

การศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติการเป็นฉนวนหุ้มสายไฟของยางธรรมชาติ
โดยการเพิ่มอนุภาคนาโนของสารไดอิเล็กตริก



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา ปีการศึกษา 2563 ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

STUDY OF IMPROVEMENT OF ELECTRICAL INSULATION PROPERTIES OF
NATURAL RUBBER BY ADDING DIELECTRIC NANOPARTICLES



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และใช้อย่างอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG โยชนด้านการค้า
ACADEMIC YEAR 2020

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง การศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติการเป็นฉนวนหุ้ม
สายไฟของยางธรรมชาติโดยการเพิ่มอนุภาคนาโนของ
สารไดอิเล็กตริก

โดย นายธนากร พันธุ์สุภา รหัสนักศึกษา 60010431
นายพสธร มโหฬารวงศ์ รหัสนักศึกษา 60010680

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ณัฐพล ฤกษ์เกษมสันต์
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาและอนุมัติให้รับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผศ.ดร.ณัฐพล ฤกษ์เกษมสันต์)

ภัทรานิชฐ์ วงศ์พร้อมรัตน์
.....กรรมการ
(ผศ.ดร.ภัทรานิชฐ์ วงศ์พร้อมรัตน์)

วลัยรัตน์ จันทร์อัมพร
.....กรรมการ
(ผศ.ดร.วลัยรัตน์ จันทร์อัมพร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติการเป็นฉนวนหุ้มสายไฟของยางธรรมชาติโดยการเพิ่มอนุภาคนาโนของสารไดอิเล็กตริก	
โดย	นายธนากร พันธุ์สุภา	รหัสนักศึกษา 60010431
	นายพสธร มโหฬารวงศ์	รหัสนักศึกษา 60010680
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี	
ปีการศึกษา	2563	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ณัฐพล ฤกษ์เกษมสันต์	

บทคัดย่อ

ผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติ ถูกนำไปใช้ในเป็นผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ยางรถยนต์ ถังมือฉนวน หรือวัสดุยึดหยุ่น เป็นต้น โดยคณะผู้วิจัยให้ความสนใจกับการนำยางธรรมชาติมาทำเป็นสายไฟฟ้า คณะผู้ทำการวิจัยได้ทำการเลือกสารที่ใช้ในการวัลคาไนซ์และเพิ่มสารไดอิเล็กตริก ได้แก่ แบเรียมไททาเนต แคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต และเบนโทไนท์เคลย์ ในระดับอนุภาคนาโนเมตร เนื่องจากมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่สูงและสามารถหาซื้อได้ง่าย โดยมีอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการวัลคาไนซ์คือ 75 องศาเซลเซียส เวลา 5 ชั่วโมง และใช้ปริมาณสารไดอิเล็กตริก 0.25, 0.5, 1, 2 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยมวลของยางธรรมชาติ เพื่อหาสภาพความต้านทานเชิงปริมาตรของยาง จากการทดลองพบว่ายางธรรมชาติก่อนการเติมสารไดอิเล็กตริกมีค่า 0.0044 ถึง 0.0090 เมกะโอมส์กิโลเมตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าสภาพความต้านทานเชิงปริมาตรมาตรฐานที่ต่ำที่สุดของสายไฟฟ้า NYY แคนเดียว และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต และเบนโทไนท์เคลย์ ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรมาตรฐานก็มีค่าเพิ่มขึ้น แบเรียมไททาเนตจะมีค่าสภาพความต้านทานเชิงปริมาตรสูงสุดเมื่อความเข้มข้น 0.25 เปอร์เซ็นต์โดยมวลของยางธรรมชาติ และผู้วิจัยได้ทำการทดลองผสมระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนตกับแบเรียมไททาเนตจะได้ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรสูงที่สุดที่อัตราส่วนแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต 0.125 เปอร์เซ็นต์โดยมวลของยางธรรมชาติกับแบเรียมไททาเนต 0.375 เปอร์เซ็นต์โดยมวลของยางธรรมชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Report Title Study of Improvement of Electrical Insulation Properties of Natural Rubber by Adding Dielectric Nanoparticles.

By Mr. Tanakorn Pansupa ID. 60010431
Mr. Possatorn Maholanwong ID. 60010680

Degree Bachelor of Engineering

Program Chemical Engineering

Year 2020

Advisor Asst. Prof. Dr. Nuttapol Lerkkasemsan

ABSTRACT

Natural rubber products are being applied in various industries such as tires, insulating gloves or flexible coverings, etc. This work we study to the use of natural rubber to make electrical wires by selecting vulcanization substances and adding dielectric substances, consists of Barium Titanate (BaTiO_3), Calcium Copper Titanate (CCTO) and Bentonite Clay (B-clay) nanoparticles. Because, it has a high dielectric constant and available. The optimum temperature and time for this vulcanization is 75°C and 5 hours and dielectric content of 0.25, 0.5, 1, 2 and 5 percent by mass of natural rubber is used to determine the volume resistivity of rubber and the results show that the natural rubber before adding dielectrics is 0.0044 to 0.0090 Megaohm Kilometer ($\text{M}\Omega\cdot\text{km}$). It is close to the lowest standard volume resistivity of NYY single-core cable and when the concentration of calcium copper titanate (CCTO) and bentonite clay (B-clay) are increased, the volume resistivity is also increased. Barium titanate (BaTiO_3) has the highest volume resistivity at a concentration of 0.25 percent by mass of natural rubber and the experimental combination of calcium copper titanate and barium titanate obtained the highest volume resistivity at the concentration of calcium copper titanate 0.125 percent by mass of natural rubber and barium titanate 0.375 percent by mass of natural rubber.

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ เนื่องจากการได้รับความกรุณาจากบุคลากรหลายท่านคอยชี้แนะแนวทาง ให้คำปรึกษา และให้การสนับสนุนในด้านต่างๆแก่ผู้จัดทำ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ณัฐพล ฤกษ์เกษมสันต์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่คอยให้คำแนะนำ ตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆของปริญญาานิพนธ์ตลอดการทำงาน ชี้แนะแนวทาง และถ่ายทอดความรู้อันเป็นประโยชน์

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมีทุกท่าน ที่มอบความรู้ เพื่อนำไปปรับใช้ในการแก้ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้น

ขอขอบพระคุณ คุณพิสันต์ ผลโพธิ์ เจ้าหน้าที่สนับสนุนวิชาการ ที่คอยช่วยเหลือในการจัดหาอุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ประกอบงานวิจัย

ขอขอบพระคุณรุ่นพี่ปริญญาโท ที่คอยช่วยให้คำแนะนำในงานวิจัย

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มาดา และครอบครัวที่เคารพรัก ที่คอยสนับสนุนและยังเป็นกำลังใจสำคัญในการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วง และหากมีข้อผิดพลาดประการใดในปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้จัดทำขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้

ธนากร พันธุ์สุภา
พสธร มโหฬารวงศ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูปภาพ.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตการศึกษา	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber).....	4
2.2 การวัลคาไนซ์ (Vulcanization).....	5
2.2.1 กระบวนการวัลคาไนซ์ (Vulcanization).....	5
2.2.2 สารเติมแต่งที่ใช้ในกระบวนการวัลคาไนซ์.....	6
2.3 สมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric properties).....	8
2.3.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant).....	8
2.3.2 สนามไฟฟ้า (Electric field, E).....	9
2.3.3 การสูญเสียทางไดอิเล็กตริก (Dielectric loss tangent).....	10
2.3.4 อิเล็กตริกคอลเบรกดาวน์ (Electrical breakdown).....	11
2.3.5 วัสดุไดอิเล็กตริก	11
2.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	13
2.4.1 การทดสอบไดอิเล็กตริก (Dielectric tests).....	13
2.4.2 สมบัติความแข็ง (Hardness).....	14
2.4.3 สภาพต้านทานเชิงพื้นผิว และเชิงปริมาตร (Surface and volume resistivity).....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.5 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectrometer; FTIR).....	15
2.4.6 การวิเคราะห์อุณหภูมิกการสลายตัวเนื่องจากความร้อน (Thermogravimetric analysis, TGA) 15	
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	18
3.1 การทดลองหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการวัลคาไนซ์	18
3.1.1 วัสดุและสารเคมี.....	18
3.1.2 อุปกรณ์.....	18
3.1.2 ขั้นตอนการทดลอง	19
3.2 การทดลองวัลคาไนซ์ก่อนการเติมสารไดรอิเล็คทริก.....	19
3.2.1 วัสดุและสารเคมี.....	19
3.2.2 อุปกรณ์.....	20
3.2.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	20
3.3 การเติมสารไดรอิเล็คทริก.....	20
3.3.1 วัสดุและสารเคมี.....	20
3.3.2 อุปกรณ์.....	21
3.3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	21
3.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	22
บทที่ 4 วิเคราะห์ผลการทดลอง	24
4.1 ผลการทดลองหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติ	24
4.2 ผลการตรวจสอบค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร.....	25
4.2.1 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรของยางธรรมชาติ	25
4.2.2 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรของยางธรรมชาติเมื่อเติมสารไดอิเล็คทริก	26
4.2.3 เปรียบเทียบค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรของยางธรรมชาติก่อนและหลังเติมสารไดอิเล็คทริก	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ อนุญาตให้นำไปใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้เพื่อการค้า

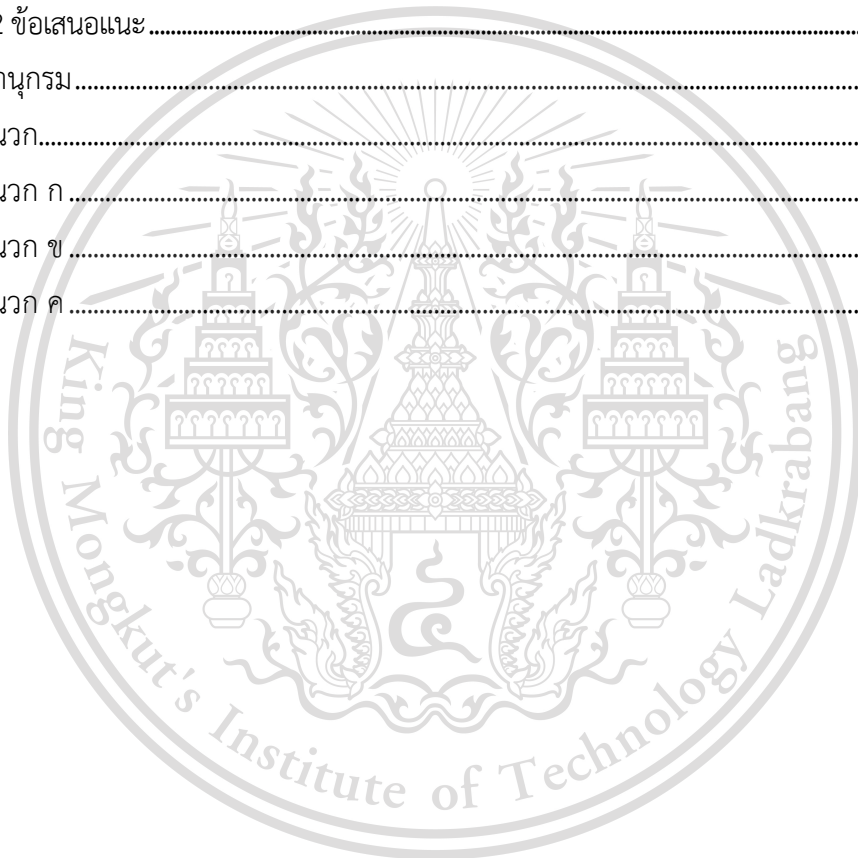
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.4 เปรียบเทียบค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรจากการทดลองกับค่ามาตรฐานของ สายไฟฟ้าหุ้มฉนวนพอลิไวนิลคลอไรด์ (มอก. 11 เล่ม 101 พ.ศ. 2559).....	31
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	33
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	33
5.2 ข้อเสนอแนะ	33
บรรณานุกรม.....	35
ภาคผนวก.....	37
ภาคผนวก ก	38
ภาคผนวก ข	44
ภาคผนวก ค	48



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 การจำแนกประเภทตัวเร่ง.....	6
ตารางที่ 2.2 แสดงค่าคงที่ได้อิเล็กทรอนิกส์ของสารแต่ละชนิด.....	9
ตารางที่ 2.3 แสดงค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกของสารแต่ละชนิด.....	10
ตารางที่ 3.1 การติดตั้งหลอดไส้ ที่ใช้ในการให้ความร้อนในกล่องอบ.....	19
ตารางที่ 4.1 ผลของลักษณะของยางธรรมชาติที่ผ่านการอบในแต่ละอุณหภูมิ.....	24
ตารางที่ ก.1 ข้อมูลของสภาพด้านทานเชิงปริมาตร ยางธรรมชาติของตัวอย่าง.....	38
ตารางที่ ก.2 ข้อมูลของสภาพด้านทานเชิงปริมาตร ของตัวอย่างยางธรรมชาติเมื่อเพิ่มแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต.....	38
ตารางที่ ก.3 ข้อมูลของสภาพด้านทานเชิงปริมาตร ของตัวอย่างยางธรรมชาติเมื่อเพิ่มแบเรียมไททาเนต.....	39
ตารางที่ ก.4 ข้อมูลของสภาพด้านทานเชิงปริมาตร ของตัวอย่างยางธรรมชาติเมื่อเพิ่มเบนโทไนท์เคลย์.....	41
ตารางที่ ก.5 ข้อมูลของสภาพด้านทานเชิงปริมาตร ของตัวอย่างยางธรรมชาติเพิ่มแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต และแบเรียมไททาเนต.....	42
ตารางที่ ก.6 ข้อมูลสภาพด้านทานเชิงปริมาตร มารตราฐานของสายไฟฟ้าหุ้มฉนวนพอลิไวนิลคลอไรด์ชนิด NYY แกนเดี่ยว.....	43
ตารางที่ ค.1 แสดงราคาและปริมาณที่ใช้ของของสารในการผลิตยางธรรมชาติที่เติมเบนโทไนท์เคลย์.....	49
ตารางที่ ค.2 แสดงผลการคำนวณเชิงเศรษฐศาสตร์ของยางธรรมชาติที่ผสมสารไดอิเล็กตริกแต่ละชนิด.....	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ.....	4
รูปที่ 2.2 การเชื่อมโมเลกุลของยางด้วยกำมะถัน	5
รูปที่ 2.3 ลักษณะของวัสดุไดอิเล็กตริกเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า	8
รูปที่ 2.4 แสดงทิศทางของสนามไฟฟ้ารอบๆประจุแต่ละชนิด	9
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของแร่ดินเหนียวกลุ่มสมิ์กไทต์	11
รูปที่ 2.6 แบบจำลองโครงสร้างผลึก และโครงสร้างผลึกของ $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$	13
รูปที่ 2.7 วิธีการทดสอบไดอิเล็กตริก (Dielectric Tests).....	13
รูปที่ 2.8 วิธีการทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์ (Rockwell Hard Test).....	14
รูปที่ 2.9 แสดงการวัดสภาพต้านทานเชิงพื้นผิว และแสดงการวัดสภาพต้านทานเชิงปริมาตร	14
รูปที่ 2.10 แสดงเครื่อง FTIR Micro-Spectrometer	15
รูปที่ 2.11 แสดงเครื่อง Thermogravimetric analyzer.....	16
รูปที่ 3.1 ภาพแสดงการวัดขนาด และเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นตัวอย่าง.....	22
รูปที่ 3.2 การวัดเส้นผ่านศูนย์กลางขั้ววัด (แผ่นอะลูมิเนียม).....	23
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร กับเวลาของยางธรรมชาติ.....	25
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร กับเวลาของยางธรรมชาติผสมแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO)	26
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร กับเวลา ของยางธรรมชาติผสมแบเรียมไททาเนต- (BaTiO_3)	27
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร กับเวลาของยางธรรมชาติเมื่อเติมเบนโทไนท์- เคลย์ (B-Clay)	28
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร กับเวลาของยางธรรมชาติเมื่อเพิ่มแคลเซียม- คอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) และแบเรียมไททาเนต (BaTiO_3)	29
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร กับเวลาของยางธรรมชาติก่อนและหลังเพิ่ม สารไดอิเล็กตริก.....	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร กับเวลา เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน.....31
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

VIII

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ ข.1 ลักษณะของยางที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส.....	44
รูปที่ ข.2 ลักษณะของยางที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส.....	45
รูปที่ ข.3 ลักษณะของยางที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส.....	46
รูปที่ ข.4 ลักษณะของยางที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส.....	47



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

เนื่องจากปัจจุบันประเทศไทยส่งออกยางพาราเป็นอันดับหนึ่งของโลกแต่มูลค่าของยางพาราที่ไทยส่งออก เทียบไม่ได้เลยกับอุตสาหกรรมของสินค้าที่เกี่ยวข้องกับยาง และยังประสบปัญหาราคายางพาราตกต่ำ ดังนั้นการคิดค้นหรือปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับยางพารา จะสามารถช่วยแก้ปัญหาราคายางพาราตกต่ำได้เนื่องจากมีความต้องการของยางพาราในตลาดเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งยังสามารถส่งออกนํารายได้เข้าประเทศได้มากกว่าแค่การส่งออกยางพารา โดยผลิตภัณฑ์ที่ใช้ยางพาราในการผลิตมากที่สุดก็คือยางรถยนต์ต่างๆ แต่ในประเทศไทยนั้นยังขาดองค์ความรู้ในการผลิตยางรถเป็นอย่างมาก ยังต้องการเวลาและเงินทุนในการวิจัยจำนวนมาก ดังนั้นการผลิตยางรถในประเทศไทยตอนนี้จึงไม่เหมาะสม เพราะจะได้ล้อยางที่มีคุณภาพต่ำกว่าแต่ราคาแพงกว่าการซื้อจากต่างประเทศ ดังนั้นจึงได้เลือกผลิตภัณฑ์ตัวอื่นของยางพารา นั่นคือสายไฟ ซึ่งในปัจจุบันสายไฟที่ผลิตจากยางพาราไม่ค่อยได้รับความนิยมเนื่องจากมีความต้านทานไฟฟ้าไม่สูงมาก เปื่อยขาดง่าย ไม่ทนต่อแดด ความร้อน และความชื้น จึงได้ทำการศึกษาและปรับปรุงคุณภาพของน้ำยางที่จะนำไปทำสายไฟ โดยการนำไปผสมกับสารต่างๆที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในด้านต่างๆให้มากขึ้น เช่น เพิ่มความสามารถในการต้านทานไฟฟ้า ความสามารถในการทนต่อแสงแดด เป็นต้น

ยางธรรมชาติหรือยางพารา คือ ลักษณะของเหลว สีขาว คล้ายน้ำมัน เป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่มาจากต้นยางพารา ทำให้มีสมบัติเป็นคอลลอยด์อนุภาคขนาดเล็ก มีค่าความเป็นกรดที่ 6.5 ถึง 7 ความหนาแน่นประมาณ 0.975 ถึง 0.980 กรัมต่อมิลลิลิตร และมีความหนืด 12 ถึง 15 เซนติพอยส์ โดยมีส่วนประกอบในน้ำยางสดที่แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นส่วนของเนื้อยาง 30 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์ และส่วนที่สองเป็นส่วนที่ไม่ใช่ยาง 60 ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ลูทอยด์ 1 ใน 4 ส่วนของน้ำ และน้ำยางสดที่กรีตได้จากต้นสามารถคงสภาพความเป็นน้ำยางได้ไม่เกิน 6 ชั่วโมง เนื่องจากแบคทีเรียที่อยู่ในอากาศ ได้กินสารอาหารที่อยู่ในน้ำยาง เช่น โปรตีน น้ำตาล ฟอสโฟไลปิด และเมื่อแบคทีเรียกินสารอาหารก็จะเกิดการย่อยสลายได้เป็นก๊าซต่างๆ เช่น ก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก่อให้เกิดการบูดเน่าและส่งกลิ่นเหม็นของน้ำยาง เพราะเหตุนี้เองจึงได้มีการหา

วิธีการป้องกัน โดยการเติมสารรักษาสภาพและป้องกันการแข็งตัวของน้ำยางหรือเรียกว่า สารป้องกันการแข็งตัว (Anticoagulant) ได้แก่ แอมโมเนีย โซเดียมซัลไฟด์ โพร์มาลดีไฮด์ เป็นต้น ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

วัสดุไดอิเล็กตริก เป็นฉนวนไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่สามารถทำให้มีขั้วไฟฟ้าได้โดยใช้สนามไฟฟ้า เมื่อไดอิเล็กตริกหนึ่งถูกวางอยู่ในสนามไฟฟ้า ประจุไฟฟ้าจะไม่ไหลผ่านตัววัสดุเหมือนอย่างที่ผ่านมา เพียงแต่ขั้วเพียงเล็กน้อยเท่านั้นจากตำแหน่งสมดุลเฉลี่ยเดิมก่อให้เกิดความเป็นขั้วไดอิเล็กตริก ในการนี้ประจุบวกจะถูกผลักไปในทิศทางของสนามและประจุลบจะขยับไปในทิศทางตรงกันข้าม ปรากฏการณ์นี้จะสร้างสนามไฟฟ้าภายในที่ช่วยลดสนามโดยรวมภายในตัวไดอิเล็กตริกเอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของการใช้สารไดโอดีเล็กตริกแต่ละชนิดผสมกับยางมีผลในการเพิ่มความสามารถในการต้านทานไฟฟ้าของยางพาราที่จะนำไปทำฉนวนหุ้มสายไฟอย่างไร
- 1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนในการผสมของสารไดโอดีเล็กตริกแต่ละชนิดมีผลต่อการเพิ่มความสามารถในการต้านทานไฟฟ้าของยางพาราที่จะนำไปทำฉนวนหุ้มสายไฟอย่างไร
- 1.2.3 เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ และเวลาในการทำวัลคาไนเซชัน มีผลต่อการเพิ่มความสามารถในการต้านทานไฟฟ้าของยางพาราที่จะนำไปทำฉนวนหุ้มสายไฟอย่างไร

1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1.3.1 ศึกษาโดยใช้สารไดโอดีเล็กตริก 3 ชนิด ที่มีค่าคงที่ไดโอดีเล็กตริกต่างกันประกอบไปด้วย เบนโทไนท์เคลย์ แบริยมไททานेट และแคลเซียมคอปเปอร์ไททานेट โดยทำการศึกษาที่ปริมาณสาร 0.25, 0.5, 1, 2 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยมวลของยางพารา
- 1.3.2 ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการวัลคาไนเซชัน โดยทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 65, 70, 75 และ 95 องศาเซลเซียส
- 1.3.3 ศึกษาอิทธิพลของเวลาในการวัลคาไนเซชัน โดยทำการศึกษาเวลา 2, 3, 4 และ 5 ชั่วโมง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถได้สารไดโอดีเล็กตริกที่มีความเหมาะสมที่นำไปผสมกับยาง แล้วมีผลในการเพิ่มความสามารถในการต้านทานไฟฟ้าของยางพาราที่จะนำไปทำฉนวนหุ้มสายไฟ
- 1.4.2 สามารถหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผสมของสารไดโอดีเล็กตริกแต่ละชนิด ที่มีผลต่อการเพิ่มความสามารถในการต้านทานไฟฟ้าของยางพาราที่จะนำไปทำฉนวนหุ้มสายไฟ
- 1.4.3 สามารถหาค่าอุณหภูมิ และเวลาในการทำวัลคาไนเซชัน ที่มีผลต่อการเพิ่มความสามารถในการต้านทานไฟฟ้าของยางพาราที่จะนำไปทำฉนวนหุ้มสายไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 2

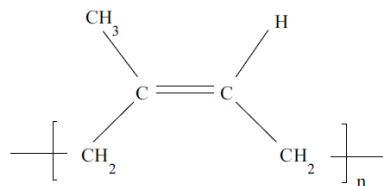
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงยางธรรมชาติ ลักษณะและโครงสร้างที่มีผลต่อสมบัติของยางธรรมชาติ การวัลคาไนซ์ กระบวนการวัลคาไนซ์และสารเติมแต่งต่างๆ ที่ช่วยส่งเสริมสมบัติของยางธรรมชาติ สมบัติไดอิเล็กตริก โดยประกอบไปด้วย ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก สนามไฟฟ้า การสูญเสียทางไดอิเล็กตริก อิเล็กตริกคอลเบรกดาวน์ และวัสดุไดอิเล็กตริก และหัวข้อสุดท้ายเป็นการสรุปสาระสำคัญของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อเป็นแนวทางในการดำเนินงาน

2.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber)

ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR) เป็นพอลิเมอร์ที่มีความบริสุทธิ์สูง โดยสูตรทางเคมีคือ poly-cis-1,4 isoprene (มากกว่า 99.9% ประกอบด้วยหน่วยโครงสร้าง cis 1,4) โดยยางธรรมชาติมีค่าความถ่วงจำเพาะ 0.934 ที่ 20 องศาเซลเซียส และมีความเสถียรที่อุณหภูมิต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส ซึ่งจะสลายตัวเป็นเศษเล็กๆ ที่อุณหภูมิ 290 ถึง 300 องศาเซลเซียส ยางธรรมชาติมีสมบัติที่เด่น เช่น ความทนต่อแรงดึง มีความทนต่อการฉีกขาด สูงมากทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูง โดยโครงสร้างที่มีผลกระทบต่อสมบัติของยาง คือ

- 1) โครงสร้างหลักประกอบด้วยไฮโดรเจนและคาร์บอน ส่งผลให้ละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เฮกเซน เบนซีน โทลูอีน เป็นต้น
- 2) พันธะคู่ที่มีความไวต่อปฏิกิริยา ทำให้เกิดปฏิกิริยากับกำมะถันในการทำวัลคาไนซ์ได้ง่ายและยังส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนและโอโซน ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของน้ำยาง
- 3) น้ำหนักโมเลกุลที่สูงของยาง ทำให้ยางแข็งเกินไปที่จะนำไปแปรรูปโดยตรง จึงต้องมีการนำยางไปบด ก่อนนำไปใช้งาน
- 4) โครงสร้างโมเลกุลที่สม่ำเสมอของน้ำยาง ส่งผลให้ตกผลึกได้ดีเมื่อยืด ทำให้มีความต้านทานต่อแรงดึงสูงมาก



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ cis-1,4-polyisoprene โดยที่ n มีค่าตั้งแต่ 5,000 ถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ยางธรรมชาติจัดเป็นยางเอนกประสงค์ที่สามารถนำไปใช้ในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย เช่น ยางรัดของ ลูกโป่ง สายพานลำเลียง ถุงมือยาง ยางรถยนต์ เป็นต้น และข้อเสียของยางธรรมชาติ ได้แก่ การไม่ทนต่อแสงแดด โอโซน น้ำมัน เป็นต้น

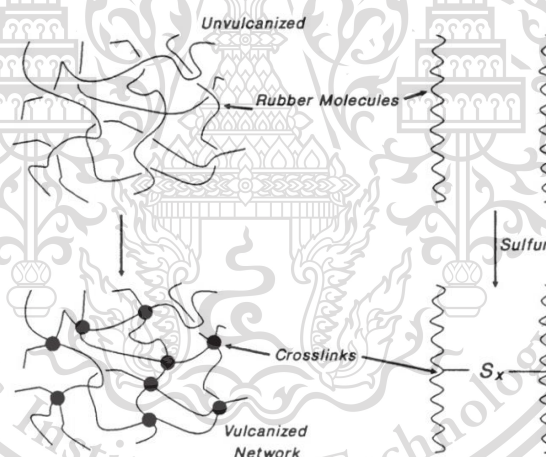
2.2 การวัลคาไนซ์ (Vulcanization)

2.2.1 กระบวนการวัลคาไนซ์ (Vulcanization)

กระบวนการวัลคาไนซ์ เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงสภาพของยาง ทำให้โมเลกุลของยาง เชื่อมโยงกับโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ เพื่อรักษาสมบัติที่เสถียร ความยืดหยุ่น หรือความแข็ง โดยการใช้ สารวัลคาไนซ์ (vulcanizing agent) โดยการวัลคาไนซ์ยางที่นิยมใช้แบ่งออกเป็น 3 ระบบใหญ่ๆ ดังนี้

1) การวัลคาไนซ์โดยใช้กำมะถัน (Sulphur Vulcanization)

เมื่อผสมกำมะถันลงในน้ำยางแล้วให้ความร้อน จะทำให้เกิดการวัลคาไนซ์เกิดขึ้น ทำใหยาง มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น เช่น ไม่เหนียวเหมือนกาวน้ำ ไม่มีกลิ่น ไม่ละลายตัวทำละลาย เป็นต้น



รูปที่ 2.2 การเชื่อมโมเลกุลของยางด้วยกำมะถัน [2]

ซึ่งในกระบวนการวัลคาไนซ์ที่ใช้ในระบบกำมะถันมี 3 ระบบ คือ

1.1) ระบบกำมะถันปกติ (Conventional Vulcanization Systems หรือ CV) ใช้ปริมาณกำมะถันจำนวนมากและใช้สารตัวเร่งน้อย จะเกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลแบบไม่มีประสิทธิภาพมากนัก จะเกิดการเชื่อมโยงแบบ polysulphidic crosslink ประมาณ 70%

1.2) ระบบอีวี (Efficient Vulcanization Systems หรือ E_v) ใช้ปริมาณกำมะถันน้อยและสารตัวเร่งมาก จะเกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลแบบ monosulphidic ประมาณ 90% ทำให้ทนต่อการเสื่อมสภาพ เนื่องจากการเกิดออกซิเดชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1.3) ระบบเซมิอีวี (Semi-Efficient Vulcanization Systems หรือ Semi-Ev) ใช้ปริมาณกำมะถันและปริมาณสารตัวเร่งเท่าๆ กัน ทำให้มีคุณสมบัติที่ใช้ในระบบกำมะถันปกติ

2) การวัลคาไนซ์โดยใช้สารให้กำมะถัน (Sulphur Donor Vulcanization)

การวัลคาไนซ์โดยใช้สารที่สลายให้กำมะถันออกมา เช่น di-morpholyl disulphide, thiuramtetrasulphide และ benzothiazyl-2-N เป็นต้น จะได้กำมะถันออกมาในปริมาณที่น้อยกว่าการใช้กำมะถันโดยตรง แต่จะมีประสิทธิภาพโมดูลัสสูงกว่าการใช้กำมะถันโดยตรง ในปริมาณเดียวกัน

3) การวัลคาไนซ์โดยใช้สารเปอร์ออกไซด์ (Peroxide Vulcanization)

เป็นการวัลคาไนซ์ใช้ได้กับยางที่อิมิตัวซึ่งไม่มีกลุ่มปฏิกิริยาใดๆ ที่สามารถสร้าง crosslink เปอร์ออกไซด์จะไม่เข้าไปในโซ่พอลิเมอร์ แต่จะสร้างอนุมูลที่เป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างพันธะ C-C กับ โซ่พอลิเมอร์ที่อยู่ติดกัน เช่น dicumyl peroxide, zinc peroxide, benzoyl peroxide, 2,4-chlorobenzoyl peroxide และ 2,5-bis (t-butylperoxy) -2,5-dimethylhexane เป็นต้น

2.2.2 สารเติมแต่งที่ใช้ในกระบวนการวัลคาไนซ์

2.2.2.1 สารตัวเร่งปฏิกิริยา (accelerators)

สารเร่งปฏิกิริยา คือ สารที่ช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาในการวัลคาไนซ์และใช้อุณหภูมิต่ำลง ให้ได้ประสิทธิภาพมากขึ้น ตัวเร่งปฏิกิริยายังสามารถช่วยลดปริมาณกำมะถันในการ crosslink ของ polydiene ได้

ตารางที่ 2.1 การจำแนกประเภทตัวเร่ง

สารตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี	Chemical Group	ความเร็วในการวัลคาไนซ์
BA, HMT	Aldehyde Amine	ช้า
DPG, DOTG	Guanidine	ช้า
MBT, MBTS, ZMBT	Thiazole	ปานกลาง
ZBDP	Thiophosphate	รวดเร็ว
CBS, TBBS, MBS, DCBS	Sulfenamides	ปานกลาง
ETU, DPTU, DBTU	Thiourea	รวดเร็ว
TMTM, TMTD, DPTT, TBzTD	Thiuram	รวดเร็ว
ZDMC, ZDEC, ZDBC, ZBEC	Dithiocarbamate	รวดเร็ว
ZIX	Xanthates	รวดเร็ว

เอกสารนี้เป็นที่มา: ดัดแปลงมาจาก Whitby, G. S. และ Simmons, H. E., 1925 [3]

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.2.2.2 สารกระตุ้นและสารหน่วงปฏิกิริยา (activators and retarders)

1) สารกระตุ้นปฏิกิริยา (activators) เป็นสารที่ช่วยกระตุ้นให้ตัวเร่งปฏิกิริยาทำงานได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งสารที่นิยมใช้กันมากในการทำวัสดุคานาซด้วยกัมมะถันคือ ซิงก์ออกไซด์ และกรดสเตียริก

2) สารหน่วงปฏิกิริยา (retarders) เป็นสารที่ช่วยลดการเกิดยางตายทั้งในระหว่างการผลิตและในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป โดยสารหน่วงปฏิกิริยาที่สำคัญ ได้แก่ สารหน่วงปฏิกิริยาที่มีฤทธิ์เป็นกรด เช่น กรดซาลิไซลิก กรดเบนโซอิก เป็นต้น และไซโคลเฮกซิลไทโอพทาไลไมด์ (cyclohexyl-N-thiophthalimide; CTP)

2.2.2.3 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (antidegradants)

เป็นสารเคมีที่เติมลงไปในสูตรเคมีเพื่อช่วยยืดอายุการใช้งาน ซึ่งมีหลายชนิดทั้งที่เปลี่ยนสีของยาง เช่น กลุ่มอนุพันธ์ของเอมีน (amine derivatives) และไม่เปลี่ยนสียาง เช่น กลุ่มอนุพันธ์ของฟีนอล (phenol derivatives) เป็นต้น

2.2.2.4 สารป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV)

สารป้องกันยูวีและการเกิดปฏิกิริยาจากออกซิเจน ถือเป็นสารที่มีความสำคัญต่อการรักษาคุณสมบัติของยาง ช่วยป้องกันยางจากการเสื่อมสภาพ เช่น เขม่าดำ สตรอเชียมไททานเนต และไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นต้น

คาร์บอนแบล็ก (Carbon Black) มีการใช้งานมากมายทั้งในอุตสาหกรรมยางและพลาสติก ใช้เป็นเม็ดสี ฟิลเลอร์นำไฟฟ้า วัสดุเสริมแรงอนุภาคและเป็นตัวดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) [4]

2.2.2.5 สารช่วยให้สารกระจายตัว

สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ (nonionic surfactant) ได้แก่ สารในกลุ่ม polyoxyethylene fatty alcohol และ polyoxyethylene sorbitol ester ได้แก่ polysorbate 20, polysorbate 80 เป็นต้น สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุนี้มักจะนำไปผสมในสบู่เหลวล้างหน้า นอกจากนี้ยังมีสารในกลุ่ม alkyl glucoside ได้แก่ decyl glucoside, lauryl glucoside เป็นสารลดแรงตึงผิวที่อ่อนให้ฟองน้อย และมีความเป็นพิษต่ำ เป็นสารที่ช่วยในการกระจายตัวของคาร์บอนแบล็ก และละลายสารมีขี้กับไม่มีขี้เข้าด้วยกัน

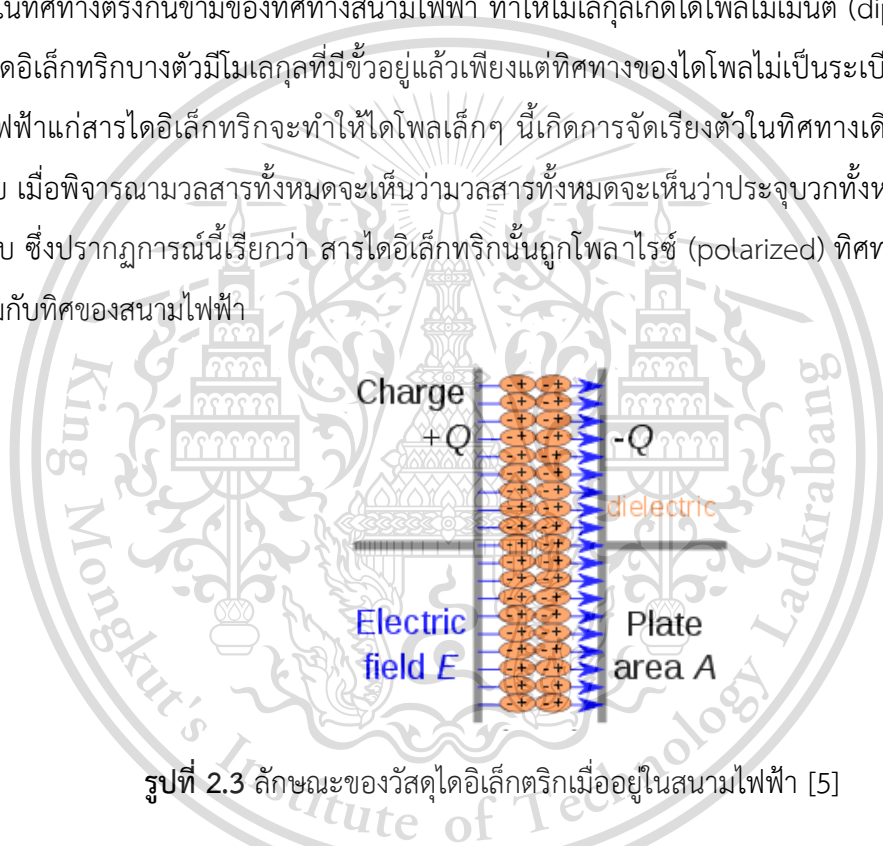
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.3 สมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric properties)

สมบัติไดอิเล็กตริก คือ การประพจน์ตัวเป็นฉนวนไฟฟ้าในวัสดุโดยเมื่อวัสดุอยู่ในสภาวะปกติจะประกอบไปด้วยโมเลกุลที่มีจุดศูนย์กลางมวลร่วมกันระหว่างโปรตอนและอิเล็กตรอน โดยอยู่ภายใต้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลกับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอม แต่เมื่อวัสดุได้รับกระแสไฟฟ้าภายนอกมากระตุ้นจะทำให้กลุ่มประจุบวกถูกผลักให้เคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันกับสนามไฟฟ้า ส่วนกลุ่มประจุลบจะถูกผลักไปในทิศทางตรงกันข้ามของทิศทางสนามไฟฟ้า ทำให้โมเลกุลเกิดไดโพลโมเมนต์ (dipole moment) ในสารไดอิเล็กตริกบางตัวมีโมเลกุลที่มีขั้วอยู่แล้วเพียงแต่ทิศทางของไดโพลไม่เป็นระเบียบดังนั้นเมื่อให้สนามไฟฟ้าแก่สารไดอิเล็กตริกจะทำให้ไดโพลเล็กๆ นี้เกิดการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันอย่างเป็นระเบียบ เมื่อพิจารณามวลสารทั้งหมดจะเห็นว่ามวลสารทั้งหมดจะเห็นว่าประจุบวกทั้งหมดย้ายออกจากประจุลบ ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า สารไดอิเล็กตริกนั้นถูกโพลาริซ์ (polarized) ทิศทางของไดโพลจะตรงข้ามกับทิศของสนามไฟฟ้า



รูปที่ 2.3 ลักษณะของวัสดุไดอิเล็กตริกเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า [5]

2.3.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant, ϵ)

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความมีขั้ว (polarity) ของวัสดุที่อุดมหมู่โมเลกุลที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูง จัดเป็นวัสดุไดอิเล็กตริก (dielectric material) มีความเป็นขั้ว (polar) สูง สามารถกักเก็บประจุไฟฟ้าไว้ จึงเป็นตัวนำไฟฟ้าไม่ดี หรือเป็นฉนวนไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

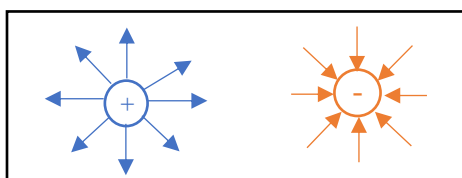
ตารางที่ 2.2 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารแต่ละชนิด

Composition	Dielectric Constant
SiO ₂	3.9
Al ₂ O ₃	9
ZrO ₂	29
HfO ₂	25
HfSiO ₄	11
Ta ₂ O ₅	26
La ₂ O ₃	30
LaAlO ₃	30
Nb ₂ O ₅	35
TiO ₂	95
BaTiO ₃	1700
SrTiO ₃	2000
Pb(Zr,Ti)O ₃ , (Pb,La)(Zr,Ti)O ₃	2500
CaCu ₃ Ti ₄ O ₁₂	80000
Li _x Ti _y Ni _{1-x-y} O	100000

ที่มา : ดัดแปลงมาจาก Jalal Azadmanjiri และคณะ, 2016 [6]

2.3.2 สนามไฟฟ้า (Electric field, E)

สนามไฟฟ้า คือปริมาณซึ่งใช้บรรยายการที่ประจุไฟฟ้าทำให้เกิดแรงกระทำกับอนุภาคมีประจุภายในบริเวณโดยรอบ หน่วยของสนามไฟฟ้าคือ นิวตันต่อคูลอมบ์ หรือโวลต์ต่อเมตร โดยสนามไฟฟ้ารอบๆประจุบวกจะมีทิศพุ่งออก และสนามไฟฟ้ารอบๆประจุลบจะมีทิศพุ่งเข้า



รูปที่ 2.4 แสดงทิศทางของสนามไฟฟ้ารอบๆประจุแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.3.3 การสูญเสียทางไดอิเล็กตริก (Dielectric loss tangent, $\tan\delta$)

เป็นค่าคงที่ของสารแต่ละชนิด เมื่อวัสดุไดอิเล็กตริกอยู่ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ พฤติกรรมวัสดุจะแตกต่างกันออกไป เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งเมื่อพิจารณาสนามไฟฟ้ากระแสสลับ สนามไฟฟ้าจะสลับตามรูปแบบของคลื่นไซน์ ดังนั้นเมื่อให้สนามไฟฟ้ากระแสสลับแก่วัสดุไดอิเล็กตริก ไดโพลภายในวัสดุไดอิเล็กตริกจะเกิดการเปลี่ยนแปลงกลับไปมาตามความถี่ของสนามไฟฟ้ากระแสสลับที่ให้ ณ ที่ความถี่สูง ไดโพลจะกลับตัวไม่ทันกับสนามที่ให้ ส่งผลให้เกิดรีเฟกซ์ (relaxation) ขึ้นหรืออาจกล่าวได้ว่าเมื่อใส่สนามไฟฟ้าแก่วัสดุสารไดอิเล็กตริก ไดโพลในสารวัสดุไดอิเล็กตริกจะใช้พลังงานที่ให้ในการกลับตัวไปมา แต่เมื่อความถี่สูงอาจทำให้ไดโพลของวัสดุไดอิเล็กตริกกลับไม่ทัน ซึ่งอาจทำให้เกิดกระแสรั่วไหลได้ส่งผลให้ค่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในระบบไฟฟ้ากระแสสลับมีค่าลดลง โดยการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกจะส่งผลกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในระบบที่เป็นไฟฟ้ากระแสสลับดังสมการ

$$K_{\omega} = \epsilon - \epsilon \tan\delta \quad (2.1)$$

โดยที่ K_{ω} คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในระบบไฟฟ้ากระแสสลับ

ϵ คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุ

$\tan\delta$ คือ ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกของวัสดุ

จากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่าค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกจะส่งผลทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุลดลงเมื่อวัสดุไดอิเล็กตริกอยู่ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นสารที่เลือกจะมาทำเป็นวัสดุไดอิเล็กตริกนั้นควรมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่สูง และมีค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกที่ต่ำ

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกของสารแต่ละชนิด

Composition	Dielectric loss tangent, $\tan\delta$
Polyethylene	0.001
CuO	15
$\text{Li}_x\text{Ti}_y\text{Ni}_{1-x-y}\text{O}$	1
$\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$	0.067
BaTiO_3	0.043
Organo-Clay	-

ที่มา : ดัดแปลงมาจาก Thanin Putjuso, 2012 [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.3.4 อิเล็กทริกคอลเบรกดาวน์ (Electrical breakdown)

อิเล็กทริกคอลเบรกดาวน์ หรือ ไดอิเล็กทริกเบรกดาวน์ คือกระบวนการที่เกิดขึ้นในวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้าซึ่งหากอยู่ภายใต้ความต่างศักย์ที่มากพอจะทำให้ฉนวนไฟฟ้ากลายเป็นตัวนำไฟฟ้า และทำให้กระแสไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปได้

2.3.5 วัสดุไดอิเล็กทริก

2.3.5.1 เบนโทไนท์เคลย์ (Bentonite Clay)

เบนโทไนท์เคลย์ คือ แร่ดินเหนียวธรรมชาติกลุ่มสเมกไทต์ซึ่งมีอยู่หลายชนิดที่สำคัญ ได้แก่ มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) และเบนโทไนต์ (Bentonite) โครงสร้างของสเมกไทต์ประกอบด้วยแผ่นซิลิกา (Silica Sheet) สองแผ่น และแผ่นอะลูมินา (Alumina Sheet) หนึ่งแผ่น สอดอยู่ระหว่างกลางของแผ่นซิลิกาทั้งสองแผ่น ซิลิกอนและอะลูมินาอะตอมในแผ่นเหล่านั้นต่างเกาะยึดออกซิเจนร่วมกัน จากลักษณะพื้นผิวของแร่ดินเหนียวสเมกไทต์ธรรมชาติซึ่งมีประจุลบ ดังนั้นจึงมีสารอนินทรีย์ ประจุบวกเช่น โซเดียม (Na^+) และ แคลเซียม (Ca^{2+}) เกาะอยู่ที่พื้นผิวของสเมกไทต์



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของแร่ดินเหนียวกลุ่มสเมกไทต์ [8]

จากโครงสร้างที่เป็นซิลิกอนและอะลูมินาซึ่งมีสมบัติไดอิเล็กทริกทำให้เหมาะสมกับการนำไปเพิ่มประสิทธิภาพการต้านทานไฟฟ้าของยางพารา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.3.5.2 แบเรียมไททานเตต (Barium titanate, BaTiO₃)

แบเรียมไททานเตต มีโครงสร้างเป็นแบบเพอโรฟสไกต์ (วัสดุที่มีโครงสร้างผลึกคล้ายกับแร่แคลเซียมไทเทเนียมออกไซด์ (CaTiO₃) ซึ่งค้นพบโดยกุสตาฟ โรส (Gustav Rose) ในแถบเทือกเขา ยูรัลประเทศรัสเซียโดยที่ชื่อ Perovskite ตั้งขึ้นเพื่อเชิดชูเกียรติแก่เลฟ เพอโรฟสกี (Lev Perovski) นักอัญมณีวิทยาชาวรัสเซีย) โดยแบเรียมไททานเตตสามารถเตรียมได้จากแบเรียมคาร์บอเนต (BaCO₃) ผสมกับไทเทเนียมออกไซด์ (TiO₂) หรือแบเรียมออกไซด์ (BaO) ผสมกับไทเทเนียมออกไซด์ (TiO₂) ด้วยอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โมล แล้วเผาตั้งปฏิกิริยา



มักถูกนำไปทำเซรามิกที่ใช้ทำตัวเก็บประจุเนื่องจากมีคุณสมบัติในการต้านทานไฟฟ้าที่ดี

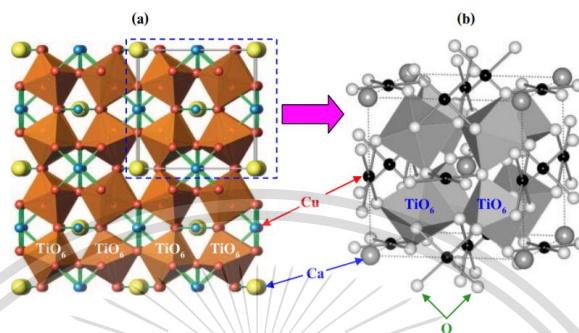
2.3.5.3 แคลเซียมคอปเปอร์ไททานเตต (Calcium copper titanate, CaCu₃Ti₄O₁₂)

แคลเซียมคอปเปอร์ไททานเตต เป็นวัสดุที่มีโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์เพอโรฟสไกต์ สูตรโครงสร้างในรูปทั่วไปของ CaCu₃Ti₄O₁₂ คือ AA'₃Mn₄O₁₂ โดย 3 ใน 4 ของตำแหน่งไอออน A ถูกแทนด้วยไอออน A' ไอออนของแคลเซียม (Ca) อยู่ ณ ตำแหน่ง A ที่แต่ละมุมของลูกบาศก์และอีกหนึ่งไอออนอยู่ที่จุดศูนย์กลางของลูกบาศก์ ภายในโครงสร้างของแต่ละลูกบาศก์ประกอบด้วยรูปทรงแปดหน้า (octahedra) ของ TiO₆ จำนวน 8 หน่วย โดยแต่ละหน่วยของทรงแปดหน้ามีลักษณะเอียงไปในทิศทางที่ก่อให้เกิดเป็นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีออกซิเจนอยู่ ณ ตำแหน่งของมุมทั้งสี่ และที่กึ่งกลางของระนาบรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสจะเป็นตำแหน่งของทองแดง (Cu) ด้วยเหตุดังกล่าวนี้โครงสร้างของ CaCu₃Ti₄O₁₂ จึงมีความเสถียรสูงกว่าวัสดุเพอโรฟสไกต์ต่างๆ ไป เนื่องจากตำแหน่ง A มีปริมาณของ Ca อยู่เพียง 25 % ดังนั้นที่ว่าง ณ ตำแหน่งของ Ca จะถูกจำกัด ส่งผลให้โครงสร้างของ CaCu₃Ti₄O₁₂ มีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่สูงมาก

โดยทั่วไปแล้ว วัสดุที่มีค่า $\epsilon > 10^3$ เป็นวัสดุที่แสดงสมบัติทางเฟอร์โรอิเล็กทริก นั่นคือสมบัติทางไดอิเล็กทริกเปลี่ยนแปลงตามโครงสร้างผลึกอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกของ CaCu₃Ti₄O₁₂ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยใช้เทคนิค neutron powder diffraction บ่งชี้ว่าวัสดุ CaCu₃Ti₄O₁₂ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกตามอุณหภูมิ แม้จะลดอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามใช้เพื่อการค้า การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทียบกับวัสดุที่มีโครงสร้างแบบเพอโรฟสไคต์ชนิดอื่นๆ เช่น BaTiO_3 ดังนั้นค่า ϵ ที่สูงมากของวัสดุ $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ จึงไม่เกี่ยวข้องกับสมบัติทางเฟอร์โรอิเล็กทริก

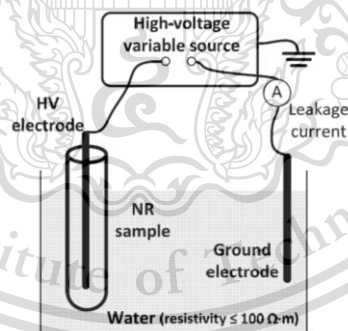


รูปที่ 2.6 (a) แบบจำลองโครงสร้างผลึก และ (b) โครงสร้างผลึกของ $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ [9]

2.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

2.4.1 การทดสอบไดอิเล็กทริก (Dielectric tests)

เป็นการทดสอบทางไฟฟ้าโดยการนำยางไปเจาะเพื่อใส่ขั้วไฟฟ้าเข้าไป นำไปใส่น้ำแล้วให้ไฟฟ้าไหลเข้าสู่ยาง จากนั้นเพิ่มความต่างศักย์ตั้งแต่ 0 โวลต์ ไปถึง ความต่างศักย์ที่เกิดการเบรกดาวน แล้ววัดกระแสที่รั่วไหลออกมาโดยวัดจากน้ำ



รูปที่ 2.7 วิธีการทดสอบไดอิเล็กทริก (Dielectric Tests) [10]

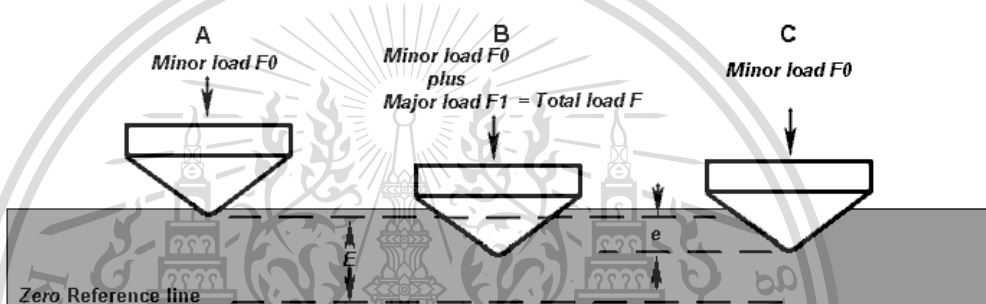
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.4.2 สมบัติความแข็ง (Hardness)

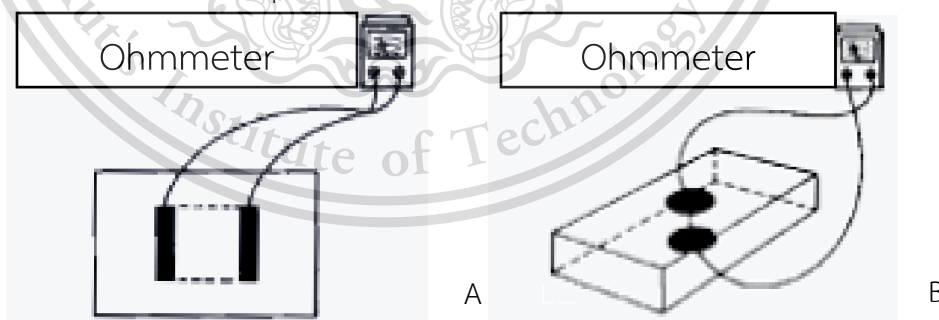
เป็นการทดสอบความแข็งของวัสดุโดยใช้วิธีการทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์ (Rockwell Hard Test) แรงที่ใช้กดมี 2 ส่วน คือ ภาระเริ่มต้น (Minor load, F_0) เป็นแรงที่ยืดหัวกดลูกบอลเหล็กชุบแข็ง หรือหัวกดเพชรไว้บนผิวโลหะที่จะวัดความแข็ง มีค่า 10 กิโลกรัมแรง เมื่อกดแรงนี้ลงไป จะเป็นการ zero set ที่หน้าปัด และ ภาระหลัก (Major load, F_1) เป็นแรงที่มากกว่า F_0 และจะกดลงอย่างต่อเนื่อง ภายหลังจากให้ภาระเริ่มต้นกับชิ้นงานจนกระทั่งถึงภาวะคงที่ไม่สามารถกดลงได้อีกให้อาภาระหลักออก แล้ววัดความแข็ง



รูปที่ 2.8 วิธีการทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์ (Rockwell Hard Test) [11]

2.4.3 สภาพต้านทานเชิงพื้นผิว และเชิงปริมาตร (Surface and volume resistivity)

การวัดสภาพต้านทานเชิงพื้นผิว และสภาพต้านทานเชิงปริมาตร สามารถวัดได้จากการใช้โอมห์มิเตอร์โดยที่จะติดให้กระแสไหลในวัสดุในทิศทางต่างกัน



รูปที่ 2.9 (A) แสดงการวัดสภาพต้านทานเชิงพื้นผิว และ (B) แสดงการวัดสภาพต้านทานเชิงปริมาตร [12]

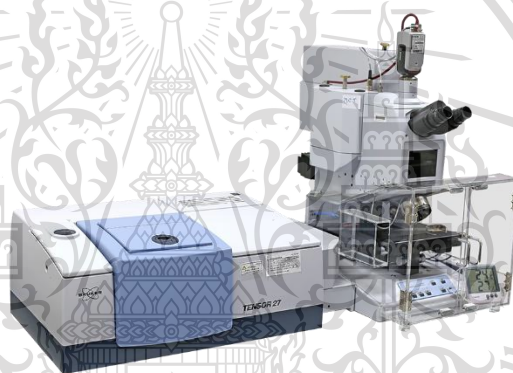
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.4.5 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectrometer; FTIR)

เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ จำแนกประเภทของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์และพันธะเคมีหรือหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุล ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ทำให้เกิดช่วงกลาง (Middle infrared region) ช่วงความยาวคลื่น (l) 2.5 – 50 mm, ช่วงเลขคลื่น 4000 - 400 cm^{-1} เป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายตัวอย่าง (nondestructive) คือไม่มีการเปลี่ยนแปลง คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของตัวอย่างหลังการวัด นอกจากนี้ยังเป็นวิธีที่สะดวก ไม่ยุ่งยาก ใช้เวลาในการวัดสั้น และมีความปลอดภัยสูงสามารถวัดตัวอย่างได้ทั้งในรูปของแข็งและของเหลว



รูปที่ 2.10 แสดงเครื่อง FTIR Micro-Spectrometer [13]

2.4.6 การวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวเนื่องจากความร้อน (Thermogravimetric analysis, TGA)

TGA เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุโดยเฉพาะพอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อน โดยการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง ตัวอย่างจะถูกวางบนจานขนาดเล็ก ซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องชั่งละเอียดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง โดยที่ทั้งหมดจะอยู่ในเตาที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและบรรยากาศได้ บรรยากาศภายในอาจจะเป็นแก๊สเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน หรือแก๊สที่มีความว่องไว เช่น อากาศ หรือ ออกซิเจน โดยน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเฉพาะของสารแต่ละชนิด โดยน้ำหนักที่หายไปนั้นเกิดมาจากการระเหย การย่อยสลาย หรือการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.11 แสดงเครื่อง Thermogravimetric analyzer [14]

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Neudys González และคณะ [10] การศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณสมบัติเป็นฉนวนของธรรมชาติยาง โดยการเพิ่มอนุภาคนาโนของ Perovskite คือ อนุภาคแบเรียมไททาเนต (BaTiO_3) ที่น้อยกว่า 1 %wt ในการทำวัลคาไนซ์กับน้ำยาง ผลการทดสอบทางไฟฟ้าพบว่าแรงดันไฟฟ้าในสายไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและกระแสไฟฟ้ารั่วลดลง ในขณะที่ความสามารถทางกลลดลง เมื่อเทียบกับการวัลคาไนซ์ที่ไม่มีการเติมสารแบเรียมไททาเนต

Jearranaipreame และคณะ [15] การศึกษาหาช่วงอุณหภูมิที่มีค่าไดอิเล็กตริกสูงสุดของวัสดุโพลีเอทิลีน ไดอิเล็กตริก โดยการเตรียมผง CCTO ขนาดอนุภาคประมาณ 30 ถึง 100 นาโนเมตร ด้วยสารละลายไข่ขาว (egg white solution) ซึ่งค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุ CCTO ที่เตรียมได้มีค่าสูงประมาณ 10^4 ถึง 2×10^4 ส่วนค่าแทนเจนต์การสูญเสียจะอยู่ระหว่าง 0.2 ถึง 30 ในช่วงอุณหภูมิ -50 ถึง 170 องศาเซลเซียส

Carlos Eduardo และคณะ [16] ได้สังเคราะห์ยางจากยางธรรมชาติผสมกับมอนอเมอริลโตนีออร์กาโนเคลย์ โดยจะใส่ออร์กาโนเคลย์ในปริมาณ 0.5, 1 และ 2 ส่วนต่อยางร้อยละโดยน้ำหนัก และทำการวัลคาไนเซชัน sulfur, dibenzothiazole disulfide (MBTS) เป็นตัวเร่ง, zinc oxide (ZnO) และ stearic acid (SA) เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยา แต่ในการวัดผลนั้นยังไม่ได้มีการวัดผลของคุณสมบัติเชิงกล และคุณสมบัติทางไฟฟ้า มีเพียงการตรวจหา functional groups ของยางที่สังเคราะห์ได้ด้วยการตรวจ FTIR และการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope / SEM) เพื่อส่องดูลักษณะผิวยางที่สังเคราะห์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

M. Zul และคณะ [17] ได้ทำการทดลองนำยางพาราจากธรรมชาติมาใช้ทำเป็นฉนวนไฟฟ้าโดยการนำไปผสมกับสารฟิลเลอร์ TiO_2 และโพลีเมอร์ชนิด LLDPE ในอัตราส่วนน้ำยาง 20 wt%, LLDPE 80 wt% และ TiO_2 0, 2, 4 ส่วนในร้อยละ พบว่าสามารถเพิ่มสมบัติด้านความต้านทานไฟฟ้าได้ดีกว่าการใช้เพียงยางพาราธรรมชาติเพียงอย่างเดียวและความต้านทานไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับปริมาณของสารฟิลเลอร์

Jordi-Roger Riba และคณะ [18] ได้ทำการศึกษาการใช้ยางพาราเป็นฉนวนสำหรับงานไฟฟ้าแรงสูง พบว่าการใช้ยางพารา ผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติที่ใช้เป็นฉนวนสำหรับการใช้งานไฟฟ้าแรงสูงจำเป็นต้องมีการควบคุมคุณภาพอย่างเข้มงวดเพื่อให้แน่ใจว่ามีลักษณะการทำงานเป็นฉนวนที่เหมาะสม แต่คุณสมบัติสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ขึ้นอยู่กับ แหล่งกำเนิดน้ำยาง การผสม และเงื่อนไขการแปรรูปเป็นต้น ดังนั้นการพัฒนาวิธีการควบคุมคุณภาพที่ใช้งานง่ายและแม่นยำเพื่อระบุตัวอย่าง NR ที่วัลคาไนซ์แล้วมีพฤติกรรมทางไดอิเล็กทริกที่เหมาะสม เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดพฤติกรรมไดอิเล็กทริกที่ไม่เหมาะสมซึ่งจะทำ แนวทางนี้ขึ้นอยู่กับข้อมูลสเปกตรัม ATR-FTIR หลายตัวแปรโดยใช้ลำดับ PCA + CVA + KNN เป็นตัวคาดการณ์ซึ่งสามารถคาดการณ์ได้แม่นยำถึง 100%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการเติมสารไตรอิเล็กทริก 3 ชนิด ได้แก่ แบเรียมไททาเนต แคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต และเบนโทไนท์เคลย์ ในระดับอนุภาคนาโนเมตร มาทำการผสมลงในน้ำยางเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์พร้อมกับการทำวัลคาไนซ์ ที่ความเข้มข้นของสารไตรอิเล็กทริก 0.25, 0.5, 1, 2 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำยาง อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เวลาในการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ 2, 3, 4 และ 5 ชั่วโมง ภายใต้ความดันบรรยากาศ และทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยมีวิธีการดำเนินการดังนี้

3.1 การทดลองหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการวัลคาไนซ์

การทดลองในครั้งนี้เพื่อศึกษาหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการวัลคาไนซ์ ให้ได้ยางที่มีลักษณะสมบูรณ์ และสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมได้

3.1.1 วัสดุและสารเคมี

1. น้ำยางเข้มข้น 60%
2. กำมะถัน
3. ซิงค์ออกไซด์
4. สารเร่งซิงก์ไดเอทิลไดโทโอคาร์บาเมต (ZDEC)
5. กรดเบนโซอิก
6. โพลีซอร์เบต(20)
7. คาร์บอนแบล็ค
8. น้ำกลั่น

3.1.2 อุปกรณ์

1. เครื่องปั่นผสมสาร
2. แม่พิมพ์ (จานแก้วเพาะเชื้อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร)
3. ชั้นวางแม่พิมพ์ (แร็ควางหลอดทดลองที่ปิดล้อมด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์)
4. ถังอบ 4 ถัง (ถังอบอะลูมิเนียมฟอยล์สี่เหลี่ยมจตุรัส 30 X 30 เซนติเมตร ติด หลอด ใส้ จำนวน 2 หลอด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 3.1 การติดตั้งหลอดไส้ ที่ใช้ในการให้ความร้อนในกล่องอบ

กล่องที่	หลอดไส้ที่ติดตั้ง 2 หลอด
1	25 วัตต์ และ 40 วัตต์
2	40 วัตต์ และ 40 วัตต์
3	60 วัตต์ และ 60 วัตต์
4	60 วัตต์ และ 100 วัตต์

3.1.2 ขั้นตอนการทดลอง

1. ผสมกรดเบนโซอิก 0.03 กรัม, กำมะถัน 4.9 กรัม, ซิงค์ออกไซด์ 4 กรัม, สารเร่ง ZDEC 4.9 กรัม, โพลีซอร์เบต(20) 3 กรัม, คาร์บอนแบล็ค 3 กรัม และน้ำกลั่น 40 มิลลิลิตร เป็นเวลา 2 นาที
2. นำส่วนผสมที่ได้ในข้อที่ 1, น้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร และน้ำยางธรรมชาติ 100 กรัม ผสมในเครื่องปั่นผสมสารด้วยความเร็ว 1,200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 25 นาที
3. หลังจากตั้งทิ้งไว้ 20 นาที ให้นำส่วนที่เกิดฟองออก แล้วกวนให้เข้ากัน และตัดแบ่งใส่แม่พิมพ์จำนวน 8 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 17 กรัม
4. นำตัวอย่างใส่ในชั้นวาง แล้วเข้ากล่องอบ เก็บตัวอย่างทุก ๆ 2, 3, 4 และ 5 ชั่วโมง
5. วัดอุณหภูมิของกล่องอบและสังเกตลักษณะของยางที่ได้

3.2 การทดลองวัดคาบไซ้ก่อนการเติมสารไดโอดีทริก

การทดลองในครั้งนี้เพื่อศึกษาความต้านทานไฟฟ้าของน้ำยางเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์ ที่ทำการวัดคาบไซ้และโดยที่ยังไม่มีการเติมสารไดโอดีทริก

3.2.1 วัสดุและสารเคมี

1. น้ำยางเข้มข้น 60%
2. กำมะถัน
3. ซิงค์ออกไซด์
4. สารเร่งซิงก์ไดเอทิลไดโทโอคาร์บาเมต (ZDEC)
5. กรดเบนโซอิก
6. โพลีซอร์เบต(20)
7. คาร์บอนแบล็ค
8. น้ำกลั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.2.2 อุปกรณ์

1. เครื่องปั่นผสมสาร
2. แม่พิมพ์ (งานแก้วเพาะเชื้อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร)
3. ชั้นวางแม่พิมพ์ (แร็ควางหลอดทดลองที่ปิดล้อมด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์)
4. กล่องอบ (กล่องอบอะลูมิเนียมฟอยล์สี่เหลี่ยมจัตุรัส 30 X 30 เซนติเมตร ติดหลอดไฟ 60 วัตต์ จำนวน 2 หลอด)

3.2.3 ขั้นตอนการทดลอง

1. ผสมกรดเบนโซอิก 0.03 กรัม, กำมะถัน 4.9 กรัม, ซิงค์ออกไซด์ 4 กรัม, สารเร่ง ZDEC 4.9 กรัม, โพลีซอร์เบต(20) 3 กรัม, คาร์บอนแบล็ค 3 กรัม และน้ำกลั่น 40 มิลลิลิตร เป็นเวลา 2 นาที
2. นำส่วนผสมที่ได้ในข้อที่ 1, น้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร และน้ำยางธรรมชาติ 100 กรัม ผสมในเครื่องปั่นผสมสารด้วยความเร็ว 1,200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 25 นาที
3. หลังจากตั้งทิ้งไว้ 20 นาที ให้นำส่วนที่เกิดฟองออก แล้วกวนให้เข้ากัน และตักแบ่งใส่แม่พิมพ์จำนวน 8 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 17 กรัม
4. นำตัวอย่างใส่ในชั้นวาง แล้วเข้ากล่องอบ เก็บตัวอย่างทุก ๆ 2, 3, 4 และ 5 ชั่วโมง
5. วิเคราะห์ผลตามหัวข้อ 3.4

3.3 การเติมสารไดรอิเล็กทริก

ในการทดลองนี้ศึกษาความต้านทานไฟฟ้าในน้ำยางเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์ ที่มีการวัลคาไนซ์ ด้วยการเติมสารไดรอิเล็กทริก 3 ชนิด ได้แก่ แบเรียมไททาเนต แคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต และเบนโทไนท์เคลย์ ในระดับอนุภาคนาโนเมตร ที่ความเข้มข้นของสารไดรอิเล็กทริก 0.25, 0.5, 1, 2 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำยาง อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เวลาในการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ 2, 3, 4 และ 5 ชั่วโมง ภายใต้ความดันบรรยากาศ

3.3.1 วัสดุและสารเคมี

1. น้ำยางเข้มข้น 60%
2. กำมะถัน
3. ซิงค์ออกไซด์
4. สารเร่งซิงก์ไดเอทิลไดไทโอคาร์บาเมต (ZDEC)
5. กรดเบนโซอิก

6. โพลีซอร์เบต(20)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.3.1 วัสดุและสารเคมี (ต่อ)

7. คาร์บอนแบล็ค
8. น้ำกลั่น
9. แบริยมไททาเนต
10. แคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต
11. เบนโทไนท์เคลย์

3.3.2 อุปกรณ์

1. เครื่องปั่นผสมสาร
2. แม่พิมพ์ (งานแก้วเพาะเชื้อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร)
3. ชั้นวางแม่พิมพ์ (แบริความลอดทดลองที่ปิดล้อมด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์)
4. ก่ออบ (ก่อบอบอะลูมิเนียมฟอยล์สี่เหลี่ยมจัตุรัส 30 X 30 เซนติเมตร ติดหลอดไฟ 60 วัตต์ จำนวน 2 หลอด)

3.3.3 ขั้นตอนการทดลอง

1. ผสมกรดเบนโซอิก 0.03 กรัม, กำมะถัน 4.9 กรัม, ซิงค์ออกไซด์ 4 กรัม, สารเร่ง ZDEC 4.9 กรัม, โพลีซอร์เบต(20) 3 กรัม, คาร์บอนแบล็ค 3 กรัม, น้ำกลั่น 40 มิลลิลิตร และสารไดอิเล็กทริกตามความเข้มข้นที่ต้องการ เป็นเวลา 2 นาที
2. นำส่วนผสมที่ได้ในข้อที่ 1, น้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร และน้ำยางธรรมชาติ 100 กรัม ผสมในเครื่องปั่นผสมสารด้วยความเร็ว 1,200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 25 นาที
3. หลังจากตั้งทิ้งไว้ 20 นาที ให้นำส่วนผสมที่ก่อบออก แล้วกวนให้เข้ากัน และตักแบ่งใส่แม่พิมพ์ จำนวน 8 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 17 กรัม
4. นำตัวอย่างใส่ในชั้นวาง แล้วเข้าก่อบ เก็บตัวอย่างทุก ๆ 2, 3, 4 และ 5 ชั่วโมง
5. วิเคราะห์ผลตามหัวข้อ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

การทดสอบสภาพต้านทานเชิงปริมาตร (Volume Resistivity)

วิธีทดสอบสภาพต้านทานเชิงปริมาตรมีประโยชน์สำหรับการประเมินการกระจายตัวของสารเติมแต่งที่เป็นสารเพิ่มความต้านทานไฟฟ้าตลอดทั้งเมทริกซ์โพลีเมอร์ สภาพต้านทานเชิงปริมาตรทำการทดสอบในลักษณะเดียวกันกับสภาพต้านทานเชิงพื้นผิวอย่างไรก็ตามอิเล็กโทรดจะถูกวางไว้ที่ด้านตรงข้ามของตัวอย่างทดสอบ

$$R_V = R \frac{A}{T} \quad (3.5)$$

$$A = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \quad (3.6)$$

โดยที่ R_V คือ สภาพต้านทานเชิงพื้นผิว (Volume resistivity) หน่วยเป็น $\Omega \cdot \text{cm}$

R คือ ค่าความต้านทานที่วัดได้ (เครื่องมือลติมิเตอร์) หน่วยเป็น Ω

A คือ พื้นที่ของขั้วอิเล็กโทรด หน่วยเป็น cm^2

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วอิเล็กโทรด หน่วยเป็น cm

T คือ ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดหรือความหนาของตัวอย่างทดสอบ หน่วยเป็น cm



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.1 ภาพแสดงตัวอย่างการวัดขนาดของ (ก) เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นตัวอย่าง,
(ข) ความหนาของชิ้นตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

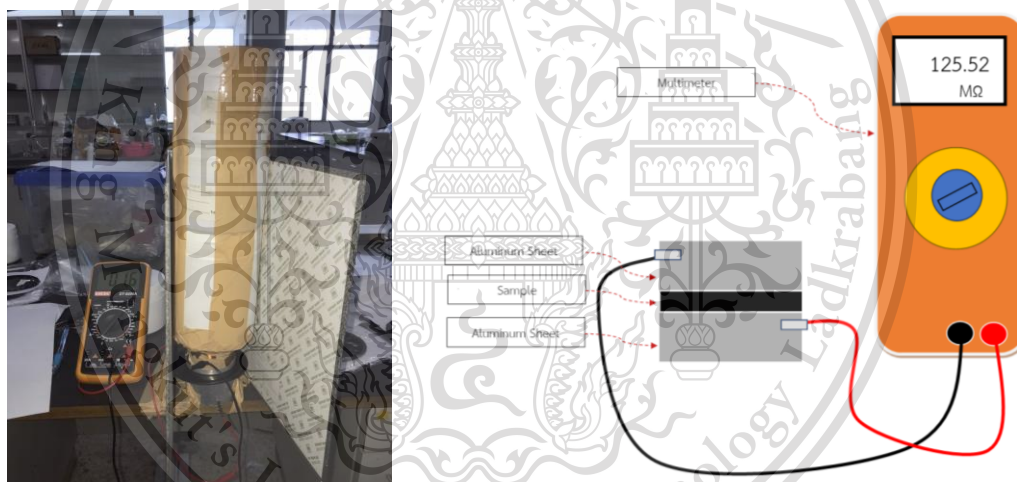


(ค)



(ง)

รูปที่ 3.2 (ค) การวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วอิเล็กโทรด (แผ่นอะลูมิเนียม),
(ง) เครื่องวัดความต้านทาน (มัลติมิเตอร์)



รูปที่ 3.3 แสดงวิธีการตรวจสอบค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน และวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการทดลองหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติ

ตารางที่ 4.1 ผลของลักษณะของยางธรรมชาติที่ผ่านการอบในแต่ละอุณหภูมิ

กล่องที่	อุณหภูมิของกล่องอบ (องศาเซลเซียส)	เวลาในการ อบ (ชั่วโมง)	ลักษณะของยางธรรมชาติที่ผ่านการอบ
1	65	2	เป็นของเหลวทั้งหมด
		3	เป็นของเหลวและบริเวณขอบจับตัวเล็กน้อย
		4	เป็นของเหลวและบริเวณขอบจับตัวแข็งมากขึ้น
		5	เป็นของเหลวและผิวด้านบนเริ่มจับตัวกัน
2	70	2	เป็นของเหลวและผิวด้านบนเริ่มจับตัวกัน
		3	เป็นของเหลวและผิวด้านบนเริ่มจับแข็งทั้งหมด
		4	ยางแข็งเกือบทั้งหมด
		5	ยางแข็งทั้งหมด
3	75	2	เป็นของเหลวและผิวด้านบนเริ่มจับแข็งทั้งหมด
		3	ยางเริ่มเป็นของแข็งเกือบทั้งหมด
		4	ยางแข็งทั้งหมด
		5	ยางแข็งทั้งหมด
4	95	2	ยางเริ่มเป็นของแข็งเกือบทั้งหมด
		3	ยางแข็งทั้งหมด
		4	ยางแข็งทั้งหมดและเริ่มแตกบริเวณผิวด้านหน้า
		5	ยางแข็งทั้งหมดและแตกบริเวณผิวด้านหน้า

จากการทดลองอบยางในกล่องที่ปิดล้อมด้วยอะลูมิเนียม และมีหลอดไส้สองหลอดเป็นตัวให้ความร้อนในแต่ละกล่อง โดยที่กล่องอบที่ 1 ลักษณะของยางที่เวลาต่างๆ ยังเป็นของเหลวเกือบทั้งหมด เอกสารนี้เป็นกล่องอบที่ 2 ลักษณะของยางจะแข็งทั้งหมดเพียงเวลาที่ 5 ชั่วโมง กล่องอบที่ 3 ลักษณะของยางจะเริ่มไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

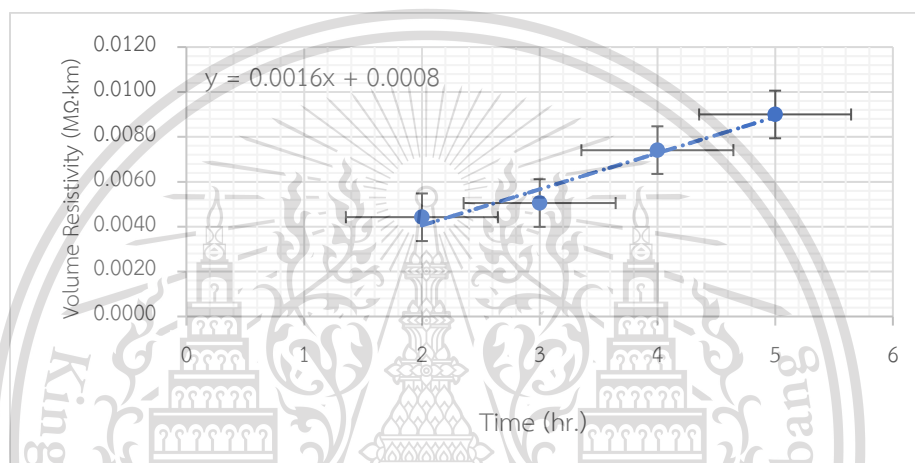
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

แข่งตั้งแต่เวลาเริ่มต้นของการเก็บผลจนถึงเวลาสุดท้าย และกล่องที่ 4 ลักษณะของยางจะแข่งตั้งแต่เริ่มต้น แล้วผิวหน้าของยางค่อยๆ มีรอยแตกเพิ่มขึ้น ดังนั้น กล่องที่ 4 เหมาะสมที่สุดในการวัดค่าไนซ์ของยางคือ กล่องที่ 3 เนื่องจากการแข่งตัวของยางที่เหมาะสมกับระยะเวลาในการวัดค่าไนซ์ของยาง และลักษณะยางที่ได้ มีความเรียบเนียนสม่ำเสมอ

4.2 ผลการตรวจสอบค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร

4.2.1 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรของยางธรรมชาติ



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร (Volume Resistivity) กับเวลาในการอบ (Time) ของยางธรรมชาติ

จากรูปที่ 4.1 พบว่าค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรของยางธรรมชาติ มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะเวลาในการวัดค่าไนซ์ โดยอัตราการเพิ่มขึ้นของสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรเท่ากับ 0.0016

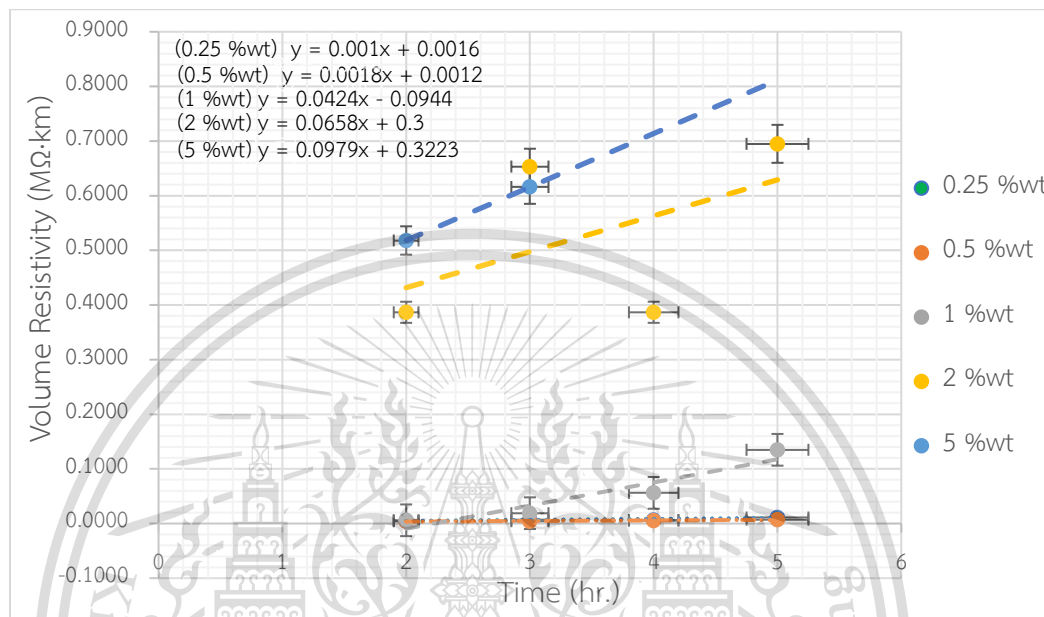
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.2.2 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรของยางธรรมชาติเมื่อเพิ่มสารไดอิเล็กตริก

1) แคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO)



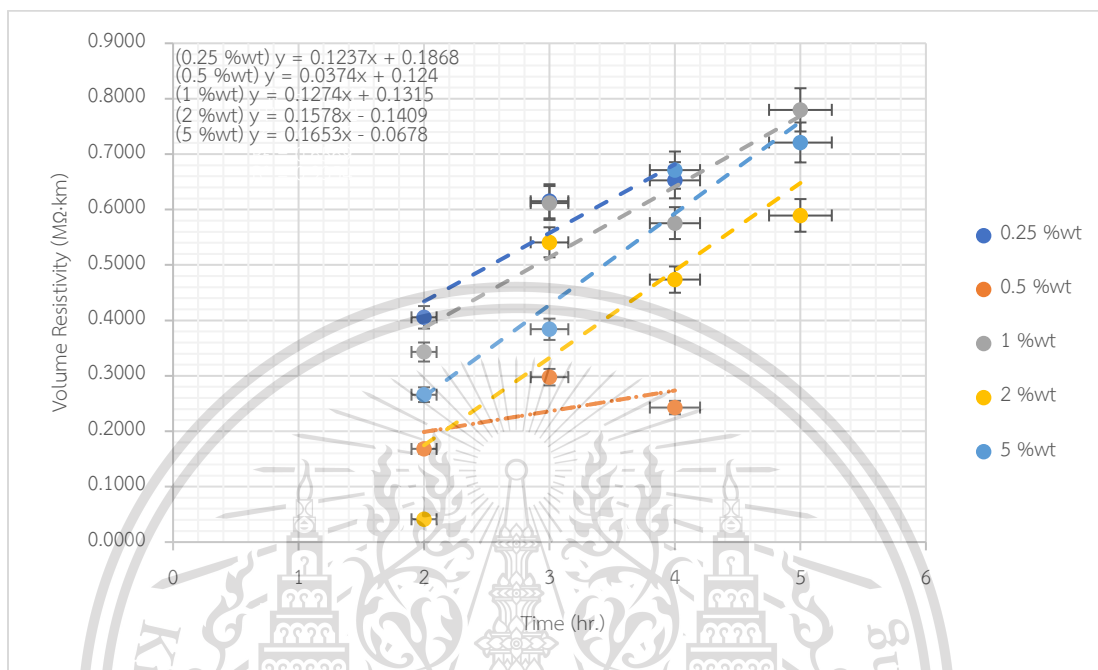
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร (Volume Resistivity) กับเวลาในการอบ (Time) ของยางธรรมชาติผสมแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO)

จากรูปที่ 4.2 ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรเมื่อเทียบกับเวลาในแต่ละความเข้มข้น โดย ที่ความเข้มข้นของแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) 0.25 และ 0.5 %wt ค่าสภาพความต้านทานเชิงปริมาตรจะมีค่าคงที่ประมาณ 0.01 MΩ·km และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นที่ 1 และ 5 %wt ค่าสภาพความต้านทานเชิงปริมาตรก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาในการอบอย่างคงที่ ซึ่งที่ความเข้มข้น 2 %wt ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรไม่คงที่ อันเนื่องมาจากลักษณะของยางที่ได้มีลักษณะไม่สมบูรณ์ ซึ่งส่งผลให้การตรวจมีความคลาดเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2) แบเรียมไททาเนต (BaTiO₃)

รูปที่ 4.3 กราฟแสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร (Volume Resistivity) กับเวลาในการอบ (Time) ของยางธรรมชาติผสมแบเรียมไททาเนต (BaTiO₃)

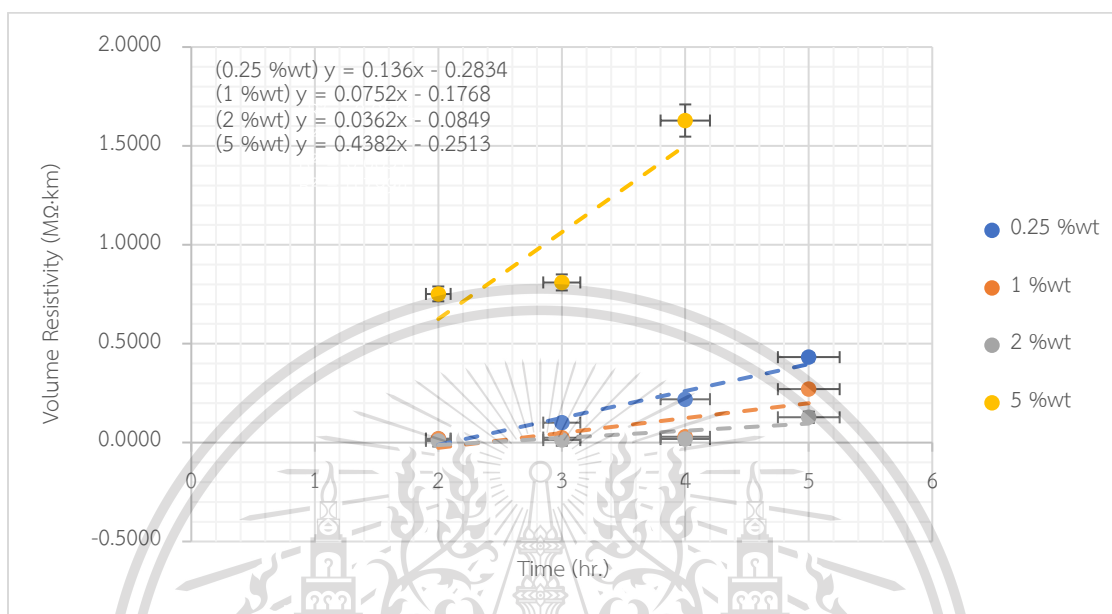
จากรูปที่ 4.3 ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรเมื่อเทียบกับเวลาในแต่ละความเข้มข้น โดย ที่ความเข้มข้นของแบเรียมไททาเนต (BaTiO₃) 0.25, 1, 2 และ 5 %wt มีอัตราการเพิ่มของค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการอบ และเมื่อความเข้มข้นของแบเรียมไททาเนตเพิ่มขึ้นค่าสภาพความต้านทานเชิงปริมาตรก็จะมีค่าลดลง ยกเว้นกรณีที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0.5 %wt ค่าสภาพความต้านทานเชิงปริมาตรจากกราฟมีค่าน้อยที่สุดเนื่องจาก ที่เวลาการอบ 5 ชั่วโมง ค่าสภาพความต้านทานไม่สามารถหาได้ เนื่องจากเกินค่าที่สามารถวัดได้จากเครื่องมัลติมิเตอร์ 200 MΩ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3) เบนโทไนท์เคลย์ (B-Clay)



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร (Volume Resistivity) กับเวลาในการอบ (Time) ของยางธรรมชาติเมื่อเติมเบนโทไนท์เคลย์ (B-Clay)

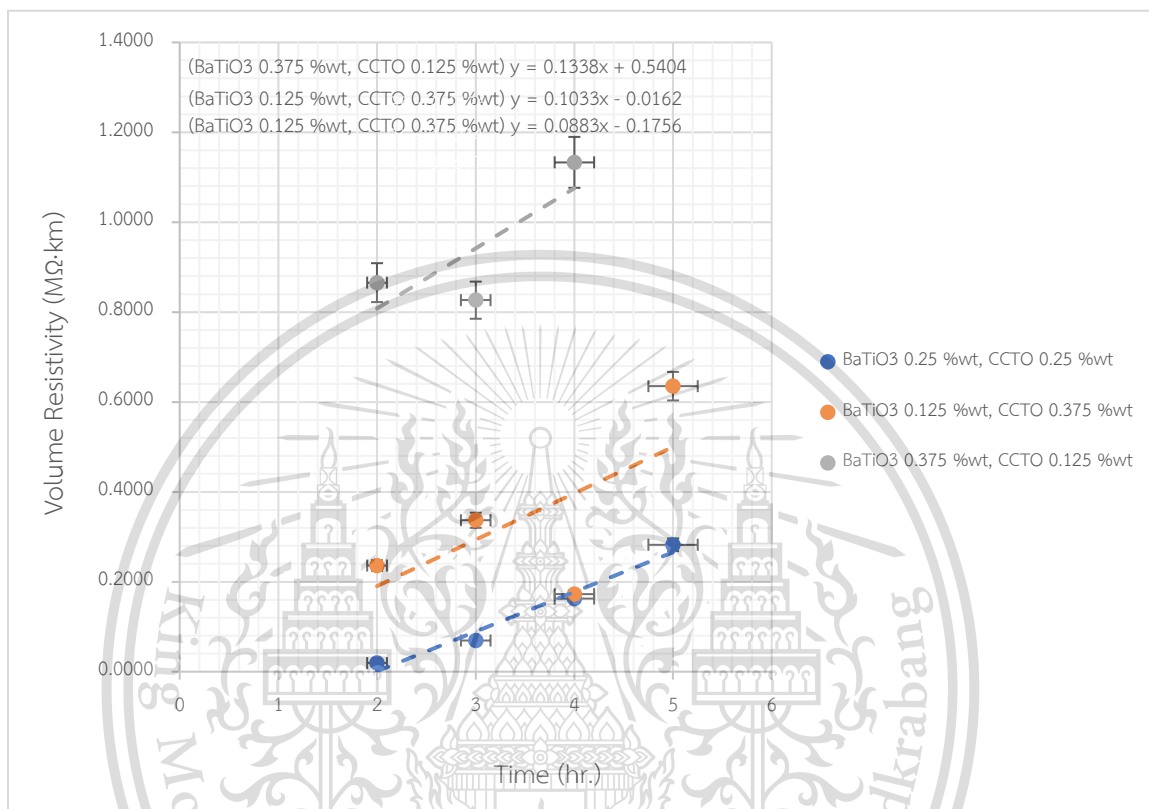
จากรูปที่ 4.4 ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรเมื่อเทียบกับเวลาในแต่ละความเข้มข้น โดย ที่ความเข้มข้นของเบนโทไนท์เคลย์ (B-Clay) 0.25, 1, 2 และ 5 %wt มีอัตราการของค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการอบ และเมื่อเทียบเวลาในการอบในแต่ละช่วงเวลาค่าสภาพความต้านทานเชิงปริมาตรที่ 5 %wt ก็จะมีมากกว่าความเข้มข้นที่น้อยกว่าเป็นอย่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4) ผสมระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนตและแบเรียมไททาเนต



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร (Volume Resistivity) กับเวลาในการอบ (Time) ของยางธรรมชาติเมื่อเพิ่มแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) และแบเรียมไททาเนต (BaTiO₃)

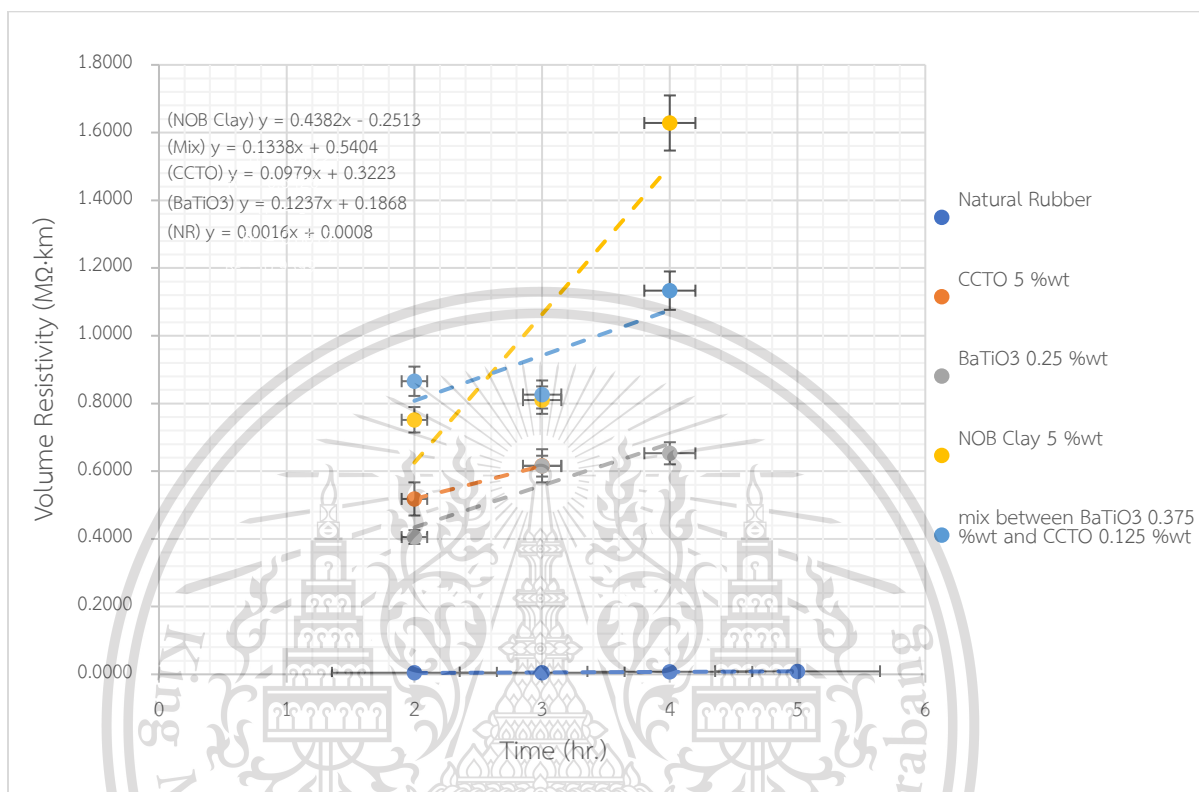
จากรูปที่ 4.5 ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรเมื่อเทียบกับเวลาในแต่ละความเข้มข้นของยางที่เติมสารแบเรียมไททาเนต (BaTiO₃) และ แคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ในอัตราส่วนต่างๆโดยให้ปริมาณรวมของสารที่เติมคงที่ที่ 0.5 %wt พบว่าค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการอบ และจะมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรที่มากที่สุดที่แคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต 0.125 %wt ผสมกับแบเรียมไททาเนต 0.375 %wt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.2.3 เปรียบเทียบค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรของยางธรรมชาติก่อนและหลังเพิ่มสารไดอิเล็กตริก



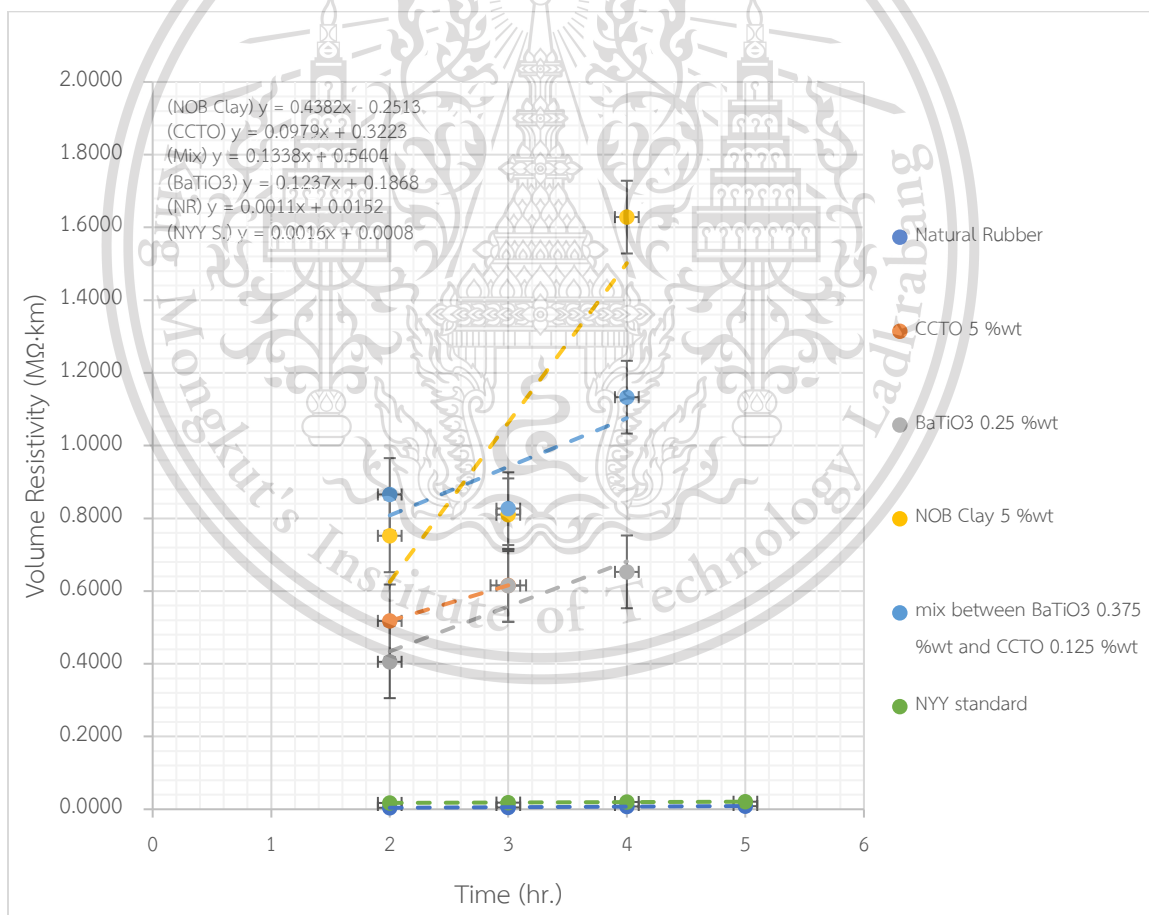
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร (Volume Resistivity) กับเวลาในการอบ (Time) ของยางธรรมชาติก่อนและหลังเพิ่มสารไดอิเล็กตริก

จากกราฟจะเห็นได้ว่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ โดยในการผสมแต่ละอัตราส่วนนั้นระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ที่ทำให้สภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรมากที่สุดคือ 5 ชั่วโมง โดยยางธรรมชาติจะมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรที่มากที่สุดคือ 0.0090 MΩ·km ยางธรรมชาติที่เติมแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) จะมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรที่มากที่สุดที่อัตราส่วน 5 %wt และมีค่าเป็น 0.6159 MΩ·km ยางธรรมชาติที่เติมแบเรียมไททาเนต (BaTiO₃) จะมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรที่มากที่สุดที่อัตราส่วน 0.25 %wt และมีค่าเป็น 0.9230 MΩ·km ยางธรรมชาติที่เติมเบนโทไนท์เคลย์ (Bentonite Clay) จะมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรที่มากที่สุดที่อัตราส่วน 5 %wt และมีค่าเป็น 1.6284 MΩ·km และยางธรรมชาติที่เติมแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) และแบเรียมไททาเนต (BaTiO₃) จะมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรที่มากที่สุดที่แคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต 0.125 %wt ผสมกับแบเรียมไททาเนต 0.375 %wt มีค่าเป็น 1.1332 MΩ·km

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุจะลดลงตามค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (Degree of Crystallinity) ซึ่งมีวิธีการทดสอบเช่น เทคนิคการวัดการกระเจิงของรังสีเอกซ์ที่มุมโต (wide angle X-ray scattering, WAXS) หรือ เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction)[10] เป็นต้น แต่เนื่องจากยังไม่ได้ทำการทดสอบ จึงสันนิษฐานว่า ยางธรรมชาติที่เติมแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) มีค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกสูงที่สุดจึงทำให้มีค่าความต้านทานไฟฟ้าน้อยที่สุด ค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกรองลงมาคือ ยางธรรมชาติที่เติมแบเรียมไททาเนต (BaTiO₃) และ ยางธรรมชาติที่เติมเบนโทไนท์เคลย์ (Bentonite Clay) ตามลำดับ จึงทำให้ความต้านทานไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น

4.2.4 เปรียบเทียบค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรจากการทดลองกับค่ามาตรฐานของ สายไฟฟ้าหุ้มฉนวนพอลิไวไนลคลอไรด์ ชนิด NYY แกนเดี่ยว (มอก. 11 เล่ม 101 พ.ศ. 2559)



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร (Volume Resistivity) กับเวลาในการอบ (Time) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากกราฟจะเป็นการแสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรของการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานที่ต่ำที่สุดของฉนวนไฟฟ้าพอลิไวนิลคลอไรด์ ชนิด NYY แกนเดี่ยว จะเห็นว่าค่ามาตรฐานนั้นมีค่าใกล้เคียงกับยางธรรมชาติที่ผ่านการวัลคาไนซ์และมีค่าคงที่ แต่จะน้อยกว่ายางธรรมชาติที่ผ่านการเติมสารไดอิล็กทริกและทำวัลคาไนซ์เป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเวลาการวัลคาไนซ์เพิ่มมากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาวิธีในการเพิ่มประสิทธิภาพด้านการป้องกันไฟฟ้าหรือการเป็นฉนวนไฟฟ้าของยางธรรมชาติเพื่อใช้ในการทำเป็นฉนวนหุ้มสายไฟ โดยจะแบ่งการศึกษาใน 3 ส่วนหลักๆด้วยกัน คือ ศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำวัลคาไนซ์ ศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการทำวัลคาไนซ์ ศึกษาอิทธิพลของสารไดอิล็กทริกแต่ละชนิดและอัตราส่วนในการผสมว่ามีผลต่อการเพิ่มความสามารถในการต้านทานไฟฟ้าของยางอย่างไร

จากการศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำวัลคาไนซ์ พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการวัลคาไนซ์ในกระบวนการนี้มากที่สุดคือ 75 องศาเซลเซียส เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่ยางแข็งตัวในระยะเวลาไม่นานจนเกินไป และผิวยางที่แข็งตัวจะไม่มีรอยแตกบริเวณผิวหน้าของยาง

จากการศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการทำวัลคาไนซ์ พบว่ายิ่งระยะเวลาในการวัลคาไนซ์มากขึ้นจะทำให้ยางมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรเพิ่มมากขึ้น โดยในกระบวนการนี้ระยะเวลาที่เหมาะสมที่สุดคือ 5 ชั่วโมง

จากการศึกษาอิทธิพลของสารไดอิล็กทริกแต่ละชนิดและอัตราส่วนในการผสม พบว่าการเติมสารไดอิล็กทริกนั้นสามารถเพิ่มค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรของยางธรรมชาติได้ดี แต่จากการทดลองพบว่าสารที่มีค่าคงที่ไดอิล็กทริกต่ำที่สุดซึ่งก็คือเบนโทไนท์เคลย์ จะให้สภาพต้านทานไฟฟ้าที่มากที่สุด โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต และเบนโทไนท์เคลย์ ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรก็มีค่าเพิ่มขึ้น แต่แบเรียมไททาเนตจะมีค่าสภาพความต้านทานเชิงปริมาตรสูงสุดที่ความเข้มข้น 0.25 เปอร์เซ็นต์โดยมวลของยางธรรมชาติและการทดลองผสมระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนตกับแบเรียมไททาเนตจะได้ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรสูงที่สุดที่อัตราส่วนแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต 0.125 เปอร์เซ็นต์โดยมวลของยางธรรมชาติกับแบเรียมไททาเนต 0.375 เปอร์เซ็นต์โดยมวลของยางธรรมชาติ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการทดลองการวัลคาไนซ์ของยาง อาจปรับแก้ในการลดสารหน่วงปฏิกิริยาลงเพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้นลดระยะเวลาในการอบลง

5.2.2 ในการทดลองการวัลคาไนซ์ของยาง อาจปรับแก้ด้วยการเพิ่มระยะเวลาในการวัลคาไนซ์เพื่อใช้ในการดูแนวโน้มของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรว่าจะมีค่าเพิ่มขึ้นต่อไปเรื่อยๆหรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

5.2.3 ในงานวิจัยนี้ยังสามารถใช้วิธีการวิเคราะห์อื่นๆร่วมด้วยเพื่อดูความเหมาะสมในการทำเป็นฉนวนสายไฟ เช่น การวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวเนื่องจากความร้อน (Thermogravimetric analysis, TGA), การทดสอบไดอิเล็กตริก(Dielectric Test) เป็นต้น

5.2.4 ในการทดลองควรใช้กระบวนการจากยางแผ่นแทนการใช้กระบวนการจากน้ำยาง เนื่องจากง่ายต่อการทดลอง และสามารถลดต้นทุนผันแปรได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บรรณานุกรม

- [1] R. Dinsmore, "Rubber Chemistry.," *Ind. Eng. Chem.*, vol. 43, no. 4, pp. 795–803, 1951.
- [2] N. González, M. Custal, S. Lalaouna, J. R. Riba, and E. Armelin, "Improvement of dielectric properties of natural rubber by adding perovskite nanoparticles," *Eur. Polym. J.*, vol. 75, pp. 210–222, 2016.
- [3] G. Whitby and H. Simmons, "Vulcanization Accelerators-I," *Ind. Eng. Chem.*, vol. 17, no. 9, pp. 931–935, 1925.
- [4] T. Innovation, "Carbon Black and Plastics," vol. 3, no. 1, pp. 1–3, 2015.
- [5] M. Nursalam and A. Fallis, "Structures and Electrical Properties of BaTiO₃ Based Ferroelectric Doped Lanthanum Oxide," *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2013.
- [6] L. Largette and R. Pasquier, "A review of the kinetics adsorption models and their application to the adsorption of lead by an activated carbon," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 109, pp. 495–504, 2016.
- [7] Thanin Putjuso, "Giant Dielectric Material," vol. 25, no. 8, pp. 8–10, 1982.
- [8] D. Kireeva, B. Popovicheva, D. Khokhlova, and K. Shoniya, "Laboratory simulation of the interaction of water molecules with carbonaceous aerosols in the atmosphere," *Moscow Univ. Phys. Bull.*, vol. 65, no. 6, pp. 510–515, 2010.
- [9] Prasit Thongbai, "Future Material for Fabricating Small-Size Capacitors," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 41, no. 1, pp. 67–79, 2013.
- [10] N. Gonzalez, J. R. Riba, M. Dels Angels Custal, and E. Armelin, "Improvement of insulation effectiveness of natural rubber by adding hydroxyl-functionalized barium titanate nanoparticles," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 24, no. 5, pp. 2881–2889, 2017.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในงานที่ออกวารสารนี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- [11] Gordon England, “Rockwell Hardness Test, สืบค้นเมื่อวันที่ 4 ธ.ค. 63. สืบค้นจาก <https://www.gordonengland.co.uk/hardness/rockwell.htm>.
- [12] Production Automation Corporation Resistivity, สืบค้นเมื่อวันที่ 15 ต.ค. 63. สืบค้นจาก <https://www.gotopac.com/art-esd-resistivity>.
- [13] สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เครื่องฟูลูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรไมโครสโคป (FTIR Micro-Spectrometer), สืบค้นเมื่อวันที่ 28 พ.ค. 63. สืบค้นจาก <https://www.slri.or.th/bdd/th/>.
- [14] Dr. Janjira Jabsin, “A Kinetic Study of Thermal Degradation of Polybenzoxazine-Dianhydride Copolymer,” *Srinakharinwirot Univ.*, vol. 52, pp. 19–20, 2011.
- [15] S. Jeeranaiprepame, N. Jangpromma, and W. Khunkitti, “Anti-aging bioactivities of egg white hydrolysates,” *Songklanakarin J. Sci. Technol.*, vol. 41, no. 4, pp. 924–933, 2019.
- [16] C. Pinto, A. Rigail and E. Mendoza, “Synthesis and characterization of natural rubber/clay nanocomposite to develop electrical safety gloves,” *Mater. Today Proc.*, vol. 6, pp. 39–115, 2020.
- [17] M. Zul and H. Makmud, “Natural Rubber as Electrical Insulator : A Review *Akademia Baru Natural Rubber as Electrical Insulator : Review*,” vol. 6, no. February 2015, pp. 28–42, 2016.
- [18] J. Riba, “Identification of natural rubber samples for high-voltage insulation applications,” *Univ. Politècnica Catalunya*, vol. 124, pp. 197–205, 2019.
- [19] พระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ. 2561, “ข้อกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม สายไฟฟ้าหุ้มฉนวนพอลิไวนิลคลอไรด์ (มอก. 11 เล่ม 101-2559),” ฉบับที่ 5093, pp. 0–16, 2561.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ภาคผนวก ก

ข้อมูลดิบ

1) ข้อมูลของสภาพต้านทานเชิงปริมาตร (Volume Resistivity)

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลของสภาพต้านทานเชิงปริมาตร (Volume Resistivity) ยางธรรมชาติของตัวอย่าง

เวลา (ชั่วโมง)	ความหนา (มิลลิเมตร)	พื้นที่หน้าตัด (ตารางมิลลิเมตร)	ความต้านทาน (เมกะโอห์ม)	สภาพต้านทานเชิงปริมาตร ($M\Omega \cdot km$)
2	0.95	2999.62	1.40	0.0044
3	0.95	2999.62	1.60	0.0051
4	0.85	2999.62	2.10	0.0074
5	0.80	2999.62	2.40	0.0090

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลของสภาพต้านทานเชิงปริมาตร (Volume Resistivity) ของตัวอย่างยางธรรมชาติเมื่อเพิ่มแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต

ความเข้มข้น (ร้อยละโดยมวล ต่อปริมาตร)	เวลา (ชั่วโมง)	ความหนา (มิลลิเมตร)	พื้นที่หน้าตัด (ตารางมิลลิเมตร)	ความต้านทาน (เมกะโอห์ม)	สภาพต้านทาน เชิงปริมาตร ($M\Omega \cdot km$)
0.25	2	1.00	2999.62	1.67	0.0050
	3	0.90	2999.62	2.10	0.0070
	4	0.96	2999.62	2.10	0.0066
	5	0.95	2999.62	3.50	0.0111
0.5	2	0.95	2999.62	1.30	0.0041
	3	1.00	2999.62	1.40	0.0042
	4	1.00	2999.62	1.80	0.0054
	5	1.05	2999.62	2.50	0.0071

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ความเข้มข้น (ร้อยละโดยมวล ต่อปริมาตร)	เวลา (ชั่วโมง)	ความหนา (มิลลิเมตร)	พื้นที่หน้าตัด (ตารางมิลลิเมตร)	ความต้านทาน (เมกะโอห์ม)	สภาพต้านทาน เชิงปริมาตร ($M\Omega \cdot km$)
1	2	0.90	2999.62	1.80	0.0060
	3	0.95	2999.62	6.00	0.0189
	4	0.85	2999.62	15.90	0.0561
	5	1.00	2999.62	45.00	0.1350
2	2	0.45	2999.62	58.00	0.3866
	3	0.50	2999.62	108.90	0.6533
	4	0.90	2999.62	116.00	0.3866
	5	0.60	2999.62	139.00	0.6949
5	2	0.85	2999.62	146.80	0.5181
	3	0.75	2999.62	154.00	0.6159
	4	0.75	2999.62	เกินค่าการตรวจสอบ	-
	5	0.70	2999.62	เกินค่าการตรวจสอบ	-

หมายเหตุ: เกินค่าการตรวจสอบ คือ เกินค่าการตรวจสอบของเครื่องมือวัดที่สามารถตรวจได้ไม่เกิน 200 $M\Omega \cdot km$

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลของสภาพต้านทานเชิงปริมาตร (Volume Resistivity) ของตัวอย่างยางธรรมชาติเมื่อเพิ่มแบเรียมไททาเนต

ความเข้มข้น (ร้อยละโดย มวลต่อ ปริมาตร)	เวลา (ชั่วโมง)	ความหนา (มิลลิเมตร)	พื้นที่หน้าตัด (ตารางมิลลิเมตร)	ความต้านทาน (เมกะโอห์ม)	สภาพต้านทาน เชิงปริมาตร ($M\Omega \cdot km$)
0.25	2	0.50	2999.62	67.60	0.4055
	3	0.80	2999.62	164.00	0.6149
	4	0.85	2999.62	185.00	0.6529
	5	0.65	2999.62	200.00	0.9230

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ความเข้มข้น (ร้อยละโดย มวลต่อ ปริมาตร)	เวลา (ชั่วโมง)	ความหนา (มิลลิเมตร)	พื้นที่หน้าตัด (ตารางมิลลิเมตร)	ความต้านทาน (เมกะโอห์ม)	สภาพต้านทาน เชิงปริมาตร (M Ω ·km)
0.5	2	0.75	2999.62	42.00	0.1680
	3	0.50	2999.62	49.60	0.2976
	4	0.65	2999.62	52.60	0.2427
	5	0.85	2999.62	เกินค่าการตรวจสอบ	-
1	2	0.60	2999.62	68.60	0.3430
	3	0.50	2999.62	102.00	0.6119
	4	0.80	2999.62	153.50	0.5756
	5	0.75	2999.62	เกินค่าการตรวจสอบ	-
2	2	0.70	2999.62	9.60	0.0411
	3	0.90	2999.62	162.30	0.5409
	4	0.95	2999.62	150.00	0.4736
	5	1.00	2999.62	196.50	0.5894
5	2	0.60	2999.62	53.20	0.2660
	3	0.50	2999.62	64.00	0.3840
	4	0.40	2999.62	89.50	0.6712
	5	0.52	2999.62	125.00	0.7211

หมายเหตุ: เกินค่าการตรวจสอบ คือ เกินค่าการตรวจสอบของเครื่องมัลติมิเตอร์ที่สามารถตรวจได้ไม่เกิน 200 M Ω ·km

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลของสภาพต้านทานเชิงปริมาตร (Volume Resistivity) ของตัวอย่างยางธรรมชาติเมื่อเพิ่มเบนโทไนท์เคลย์

ความเข้มข้น (ร้อยละโดย มวลต่อ ปริมาตร)	เวลา (ชั่วโมง)	ความหนา (มิลลิเมตร)	พื้นที่หน้าตัด (ตารางมิลลิเมตร)	ความต้านทาน (เมกะโอห์ม)	สภาพต้านทาน เชิงปริมาตร ($M\Omega \cdot km$)
0.5	2	0.70	2999.62	4.20	0.0180
	3	0.70	2999.62	23.60	0.1011
	4	0.50	2999.62	36.60	0.2196
	5	0.40	2999.62	57.60	0.4319
1	2	0.80	2999.62	5.50	0.0206
	3	1.00	2999.62	8.50	0.0255
	4	1.00	2999.62	9.70	0.0291
	5	0.50	2999.62	45.00	0.2700
2	2	0.75	2999.62	2.20	0.0088
	3	0.75	2999.62	3.20	0.0128
	4	0.55	2999.62	3.30	0.0180
	5	0.50	2999.62	21.30	0.1278
5	2	0.75	2999.62	188.00	0.7519
	3	0.55	2999.62	148.50	0.8099
	4	0.35	2999.62	190.00	1.6284
	5	0.30	2999.62	เกินค่าการตรวจสอบ	-

หมายเหตุ: เกินค่าการตรวจสอบ คือ เกินค่าการตรวจสอบของเครื่องมือวัดที่สามารถตรวจได้ไม่เกิน 200 $M\Omega \cdot km$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลของสภาพต้านทานเชิงปริมาตร (Volume Resistivity) ของตัวอย่างยางธรรมชาติ
เพิ่มแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต และแบเรียมไททาเนต

ความเข้มข้น (ร้อยละโดยมวล ต่อปริมาตร)	เวลา (ชั่วโมง)	ความหนา (มิลลิเมตร)	พื้นที่หน้าตัด (ตาราง มิลลิเมตร)	ความต้านทาน (เมกะโอห์ม)	สภาพต้านทานเชิง ปริมาตร ($M\Omega \cdot km$)
BaTiO ₃ = 0.25, CCTO = 0.25	2	0.50	2999.62	3.20	0.0192
	3	0.80	2999.62	18.50	0.0694
	4	0.70	2999.62	38.00	0.1628
	5	0.80	2999.62	75.30	0.2823
BaTiO ₃ = 0.125, CCTO = 0.375	2	0.40	2999.62	31.50	0.2362
	3	0.30	2999.62	33.70	0.3370
	4	0.60	2999.62	34.50	0.1725
	5	0.45	2999.62	95.30	0.6353
BaTiO ₃ = 0.375, CCTO = 0.125	2	0.35	2999.62	101.00	0.8656
	3	0.45	2999.62	124.00	0.8266
	4	0.45	2999.62	170.00	1.1332
	5	0.40	2999.62	เกินค่าการตรวจสอบ	-

หมายเหตุ: เกินค่าการตรวจสอบ คือ เกินค่าการตรวจสอบของเครื่องมือวัดที่สามารถตรวจได้ไม่เกิน 200 $M\Omega \cdot km$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2) ข้อมูลของสภาพต้านทานเชิงปริมาตร (Volume Resistivity) มาตรฐานของสายไฟฟ้าหุ้มฉนวนพอลิไวนิลคลอไรด์ (มอก. 11 เล่ม 101-2559)

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลสภาพต้านทานเชิงปริมาตร (Volume Resistivity) มาตรฐานของสายไฟฟ้าหุ้มฉนวนพอลิไวนิลคลอไรด์ ชนิด NYY แกนเดี่ยว[19]

ความหนา (มิลลิเมตร)	พื้นที่หน้าตัด (ตารางมิลลิเมตร)	สภาพต้านทานเชิงปริมาตรที่ต่ำที่สุดของฉนวนที่ 70°C (MΩ·km)
1.5	1	0.0207
1.5	1	0.0200
1.5	1.5	0.0184
1.5	1.5	0.0175
1.5	2.5	0.0157
1.5	2.5	0.0146
1.5	4	0.0135
1.5	6	0.0107
1.5	10	0.0088
1.5	16	0.0074
1.5	25	0.0061
1.5	35	0.0053
1.5	50	0.0046
1.5	70	0.0039
1.7	95	0.0038
1.7	120	0.0034
1.9	150	0.0034
2.1	185	0.0034
2.3	240	0.0033
2.5	300	0.0032
2.7	400	0.0030
3.1	500	0.0031

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปะลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำใบใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ภาคผนวก ข

ภาพการทดลอง

1) ลักษณะการยงที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส



รูปที่ ข.1 ลักษณะของยงที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียสเมื่อเวลาผ่านไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น โปรดอย่าได้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
(ก) 2 ชั่วโมง (ข) 3 ชั่วโมง (ค) 4 ชั่วโมง (ง) 5 ชั่วโมง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2) ลักษณะการยางที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส



รูปที่ ข.2 ลักษณะของยางที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาผ่านไป
(ก) 2 ชั่วโมง (ข) 3 ชั่วโมง (ค) 4 ชั่วโมง (ง) 5 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3) ลักษณะการยางที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส



รูปที่ ข.3 ลักษณะของยางที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาผ่านไป

(ก) 2 ชั่วโมง (ข) 3 ชั่วโมง (ค) 4 ชั่วโมง (ง) 5 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4) ลักษณะการยางที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส



รูปที่ ข.4 ลักษณะของยางที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาผ่านไป
(ก) 2 ชั่วโมง (ข) 3 ชั่วโมง (ค) 4 ชั่วโมง (ง) 5 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ภาคผนวก ค

วิธีการคำนวณ

1) ตัวอย่างการคำนวณสภาพต้านทานเชิงปริมาตร (Volume Resistivity)

เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของขั้ววัด 61.8 มิลลิเมตร วัดขึ้นส่วนยางตัวอย่างที่ได้มีความหนา 0.85 มิลลิเมตร วัดความลึกของยางตัวอย่างเมื่อได้รับแรงกด 0.05 มิลลิเมตร และวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าได้ 125 เมกะโอห์ม

เมื่อ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของขั้ววัด (mm) เท่ากับ 61.8 mm

T คือ ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด หรือความหนาของตัวอย่างทดสอบ (mm)

จะได้ 0.85 - 0.05 เท่ากับ 0.80 mm

R คือ ค่าความต้านทานที่วัดได้ (MΩ) เท่ากับ 125 MΩ

A คือ พื้นที่ของขั้วอิเล็กโทรด (mm²)

R_v คือ สภาพต้านทานเชิงปริมาตร (Volume resistivity) (MΩ·km)

$$\text{หาพื้นที่ของขั้วอิเล็กโทรดจาก } A = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

$$\text{แทนค่า } A = \pi \cdot \left(\frac{61.8}{2}\right)^2$$

$$= 2,999.62 \text{ mm}^2$$

$$\text{หาสภาพต้านทานเชิงปริมาตรจาก } R_v = R \frac{A}{T}$$

$$\text{แทนค่า } R_v = (125 \text{ M}\Omega) \cdot \left(\frac{2,999.62 \text{ mm}^2}{0.80 \text{ mm}}\right)$$

$$= 468690.62 \text{ M}\Omega \cdot \text{mm}$$

$$= 0.4687 \text{ M}\Omega \cdot \text{km}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2) ตัวอย่างการคำนวณเชิงเศรษฐศาสตร์

ตารางที่ ค.1 แสดงราคาและปริมาณที่ใช้ของของสารในการผลิตยางธรรมชาติที่เติมเบนโทไนท์เคลย์

สาร	ราคา (บาทต่อกิโลกรัม)	ปริมาณที่ใช้ (กรัม)	ราคา (บาท)
NR	42.5	100	4.25
CB	130	3	0.39
Sulphur	35	4.9	0.17
Zinc oxide	390	4	1.56
Accelerator (ZDEC)	275	4.9	1.35
Polysorbate 20	240	3	0.72
Benzoic acid	158	0.03	0.0047
Bentonite	24	5	0.12
รวม		124.83	8.56

จะเห็นว่าน้ำยางผสมเบนโทไนท์ก่อนการวัลคาไนซ์มีน้ำหนัก 124.83 กรัม มีราคา 8.56 บาท แต่เมื่อทำการทดลองพบว่าน้ำยางผสมก่อนการวัลคาไนซ์ 16 กรัม เมื่อทำการวัลคาไนซ์แล้วจะกลายเป็นแผ่นที่มีน้ำหนัก 4 กรัม ดังนั้นหากต้องการยางแผ่นที่มีน้ำหนัก 1,000 กรัม จะต้องใช้น้ำยางผสมก่อนการวัลคาไนซ์ 4,000 กรัม

สามารถหารราคาของยางแผ่นที่เติมเบนโทไนท์ 1 กิโลกรัม ได้โดย

$$\text{ราคาของยางแผ่นที่เติมเบนโทไนท์} = \frac{4,000 \times 8.56}{124.83} \text{ บาทต่อกิโลกรัม}$$

$$\text{ราคาของยางแผ่นที่เติมเบนโทไนท์} = 265.78 \text{ บาทต่อกิโลกรัม}$$

ตารางที่ ค.2 แสดงผลการคำนวณเชิงเศรษฐศาสตร์ของยางธรรมชาติที่ผสมสารไดอิล็กทริกแต่ละชนิด

สารไดอิล็กทริก	ราคาต้นทุน (บาทต่อกิโลกรัม)
Barium Titanate	671
Bentonite	266
CCTO	1,758
Mix BaTiO ₃ /CCTO	342

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.