136
รูปที่ 165 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์มวลสารของธาตุแต่ละชนิด ของฉนวน XLPO เร่งอายุชั้ยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรเมทรี WD-XRF.....	137
รูปที่ 166 ผลการทดสอบตำแหน่ง Peak ของแต่ละองค์ในธาตุแต่ละธาตุ ของฉนวน XLPO เร่งอายุชั้ยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรเมทรี WD-XRF.....	138

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 167 ผลการทดลองเพื่อหาความเข้มข้นของแต่ละธาตุ ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF.....	139
รูปที่ 168 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์มวลสารของธาตุแต่ละชนิด ของฉนวน XLPO เร่ง อายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF.....	140
รูปที่ 169 ผลการทดสอบตำแหน่ง Peak ของแต่ละองค์ในในแต่ละธาตุ ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF.....	141
รูปที่ 170 ผลการทดลองเพื่อหาความเข้มข้นของแต่ละธาตุ ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF.....	142
รูปที่ 171 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์มวลสารของธาตุแต่ละชนิด ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF.....	143
รูปที่ 172 ผลการทดสอบตำแหน่ง Peak ของแต่ละองค์ในในแต่ละธาตุ ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF.....	144
รูปที่ 173 ผลการทดลองเพื่อหาความเข้มข้นของแต่ละธาตุ ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF.....	145
รูปที่ 174 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์มวลสารของธาตุแต่ละชนิด ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF.....	146
รูปที่ 175 ผลการทดสอบตำแหน่ง Peak ของแต่ละองค์ในในแต่ละธาตุ ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF.....	147
รูปที่ 176 ผลการทดลองเพื่อหาความเข้มข้นของแต่ละธาตุ ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF.....	148

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 177 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์มวลสารของธาตุแต่ละชนิด ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF.....	149
รูปที่ 178 ผลการทดสอบตำแหน่ง Peak ของแต่ละองค์ในแต่ละธาตุ ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF.....	150
รูปที่ 179 ผลการทดลองเพื่อหาความเข้มข้นของแต่ละธาตุ ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF.....	151
รูปที่ 180 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์มวลสารของธาตุแต่ละชนิด ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF.....	152
รูปที่ 181 ผลการทดสอบตำแหน่ง Peak ของแต่ละองค์ในแต่ละธาตุ ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF.....	153
รูปที่ 182 ผลการทดลองเพื่อหาความเข้มข้นของแต่ละธาตุ ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF.....	154
รูปที่ 183 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์มวลสารของธาตุแต่ละชนิด ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF.....	155
รูปที่ 184 ผลการทดสอบตำแหน่ง Peak ของแต่ละองค์ในแต่ละธาตุ ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF.....	156
รูปที่ 185 ผลการทดลองเพื่อหาความเข้มข้นของแต่ละธาตุ ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF.....	157
รูปที่ 186 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์มวลสารของธาตุแต่ละชนิด ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF.....	158

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ XX อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 187 ผลการทดสอบตำแหน่ง Peak ของแต่ละองค์ในแต่ละธาตุ ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรเมทรี WD-XRF.....	159
รูปที่ 188 ผลการทดลองเพื่อหาความเข้มข้นของแต่ละธาตุ ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรเมทรี WD-XRF.....	160
รูปที่ 189 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์มวลสารของธาตุแต่ละชนิด ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรเมทรี WD-XRF.....	161
รูปที่ 190 ผลการทดสอบตำแหน่ง Peak ของแต่ละองค์ในแต่ละธาตุ ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรเมทรี WD-XRF.....	162
รูปที่ 191 ผลการทดลองเพื่อหาความเข้มข้นของแต่ละธาตุ ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรเมทรี WD-XRF.....	163
รูปที่ 192 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์มวลสารของธาตุแต่ละชนิด ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรเมทรี WD-XRF.....	164
รูปที่ 193 ผลการทดสอบตำแหน่ง Peak ของแต่ละองค์ในแต่ละธาตุ ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรเมทรี WD-XRF.....	165
รูปที่ 194 ผลการทดลองเพื่อหาความเข้มข้นของแต่ละธาตุ ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรเมทรี WD-XRF.....	166
รูปที่ 195 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์มวลสารของธาตุแต่ละชนิด ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรเมทรี WD-XRF.....	167
รูปที่ 196 ผลการทดสอบตำแหน่ง Peak ของแต่ละองค์ในแต่ละธาตุ ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรเมทรี WD-XRF.....	168

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 197 ผลการทดลองเพื่อหาความเข้มข้นของแต่ละธาตุ ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF.....	169
รูปที่ 198 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์มวลสารของธาตุแต่ละชนิด ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF.....	170
รูปที่ 199 ผลการทดสอบตำแหน่ง Peak ของแต่ละองค์ในแต่ละธาตุ ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF.....	171
รูปที่ 200 ผลการทดลองเพื่อหาความเข้มข้นของแต่ละธาตุ ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF.....	172
รูปที่ 201 แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ สายไฟฟ้าฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยเนื้อฉนวน 120 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 100°C 110°C 125°C ตามลำดับ.....	173
รูปที่ 202 แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ สายไฟฟ้าฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยเนื้อฉนวน 240 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 100°C 110°C 125°C ตามลำดับ.....	173
รูปที่ 203 แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ สายไฟฟ้าฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยเนื้อฉนวน 360 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 100°C 110°C 125°C ตามลำดับ.....	173
รูปที่ 204 แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ สายไฟฟ้าฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยเนื้อฉนวน 480 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 100°C 110°C 125°C ตามลำดับ.....	174
รูปที่ 205 ค่าความต้านทานสายไฟฟ้าพิกัด 600/1000V ขนาดพื้นที่หน้าตัดตัวนำ 35mm ² , 50mm ² XLPO ที่ความถี่ 10Hz-1MHz.....	175
รูปที่ 206 ค่าความเหนี่ยวนำสายไฟฟ้าพิกัด 600/1000V ขนาดพื้นที่หน้าตัดตัวนำ 35mm ² , 50mm ² XLPO ที่ความถี่ 10Hz-1MHz.....	175
รูปที่ 207 Voltage ripple และ Current ripple ภายในเบตเตอร์รีกยนต์ขณะส่งพลังงานไฟฟ้าไปยังระบบส่งกำลัง.....	176
รูปที่ 208 ผลการทดสอบ FFT ของสายไฟฟ้าชนิด XLPO พิกัดแรงดัน 600/1000V พื้นที่หน้าตัดตัวนำ 35mm ² และ 50mm ² ที่ความถี่ 200Hz-10kHz.....	176
รูปที่ 209 ผลการทดสอบฮาร์โมนิก ของสายไฟฟ้าชนิด XLPO พิกัดแรงดัน 600/1000V พื้นที่หน้าตัดตัวนำ 35mm ² และ 50mm ² ที่ความถี่ 10Hz-10kHz.....	177

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 210 ผลการทดลองการชิลล์ค่ากระแสและค่ากระแสภายในตัวนำที่ไม่ได้ชิลล์ที่ความถี่ 20 Hz to 250 kHz ที่ติดตั้งระหว่างตัวส่งกำลังและอินเวอร์เตอร์ที่รอบความเร็วมอเตอร์ 9000rpm สายไฟฟ้า XLPO พิกัด 600/1000V ชนิดมีชิลล์ พื้นที่หน้าตัดตัวนำ 50mm ²	177
รูปที่ 211 ประสิทธิภาพการชิลล์ ของสายไฟฟ้าชนิด XLPO มีชิลล์ พิกัด 600/1000V พื้นที่หน้าตัดตัวนำ 50mm ² (สีน้ำเงิน) และ 35mm ² (สีแดง) สายไฟฟ้า XLPO ไม่มีชิลล์พิกัด 600/1000V พื้นที่หน้าตัดตัวนำ 35mm ² (สีดำ).....	178
รูปที่ 212 ผลการทดสอบ Transfer impedance ของสายไฟฟ้าชนิด XLPO มีชิลล์ พิกัด 600/1000V พื้นที่หน้าตัดตัวนำ 50mm ² (สีม่วง) ที่ทำการพัฒนาขนาดตัวนำทองแดงชุบดีบุกในการถักขนาด 0.15 มม กับสายไฟฟ้าชนิด X L P O มีชิลล์ พิกัด 6 0 0 / 1 0 0 0 V พื้นที่หน้าตัดตัวนำ 50mm ²	178

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการส่งถ่ายพลังงานไฟฟ้ามีความสำคัญและเป็นที่ต้องการเพิ่มมากขึ้น เพื่อตอบสนองต่อความต้องการพลังงานที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งด้านสาธารณสุขโรค, ด้านอุตสาหกรรมและด้านการคมนาคม การส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าผ่านสายไฟฟ้าเป็นวิธีหนึ่งที่สนองต่อความต้องการดังกล่าว ดังนั้นคุณภาพของสายไฟฟ้าที่ดีย่อมส่งผลดีต่อระบบส่งจ่ายพลังงาน, เสถียรภาพของระบบและความเชื่อมั่นที่ดีของผู้บริโภค ตัวแปรที่สามารถบ่งบอกได้ถึงคุณภาพของสายไฟฟ้าได้เป็นอย่างดีคือ ฉนวนของสายไฟฟ้า ฉนวนสายไฟฟ้าโดยทั่วไป ได้แก่ โพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC), ครอสลิงค์โพลีเอทิลีน (XLPE) และยางเอทิลีนพรอเพลีน (EPR) เป็นต้น ฉนวนของสายไฟฟ้าเหล่านี้ มีขีดความสามารถและการใช้งานที่เฉพาะแตกต่างกันออกไป แต่ในปัจจุบันเริ่มมีการนำฉนวนสายไฟฟ้าชนิดครอสลิงค์โพลีเอทิลีน (XLPO) มาใช้กันอย่างแพร่หลายมากขึ้น เช่น ในส่วนของภาคอุตสาหกรรมการผลิต, ระบบรักษาความปลอดภัยอัคคีภัย, ระบบชุดเจาะน้ำมัน และในทางการทหาร เนื่องจากฉนวนไฟฟ้าชนิด XLPO มีคุณสมบัติเด่นคือทนต่ออุณหภูมิสูง, ทนต่อการกัดกร่อนในชั้นบรรยากาศและแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) อีกทั้งมีคุณสมบัติการปล่อยธาตุกลุ่มฮาโลเจนที่ต่ำเมื่อเกิดการเผาไหม้และมีคุณสมบัติหน่วงไฟเมื่อเกิดอัคคีภัย ทางผู้วิจัยจึงเลือกศึกษาฉนวนชนิด XLPO เป็นหัวข้อในงานวิจัย

นอกจากนี้ยานพาหนะที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปมีแนวโน้มลดลงและถูกแทนที่ด้วยยานยนต์ไฟฟ้า สายไฟฟ้าในระบบยานยนต์ไฟฟ้าจึงมีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งในการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าให้ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพจากแบตเตอรี่ไปสู่ระบบควบคุมและไปยังระบบขับเคลื่อนโดยมีสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากภายในละภายนอกยานยนต์น้อยที่สุด โดยทั่วไปชนิดของสายไฟฟ้าที่ใช้ในรถยนต์ไฟฟ้า ได้แก่ โพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC) ซึ่งมีคุณสมบัติความยืดหยุ่น แต่ทนต่ออุณหภูมิการใช้งานต่ำและไม่มีคุณสมบัติหน่วงไฟเมื่อเกิดอัคคีภัย

ดังนั้นการเลือกใช้วัสดุฉนวนภายในรถยนต์ไฟฟ้าควรต้องคำนึงถึงความปลอดภัยและคุณสมบัติของฉนวนที่ดี ซึ่งฉนวนไฟฟ้าชนิด XLPO เป็นอีกตัวเลือกหนึ่งสำหรับการนำมาใช้ในระบบยานยนต์ไฟฟ้า

วิธีการทดสอบคุณสมบัติของฉนวนสายไฟฟ้าสามารถทดสอบได้หลากหลายวิธี ได้แก่ การทดสอบทางกายภาพ เช่น Scanning Electron Microscope (FE-SEM), Tensile Testing Machine การทดสอบสเปกตรัมทางเคมี เช่น Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR), Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence (WD-XRF) การทดสอบทางไฟฟ้าเช่น Insulation Resistance, Highvoltage Testing, Insulation and Voltage Tester (IR), PDC Analyzer, Partial Discharge

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Testing และเพื่อเป็นการลดสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าจะมีการทดสอบเพื่อหาค่า Shielding Effectiveness ที่ดีที่สุดเป็นต้น

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นเพื่อศึกษาวิเคราะห์และปรับปรุงประสิทธิภาพโดยการปรับเปลี่ยน Catalyst และผลิตเส้นลวดทองแดงบออ่อนชุบตีบุกขนาด 0.15 มม. ถักหุ้มสายไฟฟ้าเพื่อลดผลของสัญญาณรบกวนในระบบไฟฟ้าเพื่อประยุกต์ใช้ในรถยนต์ไฟฟ้า โดยศึกษาผลของการทดสอบสายไฟฟ้า ฉนวน XLPO ในสภาวะต่างๆ เช่น สภาวะปกติ, สภาวะที่เกิดการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ พร้อมทั้งวิธีการทดสอบด้วยเครื่อง Insulation and Voltage Tester (IR), Tensile Testing Machine, PDC Analyzer, Partial Discharge Testing, Scanning Electron Microscope (FE-SEM), Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR), Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence (WD-XRF)

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสายไฟฟ้า
2. เพื่อศึกษาทฤษฎีการโพลาริเซชัน, การดิสชาร์จบางส่วน, ลักษณะทางพื้นผิว, โครงสร้าง และองค์ประกอบทางโมเลกุล สำหรับใช้ในการวิเคราะห์ผลของฉนวนสายไฟฟ้าชนิดครอสลิงค์โพลีเอเลฟิน เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริง
3. หาแนวทางการปรับปรุงและเพิ่มประสิทธิภาพของสายไฟฟ้าเพื่อประยุกต์ใช้ในรถยนต์ไฟฟ้า
4. โดยการมุ่งเน้นปรับเปลี่ยน Catalyst และผลิตเส้นลวดทองแดงบออ่อนชุบตีบุกขนาด 0.15 มม. ถักหุ้มสายไฟฟ้าเพื่อลดผลของสัญญาณรบกวนในระบบรถยนต์ไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์เนื้อฉนวนสายไฟฟ้าชนิดครอสลิงค์โพลีเอเลฟิน (XLPO) เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ, คุณสมบัติทางไฟฟ้า, คุณสมบัติทางเคมีของฉนวนสายไฟฟ้า และศึกษาสายไฟฟ้าที่ผ่านกระบวนการเร่งอายุขัยของเนื้อฉนวน ด้วยวิธีวิเคราะห์ Insulation and Voltage Tester (IR), Tensile Testing Machine, PDC Analyzer, Partial Discharge Testing, Scanning Electron Microscope (FE-SEM), Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR), Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence (WD-XRF) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการทดสอบที่กล่าวข้างต้นเปรียบเทียบกับค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ในฉนวน XLPO ของสายไฟฟ้า หาแนวทางการปรับปรุงและเพิ่มประสิทธิภาพของสายไฟฟ้าเพื่อประยุกต์ใช้ในรถยนต์ไฟฟ้า

โดยการมุ่งเน้นปรับเปลี่ยน Catalyst และผลิตเส้นลวดทองแดงบอบอ่อนชุบตีบุกขนาด 0.15 มม. ถักหุ้มสายไฟฟ้าเพื่อลดผลของสัญญาณรบกวนในระบบรถยนต์ไฟฟ้า งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 กรณีศึกษาคือ 1. ศึกษาคุณสมบัติผลตอบสนองของเนื้อฉนวนครอสลิงค์โพลีโอเลฟินและการดิสชาร์จบางส่วน 2. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีของเนื้อฉนวนครอสลิงค์โพลีโอเลฟินด้วยวิธีการทดสอบ Scanning Electron Microscope-SEM, Fourier-transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) และ Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence (WD-XRF) เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของสายไฟฟ้าที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยกรรมวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ 3. การประยุกต์ใช้สายไฟฟ้าชนิดฉนวนครอสลิงค์โพลีในรถยนต์ไฟฟ้า

1.4 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ปี พ.ศ. 2559 มีการนำเสนอผลงานเรื่อง “Effects of the Structure and Insulation Material of a Cable on the Ability of a Location Method by FDR” โดย Yoshimichi Ohki and Naoshi Hirai ใน IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 23, No. 1; February 2016. โดยได้นำเสนอผลกระทบที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างของเนื้อฉนวนไฟฟ้าในสายไฟฟ้าชนิดพอลิไวนิลคลอไรด์และครอสลิงค์โพลีโอเลฟินด้วยวิธี FDR

ปี พ.ศ. 2563 มีการนำเสนอผลงานเรื่อง “Condition Assessment of XLPO Insulated Photovoltaic Cables Based on Polarisation/Depolarisation Current” โดย Ramy S. A. Afia, Ehtasham Mustafa, Zoltán Ádám Tamus ใน 2020 International Conference on Diagnostics in Electrical Engineering (Diagnostics), 1-4 September 2020. โดยได้นำเสนอเกี่ยวกับผลที่เกิดขึ้นของกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันในสายไฟฟ้าชนิดครอสลิงค์โพลีโอเลฟินเมื่อติดตั้งใช้งานที่อุณหภูมิต่างๆ

ปี พ.ศ. 2563 มีการนำเสนอผลงานเรื่อง “Effect of Thickness on the Space Charge Behavior and DC Breakdown Strength of Cross-Linked Polyethylene Insulation” โดย ZHIPENG MA, LIJUN YANG, MUHAMMAD SHOAB BHUTTA, HAORAN BIAN, MUHAMMAD ZEESHAN KHAN ใน IEEE Access, Volume 8, 27 April 2020 โดยได้นำเสนอผลของสนามไฟฟ้า, ประจุไฟฟ้าคงค้าง และการเบรกดาวน์ของสายไฟฟ้าชนิดครอสลิงค์พอลิเอทิลีนเมื่อเนื้อฉนวนทางไฟฟ้ามีความหนาที่แตกต่างกัน

ปี พ.ศ. 2564 มีการนำเสนอผลงานเรื่อง “The Preliminary Study of Partial Discharge Behavior of Cross-linked Polyolefin (XLPO) Unshielded Cable Insulation Under Temperature Variations” โดย Jakawan Singhasivanon, Nirudh Jirasuwankul ใน 2021 18th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 18 June 2021 โดยได้นำเสนอการศึกษาศึกษาการดิสซาร์จบางส่วนในสายไฟฟ้าชนิดครอสลิงค์โพลีโอเลฟินชนิดไม่มีซิลล์ ภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่างๆ

ปี พ.ศ. 2564 มีการนำเสนอผลงานเรื่อง “An Experimental Study on Dielectric Response of the Cross-linked Polyolefin (XLPO) Insulation of the Unshielded Cable Under Electric Field and Heat Flux” โดย Jakawan Singhasivanon, Nirudh Jirasuwankul ใน 2021 18th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 18 June 2021 โดยนำเสนอการศึกษาค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับไดอิเล็กตริกของสายไฟฟ้าชนิดฉนวนไฟฟ้าครอสลิงค์โพลีโอเลฟินภายในสนามไฟฟ้าและฟลักซ์ความร้อน

ปี พ.ศ. 2556 มีการนำเสนอผลงานเรื่อง “Investigation and Analysis of Electrical Aging of XLPE Insulation for Medium Voltage Covered Conductors Manufactured in Brazil” โดย Alan Melo Nóbrega, Manuel Luis Barreira Martinez Alvaro Antonio Alencar de Queiroz ใน IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Volume: 20, Issue: 2, April 2013. โดยได้นำเสนอการศึกษาศึกษาและวิเคราะห์ สายไฟฟ้าชนิดฉนวนครอสลิงค์พอลิโอเลฟินที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการต่างๆ เช่น FOURIER TRANSFORM INFRARED SPECTROSCOPY (FTIR), THERMOGRAVIMETRIC ANALYSIS (TGA), DIFFERENTIAL SCANNING CALORIMETRY (DSC), ELECTRON SPIN RESONANCE (ESR), CONTACT ANGLE MEASUREMENT, SCANNING ELECTRON MICROSCOPY (SEM)

ปี พ.ศ. 2564 มีการนำเสนอผลงานเรื่อง “Effects of Demand Fluctuation and Mitigation Strategy in Low Voltage EV Charging Station by Battery Energy Storage System” โดย Nirudh Jirasuwankul, Sakon Klongboonjit, Chalermchat Manop ใน International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.), Vol. 16, N. 5, September – October 2021. โดยได้นำเสนอผลกระทบที่เกิดขึ้นในระบบการชาร์จของยานยนต์ไฟฟ้าด้วย Battery Energy Storage System

ปี พ.ศ. 2563 มีการนำเสนอผลงานเรื่อง “Efficient Analytical Model for the Transfer Impedance and Admittance of Noncoaxial/Twinax Braided-Shielded Cables” โดย Oussama Gassab, Sara Bouguerra, Liang Zhou, Wen-Yan Yin ใน IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, April 2020. โดยนำเสนอเรื่องผลของ Transfer Impedance และ Admittance ของ Noncoaxial/Twinax Braided-Shielded Cables

ปี พ.ศ. 2564 มีการนำเสนอผลงานเรื่อง “Investigation on Current Ripple and Electromagnetic Interference in High Voltage Powertrain Systems for Electric Vehicles by Using Cross-linked Polyolefin Insulation Shielded Cable” โดย Jakawan

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเขียนเพื่อการศึกษาค้นคว้า เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Singhasivanon, Nirudh Jirasuwankul, Kunagone Kiddee ใน International Review of Electrical Engineering (IREE), Vol.17, No.3

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เกิดทักษะกระบวนการคิดวิเคราะห์แยกแยะและสังเคราะห์องค์ความรู้ความเข้าใจในโครงสร้างของสายไฟฟ้า อาทิ ชนิดลวดตัวนำไฟฟ้า, ชนิดฉนวนสายไฟฟ้า, ชนิดการฉีลต์ของสายไฟฟ้า, ชนิดเปลือกนอกของสายไฟฟ้า รวมไปถึงการคำนวณผลของกระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ ในแต่ละประเภทของการติดตั้ง
2. เกิดทักษะกระบวนการคิดวิเคราะห์แยกแยะและสังเคราะห์ในทฤษฎีของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน, การเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้า, ผลของกระแสโพลาริเซชัน-ดีโพลาริเซชันของสายฟ้า, การเบรกดาวน์ของฉนวนไฟฟ้า, การเปลี่ยนแปลงทางความเครียดของสนามไฟฟ้าในสายไฟฟ้าชนิดครอสลิงค์โพลีเอเลฟินชนิดมีซิลล์/ไม่มีซิลล์ ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของฉนวนสายไฟฟ้า
3. เกิดการสังเคราะห์วิธีการทดสอบและความรู้ใหม่ที่ได้จากผลการทดสอบ เพื่อเป็นแนวทางให้ผู้ที่สนใจในการศึกษาสายไฟฟ้าชนิดครอสลิงค์โพลีเอเลฟินต่อไป
4. สามารถนำองค์ความรู้ที่ได้จากการศึกษารวบรวมมาประยุกต์ใช้ได้จริงในระบบงานภาคอุตสาหกรรม เช่น ระบบยานยนต์ไฟฟ้า, ระบบพลังงานทางเลือก และระบบสื่อสารโทรคมนาคม
5. สามารถพัฒนาและปรับปรุงประสิทธิภาพการป้องกันสัญญาณรบกวนของสายไฟฟ้าชนิดครอสลิงค์โพลีเอเลฟินเมื่อนำไปประยุกต์ใช้ในระบบยานยนต์ไฟฟ้าได้จริง อีกทั้งยังสามารถเพิ่มเสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าได้อย่างยั่งยืน
6. เพื่อใช้เป็นต้นแบบของสายไฟฟ้าชนิดฉนวนครอสลิงค์โพลีเอเลฟินชนิดมีซิลล์/ไม่มีซิลล์ ในการพัฒนาต่อยอดผลิตภัณฑ์ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นต่อไปในอนาคต
7. เกิดองค์ความรู้ใหม่ที่เป็นประโยชน์ต่อนักวิจัยและผู้สนใจต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 สายไฟฟ้า

สายไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญอย่างยิ่งในการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งหนึ่งไปยังอีกแหล่งหนึ่งโดยกระแสไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ไหลผ่านตัวนำไปตามสายไฟฟ้าจนถึงบริเวณที่ไฟฟ้าต่างๆ โดยสายไฟฟ้ามีโครงสร้างที่สำคัญ 3 ส่วนหลัก ดังนี้

2.1.1 โครงสร้างพื้นฐานของสายไฟฟ้า

1. ตัวนำ (Conductor) เป็นวัสดุชนิดโลหะส่วนที่ทำหน้าที่ส่งผ่านกระแสไฟฟ้า ซึ่งมาตรฐานที่ใช้ในการผลิตลวดตัวนำไฟฟ้าคือ IEC 60228: Conductor of Insulated Cables โดยจะอธิบายถึงขนาดและประเภทของวัสดุตัวนำไฟฟ้า หน่วยที่ใช้คือ mm^2 , American Wire Gauge (AWG) และ kcmil

1.1 คำจำกัดความ

1.1.1 Metal-Coated คือการเคลือบพื้นผิวตัวนำด้วยวัสดุ เช่น ดีบุก (Tinned) หรือ อลลอย (Tinned-Alloy)

1.1.2 Nominal Cross-Sectional Area คือ ขนาดของพื้นที่หน้าตัดลวดตัวนำไฟฟ้า

1.2 การจำแนกประเภทของสายไฟฟ้า (Classification) ลวดตัวนำไฟฟ้าสามารถถูกจำแนกได้ดังนี้ Class 1, Class 2, Class 5, Class 6 โดย Class 1 และ Class 2 ใช้สำหรับลักษณะของงานประเภทติดตั้งอยู่กับที่ (Fixed Installation), Classes 5, 6 ใช้สำหรับลักษณะของงานประเภทที่มีการเคลื่อนย้าย (Movable)

1.2.1 Class 1 : Solid Conductors

1.2.2 Class 2 : Stranded Conductors

1.2.3 Class 5 : Flexible Conductors

1.2.4 Class 6 : Flexible Conductors ที่มีความยืดหยุ่นมากกว่า Class 5

1.3 วัสดุ (Materials)

1.3.1 ทองแดง หรือ ทองแดงอบอ่อนชุบดีบุก (Plain or Metal-Coated Annealed Copper)

1.3.2 อลูมิเนียม หรือ อลูมิเนียมอัลลอย (Aluminium or Aluminium alloy)

1.3.3 ตัวนำไฟฟ้าชนิดอลูมิเนียมเส้นเดี่ยว (Solid Aluminium Conductors) จะมีค่าความเค้นแรงดึงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงพื้นที่หน้าตัดตัวนำไฟฟ้า

และค่าความเค้นแรงดึงของตัวนำไฟฟ้าชนิดอลูมิเนียมเส้นเดี่ยว

พื้นที่หน้าตัดตัวนำไฟฟ้า (mm ²)	ค่าความเค้นแรงดึง (N/mm ²)
10 และ 16	110 ถึง 165
25 และ 35	60 ถึง 130
50	60 ถึง 110
ตั้งแต่ 70 ขึ้นไป	60 ถึง 90

1.3.4 ตัวนำไฟฟ้าชนิดอลูมิเนียมแบบตีเกลียว (Circular and Stranded Conductors) จะมีค่าความเค้นแรงดึงดังตารางที่ 2

1.3.5 ค่าความต้านทานตัวนำไฟฟ้า (Resistance of Conductor) ค่าความต้านทานของแต่ละชนิดตัวนำไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 20°C ดังตารางที่ 3-7,

1.3.6 ค่าความต้านทานตัวนำไฟฟ้ากระแสตรง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1

$$R_{20} = R_t * k_t * \frac{1000}{L} \quad (1)$$

เมื่อ k_t คือ ตัวประกอบปรับแก้อุณหภูมิ, ตารางที่ 7

R_{20} คือ ค่าความต้านทานตัวนำไฟฟ้ากระแสตรง ที่ 20°C, Ω/km

R_t คือ ค่าความต้านทานตัวนำไฟฟ้ากระแสตรงที่วัดได้, Ω

L คือ ความยาวของตัวนำไฟฟ้า, m

1.3.7 การคำนวณหาตัวประกอบปรับแก้ของตัวนำทองแดงอบอ่อนและทองแดงอบอ่อนชุบโลหะ, ตัวนำอลูมิเนียม สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2, 3 ตามลำดับ

$$k_{t,Cu} = \frac{254.5}{234.5+t} = \frac{1}{1+0.00393(t-20)} \quad (2)$$

$$k_{t,Al} = \frac{248}{228+t} = \frac{1}{1+0.00403(t-20)} \quad (3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 แสดงพื้นที่หน้าตัดตัวนำไฟฟ้า

และค่าความเค้นแรงดึงของตัวนำไฟฟ้าชนิดอลูมิเนียมแบบตีเกลียว

พื้นที่หน้าตัดตัวนำไฟฟ้า (mm ²)	ค่าความเค้นแรงดึง (N/mm ²)
10	ถึง 200
ตั้งแต่ 16 ขึ้นไป	125 ถึง 205

ตารางที่ 3 แสดงพื้นที่หน้าตัดตัวนำไฟฟ้า, ค่าความต้านทานตัวนำไฟฟ้าชนิดตัวนำทองแดงเส้น,

ตัวนำทองแดงอ่อน และตัวนำอลูมิเนียมและอลูมิเนียมอัลลอย Class 1

พื้นที่หน้าตัดตัวนำ ไฟฟ้า mm ²	ค่าความต้านทานสูงสุดของตัวนำไฟฟ้า ที่ 20°C		
	ตัวนำทองแดงเส้น, ตัวนำทองแดงอ่อน		ตัวนำอลูมิเนียม และ อลูมิเนียมอัลลอย Ω/km
	ไม่ชุบโลหะ Ω/km	ชุบโลหะ Ω/km	
0.5	36.0	36.7	-
0.75	24.5	24.8	-
1.0	18.1	18.2	-
1.5	12.1	12.2	-
2.5	7.41	7.56	-
4	4.61	4.70	-
6	3.08	3.11	-
10	1.83	1.84	3.08
16	1.15	1.16	1.91
25	0.727	-	1.20
35	0.524	-	0.868
50	0.387	-	0.641
70	0.268	-	0.443
95	0.193	-	0.320
120	0.153	-	0.253
150	0.124	-	0.206
185	0.101	-	0.164
240	0.0775	-	0.125
300	0.0620	-	0.100
400	0.0465	-	0.0778
500	-	-	0.0605

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4 แสดงพื้นที่หน้าตัดตัวนำไฟฟ้า, โครงสร้าง, ค่าความต้านทานของตัวนำไฟฟ้าชนิด
ทองแดงอ่อน, อลูมิเนียมและอลูมิเนียมอัลลอย Class 2

พื้นที่หน้าตัด ตัวนำไฟฟ้า mm ²	จำนวนเส้นตัวนำไฟฟ้าน้อยที่สุด						ค่าความต้านทานสูงสุดของตัวนำ ไฟฟ้าที่ 20°C		
	เส้นเดี่ยว		เส้นเดี่ยวตี เกลียว		รูปทรง		ตัวนำทองแดง อ่อน		ตัวนำ อลูมิเนียม หรือ อลูมิเนียมอัล ลอย Ω/km
	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al	ไม่ชุบ โลหะ Ω/km	ชุบ โลหะ Ω/km	
0.5	7	-	-	-	-	-	36	36.7	-
0.75	7	-	-	-	-	-	24.5	24.8	-
1.0	7	-	-	-	-	-	18.1	18.2	-
1.5	7	-	6	-	-	-	12.1	12.2	-
2.5	7	-	6	-	-	-	7.41	7.56	-
4	7	-	6	-	-	-	4.61	4.70	-
6	7	-	6	-	-	-	3.08	3.11	-
10	7	7	6	6	-	-	1.83	1.84	3.08
16	7	7	6	6	-	-	1.15	1.16	1.91
25	7	7	6	6	6	6	0.727	0.734	1.2
35	7	7	6	6	6	6	0.524	0.529	0.868
50	19	19	6	6	6	6	0.387	0.391	0.641
70	19	19	12	12	12	12	0.268	0.270	0.443
95	19	19	15	15	15	15	0.193	0.195	0.320
120	37	37	18	15	18	15	0.153	0.154	0.253
150	37	37	18	15	18	15	0.124	0.126	0.206
185	37	37	30	30	30	30	0.0991	0.100	0.164
240	37	37	34	30	34	30	0.0754	0.0762	0.125
300	61	61	34	30	34	30	0.0601	0.0607	0.100
400	61	61	53	53	53	53	0.0470	0.0475	0.0778
500	61	61	53	53	53	53	0.0366	0.0369	0.0605
630	91	91	53	53	53	53	0.0283	0.0286	0.0469

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5 แสดงพื้นที่หน้าตัดตัวนำไฟฟ้า, เส้นผ่านศูนย์กลางตัวนำไฟฟ้าสูงสุด และค่าความต้านทานสูงสุดของตัวนำไฟฟ้าที่ 20°C Class 5

พื้นที่หน้าตัดตัวนำ ไฟฟ้า	เส้นผ่านศูนย์กลาง ตัวนำไฟฟ้าสูงสุด	ค่าความต้านทานสูงสุดของตัวนำไฟฟ้าที่ 20°C	
		ไม่ชุบโลหะ	ชุบโลหะ
mm ²	mm	Ω/km	Ω/km
0.5	0.21	39.0	40.1
0.75	0.21	26.0	26.7
1.0	0.21	19.5	20.0
1.5	0.26	13.3	13.7
2.5	0.26	7.98	8.21
4	0.31	4.95	5.09
6	0.31	3.30	3.39
10	0.41	1.91	1.95
16	0.41	1.21	1.24
25	0.41	0.780	0.795
35	0.41	0.554	0.565
50	0.41	0.386	0.393
70	0.51	0.272	0.277
95	0.51	0.206	0.210
120	0.51	0.161	0.164
150	0.51	0.129	0.132
185	0.51	0.106	0.108
240	0.51	0.0801	0.0817
300	0.51	0.0641	0.0654
400	0.51	0.0486	0.0495
500	0.61	0.0384	0.0391
630	0.61	0.0287	0.0292

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6 แสดงขนาดพื้นที่หน้าตัดตัวนำไฟฟ้า, เส้นผ่านศูนย์กลางตัวนำไฟฟ้าสูงสุด, ค่าความต้านทานสูงสุดของตัวนำไฟฟ้า ที่ 20°C Class 6

พื้นที่หน้าตัดตัวนำ ไฟฟ้า	เส้นผ่านศูนย์กลาง ตัวนำไฟฟ้าสูงสุด	ค่าความต้านทานสูงสุดของตัวนำไฟฟ้าที่ 20°C	
		ไม่ชุบโลหะ	ชุบโลหะ
mm ²	mm	Ω/km	Ω/km
0.5	0.16	39.0	40.1
0.75	0.16	26.0	26.7
1.0	0.16	19.5	20.0
1.5	0.16	13.3	13.7
2.5	0.16	7.98	8.21
4	0.16	4.95	5.09
6	0.21	3.30	3.39
10	0.21	1.91	1.95
16	0.21	1.21	1.24
25	0.21	0.780	0.795
35	0.21	0.554	0.565
50	0.31	0.386	0.393
70	0.31	0.272	0.277
95	0.31	0.206	0.210
120	0.31	0.161	0.164
150	0.31	0.129	0.132
185	0.41	0.106	0.108
240	0.41	0.0801	0.0817
300	0.41	0.0641	0.0654

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7 แสดงตัวประกอบปรับแก้ทุกชนิดตัวนำ k_t

สำหรับค่าความต้านทานกระแสตรงที่อุณหภูมิ 20°C

อุณหภูมิตัวนำไฟฟ้า ณ เวลาที่วัด	ตัวประกอบปรับแก้ทุก ชนิดตัวนำ	อุณหภูมิตัวนำไฟฟ้า ณ เวลาที่วัด	ตัวประกอบปรับแก้ทุก ชนิดตัวนำ
t (°C)	k_t	t (°C)	k_t
0	1.087	21	0.996
1	1.082	22	0.992
2	1.078	23	0.988
3	1.073	24	0.984
4	1.068	25	0.980
5	1.064	26	0.977
6	1.059	27	0.973
7	1.055	28	0.969
8	1.050	29	0.965
9	1.046	30	0.962
10	1.042	31	0.958
11	1.037	32	0.954
12	1.033	33	0.951
13	1.029	34	0.947
14	1.025	35	0.943
15	1.020	36	0.940
16	1.016	37	0.946
17	1.012	38	0.933
18	1.008	39	0.929
19	1.004	40	0.926
20	1.000		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 8 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดของตัวนำไฟฟ้าชนิดทองแดงเส้นเดี่ยว, ตัวนำไฟฟ้าทองแดงไม่ตีเกลียว และตัวนำไฟฟ้า Flexible

พื้นที่หน้าตัดตัวนำ ไฟฟ้า mm ²	ตัวนำไฟฟ้าในสายไฟฟ้าสำหรับการติดตั้งอยู่กับที่		ตัวนำอ่อน (Class 5 and 6) mm
	เส้นเดี่ยว (Class 1) mm	ตีเกลียว (Class 2) mm	
0.5	0.9	1.1	1.1
0.75	1.0	1.2	1.3
1.0	1.2	1.4	1.5
1.5	1.5	1.7	1.8
2.5	1.9	2.2	2.4
4	2.4	2.7	3.0
6	2.9	3.3	3.9
10	3.7	4.2	5.1
16	4.6	5.3	6.3
25	5.7	6.6	7.8
35	6.7	7.9	9.2
50	7.8	9.1	11.0
70	9.4	11.0	13.1
95	11.0	12.9	15.1
120	12.4	14.5	17.0
150	13.8	16.2	19.0
185	15.4	18.0	21.0
240	17.6	20.6	24.0
300	19.8	23.1	27.0
400	22.2	26.1	31
500	-	29.2	0
630	-	33.2	35.0
800	-	37.6	39.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 9 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำสุดและสูงที่สุด

ของตัวนำไฟฟ้าชนิดทองแดงตีเกลียวอัดแน่น, อลูมิเนียมและอลูมิเนียมอัลลอย

พื้นที่หน้าตัดตัวนำไฟฟ้า mm ²	ตัวนำไฟฟ้าตีเกลียวอัดแน่น (Class 2)	
	เส้นผ่านศูนย์กลางต่ำสุด mm	เส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุด mm
10	3.6	4.0
16	4.6	5.2
25	5.6	6.5
35	6.6	7.5
50	7.7	8.6
70	9.3	10.2
95	11.0	12.0
120	12.3	13.5
150	13.7	15.0
185	15.3	16.8
240	17.6	19.2
300	19.7	21.6
400	22.3	24.6
500	25.3	27.6
630	28.7	32.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 10 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำสุดและสูงที่สุดของตัวนำไฟฟ้าชนิดทองแดงเส้นเดี่ยว, อลูมิเนียมและอลูมิเนียมอัลลอย

พื้นที่หน้าตัดตัวนำไฟฟ้า mm ²	ตัวนำไฟฟ้าเส้นเดี่ยว (Class 1)	
	เส้นผ่านศูนย์กลางต่ำสุด mm	เส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุด mm
10	3.4	3.7
16	4.1	4.6
25	5.2	5.7
35	6.1	6.7
50	7.2	7.8
70	8.7	9.4
95	10.3	11.0
120	11.6	12.4
150	12.9	13.8
185	14.5	15.4
240	16.7	17.6
300	18.8	19.8
400	21.2	22.2
500	24.0	25.1
630	27.3	28.4
800	30.9	32.1
1000	34.8	36.0
1200	37.8	39.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ฉนวน (Insulator) ทำหน้าที่ห่อหุ้มตัวนำไฟฟ้า เพื่อป้องกันไม่ให้ตัวนำไฟฟ้าสัมผัสกัน (ในกรณีเป็นสายไฟฟ้าหลายแกน) หรือเกิดการสัมผัสของตัวนำกับอุปกรณ์ที่ต่อลงกราวด์ ของเหลวหรือสารเคมีที่สามารถก่อปฏิกิริยากับตัวนำไฟฟ้าได้ โดยวัสดุที่นำมาใช้เพื่อห่อหุ้มสายไฟฟ้า สามารถแบ่งอย่างง่ายได้เป็น 3 ประเภทดังตารางที่ 11 วัสดุแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติทนต่ออุณหภูมิตัวนำไฟฟ้า และอุณหภูมิสภาพแวดล้อมได้สูง มีคุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนได้ดี และสามารถทนต่อแรงดึงและแรงขั้ดถูได้มาก

โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ฉนวนชนิด Cross-Linked Polyolefin (XLPO) ในการศึกษาคุณสมบัติของเนื้อฉนวน และเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60092-360 : Electrical installation in ships- Part 360 Insulating and sheathing materials for shipboard and offshore units, power, control, instrumentation and telecommunication cables

ตารางที่ 11 แสดงประเภทวัสดุและชนิดของสารประกอบ

ประเภทวัสดุ	ชนิดสารประกอบ
Cross-Linked insulation Compounds	EPR, HEPR, XLPE, S95, HF90
Cross-Linked sheathing Compounds	SE, SH, SHF2
Thermoplastic sheathing Compounds	SHF1, ST2

2.1 ชนิดของสารประกอบในเนื้อฉนวน

2.1.1 EPR – Ethylene-Propylene Rubber

มี Ethylene-Propylene เป็นสารประกอบแบบแบบเชื่อมขวาง, EPDM หรืออีลาสโตเมอร์สังเคราะห์ที่เป็นแบบเดียวกัน สามารถเทียบเท่ากับ EPR

2.1.2 HEPR – Hard Ethylene-Propylene Rubber

มี Ethylene-Propylene เป็นสารประกอบแบบเชื่อมขวางแบบแข็ง, EPDM หรืออีลาสโตเมอร์สังเคราะห์ที่เป็นแบบเดียวกัน สามารถเทียบเท่ากับ EPR

2.1.3 XLPE – Cross-Linked Polyethylene

มี Polyethylene เป็นสารประกอบพอลิเมอร์แบบเชื่อมขวาง ความหนาแน่นต่ำ, พอลิเมอร์สังเคราะห์ที่เป็นแบบเดียวกัน สามารถเทียบเท่าได้เป็น XLPE

2.1.4 HF 90 – Cross-linked Polyolefin Halogen-Free

มี Polyolefin เป็นสารประกอบพอลิเมอร์แบบเชื่อมขวาง, สารสังเคราะห์หรือพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติ Halogen-Free สามารถเทียบเท่ากับ HF 90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.5 S 95 – Cross-Linked Silicone Rubber

มี Polysiloxane Elastomer เป็นสารประกอบอีลาสโตเมอร์แบบเชื่อมขวาง, อีลาสโตเมอร์สังเคราะห์ที่เป็นแบบเดียวกันสามารถเทียบเท่าได้เป็น Cross-Linked Silicone Rubber

3. เปลือกนอก (Sheath/ Jacket) เปลือกนอกของสายไฟฟ้าทำหน้าที่หุ้มแกนหรือหุ้มสายไฟฟ้าชั้นนอกสุด จะต้องมีความสมบัติเด่นในด้านป้องกันตัวนำไฟฟ้าจากสภาวะแวดล้อมโดยรอบ เช่น สภาพดินฟ้าอากาศ ทนต่อการกัดกร่อนต่อสารเคมีได้ดี ปฏิกริยาทางเคมีในอากาศ โอโซน และ ทนความร้อนได้สูง, ถ่ายเทความร้อนได้ดี อีกทั้งทนแรงดึงและการขัดถูได้สูง เหนียวไม่เปื่อยง่าย เปลือกของสายไฟฟ้าอาจจะมี 1 หรือ 2 ชั้นก็ได้เพื่อป้องกันความเสียหายทางกายภาพที่อาจเกิดขึ้น ในขณะการติดตั้งหรือใช้งาน การเลือกใช้ชนิดของเปลือกสายไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมในการติดตั้งเป็นหลัก วัสดุที่นิยมทำเป็นเปลือกนอกของสายไฟฟ้ามากที่สุดคือ พอลิไวนิลคลอไรด์ และพอลิเอทิลีน ส่วนกรณีของสายไฟฟ้าที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษก็อาจใช้วัสดุชนิดอื่นตามแต่ความเหมาะสม เช่น ไนไตรล์ รีบเบอร์ และครอสลิงค์โพลีโอเลฟิน

โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้นวนชนิด Cross-Linked Polyolefin ในการศึกษา ซึ่งคุณสมบัติของเนื้อฉนวน เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60092-360 :Electrical installation in ships- Part 360 Insulating and sheathing materials for shipboard and offshore units, power, control, instrumentation and telecommunication cables

3.1 ชนิดของสารประกอบชั้นเปลือกนอก

3.1.1 SE – Polychloroprene Rubber

มี Polychloroprene (CPC) เป็นสารประกอบอีลาสโตเมอร์แบบเชื่อมขวาง, อีลาสโตเมอร์สังเคราะห์ที่เป็นแบบเดียวกันกับ (CPC) สามารถเทียบเท่าได้เป็น SE

3.1.2 SH - Chlorosulphonated Polyethylene Rubber, Chlorinated Polyethylene Rubber

มี Synthetic Chlorinated เป็นสารประกอบ Rubber แบบเชื่อมขวาง, Chlorosulphonated Polyethylene (CSP), Chlorinated Polyethylene (CPE) สามารถเทียบเท่าได้เป็น SE

3.1.3 SHF 2 – Halogen-Free Rubber

มี polyolefin เป็นสารประกอบพอลิเมอร์แบบเชื่อมขวาง, สารสังเคราะห์หรือพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติ Halogen-Free สามารถเทียบเท่าได้กับ SHF 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 SHF 1 – Halogen-Free Thermoplastic

มี Thermoplastic Polyolefin เป็นสารประกอบพอลิเมอร์, สารสังเคราะห์หรือพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติ Halogen-Free สามารถเทียบเท่าได้กับ SHF 1

3.1.5 ST 2 – Polyvinyl Chloride Thermoplastic

มี Polyvinyl Chloride เป็นสารประกอบพอลิเมอร์แบบพลาสติก

3.2 Halogen-Free

สารประกอบที่เป็นไปตามตารางที่ 4, 6 หรือ 8

3.3 Cross-Linked Insulating Compound

ชนิดของสารประกอบ Cross-Linked Insulating, อุณหภูมิการใช้งานและอุณหภูมิฉนวนของชนิดสารประกอบฉนวน แสดงดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 แสดงชนิดของสารประกอบ Cross-Linked Insulating, อุณหภูมิการใช้งานปกติ และอุณหภูมิฉนวนของชนิดสารประกอบฉนวน

สารประกอบ	อุณหภูมิสูงสุดของตัวนำไฟฟ้า °C		ชนิดของวัสดุฉนวน
	ใช้งานปกติ	ฉนวน	
EPR	90	250	Ethylene Propylene Rubber
HEPR	90	250	Hard Grade Ethylene Propylene Rubber
XLPE	90	250	Cross-Linked Polyethylene
HF 90	90	250	Cross-Linked Polyolefin Halogen-Free
S 95	95	350	Cross-Linked Silicone Rubber

3.4 ข้อกำหนดในการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนชนิดต่างๆ ดังตารางที่ 13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 13 ข้อกำหนดในการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนชนิดต่างๆ

สารประกอบชนิดฉนวน	EPR	HEPR	XLPE	HF 90	S 95
ค่าคงที่ค่าความต้านทานฉนวน K_i ($M\Omega \cdot km$)					
- 20°C, ต่ำที่สุด	3670	3670	3670	550	1850
- อุณหภูมิการใช้งานสูงสุด	3.67	3.67	3.67	0.55	1.85
สภาพต้านทานไฟฟ้า p ($\Omega \cdot cm$)					
- 20°C, ต่ำที่สุด	1.0×10^{15}	1.0×10^{15}	1.0×10^{15}	1.5×10^{14}	5.0×10^{13}
- อุณหภูมิการใช้งานสูงสุด	1.0×10^{12}	1.0×10^{12}	1.0×10^{12}	1.5×10^{11}	5.0×10^{10}
ค่าความจุไฟฟ้าหลังจากแช่น้ำที่อุณหภูมิ 50°C					
- ค่าสูงที่สุดระหว่างสิ้นวันที่ 1 st และ 14 th (%)	15	15	-	15	15
- ค่าสูงที่สุดระหว่างสิ้นวันที่ 7 st และ 14 th (%)	5	5	-	5	5

3.5 ข้อกำหนดในการทดสอบคุณสมบัติทางกลของฉนวนชนิดเชื่อมขวาง ดังตารางที่ 14

ตารางที่ 14 แสดงข้อกำหนดในการทดสอบคุณสมบัติทางกลของฉนวนชนิดเชื่อมขวาง

รายละเอียดการทดสอบ	หน่วย	วิธีการทดสอบ		ชนิดสารประกอบเนื้อฉนวน				
		มาตรฐาน	หัวข้อ	EPR	HEPR	XLPE	HF90	S95
คุณสมบัติทางกลที่ยอมรับได้		IEC 60811-501						
ค่าที่ยอมรับได้ของ								
- แรงดึงต่ำที่สุด	N/ mm ²			4.2	8.5	12.5	9.0	7.0
- ความยืดที่จุดขาดต่ำที่สุด	%			200	200	200	120	150

ตารางที่ 14 (ต่อ) แสดงข้อกำหนดในการทดสอบคุณสมบัติทางกลของฉนวนชนิดเชื่อมขวาง

รายละเอียดการทดสอบ	หน่วย	วิธีการทดสอบ		ชนิดสารประกอบเนื้อฉนวน				
		มาตรฐาน	หัวข้อ	EPR	HEPR	XLPE	HF90	S95
คุณสมบัติทางกลของฉนวนไฟฟ้าหลังจากแรงอายุขัยในเตาอบ		IEC 60811-401						
เงื่อนไขในการแรงอายุขัยเนื้อฉนวน: - อุณหภูมิ /ค่าความคาดเคลื่อน	°C			135+-3	135+-3	135+-3	135+-3	200+-3
ระยะเวลาการอบ	h			168	168	168	168	240
ค่าแรงดึงที่ยอมรับได้ ค่าต่ำที่สุด	N/mm ²			-	-	-	-	5.5
ค่าความยืดที่จุดขาด - ค่าต่ำที่สุด	N/mm ²			-	-	-	100	120
ค่าความคาดเคลื่อนสูงที่สุด	%			+30	+30	+25	+30	-
คุณสมบัติทางกลของฉนวนไฟฟ้าหลังจากแรงอายุขัยในเตาอบ โดยไม่นำตัวนำไฟฟ้าออก		IEC 60811-401						
การแรงอายุขัยเนื้อฉนวนไฟฟ้า - อุณหภูมิ /ค่าความคาดเคลื่อน	°C			135+-3	150+-3			
- ระยะเวลาการอบ	h			168	168			
- ค่าแรงดึงที่ยอมรับได้ ค่าความคลาดเคลื่อนสูงที่สุด	%			+30	+30	-		-

ตารางที่ 14 (ต่อ) แสดงข้อกำหนดในการทดสอบคุณสมบัติทางกลของฉนวนชนิดเชื่อมขวาง

รายละเอียดการทดสอบ	หน่วย	วิธีการทดสอบ		ชนิดสารประกอบเนื้อฉนวน				
		มาตรฐาน	หัวข้อ	EPR	HEPR	XLPE	HF90	S95
การทดสอบความต้านทานไอโซน (วิธี A หรือ B)		IEC 60811-403						
เงื่อนไขการทดสอบด้วยวิธี A								
- อุณหภูมิ	°C			25+2	25+2	-	25+2	-
- ระยะเวลา	h			30	30	-	30	-
- อัตราความเข้มข้นไอโซน	ppm			250-300	250-300	-	250-300	-
ผลการทดสอบที่ยอมรับได้				ไม่เกิดการแตกหัก	ไม่เกิดการแตกหัก	-	ไม่เกิดการแตกหัก	-
เงื่อนไขการทดสอบด้วยวิธี B								
- อุณหภูมิ	°C			40+2	40+2	-	40+2	-
- ระยะเวลา	h			72	72	-	72	-
- ค่าความเข้มข้นของไอโซน, (โดยปริมาตร)	%			[(200+50) × 10 ⁻⁶]	[(200+50) × 10 ⁻⁶]	-	[(200+50) × 10 ⁻⁶]	-
- ค่าความชื้นสัมพัทธ์	%			55+10	55+10	-	55+10	-
- ความเร็วลมมากที่สุด ณ ตำแหน่งชิ้นงานทดสอบ	mm/s			500	500	-	500	-
ผลการทดสอบที่ยอมรับได้				ไม่เกิดการแตกหัก	ไม่เกิดการแตกหัก	-	ไม่เกิดการแตกหัก	-

ตารางที่ 14 (ต่อ) แสดงข้อกำหนดในการทดสอบคุณสมบัติทางกลของฉนวนชนิดเชื่อมขวาง

รายละเอียดการทดสอบ	หน่วย	วิธีการทดสอบ		ชนิดสารประกอบเนื้อฉนวน				
		มาตรฐาน	หัวข้อ	EPR	HEPR	XLPE	HF90	S95
การประเมินฮาโลเจน								
ค่าความเป็นกรด-ด่าง	uS.mm ⁻¹	IEC 60754-2		>=4.3	>=4.3	>=4.3	>=4.3	>=4.3
ค่าความนำไฟฟ้า				<=10	<=10	<=10	<=10	<=10
จำนวนกรดกำซไฮโดรเจนทั้งหมด:								
- กรดไฮโดรคลอริก และ กรดไฮโดรโบรมิก (ค่าสูงที่สุด)	%	IEC 60754-1		0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
- ฮาโลเจนฟรี (ค่าสูงที่สุด)	%	IEC60684-2:2011	45	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

3.6 ชนิดของเปลือกนอกชนิดเชื่อมขวางแสดงดังตารางที่ 15

ตารางที่ 15 แสดงชนิดของเปลือกนอกชนิดเชื่อมขวางและชนิดของสารประกอบ

ชนิดของวัสดุเนื้อฉนวน	สารประกอบ
SE	Polychloroprene rubber
SH	Chlorosulphonated polyethylene or chlorinated polyethylene rubber
SHF 2	Halogen-free rubber

3.7 ข้อกำหนดในการทดสอบคุณสมบัติทางกลของเปลือกนอกชนิดเชื่อมขวางแสดงดังตารางที่ 16

ตารางที่ 16 แสดงข้อกำหนดในการทดสอบคุณสมบัติทางกลของเปลือกนอกชนิดเชื่อมขวาง

รายละเอียดการทดสอบ	หน่วย	วิธีการทดสอบ		ชนิดสารประกอบเนื้อฉนวน		
		มาตรฐาน	หัวข้อ	SH	SE	SHF2
คุณสมบัติทางกลที่ยอมรับได้		IEC 60811-501				
ค่าที่ยอมรับได้ของ						
- แรงดึงต่ำที่สุด	N/mm ²			10	10	9
- ความยืดที่จุดขาดต่ำที่สุด	%			250	300	120
คุณสมบัติทางกลของฉนวนไฟฟ้าภายหลังจากเร่งอายุขัยในเตาอบ		IEC 60811-401				
การเร่งอายุขัยเนื้อฉนวนไฟฟ้า:						
- อุณหภูมิ / ค่าความคาดเคลื่อน	°C			100+-2	100+-2	120+-3
- ระยะเวลาการเร่งอายุในเนื้อฉนวน	h			168	168	168
ค่าที่ยอมรับได้ของแรงดึง						
- ค่าต่ำที่สุด	N/mm ²			-	-	-
- ค่าความคาดเคลื่อนมากที่สุด	%			+40	+40	+40
ค่าที่ยอมรับได้ของความยืดตัวที่จุดขาด						
- ค่าต่ำที่สุด	N/mm ²			-	-	-
- ค่าความคาดเคลื่อนสูงที่สุด	%			+40	+40	+40
การทดสอบความยืดตัวของฉนวนไฟฟ้าเมื่อได้รับความร้อน		IEC 60811-507				

ตารางที่ 16 (ต่อ) แสดงข้อกำหนดในการทดสอบคุณสมบัติทางกลของเปลือกนอกชนิดเชื่อมขวาง

รายละเอียดการทดสอบ	หน่วย	วิธีการทดสอบ		ชนิดสารประกอบเนื้อฉนวน		
		มาตรฐาน	หัวข้อ	SH	SE	SHF2
เงื่อนไขในการทดสอบ:						
- อุณหภูมิ / ค่าความคาดเคลื่อน	°C			200+-3	200+-3	200+-3
- เวลาเมื่อไม่มีภาระทางกล	Min			15	15	15
ค่าความเค้นทางกล	N/cm ²			20	20	20
ค่าการทดสอบที่ยอมรับได้:						
- ความยืดสูงสุดเมื่อมีภาระทางกล	%			175	175	175
ความยืดสูงสุดเมื่อปลอดภาระทางกล	%			15	15	15
การทดสอบความต้านทานโอโซน (วิธี A หรือ B)		IEC 60811-403				
เงื่อนไขการทดสอบด้วยวิธี A						
- อุณหภูมิ	°C			25+-2	25+-2	-
- ระยะเวลา	h			30	30	-
อัตราความเข้มข้นโอโซน	ppm			250-300	250-300	
ค่าการทดสอบที่ยอมรับได้				ไม่เกิดการแตกหัก	ไม่เกิดการแตกหัก	-
เงื่อนไขการทดสอบด้วยวิธี B						-
อุณหภูมิ	°C			40+-2	40+-2	-
ระยะเวลา	h			72	72	-
ค่าความเข้มข้นของโอโซน, (โดยปริมาตร)	%			(200+-50)×10 ⁻⁶	(200+-50)×10 ⁻⁶	-
ความชื้นสัมพัทธ์	%			55+-10	55+-10	-

ตารางที่ 16 (ต่อ) แสดงข้อกำหนดในการทดสอบคุณสมบัติทางกลของเปลือกนอกชนิดเชื่อมขวาง

รายละเอียดการทดสอบ	หน่วย	วิธีการทดสอบ		ชนิดสารประกอบเนื้อฉนวน		
		มาตรฐาน	หัวข้อ	SH	SE	SHF2
ความเร็วลมสูงสุด ณ ตำแหน่งขึ้นงานทดสอบ	mm/s			500	500	-
ค่าการทดสอบที่ยอมรับได้				ไม่เกิดการแตกหัก	ไม่เกิดการแตกหัก	
การประเมินฮาโลเจน						
- ค่าความเป็นกรด-ด่าง	uS.mm ⁻¹	IEC 60754-2				>=4.3
ค่าความนำไฟฟ้า						<=10
จำนวนกรดกำซไฮโดรเจนทั้งหมด:						
- กรดไฮโดรคลอริก และ กรดไฮโดรโบรมิก (ค่าสูงสุด)	%	IEC 60754-1				0.5
- ฮาโลเจนฟรี (ค่าสูงสุด)	%	IEC60684-2:2011	45			0.1

3.8 ชนิดของเปลือกนอกชนิดเทอร์โมพลาสติกแสดงดังตารางที่ 17

ตารางที่ 17 แสดงชนิดของเปลือกนอกเทอร์โมพลาสติก

ชนิดของวัสดุเนื้อฉนวน	ชนิดสารประกอบ
ST 2	Polyvinyl chloride thermoplastic, is permitted even though it releases harmful fumes under fire conditions
SHF 1	Halogen-free thermoplastic for use over all types of insulation

3.9 ข้อกำหนดในการทดสอบคุณสมบัติทางกลของเปลือกนอกชนิดเทอร์โมพลาสติก แสดงดังตารางที่ 18

ตารางที่ 18 แสดงข้อกำหนดในการทดสอบคุณสมบัติทางกลของเปลือกนอกชนิดเทอร์โมพลาสติก

รายละเอียดการทดสอบ	หน่วย	วิธีการทดสอบ		ชนิดของเนื้องาน	
		มาตรฐาน	หัวข้อ	ST 2	SHF 1
คุณสมบัติทางกลที่ยอมรับได้		IEC 60811-501			
ค่าที่ยอมรับได้ของ					
- แรงดึงต่ำที่สุด	N/mm ²			12.5	9.0
- ความยืดที่จุดขาดต่ำที่สุด	%			150	120
คุณสมบัติทางกลของฉนวนไฟฟ้าภายหลังจากเร่งอายุขัยในเตาอบ		IEC 60811-401			
การเร่งอายุขัยเนื้องานไฟฟ้า:					
- อุณหภูมิ / ค่าความคาดเคลื่อน	°C			100+-2	100+-2
- ระยะเวลาการเร่งอายุขัยเนื้องาน	h			168	168
ค่าที่ยอมรับได้ของแรงดึง					
- ค่าต่ำที่สุด	N/mm ²			12.5	7.0
- ค่าความคาดเคลื่อนมากที่สุด	%			+25	+30
ค่าที่ยอมรับได้ของความยืดตัวที่จุดขาด					
- ค่าต่ำที่สุด	N/mm ²			150	110
- ค่าความคาดเคลื่อนสูงที่สุด	%			+25	+30
การทดสอบความยืดตัวของฉนวนไฟฟ้าเมื่อได้รับความร้อน		IEC 60811-508			
เงื่อนไขการทดสอบ:					
- อุณหภูมิ / ค่าความคาดเคลื่อน	°C			80+-2	80+-2

ค่าความหนาของชั้นฉนวนไฟฟ้า ดังตารางที่ 19

ตารางที่ 19 แสดงความหนาของฉนวนไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC 60092-353:2016

พื้นที่หน้าตัด ตัวนำไฟฟ้า mm ²	0.6/1 kV		1.8/3 kV	
	EPR S 95 mm	HEPR HF 90 XLPE mm	EPR mm	HEPR XLPE mm
1	1.0	0.7	-	-
1.5	1.0	0.7	-	-
2.5	1.0	0.7	-	-
4	1.0	0.7	-	-
6	1.0	0.7	-	-
10	1.0	0.7	2.2	2.0
16	1.0	0.7	2.2	2.0
25	1.2	0.9	2.2	2.0
35	1.2	0.9	2.2	2.0
50	1.4	1.0	2.2	2.0
70	1.4	1.1	2.2	2.0
95	1.6	1.1	2.4	2.0
120	1.6	1.2	2.4	2.0
150	1.8	1.4	2.4	2.0
185	2.0	1.6	2.4	2.0
240	2.2	1.7	2.4	2.0
300	2.4	1.8	2.4	2.0
400	2.6	2.0	2.6	2.0
500	2.8	2.2	2.8	2.2
630	2.8	2.4	2.8	2.4

สามารถคำนวณค่าความหนาของชั้นเปลือกนอก 1 ชั้น, 2 ชั้น และสายไฟฟ้าหุ้มเกราะได้จากสมการ ที่ 4, 5, 6 ตามลำดับ

$$t_1 = 0.04D + 0.8 \text{ mm (ความหนาน้อยสุด คือ 1.0 mm)} \quad (4)$$

$$t_1 = 0.025D + 0.9 \text{ mm (ความหนาน้อยสุด คือ 1.0 mm)} \quad (5)$$

$$t_1 = 0.025D + 0.6 \text{ mm (ความหนาน้อยสุด คือ 0.8 mm)} \quad (6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ t_1 คือ ความหนาของชั้นเปลือกนอก
 D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเปลือกนอกของสายไฟฟ้า

3.10 ข้อกำหนดของขนาดตัวนำไฟฟ้าในการถักหุ้มเกราะของสายไฟฟ้า

3.10.1 ตัวนำไฟฟ้าขนาดไม่เกิน 0.2mm ใช้ถักหุ้มสายไฟฟ้าที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10mm

3.10.2 ตัวนำไฟฟ้าขนาดไม่เกิน 0.3mm ใช้ถักหุ้มสายไฟฟ้าที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 10mm ถึง 30mm

3.10.3 ตัวนำไฟฟ้าขนาดไม่เกิน 0.4mm ใช้ถักหุ้มสายไฟฟ้าที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 31mm

สามารถคำนวณความหนาแน่นของการถักหุ้มบนพื้นผิวฉนวนสายไฟฟ้าได้จากสมการที่ 7 และ 8 ตามลำดับ

$$F = \frac{NPd}{\sin \alpha} \quad (7)$$

โดยที่ F คือ แฟกเตอร์การเติม
 α คือ มุมระหว่างแกนของสายไฟฟ้ากับตัวนำไฟฟ้าสำหรับถักหุ้ม
 d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำไฟฟ้าสำหรับถักหุ้ม
 N คือ จำนวนของตัวนำไฟฟ้าสำหรับถักหุ้ม
 P คือ จำนวน picks ต่อ มิลลิเมตร

$$G = \frac{\pi}{2} \cdot F \cdot 100 \quad (8)$$

โดยที่ G คือ ความหนาแน่นของการถักหุ้มบนพื้นผิวฉนวนสายไฟฟ้า

2.1.2 พอลิเมอร์ในวัสดุฉนวนสายไฟฟ้า

วัสดุที่นิยมใช้ในฉนวนและเปลือกนอกของสายไฟฟ้าต่างๆ ได้แก่ พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) พอลิเอทิลีน (PE) ครอสลิงค์พอลิเอทิลีน (XLPE) ยางเอทิลีนพรอพิลีน (EPR) ยางไนไตรล์ (NBR) และครอสลิงค์โพลีโอเลฟินส์ (XLPO) โดยลักษณะทางโครงสร้างของพอลิเมอร์จะถูกจำแนกดังต่อไปนี้

1. พอลิเมอร์แบบเส้น (Linear Polymer) ภายในหนึ่งหน่วยพอลิเมอร์แบบเส้นจะมีการเชื่อมต่อกันของหลายหน่วยย่อยมอนอเมอร์ แต่ละสายโซ่ของพอลิเมอร์จะถูกนำมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะแวนเดอร์วาลส์หรือพันธะไฮโดรเจน โซ่พอลิเมอร์จึงเรียงตัวชิดกันมากกว่าโครงสร้างแบบอื่นๆ ทำให้พอลิเมอร์แบบเส้นมีคุณสมบัติเหนียวยืดหยุ่น มีความหนาแน่นและจุดหลอมเหลวที่สูง ตัวอย่างของพอลิเมอร์ ชนิดนี้ ได้แก่ พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) และพอลิเอทิลีน (PE) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. พอลิเมอร์แบบกิ่งก้าน (Branched Polymer) เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากการเชื่อมต่อกันของกิ่งก้านสายโซ่พอลิเมอร์หรือการแตกกิ่งก้านของมอนอเมอร์ที่ยึดติดกันภายในพอลิเมอร์ โดยลักษณะของโซ่ของกิ่งก้านมีทั้งสั้นและยาวแตกต่างกันออกไป ทำให้โซ่พอลิเมอร์ไม่สามารถจัดตัวเรียงชิดติดกันได้อย่างหนาแน่น ตัวอย่างของพอลิเมอร์ชนิดนี้ ได้แก่ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE), พอลิเอทิลีนความหนาแน่นปานกลาง (MDPE) และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) เป็นต้น

3. พอลิเมอร์แบบเชื่อมขวาง (Cross-linked Polymer) มีลักษณะการเชื่อมต่อกันของสายโซ่พอลิเมอร์เส้นหลักกับเส้นอื่นเข้าด้วยกัน ด้วยพันธะโคเวเลนต์ โดยการเกิดพอลิเมอร์ลักษณะนี้จะเกิดจากการทำการสังเคราะห์หรือเกิดจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีแบบไม่ย้อนกลับ ตัวเชื่อมขวางมักจะเกิดจากอะตอมหรือโมเลกุลของสารเร่งปฏิกิริยาที่เติมเข้าไปในกระบวนการผลิต เพื่อทำให้เกิดพันธะโคเวเลนต์ระหว่างโซ่พอลิเมอร์เข้าด้วยกัน ตัวอย่างของพอลิเมอร์ชนิดนี้ ได้แก่ ครอสลิงค์พอลิเอทิลีน (XLPE) ครอสลิงค์โพลีโอเลฟิน (XLPO) และยางเอทิลีนพรอพิลีน (EPR) เป็นต้น

4. พอลิเมอร์โครงสร้างแบบตาข่าย (Network Polymer) มีลักษณะการเชื่อมต่อเป็นตาข่ายแบบ 3 มิติ ด้วยพันธะโคเวเลนต์ ทำให้มีคุณสมบัติทางกลและคุณสมบัติทางความร้อนที่ดีขึ้น ตัวอย่างของพอลิเมอร์ชนิดนี้ ได้แก่ อีพอกซี (Epoxy) เป็นต้น

พอลิเมอร์สามารถแบ่งตามประเภทของพฤติกรรมเมื่อได้รับความร้อน เป็น 2 ประเภทคือ

1. เทอร์โมพลาสติก พอลิเมอร์ (Thermoplastic Polymer) มีโครงสร้างเป็นแบบเส้นหรือแบบกิ่งสั้นๆ สามารถทำการขึ้นรูปใหม่ซ้ำได้ พอลิเมอร์ชนิดที่นิยมใช้ทำฉนวนหรือเปลือกนอกของสายไฟฟ้า ได้แก่ พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) และพอลิเอทิลีน (PE) เป็นต้น

2. เทอร์โมเซตติง พอลิเมอร์ (Thermosetting Polymer) มีโครงสร้างเป็นแบบตาข่าย ไม่สามารถทำการขึ้นรูปใหม่ซ้ำได้ เมื่อได้รับความร้อนอุณหภูมิสูง จะทำให้พอลิเมอร์สลายตัวและเกิดความเสียหาย พอลิเมอร์ชนิดที่นิยมใช้ทำฉนวนและเปลือกนอกของสายไฟฟ้า ได้แก่ ครอสลิงค์พอลิเอทิลีน (XLPE) ครอสลิงค์โพลีโอเลฟินส์ (XLPO) และยางเอทิลีนพรอพิลีน (EPR) เป็นต้น

2.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ได้ถูกคิดค้นและประดิษฐ์ขึ้นเมื่อปี พ.ศ. 2481 โดย Manfred von Ardenne นักวิจัย นักฟิสิกส์ และนักประดิษฐ์ชาวเยอรมัน โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) สามารถแสดงให้เห็นถึงรายละเอียดของวัสดุได้ดีกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบแสง - Light Microscope (LM) ในระดับนาโนเมตร (nm) ซึ่งลักษณะของรูปที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จะเป็นภาพ 3 มิติเฉพาะโครงสร้างพื้นผิวภายนอกเท่านั้น

ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ประกอบไปด้วย 1. ปืนอิเล็กตรอน (Electron Gun) หรือแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่ แคโทด (ขั้วลบ) 2. เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Electromagnetic Lens) ทำหน้าที่ลดขนาดและโฟกัสลำแสงอิเล็กตรอนที่มาจาก ปืนอิเล็กตรอนให้อยู่ในระดับ นาโนเมตร (nm) ลงบนพื้นผิววัสดุทดสอบ 3.ชุดวางวัสดุทดสอบ (Object Stage) มีหลากหลายขนาดและรูปร่าง โดยชุดวางวัสดุทดสอบสามารถเคลื่อนที่ตามแนวแกนได้หลายแนวเพื่อปรับที่ภาพวัสดุทดสอบ 4. ชุดตรวจจับอิเล็กตรอน (Detector) ทำหน้าที่ตรวจจับลำแสงอิเล็กตรอนที่กระเจิงจากการตกกระทบที่พื้นผิวของวัสดุทดสอบแสดงกลับมาเป็นภาพ

หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้า (5 – 20 kV) เพื่อให้อิเล็กตรอนถูกยิงออกจากหัวแคโทดไปยังชุดเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อรวบรวมลำแสงไปยังพื้นผิวของวัสดุที่ทำการทดสอบ หลังจากนั้นอิเล็กตรอนกระเจิงกลับมายังตัวรับและถูกแปลผลเป็นภาพสามมิติ



รูปที่ 1 Zeiss Auriga Scanning Electron Microscope (FE-SEM)

2.3 เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, (FT-IR))

เป็นเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างทางโมเลกุลภายในสารประเภทต่างๆ เช่น ของแข็งของเหลว ก๊าซ นิยมใช้ในสารอินทรีย์ที่มีความบริสุทธิ์สูง โดยโครงสร้างทางโมเลกุลของวัสดุทดสอบจะดูดกลืนพลังงานของแสงอินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ซึ่งวิเคราะห์ด้วยสมการฟูเรียร์ (Fourier Equation) โดยแปลผลออกมาเป็น สเปกตรัม (Spectrum) ซึ่งสารแต่ละชนิดจะให้ลักษณะของสเปกตรัมที่แตกต่างกันออกไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 เครื่องมือวิเคราะห์ Fourier Transform Spectroscopy (FT-IR)

2.4 เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ แบบกระจายความยาวคลื่น Wavelength dispersive X-ray Fluorescence (WD-XRF)

WD-XRF ใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ มีลักษณะการทำงานเป็นแบบ Wavelength Dispersive เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณธาตุที่มีมากในระดับความเข้มข้นสูงตั้งแต่ระดับ เปอร์เซ็นต์ (percent) จนถึงมีปริมาณน้อยมาก ระดับส่วนในล้านส่วน (ppm) เป็นเครื่องที่สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งของแข็งและของเหลว

หลักการทำงานของ เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ แบบกระจายความยาวคลื่น Wavelength dispersive X-ray Fluorescence (WD-XRF) คือ ชุดกำเนิดรังสี X-Ray จะปล่อยรังสี เพื่อทำอันตรกิริยากับวัสดุทดสอบ ทำให้เกิดการเรืองแสงออกมา (Fluorescence) โดยแสงที่เรืองแสงออกมาจะไปตกกระทบกับ สเปกโตรมิเตอร์ (Spectrometer) เพื่อจำแนกรังสีที่ความยาวคลื่นต่างๆ และส่งไปยังตัวรับ (Detectors) เพื่อแสดงค่าของสัญญาณและแปลผลการทดสอบ



รูปที่ 3 เครื่องมือทดสอบ Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence-WDXRF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge)

การดิสชาร์จบางส่วน คือการดิสชาร์จเพียงบางส่วนเท่านั้นโดยที่ตัวนำยังไม่เชื่อมโยงถึงกัน หรือในกรณีของเนื้อฉนวนสายไฟฟ้า คือ เนื้อฉนวนยังไม่ถูกทำลายหรือเสื่อมสภาพอย่างถาวร ลักษณะของการดิสชาร์จบางส่วนแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ คือ

1. โคโรนาดิสชาร์จ (Corona Discharge) เกิดจากสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอสูงที่ความเครียดสนามไฟฟ้าเกินค่าวิกฤต E_c โดยผลจากการเกิดโคโรนาดิสชาร์จ คือ เกิดการสูญเสียของพลังงานในรูปของความร้อน แสง เสียงฮิสซิ่ง และ O_3 โดยสามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากโคโรนาได้จากสมการ 9

$$P_k = \frac{241}{\delta} (f+25) \sqrt{\frac{r}{d}} (U-U_i)^2 \cdot 10^{-5} \text{ kW/Km} \quad (9)$$

โดยที่ δ คือ ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของอากาศ, f คือ ความถี่ (Hz), r คือ รัศมีตัวนำ (cm), d คือ ระยะระหว่างเฟส (cm)

2. ดิสชาร์จตามผิว (Surface Discharge) เกิดจากสนามไฟฟ้าที่เป็นรอยต่อจากการที่มีค่าเปอร์มิตติวิตีที่แตกต่างกัน และค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวของฉนวนมีค่าสูงเกินค่าวิกฤต $E_s > E_c$ เช่นปลายของสายไฟฟ้าแรงดันสูง
3. ดิสชาร์จภายใน (Internal Discharge) เกิดจากโพรงอากาศที่อยู่ในฉนวนแข็ง เช่น โพรงอากาศภายในเนื้อฉนวนของสายไฟฟ้า เนื่องจากกระบวนการผลิตวัสดุเจือปนที่อยู่ในเนื้อฉนวนไฟฟ้า เนื่องจากกระบวนการผลิตสายไฟฟ้าที่ไม่ได้มาตรฐาน ซึ่งจะเกิดค่าความเครียดสนามไฟฟ้า ณ ตำแหน่งของโพรงอากาศหรือวัสดุเจือปนอยู่ ทำให้เกิดการดิสชาร์จภายในและเกิดการเบรกดาวนอย่างสมบูรณ์ต่อไป

2.6 การโพลาไรเซชันในเนื้อฉนวน (Polarization in Dielectric)

การโพลาไรเซชันในเนื้อฉนวน คือการที่โมเลกุลภายในเนื้อฉนวนเกิดการจัดเรียงตัวกันขึ้นใหม่ภายใต้สนามไฟฟ้าที่มากกระทำ ขณะที่ทำการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปยังเนื้อฉนวนโดยที่เนื้อฉนวนต้องไม่เกิดการเสื่อมสภาพอย่างถาวร กระบวนการนี้เรียกว่า การโพลาไรเซชัน

กระบวนการโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นภายในฉนวนถูกจำแนกออกเป็น 5 ประเภท คือ

1. อิเล็กทรอนิกส์โพลาไรเซชัน (Electronic Polarization) อิเล็กตรอนที่อยู่โดยรอบนิวเคลียสของอะตอมของฉนวน จะจัดเรียงตัวใหม่ตามแนวสนามไฟฟ้าที่มากกระทำ ทำให้อะตอมของฉนวนเกิดไดโพล (Dipole) หรือเกิดการมีขั้วขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ไอออนิกโพลาริเซชัน (Ionic Polarization) เมื่อเมื่อสนามไฟฟ้าภายนอกกระทำต่อเนื้อฉนวน ทำให้ไอออนบวกและไอออนลบของพันธะไอออนิกเคลื่อนที่ โดยที่ไอออนบวกจะเคลื่อนที่ตามทิศทางสนามไฟฟ้าและไอออนลบจะเคลื่อนที่ตรงข้ามกับทิศทางสนามไฟฟ้า

3. ออเรนเทชันโพลาริเซชัน (Orientation Polarization) โมเลกุลภายในเนื้อฉนวนจะหมุนและจัดกระจายอย่างอิสระ ทำให้สนามไฟฟ้าลัพธ์ภายในเนื้อฉนวนมีค่าเท่ากับศูนย์

4. ฮอปปีงโพลาริเซชัน (Hopping Polarization) อิเล็กตรอน และ โฮล (Hole) สามารถกระโดดจากตำแหน่งหนึ่ง ไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งได้ ทำให้เกิดพฤติกรรมการโพลาริเซชันภายในฉนวนเกิดขึ้น

5. สเปซชาร์จ์โพลาริเซชัน (Space Charge Polarization) หรือ อินเตอร์เฟเชียล โพลาริเซชัน (Interfacial Polarization) เมื่อสนามไฟฟ้ามากระทำต่อเนื้อฉนวน ประจุบวกแลประจุลบจะเคลื่อนที่มาสะสมกันตรงรอยต่อของฉนวน 2 ประเภทที่มีค่าเปอร์มิตติวิตี (Permittivity) แตกต่างกัน ทำให้การกระจายของสนามไฟฟ้าภายในฉนวนผิดเพี้ยนไปจากเดิม

กระแสโพลาริเซชันในทางทฤษฎีสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 10

$$i_{\text{pol}}(t) = C_0 V_c \left[\frac{\sigma_0}{\epsilon_0} + \epsilon_0 \delta(t) + f(t) \right] \quad (10)$$

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

2.7 พารามิเตอร์ในการฉนวนไฟฟ้า (Parameter in Dielectric)

1. เพอร์มิตติวิตีเชิงซ้อน (Permittivity, ϵ_r^*) คือพารามิเตอร์ที่แสดงคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุฉนวน โดยที่ส่วนจริงของเพอร์มิตติวิตีเชิงซ้อน $\epsilon_r'(\omega)$ แสดงความสามารถในการเก็บพลังงานในรูปสนามไฟฟ้า และส่วนจินตภาพของเพอร์มิตติวิตีเชิงซ้อน $\epsilon_r''(\omega)$ แสดงความสูญเสียในวัสดุฉนวนจากการเก็บพลังงานในรูปสนามไฟฟ้าซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าแฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก

$$\epsilon_r^*(\omega) = \epsilon_r'(\omega) - j\epsilon_r''(\omega) \quad (11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\epsilon_1' = \frac{C_{50\text{Hz}}}{C_0} \quad (12)$$

2. แפקเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dissipation Factor, $\tan \delta$)

แפקเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก $\tan \delta$ เป็นพารามิเตอร์ที่นิยมใช้ในการประเมินสภาพฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งสามารถใช้เป็นตัวชี้วัดอายุการใช้งานของเนื้อฉนวนได้ โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ 1. ความสูญเสียเนื่องจากมีกระแสไหลผ่านเนื้อฉนวน เพราะเนื้อฉนวนไม่บริสุทธิ์ 2. ความสูญเสียเนื่องจากพฤติกรรมการมีขั้ว เมื่อโมเลกุลของเนื้อฉนวนอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าทำให้เกิดกระบวนการโพลาไรซ์เซชัน 3. เกิดการดิซชาร์จภายในเนื้อฉนวนทำให้เกิดความสูญเสียในรูปแบบของความร้อนเกิดขึ้น

$$\tan \delta = \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0 \epsilon_1'} \quad (13)$$

3. สภาพการนำไฟฟ้า (Conductivity)

ฉนวนทางไฟฟ้าที่ดีจะต้องมีค่าความต้านทานที่สูงและสภาพการนำไฟฟ้าที่ต่ำ เนื่องจากจะทำให้กระแสไฟฟ้าไม่สามารถรั่วไหลผ่านทางเนื้อฉนวนได้ สามารถคำนวณได้จากสมการ 14

$$J = \frac{E}{\rho} = \sigma \quad (14)$$

4. ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ (Breakdown Voltage, E_b)

ค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ที่สูงส่งผลให้เนื้อฉนวนสามารถทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าสูงได้ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 15

$$E_b = \frac{B \cdot p}{\ln \frac{A \cdot p \cdot d}{\ln 20 \cdot (r+1)}} \quad (15)$$

2.8 การผลิตสายไฟฟ้า (Cable Production)

ขั้นตอนการผลิตสายไฟฟ้า แบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอนดังนี้ 1. ยืดลดขนาดลวดตัวนำทองแดง (Wire Drawing) 2. ตีเกลียวรวมกลุ่มตัวนำทองแดง (Bunching) 3. หุ้มฉนวนสายไฟฟ้า (Extruding – Insulation) 4. ถักหุ้มสายไฟฟ้า (Braiding) 5. หุ้มเปลือกนอกสายไฟฟ้า (Extruding – Jacket) 6. พิมพ์ชื่อสายไฟฟ้า (Printing) แสดงดังรูปที่ 5-12

โดยการผลิตสายไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ ได้มุ่งเน้นไปยังฉนวนชนิด ครอสลิงค์โพลิโอเลฟินส์เป็นหลัก ซึ่งฉนวนไฟฟ้าชนิดครอสลิงค์โพลิโอเลฟิน (Cross-linked Polyolefin - XLPO) ได้ถูกนำมา

ประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับใช้เป็นฉนวนของสายไฟฟ้า อีกทั้งยังมีความเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำเป็นอย่างมากในการผลิตและการทดสอบสายไฟฟ้า เพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานทางด้านไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ และเป็นไปตามข้อกำหนดของ International Electro technical Commission (IEC) ซึ่งเป็นหน่วยงานคณะกรรมการระหว่างประเทศว่าด้วยมาตรฐานสาขาอิเล็กทรอนิกส์, IEC60270

ครอสลิงค์โพลีโอเลฟิน (Cross-linked Polyolefin) หรือ XLPO เป็นรูปแบบของฉนวนทางไฟฟ้าที่ถูกผลิตขึ้นมาโดยกรรมวิธีแรงดันและความร้อนสูง (High pressure, Heat) คุณสมบัติที่เด่นในฉนวนไฟฟ้าชนิด (Cross-linked Polyolefin - XLPO) คือ ฮาโลเจนฟรี (Halogen free) และมีความยืดหยุ่นที่สูง (Flexible) โครงสร้างทางโมเลกุลของฉนวนไฟฟ้าชนิด XLPO ความสำคัญของฮาโลเจนฟรี (Halogen free) คือ จะไม่มีก๊าซที่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตเมื่อเกิดการเผาไหม้

ฮาโลเจน (Halogen) คือธาตุในตารางธาตุหมู่ที่ 7 พบเป็นสารประกอบ เมื่อฮาโลเจนจับรวมตัวกับไฮโดรเจนในอากาศจะอยู่ในสถานะเป็นกรดแก่ ฮาโลเจนมี 5 ประเภทคือ

ฟลูออรีน (Fluorine, F) มีสถานะเป็นก๊าซสีเหลืองอ่อน มีความไวต่อปฏิกิริยามากที่สุด เช่น สารคาร์โรฟลูออโรคาร์บอน(CFC) ในอุตสาหกรรมปรับอากาศ อุตสาหกรรมในรถยนต์และสเปรย์ฉีดพ่นสาร

คลอรีน (Chlorine, Cl) มีสถานะเป็นก๊าซสีเขียวอ่อน มีลักษณะการใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น การฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ - แบคทีเรียตามพื้นผิวและในแหล่งน้ำ, การในการทดลองในห้องปฏิบัติการ, ในอุตสาหกรรมการผลิต เช่น โพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC), ยาฆ่าแมลง และสีผสมอาหาร

โบรมีน (Bromine, Br) มีสถานะเป็นของเหลวสีน้ำตาลแดง สามารถใช้ประโยชน์ได้หลากหลายรูปแบบ เช่น อุตสาหกรรมการย้อมฟอกสีเสื้อผ้าและหนังสือ, อุตสาหกรรมการเภสัชภัณฑ์, อุตสาหกรรมผลิตพลาสติก, อุตสาหกรรมผลิตสารกันไฟ เป็นต้น

ไอโอดีน (Iodine, I) มีสถานะเป็นของแข็งสีม่วงดำ ประโยชน์ของไอโอดีน สามารถพัฒนาระบบประสาทและสมอง, กระตุ้นเมตาบอลิซึมของร่างกาย, ต้านอนุมูลอิสระและใช้เป็นยาฆ่าเชื้อโรค

แอสทาทีน (Astatine, At) เป็นธาตุกัมมันตรังสีที่มีปริมาณน้อยมากในธรรมชาติ และเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ใช้ประโยชน์ในทางด้านรังสี เช่น การฉายรังสี X-Ray, ศัลยกรรมผ่าตัด และ Radiation Therapy

Halogen-Free คือการไม่พบธาตุในกลุ่มฮาโลเจน 5 ประเภทที่กล่าวมาข้างต้นในผลิตภัณฑ์ เนื่องจาก Halogen มีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตสูง ผลิตภัณฑ์ที่เป็น Halogen-Free จึงมีความปลอดภัยในการใช้งานในอุตสาหกรรมผลิตสายไฟฟ้า

F Cl Br

I At

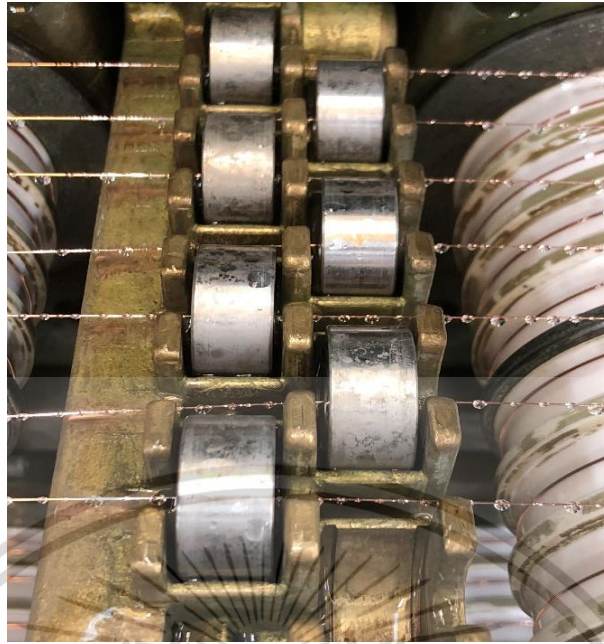


รูปที่ 4 สายไฟฟ้าชนิดฉนวน XLPO ที่ไม่เกิดการปลดปล่อยก๊าซในกลุ่ม Halogen เมื่อเกิดการเผาไหม้ (ด้านขวา)

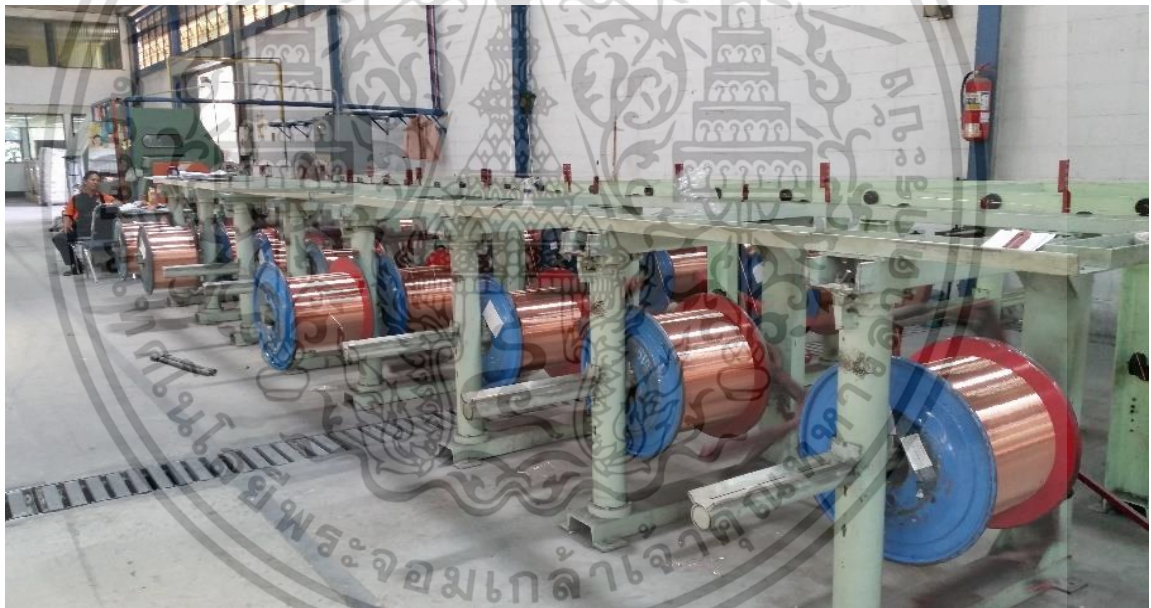


รูปที่ 5 การร้อยสายตัวนำไฟฟ้าเข้าไปในชุดล้อรีดและชุดลูกรีด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6 การรีดลดขนาดตัวนำไฟฟ้าทองแดง 0.3 มม. เป็น 0.15 มม.



รูปที่ 7 การนำตัวนำไฟฟ้าทองแดงขึ้นเตรียมสำหรับการตีเกลียวรวมกลุ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

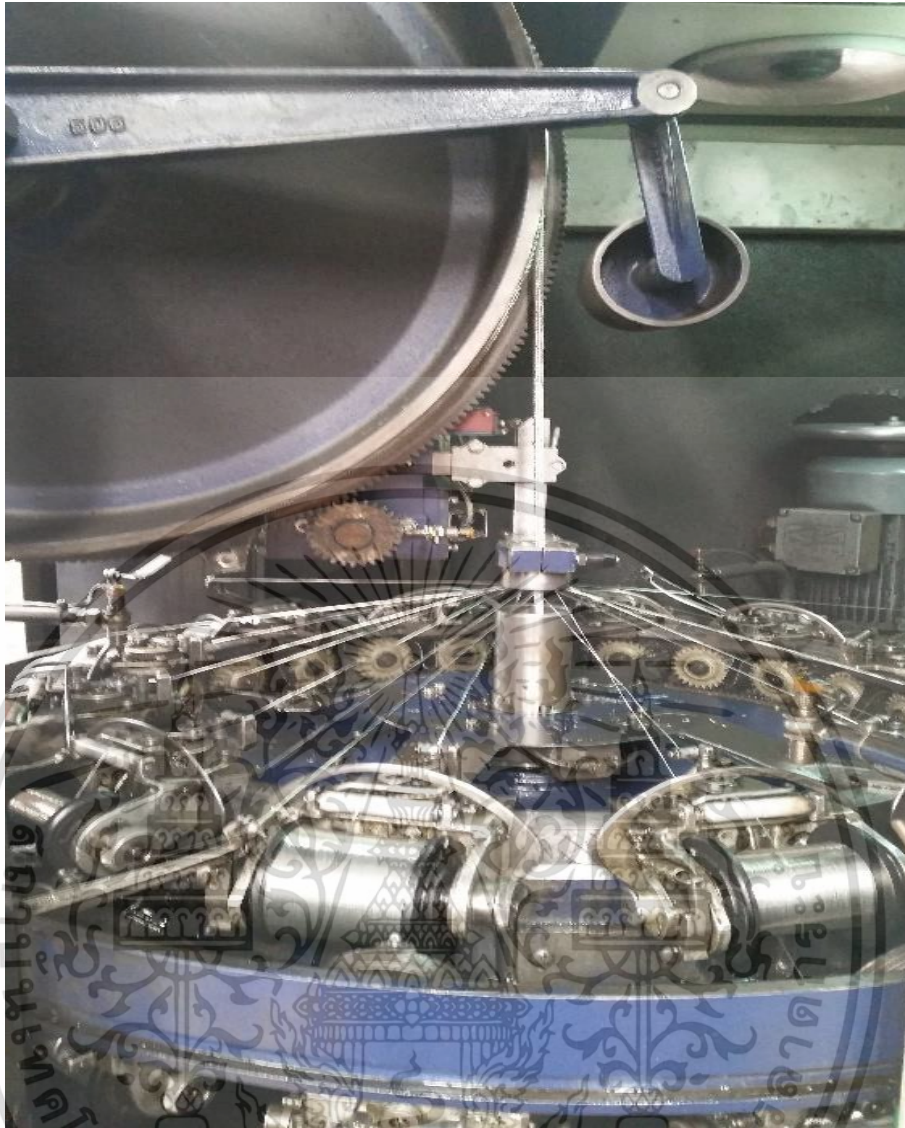


รูปที่ 8 การตีเกลียวรวมกลุ่มสายไฟฟ้าเพื่อให้ได้ขนาดพื้นที่หน้าตัดตามที่ต้องการ



รูปที่ 9 การนำตัวนำไฟฟ้าทองแดงหุ้มด้วยฉนวนไฟฟ้าชนิด XLPO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 10 การถักหุ้มสายไฟฟ้าด้วยตัวนำไฟฟ้าทองแดง, ทองแดงชุบดีบุกขนาดพื้นที่หน้าตัด
เส้นลวดตัวนำ 0.15 มม.



รูปที่ 11 การหุ้มเปลือกนอกของสายไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 12 การพิมพ์รายละเอียดและชนิดของสายไฟฟ้า

2.9 การตรวจสอบคุณภาพสายไฟฟ้า (Quality Control Process)

1. Routine Test High Voltage ตามมาตรฐาน IEC-60092-350:2014 เป็นการทดสอบสายไฟฟ้าด้วยแรงดันสูง เพื่อจำลองการใช้งานและตรวจสอบประสิทธิภาพของเนื้อฉนวนในการทนต่อสนามไฟฟ้าที่มากกระทำ

ตารางที่ 20 แสดงระดับพิกัดแรงดันสายไฟฟ้าในการทดสอบ

ระดับพิกัดแรงดันสายไฟฟ้า U_0/U kV	แรงดันทดสอบ 5 นาที	
	แรงดันกระแสสลับ (a.c.) kV	แรงดันกระแสตรง (d.c.) kV
0.15/0.25	1.5	3.6
0.6/1	3.5	8.4
1.8/3	6.5	15.6
3.6/6	12.5	-
6/10	21	-
8.7/15	30.5	-
12/20	42	-
18/30	63	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 13 การทดสอบ Routine Test High Voltage ตามมาตรฐาน IEC-60092-350:2014

2. Spark Test ตามมาตรฐาน IEC-60092-350:2014

เป็นการทดสอบสายไฟฟ้าด้วยแรงดันสูง เพื่อตรวจสอบหาความบกพร่องของเนื้องานและเปลือกนอกของสายไฟฟ้าระหว่างกระบวนการผลิต เช่น การเจาะทะลุของเนื้องาน การเจาะทะลุของชั้นเปลือกนอกสายไฟฟ้า หรือความหนาของชั้นเนื้องานไม่เป็นไปตามมาตรฐาน สามารถคำนวณแรงดันการทดสอบจากสมการที่ 16-17

$$\text{a.c. (50Hz)} = 3.0 \text{ kV} + (5 \times \text{ความหนาเนื้องาน ม.ม.}) \text{ kV} \quad (16)$$

$$\text{d.c.} = V_{\text{a.c.}} \times 1.5 \quad (17)$$



รูปที่ 14 แสดงเครื่องมือการทดสอบ Spark Test ระหว่างกระบวนการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นใบเซอร์ไอเซนด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. Conductor Resistance Test ตามมาตรฐาน IEC 60228:2004

เป็นการทดสอบค่าความต้านทานกระแสตรงของตัวนำไฟฟ้าทองแดงตามขนาดพื้นที่หน้าตัดตัวนำต่างๆ เพื่อให้เกิดความสูญเสียเนื่องมาจากความร้อนจากตัวนำไฟฟ้าน้อยที่สุด โดยสภาพการนำไฟฟ้า ตัวนำทองแดง = 5.85×10^5 mho/cm และ สภาพการนำไฟฟ้า ตัวนำอลูมิเนียม = 3.50×10^5 mho/cm สามารถคำนวณค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับได้จากสมการที่ 18, 19 ตามลำดับ

$$R_T = R_{20} \{1 + \alpha_{20}(T - 20)\} \Omega \quad (18)$$

โดยที่ R_{20} คือความต้านทานที่อุณหภูมิ 20°C (Ω)

α_{20} คือสัมประสิทธิ์ความต้านทานของวัสดุที่ 20°C (1/Celsius)

T คืออุณหภูมิของตัวนำ โดยปกติจะคำนวณที่อุณหภูมิสูงสุดที่ฉนวนทนได้ (Celsius)

$$R_{a.c.} = R_{d.c.} + R_s + R_p \quad \Omega \quad (19)$$

โดยที่ $R_{d.c.}$ คือค่าความต้านทานกระแสตรง

R_s คือค่าความต้านทานอันเนื่องมาจากปรากฏการณ์ทางผิว (Skin Effect)

R_p คือค่าความต้านทานอันเนื่องมาจากปรากฏการณ์ผลเนื่องจากความใกล้เคียง (Proximity Effect)

ปรากฏการณ์ทางผิว (Skin Effect) การเกิดขึ้นของเส้นแรงแม่เหล็ก ทำให้เกิดความเหนี่ยวนำขึ้นมาที่จุดศูนย์กลางของตัวนำจะมีเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวข้องมากที่สุด ค่าความเหนี่ยวนำจะมีค่าสูงสุดที่จุดศูนย์กลางของตัวนำ ทำให้จุดศูนย์กลางเกิดอิมพีแดนซ์สูงสุด และจะลดลงที่ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางออกไป

จากกรณีดังกล่าว ทำให้กระแสที่จุดศูนย์กลางของตัวนำมีค่าน้อยที่สุด และค่อยๆเพิ่มขึ้นไปตามแนวรัศมี และเนื่องจากอิมพีแดนซ์ขึ้นกับความถี่ หากสายตัวนำใช้ในวงจรที่มีความถี่สูง ค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นจะมากขึ้นด้วย ทำให้กระแสไหลอยู่เฉพาะที่ผิวตัวนำมากขึ้น การพิจารณาผลของปรากฏการณ์เชิงผิว ให้นิยามความลึกของผิวตัวนำ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 20

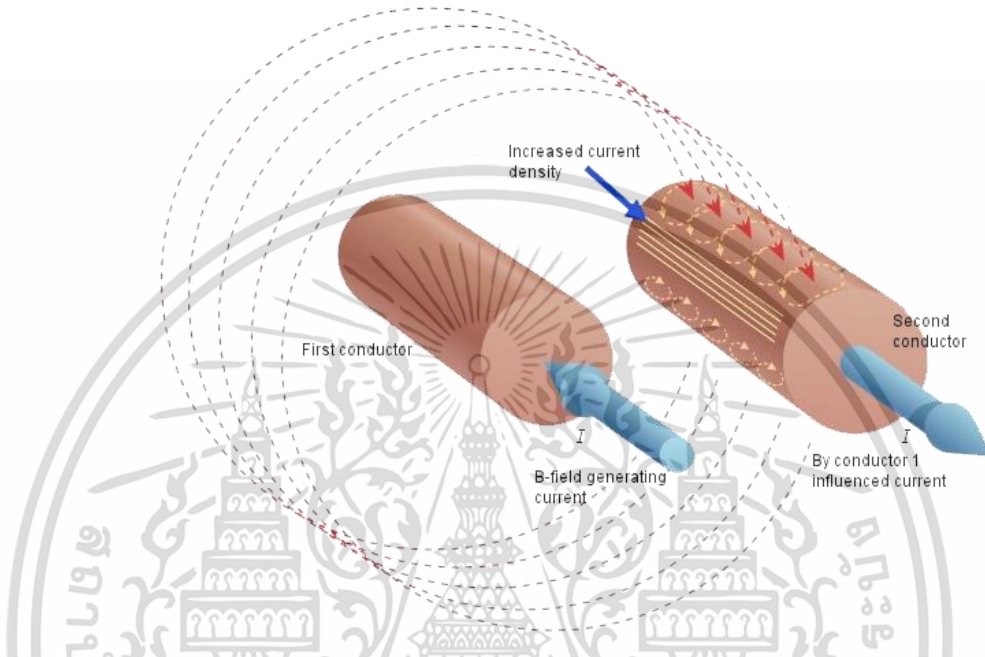
$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \mu_r \sigma}} \quad (20)$$

โดยที่ f คือความถี่ (Hz), μ_0 คือความซึมซาบของสุญญากาศ, μ_r คือความซึมซาบสัมพัทธ์, σ

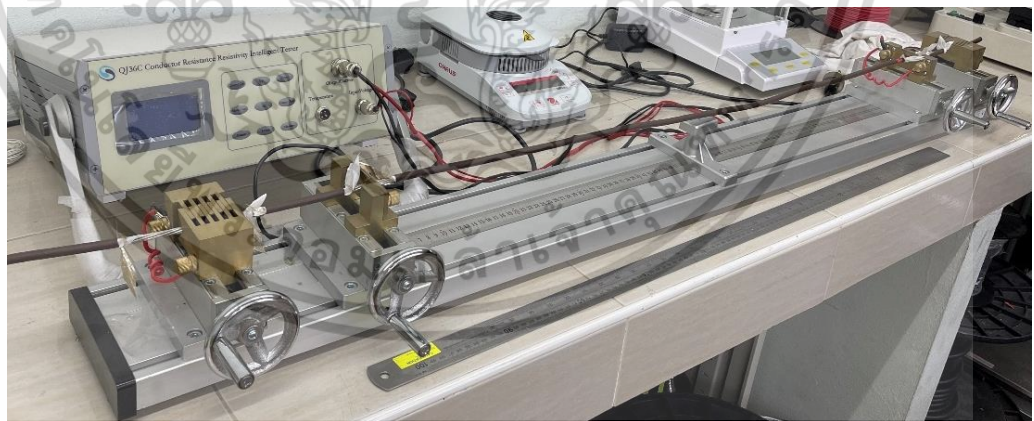
คือสภาพความนำไฟฟ้าของตัวนำ $\sigma = \frac{1}{\rho} \left(\frac{S}{m} \right)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรากฏการณ์ผลเนื่องจากความใกล้เคียง (Proximity Effect) จะแยกพิจารณาเป็น 2 กรณี คือ 1. ตัวนำสองตัวมีกระแสไหลทิศทางเดียวกัน เส้นแรงแม่เหล็กภายนอกตัวนำที่สร้างโดยตัวนำทั้งสองนั้นจะหักล้างกันที่บริเวณขอบของตัวนำด้านที่ใกล้ชิดกัน 2. ถ้าตัวนำทั้งสองมีกระแสไหลสวนทางกัน เส้นแรงแม่เหล็กบริเวณขอบตัวนำจะเสริมกัน เกิดแรงเหนี่ยวนำมากขึ้น ทำให้กระแสไหลบริเวณของด้านข้างมากขึ้น



รูปที่ 15 ปรากฏการณ์ผลเนื่องจากความใกล้เคียง (Proximity Effect)

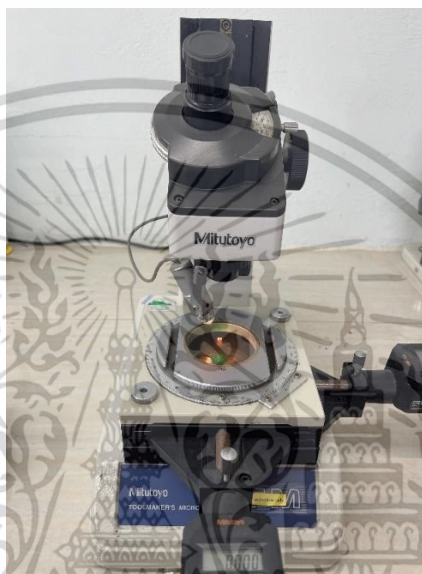


รูปที่ 16 การทดสอบ D.C. Conductor Resistance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. Cable Dimension Test

เป็นการตรวจวัดความหนาของชั้นเนื้อฉนวนและชั้นเปลือกนอกของสายไฟฟ้า เพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดตามมาตรฐาน IEC 60092-353:2016 ทำการทดสอบโดยการวัดค่า Round Thickness, RT ทั้งหมด 6 ตำแหน่งเพื่อหาค่าเฉลี่ยของความหนาชั้นฉนวนและชั้นเปลือกนอกของสายไฟฟ้า โดยสายไฟฟ้าที่เป็นไปตามมาตรฐานจะมีความหนาเฉลี่ยเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60092-353:2016 ทุกตำแหน่ง



รูปที่ 17 การทดสอบ Cable Dimensional



รูปที่ 18 ตัวอย่างการทดสอบ Cable Dimension

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. Tensile & Elongation Before and After aging Test

เป็นการตรวจสอบคุณภาพของแรงดึงและการยืดตัวของฉนวนและเปลือกนอกของสายไฟฟ้า
เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60092-360:2014



รูปที่ 19 เครื่องมือการทดสอบ Tensile & Elongation Before and After aging

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 20 ตู้อบอุณหภูมิสูงเพื่อทำการ Aging สายไฟฟ้า

6. Insulation Resistance Test

เป็นการทดสอบค่าความเป็นฉนวนของสายไฟฟ้า โดยเป็นไปตามมาตรฐาน IEC-60092-360:2014



รูปที่ 21 การทดสอบค่าความเป็นฉนวนของสายไฟฟ้า โดยเป็นไปตามมาตรฐาน

IEC-60092-360:2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. Vertical Flame Test

เป็นการทดสอบการลามไฟของสายไฟฟ้า โดยความยาวของการลามไฟเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60332-1-2



รูปที่ 22 การทดสอบการลามไฟ โดยเป็นไปตามข้อกำหนดของ IEC 60332-1-2

2.10 สายไฟฟ้าชนิดพิเศษ (Special Cables)

เป็นสายไฟฟ้าที่ใช้ในประเภทของงานที่มีลักษณะเฉพาะด้าน เช่น สายไฟฟ้าทนไฟ (Fire Resistant) ใช้ในศูนย์ข้อมูล (Data Center), ระบบฉุกเฉินและระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้ (Emergency and Fire Alarm Systems) และการเชื่อมต่อระหว่างระบบ (Electrical Wiring Interconnection System, EWIS) โดยสายไฟฟ้าชนิดทนไฟมีโครงสร้างหลักคือ เทปไมก้า (Mica Tape) โดยสามารถทนอุณหภูมิได้ 750°C ต่อการพักเทป 1 ชั้น ฉนวนและเปลือกนอกของสายไฟฟ้ามีส่วนผสมของสารหน่วงไฟและฮาโลเจนฟรี (Flame Retardant) สายไฟฟ้างานใต้น้ำ (Submersible) ใช้ในปั้มน้ำแบบจุ่มน้ำ (Submersible Pump), มอเตอร์ไฟฟ้า (Electric motors) สายไฟฟ้าชนิดงานใต้น้ำมีโครงสร้างหลัก คือตัวนำทองแดงชุบดีบุกสำหรับการถัก (Tinned Copper Wire Braid) เพื่อลดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากอินเวอร์เตอร์ (Inverter) เติร์ปยังมอเตอร์ไฟฟ้า (Electric motors) และปกป้องสายไฟฟ้าจากการกัดกร่อน ฉนวนและเปลือกนอกของสายไฟฟ้าคือ ยางอีทีลีนและยางไนไตรล์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามลำดับ (Ethylene Propylene Rubber – EPR, Nitrile-butadiene rubber, NBR) สายไฟฟ้างานในเหมืองแร่ (Mining) ใช้ในเหมืองแร่และเหมืองขุดเจาะ สายไฟฟ้าชนิดใช้งานในเหมืองแร่มีโครงสร้างหลัก คือ เกราะเส้นลวดอลูมิเนียม (Aluminium Wire Armor) เพื่อป้องกันแรงกดทับจากหินระหว่างการทำเหมืองแร่ ฉนวนและเปลือกนอกของสายไฟฟ้างานในเหมืองแร่ คือ ยางไนไตรล์ (Nitrile-butadiene rubber, NBR) ซึ่งมีคุณสมบัติทนต่อการกัดกร่อนจากสารเคมีและการขัดถู (Excellent Abrasion Resistance) สายไฟฟ้างานเรือและชายฝั่ง (Marine Offshore) ใช้สำหรับงานเดินเรือสมุทรและชายฝั่งทะเล สายไฟฟ้าชนิดงานเรือและชายฝั่งมีโครงสร้างหลัก คือ ตัวนำทองแดงชุบดีบุกสำหรับการถัก (Tinned Copper Wire Braid) เพื่อป้องกันการเกิดการทำให้ปฏิกิริยากับน้ำทะเล (Oxidation) และอลูมิเนียมลามิเนตเทป (Aluminium laminate tape) เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference, EMI) ฉนวนและเปลือกนอกของสายไฟฟ้างานเดินเรือและชายฝั่ง คือ ครอสลิงค์โพลีโอเลฟิน (Cross-linked polyolefin, XLPO) ซึ่งมีความยืดหยุ่น (Flexible), ต้านทานการลามไฟ (Flame Retardant), ทนต่อน้ำมัน (Oil Resistance), ทนต่อโคลน (Mud Resistance) และฮาโลเจนฟรี (Halogen-free)



รูปที่ 23 สายไฟฟ้าชนิดทนไฟ (Fire Resistant Cable)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 24 ลักษณะการใช้งานของสายไฟฟ้าทนไฟ (Fire Resistant Cable)



รูปที่ 25 สายไฟฟ้าชนิดงานใต้น้ำ (Submersible Cable)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 26 ลักษณะการใช้งานของสายไฟฟ้าชนิดงานใต้น้ำ (Submersible Cable)



รูปที่ 27 สายไฟฟ้าชนิดงานในเหมืองแร่ (Mining Cable)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 28 ลักษณะการใช้งานของสายไฟฟ้าชนิดงานในเหมือง (Mining Cable)



รูปที่ 29 สายไฟฟ้าชนิดงานเรือและชายฝั่ง (Marine and Offshore Cable)

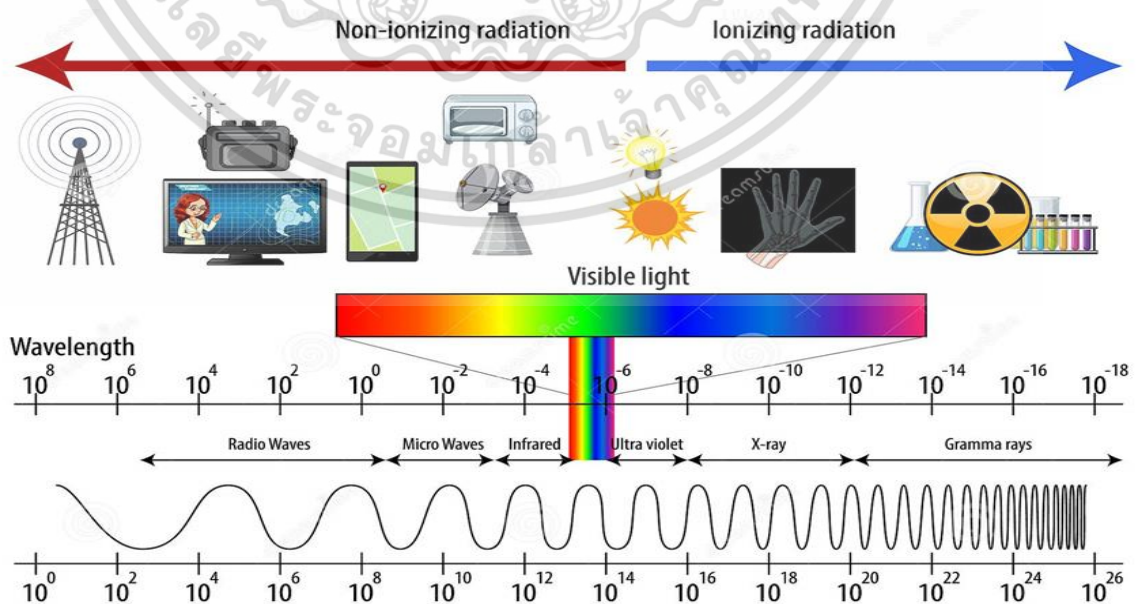
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 30 ลักษณะการใช้งานของสายไฟฟ้าชนิดงานเรือและชายฝั่ง (Marine and Offshore Cable)

2.11 สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าและการป้องกัน Electromagnetic Interference (EMI) and Protection

2.11.1 สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า หรือ Electromagnetic Interference (EMI) เป็นสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) และสนามไฟฟ้า (Electric Field) ที่เกิดจากหลายสาเหตุ เช่น ในธรรมชาติ เกิดจากรังสีคอสมิกของดวงอาทิตย์, ฟ้าแลบ, ฟ้าร้อง, ฟ้าผ่า, สนามแม่เหล็กโลกหรือเกิดจากแหล่งกำเนิดที่มนุษย์สร้างขึ้น อาทิ จากสายส่งไฟฟ้ากำลังหม้อแปลงไฟฟ้า, คลื่นโทรศัพท์เคลื่อนที่, คลื่นโทรทัศน์, จากเครื่องคอมพิวเตอร์ เป็นต้น



รูปที่ 31 สเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับสถานะแวดล้อมในการทำงานต่างๆไป เช่น โรงงานอุตสาหกรรม, อาคารสำนักงาน, บ้านเรือนที่อยู่อาศัย เป็นอีกบริเวณหนึ่งที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงปัญหาของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้ ทั้งสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำๆ (Low Frequency) จากสายส่งไฟฟ้า, หม้อแปลงไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงๆ (High Frequency) จากเครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เพราะเราต้องอาศัยในบริเวณดังกล่าวเป็นเวลาต่อเนื่องนานๆ หรืออาจตลอดชีวิต สนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหล่านี้ หากมีความแรงเกินระดับที่มาตรฐานสากลกำหนด อาจมีผลกระทบต่อสุขภาพ และจะรบกวนการทำงานของระบบสื่อสารต่างๆ เช่น ระบบคอมพิวเตอร์ จอมอนิเตอร์ ระบบสื่อสารโดยใช้สายตัวนำ (Wire communication) และระบบสื่อสารไร้สาย (Wireless communication) ได้

เมื่ออุปกรณ์สัมผัสกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหล่านี้ อุปกรณ์เหล่านั้นจะกลายเป็นตัวรับ อาจเป็นโดยตรงคือ สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ (Conducted EMI) หรือทางอ้อม คือ สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ (Radiated EMI) โดยสัญญาณรบกวนที่ถูกถ่ายโอนจากแหล่งกำเนิดไปยังตัวรับผ่านทางเส้นทางต่างๆจะถูกเรียกว่า สัญญาณรบกวนโดยตรง (Conducted EMI) เส้นทางที่สัญญาณรบกวนผ่านได้ อาทิ สายไฟฟ้า, จุดเชื่อมต่อสายไฟฟ้าแรงสูง แหล่งกำเนิด Conducted EMI เช่น มอเตอร์ไฟฟ้า, สวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลาย, DC/AC คอนเวอร์เตอร์, ไมโครคอนโทรลเลอร์, ระบบเครือข่ายจราจรอินเทอร์เน็ต

สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ (Radiated EMI) สัญญาณที่ไม่ต้องการการสัมผัสทางกายภาพ โดยจะเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางอากาศโดยตรงมี 2 ประเภทคือ Near Field และ Far Field การเกิดขึ้นของสัญญาณรบกวนมาจาก ระบบเรดาร์, มอเตอร์ไฟฟ้า, สวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลาย, DC/DC คอนเวอร์เตอร์, สัญญาณวิทยุ AM/FM, ระบบสายส่งไฟฟ้ากำลัง, อุปกรณ์การสื่อสาร

การป้องกันและลดผลสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า มีทั้งหมด 3 วิธี คือ 1. การกรองความถี่โดยใช้ฟิลเตอร์ 2. การนำสัญญาณรบกวนผ่านลงกราวด์ 3. การชิลด์ป้องกันสัญญาณรบกวน โดยการใช้วัสดุป้องกัน เช่น เหล็กกล้าคาร์บอน, ทองแดง, อลูมิเนียม, นิกเกิล เป็นต้น

งานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพสายไฟฟ้าเป็นหลักและประยุกต์ใช้ในรถยนต์ไฟฟ้าเพื่อลดผลจากสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่อาจจะทำให้ระบบรถยนต์ไฟฟ้าเกิดการขัดข้องและเสียหายได้

สายไฟฟ้าชนิดมีชิลด์ที่ผู้วิจัยนำมาศึกษา จัดอยู่ในอุปกรณ์ประเภท Conducted EMI และ Near Field Radiated EMI แต่ผลของ Conducted EMI จากสัญญาณ Drive จาก Inverter เข้าสู่ขดลวดมอเตอร์ จะเหมือนถูกลดทอนหรือกรองลงโดยธรรมชาติ เนื่องจากขดลวดมอเตอร์ไฟฟ้าคือ Low Pass Filter

ดังนั้น ส่วนที่จะมีผลต่อระบบสัญญาณไฟฟ้า การสื่อสาร หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆในรถไฟฟ้า จึงมีโอกาสได้รับผลกระทบจาก Radiated EMI มากกว่า ผู้วิจัยจึงออกแบบและพัฒนาประสิทธิภาพสายไฟฟ้าชนิดมีชิลด์ รวมทั้งทำการทดสอบก่อนนำไปประยุกต์ใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการประเมินประสิทธิภาพการป้องกันสัญญาณรบกวน สามารถประเมินได้จาก ประสิทธิภาพการชิลด์ (Shielding Effectiveness)

2.11.2 ประสิทธิภาพการชิลด์ (Shielding Effectiveness)

คืออัตราส่วนของขนาดระหว่างสนามไฟฟ้าตกกระทบ (Incident electric field) ต่อขนาดของ สนามไฟฟ้าที่ส่งผ่าน (Transmitted electric field) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 21

$$SE=20 \cdot \log_{10} \frac{E_i}{E_t} \text{ dB} \quad (21)$$

2.11.3 มาตรฐาน FCC (FCC Standards)

ในปี พ.ศ. 2470 ประเทศสหรัฐอเมริกาได้จัดตั้งองค์กร Federal Communications Commission เพื่อใช้ในการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สื่อสารที่ทำให้เกิดการแผ่กระจายพลังงานที่ความถี่วิทยุ (Radio-frequency energy) ในย่านความถี่ 9kHz ถึง 3000GHz ซึ่งมาตรฐานดังกล่าวได้ถูกออกแบบเพื่อรองรับการทำงานของอุปกรณ์ที่เกิดขึ้นทางสายตัวนำและทางอากาศ เพื่อควบคุมสินค้าที่มีการทำงานในย่านความถี่วิทยุ ไม่ให้เกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าไปกระทบต่อการทำงานของระบบอื่น ๆ โดยมาตรฐานดังกล่าวนี้ถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆเพื่อให้ครอบคลุมในการทำงานของแต่ละ อุปกรณ์ เช่น อุปกรณ์ความถี่วิทยุ (Radio-Frequency Devices) อุปกรณ์ที่ใช้งานในเชิงอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และอุปกรณ์ทางการแพทย์ (ISM) เป็นต้น

2.11.4 มาตรฐาน CISPR (CISPR standards)

ในปี พ.ศ. 2477 นานาชาติได้จัดตั้งมาตรฐาน CISPR ขึ้นมาเป็นส่วนหนึ่งของคณะกรรมการระหว่างประเทศว่าด้วยมาตรฐานอิเล็กทรอนิกส์ (International Electrotechnical Commission หรือ IEC) เพื่อหาวิธีการวัดและขีดจำกัดในการรบกวนของอุปกรณ์ในย่านความถี่วิทยุ ซึ่งหลาย ๆ ประเทศ ได้ใช้มาตรฐาน CISPR นี้เป็นต้นแบบ และถูกนำ มาดัดแปลงเพื่อร่างให้เป็นมาตรฐานที่บังคับใช้ในแต่ละประเทศ สำหรับประเทศไทยก็ได้มีการนำมาตรฐานนี้มาปรับใช้ด้วยเช่นกัน [80]



รูปที่ 32 สัญลักษณ์ FCC Standards และ IEC Standards

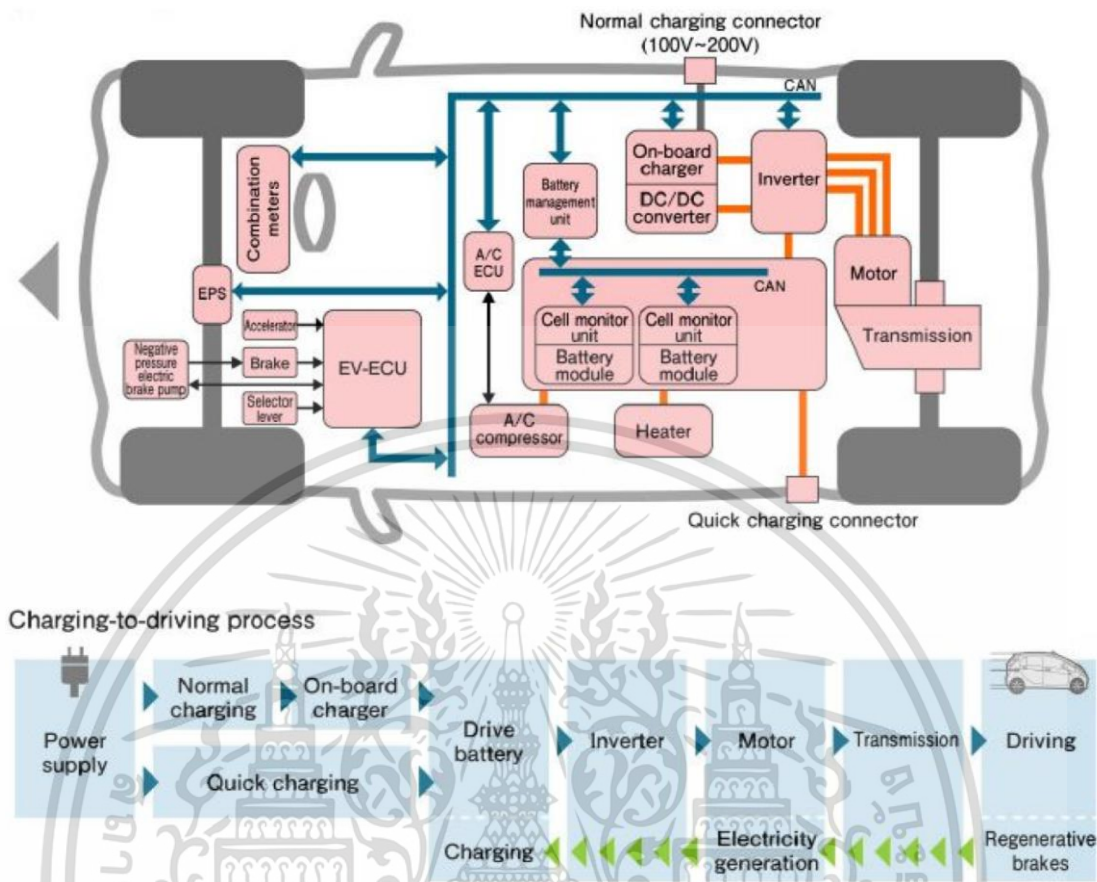
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12 ยานยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicles)

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมทางด้านยานยนต์ของโลกกำลังพัฒนายานยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยระบบไฟฟ้าและจะลดจำนวนการผลิตยานยนต์ขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์สันดาปภายใน ผู้วิจัยจึงมีเป้าหมายเพื่อศึกษาชิ้นส่วนสำคัญของรถยนต์นั่งไฟฟ้า โดยมุ่งเน้นไปยังสายส่งพลังงานในรถยนต์เป็นหลัก เพื่อศึกษาและวิจัยคุณสมบัติของสายไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในรถยนต์ไฟฟ้า โดยสายไฟฟ้าที่ผู้วิจัยได้นำมาแนะนำและทดสอบคือสายไฟฟ้าชนิดฉนวนไฟฟ้าครอสลิงค์โพลีโอเลฟิน (Cross-linked Polyolefin - XLPO) เนื่องจากมีคุณสมบัติทางกลและคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เหมาะสมในการติดตั้งภายในรถยนต์ไฟฟ้า เช่น ฉนวนไฟฟ้ามีคุณสมบัติความต้านทานของฉนวนสูง, การเกิดความสูญเสียในเนื้อฉนวนต่ำ, มีความอ่อนตัว-สามารถหักงอได้ง่าย โดยสามารถติดตั้งในพื้นที่แคบและมีมุมหักงอได้น้อย เช่น ขั้วแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า, มอเตอร์ไฟฟ้า อีกทั้งเมื่อเกิดเหตุที่ไม่คาดฝัน เช่น เกิดเพลิงไหม้สายไฟฟ้าชนิดฉนวนไฟฟ้าครอสลิงค์โพลีโอเลฟิน (Cross-linked Polyolefin - XLPO) จะมีควันน้อยและไม่เกิดควีนพิษ หรือ (Halogen Free)

ยานยนต์ไฟฟ้า มีส่วนประกอบหลักของระบบขับเคลื่อนและส่งกำลังของยานยนต์ไฟฟ้าที่สำคัญได้แก่

1. มอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับแทนที่เครื่องยนต์สันดาปภายใน (Traction Motor)
2. ระบบเกียร์ส่งกำลังซึ่งมีความใกล้เคียงกับรถยนต์สันดาปในปัจจุบัน (Transmission)
3. ระบบควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์ (Traction Motor Invertor) เป็นระบบอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อควบคุมรอบและแรงบิดของมอเตอร์
4. ระบบแบตเตอรี่และการจัดการแบตเตอรี่ สำหรับควบคุมการใช้พลังงานให้มีประสิทธิภาพสูงสุด ยาวนานและปลอดภัย (Battery Management System/ BMS)



รูปที่ 33 ระบบยานยนต์ไฟฟ้า (ที่มา : Mitsubishi)

รูปที่ 31 แสดงการไหลเวียนพลังงานไฟฟ้า (Power Flow) ในรถยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicles) และการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆโดย Power supply ทำหน้าที่ปล่อยประจุไฟฟ้าให้กับระบบเก็บพลังงาน (Battery) สามารถแยกได้เป็นการชาร์จแบบปกติ (Normal charging) แล้วผ่าน On-board charger ไปยัง Traction Battery และการชาร์จแบบเร็ว (Quick charging) ตรงเข้าไปเก็บไว้ในแบตเตอรี่ เมื่อมอเตอร์ต้นกำลัง (Traction Motor) ต้องการพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้ในการขับเคลื่อน ระบบควบคุมการขับเคลื่อน (Inverter) จะทำหน้าที่แปลงกระแสไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current) ที่กักเก็บอยู่ในแบตเตอรี่เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating Current) ในกรณีที่มอเตอร์ต้นกำลังต้องการไฟฟ้ากระแสสลับ และปรับเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้าและความถี่ของกระแสไฟฟ้าเพื่อควบคุมการทำงานของมอเตอร์ต้นกำลัง โดยมอเตอร์ต้นกำลังจะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล ส่งถ่ายกำลังผ่านชุดเกียร์ (Transmission) เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้า ในกรณีที่รถยนต์เกิดการเบรกหรือเคลื่อนที่ลงพื้นที่ลาดชัน จะเกิดกระบวนการ Regenerative braking ขึ้น โดยมอเตอร์ไฟฟ้าจะทำหน้าที่เป็นเจนเนอเรเตอร์ (Generator) เปลี่ยนพลังงานกลกลับเป็นพลังงานไฟฟ้า แล้วนำไปชาร์จเก็บไว้ในแบตเตอรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานทางกล สำหรับการนำมาใช้ในระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้า มอเตอร์ขับเคลื่อนมีหน้าที่หลักคือการสร้างแรงบิดเพื่อขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้า และเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าในขณะที่ยังวิ่ง

มอเตอร์ไฟฟ้ามีหลากหลายประเภท ในที่นี้จะนำเสนอเฉพาะมอเตอร์ไฟฟ้าที่ถูกนำมาใช้เป็นมอเตอร์ขับเคลื่อนในรถยนต์ไฟฟ้าที่ผู้วิจัยได้ทำการศึกษา โดยสามารถแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ตามลักษณะกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์รับมาเพื่อใช้ทำงาน ได้แก่ มอเตอร์กระแสตรง (DC Motor) และมอเตอร์กระแสสลับ (AC Motor) โดยการวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้เลือกใช้ Permanent Magnet Synchronous Motors ในการวิจัย เนื่องจากมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดและสร้างแรงบิดได้สูง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Motor) ที่นิยมนำมาใช้เป็น Traction motor ได้แก่ Induction motor (IM) ซึ่งเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าในประเภท Asynchronous motor และ Permanent magnet AC motor (PMAC) ซึ่งเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าในกลุ่ม Synchronous motor

ในมอเตอร์ประเภทมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor-IM) พลังงานจะถูกโอนไปยังโรเตอร์โดยการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า เหมือนการกระทำของหม้อแปลงไฟฟ้า มอเตอร์เหนี่ยวนำมีลักษณะคล้ายกับหม้อแปลงที่กัลลงหมุน โดยที่สเตเตอร์เป็นขดลวดปฐมภูมิและโรเตอร์เป็นขดลวดทุติยภูมิ มอเตอร์ไฟฟ้าแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet AC Motor) ไม่ได้มีการสร้างสนามแม่เหล็กจากขดลวดบนสเตเตอร์ แต่จะอาศัยสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแม่เหล็กถาวรแทน ในการปฏิสัมพันธ์กับสนามแม่เหล็กของโรเตอร์เพื่อสร้างแรงบิด มอเตอร์เหนี่ยวนำและมอเตอร์ไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรมีโครงสร้างพื้นฐานใกล้เคียงกัน

หน่วยกักเก็บพลังงาน (Battery) สำหรับหน่วยกักเก็บพลังงานในรถยนต์ไฟฟ้าแบบ Pure electric vehicle จะอยู่ในรูปแบบของแบตเตอรี่ (Battery) แบตเตอรี่ทำหน้าที่กักเก็บพลังงานไว้ภายในรถยนต์และทำหน้าที่ส่งผ่านพลังงานให้กับมอเตอร์ไฟฟ้า (Traction Motor) ในรูปแบบของกระแสไฟฟ้า ซึ่งประเภทของแบตเตอรี่ที่ใช้ในการวิจัยคือ แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Lithium-ion-batteries) เป็นแบตเตอรี่ที่โลหะลิเทียมเป็นขั้วแบตเตอรี่ มีส่วนประกอบที่สำคัญคือ ขั้วลบ มีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์บอนที่มีรูพรุน (เช่น แกรไฟต์) เคลือบบนแผ่นทองแดง ขั้วบวกเป็นลิเทียมเมทัลออกไซด์เคลือบบนแผ่นอะลูมิเนียม โดยมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ประกอบด้วยเกลือของลิเทียม เช่น LiPF_6 หรือ LiBF_4 ในตัวทำละลายเช่น เอทิลีนคาร์บอนเนต (Ethylene carbonate) ไดเอทิลคาร์บอนเนต (Diethyl carbonate) และ/หรือไดเมทิลคาร์บอนเนต (Dimethyl carbonate) และมีเยื่อเลือกผ่าน (Separator) กั้นระหว่างขั้วทั้งสอง ซึ่งทำจากพอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) และ/หรือพอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE)

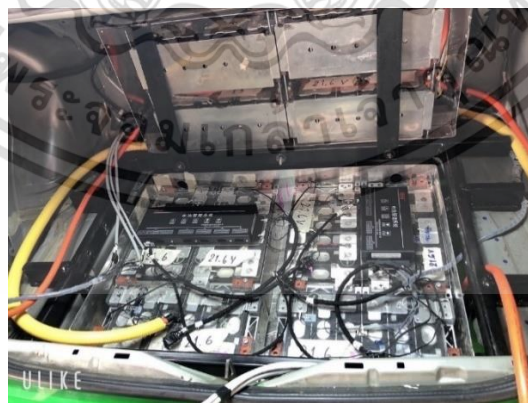
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 34 Traction motor, Construction of Induction Motor and Permanent Magnet AC Motor ที่ใช้ในรถยนต์ของบริษัท GM (ที่มา : GM Media)



รูปที่ 35 แสดงแบบร่างรถยนต์ไฟฟ้าและตำแหน่งติดตั้งแบตเตอรี่ (3D model of Electric Vehicles and high voltage battery pack)



รูปที่ 36 แบบเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน (Lithium-ion-batteries) ติดตั้งภายในรถยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicles)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

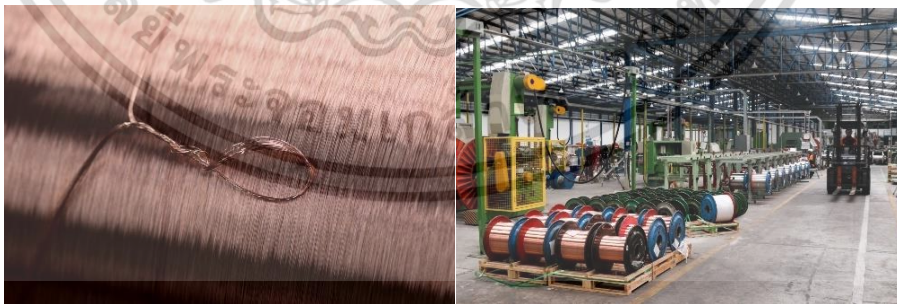
การทดสอบ

ผลงานวิจัยฉบับนี้นำเสนอการศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติของสายไฟฟ้าชนิดฉนวนครอสลิงค์โพลีเอเลฟินเพื่อประยุกต์ใช้ในรถยนต์ไฟฟ้า โดยงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 กรณีศึกษา คือ 1. ศึกษาคุณสมบัติและผลตอบสนองของเนื้อฉนวนครอสลิงค์โพลีเอเลฟินและการดิสชาร์จบางส่วน 2. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีของเนื้อฉนวนครอสลิงค์โพลีเอเลฟินด้วยวิธีการทดสอบ Scanning Electron Microscope-SEM, Fourier-transform Infrared Spectroscopy-FTIR และ Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence-WDXRF เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของสายไฟฟ้าที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยกรรมวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ 3. ประยุกต์ใช้สายไฟฟ้าชนิดฉนวนครอสลิงค์โพลีเอเลฟินชนิดไม่มีซิลล์และมีซิลล์ในรถยนต์ไฟฟ้า

3.1 ศึกษาคุณสมบัติผลตอบสนองของเนื้อฉนวนครอสลิงค์โพลีเอเลฟินและการดิสชาร์จบางส่วน

3.1.1 การทดสอบค่าความเป็นฉนวน (Insulation Resistance Test)

การทดลองนี้ เป็นการวัดค่าความเป็นฉนวนของฉนวนครอสลิงค์โพลีเอเลฟินส์ (XLPO) พิกัดแรงดันใช้งาน 600/1000V ขนาดพื้นที่หน้าตัดตัวนำ 2.5, 25, 35, 50 ตารางมิลลิเมตร โดยผสมตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อการครอสลิงค์ (Catalyst) ที่ 3%, 5%, 8% ของน้ำหนักเนื้อฉนวน XLPO โดยผลิตความยาวตัวอย่างละ 20 เมตร



รูปที่ 37 ก. และ ข. ตัวนำไฟฟ้าทองแดงเส้นฝอยยอบอ่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



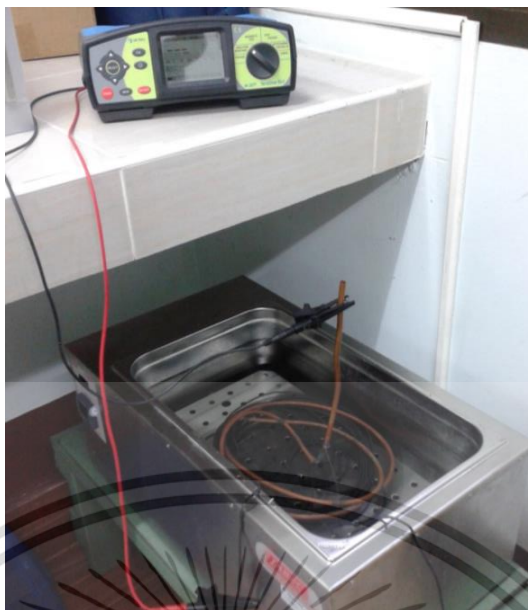
รูปที่ 38 ค. และ ง. ตัวนำไฟฟ้าทองแดงเส้นฝอยบอบอ่อนตีเกลียว และวัสดุผลิตฉนวนสายไฟฟ้าตามลำดับ



รูปที่ 39 จ. และ ฉ. ขั้นตอนการฉีกหุ้มสายไฟฟ้าและสายไฟฟ้าสำเร็จรูปตามลำดับ

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

สายไฟฟ้าผสมตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อการครอสลิงค์ (Catalyst) ที่ 3%, 5%, 8% จะถูกวัดค่าความเป็นฉนวนด้วยเครื่อง Metrel MI 2077 TeraOhm 5 kV แสดงดังรูปที่ 35 เพื่อควบคุมการทดลองให้ผลการทดลองที่ถูกต้องแม่นยำ จึงมีการใช้น้ำกลั่นบริสุทธิ์ไร้ไอออน (Deionized Water) เพื่อไม่ให้เกิดการจัดเรียงตัวของไอออนที่เจอบนอยู่ในน้ำและรบกวนผลการทดลอง ซึ่งการทดลองนี้เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60092-350:2014, IEC 60092-360:2016



รูปที่ 40 การทดสอบวัดค่าความเป็นฉนวน

2. วิธีการทดสอบ

การทดสอบค่าความเป็นฉนวนจะทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้แรงดันไฟฟ้า กระแสตรงในการทำทดสอบ ที่ 8V ถึง 500V

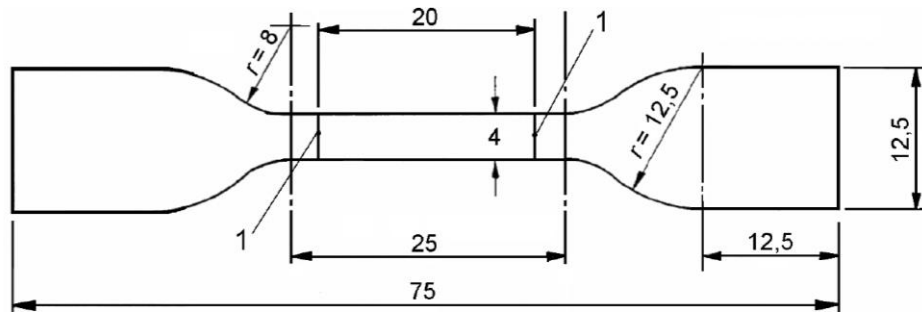
ก่อนเริ่มทำการทดสอบต้องทำการ Calibrate เครื่องมือการทดสอบก่อนทุกครั้ง จากนั้นนำ สายไฟฟ้าความยาวไม่ต่ำกว่า 15 เมตร แช่ในน้ำกลั่นไร้ไอออนเป็นเวลา 1 ชั่วโมงก่อนเริ่มการทดสอบ และทำการทดสอบที่แรงดัน 500V_{d.c.} เป็นระยะเวลา 5 นาที โดยแบ่งเป็น 3 กรณีศึกษา และบันทึก ผลการทดสอบ จากการทดสอบทั้ง 3 ดังนี้

- 1) การทดสอบวัดค่าความเป็นฉนวนของสายไฟฟ้าฉนวน XLPO ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาทาง เคมีเพื่อการครอสลิงค์ 3%
- 2) การทดสอบวัดค่าความเป็นฉนวนของสายไฟฟ้าฉนวน XLPO ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาทาง เคมีเพื่อการครอสลิงค์ 5%
- 3) การทดสอบวัดค่าความเป็นฉนวนของสายไฟฟ้าฉนวน XLPO ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาทาง เคมีเพื่อการครอสลิงค์ 8%

3.1.2 การทดสอบค่าแรงดึงและการยืดตัวของฉนวน (Tensile and Elongation Test)

การทดลองนี้ เป็นการวัดค่าแรงดึงและการยืดตัวของฉนวนครอสลิงค์โพลีเอเลฟินส์ (XLPO) พิกัดแรงดันใช้งาน 600/1000V ขนาดพื้นที่หน้าตัดตัวนำ 2.5, 25, 35, 50 ตารางมิลลิเมตร โดยผสม ตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อการครอสลิงค์ (Catalyst) ที่ 3%, 5%, 8% ของน้ำหนักเนื้อฉนวน XLPO ขนาดตัวอย่างทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60811-501:2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 41 ขนาดตัวอย่างทดสอบชนิด Dumb-bell สำหรับทดสอบ อ้างอิงจาก IEC 60811-501:2018



รูปที่ 42 การเตรียมตัวอย่าง Dumb-bell สำหรับทดสอบ



รูปที่ 43 การทดสอบแรงดึงและการยึดหดตัวของฉนวน XLPO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นแปะประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

สายไฟฟ้าผสมตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อการครอสลิงค์ (Catalyst) ที่ 3%, 5%, 8% จะถูกวัดค่าแรงดึงและการยืดตัวของฉนวนด้วยเครื่อง Hung TA Instrument Tensile Strength Tester Model HT-9112, S/N 1687 (2007), w/ Model HT-9635S Force Displacement Indicator, Digital Readout, Load Cell Type HT-8336-S, S/N 20479, 100 Kg Capacity แสดงดังรูปที่ 40 การทดลองนี้เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60092-350:2014, IEC 60092-360:2016, IEC 60811-501:2018



รูปที่ 44 Hung TA Instrument Tensile Strength Tester Model HT-9112, S/N 1687 (2007), with Model HT-9635S Force Displacement Indicator, Digital Readout, Load Cell Type HT-8336-S, S/N 20479, 100 Kg Capacity

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. วิธีการทดสอบ

เตรียมตัวอย่าง Dumb-bell ให้เป็นไปตามมาตรฐาน IEC60811-501:2018 เพื่อทำการทดสอบแรงดึงและการยืดหดตัว ทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้เครื่องมือ Tensile Strength Tester

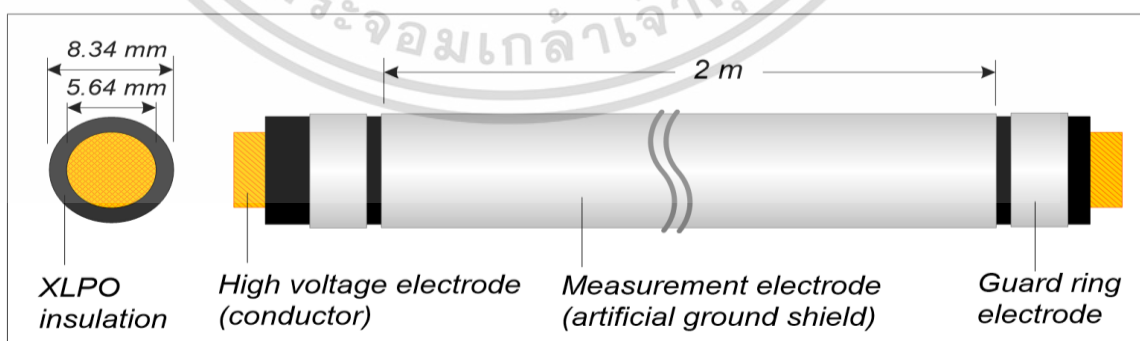
นำตัวอย่างทดสอบไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมงก่อนเริ่มทำการทดสอบ เพื่อให้ฉนวนเกิดการ Cross-linked ที่ดียิ่งขึ้น นำตัวอย่างทดสอบ Curing ใน Hot bath ที่อุณหภูมิ 90°C เป็นระยะเวลา 30 นาที และเข้า Oven ที่อุณหภูมิ 90°C 1 ชั่วโมง นำตัวอย่างทดสอบไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมงก่อนเริ่มการทดสอบ โดยแบ่งเป็น 3 กรณีศึกษา และบันทึกผลการทดสอบ จากการทดสอบทั้ง 3 ดังนี้

1. การทดสอบวัดค่าแรงดึงและการยืดหดตัวของสายไฟฟ้าฉนวน XLPO ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อการครอสลิงค์ 3%
2. การทดสอบวัดค่าแรงดึงและการยืดหดตัวของสายไฟฟ้าฉนวน XLPO ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อการครอสลิงค์ 5%
3. การทดสอบวัดค่าแรงดึงและการยืดหดตัวของสายไฟฟ้าฉนวน XLPO ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อการครอสลิงค์ 8%

3.1.3 การทดสอบค่ากระแสความนำและกระแสโพลาริเซชันดีโพลาริเซชันที่

อุณหภูมิและค่าสนามไฟฟ้าต่างๆ

การทดลองนี้ เป็นการวัดค่ากระแสความนำและกระแสโพลาริเซชันดีโพลาริเซชันที่อุณหภูมิและค่าสนามไฟฟ้าต่างๆ ของฉนวนครอสลิงค์โพลีโอเลฟินส์ (XLPO) พิกัดแรงดันใช้งาน 600/1000V ขนาดพื้นที่หน้าตัดตัวนำ 25 ตารางมิลลิเมตร โดยผสมตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อการครอสลิงค์ (Catalyst) ที่ 8% ของน้ำหนักเนื้อฉนวน XLPO ใช้ตัวอย่างในการทดสอบ 2 เมตร



รูปที่ 45 แบบจำลองสายไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ

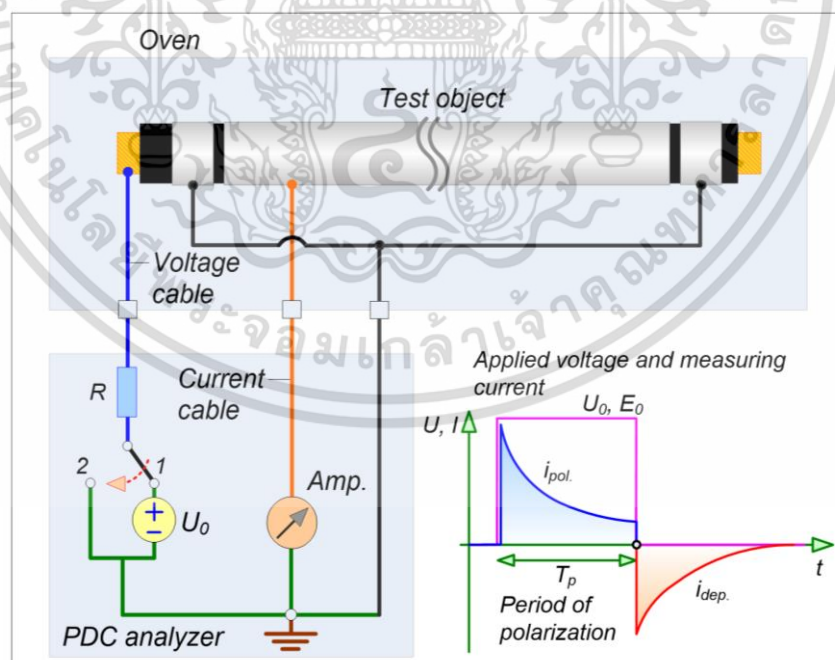
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 46 ตัวอย่างสายไฟฟ้าทดสอบหุ้มด้วยอลูมิเนียมเทปเพื่อทำหน้าที่เป็นกราวด์ของระบบ

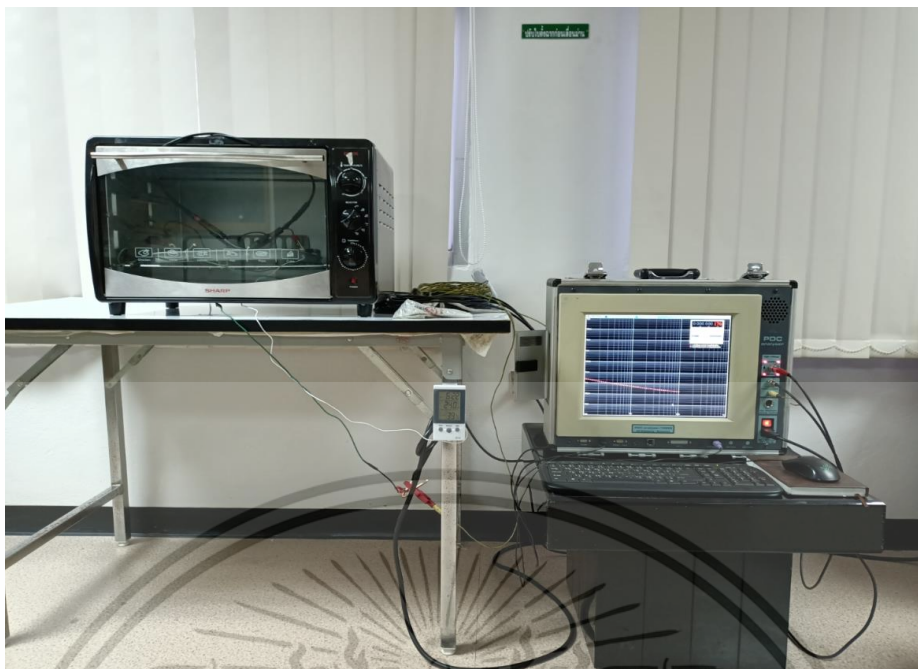
1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

สายไฟฟ้าผสมตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อการครอสลิงค์ (Catalyst) ที่ 8% จะถูกวัดค่ากระแสความนำและกระแสโพลาริไซเซชันดีโพลาริไซเซชันที่อุณหภูมิและค่าสนามไฟฟ้าต่างๆ ด้วยเครื่อง PDC-Analyser with supply source phantom-1000XE



รูปที่ 47 วงจรการวัดกระแสความนำและกระแสโพลาริไซเซชันดีโพลาริไซเซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 48 การวัดค่ากระแสความนำและกระแสโพลาร์ไรซ์เซชันดีโพลาร์ไรซ์เซชันที่อุณหภูมิ และค่าความเข้มสนามไฟฟ้าต่างๆ

2. วิธีการทดสอบ

ก่อนเริ่มทำการวัดกระแสโพลาร์ไรซ์เซชันดีโพลาร์ไรซ์เซชัน ต้องทำการดิสชาร์จประจุคงค้างในสายไฟฟ้า เนื่องจากอาจส่งผลกระทบต่อระดับกระแสโพลาร์ไรซ์เซชันและดีโพลาร์ไรซ์เซชันและทำให้ผลการทดลองมีความคาดเคลื่อนได้ โดยทำการดิสชาร์จประจุคงค้างเป็นระยะเวลา 300 วินาที

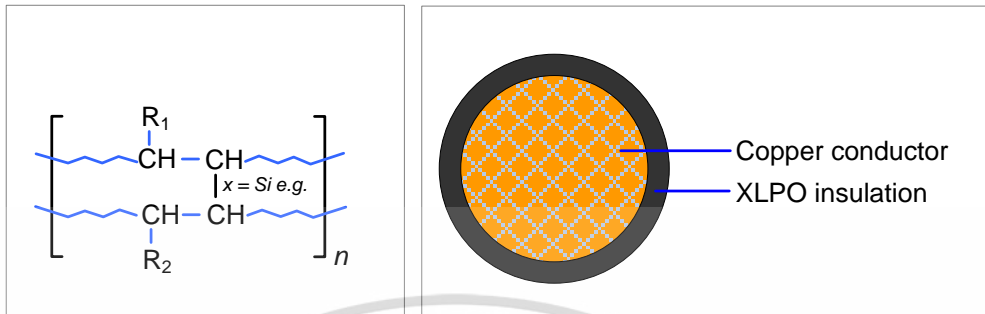
นำตัวอย่างสายไฟฟ้าชนิดเนื้อฉนวนครอสลิงค์โพลีเอเลฟินส์ที่ ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อการครอสลิงค์ 8% เข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 25°C, 50°C, 70°C และเริ่มป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ 250V, 500V, 1000V ตามลำดับ เป็นระยะเวลา 800 วินาที หลังจากนั้นดิสชาร์จประจุคงค้างเพื่อวัดค่ากระแสดีโพลาร์ไรซ์เซชันเป็นระยะเวลา 800วินาที และบันทึกผลการทดลอง โดยแบ่งการทดลองทั้งหมด 3 หัวข้อทดสอบดังนี้

1. การทดสอบวัดกระแสโพลาร์ไรซ์เซชันดีโพลาร์ไรซ์เซชันแรงดัน 250V_{dc} ที่อุณหภูมิ 25°C, 50°C, 70°C, ตามลำดับ
2. การทดสอบวัดกระแสโพลาร์ไรซ์เซชันดีโพลาร์ไรซ์เซชันแรงดัน 500V_{dc} ที่อุณหภูมิ 25°C, 50°C, 70°C, ตามลำดับ
3. การทดสอบวัดกระแสโพลาร์ไรซ์เซชันดีโพลาร์ไรซ์เซชันแรงดัน 1000V_{dc} ที่อุณหภูมิ 25°C, 50°C, 70°C, ตามลำดับ

3.1.4 การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนที่อุณหภูมิและค่าความโค้งงอของสายไฟฟ้าต่างๆ

การทดลองนี้ เป็นการการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนที่อุณหภูมิและค่าความโค้งงอของสายไฟฟ้าต่างๆ ของฉนวนครอสลิงค์โพลีเอเลฟินส์ (XLPO) พิกัดแรงดันใช้งาน 600/1000V ขนาดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นที่หน้าตัดตัวนำ 2.5 ตารางมิลลิเมตร โดยผสมตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อการครอสลิงค์ (Catalyst) ที่ 8% ของน้ำหนักเนื้อฉนวน XLPO ใช้ตัวอย่างในการทดสอบ 30 เซนติเมตร



รูปที่ 49 แบบจำลองสายไฟฟ้าชนิดฉนวน XLPO ขนาดพื้นที่หน้าตัดตัวนำ 2.5mm²



รูปที่ 50 ตัวอย่างสายไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบค่าความโค้งงอที่ 50 มิลลิเมตร



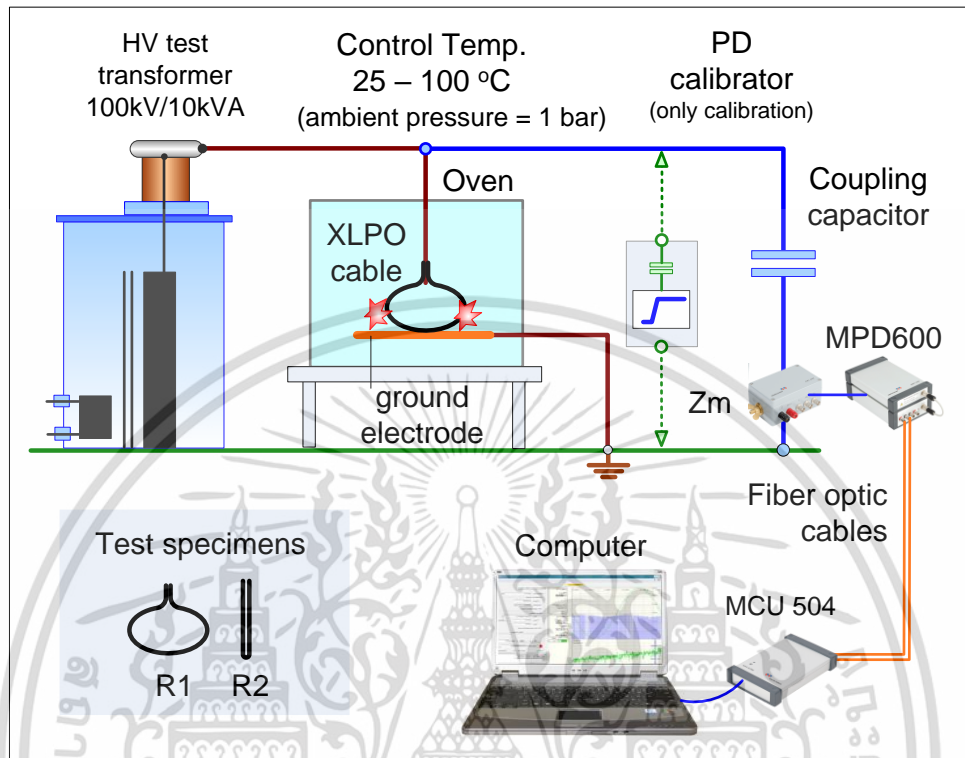
รูปที่ 51 ตัวอย่างสายไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบค่าความโค้งงอที่ 5 มิลลิเมตร

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

สายไฟฟ้าผสมตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อการครอสลิงค์ (Catalyst) ที่ 8% จะถูกทดสอบ ดิสชาร์จบางส่วนที่อุณหภูมิและค่าความโค้งงอของสายไฟฟ้าต่างๆ ด้วยเครื่อง PD Measurement Instrument Omicon MPD600, HV test transformer 22kV, 30kVA, Coupling capacitor (CK)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1,0 nF, PD calibrator 100 pF (IEC 60270:2000), Center frequency 250 kHz, Bandwidth 300 kHz



รูปที่ 52 วงจรการวัดการดีสชาร์จบางส่วนของสายไฟฟ้า



รูปที่ 53 หม้อแปลงทดสอบสายไฟฟ้าขนาดพิกัดใช้งาน 30kVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 54 การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนสายไฟฟ้าชนิดฉนวน XLPO

2. วิธีการทดสอบ

ก่อนเริ่มทำการทดสอบการดิสชาร์จบางส่วน ทำการ Calibrate เครื่องมือวัด และวัด Background noise ตามมาตรฐาน IEC 60270:2000 ทำการเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ 200V/s จนกระทั่งเกิดการดิสชาร์จบางส่วนหลังจากนั้น ทำการลดระดับแรงดันไฟฟ้าและบันทึกผลการทดลอง โดยแบ่งการทดลองทั้งหมด 8 หัวข้อทดสอบดังนี้

1. การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนของสายไฟฟ้าที่มีรัศมีโค้งงอ 50 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 25°C
2. การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนของสายไฟฟ้าที่มีรัศมีโค้งงอ 50 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 50°C
3. การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนของสายไฟฟ้าที่มีรัศมีโค้งงอ 50 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 70°C
4. การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนของสายไฟฟ้าที่มีรัศมีโค้งงอ 50 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 100°C
5. การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนของสายไฟฟ้าที่มีรัศมีโค้งงอ 5 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 25°C
6. การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนของสายไฟฟ้าที่มีรัศมีโค้งงอ 5 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 50°C
7. การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนของสายไฟฟ้าที่มีรัศมีโค้งงอ 5 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 70°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนของสายไฟฟ้าที่มีรัศมีโค้งงอ 5 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 100°C

3.2 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีของเนื้อฉนวนครอสลิงค์โพลีเอเลฟิน ด้วยวิธีการทดสอบ Scanning Electron Microscope-SEM, Fourier-transform Infrared Spectroscopy-FTIR และ Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence-WDXRF เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบแรงดันเบรกดาวนของสายไฟฟ้าที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยกรรมวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ

3.2.1 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของเนื้อฉนวนครอสลิงค์โพลีเอเลฟิน ด้วย Scanning Electron Microscope-SEM

การทดลองนี้เป็นการศึกษาพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ขนาดพื้นที่หน้าตัด 2.5 ตารางเซนติเมตร พิกัดแรงดันใช้งาน 600/1000V ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อการครอสลิงค์ 8% โดยทำการ Aging เนื้อฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง, 120 ชั่วโมง, 240 ชั่วโมง 360 ชั่วโมง และ 480 ชั่วโมงเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพทางพื้นผิวเนื้อฉนวน XLPO ใช้ตัวอย่างเนื้อฉนวนสายไฟฟ้าทั้งหมด 5 มิลลิเมตร

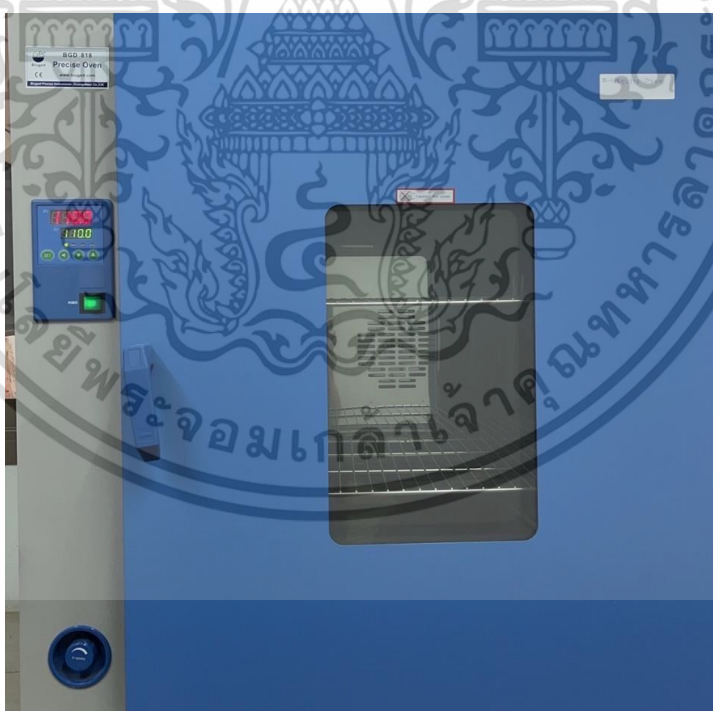


รูปที่ 55 ทำการ Aging เพื่อเตรียมตัวอย่างทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 56 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทำการ Aging ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นระยะเวลา 24, 120, 240, 360, และ 480 ชั่วโมงตามลำดับ



รูปที่ 57 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทำการ Aging ที่อุณหภูมิ 110°C เป็นระยะเวลา 24, 120, 240, 360, และ 480 ชั่วโมงตามลำดับ

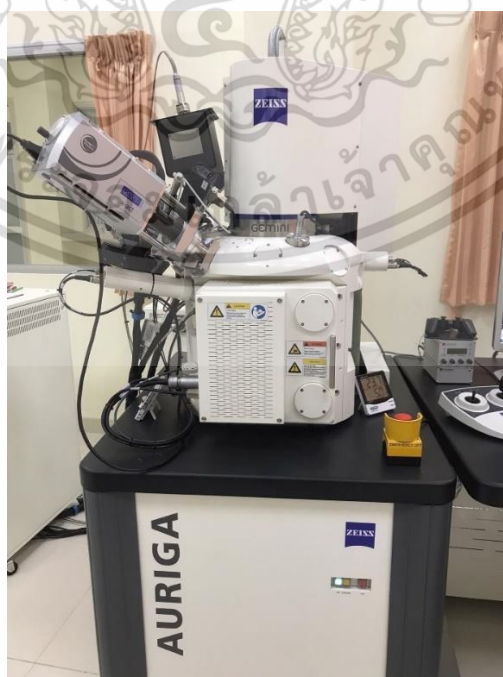
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 58 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทำการ Aging ที่อุณหภูมิ 125°C เป็นระยะเวลา 24, 120, 240, 360, และ 480 ชั่วโมงตามลำดับ

1. อุปกรณ์การทดสอบ

สายไฟฟ้าชนิดเนื้อฉนวน XLPO ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อการครอสลิงค์ 8% Aging ที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ ได้ถูกนำมาทดสอบที่เครื่อง JEOL JSM-6010LV Scanning Electron Microscope (W-SEM) กำลังขยาย 8x – 300,000 เท่า



รูปที่ 59 Zeiss Auriga Scanning Electron Microscope (FE-SEM)
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้เพื่อการวิจัยเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นใบเซอร์ใบอนุญาตการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. วิธีการทดสอบ

เริ่มทำการทดสอบโดยการนำตัวอย่างเนื้อฉนวน XLPO ที่ผ่านการ Aging ที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ ติดลงบนสตัฟ โดยการใส่เทปคาร์บอนในการยึดติดตัวอย่างกับสตัฟ โดยเทปคาร์บอนจะมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า และถุงมือที่ใช้ในการติดตัวอย่างควรเป็นถุงมือที่ไม่มีแบง เนื่องจากจะส่งผลต่อผลการทดลองได้ ทำการเก็บตัวอย่างเอาไว้ในกล่อง และทำการฉาบพื้นผิวตัวอย่างด้วยทองคำ เนื่องจากตัวอย่างที่เป็นฉนวนไฟฟ้าทำให้ไม่มีการนำอิเล็กตรอนเกิดขึ้น การฉาบพื้นผิวด้วยทองคำจึงทำให้เกิดการสะท้อนของอิเล็กตรอนและรูปที่แสดงออกมาจะชัดเจนยิ่งขึ้น จากนั้นทำการนำชิ้นงานทดสอบเข้าเครื่องปั๊มสุญญากาศเพื่อนำอากาศออกแล้วจึงทำการ Beam on เพื่อให้เกิดการปล่อยอิเล็กตรอนเกิดขึ้น ทำการโฟกัสรูปที่ต้องการ ด้วย Joystick และบันทึกรูปที่ความละเอียดต่างๆ โดยแบ่งออกเป็น 15 หัวข้อวิจัยดังนี้

1. ทำการศึกษากายภาพพื้นผิวเนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 24 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ Scanning Electron Microscope (SEM)
2. ทำการศึกษากายภาพพื้นผิวเนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ Scanning Electron Microscope (SEM)
3. ทำการศึกษากายภาพพื้นผิวเนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ Scanning Electron Microscope (SEM)
4. ทำการศึกษากายภาพพื้นผิวเนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ Scanning Electron Microscope (SEM)
5. ทำการศึกษากายภาพพื้นผิวเนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ Scanning Electron Microscope (SEM)
6. ทำการศึกษากายภาพพื้นผิวเนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 24 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ Scanning Electron Microscope (SEM)
7. ทำการศึกษากายภาพพื้นผิวเนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ Scanning Electron Microscope (SEM)
8. ทำการศึกษากายภาพพื้นผิวเนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ Scanning Electron Microscope (SEM)
9. ทำการศึกษากายภาพพื้นผิวเนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ Scanning Electron Microscope (SEM)
10. ทำการศึกษากายภาพพื้นผิวเนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ Scanning Electron Microscope (SEM)
11. ทำการศึกษากายภาพพื้นผิวเนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 24 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ Scanning Electron Microscope (SEM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. ทำการศึกษาภาพกายภาพพื้นผิวเนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ Scanning Electron Microscope (SEM)
13. ทำการศึกษาภาพกายภาพพื้นผิวเนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ Scanning Electron Microscope (SEM)
14. ทำการศึกษาภาพกายภาพพื้นผิวเนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ Scanning Electron Microscope (SEM)
15. ทำการศึกษาภาพกายภาพพื้นผิวเนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ Scanning Electron Microscope (SEM)

3.2.2 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของเนื้อฉนวนครอสลิงค์โพลีเอเลฟินด้วย Fourier-transform Infrared Spectroscopy-FTIR

การทดลองนี้เป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของเนื้อฉนวน XLPO ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อการครอสลิงค์ 8% โดยทำการ Aging เนื้อฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นระยะเวลา 24, 120, 240, 360 และ 480 ชั่วโมง เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของเนื้อฉนวน XLPO ใช้ตัวอย่างเนื้อฉนวนสายไฟฟ้าทั้งหมด 1 เซนติเมตร

1. อุปกรณ์การทดสอบ

สายไฟฟ้าชนิดเนื้อฉนวน XLPO ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อการครอสลิงค์ 8% Aging ที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ ได้ถูกนำมาทดสอบที่เครื่อง Fourier Transform Spectroscopy (FT-IR)



รูปที่ 60 เครื่องมือวิเคราะห์ Fourier Transform Spectroscopy (FT-IR) Bruker รุ่น Tensor 27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. วิธีการทดสอบ

นำตัวอย่างเนื้อฉนวน XLPO ที่ผ่านการ Aging ที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ ทำความสะอาดตัวอย่างและวางตัวอย่างลงบนแท่นอุณหภูมิเนี่ยมสำหรับวางตัวอย่าง และบันทึกผลการทดลองที่ โดยแบ่งออกเป็น 15 หัวข้อวิจัยดังนี้

1. การศึกษาลักษณะทางเคมีเนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 24 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)
2. การศึกษาลักษณะทางเคมีเนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)
3. การศึกษาลักษณะทางเคมีเนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)
4. การศึกษาลักษณะทางเคมีเนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)
5. การศึกษาลักษณะทางเคมีเนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)
6. การศึกษาลักษณะทางเคมีเนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 24 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)
7. การศึกษาลักษณะทางเคมีเนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)
8. การศึกษาลักษณะทางเคมีเนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)
9. การศึกษาลักษณะทางเคมีเนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)
10. การศึกษาลักษณะทางเคมีเนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)
11. การศึกษาลักษณะทางเคมีเนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 24 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)
12. การศึกษาลักษณะทางเคมีเนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)
13. การศึกษาลักษณะทางเคมีเนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)
14. การศึกษาลักษณะทางเคมีเนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15. การศึกษาลักษณะทางเคมีเนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)

3.2.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของเนื้อฉนวนครอสลิงค์โพลีเอเลฟินด้วย Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence (WD-XRF)

การทดลองนี้เป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของเนื้อฉนวน XLPO ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อการครอสลิงค์ 8% โดยทำการ Aging เนื้อฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นระยะเวลา 24, 120, 240, 360 และ 480 ชั่วโมง เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของเนื้อฉนวน XLPO ใช้ตัวอย่างเนื้อฉนวนสายไฟฟ้าทั้งหมด 1 เซนติเมตร

1. อุปกรณ์การทดสอบ

สายไฟฟ้าชนิดเนื้อฉนวน XLPO ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อการครอสลิงค์ 8% Aging ที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ ได้ถูกนำมาทดสอบที่เครื่อง Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence (WD-XRF) Rigaku-Supermini 200



รูปที่ 61 การเตรียมตัวอย่างฉนวน XLPO เพื่อทำการทดสอบ Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence (WD-XRF)



รูปที่ 62 เครื่องมือทดสอบ Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence (WD-XRF)

2. วิธีการทดสอบ

นำตัวอย่างเนื้อฉนวน XLPO ที่ผ่านการ Aging ที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ ทำความสะอาดตัวอย่างและติดตั้งตัวอย่างลงบนแท่นอลูมิเนียมสำหรับวางตัวอย่าง และบันทึกผลการทดลอง โดยแบ่งออกเป็น 15 หัวข้อวิจัยดังนี้

1. การศึกษาลักษณะทางเคมีเนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 24 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence (WD-XRF)
2. การศึกษาลักษณะทางเคมีเนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence (WD-XRF)
3. การศึกษาลักษณะทางเคมีเนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence (WD-XRF)
4. การศึกษาลักษณะทางเคมีเนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence (WD-XRF)
5. การศึกษาลักษณะทางเคมีเนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence (WD-XRF)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. การศึกษาลักษณะทางเคมีเนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 24 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence (WD-XRF)
7. การศึกษาลักษณะทางเคมีเนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence (WD-XRF)
8. การศึกษาลักษณะทางเคมีเนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence (WD-XRF)
9. การศึกษาลักษณะทางเคมีเนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence (WD-XRF)
10. การศึกษาลักษณะทางเคมีเนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence (WD-XRF)
11. การศึกษาลักษณะทางเคมีเนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 24 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence (WD-XRF)
12. การศึกษาลักษณะทางเคมีเนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence (WD-XRF)
13. การศึกษาลักษณะทางเคมีเนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence (WD-XRF)
14. การศึกษาลักษณะทางเคมีเนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence (WD-XRF)
15. การศึกษาลักษณะทางเคมีเนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence (WD-XRF)

3.2.4 การศึกษาแรงดันเบรกดาวน์ของเนื้อฉนวนครอสลิงค์โพลีเอเลฟิน

การทดลองนี้เป็นการศึกษาระดับแรงดันเบรกดาวน์ของเนื้อฉนวน XLPO ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อการครอสลิงค์ 8% โดยทำการ Aging เนื้อฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นระยะเวลา 24, 120, 240, 360 และ 480 ชั่วโมง เพื่อวิเคราะห์ระดับแรงดันเบรกดาวน์ที่เปลี่ยนแปลงไปของเนื้อฉนวน XLPO ใช้ตัวอย่างสายไฟฟ้าทั้งหมด 150 เมตร

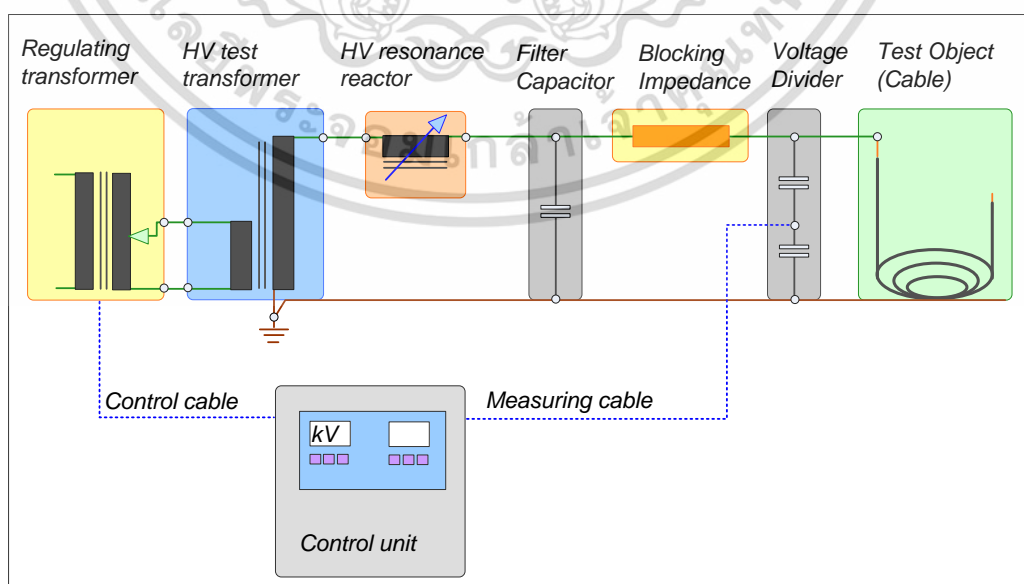
สายไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบหาแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนนี้ จะใช้สายไฟฟ้าฉนวน XLPE พิกัดแรงดัน 0.6/1kV ขนาดพื้นที่หน้าตัดตัวนำ 1.5 ตารางมิลลิเมตร ความยาว 15 เมตร จำนวนทั้งหมด 10 เส้น



รูปที่ 63 สายไฟฟ้าชนิดฉนวน XLPO สำหรับทดสอบแรงดันเบรกดาวน์

1. วงจรและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

การทดสอบเพื่อหาค่าแรงดันเบรกดาวน์จะทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ตามมาตรฐาน IEC 60270:2000



รูปที่ 64 วงจรทดสอบระดับแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวน XLPO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. วิธีการทดสอบ

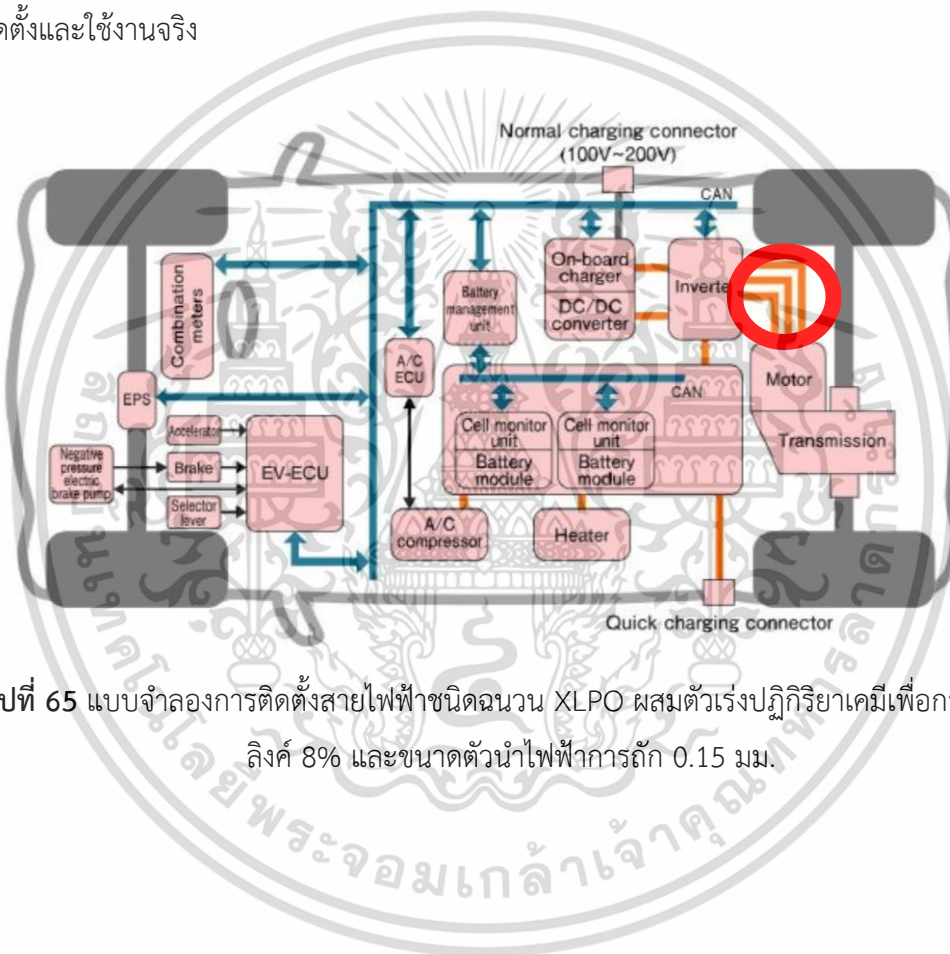
สายไฟฟ้าที่ทำการทดสอบจะถูกจ่ายแรงดันด้วย Exciter transformer จากศูนย์จนกระทั่งฉนวนเกิดการเบรกดาวน์ด้วยอัตรา 1kV/s โดยแบ่งเป็น 15 กรณีศึกษา และบันทึกผลการทดสอบ

1. การศึกษาแรงดันเบรกดาวน์เนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 24 ชั่วโมง
2. การศึกษาแรงดันเบรกดาวน์เนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง
3. การศึกษาแรงดันเบรกดาวน์เนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง
4. การศึกษาแรงดันเบรกดาวน์เนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง
5. การศึกษาแรงดันเบรกดาวน์เนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง
6. การศึกษาแรงดันเบรกดาวน์เนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 24 ชั่วโมง
7. การศึกษาแรงดันเบรกดาวน์เนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง
8. การศึกษาแรงดันเบรกดาวน์เนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง
9. การศึกษาแรงดันเบรกดาวน์เนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง
10. การศึกษาแรงดันเบรกดาวน์เนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง
11. การศึกษาแรงดันเบรกดาวน์เนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 24 ชั่วโมง
12. การศึกษาแรงดันเบรกดาวน์เนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง
13. การศึกษาแรงดันเบรกดาวน์เนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง
14. การศึกษาแรงดันเบรกดาวน์เนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง
15. การศึกษาแรงดันเบรกดาวน์เนื้อฉนวน XLPO โดย Aging ที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

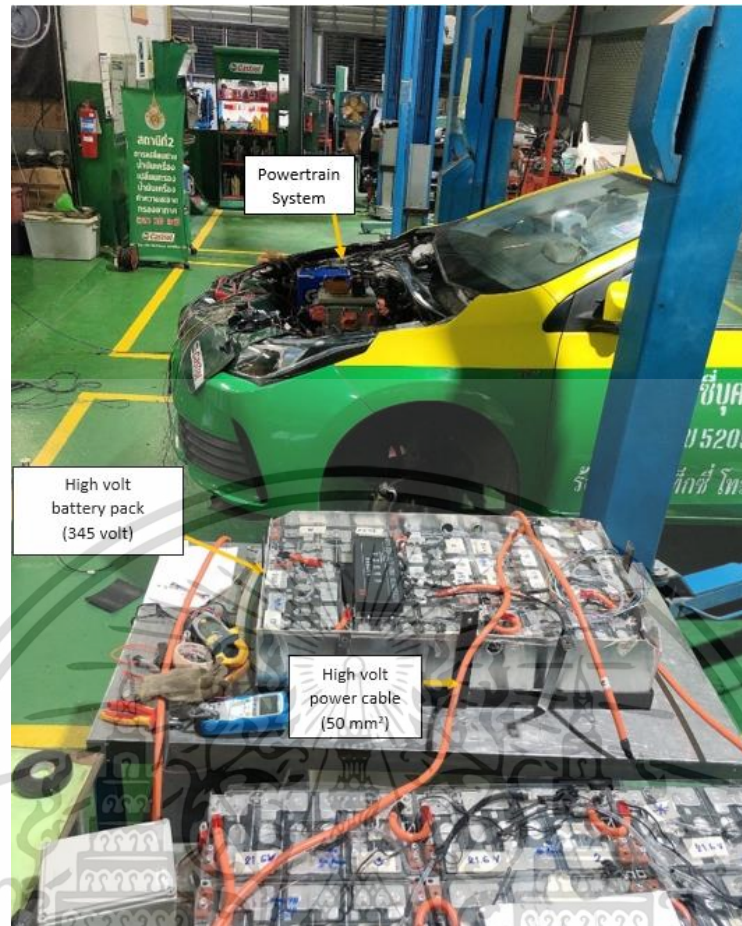
3.3 การประยุกต์ใช้สายไฟฟ้าชนิดฉนวนครอสลิงค์โพลีเอเลฟินในรถยนต์ไฟฟ้า

ในปัจจุบันสายไฟฟ้าที่ใช้ในรถยนต์ไฟฟ้าเป็นสายไฟฟ้าชนิดพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) งานวิจัยนี้จึงใช้สายไฟฟ้าชนิดฉนวน XLPO ที่ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาขึ้น คือสายไฟฟ้าชนิดฉนวน XLPO ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีเพื่อการครอสลิงค์ 8% และขนาดตัวนำไฟฟ้าในการถักหุ้ม 0.15 มม เพื่อติดตั้งในรถยนต์ไฟฟ้าเนื่องจากมีคุณสมบัติทางกายภาพ, ทางเคมี และทางไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดต่อการใช้งาน ซึ่งสายไฟฟ้าฉนวน XLPO ถูกติดตั้งระหว่างตำแหน่งระบบต้นกำลังและระบบอินเวอร์เตอร์ เนื่องจากสัญญาณที่ได้จากการไดรฟ์มอเตอร์มีความถี่สูงและมีฮาร์มอนิกส์ปนมาด้วย จึงจำเป็นต้องใช้สายไฟฟ้าแบบมีชีลล์ เพื่อศึกษาคุณสมบัติและประสิทธิภาพของสายไฟฟ้าเมื่อถูกติดตั้งและใช้งานจริง



รูปที่ 65 แบบจำลองการติดตั้งสายไฟฟ้าชนิดฉนวน XLPO ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีเพื่อการครอสลิงค์ 8% และขนาดตัวนำไฟฟ้าการถัก 0.15 มม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 66 Lithium-ion Battery pack from ADVISOR 456.5 Volt 130Ah 16 packs in series, PMSM, 37 kW by 3 in 1 BYD series



รูปที่ 67 เครื่องมือเพื่อศึกษาคุณสมบัติประสิทธิภาพของสายไฟฟ้า

Digital Storage Oscilloscope GDS-1074B วัดผลการทดสอบที่ตำแหน่ง ตำแหน่งระบบต้น
กำลังและระบบอินเวอร์เตอร์ ด้วย EMI Near Field Probe

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 68 รถยนต์ไฟฟ้าที่ติดตั้งสายไฟฟ้าชนิดฉนวน XLPO เสร็จสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดสอบ

4.1 ผลการทดสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติ, ผลตอบสนองของเนื้อฉนวนครอสลิงค์โพลีไอเลฟินและการดิสชาร์จบางส่วน

ในการทดสอบข้อที่ 4.1 ได้ทำการทดสอบค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้า โดยวัดค่าความเป็นฉนวนไฟฟ้า ของสายไฟฟ้าฉนวน XLPO พิกัด 0.6/1kV ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อการครอสลิงค์ที่ 3% 5% 8% โดยใช้ น้ำกลั่นบริสุทธิ์ไร้ไอออน (Deionized Water) เพื่อไม่ให้เกิดการจัดเรียงตัวของไอออนที่เจอบนอยู่ในน้ำและรบกวนผลการทดลอง หลังจากนั้นทดสอบค่าแรงดึงและการยืดตัวของฉนวน ทดสอบค่ากระแสความนำและกระแสโพลาริซ์เซชันดีโพลาริซ์เซชันที่อุณหภูมิและค่าสนามไฟฟ้าต่างๆ ทดสอบดิสชาร์จบางส่วนที่อุณหภูมิและค่าความโค้งงอของสายไฟฟ้าต่างๆ

ผลการทดสอบค่าความเป็นฉนวนไฟฟ้า ดังตารางที่ 21 ผลการทดสอบค่าแรงดึงและการยืดตัวของฉนวน ดังตารางที่ 22 ผลการทดสอบค่ากระแสโพลาริซ์เซชันดีโพลาริซ์เซชัน, ค่าความนำไฟฟ้า, ค่าเปอร์มิตติวิตี, แฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก, ค่าความจุไฟฟ้า ที่ค่าสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิต่างๆที่อุณหภูมิและค่าสนามไฟฟ้าต่างๆ ดังรูปที่ 65-75 ค่าความจุไฟฟ้าที่ 50Hz, ค่าพลังงานการกระตุ้น แสดงดังตารางที่ 23-24 ผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนที่อุณหภูมิและค่าความโค้งงอของสายไฟฟ้าต่างๆ ดังรูปที่ 76-79

ตารางที่ 21 แสดงผลการทดสอบค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้าอัตราส่วนผสมตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อการครอสลิงค์ 3% 5% 8%

ค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้า ($M\Omega/km$)		
ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อการครอสลิงค์ (%)		
อัตราส่วนผสม 3%	อัตราส่วนผสม 5%	อัตราส่วนผสม 8%
4524	5252	7123
4117	5468	7749
4464	4991	7582
4222	5134	7658
3978	5090	7874
4198	5112	7591
4578	5551	7529
4487	5142	7243

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 21 (ต่อ) แสดงผลการทดสอบค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้าอัตราส่วนผสมตัวเร่งปฏิกิริยา
เพื่อการครอสลิงค์ 3% 5% 8%

ค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้า (M Ω /km)		
ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อการครอสลิงค์ (%)		
อัตราส่วนผสม 3%	อัตราส่วนผสม 5%	อัตราส่วนผสม 8%
4489	5241	7611
4543	5859	7776
4567	5733	7991
4218	5594	7716
3999	5762	7282
4021	5918	7294
4273	5471	7401
4535	5168	7469
4491	5991	7706
4532	5363	7333
4558	5425	7876
4006	5643	7966
4191	5384	7262
4487	5549	7964
4493	5912	7819
4782	5254	7851
4645	5331	7662
4539	5703	7591
4655	5578	7563
4232	5212	7678
4210	5591	7733
4670	5234	7121
3907	5236	7972
4392	5575	7407
4497	5327	7644
4694	5503	7469
4551	5376	7385

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 21 (ต่อ) แสดงผลการทดสอบค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้าอัตราส่วนผสมตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อการครอสลิงค์ 3% 5% 8%

ค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้า (M Ω /km)		
ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อการครอสลิงค์ (%)		
อัตราส่วนผสม 3%	อัตราส่วนผสม 5%	อัตราส่วนผสม 8%
4559	5094	7159
4658	5137	7289

ตารางที่ 22 แสดงผลการทดสอบค่าแรงดึงและการยืดหดตัวของเนื้อฉนวน อัตราส่วนผสมตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อการครอสลิงค์ 3% 5% 8%

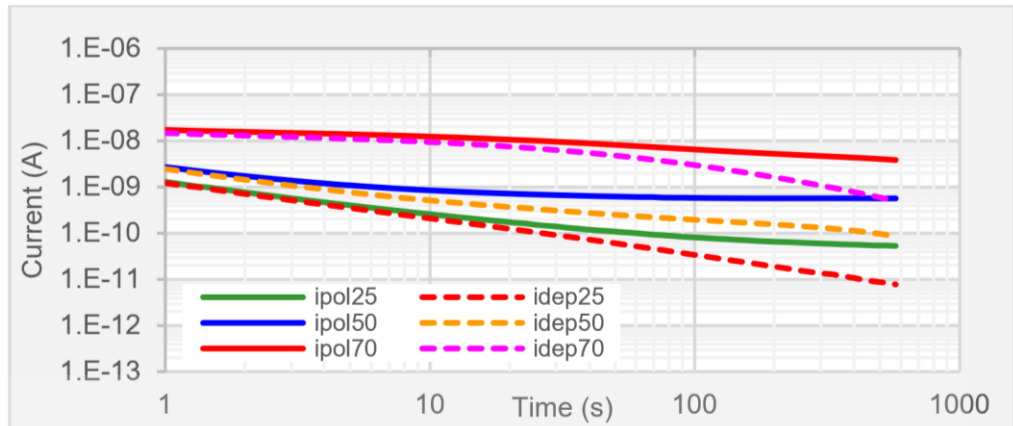
ค่าแรงดึงและการยืดหดตัวของเนื้อฉนวน (N/mm ² , %)					
ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อการครอสลิงค์ (%)					
อัตราส่วนผสม 3%		อัตราส่วนผสม 5%		อัตราส่วนผสม 8%	
แรงดึง (N/mm ²)	การยืดตัว %	แรงดึง (N/mm ²)	การยืดตัว %	แรงดึง (N/mm ²)	การยืดตัว %
11.4	163	13.1	185	16.6	209
12.0	165	12.8	186	16.7	184
11.4	159	13.2	170	19.3	233
12.6	158	13.4	181	19.1	239
11.8	155	13.1	180	18.9	223
11.8	159	13.1	181	18.5	218
11.4	165	13.0	179	19.3	208
11.2	155	13.4	175	18.9	195
12.0	163	13.1	179	20.2	199
11.4	164	12.9	175	19.3	206
11.6	155	13.6	176	16.6	198
11.2	157	13.4	184	16.6	214
12.0	166	13.0	183	18.7	202
12.0	167	13.0	178	19.5	218
11.8	155	12.8	186	20.2	220
11.4	163	13.1	185	18.5	214
11.8	165	13.4	186	18.9	201

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

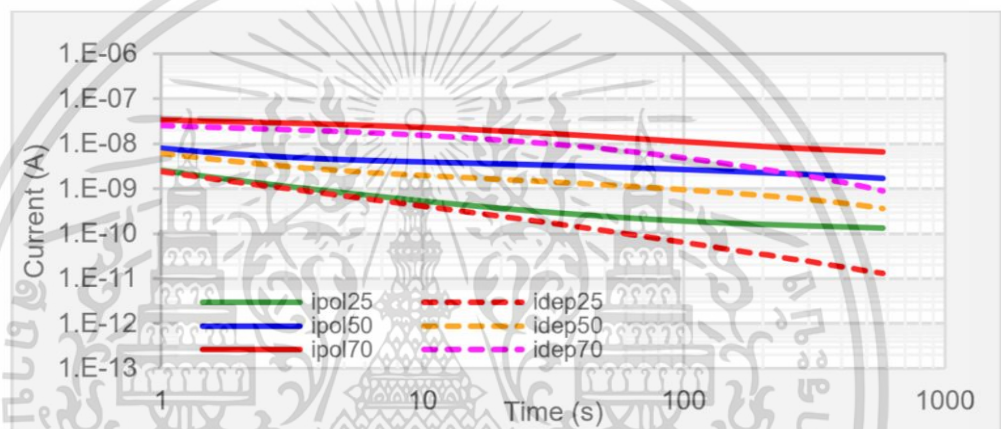
ตารางที่ 22 (ต่อ) แสดงผลการทดสอบค่าแรงดึงและการยืดหดตัวของเนื้อฉนวน อัตราส่วนผสมตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อการครอสลิงค์ 3% 5% 8%

ค่าแรงดึงและการยืดหดตัวของเนื้อฉนวน (N/mm ² , %)					
ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อการครอสลิงค์ (%)					
อัตราส่วนผสม 3%		อัตราส่วนผสม 5%		อัตราส่วนผสม 8%	
แรงดึง (N/mm ²)	การยืดตัว %	แรงดึง (N/mm ²)	การยืดตัว %	แรงดึง (N/mm ²)	การยืดตัว %
11.2	158	13.2	176	19.2	210
12.0	161	13.2	188	18.9	200
11.8	155	12.9	190	16.8	212
11.7	166	13.2	171	19.3	223
11.4	156	12.8	181	19.4	213
11.4	164	13.0	179	18.7	201
12.0	155	13.4	188	19.2	213
11.4	165	13.0	184	18.9	223
11.2	164	13.1	175	18.9	210
11.8	156	12.8	180	19.1	196
12.0	164	13.0	189	16.7	197
11.4	159	13.4	174	20.2	216
11.7	165	13.4	173	16.6	222
11.4	157	13.4	188	20.1	214
12.0	156	13.1	177	20.3	202
11.6	159	13.6	176	19.3	197
11.4	165	13.1	180	20.2	222
11.2	163	13.0	172	18.9	208
11.7	167	13.1	181	19.3	202
11.6	159	12.9	178	19.5	207
11.8	161	13.6	177	16.6	212
12.0	156	13.4	181	18.9	216
11.7	161	13.2	180	18.7	210

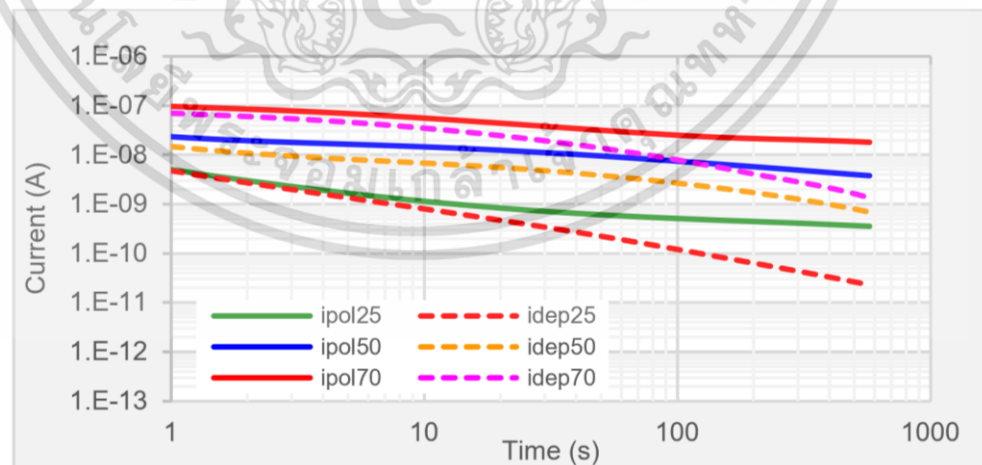
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 69 กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน ที่ $E_0 = 0.25$ kV/mm และอุณหภูมิค่าต่างๆ

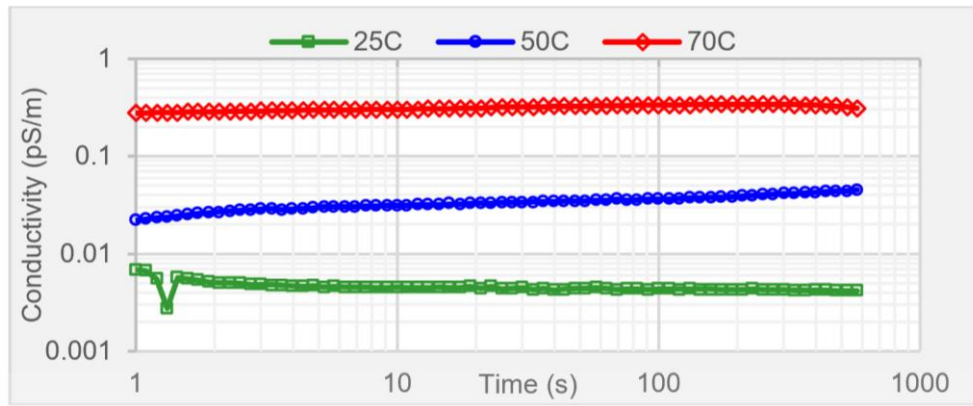


รูปที่ 70 กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน ที่ $E_0 = 0.5$ kV/mm และอุณหภูมิค่าต่างๆ

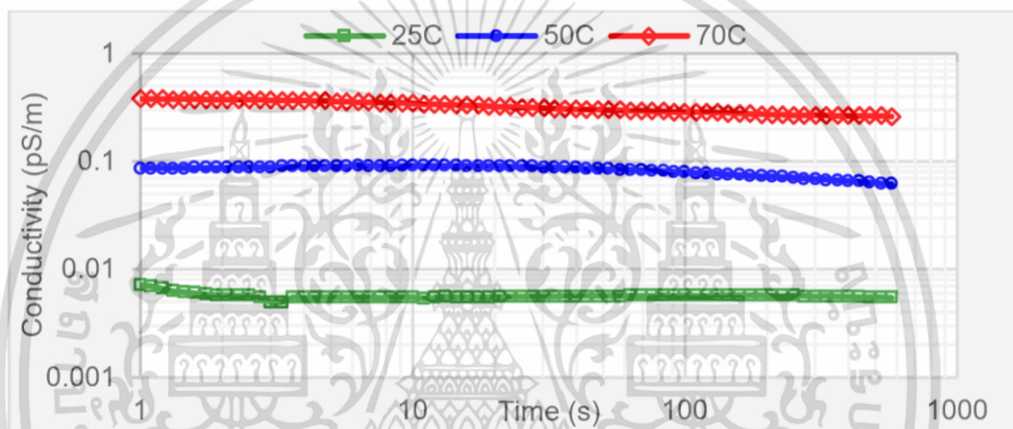


รูปที่ 71 กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน ที่ $E_0 = 1.0$ kV/mm และอุณหภูมิค่าต่างๆ

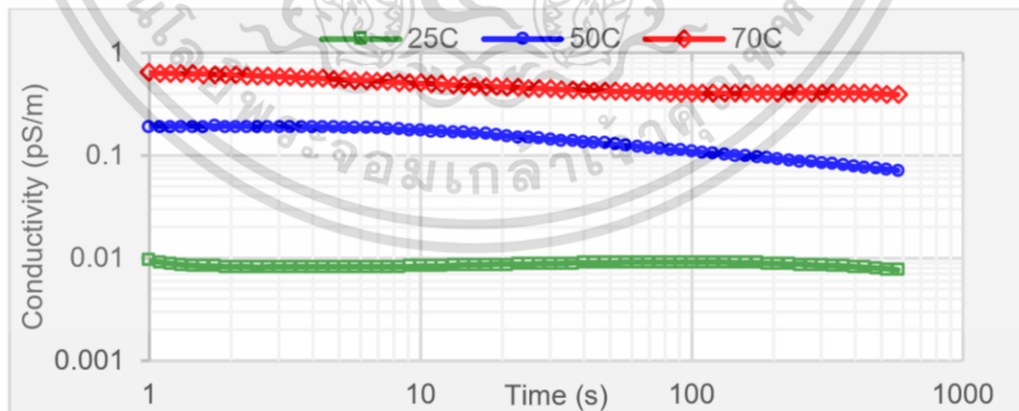
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 72 ค่าความนำไฟฟ้ากระแสตรง ที่ $E_0 = 0.25$ kV/mm และอุณหภูมิค่าต่างๆ

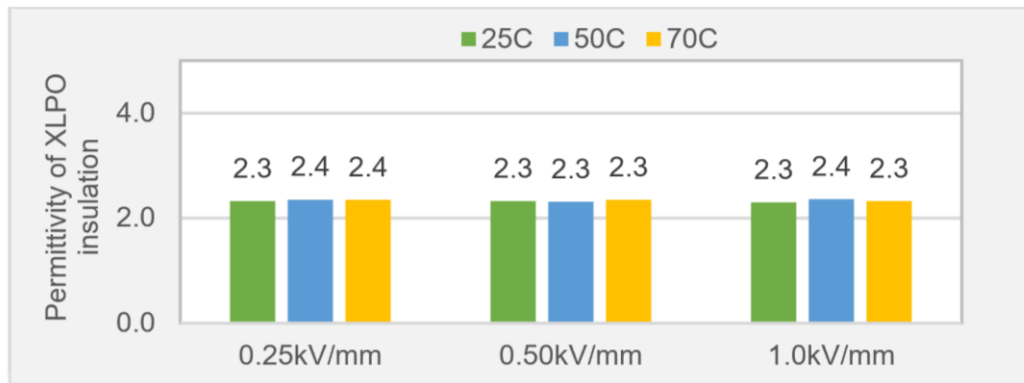


รูปที่ 73 ค่าความนำไฟฟ้ากระแสตรง ที่ $E_0 = 0.50$ kV/mm และอุณหภูมิค่าต่างๆ

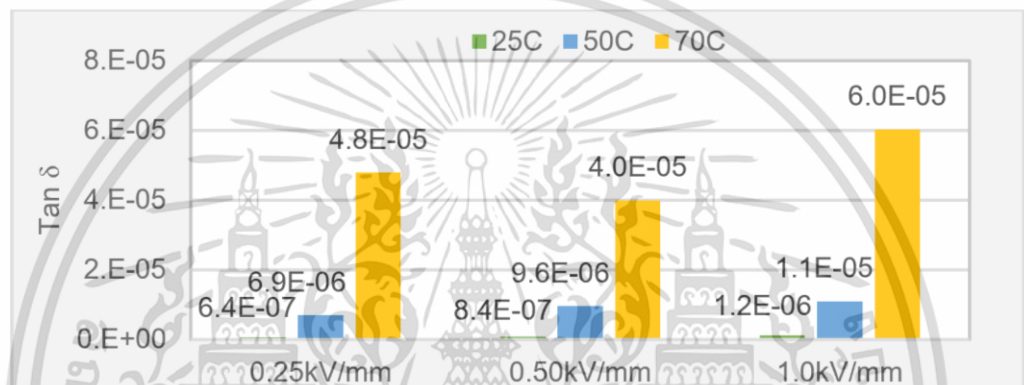


รูปที่ 74 ค่าความนำไฟฟ้ากระแสตรง ที่ $E_0 = 1.0$ kV/mm และอุณหภูมิค่าต่างๆ

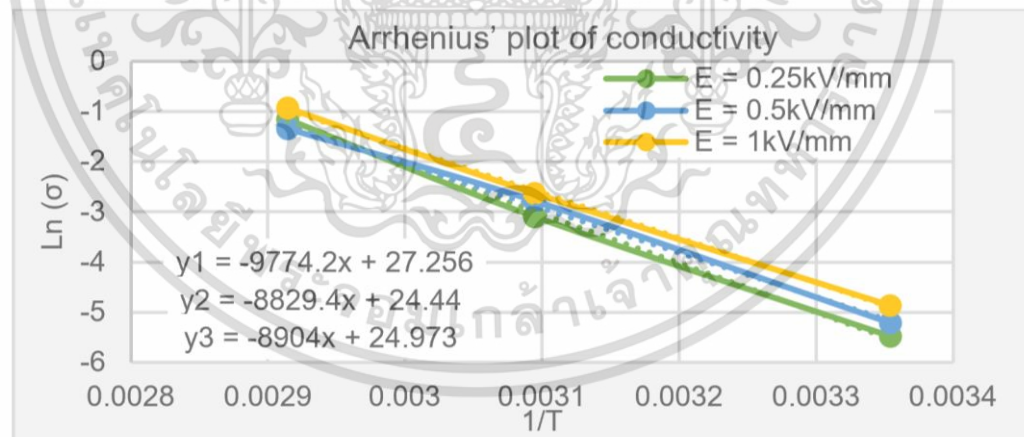
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 75 ค่าเปอร์มิตติวิตีของ XLPO ที่ค่าสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิต่างๆ

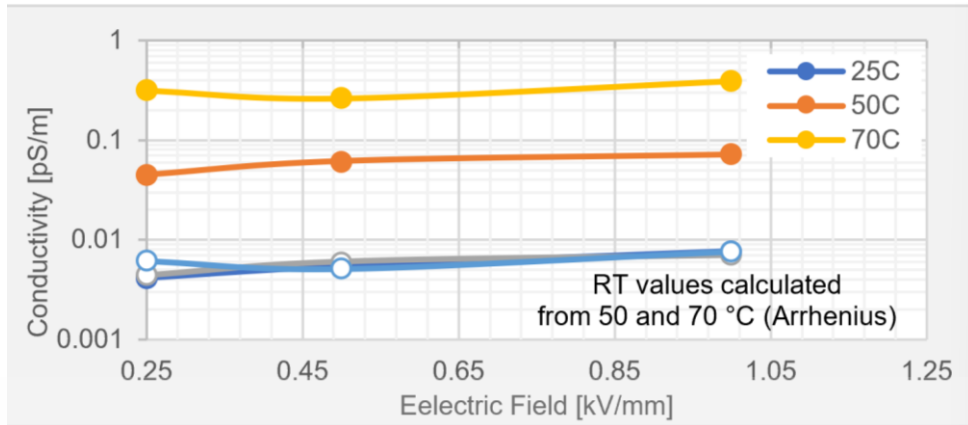


รูปที่ 76 แฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวน XLPO ที่ค่าสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิต่างๆ.

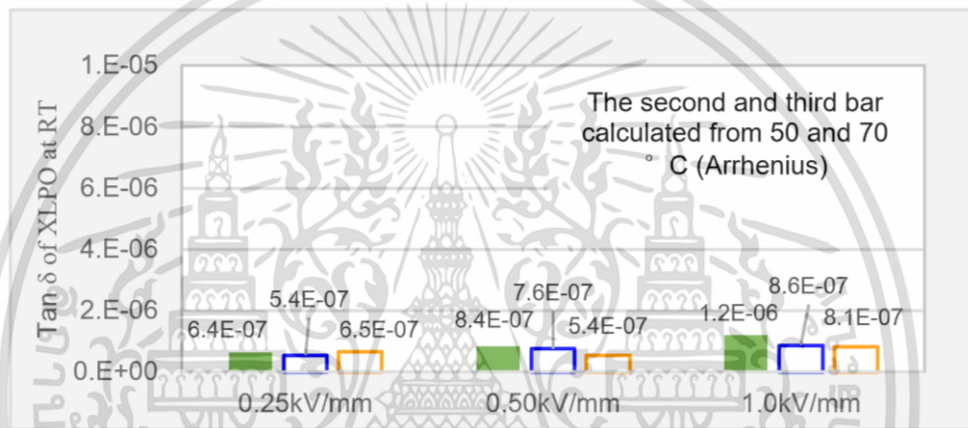


รูปที่ 77 ค่าความนำไฟฟ้าด้วยการพลอตของสมการอาร์เรเนียสของฉนวน XLPO ที่ค่าสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 78 ค่าความนำไฟฟ้าของฉนวน XLPO ในฟังก์ชันของสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 79 แพกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวน XLPO ที่อุณหภูมิ 25°C, 50°C, 70°C

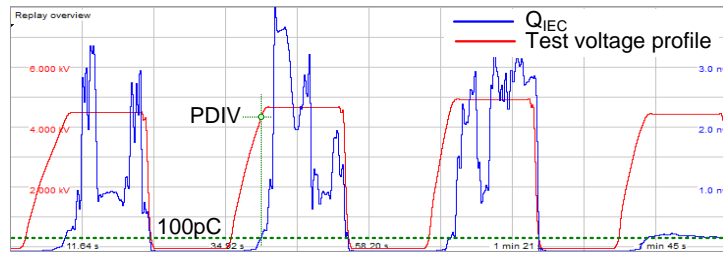
ตารางที่ 23 ค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่ 50Hz ค่าสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิต่างๆ

Capacitance at 50Hz (pF)			
E0 [kV/mm]	25c	50c	70c
0.25	662	671	670
0.50	661	658	668
1.00	654	672	663

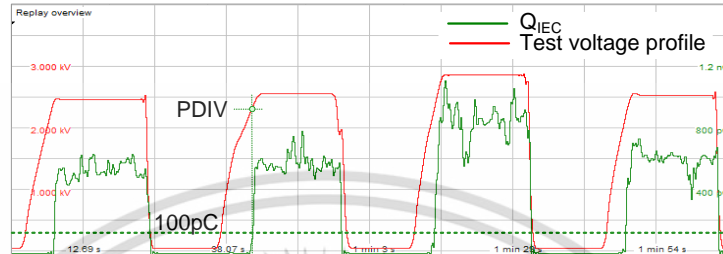
ตารางที่ 24 ค่าพลังงานการกระตุ้นของฉนวน XLPO ที่สนามไฟฟ้าค่าต่างๆ

Activation Energy		
E0 [kV/mm]	Ea [kJ/mol]	Ea [eV]
0.25	81.271	0.843
0.50	73.413	0.762
1.00	74.037	0.768

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



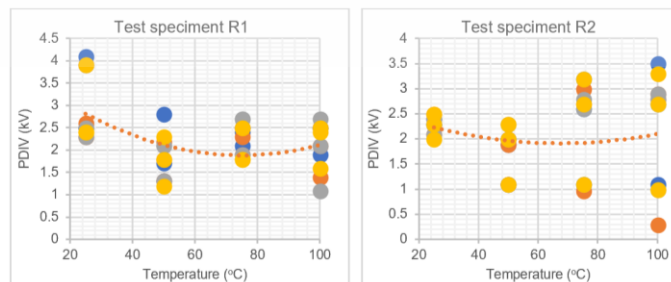
(a) the test voltage profile and QIEC of test specimen R1 at 25 °C



(b) the test voltage profile and QIEC of test specimen R2 at 25 °C

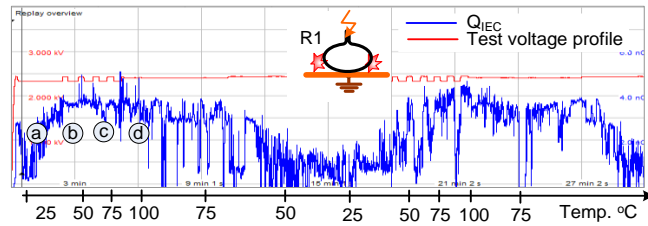
รูปที่ 80 ผลการทดสอบแรงดันเริ่มเกิดดิสชาร์จบางส่วนของตัวอย่าง R₁, R₂ ที่ค่าความโค้งงอ 50, 5 มม. ตามลำดับ

No.	Temp. [°C]	Partial discharge inception voltage results (kV)				
		Prelim_PDIV	PDIV1	PDIV2	PDIV3	
Test specimen R1	1	25	4.1	3.9	3.9	3.9
		50	1.7	1.8	2.1	1.8
		75	2.5	2.5	2.7	1.8
		100	2.5	2.1	2.1	2.4
	2	25	2.5	2.6	2.5	2.4
		50	1.3	1.3	1.3	1.2
		75	2.1	1.9	1.9	1.8
		100	1.9	1.4	1.1	1.6
	3	25	2.5	2.3	2.3	2.4
		50	2.8	2.2	2.1	2.3
		75	2.4	2.3	2.7	2.5
		100	2.5	2.5	2.7	2.5
Test specimen R2	1	25	2.3	2.1	2.1	2
		50	1.1	1.1	1.1	1.1
		75	1.1	0.97	1.1	1.1
		100	1.1	0.5	1	1
	2	25	2.4	2.5	2.4	2.5
		50	2	2	2.3	2.3
		75	3.2	3	2.8	3.2
		100	3.5	2.9	2.9	3.3
	3	25	2.3	2.4	2.3	2.3
		50	1.9	1.9	2	2
		75	2.6	2.7	2.6	2.7
		100	2.7	2.8	2.8	2.7

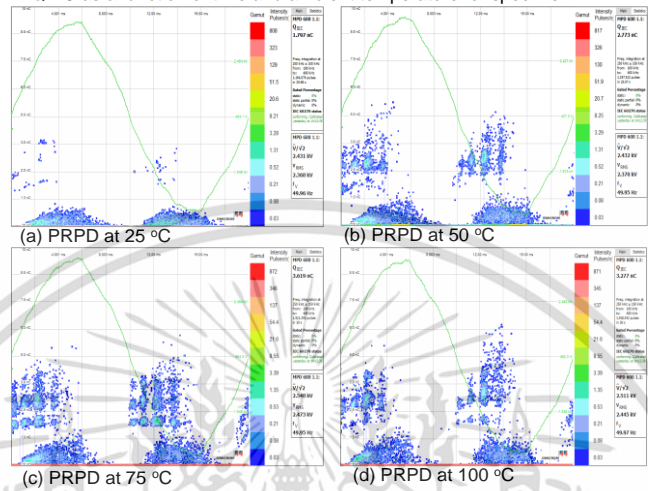


รูปที่ 81 ผลการทดสอบแรงดันเริ่มเกิดดิสชาร์จบางส่วนและพลอตกราฟของตัวอย่าง R₁, R₂ ที่ค่าความโค้งงอ 50, 5 มม. ตามลำดับ ภายใต้อุณหภูมิต่างๆ

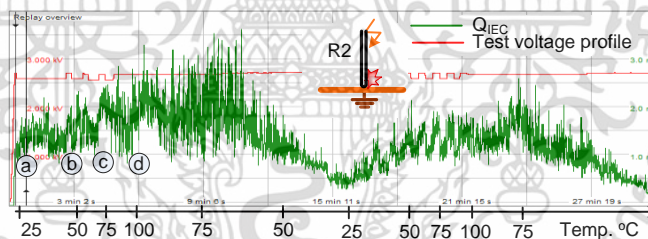
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



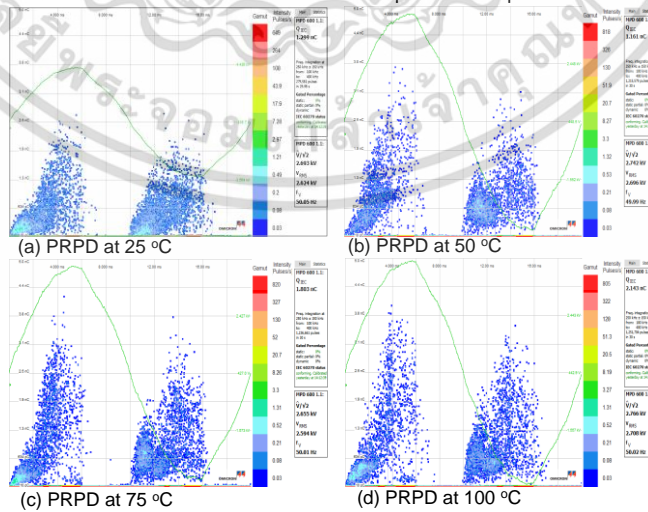
QIEC as a function of time and ambient temperature for specimen R1



รูปที่ 82 ผลการทดสอบขนาดและรูปแบบของการดิสชาร์จบางส่วน ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ ของตัวอย่าง R_1 ที่ค่าความโค้งงอ 50 มม.



QIEC as a function of time and ambient temperature for specimen R2



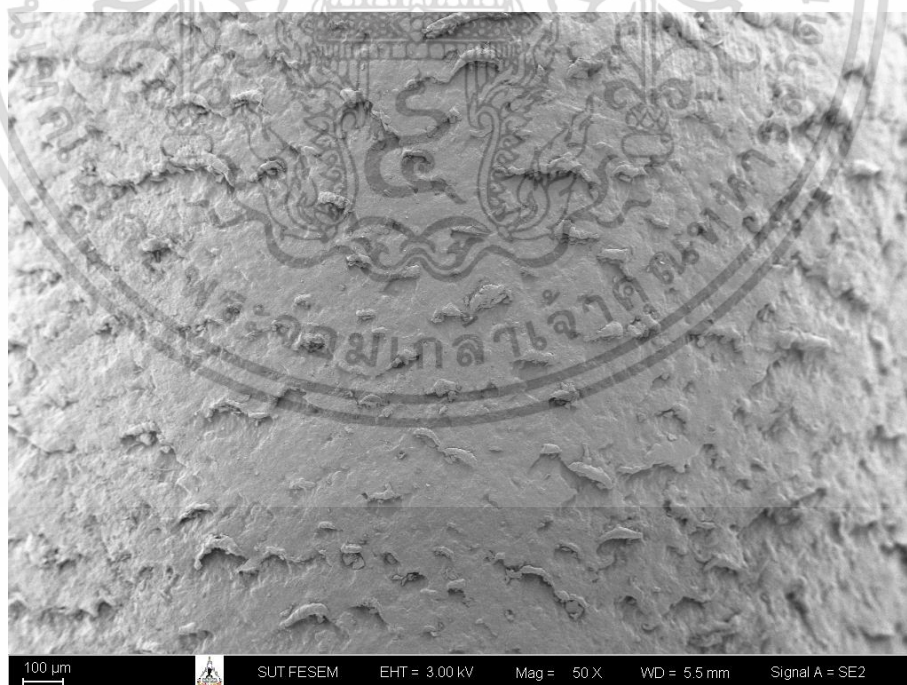
รูปที่ 83 ผลการทดสอบขนาดและรูปแบบของการดิสชาร์จบางส่วน ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ ของตัวอย่าง R_2 ที่ค่าความโค้งงอ 5 มม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีของเนื้อฉนวนครอสลิงค์โพลีโวลีนด้วยวิธีการทดสอบ Scanning Electron Microscope-SEM, Fourier-transform Infrared Spectroscopy-FTIR และ Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence-WDXRF เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของสายไฟฟ้าที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยกรรมวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ

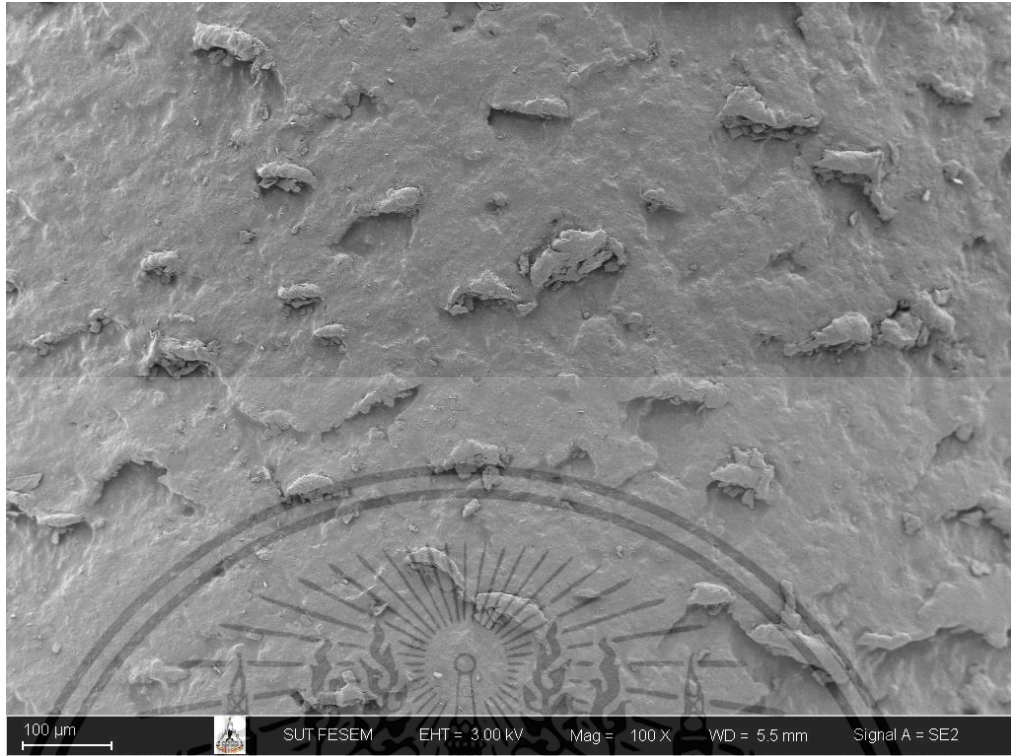
ในการทดสอบข้อที่ 4.2 ได้ทำการทดสอบการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมี ของสายไฟฟ้าฉนวน XLPO พิกัด 0.6/1kV ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อการครอสลิงค์ที่ 8% โดยทำการศึกษากายภาพพื้นผิวของฉนวนด้วยวิธีการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ทดสอบการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของเนื้อฉนวนด้วยวิธี FT-IR และ WD-XRF หลังจากนั้นทดสอบหาระดับแรงดันเบรกดาวน์ของสายไฟฟ้าที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยกรรมวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ

ผลการทดสอบกายภาพพื้นผิวของฉนวนไฟฟ้าด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังรูปที่ 80-144 ผลการทดสอบทดสอบการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของเนื้อฉนวนด้วยวิธี FT-IR ดังรูปที่ 145-157 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงทางด้านเคมีของเนื้อฉนวนด้วยวิธี WD-XRF ดังรูปที่ 158-196 ผลการทดสอบระดับแรงดันเบรกดาวน์ ดังรูปที่ 197-200



รูปที่ 84 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่ยังไม่ได้เร่งอายุขัยฉนวน ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 50 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

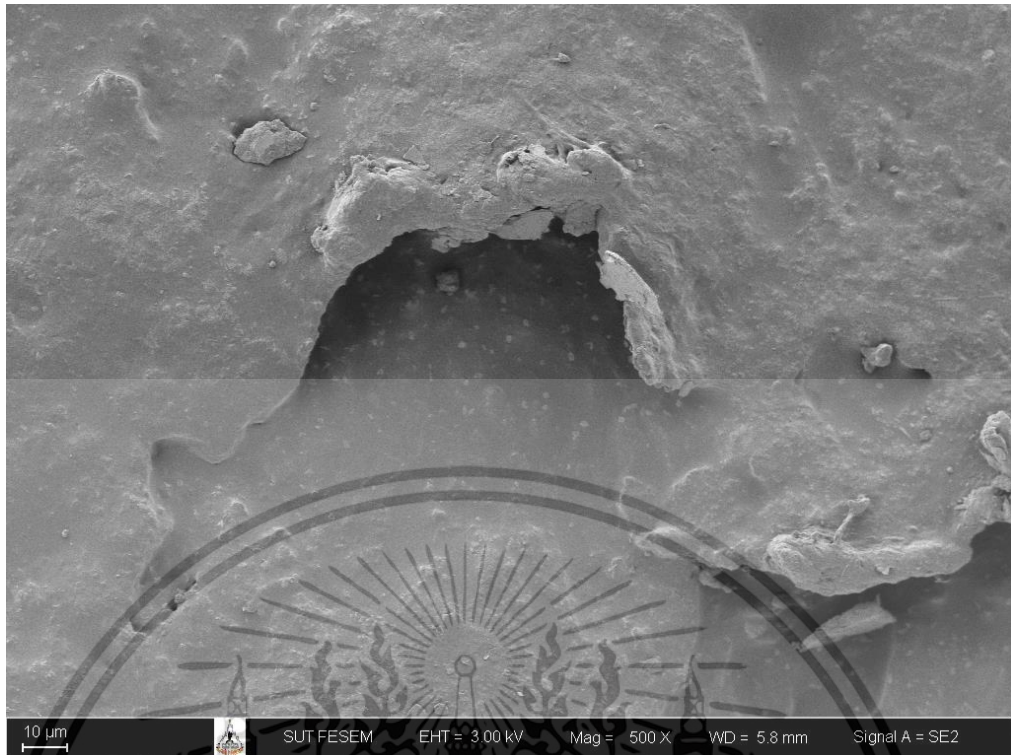


รูปที่ 85 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่ยังไม่ได้เร่งอายุขัยฉนวน ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 100 เท่า

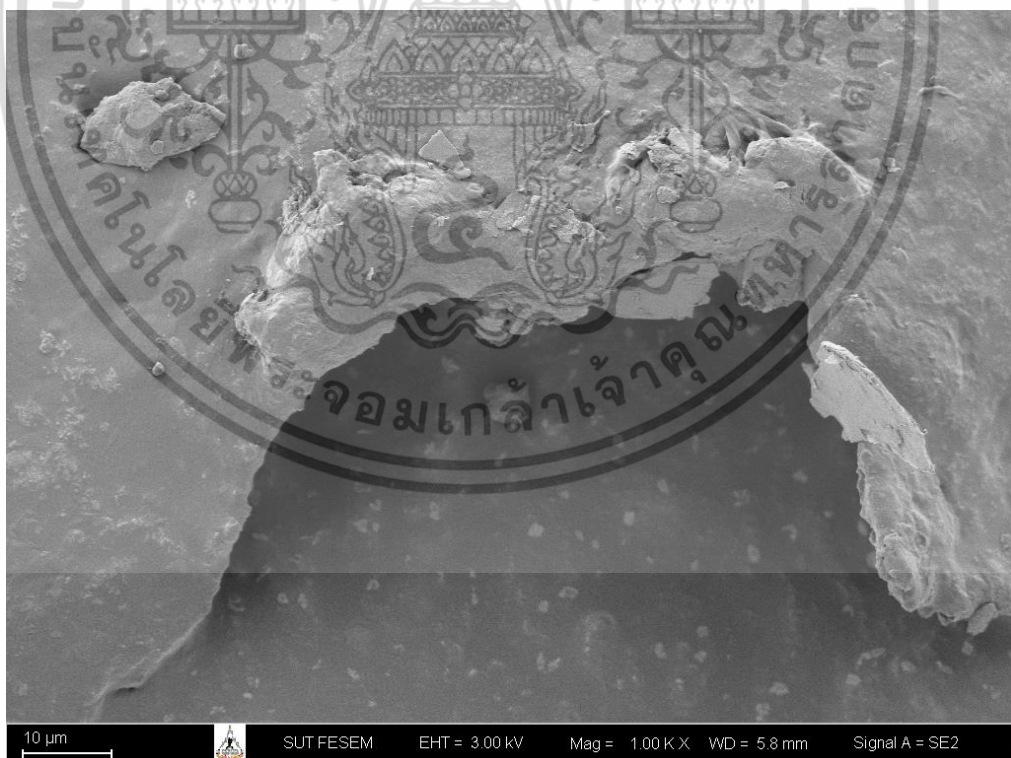


รูปที่ 86 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่ยังไม่ได้เร่งอายุขัยฉนวน ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 300 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

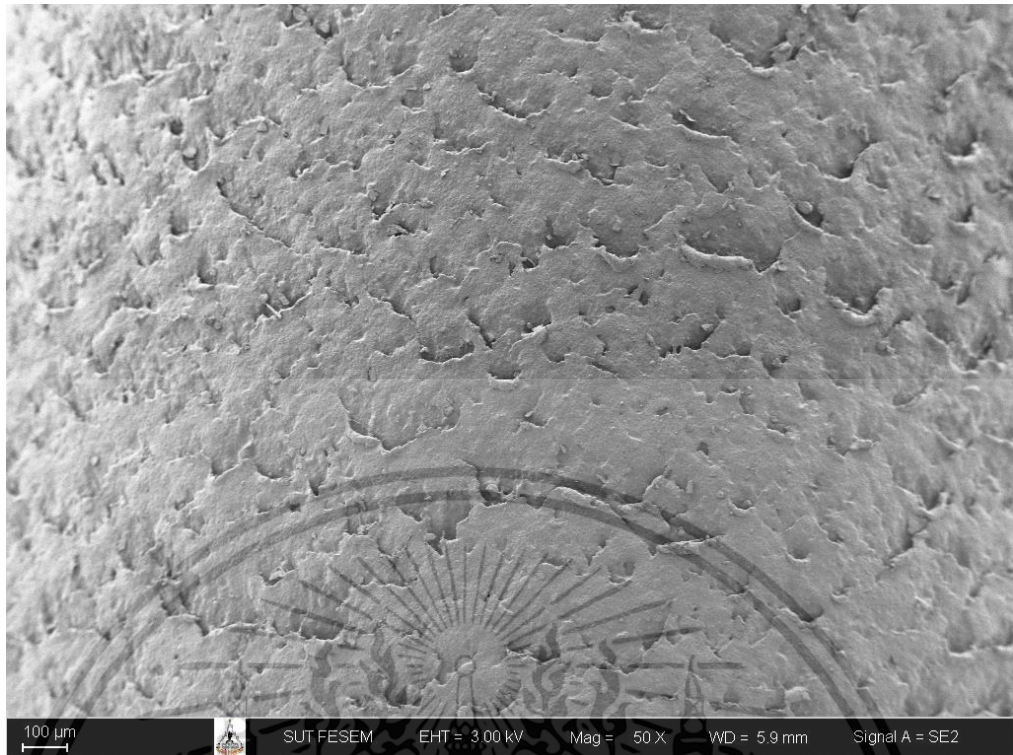


รูปที่ 87 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่ยังไม่ได้เร่งอายุขัยฉนวน ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 500 เท่า

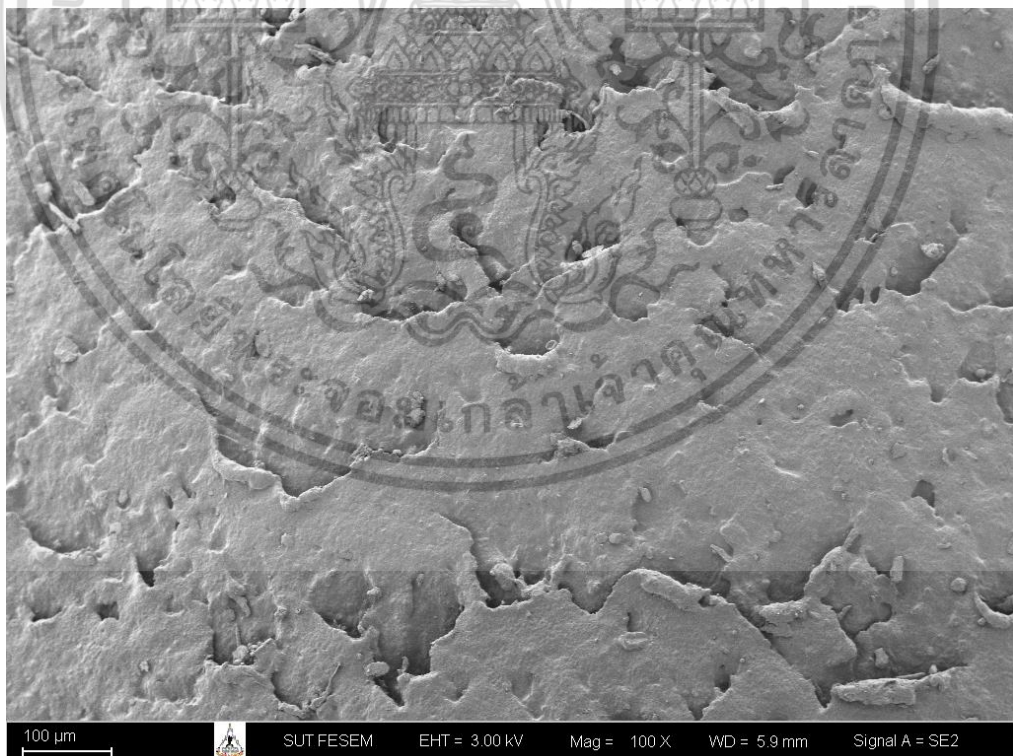


รูปที่ 88 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่ยังไม่ได้เร่งอายุขัยฉนวน ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 1000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

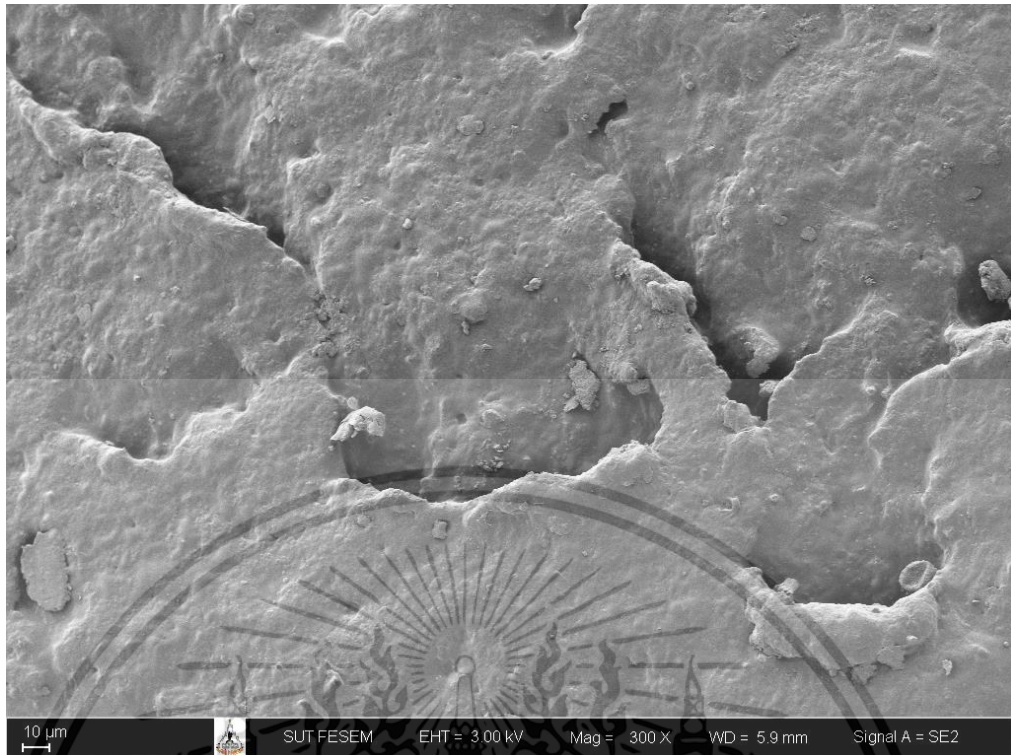


รูปที่ 89 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยจูลทรศน์อิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราด กำลังขยาย 50 เท่า

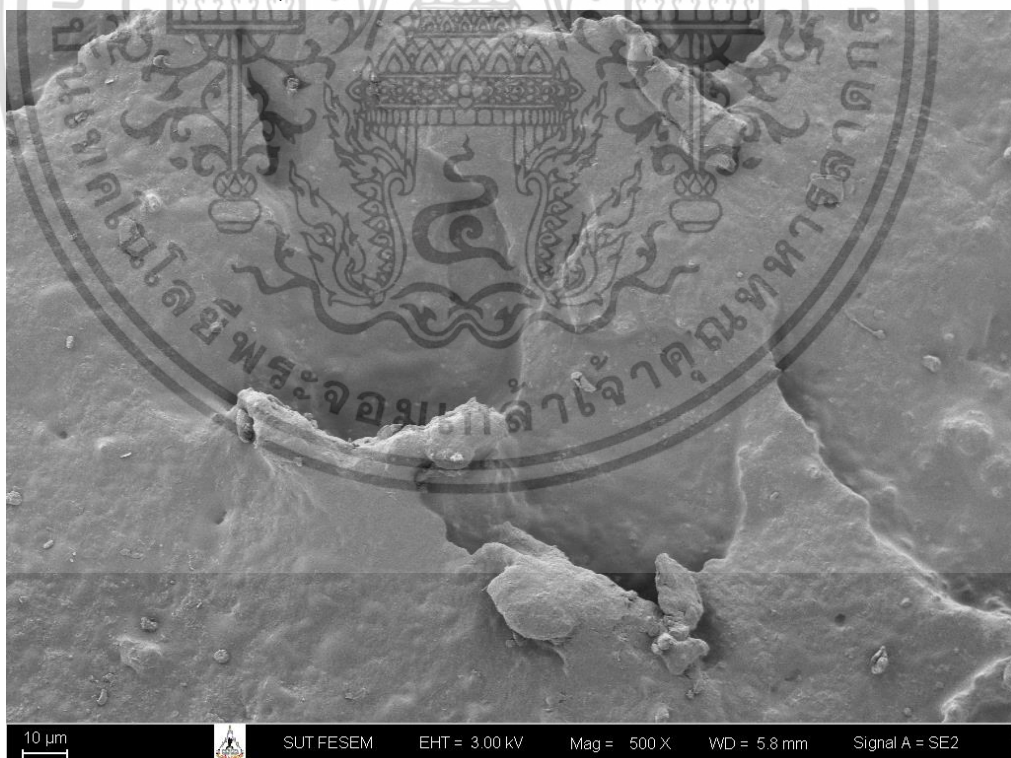


รูปที่ 90 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยจูลทรศน์อิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราด กำลังขยาย 100 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

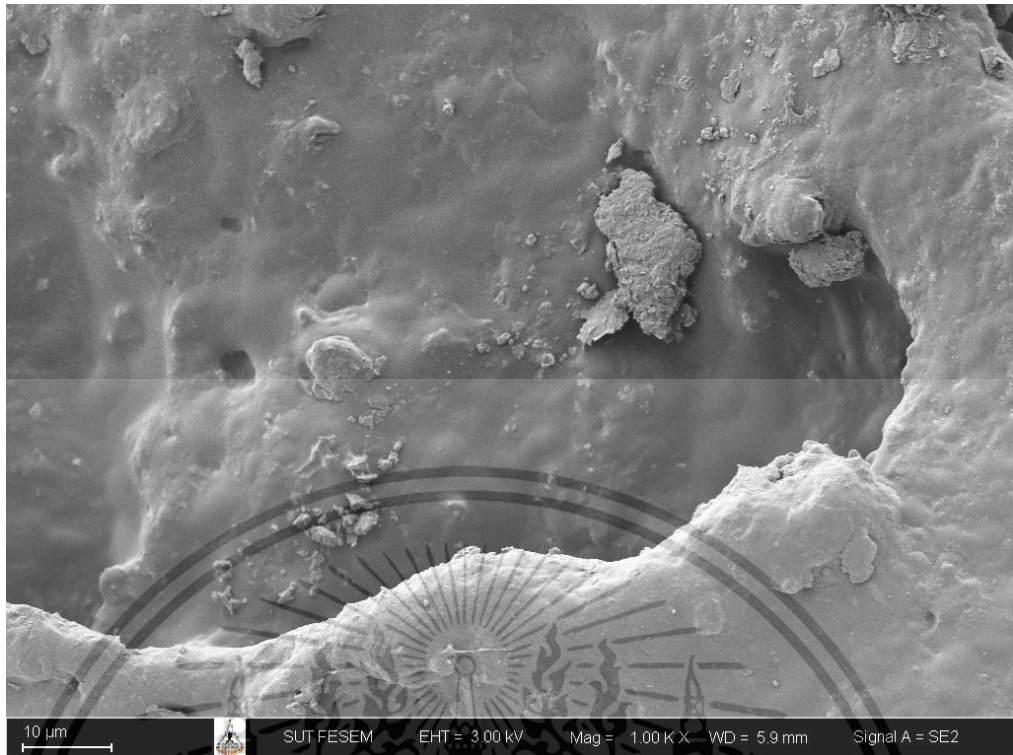


รูปที่ 91 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 300 เท่า



รูปที่ 92 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

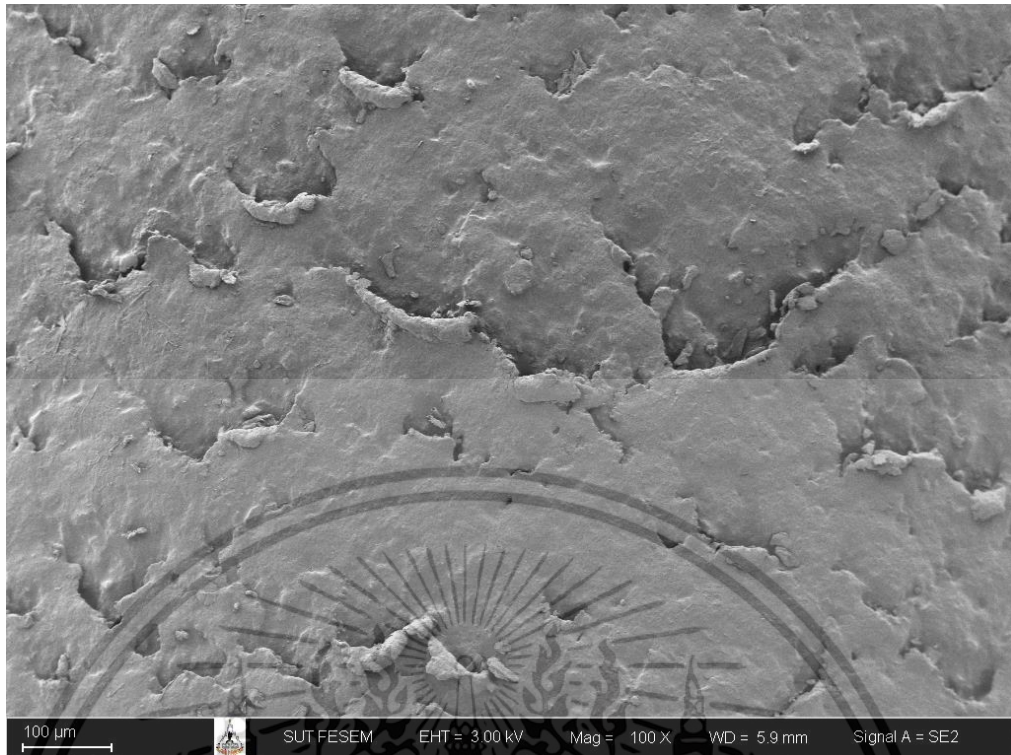


รูปที่ 93 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 1000 เท่า

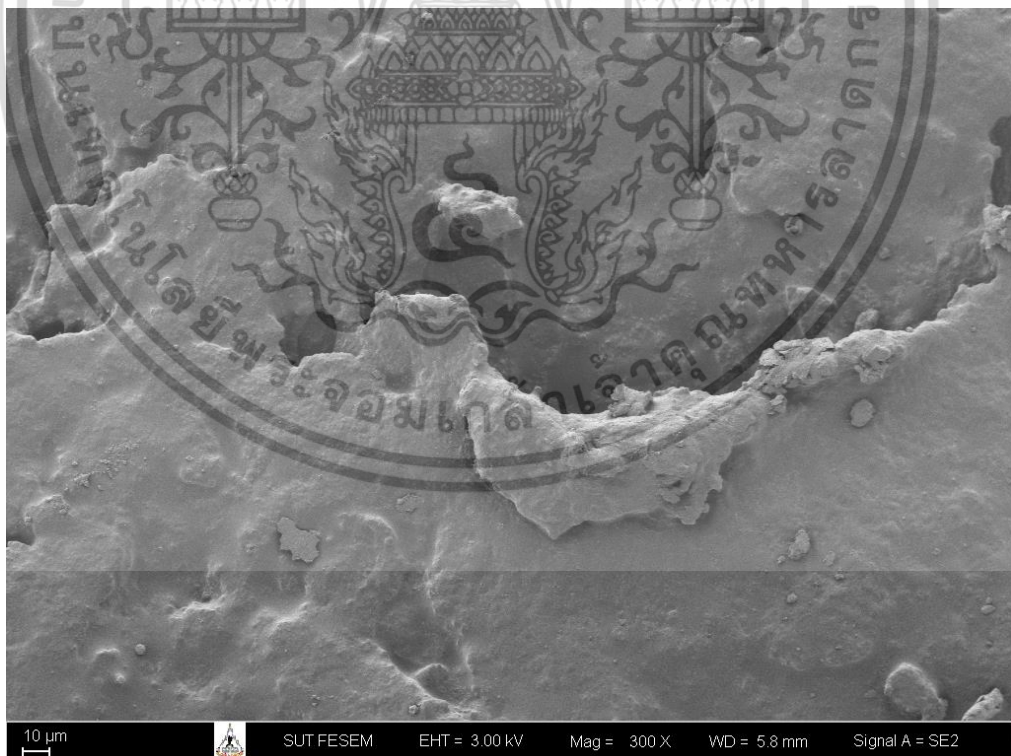


รูปที่ 94 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 50 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

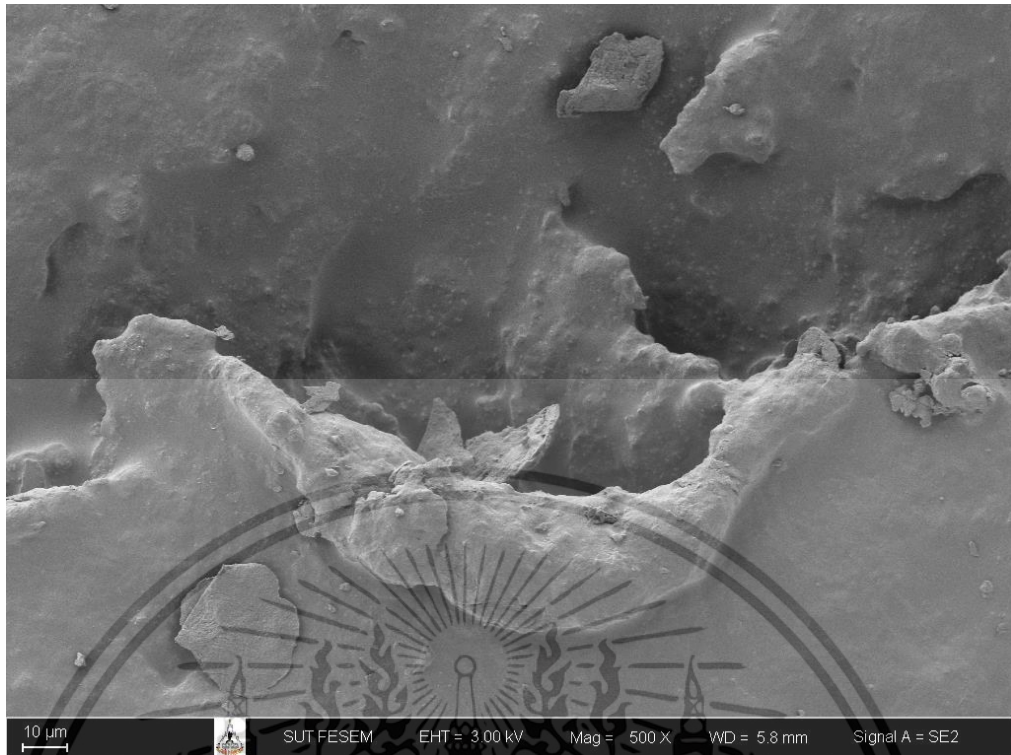


รูปที่ 95 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยจูลทรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 100 เท่า

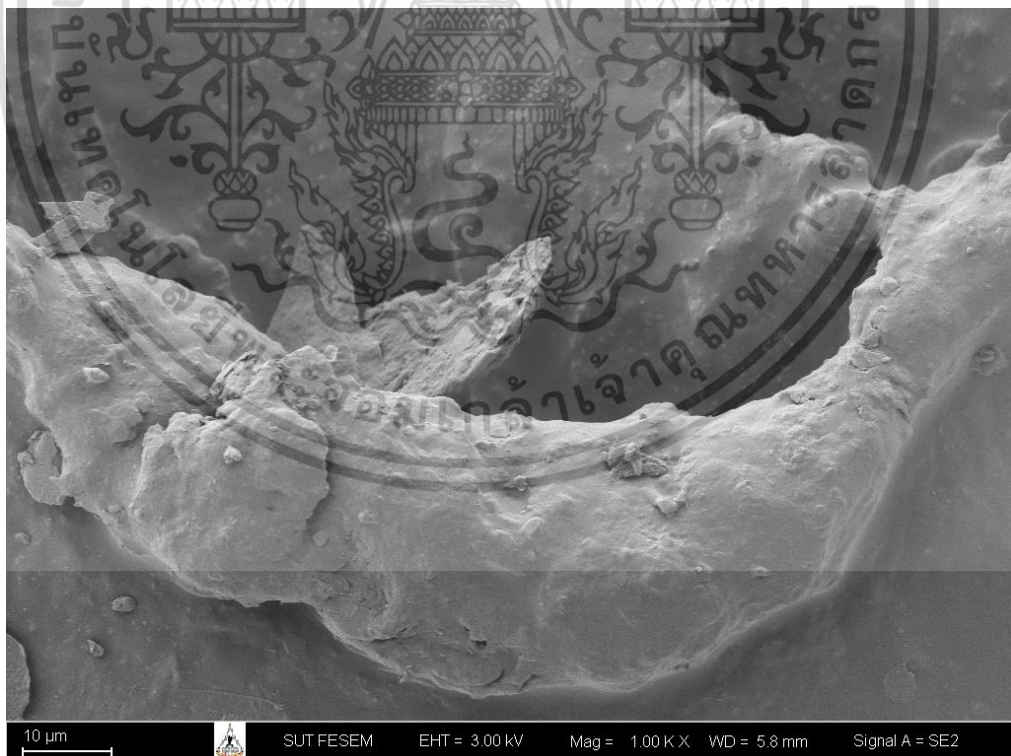


รูปที่ 96 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยจูลทรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 300 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

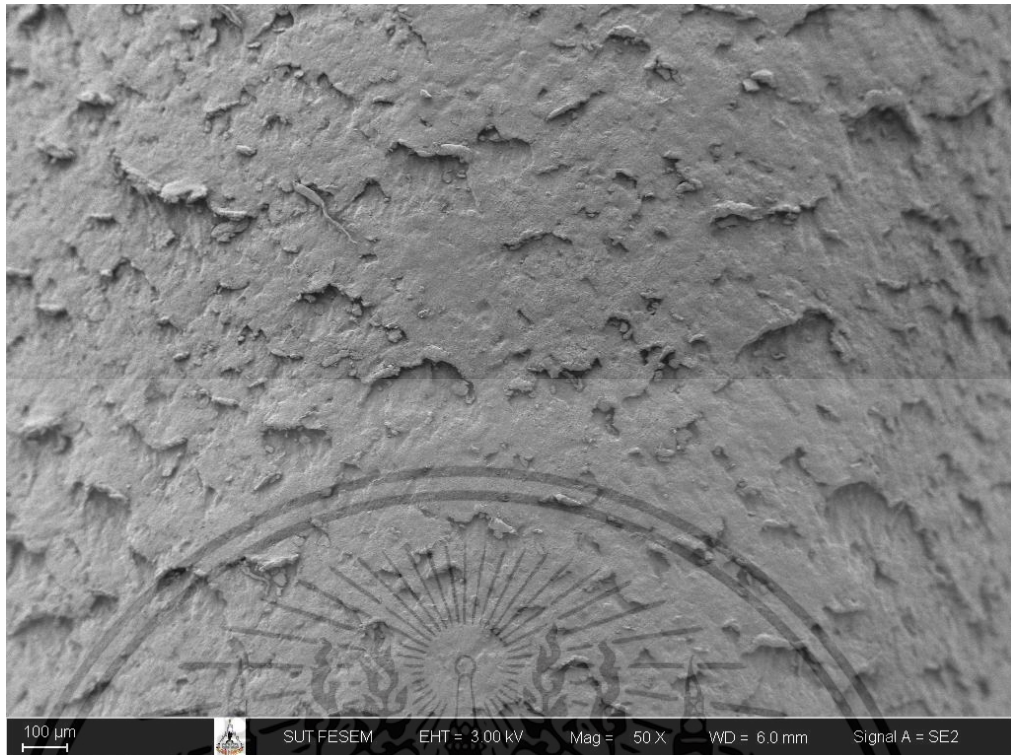


รูปที่ 97 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 500 เท่า



รูปที่ 98 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 1000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

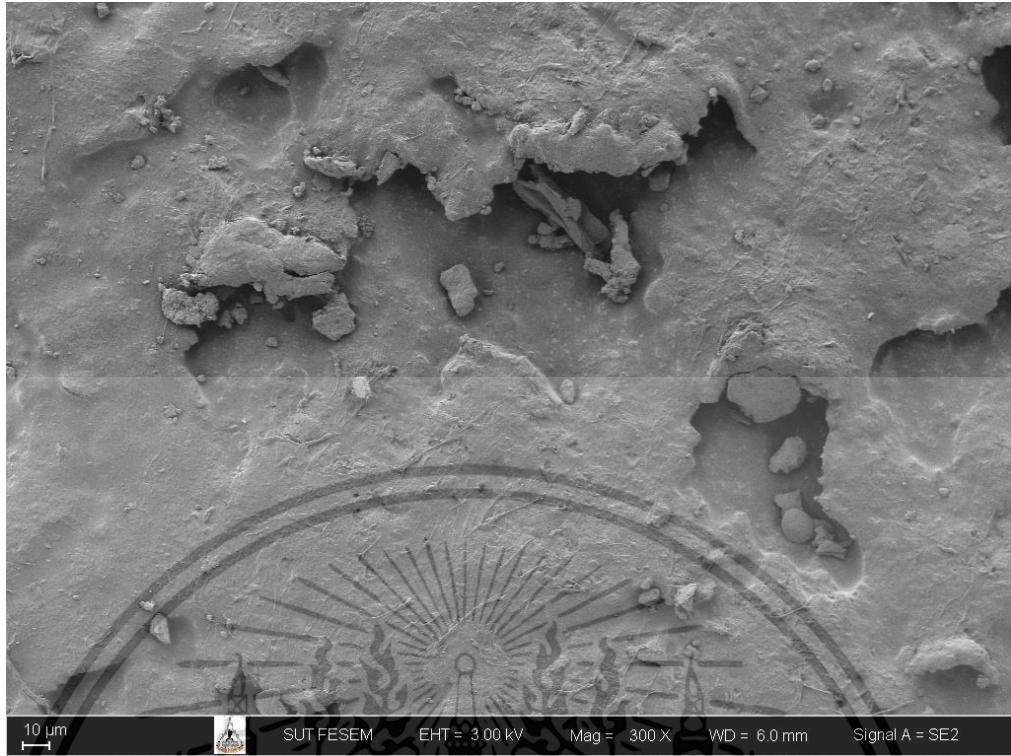


รูปที่ 99 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยจูลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 50 เท่า

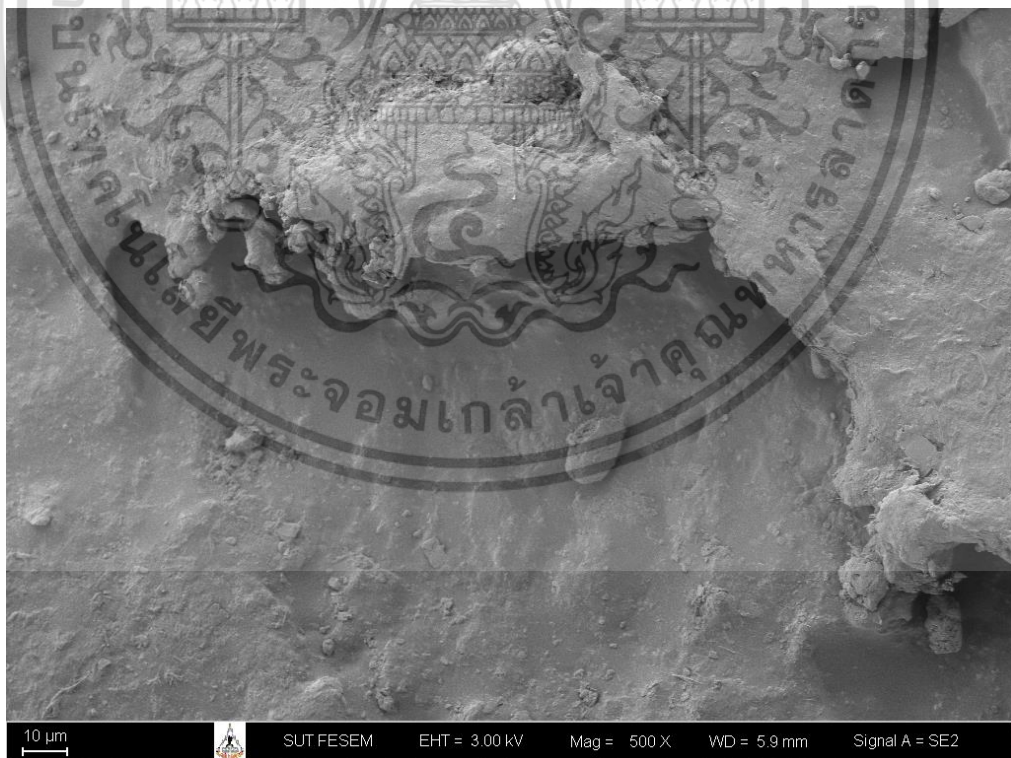


รูปที่ 100 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยจูลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 100 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

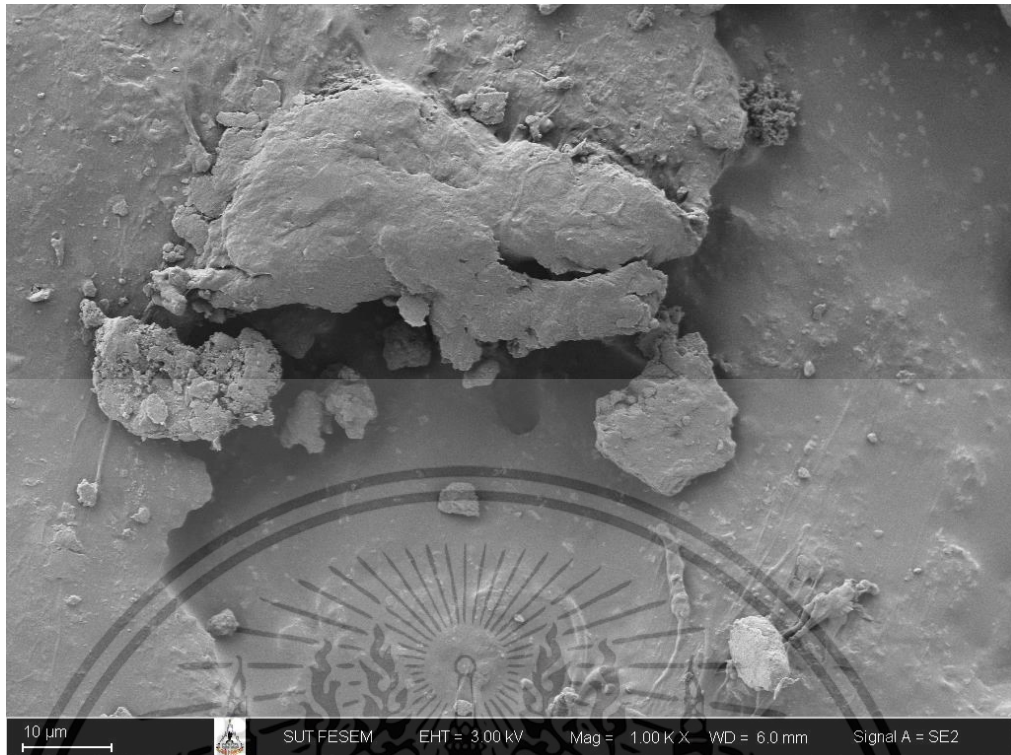


รูปที่ 101 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยจูลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 300 เท่า



รูปที่ 102 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยจูลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

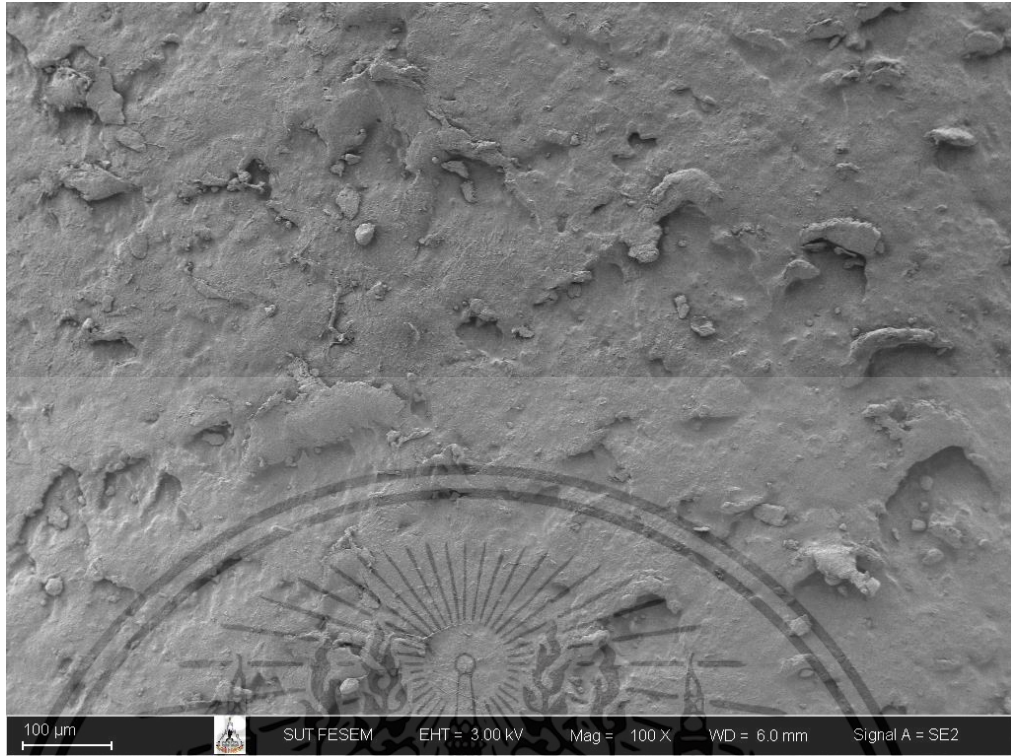


รูปที่ 103 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 1000 เท่า



รูปที่ 104 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 50 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

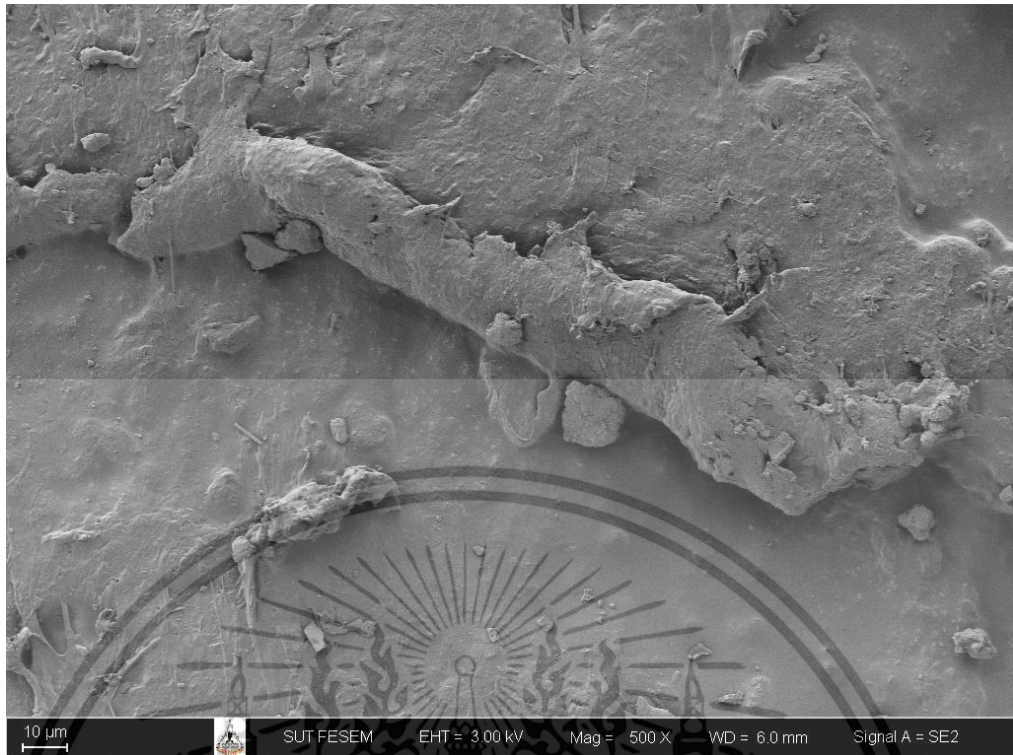


รูปที่ 105 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยจูลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 100 เท่า

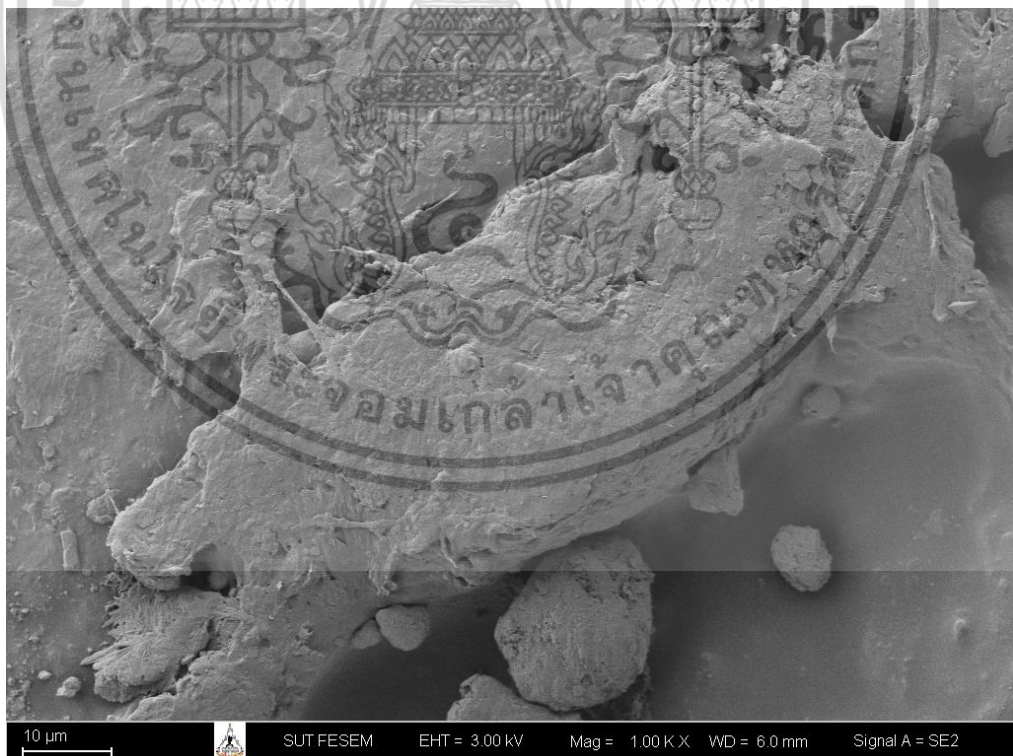


รูปที่ 106 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยจูลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 300 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

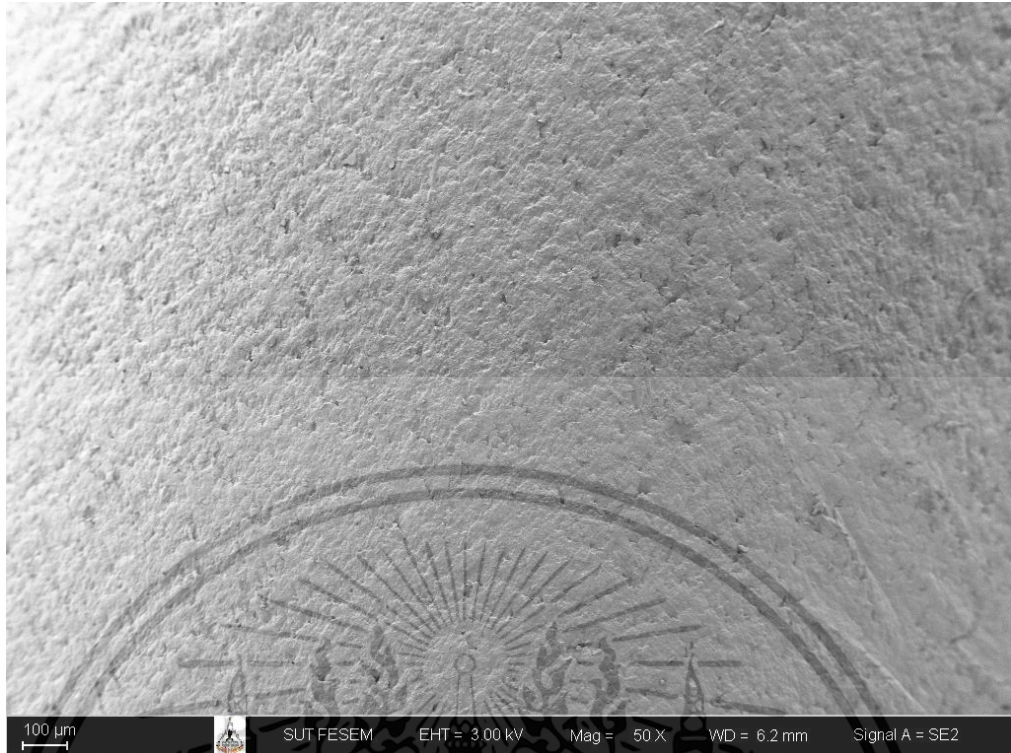


รูปที่ 107 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 500 เท่า



รูปที่ 108 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 1000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 109 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยจูลทรศน์อิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราด กำลังขยาย 50 เท่า



รูปที่ 110 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยจูลทรศน์อิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราด กำลังขยาย 100 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

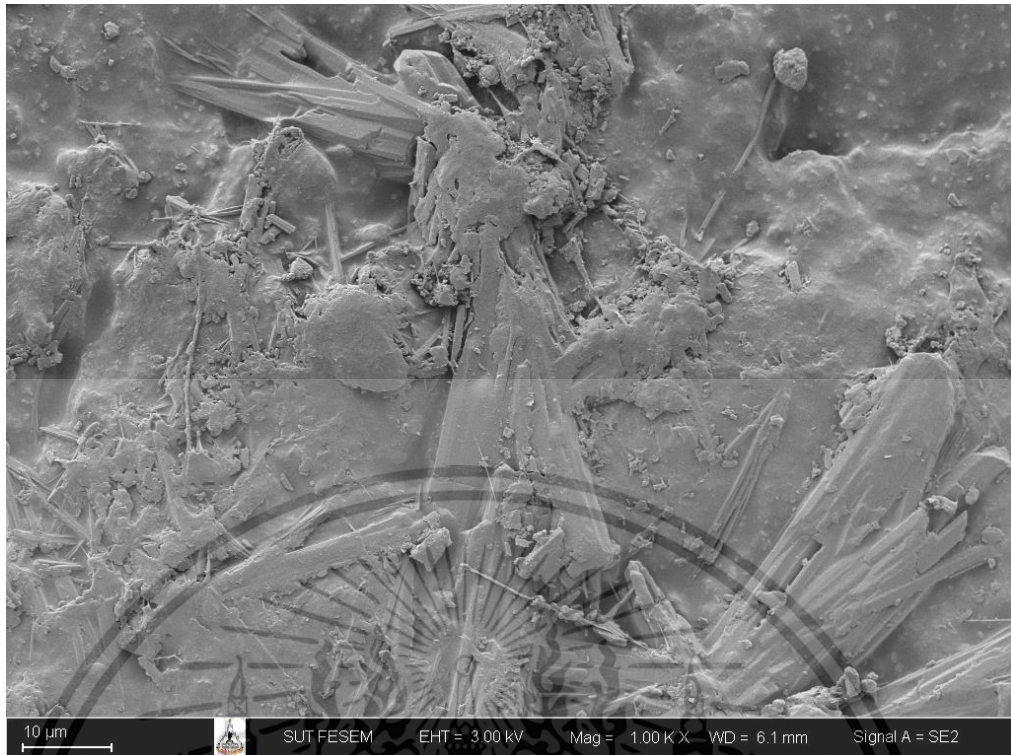


รูปที่ 111 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยจูลทรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 300 เท่า



รูปที่ 112 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยจูลทรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

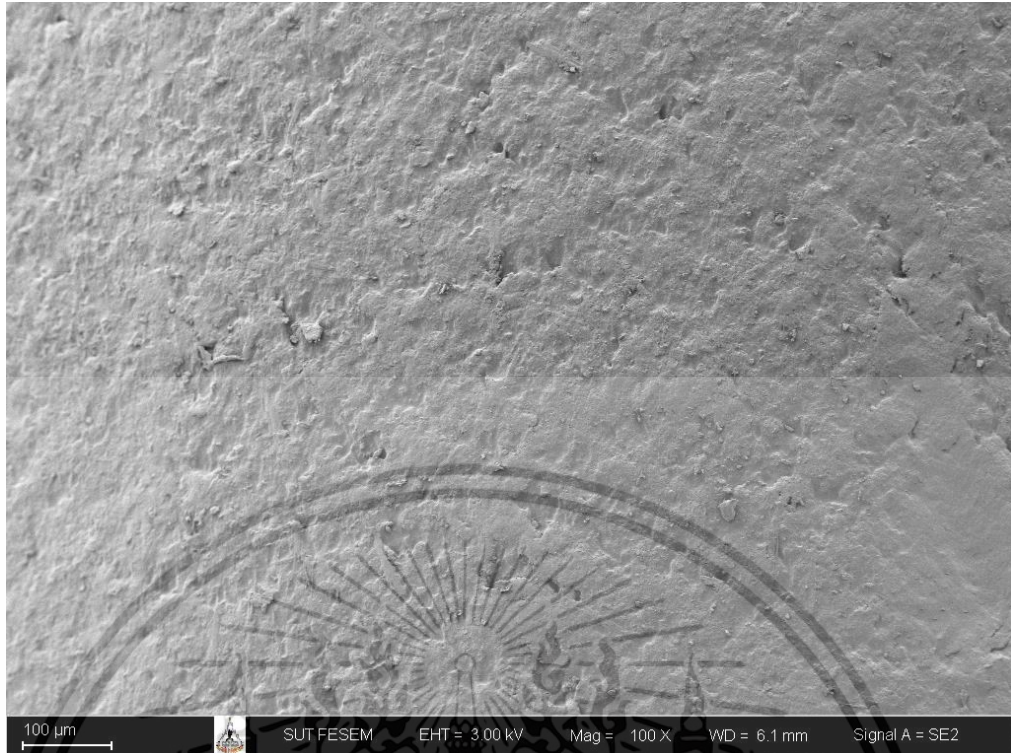


รูปที่ 113 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 1000 เท่า



รูปที่ 114 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 50 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 115 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยจูลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 100 เท่า



รูปที่ 116 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยจูลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 300 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

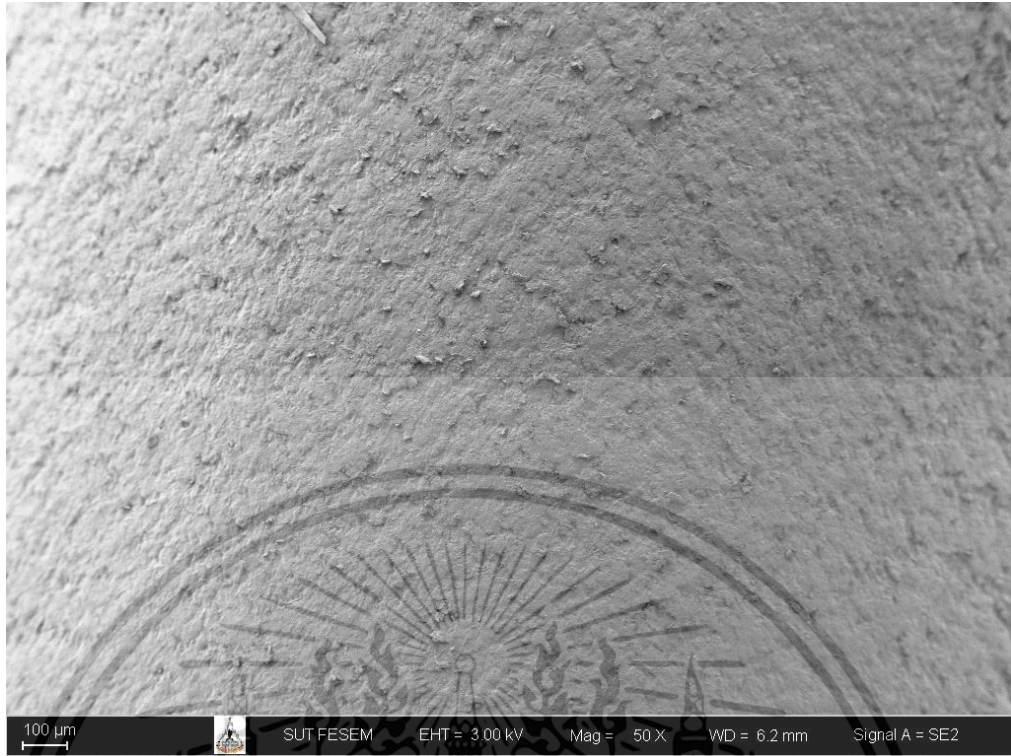


รูปที่ 117 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 500 เท่า



รูปที่ 118 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 1000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

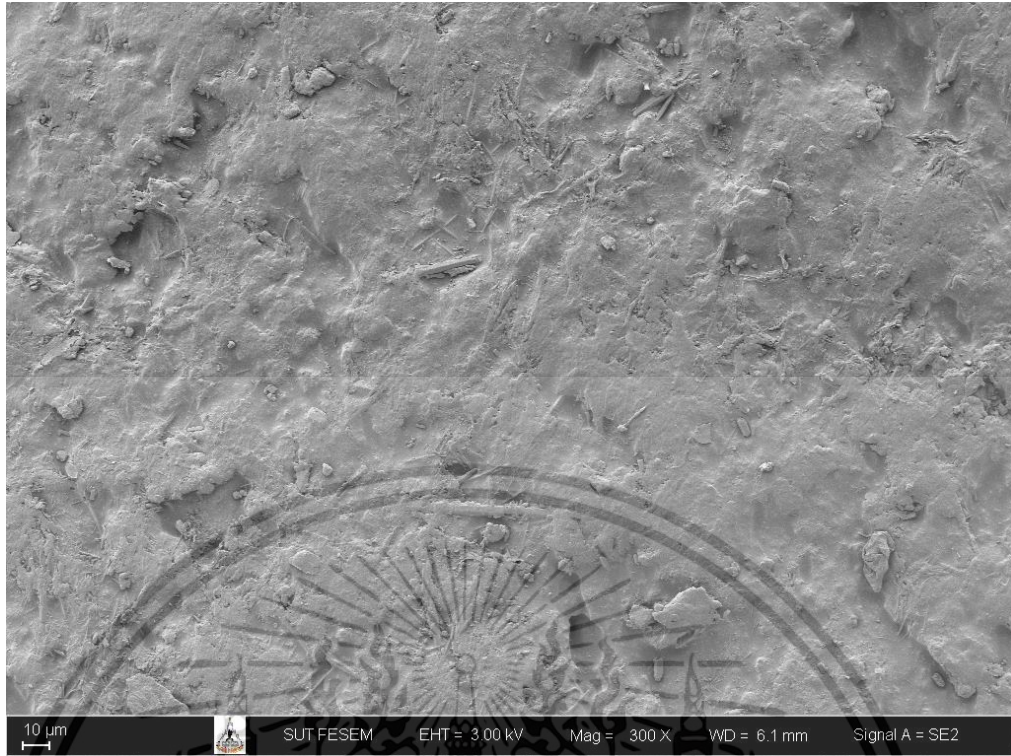


รูปที่ 119 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยจูลทรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 50 เท่า



รูปที่ 120 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยจูลทรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 100 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

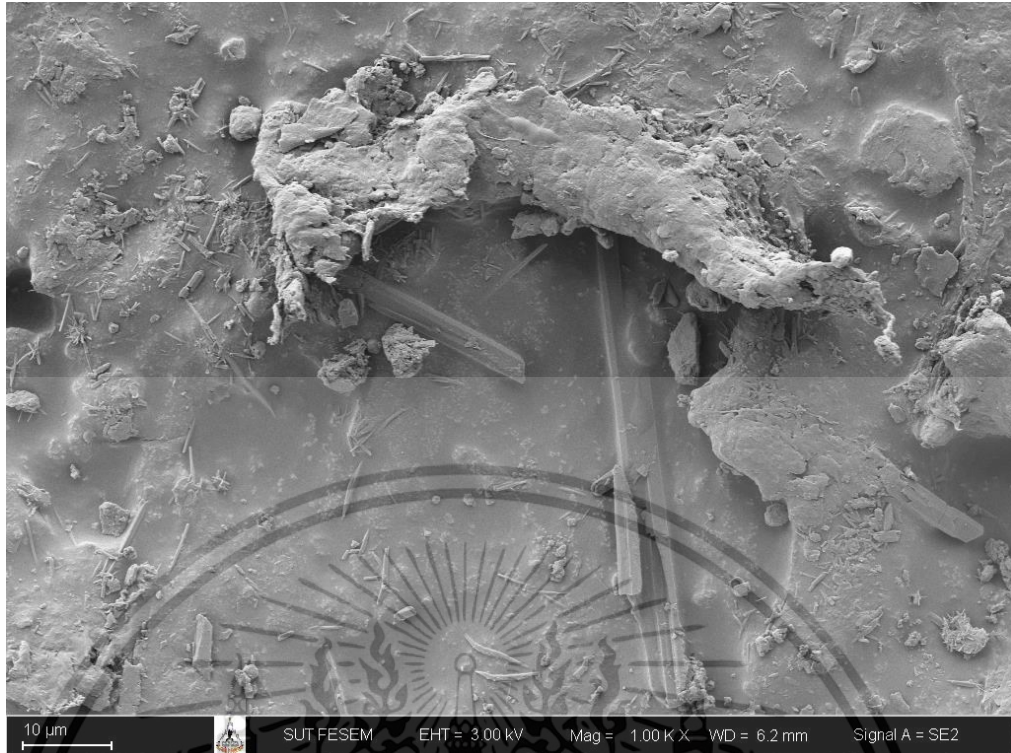


รูปที่ 121 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยจูลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 300 เท่า



รูปที่ 122 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยจูลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

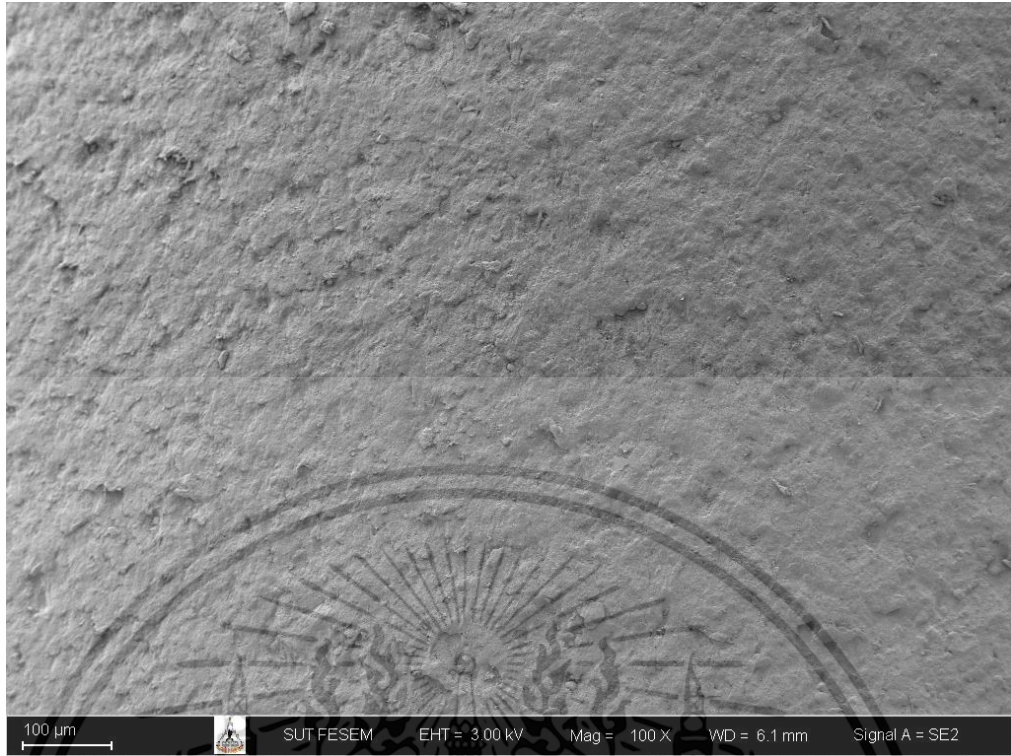


รูปที่ 123 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 1000 เท่า



รูปที่ 124 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 50 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

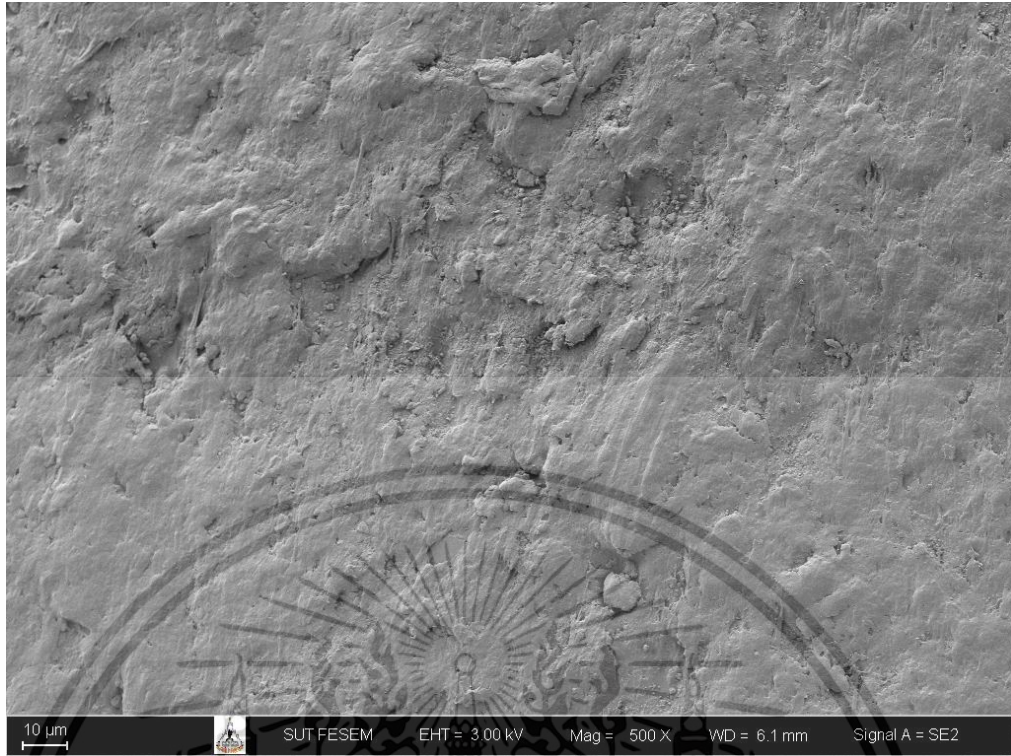


รูปที่ 125 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยจูลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 100 เท่า



รูปที่ 126 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยจูลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 300 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

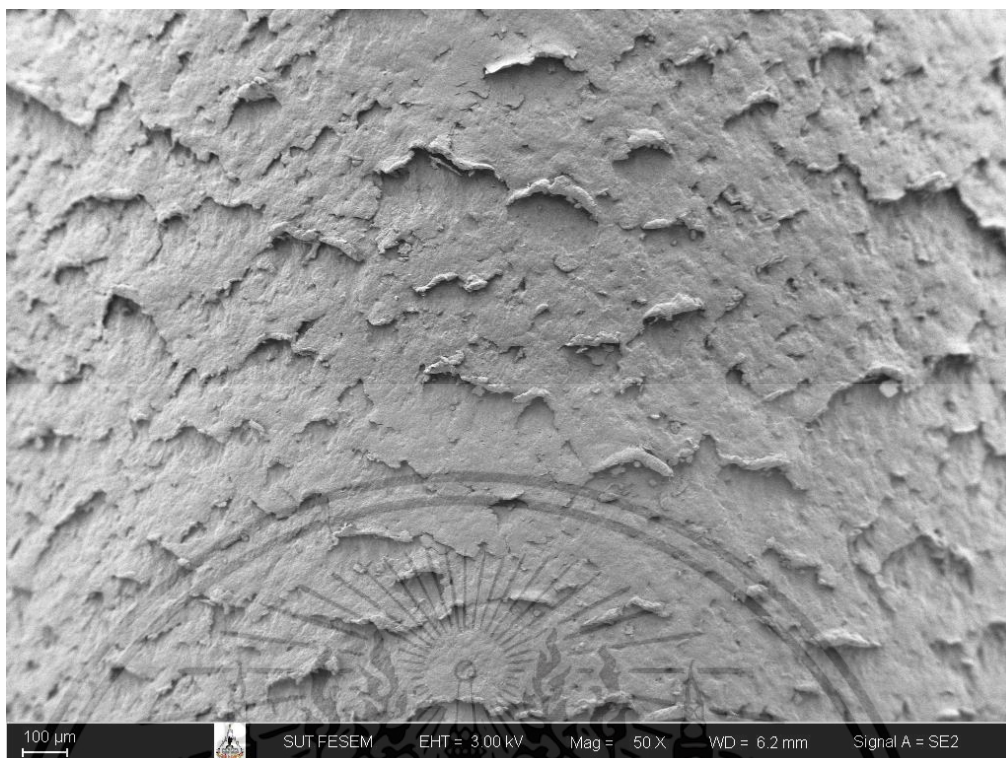


รูปที่ 127 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 500 เท่า

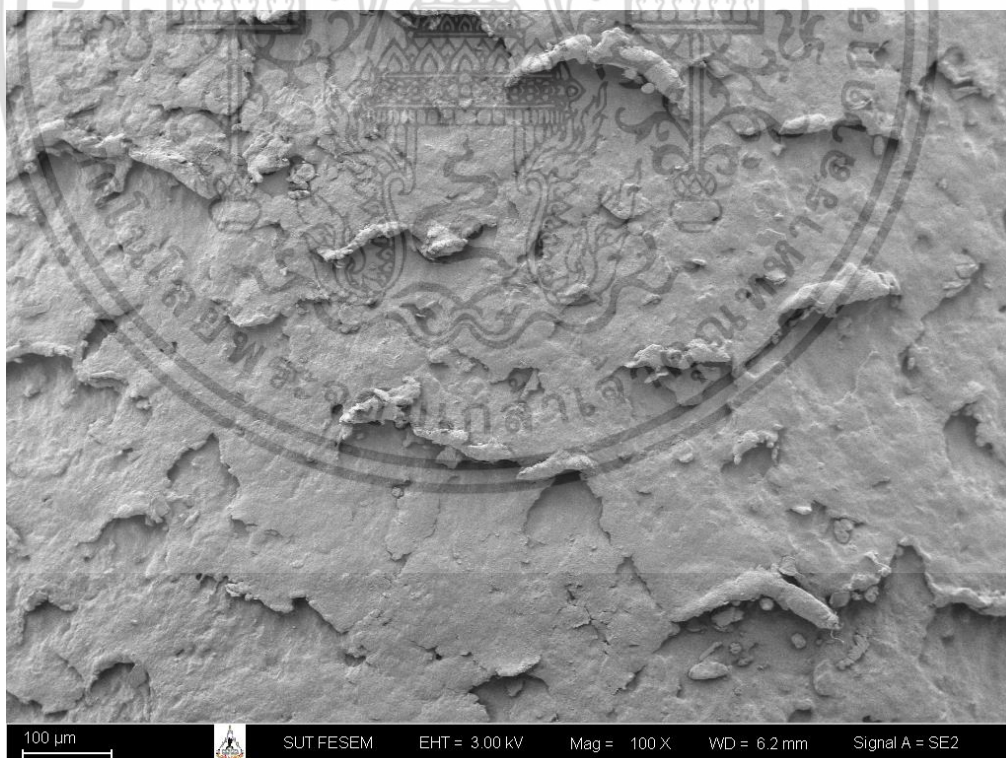


รูปที่ 128 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 1000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

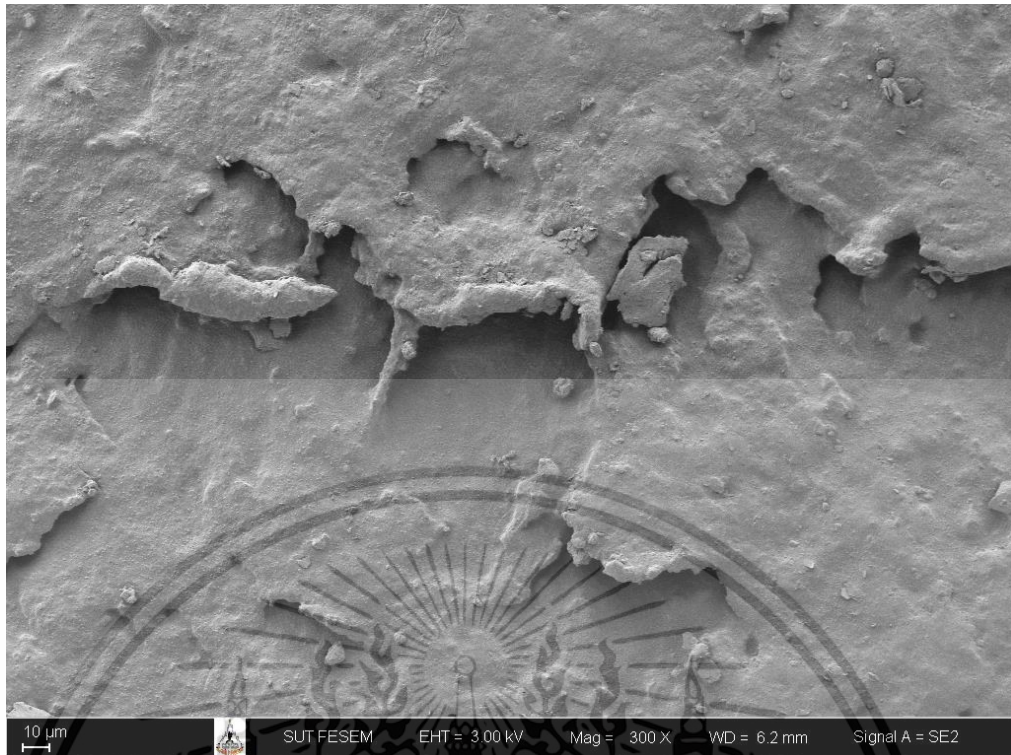


รูปที่ 129 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยจูลทรศน์อิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราด กำลังขยาย 50 เท่า

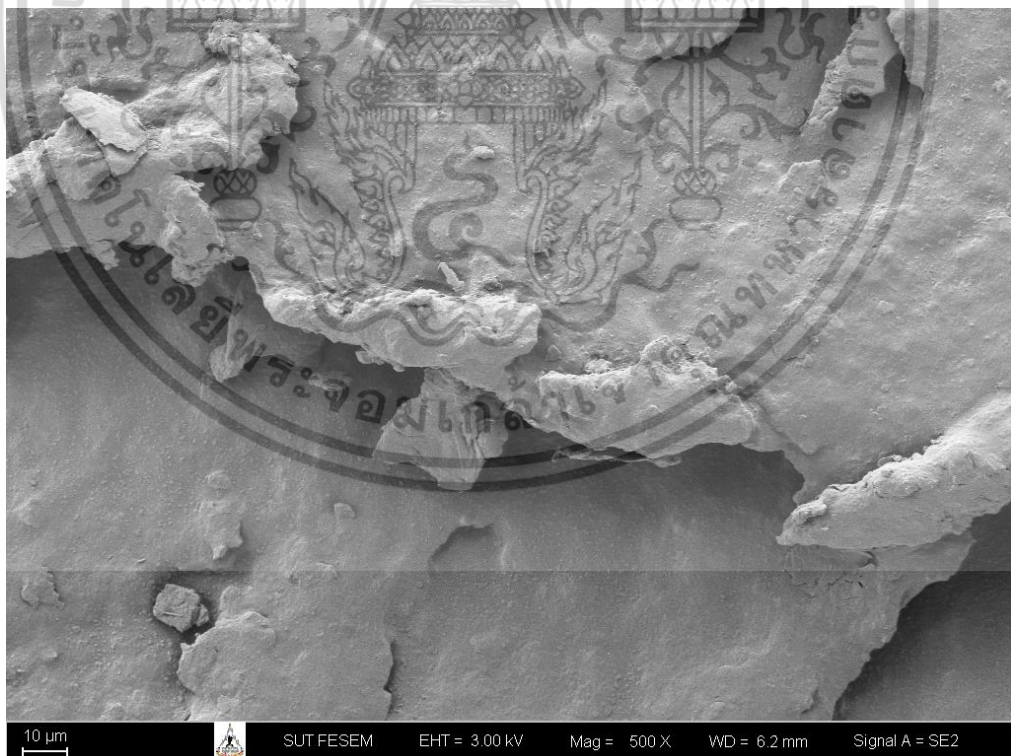


รูปที่ 130 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยจูลทรศน์อิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราด กำลังขยาย 100 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

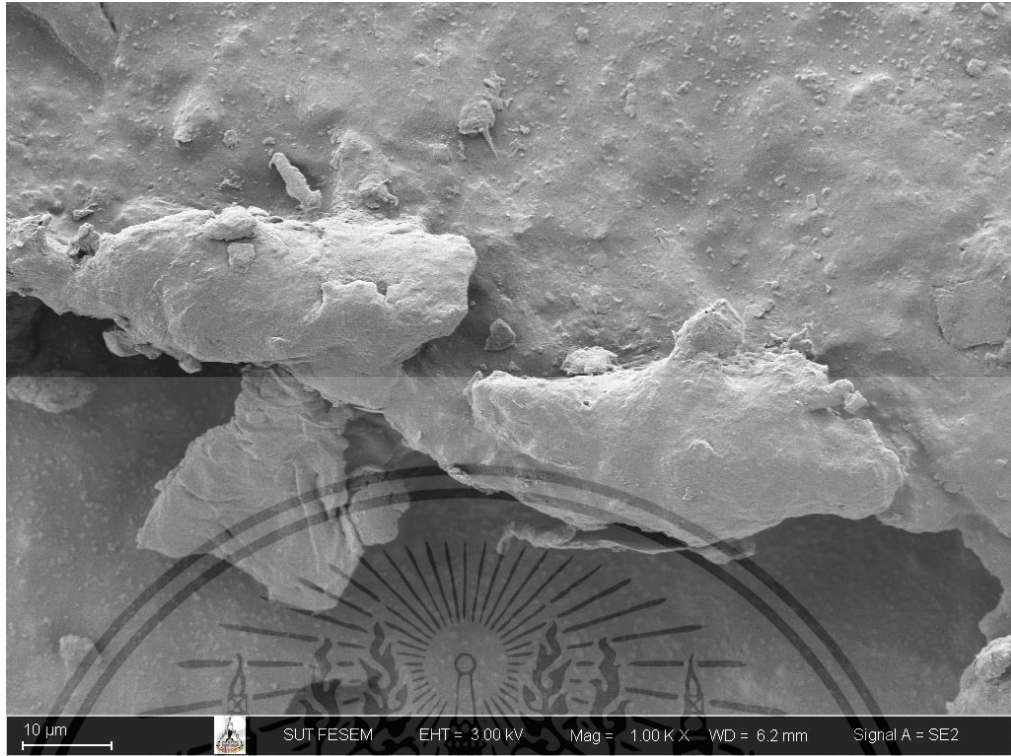


รูปที่ 131 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยจูลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 300 เท่า

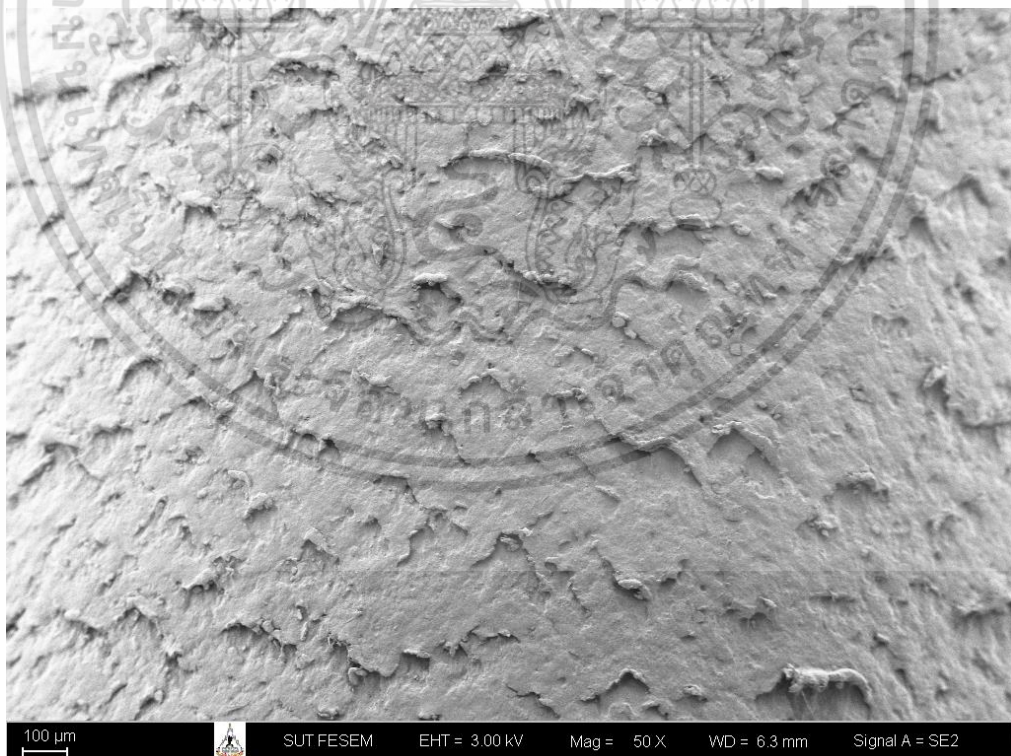


รูปที่ 132 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยจูลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

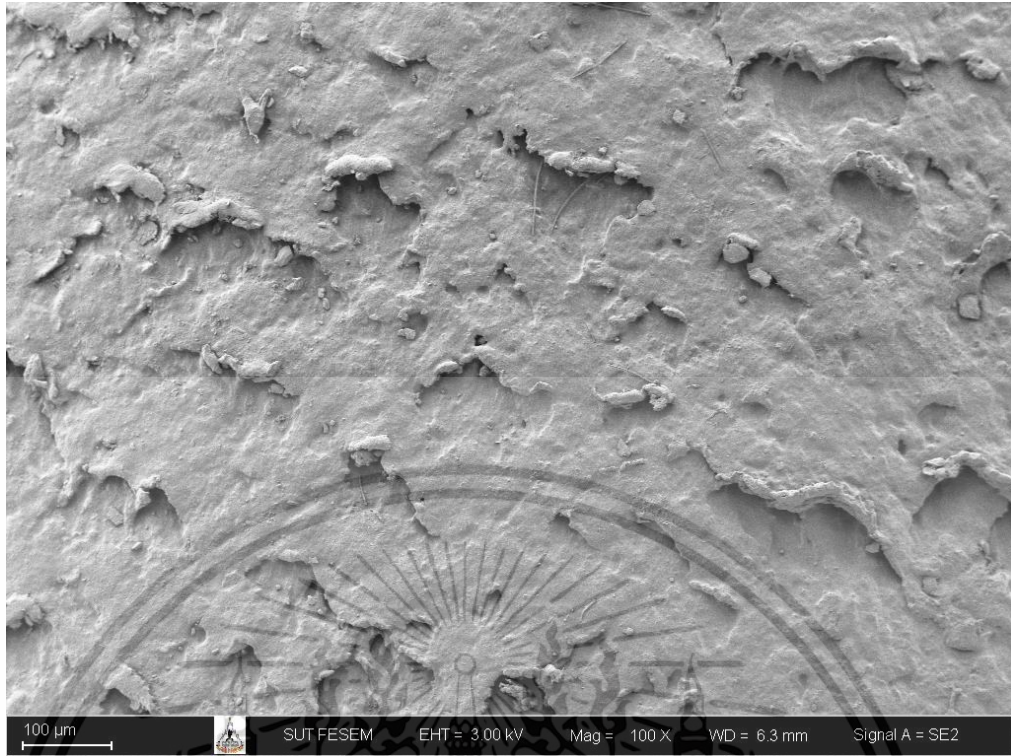


รูปที่ 133 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 1000 เท่า



รูปที่ 134 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 50 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

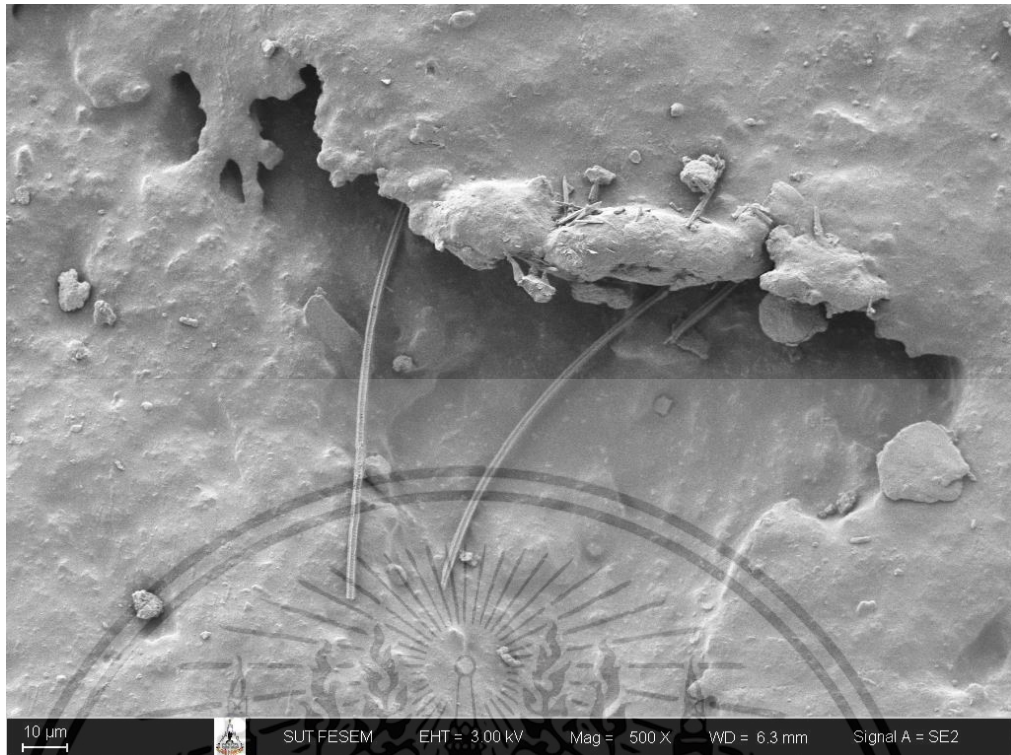


รูปที่ 135 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยจูลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 100 เท่า



รูปที่ 136 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยจูลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 300 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

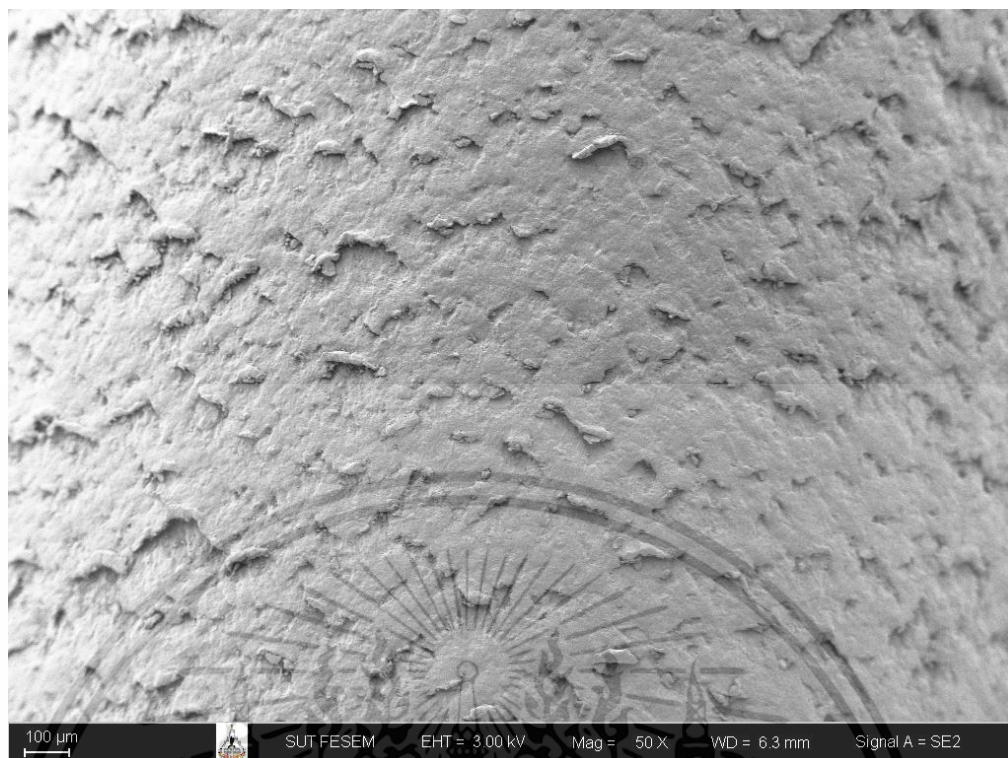


รูปที่ 137 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 500 เท่า

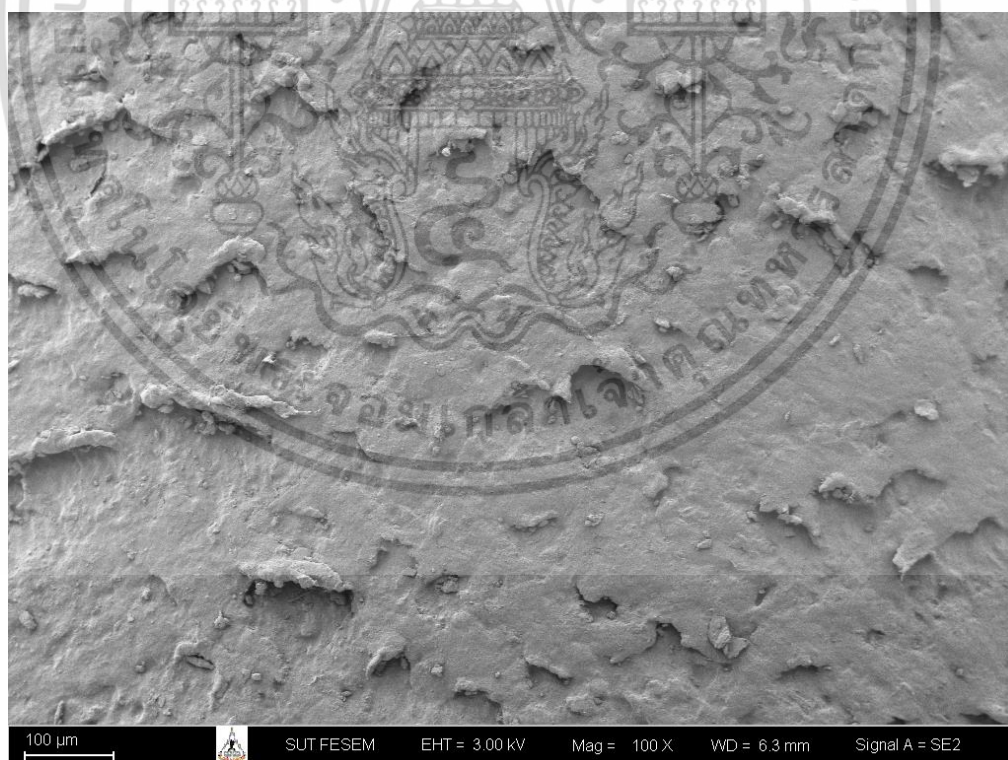


รูปที่ 138 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 1000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

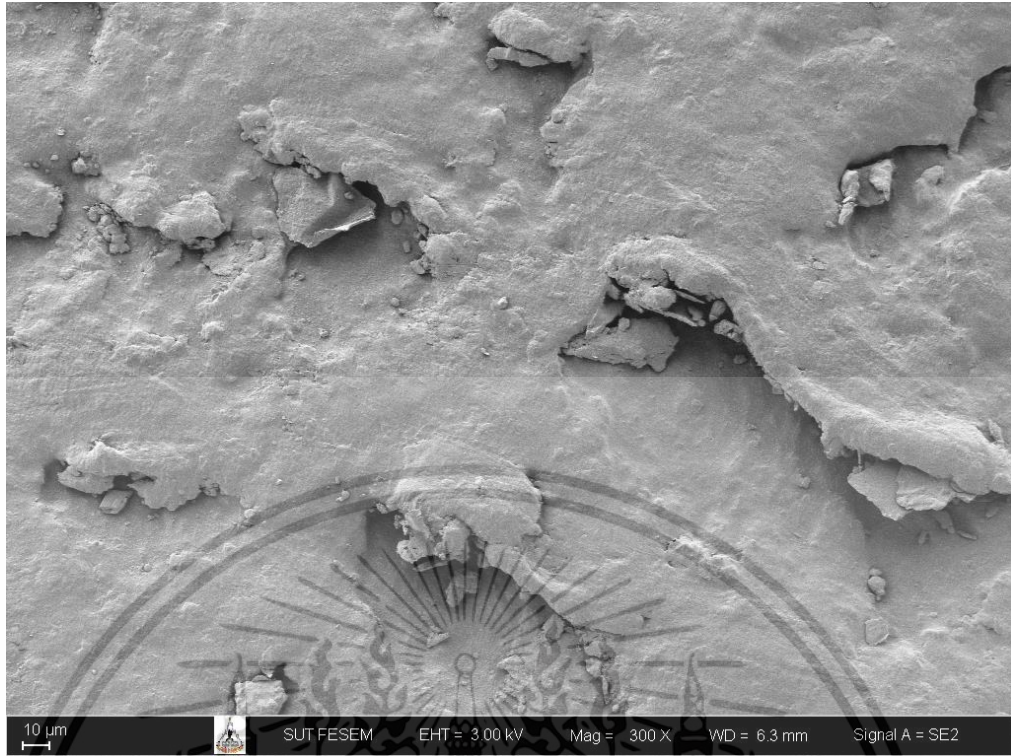


รูปที่ 139 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยจูลทรศน์อิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราด กำลังขยาย 50 เท่า

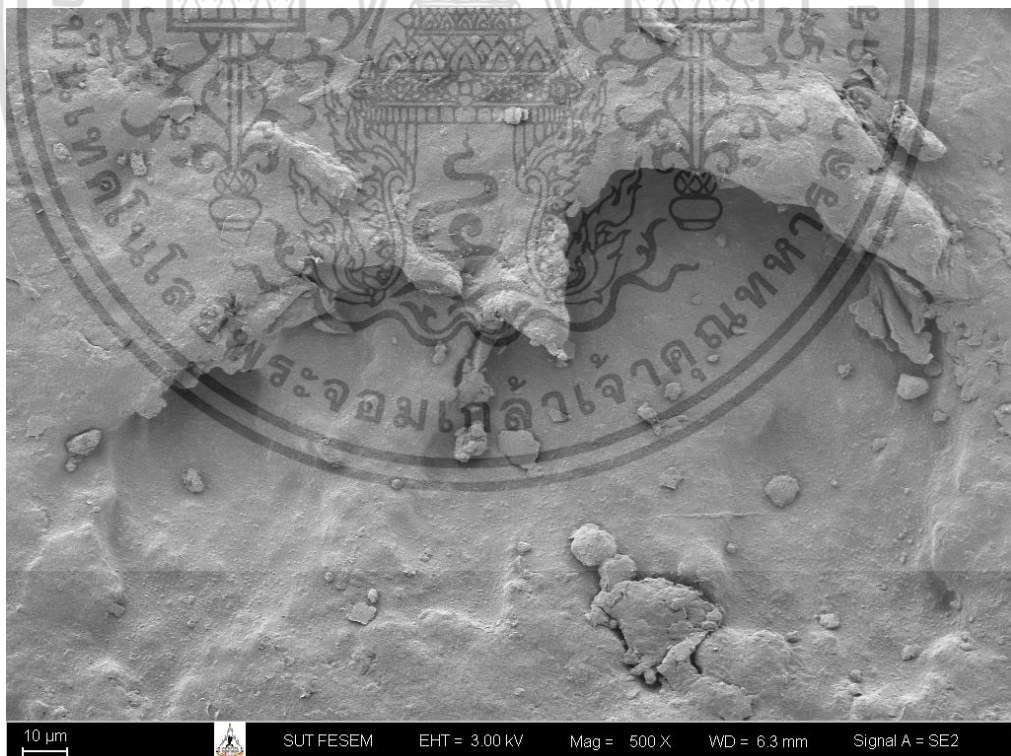


รูปที่ 140 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยจูลทรศน์อิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราด กำลังขยาย 100 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

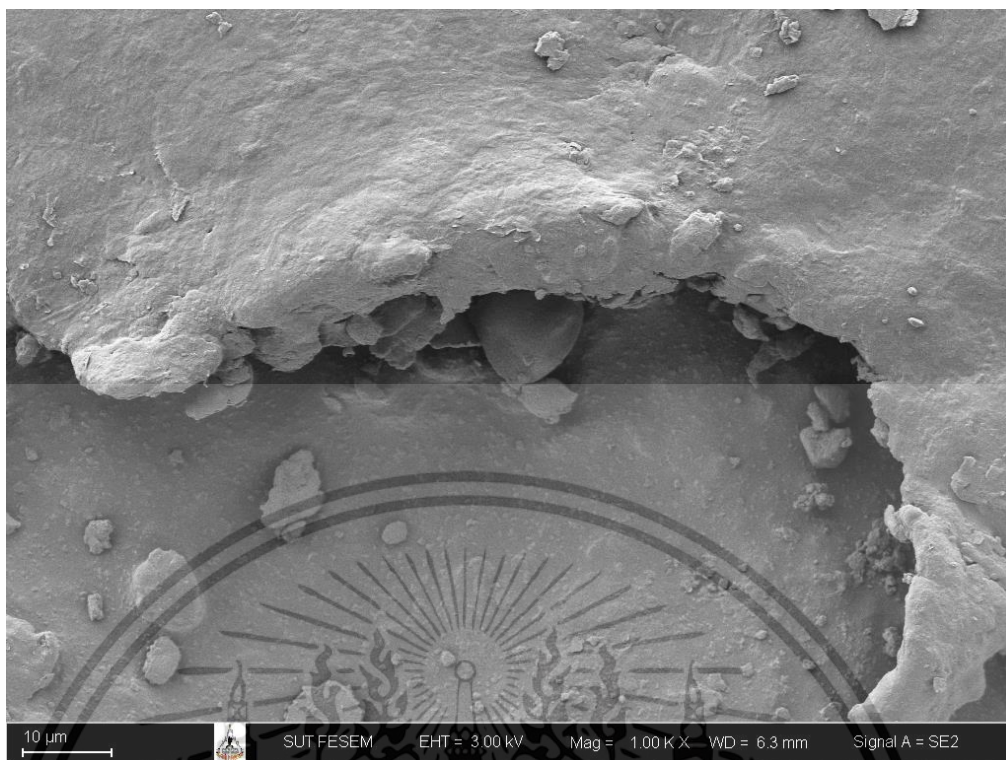


รูปที่ 141 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยจูลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 300 เท่า

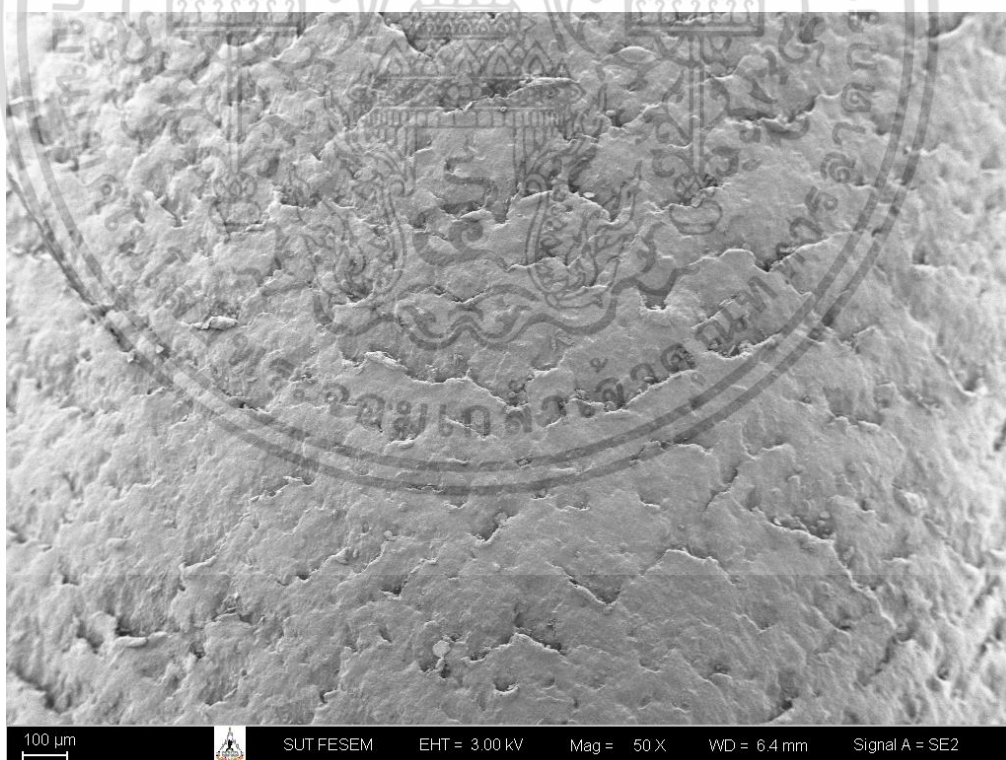


รูปที่ 142 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยจูลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

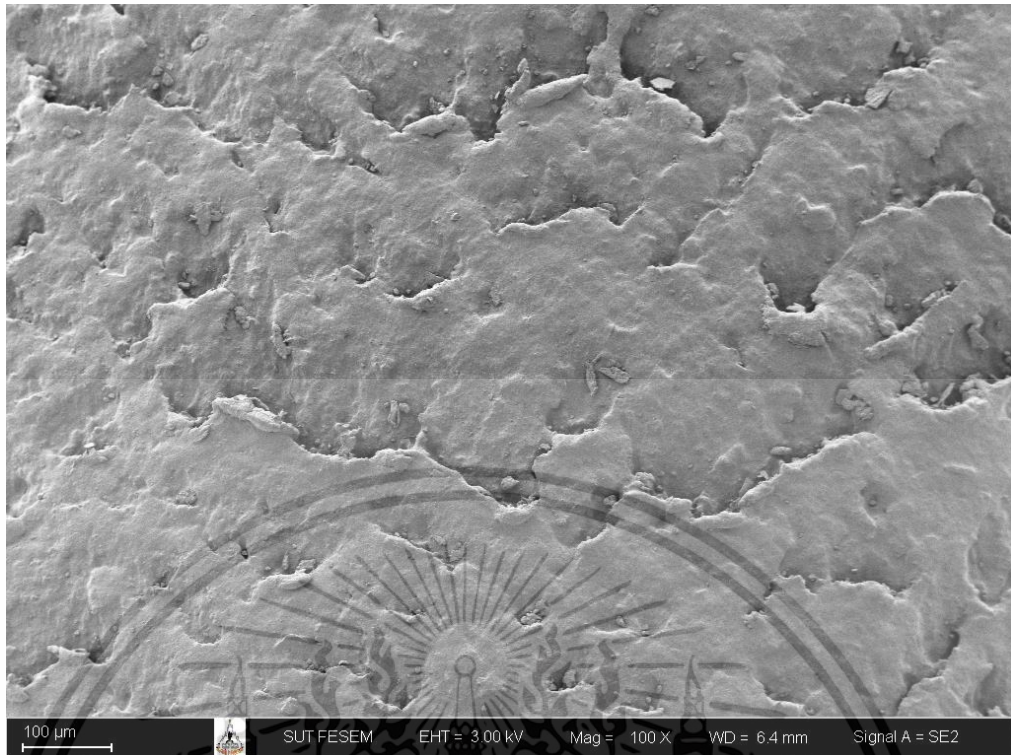


รูปที่ 143 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 1000 เท่า

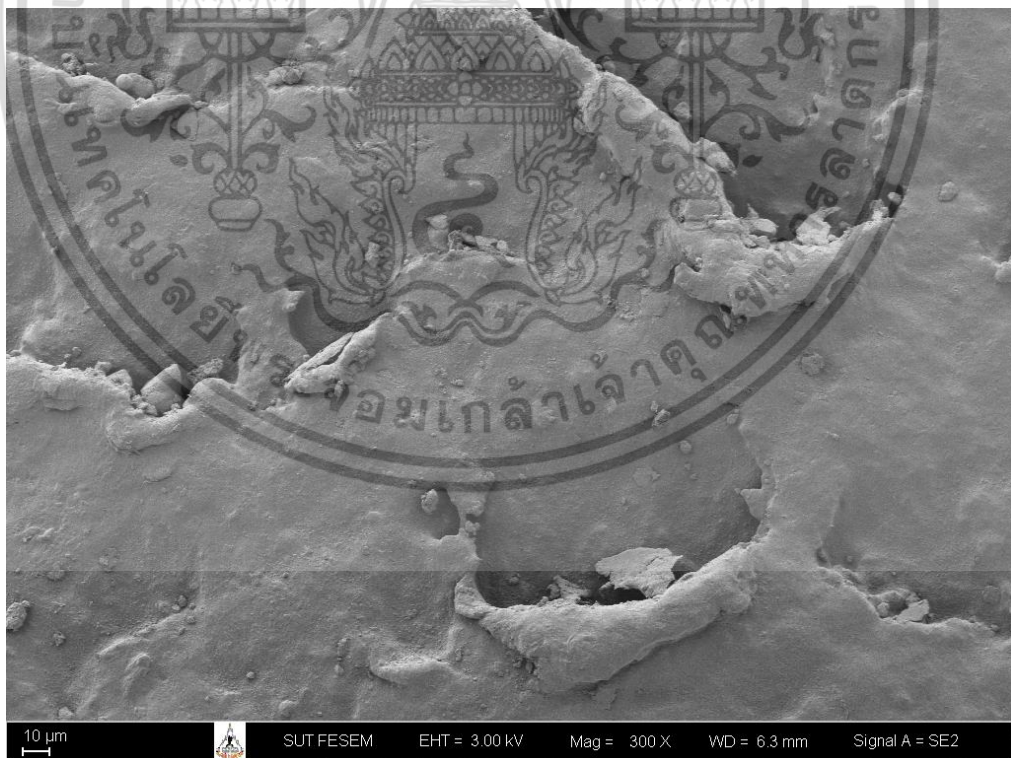


รูปที่ 144 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 50 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

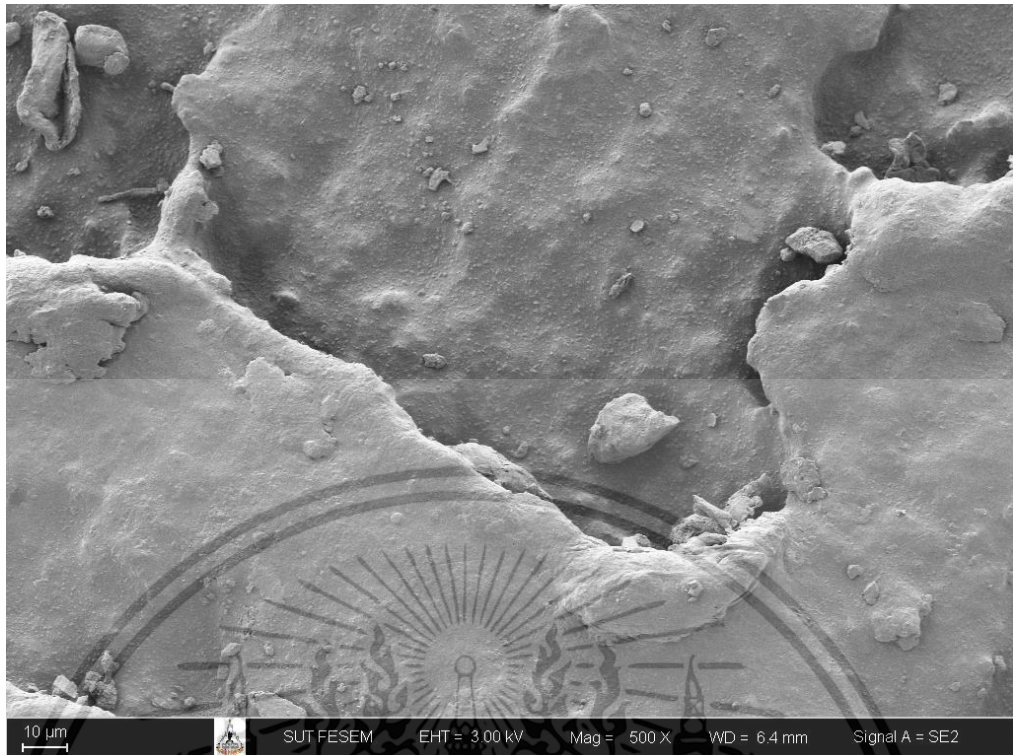


รูปที่ 145 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยจูลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 100 เท่า

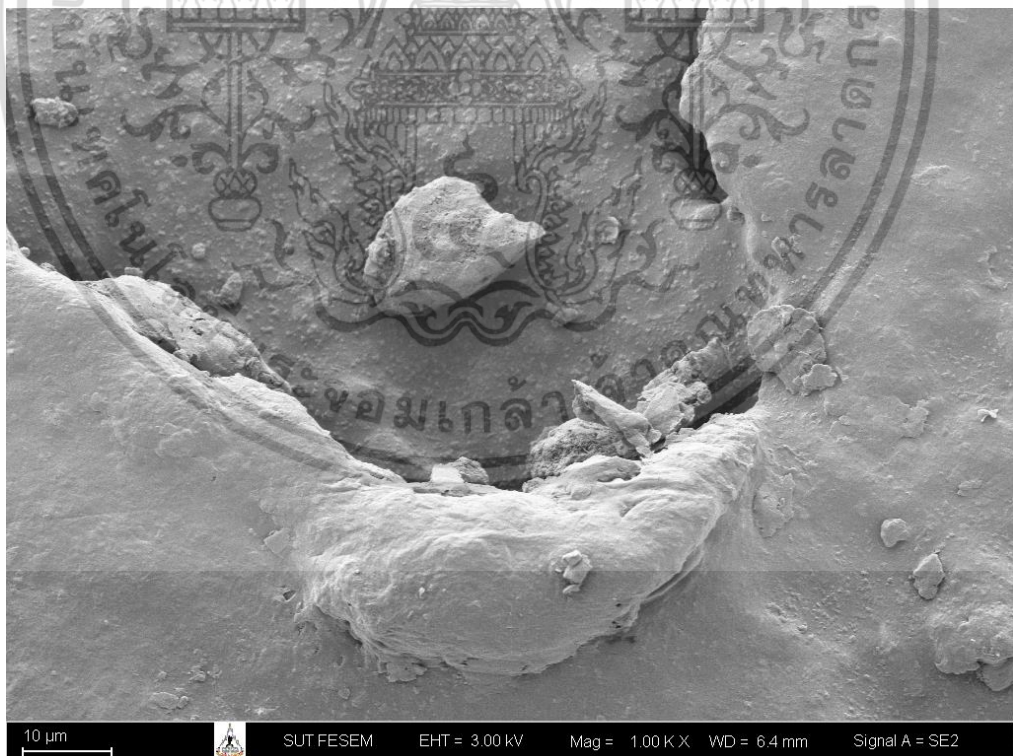


รูปที่ 146 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยจูลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 300 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

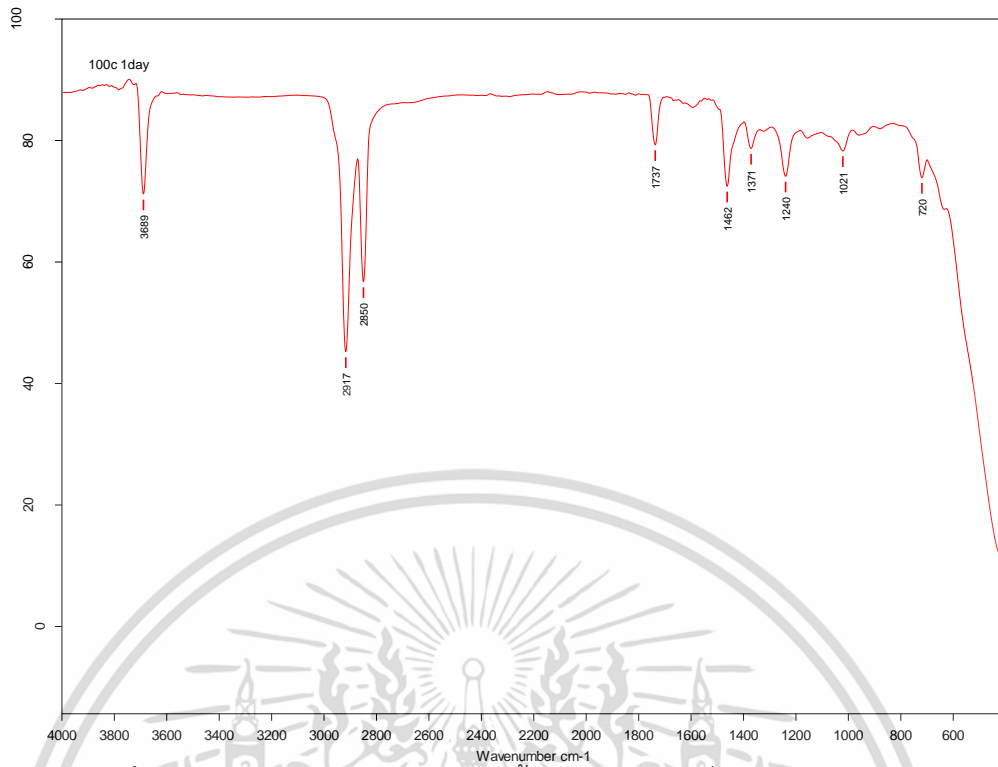


รูปที่ 147 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 500 เท่า

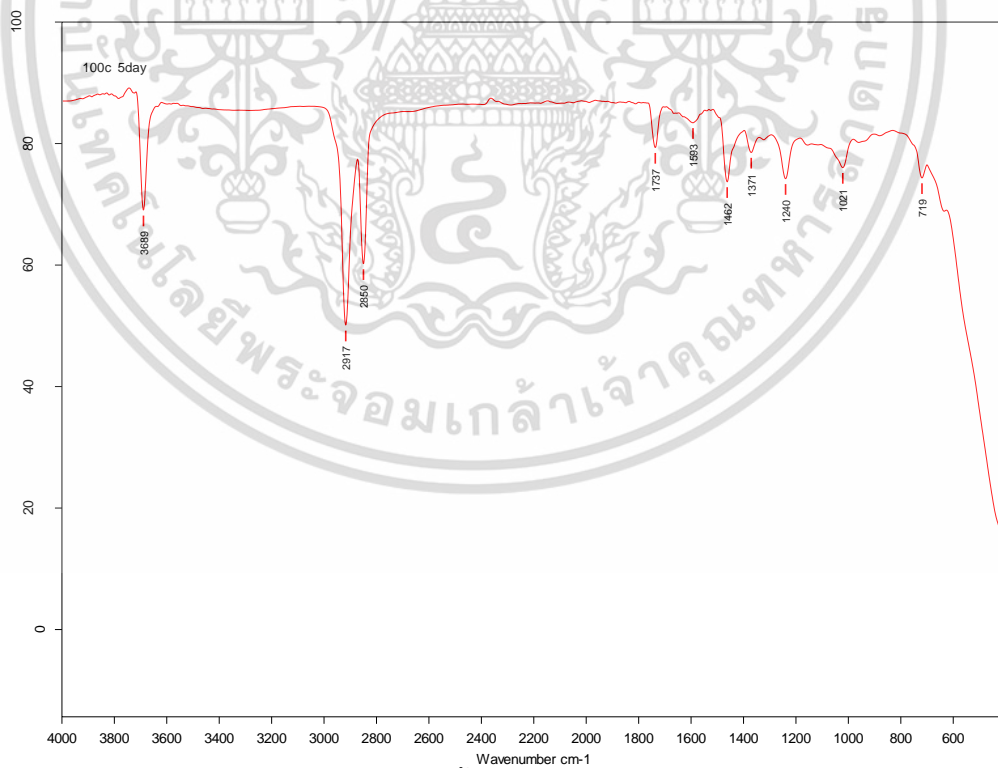


รูปที่ 148 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 1000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

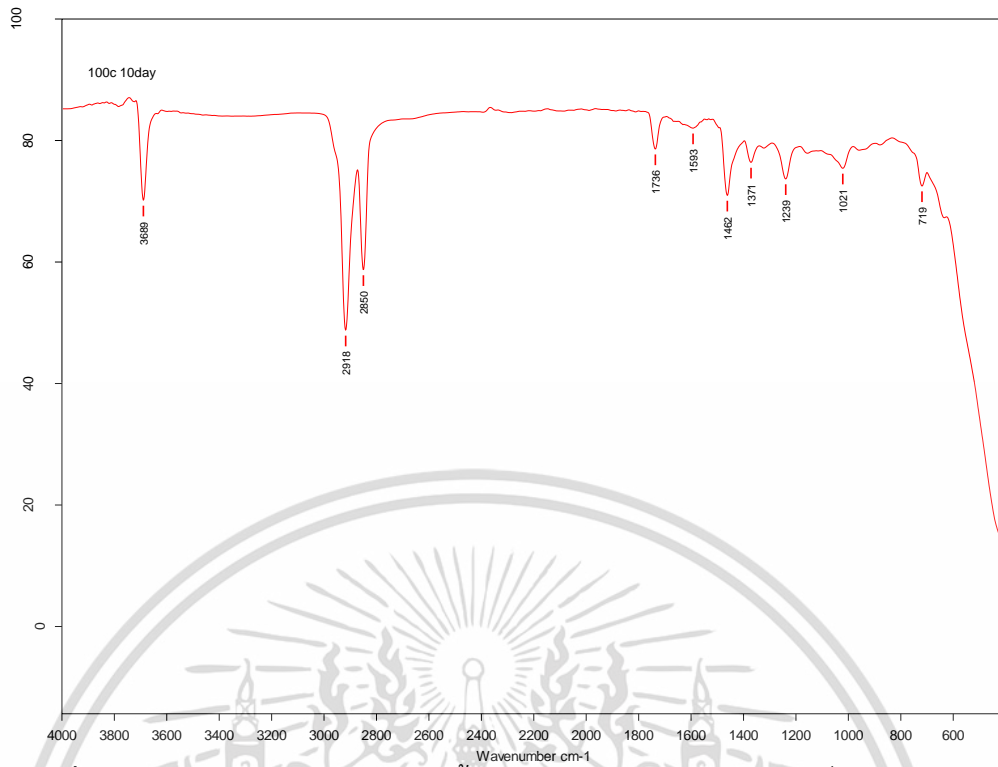


รูปที่ 149 ผลการทดสอบทางเคมีของเนื้อฉนวน XLPO ที่ยังไม่เร่งอายุขัยฉนวน ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปฏิกิริยาเคมีสเปกโตรสโคปีแบบ FT-IR

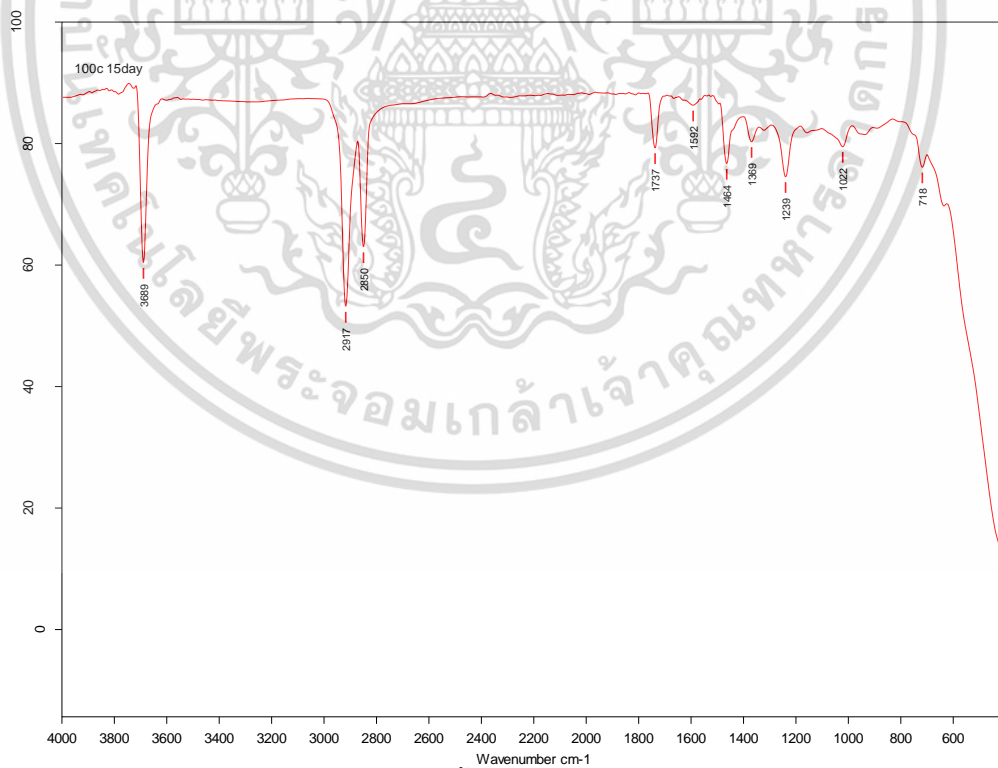


รูปที่ 150 ผลการทดสอบทางเคมีของเนื้อฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปฏิกิริยาเคมีสเปกโตรสโคปีแบบ FT-IR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

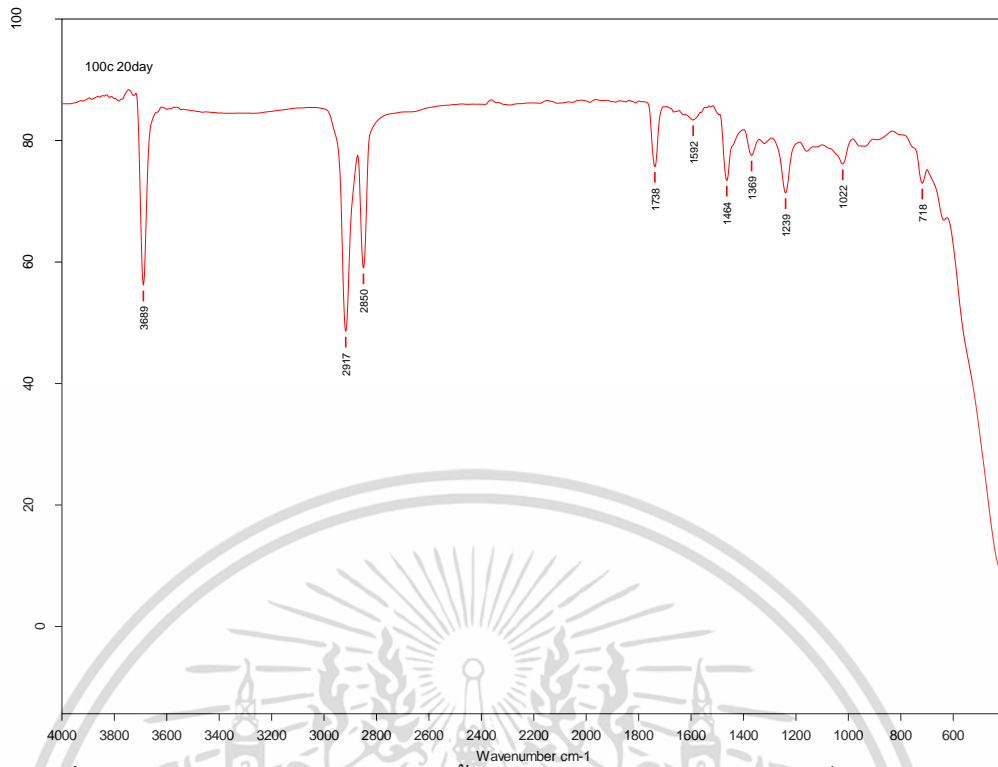


รูปที่ 151 ผลการทดสอบทางเคมีของเนื่อฉนวน XLPO แรงอายุชั้ยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ห้ปฏิกิริยาเคมีสเปกโตรสโคปีแบบ FT-IR

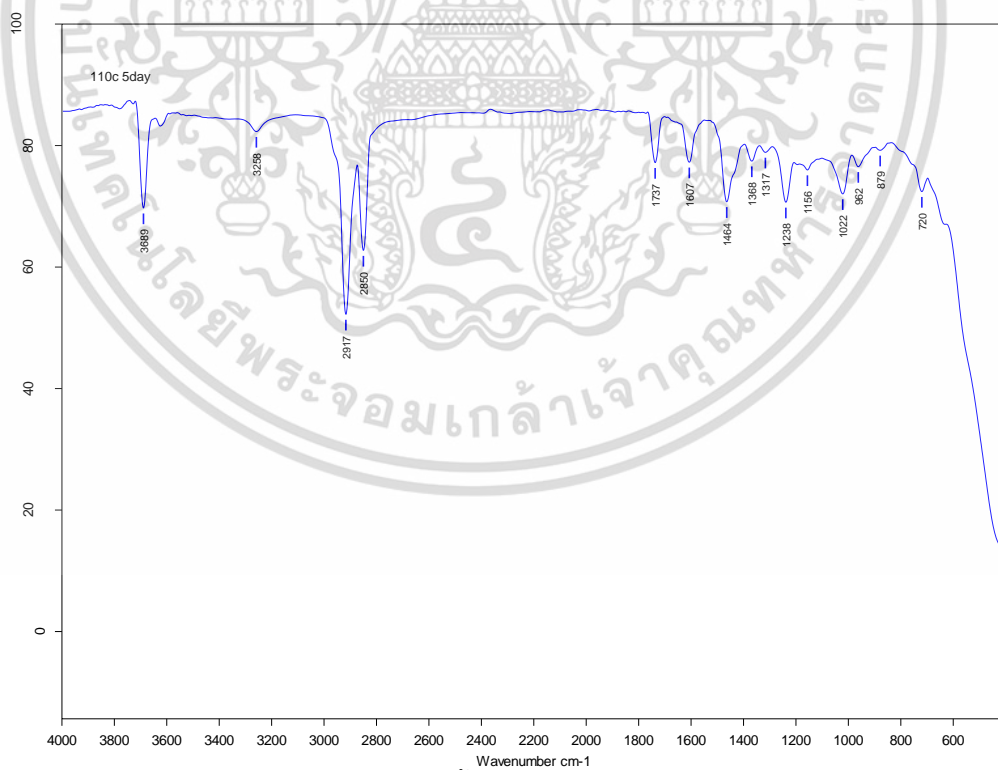


รูปที่ 152 ผลการทดสอบทางเคมีของเนื่อฉนวน XLPO แรงอายุชั้ยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ห้ปฏิกิริยาเคมีสเปกโตรสโคปีแบบ FT-IR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

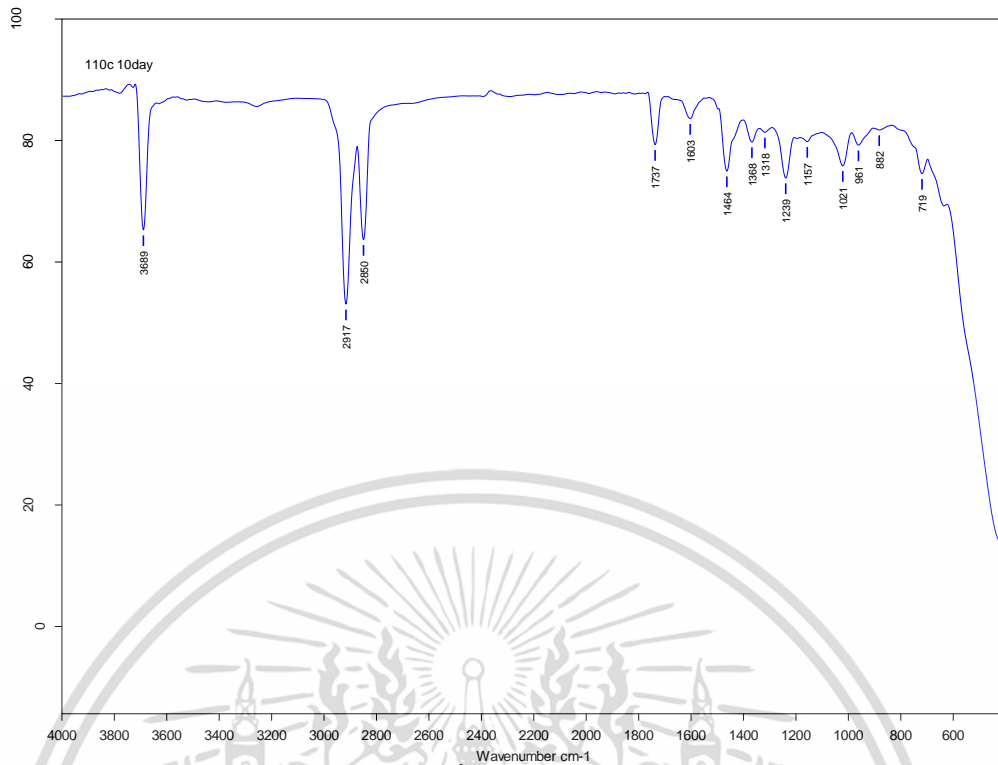


รูปที่ 153 ผลการทดสอบทางเคมีของเนื่อฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์พีฏิกิริยาเคมีสเปกโตรสโคปีแบบ FT-IR

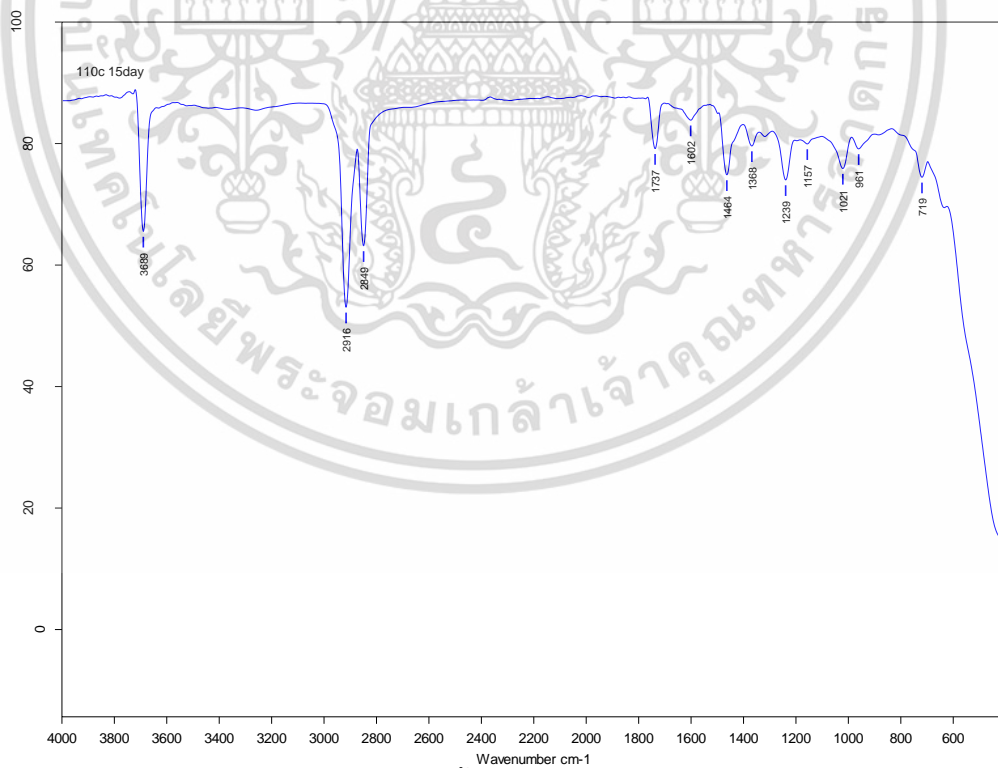


รูปที่ 154 ผลการทดสอบทางเคมีของเนื่อฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์พีฏิกิริยาเคมีสเปกโตรสโคปีแบบ FT-IR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

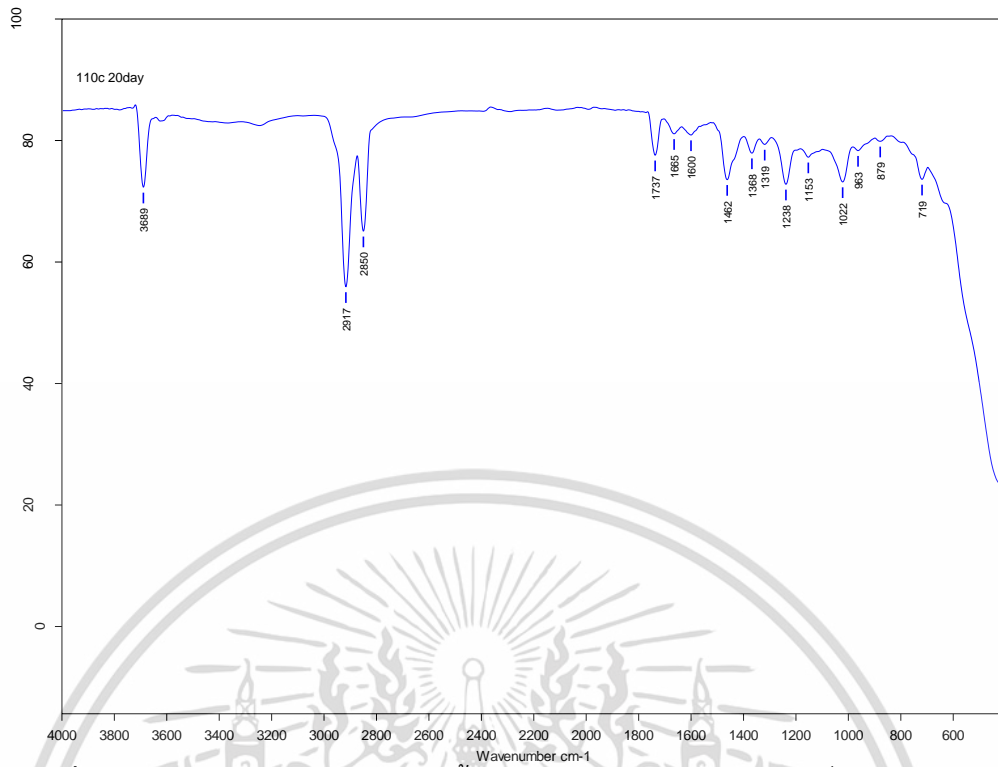


รูปที่ 155 ผลการทดสอบทางเคมีของเนื่อฉนวน XLPO แรงอายุชัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C
ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ห้ปฏิกิริยาเคมีสเปกโตรสโคปีแบบ FT-IR

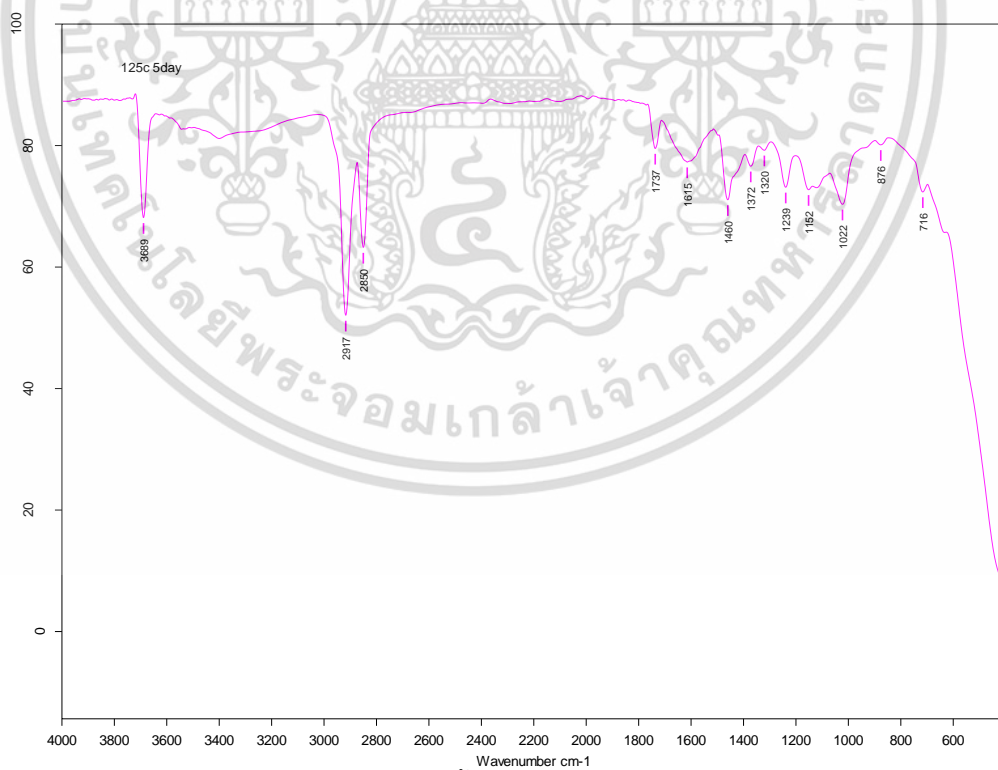


รูปที่ 156 ผลการทดสอบทางเคมีของเนื่อฉนวน XLPO แรงอายุชัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C
ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ห้ปฏิกิริยาเคมีสเปกโตรสโคปีแบบ FT-IR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

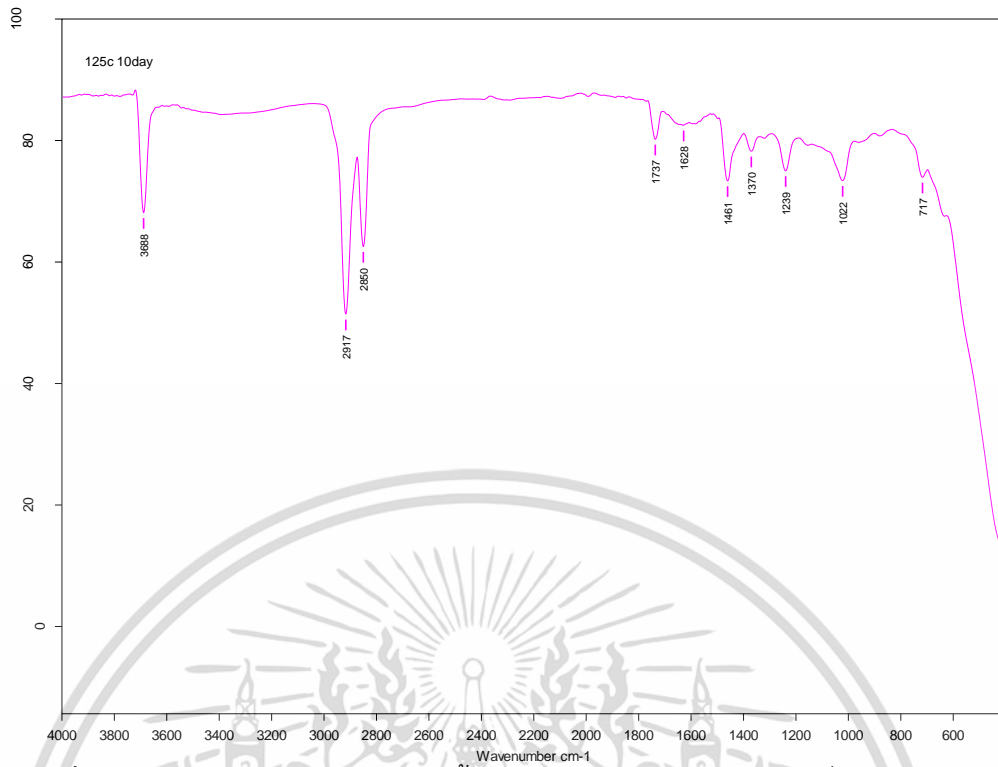


รูปที่ 157 ผลการทดสอบทางเคมีของเนื่อฉนวน XLPO เรงอายุชัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปฏิกิริยาเคมีสเปกโตรสโคปีแบบ FT-IR

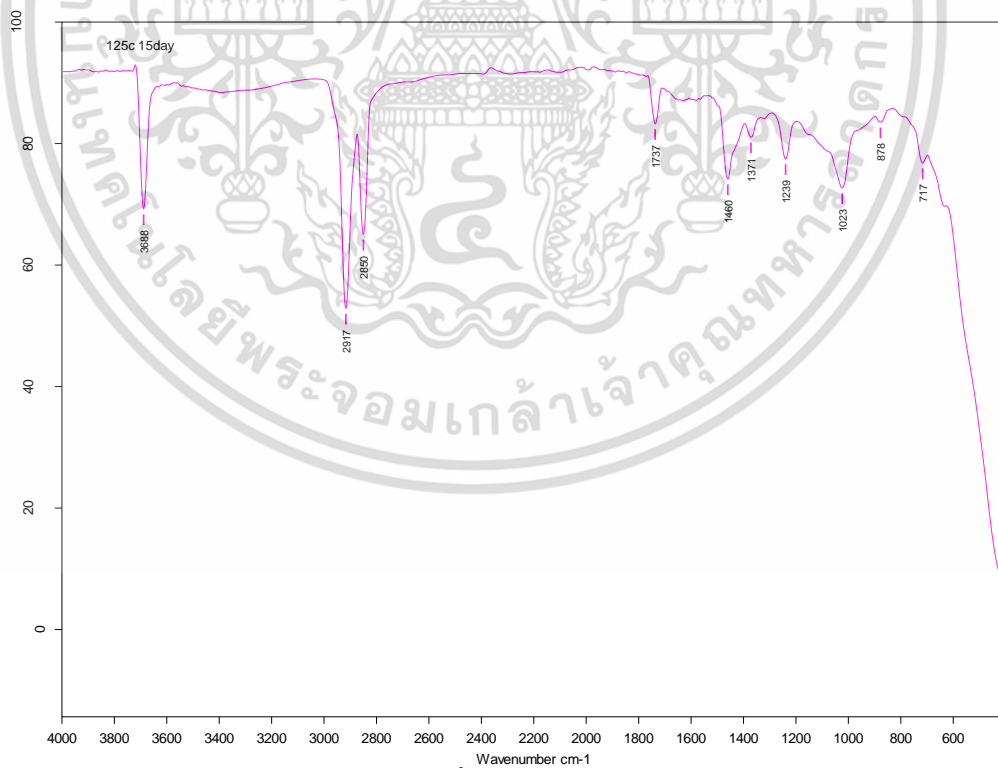


รูปที่ 158 ผลการทดสอบทางเคมีของเนื่อฉนวน XLPO เรงอายุชัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปฏิกิริยาเคมีสเปกโตรสโคปีแบบ FT-IR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

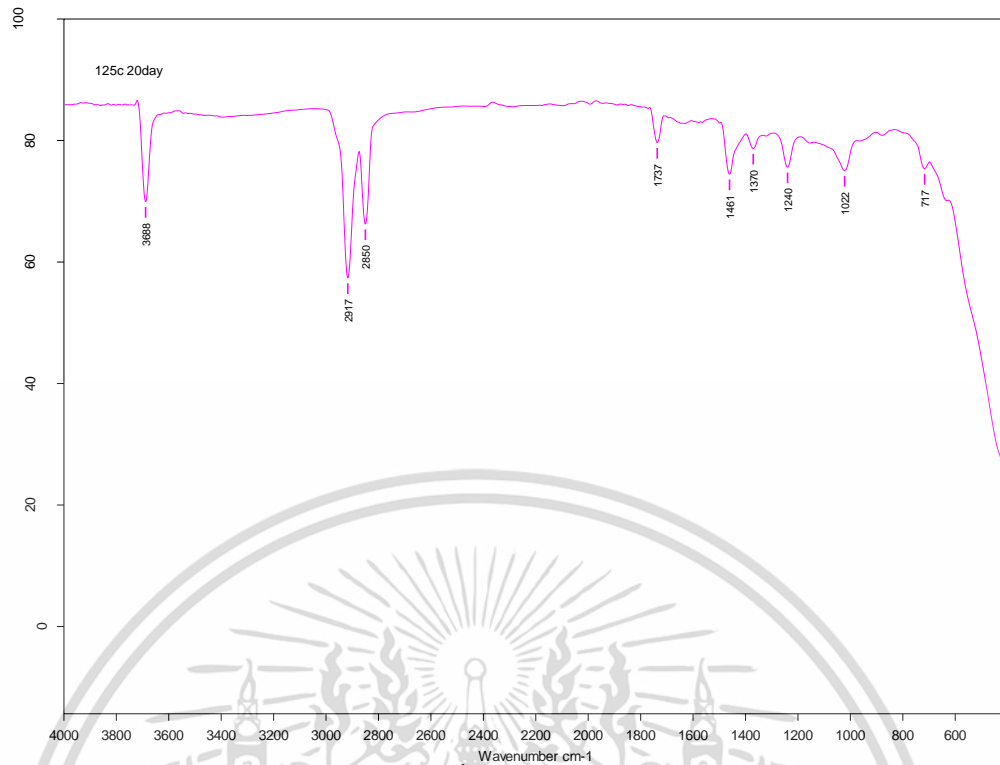


รูปที่ 159 ผลการทดสอบทางเคมีของเนื่อนนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์พีฏิกิริยาเคมีสเปกโตรสโคปีแบบ FT-IR



รูปที่ 160 ผลการทดสอบทางเคมีของเนื่อนนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์พีฏิกิริยาเคมีสเปกโตรสโคปีแบบ FT-IR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 161 ผลการทดสอบทางเคมีของเนื่อนวน XLPO เร่งอายุขัยจนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปฏิกิริยาเคมีสเปกโตรสโคปีแบบ FT-IR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2022- 5- 6 12:06

SQX Calculation Result							
Sample : Aging 100°C, 1Day				Date analyzed : 2022- 5- 6 11:46			
Application : F-U_Solid_N_001				Sample type : Polymer			
Balance : CH2							
Matching library :				Impurity corr. :			
Sample film corr. :				File : Aging 100°C, 1_1			
No.	Component	Result	Unit	Det. limit	El. line	Intensity	w/o normal
1	CH2	87.3	mass%				87.3397
2	Mg	10.8	mass%	0.01363	Mg-KA	17.3310	10.7971
3	Br	0.712	mass%	0.00092	Br-KA	135.2997	0.7125
4	Ca	0.353	mass%	0.00293	Ca-KA	5.9703	0.3531
5	Si	0.282	mass%	0.00255	Si-KA	1.5640	0.2820
6	Al	0.145	mass%	0.00811	Al-KA	0.9145	0.1450
7	Cu	0.122	mass%	0.00089	Cu-KA	8.6358	0.1221
8	Na	0.0510	mass%	0.01843	Na-KA	0.0251	0.0510
9	Sb	0.0423	mass%	0.00386	Sb-KA	0.2503	0.0423
10	P	0.0423	mass%	0.00112	P-KA	0.3339	0.0423
11	Sn	0.0306	mass%	0.00324	Sn-KA	0.1840	0.0306
12	Cl	0.0270	mass%	0.00065	Cl-KA	0.5652	0.0270
13	K	0.0186	mass%	0.00285	K-KA	0.1799	0.0186
14	S	0.0185	mass%	0.00058	S-KA	0.2660	0.0185
15	Sr	0.0107	mass%	0.00075	Sr-KA	2.1412	0.0107
16	Fe	0.0046	mass%	0.00101	Fe-KA	0.1307	0.0046
17	Zn	0.0017	mass%	0.00078	Zn-KA	0.1598	0.0017
18	Zr	0.0014	mass%	0.00073	Zr-KA	0.6780	0.0014

Rigaku

รูปที่ 162 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์มวลสารของธาตุแต่ละชนิด
ของฉนวน XLPO ที่ยังไม่ได้เร่งอายุขัยฉนวน ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ
โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรเมทรี WD-XRF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2022- 5- 6 12:06

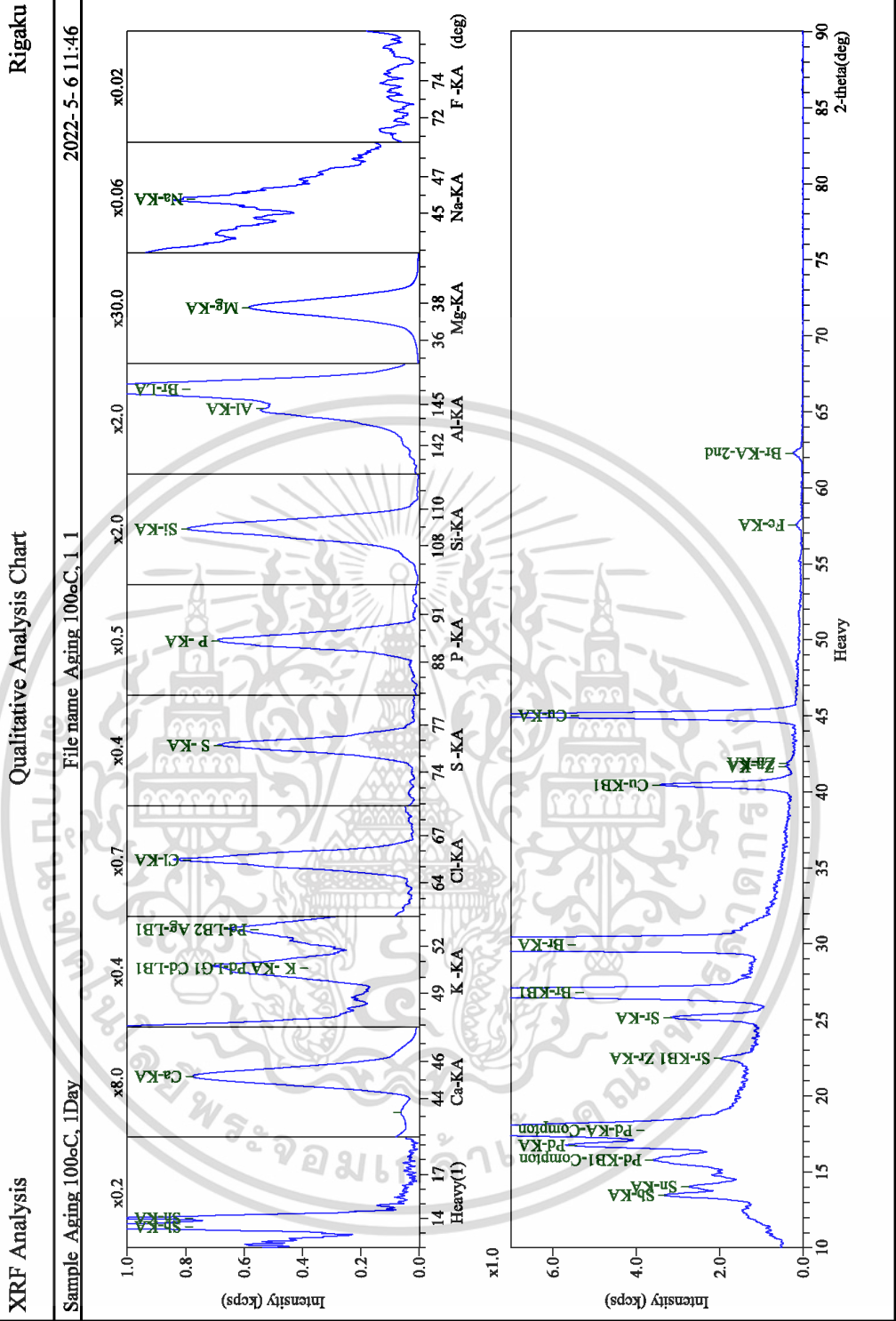
Peak Identification Result					
Sample : Aging 100°C, 1Day			Measured date : 2022- 5- 6 11:46		
Application : F-U_Solid_N_001			File : Aging 100°C, 1_1		
Spectrum	No.	Peak position (deg)	Net int. (kcps)	BG int. (kcps)	Element line
Heavy	1	13.464	1.792	1.491	Sb-KA
	2	14.014	1.208	1.553	Sn-KA
	3	15.798	2.180	1.410	Pd-KB1-Compton
	4	16.754	3.324	2.741	Pd-KA
	5	17.714	9.574	1.410	Pd-KA-Compton
	6	22.468	0.678	1.270	Sr-KB1 Zr-KA
	7	25.136	2.141	1.037	Sr-KA
	8	26.782	25.420	1.049	Br-KB1
	9	29.960	135.300	1.427	Br-KA
	10	40.445	3.148	0.282	Cu-KB1
	11	41.653	0.160	0.261	Zn-KA
	12	41.863	0.143	0.249	Zn-KA
	13	45.008	8.636	0.187	Cu-KA
	14	57.525	0.131	0.037	Fe-KA
	15	62.263	0.219	0.025	Br-KA-2nd
Heavy(1)	1	13.436	0.250	0.039	Sb-KA
	2	14.017	0.184	0.029	Sn-KA
Ca-KA	1	43.223	0.188	0.314	Ca-KA
K -KA	2	45.178	5.970	0.226	K -KA
	1	50.585	0.180	0.088	K -KA Pd-LG1
	2	53.044	0.115	0.144	Cd-LB1 Pd-LB2 Ag-LB1
Cl-KA	1	65.435	0.565	0.022	Cl-KA
S -KA	1	75.701	0.266	0.008	S -KA
P -KA	1	89.309	0.334	0.009	P -KA
Si-KA	1	108.939	1.564	0.023	Si-KA
Al-KA	1	144.685	0.915	0.134	Al-KA
	2	146.096	2.152	0.136	Br-LA
Mg-KA	1	37.759	17.331	0.143	Mg-KA
Na-KA	1	45.751	0.025	0.023	Na-KA

Rigaku

รูปที่ 163 ผลการทดสอบตำแหน่ง Peak ของแต่ละองค์ในแต่ละธาตุ
ของฉนวน XLPO ที่ยังไม่ได้เร่งอายุขัยฉนวน ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ
โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรเมทรี WD-XRF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2022- 5- 6 12:06



รูปที่ 164 ผลการทดลองเพื่อหาความเข้มข้นของแต่ละธาตุ
 ในฉนวน XLPO ที่ยังไม่เร่งอายุขัยเมื่อฉนวนด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ
 โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรเมทรี WD-XRF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2022- 5- 6 12:27

SQX Calculation Result							
Sample : Aging 100°C, 5Day				Date analyzed : 2022- 5- 6 12:06			
Application : F-U_Solid_N_002				Sample type : Polymer			
Balance : CH2							
Matching library :				Impurity corr. :			
Sample film corr. :				File : Aging 100°C, 5Da			
No.	Component	Result	Unit	Det. limit	El. line	Intensity	w/o normal
1	CH2	88.0	mass%				87.9634
2	Mg	10.1	mass%	0.01425	Mg-KA	16.1921	10.0968
3	Br	0.673	mass%	0.00081	Br-KA	129.4372	0.6729
4	Ca	0.333	mass%	0.00284	Ca-KA	5.7533	0.3329
5	Si	0.332	mass%	0.00253	Si-KA	1.8887	0.3322
6	Al	0.190	mass%	0.00797	Al-KA	1.1797	0.1902
7	Cu	0.157	mass%	0.00084	Cu-KA	11.3677	0.1573
8	Cl	0.0459	mass%	0.00057	Cl-KA	0.9842	0.0459
9	Sb	0.0421	mass%	0.00332	Sb-KA	0.2527	0.0421
10	Na	0.0406	mass%	0.01732	Na-KA	0.0198	0.0406
11	P	0.0375	mass%	0.00106	P-KA	0.3031	0.0375
12	Sn	0.0240	mass%	0.00273	Sn-KA	0.1470	0.0240
13	K	0.0200	mass%	0.00268	K-KA	0.1936	0.0200
14	S	0.0178	mass%	0.00061	S-KA	0.2616	0.0178
15	Sr	0.0106	mass%	0.00071	Sr-KA	2.1556	0.0106
16	Ti	0.0085	mass%	0.00219	Ti-KA	0.0428	0.0085
17	Fe	0.0059	mass%	0.00081	Fe-KA	0.1721	0.0059
18	Zr	0.0014	mass%	0.00070	Zr-KA	0.6891	0.0014

Rigaku

รูปที่ 165 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์มวลสารของธาตุแต่ละชนิด
ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ
โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2022- 5- 6 12:26

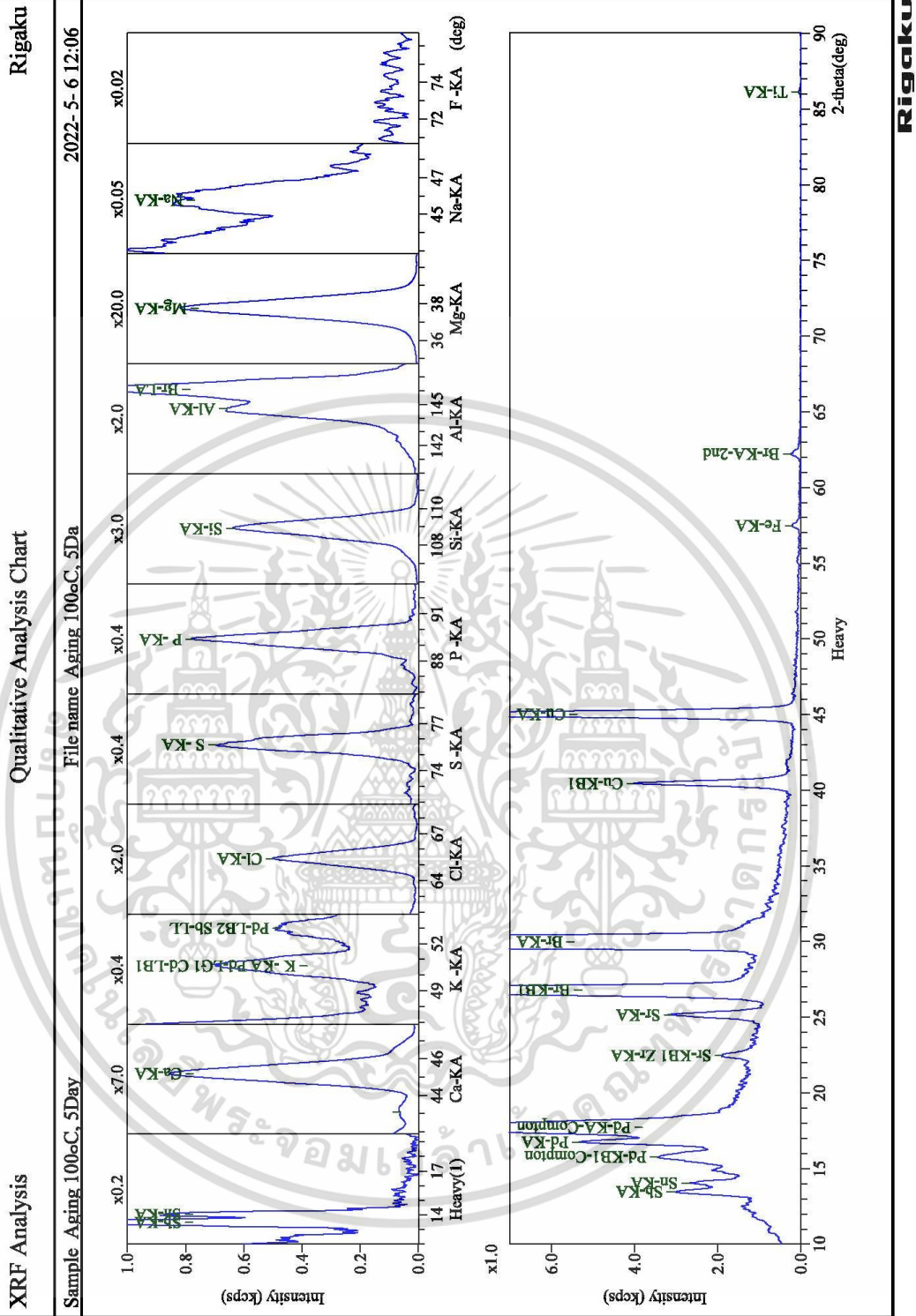
Peak Identification Result					
Sample : Aging 100°C, 5Day			Measured date : 2022- 5- 6 12:06		
Application : F-U_Solid_N_002			File : Aging 100°C, 5Da		
Spectrum	No.	Peak position (deg)	Net int. (kcps)	BG int. (kcps)	Element line
Heavy	1	13.464	1.736	1.295	Sb-KA
	2	14.040	1.279	1.409	Sn-KA
	3	15.768	2.011	1.421	Pd-KB1-Compton
	4	16.754	3.088	2.590	Pd-KA
	5	17.704	9.052	1.421	Pd-KA-Compton
	6	22.467	0.689	1.192	Sr-KB1 Zr-KA
	7	25.143	2.156	0.964	Sr-KA
	8	26.781	24.182	1.021	Br-KB1
	9	29.962	129.437	1.092	Br-KA
	10	40.452	3.744	0.270	Cu-KB1
	11	45.008	11.368	0.175	Cu-KA
	12	57.470	0.172	0.027	Fe-KA
	13	62.217	0.209	0.027	Br-KA-2nd
	14	86.128	0.043	0.005	Ti-KA
Heavy(1)	1	13.497	0.253	0.032	Sb-KA
	2	14.022	0.147	0.022	Sn-KA
Ca-KA	1	43.114	0.161	0.301	
	2	45.184	5.753	0.228	Ca-KA
K -KA	1	50.599	0.194	0.082	K -KA Pd-LG1
	2	52.998	0.077	0.118	Cd-LB1 Sb-LL
Cl-KA	1	65.412	0.984	0.017	Cl-KA
S -KA	1	75.661	0.262	0.009	S -KA
P -KA	1	89.362	0.303	0.008	P -KA
Si-KA	1	108.940	1.889	0.023	Si-KA
Al-KA	1	144.657	1.180	0.139	Al-KA
	2	146.095	2.104	0.136	Br-LA
Mg-KA	1	37.760	16.192	0.152	Mg-KA
Na-KA	1	45.784	0.020	0.021	Na-KA

Rigaku

รูปที่ 166 ผลการทดสอบตำแหน่ง Peak ของแต่ละองค์ในแต่ละธาตุ
ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ
โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2022- 5- 6 12:26



รูปที่ 167 ผลการทดลองเพื่อหาความเข้มข้นของแต่ละธาตุ

ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ

โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมตรี WD-XRF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2022- 5- 6 12:47

SQX Calculation Result							
Sample : Aging 100°C, 10Day				Date analyzed : 2022- 5- 6 12:27			
Application : F-U_Solid_N_003				Sample type : Polymer			
Balance : CH2							
Matching library :				Impurity corr. :			
Sample film corr. :				File : Aging 100°C, 10D			
No.	Component	Result	Unit	Det. limit	El. line	Intensity	w/o normal
1	CH2	86.2	mass%				86.2223
2	Mg	11.6	mass%	0.01405	Mg-KA	18.6773	11.6447
3	Br	0.760	mass%	0.00086	Br-KA	137.4740	0.7602
4	Ca	0.384	mass%	0.00326	Ca-KA	6.1907	0.3840
5	Si	0.359	mass%	0.00294	Si-KA	1.9177	0.3590
6	Al	0.253	mass%	0.00885	Al-KA	1.4587	0.2529
7	Cu	0.105	mass%	0.00097	Cu-KA	7.0357	0.1053
8	Sb	0.0549	mass%	0.00409	Sb-KA	0.3130	0.0549
9	P	0.0464	mass%	0.00133	P-KA	0.3511	0.0464
10	Sn	0.0325	mass%	0.00351	Sn-KA	0.1885	0.0325
11	Na	0.0322	mass%	0.01803	Na-KA	0.0158	0.0322
12	Cl	0.0306	mass%	0.00060	Cl-KA	0.6126	0.0306
13	K	0.0254	mass%	0.00311	K-KA	0.2312	0.0254
14	S	0.0179	mass%	0.00061	S-KA	0.2460	0.0179
15	Sr	0.0120	mass%	0.00080	Sr-KA	2.2834	0.0120
16	Ti	0.0084	mass%	0.00207	Ti-KA	0.0391	0.0084
17	Fe	0.0066	mass%	0.00092	Fe-KA	0.1765	0.0066
18	Mn	0.0040	mass%	0.00115	Mn-KA	0.0671	0.0040
19	Zr	0.0010	mass%	0.00078	Zr-KA	0.7192	0.0010

Rigaku

รูปที่ 168 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์มวลสารของธาตุแต่ละชนิด
ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ
โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

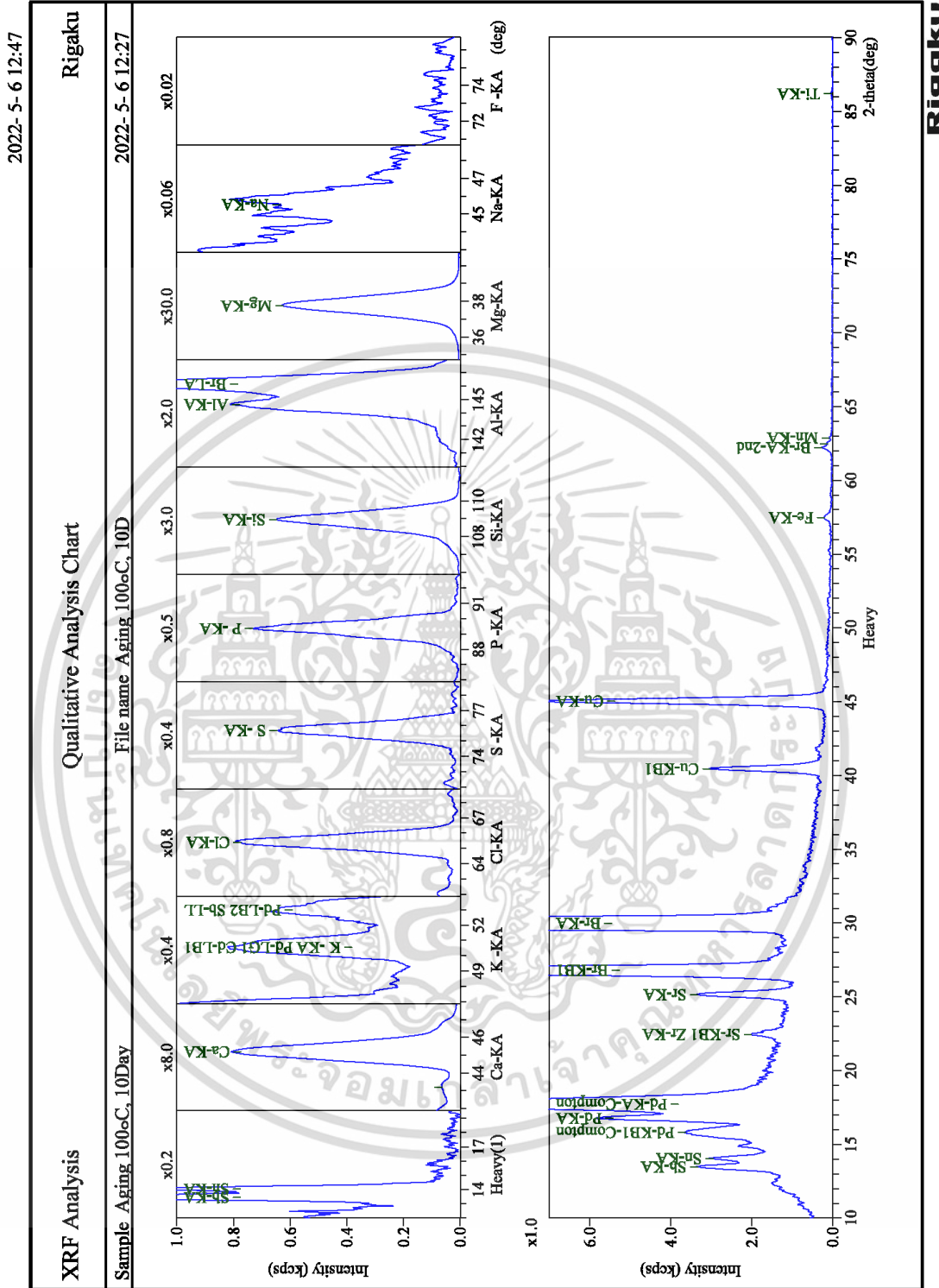
2022- 5- 6 12:47

Peak Identification Result					
Sample : Aging 100°C, 10Day			Measured date : 2022- 5- 6 12:27		
Application : F-U_Solid_N_003			File : Aging 100°C, 10D		
Spectrum	No.	Peak position (deg)	Net int. (kcps)	BG int. (kcps)	Element line
Heavy	1	13.475	1.803	1.559	Sb-KA
	2	14.037	1.401	1.629	Sn-KA
	3	15.816	2.049	1.596	Pd-KB1-Compton
	4	16.769	3.310	2.915	Pd-KA
	5	17.716	9.767	1.596	Pd-KA-Compton
	6	22.444	0.719	1.292	Sr-KB1 Zr-KA
	7	25.142	2.283	1.058	Sr-KA
	8	26.783	26.006	1.052	Br-KB1
	9	29.962	137.474	1.118	Br-KA
	10	40.457	2.719	0.295	Cu-KB1
	11	45.027	7.036	0.193	Cu-KA
	12	57.463	0.176	0.028	Fe-KA
	13	62.217	0.248	0.017	Br-KA-2nd
	14	62.447	0.114	0.017	
	15	62.860	0.067	0.018	Mn-KA
	16	86.183	0.039	0.003	Ti-KA
Heavy(1)	1	13.460	0.313	0.041	Sb-KA
	2	14.039	0.188	0.031	Sn-KA
Ca-KA	1	43.217	0.173	0.345	
	2	45.182	6.191	0.256	Ca-KA
K -KA	1	50.541	0.231	0.097	K -KA Pd-LG1
	2	52.969	0.094	0.163	Cd-LB1 Pd-LB2 Sb-LL
Cl-KA	1	65.407	0.613	0.018	Cl-KA
S -KA	1	75.712	0.246	0.007	S -KA
P -KA	1	89.365	0.351	0.011	P -KA
Si-KA	1	108.944	1.918	0.027	Si-KA
Al-KA	1	144.633	1.459	0.158	Al-KA
	2	146.114	2.192	0.153	Br-LA
Mg-KA	1	37.764	18.677	0.150	Mg-KA
Na-KA	1	45.525	0.016	0.022	Na-KA

Rigaku

รูปที่ 169 ผลการทดสอบตำแหน่ง Peak ของแต่ละองค์ในแต่ละธาตุ
ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ
โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 170 ผลการทดลองเพื่อหาความเข้มข้นของแต่ละธาตุ
 ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ
 โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2022- 5- 6 13:09

SQX Calculation Result							
Sample : Aging 100°C, 15Day				Date analyzed : 2022- 5- 6 12:48			
Application : F-U_Solid_N_004				Sample type : Polymer			
Balance : CH2							
Matching library :				Impurity corr. :			
Sample film corr. :				File : Aging 100°C, 15D			
No.	Component	Result	Unit	Det. limit	El. line	Intensity	w/o normal
1	CH2	85.6	mass%				85.5583
2	Mg	12.1	mass%	0.01475	Mg-KA	19.4717	12.1483
3	Br	0.845	mass%	0.00106	Br-KA	148.3698	0.8452
4	Ca	0.432	mass%	0.00344	Ca-KA	6.7546	0.4319
5	Si	0.405	mass%	0.00318	Si-KA	2.1215	0.4050
6	Al	0.181	mass%	0.00891	Al-KA	1.0775	0.1807
7	Cl	0.102	mass%	0.00078	Cl-KA	1.9947	0.1021
8	Cu	0.0629	mass%	0.00101	Cu-KA	4.0560	0.0629
9	Sb	0.0544	mass%	0.00452	Sb-KA	0.2990	0.0544
10	P	0.0526	mass%	0.00110	P-KA	0.3893	0.0526
11	Sn	0.0418	mass%	0.00374	Sn-KA	0.2334	0.0418
12	Na	0.0338	mass%	0.01939	Na-KA	0.0165	0.0338
13	K	0.0258	mass%	0.00346	K-KA	0.2299	0.0258
14	S	0.0210	mass%	0.00074	S-KA	0.2820	0.0210
15	Sr	0.0136	mass%	0.00088	Sr-KA	2.4570	0.0136
16	Ti	0.0134	mass%	0.00199	Ti-KA	0.0602	0.0134
17	Fe	0.0076	mass%	0.00129	Fe-KA	0.1952	0.0076
18	Zr	0.0018	mass%	0.00086	Zr-KA	0.9178	0.0018

Rigaku

รูปที่ 171 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์มวลสารของธาตุแต่ละชนิด
ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ
โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

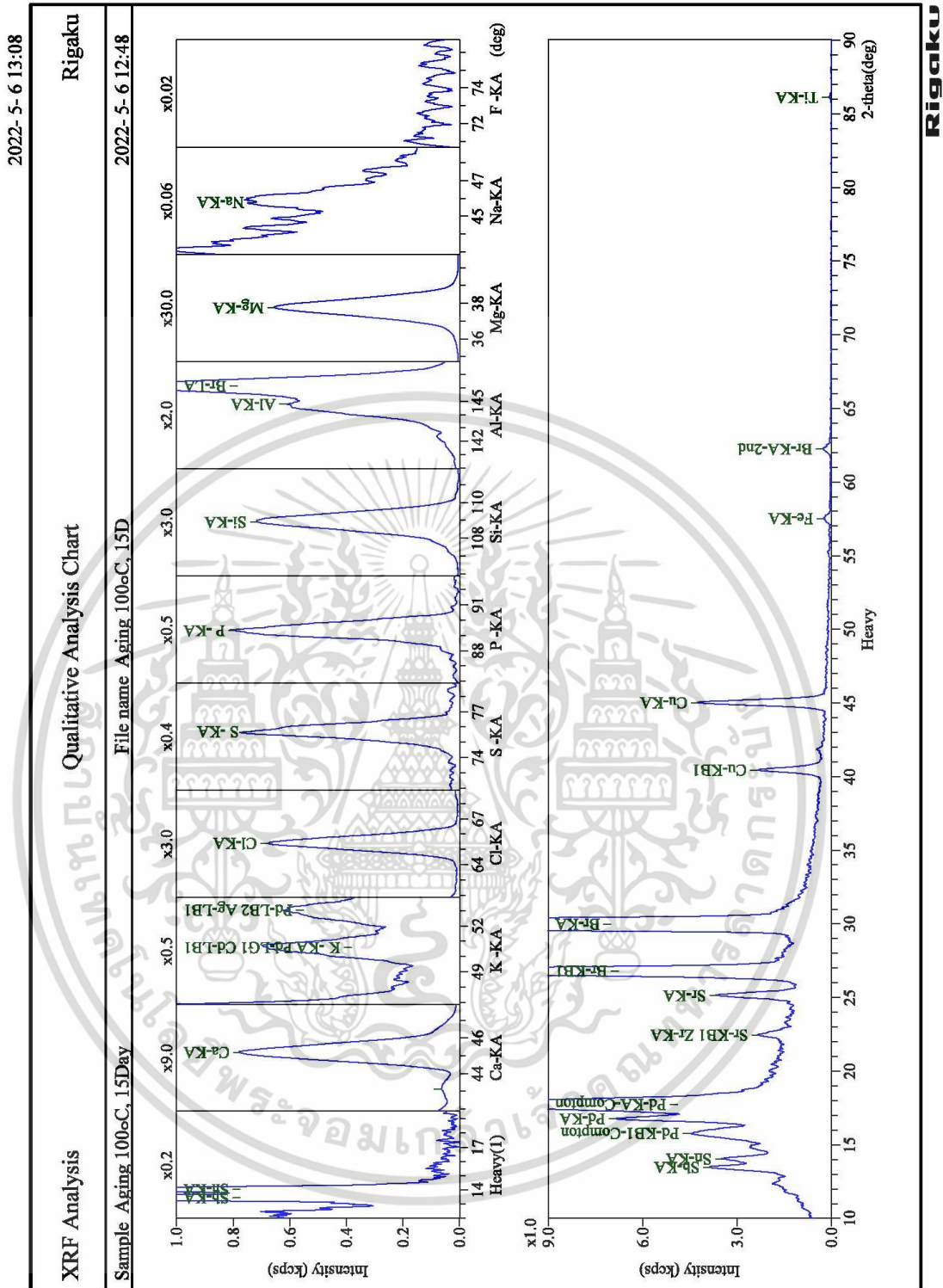
2022- 5- 6 13:08

Peak Identification Result					
Sample : Aging 100°C, 15Day			Measured date : 2022- 5- 6 12:48		
Application : F-U_Solid_N_004			File : Aging 100°C, 15D		
Spectrum	No.	Peak position (deg)	Net int. (kcps)	BG int. (kcps)	Element line
Heavy	1	13.468	2.013	1.844	Sb-KA
	2	14.035	1.526	1.956	Sn-KA
	3	15.776	2.762	1.677	Pd-KB1-Compton
	4	16.764	4.027	3.374	Pd-KA
	5	17.728	11.572	1.677	Pd-KA-Compton
	6	22.459	0.918	1.430	Sr-KB1 Zr-KA
	7	25.137	2.457	1.180	Sr-KA
	8	26.780	27.920	1.518	Br-KB1
	9	29.961	148.370	1.619	Br-KA
	10	40.446	2.029	0.311	Cu-KB1
	11	45.014	4.056	0.198	Cu-KA
	12	57.517	0.195	0.052	Fe-KA
	13	62.232	0.233	0.037	Br-KA-2nd
	14	86.120	0.060	0.002	Ti-KA
Heavy(1)	1	13.460	0.299	0.048	Sb-KA
	2	14.027	0.233	0.034	Sn-KA
Ca-KA	1	43.166	0.221	0.343	
	2	45.171	6.755	0.259	Ca-KA
K-KA	1	50.582	0.230	0.112	K-KA Pd-LG1
	2	53.013	0.127	0.185	Cd-LB1 Ag-LB1
Cl-KA	1	65.406	1.995	0.027	Cl-KA
S-KA	1	75.699	0.282	0.011	S-KA
P-KA	1	89.284	0.389	0.008	P-KA
Si-KA	1	108.940	2.121	0.032	Si-KA
Al-KA	1	144.760	1.078	0.141	Al-KA
	2	146.113	2.287	0.142	Br-LA
Mg-KA	1	37.763	19.472	0.164	Mg-KA
Na-KA	1	45.784	0.017	0.027	Na-KA

Rigaku

รูปที่ 172 ผลการทดสอบตำแหน่ง Peak ของแต่ละองค์ในแต่ละธาตุ
ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ
โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 173 ผลการทดลองเพื่อหาความเข้มข้นของแต่ละธาตุของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2022- 5- 7 12:13

SQX Calculation Result							
Sample : Aging 100°C, 20Day				Date analyzed : 2022- 5- 7 11:53			
Application : F-U_Solid_N_004				Sample type : Polymer			
Balance : CH2							
Matching library :				Impurity corr. :			
Sample film corr. :				File : Aging 100°C, 2_1			
No.	Component	Result	Unit	Det. limit	El. line	Intensity	w/o normal
1	CH2	86.6	mass%				86.6362
2	Mg	11.3	mass%	0.01464	Mg-KA	18.0880	11.2744
3	Br	0.756	mass%	0.00087	Br-KA	139.8733	0.7563
4	Ca	0.390	mass%	0.00318	Ca-KA	6.3928	0.3900
5	Si	0.381	mass%	0.00296	Si-KA	2.0676	0.3810
6	Al	0.189	mass%	0.00873	Al-KA	1.1417	0.1895
7	Cu	0.0882	mass%	0.00093	Cu-KA	6.0126	0.0882
8	Na	0.0615	mass%	0.01759	Na-KA	0.0300	0.0615
9	P	0.0452	mass%	0.00099	P-KA	0.3474	0.0452
10	Sb	0.0448	mass%	0.00419	Sb-KA	0.2591	0.0448
11	Sn	0.0345	mass%	0.00349	Sn-KA	0.2027	0.0345
12	Cl	0.0303	mass%	0.00066	Cl-KA	0.6163	0.0303
13	K	0.0247	mass%	0.00293	K-KA	0.2243	0.0247
14	S	0.0175	mass%	0.00076	S-KA	0.2445	0.0175
15	Sr	0.0123	mass%	0.00079	Sr-KA	2.3752	0.0123
16	Fe	0.0080	mass%	0.00128	Fe-KA	0.2189	0.0080
17	Mn	0.0043	mass%	0.00138	Mn-KA	0.0739	0.0043
18	Zr	0.0015	mass%	0.00077	Zr-KA	0.8641	0.0015

Rigaku

รูปที่ 174 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์มวลสารของธาตุแต่ละชนิด
ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ
โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2022- 5- 7 12:12

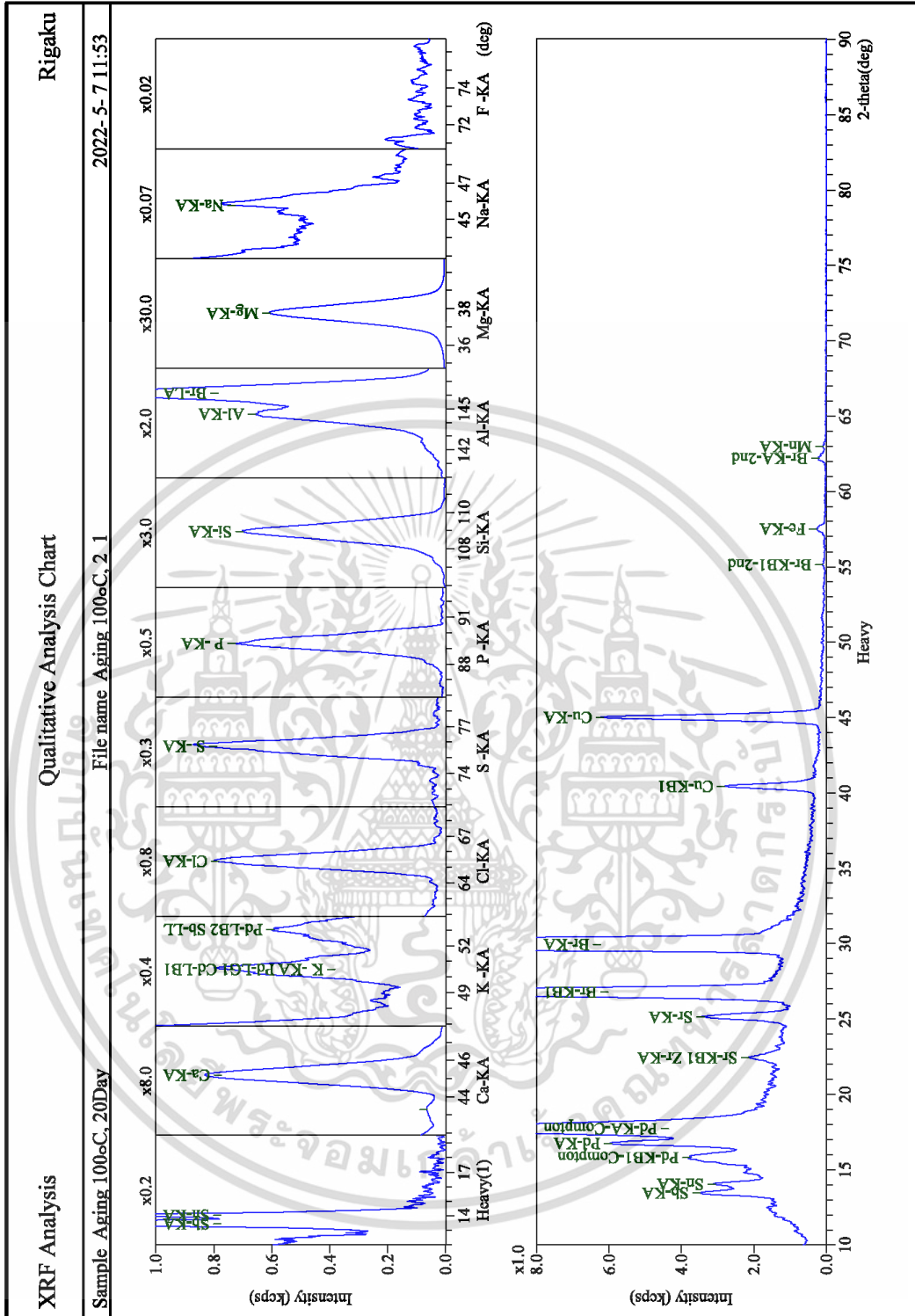
Peak Identification Result					
Sample : Aging 100°C, 20Day			Measured date : 2022- 5- 7 11:53		
Application : F-U_Solid_N_004			File : Aging 100°C, 2_1		
Spectrum	No.	Peak position (deg)	Net int. (kcps)	BG int. (kcps)	Element line
Heavy	1	13.453	1.884	1.572	Sb-KA
	2	14.027	1.376	1.709	Sn-KA
	3	15.819	2.218	1.556	Pd-KB1-Compton
	4	16.755	3.535	3.036	Pd-KA
	5	17.718	10.277	1.556	Pd-KA-Compton
	6	22.435	0.864	1.288	Sr-KB1 Zr-KA
	7	25.136	2.375	1.071	Sr-KA
	8	26.778	26.056	1.298	Br-KB1
	9	29.958	139.873	1.193	Br-KA
	10	40.437	2.503	0.304	Cu-KB1
	11	45.003	6.013	0.187	Cu-KA
	12	55.135	0.068	0.044	Br-KB1-2nd
	13	57.500	0.219	0.055	Fe-KA
	14	62.184	0.180	0.028	Br-KA-2nd
	15	62.966	0.074	0.026	Mn-KA
Heavy(1)	1	13.444	0.259	0.044	Sb-KA
	2	14.023	0.203	0.032	Sn-KA
Ca-KA	1	43.283	0.181	0.328	
	2	45.179	6.393	0.253	Ca-KA
K -KA	1	50.497	0.224	0.087	K -KA Pd-LG1
	2	53.020	0.092	0.146	Cd-LB1 Pd-LB2 Sb-LL
Cl-KA	1	65.414	0.616	0.022	Cl-KA
S -KA	1	75.754	0.245	0.012	S -KA
P -KA	1	89.329	0.347	0.007	P -KA
Si-KA	1	108.940	2.068	0.028	Si-KA
Al-KA	1	144.642	1.142	0.156	Al-KA
	2	146.103	2.086	0.148	Br-LA
Mg-KA	1	37.758	18.088	0.163	Mg-KA
Na-KA	1	45.759	0.030	0.021	Na-KA

Rigaku

รูปที่ 175 ผลการทดสอบตำแหน่ง Peak ของแต่ละองค์ในแต่ละธาตุ
ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ
โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2022- 5- 7 12:13



รูปที่ 176 ผลการทดลองเพื่อหาความเข้มข้นของแต่ละธาตุ
 ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ
 โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2022- 5- 6 15:33

SQX Calculation Result							
Sample : Aging 110°C, 5Day				Date analyzed : 2022- 5- 6 15:13			
Application : F-U_Solid_N_007				Sample type : Polymer			
Balance : CH2							
Matching library :				Impurity corr. :			
Sample film corr. :				File : Aging 110°C, 5Da			
No.	Component	Result	Unit	Det. limit	El. line	Intensity	w/o normal
1	CH2	88.5	mass%				88.4535
2	Mg	9.48	mass%	0.01345	Mg-KA	15.1513	9.4777
3	Br	0.834	mass%	0.00096	Br-KA	156.6795	0.8338
4	Ca	0.296	mass%	0.00321	Ca-KA	5.2194	0.2960
5	Si	0.248	mass%	0.00267	Si-KA	1.4258	0.2482
6	Al	0.248	mass%	0.00892	Al-KA	1.5616	0.2482
7	Cu	0.180	mass%	0.00089	Cu-KA	13.2020	0.1802
8	Sb	0.0845	mass%	0.00385	Sb-KA	0.4764	0.0845
9	P	0.0683	mass%	0.00122	P -KA	0.5589	0.0683
10	Sn	0.0309	mass%	0.00313	Sn-KA	0.1776	0.0309
11	Cl	0.0205	mass%	0.00058	Cl-KA	0.4444	0.0205
12	S	0.0172	mass%	0.00060	S -KA	0.2559	0.0172
13	K	0.0146	mass%	0.00255	K -KA	0.1469	0.0146
14	Zn	0.0119	mass%	0.00077	Zn-KA	1.2007	0.0119
15	Sr	0.0085	mass%	0.00076	Sr-KA	1.6154	0.0085
16	Fe	0.0048	mass%	0.00096	Fe-KA	0.1423	0.0048
17	Zr	0.0012	mass%	0.00073	Zr-KA	0.5720	0.0012

Rigaku

รูปที่ 177 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์มวลสารของธาตุแต่ละชนิด
ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ
โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2022- 5- 6 15:33

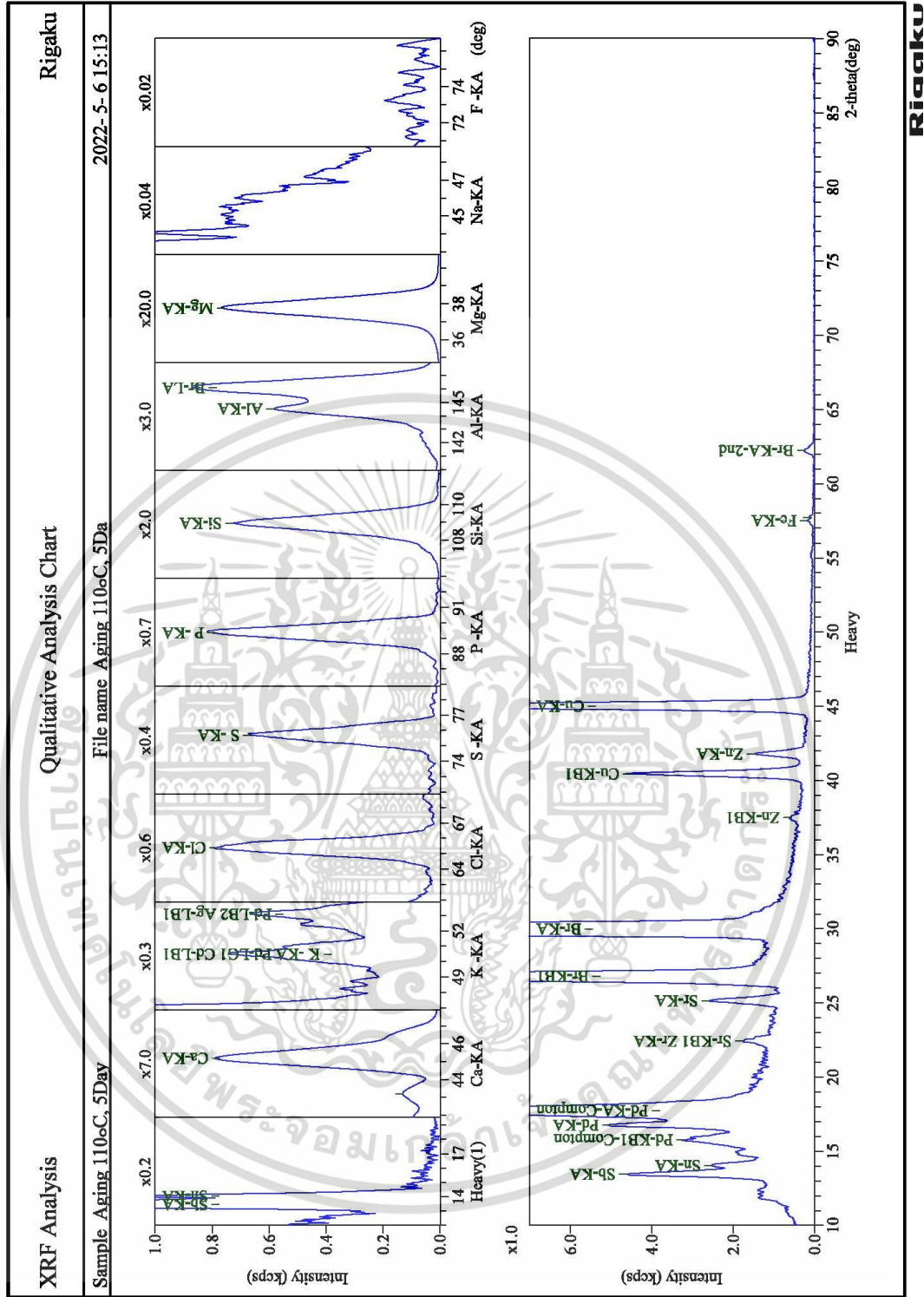
Peak Identification Result					
Sample : Aging 110°C, 5Day			Measured date : 2022- 5- 6 15:13		
Application : F-U_Solid_N_007			File : Aging 110°C, 5Da		
Spectrum	No.	Peak position (deg)	Net int. (kcps)	BG int. (kcps)	Element line
Heavy	1	13.449	3.238	1.367	Sb-KA
	2	14.033	1.115	1.418	Sn-KA
	3	15.768	1.888	1.306	Pd-KB1-Compton
	4	16.761	3.022	2.512	Pd-KA
	5	17.721	8.397	1.306	Pd-KA-Compton
	6	22.438	0.572	1.158	Sr-KB1 Zr-KA
	7	25.144	1.615	0.964	Sr-KA
	8	26.784	28.980	1.209	Br-KB1
	9	29.961	156.680	1.505	Br-KA
	10	37.487	0.226	0.357	Zn-KB1
	11	40.452	4.274	0.314	Cu-KB1
	12	41.777	1.201	0.269	Zn-KA
	13	45.009	13.202	0.200	Cu-KA
	14	57.494	0.142	0.038	Fe-KA
	15	57.739	0.072	0.038	
	16	62.221	0.223	0.023	Br-KA-2nd
Heavy(1)	1	13.446	0.476	0.036	Sb-KA
	2	14.021	0.178	0.025	Sn-KA
Ca-KA	1	43.176	0.471	0.447	
	2	45.183	5.219	0.304	Ca-KA
K -KA	1	50.499	0.147	0.076	K -KA Pd-LG1
	2	53.063	0.092	0.108	Cd-LB1 Ag-LB1
Cl-KA	1	65.419	0.444	0.017	Cl-KA
S -KA	1	75.690	0.256	0.009	S -KA
P -KA	1	89.370	0.559	0.011	P -KA
Si-KA	1	108.942	1.426	0.025	Si-KA
Al-KA	1	144.544	1.562	0.181	Al-KA
	2	146.083	2.433	0.165	Br-LA
Mg-KA	1	37.760	15.151	0.136	Mg-KA

Rigaku

รูปที่ 178 ผลการทดสอบตำแหน่ง Peak ของแต่ละองค์ในแต่ละธาตุ
ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ
โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2022-5-6 15:33



รูปที่ 179 ผลการทดลองเพื่อหาความเข้มข้นของแต่ละธาตุ

ของฉนวน XLPO เริงอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2022- 5- 6 15:53

SQX Calculation Result							
Sample : Aging 110°C, 10Day				Date analyzed : 2022- 5- 6 15:33			
Application : F-U_Solid_N_008				Sample type : Polymer			
Balance : CH2							
Matching library :				Impurity corr. :			
Sample film corr. :				File : Aging 110°C, 10D			
No.	Component	Result	Unit	Det. limit	El. line	Intensity	w/o normal
1	CH2	88.5	mass%				88.4952
2	Mg	9.49	mass%	0.01362	Mg-KA	15.2021	9.4928
3	Br	0.836	mass%	0.00084	Br-KA	159.1774	0.8364
4	Ca	0.290	mass%	0.00331	Ca-KA	5.1305	0.2901
5	Al	0.247	mass%	0.00866	Al-KA	1.5560	0.2469
6	Si	0.225	mass%	0.00240	Si-KA	1.2941	0.2251
7	Cu	0.152	mass%	0.00089	Cu-KA	11.1884	0.1518
8	Sb	0.0844	mass%	0.00341	Sb-KA	0.4783	0.0844
9	P	0.0590	mass%	0.00112	P-KA	0.4834	0.0590
10	Sn	0.0324	mass%	0.00296	Sn-KA	0.1871	0.0324
11	Cl	0.0285	mass%	0.00072	Cl-KA	0.6196	0.0285
12	S	0.0197	mass%	0.00067	S-KA	0.2937	0.0197
13	Zn	0.0118	mass%	0.00075	Zn-KA	1.1922	0.0118
14	K	0.0118	mass%	0.00270	K-KA	0.1172	0.0118
15	Sr	0.0089	mass%	0.00072	Sr-KA	1.7181	0.0089
16	Fe	0.0038	mass%	0.00107	Fe-KA	0.1126	0.0038
17	Zr	0.0014	mass%	0.00071	Zr-KA	0.5989	0.0014

Rigaku

รูปที่ 180 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์มวลสารของธาตุแต่ละชนิด
ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ
โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

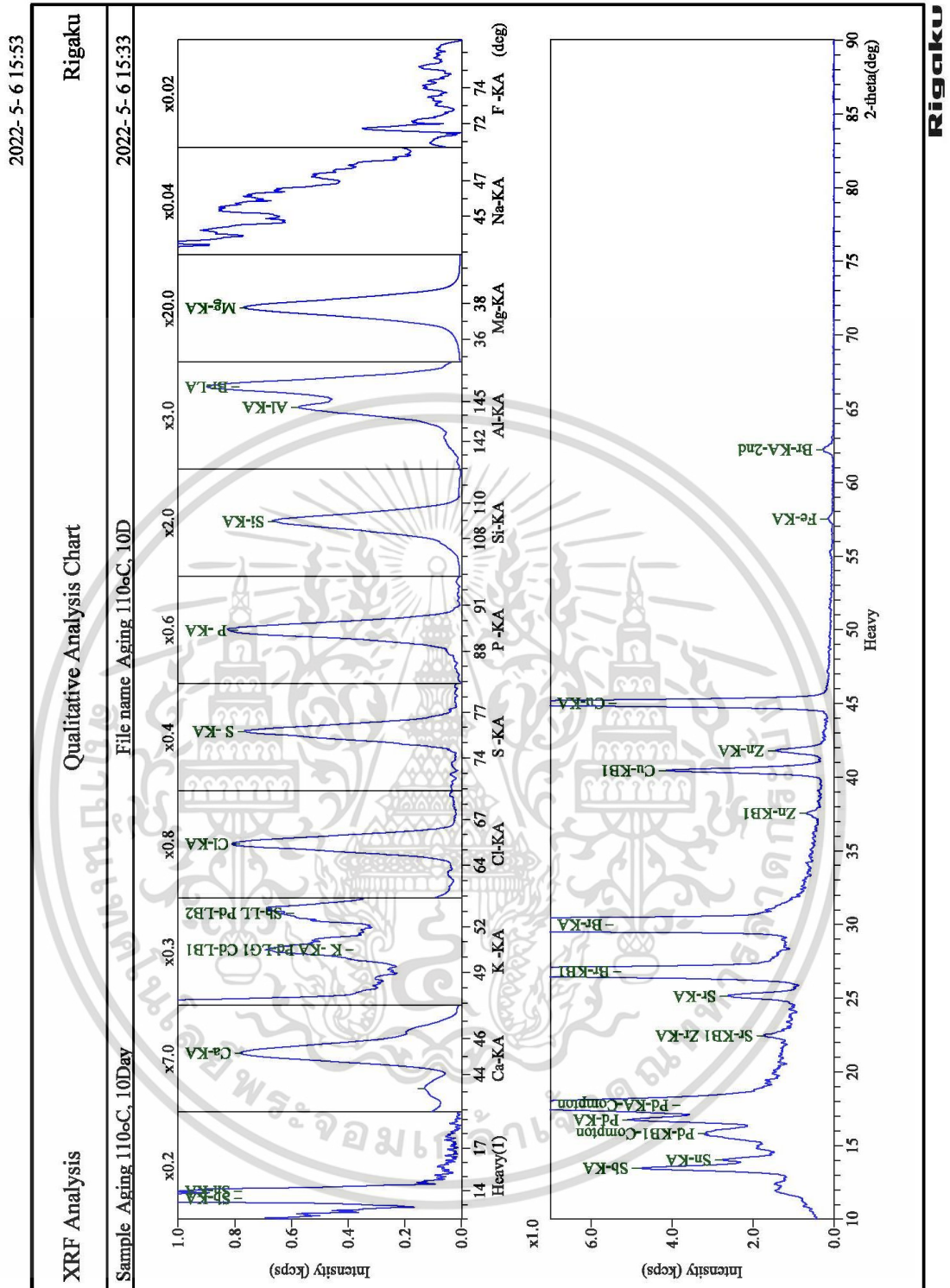
2022- 5- 6 15:53

Peak Identification Result					
Sample : Aging 110°C, 10Day			Measured date : 2022- 5- 6 15:33		
Application : F-U_Solid_N_008			File : Aging 110°C, 10D		
Spectrum	No.	Peak position (deg)	Net int. (kcps)	BG int. (kcps)	Element line
Heavy	1	13.460	3.360	1.444	Sb-KA
	2	14.019	1.266	1.515	Sn-KA
	3	15.809	1.822	1.335	Pd-KB1-Compton
	4	16.760	2.830	2.736	Pd-KA
	5	17.730	8.794	1.335	Pd-KA-Compton
	6	22.459	0.599	1.103	Sr-KB1 Zr-KA
	7	25.139	1.718	0.899	Sr-KA
	8	26.783	29.564	1.290	Br-KB1
	9	29.961	159.177	1.168	Br-KA
	10	37.537	0.281	0.381	Zn-KB1
	11	40.444	3.842	0.298	Cu-KB1
	12	41.782	1.192	0.254	Zn-KA
	13	45.012	11.188	0.200	Cu-KA
	14	57.504	0.113	0.048	Fe-KA
	15	62.208	0.234	0.029	Br-KA-2nd
Heavy(1)	1	13.453	0.478	0.028	Sb-KA
	2	13.941	0.187	0.022	Sn-KA
Ca-KA	1	43.173	0.431	0.473	Ca-KA
	2	45.189	5.130	0.325	Ca-KA
K -KA	1	50.500	0.117	0.086	K -KA Pd-LG1
	2	52.865	0.071	0.117	Cd-LB1 Sb-LL Pd-LB2
Cl-KA	1	65.405	0.620	0.027	Cl-KA
S -KA	1	75.720	0.294	0.011	S -KA
P -KA	1	89.346	0.483	0.009	P -KA
Si-KA	1	108.944	1.294	0.021	Si-KA
Al-KA	1	144.561	1.556	0.170	Al-KA
	2	146.094	2.526	0.169	Br-LA
Mg-KA	1	37.761	15.202	0.139	Mg-KA

Rigaku

รูปที่ 181 ผลการทดสอบตำแหน่ง Peak ของแต่ละองค์ในแต่ละธาตุ
ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ
โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 182 ผลการทดลองเพื่อหาความเข้มข้นของแต่ละธาตุ
 ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ
 โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2022- 5- 6 16:13

SQX Calculation Result							
Sample : Aging 110°C, 15Day				Date analyzed : 2022- 5- 6 15:54			
Application : F-U_Solid_N_009				Sample type : Polymer			
Balance : CH2							
Matching library :				Impurity corr. :			
Sample film corr. :				File : Aging 110°C, 15D			
No.	Component	Result	Unit	Det. limit	El. line	Intensity	w/o normal
1	CH2	88.0	mass%				88.0380
2	Mg	9.81	mass%	0.01370	Mg-KA	15.7034	9.8051
3	Br	0.887	mass%	0.00087	Br-KA	165.7034	0.8866
4	Ca	0.324	mass%	0.00324	Ca-KA	5.5809	0.3236
5	Al	0.294	mass%	0.00905	Al-KA	1.8120	0.2944
6	Si	0.277	mass%	0.00253	Si-KA	1.5660	0.2769
7	Cu	0.123	mass%	0.00086	Cu-KA	8.8609	0.1231
8	Sb	0.0962	mass%	0.00393	Sb-KA	0.5337	0.0962
9	P	0.0518	mass%	0.00122	P-KA	0.4161	0.0518
10	Sn	0.0259	mass%	0.00339	Sn-KA	0.1467	0.0259
11	S	0.0219	mass%	0.00059	S-KA	0.3195	0.0219
12	Cl	0.0153	mass%	0.00064	Cl-KA	0.3253	0.0153
13	K	0.0128	mass%	0.00273	K-KA	0.1283	0.0128
14	Zn	0.0118	mass%	0.00072	Zn-KA	1.1693	0.0118
15	Sr	0.0096	mass%	0.00077	Sr-KA	1.7870	0.0096
16	Fe	0.0057	mass%	0.00102	Fe-KA	0.1651	0.0057
17	Zr	0.0013	mass%	0.00076	Zr-KA	0.6076	0.0013

Rigaku

รูปที่ 183 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์มวลสารของธาตุแต่ละชนิด
ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ
โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

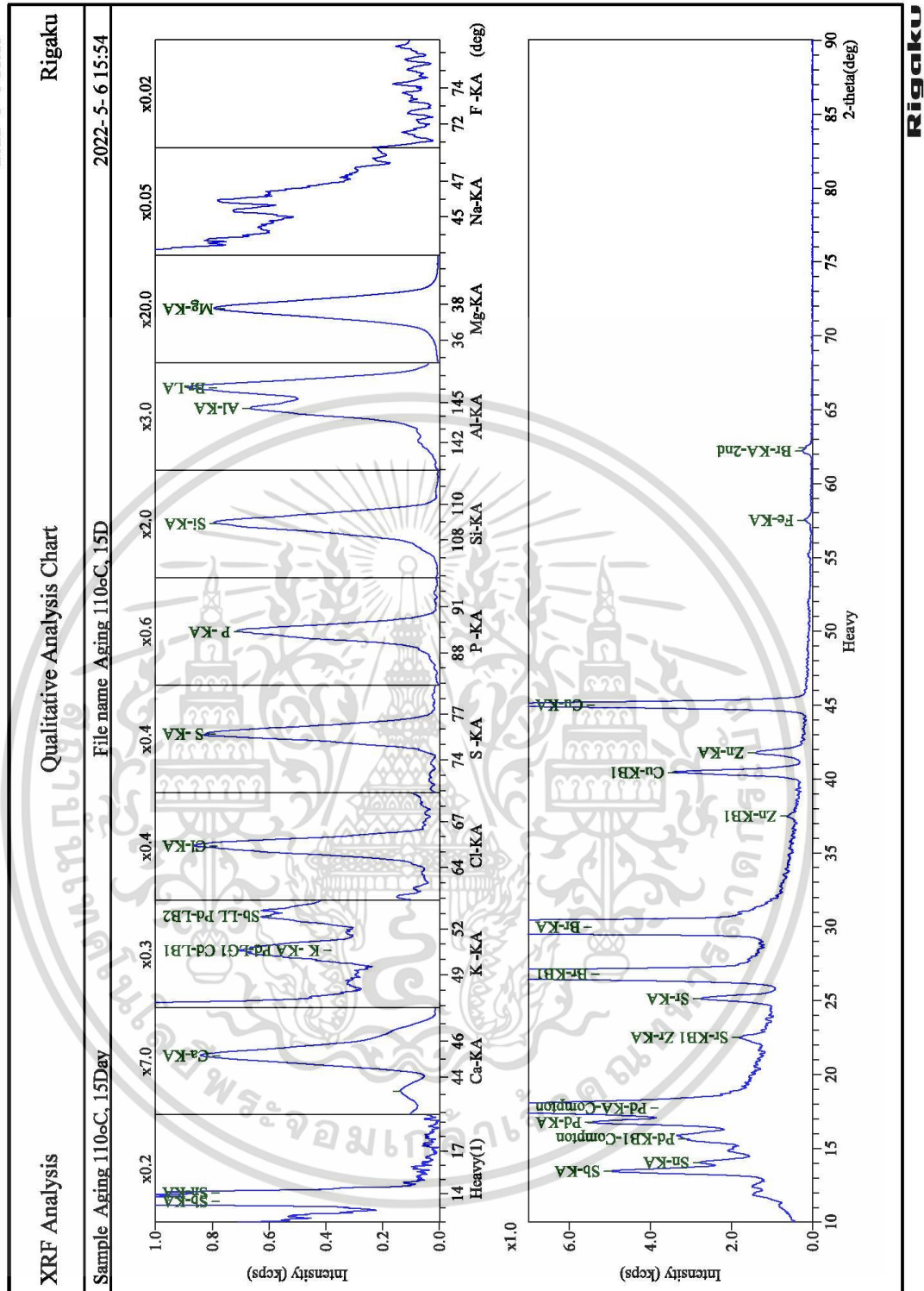
2022- 5- 6 16:13

Peak Identification Result					
Sample : Aging 110°C, 15Day			Measured date : 2022- 5- 6 15:54		
Application : F-U_Solid_N_009			File : Aging 110°C, 15D		
Spectrum	No.	Peak position (deg)	Net int. (kcps)	BG int. (kcps)	Element line
Heavy	1	13.459	3.549	1.436	Sb-KA
	2	14.033	1.249	1.518	Sn-KA
	3	15.646	1.135	2.003	Pd-KB1-Compton
	4	16.762	3.210	2.752	Pd-KA
	5	17.719	9.060	1.385	Pd-KA-Compton
	6	22.502	0.608	1.191	Sr-KB1 Zr-KA
	7	25.140	1.787	0.952	Sr-KA
	8	26.785	30.479	1.297	Br-KB1
	9	29.963	165.703	1.228	Br-KA
	10	37.488	0.196	0.416	Zn-KB1
	11	40.459	3.178	0.263	Cu-KB1
	12	41.777	1.169	0.225	Zn-KA
	13	45.017	8.861	0.177	Cu-KA
	14	57.514	0.165	0.040	Fe-KA
	15	62.192	0.224	0.029	Br-KA-2nd
	16	62.404	0.140	0.027	
Heavy(1)	1	13.459	0.534	0.037	Sb-KA
	2	14.049	0.147	0.028	Sn-KA
Ca-KA	1	43.172	0.488	0.468	
	2	45.201	5.581	0.307	Ca-KA
K -KA	1	50.567	0.128	0.083	K -KA Pd-LG1
	2	52.858	0.062	0.117	Cd-LB1 Pd-LB2
Cl-KA	1	65.405	0.325	0.021	Cl-KA
S -KA	1	75.709	0.319	0.008	S -KA
P -KA	1	89.368	0.416	0.010	P -KA
Si-KA	1	108.938	1.566	0.024	Si-KA
Al-KA	1	144.594	1.812	0.181	Al-KA
	2	146.087	2.496	0.166	Br-LA
Mg-KA	1	37.764	15.703	0.143	Mg-KA

Rigaku

รูปที่ 184 ผลการทดสอบตำแหน่ง Peak ของแต่ละองค์ในแต่ละธาตุ
ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ
โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 185 ผลการทดลองเพื่อหาความเข้มข้นของแต่ละธาตุ
ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ
โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2022- 5- 6 16:34

SQX Calculation Result							
Sample : Aging 110°C, 20Day				Date analyzed : 2022- 5- 6 16:14			
Application : F-U_Solid_N_010				Sample type : Polymer			
Balance : CH2							
Matching library :				Impurity corr. :			
Sample film corr. :				File : Aging 110°C, 20D			
No.	Component	Result	Unit	Det. limit	El. line	Intensity	w/o normal
1	CH2	88.4	mass%				88.3559
2	Mg	9.57	mass%	0.01348	Mg-KA	15.3275	9.5739
3	Br	0.856	mass%	0.00082	Br-KA	163.0536	0.8564
4	Ca	0.306	mass%	0.00322	Ca-KA	5.3691	0.3063
5	Al	0.261	mass%	0.00872	Al-KA	1.6366	0.2615
6	Si	0.236	mass%	0.00229	Si-KA	1.3474	0.2355
7	Cu	0.120	mass%	0.00088	Cu-KA	8.7440	0.1195
8	Sb	0.0988	mass%	0.00371	Sb-KA	0.5564	0.0988
9	P	0.0503	mass%	0.00109	P-KA	0.4101	0.0503
10	Na	0.0299	mass%	0.01742	Na-KA	0.0160	0.0299
11	Sn	0.0277	mass%	0.00315	Sn-KA	0.1595	0.0277
12	Cl	0.0231	mass%	0.00052	Cl-KA	0.4991	0.0231
13	S	0.0196	mass%	0.00056	S-KA	0.2901	0.0196
14	K	0.0157	mass%	0.00269	K-KA	0.1584	0.0157
15	Zn	0.0122	mass%	0.00074	Zn-KA	1.2207	0.0122
16	Sr	0.0094	mass%	0.00075	Sr-KA	1.8023	0.0094
17	Fe	0.0030	mass%	0.00105	Fe-KA	0.0869	0.0030
18	Zr	0.0013	mass%	0.00073	Zr-KA	0.5958	0.0013

Rigaku

รูปที่ 186 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์มวลสารของธาตุแต่ละชนิด
ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ
โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2022- 5- 6 16:33

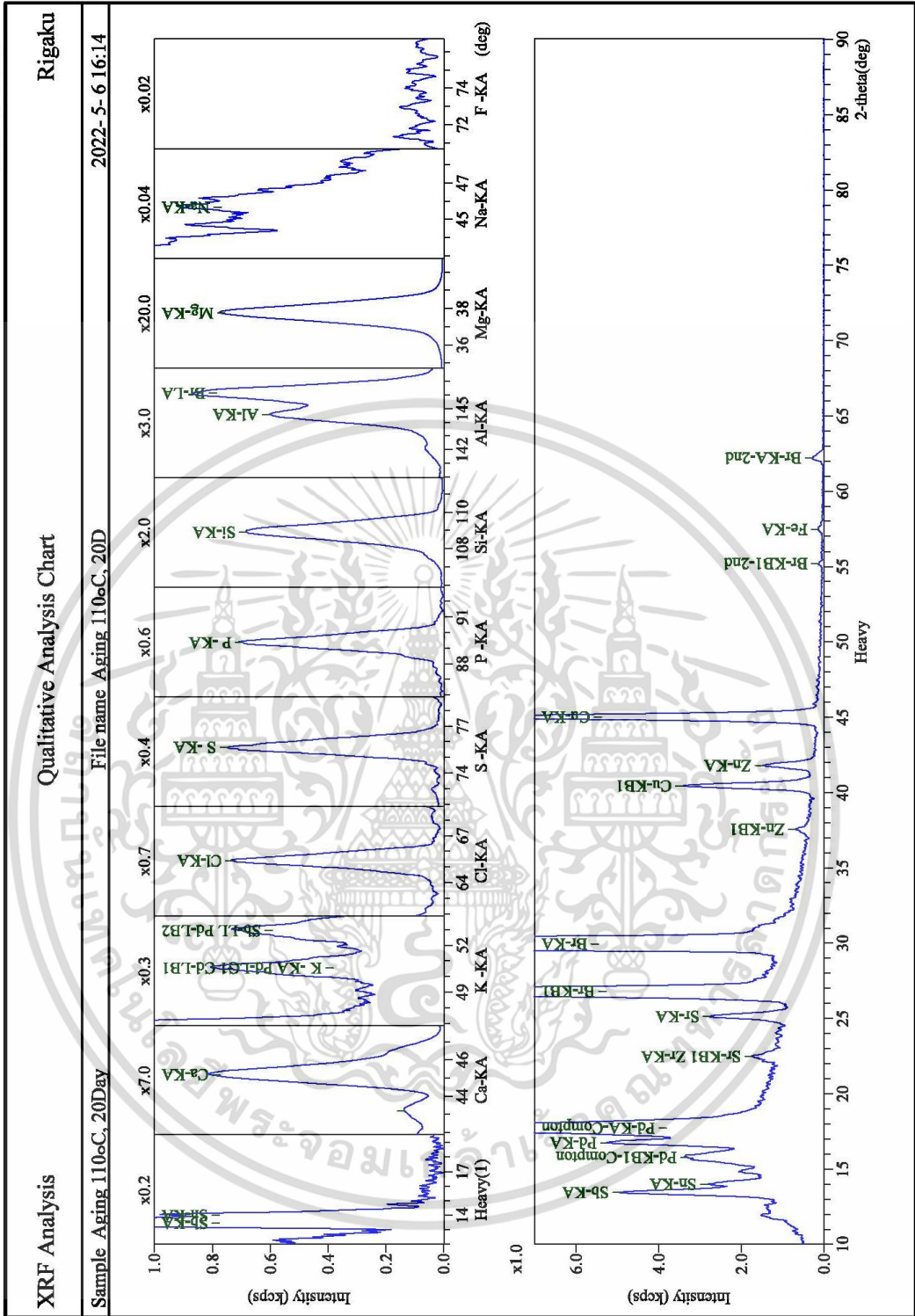
Peak Identification Result					
Sample : Aging 110°C, 20Day			Measured date : 2022- 5- 6 16:14		
Application : F-U_Solid_N_010			File : Aging 110°C, 20D		
Spectrum	No.	Peak position (deg)	Net int. (kcps)	BG int. (kcps)	Element line
Heavy	1	13.458	3.437	1.448	Sb-KA
	2	13.999	1.294	1.499	Sn-KA
	3	15.768	1.973	1.324	Pd-KB1-Compton
	4	16.759	2.961	2.784	Pd-KA
	5	17.714	8.845	1.324	Pd-KA-Compton
	6	22.461	0.596	1.140	Sr-KB1 Zr-KA
	7	25.129	1.802	0.938	Sr-KA
	8	26.780	30.197	1.288	Br-KB1
	9	29.960	163.054	1.136	Br-KA
	10	37.540	0.321	0.360	Zn-KB1
	11	40.442	3.149	0.259	Cu-KB1
	12	41.792	1.221	0.241	Zn-KA
	13	45.004	8.744	0.194	Cu-KA
	14	55.185	0.070	0.055	Br-KB1-2nd
	15	57.478	0.087	0.045	Fe-KA
	16	62.203	0.242	0.030	Br-KA-2nd
Heavy(1)	1	13.448	0.556	0.033	Sb-KA
	2	13.998	0.159	0.025	Sn-KA
Ca-KA	1	43.187	0.496	0.453	Ca-KA
	2	45.202	5.369	0.315	Ca-KA
K -KA	1	50.548	0.158	0.082	K -KA Pd-LG1
	2	52.948	0.091	0.122	Cd-LB1 Pd-LB2
Cl-KA	1	65.401	0.499	0.014	Cl-KA
S -KA	1	75.632	0.290	0.008	S -KA
P -KA	1	89.341	0.410	0.009	P -KA
Si-KA	1	108.928	1.347	0.019	Si-KA
Al-KA	1	144.580	1.637	0.165	Al-KA
	2	146.109	2.453	0.156	Br-LA
Mg-KA	1	37.761	15.328	0.138	Mg-KA
Na-KA	1	45.672	0.016	0.020	Na-KA

Rigaku

รูปที่ 187 ผลการทดสอบตำแหน่ง Peak ของแต่ละองค์ในแต่ละธาตุ
ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ
โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2022- 5 - 6 16:34



รูปที่ 188 ผลการทดลองเพื่อหาความเข้มข้นของแต่ละธาตุ
 ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ
 โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2022- 5- 7 10:51

SQX Calculation Result							
Sample : Aging 125°C, 5Day				Date analyzed : 2022- 5- 7 10:32			
Application : F-U_Solid_N_000				Sample type : Polymer			
Balance : CH2							
Matching library :				Impurity corr. :			
Sample film corr. :				File : Aging 125°C, 5Da			
No.	Component	Result	Unit	Det. limit	El. line	Intensity	w/o normal
1	CH2	87.7	mass%				87.7194
2	Mg	10.4	mass%	0.01391	Mg-KA	16.6648	10.3840
3	Br	0.612	mass%	0.00078	Br-KA	118.2620	0.6122
4	Si	0.374	mass%	0.00272	Si-KA	2.1122	0.3739
5	Ca	0.338	mass%	0.00289	Ca-KA	5.8091	0.3384
6	Al	0.170	mass%	0.00735	Al-KA	1.0454	0.1699
7	Cu	0.148	mass%	0.00088	Cu-KA	10.5822	0.1478
8	Na	0.0514	mass%	0.01864	Na-KA	0.0251	0.0514
9	Sb	0.0418	mass%	0.00335	Sb-KA	0.2562	0.0418
10	P	0.0399	mass%	0.00100	P-KA	0.3196	0.0399
11	Sn	0.0278	mass%	0.00288	Sn-KA	0.1738	0.0278
12	S	0.0278	mass%	0.00061	S-KA	0.4052	0.0278
13	K	0.0246	mass%	0.00249	K-KA	0.2497	0.0246
14	Cl	0.0231	mass%	0.00059	Cl-KA	0.4901	0.0231
15	Sr	0.0106	mass%	0.00069	Sr-KA	2.2070	0.0106
16	Fe	0.0043	mass%	0.00103	Fe-KA	0.1248	0.0043
17	Mn	0.0022	mass%	0.00091	Mn-KA	0.0402	0.0022
18	Zr	0.0009	mass%	0.00068	Zr-KA	0.6986	0.0009

Rigaku

รูปที่ 189 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์มวลสารของธาตุแต่ละชนิด
ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ
โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2022- 5- 7 10:51

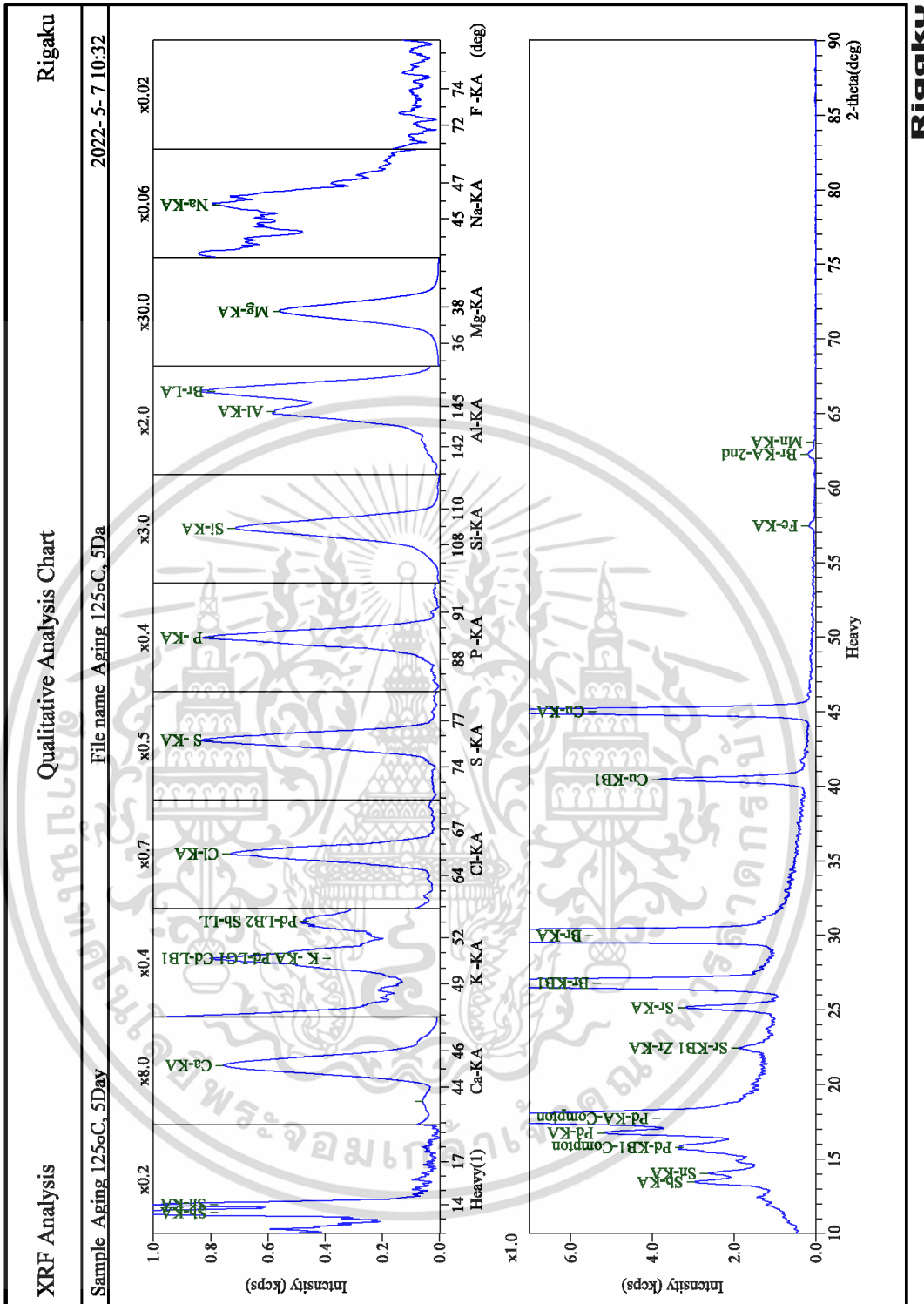
Peak Identification Result					
Sample : Aging 125°C, 5Day			Measured date : 2022- 5- 7 10:32		
Application : F-U_Solid_N_000			File : Aging 125°C, 5Da		
Spectrum	No.	Peak position (deg)	Net int. (kcps)	BG int. (kcps)	Element line
Heavy	1	13.457	1.615	1.374	Sb-KA
	2	14.035	1.166	1.457	Sn-KA
	3	15.775	1.954	1.322	Pd-KB1-Compton
	4	16.755	3.047	2.596	Pd-KA
	5	17.719	8.838	1.322	Pd-KA-Compton
	6	22.443	0.699	1.177	Sr-KB1 Zr-KA
	7	25.146	2.207	0.988	Sr-KA
	8	26.783	21.659	1.171	Br-KB1
	9	29.963	118.262	1.054	Br-KA
	10	40.455	3.559	0.282	Cu-KB1
	11	45.013	10.582	0.181	Cu-KA
	12	57.460	0.125	0.044	Fe-KA
	13	62.258	0.186	0.017	Br-KA-2nd
	14	63.071	0.040	0.013	Mn-KA
Heavy(1)	1	13.454	0.256	0.034	Sb-KA
	2	14.002	0.174	0.025	Sn-KA
Ca-KA	1	43.178	0.195	0.294	Ca-KA
	2	45.183	5.809	0.229	Ca-KA
K -KA	1	50.612	0.250	0.070	K -KA Pd-LG1
	2	53.012	0.066	0.118	Pd-LB2 Sb-LL
Cl-KA	1	65.411	0.490	0.018	Cl-KA
S -KA	1	75.726	0.405	0.010	S -KA
P -KA	1	89.374	0.320	0.008	P -KA
Si-KA	1	108.931	2.112	0.025	Si-KA
Al-KA	1	144.610	1.045	0.109	Al-KA
	2	146.087	1.576	0.097	Br-LA
Mg-KA	1	37.762	16.665	0.147	Mg-KA
Na-KA	1	45.785	0.025	0.022	Na-KA

Rigaku

รูปที่ 190 ผลการทดสอบตำแหน่ง Peak ของแต่ละองค์ในแต่ละธาตุ
ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ
โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2022-5-7 10:51



รูปที่ 191 ผลการทดลองเพื่อหาความเข้มข้นของแต่ละธาตุ
 ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 120 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ
 โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2022- 5- 7 11:12

SQX Calculation Result							
Sample : Aging 125°C, 10Day				Date analyzed : 2022- 5- 7 10:52			
Application : F-U_Solid_N_001				Sample type : Polymer			
Balance : CH2							
Matching library :				Impurity corr. :			
Sample film corr. :				File : Aging 125°C, 10D			
No.	Component	Result	Unit	Det. limit	El. line	Intensity	w/o normal
1	CH2	85.1	mass%				85.0686
2	Mg	12.7	mass%	0.01499	Mg-KA	20.4290	12.7270
3	Br	0.820	mass%	0.00107	Br-KA	142.3003	0.8202
4	Ca	0.422	mass%	0.00362	Ca-KA	6.5015	0.4224
5	Si	0.399	mass%	0.00309	Si-KA	2.0544	0.3989
6	Al	0.179	mass%	0.00893	Al-KA	1.0432	0.1787
7	Cl	0.0847	mass%	0.00079	Cl-KA	1.6261	0.0847
8	Cu	0.0781	mass%	0.00105	Cu-KA	4.9662	0.0781
9	Sb	0.0554	mass%	0.00481	Sb-KA	0.3056	0.0554
10	P	0.0496	mass%	0.00127	P-KA	0.3607	0.0496
11	Sn	0.0407	mass%	0.00401	Sn-KA	0.2276	0.0407
12	K	0.0279	mass%	0.00358	K-KA	0.2445	0.0279
13	S	0.0222	mass%	0.00076	S-KA	0.2937	0.0222
14	Sr	0.0142	mass%	0.00087	Sr-KA	2.5644	0.0142
15	Ti	0.0061	mass%	0.00253	Ti-KA	0.0271	0.0061
16	Fe	0.0037	mass%	0.00117	Fe-KA	0.0945	0.0037
17	Zr	0.0016	mass%	0.00088	Zr-KA	0.8297	0.0016

Rigaku

รูปที่ 192 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์มวลสารของธาตุแต่ละชนิด
ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ
โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2022- 5- 7 11:12

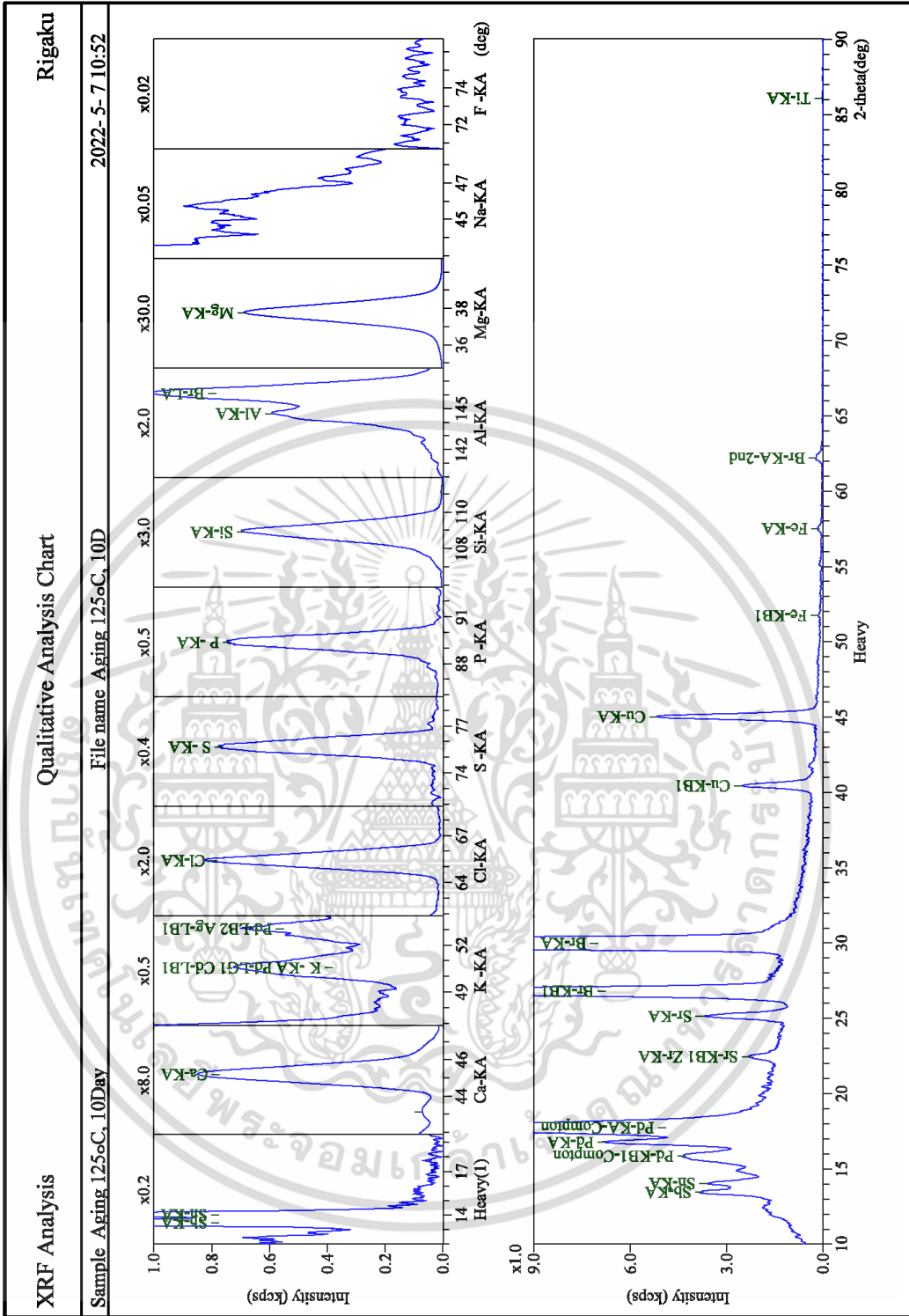
Peak Identification Result					
Sample : Aging 125°C, 10Day			Measured date : 2022- 5- 7 10:52		
Application : F-U_Solid_N_001			File : Aging 125°C, 10D		
Spectrum	No.	Peak position (deg)	Net int. (kcps)	BG int. (kcps)	Element line
Heavy	1	13.450	1.839	1.909	Sb-KA
	2	14.033	1.625	1.973	Sn-KA
	3	15.859	2.721	1.592	Pd-KB1-Compton
	4	16.767	3.930	3.590	Pd-KA
	5	17.721	11.657	1.592	Pd-KA-Compton
	6	22.448	0.830	1.475	Sr-KB1 Zr-KA
	7	25.134	2.564	1.160	Sr-KA
	8	26.784	27.032	1.415	Br-KB1
	9	29.962	142.300	1.585	Br-KA
	10	40.450	2.219	0.292	Cu-KB1
	11	45.017	4.966	0.208	Cu-KA
	12	51.721	0.079	0.072	Fe-KB1
	13	57.496	0.095	0.041	Fe-KA
	14	62.181	0.178	0.027	Br-KA-2nd
	15	86.080	0.027	0.004	Ti-KA
Heavy(1)	1	13.472	0.306	0.053	Sb-KA
	2	14.013	0.228	0.038	Sn-KA
Ca-KA	1	43.155	0.221	0.354	
	2	45.184	6.501	0.289	Ca-KA
K -KA	1	50.545	0.244	0.116	K -KA Pd-LG1
	2	53.059	0.160	0.189	Cd-LB1 Ag-LB1
Cl-KA	1	65.406	1.626	0.027	Cl-KA
S -KA	1	75.656	0.294	0.012	S -KA
P -KA	1	89.367	0.361	0.010	P -KA
Si-KA	1	108.930	2.054	0.027	Si-KA
Al-KA	1	144.646	1.043	0.139	Al-KA
	2	146.095	1.896	0.134	Br-LA
Mg-KA	1	37.762	20.429	0.171	Mg-KA

Rigaku

รูปที่ 193 ผลการทดสอบตำแหน่ง Peak ของแต่ละองค์ในแต่ละธาตุ
ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ
โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2022- 5- 7 11:12



รูปที่ 194 ผลการทดลองเพื่อหาความเข้มข้นของแต่ละธาตุ

ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมตรี WD-XRF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2022- 5- 7 11:32

SQX Calculation Result							
Sample : Aging 125°C, 15Day				Date analyzed : 2022- 5- 7 11:12			
Application : F-U_Solid_N_002				Sample type : Polymer			
Balance : CH2							
Matching library :				Impurity corr. :			
Sample film corr. :				File : Aging 125°C, 15D			
No.	Component	Result	Unit	Det. limit	El. line	Intensity	w/o normal
1	CH2	86.1	mass%				86.0735
2	Mg	11.6	mass%	0.01414	Mg-KA	18.5573	11.5773
3	Br	0.778	mass%	0.00101	Br-KA	139.5585	0.7780
4	Si	0.485	mass%	0.00350	Si-KA	2.5941	0.4846
5	Ca	0.434	mass%	0.00343	Ca-KA	6.8942	0.4337
6	Al	0.206	mass%	0.00845	Al-KA	1.2193	0.2061
7	Cl	0.108	mass%	0.00075	Cl-KA	2.1582	0.1084
8	Cu	0.0712	mass%	0.00107	Cu-KA	4.6799	0.0712
9	P	0.0532	mass%	0.00119	P-KA	0.4009	0.0532
10	Sb	0.0518	mass%	0.00466	Sb-KA	0.2930	0.0518
11	Na	0.0446	mass%	0.01768	Na-KA	0.0220	0.0446
12	Sn	0.0352	mass%	0.00410	Sn-KA	0.2026	0.0352
13	K	0.0297	mass%	0.00351	K-KA	0.2676	0.0297
14	S	0.0263	mass%	0.00068	S-KA	0.3598	0.0263
15	Sr	0.0127	mass%	0.00086	Sr-KA	2.3867	0.0127
16	Fe	0.0074	mass%	0.00107	Fe-KA	0.1938	0.0074
17	Mn	0.0031	mass%	0.00117	Mn-KA	0.0513	0.0031
18	Zn	0.0020	mass%	0.00090	Zn-KA	0.1828	0.0020
19	Zr	0.0014	mass%	0.00083	Zr-KA	0.8742	0.0014

Rigaku

รูปที่ 195 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์มวลสารของธาตุแต่ละชนิด
ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ
โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2022-5-7 11:32

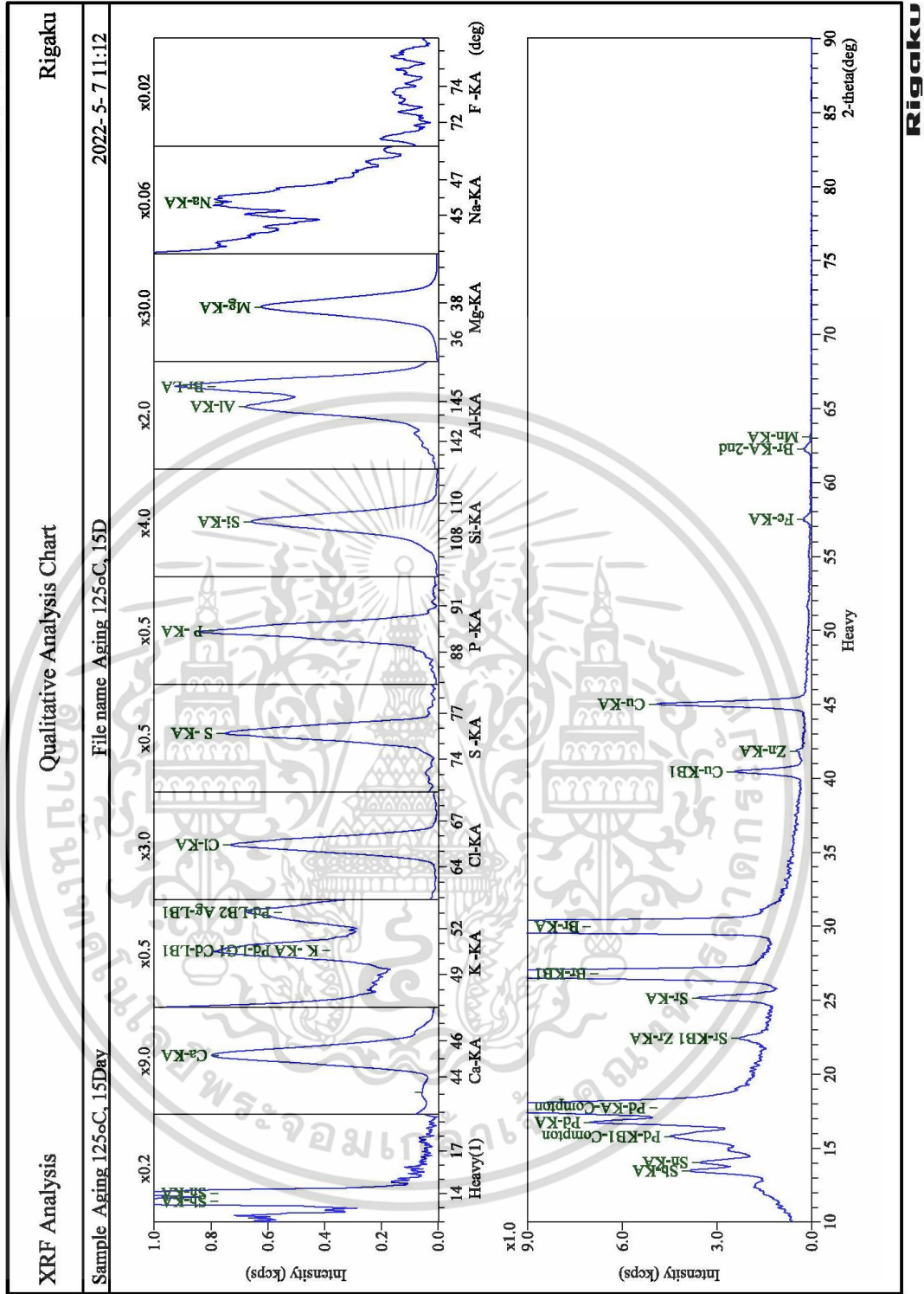
Peak Identification Result					
Sample : Aging 125°C, 15Day			Measured date : 2022-5-7 11:12		
Application : F-U_Solid_N_002			File : Aging 125°C, 15D		
Spectrum	No.	Peak position (deg)	Net int. (kcps)	BG int. (kcps)	Element line
Heavy	1	13.469	2.060	1.795	Sb-KA
	2	14.035	1.630	1.907	Sn-KA
	3	15.781	2.699	1.740	Pd-KB1-Compton
	4	16.760	4.027	3.528	Pd-KA
	5	17.716	11.537	1.740	Pd-KA-Compton
	6	22.434	0.874	1.428	Sr-KB1 Zr-KA
	7	25.139	2.387	1.198	Sr-KA
	8	26.785	25.848	1.455	Br-KB1
	9	29.961	139.559	1.522	Br-KA
	10	40.454	2.126	0.322	Cu-KB1
	11	41.819	0.183	0.297	Zn-KA
	12	45.011	4.680	0.228	Cu-KA
	13	57.493	0.194	0.038	Fe-KA
	14	62.242	0.208	0.019	Br-KA-2nd
	15	63.073	0.051	0.019	Mn-KA
Heavy(1)	1	13.450	0.293	0.053	Sb-KA
	2	14.012	0.203	0.042	Sn-KA
Ca-KA	1	43.130	0.151	0.354	
	2	43.130	0.151	0.354	
	3	45.181	6.894	0.278	Ca-KA
K -KA	1	50.545	0.268	0.118	K -KA Pd-LG1
	2	53.015	0.137	0.199	Cd-LB1 Ag-LB1
Cl-KA	1	65.434	2.158	0.024	Cl-KA
S -KA	1	75.713	0.360	0.010	S -KA
P -KA	1	89.339	0.401	0.010	P -KA
Si-KA	1	108.947	2.594	0.039	Si-KA
Al-KA	1	144.607	1.219	0.132	Al-KA
	2	146.099	1.730	0.125	Br-LA
Mg-KA	1	37.766	18.557	0.151	Mg-KA
Na-KA	1	45.705	0.022	0.023	Na-KA

Rigaku

รูปที่ 196 ผลการทดสอบตำแหน่ง Peak ของแต่ละองค์ประกอบในแต่ละธาตุ
ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ
โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2022-5-7 11:32



รูปที่ 197 ผลการทดลองเพื่อหาความเข้มข้นของแต่ละธาตุ

ของฉนวน XLPO เริงอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 360 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมตรี WD-XRF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2022- 5- 7 11:52

SQX Calculation Result							
Sample : Aging 125°C, 20Day				Date analyzed : 2022- 5- 7 11:33			
Application : F-U_Solid_N_003				Sample type : Polymer			
Balance : CH2							
Matching library :				Impurity corr. :			
Sample film corr. :				File : Aging 125°C, 20D			
No.	Component	Result	Unit	Det. limit	El. line	Intensity	w/o normal
1	CH2	87.5	mass%				87.5491
2	Mg	10.5	mass%	0.01347	Mg-KA	16.9371	10.5339
3	Br	0.617	mass%	0.00091	Br-KA	118.2234	0.6170
4	Si	0.423	mass%	0.00263	Si-KA	2.3753	0.4228
5	Ca	0.352	mass%	0.00290	Ca-KA	6.0028	0.3524
6	Al	0.190	mass%	0.00736	Al-KA	1.1516	0.1901
7	Cu	0.146	mass%	0.00091	Cu-KA	10.3299	0.1457
8	Sb	0.0441	mass%	0.00364	Sb-KA	0.2690	0.0441
9	P	0.0388	mass%	0.00118	P-KA	0.3083	0.0388
10	Sn	0.0277	mass%	0.00301	Sn-KA	0.1724	0.0277
11	S	0.0225	mass%	0.00069	S-KA	0.3251	0.0225
12	K	0.0194	mass%	0.00265	K-KA	0.1892	0.0194
13	Cl	0.0186	mass%	0.00058	Cl-KA	0.3932	0.0186
14	Sr	0.0100	mass%	0.00071	Sr-KA	2.0791	0.0100
15	Fe	0.0067	mass%	0.00110	Fe-KA	0.1922	0.0067
16	Zr	0.0012	mass%	0.00069	Zr-KA	0.8168	0.0012

Rigaku

รูปที่ 198 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์มวลสารของธาตุแต่ละชนิด
ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ
โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

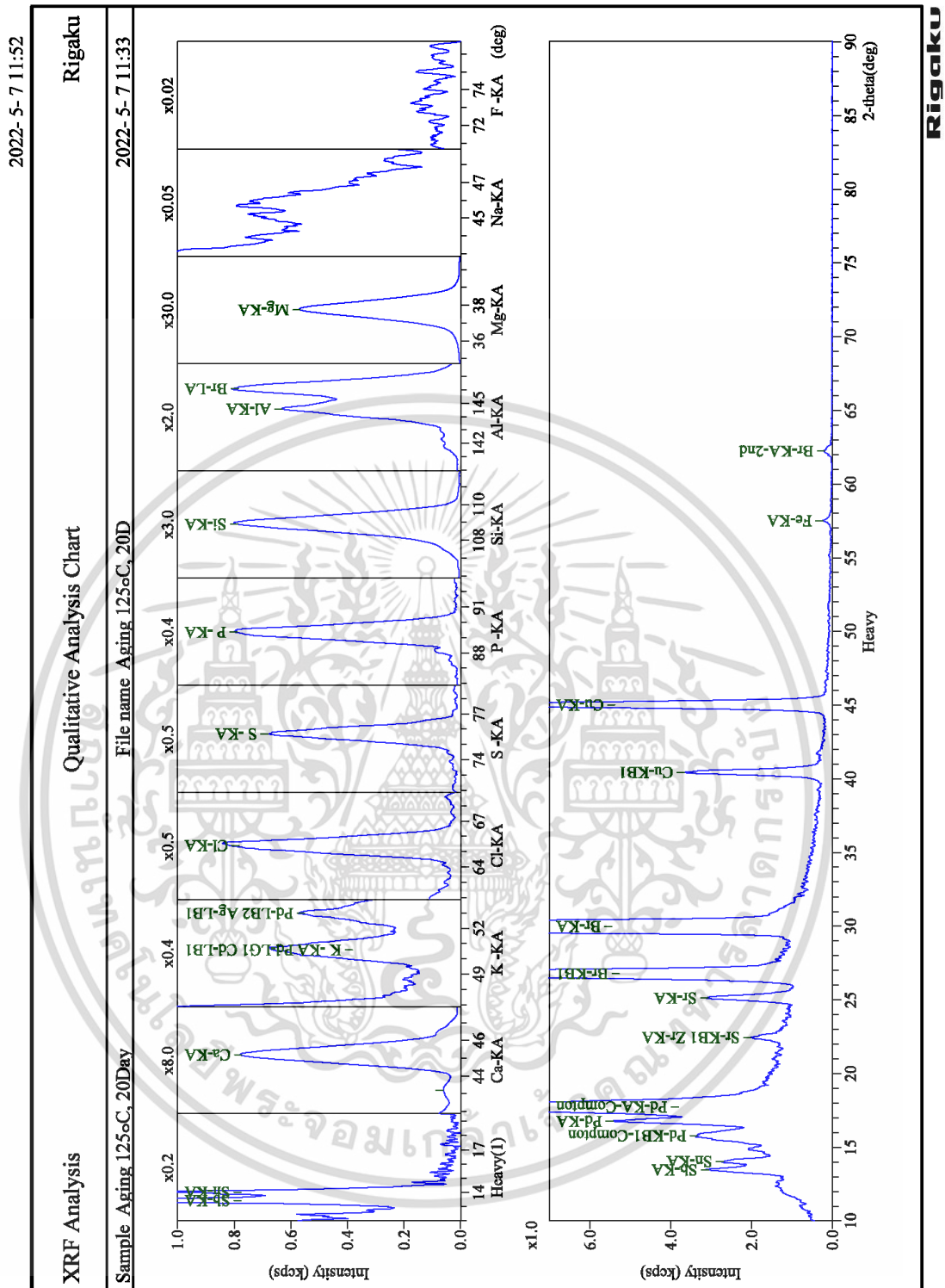
2022- 5- 7 11:52

Peak Identification Result					
Sample : Aging 125°C, 20Day			Measured date : 2022- 5- 7 11:33		
Application : F-U_Solid_N_003			File : Aging 125°C, 20D		
Spectrum	No.	Peak position (deg)	Net int. (kcps)	BG int. (kcps)	Element line
Heavy	1	13.474	1.707	1.404	Sb-KA
	2	14.029	1.149	1.532	Sn-KA
	3	15.793	1.968	1.374	Pd-KB1-Compton
	4	16.766	3.084	2.703	Pd-KA
	5	17.726	9.124	1.374	Pd-KA-Compton
	6	22.448	0.817	1.202	Sr-KB1 Zr-KA
	7	25.131	2.079	1.012	Sr-KA
	8	26.780	22.145	1.143	Br-KB1
	9	29.961	118.223	1.387	Br-KA
	10	40.446	3.378	0.270	Cu-KB1
	11	45.009	10.330	0.192	Cu-KA
	12	57.506	0.192	0.045	Fe-KA
	13	62.223	0.173	0.028	Br-KA-2nd
Heavy(1)	1	13.440	0.269	0.038	Sb-KA
	2	14.006	0.172	0.027	Sn-KA
Ca-KA	1	43.170	0.183	0.309	
	2	45.184	6.003	0.229	Ca-KA
K -KA	1	50.593	0.189	0.078	K -KA Pd-LG1
	2	52.963	0.102	0.128	Cd-LB1 Pd-LB2 Ag-LB1
Cl-KA	1	65.416	0.393	0.017	Cl-KA
S -KA	1	75.703	0.325	0.011	S -KA
P -KA	1	89.332	0.308	0.010	P -KA
Si-KA	1	108.935	2.375	0.025	Si-KA
Al-KA	1	144.599	1.152	0.110	Al-KA
	2	146.086	1.502	0.103	Br-LA
Mg-KA	1	37.761	16.937	0.138	Mg-KA

Rigaku

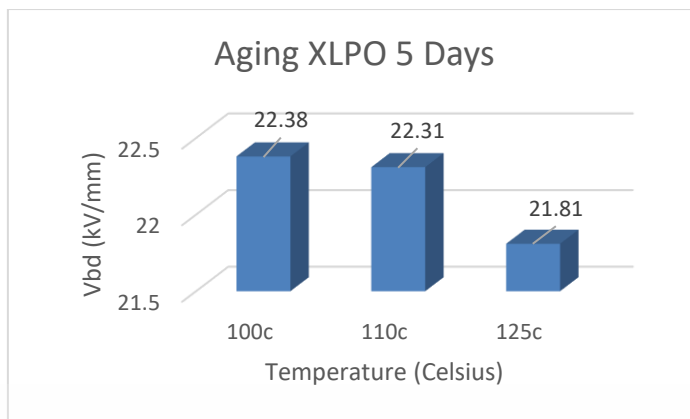
รูปที่ 199 ผลการทดสอบตำแหน่ง Peak ของแต่ละองค์ในแต่ละธาตุ
ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ
โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี WD-XRF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

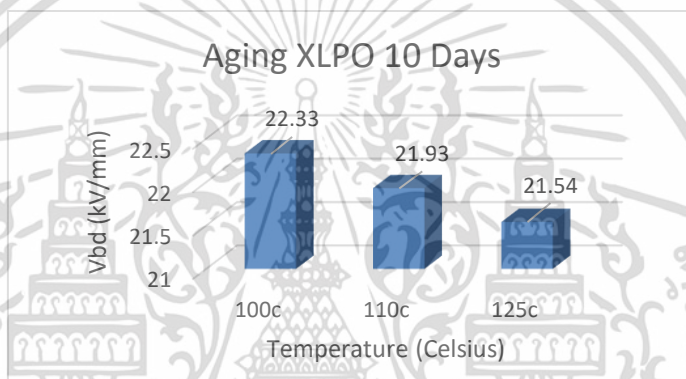


รูปที่ 200 ผลการทดลองเพื่อหาความเข้มข้นของแต่ละธาตุ
ของฉนวน XLPO เร่งอายุขัยฉนวนที่อุณหภูมิ 125°C ระยะเวลา 480 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ
โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมตรี WD-XRF

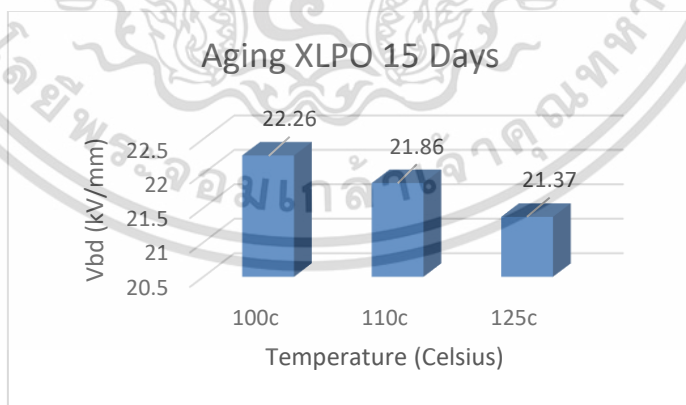
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 201 แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ สายไฟฟ้าฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยเนื้อฉนวน 120 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 100°C 110°C 125°C ตามลำดับ

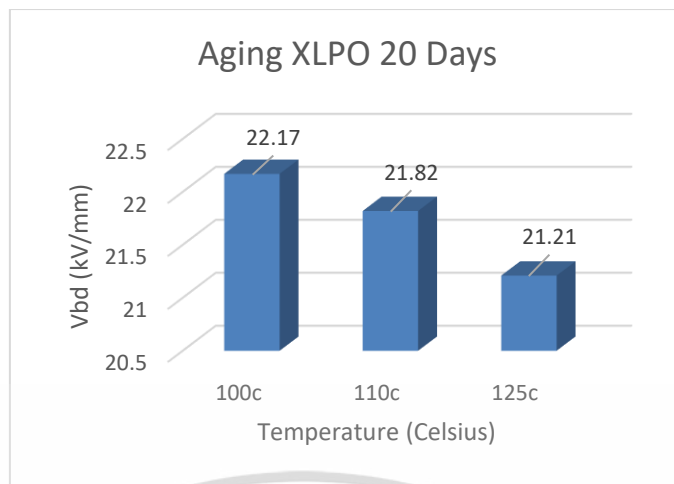


รูปที่ 202 แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ สายไฟฟ้าฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยเนื้อฉนวน 240 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 100°C 110°C 125°C ตามลำดับ



รูปที่ 203 แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ สายไฟฟ้าฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยเนื้อฉนวน 360 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 100°C 110°C 125°C ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



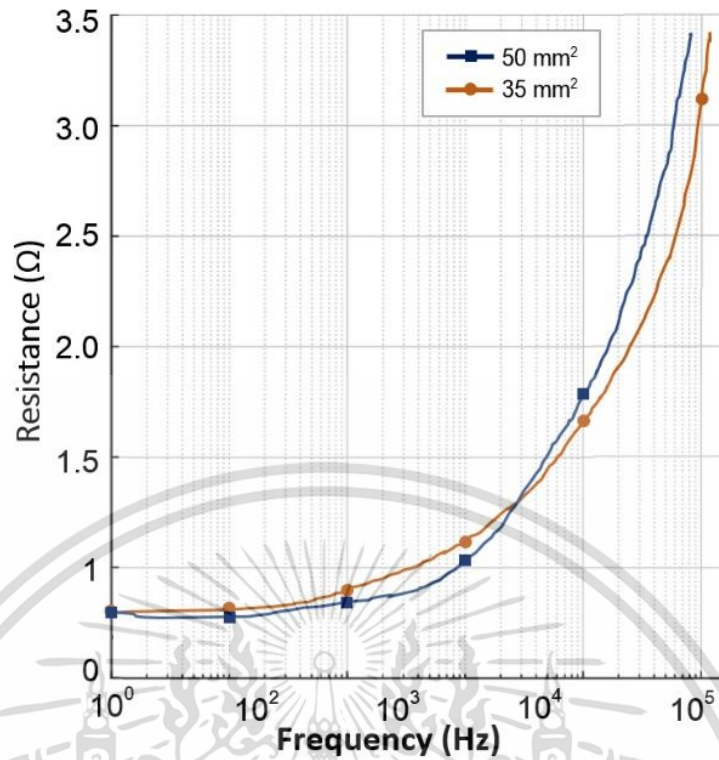
รูปที่ 204 แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ สายไฟฟ้าฉนวน XLPO ที่เร่งอายุขัยเนื้อฉนวน 480 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 100°C 110°C 125°C ตามลำดับ

4.3 ผลการทดสอบการประยุกต์ใช้สายไฟฟ้าชนิดฉนวนครอสลิงค์โพลีโอเลฟินในรถยนต์ไฟฟ้า

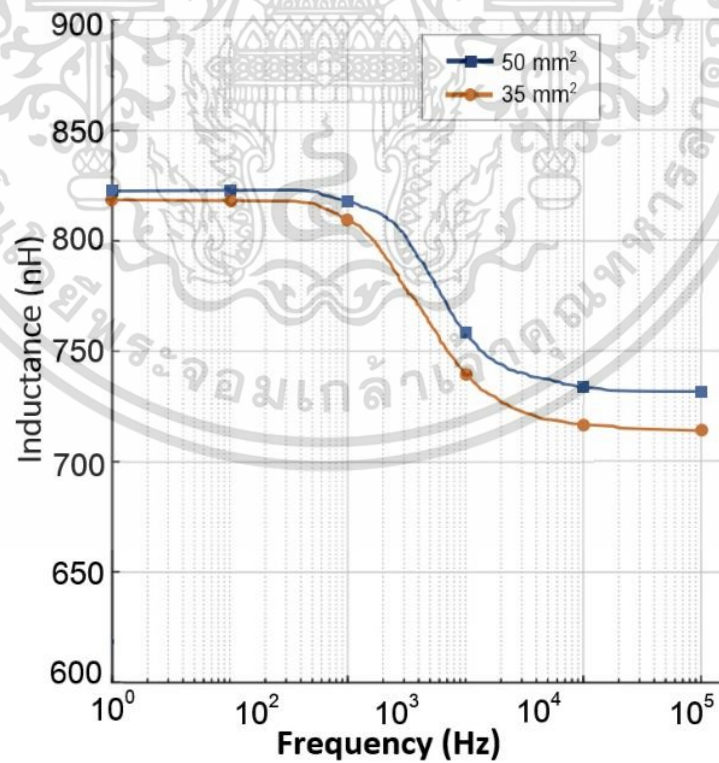
ในการทดสอบข้อที่ 4.3 ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ ของสายไฟฟ้าฉนวน XLPO พิกัด 0.6/1kV ขนาดพื้นที่หน้าตัดตัวนำทองแดง 35mm² และ 50mm² ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อการครอสลิงค์ที่ 8% โดยทำการศึกษาค่าความต้านทานที่ความถี่ต่างๆ, ค่าความเหนี่ยวนำที่ความถี่ต่างๆ, ค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ, ประสิทธิภาพการซิลล์และฮาร์มอนิกส์ที่ความถี่ต่างๆด้วยเครื่องมือการทดสอบ Digital Storage Oscilloscope GDS-1074B, EMI Near Field Probe

ผลการทดสอบค่าความต้านทานและความเหนี่ยวนำที่ความถี่ 10Hz-1MHz ด้วยด้วยเครื่องมือการทดสอบ Digital Storage Oscilloscope GDS-1074B ผลการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ ด้วยเครื่องมือการทดสอบ Digital Storage Oscilloscope GDS-1074B ประสิทธิภาพการซิลล์และฮาร์มอนิกส์ที่ความถี่ต่างๆด้วยเครื่องมือการทดสอบ Digital Storage Oscilloscope GDS-1074B ดังรูปที่ 201-208

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

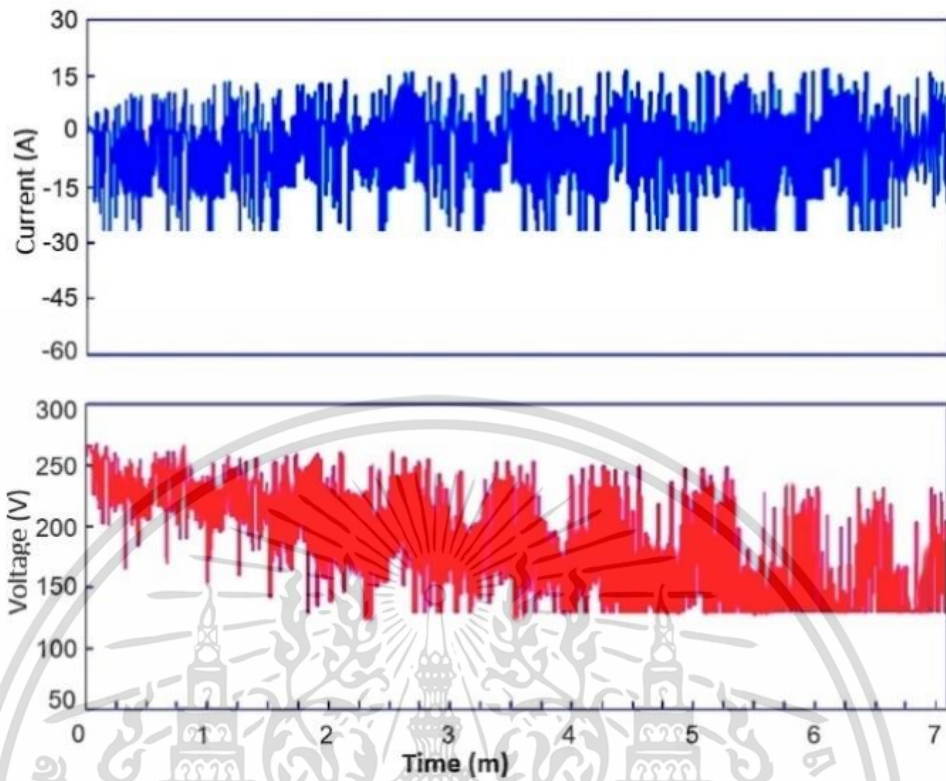


รูปที่ 205 ค่าความต้านทานสายไฟฟ้าพิกัด 600/1000V
ขนาดพื้นที่หน้าตัดตัวนำ 35mm², 50mm² XLPO ที่ความถี่ 10Hz-1MHz

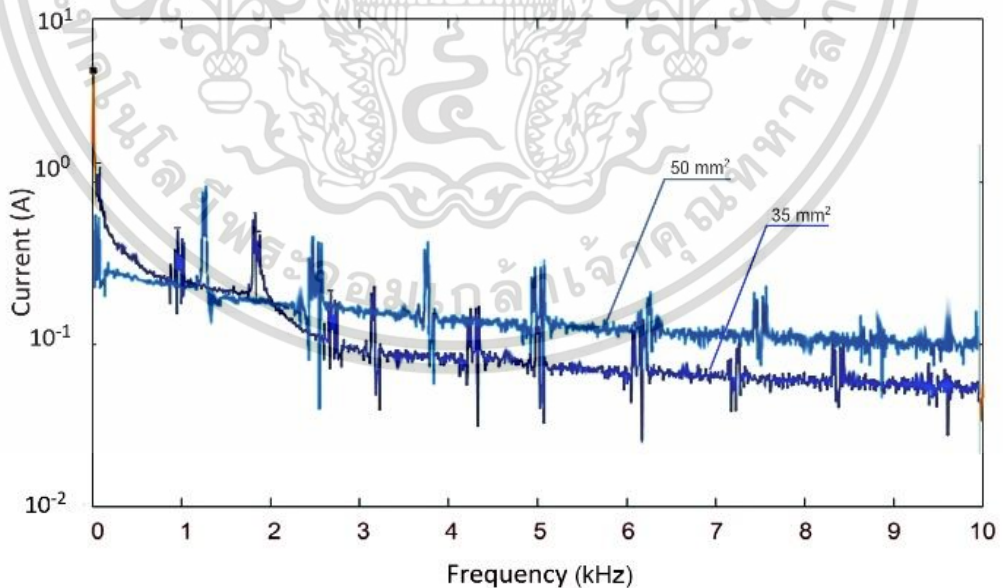


รูปที่ 206 ค่าความเหนี่ยวนำสายไฟฟ้าพิกัด 600/1000V
ขนาดพื้นที่หน้าตัดตัวนำ 35mm², 50mm² XLPO ที่ความถี่ 10Hz-1MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

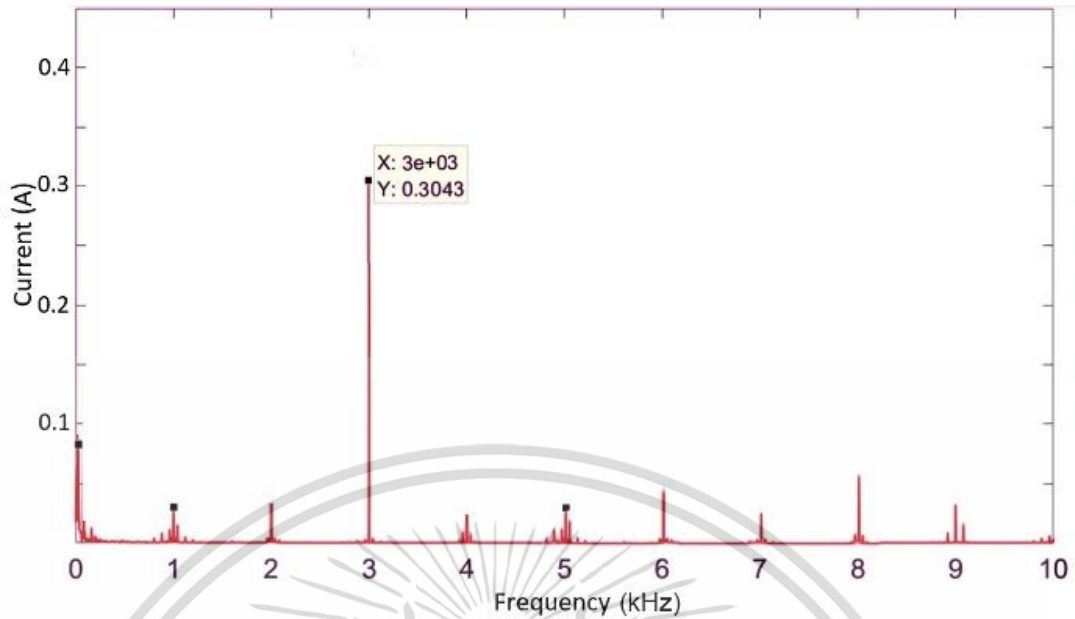


รูปที่ 207 Voltage ripple และ Current ripple ภายในแบตเตอรี่รถยนต์
ขณะส่งพลังงานไฟฟ้าไปยังระบบส่งกำลัง

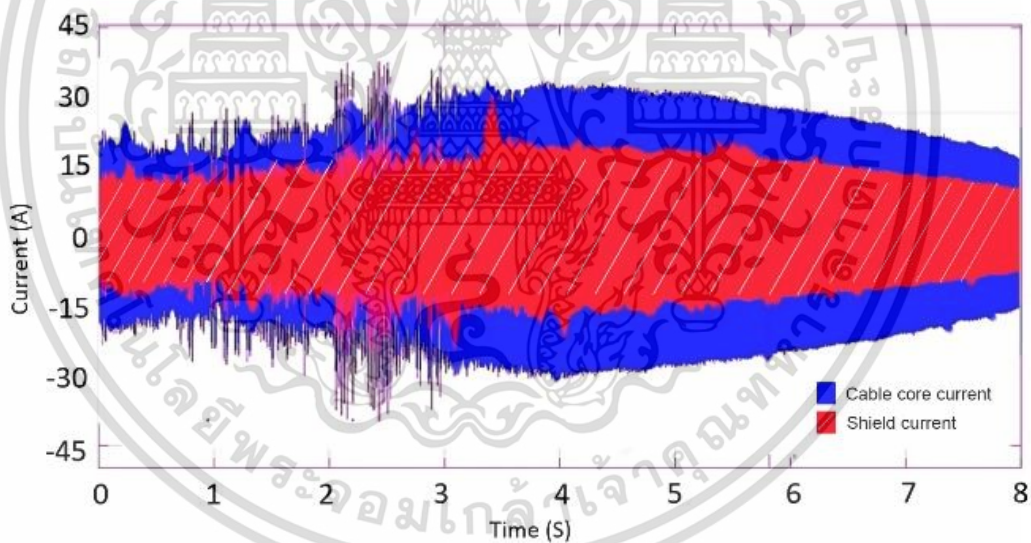


รูปที่ 208 ผลการทดสอบ FFT ของสายไฟฟ้าชนิด XLPO พิกัดแรงดัน 600/1000V
พื้นที่หน้าตัดตัวนำ 35mm² และ 50mm² ที่ความถี่ 200Hz-10kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

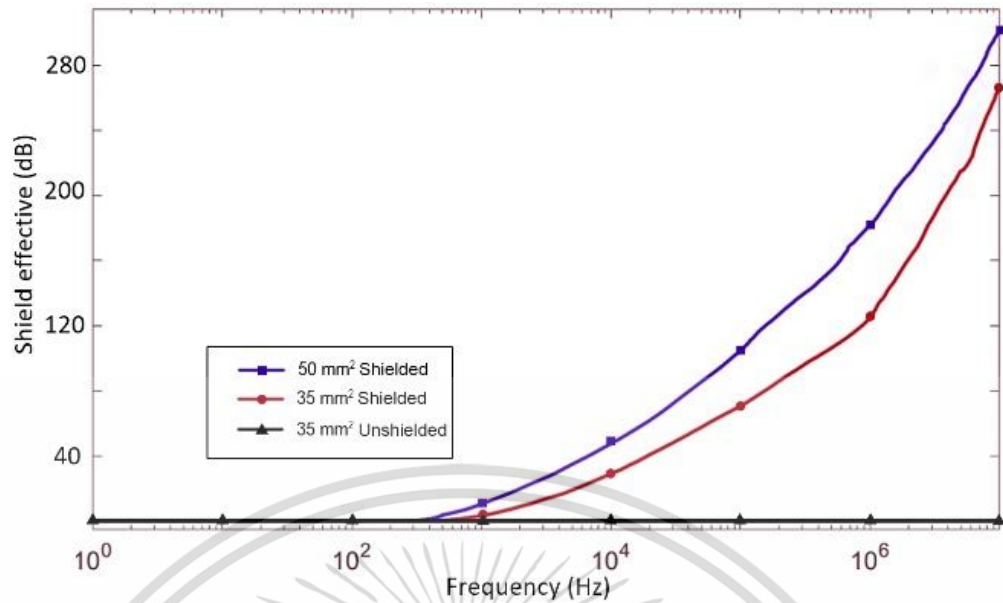


รูปที่ 209 ผลการทดสอบฮาร์โมนิก ของสายไฟฟ้าชนิด XLPO พิกัดแรงดัน 600/1000V
พื้นที่หน้าตัดตัวนำ 35mm² และ 50mm² ที่ความถี่ 10Hz-10kHz

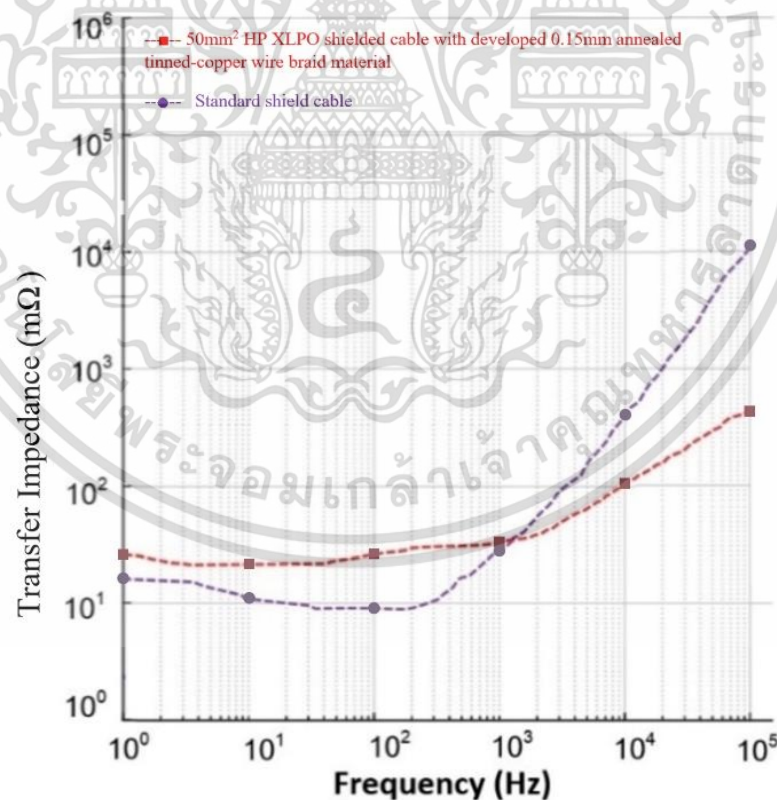


รูปที่ 210 ผลการทดลองการชิลล์ค่ากระแสและค่ากระแสภายในตัวนำที่ไม่ได้ชิลล์ที่ความถี่ 20 Hz to
250 kHz ที่ติดตั้งระหว่างตัวส่งกำลังและอินเวอร์เตอร์ที่รอบความเร็วมอเตอร์ 9000rpm
สายไฟฟ้า XLPO พิกัด 600/1000V ชนิดมีชิลล์ พื้นที่หน้าตัดตัวนำ 50mm²

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 211 ประสิทธิภาพการชิลล์ ของสายไฟฟ้าชนิด XLPO มีชิลล์ พิกัด 600/1000V พื้นที่หน้าตัดตัวนำ 50mm² (สีน้ำเงิน) และ 35mm² (สีแดง) สายไฟฟ้า XLPO ไม่มีชิลล์พิกัด 600/1000V พื้นที่หน้าตัดตัวนำ 35mm² (สีดำ)



รูปที่ 212 ผลการทดสอบ Transfer impedance ของสายไฟฟ้าชนิด XLPO มีชิลล์ พิกัด 600/1000V พื้นที่หน้าตัดตัวนำ 50mm² (สีม่วง) ที่ทำการพัฒนาขนาดตัวนำทองแดงชุบตีบุกในการถักขนาด 0.15 มม กับสายไฟฟ้าชนิด XLPO มีชิลล์ พิกัด 600/1000V พื้นที่หน้าตัดตัวนำ 50mm² เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

วิเคราะห์และสรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาคุณสมบัติทางกล, ผลตอบสนองของเนื้อฉนวนครอสลิงค์โพลีเอเลฟิน, การดิซซาร์จบางส่วน, การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีด้วยวิธีการทดสอบ Scanning Electron Microscope-SEM, Fourier-transform Infrared Spectroscopy-FTIR, Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence-WDXRF, แรงดันเบรกดาวน์ของสายไฟฟ้าที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยกรรมวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ และการประยุกต์ใช้สายไฟฟ้าชนิดฉนวนครอสลิงค์โพลีเอเลฟินในรถยนต์ไฟฟ้าสามารถวิเคราะห์และสรุปผลการวิจัยได้ดังต่อไปนี้

1. กรณีของค่าความต้านทาน, แรงดึงและการยืดหดตัวของเนื้อฉนวน XLPO ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อการครอสลิงค์ (Catalyst) 3%, 5%, 8% ของน้ำหนักเนื้อฉนวนพบว่า เนื้อฉนวน XLPO ที่ผสม Catalyst 8% มีค่าความต้านทานเนื้อฉนวนเพิ่มขึ้น 94.94% ทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น 72.32% การยืดหดตัวเพิ่มมากขึ้น 54.2% เนื่องจาก Catalyst ส่งผลให้เกิดการเชื่อมโยงของมอนอเมอร์และพอลิเมอร์ภายในโมเลกุลเนื้อฉนวนเพิ่มมากขึ้นจึงส่งผลให้คุณสมบัติทางกลและทางไฟฟ้าเพิ่มสูงมากขึ้น โดยขณะเดียวกันนั้นการผสม Catalyst ที่ 9% ขึ้นไปทำให้ไม่สามารถผลิตสายไฟฟ้าได้จริงในภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากวัตถุดิบมีความเหนียว, หนืดและแข็งติดภายในเครื่องจักรผลิต จึงสรุปได้ว่า Catalyst ที่ 8% ให้ผลการทดสอบทางกลและทางไฟฟ้าที่ดีที่สุด และมีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้ในการผลิตสายไฟฟ้าฉนวน XLPO ในงานวิจัยเล่มนี้
2. กรณีของผลการตอบสนองไดอิเล็กตริกพบว่า กระแสโพลาริซเซชันและดีโพลาริซเซชันที่ค่าสนามไฟฟ้า 0.25, 0.50, 1.00 kV/mm แปรผันตรงกับค่ากระแสความนำไฟฟ้า กล่าวคือเมื่อโมเลกุลของเนื้อฉนวนเกิดการจัดเรียงตัวกันตามแนวแรงที่สนามไฟฟ้ามากระทำส่งผลให้เกิดกระแสความนำขึ้นในเนื้อฉนวนเนื่องจากฉนวนไม่สามารถเป็นฉนวนได้อย่างสมบูรณ์ และเมื่อฉนวนอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าและอุณหภูมิที่สูงมากขึ้นเรื่อยๆ ส่งผลให้อิเล็กตรอนชั้นนอกสุดของโมเลกุลเนื้อฉนวนได้รับพลังงานจนเกิดการสั่นและถูกกระตุ้น เกิดสภาวะการนำไฟฟ้าเกิดขึ้น ทั้งนี้ค่าเปอร์มิตติวิตีของเนื้อฉนวน XLPO ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ขณะที่ค่าแพกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกเพิ่มสูงมากขึ้นที่ค่าสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิที่สูงขึ้น จึงสรุปได้ว่า ที่ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่สูงขึ้น ส่งผลให้เกิดสภาพความนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น เกิดความสูญเสียในเนื้อฉนวนเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ค่าเปอร์มิตติวิตีมีค่าเท่ากันในทุกค่าสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิต่างๆเช่นเดียวกันจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. งานวิจัยนี้พบว่าหากโมเลกุลของเนื้อฉนวน XLPO ได้รับพลังงานการกระตุ้นที่ 0.77 eV จะส่งผลให้ฉนวน XLPO เปลี่ยนสภาพจากไม่นำไฟฟ้าเป็นสภาพการนำไฟฟ้า
4. กรณีของผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนพบว่าขนาดของแรงดันเริ่มต้นการดิสชาร์จบางส่วนและรูปแบบของการดิสชาร์จบางส่วนมีความสอดคล้องกันกับรัศมีโค้งงอในการติดตั้งสายไฟฟ้าและอุณหภูมิ กล่าวคือการติดตั้งสายไฟฟ้าที่รัศมีการโค้งงอน้อยมากๆ และที่อุณหภูมิสูงจะส่งผลให้แรงดันเริ่มต้นการเกิดดิสชาร์จลดต่ำลง เนื่องจากเกิดความเค้นที่จุดโค้งงอของสายไฟฟ้าทำให้เนื้อฉนวนเกิดความล้าและเกิดการรอยแยกเล็กๆ ขึ้นบนพื้นผิวของเนื้อฉนวนและที่อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้เกิดกระแสความนำเกิดขึ้นดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในข้อสรุปที่ 2 จึงสรุปได้ว่าการติดตั้งสายไฟฟ้าใจจุดที่มีความโค้งงอน้อยๆ จะเกิดแรงเค้นและเกิดการรอยแยกบนพื้นผิวเนื้อฉนวน อีกทั้งยังมีสภาพการนำไฟฟ้าเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจึงส่งผลให้แรงดันเริ่มต้นของการดิสชาร์จบางส่วนต่ำลงอีกทั้งอุณหภูมิที่สูงขึ้นยังส่งผลให้ขนาดและรูปแบบของการดิสชาร์จบางส่วนเพิ่มสูงขึ้นและมีความถี่ในการเกิดเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ
5. กรณีของการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพพื้นผิวเนื้อฉนวน XLPO ด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบ SEM พบว่าการอบเพื่อเร่งอายุขัยเนื้อฉนวนที่ระยะเวลา 120 ชั่วโมง, 240 ชั่วโมง, 360 ชั่วโมง, 480 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 100°C, 110°C, 125°C ตามลำดับมีลักษณะทางกายภาพพื้นผิวที่กำลังขยาย 50 เท่า, 100 เท่า, 300 เท่า, 500 เท่า, 1000 เท่า ดังนี้ พบลักษณะเป็นหลุมเล็กๆ รูปร่างไม่สมมาตร มีการหดตัวของเนื้อฉนวนเล็กน้อยที่ขอบปากหลุม โดยคาดว่ามาจากการผลิตเมื่อสายไฟฟ้าถูกฉีดหุ้มโดยเครื่องหุ้มฉนวน อีกทั้งอุณหภูมิความร้อนเมื่อถูกเร่งอายุขัยเนื้อฉนวน จึงสรุปได้ว่าลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของเนื้อฉนวน XLPO ที่ทำการเร่งอายุขัยเนื้อฉนวนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยยะสำคัญที่จะส่งผลให้พื้นผิวภายนอกถูกกัดกร่อนหรือเสื่อมสภาพจากความร้อน
6. กรณีของการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของเนื้อฉนวน XLPO ด้วยการวิเคราะห์แบบ FT-IR และ WD-XRF พบว่าการดูดกลืนพลังงานของแสงอินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ของธาตุภายในเนื้อฉนวน XLPO ที่อบเพื่อเร่งอายุขัยเนื้อฉนวนระยะเวลา 120 ชั่วโมง, 240 ชั่วโมง, 360 ชั่วโมง, 480 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 100°C, 110°C, 125°C มีผลการทดสอบที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยยะสำคัญ คือ เมื่อทำการเทียบผลการทดสอบสเปกโทรสโกปี ที่ Wavenumber cm^{-1} 3600, 2900, 2800, 1700, 1500, 1400, 1300, 1200, 1000 และต่ำกว่า 1000 ของเนื้อฉนวน XLPO ที่ไม่ได้เร่งอายุขัยเนื้อฉนวน XLPO เพื่อเปรียบเทียบกับเนื้อฉนวนที่เร่งอายุขัย 100°C, 110°C, 125°C ระยะเวลา 120, 240, 360, 480 ชั่วโมง ซึ่งไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยยะสำคัญ อีกทั้งผลการทดสอบ X-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ray Fluorescence พบว่าผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์มวลสารของธาตุแต่ละชนิด, ผลการทดสอบตำแหน่ง Peak, ผลการทดลองเพื่อหาความเข้มข้นของแต่ละธาตุ ไม่มีความแตกต่างกันของธาตุที่ถูกจำแนกอย่างมีนัยยะสำคัญ จึงสรุปได้ว่าแทบไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านเคมีภายในโมเลกุลของเนื้อฉนวนชนิด XLPO ที่เร่งอายุขัยเนื้อฉนวนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ

7. กรณีของแรงดันเบรกดาวน์ของสายไฟฟ้าที่เร่งอายุขัย 100°C, 110°C, 125°C ระยะเวลา 120, 240, 360, 480 ชั่วโมงพบว่าแรงดันเบรกดาวน์มีค่าลดลงอย่างมีนัยยะสำคัญเมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาในการอบเพื่อเร่งอายุเนื้อฉนวนเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากฉนวนเกิดการเสื่อมสภาพจากความร้อนอีกทั้งโมเลกุลของเนื้อฉนวนได้รับพลังงานและเกิดการสั่นอย่างต่อเนื่องเมื่อได้รับพลังงานความร้อนจึงส่งผลให้ค่าความต้านทานของเนื้อฉนวนลดต่ำลงเกิดสภาพความนำไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นจนถึงระดับที่ฉนวนไม่สามารถแสดงคุณสมบัติความเป็นฉนวนได้อีกต่อไปจึงเกิดการเบรกดาวน์เกิดขึ้น จึงสรุปได้ว่าระยะเวลาในการอบเพื่อเร่งอายุขัยเนื้อฉนวนและอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้แรงดันเบรกดาวน์มีค่าลดลง 3.54-8.58%

8. กรณีการประยุกต์ใช้สายไฟฟ้าฉนวน XLPO ในรถยนต์ไฟฟ้าพบว่า ประสิทธิภาพการซิลล์มีค่าเพิ่มมากขึ้นที่ความถี่สูงขึ้นและทรานเฟอร์อิมพีแดนซ์มีค่าลดลง 11.5% - 15.25% ที่ความถี่ตั้งแต่ 200Hz ขึ้นไป โดยอิมพีแดนซ์ถูกถ่ายโอน จากต้นทางคือสายไฟฟ้าที่ทำการทดสอบ ไปยังตำแหน่งกราวด์ของระบบรถยนต์ไฟฟ้า เมื่อเปรียบเทียบกับสายไฟที่มีซิลล์แบบปกติกับสายไฟที่มีซิลล์ที่ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาขึ้น ในตำแหน่งระหว่างระบบต้นกำลังกับอินเวอร์เตอร์ เนื่องจากการใช้ตัวนำไฟฟ้าทองแดงชุบตีบุกขนาดเล็ก ที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 มม. ทำให้สามารถเพิ่มพื้นที่ในการถักหุ้มสายไฟฟ้ามากขึ้น อีกทั้งยังเป็นวัสดุไดอะแมกเนติก กล่าวคือสามารถป้องกันสนามแม่เหล็กได้เป็นอย่างดี อีกทั้งการชุบตีบุกส่งผลให้ไม่เกิดออกซิเดชันบนพื้นผิวของตัวนำไฟฟ้าทองแดงส่งผลให้ไม่เกิดออกไซด์ของเหล็กหรือสนิมทำให้สามารถใช้งานสายไฟฟ้าได้อย่างยาวนาน ด้วยข้อวิเคราะห์และการสรุปผลการทดสอบที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นนั้นจึงทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้พบว่าเทคนิคต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์เนื้อฉนวนที่ได้นำเสนอไปแล้วก่อนหน้านี้ นั้น สามารถใช้ในการวิเคราะห์และประเมินสภาพเนื้อฉนวนได้จริง

9. ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะในการต่อยอดงานวิจัยด้วยการปรับเปลี่ยนองค์ประกอบของธาตุและสารประกอบทางเคมีในสารเร่งปฏิกิริยาทางเคมี เพื่อให้สามารถผลิตสายไฟฟ้าที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาในอัตราส่วนที่สูงกว่า 8% ได้ และเพิ่มความหนาชั้นผิวตีบุกที่เคลือบลดตัวนำทองแดง เพื่อให้ทนต่อสภาวะแวดล้อมและลดผลของสัญญาณรบกวนได้ดียิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. องค์ความรู้จากการศึกษาสายไฟฟ้าที่ผู้วิจัยได้วิเคราะห์และพัฒนาขึ้นพบว่าการเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของอัตราส่วนผสมตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีแปรผันโดยตรงกับ ค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้า, ค่าความต้านทานแรงดึง, ความยืดหดตัวของเนื้อฉนวน, กระแสการนำ, กระแสโพลาริเซชัน และค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของสายไฟฟ้าชนิดฉนวนครอสลิงค์โพลีเอเลฟิน กล่าวคือ เมื่อทำการเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของอัตราส่วนผสมตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีมากขึ้น จะทำให้ค่าตัวแปรต่างๆที่กล่าวมาข้างต้นเพิ่มสูงขึ้นไปด้วย เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีทำให้พันธะทางเคมีของมอนอเมอร์เกิดการเชื่อมขวางต่อกันมากขึ้น จึงมีคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นไปด้วย และเนื่องจากการเชื่อมขวางกันระหว่างมอนอเมอร์ไม่ทำให้เกิดธาตุหรือสารประกอบใหม่เกิดขึ้น ทำให้ผลการทดสอบ FT-IR และ WD-XRF พบว่าไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงในระดับเคมีอย่างมีนัยยะสำคัญ เมื่อเร่งอายุขัยเนื้อฉนวน XLPO ที่ระยะเวลาและอุณหภูมิต่างๆ ในกรณีนี้เองจึงสามารถกล่าวได้ว่า สายไฟฟ้าชนิดฉนวน XLPO มีความเสียรและไม่ปลดปล่อยธาตุหรือสารประกอบที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต อีกทั้งมีคุณสมบัติเด่น คือ หน่วงไฟ, ไม่ลามไฟ และไม่เกิดก๊าซพิษเมื่อถูกเผาไหม้ เมื่อทำการทดสอบพื้นผิวของฉนวนด้วยวิธี SEM ไม่พบสิ่งผิดปกติต่างๆ เช่น การถูกเจาะทะลุ อันเนื่องมาจากการเร่งอายุขัยเนื้อฉนวน จากการประยุกต์ใช้สายไฟฟ้าชนิดฉนวน XLPO ชนิดที่มีซิลล์ที่ผู้วิจัยได้คิดค้นและพัฒนาขึ้น ติดตั้งในตำแหน่งระหว่างอินเวอร์เตอร์และมอเตอร์ พบว่าค่าความต้านทาน, ความเหนียวนำ, ทรานสเฟอร์อิมพีแดนซ์ และประสิทธิภาพการป้องกันสัญญาณรบกวนที่ได้จากการทดลองจริง มีผลการทดลองที่ดีกว่าสายไฟฟ้าชนิดอื่นๆอย่างมีนัยยะสำคัญ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า สายไฟฟ้าชนิดฉนวนครอสลิงค์โพลีเอเลฟิน มีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานทั้งในภาคครัวเรือน เช่นระบบแจ้งเหตุอัคคีภัย, ระบบสายไฟฟ้าใต้ดิน และในภาคอุตสาหกรรม เช่น การขุดเจาะน้ำมัน, ระบบยานยนต์ไฟฟ้า, ระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ตได้เป็นอย่างดี อีกทั้งฉนวนสายไฟฟ้าชนิดครอสลิงค์โพลีเอเลฟินยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม งานวิจัยเล่มนี้จึงเป็นอีกหนึ่งงานวิจัยที่สามารถต่อยอดทางการศึกษาและธุรกิจได้เป็นอย่างดีสำหรับผู้สนใจในอนาคตต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] Ramy S. A. Afia, Ehtasham Mustafa, and Zoltán Ádám Tamus, “Thermal Aging of Photovoltaic Cables Based Cross-Linked Polyolefin (XLPO) Insulation,” Lecture Notes in Electrical Engineering, vol. 598, pp. 253-259, Springer Nature Switzerland AG 2020.
- [2] S. Klienhom, N. Boonsaner, P. Nimsanong, P.Chancharoensook, A.Kunakorn, and N. Pattanadech, “Dielectric Response Analysis for Cable Joint Problems in Medium Voltage Underground Cable System,” Lecture Notes in Electrical Engineering, vol. 599, pp. 1056–1063, Springer Nature Switzerland AG 2020.
- [3] IEC 60270:2000: High-voltage test techniques – Partial discharge measurements, third edition (2000)
- [4] IEC 60270:2000/AMD1:2015 Amendment 1 - High-voltage test techniques - Partial discharge measurements
- [5] Andreas Küchler, High Voltage Engineering: Fundamentals – Technology – Applications, Springer Berlin Heidelberg, 2017, Chapter 6.
- [6] E. Kuffel, W.S. Zaengl, and J. Kuffel, High Voltage Engineering: Fundamentals, Butterworth-Heinemann, Second edition 2000, Chapter 7.
- [7] Richard Cselko, Istvan Kiss, “Estimation of the Partial Discharge Inception Voltage of Low Voltage Cables”, 2019 Electrical Insulation Conference (EIC), Calgary, Alberta, Canada, 16-19 June 2019.
- [8] Condition Assessment of XLPO Insulated Photovoltaic Cables Based on Polarisation/Depolarisation Current 2020 International Conference on Diagnostics in Electrical Engineering (Diagnostika) 1- 4 Sep 2020.
- [9] J. Singhasivanon, N. Pattanadech and N. Jirasuwankul, “Comparative Testing of Breakdown Voltage Versus Polarization Current of 0.6/1kV XLPE Cables with Different Defects” 6th International Electrical Engineering Congress, Krabi, Thailand, 7-9 March 2018.
- [10] IEC 60092-360:2021 Electrical installations in ships - Part 360: Insulating and sheathing materials for shipboard and offshore units, power, control, instrumentation and telecommunication cable

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] I. Elomary, A. Ahmed, I. Lhassane, Optimization Design of the BLDC Motor Using Backtracking Search Algorithm, (2021) International Review of Electrical Engineering (IREE), 16 (2), doi.org/10.15866/iree.v16i2.17411.
- [12] Z. Rezvani, J. Jansson, and J. Bodin, Advances in Consumer Electric Vehicle Adoption Research: A Review and Research Agenda, Transportation Research Part D: Transport and Environment, vol. 34, January 2015, pp. 122-136.
- [13] Esposito, F., Isastia, V., Meo, S., PSO based energy management strategy for pure electric vehicles with dual energy storage systems, (2010) International Review of Electrical Engineering (IREE), 5 (5), pp. 1862-1871.
- [14] N. Jirasuwankul, S. Klongboonjit, C. Manop, Effects of Demand Fluctuation and Mitigation Strategy in Low Voltage EV Charging Station by Battery Energy Storage System, (2021) International Review of Electrical Engineering (IREE), Vol. 16, N.5.
- [15] M. Antivachis, P. S. Niklaus, D. Bortis, J. W. Kolar. "Input/Output EMI Filter Design for Three-Phase Ultra-High Speed Motor Drive GaN Inverter Stage". CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, Vol. 6, No., MARCH 2021.
- [16] H. Chen, T. Wang, S. Ye, T. Zhou, "Modeling and Suppression of Electromagnetic Interference Noise on Motor Resolver of Electric Vehicle". IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 63, Iss. 3, June 2021.
- [17] S. M. Lukic, J. Cao, R. C. Bansal, F. Rodriguez and A. Emadi : "Energy storage systems for automotive applications", IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 55, No. 6, pp. 2258-2267 (2008).
- [18] X. Hu, N. Murgovski, L. M. Johannesson, and B. Egardt: "Comparison of three electrochemical energy buffers applied to a hybrid bus powertrain with simultaneous optimal sizing and energy management", IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., Vol. 15, No. 3, pp. 1193-1205 (2014).
- [19] Salama, H., Said, S., Vokony, I., Hartmann, B., Power System Improvement of Different Coordinated Electric Vehicles Integration Approaches with Superconducting Magnetic Energy Storage, (2019) International Review of Electrical Engineering (IREE), 14 (6), pp. 407-419, doi.org/10.15866/iree.v14i6.17315.
- [20] Y. Zhang, G. Chen, Y. Hu, C. Gong, Y. Wang, "Cascaded Multilevel Inverter Based Power and Signal Multiplex Transmission for Electric Vehicles", Transactions on Electrical Mechanics and Systems, Vol. 4, No. 2, June 2020.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [21] J. Qu, Q. Zhang, Y. Wang and S. Cui, "Conducted EMI Investigation of a SiC-Based Multiplexing Converter for EV/PHEV," in IEEE Access, vol. 9, pp. 58807-58823, 2021, doi: 0.1109/ACCESS.2021.3072976.
- [22] B. A. Ikawanty, M. Ashari, H. Suryoatmojo, T. Taufik, A Novel Multiphase Interleaved DC-DC Boost Converter with Reduced Input Current Ripple for Renewable Energy Application, (2022) International Review of Electrical Engineering (IREE), Vol. 10, No. 1. doi.org/10.15866/irea.v10i1.20941.
- [23] S. Bauer, A. Reinbacher-Kostinger, Oszkar, Christian. "Sensitivity Analysis of the Transfer Impedance of Shielded Cables With Braided Shields Using a Parameterized FEM Model", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 57, No. 6, June, 2021.
- [24] C. Tuerk, D. J. Pommerenke, S. Bauer, "Improved Alternative Method for Fast and Simple Transfer Impedance Measurements", IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications, Vol. 2, Iss. 4, December, 2020.
- [25] D. Zhang et al., "Stability Analysis of the Cable Core of a 10 kA HTS DC Power Cable Used in the Electrolytic Aluminum Industry," in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 25, no. 3, pp. 1-4, June 2015, Art no. 5402304, doi: 10.1109/TASC.2014.2374691.
- [26] L. Zhai, G. Hu, M. Lv, T. Zhang, R. Hou. "Comparison of Two Design Methods of EMI Filter for High Voltage Power Supply in DC-DC Converter of Electric Vehicle". IEEE Access, Vol.8, April 2020.
- [27] O. Gassab, S. Bouguerra, L. Zhou, W-Y. Yin, Efficient Analytical Model for the Transfer Impedance and Admittance of Noncoaxial/Twinax Braided-Shielded Cables, IEEE Transection on Electromagnetic Compatibility, Vol. 62, Iss.6 December 2020
- [28] Bindu, R., Thale, S., Performance Analysis of Power Sharing Control Strategies for Battery/Ultracapacitor Hybrid Energy Storage Based Electric Vehicle, (2020) International Review of Electrical Engineering (IREE), 15 (5), pp. 382-393, doi.org/10.15866/iree.v15i5.18404.
- [29] I. Husain, B. Ozpineci, Md. S. Islam, E. Gurpinar, W. Yu, L. Xue, R. Sahu, "Electric Drive Technology Trends, Challenges, and Opportunities for Future Electric Vehicles", IEEE, PP. 1039 – 1059, January 2021.

- [30] D. Shin, M. Poncino, E. Macii and N. Chang: "A statistical model-based cell-to-cell variability management of Li-ion battery pack", *IEEE Trans. Comput.-Aided Design Integr. Circuits Syst.*, Vol. 34, No. 2, pp. 252-265 (2015).
- [31] J. Shen, and A. Khaligh : "A supervisory energy management control strategy in a battery/ultracapacitor hybrid energy storage system", *IEEE Trans. Transport. Electrific.*, Vol. 1, No. 3, pp. 223-231 (2015).
- [32] X. Chen, J. Wang, A. Griffio, L. Chen, Evaluation of Waste Heat Recovery of Electrical Powertrain with Electro-thermally Coupled Models for Electric Vehicle Applications, Vol.7, No.3, September 2021.
- [33] J. Singhasivanon and N. Jirasuwankul, "An Experimental Study on Dielectric Response of the Cross-linked Polyolefin (XLPO) Insulation of the Unshielded Cable Under Electric Field and Heat Flux," 2021 18th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2021, pp. 332-335, doi: 10.1109/ECTI-CON51831.2021.9454759.
- [34] A. Mushtaq, S. Frei, K. Siebert and J. Bärenfänger, "Analysis of shielding effectiveness of HV cable and connector systems used for electric vehicles," 2013 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2013, pp. 241-246.
- [35] G. Chiqovani, I. Oganezova, G. Gabriadze, M. Kuehn, M. Messer and R. Jobava, "Radiation of Low Frequency Magnetic Field from High Voltage Powertrain Systems of Electric Vehicles," 2019 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE, 2019, pp. 968-971, doi: 10.1109/EMCEurope.2019.8872132.
- [36] I. Ecsedi, Á. J. Lengyel, D. Gönczi, Bounds for the Thermal Conductance of Body of Rotation, *International Review on Modelling and Simulations (IREMOS)*, Vol. 13, No. 3, (2020).
- [37] X. Jia, C. Hu, B. Dong, F. He, H. Wang and D. Xu, "Influence of system layout on CM EMI noise of SiC electric vehicle powertrains," in *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, vol. 6, no. 4, pp. 298-309, Dec. 2021, doi: 10.24295/CPSSPEA.2021.00028.
- [38] K-T. Kim, M. S. Manoharan, M. A. T. Abdelkader, C-G. Lee, J-H. Park, A. Ahmed.

"Skin Effect-Related AC Resistance Study in Macroscopic Scale Carbon

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Nanotube Yarn Applicable to High-Power Converter” IEEE Transactions on Nanotechnology, Vol. 20, June, 2021.
- [39] M. A. Alaql, K. Kopsidas, “Modeling Multi-Layer OHL Conductors Undergoing Wind-Induced Motion”, IEEE Access, Vol. 8, pp. 104579 – 104589, June 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2999465.
- [40] IEC 60092-350:2020, Electrical installations in ships - Part 350: General construction and test methods of power, control and instrumentation cables for shipboard and offshore applications.
- [41] IEC 60092-354:2020, Electrical installations in ships – Part 354: Single- and three-core power cables with extruded solid insulation for rated voltages 6 kV ($U_m = 7,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV).
- [42] IEC 60502-2:2014, Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV) – Part 2: Cables for rated voltages from 6 kV ($U_m = 7,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV).
- [43] IEC 60228:2004, Conductors of insulated cables.
- [44] M. Xu, Y. Wang, X. Li, X. Dong, Hi Zhang, H. Zhao, X. shi, “Analysis of the Influence of the Structural Parameters of Aircraft Braided-Shield Cable on Shielding Effectiveness”. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 62, iss.4, July 2019.
- [45] A. Emadi, Y. J. Lee, and K. Rajashekar : “Power electronics and motor drives in electric, hybrid electric, and plug-in hybrid electric vehicles”, IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 55, No. 6, pp. 2237–2245 (2008).
- [46] C. H. T. Lee, W. Hua, T. Long, C. Jiang, L. V. Iyer, “A Critical Review of Emerging Technologies for Electric and Hybrid Vehicles”, IEEE Open Journal of Vehicular Technology, Vol. 2, pp. 471-485, Dec 2021, doi: 10.1109/OJVT.2021.3138894.
- [47] N. Murali, V. P. Mini, S. Ushakumari, Modified V-Shaped Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive for Electric Vehicle, (2021) International Review of Electrical Engineering (IREE), 14 (6), doi.org/10.15866/iremos.v14i6.20884.
- [48] P. Xiao, P. A. Du, and B. Zhang, “An analytical method for radiated electromagnetic and shielding effectiveness of braided coaxial cable,” IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 61, no. 1, pp. 1–7, 2018.

- [49] F. Sprei, *Disrupting Mobility*, Energy Research & Social Science, vol. 37, March 2018, pp. 238-242.
- [50] Z. Rezvani, J. Jansson, and J. Bodin, *Advances in Consumer Electric Vehicle Adoption Research: A Review and Research Agenda*, Transportation Research Part D: Transport and Environment, vol. 34, January 2015, pp. 122-136.
- [51] N. Daina, A. Sivakumar, J. W. Polak, *Electric Vehicle Charging Choices: Modelling and Implications for Smart Charging Services*, Transportation Research Part C, vol. 81, pp. 36–56, 2017.
- [52] J. L Afonso, L A. L. Cardoso, D. Pedrosa, T. J. C. Sousa, L. Machado, M. Tanta, and V. Monteiro, *A Review on Power Electronics Technologies for Electric Mobility*, Energies, vol. 13, n. 6343, 2020. doi: 10.3390/en13236343
- [53] M. Bertoluzzo et al., *A Distributed Driving and Steering System for Electric Vehicles Using Rotary-linear Motors*, SPEEDAM 2010, Pisa, Italy, 2010, pp. 1156-1159.
- [54] M. K. Loganathan, C. Ming Tan, B. Mishra, T. A. M. Msagati and L. W. Snyman, *Review and Selection of Advanced Battery Technologies for Post 2020 Era Electric Vehicles*, 2019 IEEE Transportation Electrification Conference (ITEC-India), Bengaluru, India, 2019, pp. 1-5.
- [55] M. Brenna, F. Foiadelli, C. Leone, and M. Longo, *Electric Vehicles Charging Technology Review and Optimal Size Estimation*, Journal of Electrical Engineering & Technology, vol.15, 2020, pp. 2539–2552.
- [56] S. Meo and L. Toscano, *Some New Results on the Averaging Theory Approach for the Analysis of Power Electronic Converters*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 65, no.12, pp. 9367-9377, Dec. 2018. doi: 10.1109/TIE.2018.2821620
- [57] S. Meo, *Nonlinear Convex Optimization of the Energy Management for Hybrid Electric Vehicles*, Engineering Letters, vol 22, n.4, 2014.
- [58] Del Pizzo, A., Meo, S., Brando, G., Dannier, A., Ciancetta, F., *An Energy Management Strategy for Fuel-cell Hybrid Electric Vehicles via Particle Swarm Optimization Approach*, (2014) International Review on Modelling and Simulations (IREMOS), 7 (4), pp. 543-553. doi: <https://doi.org/10.15866/iremos.v7i4.4227>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [59] Esposito, F., Isastia, V., Meo, S., PSO based energy management strategy for pure electric vehicles with dual energy storage systems, (2010) International Review of Electrical Engineering (IREE), 5 (5), pp. 1862-1871.
- [60] C. Srithapon, P. Ghosh, A. Siritaratiwat, and R. Chatthaworn, Optimization of Electric Vehicle Charging Scheduling in Urban Village Networks Considering Energy Arbitrage and Distribution Cost, *Energies*, vol.13, n.349, 2020.
- [61] M.T. Hussain, N.B. Sulaiman, M.S. Hussain, and M. Jabir, Optimal Management Strategies to Solve Issues of Grid Having Electric Vehicles (EV): A Review, *Journal of Energy Storage*, vol.33, 2021.
- [62] S. Zhou, Y. Zhuang, W. Gu, and Z. Wu, Operation and Economic Assessment of Hybrid Refueling Station Considering Traffic Flow Information, *Energies*, vol.11, n.1991, 2018.
- [63] A.S.Masoum, S. Deilami, P.S. Moses, M.A Masoum, and A.Siada, Smart Load Management of Plug-in Electric Vehicles in Distribution and Residential Networks with Charging Stations for Peak Shaving and Loss Minimization Considering Voltage Regulation, *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol.5 n.8, 2011, pp.877–888.
- [64] Z. Yu, and L. Tong, Demand Response via Large Scale Charging of Electric Vehicles, *IEEE Power and Energy Society General Meeting PESGM 2016*, 2016.
- [65] K. D. McBee, Transformer Aging Due to High Penetrations of PV, EV, Charging, and Energy Storage, *9th Annual IEEE Green Technologies- GreenTech2016~*, March 29–31, 2016, Denver, CO, USA.
- [66] C. L. Su, K.E. Zheng, R.C. Leou, C.N. Lu, J.H. Teng, and K.F. Huang, Analysis of PEV Charging Impact on Distribution Transformer Aging for Charging Station Transformer Design, *IEEE Industry Application Society Annual Meeting*, October 5-9, 2014, Vancouver, BC, Canada.
- [67] D. Ronanki, A. Kelkar, and S. S. Williamson, Extreme Fast Charging Technology-Prospects to Enhance Sustainable Electric Transportation, *Energies*, vol. 12, n.3721, 2019.
- [67] M.C. Falvo, D. Sbordone, and M. Devetsikiotis, EV Charging Stations and Modes: International Standards, *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion – SPEEDAM 2014*, June 18, 2014.

- [69] L. Wang, Z. Qin, T. Slangen, P. Bauer and T. van Wijk, Grid Impact of Electric Vehicle Fast Charging Stations: Trends, Standards, Issues and Mitigation Measures - An Overview, *IEEE Open Journal of Power Electronics*, vol.2, pp. 56-74, 2021. doi: 10.1109/OJPEL.2021.3054601
- [70] J. Sun, Impedance-based Stability Criterion for Grid-connected Inverters, *IEEE Trans. Power Electronics.*, vol. 26, no. 11, pp. 3075–3078, Nov. 2011.
- [71] S. Habib., M. M. Khan, F. Abbas, L. Sang, M. U. Shahid, and H. Tang, A Comprehensive Study of Implemented International Standards, Technical Challenges, Impacts and Prospects for Electric Vehicles, *IEEE Access*, vol.6, 2018, pp.13866-13890.
- [72] M. Coppola, P. Cennamo, A. Dannier, D. Iannuzzi and S. Meo, Wireless Power Transfer Circuit for E-bike Battery Charging System, 2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), Nottingham, UK, 2018, pp. 1-5.
doi: 10.1109/ESARS-ITEC.2018.8607342
- [73] K. Yunus, H. Z. De La Parra and M. Reza, Distribution Grid Impact of Plug-In Electric Vehicles Charging at Fast Charging Stations using Stochastic Charging Model, *Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications*, Birmingham, UK, 2011, pp. 1-11.
- [74] H. Turker, S. Bacha, D. Chatroux, and A. Hably, Low-Voltage Transformer Loss-of-Life Assessments for a High Penetration of Plug-In Hybrid Electric Vehicles (PHEVs), *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 27, n.3, July 2012, pp. 1323-1331.
- [75] H. Nordman, N. Rafsback, and D. Susa, Temperature Responses to Step Changes in the Load Current of Power Transformers, *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol.18, 2003, pp.1110–1111.
- [76] X. Wang and F. Blaabjerg, Harmonic Stability in Power Electronic-based Power Systems: Concept, Modeling, and Analysis, *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 10, no. 3, pp. 2858–2870, May 2019.
- [77] S.Habib., M. M. Khan, F. Abbas, L. Sang, M. U. Shahid, and H. Tang, A Comprehensive Study of Implemented International Standards, Technical

- Challenges, Impacts and Prospects for Electric Vehicles, IEEE Access, vol.6, 2018, pp.13866-13890.
- [78] K. D. McBee, J. hong, and P. Rudraraju, Demand Side Management Effects on Substation Transformer Capacity Limits, Applied Sciences, vol. 9, 2019.
- [79] W. Mingshen, M. Yunfei, J. Tao, J. Hongjie, L. Xue, H. Kai, and W. Tong, Load Curve Smoothing Strategy Based on Unified State Model of Different Demand Side Resources, Journal of Modern Power System, Clean Energy, vol. 6, n.3, 2018, pp.540–554.
- [80] การศึกษาเทคนิคการคาดการณ์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศโดยอาศัยผลการวัดกระแสไหลพร้อมสำหรับระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง, วราเทพ ผดุงถิ่น
- [81] C. Charumit, V. Kinnares, Discontinuous SVPWM Techniques of Three-Leg VSI-Fed Balanced Two-Phase Loads for Reduced Switching Losses and Current Ripple, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 30, Issue 4, April 2015, page 2194-2204, DOI : 10.1109/TPEL.2014.2326773.
- [82] W. Yeetum, V. Kinnares, Parallel Active Power Filter Based on Source Current Detection for Antiparallel Resonance with Robustness to Parameter Variations in Power Systems, Vol. 66, Issue 2, February 2019, page 876-886.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Investigation on Current Ripple and Electromagnetic Interference in High Voltage Powertrain Systems for Electric Vehicles by Using Crosslinked Polyolefin Insulation Shielded Cable

Jakawan Singhasivanon¹, Nirudh Jirasuwankul¹, Kunagone Kiddee²

Abstract – At this moment, the powertrain system of Electric Vehicles (EVs) tends to use high voltages and high currents when the EVs operate at High Power (HP) mode. The Electromagnetic Interference (EMI) is caused by Electromagnetic Field (EF), high voltage, and current ripple. EMI affects EVs, whereas the Shielding Effectiveness (SE), and the proportional inverse of the transfer impedance prevent the effect of EMI. This research aims to investigate the current ripple the EMI in high voltage powertrain systems for EVs by using the developed crosslinked polyolefin insulation shielded cable, 50 mm² single-core HP XLPO shielded cable with 0.15 mm annealed tinned-copper wire braid material. The experiment consists of three parts. The first one investigates the tendency of SE and current ripple. The second part shows the analysis of the effect of HP mode to the cable. The third part is an additional study that compares and analyzes the transfer impedance. The results indicate that the cable operates properly in the frequency above 200 Hz, transfer impedance decreasing between 11.5% to 15.25%, induces the SE and reduces the current ripple in the higher frequency range. The results obtained from this research represent a preliminary investigation guideline in decreasing the effect of EMI in EVs by using 50mm² single-core HP XLPO shielded cable with 0.15 mm annealed tinned-copper wire braid material in a high-power range. Copyright © 2022 Praise Worthy Prize S.r.l. - All rights reserved.

Keywords: Crosslinked Polyolefin Insulation Shielded Cable, High Voltage Powertrain Systems, Electric Vehicles (EVs), Shielding Effectiveness (SE), Current Ripple, Tinned-Copper Wire Braid

Nomenclature

XLPO	Crosslinked Polyolefin	μ_0	Magnetic permeability
HP XLPO	Crosslinked Polyolefin operate at high power mode	C_0	Capacitance matrix
EVs	Electric Vehicles	V	Voltage on conductor
EMI	Electromagnetic Interference	σ	Wire's specific conductivity
EMC	Electromagnetic Compatibility	W_m	Energy stored
EF	Electromagnetic Field	B	Magnetic flux density
SE	Shielding Effectiveness	I	Total current
PCU	Power control unit	r	Distance
pHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle	Z_T	Transfer Impedance
R_{DC}	Resistance of direct current	R_1	Terminal Impedance
R_{AC}	Resistance of alternating current	Z_0	Impedance of the signal generator and receiver
l	Cable length	L_c	Coupling length of the tested cable
ρ_{pp}	Conductor resistivity	NYCC	New York City Drive Cycle
a	Cross-sectional area	PMSM	Permanent Magnet Synchronous Motor
α	Skin penetration depth effect	PWM	Pulse Width Modulation
W	Current velocity		
μ	Permeability		
r	Radius of cable		
E_i	Magnitude of the incident electric field		
E_T	Magnitude of the transmitted electric field		
L	Inductance per length unit		
ϵ_0	Vacuum permittivity		

I. Introduction

Presently, countries all over the world are greatly aware of the importance of reducing energy consumption and emissions in the transport sector. It can cause harmful impact on environmental [1]. EVs are an alternative that can be applied to the transport sector.

They are more likely to be used in future due to all

their advantages [2]. These cars are powered by electric motors and energy from batteries or other types of storage devices. Furthermore, the EVs have better torque output that has ability to accelerate faster and smoother.

Maintenance of EVs is cheaper compared with the internal combustion engine cars. The EVs driving system mainly consists of a high voltage battery [3], [4], drive circuit and high-powered motors. Such devices are connected to cables in order to transmit energy. When high voltage and high current transmit through cables, EF occurs around the connected link between the load and the supply resulting in the existing of EMI or even the EMC. EMI is caused by several factor i.e. EF, high voltage, current ripple, etc. The ability to prevent the effect of EMI of cable is determined by SE, the proportional inverse of the transfer impedance.

Therefore, the quality of insulator, conductor, and shield of the cables, used in the EVs system devices, is directly linked to the level of electromagnetic emissions.

Connecting low-quality shielded cable can often lead to high levels of electromagnetic emissions that could exceed the emission standard. Therefore, the common problem for most suppliers who produce cables and vehicles is finding methods to effectively assess and examine the shielded cable. Generally, EMI is considered around 0 to 400 GHz. In EVs, the electrical system will operate at 0 to 800 Hz at the DC and AC link, respectively [5], [6]. However, high power inverters operate at high frequency currents, which result in high harmonic spreading at the link. Therefore, frequency ranges exceeding 0 to 800 Hz should be taken into consideration. The EF can spread around the vicinity, which may interfere with electric systems nearby. Such EMI may cause car malfunctions or degeneration and with this reason, EMI should be taken seriously for the safety and trustworthiness of the EVs systems [7]. How to effectively explain the EMI and improve the safety and reliability of EVs is a substantial issue that hinders the further development of EVs. In addition, when switching devices or power from the inverter or electronic systems, currents ripple will be released at high voltages of 15 Hz to 200 kHz [8], [9]. In this situation, electric currents may exceed the capacity of the cable resulting in damage, unwanted mistakes, and faster system deterioration. Various researches have been conducted to look and gauge the modeling of power inverters in the automotive industry [10]. J. Qu et al. have studied the electromagnetic compatibility and the characteristics of a shielded system in EVs [11]. The effect of ripple voltage and the improvement of the passive devices such as the DC-linked HV storage devices has been also conducted by the author of this paper [12]. Several studies have been conducted about the shielding properties, conducted interference voltage, transfer impedance of braided cable [13], [14] and shield currents found in HV's automotive systems including the effect on Alternating Current (AC) and Direct Current (DC) cables that run between the traction power inverter and the electrical machines in 3-phase AC systems [15]-

[17]. This research mainly focuses on HP XLPO shielded cable with the developed 0.15 mm annealed tinned-copper wire braid material that implemented in EVs. A simulation and an experimental have been run using the developed HP XLPO shielded cable and standard shielded cable within a high voltage powertrain system of EVs. Measurements of conductor, inductance, harmonics, voltage and current ripple, shielding effective, impedance, amplitude of resonant and comparison efficiency of 50 mm² single-core HP XLPO shielded cable with 0.15 mm annealed tinned-copper wire braid material and other shielded cable by various frequency. By using the data gathered from the simulations and experimental, it has been concluded that the developed HP XLPO shielded cable has been able to be more effective, energy saving and safely transfer power within EVs than other standard shielded cables.

II. High Voltage Powertrain Systems of EVs

High Voltage Powertrain Systems in EVs are demonstrated in Fig. 1. There is an arrangement of components of high voltage systems that consists of a high voltage battery with high-performance long-life cycle [18], Power Control Unit (PCU) and drive motor.

The battery in Fig. 2 is classified as a high voltage battery to categorize it from the common 12 V battery used in common vehicles. It is also known as a Traction battery to indicate its high voltage. These components should be carefully designed as well as a battery box and the insulation part should protect itself from high voltage and the connection of the battery by resilient ability.

Moreover, the battery box is designed to cool itself using natural airflow as well. The PCU is an interface that drives the direct current from the high voltage battery and controls the output power to the electric drive motor in AC [19]. The drive motor acts as the electric motor, generator and transmits the output power through differential gears. In order to illustrate clearly the placement of high voltage systems in the EVs, Fig. 1 shows the layout of high voltage connections, illustrating how the drive motor is connected to the battery through an inverter that connects the AC of the motor, and the DC from the battery, also known as the DC/AC Converter. Inverters will not only convert the DC from battery to drive vehicles, but in the regenerative braking case, also smoothly convert AC to DC appropriately for battery use. From Fig. 1, there are many devices connected to high voltages via a high voltage-link circuit, also known as high voltage bus. With this connection, the main electricity will be connected from the high voltage battery. Besides the main component, the electric drive systems also need the additional part to encourage the system such as other vehicle devices that normally work under 12 V batteries such as lighting, vacuum pumps and brake systems, will use power from a high voltage bus by the AC/DC converter to lower the current to the level appropriate for smaller devices. Other small devices that

use high power may connect directly to the high voltage bus, such as an air conditioner, heater, compressor, cooling system, the system that used to recovery waste heat from powertrain systems of EVs [20]-[22].

Therefore, the devices will work concurrently with a safe management system that controls high voltage in both hardware and software.

As described, the main components are held together by a high voltage bus. In this bus, high voltages may transmit a large amount of electric current. Therefore, the busbar fastening process is important, especially when operating vehicles with high vibrations. In cases where the busbar is loose, heated or on high electrical resistance, it may cause dangerous sparks. Therefore, materials used for producing devices should have electrical and mechanical properties that are appropriately assembled for safety.

II.1. Voltage Range in High Voltage System

In designing a high voltage system for the EVs, the voltage range will differ according to each type of drive motor and vehicle size under safety standards [7]. In DC, more than 60 V are considered as high voltage and should be designed with safety if the EVs have a high power-rating exceeding 12 kW. Generally, the EVs run using high voltage in order to maintain the current level of 25 A. Plug-in Hybrid Electric Vehicle (pHEV) runs in a voltage range around 400V [8].

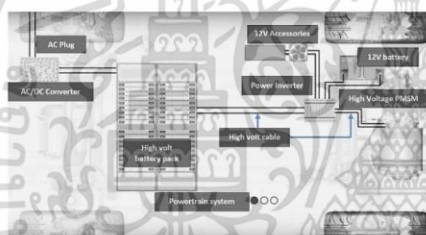


Fig. 1. Diagram of High Voltage Powertrain System for Electric Vehicles

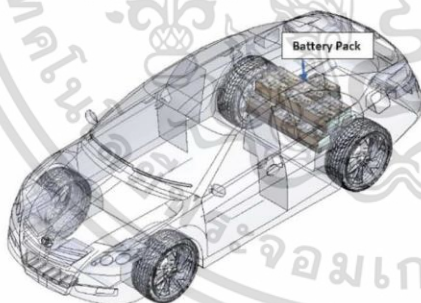


Fig. 2. 3D model of high voltage battery pack in EVs

II.2. Vehicle High Voltage Cables

The cables are very important components connected to the generator and mainly used for transmitting high voltage and electric currents in EVs. Proper insulator, conductor, and shield should be considered because they can reduce or prevent EMI in a high voltage application.

By the nature of insulator, working in high temperature environment leads to the degradation of an insulation, increasing of electrical conductivity, reduction of breakdown voltage effects to high voltage application performance [23]. If considered of conductor, Single-core wire is used for high electric current transmission whereas the multi-core wire is used for low electric current transmissions such as in the air compressor. The duty of shield is to prevent noise and other interference by covering the conductor and the insulator. Examples of HP XLPO shielded cable are shown in Figs. 3-5.

III. Analysis of Shielding Effectiveness and Electromagnetic Interference Mechanism of Electric Vehicles

In the EVs, DC links activate at 0 Hz and 0 to 35 kHz in the DC and AC link, respectively. However, the power inverter is functional at a higher frequency range and the current is chopping.

It consequently causes high harmonic generation effects in the links. Therefore, a frequency higher than 0 Hz needs to be evaluated. The surrounding electromagnetic fields can appear to interfere with electronic devices and cause system deterioration.

Therefore, EMI needs to be on the examination list in order to improve reliability and safety of EVs. The EMI emission can be separated into two sorts: common and differential mode. Common currents are the currents drawn via the internal conductor to the HP XLPO shielded cable. Common currents are the individual currents of the internal conductors and fed back to another internal conductor. In differential mode, the emission is conducted on signal lines and back, via any other phases.



Fig. 3. 1.5 mm² LSZH Steel Wire Multi core HP XLPO shielded cable



Fig. 4. 50 mm² LSZH Steel Wire Multi core HP XLPO shielded cable



Fig. 5. 50 mm² HP XLPO shielded cable with anneal tinned-copper wire braid

This mostly occurs repeatedly at lower frequency ranges because of the switching devices of a power inverter [24]. The HP XLPO shielded cable characteristics affect the common and differential currents, which regulate the capacitive, resistivity and inductive coupling in the internal conductor and the surroundings surface [25]. The HP XLPO shielded cable resistance will be considered through manual and other definite parameters [26]. Conductor resistance in DC current has been calculated as follows:

$$R_{DC} = \frac{l_{ohp}}{a} \quad (1)$$

When an AC current propagates in the conductors, an opposite direction current is generated in the conductor core. Consequently, this surface depth effect decreases the current transfers in the conductor core. A parameter about the skin penetration depth effect is α , and it can be seen from the surface depth where the current draws [27], [28], as shown in the following equation:

$$\alpha = \sqrt{\frac{2\rho}{W\mu}} \quad (2)$$

For a depth, the resistance can be designed as follows:

$$R_{AC} = \frac{l\rho}{a - \pi(r - \alpha)^2} \quad (3)$$

This formula is valid only for $r \geq \alpha$, since the surface depth cannot be greater than the cable conductor radius [29]. In higher frequency, it can be defined as:

$$R = \frac{l}{2\pi r \alpha} \quad (4)$$

Furthermore, Figs. 6 illustrate the production process of braiding cable according to IEC Standard [30]-[33].

Since the HP XLPO is shielded, cable has been analyzed adding a metalized film layer to the outer shielding layer, in comparison with the single-layer shielding, the diamond-shaped holes on the inside are wrapped by metalized films that can effectively prevent the magnetic field from leaking via small holes [34]. In addition, the hole inductance effect is also importantly reduced. The Shield Effectiveness (SE) equation is shown below:

$$SE = 20 \log_{10} \frac{E_i}{E_t} \quad (5)$$

In case the grounded plane conductors are without magnetic materials, the inductance and capacitance matrix has been calculated in the following approximation function:

$$L = \varepsilon_0 \mu_0 C_0^{-1} \quad (6)$$



(a) Wire drawing process



(b) Braiding process

Figs. 6. Production process of HP XLPO shielded cable with our developed 0.15mm annealed tinned-copper wire material

In order to calculate the inductance per length unit, through surface magnetic integration is defined as:

$$L = \frac{2}{I} \iint_V \sigma W_m dx dy \quad (7)$$

IV. Cable Model

This section describes the cable model used in the experiment and its properties. COMSOL Multiphysics® version 5.6 has been used to create and simulate the HP XLPO cable model. It consists of the HP XLPO insulation, cable core and the shield. Three different specifications of cable are used in the experiment as follows:

- 1) 50 mm² single-core HP XLPO shielded cable With developed 0.15 mm annealed tinned-copper wire braid material as Fig 7;
- 2) 35 mm² single-core HP XLPO shielded cable with developed 0.15 mm annealed tinned-copper wire braid material as Fig 8;
- 3) 35 mm² single-core HP XLPO unshielded cable as Fig 9.

Fig 7 presents the cross-section of the 50 mm² single-core HP XLPO shielded cable. This type of cable is mostly assembled between the traction power inverter and the high voltage battery pack. Since this is a typical power HP XLPO shielded cable used in EVs applications, most assessments have been studied and have been the reference cable for the parameters.



Fig. 7. Cross section of a 50 mm² single-core HP XLPO shielded cable



Fig. 8. Cross section of 35 mm² single-core HP XLPO shielded cable



Fig. 9. Cross section of 35 mm² single-core HP XLPO unshielded cable

IV.1. Electromagnetic Fields

Approaches for reduction of the electromagnetic field caused by an electric current surrounding the HP XLPO shielded cables have been perceived, estimated, and found. This research emphasizes how the electromagnetic field and flux are affected by the current that flows from one part to another. The specific magnetic flux density for an area in space can be expressed as:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \phi \tag{8}$$

The transfer impedance can be explained by:

$$Z_T = \frac{R_1 + Z_0}{2L_c} \times 10^{-(\alpha_{means} - \alpha_{cal}/20)} \tag{9}$$

IV.2. High Power (HP) Cross-Linked Polyolefin (XLPO) Insulation Shielded Cable Measurements

High voltage systems of electric vehicles are powered by a high-power DC system. This study assumes that it uses a 350 V system with a traction inverter of 40 kW.

The current ripple source comes from the power inverter and high voltage battery pack. According to [35], the power inverter should be calculated in this frequency range with its Norton's theorem circuit, where the

internal impedance of the source comprises of the DC-link. This research has ignored the ripple spread of other supplemental loads and it has mostly focused on the power inverter's load. The 35 and 50 mm² single-core HP XLPO shielded cable with 0.15 mm annealed tinned-copper wire braid material has been tested in bench test of virtual EVs. The test results of 35 and 50 mm² single-core HP XLPO shielded cable for EVs usage in frequency range 10 Hz–1 MHz are shown in Figs. 10.

The set-up of unit under test is shown in Figs. 11, 12.

V. Experimental and Simulation Results

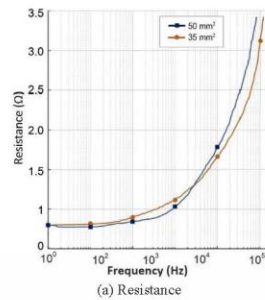
The research shows the simulations carried out on the proposed High Voltage Powertrain System for EVs using MATLAB/Simulink, given the drive-cycle distance of 6140.02m, the travel time of 670 s and the New York City Drive Cycle (NYCC). The maximum speed and the residence time in the deceleration mode per drive cycle have been 71.01 km/h and 28.99%. Table I and Fig. 13 show the simulated and the experimental of high voltage lithium-ion battery, high efficiency PMSM, measurement instrument specifications and results. Some corresponding examples have been reported by [36], [37]. For the simulated speed curves of the High Voltage Powertrain System for EVs in a single drive cycle, the EVs have accelerated to a constant speed of approximately 45km/h for 90s before slowing down to a stop. The second part has been taken after 60s at a constant speed of 53km/h for 150s before deceleration.

The last cycle has been done after 48s up to 81.01km/h constantly for 240 s. From the experiment of the motor at 4500 rpm, with a torque of 50 Nm, Fig. 14 indicates the results of FFT of 35 mm² and 50 mm² HP XLPO shielded cables from the AC current. The observation is that the first harmonic occurs at 1.5 kHz, where basic components are below 200 Hz consistently with 3150 rpm. High frequency harmonics are caused by the inverter using PWM with switching frequency points of 20 kHz. Importantly, the Rogowski coil should be examined to make sure it covers both the conductors' insides, as well as the shield and to measure the current in both the inner conductor and the shield.

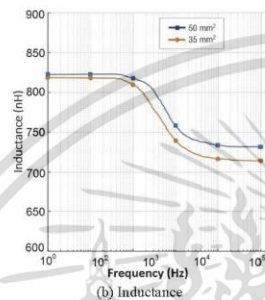
TABLE I
THE SIMULATED AND EXPERIMENTAL OF HIGH VOLTAGE LITHIUM-ION BATTERY, HIGH EFFICIENCY PMSM, MEASUREMENT INSTRUMENT

Specifics	SPECIFICATIONS	
	Simulation	Experimental
High voltage Battery pack	Lithium-ion Battery pack from ADVISOR 456.5 Volt 130Ah 16 packs in series High efficiency	Lithium-ion Battery pack from ADVISOR 456.5 Volt 130Ah 16 packs in series High efficiency
Motor	PMSM, 37 kW from ADVISOR 1. Conductor Resistance Resistivity series QJ36C	PMSM, 37 kW by 3 in 1 BYD series
Measurement Instrument	2. Digital Storage Oscilloscope GDS-I074B 3. Surface book 2, 15 inches with Intel Quad-Core 17-8650u, 4.2GHz, 16GB Ram, 1TB SSD, Nvidia GeForce GTX 1060, 6GB graphic memory	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) Resistance



(b) Inductance

Figs. 10. Test results of 35 and 50 mm² single-core HP XLPO shielded cable for EVs usage in frequency range 10 Hz–1 MHz



Fig. 11. Digital Storage Oscilloscope GDS-1074B

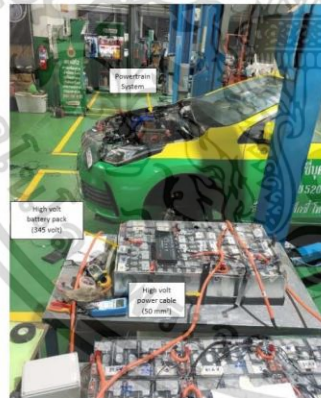


Fig. 12. Bench test of virtual EVs

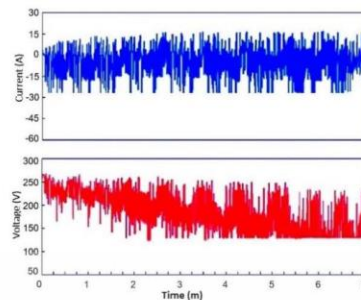


Fig. 13. The experimental results of the High Voltage Powertrain System for Electric Vehicles : the DC-link of voltage ripple and current ripple waveforms in the battery-enabled normal mode

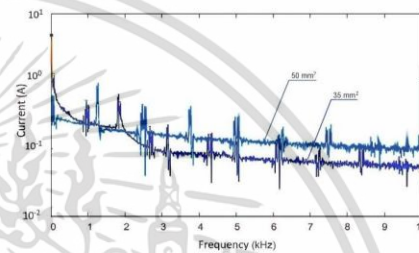


Fig. 14. The results of FFT of 35mm² and 50mm² HP XLPO shielded cable from the AC current

The same process is used for the DC cable. The FFT of the AC current on the 50 mm² HP XLPO shielded cable at positive side of the high voltage battery is indicated in Fig. 15. Since the current is measured by the Rogowski coil, the DC components are not shown in Fig. 15. The figure shows only the AC harmonic of the DC cable. In this case, the DC cable will use a breakout box to wrap the Rogowski coil around the inner conductor.

The same harmonic can be observed here from 20 kHz up and the signal from the AC component at 200 Hz is low. From this result, it is an example of a harmonic current that can spread in AC and DC driving situations.

These harmonics may cause EMI to devices in the EVs. The following section will present ways to reduce the magnetic field for any frequency range from 1 Hz to 20 MHz. In order to prove the effectiveness of the shield, the simulation of HP XLPO cable 35 and 50 mm² with shield and HP XLPO cable 35 mm² without shield is set in forms of the frequency-domain in simulations.

For each simulation, two shield cables have been placed side by side, and each cable has the electric current in the opposite direction. From the result of simulations shown in Fig. 16, the effectiveness of the shield increases in higher frequencies for the HP XLPO cable with a shield, whereas the effectiveness of the shield decreases in low frequencies because of the loss of reflection and low-frequency absorption.

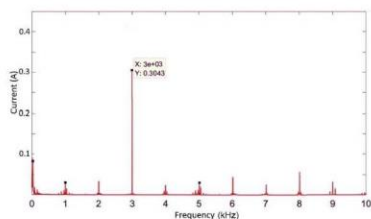


Fig. 15. The FFT of the AC current on the 50mm² HP XLPO shielded cable at positive side of the high voltage battery

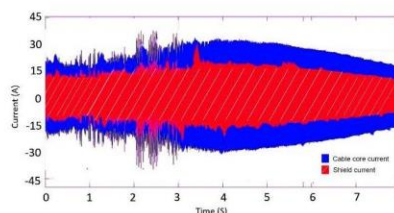


Fig. 17. Measured shield and cable core current in the frequency range of 20 Hz to 250 kHz in the time domain on a 50mm² HP XLPO shielded cable, assembled between the HV-distributor and the front power inverter, over an acceleration cycle ranging from 0 to 9000 rpm

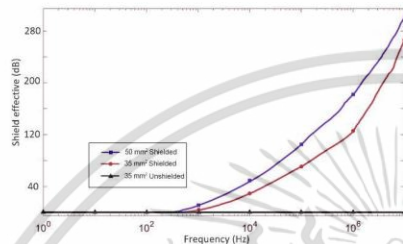


Fig. 16. The shield effectiveness of 50 mm² shielded (blue), 35 mm² shielded (red) and 35 mm² unshielded (black) HP XLPO

In order to reduce low-frequency magnetic fields, permeable materials should be used instead of electrically conductive materials. In order to test this observation, shielding material in a standard cable is replaced by the developed 0.15mm annealed tinned-copper wire braid shielding. The graph will present the behaviors of permeability in each frequency of highly permeable materials. This information will be used to review the result of highly permeable materials such as a Magnetic shield [38]. The measurement has required a custom breakout box that enables the measurement of the shield current and the cable core current, without changing the cable length, geometry, and the system parameters. From the result illustrated in Fig. 17, the current around a cable core has a band pass filter in the frequency range of 20 Hz to 250 kHz and the current shield is filtered with the same parameter. Moreover, the figure shows the test measurement of short-period acceleration and braking cycle of the actual vehicle. As observed from the measurement, shield currents observed are in line with the shield expected in the acceleration of the NYCC driving cycle. The test measurement has been performed with the actual vehicle parameters. The test result shows that in this specific frequency range, the currents that come from the inductive coupling, between the shield and the cable core have amplitude of more than 32% than that of the ripple cable core. In addition, the measurement indicates that the electric current limit of 15A RMS can exceed the limit when actually driving.

The conclusion of the test measurement goes along with the objectives to find the correct material.

The measurements have been conducted using the Digital Storage Oscilloscope GDS-1074B and a 1.25-meter HP XLPO shielded cable with the same procedure as for the impedance measurements. The shield connections have been opened or grounded using approximately 20 cm long HP XLPO cables. As seen from Fig. 18, the separation curves of 0.5 cm and 12 cm are significantly different at low frequencies. Then, curves will appear at both with higher frequencies. The curve of 12 cm has lower inductance than the curve of 0.5 cm in the field of 1.5 Hz and 2.5 MHz. In order to analyze further the behaviors of induction frequency, monitoring induction currents can be found in simulations, using current surface combination on the shield. The results are available in Fig. 19. From the experiment and simulation, the calculated coupling factor is set as 0.825 and 0.914 for 0.5 cm and 12 cm of testing cable respectively. The impedance result using (4) is demonstrated in Figs. 20, 21. Cable separation is shown using (7) with the measured inductance for shielded cables. The result of the simulation from Fig. 21 is obtained from two simulations. The first one is the contact between the ideal shields. The second simulation is the resistance level at 0.02 Ω and the inductance of 0.35μH added to mimic real measurements. From Fig. 22, the resonant frequency can be realized as 124 kHz with 12 cm partition and as 192 kHz with 0.5 cm portion when the shield is open. Once the shield is grounded, the resonant frequency is substituted, 280 kHz for both 12 and 0.5 cm portion.

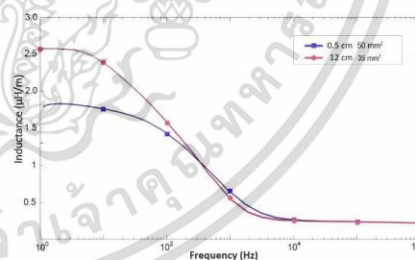


Fig. 18. Inductance of 0.5 and 12 cm 50 mm² HP XLPO shielded cable for frequencies between 1.5 Hz and 2.5 MHz in two parallel

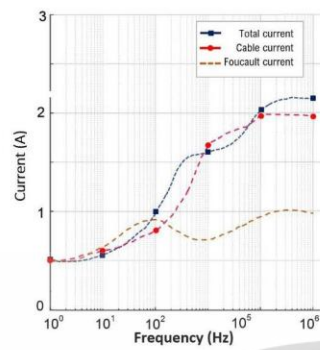


Fig. 19. The induction currents for 0.5 cm 50 mm² HP XLPO shielded cable separation for frequencies between 1.5 Hz and 20 MHz

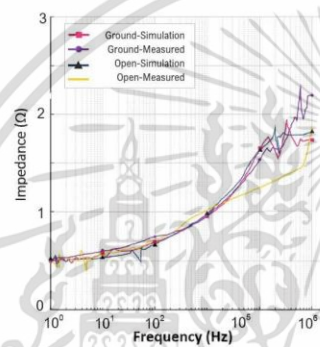


Fig. 20. The impedance simulation and measurement of differential mode for 0.5 cm 50 mm² HP XLPO shielded cable separation.

The shields capacitance of HP XLPO shielded cables is measured by taking the exact same approach. The voltage amplitude separated through the applied voltage V_{out}/V_{in} is shown in Fig. 23. The equivalent measurements for the HP XLPO shielded cables are essay.

For the measurement of the internal conductor to shield, the cable of 2.57meters has been used. For the shield's evaluation, the HP XLPO shielded cable is intersected to make the length of 1.25 m. The instrument used in this measurement is the Vector Network Analyzer Bode 100. The prototype EVs of this research is shown in Fig. 25.

The transfer impedance comparison of 50mm² HP XLPO shielded cable with developed 0.15mm annealed tinned-copper wire braid material and standard shielded cable has been simulated and analyzed, as shown in Fig. 24.

From the perspective of the overall optimization model, the transfer impedance of 50mm² HP XLPO shielded cable with developed 0.15mm annealed tinned-

copper wire braid material HP XLPO shielded cable at high frequencies is significantly lower than the one of other shielded cables.

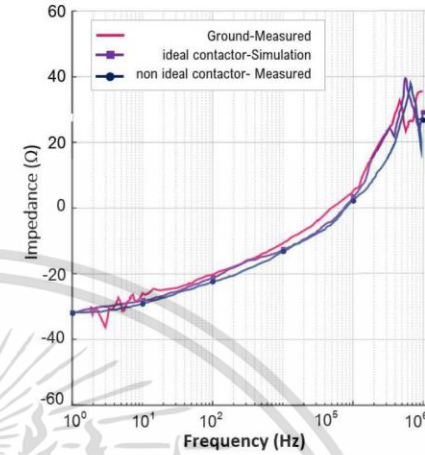


Fig. 21. Simulation and Measurement of Fully-differential mode impedance for the 12 cm 50mm² HP XLPO shielded cable

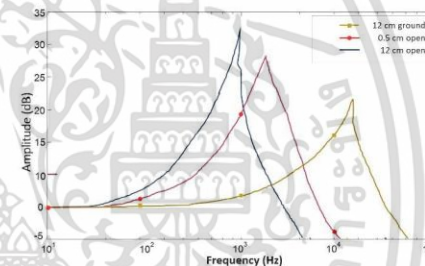


Fig. 22. Resonant frequency measurement for a 50mm² HP XLPO shielded cable

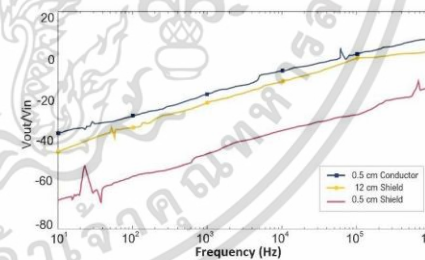


Fig. 23. The applied voltage V_{out}/V_{in} of a 50mm² HP XLPO shielded cable

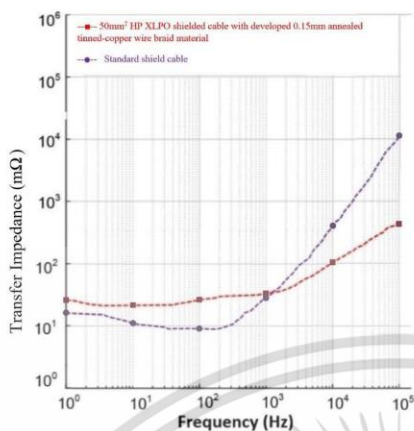


Fig. 24. The transfer impedance comparison of 50 mm² HP XLPO shielded cable with developed 0.15 mm annealed tinned-copper wire braid material and standard shielded cable



Fig. 25. The prototype EVs of this research

VI. Conclusion

This paper proposes the investigation on current ripple and electromagnetic interference in high voltage powertrain systems for electric vehicles by using crosslinked polyolefin insulation shielded cable. In HP operation mode of EVs powertrain systems, EMI is caused by the switching process of the motor drive. The shielding capability of the high-power cables that connects the powertrain devices and high-voltage energy storage systems of the EVs, is directly associated to its EMI. This research proposes three main parts.

The first one investigates the tendency of the SE and current ripple around the developed cable in various frequency ranges in HP operation mode of EVs system.

In the second part, cable models have been provided and analysis has been integrated into an actual EVs powertrain system, based on the predicted shield current demand on separately HP XLPO shielded cables in EVs.

The final part is the additional study that compares and analyzes the transfer impedance of the developed cable in order to determine its shielding capability by compared to standard shielded cable. In doing so, actual HP XLPO shielded cables have been wired up in real EVs to be used in the assessment. As obtained from the test, the ripple noise is realized in the frequency range of 20 Hz to 250 kHz. The simulations and the measurements indicate that shielding with the developed 0.15 mm annealed tinned-copper wire braid material has increased the SE and decreased ripple around the cables in the higher frequency range, if it is suitably connected.

The simulation and measurements, by considering the shield and the changes of inductance, have been compared to real HP XLPO shielded cables wired to the EVs. The result is that the model properly operates in the frequency range of 1.5 Hz to 2.5 MHz. Moreover, various types of HP XLPO shielded cables have been created for the test. According to the error rate in the calculation from the test and simulation of transfer impedance, each frequency band is less than 18.31% and the error ratio of the HP XLPO shielded cable decreases approximately by 10.25% in the frequency point of 20MHz, which is close to the test. Therefore, the modeling optimization is verified. In addition, the engineering application value is approved. It is concluded that at 20MHz and above, the transfer impedance of developed cable (50mm² HP XLPO shielded cable with developed 0.15mm annealed tinned-copper wire braid material HP XLPO shielded cable) decreases between 11.5% to 15.25% and is lower than standard shielded cable, which means that the developed cable has higher level of the SE when compared to standard shielded cable. These results allow realizing better the high-power EVs powertrain system and to design EVs application, which will improve the reliability, safety and more economical energy saving of future EVs. Having cables that are more reliable will not only make EVs safer, but also more energy efficient. As they become cheaper to manufacture and more energy efficient, more people will opt for EVs commercially and within the industrial sector. This could lead away from using fossil fuels to create gas, and with the energy sector already focused on cleaner ways to generate electricity, moving vehicles in that direction is the next logical step.

Acknowledgements

This work is ostensibly supported by Department of Electrical Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMUTL), Thailand. With cooperation of Program of Electronic and Automation System Engineering, Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand. I am gratefully

acknowledging my parents, and advisor for their support. Finally, I would like to especially thank my wife, Mrs. Kamonwan Singhasivanon for all her reasonable and useful suggestion throughout the period of this research.

References

- [1] Elomary, I., Ahmed, A., Lhassane, I., Optimization Design of the BLDC Motor Using Backtracking Search Algorithm, (2021) *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, 16 (2), pp. 167-173. doi: <https://doi.org/10.15866/iree.v16i2.17411>
- [2] Z. Rezvani, J. Jansson, and J. Bodin, Advances in Consumer Electric Vehicle Adoption Research: A Review and Research Agenda, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 34, January 2015, pp. 122-136.
- [3] Esposito, F., Isastia, V., Meo, S., PSO based energy management strategy for pure electric vehicles with dual energy storage systems, (2010) *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, 5 (5), pp. 1862-1871.
- [4] Jirasuwankul, N., Klongboonjit, S., Manop, C., Effects of Demand Fluctuation and Mitigation Strategy in Low Voltage EV Charging Station by Battery Energy Storage System, (2021) *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, 16 (5), pp. 409-417. doi: <https://doi.org/10.15866/iree.v16i5.18865>
- [5] M. Antiwadihis, P. S. Niklaus, D. Bortis, J. W. Kolar, Input/Output EMI Filter Design for Three-Phase Ultra-High Speed Motor Drive GaN Inverter Stage, *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, Vol. 6, No. MARCH 2021.
- [6] H. Chen, T. Wang, S. Ye, T. Zhou, Modeling and Suppression of Electromagnetic Interference Noise on Motor Resolver of Electric Vehicle, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 63, Iss. 3, June 2021.
- [7] S. M. Lukic, J. Cao, R. C. Bansal, F. Rodriguez and A. Emadi, "Energy storage systems for automotive applications", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 55, No. 6, pp. 2258-2267 (2008).
- [8] X. Hu, N., Murgovski, L. M., Johannesson, and B. Egardt: Comparison of three electrochemical energy buffers applied to a hybrid bus powertrain with simultaneous optimal sizing and energy management, *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, Vol. 15, No. 3, pp. 1193-1205 (2014).
- [9] Salama, H., Said, S., Vokony, I., Hartmann, B., Power System Improvement of Different Coordinated Electric Vehicles Integration Approaches with Superconducting Magnetic Energy Storage, (2019) *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, 14 (6), pp. 407-419. doi: <https://doi.org/10.15866/iree.v14i6.17315>
- [10] Y. Zhang, G. Chen, Y. Hu, C. Gong, Y. Wang, Cascaded Multilevel Inverter Based Power and Signal Multiplex Transmission for Electric Vehicles, *Ces Transactions on Electrical Mechanics and Systems*, Vol. 4, No. 2, June 2020.
- [11] J. Qu, Q. Zhang, Y. Wang and S. Cui, Conducted EMI Investigation of a SiC-Based Multiplexing Converter for EV/PHEV, in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 58807-58823, 2021. doi: [10.1109/ACCESS.2021.3072976](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3072976)
- [12] Ikawanty, B., Ashari, M., Suryatomojo, H., Taufik, T., A Novel Multiphase Interleaved DC-DC Boost Converter with Reduced Input Current Ripple for Renewable Energy Application, (2022) *International Journal on Engineering Applications (IREA)*, 10 (1), pp. 77-86. doi: <https://doi.org/10.15866/irea.v10i1.20941>
- [13] S. Bauer, A. Reinbacher-Kostinger, Oskar, Christian, Sensitivity Analysis of the Transfer Impedance of Shielded Cables With Braided Shields Using a Parameterized FEM Model, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 57, No. 6, June, 2021.
- [14] C. Tuerk, D. J. Pommerenke, S. Bauer, Improved Alternative Method for Fast and Simple Transfer Impedance Measurements, *IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications*, Vol. 2, Iss. 4, December, 2020.
- [15] D. Zhang et al., Stability Analysis of the Cable Core of a 10 kA HTS DC Power Cable Used in the Electrolytic Aluminum Industry, in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 25, no. 3, pp. 1-4, June 2015, Art no. 5402304. doi: [10.1109/TASC.2014.2374691](https://doi.org/10.1109/TASC.2014.2374691)
- [16] L. Zhai, G. Hu, M. Lv, T. Zhang, R. Hou, Comparison of Two Design Methods of EMI Filter for High Voltage Power Supply in DC-DC Converter of Electric Vehicle, *IEEE Access*, Vol.8, April 2020.
- [17] O. Gassab, S. Bouguerra, L. Zhou, W.-Y. Yin, Efficient Analytical Model for the Transfer Impedance and Admittance of Noncoaxial/Twinax Braided-Shielded Cables, *IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 62, Iss.6 December 2020
- [18] Bindu, R., Thale, S., Performance Analysis of Power Sharing Control Strategies for Battery/Supercapacitor Hybrid Energy Storage Based Electric Vehicle, (2020) *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, 15 (5), pp. 382-393. doi: <https://doi.org/10.15866/iree.v15i5.18404>
- [19] I. Husain et al., Electric Drive Technology Trends, Challenges, and Opportunities for Future Electric Vehicles, in *Proceedings of the IEEE*, vol. 109, no. 6, pp. 1039-1059, June 2021. doi: [10.1109/JPROC.2020.3046112](https://doi.org/10.1109/JPROC.2020.3046112)
- [20] D. Shin, M. Poncino, E. Macii and N. Chang: A statistical model-based cell-to-cell variability management of Li-ion battery pack, *IEEE Trans. Comput.-Aided Design Integr. Circuits Syst.*, Vol. 34, No. 2, pp. 252-265 (2015).
- [21] J. Shen, and A. Khaligh, A supervisory energy management control strategy in a battery/supercapacitor hybrid energy storage system, *IEEE Trans. Transport. Electric.*, Vol. 1, No. 3, pp. 223-231 (2015).
- [22] X. Chen, J. Wang, A. Griffo and L. Chen, Evaluation of waste heat recovery of electrical powertrain with electro-thermally coupled models for electric vehicle applications, in *Chinese Journal of Electrical Engineering*, vol. 7, no. 3, pp. 88-99, Sept. 2021. doi: [10.23919/CJEE.2021.000028](https://doi.org/10.23919/CJEE.2021.000028)
- [23] J. Singhasivanon and N. Jirasuwankul, An Experimental Study on Dielectric Response of the Crosslinked Polyolefin (XLPO) Insulation of the Unshielded Cable Under Electric Field and Heat Flux, *2021 15th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTT-CON)*, 2021, pp. 332-335. doi: [10.1109/ECTT-CON51831.2021.9454759](https://doi.org/10.1109/ECTT-CON51831.2021.9454759)
- [24] A. Mushaq, S. Frei, K. Siebert and J. Bärenfänger, Analysis of shielding effectiveness of HV cable and connector systems used for electric vehicles, *2013 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2013, pp. 241-246.
- [25] G. Chiqovani, I. Oganezova, G. Gabriadze, M. Kuehn, M. Messer and R. Jobava, Radiation of Low Frequency Magnetic Field from High Voltage Powertrain Systems of Electric Vehicles, *2019 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE*, 2019, pp. 968-971. doi: [10.1109/EMCEurope.2019.8872132](https://doi.org/10.1109/EMCEurope.2019.8872132)
- [26] Eesedi, I., Lengyel, A., Gónczi, D., Bounds for the Thermal Conductance of Body of Rotation, (2020) *International Review on Modelling and Simulations (IREMOS)*, 13 (3), pp. 185-193. doi: <https://doi.org/10.15866/iremos.v13i3.18619>
- [27] X. Jia, C. Hu, B. Dong, F. He, H. Wang and D. Xu, Influence of system layout on CM EMI noise of SiC electric vehicle powertrains, in *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, vol. 6, no. 4, pp. 298-309, Dec. 2021. doi: [10.24295/CPSSPEA.2021.00028](https://doi.org/10.24295/CPSSPEA.2021.00028)
- [28] K.-T. Kim, M. S. Manoharan, M. A. T. Abdelkader, C.-G. Lee, J.-H. Park, A. Ahmed, Skin Effect-Related AC Resistance Study in Macroscopic Scale Carbon Nanotube Yarn Applicable to High-Power Converter, *IEEE Transactions on Nanotechnology*, Vol. 20, June, 2021.
- [29] M. A. Alaql, K. Kopsidas, Modeling Multi-Layer OHL Conductors Undergoing Wind-Induced Motion, *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 104579-104589, June 2020. doi: [10.1109/ACCESS.2020.2999465](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2999465)
- [30] IEC 60092-350:2020, *Electrical installations in ships - Part 350: General construction and test methods of power, control and instrumentation cables for shipboard and offshore applications.*
- [31] IEC 60092-354:2020, *Electrical installations in ships - Part 354: Single- and three-core power cables with extruded solid insulation*

- for rated voltages 6 kV ($U_m = 7.2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV).
- [32] IEC 60502-2:2014, Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ($U_m = 1.2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV) – Part 2: Cables for rated voltages from 6 kV ($U_m = 7.2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV).
- [33] IEC 60228:2004, *Conductors of insulated cables*.
- [34] M. Xu, Y. Wang, X. Li, X. Dong, H. Zhang, H. Zhao, X. Shi, Analysis of the Influence of the Structural Parameters of Aircraft Braided-Shield Cable on Shielding Effectiveness. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 62, iss.4, July 2019.
- [35] A. Emadi, Y. J. Lee, and K. Rajashekar, Power electronics and motor drives in electric, hybrid electric, and plug-in hybrid electric vehicles, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 55, No. 6, pp. 2237–2245 (2008).
- [36] C. H. T. Lee, W. Hua, T. Long, C. Jiang, L. V. Iyer, A Critical Review of Emerging Technologies for Electric and Hybrid Vehicles, *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, Vol. 2, pp. 471–485, Dec 2021. doi: 10.1109/OJVT.2021.3138894
- [37] Murali, N., Mini, V., Ushakumari, S., Modified V-Shaped Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive for Electric Vehicle, (2021) *International Review on Modelling and Simulations (IREMOS)*, 14 (6), pp. 439–450. doi: <https://doi.org/10.15866/iremos.v14i6.20884>.
- [38] P. Xiao, P. A. Du, and B. Zhang, An analytical method for radiated electromagnetic and shielding effectiveness of braided coaxial cable, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 61, no. 1, pp. 1–7, 2018.



Nirudh Jirasuwankul was born in Mukdaharn, Thailand, in 1969. He received the B.E. and M.E. degrees in Electrical Engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Thailand, in 1991 and 1998 respectively. He had professional experiences in a position of electrical engineer of the Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT) in 1991-1993, and also electrical engineer in ABB Services Ltd. (Thailand) in 1994. He received a Ph.D. degree in Energy Technology from The Joint Graduate School of Energy and Environment (JGSEE), King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT), Thailand, in 2008. Since 2009, he has joined the Department of Electrical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, as a Lecturer and is currently an assistant professor. His research interests are in Power and Energy, Energy Efficiency and Power Generation from Renewable Energy Resources.



Kumagone Kiddee was born in Bangkok, Thailand, in 1988. He received the Ph.D. in Electrical Engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Thailand, in 2016. Since 2017, he has been an Associate Professor at Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand. His research interests include Power Electronic, Power inverter and Electric Vehicles.

Authors' information

¹Department of Electrical Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Thailand.

²Program of Electronic and Automation System Engineering, Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand.



Jakawan Singhasivanon was born in Bangkok, Thailand, in 1994. He received the B.E. and M.E. degrees in Electrical Engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Thailand, in 2016 and 2018 respectively. He currently studying Ph.D. in Electrical Engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Thailand. He had professional 4 years' experience in a position of Technical Manager of TriCab (Thailand) Co., LTD. His current research interests include cable's Insulators, cable shielding, Electric Vehicles and Renewable Energy.

The Preliminary Study of Partial Discharge Behavior of Crosslinked Polyolefin (XLPO) Unshielded Cable Insulation Under Temperature Variations

Jakawan Singhasivanon

Department of Electrical Engineering, School of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Thailand

Jakawan_dew@outlook.com

Nirudh Jirasuwankul

Department of Electrical Engineering, School of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Thailand

nirudh.ji@kmitl.ac.th

Abstract— An emerging of new material, XLPO, has now been widely used as power cable insulation and it is necessary and compulsory to perform compliant standard test. According to the IEC 60270, partial discharge (PD) test is the promised and nonintrusive method to determine quality of insulation. In this paper, XLPO insulation of the unshielded cable has been preliminary tested by measuring its PD behavior under different temperature exposure. The experimental results illustrate that occurrence of partial discharge inception voltage (PDIV) forms as parabola with a convex trend under temperature variations. It is also found that XLPO is less susceptible to PDIV when compared to PVC insulation under the same conditions.

Keywords— crosslinked polyolefin, partial discharge inception voltage, renewable energy systems, cable Insulation, partial discharge measurement.

I. INTRODUCTION

Cross-linked Polyolefin called “XLPO” is a form of insulation that is created through both high pressure and heat. The most important attribute of XLPO is that it is halogen-free and is more flexible. The structure of the XLPO molecules and typical cable cross-sections for the XLPO insulated cable is depicted in Figure 1. The importance of a halogen-free XLPO cable is that it will not emit toxic gases when exposed to fire. Nowadays, XLPO insulated cables are widely used for renewable energy and electrical vehicle systems [1]. For renewable energy systems, the XLPO insulated cables are used as links between the main components of such systems, while electrical vehicle systems with XLPO insulated cables are used in electric motorcycles for starting, charging, lighting and panel circuits. Therefore, the reliability, efficiency, lifetime, and safety of such systems are affected greatly by the functionality of these cables.

Most cable failures usually occur due to improper insulation, because they were operated under electrical, thermal, mechanical, and environmental stress [2]. A cable with a high load current is at risk, because it sustains higher temperatures that may eventually lead to catastrophic failure of the whole unit. The effective dielectric parameters used to assess the condition of the insulation of the system are partial discharge inception voltage (PDIV) and partial discharge magnitude (QIEC). These parameters represent the symptoms of insulation

degradation at a weak-spot or high electric field regions in insulation systems in both low-voltage and high-voltage equipment. Generally, the partial discharge occurring at weak-spots within insulation systems can be classified into three types, as depicted in Figure 2, i.e. corona discharge, surface discharge, and internal discharge. The so-called, “conventional PD measurement” is the most popular and effective test circuit for the PD measurement according to IEC 60270 standards [3-6]. Such circuits detect the pulse currents caused by the charge transfer in the defected site, when decoupled from the terminals of the test object. The partial discharge activity taking place at the weak spots on the insulation system is evaluated, i.e., PD on the surface insulation, PD in voids within the insulation bulk, and PD at sharp edges and protrusions on the surface of HV electrodes. The PD quantities involved in interpreting the PD activity, which are PD magnitude (Q_{IEC}), PD inception (PDIV), and PRPD patterns are analyzed to assess the condition of the insulation system.

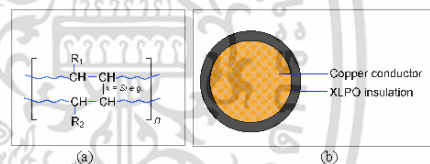


Fig. 1. (a) Cross-linked Polyolefin (XLPO) (b) Typical cable cross-sections for XLPO insulated cable.

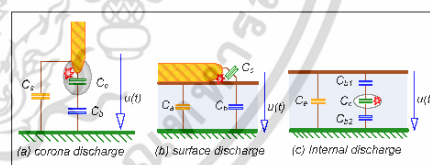


Fig. 2. Simplified equivalent circuit for describing the charge transferred in dielectric owing to partial discharge.

II. EXPERIMENTATION AND DISCUSSION

The purpose of partial discharge measurements for this research is to investigate the magnitude of a charge and a minimum value of applied test voltage that causes the ionization of gas molecules of the surrounding XLPO cable (describing in Figure 2.b above) under the variation of ambient temperature. The dielectric parameters such as PDIV and PD magnitude as a function of temperature were evaluated.

A. Preparation

For the experiment, 0.6/1 kV XLPO unshielded cables of 2.5 mm² cross-section area, with two bending radii were prepared for experiments, i.e., test specimen R1 with a bending radius of 50 mm and test specimen R2 with a bending radius of 5mm. A total of 2 experiments were conducted as described below.

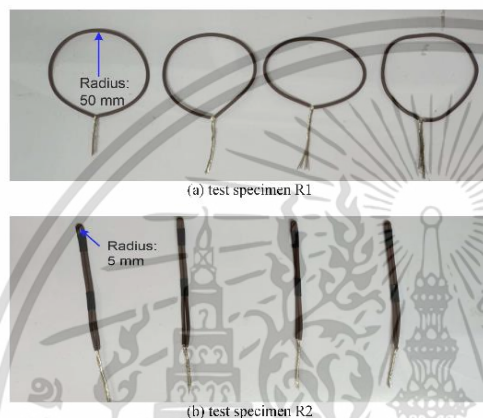


Fig. 3. Preparation of specimens for experiment 1 and 2

Experiment 1

To study the PDIV of unaged XLPO cables, experiment 1 was conducted on two sets of test specimens (R1 and R2) in the laboratory under a specific test condition, i.e., ambient temperature varying from 25°C to 100°C.

Experiment 2

To study the PD magnitude of unaged XLPO cables, experiment 2 was conducted on two sets of test specimens (R1 and R2) in the laboratory under a sustained test voltage and ambient temperature varying from 25°C to 100°C.

B. PD Test Set-up

The PD test circuit diagram and the test apparatus used to investigate the PD behavior of the XLPO cable in experiments 1 – 2 are shown in Fig. 4 and Fig. 5.

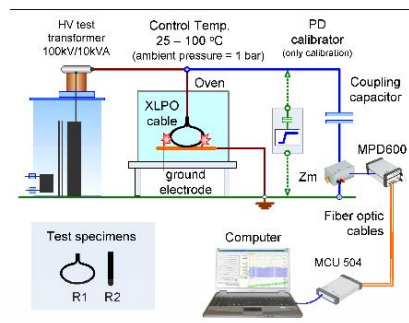


Fig. 4. Test circuit diagram for PD measurement.

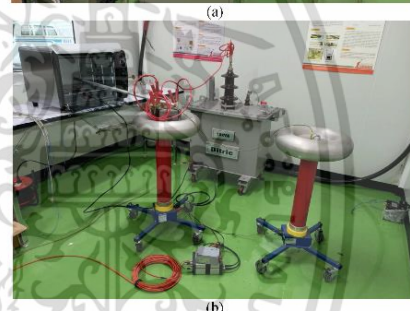


Fig. 5. (a), (b) Test circuit apparatus for PD measurement of XLPO insulated cable.

TABLE I. TEST INSTRUMENT DETAILS

No.	Test Instrument	Parameters
1	HV test transformer	22 kV, 30 kVA
2	Coupling capacitor, Ck	1.0 nF
3	PD calibrator	100 pF (IEC 60270)
4	PD Measuring Instrument	Omicron MPD600
	Center frequency	250 kHz
	Bandwidth	300 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C. Test procedure of PDIV measurement with temperature variation

The measuring circuit was set up according to IEC 60270 standards, measuring frequency ranges between 100 to 400 kHz.

The measuring circuit was calibrated with a known standard charge (apparent charge) via the terminals of the test object and background noise was recorded. Voltage was then applied to the test specimen uniformly and increased the from zero at the rate of 200V/s until PDIV is reached and sustained for 10 s. PDIV value in this experiment is defined at Q_{IEC} of 100 pC and then decreased until the voltage is zero. Carry out 1 PDIV for the preliminary test and 3 PDIV for the experiment with the same specific test temperatures, i.e., 25°C, 50°C, 75°C, 100°C and PDIV and PD amplitude as a function of test voltage (U_t) and time (t).

D. Test procedure of PD magnitude measurement with temperature variation

Calibrate the measuring circuit the same as the PDIV measurement. Then, apply voltage to the test specimen uniformly and increase the voltage from zero at the rate of 200V/s, until 120 percent of PDIV and sustain the test voltage. Next, increase the temperature in the oven from 25°C to 100°C and then decrease the temperature to 25°C. After that, repeat the test again.

III. TEST RESULTS

A. Results of PDIV measurement with temperature variation

Figure 6 shows an example of PDIV measurement results determining the PDIV of a XLPO cable. Table II and Figure 7 report the results of case studies performed to investigate the temperature dependence of PDIV for 0.6/1kV XLPO cable.

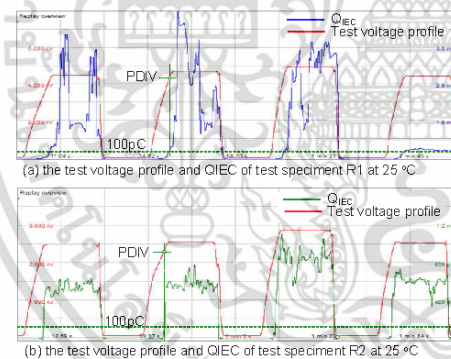


Fig. 6. An example of PDIV measurement results

TABLE II PDIV RESULTS OF TEST SPECIMENS

No.	Temp. [°C]	Partial discharge inception voltage results (kV)					
		Prelim_PDIV	PDIV1	PDIV2	PDIV3		
Test specimen R1	1	25	4.1	3.9	3.9	3.9	
		50	1.7	1.8	2.1	1.8	
		75	2.5	2.5	2.7	1.8	
	2	100	2.5	2.1	2.1	2.4	
		25	2.5	2.6	2.5	2.4	
		50	1.3	1.3	1.3	1.2	
	3	75	2.1	1.9	1.9	1.8	
		100	1.9	1.4	1.1	1.6	
		25	2.5	2.3	2.3	2.4	
	Test specimen R2	1	30	2.8	2.2	2.1	2.3
			75	2.4	2.3	2.7	2.5
			100	2.5	2.5	2.7	2.5
2		25	2.3	2.1	2.1	2	
		50	1.1	1.1	1.1	1.1	
		75	1.1	0.97	1.1	1.1	
3		100	1.1	0.3	1	1	
		25	2.4	2.5	2.4	2.5	
		50	2	2	2.3	2.3	
3		75	3.2	2	2.8	3.2	
		100	3.5	2.9	2.9	3.3	
		25	2.3	2.4	2.3	2.3	
	50	1.9	1.9	2	2		
	75	2.6	2.7	2.6	2.7		
	100	2.7	2.8	2.8	2.7		

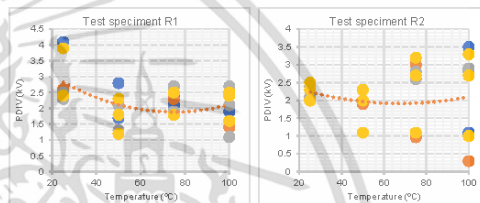


Fig. 7. Plot of PDIV for the specimen R1 and R2 under temperature variation

B. Results of PD magnitude measurement with temperature variation

Figures 8 and 9 illustrate the results of the PD magnitude measurements and phase-resolved partial discharge (PRPD) pattern with temperature variations with sustained test voltages for the 0.6/1kV XLPO cable under specific test conditions.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

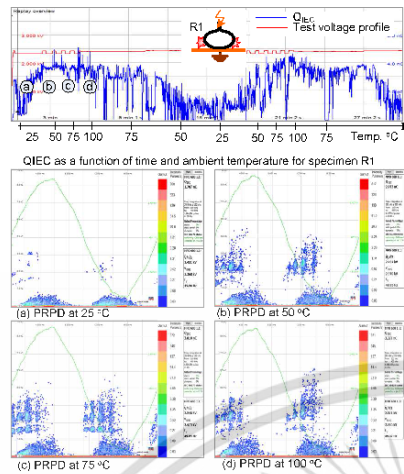


Fig. 8. The results of QIEC and PRPD patterns at different temperatures for test specimen R1

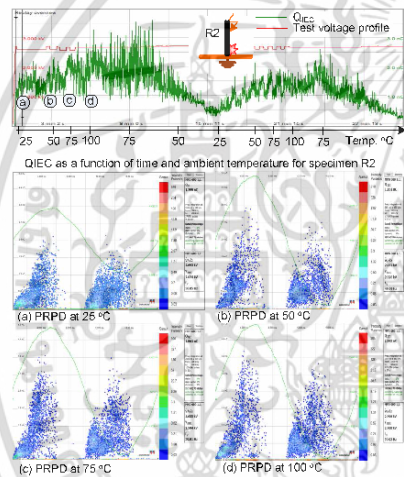


Fig. 9 The results of QIEC and PRPD patterns at different temperatures for test specimen R2

IV. CONCLUSION

The experiment results found that the PDIV behavior of the XLPO insulation at ambient temperatures is similar to a parabola shape with a concave upward trend. PD magnitude is dependent on the ambient temperature. However, it can be concluded that the repetition rate of test specimen R1 and R2 under various temperatures of 25 °C, 50 °C, 75 °C, 100 °C were the same. The occurring of PRPD patterns tend to increase with a lower bending radius and higher temperatures. The PD magnitude waveforms of R1 is shorter than R2 while increasing the applied voltage. It is also found that XLPO is less susceptible to PDIV when compared to PVC insulation under the same conditions [7]. Therefore, this research will be continually developed.

ACKNOWLEDGMENT

The authors wish to acknowledge Mr. Phethai Nimsanong that provided valuable tips about PD measurement techniques, and Mr. Sakda Maneerot from High-Voltage Laboratory Dielectric Serve Lab Co., Ltd. for supporting the PD measuring system.

REFERENCES

- [1] Ramy S. A. Afia, Ehtasham Mustafa, and Zoltán Ádám Tamus, "Thermal Aging of Photovoltaic Cables Based Cross-Linked Polyolefin (XLPO) Insulation," *Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 598, pp. 253–259, Springer Nature Switzerland AG 2020.
- [2] S. Klienhom, N. Boonsaner, P. Nimsanong, P. Chanchaensook, A. Kunakom, and N. Pattanadech, "Dielectric Response Analysis for Cable Joint Problems in Medium Voltage Underground Cable System," *Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 599, pp. 1056–1063, Springer Nature Switzerland AG 2020.
- [3] IEC 60270: High-voltage test techniques – Partial discharge measurements, third edition (2000)
- [4] IEC 60270:2000/AMD1:2015 Amendment 1 - High-voltage test techniques - Partial discharge measurements
- [5] Andreas Kuchler, *High Voltage Engineering: Fundamentals – Technology – Applications*, Springer Berlin Heidelberg, 2017, Chapter 6.
- [6] E. Kuffel, W.S. Zaengl, and J. Kuffel, *High Voltage Engineering: Fundamentals*, Butterworth-Heinemann, Second edition 2000, Chapter 7.
- [7] Richard Cselko, Istvan Kiss, "Estimation of the Partial Discharge Inception Voltage of Low Voltage Cables", 2019 Electrical Insulation Conference (EIC), Calgary, Alberta, Canada, 16-19 June 2019.

An Experimental Study on Dielectric Response of the Crosslinked Polyolefin (XLPO) Insulation of the Unshielded Cable Under Electric Field and Heat Flux

Jakawan Singhasivanon
 Department of Electrical Engineering,
 School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology
 Ladkrabang
 Thailand
 Jakawan_dew@outlook.com

Nirudh Jirasuwankul
 Department of Electrical Engineering,
 School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology
 Ladkrabang
 Thailand
 nirudh.ji@kmitl.ac.th

Abstract— Nowadays, crosslinked polyolefin cables (XLPO cables) are more popular and more famous for electrical insulation. In order to study and analyze the characteristics of insulation. The polarization and depolarization of current measurements (PDC measurement) is one of the advance methods that can compute and provide dielectric reaction parameters. In this paper, aim to study dielectric response of the XLPO insulation of unshielded cables under electric fields and heat fluctuations by measuring permittivity (ϵ'), conductivity (σ) and dissipation factors ($\tan \delta$). The experimental results indicate permittivity is rather constant at different field strengths and temperatures and are similarly to XLPE insulation. It is also found that the activation energy of XLPO insulation is 0.77 eV. Future more, action energy in this research can excite electrons or ions in valent band within insulations to change the state from non-conductivity to conductivity.

Keywords— crosslinked polyolefin, conductivity, permittivity, dissipation factor, activation energy.

I. INTRODUCTION

Recently, XLPO insulated cables have been widely used for renewable energy- and vehicle electrical systems [1]. A major advantage of this type of cable is that it is halogen-free (non-toxic) and has good flexible properties. The structure of the XLPO molecule and typical cable cross-sections for the XLPO insulated cable is depicted in Figure 1. Owing to a lack of technical knowledge about the dielectric properties of XLPO cables, this paper aims to study the characteristics of XLPO insulation, especially under electric fields and heat fluctuations. The most important parameter to be considered here is the conductivity, permittivity, $\tan \delta$ and activation energy. These parameters represent the intrinsic properties of the insulation condition. The conductivity represents electrons or ions that migrate across the insulation bulk, between the copper and the ground. The permittivity illustrates the ability of accumulated electric charges in a dielectric material and the $\tan \delta$ represents the dielectric loss that is the ratio between the real and imaginary parts of the permittivity [2], [3].

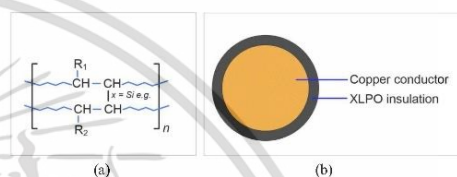


Fig. 1. (a) Cross-linked Polyolefin (XLPO) (b) Typical cable cross-sections for XLPO insulated cable.

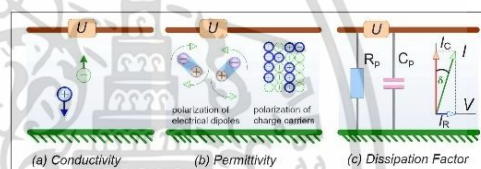


Fig. 2. Dielectric parameters describing insulation properties.

II. EXPERIMENTATION

A. Preparation

For the experiment, 0.6/1 kV XLPO unshielded cables with a 25 mm² cross-section area and length of 2 meters were prepared for the experiments. The aluminum foil tape was utilized as an artificial ground for the XLPO cable by insulating it and guard ring electrodes were attached, to measure the dielectric response under the electric field and heat flux as shown in Figure 3.

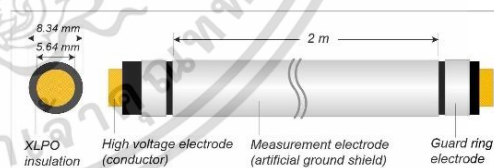


Fig. 3. Schematic representation of specimens for experiment



Fig. 4. Preparation of specimens for experiment

To study the dielectric response of unaged XLPO cables, the specimen was placed in a controlled-temperature oven to simulate heat flux. The temperature of the oven was set to 25°C, 50°C, and 70°C whilst applying the electric field.

B. Dielectric Response (PDC) Test Set-up

The PDC test circuit diagram and the test apparatus used to investigate the dielectric behavior of the XLPO cable in experiments are shown in Fig. 5 and Fig. 6 [2], [4].

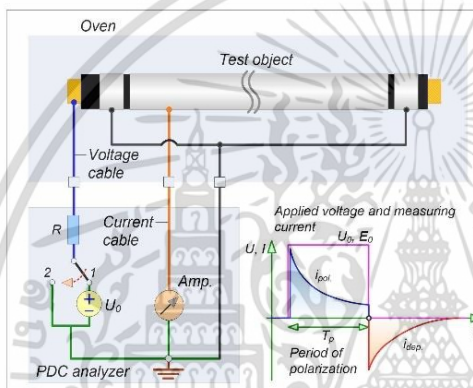


Fig. 5. Test circuit diagram for dielectric response (PDC) measurement.



Fig. 6. Test circuit arrangement for dielectric response (PDC) measurement.

TABLE I. TEST INSTRUMENT DETAILS FOR EXPERIMENT

Test Instrument	Parameters
PDC-ANALYSER-1MOD	Current measurement range: ± 1 mA
	Resolution (current display when measuring): 1 pA
	Resolution (recorded data): 0.1 pA
	Accuracy: 0.5 % of the measured value ± 1 pA after 1 hour warming up
	Voltage source: +30 ... +2000 V

C. Test procedure of PDC measurement under electric and thermal fields

The measuring circuit was set to be the same as depicted in Figures 5 and 6. Then step voltage was applied to the test specimen with an electric field strength of 0.25kV/mm under thermal flux in the oven with three steps, i.e., 25°C, 50°C, and 70°C. At the same time, the polarization and depolarization currents were recorded. Next, step two was repeated before applying the electric field strength of 0.5, and 1.0 kV/mm

III. TEST RESULTS

A. Results of PDC measurements

Figures 7 to 9 show the PDC measurement results of XLPO cables under electric fields and heat fluctuations. The figures below show the polarization current or charging current (solid line) and the depolarization current or discharging current (dot line) of the XLPO insulation. The scale in X-axis is Time (seconds), the scale in Y-axis is current (A). Table II reports the capacitance at 50 Hz of XLPO cable under electric field and heat flux.

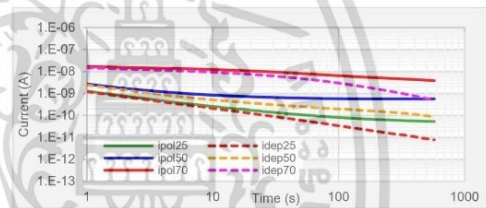


Fig. 7. Polarization and depolarization currents at $E_0 = 0.25$ kV/mm and different temperatures.

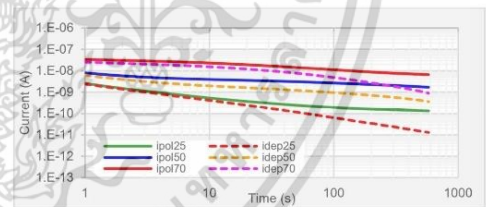


Fig. 8. Polarization and depolarization currents at $E_0 = 0.5$ kV/mm and different temperatures.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

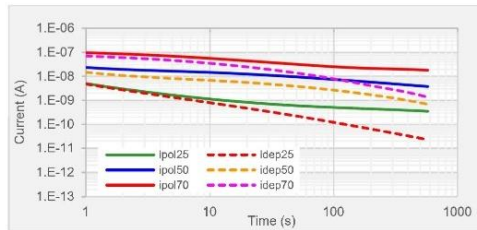


Fig. 9. Polarization and depolarization currents at $E_0 = 1.0$ kV/mm and different temperatures.

TABLE II. C50HZ AT DIFFERENT FIELD STRENGTHS AND TEMPERATURES

E_0 [kV/mm]	Capacitance at 50Hz (pF)		
	25 °C	50 °C	70 °C
0.25	662	671	670
0.5	661	658	668
1.0	654	672	663

IV. DISCUSSION

A. Calculation of Dielectric Parameters

From the PDC test results, the dielectric parameters of XLPO insulation such as the DC conductivity, permittivity, $\tan \delta$, and activation energy can be calculated as the equations below.

D.C. conductivity:

$$\sigma(t) \approx \frac{\epsilon_0}{C_0 U_0} \cdot [ipol + idep] \quad (1)$$

where: ϵ_0 is permittivity of free space, C_0 is the vacuum capacitance, U_0 is step voltage, $ipol(t)$ is polarization current, $idep(t)$ is depolarization current

Permittivity:

$$\epsilon'_r = C_{50Hz} / C_0 \quad (2)$$

where: C_{50Hz} is the geometrical capacitance, C_0 is the vacuum capacitance

Dissipation Factor $\tan \delta$:

$$\tan \delta_c = \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0 \epsilon'_r} \quad (3)$$

where: ω is the angular frequency of test voltage, ϵ_0 and ϵ'_r is the relative permittivity of vacuum and the relative permittivity of the XLPO insulation

Arrhenius' exponential law:

$$\sigma(T) = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (4)$$

where: σ_0 is a pre-exponential factor, E_a is the activation energy for conduction, R is the Boltmann's constant, T is the absolute temperature.

B. Apparent d.c. conductivity of XLPO insulation as a function of field strengths and temperatures

In this section, equation (1) was applied to investigate the electrons or ions that migrate across the XLPO insulation under different field strengths and temperatures. The results of the DC conductivity calculations are shown in Figures 10 and 12.

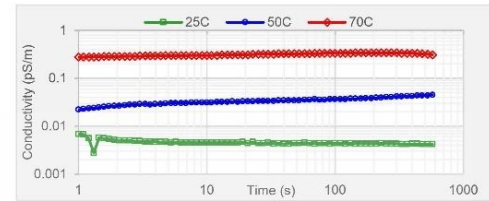


Fig. 10. d.c. conductivity at $E_0 = 0.25$ kV/mm and different temperatures.

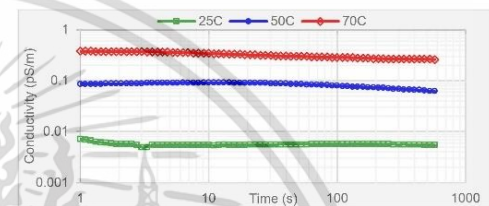


Fig. 11. d.c. conductivity at $E_0 = 0.5$ kV/mm and different temperatures.

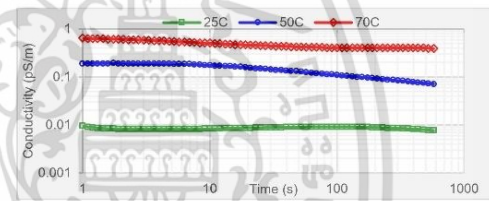


Fig. 12. d.c. conductivity at $E_0 = 1.0$ kV/mm and different temperatures.

C. Permittivity of XLPO insulation at different strengths and temperatures

In this section, equation (2) was applied to investigate the orientation of polar molecule groups of XLPO insulation under different field strengths and temperatures. The results of permittivity calculations are shown in Figures 13.



Fig. 13. Permittivity of XLPO insulation at different strengths and temperatures

D. $Tan \delta$ of XLPO insulation at different strengths and temperatures

In this section, equation (3) was applied to investigate the dielectric loss, due to electrons or ions that migrate across the XLPO insulation under different field strengths and temperatures. The results of $Tan \delta$ calculations are shown in Figures 14.

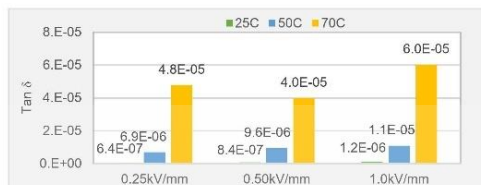


Fig. 14. $Tan \delta$ of XLPO insulation at different field strengths and temperatures.

E. Arrhenius plot of conductivity of XLPO insulation

To investigate the chemical reaction of XLPO insulation, equation (4) was applied to estimate the activation energy under different field strengths and temperatures. The results of the DC conductivity calculations are shown in Figures 10 to 12. The Arrhenius plot of conductivity of XLPO insulation and activation energy of XLPO insulation are shown in Figure 15 and Table III respectively.

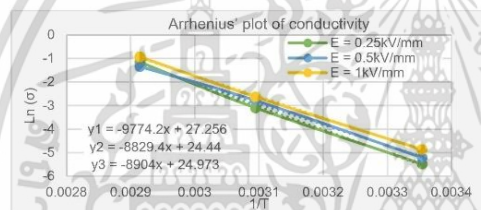


Fig. 15. Arrhenius plot of conductivity of XLPO insulation with different field strengths.

TABLE III. ACTIVATION ENERGY OF XLPO INSULATION WITH DIFFERENT FIELD STRENGTHS

E_0 [kV/mm]	Activation Energy	
	E_a [kJ/mol]	E_a [eV]
0.25	81.271	0.843
0.50	73.413	0.762
1.00	74.037	0.768

In the research, as the results show in the previous sections, increasing the temperature causes an increase in conductivity and dielectric loss for all experiments, while the permittivity is quite constant at different field strengths and temperatures. According to Arrhenius' exponential equation, it was found that the activation energy of XLPO insulation is about 0.77 eV. Conductivity at 25°C, 50°C and 70°C are used to calculate room temperature (RT) values (empty symbols) by Arrhenius' law with proposed activation energy as shown in Figures 16 and 17. A very good agreement with directly measured values

(filled symbols) is achieved in the whole range of DC conductivity and $Tan \delta$.

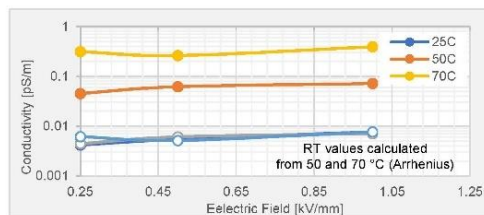


Fig. 16. d.c. conductivity of XLPO as function of field strengths and temperatures, RT values (25°C) are additionally calculated from 50 and 70 °C (Arrhenius) for verification of Arrhenius' law (empty symbols).

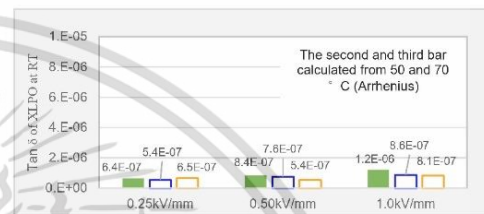


Fig. 17. Original $Tan \delta$ at 25°C of XLPO and additionally calculated from 50°C and 70°C for verification of Arrhenius' law (empty bars).

V. CONCLUSION

The experiment results shown conductivity and dielectric loss are all increased while temperatures increase. The permittivity is constant at different field strengths and temperatures, which is similarly crosslinked to polyethylene (XLPE) insulation. The research also found the activation energy of XLPO insulation is 0.77 eV according to Arrhenius' exponential equation. Thus, it can be concluded that permittivity of XLPO and XLPE are relatively the same. Moreover, 0.77 eV of action energy can excite electrons or ions in valent band within both insulations to change the state from non-conductivity to conductivity.

ACKNOWLEDGMENT

The authors wish to acknowledge Mr. Phethai Nimsanong that provides valuable tips about PDC measurement techniques.

REFERENCES

- [1] Condition Assessment of XLPO Insulated Photovoltaic Cables Based on Polarisation/Depolarisation Current 2020 International Conference on Diagnostics in Electrical Engineering (Diagnostika) 1- 4 Sep 2020.
- [2] J. Singhasivanon, N. Pattanadech and N. Jirasuwankul, "Comparative Testing of Breakdown Voltage Versus Polarization Current of 0.6/1kV XLPE Cables with Different Defects" 6th International Electrical Engineering Congress, Krabi, Thailand, 7-9 March 2018.
- [3] IEC 60092-360:2021 Electrical installations in ships - Part 360: Insulating and sheathing materials for shipboard and offshore units, power, control, instrumentation and telecommunication cable



ภาคผนวก ข
PDC Specifications

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Insulation Analysis and Diagnosis

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

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

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

Current measurement	
range	±1 mA
resolution (current display when measuring)	1 pA
resolution (recorded data)	0.1 pA
accuracy	0.5 % of the measured value ±1 pA after 1 hour warming up
impedance	10 kΩ
protection	up to 100 mA respectively 1 kV for 50 ms
noise suppression	up to 10 µA eff at 50 / 60 Hz mains frequency
filtering (current display when measuring)	mean value in 1 s intervals
filtering (recorded data)	mean value in intervals increasing proportionally with the time from the voltage source switching moment
Voltage source	
voltage range when switched on	+30 ... +2000 V
maximum current sourcing when switched on	<4.5 mA
impedance when switched on	< 20 kΩ
impedance when switched to zero	< 0.2 Ω
current limiting when switching cap. loads	< ±100 mA for 20 ms
Capacitance measurement	
the load capacitance is indirectly measured by computing the ratio charge to voltage when the voltage source is switched off for measuring of the depolarisation current. However, the current measurement is not impaired by a load capacitance surpassing the range listed below.	
load capacitance measuring range at 2 kV source voltage	25 nF
accuracy at 2 kV source voltage	±2 % ±5 pF
load capacitance measuring range at 1 kV source voltage	50 nF
accuracy at 1 kV source voltage	±2 % ±10 pF
load capacitance measuring range at 500 V source voltage	100 nF
accuracy at 500 V source voltage	±2 % ±20 pF
load capacitance measuring range at 100 V source voltage	500 nF
accuracy at 100 V source voltage	±2 % ±100 pF
Computer	
display	15" TFT, resolution 1024 x 786 pixels
processor	Embedded Intel® Atom™ processor, dual-core D525 1.8G
memory	1GB 800MHz DDR3 RAM
drives	120 GB harddisk, DVD +/-RW
standard interfaces	4x USB 2.0, 1x Ethernet
extras	changeover contact synchronised to high-voltage output
Software	
operating system	Windows XP SP3
measuring and control program	installed ready to use, outputs for each measurement one file with polarisation data, one file with depolarisation data and one file with general measurement descriptions
standard evaluation software	installed ready to use, easy to use, extensive possibilities to postprocess, display, print and export the measured data, computation of the complex capacitance in function of frequency, computation of a lumped equivalent circuit of the measured insulation, computation of recovery voltages and the derived "polarisation spectrum", computation of polarisation indexes and of insulation resistances according to all known standards and definitions
advanced evaluation software	quality assessment of oil-paper insulation systems, quantitative determination of moisture content in pressboard and of oil conductivity for power transformers
Miscellaneous	
weight	14.3 kg, in rugged waterproof carrying case
power supply	90 ... 260 V, 47 ... 63 Hz, <160 VA
size	520 x 230 x 435 (width x depth x height in mm)
temperature (use)	0 ... 35 °C
temperature (stock)	-10 ... 50 °C
pressure	70 ... 106 kPa
humidity	5 ... 80 % non condensing
acceleration	< 2 g
length of standard measurement cables	15 m

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

specifications subject to change without notice

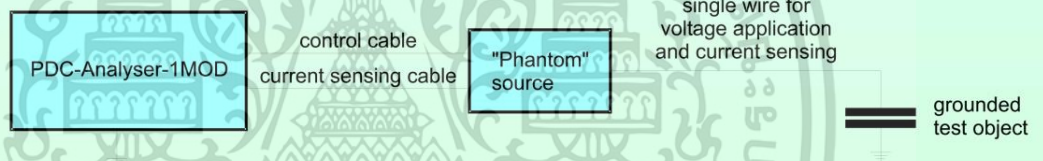
ALFF ENGINEERING
 Gomweg 7 8915 Hausen am Albis Switzerland

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Accessory Device Making Possible The Measurement Of
Polarisation and Depolarisation Current On Grounded Objects
Voltage Source PDC-Phantom-1000XE



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



Specifications PDC-Phantom-1000XE

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

specifications subject to change without notice

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

ALFF ENGINEERING
Gomweg 7 8915 Hausen am Albis Switzerland

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

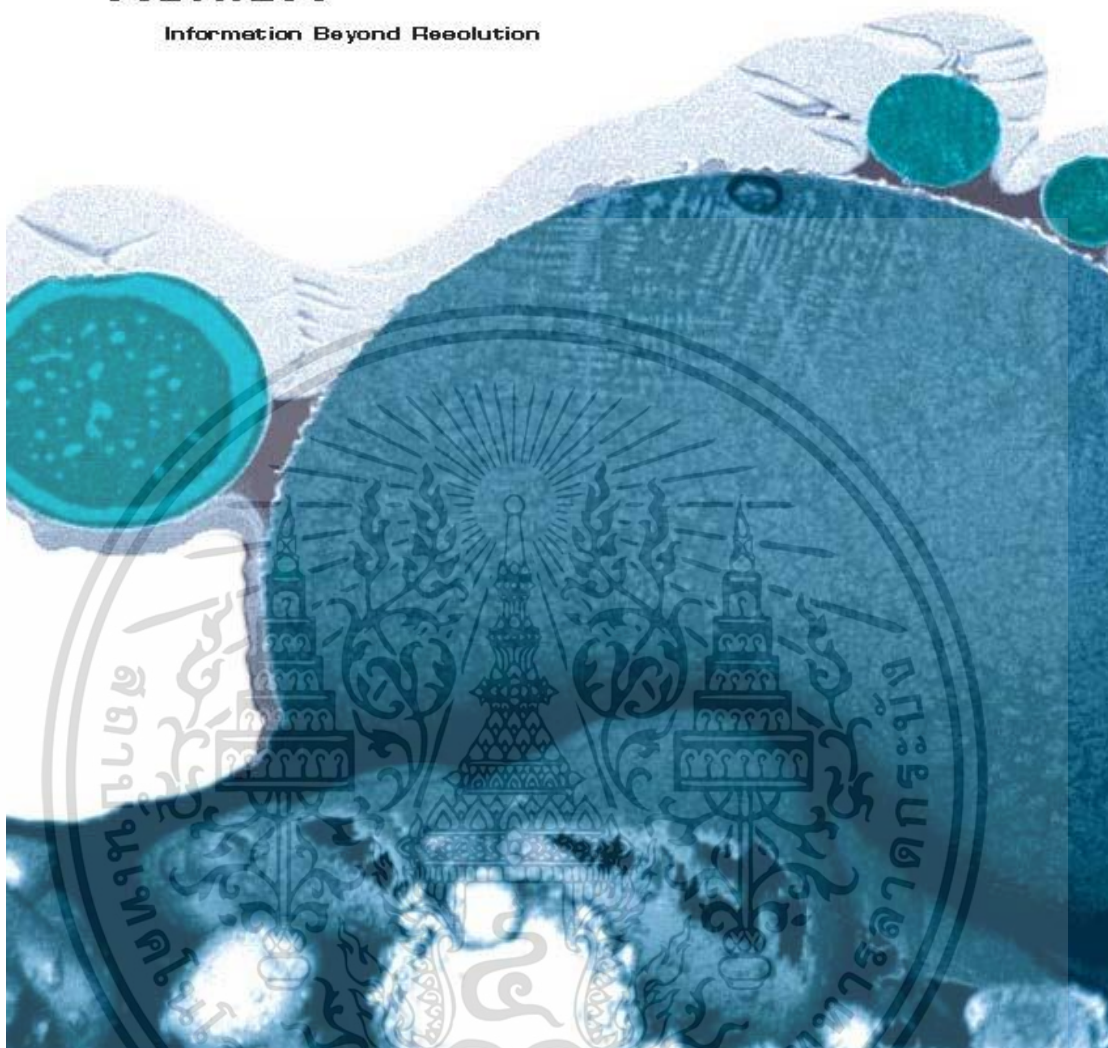


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CrossBeam® Workstations from Carl Zeiss

AURIGA®

Information Beyond Resolution

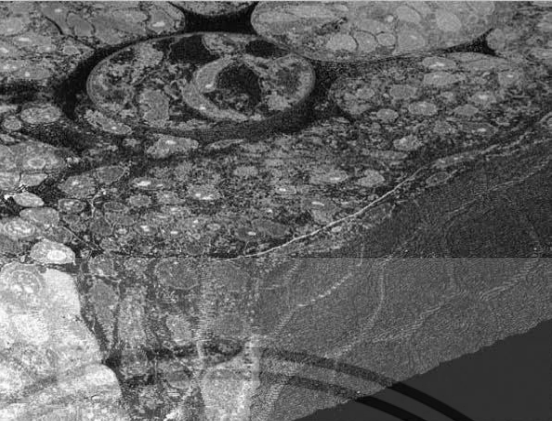


We make it visible.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Information Beyond Resolution in Life Science

- Full sample information with large area / large volume milling and high resolution imaging
- Used high depth of focus imaging of biological samples with no additional preparation using the local charge compensation method
- Ultra-thinned depth resolution in tomography applications with highly sophisticated milling control
- Access to accurate structural information with 3D reconstruction



Large volume 3D reconstruction (130 x 130 x 500 nm) of a carbonized part of a carbonized carbon. The image is a 3D reconstruction of a carbonized plant stem, showing internal cellular structures. The image is a 3D reconstruction of a carbonized plant stem, showing internal cellular structures. The image is a 3D reconstruction of a carbonized plant stem, showing internal cellular structures.

3D mapping of porous fresh high conductivity by cryo-ET/EDS and 3D imaging. The conductivity was shown in blue. A large image size with 300 nm slice thickness and a pixel size of 5 nm. The image was taken at 20 kV. Courtesy of Prof. Dr. Ralf G. Krupp, Institute of Physics, University of Würzburg, Germany.


3D reconstruction of a porous structure based on cryo-ET/EDS. The conductivity was shown in blue. A large image size with 300 nm slice thickness and a pixel size of 5 nm. The image was taken at 20 kV. Courtesy of Prof. Dr. Ralf G. Krupp, Institute of Physics, University of Würzburg, Germany.

3D reconstruction of a porous structure based on cryo-ET/EDS. The conductivity was shown in blue. A large image size with 300 nm slice thickness and a pixel size of 5 nm. The image was taken at 20 kV. Courtesy of Prof. Dr. Ralf G. Krupp, Institute of Physics, University of Würzburg, Germany.

3D reconstruction of a porous structure based on cryo-ET/EDS. The conductivity was shown in blue. A large image size with 300 nm slice thickness and a pixel size of 5 nm. The image was taken at 20 kV. Courtesy of Prof. Dr. Ralf G. Krupp, Institute of Physics, University of Würzburg, Germany.

Information Beyond Resolution in Semiconductor Technology

- 3D surface sensitive imaging with fast FIB cross-section milling and low voltage high resolution optics design
- Perfect sample characterization using integrated and optional analysis technology such as STEM or EDS
- Creation of complex nanoparticles with advanced focused ion beam and post processing instrumentation
- Full workflow control and throughput assessment in TEM sample preparation by high resolution live imaging and software based process automation



3D reconstruction of a porous structure based on cryo-ET/EDS. The conductivity was shown in blue. A large image size with 300 nm slice thickness and a pixel size of 5 nm. The image was taken at 20 kV. Courtesy of Prof. Dr. Ralf G. Krupp, Institute of Physics, University of Würzburg, Germany.

3D reconstruction of a porous structure based on cryo-ET/EDS. The conductivity was shown in blue. A large image size with 300 nm slice thickness and a pixel size of 5 nm. The image was taken at 20 kV. Courtesy of Prof. Dr. Ralf G. Krupp, Institute of Physics, University of Würzburg, Germany.

3D reconstruction of a porous structure based on cryo-ET/EDS. The conductivity was shown in blue. A large image size with 300 nm slice thickness and a pixel size of 5 nm. The image was taken at 20 kV. Courtesy of Prof. Dr. Ralf G. Krupp, Institute of Physics, University of Würzburg, Germany.

3D reconstruction of a porous structure based on cryo-ET/EDS. The conductivity was shown in blue. A large image size with 300 nm slice thickness and a pixel size of 5 nm. The image was taken at 20 kV. Courtesy of Prof. Dr. Ralf G. Krupp, Institute of Physics, University of Würzburg, Germany.

3D reconstruction of a porous structure based on cryo-ET/EDS. The conductivity was shown in blue. A large image size with 300 nm slice thickness and a pixel size of 5 nm. The image was taken at 20 kV. Courtesy of Prof. Dr. Ralf G. Krupp, Institute of Physics, University of Würzburg, Germany.

3D reconstruction of a porous structure based on cryo-ET/EDS. The conductivity was shown in blue. A large image size with 300 nm slice thickness and a pixel size of 5 nm. The image was taken at 20 kV. Courtesy of Prof. Dr. Ralf G. Krupp, Institute of Physics, University of Würzburg, Germany.

3D reconstruction of a porous structure based on cryo-ET/EDS. The conductivity was shown in blue. A large image size with 300 nm slice thickness and a pixel size of 5 nm. The image was taken at 20 kV. Courtesy of Prof. Dr. Ralf G. Krupp, Institute of Physics, University of Würzburg, Germany.

3D reconstruction of a porous structure based on cryo-ET/EDS. The conductivity was shown in blue. A large image size with 300 nm slice thickness and a pixel size of 5 nm. The image was taken at 20 kV. Courtesy of Prof. Dr. Ralf G. Krupp, Institute of Physics, University of Würzburg, Germany.

3D reconstruction of a porous structure based on cryo-ET/EDS. The conductivity was shown in blue. A large image size with 300 nm slice thickness and a pixel size of 5 nm. The image was taken at 20 kV. Courtesy of Prof. Dr. Ralf G. Krupp, Institute of Physics, University of Würzburg, Germany.

3D reconstruction of a porous structure based on cryo-ET/EDS. The conductivity was shown in blue. A large image size with 300 nm slice thickness and a pixel size of 5 nm. The image was taken at 20 kV. Courtesy of Prof. Dr. Ralf G. Krupp, Institute of Physics, University of Würzburg, Germany.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



AURIGA®

Custom-Tailored and Future Assured

FE-SEM Platform

1 GEMINI® (E)SEM column
with in-lens SE collector for high resolution and contrast imaging



2 AURIGA® vacuum chamber
with 15 Fee accessory ports

CrossBeam® Components

3 FB column
for fast and precise sample modification
- Canon column for all purpose applications
- Cobra column with best-in-class FB resolution



4 Gas injection system
for a wide range of volatile gas processes
- Single GDS
- Multi GDS with auto-processor transitions



Options

5 Local charge compensation and in-situ sample cleaning
- Multi GDS integrated or
- Charge compensation



6 In-lens EBP® detector
for 3x-high signal contrast

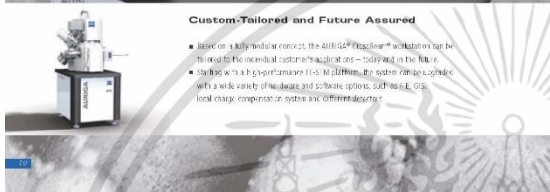


7 Airlock
for fast and convenient sample handling
- 80 mm or
- 100mm maximum specimen size

Further Options
Ion Beam: STEM, ADF-ED, HR-ED, HR-EDS, WDS, SIMS etc.

Custom-Tailored and Future Assured

- Based on a fully modular concept, the AURIGA® CrossBeam® workstation can be tailored to the individual customer's needs (e.g. – 200kV, 300kV, or 500kV).
- Available with a choice of various options (e.g. 200kV, EDS, GDS, local charge compensation system and EBP detector).



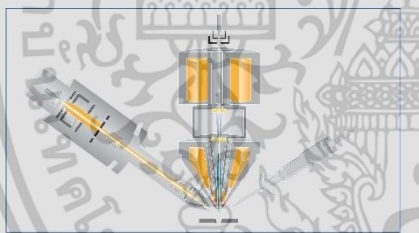
FE-SEM Platform

CrossBeam® Components

Options

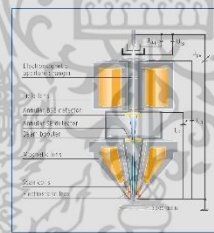


CrossBeam® Concept

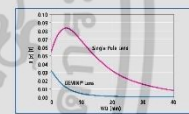


Scalability of the CrossBeam® concept: The AURIGA® workstation concept, designed for beam sizes and gas injection systems up to 500kV.

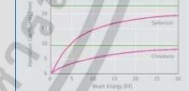
GEMINI® Electron Optics



Scalability of the GEMINI® electron optics: The GEMINI® electron optics, designed for beam sizes up to 500kV.



High resolution resolution of the GEMINI® electron optics: The resolution of the GEMINI® electron optics is independent of the magnification, allowing investigation of complex materials and individual fine structure.



The high resolution resolution of the GEMINI® electron optics: The resolution of the GEMINI® electron optics is independent of the magnification, allowing investigation of complex materials and individual fine structure.

Fast and precise sample modification

When working with beam sizes up to 500kV, the precision of the electron beam is essential for the most precise local sample modification. High brightness (small spot size) and high resolution (small spot size) are essential for the most precise sample modification. The high resolution (small spot size) and high brightness (small spot size) are essential for the most precise sample modification. The high resolution (small spot size) and high brightness (small spot size) are essential for the most precise sample modification.

High resolution processing

High resolution processing is essential for the most precise sample modification. The high resolution (small spot size) and high brightness (small spot size) are essential for the most precise sample modification. The high resolution (small spot size) and high brightness (small spot size) are essential for the most precise sample modification.

Super-resolution imaging

Super-resolution imaging is essential for the most precise sample modification. The high resolution (small spot size) and high brightness (small spot size) are essential for the most precise sample modification. The high resolution (small spot size) and high brightness (small spot size) are essential for the most precise sample modification.

Easy to use by design

Easy to use by design is essential for the most precise sample modification. The high resolution (small spot size) and high brightness (small spot size) are essential for the most precise sample modification. The high resolution (small spot size) and high brightness (small spot size) are essential for the most precise sample modification.

Instant topography and composition

Instant topography and composition is essential for the most precise sample modification. The high resolution (small spot size) and high brightness (small spot size) are essential for the most precise sample modification. The high resolution (small spot size) and high brightness (small spot size) are essential for the most precise sample modification.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



FT-IR Specifications :

Spectral Range 7,500 to 370 cm^{-1} , with standard KBr beamsplitter
 10,000 to 400 cm^{-1} , optional, with broadband KBr beamsplitter
 5,000 to 200 cm^{-1} , optional with CsI optics
 6,000 to 500 cm^{-1} , optional with “High Humidity” ZnSe optics

Resolution Better than 1 cm^{-1} (apodized), optional better than 0.5 cm^{-1} (apodized)

Wavenumber Accuracy Better than 0.01 cm^{-1} @ 2,000 cm^{-1}

Photometric Accuracy Better than 0.1% T

Signal-to-Noise (Minimum) 5 Sec: >6,000:1 (= <7.2*10⁻⁵AU noise) peak-to-peak, 4 cm^{-1} resolution
 Signal-to-Noise (Achievable) 5 Sec: >8,000:1 (= <5.4*10⁻⁵AU noise) peak-to-peak, 4 cm^{-1} resolution
 1 Min: >45,000:1 (= <9.7*10⁻⁶AU noise) peak-to-peak, 4 cm^{-1} resolution

Interferometer RockSolid, Permanent aligned, high stability

Scan Speed 3 velocities, 2.2 – 20 kHz (1.4 – 12.7 mm/sec opd),
 optional 4 velocities, 2.2 – 40 kHz (1.4 – 25.5 mm/sec opd)

Detector DigiTect™ detector system, High sensitivity DLATGS,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

optional LN₂cooled MCT detector, easy exchange

A/D Converter 24 bit

Validation IVU internal validation unit

Spectrometer Size 66.5(W) x 43.4(D) x 28.1(H) cm

Sample Compartment Size 25.5(W) x 27(D) x 16(H) cm

Weight 37 Kg

Spectrometer Power 85 – 265 V_{AC}, 45 – 67 Hz, 70 W

Computer Interface Ethernet connection

Spectroscopy Software OPUS: easy to use, full GLP compliant, full 21 CFR part 11 compliant



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



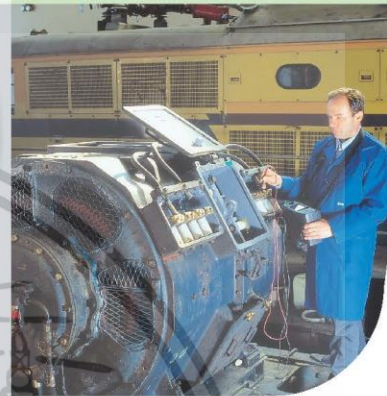
ภาคผนวก จ

Insulation and Voltage Tester Specification

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MI 2077 TeraOhm 5 kV

5 kV Insulation and Voltage tester



Advanced, field proven instrument. Technical demands require high performance measuring instruments capable of measuring polarization index (PI), dielectric absorption ratio (DAR), dielectric discharge (DD), insulation system capacitance. Ease of use, high EMI immunity and automatic discharge of load after completed measurement are just some of many outstanding features that distinguish Metrel HV testers from other similar products on the market.

High insulation resistance measurement:

- DC test voltages from 250 V up to 5000 V in steps of 50 V;
- Measuring range up to 5 T Ω ;
- Timer mode from 1 s up to 30 min;
- Capacitance measurement up to 50 μ F.

Step voltage measurement of insulation resistance:

- DC test voltage up to 5000 V automatically divided in 5 steps;
- Adjustable test time.

Withstanding voltage test up to 5000 V:

- Insulation leakage current measurement;
- Adjustable test voltage slope;
- Pre-set threshold test current from 1 mA to 1.4 mA;
- Time programmable step voltage test.

Other features:

- Voltage and frequency measurement up to 600 V AC/DC;
- Automatic discharge of capacitive loads;
- Guard terminal to eliminate influence of insulation surface leakage currents;
- Digital and bar graph display;
- Built-in battery charger;
- User-friendly PC software (optional);
- RS232 isolated communication port.

5 kV

CAT III
600 V

TYPICAL APPLICATIONS:

- Rotating machines
- Transformers
- Cables
- High voltage generators
- Electrical circuits
- Surge arresters
- Measuring transducers

STANDARDS:

- Instruments operation: IEC/EN 61557-2
- Electromagnetic compatibility: (EMC) EN 61326 Class B
- Safety: EN 61010-1 (instruments), EN 61010-031 (accessories)

 **METREL**[®]

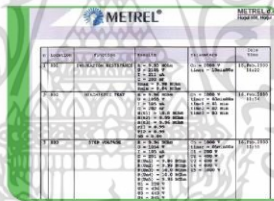
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Technical Specification

Function	Measuring range	Resolution	Accuracy
Insulation resistance	0 k Ω ... 999 k Ω	1 k Ω	\pm (5 % of reading + 3 digits)
	1.00 M Ω ... 9.99 M Ω	10 k Ω	\pm (5 % of reading + 3 digits)
	10.0 M Ω ... 99.9 M Ω	100 k Ω	\pm (5 % of reading + 3 digits)
	100 M Ω ... 999 M Ω	1 M Ω	\pm (5 % of reading + 3 digits)
	1.00 G Ω ... 9.99 G Ω	10 M Ω	\pm (5 % of reading + 3 digits)
	10.0 G Ω ... 99.9 G Ω	100 M Ω	\pm (5 % of reading + 3 digits)
	100 G Ω ... 999 G Ω	1 G Ω	\pm (5 % of reading + 3 digits)
Test voltage	0 V ... 5500 V	1 V	\pm (3% of reading + 3 V)
Insulation leakage current	0.00 nA ... 9.99 nA	0.01 nA	\pm (5% of reading + 0.05 nA)
	10.0 nA ... 99.9 nA	0.1 nA	
	100 nA ... 999 nA	1 nA	
	1.00 μ A ... 9.99 μ A	10 nA	
	10.0 μ A ... 99.9 μ A	100 nA	
	100 μ A ... 999 μ A	1 μ A	
	1.00 mA ... 1.54 mA	10 μ A	
Dielectric absorption ratio (DAR)	0.01 ... 9.99	0.01	\pm (5 % of reading + 2 digits)
	10.0 ... 100.0	0.1	\pm 5 % of reading
Polarization index (PI)	0.01 ... 9.99	0.01	\pm (5 % of reading + 2 digits)
	10.0 ... 100.0	0.1	\pm 5 % of reading
Dielectric discharge (DD)	0.01 ... 9.99	0.01	\pm (5 % of reading + 2 digits)
	10.0 ... 100.0	0.1	\pm 5 % of reading
Voltage AC / DC	0 V ... 600 V	1 V	\pm (3% of reading + 3 V)
Frequency	45.0 Hz ... 65.0 Hz	0.1 Hz	\pm 0.2 Hz
Capacitance	0.0 nF ... 99.9 nF	0.1 nF	\pm (5 % of reading + 2 digits)
	100 nF ... 999 nF	1 nF	
	1.00 μ F ... 50.00 μ F	10 nF	
Battery power supply	6 x 1.2 V NiMH rechargeable batteries, type C		
Display	Matrix LCD with backlight, 160 x 116 dots		
Overvoltage category	CAT III / 600 V		
Protection class	Double insulation		
COM port	RS232 (optional USB with serial converter)		
Dimensions	265 x 110 x 185 mm		
Weight	2.1 kg		



Large custom LCD dot matrix display with bar graph and backlight. Simultaneous presentation of measuring results and test parameters. Built-in timer and real time clock.



Up to 1000 test results can be stored in the memory module of TeraOhm 5 kV. Windows compatible PC software TeraLink serves for downloading and management of test results. Results can be further exported to other Windows programs.

ORDERING INFORMATION

MI 2077

Standard set



Instrument TeraOhm 5 kV
Soft carrying bag
Mains cable
Test lead, 2 m, 2 pcs (black, red)
Guard test lead, 2 m, with crocodile clip (green)
Crocodile clip, 2 pcs (black)
Test probe, 2 pcs (black, red)
Handbook "Guide to modern insulation testing" on CD
Instruction manual
Calibration certificate

OPTIONAL ACCESSORIES

Photo	Order No.	Acc. description
	A 1046	6 x 1.2 V NiMH batteries, C type
	A 1056	PC SW TeraLink with RS232 cable
	A 1171	RS232 / USB adapter with 1 m cable
	S 2036	HV crocodile clip, 2 pcs (black, red)
	S 2039	5 kV shielded test lead 15 m, 2 pcs
	S 2042	5 kV shielded test lead with test probe 10 m, 2 pcs
	S 2044	5 kV shielded test lead with test probe 15 m, 2 pcs

Note! Photographs in this catalogue may slightly differ from the instruments at the time of delivery. Subject to technical change without notice.

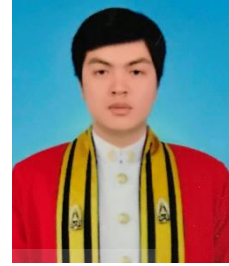


Measuring and Regulation Equipment Manufacturer
METREL d.d.
Ljubljanska 77
SI-1354 Horjul
Tel: + 386 (0)1 75 58 200
Fax: + 386 (0)1 75 49 226
E-mail: metrel@metrel.si
http://www.metrel.si

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายจักรวาล สิงห์ศิวานนท์
วัน เดือน ปีเกิด 29 มีนาคม 2537
ที่อยู่ 142/15 หมู่บ้านปัญญา ถนนพัฒนาการ 30
เขตสวนหลวง แขวงสวนหลวง
จังหวัด กรุงเทพมหานคร 10250



ประวัติการทำงาน 2561-2564 ผู้จัดการฝ่ายเทคนิค บริษัทไทรแค็บ (ประเทศไทย) จำกัด

ประวัติการศึกษา 2564 – ปัจจุบัน ศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2559 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2558 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2555 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนบดินทรเดชา (สิงห์ สิงหเสนี) จังหวัดกรุงเทพมหานคร
2553 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนบดินทรเดชา (สิงห์ สิงหเสนี) จังหวัดกรุงเทพมหานคร
2550 สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษา โรงเรียนสมถวิล จังหวัดกรุงเทพมหานคร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้