

นาโนคอมโพสิตอีพอกซีที่เติมด้วยเศษแก้วสำหรับใช้งานฉนวนไฟฟ้า

EPOXY NANOCOMPOSITES FILLED WITH WASTE GLASS USED IN
ELECTRICAL INSULATION



นายภูมิสิทธิ์ รوبرู
POOMSIT ROBRU

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EPOXY NANOCOMPOSITES FILLED WITH WASTE GLASS USED IN
ELECTRICAL INSULATION



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF
ENGINEERING IN NANOMATERIAL ENGINEERING
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LARDKRABANG

2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018




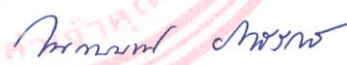
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ นาโนคอมโพสิตอีพอกซีที่เติมด้วยเศษแก้วสำหรับใช้งานฉนวนไฟฟ้า
Special Project Title EPOXY NANOCOMPOSITES FILLED WITH WASTE GLASS USED IN
ELECTRICAL INSULATION
นักศึกษา นาย ภูมิสิทธิ์ รอบรู้
รหัสประจำตัว 58110045
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุนาโน
ปีการศึกษา 2561
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. วรณวิทย์ วิทยากร
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร. กนกนันทน์ ภาชีรักษ์

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. กรรช อ่อนละอ	
ผศ.ดร. ทศพล เมลืองนนท์	
รศ.ดร. วรณวิทย์ วิทยากร	
ผศ.ดร. กนกนันทน์ ภาชีรักษ์	

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังอนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดารินี พรหมโยธิน)
หัวหน้าภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วันที่..... 20 เดือน..... มี.ค. พ.ศ. 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง นาโนคอมโพสิตอีพอกซีที่เติมด้วยเศษแก้วสำหรับใช้งานฉนวนไฟฟ้า

นักศึกษา นายภูมิสิทธิ์ รอบรู้

รหัสประจำตัว 58110045

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุนาโน

ปีการศึกษา 2561

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. วรณวิทย์ วิทยากร

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร. กนกนันท์ ภาชีรักษ์

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) จากเศษแก้วแตกที่เป็นขยะครัวเรือนให้มีขนาดเล็กละเอียดและมีคุณภาพดีสามารถนำไปใช้งานเป็นผิวเคลือบคอมโพสิตที่มีคุณภาพสูงได้ โดยเริ่มจากการนำผงของเศษแก้วแตกมาบดให้ละเอียดด้วยเทคนิคการบดย่อยแบบสั้น จากนั้นนำไปตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยา ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค และองค์ประกอบทางเคมีของผงแก้วที่ได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเลเซอร์ เทคนิคการกระเจิงรังสีเอ็กซ์ (EDX) เครื่องฟลูอริเยร์ทรานสฟอร์ม และ อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FT-IR) ตามลำดับ จากนั้นจึงนำผงแก้วที่เตรียมได้นี้ไปผสมกับอีพอกซีเรซินในสัดส่วนต่างๆ เพื่อให้เกิดเป็นนาโนคอมโพสิตอีพอกซีเรซิน/ผงแก้ว แล้วทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ ลักษณะโครงสร้างจุลภาค และคุณสมบัติทางไฟฟ้า พร้อมกันนี้ได้ทำการเตรียมคอมโพสิตระหว่างอีพอกซีเรซินกับผงนาโนซิลิกาทางการค้าด้วยในสัดส่วนและเทคนิคเดียวกันเพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project	EPOXY NANOCOMPOSITES FILLED WITH WASTE GLASS USED IN ELECTRICAL INSULATION
Students	Mr. Poomsit Robru
Students ID	58110045
Degree	Bachelor of Engineering
Department	Nanoscience and Nanotechnology
Program	Nanomaterial Engineering
Academic Year	2018
Advisor	Assoc. Prof. Dr. Wanwilai Vittayakor
Co-Special Project Advisor	Asst. Prof. Dr. Kanoknan Pacheerak

Abstract

This work focused on the preparation of SiO₂ from household waste glass in order to have fine particle and good quality for application in electrical insulation. Firstly, the waste glass was ground and fine-milled by using vibratory milling technique. After that, the morphology, particle size and size distribution and chemical compositions of glass powder were investigated by using scanning electron microscope (SEM), laser particle sizer, energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX) and Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR), respectively. After that, this glass powder was mixed with epoxy resin in various ratios in order to create the epoxy resin/glass powder composites. Physical properties, microstructure and electrical properties of all composites were investigated.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. วรณวิไลย วิทยากร ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะและให้ความช่วยเหลือในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ อาทิ ให้คำแนะนำในการวางแผนการทดลองและการเก็บรวบรวมข้อมูล การเรียบเรียงเนื้อหา การจัดทำรูปเล่มโครงการพิเศษรวมถึงการแก้ไขปัญหาข้อบกพร่องต่าง ๆ ตลอดจนให้ความรู้ที่นอกเหนือจากความรู้ในตำราแก่ข้าพเจ้า อีกทั้ง ผศ.ดร. กรรช อ่อนละอ และ ผศ.ดร. ทศพล เมลียงนนท์ ประธานและกรรมการสอบหัวข้อโครงการพิเศษและโครงร่างโครงการพิเศษที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะต่างๆ และขอขอบคุณสมาชิกหน่วยงานวิจัยเซรามิกชั้นสูงทุก ๆ ท่านที่คอยให้กำลังใจรวมถึงให้คำปรึกษาแก่ข้าพเจ้าตลอดจนการศึกษาในระดับปริญญาตรีนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และสมาชิกในครอบครัวทุกท่านที่คอยส่งเสริมผลักดันและเป็นแรงบันดาลใจให้ข้าพเจ้าสำเร็จการศึกษาในครั้งนี้

ภูมิสิทธิ์ รอบรู้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	i
Abstract.....	ii
กิตติกรรมประกาศ.....	iii
สารบัญ.....	iv
สารบัญตาราง.....	vii
สารบัญภาพ	viii
บทที่ 1	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตและแผนการดำเนินงานวิจัย	3
บทที่ 2	5
2.1 อีพอกซีเรซิน (Epoxy Resin).....	5
2.1.1 สมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์	6
2.1.2 ชนิดและการเลือกใช้อีพอกซีเรซิน	6
2.1.3 การเชื่อมโยงอีพอกซีเรซิน (Curing of Epoxy Resins) [2].....	10
2.2 การใช้งานอีพอกซีเรซินทำเป็นฉนวน [3].....	11
2.3 ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO ₂) [4].....	15
2.3.1 ลักษณะสมบัติเฉพาะทั่วไป	15
2.3.2 ซิลิกอนไดออกไซด์ในแก้วและขวดแก้ว (Bottle / beverage glass) [5]	16
2.3.3 การใช้ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO ₂) เป็นเฟสเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิต	21
2.4 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	24
2.5 เทคนิคที่ใช้ในการเตรียมสาร.....	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.1 เทคนิคการบดย่อยด้วยลูกบอล [15]	28
2.5.2 เทคนิคการหล่อแบบดั้งเดิม (conventional casting) [19].....	32
2.6 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สาร	33
2.6.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [21].....	33
2.6.2 เครื่องวิเคราะห์หาธาตุต่างๆ (Energy Dispersive X-ray Spectrometer; EDX).....	35
2.6.3 เครื่องวัดการกระจายตัวของอนุภาค (Particle size distribution analyzer).....	35
บทที่ 3	38
3.1 สารเคมีที่ใช้	38
3.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้	38
3.3 กระบวนการบดหยาบและบดย่อยเศษแก้ว (glass powder).....	41
3.4 กระบวนการเตรียมอีพอกซีเรซิน	43
บทที่ 4	49
4.1 ผลการตรวจสอบผงแก้ว	49
4.1.1 สมบัติทางกายภาพและขนาดอนุภาคของผงแก้ว	49
4.1.2 ลักษณะโครงสร้างจุลภาค.....	50
4.1.3 ขนาดและการกระจายตัว	54
4.2 ผลการตรวจสอบคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับผงแก้ว	63
4.2.1 ลักษณะและสมบัติทางกายภาพ	63
4.2.2 โครงสร้างจุลภาคของคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับผงแก้ว	65
4.3.2 โครงสร้างจุลภาคของคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า	70
4.4 สมบัติทางไฟฟ้า.....	74
บทที่ 5	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

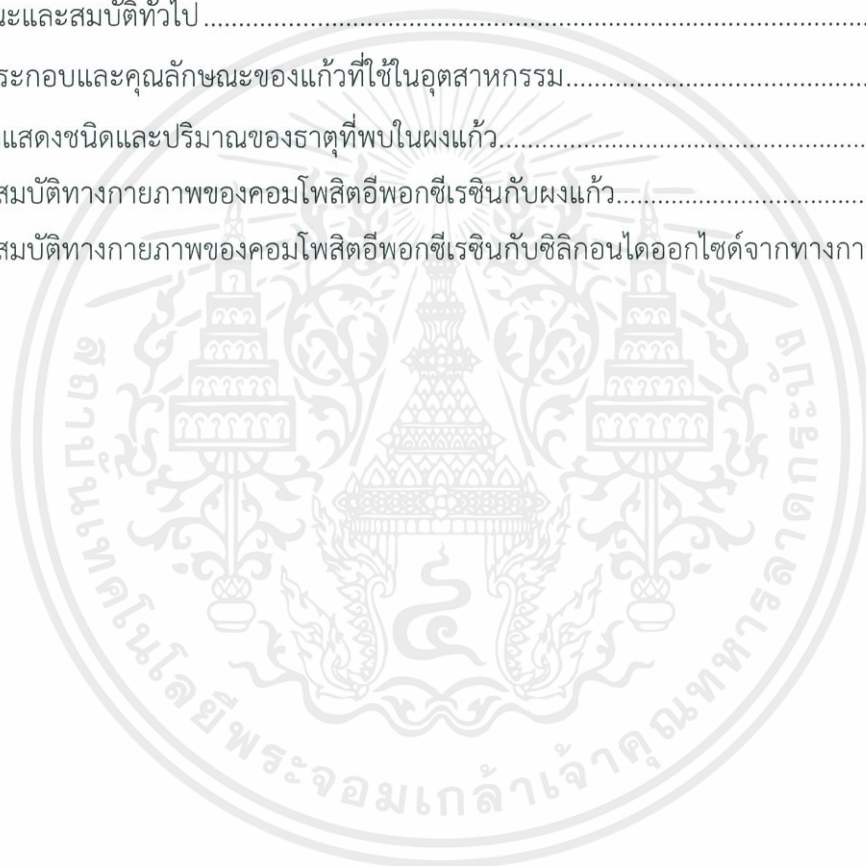
สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1 สรุปผลการทดลอง	85
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	86
บรรณานุกรม.....	86
ประวัติผู้เขียน	89



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ระยะเวลาที่ขยະแต่ละชนิดย่อยสลายตามธรรมชาติ	2
1.2 แผนการวิจัย	4
2.1 ผลของอัตราส่วนโดยโมลสารตั้งต้นที่มีต่อน้ำหนักโมเลกุลของอีพอกซีเรซิน	7
2.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของโพลีเมอร์ประเภทเทอร์โมเซตติง	13
2.4 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนแข็งอื่นๆ	14
2.5 ลักษณะและสมบัติทั่วไป	16
2.6 องค์ประกอบและคุณลักษณะของแก้วที่ใช้ในอุตสาหกรรม	22
4.1 ตารางแสดงชนิดและปริมาณของธาตุที่พบในผงแก้ว	62
4.2 แสดงสมบัติทางกายภาพของคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับผงแก้ว	64
4.3 แสดงสมบัติทางกายภาพของคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์จากทางการค้า	69



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของหมู่อีพอกไซด์.....	5
2.2 ปฏิกริยาสังเคราะห์ Diglycidyl Ether of Bisphenol A (DGEBA)	7
2.3 โครงสร้างของกลีซิดิวเอสเทอร์เรซิน.....	8
2.4 โครงสร้างของกลีซิดิวเอมีนเรซิน	8
2.5 โครงสร้างของกลีซิดิวอีเทอร์โนวาแลกเรซิน	9
2.6 โครงสร้างของโบรมิเนทเตดเรซิน	9
2.7 โครงสร้างทางเคมีของอีพอกซีเรซิน (a) วงแหวนอีพอกไซด์เป็นสารตั้งต้นในการทำอีพอกซีเรซิน (b) โครงสร้างของสารประกอบอีพอกซีเรซิน	12
2.8 เปรียบเทียบค่าแฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวนแข็งชนิดต่างๆที่ความถี่ 50	14
2.9 วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นส่วนประกอบในรถยนต์.....	21
2.10 แสดงถึงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของอีพอกซีเรซินผสมกับ 65% ไมโครซิลิกา และ 5% นาโนซิลิกา.....	24
2.11 แสดงผลการศึกษาความคงทนไดอิเล็กตริกของชิ้นงานอีพอกซีที่เติมด้วยนาโนซิลิกาที่สัดส่วนต่างๆ.....	25
2.12 แสดงผลการศึกษาความคงทนไดอิเล็กตริกของชิ้นงานอีพอกซีที่เติมด้วยไมโครและนาโนซิลิกาที่สัดส่วนต่างๆ.....	25
2.13 แสดงลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของนาโนคอมโพสิต (a) และ (b) อีพอกซีเรซิน/Si ที่ไม่ได้ปรับปรุงผิว (ER/UTI และ ER/UTO) และ (c) อีพอกซีเรซิน/Si ที่ปรับปรุงผิว (ER/PTI).....	26
2.14 แสดงค่าพารามิเตอร์ของการคายประจุบางส่วน (PD) สำหรับชิ้นงานอีพอกซีเรซินที่เติมด้วยซิลิกาที่ผ่านการบำบัดเทคนิคต่างๆ	27
2.15 แสดงการตกกระทบของเม็ดบอลระหว่างกระบวนการบดย่อย.....	29
2.16 เครื่องบดบอลมิลล์แบบแบชมิลล์	30
2.17 เครื่องบดแบบพับเบลมิลล์	31

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.18 การหล่อเรซิน	33
2.19 ภาพส่วนประกอบต่างๆภายในกล่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	34
2.20 เครื่องวิเคราะห์ธาตุต่าง ๆ ด้วยรังสีเอ็กซ์	35
2.21 เครื่องวัดการกระจายตัวของอนุภาค	36
3.1 แผนผังการเตรียมคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับเฟสเสริมแรง	40
3.2 ผงแก้วที่ผ่านการบดหยาบ	41
3.3 เครื่องบดย่อยแนวตั้งด้วยลูกบอล	42
3.4 การเตรียมผงแก้วเพื่อนำไปบดย่อย	42
3.5 การแยกสารที่ต้องการออกจากขวดและลูกบด	42
3.6 ตู้อบสาร	43
3.7 ลักษณะของผงแก้วหลังผ่านกระบวนการบดย่อย	43
3.8 ขั้นตอนเคลือบพาราฟิล์มเพื่อไม่ให้ชิ้นงานไม่ติดกับแม่แบบ	46
3.9 ขั้นตอนการผสมคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับผงแก้ว/อนุภาคนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า	46
3.10 ขั้นตอนการปั่นกวนด้วยแม่เหล็กผสมคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับผงแก้ว/อนุภาคนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า	47
3.11 ขั้นตอนการไล่ฟองอากาศออกจากชิ้นงานคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับผงแก้ว/อนุภาคนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า	47
3.12 ขั้นตอนการทิ้งให้คอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับผงแก้ว/อนุภาคนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้าขึ้นรูป	48
3.13 ชิ้นงานคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับผงแก้ว/อนุภาคนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า	48
4.1 ผงแก้ว	50
4.2 อนุภาคนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า	50

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผงแก้วที่ใช้เวลาบด 1 ชั่วโมง (กำลังขยาย 1000 และ 2500 เท่าตามลำดับ).....	51
4.4 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผงแก้วที่ใช้เวลาบด 2 ชั่วโมง (กำลังขยาย 1000 และ 2500 เท่าตามลำดับ).....	52
4.5 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผงแก้วที่ใช้เวลาบด 3 ชั่วโมง (กำลังขยาย 1000 และ 2500 เท่าตามลำดับ).....	52
4.6 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผงแก้วที่ใช้เวลาบด 4 ชั่วโมง (กำลังขยาย 1000 และ 5000 เท่าตามลำดับ).....	53
4.7 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของอนุภาคนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ (กำลังขยาย 1000 และ 2500 เท่าตามลำดับ).....	54
4.8 กราฟแสดงขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงแก้วที่บดในเวลา 1 ชั่วโมง.....	55
4.9 กราฟแสดงขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงแก้วที่บดในเวลา 2 ชั่วโมง.....	55
4.10 กราฟแสดงขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงแก้วที่บดในเวลา 3 ชั่วโมง.....	56
4.11 กราฟแสดงขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงแก้วที่บดในเวลา 4 ชั่วโมง.....	56
4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนและการสั่นของพันธะในผงแก้วที่บดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง...	58
4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนและการสั่นของพันธะในผงแก้วที่บดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง...	58
4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนและการสั่นของพันธะในผงแก้วที่บดเป็นเวลา 3 ชั่วโมง...	59
4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนและการสั่นของพันธะในผงแก้วที่บดเป็นเวลา 4 ชั่วโมง...	59

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.16 แสดงความสัมพันธ์ของการดูดกลืนและการสั่นของพันธะของอนุภาคนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า.....	60
4.17 แสดงความสัมพันธ์ของการดูดกลืนและการสั่นของพันธะระหว่างอนุภาคของแก้วที่บด 3 ชั่วโมงกับอนุภาคนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า.....	60
4.18 แสดงชนิดและปริมาณของธาตุที่พบในผงแก้ว	61
4.19 ลักษณะผิวหน้าของคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับผงแก้ว	63
4.20 ลักษณะด้านข้างของคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับผงแก้ว	63
4.2 (a) แสดงภาพผิวหน้าของคอมโพสิตอีพอกซีบริสุทธิ์กำลังขยาย 1000 เท่า (b) แสดงภาพผิวตัดขวางของคอมโพสิตอีพอกซีบริสุทธิ์กำลังขยาย 1000 เท่า (c) แสดงภาพผิวหน้าของอีพอกซีกับผงแก้วอัตราส่วน 1 wt% กำลังขยาย 1000 เท่า (d) แสดงภาพผิวตัดขวางของอีพอกซีกับผงแก้วอัตราส่วน 1 wt% กำลังขยาย 1000 เท่า (e) แสดงภาพผิวหน้าของอีพอกซีกับผงแก้วอัตราส่วน 2 wt% กำลังขยาย 1000 เท่า (f) แสดงภาพผิวตัดขวางของอีพอกซีกับผงแก้วอัตราส่วน 2 wt% กำลังขยาย 1000 เท่า	66
4.22 (a) แสดงภาพผิวหน้าของอีพอกซีกับผงแก้วอัตราส่วน 3 wt% กำลังขยาย 1000 เท่า(b) แสดงภาพผิวหน้าของอีพอกซีกับผงแก้วอัตราส่วน 3 wt% กำลังขยาย 1000 เท่า (d) แสดงภาพผิวตัดขวางของอีพอกซีกับผงแก้วอัตราส่วน 4 wt% กำลังขยาย 1000 เท่า (e) แสดงภาพผิวหน้าของอีพอกซีกับผงแก้วอัตราส่วน 5 wt% กำลังขยาย 1000 เท่า (e) แสดงภาพผิวตัดขวางของอีพอกซีกับผงแก้วอัตราส่วน 5 wt% กำลังขยาย 1000 เท่า.....	67
4.23 ลักษณะผิวหน้าของคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า	68
4.24 ลักษณะผิวข้างของคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า	68

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.25 (a) แสดงภาพผิวหน้าของคอมโพลีเอสเตอร์พอกซีกับซิลิกอนไดออกไซด์อัตราส่วน 1 wt% กำลังขยาย 1000 เท่า (b) แสดงภาพผิวตัดขวางของคอมโพลีเอสเตอร์พอกซีกับซิลิกอนไดออกไซด์อัตราส่วน 1 wt% กำลังขยาย 1000 เท่า (c) แสดงภาพผิวตัดขวางของคอมโพลีเอสเตอร์พอกซีกับซิลิกอนไดออกไซด์อัตราส่วน 2 wt% กำลังขยาย 1000 เท่า (d) แสดงภาพผิวตัดขวางของคอมโพลีเอสเตอร์พอกซีกับซิลิกอนไดออกไซด์อัตราส่วน 2 wt% กำลังขยาย 1000 เท่า.....	71
4.26 (a) แสดงภาพผิวหน้าของคอมโพลีเอสเตอร์พอกซีกับซิลิกอนไดออกไซด์อัตราส่วน 3 wt% กำลังขยาย 1000 เท่า (b) แสดงภาพผิวหน้าของคอมโพลีเอสเตอร์พอกซีกับซิลิกอนไดออกไซด์อัตราส่วน 3 wt% กำลังขยาย 1000 เท่า (c) แสดงภาพผิวหน้าของคอมโพลีเอสเตอร์พอกซีกับซิลิกอนไดออกไซด์อัตราส่วน 4 wt% กำลังขยาย 1000 เท่า (e) แสดงภาพผิวตัดขวางของคอมโพลีเอสเตอร์พอกซีกับซิลิกอนไดออกไซด์อัตราส่วน 4 wt% กำลังขยาย 1000 เท่า.....	72
4.27 (a) แสดงภาพผิวหน้าของคอมโพลีเอสเตอร์พอกซี/ซิลิกอนไดออกไซด์อัตราส่วน 5 wt% กำลังขยาย 1000 เท่า (b) แสดงภาพผิวตัดขวางของคอมโพลีเอสเตอร์พอกซีกับซิลิกอนไดออกไซด์อัตราส่วน 5 wt% กำลังขยาย 1000 เท่า	73
4.28 กราฟแสดงความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุพอกซีเรซินที่ไม่มีการเจือสารผสม	74
4.29 กราฟแสดงความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุพอกซีเรซินที่อุณหภูมิคงที่ที่ทำการบดที่ 3 ชั่วโมงอัตราส่วน 1 wt%	75
4.30 กราฟแสดงความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุพอกซีเรซินที่อุณหภูมิคงที่ที่ทำการบดที่ 3 ชั่วโมงอัตราส่วน 2 wt%	76

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.31 กราฟแสดงความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุพอกซีเรซินที่อุณหภูมิคงแกว้ที่ทำการอบที่ 3 ชั่วโมงอัตราส่วน 3 wt%	77
4.32 กราฟแสดงความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุพอกซีเรซินที่อุณหภูมิคงแกว้ที่ทำการอบที่ 3 ชั่วโมงอัตราส่วน 4 wt%	77
4.33 กราฟแสดงความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุพอกซีเรซินที่อุณหภูมิคงแกว้ที่ทำการอบที่ 3 ชั่วโมงอัตราส่วน 5 wt%	78
4.34 กราฟแสดงความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุพอกซีเรซินที่อุณหภูมิคงแกว้ที่ทำการอบที่ 3 ชั่วโมงอัตราส่วน 1 wt%	78
4.35 กราฟแสดงความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุพอกซีเรซินที่อุณหภูมิคงแกว้ที่ทำการอบที่ 3 ชั่วโมงอัตราส่วน 2 wt%	79
4.36 กราฟแสดงความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุพอกซีเรซินที่อุณหภูมิคงแกว้ที่ทำการอบที่ 3 ชั่วโมงอัตราส่วน 3 wt.%	79
4.37 กราฟแสดงความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุพอกซีเรซินที่อุณหภูมิคงแกว้ที่ทำการอบที่ 3 ชั่วโมงอัตราส่วน 4 wt%	80
4.38 กราฟแสดงความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุพอกซีเรซินที่อุณหภูมิคงแกว้ที่ทำการอบที่ 3 ชั่วโมงอัตราส่วน 5 wt%	81
4.39 กราฟแสดงความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุพอกซีเรซินที่อุณหภูมิคงแกว้ที่ทำการอบที่ 3 ชั่วโมงเปรียบเทียบทุกสัดส่วน.....	82
4.40 กราฟแสดงความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุพอกซีเรซินที่อุณหภูมิคงแกว้ที่ทำการอบที่ 3 ชั่วโมงเปรียบเทียบทุกสัดส่วน.....	82
4.41 กราฟเปรียบเทียบความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุพอกซีเรซินที่อุณหภูมิคงแกว้ กับวัสดุพอกซีเรซินที่อุณหภูมิคงแกว้ที่ทำการอบที่ 3 ชั่วโมงที่ความถี่ 1000 Hz.....	83
4.42 แสดงการเกิด Breakdown	84

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในบทนี้จะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญ วัสดุประสมค์ ขอบเขต โดยมีรายละเอียด ดังนี้ ในปัจจุบันวัสดุคอมโพสิตมีการใช้งานอย่างแพร่หลายมากยิ่งขึ้นเนื่องด้วยเป็นวัสดุทางเลือกที่สามารถเลือกวัสดุหลักและวัสดุเสริมแรงได้ทำให้อุปสนองต่อการใช้งานในแต่ละด้านมากยิ่งขึ้นอาจใช้วัสดุหลักเป็นวัสดุที่สังเคราะห์ขึ้นและวัสดุเสริมแรงเป็นวัสดุจากธรรมชาติหรือใช้วัสดุหลักและวัสดุเสริมแรงที่สังเคราะห์ขึ้นก็ได้ ดังกล่าวมานี้นำไปสู่การใช้งานในแต่ละด้านตามความต้องการและความเหมาะสมงานฉนวนไฟฟ้าก็เป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีการใช้วัสดุคอมโพสิตเข้าไปประยุกต์ใช้งานซึ่งโดยทั่วไปวัสดุที่ใช้นำมาทำเป็นฉนวนในระบบวงจรไฟฟ้านั้นมักเป็นกลุ่มของวัสดุพอลิเมอร์เนื่องจากมีความสามารถในการต้านทานไฟฟ้าที่ดีมีความยืดหยุ่นสูงสามารถขึ้นรูปเป็นรูปร่างได้ตามต้องการแต่วัสดุพอลิเมอร์ก็มีข้อด้อยก็คือมีความแข็งแรงทางกลที่ต่ำและทนความร้อนได้น้อย ในงานวิจัยนี้ได้มุ่งความสนใจไปที่วัสดุพอลิเมอร์กลุ่มอีพอกซีเรซิน ซึ่งเป็นโคพอลิเมอร์และจัดอยู่ในกลุ่มเทอร์โมเซตติงพอลิเมอร์ (Thermosetting Polymer) เกิดจากสารเคมีสองส่วน คือ บิสฟีนอลเอและอีพิกลอโรไฮดริน (Biphenol A and Epichlorohydrin) ทำปฏิกิริยากันและเกิดการร่างแห (cross link) ซึ่งมีลักษณะทางกายภาพเป็นของแข็งใสไม่มีสีและมีความเสถียรทางเคมีและไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจึงนิยมนำไปใช้งานในด้านต่างๆมากมายอาทิงานด้านบรรจุภัณฑ์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชิ้นส่วนอุปกรณ์ทางการแพทย์ ชิ้นส่วนรถ / เรือและงานด้านผิวเคลือบ แต่ก็มีข้อด้อยคือมีความแข็งแรงต่ำทำให้อายุการใช้งานถูกลดลงไปด้วยและอาจมีประสิทธิภาพไม่เท่าที่ควรซึ่งมีงานวิจัยจำนวนหนึ่งที่พยายามคิดค้นวิธีปรับปรุงสมบัติของอีพอกซีเรซินให้ดียิ่งขึ้นซึ่งวิธีหนึ่งที่พบเห็นได้บ่อยและมีประสิทธิภาพสูงสุดคือการเจืออนุภาคขนาดเล็กระดับนาโนเมตร เช่น ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ฯลฯ ลงไปในอีพอกซีเรซินเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งจากตัวอย่างงานวิจัยที่ศึกษาพบว่าเมื่อทำการเพิ่มประสิทธิภาพวัสดุคอมโพสิตโดยมีอีพอกซีเรซินเป็นวัสดุหลักและซิลิกอนไดออกไซด์เป็นวัสดุเสริมแรงแล้วพบว่าคอมโพสิตที่ได้มีประสิทธิภาพมากขึ้นและสามารถนำไปใช้งานด้านฉนวนไฟฟ้าได้ดีสามารถนำไปใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าในหม้อแปลงหรือนำไปใช้ในการเคลือบสายไฟและสายโทรศัพท์ในอาคารทั้งนี้ซิลิกอนไดออกไซด์ในทางการค้ามีราคาแพงหากเทียบในหน่วยกิโลกรัมมีราคา 12,000 บาท ต่อ 50 กรัม ซึ่งด้วยราคาที่สูงอาจไม่คุ้มค่านำไปใช้ในเชิงอุตสาหกรรม ดังนั้น จึงพยายามแก้ไขปัญหานี้โดยมองหาตัวเสริมแรงที่มีราคาถูกลงและสกัดขึ้นมาได้จากขยะเหลือใช้จึงสังเกตเห็นประโยชน์ของขวดแก้ว ประกอบกับในปัจจุบันปัญหาขยะเป็นปัญหาอันดับต้นๆ ที่ต้องเร่งจัดการและแก้ไขเนื่องด้วยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประชากรเพิ่มจำนวนมากขึ้น ทำให้มีการใช้ทรัพยากรเพิ่มขึ้นและเกิดเป็นของเสียหรือขยะเพิ่มขึ้น ซึ่งทุกวันนี้คนไทยกว่า 75 ล้านคน สามารถสร้างขยะได้มากถึง 14 ล้านตันต่อปีแต่ความสามารถในการจัดเก็บขยะกลับมีไม่ถึง 70 % ของขยะที่เกิดขึ้น จึงทำให้เกิดปริมาณมูลฝอยตกค้างตามสถานที่ต่าง ๆ หรือมีการนำไปกำจัดโดยวิธีกองบนพื้นซึ่งไม่ถูกต้องตามหลักสุขาภิบาลก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม ขยะที่เราพบ ได้แก่ ขยะมูลฝอย สามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ (1) ขยะหรือของเสียแบ่งเป็น มูลฝอยธรรมดาทั่วไป ได้แก่ มูลฝอยสด เศษอาหาร กระดาษ โฟม พลาสติก ขวดแก้ว โลหะ ฯลฯ และ (2) ขยะหรือของเสียอันตราย ได้แก่ มูลฝอย ติดเชื้อจากโรงพยาบาล กากสารเคมี สารเคมีกำจัดแมลง กากน้ำมัน หลอดฟลูออเรสเซนต์ เป็นต้น โดยระยะเวลาในการย่อยสลายของขยะแต่ละประเภทได้แสดงไว้ในตารางที่ 1.1

ตาราง 1.1 ระยะเวลาที่ขยะแต่ละชนิดย่อยสลายตามธรรมชาติ

ชนิดของขยะ	ระยะเวลาย่อยสลาย
กระป๋องเหล็ก	100 ปี
กระป๋องอลูมิเนียม	80-100 ปี
ถุงพลาสติก/ขวดพลาสติก	450 ปี
ผ้าอ้อมสำเร็จรูป	500 ปี
โฟม	ไม่ย่อยสลาย
ขวดแก้ว	ชั่วนิรันดร์

จากตารางที่ 1.1 จะเห็นว่าแก้วย่อยสลายไม่ได้ ดังนั้นแก้วจึงควรเป็นวัสดุที่ถูกนำกลับมาใช้ใหม่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งจากข้อมูลตรงนี้จึงทำให้เกิดแนวคิดที่จะนำเศษแก้วมาใช้เป็นเฟสเสริมแรงในอิพอกซีเรซิน โดยเชื่อว่าเศษแก้วซึ่งมีองค์ประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์อยู่เป็นจำนวนมากนั้น หากผ่านกระบวนการสกัดที่เหมาะสมก็จะสามารถใช้งานเป็นวัสดุเสริมแรงในอิพอกซีเรซินได้เทียบเท่ากับผงซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้าได้เลยทีเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อเตรียมอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) จากเศษแก้วหรือแก้วแตกที่เป็นขยะในครัวเรือนให้มีอนุภาคขนาดเล็กโดยทางฟิสิกส์
- 1.2.2 เพื่อเตรียมคอมโพสิตระหว่างอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยซิลิกาจากผงแก้วสำหรับใช้งานด้านฉนวนไฟฟ้าที่มีความแข็งแรงทนทาน
- 1.2.3 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนองค์ประกอบโครงสร้างและสมบัติของคอมโพสิตระหว่างอีพอกซีเรซินกับซิลิกาที่สกัดจากผงแก้ว
- 1.2.4 เพื่อลดค่าใช้จ่ายและเพิ่มมูลค่าให้กับขยะประเภทเศษแก้วที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ในเชิงอุตสาหกรรม

1.3 ขอบเขตและแผนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยจะทำการสกัดซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) จากผงแก้วเหลือทิ้งที่เป็นขยะครัวเรือนให้มีคุณภาพสูงและมีอนุภาคขนาดเล็ก จากนั้นทำการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตระหว่างอีพอกซีเรซิน (matrix) กับซิลิกอนไดออกไซด์จากเศษแก้ว (filler) ด้วยเทคนิคการหล่อแบบดั้งเดิม (Conventional casting) โดยทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของคอมโพสิตเป็น 0 wt%, 1 wt%, 2 wt%, 3 wt%, 4 wt% และ 5 wt% ตามลำดับจากนั้นทำการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และตรวจสอบสมบัติทางเคมีด้วยเครื่อง (FT-IR) เพื่อดูโครงสร้างของโมเลกุล และตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงานทั้งหมด ได้แก่ วัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้า และ วัดค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้า ของคอมโพสิตระหว่างอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ในทางการค้าควบคู่ไปด้วยในทุก ๆ อัตราส่วนเพื่อที่จะใช้เป็นชุดควบคุม โดยแผนการวิจัยทั้งหมดสามารถแสดงในตารางที่ 1.2

ตาราง 1.2 แผนการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลาในการทำวิจัย									
	ปี2561					ปี2562				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ย.	เม.ย.	พ.ค.
ศึกษางานวิจัยขั้นตอน และเทคนิคการขึ้นรูปเรซิน	➔									
เตรียมผงซิลิกาจากขวดแก้ว ด้วยวิธีการบดหยาบและบด ย่อยจากนั้นนำไปวัดขนาด อนุภาค	➔									
ขึ้นรูปเรซินกับ ซิลิกอนไดออกไซด์นาโน พาวเดอร์/ผงแก้ว ด้วย อัตราส่วน 0,1,2,3,4,5 wt%		➔								
นำชิ้นงานที่ได้วัดคุณสมบัติ ต่างๆ วิเคราะห์และบันทึก ข้อมูลที่ได้			➔							
เขียนรายงานผล และจัดทำ รูปเล่มบทที่1-3				➔						
เลือกอัตราส่วนที่ดีที่สุดและ นำไปประยุกต์ใช้และ ตรวจสอบสมบัติด้วยเทคนิค ต่างๆ						➔				
วิเคราะห์ผลและบันทึก ข้อมูลที่ได้ จัดทำรูปเล่ม								➔		

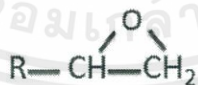
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุคอมโพสิตระหว่างอีพอกซีเรซินและซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) รวมทั้งขั้นตอนและกระบวนการในการขึ้นรูปเป็นเม็ดและอัตราส่วนน้ำหนักของซิลิกอนไดออกไซด์ที่ได้ทำการเปลี่ยนแปลงรวมไปถึงทฤษฎีการตรวจวัดสมบัติต่างๆของวัสดุคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 อีพอกซีเรซิน (Epoxy Resin)

อีพอกซีเรซินจัดเป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซตที่มีสมบัติเด่นทางด้านความแข็งแรงและการทนต่อการคืบตัวซึ่งเมื่อผ่านกระบวนการเชื่อมโยงโมเลกุลหรือการบ่ม (Curing) แล้วไม่สามารถเปลี่ยนแปลงกลับไปเป็นรูปเดิมได้ กล่าวคือ เรซินถูกทำให้แข็งจนไม่สามารถหลอมเหลวใหม่ได้ถึงแม้จะเพิ่มอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องเรซินก็ไม่สามารถอ่อนตัวได้อีก การเปลี่ยนแปลงนี้เกิดขึ้นเนื่องจากพอลิเมอร์เกิดเป็นโครงร่างแหแบบถาวรโดยทั่วไปแล้วการบ่มนี้ทำได้โดยอาศัยความร้อนและความดันแต่เรซินบางกลุ่มก็สามารถบ่มที่อุณหภูมิต่ำได้โดยไม่ต้องใช้ความดัน การเกิดโครงร่างที่เป็นร่างแหของเทอร์โมเซตนี้ทำให้โมเลกุลเคลื่อนไหวได้น้อยหรือไม่สามารถเคลื่อนไหวได้จึงให้สมบัติที่ดีในเรื่องความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง การไม่ละลายในตัวทำละลาย ความทนทานต่อความร้อน สารเคมีและการคืบตัว อีพอกซีเรซินเกิดจากการทำปฏิกิริยาของสารตั้งต้น ซึ่งเป็นสารจำพวกอีพอกไซด์และที่มีหมู่อีพอกไซด์อยู่ในโซ่พอลิเมอร์ก่อนเกิดการเชื่อมโยง หมู่อีพอกไซด์อาจจะอยู่ในรูปของออกซิแรน (oxirane) หรือหมู่ออกซิลีน (oxyline) แสดงดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของหมู่อีพอกไซด์

ดังนั้นอาจให้คำนิยามของอีพอกซีเรซินว่าเป็นพอลิเมอร์ เชื่อมโยงโดยการเชื่อมโยงเกิดจากปฏิกิริยา ของหมู่อีพอกซีเรซินกับสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงซึ่งมีด้วยกันหลายประเภท ได้แก่ พอลิเอมีน พอลิเอไมด์ พอลิซิลิเฟต กรดหรือแอซิดแอนไฮไดรด์ทำให้ได้เรซินที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่าง ๆ กัน ซึ่งมีลักษณะที่เป็นโครงร่างตาข่ายสามมิติ (3D-network) โดยปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ของอีพอกซี จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการขึ้นรูปทำให้น้ำหนักโมเลกุลของผลิตภัณฑ์สูงขึ้นและโครงสร้างของผลิตภัณฑ์มีลักษณะเป็นโครงร่างตาข่ายเริ่มจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอีพอกซีเรซินซึ่งเป็นของเหลวและสารเชื่อมโยง (Curing agent) ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดรูปร่างโมเลกุลที่ใหญ่ขึ้น หลังจากนั้นโมเลกุลจะค่อย ๆ มีขนาดใหญ่ขึ้นแต่ขนาดของโมเลกุลโดยเฉลี่ยถือว่ายังคงเล็กอยู่และเมื่อมีการเชื่อมโยงเพิ่มมากขึ้นขนาดของโมเลกุลก็ค่อยเพิ่มขึ้นเกิดการเชื่อมโยงของสายโซ่พอลิเมอร์เป็นโครงร่างตาข่ายที่ซับซ้อนโดยอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้วของการเชื่อมโยงจะเพิ่มขึ้นในกระบวนการเชื่อมโยง จุดวิกฤติของการเกิดเป็นเจลจะเกิดขึ้นเมื่อพอลิเมอร์เกิดการเชื่อมโยงเป็นโครงร่างตาข่ายแบบ 3 มิติ โดยสมบูรณ์ซึ่งก่อนหน้าที่จะเกิดเป็นเจลอีพอกซีเรซินที่ได้ภายหลังการเชื่อมโยงเป็นของแข็งที่ยืดหยุ่นได้ (elastic solid) ผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์ของอีพอกซีเรซินพัฒนาโดยสองบริษัทคือ Ciba AG (ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ จดลิขสิทธิ์ในปี ค.ศ. 1943) และบริษัท DevOC and Raynold Co.Lt (สหรัฐอเมริกา จดลิขสิทธิ์ในปี ค.ศ. 1950) ถึงแม้พอลิเมอร์นี้จะมีราคาค่อนข้างแพงแต่ก็มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม

2.1.1 สมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์

อีพอกซีเรซินส่วนใหญ่ใช้เป็นวัสดุในการเคลือบผิวเพราะมีสมบัติเหนียวยืดหยุ่นได้ดี และมีความสามารถในการยึดเหนี่ยวหรือเกาะติดกับวัสดุทั่วไปเป็นอย่างดี และยังไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาการใช้ประโยชน์อื่น ๆ ของอีพอกซีเรซิน ได้แก่ ใช้เป็นกาว ซ่อมแซมอุปกรณ์ต่าง ๆ ใช้เคลือบอุปกรณ์ในโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อป้องกันการผุกร่อน ใช้ในงานเคลือบผิวของอุปกรณ์ภายในบ้านเรือนและท่อเก็บแก๊ส ใช้ในการเชื่อมส่วนประกอบโลหะแก้วและเซรามิก ใช้ในการหล่ออุปกรณ์ที่ทำจากโลหะและเคลือบอุปกรณ์ ใช้ใส่ในส่วนประกอบของอุปกรณ์ไฟฟ้าเส้นใยของท่อและท่อความดัน ใช้เคลือบผิวของพื้นและผนัง ใช้เป็นวัสดุของแผ่นกำบังนิวตรอน ซีเมนต์และปูนขาว ใช้เคลือบผิวถนนเพื่อกันลื่น ใช้ทำโฟมแข็ง และใช้เป็นสารในการทำสีของแก้ว เป็นต้น

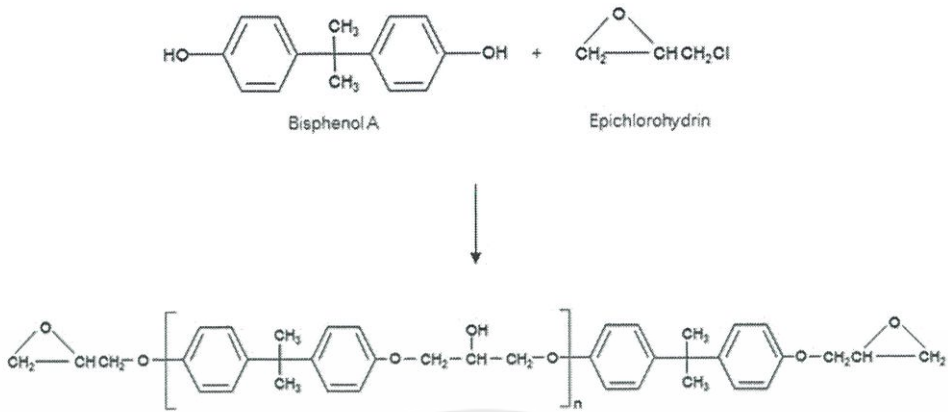
2.1.2 ชนิดและการเลือกใช้อีพอกซีเรซิน

โดยทั่วไปสามารถแบ่งชนิดของอีพอกซีเรซินได้เป็น 6 ชนิด คือ ไบฟีนอลเบสเรซิน (Bisphenol A based resin) กลีซิดิวเอสเทอร์เรซิน (Glycidyl ester resin) กลีซิดิวเอมีนเรซิน (Glycidyltamin resin) กลีซิดิวอีเทอร์โนวาแลกเรซิน (Glycidyl ethers of novotac resin) โบรมีนเตดเรซิน (Brominated resin) และเรซินชนิดอื่น ๆ (Other resin) [1]

- ไบฟีนอลเบสเรซิน (Bisphenol A based resin)

Bisphenol A base resin หรือ Diglycidyl Ether of Bisphenol A (DGEBA) มีปฏิกิริยาการสังเคราะห์เป็นตัวอย่างของอีพอกซีเรซินทางการค้าซึ่งสามารถสังเคราะห์โดยการทำปฏิกิริยาของ Bisphenol A กับ epichlorohydrin ร่วมกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.2 ปฏิกิริยาสังเคราะห์ Diglyceryl Ether of Bisphenol A (DGEBA)

จากโครงสร้างสังเกตว่า DGEBA มีหมู่อีพอกไซด์เป็นหมู่ปลายโซ่ (end group) มีจำนวนหน่วยซ้ำ ๆ กันเท่ากับหน่วย n ผลิตภัณฑ์ทางการค้ามีค่า n อยู่ในช่วง 0-25 มีค่ามากน้อยเพียงใดขึ้นกับอัตราส่วนโดยโมลของสารตั้งต้น พอลิเมอร์ที่ได้มีค่า n ต่ำ (น้ำหนักโมเลกุลต่ำ) ถ้าอัตราส่วนโดยโมลของ epichlorohydrin : bisphenol A มีค่าสูง และจะมีค่าสูงสุดเมื่อโมล / โมลของสารตั้งต้นทั้งสองเป็น 1:1 ผลของอัตราส่วนของสารตั้งต้นต่อน้ำหนักโมเลกุลของอีพอกซีเรซินที่ได้ แสดงดังตารางที่ 2.1

ตาราง 2.1 ผลของอัตราส่วนโดยโมลสารตั้งต้นที่มีต่อน้ำหนักโมเลกุลของอีพอกซีเรซิน

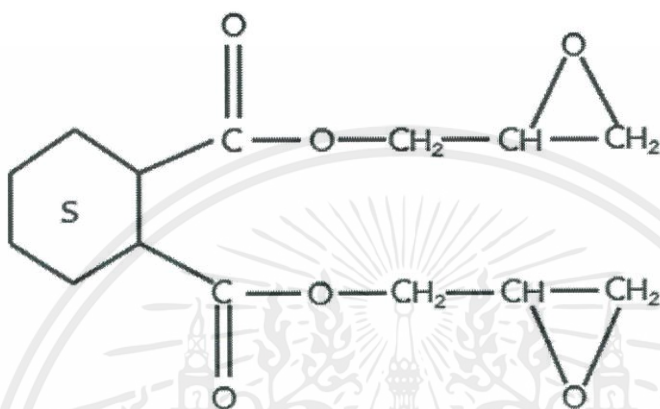
อัตราส่วนโดยโมลของ Epichlorohydrin: bisphenol A	น้ำหนักโมเลกุล	จุดอ่อนตัว °C
10.0 : 1	370	9
2.0 : 1	451	43
1.4 : 1	791	84
1.33 : 1	802	90
1.25:1	1133	100
1.2:1	1420	112

สถานะของพอลิเมอร์ขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยต่ำพอลิเมอร์มีสถานะเป็นของเหลวหนืด และถ้ามีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยสูงจะเป็นของแข็งเปราะมีจุดหลอมเหลวสูง อีพอกซีเรซินมีหลายชนิดยกตัวอย่างดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กลีซิดิวเอสเทอร์เรซิน (Glycidyl ester resin)

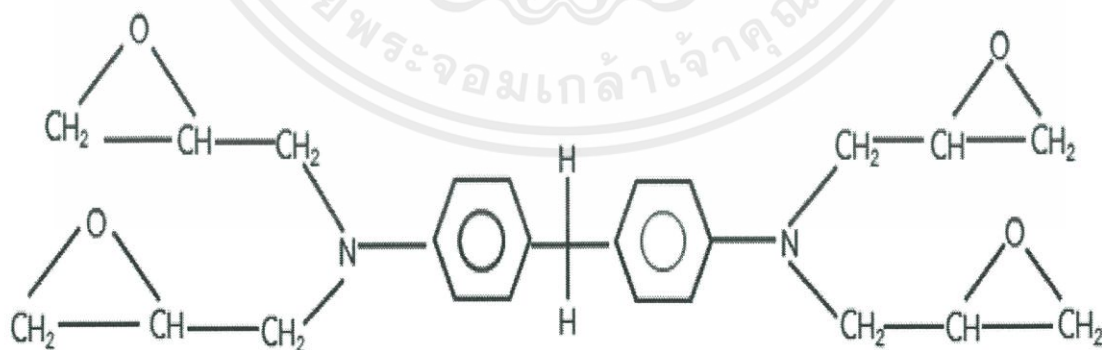
สามารถสังเคราะห์โดยการทำปฏิกิริยา ของ bisphenol A กับ diacid อีพอกซีเรซินชนิดนี้ใช้กับงาน พันมอเตอร์ (High Voltage electrical insulator) ใช้เตรียมลามิเนตสำหรับชิ้นงานที่ต้องบ่มที่ อุณหภูมิสูงถ้าต้องการทำลามิเนต ต้องใช้ร่วมกับสารเชื่อมโยงประเภทแอนไฮไดรด์



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของกลีซิดิวเอสเทอร์เรซิน

- กลีซิดิวเอมีนเรซิน (Glycidylamine resin)

กลีซิดิวเอมีนเรซินสามารถสังเคราะห์โดยทำปฏิกิริยากับ bisphenol กับ amine อีพอกซีเรซินชนิดนี้ เหมาะสมกับการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะทนความร้อนและทนต่อรังสีนิวเคลียร์

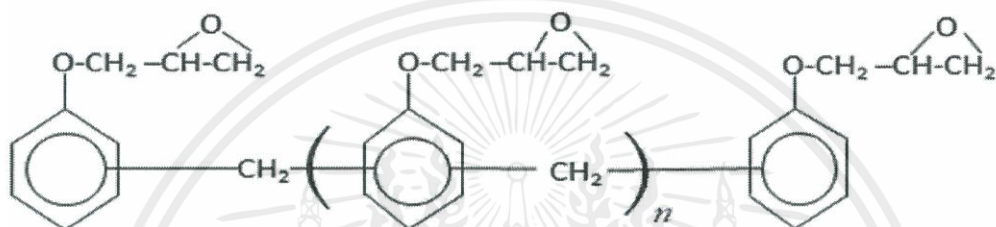


ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของกลีซิดิวเอมีนเรซิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กลีซิดิวีเทอร์โนวาแลก (Glycidyl esters of novalac resin)

กลีซิดิวีเทอร์โนวาแลกเรซิน (Glycidyl ethers of novalac resin) เป็นอีพอกซีเรซินที่เตรียมจากโนวาแลก ซึ่งโนวาแลกได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างฟีนอลและแอลดีไฮด์ โดยมีอัตราส่วน 1 : 2 : 1 ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นที่เป็นกรด กลีซิดิวีเทอร์โนวาแลกเรซินสามารถสังเคราะห์โดยการทำปฏิกิริยาของโนวาแลกกับอีพิคลอโรไฮดริน (Epichlorohydrin) อีพอกซีเรซินชนิดนี้เหมาะกับการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ทนต่อสารเคมี (Chemical resistance) และทำแผงคอมพิวเตอร์โดยสารเชื่อมโยงที่ใช้คืออะโรมาติกไดเอมีน (Aromatic diamine) ตัวเร่งปฏิกิริยา คือสารเชิงซ้อนโบรอนไตรฟลูออไรด์

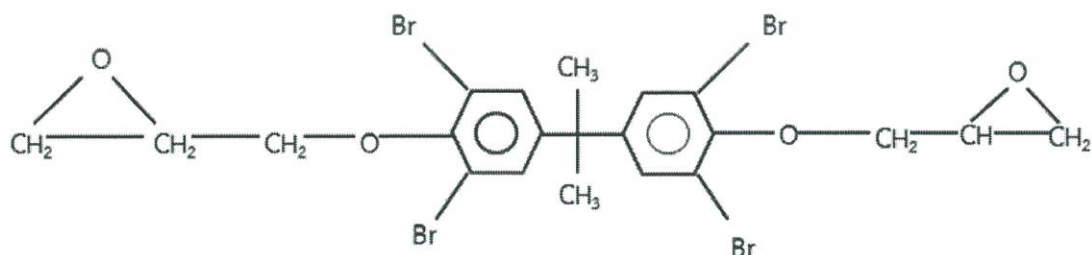


ภาพที่ 2.5 โครงสร้างของกลีซิดิวีเทอร์โนวาแลกเรซิน

- โบรมีนเตตเรซิน (Brominated resin)

โบรมีนเตตเรซิน (Brominated resin) เป็นอีพอกซีเรซินที่มีโบรมีนประกอบอยู่ในโครงสร้างด้วยสารเชื่อมโยง (Curing agent) คือ ไดไซยาไมด์เอมีน (dicyandiamide) ใช้กับงานที่ทนไฟ งานเหล็ก ใช้เป็นแผงวงจรไฟฟ้า

เรซินชนิดอื่น ๆ ส่วนใหญ่เป็นเรซินที่สังเคราะห์เพื่อใช้งานในเฉพาะด้าน เช่น ใช้งานเกี่ยวข้องกับ อวกาศ (Aerospace application)



ภาพที่ 2.6 โครงสร้างของโบรมีนเตตเรซิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 การเชื่อมโยงอีพอกซีเรซิน (Curing of Epoxy Resins) [2]

กระบวนการเชื่อมโยงปฏิกิริยาเคมีระหว่างหมู่อีพอกไซด์ในอีพอกซีเรซินกับสารเชื่อมโยง หรือฮาร์ดเนอร์ (hardener) จะเกิดการเชื่อมโยงพันธะเป็นโครงร่างตาข่าย 3 มิติ อีพอกซีเรซินจะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวหนืดกลายเป็นของแข็งและไม่สามารถหลอมเหลวได้ จึงกลายเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง ฉะนั้นจึงต้องเชื่อมโยงอีพอกซีเรซินกับฮาร์ดเนอร์โดยปกติทั่วไปจะสามารถเชื่อมโยงได้รวดเร็วและง่ายที่อุณหภูมิต่าง ๆ ตั้งแต่ 5 - 150 องศาเซลเซียส ทั้งนี้อยู่กับฮาร์ดเนอร์ที่ใช้การเลือกใช้สารเชื่อมโยงในอีพอกซีเรซินขึ้นอยู่กับกระบวนการของอีพอกซีเรซินที่ต้องการ ซึ่งที่เป็นที่นิยมใช้ทั่วไปอุตสาหกรรมทั่วไปในประเทศได้แก่ amine polyamides phenolic resin anhydrides isocyanates และ polymercaptans จลศาสตร์ของปฏิกิริยาการเชื่อมโยงและค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของระบบขึ้นอยู่กับโครงสร้างโมเลกุลของสารเชื่อมโยงการเลือกอีพอกซีเรซินและสารเชื่อมโยงขึ้นอยู่กับการใช้งาน กระบวนการและสมบัติอื่น ๆ ที่ต้องการ โดยปริมาณสารสัมพันธ์ของอีพอกซีเรซินกับฮาร์ดเนอร์ส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ได้ ชนิดและปริมาณของสารเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อการควบคุมความหนาแน่นภายในโครงสร้างในระหว่างการเชื่อมโยงพันธะ (cross link) สำหรับเอมีน (amine) และฟีนอลิก เรซิน (phenolic resin) ซึ่งเป็นสารเชื่อมโยงที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการผลิตอีพอกซีเรซิน

ก. สารเชื่อมโยงประเภทเอมีน (Amine based curing agents)

เอมีนเป็นสารเชื่อมโยงที่นิยมใช้กันมากที่สุดในการผลิตอีพอกซีเรซิน อาจเป็นเอมีนชนิดปฐมภูมิหรือทุติยภูมิ อะลิฟาติกหรืออะโรมาติกเอมีน สำหรับเอมีนชนิดตติยภูมิส่วนใหญ่นิยมใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหรือ accelerators ซึ่งหากใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณมากเกินไปจะส่งผลให้เกิดการเชื่อมโยงเร็วกว่าปกติ หากใช้ในปริมาณที่พอเหมาะและความร้อนสม่ำเสมอจะส่งผลดีต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ ยกตัวอย่างเช่น

- เอทิลีนไดเอมีน (Ethylene diamine, EDA) นำไปผสมกับอีพอกซีเรซินทำให้เกิดการแข็งตัวได้เนื่องจากกลิ่นฉุนจึงถูกนำมาใช้งานน้อยใช้กับงานทาผิว

- ไตรเอทิลีนเตตระอะมีน (Triethylene tetraamine, TETA) ใช้เป็นสารเชื่อมโยงใน DGEBA ที่อุณหภูมิห้อง ใช้กับงานฉาบผิว หล่อรูป (มีสีเหลืองอ่อน)

- 4,4 ไดอะมีโนไดฟีนิลมีเทน (4,4-Diaminodiphenyl methane, DDM) เป็นสารเชื่อมโยงสำหรับใช้เตรียม prepreg จุดหลอมเหลว 100 องศาเซลเซียส มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว แต่ไม่นิยมใช้เนื่องจากเป็นสารก่อมะเร็ง

4,4 ไดอะมีโนไดฟีนิลซัลโฟน (4,4-Diaminodiphenyl sulfone, DDS) ใช้ร่วมกับสารประกอบโบรอนไตรฟลูออไรด์ (Boron trifluoride Complex) ซึ่งใช้อุณหภูมิ 130-140 องศาเซลเซียส เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซลเซียสแล้วจึงเติม DDS ลงไปและคนให้เข้ากัน ถ้าต้องเตรียม prepreg ต้องนำเรซินไปละลายพร้อม กับ DDS ในอะซิโตนหรือเมทิลคีโตน สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำเอา DGEBA ผสมกับ DDS สามารถใช้งานที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสได้

ข. สารเชื่อมโยงประเภทแอนไฮไดรด์ (Anhydride curing agent)

สารเชื่อมโยงประเภทนี้จะทนความร้อนดีกว่าสารเชื่อมโยงประเภทเอมีนแต่ต้องใช้เอมีนตติยภูมิเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น แบ่งตามสถานะและการใช้งานออกเป็น 3 ประเภท

1. ของเหลว (Liquid) ได้แก่ Methyl tetrahydrophthalic anhydride (MTHPA), Nadic methyl anhydride (NMA) ส่วนใหญ่ใช้งาน prepreg งานไฟฟ้าและ filament winding application (เอาเส้นใยชุบเป็นเส้นและพับเป็นชิ้นงาน)

2. ของแข็งที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ (low melting solid) ได้แก่ Hexahydrothalic anhydride จุดหลอมเหลว 35 องศาเซลเซียสใช้กับงานหล่อ (casting)

3. ของแข็งที่มีจุดหลอมเหลวสูง (High melting solid) ได้แก่ Trimetic anhydride จุดหลอมเหลว 160 องศาเซลเซียส สามารถละลายได้ในเรซิน 125 องศาเซลเซียส ใช้ทำผลิตภัณฑ์ที่ทนต่ออุณหภูมิสูงเช่น powder Coating และงาน prepreg ตัวอย่างของตัวเร่งที่ใช้กับสารเชื่อมโยงประเภทนี้ ได้แก่ Benzyl dimethylamine (BDMA) N-Buthylimidazole (BLDZ)

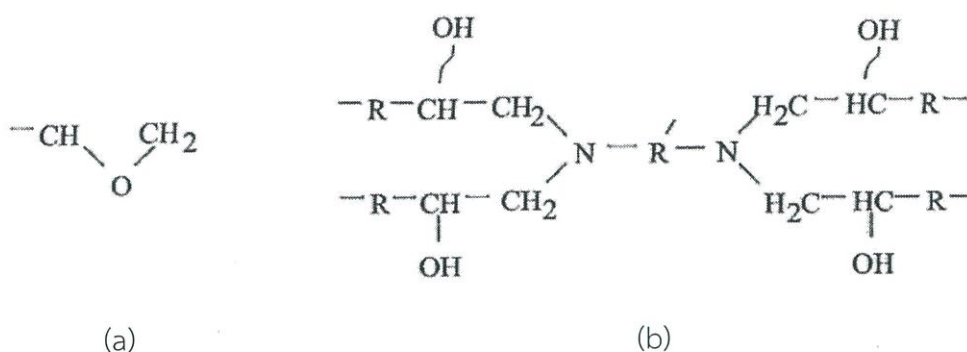
ค. สารเชื่อมโยงประเภทพอลิเอไมด์ (Polyamine Curing agent)

เป็นพอลิเอไมด์ที่เตรียมจากไดคาร์บอกซิลิกกับไดเอมีน ซึ่งเป็นพวกอะลิฟาติกได้เป็นพอลิเอไมด์ เช่น บริษัท Ciba-Geigy ผลิตพอลิเอไมด์ Araldite บริษัทที่ทำการผลิตพอลิเอไมด์ชื่อ Beckopex

2.2 การใช้งานอีพอกซีเรซินทำเป็นฉนวน [3]

การเป็นฉนวนไฟฟ้ามีคุณสมบัติเชิงกลและความร้อนที่ดีทนต่อปฏิกิริยาเคมีและการกัดกร่อน จากธรรมชาติสามารถนำมาหล่อหุ้มอุปกรณ์ไฟฟ้าได้ ส่วนมากจะใช้เป็นฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เช่น หม้อแปลง สวิตช์เกียร์ เครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้า ตัวเก็บประจุ ตัวต้านทานเป็นต้น มีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า 500 V/mil ค่าเปอร์มิติวิตี (60-10 Hz) 0.04 -0.03 ค่าสภาพต้านทาน 3.9×10 โอห์ม เซนติเมตร และ ค่า arc resistance 45 วินาที คุณสมบัติของอีพอกซีเรซินแสดงในตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนประเภทเทอร์โมเซตติงอื่นๆ แสดงในตารางที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของอีพ็อกซีเรซิน (a) วงแหวนอีพ็อกไซด์เป็นสารตั้งต้นในการทำอีพ็อกซีเรซิน (b) โครงสร้างของสารประกอบอีพ็อกซีเรซิน [3]

ตาราง 2.2 คุณสมบัติของอีพ็อกซีเรซิน [3]

Property	Unfilled	Silica Filled
Volume resistivity, $\Omega\text{-cm}$	$10^{12}\text{-}10^{17}$	$10^{13}\text{-}10^{16}$
Dielectric strength, V/mil		
Short time	400-550	400-550
Step-by-step	350	
Dielectric constant		
60 Hz	3.5-5.0	3.2-4.5
10^3 Hz	3.5-4.5	3.2-4.0
10^6 Hz	3.3-4.0	3.0-3.8
Dissipation factor		
60 Hz	0.002-0.010	0.008-0.03
10^3 Hz	0.002-0.020	0.008-0.03
10^6 Hz	0.030-0.050	0.02-0.04
Arc resistance, s	45-120	150-300
Specific gravity	1.11-1.14	1.6-2.0
Modulus of elasticity in tension, $\text{psi} \times 10^5$	3.0-3.5	3.5-4.0
Percent elongation, %	3-6	1-3
Flexural strength, $\text{psi} \times 10^3$	13-21	8-14
Compressive strength, $\text{psi} \times 10^3$	15-21	15-40
Rockwell hardness	M80-M110	M85-M120
Impact strength, ft-lb/in.	0.2-1.0	0.3-0.45
Heat distortion temperature, $^{\circ}\text{F}$ at 264 psi	115-550	160-550
Thermal conductivity, $\text{cal/}^{\circ}\text{C} \cdot \text{cm} \cdot \text{s} \times 10^4$	4-5	10-20
Thermal expansion,		
in./in. per $^{\circ}\text{C} \times 10^5$	4.5-6.5	2.0-4.0
Water absorption, %	0.08-0.15	0.04-0.10
Burning rate	Slow to self extinguish	Self-extinguishing

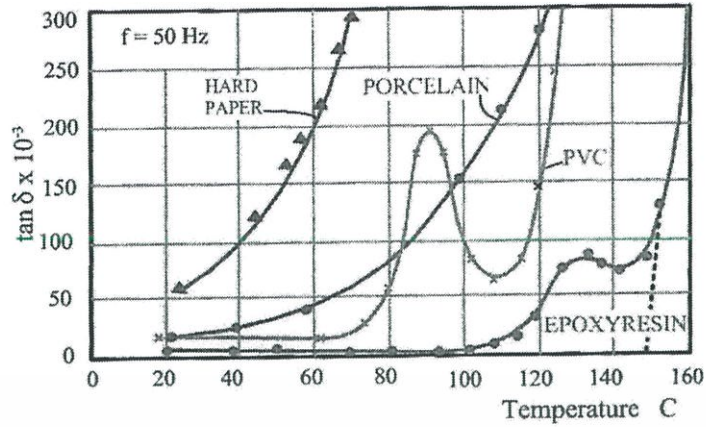
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ : Arc resistance ตามมาตรฐาน ASTM D495: วัสดุใดมีค่า arc resistance มาก แสดงถึงมีความสามารถ ต้านทานต่อการเกิดเบรกดาวน์ตามผิว (Surface breakdown) ที่มีสาเหตุมาจากการอาร์คหรือการเกิดร่องรอยการนำไฟฟ้าบนผิวฉนวน (Arcing or tracking) ค่า arc resistance กำหนดเป็นเวลา (วินาที) ที่ทำให้เกิดการ breakdown ตลอดทั้งผิววัสดุทดสอบ โดยการทดสอบ จะต้องมีกำหนดลักษณะผิววัสดุทดสอบและสภาพแวดล้อมการทดสอบ โดยเฉพาะเรื่องของ ความชื้น วัสดุทดสอบจะต้องมีความหนา 0.125 นิ้ว ผิวเรียบแบน

ตาราง 2.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของโพลีเมอร์ประเภทเทอร์โมเซตติง [3]

Compound	Dielectric Strength V/mil (kV/mm)	Dielectric constant		Dielectric factor		Maximum Service Temperature °C	Arc Resistance (second)
		60 Hz	10 ⁶ Hz	60 Hz	10 ⁶ Hz		
Glass-filled allyle	400(15.7)	4.2	3.5	0.004	0.01	260	140
Glass-Filled phenolic	380(15.0)	6.0	5.0	-	0.02	232	180
Glass-filled epoxy (electricalgrade)	390(15.4)	5.0	4.6	0.1	0.01	204	187
Glass-filled melamine	340(13.4)	8.0	6.2	-	0.02	204	180+
Glass-filled akyl/polyester	375(14.8)	54.3	4.6	0.1	0.02	204	180+

จากการยกตัวอย่างพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ที่ได้นำมาใช้เป็นฉนวนไฟฟ้านั้นจะพบว่าคุณสมบัติไม่เหมือนกัน การเลือกใช้งานจึงต้องคำนึงถึงความเหมาะสมของงานแต่ละประเภท รวมทั้งต้องพิจารณาความสูญเสียของฉนวนที่เกิดขึ้นด้วย ดังแสดงในภาพที่ 2.8 และตารางที่ 2.4 ตามลำดับ



ภาพที่ 2.8 เปรียบเทียบค่าแฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวนแข็งชนิดต่างๆที่ความถี่ 50

[3]

ตาราง 2.4 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนแข็งอื่นๆ [3]

Materials	ϵ_r	$\tan \delta$ at 25 °C 1 MHz (average)	ρ_v at 25 °C ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Breakdown Stress (kV/mm)
Quartz glass	3.9	5×10^{-4}	10^{12}	
Lead glass	9			
Soda – lime glass	7	0.01		10 - 40
Glass ceramic	5 - 7	0.001 - 0.1	$10^{12} - 10^{14}$	20 - 80
Porcelain	5	0.04	$10^{12} - 10^{15}$	20 - 30
Zirconium ceramic	7-12	0.003		20 - 30
Alumina ceramic	10	0.0005		
Barium titanate ceramic	2,000 – 8,000	0.1		
Micanite	5 - 11	0.003	$10^{14} - 10^{16}$	50 (for 1 mm specimen) 100 – 200 (for 0.1 mm specimen)
PVC	6	0.1		
PE	2.3	0.0001	$10^{15} - 10^{18}$	40
Polystyrene	2.6	0.0001	$10^{16} - 10^{18}$	30 - 40
PTFE	2	0.0002	$10^{16} - 10^{18}$	25
Bakelite	4.5	0.1	10^{13}	
Vulcanized nature rubber	3.5	0.05		
Methy methacrylate	3.6	0.01		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) [4]

2.3.1 ลักษณะสมบัติเฉพาะทั่วไป

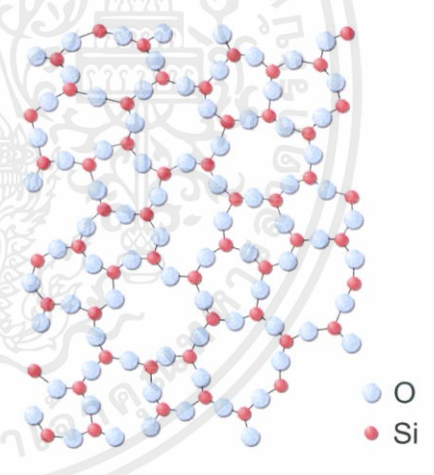
ซิลิกอนไดออกไซด์หรือที่รู้จักโดยทั่วไปคือซิลิกา ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ตามธรรมชาติหรือสังเคราะห์ขึ้นโดยมีลักษณะโครงสร้างเป็น O=Si=O ซิลิกาจะปรากฏอยู่ในสถานะผลึกและมักอยู่ในรูปควอตซ์ ทั้งนี้รูปร่างทางกายภาพของซิลิกาแบ่งได้ 3 แบบ คือ แบบผลึก (Crystalline) อสัณฐาน (amorphus) และอสัณฐานสังเคราะห์วัสดุนาโนซิลิกาทั่วไปแล้วมีรูปร่างเป็นอสัณฐานสังเคราะห์ หรือที่เรียกว่า Synthetic amorphus silica หรือ SAS โดยได้มาจากการสังเคราะห์ 3 วิธีคือ

1. การให้ความร้อน (thermal route) โดยมาจากการให้ความร้อนเพื่อให้เกิดการไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ในสถานะก๊าซของสารคลอโรซิลเลน (chlorosilanes) ภายใต้เปลวไฟของออกซิเจนหรือไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิประมาณ 1,000 องศาเซลเซียส
2. วิธีเปียก (wet route) โดยการตกตะกอนของซิลิกาและซิลิกาเจล หรือซิลิกาแอร์เจล ซึ่งเกิดจากการควบคุมปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน (polymerization) และเกิดการตกตะกอนของ SAS จากสารละลายไฮเดียมซิลิเกตโดยซิลิกาที่ได้จะอยู่ในรูปอสัณฐาน
3. วิธีซิลิกาโซล (silica sols) หรือคอลลอยด์ ซิลิกา (colloidal silica) โดยซิลิกาโซลเป็นซิลิกา SAS ที่กระจายตัวในของเหลวโดยทั่วไปคือน้ำและซิลิกาโซลนี้เกิดจากการไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ของซิลิกอนเตตระคลอไรด์ (silicon tetrachloride) ในน้ำหรือสารละลายที่เป็นโพลิเมอร์ไรเซชันของไฮเดียมซิลิเกต

วิธีการที่นิยมใช้สำหรับการสังเคราะห์ซิลิกา คือ วิธีเปียก (ตกตะกอน) และวิธีให้ความร้อน โดย Synthetic amorphous silica ที่ได้จากสองวิธีนี้จะมีลักษณะสมบัติแตกต่างกันจึงมีรหัสของ CAS No. ที่แตกต่างกัน (CAS No. 112926-00-8 และ 112945-52-5 ตามลำดับ) ซิลิกาในรูป amorphus silica จะมีขนาดเล็กในช่วง 100 -1,000 นาโนเมตรและมีแนวโน้มจะรวมตัวกันเป็นกลุ่ม จึงเป็นที่รู้จักในนามอนุภาคนาโนซิลิกา (silica nanoparticles, SNPs) ในปัจจุบันได้มีการผลิต SNPs ให้มีขนาดเล็กมากขึ้น โดยขนาดของอนุภาคนาโนซิลิกา ปัจจุบันมีขนาดเล็ก ลงถึง 10-25 นาโนเมตร การสังเคราะห์ด้วยการให้ความร้อนทำให้สามารถผลิตอนุภาคนาโนซิลิกาเล็กได้ถึง 2 นาโนเมตร ขนาดรูพรุนของนาโนซิลิกามักอยู่ในช่วง mesopores ซึ่งมีขนาดประมาณ 2.50 นาโนเมตรหรืออาจอยู่ในรูปที่ไม่มีรูพรุนได้ อนุภาคนาโนซิลิกาไม่ละลายน้ำเมื่อปรากฏอยู่รูป SiO₂, H₂O โดยลักษณะพื้นผิวของซิลิกาจะเป็นลักษณะชอบน้ำ (hydrophilic) ซึ่งสมบัตินี้จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนกลุ่มไฮดรอกซิลที่มีพันธะกับซิลิกอนหรือที่เรียกว่ากลุ่ม silanols ในอนุภาคนาโนซิลิกา โดยในกลุ่มนี้จะทำให้เกิดการสร้างพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำ ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้อนุภาคนาโนซิลิกามีสมบัติในการดูดซับน้ำได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 2.5 ลักษณะและสมบัติทั่วไป

ชื่อ	Silicon dioxy, silica synthesis, amorphous silica, silica nanoparticles
CAS number	7631-86-9 (CAS No 112945-52-5 and 112926-00-8)
สูตรโมเลกุล	SiO ₂
น้ำหนักโมเลกุล	60.09 กรัมต่อโมล
ความหนาแน่น	2.2 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ต่อ 20 องศาเซลเซียส
จุดหลอมเหลว	ประมาณ 1,700 องศาเซลเซียส
ลักษณะทั่วไป	ผงสีขาว ไม่ละลายน้ำ (water insoluble) ลักษณะโครงสร้าง SiO ₄ , tetrahedral
ลักษณะโครงสร้างทางเคมี	

2.3.2 ซิลิกอนไดออกไซด์ในแก้วและขวดแก้ว (Bottle / beverage glass) [5]

แก้วเป็นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตขึ้นมาจากทรายโดยมีหินปูนและโซดาไฟเป็นส่วนประกอบหลัก โดยนำมาหลอมและขึ้นรูปเป็นภาชนะต่าง ๆ เช่น แก้วน้ำ ขวดอาหารและเครื่องดื่ม ฯลฯ แก้วเป็นวัสดุที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ ขวดแก้วทุกประเภทสามารถนำมารีไซเคิลได้แต่ขวดแก้วแต่ละประเภทแต่ละสีจะมีราคาต่างกัน คือ ขวดแก้วสีขาวจะมีราคาดีที่สุทธองลงมาคือสีขาและสีเขียว ถ้าเป็นขวดดีที่ไม่แตกก็จะได้ราคาสูงกว่าขวดแตกหรือเศษแก้ว ดังนั้นควรมีการคัดแยกแก้วออกตามสี โดยแก้วสามารถแบ่งออกได้หลายประเภท ดังนี้

1. Alkalies-Barium Silicate Glass เป็นแก้วที่ใช้ในการผลิตจอภาพของโทรทัศน์ เนื่องจากในการทำงานของโทรทัศน์จะมีการปล่อยรังสีเอ็กซ์ (X-Ray) ออกมาในปริมาณมากซึ่งเป็นอันตรายต่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร่างกาย จึงมีน้ำแก้วชนิดนี้มาผลิตเป็นจอภาพ เนื่องจากการที่แก้วชนิดนี้มีคุณสมบัติในการสามารถดูดซับรังสีเอ็กซ์ (X-Ray) ได้ทำให้ผู้ชมสามารถดูโทรทัศน์ได้อย่างปลอดภัย

2. Aluminosilicate Glass เป็นแก้วอลูมิเนียมซิลิเกตเป็นแก้วที่มีส่วนประกอบเป็น อลูมิเนียมออกไซด์ (aluminium oxide (Al_2O_3)) ประมาณ 20% (ส่วนใหญ่มักจะมีส่วนประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide (CaO)) ปนอยู่ด้วยเล็กน้อย) รวมทั้งยังมีส่วนประกอบที่เป็นแมกนีเซียมออกไซด์ (magnesium oxide (MgO)) บอริกออกไซด์ (boric Oxide (B_2O_3)) โซเดียมออกไซด์ (Sodium oxide (Na_2O)) และโพแทสเซียมออกไซด์ (potassium oxide (K₂O)) ในปริมาณสัดส่วนที่เล็กน้อย โดยเฉพาะการที่มีสัดส่วนของโซดาหรือโซเดียมออกไซด์และโพแทสเซียมหรือโพแทสเซียมออกไซด์ในปริมาณที่น้อยทำให้แก้วชนิดนี้ทนทานต่ออุณหภูมิสูง (High Thermal Resistance) และทนทานสภาวะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน (Thermal Shock Resistance) ได้ดีจึงนิยมใช้แก้วชนิดนี้ในการผลิตเป็นหลอดแก้วที่ติดตั้งในเตาเผา (Combustion Tube) เพื่อใช้ในการเผาไหม้สารต่าง ๆ กับอากาศหรือออกซิเจนนอกจากนี้ยังใช้แก้วอลูมิเนียมซิลิเกตในการผลิตหลอดฮาโลเจนทั้งสแตน (halogen - tungsten lamp) เป็นแก้วที่ทนอุณหภูมิได้สูงมากโดยทนได้ถึง 750 องศาเซลเซียส

3. Borosilicate Glass แก้วชนิดนี้จะเป็นแก้วที่เราค่อนข้างจะคุ้นเคย เนื่องจากเราจะพบเห็นอุปกรณ์หรือเครื่องใช้หลายชนิดที่ผลิตจากแก้วชนิดนี้ ตัวอย่างเช่น ภาชนะแก้วทนความร้อน ต่าง ๆ (Ovenware หรือ heat resisting ware) เช่น ผลิตภัณฑ์ยี่ห้อหนึ่งที่คนส่วนใหญ่รู้จัก ซึ่งก็คือ Pyrex) ทั้งนี้แก้วโบโรซิลิเกตจะมีส่วนประกอบหลักเป็นซิลิกา (silica) ประมาณ 70-80% และมีส่วนประกอบเป็นบอริกออกไซด์ (boric oxide (B_2O_3)) ประมาณ 7-13% นอกเหนือจากนั้นจะเป็นส่วนประกอบของโซเดียมออกไซด์ (sodium oxide (Na_2O)) โพแทสเซียมออกไซด์ (potassium Oxide (K_2O)) และอลูมิเนียมออกไซด์ (aluminum oxide (Al_2O_3)) ในปริมาณเล็กน้อย จากการที่มีส่วนประกอบของสารประกอบออกไซด์ของโลหะอัลคาไลน์ (โซเดียมออกไซด์และโพแทสเซียมออกไซด์) ในปริมาณที่น้อยจึงทำให้แก้วชนิดนี้สามารถทนทานต่อสารเคมีต่าง ๆ (High Chemical Resistance) และทนทานต่อสภาวะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน (Thermal Shock Resistance) ได้ดี ดังนั้นจึงมีการนำแก้วชนิดนี้มาใช้งานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับสารเคมีอย่างแพร่หลาย เช่น อุปกรณ์เครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการ (Laboratory apparatus) ตัวอย่างเช่น หลอดทดลอง (test tube) หลอด (ampoules) ปีกเกอร์ (beaker) ขวดรูปชมพู่ (flask) บิวเรต (buret) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการใช้แก้วชนิดนี้ในการผลิตเป็นอุปกรณ์หลอดไฟและใช้เป็นส่วนประกอบในการผลิตใยแก้ว (glass fiber) ที่ใช้สำหรับการผลิตเป็นผ้าฉนวนกันความร้อนต่าง ๆ และการใช้เป็นส่วนประกอบที่เสริมความแข็งแรงให้กับผลิตภัณฑ์พลาสติก เช่น glass filled Teflon glass filled nylon glass filled polypropylene เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. Commercial Glass แก้วชนิดนี้เป็นแก้วที่เราคุ้นเคยมากที่สุด เนื่องจากจะพบเห็น และใช้งานแก้วชนิดนี้อยู่เป็นประจำในชีวิตประจำวัน เช่น ขวดแก้ว (bottles) แก้วน้ำ (drinking glasses) แผ่นกระจกที่ใช้ทำหน้าต่าง (flat glass for window) เหยือกน้ำ (jars) ซึ่งแก้วชนิดนี้จะมี ชื่อเรียกว่า "commercial glass" หรือ "soda lime glass" แก้วชนิดนี้มีส่วนประกอบหลักเป็นทราย (sand) โดยเป็นนำทรายมาหลอมด้วยความร้อนสูงประมาณ 1,700 องศาเซลเซียส เพื่อผลิตเป็นแก้ว (แก้วบางชนิดมีการใส่สารเคมี หรือแร่ธาตุบางอย่างเข้าไปจะทำให้ทรายมีจุดหลอมเหลว (melting point) ที่ต่ำลง เช่น การผลิตแก้วโซดาไลม์ (Soda lime glass) จะมีการเติมโซดาแอชหรือโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ลงไป ซึ่งจะทำให้เกิดส่วนผสมของซิลิกา (silica (SiO_2)) ประมาณ 75% และ โซเดียมออกไซด์ (Sodium oxide (Na_2O)) ประมาณ 25% ซึ่งจะทำให้จุดหลอมเหลวของทรายต่ำลงเหลือ 800 องศาเซลเซียส ซึ่งแก้วที่ได้จะมีชื่อเรียกว่า "water glass" แก้วชนิดนี้จะละลายน้ำได้ จึงจำเป็นต้องมีการเติมหินปูน (limestone) ซึ่งจะมีส่วนประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (calcium Oxide (CaO)) และแมกนีเซียมออกไซด์ (magnesium oxide (MgO)) ลงไป เพื่อให้แก้วมีความคงตัว ทั้งนี้ Commercial Glass โดยปกติแล้วจะไม่มีสี (Colourless) ทำให้สามารถส่งผ่านแสงได้อย่างอิสระ จึงทำให้มีการนำแก้วชนิดนี้มาใช้เป็นอุปกรณ์หรือเครื่องใช้ที่ต้องการให้แสงส่องผ่านได้สะดวก เช่น หน้าต่าง แต่แก้วชนิดนี้สามารถทำให้มีสีได้โดยการเติมสารเคมีบางชนิดที่ทำให้เกิดสีลงไป สำหรับ ส่วนประกอบของ "commercial glass" โดยทั่วไปจะมีส่วนประกอบดังนี้

ซิลิกา (silica (SiO_2))	ประมาณ	70-74%
โซเดียมออกไซด์ (sodium oxide (Na_2O))	ประมาณ	12-16%
แคลเซียมออกไซด์ (calcium Oxide (CaO))	ประมาณ	5-11%
แมกนีเซียมออกไซด์ (magnesium oxide (MgO))	ประมาณ	1-3%
อลูมิเนียมออกไซด์ (aluminum oxide (Al_2O_3))	ประมาณ	1-3%

โดยสำหรับการใช้งานที่ต่างกันก็จะมีส่วนประกอบในแต่ละส่วนที่มากน้อยต่างกัน เช่น แผ่นกระจกสำหรับทำหน้าต่าง (flat glass for window) จะมีสัดส่วนของแมกนีเซียมออกไซด์ที่น้อยกว่า แก้วที่นำมาผลิตเป็นภาชนะ

5. Glass Ceramics เป็นแก้วที่ผลิตจาก lithium aluminosilicate glass ซึ่งจะเป็นแก้วที่มีคุณสมบัติทนทานต่อสภาวะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างฉับพลันได้ดี (thermal shock resistance) จากคุณสมบัติดังกล่าว จึงมีการนำแก้วชนิดนี้ไปใช้งานในหลายด้าน เช่น Cooker hob (พื้นที่เรียบด้านบนสุดของเตาสำหรับเตาแม่เหล็กไฟฟ้า) Cooking ware (เครื่องแก้วที่ใช้ทำอาหาร) missile nose cone (ส่วนประกอบหัวจรวด) แก้วชนิดนี้จะมีคุณสมบัติทนความร้อนและทนทานต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การขยายตัวทางความร้อน (thermal shock) ได้ดีเป็นพิเศษเนื่องจากในการผลิตแก้วชนิดนี้จะมีการกระตุ้นการสร้างผลึก (Crystallization) และควบคุมสัดส่วนของปริมาณผลึกในแก้วให้มีความเหมาะสมเพื่อให้เกิดการผสมผสานคุณสมบัติที่ดีของแก้วและเซรามิก ซึ่งจะทำให้แก้วที่ได้มีความแข็งแรงทนทานยิ่งขึ้น

6. Glass Fiber หรือใยแก้วจะมีส่วนประกอบแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับลักษณะการนำไปใช้งาน เช่น ใช้เป็นฉนวนกันความร้อนบนหลังคา (roof insulation) ใช้เป็นอุปกรณ์เครื่องมือแพทย์ (medical equipment) ตัวอย่างอุปกรณ์ endoscope เป็นต้น ในกรณีที่จะใช้ใยแก้วในการเป็นฉนวนกันความร้อน และ glass Wool จะใช้แก้วชนิดโซดาไลม์ (Soda lime glass) แต่ถ้าจะผลิตเป็นลักษณะของสิ่งทอ (textiles) จะใช้แก้วชนิดอลูมิเนียมซิลิเกต (aluminosilicate glass) ที่มีส่วนประกอบของโซเดียมออกไซด์ (sodium oxide) ที่มีค่าต่ำ เพื่อให้ได้คุณสมบัติในการทนทานต่อ สารเคมีและอุณหภูมิจุดอ่อนตัวที่สูง (high softening point) นอกจากนี้ยังมีการนำใยแก้วถูกนำมาใช้ในการเสริมความแข็งแรงให้กับพลาสติก เช่น หมวกนิรภัย เรือ ท่อ เชือก แซสซีส์รถยนต์ ท่อไอเสีย รถยนต์ เป็นต้น รวมถึงยังมีการนำใยแก้วไปใช้ทำเป็นสายเคเบิลใยแก้วที่สามารถใช้ในการส่งผ่านข้อมูล (fiber optical) หรือสัญญาณภาพสัญญาณเสียงเพื่อใช้ในการสื่อสารหรือส่งผ่านข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ต่าง ๆ

7. Lead Glass ถูกเรียกโดยทั่วไปว่า "lead crystal" ซึ่งแก้วชนิดนี้จะถูกใช้ในการผลิตแก้วที่ใช้ในงานตกแต่ง (decorative glasses) โดยส่วนประกอบของแก้วชนิดนี้จะแตกต่างจากแก้วโดยทั่วไป คือ จะใช้ตะกั่วออกไซด์ (lead oxide (PbO)) แทนที่แคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide (CaO)) และใช้โพแทสเซียมออกไซด์ (potassium oxide (K₂O)) แทนที่โซเดียมออกไซด์ (sodium oxide (Na₂O)) ทั้งนี้แก้วแบบ Traditional English Full Lead Crystal จะมีส่วนประกอบของ lead oxide อยู่อย่างน้อย 30% แต่ถ้าแก้วที่มี lead oxide อยู่อย่างน้อย 24% จะเรียกแก้วชนิดนี้ว่า "lead crystal" แต่แก้วที่มีส่วนประกอบของ lead oxide น้อยกว่า 24% จะเรียกว่า "crystal glass" ทั้งนี้ตะกั่ว หรือ lead จะถูกตรึงอยู่ในโครงสร้างเคมีของแก้ว ซึ่งจะไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพ แต่ถ้าแก้วมีปริมาณของ lead Oxide สูงถึง 65% จะทำให้แก้วมีคุณสมบัติในการสามารถดูดซับรังสีแกมมาได้ดี แต่สำหรับ lead glass ที่ใช้ในงานตกแต่งจะมีดัชนีหักเหแสง (refractive index) สูงจึงทำให้เกิดประกายแสงระยิบระยับรวมทั้งตัวแก้วมีสภาพพื้นผิวที่อ่อนจึงสามารถนำมาบดตัดหรือแกะสลักได้ง่ายและเป็นที่ยอมรับในการนำมาทำภาชนะแก้วคริสตัลหรือใช้ในงานตกแต่ง

8. Optical Glass เป็นแก้วที่จะพบเห็นอุปกรณ์วิทยาศาสตร์ (Scientific instruments) อุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาทางภูมิศาสตร์ กล้องจุลทรรศน์ (microscope) เลนส์กล้องถ่ายรูป อุปกรณ์เกี่ยวกับเลเซอร์ เป็นต้น ทั้งนี้จากคุณสมบัติสำคัญของ optical glass คือ ดัชนีหักเหแสง (refractive index)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และการกระจายของแสง (dispersion) ซึ่งจากการผสมผสานกันระหว่างคุณสมบัติทั้งสองทำให้ได้คุณสมบัติของ optical glass ที่หลากหลายส่งผลต่อคุณภาพความคมชัดและสีของภาพอย่างที่เราจะพบในเลนส์ของกล้องถ่ายภาพ

9. Sealing Glass แก้วชนิดนี้จะมีส่วนผสมที่หลากหลายเพื่อใช้ในการป้องกันโลหะจากไฟฟ้าและส่วนประกอบหรือชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ทั้งนี้แก้วชนิดนี้สามารถถูกจัดกลุ่มตามสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (thermal expansion Coefficient) ซึ่งต้องสอดคล้องกับสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของโลหะ เพื่อที่จะทำให้สามารถปิดผนึกหรือป้องกันโลหะโดยปราศจากความเครียด (strain) มากเกินไปอันเกิดขึ้นเนื่องจากสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของแก้วและโลหะมีความแตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น สำหรับโลหะทั้งสแตน (tungsten) ควรใช้แก้วชนิด borosilicate alkaline earth-aluminous Silicate glass แต่ถ้าเป็นโลหะโมลิบดีนัม (molybdenum) และ iron-nickel-cobalt (Fenico) alloy ควรใช้โซเดียมซิลิเกต (sodium borosilicate) เป็นต้น

10. Technical Glass เป็นศัพท์ที่ใช้เรียกแก้วที่ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ โดยแก้วที่มีส่วนผสมที่ต่างกันจะถูกใช้ในการป้องกันส่วนประกอบของแผ่นวงจรรซิลิคอน (Silicon semiconductor Components) จากสารเคมีและความเสียหายจากการกระทบกระแทกซึ่งจะถูกเรียกว่า "passivation glass" ซึ่งเป็นส่วนผสมที่สำคัญมากในอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (microelectronics industry) และการผลิตแผ่นชิปซิลิคอน (silicon chip) ส่วนแก้วชนิดต่อมาคือ "phosphate glass" ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ซึ่งจะถูกใช้ในการผลิต electron multiplier ส่วนแก้วอีกชนิดหนึ่งคือ "chalcogenide glass" ซึ่งเป็นแก้วที่ใช้เป็นวัสดุในการส่งผ่านคลื่นอินฟราเรดและเป็นส่วนผสมของอุปกรณ์สวิตช์สำหรับหน่วยความจำในเครื่องคอมพิวเตอร์

11. Vitreous silica glass เป็นแก้วที่มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวต่ำ (low thermal expansion) แก้วชนิดนี้นิยมนำมาทำเป็นตัวกรอง (filter) ซึ่งการทำให้แก้วมีรูพรุนจะเป็นใช้ปฏิกิริยาเคมีกับกรดโดยแก้วที่มีรูพรุนนี้จะถูกเรียกว่า "vycor"

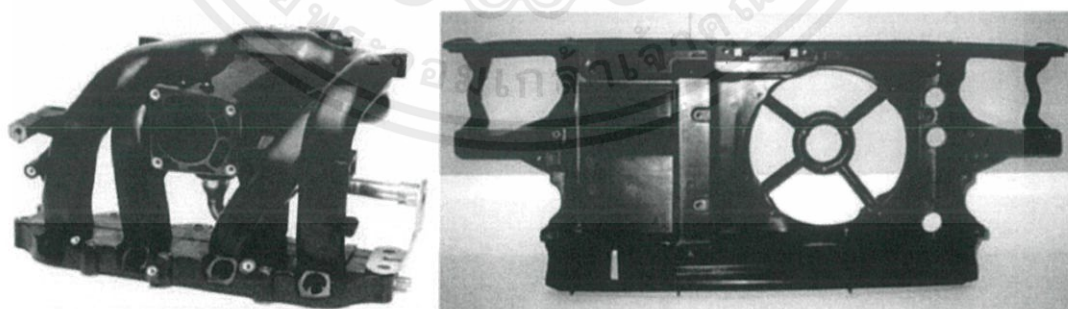
2.3.3 การใช้ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) เป็นเฟสเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิต

2.3.3.1 การเสริมแรงในวัสดุทั่วไป [6]

วัสดุเชิงประกอบเป็นวัสดุสำคัญในอุตสาหกรรม เช่น ในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง เส้นใยแก้ว (fiber glass) ที่ถูกพัฒนามาพิเศษเพื่อการเสริมแรงให้กับเมทริกซ์ซีเมนต์ หรือการใช้คอนกรีตที่เกิดจากซีเมนต์เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยลวดทำให้เกิดเป็นคอนกรีตที่มีน้ำหนักเบา ด้านวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ไม่นิยมใช้เป็นวัสดุโครงสร้างที่รับแรงโดยตรงแต่มักใช้ประกอบกับวัสดุโครงสร้างเดิมเพื่อเสริมประสิทธิภาพให้ดียิ่งขึ้น สำหรับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์วัสดุเชิงประกอบโลหะที่เป็นอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์เสริมแรงเมทริกซ์อลูมิเนียมจะนำมาใช้เป็นวัสดุสำหรับการทำฮาร์ดดิสก์เพราะสามารถออกแบบให้มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนได้โดยการปรับสัดส่วนของอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ วัสดุเชิงประกอบสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอีกหลาย ๆ ด้าน ซึ่งพบได้ในชีวิตประจำวัน เช่น หมวกนิรภัย กระดานโต้คลื่น ไม้เทนนิส ไม้กอล์ฟ เป็นต้น

2.3.3.2 การเสริมแรงในอีพอกซีเรซิน [7]

วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์นำไปใช้เป็นวัสดุในการทำโครงสร้างรถยนต์และเรือ เช่น กันชน โครงสร้างร่วมในห้องโดยสาร รวมไปถึงนำไปทำเรือขนาดเล็ก เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความทนทานต่อการใช้งาน สามารถขึ้นรูปได้ง่ายด้วยมือ ต่อมาเมื่อวัสดุเชิงประกอบถูกพัฒนาให้มีสมบัติที่ดีมากขึ้น จึงกลายเป็นส่วนประกอบสำหรับเรือโดยสารขนาดใหญ่จนถึงเรือรบเมทริกซ์ (Matrix) ที่นิยมใช้ในการทำเรือ ได้แก่ พอลิเอสเตอร์ไวนิลเอสเตอร์และอีพอกซี โดยใช้เส้นใยแก้วชนิดเส้นใยสั้นและเส้นใยผืนเป็นสารเสริมแรง (reinforcement) นอกจากนี้ยังพบการใช้วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ประกบร่วมกับแกนซึ่งเป็นวัสดุที่เบาและแข็งแรงเพื่อทำเป็นตัวเรือ



ภาพที่ 2.9 วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นส่วนประกอบในรถยนต์ [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจากข้อมูลทั้งหมดที่กล่าวมาสามารถเปรียบเทียบปริมาณของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) รวมถึงองค์ประกอบและคุณลักษณะของแก้วที่ใช้ในอุตสาหกรรม แสดงดังตารางที่ 2.6

ตาราง 2.6 องค์ประกอบและคุณลักษณะของแก้วที่ใช้ในอุตสาหกรรม [7]

ชนิดของแก้ว	องค์ประกอบ (ร้อยละน้ำหนัก)						คุณลักษณะและการใช้งาน
	SiO_2	Na_2O	CaO	Al_2O_3	B_2O_3	อื่น ๆ	
แก้วซิลิกา หลอมเหลว	>99.5	-	-	-	-	-	อุณหภูมิการหลอมเหลวสูง ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวต่ำ
แก้วซิลิกา หลอมเหลว ร้อยละ 96	>96	-	-	-	4	-	ต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและการกัดกร่อนของสารเคมีได้ดี ใช้ทำอุปกรณ์ในห้องทดลอง
แก้วบอโรซิลิเกต	81	3.5	-	2.5	13	-	ต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและการกัดกร่อนของสารเคมีได้ดี ใช้ทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

							ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ ในเตาอบ
แก้วโซดาไลม์	74	16	5	1	4MgO	-	อุณหภูมิการ หลอม ความ หนาแน่นสูง มีความมัน วาวสูง ใช้ทำเลนส์
แก้วเลตซิลี เกต	54	1	-	-	-	37 PbO 8 K ₂ O	อุณหภูมิการ หลอมต่ำ ความ หนาแน่นสูง มีความมัน วาวสูง
แก้วอะลูมิโน ซิลีเกต	70	-	-	18	-	4.5 TiO ₂ 2.5 Li ₂ O	ขึ้นรูปง่าย แข็งแรงและ ทนต่อการ เปลี่ยนแปลง อุณหภูมิได้ดี ใช้ทำ ผลิตภัณฑ์ที่ ใช้ในเตาอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

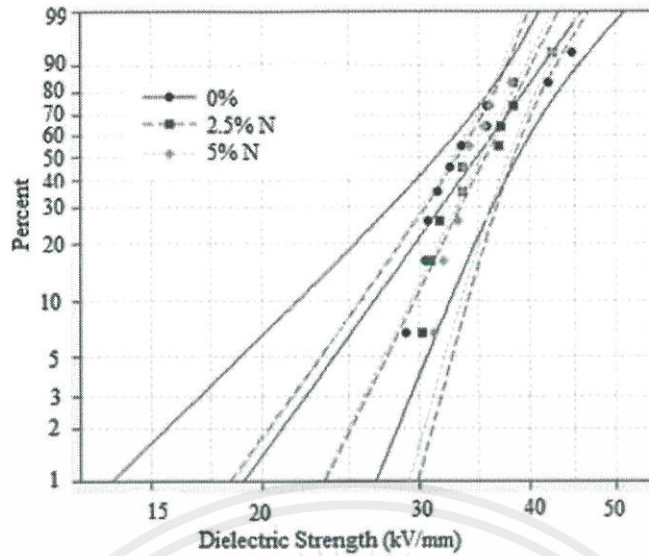
2.4 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับการนำคอมโพสิตอีพอกซี/ซิลิกอนไดออกไซด์ไปใช้งานเป็นฉนวนไฟฟ้านั้นก็มีความสำคัญอย่างยิ่งเนื่องจากการเติมอนุภาค SiO_2 ลงไปในอีพอกซีนั้นช่วยให้ค่าความสามารถในการเป็นฉนวนไฟฟ้าดีขึ้นดังเช่นงานวิจัยของ Iyer และคณะ [8] ที่ได้ทดลองเติมอนุภาคซิลิกาที่มีขนาดอยู่ในระดับไมโครเมตร นาโนเมตร และไมโคร-นาโนเมตรผสมกันลงในวัสดุฉนวนอีพอกซีเรซิน ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งแรงทางไดอิเล็กทริกของวัสดุฉนวนที่เติมด้วยอนุภาคนาโนและอนุภาคนาโนผสมกับไมโครซิลิกามีค่าที่สูงขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับการเติมด้วยอนุภาคขนาดไมโครเมตร โดยภาพที่ 2.10 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของอีพอกซีเรซินผสมกับอนุภาคนาโนและไมโครซิลิกา ส่วนภาพที่ 2.11 และ 2.12 นั้นแสดงผลการศึกษาความทนทานไดอิเล็กทริกของชิ้นงานอีพอกซีที่เติมนาโนซิลิกาและนาโน+ไมโครซิลิกา หรืองานวิจัยของ Iizuka และคณะ [9] ที่พบว่าการเติมอนุภาคนาโนของ SiO_2 ลงไปในฉนวนอีพอกซีเพียงเล็กน้อยก็สามารถช่วยให้ระยะเวลาในการเกิดดิสชาร์จของฉนวนนี้ยาวนานมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยให้อัตราการสึกกร่อนลดลงอีกด้วย



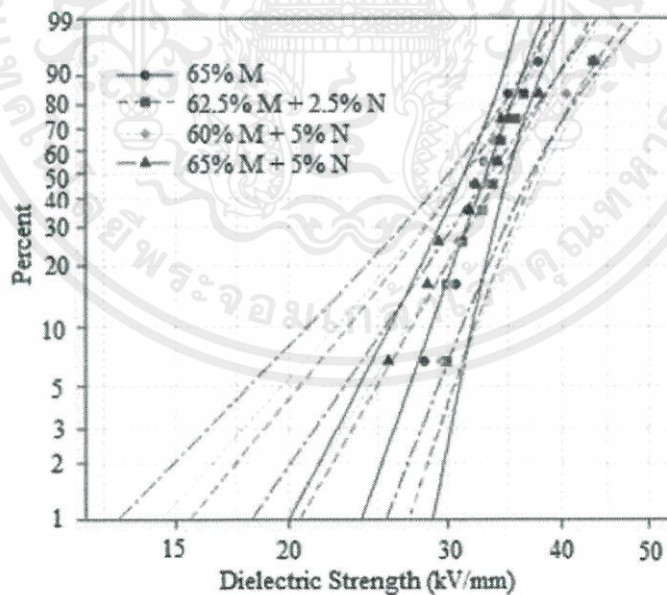
ภาพที่ 2.10 แสดงถึงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของอีพอกซีเรซินผสมกับ 65% ไมโครซิลิกา และ 5% นาโนซิลิกา [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



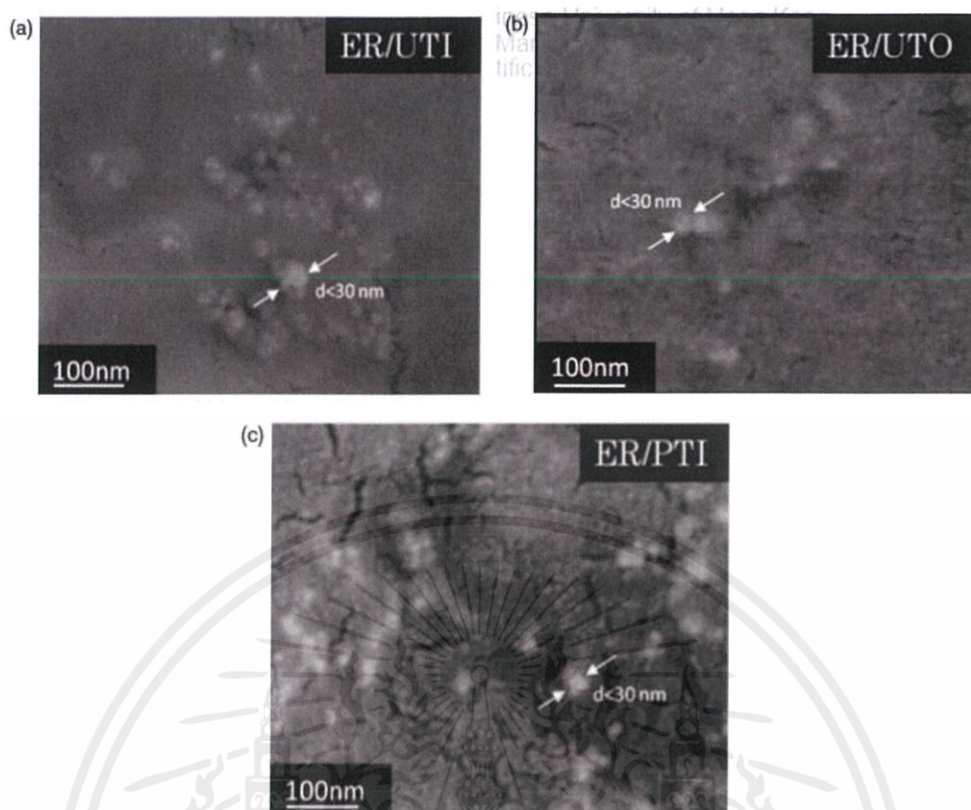
ภาพที่ 2.11 แสดงผลการศึกษาความคงทนไดอิเล็กทริกของชิ้นงานอีพอกซีที่เติมด้วยนาโนซิลิกาที่ สัดส่วนต่างๆ [8]

อย่างไรก็ตามปัญหาที่สำคัญของการเติมอนุภาคนาโนลงไปในตัววัสดุอีพอกซีนั้นคือ ความสามารถในการกระจายตัวของอนุภาคดังกล่าว โดยหากอนุภาคนาโนมีการกระจายตัวที่ไม่ดีและไม่เหมาะสม



ภาพที่ 2.12 แสดงผลการศึกษาความคงทนไดอิเล็กทริกของชิ้นงานอีพอกซีที่เติมด้วยไมโครและนาโน ซิลิกาที่สัดส่วนต่างๆ [8]

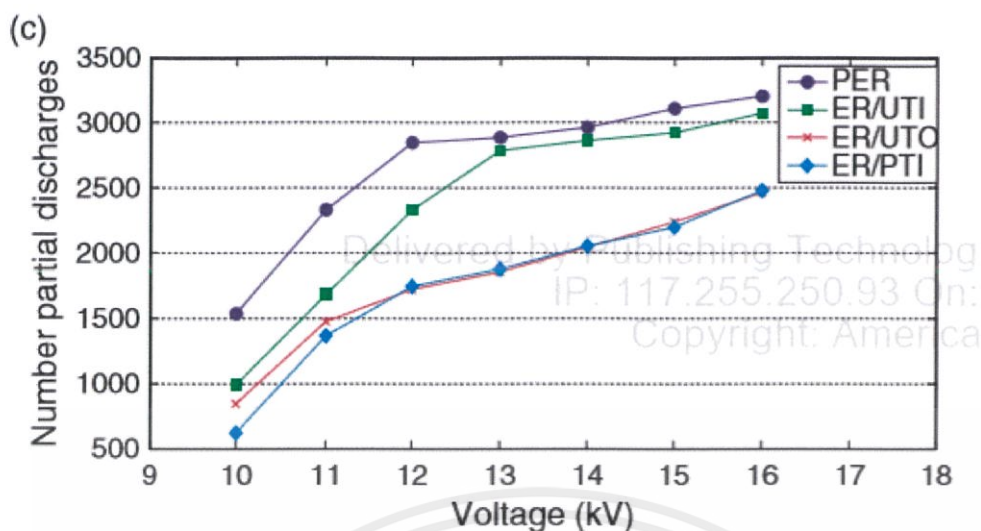
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.13 แสดงลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของนาโนคอมโพสิต (a) และ (b) อีพอกซีเรซิน/Si ที่ไม่ได้ปรับปรุงผิว (ER/UTI และ ER/UTO) และ (c) อีพอกซีเรซิน/Si ที่ปรับปรุงผิว (ER/PTI) [10]

ก็จะไม่สามารถตั้งศักยภาพในการเสริมสมบัติของวัสดุกลุ่มนี้ออกมาได้เลยซึ่งก็ยังคงเป็นสิ่งที่ทำหยาการศึกษาวิจัยอยู่ในปัจจุบัน ดังเช่นงานวิจัยของ Yan และคณะ [10] ที่ได้พยายามปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคนาโน SiO_2 ที่ถูกเติมลงไปอีพอกซีให้สามารถกระจายตัวได้ดียิ่งขึ้นด้วยการบำบัดพื้นผิวหน้าของอนุภาคนาโนด้วยพลาสมา ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคนาโนมีขนาดลดลงน้อยกว่า 30 นาโนเมตร อีกทั้งยังมีการกระจายตัวที่ดีและมีความสม่ำเสมอขึ้นด้วย นอกจากนี้ค่าความคงทนต่อเบรคดาวนและการเกิดดิสชาร์จบางส่วนมีค่าสูงชันมากเมื่อเทียบกับกรณีเติมด้วยอนุภาคที่ไม่ผ่านการบำบัดใดๆ โดยภาพที่ 2.13 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการปรับผิวด้วยเทคนิคต่างๆ และภาพที่ 2.14 แสดงค่าพารามิเตอร์ของการคายประจุบางส่วน (PD) สำหรับชิ้นงานอีพอกซีเรซินที่เติมด้วยซิลิกาที่ผ่านการบำบัดเทคนิคต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.14 แสดงค่าพารามิเตอร์ของการคายประจุบางส่วน (PD) สำหรับชิ้นงานอีพ็อกซีเรซินที่เติมด้วยซิลิกาที่ผ่านการบำบัดเทคนิคต่างๆ [10]

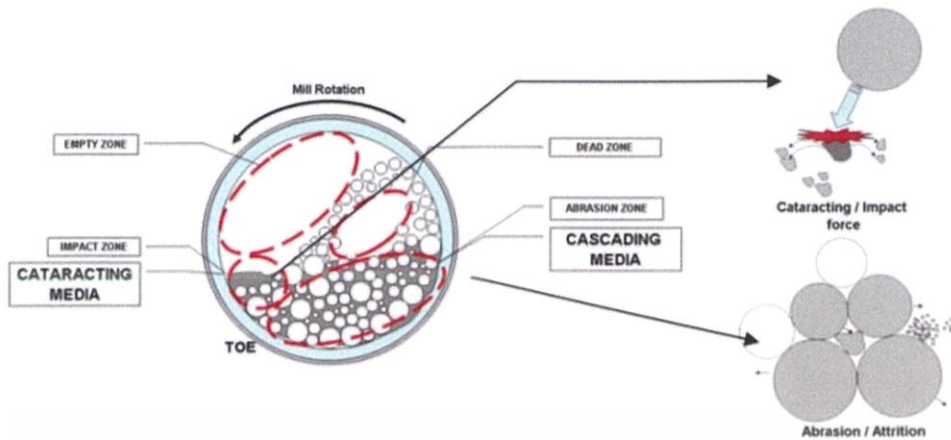
สำหรับการสกัด SiO_2 จากเศษแก้วที่เป็นขยะจากครัวเรือนเพื่อนำมาผสมกับอีพ็อกซีเรซินให้เกิดเป็นวัสดุคอมโพสิตนั้นยังไม่พบว่ามีงานวิจัยออกมามากเป็นทางการ มีเพียงแต่การนำเศษแก้วไปเป็นสารตั้งต้นในวัสดุอื่นดังเช่นงานวิจัยของ T. Saengchantara และคณะ [11] ที่ได้นำเศษแก้วมาทำเป็นวัสดุมวลเบาขึ้น โดยนำเศษแก้วมาบดละเอียดแล้วผสมกับเถ้าลอยมาผสมกันในสัดส่วนของเศษแก้วร้อยละ 50 – 80 และเถ้าลอยร้อยละ 20 – 50 โดยใช้หินปูนและโดโลไมต์เป็นสารก่อฟอง ใช้โซเดียมซิลิเกตเป็นสารเชื่อมประสาน และใช้บอแรกซ์เป็นสารช่วยหลอม จากนั้นนำไปเผาในเตาไฟฟ้าเพื่อให้เกิดเป็นชิ้นงานขึ้นมาแล้วจึงนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ ลักษณะทั่วไป ความหนาแน่น และความต้านแรงอัด โดยพบว่าชิ้นงานที่ได้มีความแข็งแรงที่ดี มีสมบัติกันความชื้นได้สามารถนำไปใช้เป็นฉนวนกันความร้อนสำหรับอาคารบ้านเรือน หรือการนำเศษแก้วใส่ทดแทนฟลด์สปาร์ในผลิตภัณฑ์พอร์ซเลน ซึ่งโดยทั่วไปความโปร่งใสของเนื้อแก้วจะเกิดจากการหลอมตัวของหินฟินมากลายเป็นเนื้อแก้ว (glassy phase) ซึ่งในงานวิจัยนี้ Thiemsorn และ Kaewthip [12] ได้เลือกใช้เศษแก้วโซดา-ไลม์-ซิลิกาที่ได้จากเศษขวดและกระจกซึ่งมีองค์ประกอบคล้ายกับหินฟินมาก พร้อมกับศึกษาอิทธิพลของเศษแก้วโซดา-ไลม์-ซิลิกาที่มีต่อสมบัติของพอร์ซเลน โดยผลการทดลองพบว่าส่วนผสมที่มีปริมาณของเศษแก้วสูงจะเกิดการสุกตัว (vitrification) ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1250 องศาเซลเซียส ค่าความขาวมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ความโปร่งแสงมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่าโมดูลัสของการแตกหักมีค่าเพิ่มหรือลดลงขึ้นกับปริมาณของเศษแก้วที่เติมลง นอกจากนี้งานวิจัยที่ศึกษาวิธีการสกัด SiO_2 จากเศษแก้วที่เป็นขยะครัวเรือนให้มีคุณภาพสูงเพื่อนำมาใช้ในงานอื่นต่อก็มีปรากฏอยู่ในฐานข้อมูลจำนวนหนึ่งเช่นกัน ดังเช่นงานวิจัยของ Prasath และ Elumalai [13] ที่ได้ทดลองสกัดซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ที่มีโครงสร้างระดับนาโนเมตรจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เศษแก้วขยะแล้วใช้เป็นขี้เถ้าโนดสำหรับตัวกักเก็บพลังงานในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า SiO_2 ที่สกัดได้มีความตื่นตัวทางไฟฟ้าเคมีและสามารถคายประจุออกมาได้ราว $270 \text{ mA}\cdot\text{h}\cdot\text{g}^{-1}$ ในรอบแรกและราว $144 \text{ mA}\cdot\text{h}\cdot\text{g}^{-1}$ ในรอบถัดไป ซึ่งผู้วิจัยได้สรุปไว้ว่า SiO_2 จากเศษแก้วขยะนี้สามารถใช้เป็นแหล่งกำเนิดที่ยั่งยืนได้สำหรับวัสดุที่ประยุกต์ใช้ในงานกักเก็บพลังงาน หรือ งานวิจัยของ Mori [14] ที่ได้สกัด SiO_2 จากเศษแก้วสีด้วยเทคนิคการหลอมอัลคาไลด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งได้ผลผลิตความบริสุทธิ์สูงถึง 99.9 เปอร์เซ็นต์

2.5 เทคนิคที่ใช้ในการเตรียมสาร

2.5.1 เทคนิคการบดย่อยด้วยลูกบอล [15]

เทคนิคการบดย่อยด้วยลูกบอลถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย สำหรับการบดเตรียมผงแก้ว เทคนิคที่ใช้ ได้แก่ เทคนิคการบดย่อยด้วยลูกบอล (ball - milling technique) เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายต้นทุนต่ำอีกทั้งยังสามารถบดย่อยให้มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตรได้ โดยเม็ดบดดังกล่าวต้องทำมาจากวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง เช่น ลูกเหล็กทรงกลมหรือเซรามิก เช่นอลูมินา (Al_2O_3) หรือ เซอร์โคเนีย (ZrO_2) เพื่อป้องกันการหลุดร่อนของเม็ดบดระหว่างกระบวนการบดย่อย ซึ่งอาจก่อให้เกิดการปนเปื้อนของสารจากเม็ดบดได้ นอกจากนี้อีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ คือ ขนาดของเม็ดบด หากใช้เม็ดบดขนาดใหญ่เพียงอย่างเดียวในการบดจะทำให้สามารถบดย่อยอนุภาคขนาดใหญ่ให้แตกลงได้ แต่ก็ไม่สามารถบดย่อยอนุภาคให้มีขนาดเล็กลงได้มากนัก ในขณะเดียวกัน หากใช้เม็ดบดขนาดเล็กชนิดเดียวในกระบวนการบดย่อยจะทำให้อัตราการบดย่อยที่สูงกว่าเม็ดบดขนาดใหญ่ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น แต่แรงในการบดอาจไม่มากพอในการบดอนุภาคขนาดใหญ่ให้แตกลงได้ดังนั้นในกระบวนการบดย่อยควรใช้เม็ดบดขนาดใหญ่และขนาดเล็กผสมกัน เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการบดย่อยที่เพิ่มขึ้น โดยภายในขวดพลาสติกที่บรรจุไปด้วยเม็ดบดสารที่ต้องการบดย่อยหรือ ผสมและของเหลวที่ช่วยในการกระจายตัวของอนุภาค (ในงานวิจัยนี้ใช้เอทานอล) โดยจะทำการหมุนขวดในแนวตั้ง (Vibratory ball - milling) บนสายพานที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ ในขณะที่ขวดบอลหมุนบนสายพานนั้นเม็ดบดจะต้องมีการตกระทบกันเป็นรูปตัว D ดังภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 แสดงการตกกระทบของเม็ดบอลระหว่างกระบวนการบดย่อย [15]

โดยการบดย่อยด้วยลูกบอลสามารถแบ่งประเภทได้ ดังนี้

1. เครื่องบดย่อยแบบ Batch mill [16]

เป็นการบดย่อยโดยใช้ลูกบอล (ball mill) โดยการเติมวัสดุและวัสดุตัวกลาง (Medium) เช่น น้ำ แอลกอฮอล์ โพลีเอธิลีนและสารปรับปรุงคุณสมบัติ (Additive) ต่าง ๆ ตัวช่วยในการกระจายและการลอยตัว (Deflocculant) ลงไป แล้วทำการปิดฝาจากนั้นจึงเริ่มการบดย่อย จนกระทั่งได้ความละเอียดหรือเวลาตามที่ต้องการจึงถ่ายน้ำสลิบออกมาซึ่งเป็นการผลิตแบบไม่ต่อเนื่อง การบดแบบแบชมิลล์ (Batch mill) นี้ สิ่งสำคัญคือจะต้องคำนึงถึง คือ คุณภาพของน้ำสลิบหรือสีเคลือบที่สม่ำเสมอในแต่ละถัง ต้นทุนในการผลิตและประสิทธิภาพในการบด การบดโดยใช้แบชมิลล์นั้น สามารถบดได้ทั้งแบบแห้งและแบบเปียกโดยวัสดุที่บดที่ต้องการบดสามารถบดแยกส่วนระหว่างวัสดุที่มีความแข็งมาก (Hard Material) อย่างเดียว โดยมีการเติมดินลงไปบางส่วนเพื่อช่วยในการกระจายตัวลอยตัวแล้วจึงนำน้ำสลิบที่ได้ไปผสมรวมกับวัสดุที่ไม่แข็งแต่จะมีการจับตัวกันอย่างอ่อน (Soft Material) สำหรับการบดแห้งโดยการบดย่อยด้วยลูกบอลมักจะเป็นการบดวัสดุที่บด เช่น หินปูน (Limestone) หินฟ้าม้า (Feldspar) ทรายควอทซ์ (SiO₂) เป็นต้น เพื่อให้มีความละเอียดสูงสำหรับการนำไปใช้ในวัสดุในเนื้อดินหรือน้ำยาเคลือบ โดยผู้ใช้งานไม่จำเป็นต้องนำไปบดเพิ่มหรือแค่นำไปผสมเพื่อให้วัสดุเป็นเนื้อเดียวกันในการบดแบบแห้งจำเป็นต้องใช้ลมเป็นตัวช่วยพาวัสดุที่ละเอียดแล้วออกมาจากถังบด



ภาพที่ 2.16 เครื่องบดบอลมิลล์แบบแบชมิลล์ [17]

นอกจากนี้แล้วชนิดของลูกบดก็มีความสำคัญโดยการเลือกใช้ลูกบดชนิดต่าง ๆ กันนั้นขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ที่จะบดหากเป็นเนื้อดินของผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการเน้นเรื่องความขาวของเนื้อผลิตภัณฑ์มากนัก เช่น เนื้อของกระเบื้องปูพื้น บุผนัง เนื้อดินสโตนแวร์ เนื้อดินกระเบื้องหลังคา อาจเลือกใช้ลูกบดที่มีมลทิน (Impurities) ปนอยู่ในเนื้อของลูกบดได้ราคาของลูกบดก็เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึง เนื่องจากบางโรงงานยังมีเงินลงทุนที่ไม่สูงนักจึงมักเลือกใช้ลูกบดที่มีราคาไม่สูงมาใช้งานรวมทั้งคำนึงถึงประสิทธิภาพในการบดของลูกบดแต่ละชนิดด้วยแต่ถ้ามีการคำนวณเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพในการบดของลูกบดที่มีค่าความหนาแน่นสูง เช่น ลูกบดเนื้ออลูมินาแล้วอาจจะลดงบประมาณการลงทุนรวมลงได้เนื่องจากประสิทธิภาพในการบดที่สูงขึ้นทำให้ลดชั่วโมงในการบดลงไปได้มาก โดยปกติแล้วลูกบดชนิดฟลินท์ (Flint) หรือเพ็บบิลสโตน (Pebble Stone) ซึ่งเป็นหินที่เกิดจากธรรมชาติตามชายฝั่งทะเล แม่น้ำจะใช้สำหรับการบดเนื้อดินที่ไม่ต้องการความขาวมากนัก เนื่องจากลูกบดเป็นเพ็บบิลจะมีมลทินอยู่มากพอสมควรราคาจึงไม่แพงมากนักเมื่อเทียบกับลูกบดชนิดอื่น ๆ เมื่อบดได้สักระยะหนึ่งลูกบดจะสึกกร่อนไปซึ่งสิ่งที่ออกมาคือซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) สารดังกล่าวสามารถปนเปื้อนไปกับดินได้เลยไม่ถือว่าเป็นมลทินหรือสิ่งแปลกปลอมเรียกการบดโดยใช้ลูกบดที่มีเนื้อเดียวกันกับผลิตภัณฑ์ว่า “Autogenous Milling” นอกจากนี้ยังมีลูกบดอีกชนิดหนึ่ง คือ ลูกบดชนิดโพซาลีนท์ (Porcelain) จะมีราคาสูงกว่าเพ็บบิลสโตน (Pebble Stone) แต่หากเปรียบเทียบกับลูกบดอลูมินาแล้วก็ยังมีราคาต่ำกว่าอยู่มา

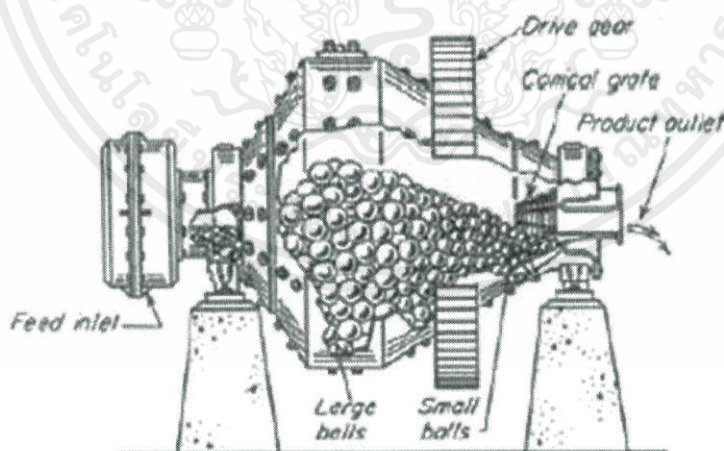
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เครื่องบดย่อยแบบ Continuous Mill แบ่งตามลักษณะได้ดังนี้

ก. แบบไหลล้นออก (Overflow Discharge) เป็นการบดแบบเปียกที่นิยมใช้กันมากในงานเหมืองแร่

ข. แบบไหลออกช่วงระดับปานกลาง (Intermediate Level Diaphragm Discharge) เป็นการปิดแบบแห้งและเปียก ลดการบดจนละเอียดเกินไประดับของลูกบอลที่ใช้บดอยู่ในช่วง 40-50 เปอร์เซ็นต์

ค. แบบไหลออกช่วงระดับต่ำ (Low level diaphragm discharge) ใช้บดได้ทั้งแห้งและเปียก เช่นเดียวกับแบบที่ไหลออกช่วงกลางเครื่องบดบอลมิลล์ไม่มีข้อจำกัดเกี่ยวกับ รูปร่างและความเร็วในการทำงาน เครื่องที่มีความยาว 3 - 5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางจะใช้ในกรณีที่พื้นผิวของแร่ถูกบดถึง จุดวิกฤติและไม่ต้องการให้มีการนำกลับมาบดซ้ำสูงหากเครื่องบดมีความยาว 1-2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางแร่ที่บดได้จะมีขนาดช่วงแคบ ๆ เพ็บบิลมิลล์ (Pebble mills) ใช้บดได้ทั้งบดแห้งและบดเปียก โดยลูกบดที่ใช้เป็นก้อนกรวดแข็ง เช่น ฟรินท์ (Frint) สามารถบดได้จากขนาด 3/8 นิ้วและละเอียดกว่า 10 ไมครอน ใช้มากในการบดของเหมืองแร่ทองคำ โดยปกติจะใช้ความเร็ว 75-85.9% ของความเร็ววิกฤติ



ภาพที่ 2.17 เครื่องบดแบบเพ็บบิลมิลล์ [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของสารที่บด มีดังนี้

1. ปริมาณของลูกบดที่ใช้ในหม้อบด
2. ขนาดของลูกบดและสัดส่วนในแต่ละขนาดที่เติมลงในหม้อบด
3. ชนิดของลูกบด (Type of Grinding Media)
4. ชนิดของตัวกรูหม้อบด (Liner)
5. ความเร็วในการหมุนของหม้อบด (Critical Speed)
6. ปริมาณของวัตถุดิบที่เติมและปริมาณของ Medium ที่เติม
7. ความสม่ำเสมอของวัตถุดิบ และความแข็ง (Hardness) ของวัตถุดิบ
8. ความละเอียดของวัตถุดิบ
9. ความหนืด (Viscosity) และความหนาแน่น (Density) ของน้ำดินหรือสีเคลือบ
10. ปริมาณการเติมและชนิดของสารช่วยกระจายและลอยตัว (Deflocculant)
11. วิธีการเติมวัตถุดิบและตัวช่วยปรับปรุงคุณภาพ (Additive) เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการบดสูงสุดนั้น การเติมลูกบดลงไปในหม้อบด (Ball mill) นั้นจะเติมอยู่ที่ประมาณ 50 – 55 % ของปริมาตรภายในทั้งหมดของหม้อบด ซึ่งจากการทดสอบพบว่าช่วงของการเติมลูกบดในช่วงนี้จะช่วยให้เวลาในการบดน้อยที่สุดและค่าการกระจายตัวของอนุภาค (Particle Size Distribution) จะดีที่สุด

2.5.2 เทคนิคการหล่อแบบดั้งเดิม (conventional casting) [19]

เทคนิคนี้จะเป็นการขึ้นรูปเรซินโดยใช้แม่พิมพ์พีวีซีสำเร็จรูป ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2524 มิลลิเมตร ซึ่งวิธีการหล่อเรซิน มีดังนี้ 1) ใช้พาราฟิล์มแม่แบบให้ทั่วและฐานของแม่แบบ 2) เตรียมเรซินกับฮาร์ดเตเนอร์ในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่ได้คำนวณไว้ 3) เทเรซินและฮาร์ดเตเนอร์ลงในถ้วยพลาสติกหรือถ้วยกระดาษในปริมาณที่ต้องการใช้และใช้แท่งโลหะหรือหลอดดูดสารกวนเบา ๆ ให้ส่วนผสมเข้ากันโดยกวนเน้นที่ขอบด้านข้างถ้วยและก้นถ้วย 4) นำไปปั่นกวนด้วยแม่เหล็กเพื่อให้อนุภาคกระจายกันโดยทั่ว 5) เทลงแม่พิมพ์และนำไปใส่ฟองอากาศ 6) นำออกมาทิ้งไว้ให้แข็งตัว 6-8 ชั่วโมง 6) เมื่อเรซินแข็งตัวดีแล้วให้ทำการนำเรซินออกจากแม่แบบ นำมาขัดตกแต่งด้วยกระดาษทราย โดยขัดไล่จากเบอร์หยาบไปเบอร์ละเอียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.18 การหล่อเรซิน [20]

2.6 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สาร

2.6.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [21]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope ; SEM) มีต้นกำเนิดเป็นอิเล็กตรอนแทนที่จะเป็นแสงเหมือนกล้องจุลทรรศน์แสงทั่วไป โดยลำอิเล็กตรอนเกิดจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าแรงสูงแก่ขดลวดทั้งสแตนด์ ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากขดลวดจากนั้นอิเล็กตรอนที่หลุดออกจะถูกควบคุมทิศทางด้วยภายใต้สนามแม่เหล็ก ซึ่งอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กหรือที่เรียกว่าเลนส์แม่เหล็กทำให้ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิวิ่งเข้ามากระทบกับชิ้นงานเกิดอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนต่อชิ้นงาน เนื่องจากลำอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) เป็นอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชิ้นงานมีหลายระดับพลังงาน ดังนี้

2.6.1.1 อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron)

เป็นอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชั้นแถบการนำ (Conduction band) หรือแถบพลังงานวาเลนซ์ (valence band) ซึ่งใช้พลังงาน ไม่สูงเพื่อให้อิเล็กตรอนสามารถหลุดออกจากผิวชิ้นงาน โดยอิเล็กตรอนนี้ คือ อิเล็กตรอนอิสระจะมี ช่วงพลังงาน 10-15 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) อิเล็กตรอนชนิดนี้ จะใช้ในการสร้างภาพที่บริเวณพื้นผิวของชิ้นงานสำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

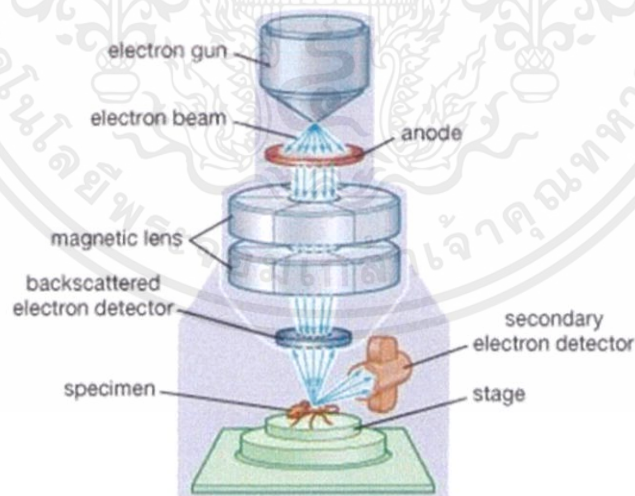
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1.2 อิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับ (back-scattered electron)

เป็นอิเล็กตรอน ที่เกิดจากการที่อิเล็กตรอนปฐมภูมิวิ่งเข้าชนชิ้นงานอิเล็กตรอนนี้จะสูญเสียพลังงานให้กับอะตอมในชิ้นงานบางส่วนแล้วเกิดการกระเจิงกลับออกมาจากชิ้นงาน ซึ่งพลังงานของอิเล็กตรอนชนิดนี้จะมีค่าตั้งแต่พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิไปจนถึงพลังงานอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ค่าพลังงานต่าง ๆ ที่ กระเจิงกลับมานั้นจะขึ้นกับเลขมวลอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของชิ้นงาน ดังนั้นอิเล็กตรอนชนิดนี้สามารถใช้สร้างภาพที่แสดงความแตกต่างของธาตุได้ โดยแสดงในรูปแบบความเข้มและความสว่างของภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณใช้ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน

2.6.1.3 รังสีเอ็กซ์ (X-Ray)

เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้น ความถี่สูง เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนชิ้นงานทำให้อิเล็กตรอนในระดับชั้นโคจรต่าง ๆ (K,L,M,...) ได้รับความเร่งจนหลุดออกจากวงโคจร อิเล็กตรอนจากชั้นโคจรถัดไปเข้ามาแทนที่ ทำให้มีการปลดปล่อยรังสีเอ็กซ์ออกมา โดยสเปกตรัมของรังสีเอ็กซ์ที่ถูกปล่อยออกมานี้สามารถนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุได้ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณค่าพลังงานนี้จะขึ้นกับเลขอะตอมของธาตุซึ่งจะใช้หัววัดรังสีเอ็กซ์ (energy dispersive X-ray ; EDX) ในการวิเคราะห์ข้อมูลประกอบกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)



ภาพที่ 2.19 ภาพส่วนประกอบต่างๆภายในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [22]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2 เครื่องวิเคราะห์หาธาตุต่างๆ (Energy Dispersive X-ray Spectrometer; EDX)

เป็นเครื่องมือวิเคราะห์หาธาตุด้านอิเล็กทริกซ์ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ตั้งแต่ธาตุคาร์บอนถึงธาตุยูเรเนียมเป็นต้นไป นำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวางสามารถทดสอบได้ทั้งของแข็ง ของเหลวหรือผงสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพหลักการของเทคนิคนี้ คือ ให้อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดเข้าไปและชนสารตัวอย่าง โดยรังสีเอกซ์จะทำให้อิเล็กตรอนวงในสุดของอะตอมของธาตุหลุดออกอิเล็กตรอนในวงถัดมาจึงจะเข้ามาแทนที่และปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในลักษณะของอิเล็กตรอนฟลูออเรสเซนส์ ซึ่งจะมีค่าพลังงานเป็นค่าเฉพาะตัวของธาตุนั้นเป็นพื้นฐานการวิเคราะห์เชิงคุณภาพและความเข้มข้นของอิเล็กตรอนฟลูออเรสเซนส์ที่เกิดขึ้นจะเป็นพื้นฐานการวิเคราะห์เชิงปริมาณ



ภาพที่ 2.20 เครื่องวิเคราะห์หาธาตุต่าง ๆ ด้วยรังสีเอกซ์ [23]

2.6.3 เครื่องวัดการกระจายตัวของอนุภาค (Particle size distribution analyzer)

เครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Particle size distribution analyzer) เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของสารตัวอย่าง โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของ เลเซอร์ (LASER Diffraction) จากแหล่งกำเนิดเลเซอร์ชนิด แก๊สฮีเลียม-นีออน (He-Ne Laser) ซึ่งเป็นแสงสีแดงมีความยาวคลื่น 632.82 นาโนเมตร ลำแสงจะถูกขยายขนาดโดย Beam expander แล้วส่องผ่านไปยังอนุภาคที่เป็นสารแขวนลอย (Emulsion) อยู่ในตัวกลางที่เป็นของเหลวมีความโปร่งใสและมีค่าดัชนีหักเหแตกต่างจากอนุภาค จนเกิดการกระเจิงของแสงที่บริเวณผิวของอนุภาคได้ และไม่ทำปฏิกิริยากับอนุภาคของสารที่ต้องการวิเคราะห์ นอกจากนี้ปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคจะต้องสูงพอที่จะได้ข้อมูลเชิงสถิติที่ดีสำหรับการทดสอบแบบเปียกและความเข้มข้น 2- 6 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการทดสอบแบบแห้งแต่ต้องไม่เข้มข้นเกินไปจนเกิดการกระเจิงซ้ำกันหลายครั้ง (Multiple Scattering) เมื่อแสงเลเซอร์เดินทางผ่านอนุภาคที่เป็นสารแขวนลอยจะเกิดปรากฏการณ์กระเจิงของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสงโดยแสงที่กระเจิงจากอนุภาคจะมีรูปแบบของความเข้มที่มุมต่างกันขึ้นกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค แต่ลุ่มของการกระเจิงจะมีสัดส่วนผกผันกับขนาดของอนุภาค ซึ่งสมบัติการกระเจิงของแสงจากอนุภาคนี้สามารถใช้ในการคำนวณหาการกระจายตัวของขนาดอนุภาคได้ โดยลำแสงที่กระเจิงจากอนุภาคจะถูกส่งผ่านไปยังเลนส์รวมแสง (Condenser lens) ทำให้เกิดภาพปรากฏเป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนแบบฟาร์ฟิลด์ (Far field diffraction pattern) ที่โฟโตเซลล์ดีเทคเตอร์ (Photocell detector) ซึ่งวางอยู่บนระยะห่างที่ตั้งฉากกับเส้นทางเดินของแสงเลเซอร์ที่จุดโฟกัสของการเลี้ยวเบนจะมีลักษณะเป็นวงมิต - สว่างสัมพันธ์กับการกระจายตัวของขนาดอนุภาคเลนส์รวมแสงได้ถูกออกแบบให้มีคุณสมบัติพิเศษ คือ ไม่ว่าอนุภาคจะก่อให้เกิดการกระเจิงที่บริเวณใดในลำแสงเลเซอร์ก็ตามรูปแบบการเลี้ยวเบนจะไม่เคลื่อนไหวและมีจุดศูนย์กลางอยู่บนแกนออฟติกของเลนส์เสมอ (Allen, 1997) จากการกระเจิงของแสงที่ได้สามารถคำนวณหาขนาดอนุภาคได้ตามทฤษฎีของมี (Mie theory) โดยใช้ค่าดัชนีหักเห (Refractive index) และค่าการดูดซับแสง (Absorption index) ของอนุภาคและตัวกลางร่วมด้วยจากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์สีแดงและสีน้ำเงินเคลื่อนที่ผ่าน



ภาพที่ 2.21 เครื่องวัดการกระจายตัวของอนุภาค [24]

กลุ่มตัวอย่างแสงสีแดงมีความ ยาวคลื่น 632.82 นาโนเมตร ใช้วัดอนุภาคขนาดใหญ่และแสงสีน้ำเงินมีความยาวคลื่น 473.00 นาโนเมตร ใช้วัดอนุภาคขนาดเล็กและมีดีเทคเตอร์รับแสงการเลี้ยวเบนของเลเซอร์ เพื่อทำการวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคและบันทึกค่าเฉลี่ยการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยการประมวลผลของเครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผ่านคอมพิวเตอร์ โดยมุมของการเลี้ยวเบนจะขึ้นกับขนาดอนุภาคซึ่งความสัมพันธ์ ดังนี้

$$\sin \theta = \frac{1.22 \cdot \lambda}{t}$$

โดย θ คือ มุมของการเลี้ยวเบน

t คือ ขนาดอนุภาค

λ คือ ความยาวคลื่นแสงที่กระทบอนุภาค

หากพิจารณาที่มุมการเลี้ยวเบนน้อย ๆ จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\theta = \frac{1.22\lambda}{t}$$

โดยเครื่อง Particle size distribution analyzer มีระบบการวิเคราะห์ 2 ระบบ คือการทดสอบแบบ เปียกและการทดสอบแบบแห้ง การทดสอบแบบเปียกจะใช้ของเหลวเป็นตัวกลางนำสารตัวอย่างเคลื่อนที่ผ่าน cell window (ในการทดลองใช้น้ำ RO) ซึ่งการทดสอบแบบเปียกจะมีการกระจายตัวของสารตัวอย่างได้ดี โดย cell Window แคบและมีระบบ ultrasonic ช่วยในการกระจายอนุภาคขณะทำการทดสอบการทดสอบแบบแห้งจะใช้ลมเป็นตัวกลางนำสารตัวอย่างเคลื่อนที่ผ่าน cell window สำหรับตัวอย่างที่ไม่สามารถกระจายตัวในของเหลวได้ แต่การทดสอบแบบแห้งนี้จะมีการกระจายตัวของตัวอย่างได้ไม่ค่อยดีเท่าแบบเปียกและ cell Window กว้าง ทำให้อนุภาคใหญ่มีโอกาสบังอนุภาคเล็กได้ขณะเคลื่อนที่ผ่าน cell window ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงสารเคมี วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับกระบวนการเตรียมชิ้นงานคอมโพสิตระหว่างอีพอกซีเรซิน (Epoxy Resin) กับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ด้วยกระบวนการหล่อ (casting) เพื่อนำชิ้นงานไปทำเป็นฉนวนไฟฟ้า รวมไปถึงเทคนิคที่ใช้ ในการตรวจสอบสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ปริมาณธาตุในวัสดุผสม สมบัติทางไฟฟ้า เช่น ทดสอบการนำไฟฟ้า เป็นต้น โดยขั้นตอนการทดลองทั้งหมดได้แสดงไว้เป็นแผนผังดังภาพที่ 3.1 ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1 สารเคมีที่ใช้

3.1.1 อีพอกซีเรซิน (Epoxy Resin) และสารเชื่อมโยง (Hardener) ผลิตโดยบริษัท buehler ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.1.2 ผงซิลิกอนไดออกไซด์นาโน (Silicon dioxide nano powder) ขนาดอนุภาค ประมาณ 15-30 นาโนเมตร ความบริสุทธิ์ 99.99% ผลิตโดย Professional Chemical for Research Laboratory

3.1.3 เอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{O}$) ความบริสุทธิ์ 95%

3.1.4 น้ำกลั่น (DI Water)

3.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้

3.2.1 เครื่องตรวจสอบขนาดอนุภาค (Particle Analyzer) ยี่ห้อ Beckman Coulter รุ่น DelsaNano C ผลิตโดยประเทศออสเตรเลีย

3.2.2 เครื่องตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer) ยี่ห้อ Philips รุ่น X'Pert MPD ผลิตโดยบริษัท Philips ประเทศฮอลแลนด์

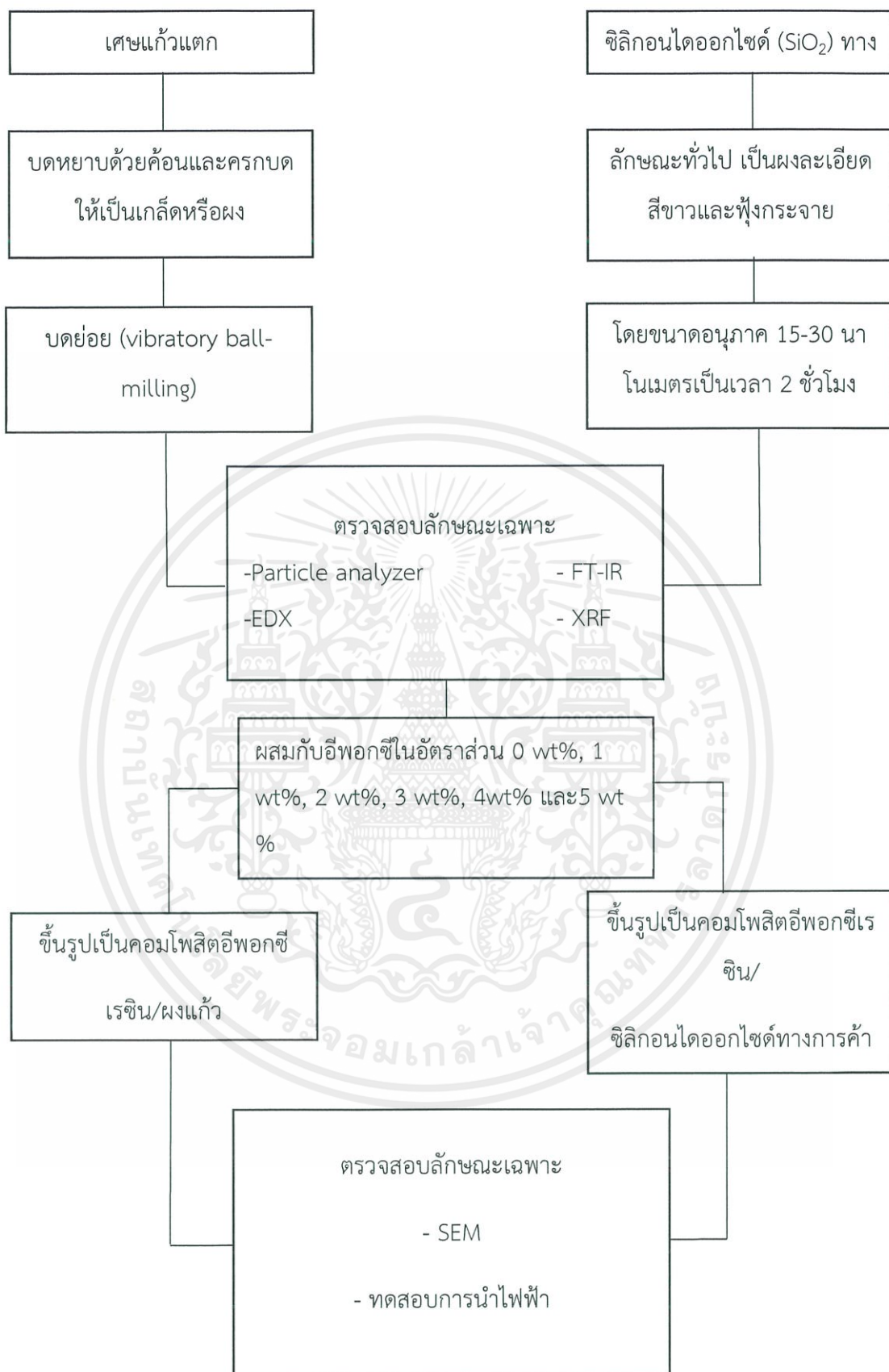
3.2.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) รุ่น JSM-6335F ผลิตโดยบริษัท JEOL ประเทศญี่ปุ่น

3.2.4 เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence Spectroscopy)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3.2.5 เครื่องตรวจสอบปริมาณองค์ประกอบของธาตุ (Fourier Transform infrared ยี่ห้อ PerkinElmer UATR TWO)
- 3.2.6 เครื่องวิเคราะห์ธาตุต่าง ๆ (Energy Dispersive X-ray Spectrometer)
- 3.2.7 เครื่องบดย่อยสารแนวตั้งด้วยลูกบอล (Vibrational ball-milling)
- 3.2.8 ลูกบดเซอร์โคเนีย (ZrO_2) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร
- 3.2.9 ตู้อบสาร
- 3.2.10 เครื่องชั่งดิจิตอล
- 3.2.11 เวอร์เนียคาร์ลิเปอร์ (electronic digital calipers)
- 3.2.13 ปีกเกอร์ขนาด 1000 600 250 และ 50 มิลลิตร
- 3.2.14 ตะแกรงร่อน
- 3.2.17 แก้วกระดาษขนาดเล็ก (ใช้ในการผสมเรซิน)
- 3.2.18 กระดาษฟอยล์ (อลูมิเนียม)
- 3.2.19 กระดาษทิชชู
- 3.2.20 กระดาษทรายเบอร์ 400 600 800 และ 1000
- 3.2.24 นาฬิกาจับเวลา
- 3.2.25 ครกหยก
- 3.2.26 แม่แบบสำหรับหล่อเรซิน
- 3.2.27 แผ่นพาราฟิล์ม
- 3.2.28 เครื่องให้ความร้อน (Hotplate)
- 3.2.29 เครื่องสั่นสะเทือน (ultrasonic Cleaner)
- 3.2.30 เทปทองแดง (Cu tape)
- 3.2.31 หลอดทดลองแบบมีฝาปิด
- 3.2.33 ค้อน (สำหรับการบดแก้ว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.1 แผนผังการเตรียมคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับเฟลสเสริมแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 กระบวนการบดหยาบและบดย่อยเศษแก้ว (glass powder)

การเตรียมผงแก้วจากเศษแก้วประเภทโซดาไลม์ (Sodalime)

ในการเตรียมผงจากเศษแก้วนั้นเริ่มจากนำเศษแก้วมาบดหยาบเพื่อให้มีขนาดเล็กพอสมควร มองเห็นด้วยตาเปล่าจะมีลักษณะเป็นผงหรือเกล็ดแสดงดังภาพที่ 3.2 จากนั้นนำผงแก้วที่ผ่านการบดหยาบแล้วไปเข้าสู่กระบวนการบดย่อย (vibratory ball-mitting) แสดงดังภาพที่ 3.3 โดยนำผงแก้ว เทลงขวดพลาสติกที่บรรจุด้วยลูกบดเซอร์โคเนีย (ZrO_2) แสดงดังภาพที่ 3.4 จากนั้นเติมเอทานอลลงไปเพื่อช่วยในการกระจายตัวของผงแก้วปิดฝาขวดให้สนิทพันด้วยเทปกาวสีดำบริเวณฝาเกลียวเพื่อป้องกันการรั่วซึมและนำไปบดย่อยด้วยเครื่องบดย่อยเป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากครบกำหนดเวลาแล้วจึงนำของเหลวที่มีส่วนผสมของผงแก้วเอทานอลและลูกบดเซอร์โคเนียออกมาล้างเพื่อแยกสารที่ต้องการออก โดยทำการล้างด้วยเอทานอลและเทลูกบดใส่ตะแกรงกรองสารแสดงดังภาพที่ 3.5 ทำการล้างจนกระทั่งไม่มีสารติดอยู่ที่ลูกบดนำสารที่มีส่วนผสมของผงแก้วและเอทานอลเทใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสแสดงดังภาพที่ 3.6 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อระเหยเอทานอลออกเหลือไว้เพียงเนื้อสารที่ต้องการ นอกจากนี้แล้วการอบยังช่วยให้สารแห้งและปราศจากความชื้นอีกด้วย เมื่อสารแห้งสนิทแล้วนำสารออกจากตู้อบแสดงดังภาพที่ 3.7

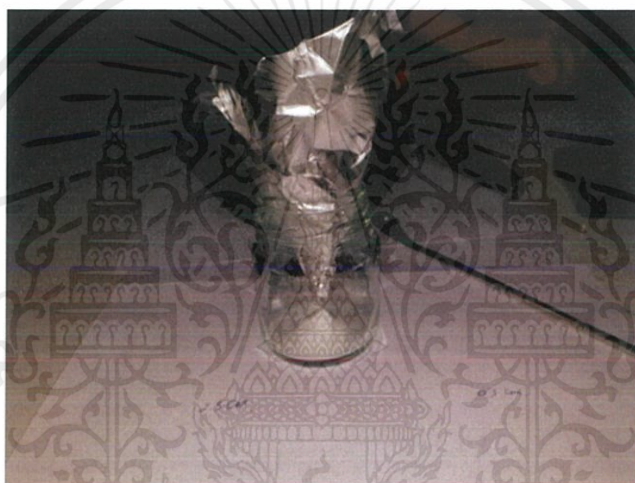


ภาพที่ 3.2 ผงแก้วที่ผ่านการบดหยาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.3 เครื่องบดย่อยแนวตั้งด้วยลูกบอล



ภาพที่ 3.4 การเตรียมผงแก้วเพื่อนำไปบดย่อย



ภาพที่ 3.5 การแยกสารที่ต้องการออกจากขวดและลูกบด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.6 ตู้อบสาร



ภาพที่ 3.7 ลักษณะของผงแก้วหลังผ่านกระบวนการบดย่อย

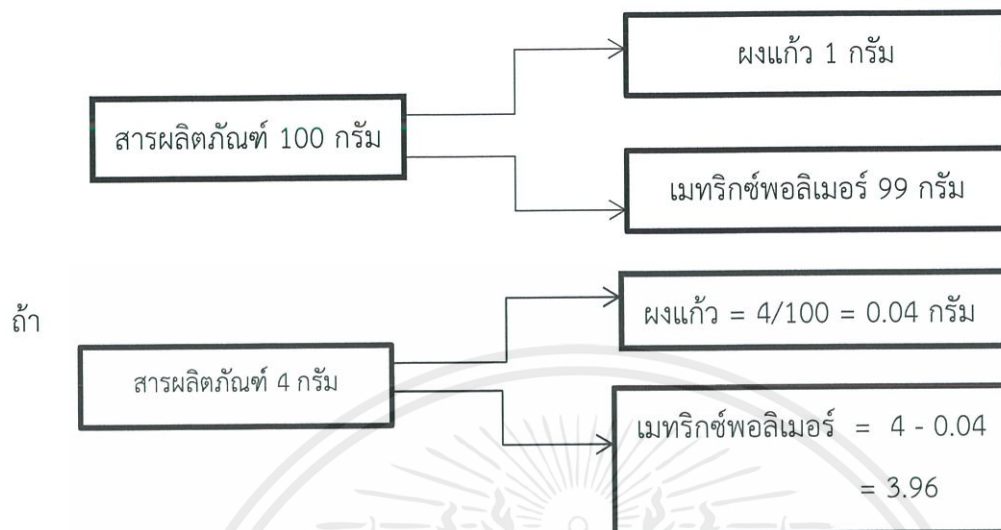
3.4 กระบวนการเตรียมอีพอกซีเรซิน

ในการหล่ออีพอกซีเรซิน เริ่มจากการคำนวณอัตราส่วนของอีพอกซีเรซิน (Epoxy Resin) กับ สารเชื่อมโยง (hardener) โดย ณ ที่นี้กำหนดให้ส่วนผสมทั้งหมดเท่ากับ 4 กรัม สำหรับการหล่อใน ส่วนของอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ และผงแก้วที่เจือลงไปอีพอกซีเรซิน มีอัตราส่วน คือ 0 wt%, 1 wt.%, 2 wt%, 3 wt%, 4 wt% และ 5 wt% ตามลำดับ แสดงการคำนวณดังนี้

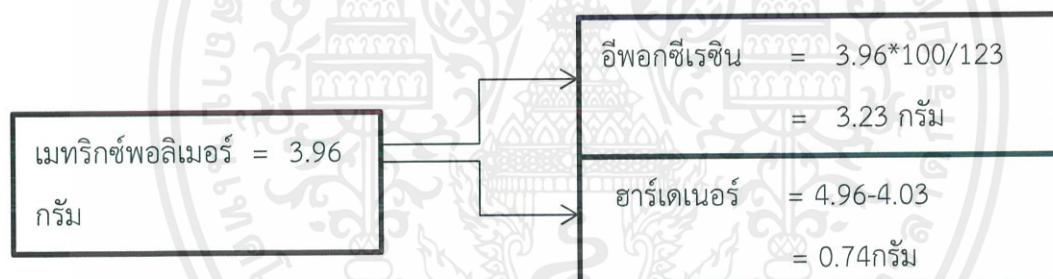
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการคำนวณ

- อัตราส่วน 1 wt% สามารถเทียบบัญญัติไตรยางศ์ได้ ดังนี้



อัตราส่วนอีพอกซีเรซิน : ฮาร์ดเตเนอร์ เท่ากับ 100 : 23 ส่วน



ดังนั้น

- อัตราส่วน wt.%
- อีพอกซีเรซิน 3.23 กรัม
- hardener 0.74 กรัม
- ซิลิกอนไดออกไซด์ 0 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อัตราส่วน 0 wt.%		- อัตราส่วน 2 wt.%	
- อีพอกซีเรซิน	3.25 กรัม	- อีพอกซีเรซิน	3.19 กรัม
- hardener	0.75 กรัม	- hardener	0.73 กรัม
- ซิลิกอนไดออกไซด์	0 กรัม	- ซิลิกอนไดออกไซด์	0.08 กรัม
- อัตราส่วน 3 wt%		- อัตราส่วน 4 wt%	
- อีพอกซีเรซิน	3.15 กรัม	- อีพอกซีเรซิน	3.12 กรัม
- hardener	0.73 กรัม	- hardener	0.72 กรัม
- ซิลิกอนไดออกไซด์	0.12 กรัม	- ซิลิกอนไดออกไซด์	0.16 กรัม
- อัตราส่วน 5 wt%			
- อีพอกซีเรซิน	3.09 กรัม		
- hardener	0.71 กรัม		
- ซิลิกอนไดออกไซด์	0.20 กรัม		

จากนั้นทำการผสมสารทั้งสององค์ประกอบในทุกสัดส่วนตามที่คำนวณได้ เพื่อเตรียมเป็นชิ้นงานคอมโพสิตด้วยเทคนิคการหล่อแบบดั้งเดิม (conventional casting) ซึ่งเป็นเทคนิคการขึ้นรูปเรซินจากแม่แบบหรือแม่พิมพ์ ในงานวิจัยนี้ใช้แม่แบบพีวีซีสำเร็จรูปและมีขั้นตอนดังนี้ คือ ทำการซั่งอีพอกซีเรซิน ฮาร์ดเดนเนอร์และผงแก้วในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่คำนวณไว้ และเตรียมแม่แบบ โดยทำความสะอาดด้วยเอทานอลและรองด้วยแผ่นพาราฟิล์ม เพื่อให้ง่ายต่อการนำชิ้นงานออกจากแม่แบบ จากนั้นผสมอีพอกซีเรซินกับฮาร์ดเดนเนอร์ลงในถ้วยกระดาษและใช้หลอดดูดสารคนเบา ๆ และคนให้ทั่วจับเวลา 2 นาที เมื่อครบกำหนดเวลาให้ทำการเติมผงแก้วที่ซั่งไว้ลงไปและคนอีกครั้งจับเวลา 4 นาที จากนั้นเมื่อครบกำหนดเวลาแล้วให้เทสารลงในแม่แบบที่เตรียมไว้ โดยค่อย ๆ เทและใช้หลอดดูดสารช่วยกวาดสารที่ติดอยู่ที่ภาชนะลงให้ได้มากที่สุด เพื่อที่จะได้น้ำหนักตามที่ต้องการ เมื่อชิ้นงานแข็งตัว แล้วให้นำชิ้นงานออกจากแม่แบบ โดยขั้นตอนทั้งหมดได้แสดงไว้ในภาพที่ 3.8 – 3.13 จากนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการเตรียมคอมโพสิตระหว่างอีพอกซีเรซินกับผงนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้าในสัดส่วนและวิธีการเดียวกัน เพื่อใช้เป็นชุดเปรียบเทียบ



ภาพที่ 3.8 ขั้นตอนเคลือบพาราฟิล์มเพื่อไม่ให้ชิ้นงานไม่ติดกับแม่แบบ

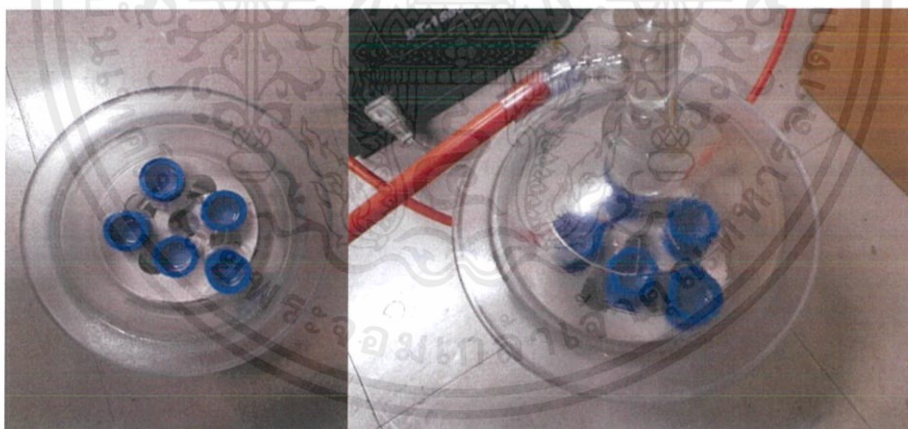


ภาพที่ 3.9 ขั้นตอนการผสมคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับผงแก้ว/อนุภาคนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.10 ขั้นตอนการปั่นกวนด้วยแม่เหล็กผสมคอมโพลีตอพออกซีเรซินกับผงแก้ว/อนุภาคนาโน ซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า

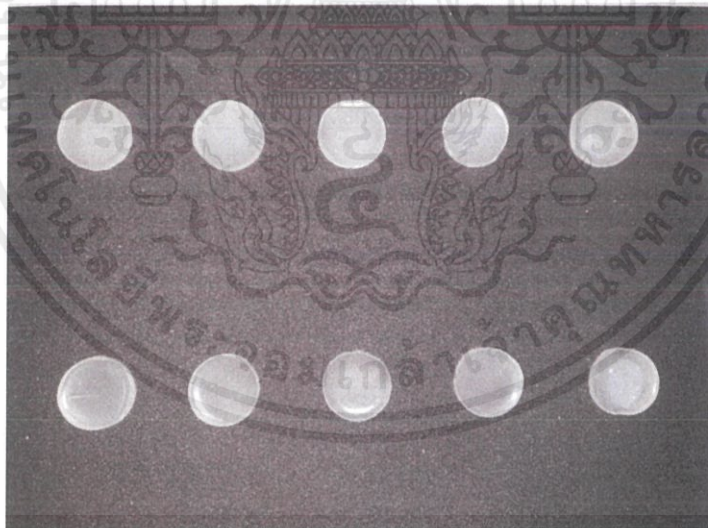


ภาพที่ 3.11 ขั้นตอนการไล่ฟองอากาศออกจากชิ้นงานคอมโพลีตอพออกซีเรซินกับผงแก้ว/อนุภาคนาโน ซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.12 ขั้นตอนการทิ้งให้คอมโพลีเมอร์พอกซีเรซินกับผงแก้ว/อนุภาคนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ทาง
การค้าขึ้นรูป



ภาพที่ 3.13 ชิ้นงานคอมโพลีเมอร์พอกซีเรซินกับผงแก้ว/อนุภาคนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

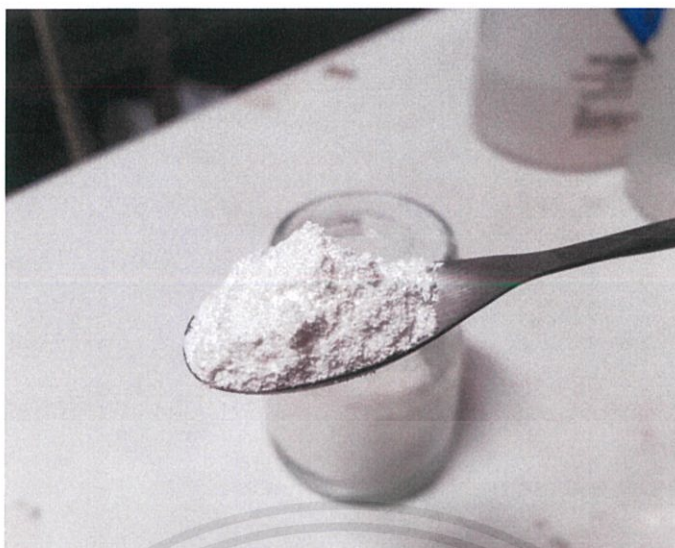
ผลการทดลองและการอภิปรายผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองที่ได้จากการเตรียมคอมโพสิตระหว่างอีพอกซีเรซินกับผงแก้วด้วยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม (conventional casting) โดยแบ่งเป็นสองเงื่อนไขโดยมีอัตราส่วนการเติมเฟสเสริมแรงเท่ากับ 1 %, 2%, 3%, 4% และ 5 % โดยน้ำหนัก โดยจะมีรายละเอียดของสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ โครงสร้างจุลภาคพร้อมกันนี้ยังได้แสดงผลการทดลองในส่วนของคอมโพสิตชุดเปรียบเทียบ ซึ่งเป็นการใช้ผงนาโนซิลิกาทางการค้าแทนผงแก้วควบคู่กันไป จากนั้นเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมนำไปขึ้นรูปและนำไปตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า ได้แก่ ความเป็นฉนวนไฟฟ้า ความต้านทานไฟฟ้า และ ความคงทนทางไฟฟ้า (Electric Breakdown) โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1 ผลการตรวจสอบผงแก้ว

4.1.1 สมบัติทางกายภาพและขนาดอนุภาคของผงแก้ว

ลักษณะภายนอกของอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ที่เตรียมจากเศษแก้ว โดยขั้นตอนการเตรียมผงแก้ว คือ นำเศษแก้วประเภทโซดาไลม์มาทำความสะอาด จากนั้นนำมาบดหยาบด้วยค้อนปอนด์และนำไปบดย่อยด้วยเครื่องบดย่อยในแนวตั้ง (vibratory ball milling) เป็นเวลา 1 , 2 , 3 และ 4 ชั่วโมงตามลำดับจะได้ลักษณะอนุภาคที่ได้มีความละเอียด เมื่อมองด้วยตาเปล่ามีลักษณะเป็นผงสีขาวคล้ายผงแป้งและไม่ละลายน้ำมีลักษณะดังภาพที่ 4.1 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้าแล้วพบว่าผงทางการค้ามีลักษณะเป็นผงสีขาวละเอียดและมีความฟุ้งกระจายมากกว่าผงแก้วเนื่องจากอนุภาคมีขนาดเล็กมากกว่านั่นเอง แสดงดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.1 ผงแก้ว



ภาพที่ 4.2 อนุภาคนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า

4.1.2 ลักษณะโครงสร้างจุลภาค

หลังจากกระบวนการบดหยาบและบดย่อยเศษแก้วประเภทโซดาไลม์แล้ว ได้นำผงแก้วที่ได้ไปตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) พบว่าผงแก้วที่บดในเวลา 1 ชั่วโมง มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมและมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กระจายกันเป็นบางส่วน แต่ส่วนมากจะจับกันเป็นก้อนใหญ่แสดงดังภาพที่ 4.3 มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 1.79 – 13.15 ไมโครเมตร และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 5.96 ไมโครเมตร เมื่อเพิ่มเวลาขึ้นเป็น 2 ชั่วโมง พบว่าผงแก้วมีลักษณะเป็นทรงเหลี่ยมมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับเวลาที่ใช้บดใน 1 ชั่วโมง แต่มีการจับตัวกันที่น้อยกว่าเล็กน้อยแสดงดังภาพดังภาพที่ 4.4 มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 1.35 – 13.16 ไมโครเมตร และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 5.71 ไมโครเมตร เมื่อเพิ่มเวลาบดให้เป็น 3 ชั่วโมง ผงแก้วมีลักษณะเป็นทรงเหลี่ยม

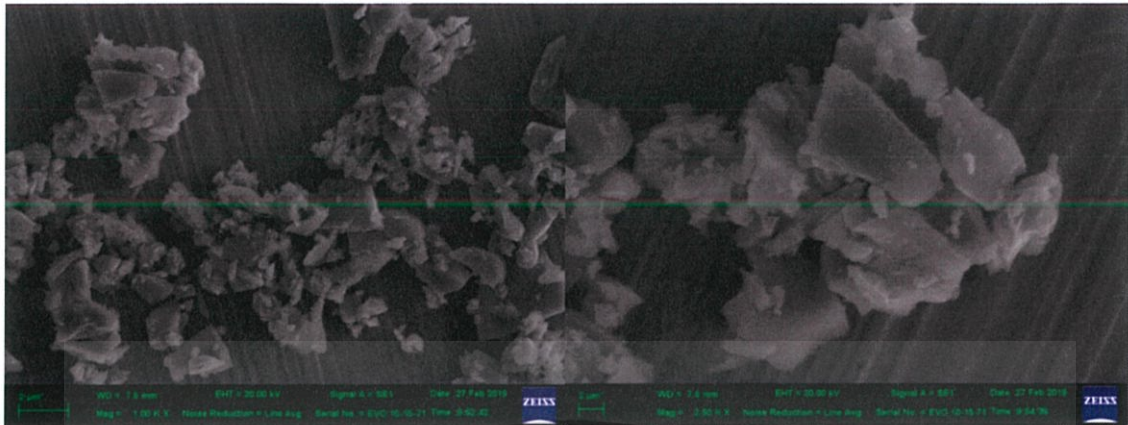
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้อยลง และมีขนาดขนาดของอนุภาคที่เล็กลงและจับตัวกันเป็นก้อนน้อยลงอย่างเห็นได้ชัด จากการบดที่เวลา 2 ชั่วโมงดังภาพที่ 4.5 โดยมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 1.51 – 12.72 ไมโครเมตร และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 5.07 ไมโครเมตร และเมื่อเพิ่มเวลาในการบดเป็น 4 ชั่วโมง พบว่าผงแก้วมีลักษณะไม่แตกต่างกับบดที่เวลา 3 ชั่วโมงมากนัก แต่มีการจับตัวกันเป็นก้อนมากกว่าดังภาพที่ 4.6 มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 1.09 – 8.19 ไมโครเมตร และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 3.56 ไมโครเมตร



ภาพที่ 4.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผงแก้วที่ใช้เวลาบด 1 ชั่วโมง (กำลังขยาย 1000 และ 2500 เท่าตามลำดับ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

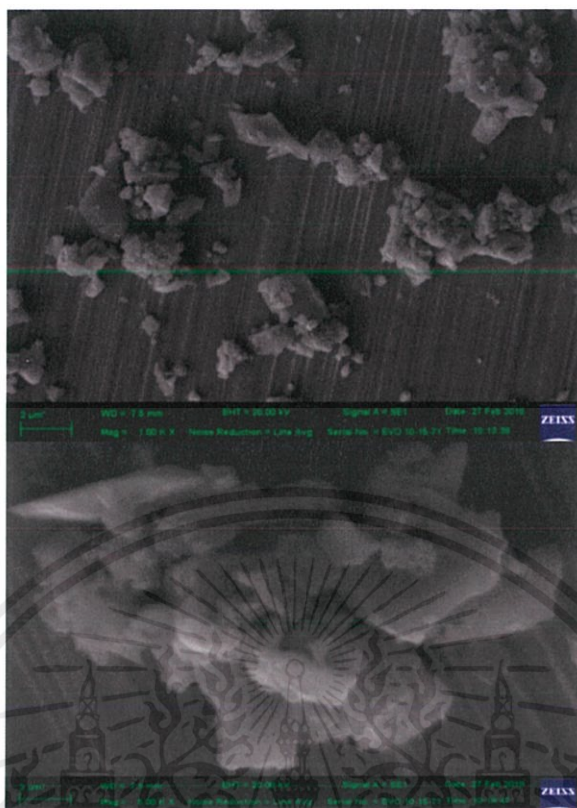


ภาพที่4.4 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผงแก้วที่ใช้เวลาด 2 ชั่วโมง (กำลังขยาย 1000 และ 2500 เท่าตามลำดับ)



ภาพที่4.5 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผงแก้วที่ใช้เวลาด 3 ชั่วโมง (กำลังขยาย 1000 และ 2500 เท่าตามลำดับ)

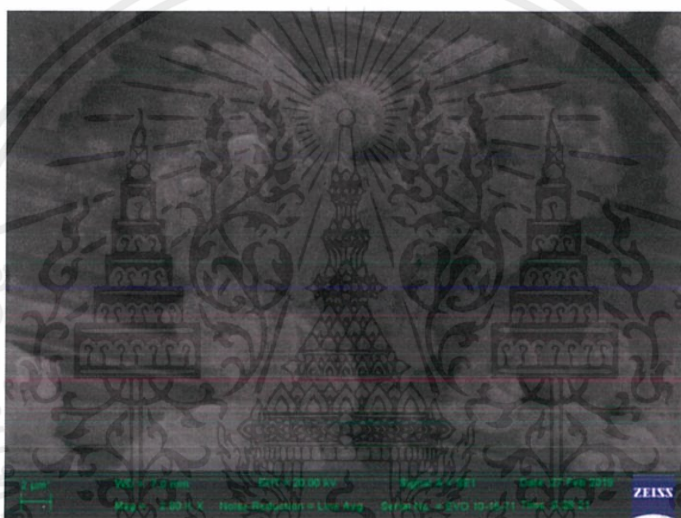
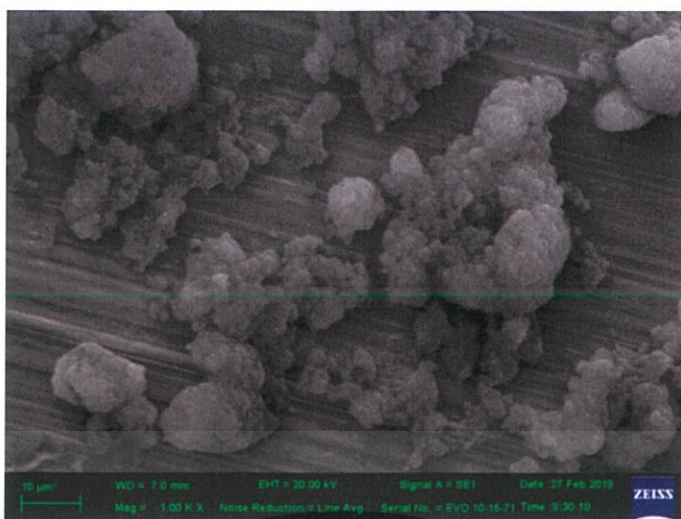
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.6 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผงแก้วที่ใช้เวลาอบ 4 ชั่วโมง (กำลังขยาย 1000 และ 5000 เท่าตามลำดับ)

สำหรับอนุภาคนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ ก็ได้นำไปตรวจวัดลักษณะโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ด้วยเช่นกัน พบว่าอนุภาคมีขนาดเล็กมากและมีการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนมีขนาดอยู่ในช่วง 15-30 นาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่ระบุไว้ในผลิตภัณฑ์ทางการค้าดังภาพที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



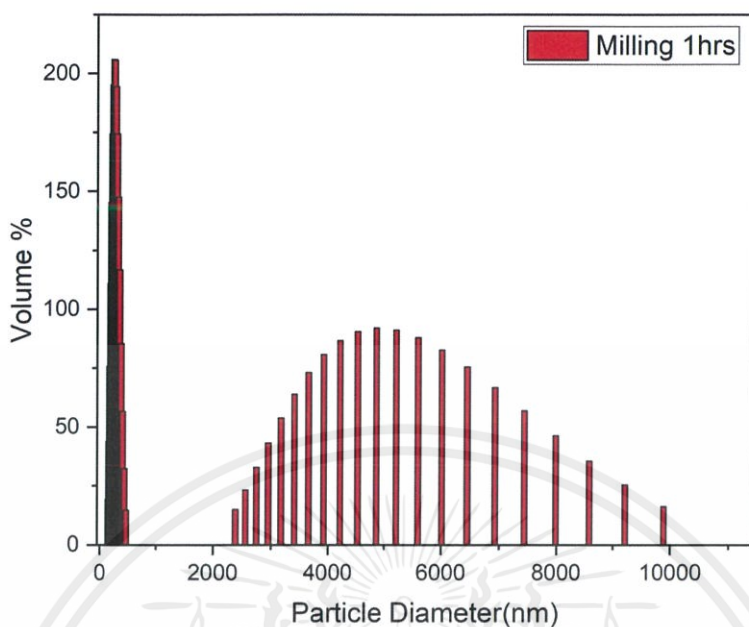
ภาพที่ 4.7 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของอนุภาคนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ (กำลังขยาย 1000 และ 2500 เท่าตามลำดับ)

4.1.3 ขนาดและการกระจายตัว

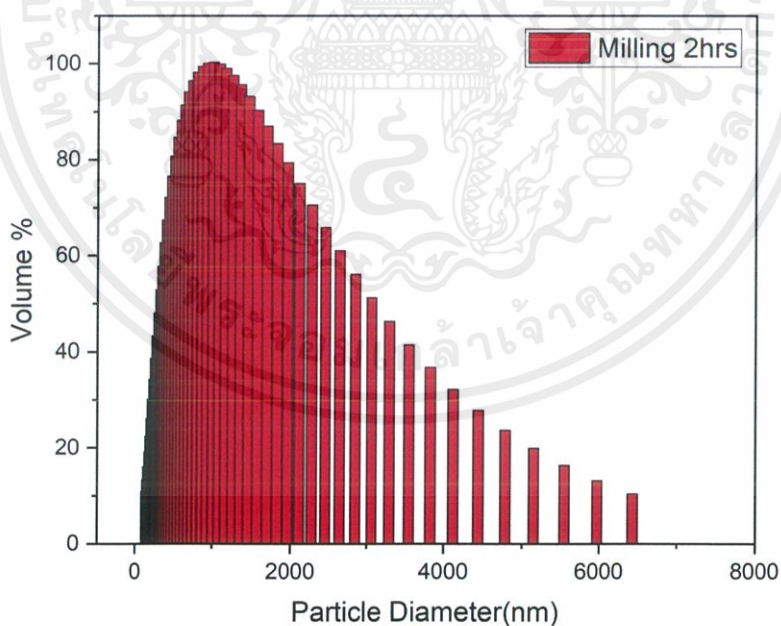
นำผงแก้วที่ผ่านการบดย่อยมาตรวจสอบขนาดอนุภาคด้วยเครื่องตรวจสอบขนาดอนุภาค (Particle size distribution analyzer) โดยนำผงไปแก้วที่ทำการบดเป็นเวลา 1 , 2 , 3 และ 4 ชั่วโมง เจือจางในเอทานอลแล้วนำไปใส่ในคิวเวตและนำเข้าเครื่องทดสอบ โดยผลการตรวจสอบขนาดอนุภาคมีดังนี้

ผลการตรวจสอบขนาดอนุภาคที่ใช้เวลาบด 1 ชั่วโมงพบว่าผงแก้วมีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 0 ถึง 500 และ 2400 ถึง 9900 นาโนเมตร และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 1884.16 นาโนเมตร แสดงดังภาพที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

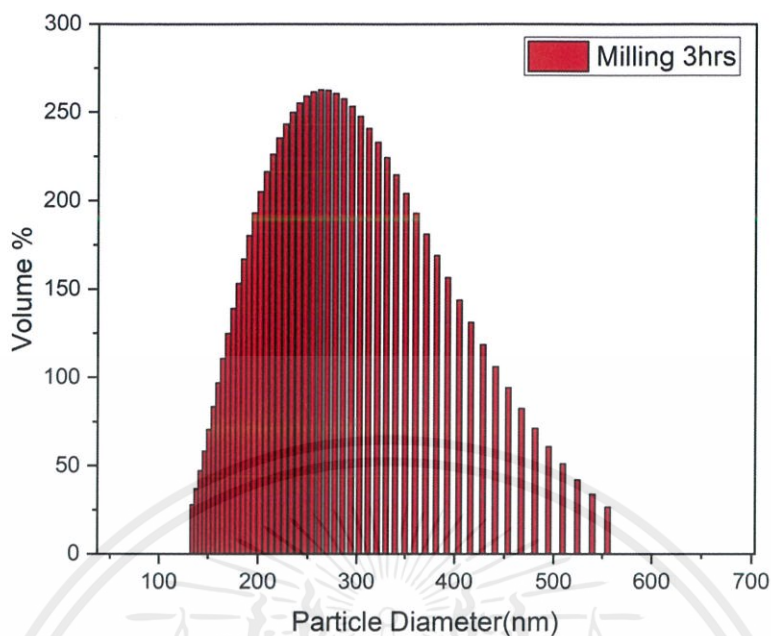


ภาพที่ 4.8 กราฟแสดงขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงแก้วที่บดในเวลา 1 ชั่วโมง ผลการตรวจสอบขนาดอนุภาคที่ใช้เวลาบด 2 ชั่วโมงพบว่าผงแก้วมีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 9 ถึง 6400 นาโนเมตร และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 2190.33 นาโนเมตร แสดงดังภาพที่ 4.9

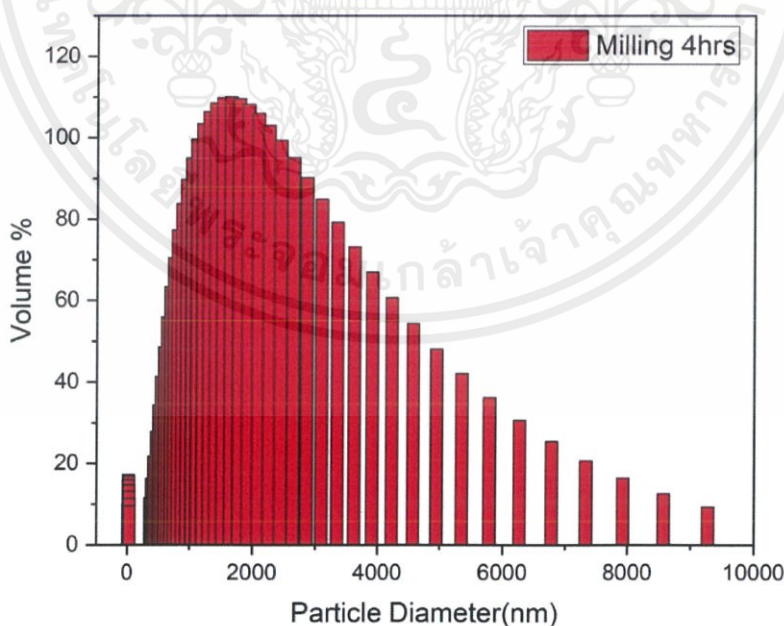


ภาพที่ 4.9 กราฟแสดงขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงแก้วที่บดในเวลา 2 ชั่วโมง ผลการตรวจสอบขนาดอนุภาคที่ใช้เวลาบด 3 ชั่วโมงพบว่าผงแก้วมีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 40 ถึง 700 นาโนเมตร และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 232.0017 นาโนเมตร แสดงดังภาพที่ 4.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.10 กราฟแสดงขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงแก๊วที่บดในเวลา 3 ชั่วโมง ผลการตรวจสอบขนาดอนุภาคที่ใช้เวลาบด 4 ชั่วโมงพบว่าผงแก๊วมีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 10 ถึง 28300 นาโนเมตร และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 3149.87 นาโนเมตร แสดงดังภาพที่ 4.11



ภาพที่ 4.11 กราฟแสดงขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงแก๊วที่บดในเวลา 4 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการตรวจสอบขนาดอนุภาคเห็นได้ชัดว่า ขนาดอนุภาคของแก้วที่บดเป็นเวลา 3 ชั่วโมงมีขนาดเล็กและจับกันเป็นก้อนน้อยกว่าการบดที่ชั่วโมงอื่นๆ โดยมีขนาดของอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 232.0017 นาโนเมตร เราจึงเลือกอนุภาคของแก้วที่บดเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ไปผสมเป็นสารผสมคอมโพสิตในความเข้มข้นต่างๆต่อไป

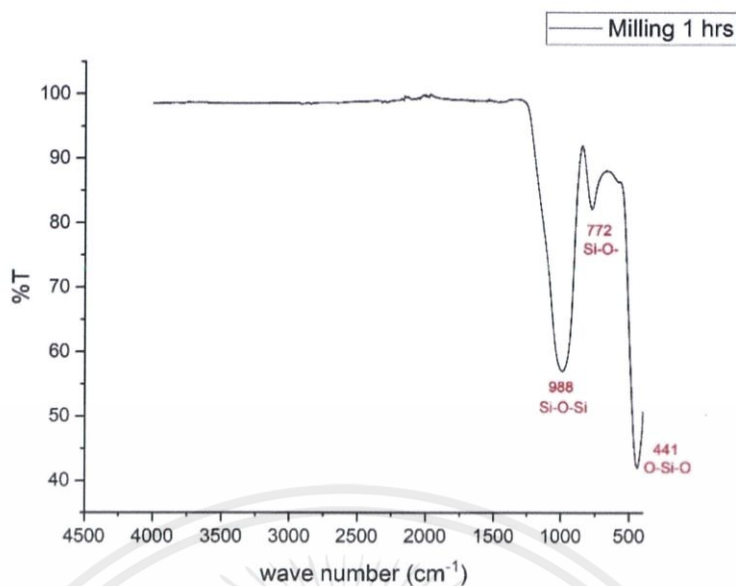
4.1.4 องค์ประกอบของธาตุและสารประกอบของผงแก้ว

เมื่อทราบขนาดอนุภาคของผงแก้วแล้วจึงนำอนุภาคผงแก้วที่บดในเวลาต่างๆ ไปตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคต่างๆ ได้แก่ FT-IR และ EDX

4.1.4.1 การตรวจสอบด้วยเทคนิค FT-IR

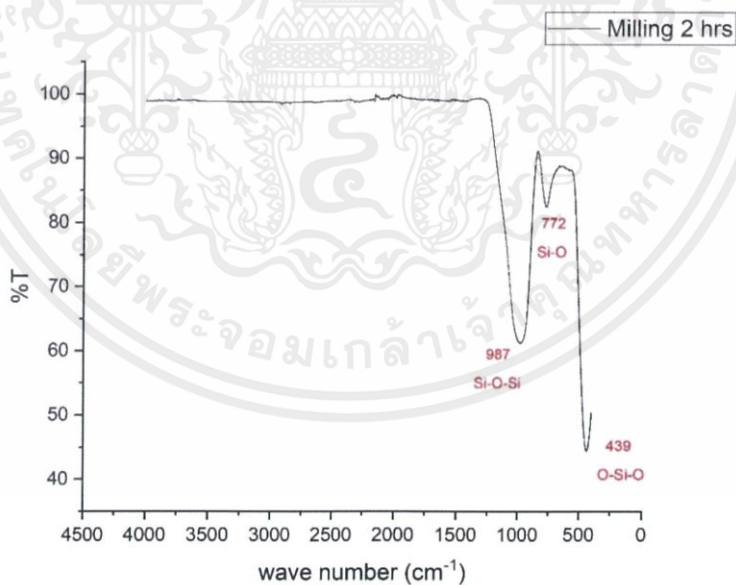
ทำการตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุและสารประกอบด้วยเทคนิค FT-IR โดยเทคนิคที่ใช้จำแนกสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ พันธะเคมีในโมเลกุล จึงสามารถบอกถึงปริมาณองค์ประกอบที่มีอยู่ในโมเลกุลของสารผสมที่ไม่ทราบชนิดได้ โดยทำการตรวจวัดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของสารตัวอย่างที่การสั่นความถี่ต่าง ๆ ซึ่งมีความจำเพาะของแต่ละพันธะ ซึ่งภาพที่ 4.12 - 4.17 กราฟแสดงให้เห็นถึงการขึ้นของพีค 3 ตำแหน่ง ตำแหน่งที่ ดังนี้

อนุภาคที่ใช้เวลาบด 1 ชั่วโมงพบว่า ตำแหน่ง 1 คือ 441 cm^{-1} ตำแหน่งที่ 2 คือ 772 cm^{-1} และตำแหน่งที่ 3 คือ 987 cm^{-1} ดังภาพที่ 4.12



ภาพที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนและการสั่นของพันธะในผงแก้วที่บดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

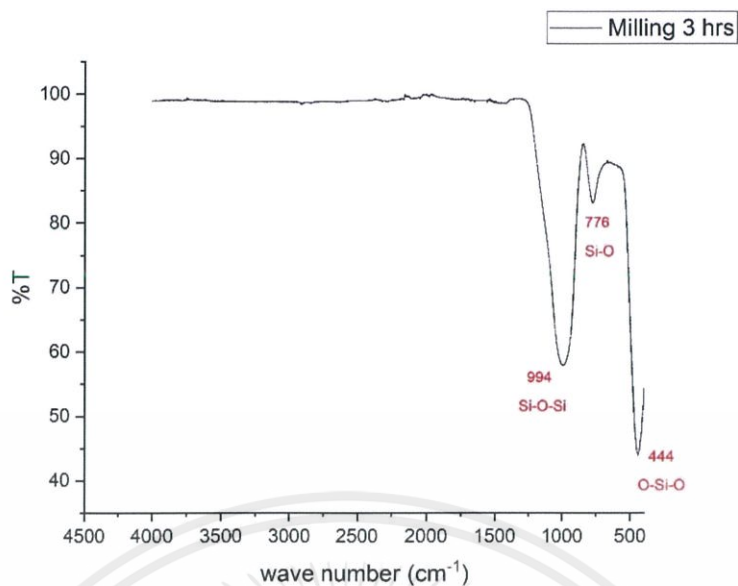
อนุภาคที่ใช้เวลาบด 2 ชั่วโมงพบว่า ตำแหน่ง 1 คือ 439 cm⁻¹ ตำแหน่งที่ 2 คือ 772 cm⁻¹ และตำแหน่งที่ 3 คือ 987 cm⁻¹ ดังภาพที่ 4.13



ภาพที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนและการสั่นของพันธะในผงแก้วที่บดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

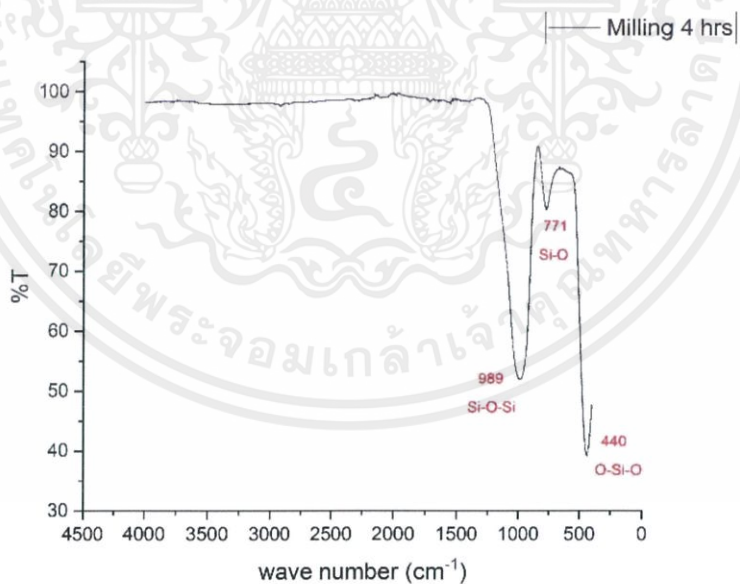
อนุภาคที่ใช้เวลาบด 3 ชั่วโมงพบว่า ตำแหน่ง 1 คือ 444 cm⁻¹ ตำแหน่งที่ 2 คือ 776 cm⁻¹ และตำแหน่งที่ 3 คือ 994 cm⁻¹ ดังภาพที่ 4.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนและการสั่นของพันธะในผงแก้วที่บดเป็นเวลา 3 ชั่วโมง

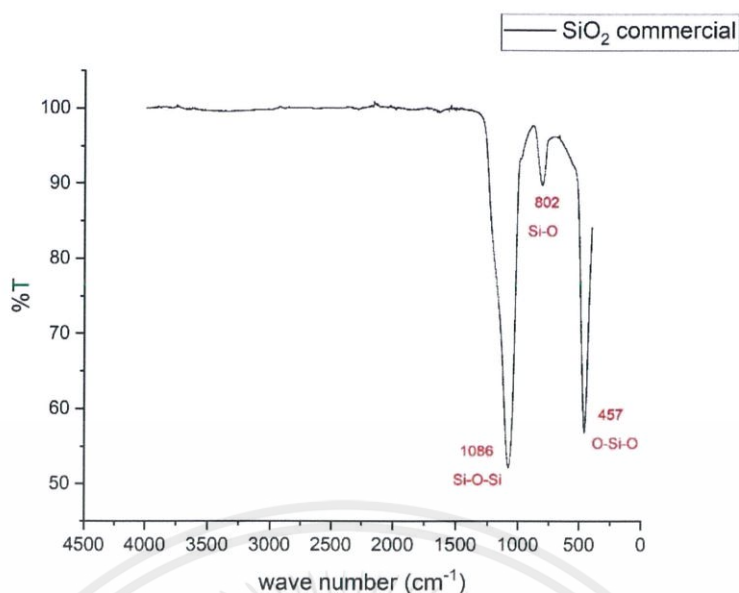
อนุภาคที่ใช้เวลาบด 4 ชั่วโมงพบว่า ตำแหน่ง 1 คือ 440 cm⁻¹ ตำแหน่งที่ 2 คือ 771 cm⁻¹ และตำแหน่งที่ 3 คือ 989 cm⁻¹ ดังภาพที่ 4.15



ภาพที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนและการสั่นของพันธะในผงแก้วที่บดเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

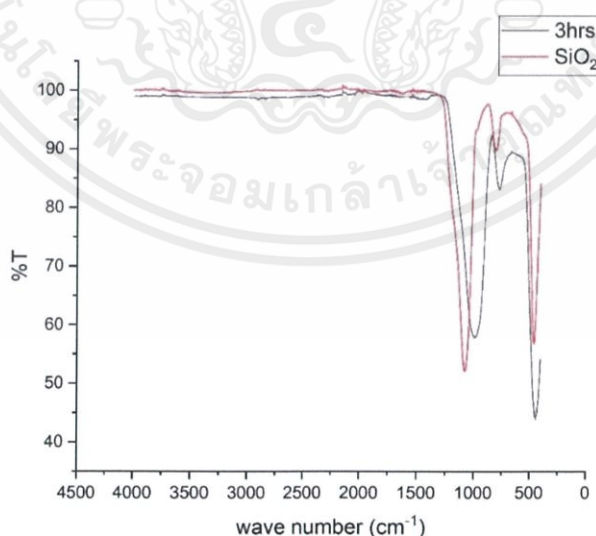
อนุภาคนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้าพบว่า ตำแหน่ง 1 คือ 457 cm⁻¹ ตำแหน่งที่ 2 คือ 802 cm⁻¹ และตำแหน่งที่ 3 คือ 1086 cm⁻¹ ดังภาพที่ 4.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ของการดูดกลืนและการสั่นของพันธะของอนุภาคนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า

ซึ่งจากการสืบค้นงานวิจัยพบว่าเป็นการสั่นในช่วงความถี่ของพันธะ O-Si-O bending vibration, Si-O-Stretching และ Si-O-Si asymmetric ตามลำดับ ซึ่งพันธะที่แสดงมีความใกล้เคียงกันกับการตรวจสอบผงแก้วและอนุภาคนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า จึงสามารถสรุปได้ว่าสารตัวอย่างทั้งสองเป็นสารที่มีซิลิกอนไดออกไซด์ประกอบอยู่จริงแต่อาจต่างกันที่ความบริสุทธิ์ของสารดังภาพที่ 4.17

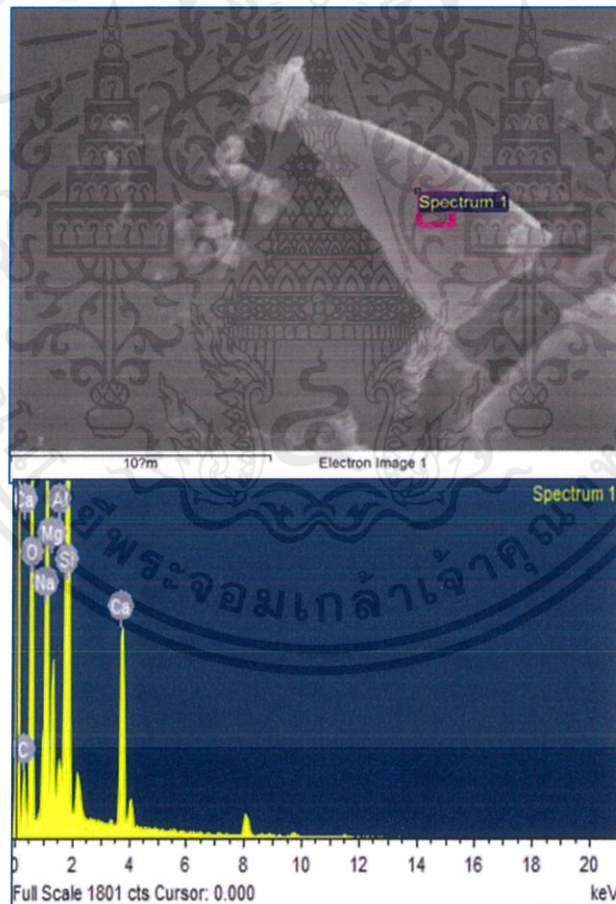


ภาพที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ของการดูดกลืนและการสั่นของพันธะระหว่างอนุภาคของแก้วที่บด 3 ชั่วโมงกับอนุภาคนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4.2 การตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิค EDX

ทำการตรวจสอบประกอบปริมาณธาตุของผงแก้วพบว่า มีธาตุอยู่หลากหลายชนิดและแสดงปริมาณของธาตุดังตารางในภาพที่ 4.18 ซึ่งจะเห็นได้ว่าธาตุที่มีปริมาณมากที่สุดได้แก่ธาตุออกซิเจน เท่ากับ 49.03 % โดยน้ำหนัก นอกจากนี้แล้วยังพบว่าธาตุที่มีปริมาณรองลงมาคือธาตุซิลิกา เท่ากับ 26.03 % โดยน้ำหนัก ซึ่งพบธาตุอื่นๆประกอบอยู่ด้วย ได้แก่ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) โซเดียม (Na) แมกนีเซียม (Mg) และอลูมิเนียม (Al) แสดงดังภาพ 4.18 และตารางที่ 4.1 โดยผลที่ได้ยืนยันว่า ผงแก้วที่ได้มีปริมาณซิลิกา (Si) และออกซิเจน (O) เป็นองค์ประกอบที่มีอยู่จริงและมีอยู่ในปริมาณที่มาก ซึ่งสอดคล้องกับจุดประสงค์ที่จะเตรียมซิลิกอนไดออกไซด์จากแหล่งที่หาได้ง่ายหรือมีราคาถูก และมีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์เพียงพอที่จะนำมาใช้ทดแทนอนุภาคนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้าได้ ในขั้นตอนนี้ไม่ได้ทำการตรวจสอบผงซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า เนื่องจากถือว่ามีความบริสุทธิ์สูงอยู่แล้ว



ภาพที่ 4.18 แสดงชนิดและปริมาณของธาตุที่พบในผงแก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงชนิดและปริมาณของธาตุที่พบในผงแก้ว

Element	Weight%	Atomic%
C K	10.01	15.48
O K	49.03	56.91
Na K	7.85	6.34
Mg K	2.17	1.65
Al K	0.59	0.41
Si K	26.03	17.21
Ca K	4.31	2.00
Totals	100.00	

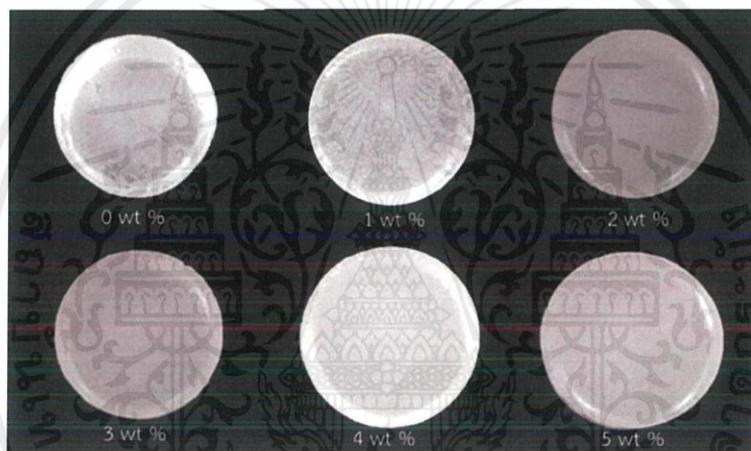
จากผลการทดลองที่ได้จากตอนที่ 4.1 นั้นพบว่า การบดย่อยผงแก้วเป็นเวลานาน 3 ชั่วโมง นั้นให้ขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุด และมีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกับซิลิกาทางการค้าอีกด้วย ดังนั้น จึงทำการเลือกผงแก้วในเงื่อนไขนี้ไปเตรียมเป็นวัสดุนาโนคอมโพสิต โดยใช้อีพอกซีเรซินเป็นเฟสหลัก พร้อมทั้งทำการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนผสมของผงแก้วนี้ เพื่อศึกษาสมบัติที่เกิดขึ้นต่อไปพร้อมกันนี้ยังได้ทำการเตรียมวัสดุคอมโพสิตระหว่างอีพอกซีเรซินกับผงนาโนซิลิกาทางการค้าในสัดส่วนเดียวกันควบคู่ไปด้วย โดยผลการทดลองทั้งหมดมีรายละเอียดดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

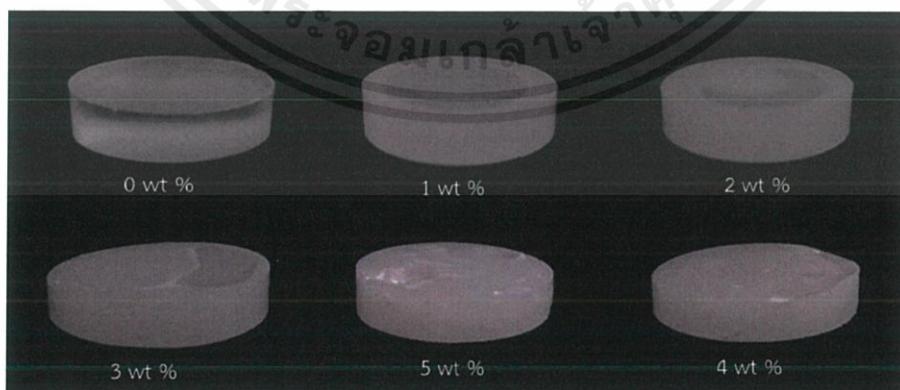
4.2 ผลการตรวจสอบคอมโพลีเมอร์อีพอกซีเรซินกับผงแก้ว

4.2.1 ลักษณะและสมบัติทางกายภาพ

โดยในขั้นตอนนี้จะเป็นการการหล่อขึ้นรูปอีพอกซีเรซินกับผงแก้ว (Glass powder) โดยจะเตรียมคอมโพลีเมอร์ระหว่างอีพอกซีเรซินกับผงแก้วในอัตราส่วนดังนี้ คือ 1 wt%, 2 wt%, 3 wt%, 4 wt% และ 5 wt% โดยน้ำหนัก ซึ่งคอมโพลีเมอร์ที่ได้จะแสดงดังภาพที่ 4.19 และ 4.20 จะเห็นว่าที่อัตราส่วนของผงแก้วที่ 1 wt% โดยน้ำหนักจะโปร่งแสงและมีลักษณะใสมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับคอมโพลีเมอร์ที่เจือผงแก้วในอัตราส่วนเพิ่มที่สูงขึ้นจะมีลักษณะขุ่นขึ้นและมีการกระจายตัวของอนุภาคหนาแน่นเพิ่มขึ้นตามลำดับ (เมื่อมองด้วยตาเปล่า)



ภาพที่ 4.19 ลักษณะผิวหน้าของคอมโพลีเมอร์อีพอกซีเรซินกับผงแก้ว



ภาพที่ 4.20 ลักษณะด้านข้างของคอมโพลีเมอร์อีพอกซีเรซินกับผงแก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงสมบัติทางกายภาพของคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับผงแก้ว

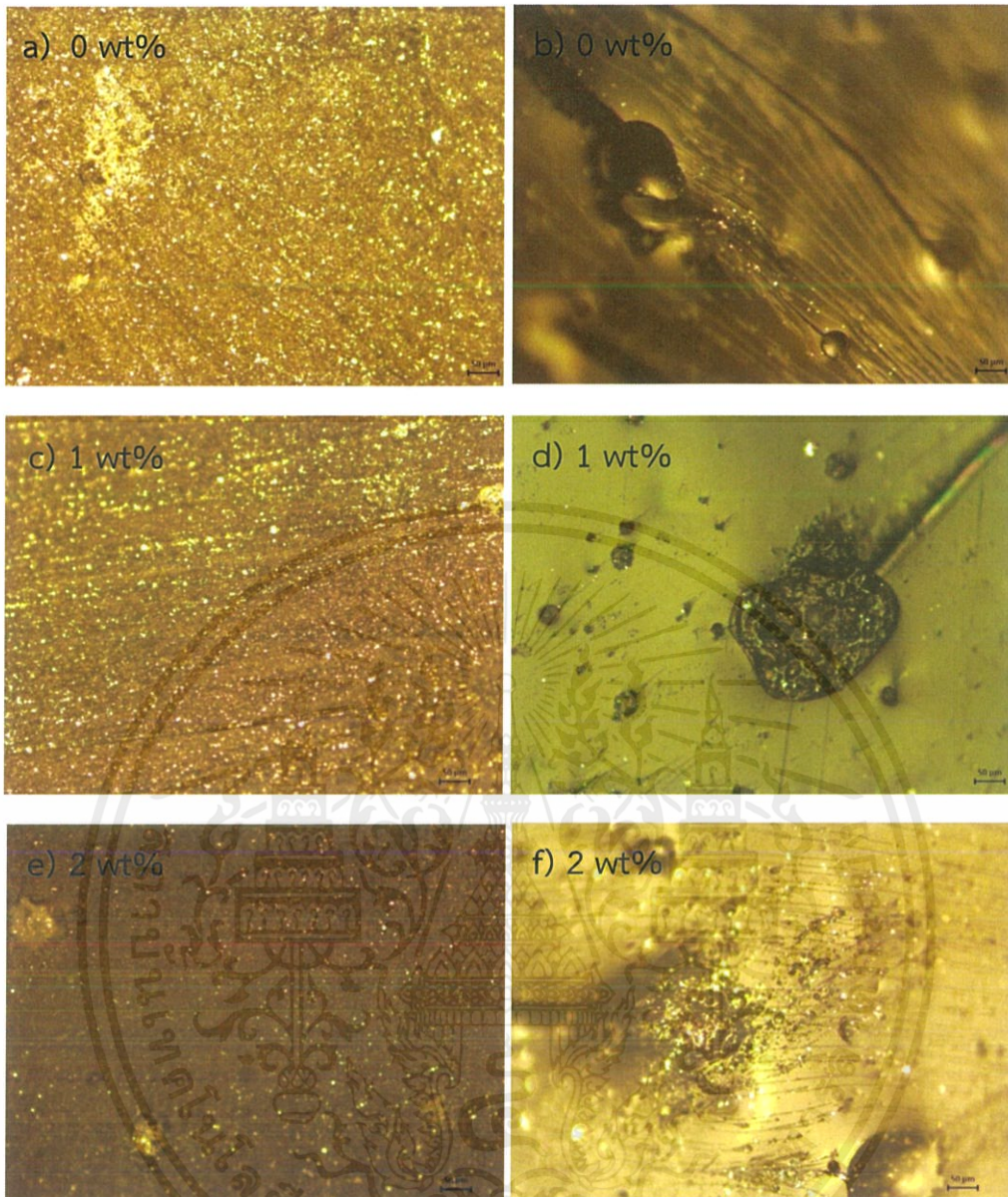
เรซิน : ผงแก้ว (โดยน้ำหนัก)	มวล (g)	ความ หนา (cm)	รัศมี (cm)	ความหนาแน่น (g/cm ³)	ลักษณะทางกายภาพ
0 wt%	3.4068	0.5	2.524	1.170	สีใส
1 wt%	3.611	0.5	2.524	1.4707	มีการกระจายตัวของอนุภาคแต่น้อย และมีความโปร่งใส
2 wt%	3.482	0.5	2.524	1.4183	มีการกระจายตัวของอนุภาคหนาแน่นขึ้น เริ่มมีสีขาวขุ่น
3 wt%	3.413	0.5	2.524	1.3901	มีการกระจายตัวของอนุภาคหนาแน่นขึ้นตามลำดับ มีสีขาวขุ่นเข้ม
4 wt%	3.271	0.5	2.524	1.33215	มีการกระจายตัวของอนุภาคหนาแน่นค่อนข้างมาก มีสีขาวผิวเรซินด้านข้างมีการเกาะกันกับแม่พิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5 wt%	2.998	0.5	2.524	1.22085	มีการกระจายตัวของอนุภาคหนาแน่นมาก มีสีขาวขุ่น ผิวเรซินด้านผิวเรซินด้านข้างมีการเกาะกันกับแม่พิมพ์
-------	-------	-----	-------	---------	---

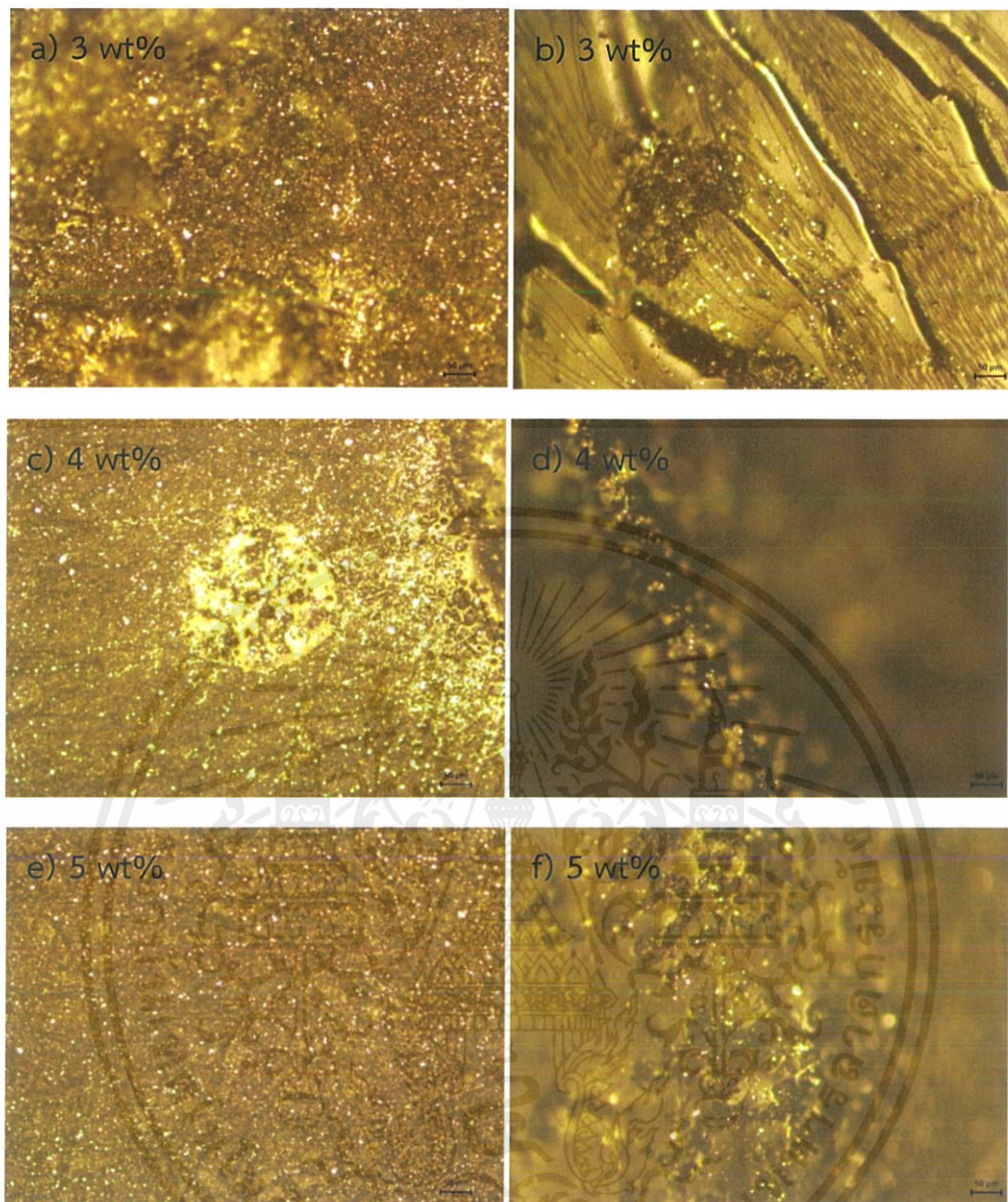
4.2.2 โครงสร้างจุลภาคของคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับผงแก้ว

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้างจุลภาคของอีพอกซีเรซินกับผงแก้วและซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้าโดยนำชิ้นงานที่หล่อขึ้นรูปในอัตราส่วนต่าง ๆ ได้แก่ อีพอกซีเรซินบริสุทธิ์ อีพอกซีที่เจือสารตัวเติมในอัตราส่วน 1 wt% , 2 wt% , 3 wt% ,4 wt% และ 5 wt% นำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ upright microscope โดยถ่ายภาพผิวหน้าของชิ้นงานคอมโพสิต และถ่ายภาพผิวตัดขวางของชิ้นงาน ทั้งนี้เพื่อดูลักษณะทั่วไปของชิ้นงาน รวมถึงการกระจายตัวของอนุภาคของผงแก้วในคอมโพสิต หรือการเกิดความเป็นรูพรุนในชิ้นวัสดุคอมโพสิต ซึ่งพบว่าความแตกต่างมีไม่มากนักเนื่องจากการเจือเฟสเสริมแรงมีการเจือที่น้อยมากเมื่ออยู่ในเฟสของพอลิเมอร์เมทริกซ์ ร่วมกับอนุภาคของผงแก้วมีขนาดใหญ่จึงทำให้ไม่เกิดการเสริมแรงในระดับอะตอมหรือโมเลกุล จึงทำให้มองไม่เห็นการกระจายตัวที่ชัดเจนมากนัก และมองเห็นการกระจายตัวในบางอัตราส่วนที่เพิ่มสูงขึ้น คือ ที่อัตราส่วน 5 wt% โดยน้ำหนัก แสดงดังภาพที่ 4.21 และ 4.22



ภาพที่ 4.21 (a) แสดงภาพผิวหน้าของคอมโพลีเมอร์อีพอกซีบริสุทธิ์กำลังขยาย 1000 เท่า
 (b) แสดงภาพผิวตัดขวางของคอมโพลีเมอร์อีพอกซีบริสุทธิ์กำลังขยาย 1000 เท่า
 (c) แสดงภาพผิวหน้าของอีพอกซีกับผงแก้วอัตราส่วน 1 wt% กำลังขยาย 1000 เท่า
 (d) แสดงภาพผิวตัดขวางของอีพอกซีกับผงแก้วอัตราส่วน 1 wt% กำลังขยาย 1000 เท่า
 (e) แสดงภาพผิวหน้าของอีพอกซีกับผงแก้วอัตราส่วน 2 wt% กำลังขยาย 1000 เท่า
 (f) แสดงภาพผิวตัดขวางของอีพอกซีกับผงแก้วอัตราส่วน 2 wt% กำลังขยาย 1000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.22 (a) แสดงภาพผิวหน้าของอีพอกซีกับผงแก้วอัตราส่วน 3 wt% กำลังขยาย 1000 เท่า
 (b) แสดงภาพผิวหน้าของอีพอกซีกับผงแก้วอัตราส่วน 3 wt% กำลังขยาย 1000 เท่า
 (c) แสดงภาพผิวหน้าของอีพอกซีกับผงแก้วอัตราส่วน 4 wt% กำลังขยาย 1000 เท่า
 (d) แสดงภาพผิวดัดขวางของอีพอกซีกับผงแก้วอัตราส่วน 4 wt% กำลังขยาย 1000 เท่า
 (e) แสดงภาพผิวหน้าของอีพอกซีกับผงแก้วอัตราส่วน 5 wt% กำลังขยาย 1000 เท่า
 (f) แสดงภาพผิวดัดขวางของอีพอกซีกับผงแก้วอัตราส่วน 5 wt% กำลังขยาย 1000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

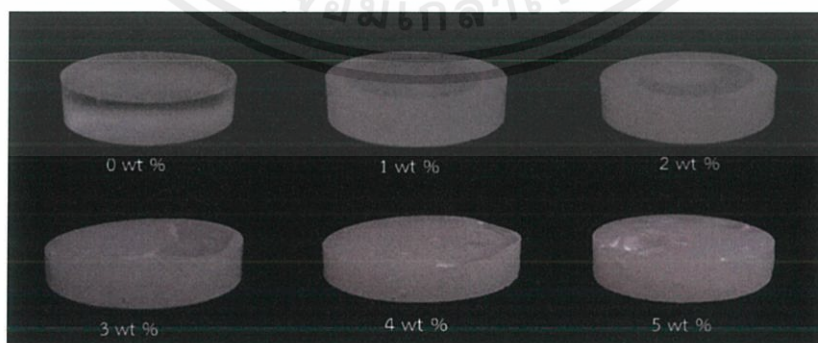
4.3 ผลการตรวจสอบคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า

4.3.1 ลักษณะและสมบัติทางกายภาพ

โดยในขั้นตอนนี้จะเป็นการการหล่อขึ้นรูปอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า (SiO_2 nanoparticles) โดยจะเตรียมคอมโพสิตระหว่างอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์ในอัตราส่วนดังนี้ คือ 1 wt%, 2 wt%, 3 wt%, 4 wt% และ 5 wt% โดยน้ำหนัก ซึ่งคอมโพสิตที่ได้จะแสดงดังภาพที่ 4.22 จะเห็นว่าที่อัตราส่วนซิลิกอนไดออกไซด์ที่ 1 wt% จะโปร่งใสและมีการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ในอีพอกซีน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับคอมโพสิตที่เจือซิลิกอนไดออกไซด์ในอัตราส่วนที่เพิ่มสูงขึ้นจะมีลักษณะขุ่นขึ้นและมีการกระจายตัวของอนุภาคหนาแน่นมากกว่าตามลำดับ โดยที่อัตราส่วนซิลิกอนไดออกไซด์ 4 และ 5 wt% โดยน้ำหนัก คอมโพสิตที่ได้มีลักษณะผิวหน้าขรุขระเนื่องจากมีปริมาณอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรเจืออยู่มากและทำให้เกิดความหนืดขึ้นมากกว่าคอมโพสิตที่มีซิลิกอนไดออกไซด์ที่เจืออยู่ในปริมาณที่น้อย ซึ่งภาพถ่ายทางกายภาพที่ผิวหน้าและผิวด้านข้างของชิ้นงานจะแสดงดังภาพที่ 4.23 และ 4.24



ภาพที่ 4.23 ลักษณะผิวหน้าของคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า



ภาพที่ 4.24 ลักษณะผิวด้านข้างของคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงสมบัติทางกายภาพของคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์จากการค้า

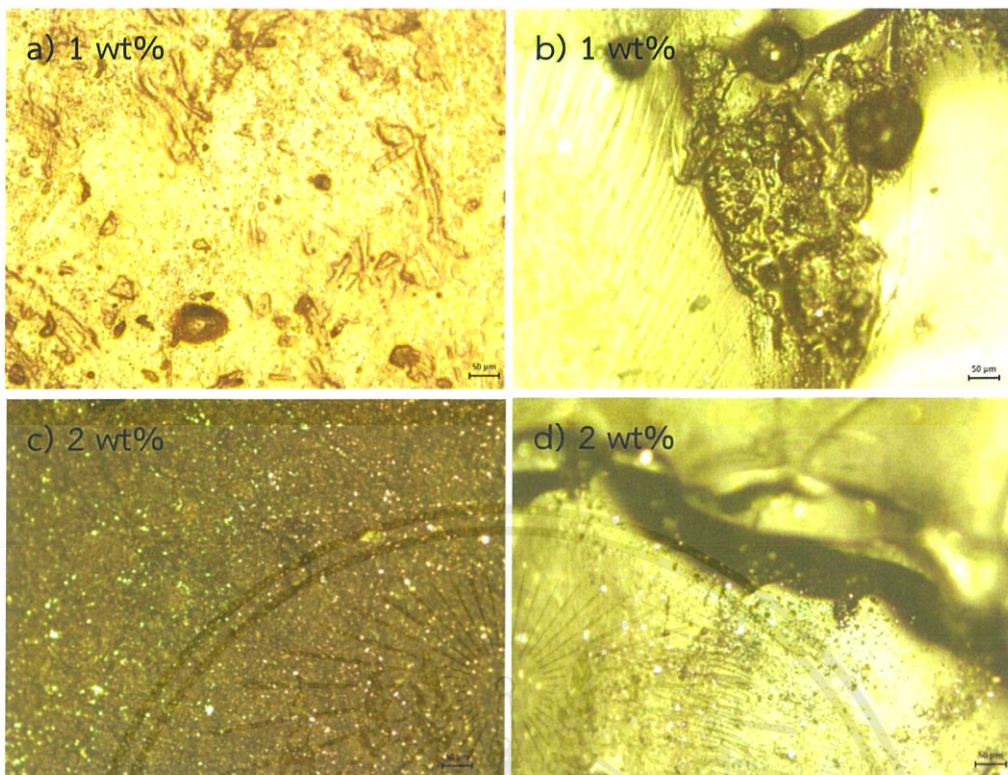
เรซิน : ซิลิกา (โดยน้ำหนัก)	มวล (g)	ความ หนา (cm)	รัศมี (cm)	ความหนาแน่น (g/cm ³)	ลักษณะทางกายภาพ
0 wt%	3.588	0.5	2.524	1.22305	สีใส
1 wt%	3.565	0.5	2.524	1.452	มีการกระจายตัวของอนุภาคแต่น้อย และมีความโปร่งใส
2 wt%	3.474	0.5	2.524	1.3743	มีการกระจายตัวของอนุภาคหนาแน่นขึ้น เริ่มมีสีขาวขุ่น
3 wt%	3.442	0.5	2.524	1.4017	มีการกระจายตัวของอนุภาคหนาแน่นขึ้นตามลำดับ มีสีขาวขุ่น
4 wt%	3.509	0.5	2.524	1.42895	มีการกระจายตัวของอนุภาคหนาแน่นค่อนข้างมาก มีสีขาวขุ่น ผิวเรซินด้านบนเริ่มขรุขระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5 wt%	3.394	0.5	2.524	1.38205	มีการกระจายตัวของอนุภาคหนาแน่นมาก มีสีขาวขุ่น ผิวเรซินด้านบนไม่มีความเรียบและขรุขระ
-------	-------	-----	-------	---------	---

4.3.2 โครงสร้างจุลภาคของคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้างจุลภาคของอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้าโดยนำชิ้นงานที่หล่อแบบดั้งเดิมในอัตราส่วนต่าง ๆ ได้แก่ อีพอกซีเรซินบริสุทธิ์ อีพอกซีที่เจือซิลิกอนไดออกไซด์ในอัตราส่วน 1 wt% , 2 wt% , 3 wt% , 4 wt% และ 5 wt% นำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ upright microscope โดยถ่ายภาพผิวหน้าของชิ้นงานคอมโพสิตและถ่ายภาพตัดขวางของชิ้นงาน ทั้งนี้เพื่อดูลักษณะทั่วไปของชิ้นงาน รวมถึงการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ในคอมโพสิต จากภาพถ่ายผิวหน้าพบว่าบางอัตราส่วน ได้แก่ 1-3 wt% เห็นการกระจายตัวของอนุภาคบนเฟสเมตริกซ์ โดยชัดเจนที่อัตราส่วน 3 wt% อย่างไรก็ตามการกระจายตัวดังกล่าวก็ถือว่ายังเป็นการกระจายตัวที่ไม่ดีเพราะยังเห็นการรวมตัวและการเกาะตัวเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคอยู่ ส่วนภาพถ่ายตัดขวางก็ยังมองไม่เห็นการกระจายตัวของอนุภาคที่ชัดเจน เนื่องจากเฟสเสริมแรงมีขนาดในระดับนาโนเมตร ทำให้อนุภาครวมตัวกันเป็นก้อนและกระจายตัวได้ไม่ดีเมื่ออยู่ในเฟสพอลิเมอร์เมตริกซ์ แต่เกิดความเป็นรูพรุนในชิ้นวัสดุคอมโพสิตแทนและพบว่ามีการเกิดรูพรุนเกิดขึ้นในชิ้นงานในอัตราส่วนที่มีการเจืออนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ในอัตราส่วนตั้งแต่ 2-5 wt% โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นการเจือที่มีอัตราส่วนที่เพิ่มสูงขึ้น ภาพถ่ายผิวหน้าและภาพถ่ายตัดขวางจะแสดงดังภาพที่ 4.25 และ 4.26



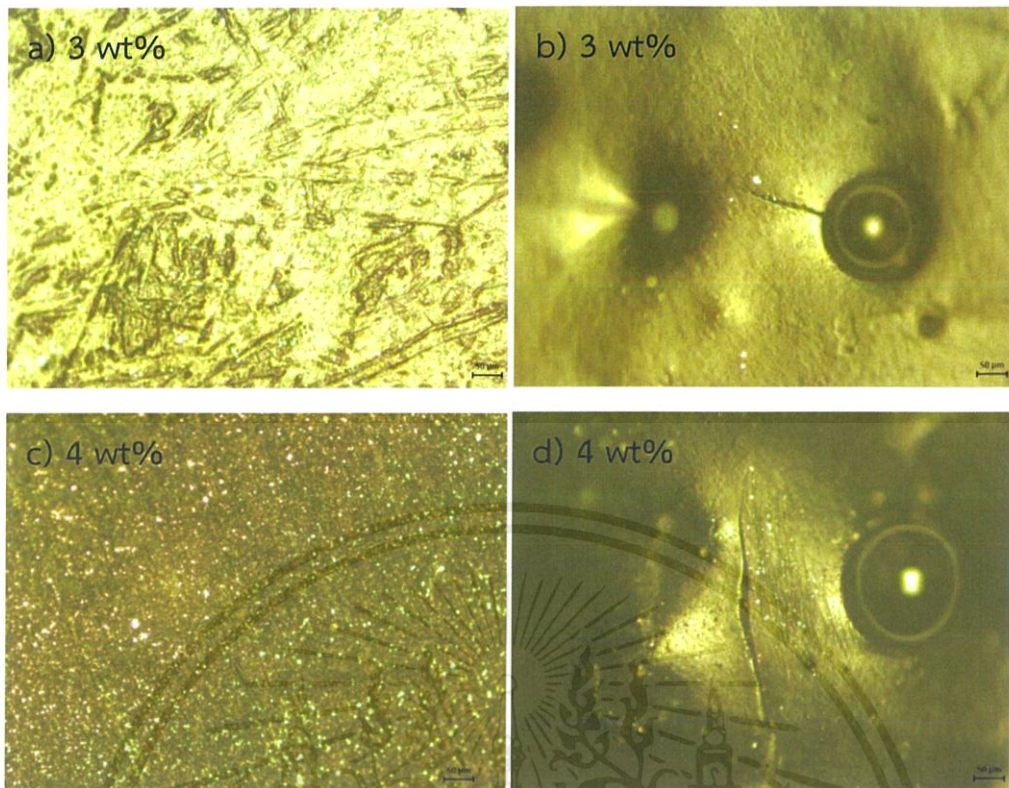
ภาพที่ 4.25 (a) แสดงภาพผิวหน้าของคอมโพสิตอีพอกซีกับซิลิกอนไดออกไซด์อัตราส่วน 1 wt% กำลังขยาย 1000 เท่า

(b) แสดงภาพผิวตัดขวางของคอมโพสิตอีพอกซีกับซิลิกอนไดออกไซด์อัตราส่วน 1 wt% กำลังขยาย 1000 เท่า

(c) แสดงภาพผิวตัดขวางของคอมโพสิตอีพอกซีกับซิลิกอนไดออกไซด์อัตราส่วน 2 wt% กำลังขยาย 1000 เท่า

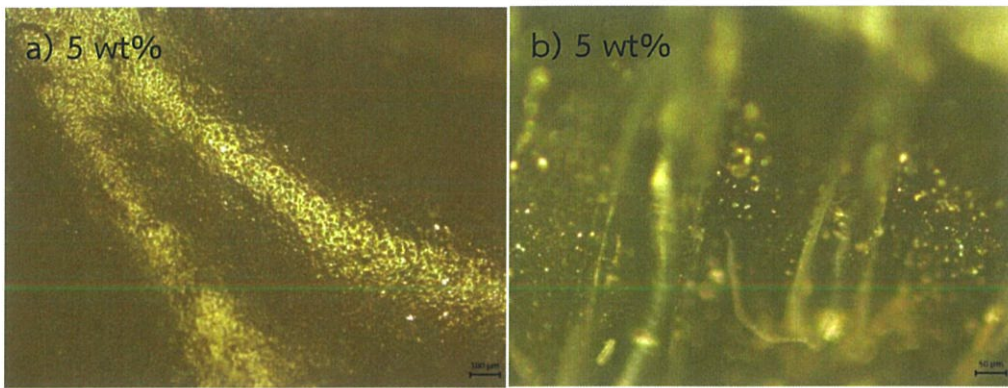
(d) แสดงภาพผิวตัดขวางของคอมโพสิตอีพอกซีกับซิลิกอนไดออกไซด์อัตราส่วน 2 wt% กำลังขยาย 1000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- ภาพที่ 4.26 (a) แสดงภาพผิวหน้าของคอมโพสิตอีพอกซีกับซิลิกอนไดออกไซด์อัตราส่วน 3 wt% กำลังขยาย 1000 เท่า
- (b) แสดงภาพผิวหน้าของคอมโพสิตอีพอกซีกับซิลิกอนไดออกไซด์อัตราส่วน 3 wt% กำลังขยาย 1000 เท่า
- (c) แสดงภาพผิวหน้าของคอมโพสิตอีพอกซีกับซิลิกอนไดออกไซด์อัตราส่วน 4 wt% กำลังขยาย 1000 เท่า
- (d) แสดงภาพผิวตัดขวางของคอมโพสิตอีพอกซีกับซิลิกอนไดออกไซด์อัตราส่วน 4 wt% กำลังขยาย 1000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.27 (a) แสดงภาพผิวหน้าของคอมโพสิตอีพอกซี/ซิลิกอนไดออกไซด์อัตราส่วน 5 wt% กำลังขยาย 1000 เท่า

(b) แสดงภาพผิวดัดขวางของคอมโพสิตอีพอกซีกับซิลิกอนไดออกไซด์อัตราส่วน 5 wt% กำลังขยาย 1000 เท่า



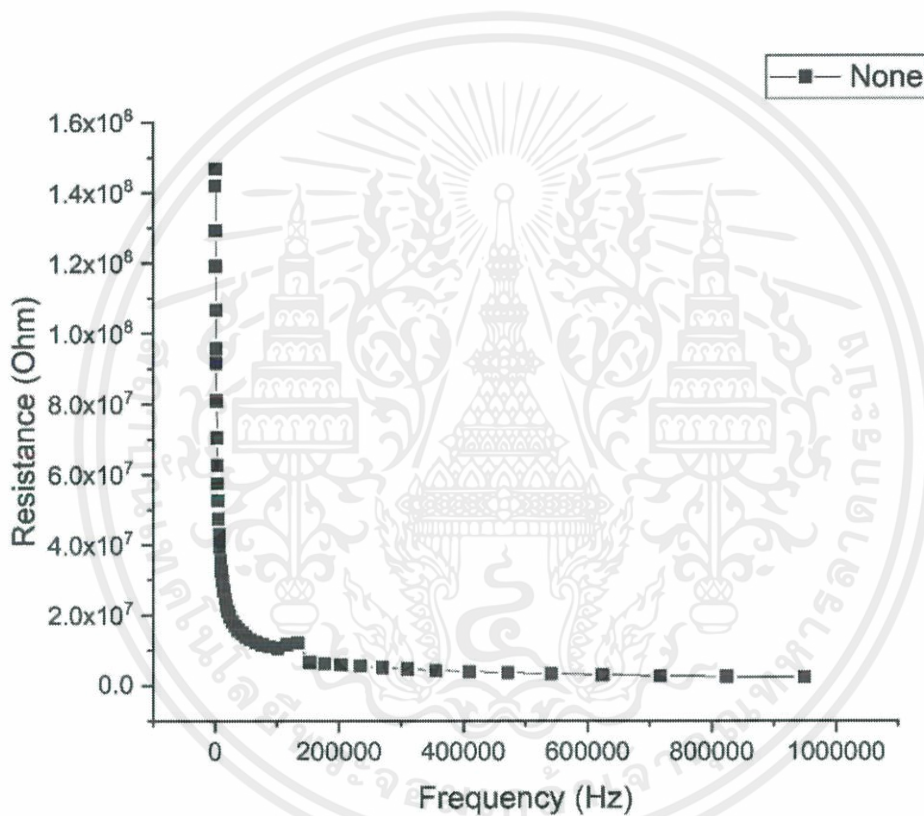
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 สมบัติทางไฟฟ้า

4.4.1 ความต้านทาน (R)

สามารถวัดได้จากเครื่อง LCR meter โดยเครื่องจะทำการวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าและความถี่ โดยวัดที่อุณหภูมิห้องและนำมาวิเคราะห์ผลด้วยกราฟ ตามวัสดุคอมโพสิตที่สัดส่วนต่างๆ ที่ดังนี้

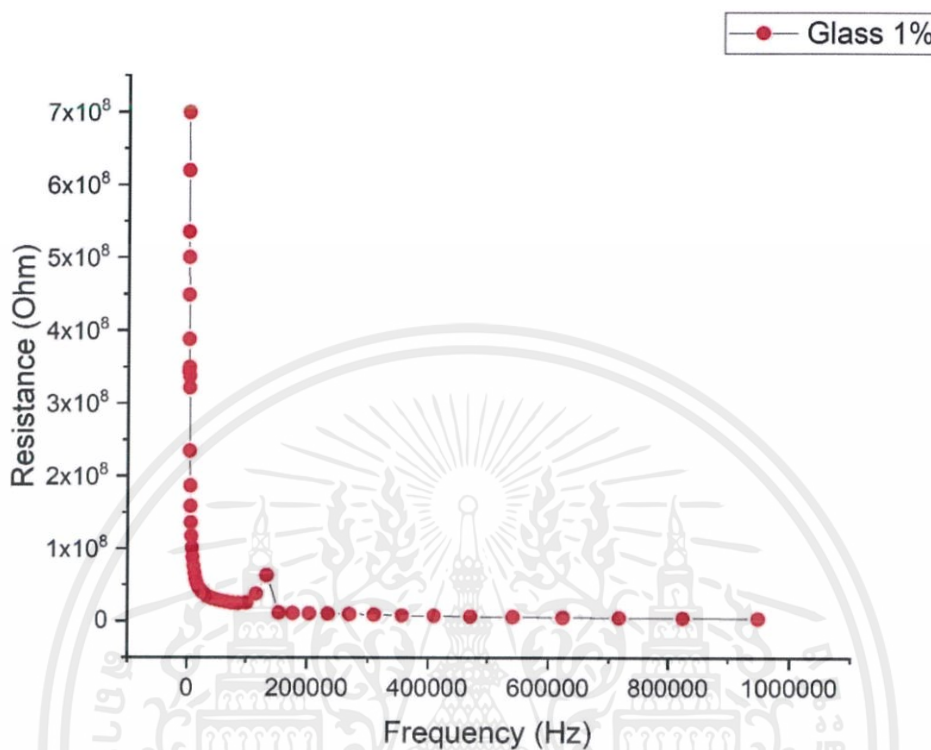
วัสดุอีพอกซีเรซินที่ไม่มีการเจือสารผสม มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าสูงสุดที่ 1.46×10^8 โอห์ม ดังภาพที่ 4.28



ภาพที่ 4.28 กราฟแสดงความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุอีพอกซีเรซินที่ไม่มีการเจือสารผสม

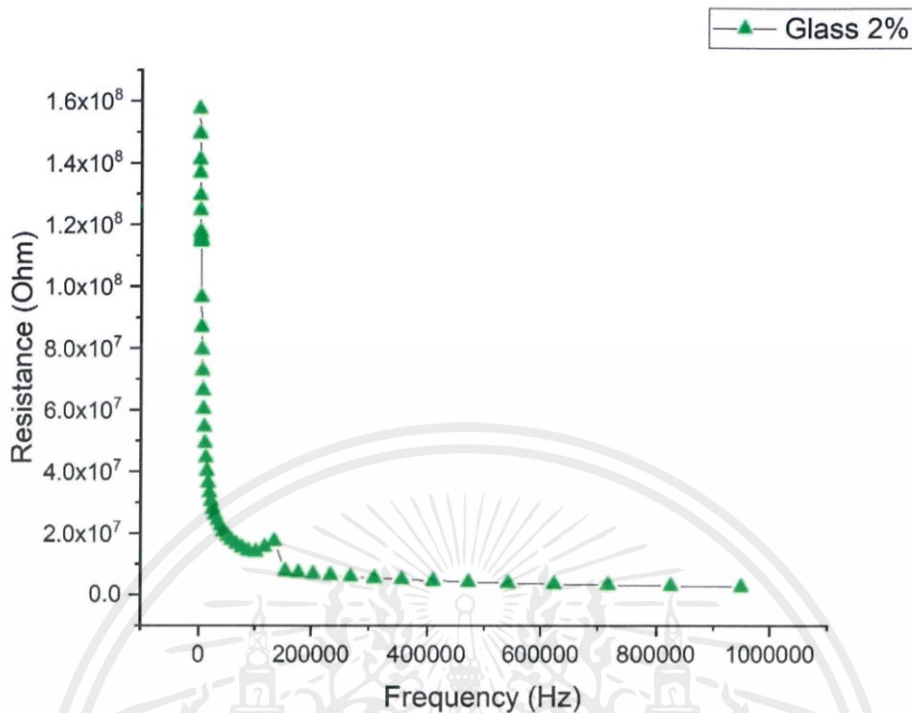
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุคอมโพสิตอีพอกซีเรซินที่ผสมอนุภาคผงแก้วที่ทำการบดที่ 3 ชั่วโมงอัตราส่วน 1 wt% มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าสูงสุดที่ 7×10^8 โอห์ม ดังภาพที่ 4.29



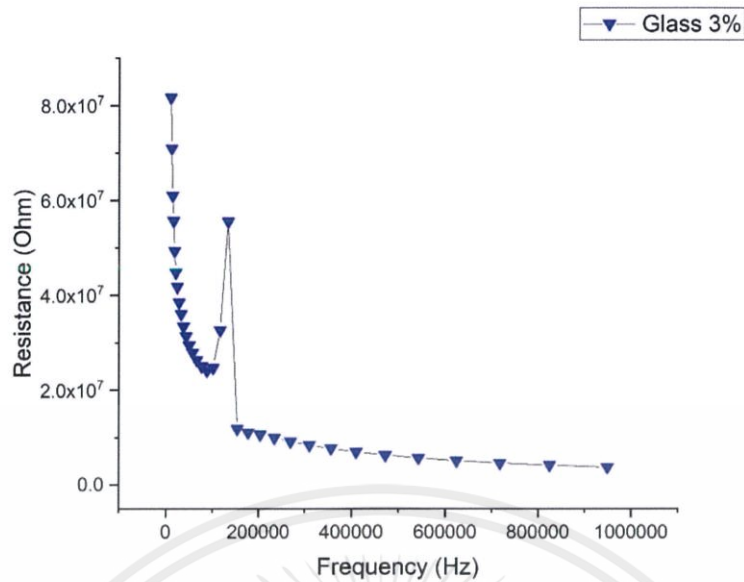
ภาพที่ 4.29 กราฟแสดงความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุอีพอกซีเรซินที่อนุภาคผงแก้วที่ทำการบดที่ 3 ชั่วโมงอัตราส่วน 1 wt%

วัสดุคอมโพสิตอีพอกซีเรซินที่ผสมอนุภาคผงแก้วที่ทำการบดที่ 3 ชั่วโมงอัตราส่วน 2 wt% มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าสูงสุดที่ 1.5×10^8 โอห์ม ดังภาพที่ 4.30



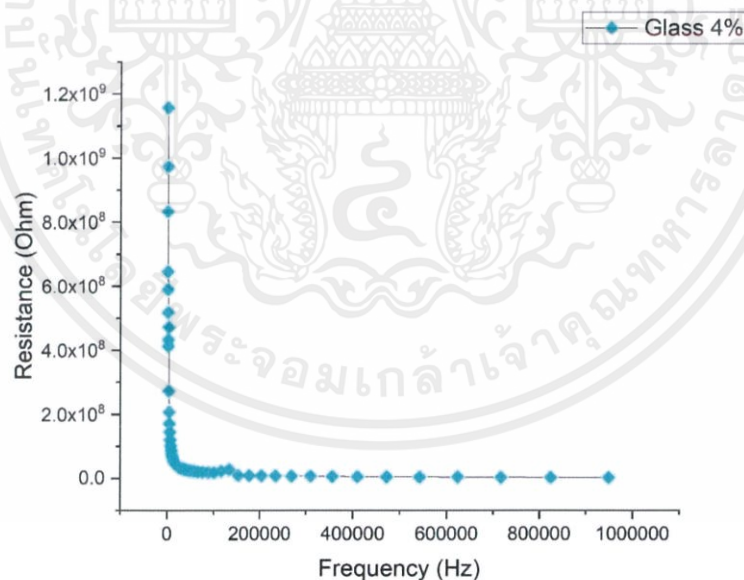
ภาพที่ 4.30 กราฟแสดงความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุพอกซีเรซินที่อนุภาคผงแก้วที่ทำการบดที่ 3 ชั่วโมงอัตราส่วน 2 wt%

วัสดุพอกซีเรซินที่ผสมอนุภาคผงแก้วที่ทำการบดที่ 3 ชั่วโมงอัตราส่วน 3 wt% มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าสูงสุดที่ 8.16×10^7 โอห์ม ซึ่งในกราฟจะมีช่วงที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นที่ความถี่ที่ 116615 มีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ 3.2×10^7 โอห์ม จนถึงความถี่ที่ 134107 มีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ 5.5×10^7 โอห์ม แล้วลดลงอย่างเห็นได้ชัด ดังภาพที่ 4.31



ภาพที่ 4.31 กราฟแสดงความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุอีพอกซีเรซินที่อนุภาคผงแก้วที่ทำการบดที่ 3 ชั่วโมงอัตราส่วน 3 wt%

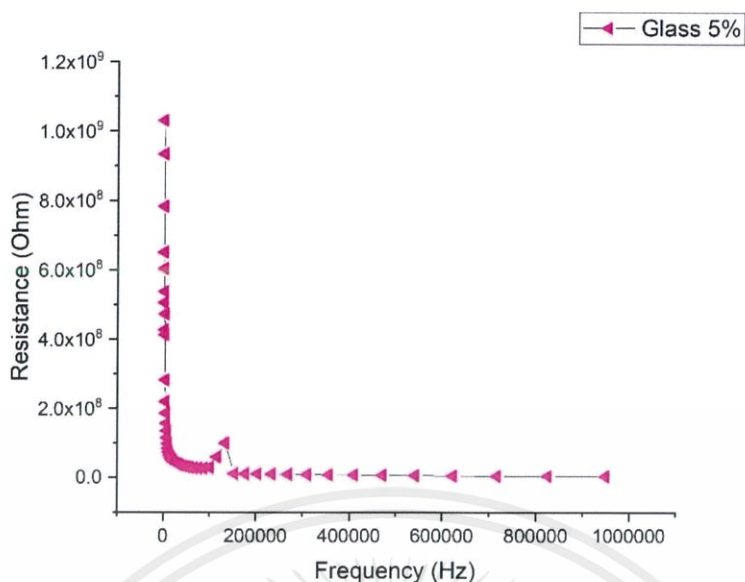
วัสดุคอมโพสิตอีพอกซีเรซินที่ผสมอนุภาคผงแก้วที่ทำการบดที่ 3 ชั่วโมงอัตราส่วน 4 wt% มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าสูงสุดที่ 1.15×10^9 โอห์ม ดังภาพที่ 4.32



ภาพที่ 4.32 กราฟแสดงความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุอีพอกซีเรซินที่อนุภาคผงแก้วที่ทำการบดที่ 3 ชั่วโมงอัตราส่วน 4 wt%

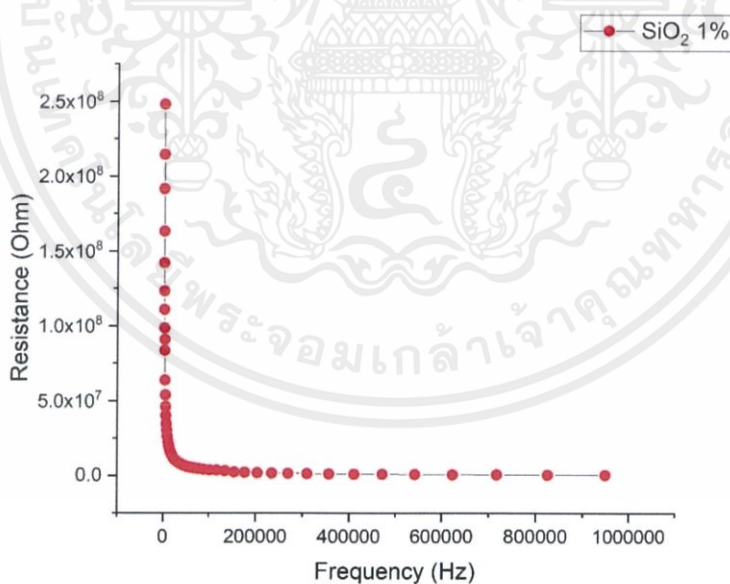
วัสดุคอมโพสิตอีพอกซีเรซินที่ผสมอนุภาคผงแก้วที่ทำการบดที่ 3 ชั่วโมงอัตราส่วน 5 wt% มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าสูงสุดที่ 1.03×10^9 โอห์ม ดังภาพที่ 4.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.33 กราฟแสดงความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิห้องที่ทำการอบที่ 3 ชั่วโมงอัตราส่วน 5 wt%

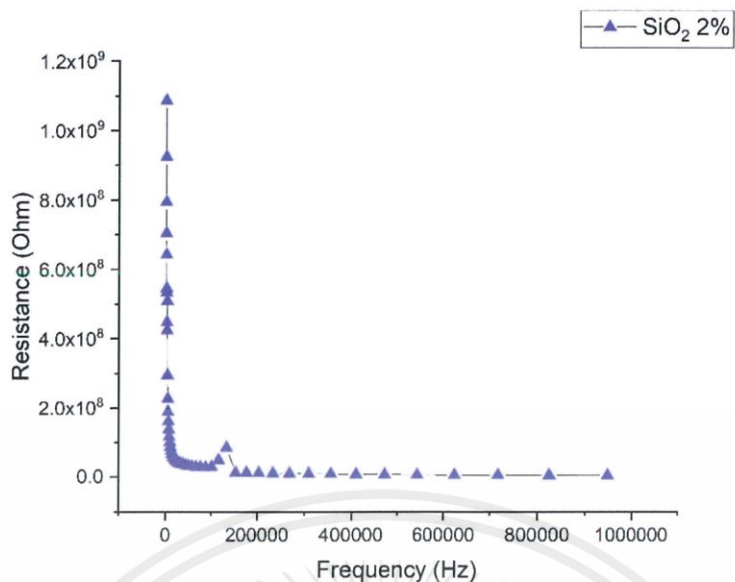
วัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์ที่ผสมกับซิลิกอนไดออกไซด์อัตราส่วน 1 wt% มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าสูงสุดที่ 2.48×10^8 โอห์ม ดังภาพที่ 4.34



ภาพที่ 4.34 กราฟแสดงความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิห้องซิลิกอนไดออกไซด์อัตราส่วน อัตราส่วน 1 wt%

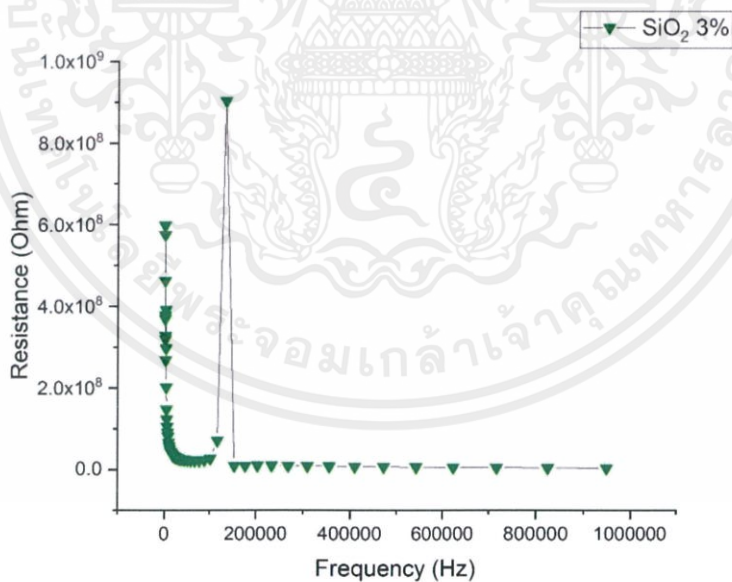
วัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์ที่ผสมกับซิลิกอนไดออกไซด์อัตราส่วน 2 wt% มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าสูงสุดที่ 1.05×10^9 โอห์ม ดังภาพที่ 4.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.35 กราฟแสดงความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุฟอกซีเรซินที่อนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ อัตราส่วน อัตราส่วน 2 wt%

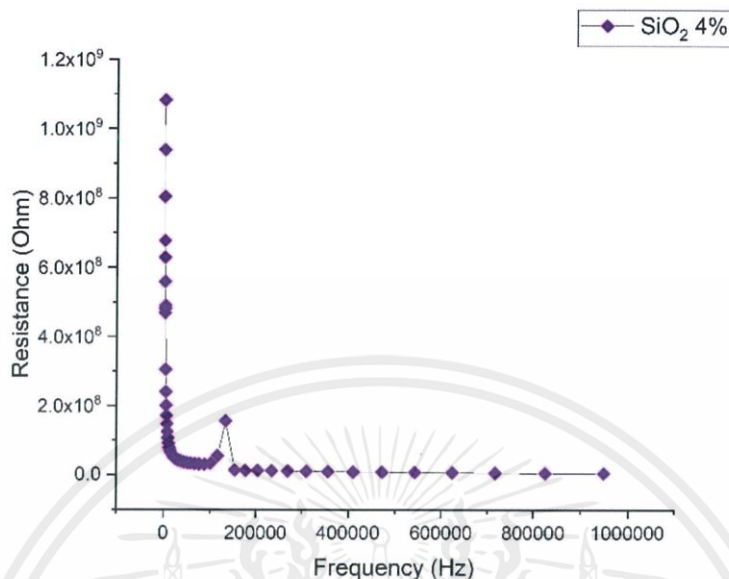
วัสดุคอมโพสิตฟอกซีเรซินที่ผสมกับซิลิกอนไดออกไซด์อัตราส่วน 3 wt% มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าสูงสุดที่ 9.03×10^8 โอห์ม ดังภาพที่ 4.36



ภาพที่ 4.36 กราฟแสดงความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุฟอกซีเรซินที่อนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ อัตราส่วน อัตราส่วน 3 wt.%

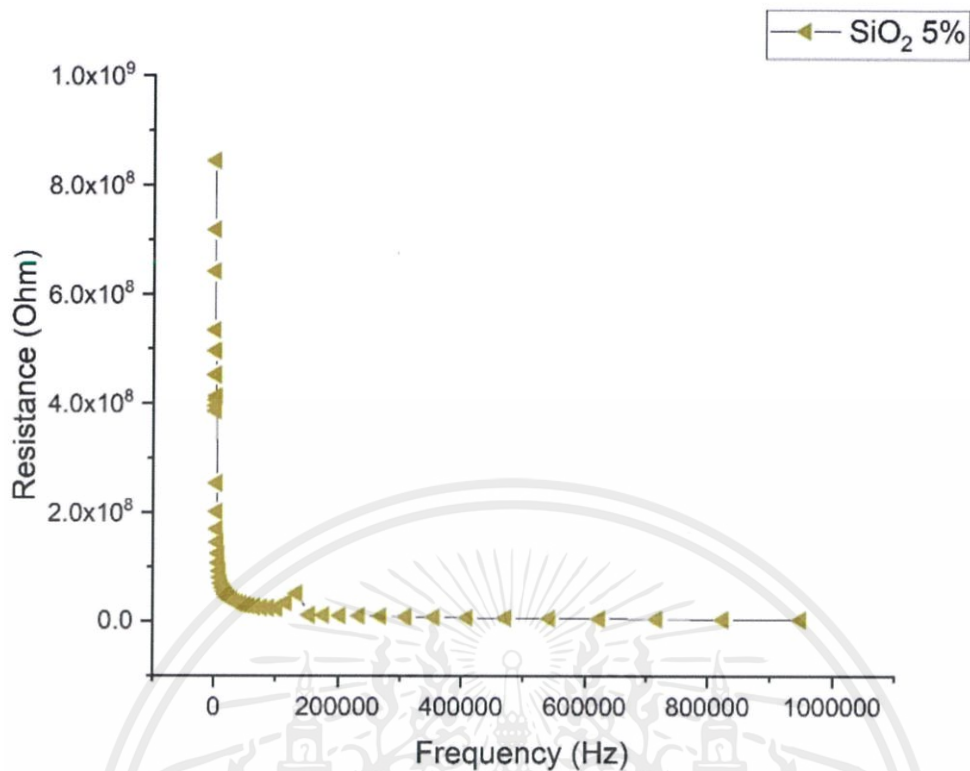
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุคอมโพสิตอีพอกซีเรซินที่ผสมกับซิลิกอนไดออกไซด์อัตราส่วน 4 wt% มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าสูงสุดที่ 1.18×10^9 โอห์ม ดังภาพที่ 4.37



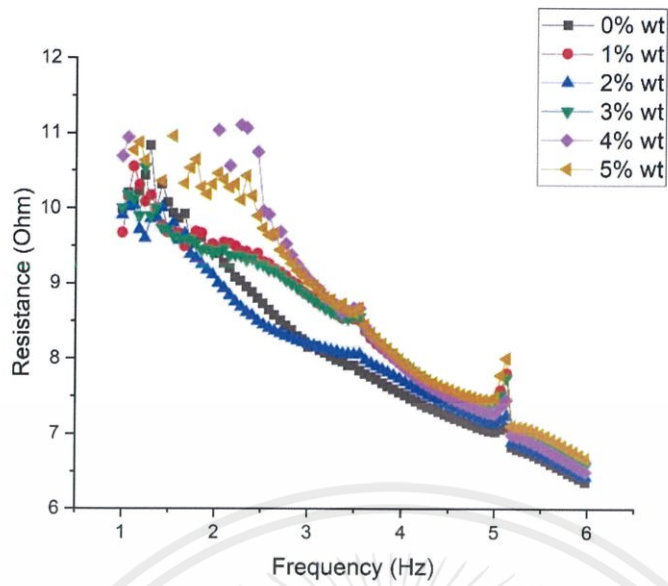
ภาพที่ 4.37 กราฟแสดงความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุอีพอกซีเรซินที่อนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์อัตราส่วน 4 wt%

วัสดุคอมโพสิตอีพอกซีเรซินที่ผสมกับซิลิกอนไดออกไซด์อัตราส่วน 5 wt% มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าสูงสุดที่ 8.44×10^8 โอห์ม ดังภาพที่ 4.38

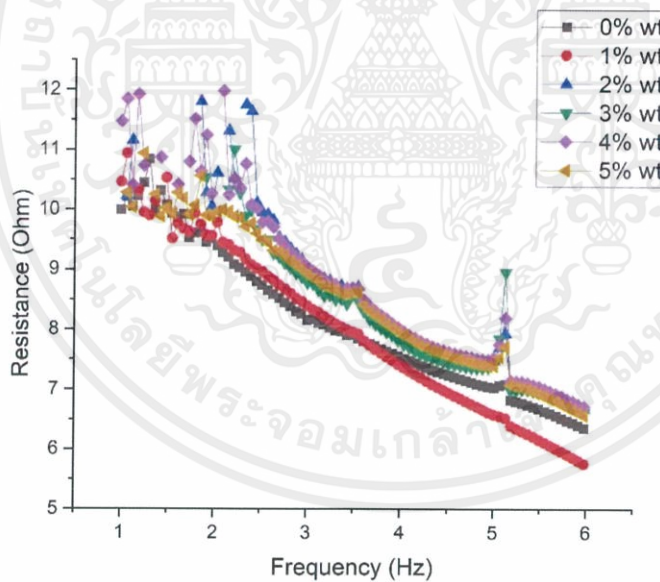


ภาพที่ 4.38 กราฟแสดงความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุอิพอกซีเรซินที่อนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ อัตราส่วน อัตราส่วน 5 wt%

จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุคอมโพสิตทั้งหมดมีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่ต่ำกว่า วัสดุอิพอกซีเรซินที่ไม่มีการเจือสารคอมโพสิตเข้าไปอย่างเห็นได้ชัดและเมื่อนำกราฟของวัสดุคอมโพสิตมาวิเคราะห์รวมกันทุกสัดส่วน จะเห็นได้ว่า ที่ 4 wt% มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่สูงที่สุด ทั้งสารเจืออนุภาคผงแก้วและอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า ดังภาพที่ 4.39 และ 4.40 ซึ่งเมื่อเรานำกราฟของวัสดุคอมโพสิตอิพอกซีเรซินที่เจือกับอนุภาคผงแก้วบดที่ 3 ชั่วโมงกับวัสดุคอมโพสิตอิพอกซีเรซินที่เจือกับอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า มาเปรียบเทียบกันที่ความถี่ที่ 1000 Hz ซึ่งเป็นความถี่ที่มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่มีค่าสูงที่สุดทุกสัดส่วน จะเห็นได้ว่าวัสดุคอมโพสิตอิพอกซีเรซินที่เจือกับอนุภาคผงแก้ว ในการผสมที่สัดส่วน 1 wt% และ 2 wt% มีค่าที่ต่ำกว่าวัสดุคอมโพสิตอิพอกซีเรซินที่เจือกับอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้าซึ่งเป็นตัวเปรียบเทียบอย่างมาก ในสัดส่วนที่ 3 wt% วัสดุคอมโพสิตอิพอกซีเรซินที่เจือกับอนุภาคผงแก้วมีความใกล้เคียงกับตัวเปรียบเทียบ และในสัดส่วนที่ 4 wt% มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่สูงที่สุดในทุกสัดส่วนและมีค่าที่ใกล้เคียงกับตัวเปรียบเทียบสูง ตามภาพที่ 4.41

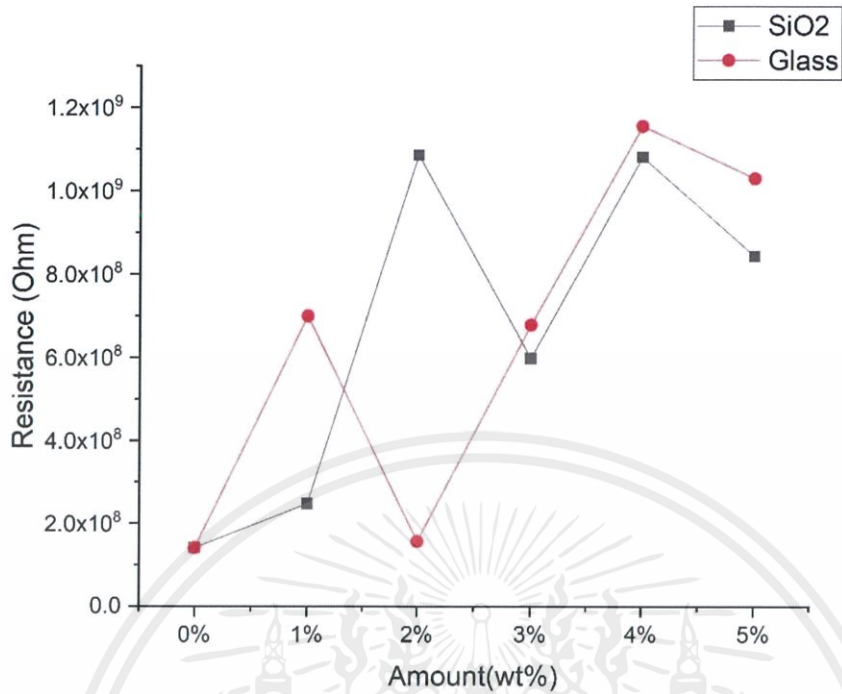


ภาพที่ 4.39 กราฟแสดงความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุพอลิไพร์เรซินที่อนุภาคผงแก้วที่ทำการบดที่ 3 ชั่วโมงเปรียบเทียบทุกสัดส่วน



ภาพที่ 4.40 กราฟแสดงความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุพอลิไพร์เรซินที่อนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ เปรียบเทียบทุกสัดส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

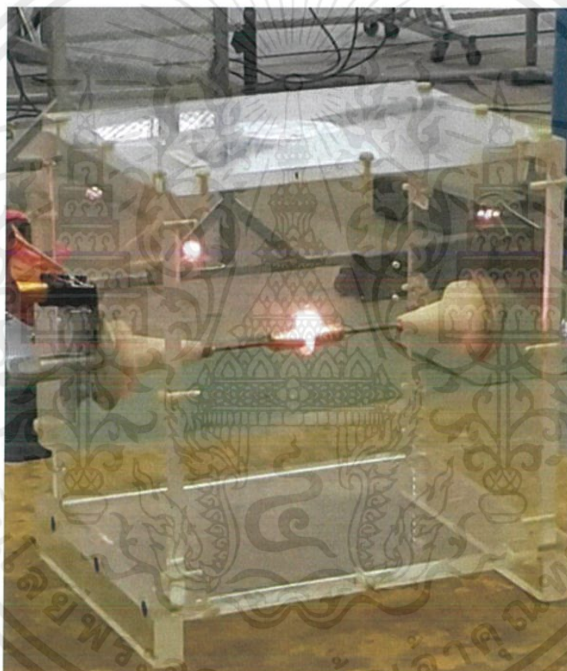


ภาพที่ 4.41 กราฟเปรียบเทียบความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุฟอกซีเรซินที่อนุภาคผงแก้วกับวัสดุฟอกซีเรซินที่อนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ ที่ความถี่ 1000 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 ค่าสภาพความคองทนทางไฟฟ้า (Electrical Breakdown)

เมื่อนำวัสดุคอมโพสิตที่มีการปรับปรุงโครงสร้างที่ผสมกับอนุภาคผงแก้วที่บดเป็นเวลา 3 ชั่วโมงและอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า ทำการวัดค่าสภาพความคองทนทางไฟฟ้า พบว่า วัสดุคอมโพสิตที่มีการปรับปรุงโครงสร้างที่ผสมกับอนุภาคผงแก้วมีค่าสภาพความคองทนทางไฟฟ้าที่ 5.0104 kV/mm และวัสดุคอมโพสิตที่มีการเจือซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้ามีค่าสภาพความคองทนทางไฟฟ้าที่ 4.9204 kV/mm ซึ่งวัสดุคอมโพสิตทั้งคู่มีค่าสภาพความคองทนทางไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกันมาก



ภาพที่ 4.42 แสดงการเกิด Breakdown

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลองและแนวทางการพัฒนา

ในบทนี้เป็นการสรุปผลการทดลองที่ได้จากการเตรียมผงแก้วจากเศษแก้วแตก ด้วยเทคนิคบดหยาบและบดย่อย (Vibratory ball milling) และการเตรียมคอมโพสิตระหว่างอีพอกซีเรซินกับผงแก้วและอีพอกซีกับซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า โดยการหล่อขึ้นรูปแบบดั้งเดิม (conventional casting) ในอัตราส่วน 0 wt%, 1 wt%, 2 wt%, 3 wt%, 4 wt% และ 5 wt% ตามลำดับ พร้อมกับข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัย โดยมีรายละเอียดดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

1.สามารถเตรียมซิลิกอนไดออกไซด์ได้จากเศษแก้วแตก โดยแก้วเป็นประเภทโซดาไลม์ ด้วยเทคนิคการบดหยาบด้วยค้อนและบดย่อย (Vibratory ball-milling) เป็นเวลา 1, 2, 3, 4 ชั่วโมง โดยซิลิกาที่เตรียมได้จากเศษแก้วแตกถูกนำไปตรวจสอบขนาดอนุภาคด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle size distribution analyzer) พบว่ามีขนาดอนุภาคที่ดีที่สุด อยู่ในช่วงการบดที่ 3 ชั่วโมงซึ่งมีค่าเฉลี่ย 232.0017 นาโนเมตร ซึ่งเป็นถือว่าอนุภาคมีขนาดใหญ่ และจากการนำอนุภาคไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าขนาดอนุภาคมีขนาดที่แตกต่างกัน แต่ก็ไม่มีจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน

2.สามารถเตรียมอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์จากเศษแก้วแตกได้ โดยผลิตจากสิ่งที่เหลือใช้แล้วและไม่เกิดประโยชน์ โดยมีขนาดอนุภาคที่สามารถใช้แทนซิลิกอนไดออกไซด์นาโนทางการค้าได้ จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค EDX และ FT-IR พบว่าซิลิกอนไดออกไซด์จากผงแก้วมีปริมาณธาตุซิลิกาอยู่ 31.10% และ ผลที่ได้ยืนยันว่าผงแก้วที่ได้มีปริมาณซิลิกา (Si) และออกซิเจน (O) เป็นองค์ประกอบที่มีอยู่จริงและมีอยู่ในปริมาณที่มาก ซึ่งสอดคล้องกับจุดประสงค์ที่จะเตรียมซิลิกอนไดออกไซด์จากแหล่งที่ทำได้ง่ายหรือมีราคาถูกและมีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์เพียงพอที่จะนำมาใช้ทดแทนอนุภาคนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้าได้ ซึ่งใกล้เคียงกับปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ในแก้วประเภทโซดาไลม์จากข้อมูลพื้นฐานและสามารถใช้ทดแทนกันได้ อีกทั้งยังสามารถลดค่าใช้จ่ายได้เป็นอย่างมาก

3. การขึ้นรูปคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์จากผงแก้วและขึ้นรูปอีพอกซีเรซินกับอนุภาคนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้าเพื่อใช้เป็นชุดควบคุม โดยมีอัตราส่วนในการขึ้นรูปคือ 0 wt% , 1wt% , 2 wt% , 3 wt% , 4 wt% และ 5 wt% โดยน้ำหนัก ผลที่ได้พบว่าคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์จากผงแก้วสามารถขึ้นรูปสม่ำเสมอในทุกอัตราส่วนและมีการกระจายตัวของอนุภาคที่ดีในอัตราส่วน 4 wt% และ 5 wt% ในส่วนของการขึ้นรูปอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้าที่อัตราส่วน 2 wt% และ 3 wt% มีบางอัตราส่วนที่ขึ้นรูปแล้วชิ้นงานไม่สม่ำเสมอ คือ อัตราส่วนที่เจืออนุภาคนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้าในปริมาณมาก คือ 4 wt% และ 5 wt% เนื่องจากขนาดของอนุภาคมีขนาดเล็ก (15-30 นาโนเมตร) เมื่อเจือในปริมาณที่มากจะทำให้อนุภาคเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนและกระจายตัวได้ไม่ดีในเมทริกซ์อีพอกซี ส่งผลให้ชิ้นงานที่หล่อมีผิวหน้าขรุขระ

4. ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุคอมโพสิตทั้งหมดมีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่ดีกว่าวัสดุอีพอกซีเรซินที่ไม่มีการเจือสารคอมโพสิตเข้าไปได้ชัดและเมื่อนำกราฟของวัสดุคอมโพสิตมาวิเคราะห์พร้อมกันทุกสัดส่วน ที่ 4 wt% มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่สูงที่สุด ทั้งสารเจืออนุภาคผงแก้วและอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า ซึ่งเมื่อเรานำกราฟของวัสดุคอมโพสิตอีพอกซีเรซินที่เจือกับอนุภาคผงแก้วบดที่ 3 ชั่วโมงกับวัสดุคอมโพสิตอีพอกซีเรซินที่เจือกับอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า มาเปรียบเทียบกับที่ความถี่ที่ 1000 Hz ซึ่งเป็นความถี่ที่มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่มีค่าสูงที่สุดทุกสัดส่วน ในสัดส่วนที่ 4 wt% มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่สูงที่สุดในทุกสัดส่วน ทั้งสารเจืออนุภาคผงแก้วและอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า

5. วัสดุคอมโพสิตที่มีการปรับปรุงโครงสร้างที่ผสมกับอนุภาคผงแก้วที่บดเป็นเวลา 3 ชั่วโมงและอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า ทำการวัดค่าสภาพความคงทนทางไฟฟ้า พบว่า วัสดุคอมโพสิตที่มีการปรับปรุงโครงสร้างที่ผสมกับอนุภาคผงแก้วมีค่าสภาพความคงทนทางไฟฟ้าที่ 5.0104 kV/mm และวัสดุคอมโพสิตที่มีการเจือซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้ามีค่าสภาพความคงทนทางไฟฟ้าที่ 4.9204 kV/mm ซึ่งวัสดุคอมโพสิตทั้งคู่มีค่าสภาพความคงทนทางไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกันมาก

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในขั้นตอนการขึ้นรูปคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์จากผงแก้วและขึ้นรูปอีพอกซีเรซินกับอนุภาคนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า ควรมีพื้นที่หน้าตัดที่กว้างประมาณจานรองแก้วขา และลดความหนาของชิ้นงานลง จะสามารถทำให้วัสดุคอมโพสิตมีความคงทนทางไฟฟ้าได้มากขึ้น

2. ในขั้นตอนการผสมคอมโพสิตอีพอกซีเรซินควรใช้เวลาในการไล่ฟองอากาศให้นานกว่านี้ เพื่อให้ฟองอากาศในชิ้นงานลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] [Online]. Available : <https://www.thoughtco.com/what-is-epoxy-resin-820372>
- [2] [Online]. Available : http://oservice.skru.ac.th/ebookft/688/chapter_2.pdf
- [3] ผศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช. 2557.วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า เล่ม 1: ฉนวนและวัสดุฉนวนไฟฟ้า. พิมพ์ครั้งที่3.กรุงเทพฯ.ห้างหุ้นส่วนจำกัด มินเซอร์วิส ซัพพลาย
- [4] [Online]. Available
http://web.eng.nu.ac.th/eng2012/ceri/nanodatabase/info2.php?cat_id=5&p_id=167
- [5] [Online]. Available :
http://www.teacher.ssru.ac.th/reudee_ni/file.php/1/CeramicTechnology/c1-glass.pdf
- [6] [Online]. Available : <https://www.mtec.or.th/academic-services/mtec-knowledge/>
- [7] [Online]. Available: file:///C:/Users/User/Downloads/289_60-72.pdf
- [8] Iyer, G., et al. "Dielectric properties of epoxy based nanocomposites for high voltage insulation." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 18.3 (2011): 659-666.
- [9] Iizuka, T., Zhou, Y., Maekawa, T., Tanaka, T., & Tatsumi, K. (2014, October). Surface analysis of epoxy nanocomposite insulator materials eroded by partial discharge. In *2014 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)* (pp. 703-706). IEEE.
- [10] Yan, W., Phung, B. T., Han, Z. J., & Ostrikov, K. (2013). Characteristics of epoxy Resin/SiO₂ nanocomposite insulation: Effects of plasma surface treatment on the nanoparticles. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 13(5), 3371-3376.
- [11] W. T. Saengchantara, S. Sriprasertsuk, P. Suwannason, S. Rugthaicharoencheep, Bulletin of Applied Sciences 5 (2016). [12] Thiemsorn, Worapong, and Puwanart Kaewthip. "Influence of soda-lime-silica cullet on the properties of porcelain mixture." (2009).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] A. Prasath, P. Elumalai, ChemistrySelect 1 (2016) 3363-3366.
- [14] H. Mori, Journal of the Ceramic Society of Japan 111 (2003) 376-381.
- [15] [Online]. Available : http://www.thaiceramicsociety.com/pc_pre_grindmore.php
- [16] [Online]. Available :
<http://www.allartcenter.com/index.php?lay=show&ac=article&Id=482737>
- [17] [Online]. Available : <http://th.eo-hi.com/grinding-machine/ball-mill-machine/energy-saving-ball-mill-machine.html>
- [18] [Online]. Available : http://www.thaiceramicsociety.com/pc_pre_grindmore.php
- [19] [Online]. Available : <http://web2.mfu.ac.th/center/stic/micro-analysis-instrument-menu/item/96-scanning-electron-microscope.html>
- [20] [Online]. Available : <http://nvwoodwerks.com>
- [21] [Online]. Available : <http://www.intertek.com/analysis/microscopy/edx/>
- [22] [Online]. Available : <https://www.iitk.ac.in/dord/energy-dispersive-spectroscopye>
- [23] [Online]. Available : <http://web2.mfu.ac.th/center/stic/micro-analysis-instrument-menu/item/113-particle-size-analyzer.html>
- [24] [Online]. Available : <http://web2.mfu.ac.th/center/stic/micro-analysis-instrument-menu/item/113-particle-size-analyzer.html>

ประวัติผู้เขียน

นายภูมิสิทธิ์ ครอบรู้ เกิดวันที่ 23 พฤษภาคม พ.ศ. 2539 ณ โรงพยาบาลน่าน อำเภอเมือง จังหวัดน่าน จบการศึกษาระดับชั้นประถมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนสารสาสน์วิเทศนิมิตรใหม่ ในปีการศึกษา 2551 จบการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนนวมินทราชินูทิศ เบญจมราชาลัย ปีการศึกษา 2557 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับอุดมศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้