

การพัฒนาผิวเคลือบนาโนคอมโพสิตจากขยะประเภทเศษแก้ว

DEVELOPMENT OF NANOCOMPOSITE COATING FROM GLASS WASTE



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF NANOCOMPOSITE COATING FROM GLASS WASTE



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2017



COPYRIGHT 2017


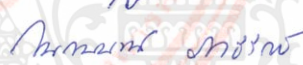

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การพัฒนาผิวเคลือบนาโนคอมโพสิตจากขยะประเภทเศษแก้ว
Special Project Title Development of Nanocomposite Coating from Glass Waste
นักศึกษา นางสาวนิตยา พันธุ์สะอาด
รหัสประจำตัว 57110026
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุนาโน
ปีการศึกษา 2560
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.วรรณวิไล วิทยากร

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.วณิชยา เมฆประสาธ	
ผศ.ดร.กนกนันท์ ภาชีรักษ์	
รศ.ดร.วรรณวิไล วิทยากร	

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



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดารินี พรหมโยธิน)
หัวหน้าภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วันที่.....15..... เดือน.....พ.ย.....พ.ศ. 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการพิเศษ	การพัฒนาผิวเคลือบนาโนคอมโพสิตจากขยะประเภทเศษแก้ว
นักศึกษา	นางสาวนิตยา พันธุ์สะอาด
รหัสประจำตัว	57110026
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุนาโน
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. วรณวิสัย วิทยากร

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) จากเศษแก้วแตกที่เป็นขยะครัวเรือนให้มีขนาดเล็กละเอียดและมีคุณภาพดีสามารถนำไปใช้งานเป็นผิวเคลือบคอมโพสิตที่มีคุณภาพสูงได้ โดยเริ่มจากการนำผงของเศษแก้วแตกมาบดให้ละเอียดด้วยเทคนิคการบดย่อยแบบสั้น จากนั้นนำไปตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยา ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค และองค์ประกอบทางเคมีของผงแก้วที่ได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเลเซอร์ เทคนิคการกระเจิงรังสีเอ็กซ์ (EDX) เครื่องฟูรีเยร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FT-IR) และเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้พบว่าผงแก้วมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 3149.1 นาโนเมตร และมีส่วนประกอบของ SiO_2 อยู่สูงถึง 66.50 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นจึงนำผงแก้วที่เตรียมได้ไปผสมกับอีพอกซีเรซินในสัดส่วนต่างๆ เพื่อให้เกิดเป็นนาโนคอมโพสิตอีพอกซีเรซิน/ผงแก้ว แล้วทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ ลักษณะโครงสร้างจุลภาค และค่าความแข็งของชิ้นงานทั้งหมด พร้อมทั้งได้ทำการเตรียมคอมโพสิตระหว่างอีพอกซีเรซินกับผงนาโนซิลิกาทางการค้าด้วยในสัดส่วนและเทคนิคเดียวกันเพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบ โดยผลที่ได้พบว่าคอมโพสิตที่สัดส่วนการเติมผงแก้วเท่ากับ 2 และ 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักให้ค่าความแข็งสูงสุด จากนั้นนำคอมโพสิตนี้ไปเตรียมเป็นผิวเคลือบโดยการเคลือบลงบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (DSS2205) แล้วนำทดสอบความสามารถในการต้านทานต่อการกัดกร่อนในน้ำเกลือ ซึ่งจากการทดลองพบว่าความสามารถในการกัดกร่อนของชิ้นโลหะที่เคลือบด้วยนาโนคอมโพสิตอีพอกซีเรซิน/ผงแก้วนั้นไม่แตกต่างจากชิ้นโลหะที่เคลือบด้วยนาโนคอมโพสิตอีพอกซีเรซิน/ผงนาโนซิลิกาทางการค้า ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการเตรียมคอมโพสิตอีพอกซีเรซินจากผงแก้วที่ได้จากเศษแก้วแตกที่เป็นขยะครัวเรือนมีคุณภาพดีเทียบเท่ากับคอมโพสิตอีพอกซีเรซินจากผงนาโนซิลิกาทางการค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Development of Nanocomposite Coating from Glass Waste
Student	Miss Nittaya Pansa-ad
Student ID	57110026
Degree	Bachelor of Engineering
Year	2017
Advisor	Assoc.Prof.Dr. Wanwilai Vittayakorn

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 high quality composite coating. 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), Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR) and X-ray fluorescence spectrometer (XRF), respectively. From the results, it can be seen that the average particle size of glass powder is 3149.1 nm and the amount of SiO₂ in glass powder is about 66.50 %. 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 hardness of all composites were investigated. Moreover, the epoxy resin/commercial nano-SiO₂ composites were also fabricated in the same ratios and same method in order to comparison. From the results, it is showed that the composites with the amount of glass powder were 2 and 3 percentage by weight exhibited the highest hardness values. Therefore, these composites have been made for surface coating on stainless steel (DSS2205) by directly pouring on the metal. After corrosion testing in NaCl, it was found that the corrosion resistance of epoxy resin/glass powder composite coating showed the same value with epoxy resin/commercial nano-SiO₂ composite coating. So, it can be assumed that SiO₂ prepared from household waste glass can be used as composite coating as good as commercial nano-SiO₂

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. วรณวิไลย วิทยากร ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะและให้ความช่วยเหลือในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ อาทิ ให้คำแนะนำในการวางแผนการตลาดและการเก็บรวบรวมข้อมูล การเรียบเรียงเนื้อหา การจัดทำรูปเล่มโครงการพิเศษรวมถึงการแก้ไขปัญหาข้อบกพร่องต่าง ๆ ตลอดจนให้ความรู้ที่นอกเหนือจากความรู้ในตำราแก่ข้าพเจ้า อีกทั้งขอขอบคุณ ผศ.ดร.วณิชยา เมฆประสาธ และ ผศ.ดร. กนกนันทน์ ภาศิริรักษ์ ประธานและกรรมการสอบหัวข้อโครงการพิเศษและโครงร่างโครงการพิเศษที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะต่างๆ และขอขอบคุณสมาชิกหน่วยงานวิจัยเชรามิกชั้นสูงทุก ๆ ท่านที่คอยให้กำลังใจรวมถึงให้คำปรึกษาแก่ข้าพเจ้าตลอดจนการศึกษาในระดับปริญญาตรีนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และสมาชิกในครอบครัวทุกท่านที่คอยส่งเสริมผลักดันและเป็นแรงบันดาลใจให้แก่ข้าพเจ้าสำเร็จการศึกษาในครั้งนี้

นิตยา พันธุ์สะอาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ii
กิตติกรรมประกาศ.....	iii
สารบัญ.....	iv
สารบัญภาพ	vi
สารบัญตาราง.....	viii
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตและแผนการดำเนินงาน.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 อีพอกซีเรซิน	6
2.1.1 สมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์	7
2.1.2 ชนิดและการเลือกใช้งาน	7
2.1.3 การเชื่อมโยงอีพอกซีเรซิน	11
2.2 การใช้งานอีพอกซีเรซินเป็นผิวเคลือบ	12
2.2.1 การใช้งานเคลือบพื้นผิว.....	12
2.2.2 การใช้งานเคลือบเฟอร์นิเจอร์และไม้	13
2.3 ซิลิกอนไดออกไซด์	14
2.3.1 ลักษณะสมบัติเฉพาะทั่วไป.....	14
2.3.2 ซิลิกอนไดออกไซด์ในแก้วและขวดแก้ว.....	16
2.3.3 การเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิต.....	19
2.4 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22
2.5 เทคนิคที่ใช้ในการเตรียมสาร	25
2.5.1 เทคนิคการบดย่อยด้วยลูกบอล.....	25
2.5.2 เทคนิคการหล่อแบบดั้งเดิม	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สาร.....	30
2.6.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	30
2.6.2 เครื่องวิเคราะห์หาธาตุต่าง ๆ.....	31
2.6.3 เครื่องวัดการกระจายตัวของอนุภาค.....	32
2.6.4 เครื่องวิเคราะห์ด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์	34
2.6.5 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุในโมเลกุล	39
2.6.6 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	40
2.6.7 เครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์.....	41
2.6.8 การทดสอบการต้านทานต่อการกัดกร่อนของโลหะ	42
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	45
3.1 สารเคมีที่ใช้.....	45
3.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้.....	45
3.3 กระบวนการบดหยาบและบดย่อยเศษแก้ว.....	48
3.4 กระบวนการเตรียมอีพอกซีเรซิน	52
3.5 การเตรียมผิวเคลือบคอมโพสิตอีพอกซี/ผงแก้ว	55
3.6 การตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	57
3.7 การตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ	58
3.8 การตรวจสอบวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุในโมเลกุล.....	59
3.9 การตรวจสอบขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค.....	60
3.10 การตรวจสอบความแข็งแบบวิกเกอร์	61
3.11 การตรวจสอบการต้านทานต่อการกัดกร่อนของผิวเคลือบคอมโพสิต.....	63
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	
4.1 ผลการตรวจสอบผงแก้ว.....	64
4.1.1 สมบัติทางกายภาพและขนาดอนุภาคของผงแก้ว	64
4.1.2 ลักษณะโครงสร้างจุลภาค	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.3 ขนาดและการกระจายตัว	66
4.1.4 องค์ประกอบของธาตุและสารประกอบของผงแก้ว	67
4.2 ผลการตรวจสอบคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับผงแก้ว	72
4.2.1 ลักษณะและสมบัติทางกายภาพ	72
4.2.2 โครงสร้างจุลภาคของคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับผงแก้ว	74
4.2.3 สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับผงแก้ว.....	76
4.3 ผลการตรวจสอบคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า.....	77
4.3.1 ลักษณะและสมบัติทางกายภาพ	77
4.3.2 โครงสร้างจุลภาคของคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์	79
4.3.3 สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์.....	82
4.4 ผลการตรวจสอบผิวเคลือบคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับผงแก้ว.....	83
4.5 ผลการตรวจสอบผิวเคลือบคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์	84
4.6 การตรวจสอบความต้านทานต่อการกัดกร่อน	85
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง	87
5.2 ข้อเสนอแนะ	88
บรรณานุกรม.....	89
ประวัติผู้เขียน.....	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 โครงสร้างหม้อไพอกไซด์	6
2.2 ปฏิกริยาการสังเคราะห์ (DGEBA)	8
2.3 โครงสร้างของกลีซีดีวเอสเทอร์เรซิน.....	9
2.4 โครงสร้างของกลีซีดีวเอมีนเรซิน	9
2.5 โครงสร้างของกลีซีดีวเอสเทอร์โนวาแลกเรซิน.....	10
2.6 โครงสร้างของโบรมิเนเตดเรซิน.....	10
2.7 การเคลือบพื้นผิวด้วยอีพอกซีเรซิน	13
2.8 การเคลือบเฟอร์นิเจอร์ไม้ด้วยอีพอกซีเรซิน.....	13
2.9 การใช้งานวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์เป็นส่วนประกอบรถยนต์.....	20
2.10 รอยกดของการวัดค่าความแข็ง	22
2.11 พื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม.....	23
2.12 กราฟโพเทิลเซียลไดนามิกของเหล็กกล้าไร้สนิม	23
2.13 การถูกกัดกร่อนของโลหะอ่อน.....	24
2.14 การตกกระทบของเม็ดบอลในกระบวนการบดย่อย.....	25
2.15 เครื่องบดบอลมิลล์แบบแบชมิลล์	26
2.16 เครื่องบดแบบพับเปิดมิลล์	28
2.17 การหล่อเรซิน	29
2.18 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	31
2.19 เครื่องหาปริมาณธาตุ.....	32
2.20 เครื่องวัดการกระจายตัวของอนุภาค	33
2.21 ชั้นของอิเล็กตรอนในวงโคจร	34
2.22 การหลุดของอิเล็กตรอน	35
2.23 รังสีเอกซ์จำเพาะจากการเปลี่ยนชั้นของอิเล็กตรอน	36
2.24 สัญลักษณ์รังสีเอกซ์จำเพาะจากการเปลี่ยนชั้นของอิเล็กตรอน.....	36
2.25 การต่ออุปกรณ์ของเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์.....	38
2.26 ส่วนประกอบและลำดับการทำงานของเครื่องตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุ.....	49
2.27 การตกกระทบของรังสีเอกซ์	40
2.28 หัวกดความแข็งแบบวิกเกอร์.....	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.29 เซลล์เคมีไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบการกัดกร่อน.....	43
3.1 แผนผังการเตรียมอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์จากเศษแก้ว.....	46
3.2 แผนผังการเตรียมอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า.....	47
3.3 เศษแก้วที่ผ่านการบดหยาบ.....	48
3.4 เครื่องบดย่อยด้วยลูกบอลในแนวตั้ง.....	49
3.5 การเตรียมผงแก้วเพื่อนำไปบดย่อย.....	49
3.6 การแยกสารที่ต้องการออกจากขวดและลูกบด.....	50
3.7 ตู้อบสาร.....	50
3.8 ตู้ดูดความชื้น.....	51
3.9 ลักษณะของผงแก้วหลังผ่านกระบวนการบดย่อย.....	51
3.11 ขั้นตอนการขึ้นรูปด้วยเทคนิคการหล่อแบบดั้งเดิม.....	54
3.12 ชั้นโลหะขนาด 2x2 เซนติเมตร.....	55
3.13 การทำความสะอาดผิวหน้าโลหะด้วยกระดาษทราย.....	56
3.14 การเคลือบผิวโลหะด้วยคอมโพสิตอีพอกซีกับเฟสเสริมแรง.....	56
3.15 เครื่องสปีดเตอร์ริง.....	57
3.16 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	58
3.17 เครื่อง EDX.....	59
3.18 เครื่อง FT-IR.....	60
3.19 เครื่องตรวจสอบขนาดอนุภาค.....	61
3.20 เครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์.....	62
3.21 การแช่โลหะในน้ำเกลือ.....	63
3.22 การตรวจสอบการต้านทานต่อการกัดกร่อน.....	63
4.1 ผงแก้ว.....	64
4.2 อนุภาคนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า.....	65
4.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผงแก้ว.....	65
4.4 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของอนุภาคนาโนซิลิกอนไดออกไซด์.....	66
4.5 กราฟแสดงขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงแก้ว.....	67
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนและการสั่นของพันธะในผงแก้ว.....	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนและการสั่นของพันธะในซิลิกอนไดออกไซด์.....	68
4.8 แสดงชนิดและปริมาณของธาตุที่พบในผงแก้ว.....	69
4.9 กราฟแสดงปริมาณของธาตุต่างๆที่พบในผงแก้ว.....	71
4.10 กราฟแสดงปริมาณของสารประกอบที่พบในผงแก้ว.....	71
4.11 ลักษณะผิวหน้าของคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับผงแก้ว.....	72
4.12 ลักษณะผิวด้านข้างของคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับผงแก้ว.....	72
4.13 โครงสร้างจุลภาคผิวหน้าและผิวดัดขวางของคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับผงแก้ว.....	74
4.14 รอยกดบนคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับผงแก้ว.....	76
4.15 ลักษณะผิวหน้าของคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า.....	78
4.16 ลักษณะผิวข้างของคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า.....	78
4.17 โครงสร้างจุลภาคผิวหน้าและผิวดัดขวางของคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับซิลิกา.....	80
4.18 รอยกดบนคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า.....	82
4.19 ผิวเคลือบคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับผงแก้ว.....	84
4.20 ผิวเคลือบคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า.....	84
4.21 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันที่ให้กับโลหะที่เคลือบด้วยอีพอกซีคอมโพสิตกับเฟสเสริมแรงในอัตราส่วน 2 wt.% โดยน้ำหนัก.....	85
4.22 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันที่ให้กับโลหะที่เคลือบด้วยอีพอกซีคอมโพสิตกับเฟสเสริมแรงในอัตราส่วน 3 wt.% โดยน้ำหนัก.....	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ **ix** ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ระยะเวลาการย่อยสลายของขยะ.....	2
1.2 แผนการวิจัย.....	5
2.1 อัตราส่วนโดยโมลของสารตั้งต้นต่อน้ำหนักโมเลกุลของอีพอกซีเรซิน.....	8
2.2 ลักษณะและสมบัติโดยทั่วไปของซิลิกอนไดออกไซด์.....	15
2.3 การเปรียบเทียบปริมาณซิลิกาในแก้ว.....	21
2.4 พลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในแต่ละชั้น.....	35
2.5 แอ็บซอร์บชันแอนด์พลังงานของรังสีเอกซ์จำเพาะ.....	37
4.1 ตารางแสดงชนิดและปริมาณธาตุที่พบในแก้ว.....	70
4.2 ตารางแสดงสมบัติทางกายภาพของอีพอกซีเรซินกับผงแก้ว.....	73
4.3 ตารางแสดงค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ของผงแก้ว.....	77
4.4 ตารางแสดงสมบัติทางกายภาพของอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์.....	79
4.5 ตารางแสดงค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ของซิลิกอนไดออกไซด์.....	83
4.6 ตารางแสดงค่า Break down potential (E_b).....	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันวัสดุคอมโพสิตมีการใช้งานอย่างแพร่หลายมากยิ่งขึ้น เนื่องด้วยเป็นวัสดุทางเลือกที่สามารถเลือกวัสดุหลักและวัสดุเสริมแรงได้ทำให้ตอบสนองต่อการใช้งานในแต่ละด้านมากยิ่งขึ้น อาจใช้วัสดุหลักเป็นวัสดุที่สังเคราะห์ขึ้นและวัสดุเสริมแรงเป็นวัสดุจากธรรมชาติหรือใช้วัสดุหลักและวัสดุเสริมแรงที่สังเคราะห์ขึ้นก็ได้ ดังกล่าวมานี้นำไปสู่การใช้งานในแต่ละด้านตามความต้องการและความเหมาะสม ในงานวิจัยนี้ให้ความสำคัญไปที่อีพอกซีเรซินซึ่งเป็นโคพอลิเมอร์และจัดอยู่ในกลุ่มเทอร์โมเซตติง พอลิเมอร์ (Thermosetting Polymer) เกิดจากสารเคมีสองส่วน คือ บิสฟีนอลเอ และอีพิกลอร์ไฮดริน (Biphenol A and Epichlorohydrin) ทำปฏิกิริยากันและเกิดการร่างแห (cross link) ซึ่งมีลักษณะทางกายภาพเป็นของแข็ง ใส ไม่มีสีและมีความเสถียรทางเคมีและไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจึงนิยมนำไปใช้งานในด้านต่าง ๆ มากมาย อาทิ งานด้านบรรจุภัณฑ์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ชิ้นส่วนอุปกรณ์ทางการแพทย์ ชิ้นส่วนรถ / เรือและงานด้านผิวเคลือบ ซึ่งเห็นและพบมากในการนำอีพอกซีเรซินมาใช้งานคืองานด้านผิวเคลือบต่าง ๆ เนื่องจากสามารถช่วยในเรื่องการต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดี ทั้งนี้อีพอกซีเรซินมีข้อเด่นหลากหลายข้อดังกล่าวมาแต่ก็มีข้อด้อยคือมีความแข็งแรงต่ำทำให้อายุการใช้งานถูกลดลงไปด้วยและอาจมีประสิทธิภาพไม่ดีเท่าที่ควร จึงมีงานวิจัยจำนวนมากที่พยายามคิดค้นวิธีปรับปรุงสมบัติของอีพอกซีเรซินให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งวิธีหนึ่งที่พบเห็นได้บ่อยและมีประสิทธิภาพสูงสุดคือการเจืออนุภาคขนาดเล็กระดับนาโนเมตร เช่น ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ฯลฯ ลงไปในอีพอกซีเรซินเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งจากตัวอย่างงานวิจัยที่ศึกษาพบว่าเมื่อทำการเพิ่มประสิทธิภาพวัสดุคอมโพสิต โดยมีอีพอกซีเรซินเป็นวัสดุหลักและซิลิกอนไดออกไซด์เป็นวัสดุเสริมแรงแล้วพบว่าคอมโพสิตที่ได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น และสามารถนำไปใช้งานด้านเคลือบผิวโลหะหรืองานด้านทะเลและชายฝั่งได้ เนื่องจากสิ่งแวดล้อมในทะเลนั้นมีไอของเกลือหรือความเป็นกรดทำให้โลหะเกิดสนิมและเกิดการกัดกร่อนของคลอไรด์ได้ง่าย ส่งผลให้วัสดุเกิดความเสียหายซึ่งอาจนำไปสู่ความเสียหายในระยะยาว โดยทั่วไปอนุภาคนาโนที่นิยมใช้มีหลากหลายดังที่กล่าวไป ได้แก่ ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ฯลฯ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะได้มุ่งความสนใจไปที่การเลือกใช้ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เนื่องจากสามารถเสริมความแข็งแรงได้อย่างมีประสิทธิภาพอีกทั้งซิลิกอนไดออกไซด์ยังเป็นส่วนประกอบของแก้ว ซึ่งสามารถพบได้จากหลายแหล่งมีทั้งที่สังเคราะห์ขึ้นและที่ใช้ทางการค้าหรือจากแหล่งที่พบในธรรมชาติ เช่น ขวดแก้ว (bottles) และทราย (sand) ทั้งนี้ซิลิกอนไดออกไซด์ในทางการค้านั้นมีราคาแพงหากเทียบในหน่วยกิโลกรัมมีเอกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ราคา 12,000 บาท ต่อ 50 กรัม ซึ่งด้วยราคาที่สูงอาจไม่คุ้มค่าหากนำไปใช้ในเชิงอุตสาหกรรม ดังนั้นจึงพยายามแก้ไขปัญหานี้โดยมองหาตัวเสริมแรงที่มีราคาถูกลงและสกัดขึ้นมาได้จากขยะเหลือใช้ จึงเห็นประโยชน์ของขวดแก้ว ประกอบกับในปัจจุบันปัญหาขยะเป็นปัญหาอันดับต้น ๆ ที่ต้องเร่งจัดการและแก้ไขเนื่องด้วยประชากรเพิ่มจำนวนมากขึ้น ทำให้มีการใช้ทรัพยากรเพิ่มขึ้นและเกิดเป็นของเสียหรือขยะเพิ่มขึ้น ซึ่งทุกวันนี้คนไทยกว่า 75 ล้านคน สามารถสร้างขยะได้มากถึง 14 ล้านตันต่อปีแต่ความสามารถในการจัดเก็บขยะกลับมีไม่ถึง 70 % ของขยะที่เกิดขึ้น จึงทำให้เกิดปริมาณมูลฝอยตกค้างตามสถานที่ต่าง ๆ หรือมีการนำไปกำจัดโดยวิธีกองบนพื้นซึ่งไม่ถูกต้องตามหลักสุขาภิบาลก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมขยะที่เราพบ ได้แก่ ขยะมูลฝอย สามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ (1) ขยะหรือของเสียแบ่งเป็น มูลฝอยธรรมดาทั่วไป ได้แก่ มูลฝอยสด เศษอาหาร กระดาษ โฟม พลาสติก ขวดแก้ว โลหะ ฯลฯ และ (2) ขยะหรือของเสียอันตราย ได้แก่ มูลฝอยติดเชื้อจากโรงพยาบาล กากสารเคมี สารเคมีกำจัดแมลง กากน้ำมัน หลอดฟลูออเรสเซนต์ เป็นต้น โดยระยะเวลาในการย่อยสลายของขยะแต่ละประเภทได้แสดงไว้ในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาที่ขยะแต่ละชนิดย่อยสลายตามธรรมชาติ

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

จากตารางที่ 1.1 จะเห็นว่าแก้วไม่ย่อยสลายได้ ดังนั้นแก้วจึงควรเป็นวัสดุที่ถูกนำกลับมาใช้ใหม่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งจากข้อมูลตรงนี้จึงทำให้เกิดแนวคิดที่จะนำเศษแก้วมาใช้เป็นเฟสเสริมแรงในอีพอกซีเรซิน โดยการนำเศษแก้วมาเป็นแหล่งสังเคราะห์อนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) โดยประเภทของขวดแก้วที่เลือกใช้เป็น “Commercial glass” หรือ “Sodalime” ซึ่งแก้วชนิดนี้เป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แก้วพบเห็นและใช้งานอยู่เป็นประจำในชีวิตประจำวัน เช่น ขวดแก้ว (bottles) แก้วน้ำ (drinking glasses) แผ่นกระจกที่ใช้ทำหน้าต่าง (flat glass for window) และเหยือกน้ำ (jars) โดยแก้วชนิดนี้มีส่วนประกอบหลักเป็นทราย (sand) โดยเป็นการนำทรายมาหลอมด้วยความร้อนสูงประมาณ 1,700 องศาเซลเซียสเพื่อผลิตเป็นแก้ว โดยแก้วบางชนิดมีการใส่สารเคมีหรือแร่ธาตุบางอย่างเข้าไปจะทำให้ทรายมีจุดหลอมเหลว (melting point) ที่ต่ำลง ตัวอย่าง เช่น การผลิตแก้วโซดาไลม์ (sodalime glass) จะมีการเติมโซดาแอชหรือโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ลงไป ซึ่งจะทำให้เกิดส่วนผสมของซิลิกา (silica (SiO_2)) ประมาณ 75% และโซเดียมออกไซด์ (sodium oxide (Na_2O)) ประมาณ 25% นอกจากนี้อาจมีการเติมหินปูน (limestone) ซึ่งจะมีส่วนประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide (CaO)) และแมกนีเซียมออกไซด์ (magnesium oxide (MgO)) ลงไปเพื่อให้แก้วมีความคงตัว ซึ่งโดยทั่วไปสามารถสรุปปริมาณของส่วนประกอบต่าง ๆ ของแก้วทางการค้าได้ ดังนี้

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%

ด้วยเหตุนี้เองงานวิจัยนี้จึงได้มุ่งความสนใจไปที่การศึกษาและพัฒนาคอมโพสิตระหว่างอีพอกซีเรซินกับซิลิกาที่สกัดได้จากเศษแก้วแตก สำหรับใช้งานเป็นผิวเคลือบที่มีความแข็งแรงทนทานสูง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อเตรียมอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) จากเศษแก้วหรือแก้วแตกที่เป็นขยะครัวเรือนให้มีอนุภาคขนาดเล็ก

1.2.2 เพื่อเตรียมคอมโพสิตระหว่างอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยซิลิกาจากผงแก้วสำหรับใช้งานเป็นผิวเคลือบที่มีความแข็งแรงทนทาน

1.2.3 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนองค์ประกอบ โครงสร้างและสมบัติของคอมโพสิตระหว่างอีพอกซีเรซินกับซิลิกาที่สกัดจากผงแก้ว

1.2.4 เพื่อลดค่าใช้จ่ายและเพิ่มมูลค่าให้กับขยะประเภทเศษแก้วในเชิงอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตและแผนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยจะทำการสกัดซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) จากผงแก้วเหลือทิ้งที่เป็นขยะครัวเรือนให้มีคุณภาพสูงและมีอนุภาคขนาดเล็ก จากนั้นทำการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตระหว่างอีพอกซีเรซิน (matrix) กับซิลิกอนไดออกไซด์จากเศษแก้ว (filler) ด้วยเทคนิคการหล่อแบบดั้งเดิม (conventional casting) โดยทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของคอมโพสิตเป็น 1 wt. % 2 wt. % 3 wt. % 4 wt. % และ 5 wt. % ตามลำดับจากนั้นทำการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และตรวจสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทั้งหมด ได้แก่ ความแข็งโดยในขั้นตอนนี้ได้ทำการเตรียมคอมโพสิตระหว่างอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ในทางการค้าควบคู่ไปด้วยในทุก ๆ อัตราส่วนเพื่อที่จะใช้เป็นชุดควบคุม จากนั้นในส่วนสุดท้ายจะเลือกวัสดุประกอบที่เหมาะสมไปขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางบนแผ่นโลหะเพื่อทำการทดสอบความแข็งแรงและความต้านทานต่อการกัดกร่อนต่อไป โดยแผนการวิจัยทั้งหมดสามารถแสดงในตารางที่

1.2



ตารางที่ 1.2 แผนการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลาในการทำวิจัย									
	ปี 2560					ปี 2561				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
ศึกษางานวิจัยขั้นตอนและเทคนิคในการขึ้นรูปเรซิน	➔									
ขึ้นรูปเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์นาโนพาวเดอร์ที่อัตราส่วน 0 - 5 wt. %	➔	➔								
เตรียมผงซิลิกาจากขวดแก้ว ด้วยวิธีการบดหยาบและบดย่อย จากนั้นนำไปวัดขนาดอนุภาค		➔	➔							
ขึ้นรูปเรซินกับ ผงแก้วที่อัตราส่วน 1 - 5 wt. %			➔	➔						
นำชิ้นงานที่ได้วัดสมบัติต่างๆ วิเคราะห์และบันทึกผลข้อมูลที่ได้				➔	➔					
เขียนรายงานผล และจัดทำรูปเล่มบทที่ 1-3					➔	➔				
เลือกอัตราส่วนที่ดีที่สุด นำไปขึ้นรูปเป็นฟิล์มเคลือบบนผิวโลหะและตรวจสอบสมบัติด้วยเทคนิคต่างๆ						➔	➔			
วิเคราะห์ผลและบันทึกข้อมูลที่ได้จัดทำรูปเล่ม								➔	➔	➔

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

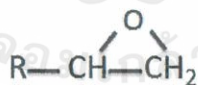
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุคอมโพสิตระหว่างอีพอกซีเรซินและซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) รวมทั้งขั้นตอนและกระบวนการในการขึ้นรูปเป็นเม็ดและอัตราส่วนน้ำหนักของซิลิกอนไดออกไซด์ที่ได้ทำการเปลี่ยนแปลงรวมไปถึงทฤษฎีการตรวจวัดสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 อีพอกซีเรซิน (Epoxy Resin)

อีพอกซีเรซินจัดเป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซตที่มีสมบัติเด่นทางด้านความแข็งแรงและการทนต่อการคืบตัว ซึ่งเมื่อผ่านกระบวนการเชื่อมโยงโมเลกุลหรือการบ่ม (curing) แล้วไม่สามารถเปลี่ยนแปลงกลับไปเดิมได้ กล่าวคือ เรซินถูกทำให้แข็งจนไม่สามารถหลอมเหลวใหม่ได้ถึงแม้จะเพิ่มอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องเรซินก็ไม่สามารถอ่อนตัวได้อีกการเปลี่ยนแปลงนี้เกิดขึ้นเนื่องจากพอลิเมอร์เกิดเป็นโครงร่างแบบถาวรโดยทั่วไปแล้วการบ่มนี้ทำได้โดยอาศัยความร้อนและความดัน แต่เรซินบางกลุ่มก็สามารถบ่มที่อุณหภูมิห้องได้โดยไม่ต้องใช้ความดัน การเกิดโครงสร้างที่เป็นร่างแหของเทอร์โมเซตนี้ทำให้โมเลกุลเคลื่อนไหวได้น้อยหรือไม่สามารถเคลื่อนไหวได้จึงให้สมบัติที่ดีในเรื่องความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง การไม่ละลายในตัวทำละลาย ความทนทานต่อความร้อน สารเคมีและการคืบตัวอีพอกซีเรซินเกิดจากการทำปฏิกิริยาของสารตั้งต้น ซึ่งเป็นสารจำพวกอีพอกไซด์และที่มีหมู่อีพอกไซด์อยู่ในโซ่พอลิเมอร์ก่อนเกิดการเชื่อมโยง หมู่อีพอกไซด์อาจจะอยู่ในรูปของออกซิแรน (oxirane) หรือหมู่ออกซิไลน์ (thoxyline) แสดงดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของหมู่อีพอกไซด์

ดังนั้นอาจให้คำนิยามของอีพอกซีเรซินว่าเป็นพอลิเมอร์ เชื่อมโยงโดยการเชื่อมโยงเกิดจากปฏิกิริยาของหมู่อีพอกซีเรซินกับสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงซึ่งมีด้วยกันหลายประเภท ได้แก่ พอลิเอมีน พอลิเอไมด์ พอลิซิลิเฟต กรดหรือแอซิดแอนไฮไดรด์ทำให้ได้เรซินที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่าง ๆ กัน ซึ่งมีลักษณะที่เป็นโครงร่างตาข่ายสามมิติ (3D-network) โดยปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ของอีพอกซีจะเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการขึ้นรูปทำให้น้ำหนักโมเลกุลของผลิตภัณฑ์สูงขึ้นและโครงสร้างของผลิตภัณฑ์มีลักษณะเป็นโครงร่างตาข่ายเริ่มจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอีพอกซีเรซินซึ่งเป็นของเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสารเชื่อมโยง (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

อีพอกซีเรซินส่วนใหญ่ใช้เป็นวัสดุในการเคลือบผิว เพราะมีสมบัติเหนียวยืดหยุ่นได้ดีและมีความสามารถในการยึดเหนี่ยวหรือเกาะติดกับวัสดุทั่วไปเป็นอย่างดี และยังไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาการใช้ประโยชน์อื่น ๆ ของอีพอกซีเรซิน ได้แก่ ใช้เป็นกาว ซ่อมแซมอุปกรณ์ต่าง ๆ ใช้เคลือบอุปกรณ์ในโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อป้องกันการผุกร่อน ใช้ในงานเคลือบผิวของอุปกรณ์ภายในบ้านเรือนและท่อเก็บแก๊ส ใช้ในการเชื่อมส่วนประกอบโลหะแก้วและเซรามิก ใช้ในการหล่ออุปกรณ์ที่ทำจากโลหะและเคลือบอุปกรณ์ ใช้ใส่ในส่วนประกอบของอุปกรณ์ไฟฟ้า เส้นใยของท่อและท่อความดัน ใช้เคลือบผิวของพื้นและผนัง ใช้เป็นวัสดุของแผ่นกำบังนิวตรอน ซีเมนต์และปูนขาว ใช้เคลือบผิวถนนเพื่อกันลื่น ใช้ทำโฟมแข็ง และใช้เป็นสารในการทำสีของแก้ว เป็นต้น

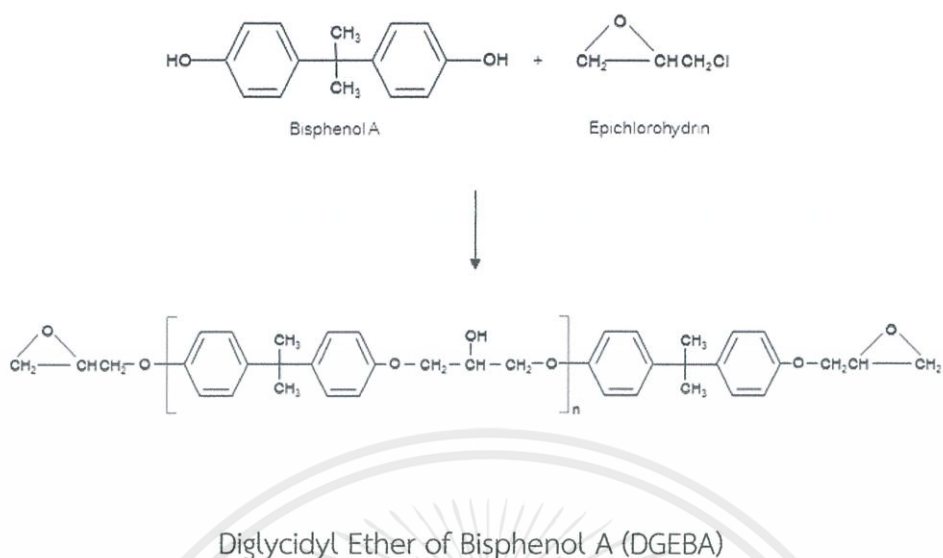
2.1.2 ชนิดและการเลือกใช้อีพอกซีเรซิน

โดยทั่วไปสามารถแบ่งชนิดของอีพอกซีเรซินได้เป็น 6 ชนิด คือ ไบฟีนอลเบสเรซิน (Bisphenol A based resin) กลีซิดิวเอสเทอร์เรซิน (Glycidyl ester resin) กลีซิดิวเอมีนเรซิน (Glycidyl amin resin) กลีซิดิวอีเทอร์โนวาแลกเรซิน (Glycidyl ethers of novolac resin) โบรมิเนตเตดเรซิน (Brominated resin) และเรซินชนิดอื่น ๆ (Other resin)

-ไบฟีนอลเอเบสเรซิน (Bisphenol A based resin)

Bisphenol A base resin หรือ Diglycidyl Ether of Bisphenol A (DGEBA) มีปฏิกิริยาการสังเคราะห์ เป็นตัวอย่างของอีพอกซีเรซินทางการค้าซึ่งสามารถสังเคราะห์โดยการทำปฏิกิริยาของ Bisphenol A กับ epichlorohydrin ร่วมกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.2 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์หรือ Diglycidyl Ether of Bisphenol A (DGEBA)

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

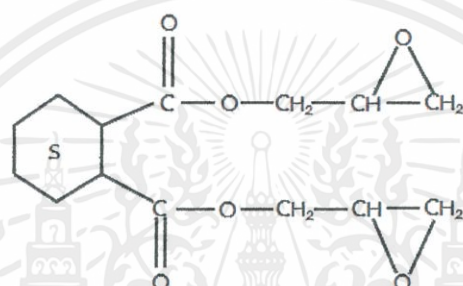
ตารางที่ 2.1 ผลของอัตราส่วนโดยโมลสารตั้งต้นที่มีต่อน้ำหนักโมเลกุลของอีพอกซีเรซิน

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

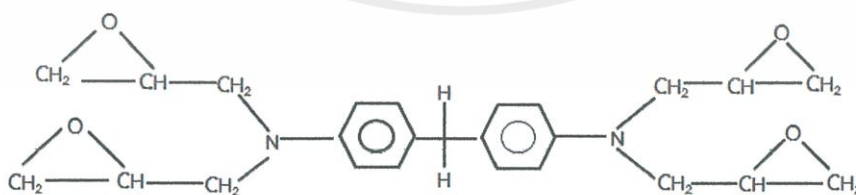
สถานะของพอลิเมอร์ขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยต่ำพอลิเมอร์มีสถานะเป็นของเหลวหนืด และถ้ามีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยสูงจะเป็นของแข็งเพราะมีจุดหลอมเหลวสูง อีพอกซีเรซินมีหลายชนิดยกตัวอย่างดังต่อไปนี้

- กลีซิดิวเอสเทอร์เรซิน (Glycidyl ester resin) สามารถสังเคราะห์โดยการทำปฏิกิริยาของ bisphenol A กับ diacid อีพอกซีเรซินชนิดนี้ใช้กับงานพันมอเตอร์ (High Voltage electrical insulator) ใช้เตรียมลามีเนตสำหรับชิ้นงานที่ต้องบ่มที่อุณหภูมิสูงถ้าต้องการทำลามีเนตต้องใช้ร่วมกับสารเชื่อมโยงประเภทแอนไฮไดรด์



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของกลีซิดิวเอสเทอร์เรซิน

- กลีซิดิวเอมีนเรซิน (Glycidyl amine resin) กลีซิดิวเอมีนเรซินสามารถสังเคราะห์โดยทำปฏิกิริยากับ bisphenol กับ amine อีพอกซีเรซินชนิดนี้เหมาะสมกับการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะทนความร้อนและทนต่อรังสีนิวเคลียร์

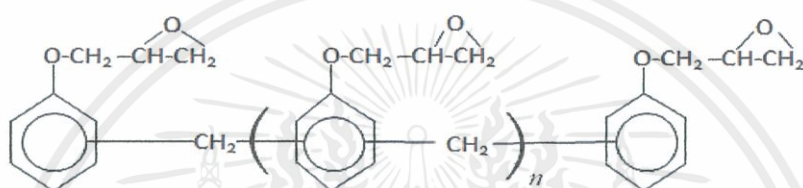


ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของกลีซิดิวเอมีนเรซิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กลีซิดิวีเทอร์โนวาแลก (Glycidyl esters of novalac resin)

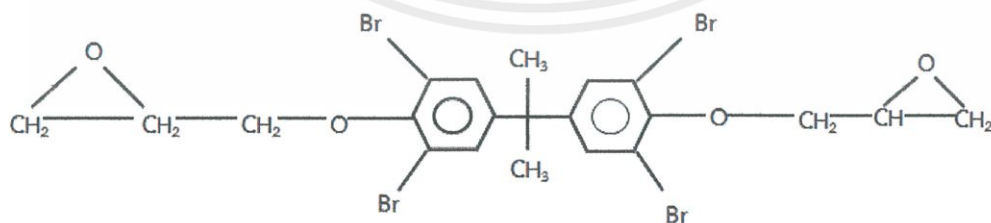
กลีซิดิวีเทอร์โนวาแลกเรซิน (Glycidyl ethers of novalac resin) เป็นอีพอกซีเรซินที่เตรียมจากโนวาแลก ซึ่งโนวาแลกได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างฟีนอลและแอลดีไฮด์ โดยมีอัตราส่วน 1 : 2 : 1 ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นที่เปกรด กลีซิดิวีเทอร์โนวาแลกเรซินสามารถสังเคราะห์โดยการทำปฏิกิริยาของโนวาแลกกับอีพิคลอโรไฮดริน (Epichlorohydrin) อีพอกซีเรซินชนิดนี้เหมาะกับการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ทนต่อสารเคมี (chemical resistance) และทำแผงคอมพิวเตอรืโดยสารเชื่อมโยงที่ใช้คืออะโรมาติกไดเอมีน (Aromatic diamine) ตัวเร่งปฏิกิริยาคือสารเชิงซ้อนโบรอนไตรฟลูออไรด์



ภาพที่ 2.5 โครงสร้างของกลีซิดิวีเทอร์โนวาแลกเรซิน

- โบรมิเนตเตดเรซิน (Brominated resin)

โบรมิเนตเตดเรซิน (Brominated resin) เป็นอีพอกซีเรซินที่มีโบรมีนประกอบอยู่ในโครงสร้างด้วย สารเชื่อมโยง (curing agent) คือ ไดไซยาไมด์เอมีน (dicyandiamide) ใช้กับงานที่ทนไฟ งานเหล็ก ใช้เป็นแผงวงจรไฟฟ้า



ภาพที่ 2.6 โครงสร้างของโบรมิเนตเตดเรซิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรซินชนิดอื่น ๆ ส่วนใหญ่เป็นเรซินที่สังเคราะห์เพื่อใช้งานในเฉพาะด้าน เช่น ใช้งานเกี่ยวข้องกับอวกาศ (Aerospace application)

2.1.3 การเชื่อมโยงอีพอกซีเรซิน (Curing of Epoxy Resins) [2]

กระบวนการเชื่อมโยงปฏิกิริยาเคมีระหว่างหมู่อีพอกไซด์ในอีพอกซีเรซินกับสารเชื่อมโยงหรือฮาร์ดเนอร์ (hardener) จะเกิดการเชื่อมโยงพันธะเป็นโครงร่างตาข่าย 3 มิติ อีพอกซีเรซินจะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวหนืดกลายเป็นของแข็งและไม่สามารถหลอมเหลวได้ จึงกลายเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง ฉะนั้นจึงต้องเชื่อมโยงอีพอกซีเรซินกับฮาร์ดเนอร์โดยปกติทั่วไปจะสามารถเชื่อมโยงได้รวดเร็วและง่ายที่อุณหภูมิต่าง ๆ ตั้งแต่ 5 - 150 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับฮาร์ดเนอร์ที่ใช้การเลือกใช้สารเชื่อมโยงในอีพอกซีเรซินขึ้นอยู่กับกระบวนการของอีพอกซีเรซินที่ต้องการ ซึ่งที่นิยมใช้ทั่วไปได้แก่ amine polyaminds phenolic resin anhydrides isocyanates และ polymercaptans จลศาสตร์ของปฏิกิริยาการเชื่อมโยงและค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของระบบขึ้นอยู่กับโครงสร้างโมเลกุลของสารเชื่อมโยง การเลือกอีพอกซีเรซินและสารเชื่อมโยงขึ้นอยู่กับนำไปใช้งาน 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 หากใช้ในปริมาณที่เหมาะสมและความร้อนสม่ำเสมอจะส่งผลดีต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ ยกตัวอย่างเช่น

- เอทิลีนไดเอมีน (Ethylene diamine, EDA) นำไปผสมกับอีพอกซีเรซินทำให้เกิดการแข็งตัวได้เนื่องจากกลิ่นฉุนจึงถูกนำมาใช้งานน้อยใช้กับงานทากาว

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

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

- 4,4 ไดอะมีโนไดฟีนิลซัลโฟน (4,4-Diaminodiphenyl sulphone, DDS) ใช้ร่วมกับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารประกอบโบรอนไตรฟลูออไรด์ (Boron trifluoride complex) ซึ่งใช้อุณหภูมิ 130-140 องศาเซลเซียสแล้วจึงเติม DDS ลงไปและคนให้เข้ากัน ถ้าต้องเตรียม prepreg ต้องนำเรซินไปละลายพร้อมกับ 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 Trimellitic anhydride จุดหลอมเหลว 160 องศาเซลเซียส สามารถละลายได้ในเรซิน 125 องศาเซลเซียส ใช้ทำผลิตภัณฑ์ที่ทนต่ออุณหภูมิสูงเช่น powder coating และงาน prepreg ตัวอย่างของตัวเร่งที่ใช้กับสารเชื่อมโยงประเภทนี้ได้แก่ Benzyl dimethylamine (BDMA) N-Buthylimidazole (BLDZ)

ค. สารเชื่อมโยงประเภทพอลิเอไมด์ (Polyamine curing agent)

เป็นพอลิเอไมด์ที่เตรียมจากไดคาร์บอกซิลิกกับไดเอมีน ซึ่งเป็นพวกอะลิฟาติกได้เป็นพอลิเอไมด์ เช่น บริษัท Ciba-Geigy ผลิตพอลิเอไมด์ Araldite บริษัทที่ทำการผลิตพอลิเอไมด์ชื่อ Beckopex

2.2 การใช้งานอีพอกซีเรซินเป็นผิวเคลือบ (coating) [3]

2.2.1 ใช้งานด้านเคลือบพื้น Epoxy (Epoxy Floor)

อีพอกซีเรซินนิยมใช้ในการ เคลือบพื้น โรงงานอุตสาหกรรม พื้นคลังสินค้า พื้นโรงพยาบาล โดยส่วนใหญ่แล้ว อีพอกซีมีส่วนผสมทางเคมีหลักอยู่ 2 ส่วน ประกอบด้วยกัน โดยปกติจะเรียกว่า เบสเรซิน (base resin) แบ่งตามการใช้งานได้เป็น 2 ประเภทหลัก ๆ คือ

1) อีพอกซีเรซินชนิดบริสุทธิ์ (Epoxy Resin 100% Solid) เป็นอีพอกซีเรซินที่ไม่มีส่วนผสมของสารละลาย นิยมนำมาใช้งานพื้นที่ต้องการรับกำลังมาก ๆ หรืองานที่ต้องการความหนา มาก เช่น อีพอกซีมอร์ตาร์ (Epoxy Mortar) อีพอกซีอินเจกชัน (Epoxy Injection) และอีพอกซีเซลฟ์ เลเวลลิ่ง (Epoxy Self Leveling) เป็นต้น

2) อีพอกซีเรซินชนิดสารละลาย (Epoxy Resin Solvent Type) คือ อีพอกซีที่มีส่วนผสมของสารละลายเพื่อให้ชั้นอีพอกซีที่ได้มีความบาง เหมาะกับการนำไปใช้งานประเภทผิวเคลือบ (Epoxy Coating) หรือใช้ในงานเพนต์ (Epoxy Paint)

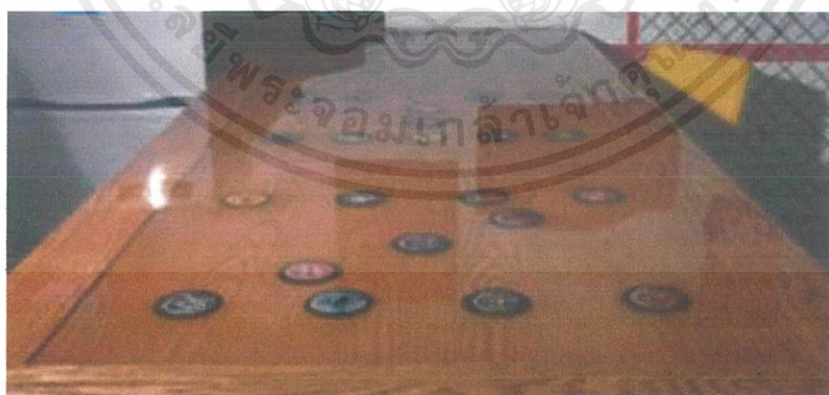
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.7 การเคลือบพื้นผิวด้วยอีพอกซีเรซิน [4]

2.2.2 การใช้งานอีพอกซีเคลือบงานเฟอร์นิเจอร์และไม้ (Epoxy Furniture)

อีพอกซีเรซินมีสมบัติการยึดเกาะทางเคมี เพราะคุณสมบัติที่ดีคือไม่มีความร้อนเกิดระหว่างทำปฏิกิริยา ยึดเกาะพื้นผิวเดิมแม้เป็นผิวสแตนเลสและไม่ดูดซึมของเหลวใด ๆ เมื่อแห้งแล้วสามารถนำมาใช้เคลือบบนพื้นผิวได้หลากหลายวัสดุ เช่น งานไม้หรือเฟอร์นิเจอร์และงานเคลือบโลหะ สามารถทำความสะอาดผิวได้ง่าย มีความแข็งแรงทนทาน ยืดอายุการใช้งานยาวนาน ให้สีคงทน มีคุณสมบัติทนน้ำ ทนความชื้นและทนสภาพภูมิอากาศภายนอก นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้ชิ้นงานอีกด้วย



ภาพที่ 2.8 การเคลือบเฟอร์นิเจอร์ไม้ด้วยอีพอกซีเรซิน [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) [6]

2.3.1 ลักษณะสมบัติเฉพาะทั่วไป

ซิลิกอนไดออกไซด์หรือที่รู้จักโดยทั่วไปคือซิลิกา ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ตามธรรมชาติหรือสังเคราะห์ขึ้นโดยมีลักษณะโครงสร้างเป็น O=Si=O ซิลิกาจะปรากฏอยู่ในสถานะผลึกและมักอยู่ในรูปควอตซ์ ทั้งนี้รูปร่างทางกายภาพของซิลิกาแบ่งได้ 3 แบบ คือ แบบผลึก (crystalline) อสัณฐาน (amorphus) และอสัณฐานสังเคราะห์วัสดุนาโนซิลิกาทั่วไปแล้วมีรูปร่างเป็นอสัณฐานสังเคราะห์หรือที่เรียกว่า synthetic amorphus silica หรือ SAS โดยได้มาจากการสังเคราะห์ 3 วิธีคือ

1. การให้ความร้อน (thermal rote) โดยมาจากการให้ความร้อนเพื่อให้เกิดการไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ในสถานะก๊าซของสารคลอโรไซเลน (chlorosilanes) ภายใต้เปลวไฟของออกซิเจนหรือไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิประมาณ 1,000 องศาเซลเซียส

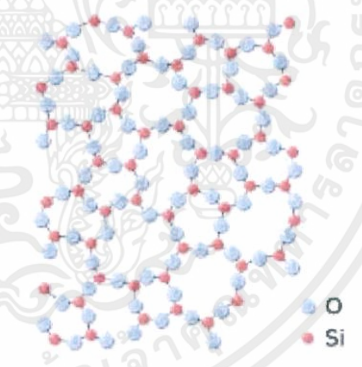
2. วิธีเปียก (wet rout) โดยการตกตะกอนของซิลิกาและซิลิกาเจล หรือซิลิกาแอโรเจล ซึ่งเกิดจากการควบคุมปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน (polymerization) และเกิดการตกตะกอนของ SAS จากสารละลายโซเดียมซิลิเกต โดยซิลิกาที่ได้จะอยู่ในรูปอสัณฐาน

3. วิธีซิลิกาโซล (silica sols) หรือคอลลอยด์ ซิลิกา (colloidal silica) โดยซิลิกาโซลเป็นซิลิกา SAS ที่กระจายตัวในของเหลวโดยทั่วไปคือน้ำและซิลิกาโซลนี้เกิดจากการไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ของซิลิกอนเตตระคลอไรด์ (silicon tetrachloride) ในน้ำหรือสารละลายที่เป็นพอลิเมอร์ไรเซชันของโซเดียมซิลิเกต

วิธีการที่นิยมใช้สำหรับการสังเคราะห์ซิลิกา คือ วิธีเปียก (ตกตะกอน) และวิธีให้ความร้อน โดย synthetic amorphous silica ที่ได้จากสองวิธีนี้จะมีลักษณะสมบัติแตกต่างกันจึงมีรหัสของ CAS No. ที่แตกต่าง (CAS No. 112926-00-8 และ 112945-52-5 ตามลำดับ) (OECD SIDS, 2004) ซิลิกาในรูป amorphous silica จะมีขนาดเล็กในช่วง 100 -1,000 นาโนเมตรและมีแนวโน้มจะรวมตัวกันเป็นกลุ่มจึงเป็นที่รู้จักในนามอนุภาคนาโนซิลิกา (silica nanoparticles, SNPs) (Harrison, 2009) ในปัจจุบันได้มีการผลิต SAS มีขนาดเล็กมากขึ้น โดยขนาดของอนุภาคนาโนซิลิกา ปัจจุบันมีขนาดเล็กลงถึง 10-25 นาโนเมตร การสังเคราะห์ด้วยการให้ความร้อนทำให้สามารถผลิตอนุภาคนาโนซิลิกาเล็กได้ถึง 2 นาโนเมตร ขนาดรูพรุนของนาโนซิลิกามักอยู่ในช่วง mesopores ซึ่งมีขนาดประมาณ 2-50 นาโนเมตรหรืออาจอยู่ในรูปที่ไม่มีรูพรุนได้ (Iler, 1979)

อนุภาคนาโนซิลิกาไม่ละลายน้ำเมื่อปรากฏอยู่ในรูป SiO₂ .x H₂ O โดยลักษณะพื้นผิวของซิลิกาจะเป็นลักษณะชอบน้ำ (hydrophilic) ซึ่งสมบัตินี้จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนกลุ่มไฮดรอกซิลที่มีพันธะกับซิลิกอนหรือที่เรียกว่ากลุ่ม silanols ในอนุภาคนาโนซิลิกา โดยในกลุ่มนี้จะทำให้เกิดการสร้างพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำ ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้อนุภาคนาโนซิลิกามีสมบัติในการดูดซับน้ำได้ดี

ตารางที่ 2.2 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	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 ซิลิกอนไดออกไซด์ในแก้วและขวดแก้ว (Bottle / beverage glass) [7]

แก้วเป็นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตขึ้นมาจากทรายโดยมีหินปูนและโซดาไฟเป็นส่วนประกอบหลัก โดยนำมาหลอมและขึ้นรูปเป็นภาชนะต่าง ๆ เช่น แก้วน้ำ ขวดอาหารและเครื่องดื่ม ฯลฯ แก้วเป็นวัสดุที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ ขวดแก้วทุกประเภทสามารถนำมารีไซเคิลได้แต่ขวดแก้วแต่ละประเภทแต่ละสีจะมีราคาต่างกัน คือ ขวดแก้วสีชาจะมีราคาที่สูงที่สุด รองลงมาคือสีขาและสีเขียว ถ้าเป็นขวดสีที่ไม่แตกก็จะได้ราคาสูงกว่าขวดแตกหรือเศษแก้ว ดังนั้นควรมีการคัดแยกแก้วออกตามสี โดยแก้วสามารถแบ่งออกได้หลายประเภท ดังนี้

1. Alkalies-Barium Silicate Glass เป็นแก้วที่ใช้ในการผลิตจอภาพของโทรทัศน์ เนื่องจากในการทำงานของโทรทัศน์จะมีการปล่อยรังสีเอ็กซ์ (X-Ray) ออกมาในปริมาณมากซึ่งเป็นอันตรายต่อร่างกาย จึงมีนำแก้วชนิดนี้มาผลิตเป็นจอภาพ เนื่องจากแก้วชนิดนี้มีคุณสมบัติในการสามารถดูดซับรังสีเอ็กซ์ (X-Ray) ได้ทำให้ผู้ชมสามารถดูโทรทัศน์ได้อย่างปลอดภัย

2. Aluminosilicate Glass เป็นแก้วอลูมิเนียมซิลิเกตเป็นแก้วที่มีส่วนประกอบเป็นอลูมิเนียมออกไซด์ (aluminium oxide (Al_2O_3)) ประมาณ 20% (ส่วนใหญ่จะมีส่วนประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide (CaO)) ปนอยู่ด้วยเล็กน้อย) รวมทั้งยังมีส่วนประกอบที่เป็นแมกนีเซียมออกไซด์ (magnesium oxide (MgO)) บอริกออกไซด์ (boric oxide (B_2O_3)) โซเดียมออกไซด์ (sodium oxide (Na_2O)) และโพแทสเซียมออกไซด์ (potassium oxide (K_2O)) ในปริมาณสัดส่วนที่เล็กน้อย โดยเฉพาะการที่มีสัดส่วนของโซดาหรือโซเดียมออกไซด์และโพแทสเซียมหรือโพแทสเซียมออกไซด์ในปริมาณที่น้อยทำให้แก้วชนิดนี้ทนทานต่ออุณหภูมิสูง (High Thermal Resistance) และทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน (Thermal Shock Resistance) ได้ดีจึงนิยมใช้แก้วชนิดนี้ในการผลิตเป็นหลอดแก้วที่ติดตั้งในเตาเผา (Combustion Tube) เพื่อใช้ในการเผาไหม้สารต่าง ๆ กับอากาศหรือออกซิเจนนอกจากนี้ยังใช้แก้วอลูมิเนียมซิลิเกตในการผลิตหลอดฮาโลเจน-ทังสเตน (halogen - tungsten lamp) เป็นแก้วที่ทนอุณหภูมิได้สูงมากโดยทนได้ถึง 750 องศาเซลเซียส

3. Borosilicate Glass แก้วชนิดนี้จะเป็นแก้วที่เราค่อนข้างจะคุ้นเคย เนื่องจากเราจะพบเห็นอุปกรณ์หรือเครื่องใช้หลายชนิดที่ผลิตจากแก้วชนิดนี้ ตัวอย่างเช่น ภาชนะแก้วทนความร้อนต่าง 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 (aluminium oxide (Al_2O_3)) ในปริมาณเล็กน้อย จากการที่มีส่วนประกอบของสารประกอบออกไซด์ของโลหะอัลคาไลน์ (โซเดียมออกไซด์และโพแทสเซียมออกไซด์) ในปริมาณที่น้อยจึงทำให้แก้วชนิดนี้สามารถทนทานต่อสารเคมีต่าง ๆ (High Chemical Resistance) และทนทานต่อสภาวะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน (Thermal Shock Resistance)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Resistance) ได้ดี ดังนั้นจึงมีการนำแก้วชนิดนี้มาใช้งานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับสารเคมี อย่างแพร่หลาย 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

4. Commercial Glass แก้วชนิดนี้เป็นแก้วที่เราคุ้นเคยมากที่สุด เนื่องจากจะพบเห็นและใช้งานแก้วชนิดนี้อยู่เป็นประจำในชีวิตประจำวัน เช่น ขวดแก้ว (bottles) แก้วน้ำ (drinking glasses) แผ่นกระจกที่ใช้ทำหน้าต่าง (flat glass for window) เหยือกน้ำ (jars) ซึ่งแก้วชนิดนี้จะมีชื่อเรียกว่า "commercial glass" หรือ "sodalime 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% ซึ่งจะช่วยให้จุดหลอมเหลวของทรายต่ำลงเหลือ 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) จะมีสัดส่วนของแมกนีเซียมออกไซด์ที่น้อยกว่าแก้วที่นำมาผลิตเป็นภาชนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. Glass Ceramics เป็นแก้วที่ผลิตจาก lithium aluminosilicate glass ซึ่งจะเป็นแก้วที่มีคุณสมบัติทนทานต่อสภาวะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างฉับพลันได้ดี (thermal shock resistance) จากคุณสมบัติดังกล่าว จึงมีการนำแก้วชนิดนี้ไปใช้งานในหลายด้าน เช่น cooker hob (พื้นที่เรียบด้านบนสุดของเตาสำหรับเตาแม่เหล็กไฟฟ้า) cooking ware (เครื่องแก้วที่ใช้ทำอาหาร) missile nose cone (ส่วนประกอบหัวจรวด) แก้วชนิดนี้จะมีคุณสมบัติทนความร้อนและทนทานต่อการขยายตัวทางความร้อน (thermal shock) ได้ดีเป็นพิเศษเนื่องจากการผลิตแก้วชนิดนี้จะมีการกระตุ้นการสร้างผลึก (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) จะใช้แก้วชนิดอลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate glass) ที่มีส่วนประกอบของโซเดียมออกไซด์ (sodium oxide) ที่มีค่าต่ำ เพื่อให้ได้คุณสมบัติในการทนทานต่อสารเคมีและอุณหภูมิจุดอ่อนตัวที่สูง (high softening point) นอกจากนี้ยังมีการนำใยแก้วถูกนำมาใช้ในการเสริมความแข็งแรงให้กับพลาสติก เช่น หมวกนิรภัย เรือ ท่อ เชือก แคลสซีสรถยนต์ ท่อไอเสียรถยนต์ เป็นต้น รวมถึงยังมีการนำใยแก้วไปใช้ทำเป็นสายเคเบิลใยแก้วที่สามารถใช้ในการส่งผ่านข้อมูล (fiber optical) หรือสัญญาณภาพ สัญญาณเสียงเพื่อใช้ในการสื่อสารหรือส่งผ่านข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ต่าง 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) สูงจึงทำให้เกิดประกายแสงระยิบระยับรวมทั้งตัวแก้วมีสภาพพื้นผิวที่อ่อนจึงสามารถนำมาบดตัดหรือแกะสลักได้ง่าย และเป็นที่นิยมในการนำมาทำภาชนะแก้วคริสตัลหรือใช้ในงานตกแต่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. Optical Glass เป็นแก้วที่จะพบเห็นอุปกรณ์วิทยาศาสตร์ (scientific instruments) อุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาทางภูมิศาสตร์ กล้องจุลทรรศน์ (microscope) เลนส์กล้องถ่ายรูป อุปกรณ์เกี่ยวกับเลเซอร์ เป็นต้น ทั้งนี้จากคุณสมบัติสำคัญของ optical glass คือ ดัชนีหักเหแสง (refractive index) และการกระจายของแสง (dispersion) ซึ่งจากการผสมผสานกันระหว่างคุณสมบัติทั้งสองทำให้ได้คุณสมบัติของ optical glass ที่หลากหลายส่งผลต่อคุณภาพ ความคมชัดและสีสันทของภาพอย่างที่เราจะพบในเลนส์ของกล้องถ่ายภาพ

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

10. Technical Glass เป็นศัพท์ที่ใช้เรียกแก้วที่ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์โดยแก้วที่มีส่วนประกอบที่ต่างกัน จะถูกใช้ในการป้องกันส่วนประกอบของแผ่นวงจรรีซิลิคอน (silicon semiconductor components) จากสารเคมีและความเสียหายจากการกระทบกระแทกซึ่งจะถูกเรียกว่า "passivation glass" ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญมากในอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (microelectronics industry) และการผลิตแผ่นชิปซิลิคอน (silicon chip) ส่วนแก้วชนิดต่อมาคือ "phosphate glass" ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ซึ่งจะถูกใช้ในการผลิต electron multiplier ส่วนแก้วอีกชนิดหนึ่งคือ "chalcogenide glass" ซึ่งเป็นแก้วที่ใช้เป็นวัสดุในการส่งผ่านคลื่นอินฟราเรดและเป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์สวิตซ์สำหรับหน่วยความจำในเครื่องคอมพิวเตอร์

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

2.3.3 การใช้ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นเฟสเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิต

2.3.3.1 การเสริมแรงในวัสดุทั่วไป [8]

วัสดุเชิงประกอบเป็นวัสดุสำคัญในอุตสาหกรรม เช่น ในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง เส้นใยแก้ว (fiber glass) ที่ถูกพัฒนามาพิเศษเพื่อการเสริมแรงให้กับเมทริกซ์ซีเมนต์ หรือการใช้คอนกรีตที่เกิดจากซีเมนต์เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยลวดทำให้เกิดเป็นคอนกรีตที่มีน้ำหนักเบา ด้านวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ไม่นิยมใช้เป็นวัสดุโครงสร้างที่รับแรงโดยตรงแต่มักใช้ประกอบกับวัสดุเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างเดิมเพื่อเสริมประสิทธิภาพให้ดียิ่งขึ้น สำหรับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์วัสดุเชิงประกอบโลหะที่เป็นอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์เสริมแรงเมทริกซ์อลูมิเนียมจะนำมาใช้เป็นวัสดุสำหรับการทำฮาร์ดดิสก์เพราะสามารถออกแบบให้มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนได้ โดยการปรับสัดส่วนของอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ วัสดุเชิงประกอบสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอีกหลาย ๆ ด้าน ซึ่งพบได้ในชีวิตประจำวัน เช่น หมวกนิรภัย กระดานโต้คลื่น ไม้เทนนิส ไม้กอล์ฟ เป็นต้น

2.3.3.2 การเสริมแรงในอีพอกซีเรซิน [9]

วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์นำไปใช้เป็นวัสดุในการทำโครงสร้างรถยนต์และเรือ เช่น กันชน โครงสร้างร่วมในท้องโดยสาร รวมไปถึงนำไปทำเรือขนาดเล็ก เนื่องจากเป็นวัสดุ ที่มีความทนทานต่อการใช้งาน สามารถขึ้นรูปได้ง่ายด้วยมือ ต่อมาเมื่อวัสดุเชิงประกอบถูกพัฒนาให้มีสมบัติที่ดีมากขึ้น จึงกลายเป็นส่วนประกอบสำหรับเรือโดยสารขนาดใหญ่จนถึง เรือรบเมทริกซ์ (Matrix) ที่นิยมใช้ในการทำเรือ ได้แก่ พอลิเอสเตอร์ไวเนลเอสเตอร์และอีพอกซี โดยใช้เส้นใยแก้วชนิดเส้นใยสั้นและเส้นใยผืนเป็นสารเสริมแรง (reinforcement) นอกจากนี้ยังพบการใช้วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ประกบร่วมกับแกน ซึ่งเป็นวัสดุที่เบาและแข็งแรงเพื่อทำเป็นตัวเรือ



ภาพที่ 2.9 วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นส่วนประกอบในรถยนต์ [10]

ซึ่งจากข้อมูลทั้งหมดที่กล่าวมาสามารถเปรียบเทียบปริมาณของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) รวมถึงองค์ประกอบและคุณลักษณะของแก้วที่ใช้ในอุตสาหกรรม แสดงดังตารางที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

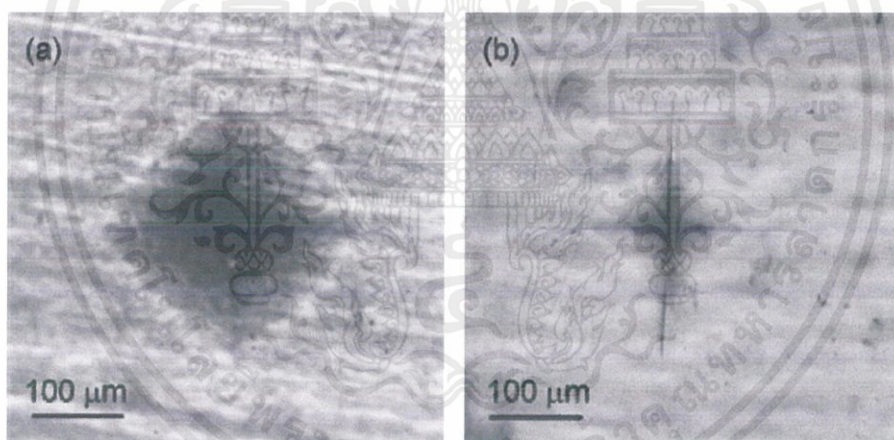
ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบและคุณลักษณะของแก้วที่ใช้ในอุตสาหกรรม

ชนิดของแก้ว	องค์ประกอบ (ร้อยละน้ำหนัก)						คุณลักษณะและการใช้งาน
	SiO ₂	Na ₂ O	CaO	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	อื่น ๆ	
แก้วซิลิกา หลอมเหลว	>99.5	-	-	-	-	-	อุณหภูมิการหลอมเหลวสูง ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวต่ำ
แก้วซิลิกา หลอมเหลว ร้อยละ 96	>96	-	-	-	4	-	ด้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและการกัดกร่อนของสารเคมีได้ดี ใช้ทำอุปกรณ์ในห้องทดลอง
แก้วบอโร ซิลิเกต	81	3.5	-	2.5	13	-	ด้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและการกัดกร่อนของสารเคมีได้ดี ใช้ทำผลิตภัณฑ์ใช้ในเตาอบ
แก้วโซดา ไลม์	74	16	5	1	4 MgO	-	อุณหภูมิการหลอมต่ำ ความหนาแน่นสูง มีความมันวาวสูง ใช้ทำเลนส์
แก้วเลดซิลิ เกต	54	1	-	-	-	37 PbO 8 K ₂ O	อุณหภูมิการหลอมต่ำ ความหนาแน่นสูง มีความมันวาวสูง
แก้วอะลูมิ โนซิลิเกต	70	-	-	18	-	4.5 TiO ₂ 2.5 Li ₂ O	ขึ้นรูปง่ายแข็งแรงและทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ดี ใช้ทำผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในเตาอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature Review)

งานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาวัดคานาโนคอมโพสิตระหว่างอีพอกซีเรซินกับวัสดุเสริมแรงที่เป็นซิลิกอนไดออกไซด์นาโน เพื่อทดสอบการป้องกันการกัดกร่อนในวัสดุจำพวกโลหะมีหลายงานวิจัย ดังเช่นงานวิจัยของ Conradi และคณะ [11] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการถูกกัดกร่อนของอีพอกซีเติมอนุภาคซิลิกาขนาดนาโนเมตร โดยอัตราส่วนในการเจือซิลิกานั้น คือ 2 wt. % เคลือบลงบนโลหะสแตนเลสสตีลที่มีความหนา 50 มิลลิเมตร และความหนาของชั้นเคลือบ คือ 130 นาโนเมตร ผลสรุปพบว่าอนุภาคซิลิกาขนาดนาโนเมตรเจือในอัตราส่วน 2 wt. % อนุภาคซิลิกามีผลในการปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของเมทริกซ์ที่เคลือบบนโลหะ สะท้อนให้เห็นถึงความแข็งที่เพิ่มขึ้น ความขรุขระของพื้นผิวที่เพิ่มขึ้นมีผลในการเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมที่เต็มไปด้วยคลอไรด์ไอออน โดยมีประสิทธิภาพการต้านการกัดกร่อนมีค่าที่เพิ่มขึ้นและมีอัตราการกัดกร่อนที่ลดลง

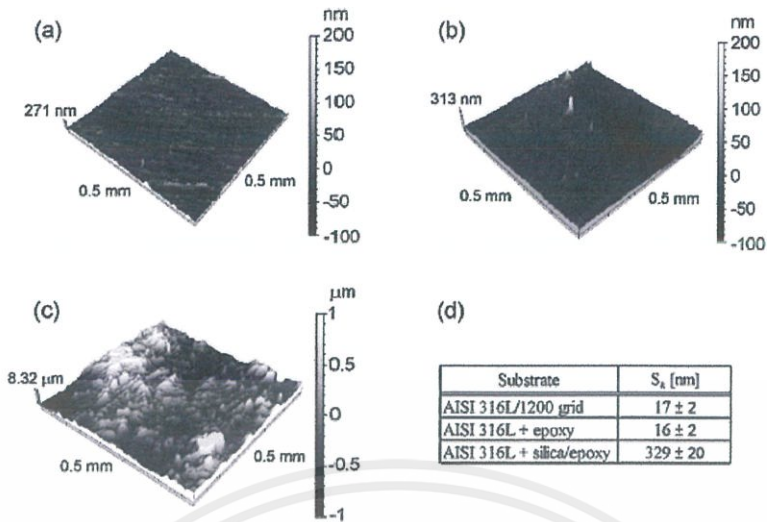


ภาพที่ 2.10 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ของการวัดค่าความแข็ง ที่แรงกด 0.5 กิโลกรัม แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเหล็กกล้า (AISI 316L)

(a) โลหะที่เคลือบอีพอกซีบริสุทธิ์ ความหนา 50 มิลลิเมตร

(b) โลหะที่เคลือบอีพอกซีกับซิลิกา ความหนา 50 มิลลิเมตรและซิลิกาขนาด 130 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



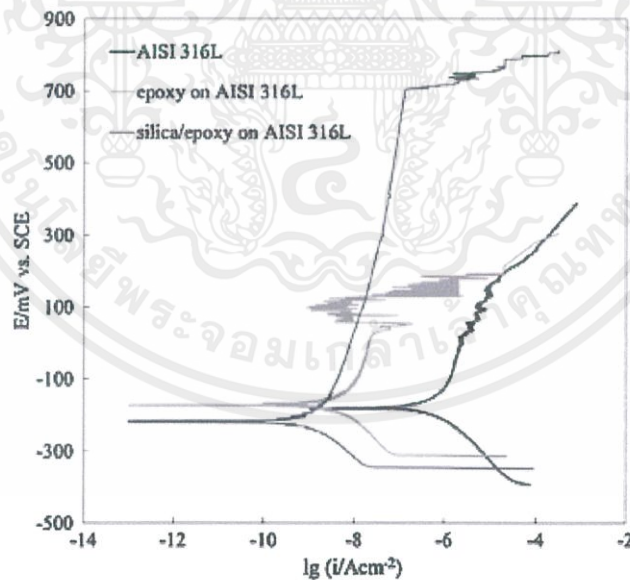
ภาพที่ 2.11 แสดงพื้นผิวของพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 316L)

(a) พื้นผิวที่เคลือบกระดาซทราย (SiC) ถึง 1200 เม็ด

(b) เคลือบด้วยอีพอกซี ความหนา 50 มิลลิเมตร

(c) เคลือบด้วยอีพอกซีและซิลิกา ความหนา 50 มิลลิเมตร

(d) ค่าเฉลี่ยความขรุขระของพื้นผิวทั้ง 3 ชนิด



ภาพที่ 2.12 แสดงกราฟโพเทนเชียลไดนามิก

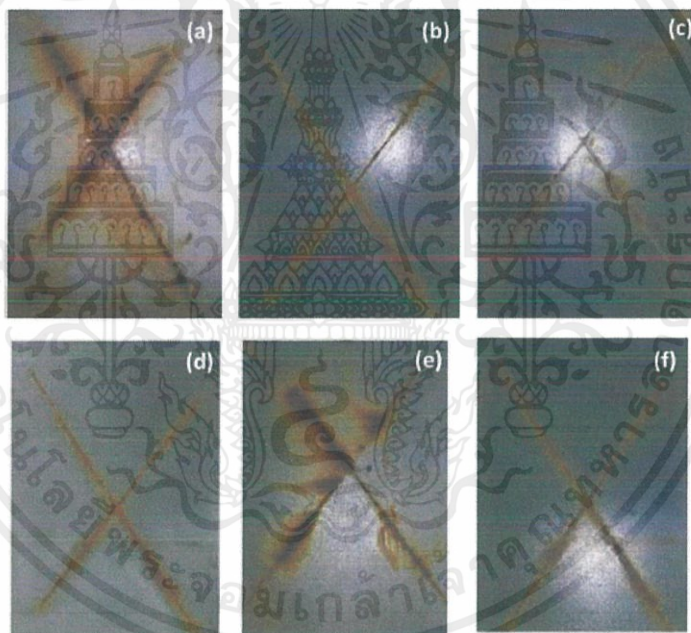
(a) เหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 316L)

(b) เหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบด้วยอีพอกซี

(c) เหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบด้วยซิลิกา/อีพอกซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากงานวิจัยข้างต้นยังมีผู้ที่ศึกษาวัสดุคอมโพสิตชนิดอื่น ๆ และมีการเจืออนุภาคของซิลิกา ลงไปเช่นกันโดย Gazala Ruhi และ S.K. Dhawan [12] ได้ศึกษาผลของอีพอกซีเรซินกับพอลิเมอร์คอมโพสิตและอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ พอลิเมอร์คอมโพสิตที่ทำการศึกษา ได้แก่ Polymer Composite Polypyrrole SiO₂ (PCs) และ Polymer Composite Chitosan Polypyrrole SiO₂ (CsPC) โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนโดยน้ำหนักของคอมโพสิต งานวิจัยดังกล่าวนำไปประยุกต์ใช้ในการเคลือบโลหะอ่อนด้วยวิธี “Salt Spray Test” เพื่อป้องกันการกัดกร่อนของสนิม ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวพบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนที่ดีที่สุด ได้แก่ Polymer Composite Chitosan Polypyrrole SiO₂ (CsPC) ภาพ c. คืออัตราส่วน 2 wt. % ของ chitosan polypyrrole/SiO₂ (CsPC) สังเกตได้จากลักษณะทางกายภาพของโลหะอ่อนซึ่งถูกกัดกร่อนน้อยที่สุดและนอกจากนี้ยังพบว่า CsPC ที่อัตราส่วน 2 wt. % ให้ % P.E. (Protect Efficiency) สูงถึง 99.97 % อีกด้วย



ภาพที่ 2.13 โลหะอ่อนที่ทำสัญลักษณ์เพื่อสังเกตการกัดกร่อนภายหลัง 65 วัน

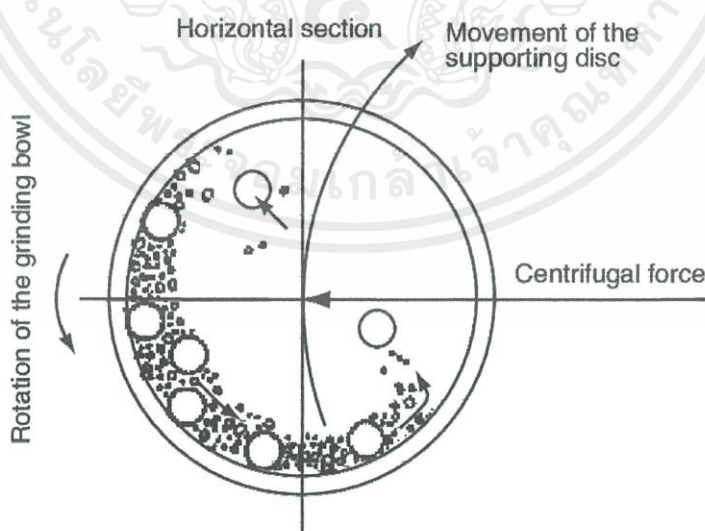
- (a) เคลือบด้วยอีพอกซีบริสุทธิ์
- (b) เคลือบด้วยไคโตซาน/พอลิไพโรล/ซิลิกอนไดออกไซด์ 1.0 wt. %
- (c) เคลือบด้วยไคโตซาน/พอลิไพโรล/ซิลิกอนไดออกไซด์ 2.0 wt. %
- (d) เคลือบด้วยไคโตซาน/พอลิไพโรล/ซิลิกอนไดออกไซด์ 3.0 wt. %
- (e) เคลือบด้วยไคโตซาน/พอลิไพโรล
- (f) เคลือบด้วยพอลิไพโรล/ซิลิกอนไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 เทคนิคที่ใช้ในการเตรียมสาร

2.5.1 เทคนิคการบดย่อยด้วยลูกบอล [13]

เทคนิคการบดย่อยด้วยลูกบอลถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย สำหรับการบดผง เตรียมผง แก้ว เทคนิคที่ใช้ ได้แก่ เทคนิคการบดย่อยด้วยลูกบอล (ball - milling technique) เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายต้นทุนต่ำอีกทั้งยังสามารถบดย่อยผงให้มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตรได้ โดยเม็ดบดดังกล่าวต้องทำมาจากวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง เช่น ลูกเหล็กทรงกลมหรือเซรามิก เช่นอลูมินา (Al_2O_3) หรือ เซอร์โคเนีย (ZrO_2) เพื่อป้องกันการหลุดกร่อนของเม็ดบดระหว่างกระบวนการบดย่อย ซึ่งอาจก่อให้เกิดการปนเปื้อนของสารจากเม็ดบดได้ นอกจากนี้อีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ คือ ขนาดของเม็ดบด หากใช้เม็ดบดขนาดใหญ่เพียงอย่างเดียวในการบดจะทำให้สามารถบดย่อยอนุภาคขนาดใหญ่ให้แตกลงได้ แต่ก็ไม่สามารถบดย่อยอนุภาคให้มีขนาดเล็กลงได้มากนัก ในขณะที่เดียวกันหากใช้เม็ดบดขนาดเล็กชนิดเดียวในกระบวนการบดย่อยจะทำให้อัตราการบดย่อยที่สูงกว่าเม็ดบดขนาดใหญ่ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น แต่แรงในการบดอาจไม่มากพอในการบดอนุภาคขนาดใหญ่ให้เล็กลงได้ ดังนั้นในกระบวนการบดย่อยควรใช้เม็ดบดขนาดใหญ่และขนาดเล็กผสมกัน เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการบดย่อยที่เพิ่มขึ้น โดยภายในขวดพลาสติกที่บรรจุไปด้วยเม็ดบด สารที่ต้องการบดย่อยหรือผสมและของเหลวที่ช่วยในการกระจายตัวของอนุภาค (ในงานวิจัยนี้ใช้เอทานอล) โดยจะทำการหมุนขวดในแนวตั้ง (Vibratory ball - milling) บนสายพานที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ ในขณะที่ขวดบอลหมุนบนสายพานนั้นเม็ดบดจะต้องมีการตกระทบกันเป็นรูปตัว D ดังภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 แสดงการตกระทบของเม็ดบดระหว่างกระบวนการบดย่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการบดย่อยด้วยลูกบอลสามารถแบ่งประเภทได้ ดังนี้

1. เครื่องบดย่อยแบบ Batch mill [14]

เป็นการบดย่อยโดยใช้ลูกบอล (ball mill) โดยการเติมวัตถุและวัตถุตัวกลาง (Medium) เช่น น้ำ แอลกอฮอล์ โพลีเอธิลีนและสารปรับปรุงคุณสมบัติ (Additive) ต่าง ๆ ตัวช่วยในการกระจายและการลอยตัว (Deflocculant) ลงไป แล้วทำการปิดฝาจากนั้นจึงเริ่มการบดย่อยจนกระทั่งได้ความละเอียดหรือเวลาตามที่ต้องการจึงถ่ายน้ำสลิปออกมาซึ่งเป็นการผลิตแบบไม่ต่อเนื่อง การบดแบบแบชมิลล์ (Batch mill) นี้ สิ่งสำคัญคือจะต้องคำนึงถึง คือ คุณภาพของน้ำสลิปหรือสีเคลือบที่สม่ำเสมอในแต่ละถัง ต้นทุนในการผลิตและประสิทธิภาพในการบด การบดโดยใช้แบชมิลล์นั้นสามารถบดได้ทั้งแบบแห้งและแบบเปียกโดยวัตถุดิบที่ต้องการบดสามารถบดแยกส่วนระหว่างวัตถุดิบที่มีความแข็งมาก (Hard Material) อย่างเดียว โดยมีการเติมดินลงไปบางส่วนเพื่อช่วยในการกระจายตัวลอยตัวแล้วจึงนำน้ำสลิปที่ได้ไปผสมรวมกับวัตถุดิบที่ไม่แข็งแต่จะมีการจับตัวกันอย่างอ่อน (Soft Material) สำหรับการบดแห้งโดยการใช้การบดย่อยด้วยลูกบอล มักจะเป็นการบดวัตถุดิบ เช่น หินปูน หินปูน (Limestone) หินฟ้าม้า (Feldspar) ททรายควอทซ์ (SiO_2) เป็นต้น เพื่อให้มีความละเอียดสูง สำหรับการนำไปใช้ในวัตถุดิบในเนื้อดินหรือน้ำยาเคลือบ โดยผู้ใช้งานไม่จำเป็นต้องนำไปบดเพิ่มหรือแค่นำไปผสมเพื่อให้วัตถุดิบเป็นเนื้อเดียวกัน ในการบดแบบแห้งจำเป็นต้องใช้ลมเป็นตัวช่วยพาวัตถุดิบที่ละเอียดแล้วออกมาจากถังบด



ภาพที่ 2.15 เครื่องบดบอลมิลล์แบบแบชมิลล์ [15]

นอกจากนี้แล้วชนิดของลูกบดก็มีความสำคัญโดยการใช้ลูกบดชนิดต่าง ๆ กันนั้นขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่จะบดหากเป็นเนื้อดินของผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการเน้นเรื่องความขาวของเนื้อผลิตภัณฑ์มากนัก เช่น เนื้อของกระเบื้องปูพื้น บุผนัง เนื้อดินสโตนแวร์ เนื้อดินกระเบื้องหลังคา อาจเลือกใช้ลูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บดที่มีมลทิน (Impurities) ปนอยู่ในเนื้อของลูกบดได้ ราคาของลูกบดก็เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงเนื่องจากบางโรงงานยังมีเงินลงทุนที่ไม่สูงนัก จึงมักเลือกใช้ลูกบดที่มีราคาไม่สูงมาใช้งานรวมทั้งคำนึงถึงประสิทธิภาพในการบดของลูกบดแต่ละชนิดด้วยแต่ถ้ามีการคำนวณเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพในการบดของลูกบดที่มีค่าความหนาแน่นสูง เช่น ลูกบดเนื้ออลูมินาแล้วอาจจะลดงบประมาณการลงทุนรวมลงไปได้เนื่องจากประสิทธิภาพในการบดที่สูงขึ้นทำให้ลดชั่วโมงในการบดลงไปได้มาก โดยปกติแล้วลูกบดชนิดฟลินท์ (Flint) หรือพับเบิล สโตน (Pebble Stone) ซึ่งเป็นหินที่เกิดจากธรรมชาติตามชายฝั่งทะเล แม่น้ำ จะใช้สำหรับการบดเนื้อดินที่ไม่ต้องการความขาวมากนัก เนื่องจากลูกบดเป็นพับเบิลจะมีมลทินอยู่มากพอสมควรราคาจึงไม่แพงมากนักเมื่อเทียบกับลูกบดชนิดอื่น ๆ เมื่อบดได้สักระยะหนึ่งลูกบดจะสึกกร่อนไปซึ่งสิ่งที่ออกมาคือซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) สารดังกล่าวสามารถปนเปื้อนไปกับดินได้เลยไม่ถือว่าเป็นมลทินหรือสิ่งแปลกปลอมเรียกการบดโดยใช้ลูกบดที่มีเนื้อเดียวกันกับผลิตภัณฑ์ว่า “Autogenous Milling” นอกจากนี้ยังมีลูกบดอีกชนิดหนึ่ง คือ ลูกบดชนิดโพซาลีนท์ (Porcelain) จะมีราคาสูงกว่าพับเบิล สโตน (Pebble Stone) แต่หากเปรียบเทียบกับลูกบดอลูมินาแล้วก็ยังมีราคาต่ำกว่าอยู่มาก

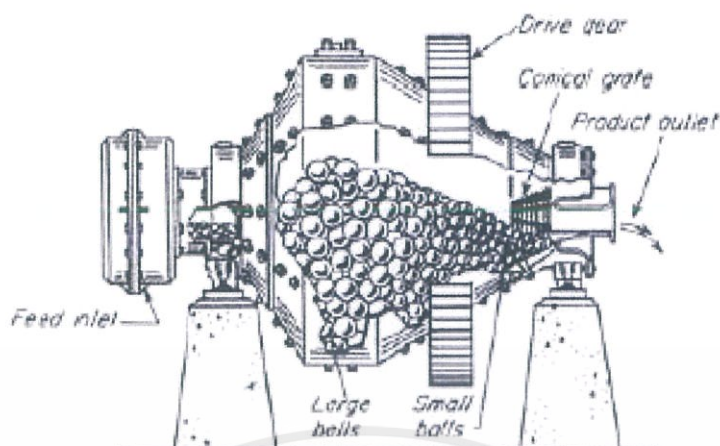
2. เครื่องบดย่อยแบบ Continuous Mill แบ่งตามลักษณะได้ดังนี้

ก. แบบไหลล้นออก (Overflow Discharge) เป็นการบดแบบเปียกที่นิยมใช้กันมากในงานเหมืองแร่

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

ค. แบบไหลออกช่วงระดับต่ำ (Low level diaphragm discharge) ใช้บดได้ทั้งแห้งและเปียก เช่นเดียวกับแบบที่ไหลออกช่วงกลางเครื่องบดบอลมิลล์ไม่มีข้อจำกัดเกี่ยวกับ รูปร่างและความเร็วในการทำงาน เครื่องที่มีความยาว 3 – 5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางจะใช้ในกรณีที่พื้นผิวของแร่ถูกบดถึงจุดวิกฤติและไม่ต้องการให้มีการนำกลับมาบดซ้ำสูงหาก เครื่องบดมีความยาว 1-2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางแร่ที่บดได้จะมีขนาดช่วงแคบ ๆ พิวเบิลมิลล์ (Pebble mills) ใช้บดได้ทั้งบดแห้งและบดเปียก โดยลูกบดที่ใช้เป็นก้อนกรวดแข็ง เช่น ฟรินท์ (Frint) สามารถบดได้จากขนาด 3/8 นิ้วและละเอียดกว่า 10 ไมครอน ใช้มากในการบดของเหมืองแร่ทองคำ โดยปกติจะใช้ความเร็ว 75-85 % ของความเร็ววิกฤติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.16 เครื่องบดแบบพับเบลมิลล์ [16]

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)

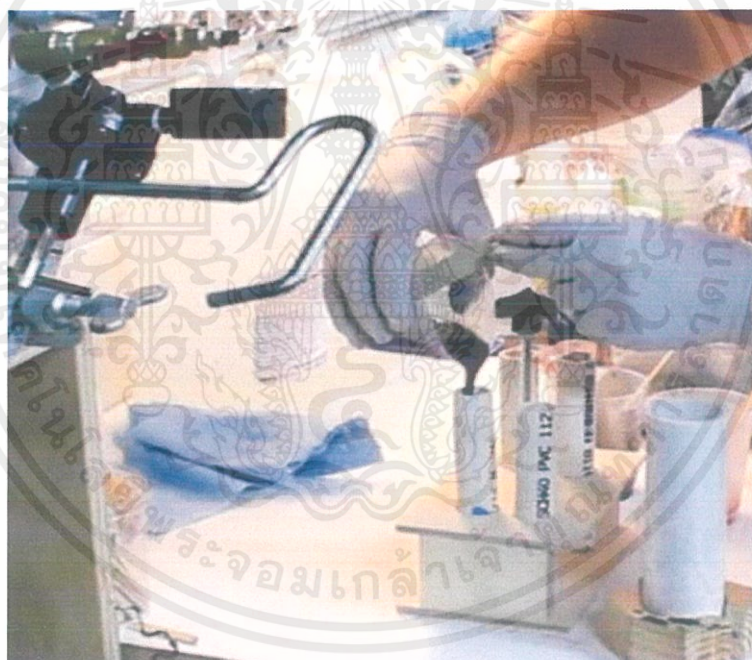
เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการบดสูงสุดนั้น การเติมลูกบดลงไปในหม้อบด (Ball mill) นั้นจะเติมอยู่ที่ประมาณ 50 – 55 % ของปริมาตรภายในทั้งหมดของหม้อบด ซึ่งจากการ ทดสอบพบว่า ช่วงของการเติมลูกบดในช่วงนี้จะช่วยให้เวลาในการบดน้อยที่สุดและค่าการกระจายตัวของอนุภาค (Particle Size Distribution) จะดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 เทคนิคการหล่อแบบดั้งเดิม (conventional casting) [17]

เทคนิคนี้จะเป็นการขึ้นรูปเรซินโดยใช้แม่พิมพ์พีวีซีสำเร็จรูป ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.24 มิลลิเมตร ซึ่งวิธีการหล่อเรซิน มีดังนี้

- 1) ใช้วาสลีนทาบริเวณแม่พิมพ์ให้ทั่ว ใช้ผ้าเช็ดให้ผิวไม่มีรอยเปื้อนเพื่อสะดวกในการนำชิ้นงานออก
- 2) เตรียมเรซินกับฮาร์ดเตเนอร์ในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่ได้คำนวณไว้
- 3) เทเรซินและฮาร์ดเตเนอร์ลงในถ้วยพลาสติกหรือถ้วยกระดาษในปริมาณที่ต้องการใช้และใช้แท่งโลหะหรือหลอดดูดสารกวนเบา ๆ ให้ส่วนผสมเข้ากันโดยกวนเน้นที่ขอบด้านข้างถ้วยและก้นถ้วย
- 4) เทลงแม่พิมพ์และทิ้งไว้ 6-8 ชั่วโมง
- 5) เมื่อเรซินแข็งตัวดีแล้วให้ทำการนำเรซินออกจากแม่แบบ นำมาขัดตกแต่งด้วยกระดาษทรายน้ำโดยขัดไล่จากเบอร์หยาบไปเบอร์ละเอียด



ภาพที่ 2.17 การหล่อเรซิน [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สาร

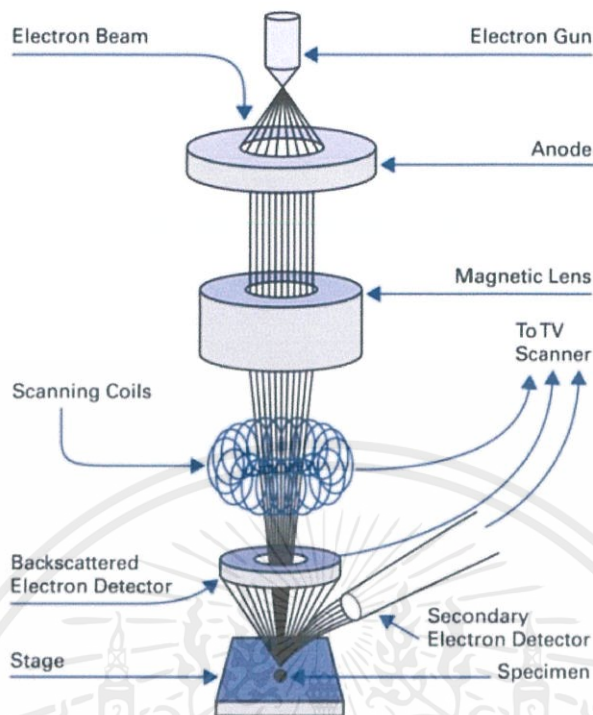
2.6.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [19]

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) ซึ่งใช้พลังงานไม่สูงเพื่อให้อิเล็กตรอนสามารถหลุดออกจากผิวชิ้นงาน โดยอิเล็กตรอนนี้ คือ อิเล็กตรอนอิสระจะมีช่วงพลังงาน 10-15 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) อิเล็กตรอนชนิดนี้จะใช้ในการสร้างภาพที่บริเวณพื้นผิวของชิ้นงานสำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

2.6.1.2) อิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับ (back-scattered electron) เป็นอิเล็กตรอนที่เกิดจากการที่อิเล็กตรอนปฐมภูมิวิ่งเข้าชนชิ้นงาน อิเล็กตรอนนี้จะสูญเสียพลังงานให้กับอะตอมในชิ้นงานบางส่วนแล้วเกิดการกระเจิงกลับออกมาจากชิ้นงาน ซึ่งพลังงานของอิเล็กตรอนชนิดนี้จะมีค่าตั้งแต่พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิไปจนถึงพลังงานอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ค่าพลังงานต่าง ๆ ที่กระเจิงกลับมานั้นจะขึ้นกับเลขมวลอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของชิ้นงาน ดังนั้นอิเล็กตรอนชนิดนี้สามารถใช้สร้างภาพที่แสดงความแตกต่างของธาตุได้ โดยแสดงในรูปแบบความเข้มและความสว่างของภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณใช้ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน

2.6.1.3) รังสีเอ็กซ์ (X - ray) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้น ความถี่สูงเกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนชิ้นงานทำให้อิเล็กตรอนในระดับชั้นโคจรต่าง ๆ (K,L,M,...) ได้รับพลังงานมากพอจนหลุดออกจากวงโคจร อิเล็กตรอนจากชั้นโคจรถัดไปเข้ามาแทนที่ ทำให้มีการปลดปล่อยรังสีเอ็กซ์ออกมา โดยสเปกตรัมของรังสีเอ็กซ์ที่ถูกปล่อยออกมานี้สามารถนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุได้ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณค่าพลังงานนี้จะขึ้นกับเลขอะตอมของธาตุซึ่งจะใช้หัววัดรังสีเอ็กซ์ (energy dispersive X-ray ; EDX) ในการวิเคราะห์ข้อมูลประกอบกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)



ภาพที่ 2.18 ส่วนประกอบต่าง ๆ ภายในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [20]

2.6.2 เครื่องวิเคราะห์หาธาตุต่าง ๆ (Energy Dispersive X-ray Spectrometer ; EDX)

เป็นเครื่องมือวิเคราะห์หาธาตุด้านเอกซเรย์ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ตั้งแต่ธาตุคาร์บอนถึงธาตุยูเรเนียมเป็นต้นไป นำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวางสามารถทดสอบได้ทั้งของแข็ง ของเหลวหรือผง สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ หลักการของเทคนิคนี้ คือ ให้งี้รังสีเอ็กซ์จากแหล่งกำเนิดเข้าไปและชนสารตัวอย่าง โดยรังสีเอ็กซ์จะทำให้อิเล็กตรอนวงในสุดของอะตอมของธาตุหลุดออก อิเล็กตรอนในวงถัดมาจึงจะเข้ามาแทนที่และปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในลักษณะของเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ ซึ่งจะมีค่าพลังงานเป็นค่าเฉพาะตัวของธาตุนั้นเป็นพื้นฐานการวิเคราะห์เชิงคุณภาพและความเข้มข้นของเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ที่เกิดขึ้นจะเป็นพื้นฐานการวิเคราะห์เชิงปริมาณ [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



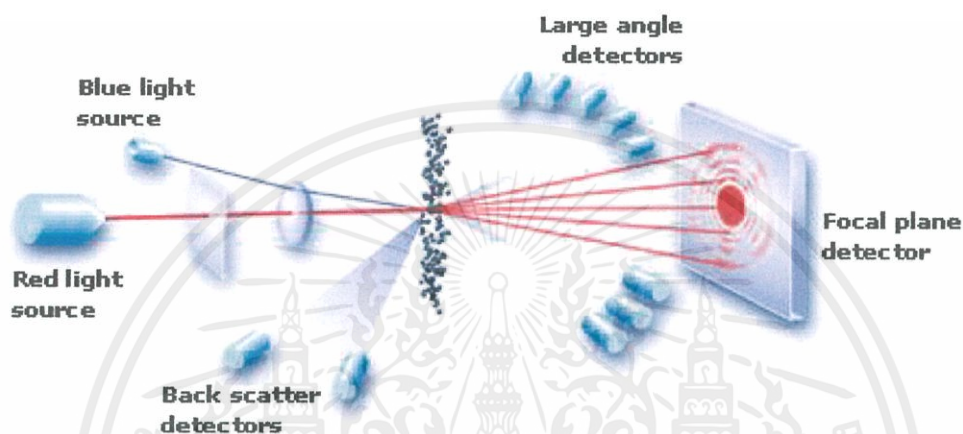
ภาพที่ 2.19 เครื่องวิเคราะห์ธาตุต่าง ๆ ด้วยรังสีเอ็กซ์ [22]

2.6.3 เครื่องวัดการกระจายตัวของอนุภาค (Particle size distribution analyzer) [23]

เครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Particle size distribution analyzer) เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของสารตัวอย่าง โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของเลเซอร์ (LASER Diffraction) จากแหล่งกำเนิดเลเซอร์ชนิด แก๊สฮีเลียม-นีออน (He-Ne Laser) ซึ่งเป็นแสงสีแดงมีความยาวคลื่น 632.82 นาโนเมตร ลำแสงจะถูกขยายขนาดโดย Beam expander แล้วส่องผ่านไปยังอนุภาคที่เป็นสารแขวนลอย (Emulsion) อยู่ในตัวกลางที่เป็นของเหลวมีความโปร่งใสและมีค่าดัชนีหักเหแตกต่างจากอนุภาค จนเกิดการกระเจิงของแสงที่บริเวณผิวของอนุภาคได้ และไม่ทำปฏิกิริยากับอนุภาคของสารที่ต้องการวิเคราะห์ นอกจากนี้ปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคจะต้องสูงพอที่จะได้ข้อมูลเชิงสถิติที่ดีสำหรับการทดสอบแบบเปียกและความเข้มข้น 2- 6 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการทดสอบแบบแห้ง แต่ต้องไม่เข้มข้นเกินไปจนเกิดการกระเจิงซ้ำกันหลายครั้ง (Multiple scattering) เมื่อแสงเลเซอร์เดินทางผ่านอนุภาคที่เป็นสารแขวนลอยจะเกิดปรากฏการณ์กระเจิงของแสงโดยแสงที่กระเจิงจากอนุภาคจะมีรูปแบบของความเข้มที่มุมต่างกันขึ้นกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค แต่ละมุมของการกระเจิงจะมีสัดส่วนผกผันกับขนาดของอนุภาค ซึ่งสมบัติการกระเจิงของแสงจากอนุภาคนี้สามารถใช้ในการคำนวณหาการกระจายตัวของขนาดอนุภาคได้ โดยลำแสงที่กระเจิงจากอนุภาคจะถูกส่งผ่านไปยังเลนส์รวมแสง (Condenser lens) ทำให้เกิดภาพปรากฏเป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนแบบฟาร์ฟิลด์ (Far field diffraction pattern) ที่โฟโตเซลล์ดีเทคเตอร์ (Photocell detector) ซึ่งวางอยู่บนระยะห่างที่ตั้งฉากกับเส้นทางเดินของแสงเลเซอร์ที่จุดโฟกัสของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเลี้ยวเบนจะมีลักษณะเป็นวงมิต - สว่างสัมพันธ์กับการกระจายตัวของขนาดอนุภาค เลนส์รวมแสงได้ถูกออกแบบให้มีคุณสมบัติพิเศษ คือ ไม่ว่าอนุภาคจะก่อให้เกิดการกระเจิงที่บริเวณใดในลำแสงเลเซอร์ก็ตามรูปแบบการเลี้ยวเบนจะไม่เคลื่อนไหวและมีจุดศูนย์กลางอยู่บนแกนออปติกของเลนส์เสมอ (Allen, 1997) จากการกระเจิงของแสงที่ได้สามารถคำนวณหาขนาดอนุภาคได้ตามทฤษฎีของมี (Mie theory) โดยใช้ค่าดัชนีหักเห (Refractive index) และค่าการดูดซับแสง (Absorption index) ของอนุภาคและตัวกลางร่วมด้วย



ภาพที่ 2.20 เครื่องวัดการกระจายตัวของอนุภาค [24]

จากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์สีแดงและสีน้ำเงินเคลื่อนที่ผ่านกลุ่มตัวอย่างแสงสีแดงมีความยาวคลื่น 632.82 นาโนเมตร ใช้วัดอนุภาคขนาดใหญ่และแสงสีน้ำเงินมีความยาวคลื่น 473.00 นาโนเมตร ใช้วัดอนุภาคขนาดเล็กและมีดีเทคเตอร์รับแสงการเลี้ยวเบนของเลเซอร์ เพื่อทำการวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคและบันทึกค่าเฉลี่ยการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยการประมวลผลของเครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผ่านคอมพิวเตอร์ โดยมุมของการเลี้ยวเบนจะขึ้นกับขนาดอนุภาคซึ่งความสัมพันธ์ ดังนี้ (Rahaman , 2003)

$$\sin\theta = \frac{1.22\lambda}{t} \quad (2.1)$$

โดย θ คือ มุมของการเลี้ยวเบน

T คือ ขนาดอนุภาค

λ คือ ความยาวคลื่นแสงที่กระทบอนุภาค

หากพิจารณาที่มุมการเลี้ยวเบนน้อย ๆ จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

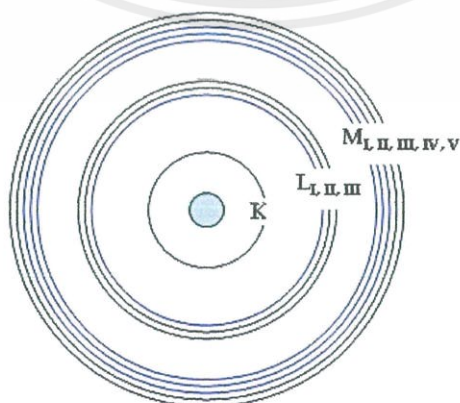
$$\theta = \frac{1.22 \lambda}{t} \quad (2.2)$$

โดยเครื่อง Particlesize distribution analyzer มีระบบการวิเคราะห์ 2 ระบบ คือการทดสอบแบบเปียกและการทดสอบแบบแห้ง การทดสอบแบบเปียกจะใช้ของเหลวเป็นตัวกลางนำสารตัวอย่างเคลื่อนที่ผ่าน cell window (ในการทดลองใช้น้ำ RO) ซึ่งการทดสอบแบบเปียกจะมีการกระจายตัวของสารตัวอย่างได้ดี โดย cell window แควบและมีระบบ ultrasonic ช่วยในการกระจายอนุภาคขณะทำการทดสอบ

- การทดสอบแบบแห้งจะใช้ลมเป็นตัวกลางนำสารตัวอย่างเคลื่อนที่ผ่าน cell window สำหรับตัวอย่างที่ไม่สามารถกระจายตัวในของเหลวได้ แต่การทดสอบแบบแห้งนี้จะมีการกระจายตัวของตัวอย่างได้ไม่ค่อยดีเท่าแบบเปียกและ cell window กว้าง ทำให้อนุภาคใหญ่มีโอกาสบังอนุภาคเล็กได้ขณะเคลื่อนที่ผ่าน cell window ได้

2.6.4 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence Spectroscopy ; XRF)

เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ชนิดของธาตุและปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการที่อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอม เปลี่ยนระดับชั้นที่มีพลังงานสูงไปยังชั้นที่มีพลังงานต่ำกว่าและคายพลังงานออกมาในรูปรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานจำเพาะ (characteristic x -ray) ของแต่ละธาตุ อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอม แบ่งเป็นชั้น (shells) โดยชั้นในสุด ได้แก่ ชั้น K มีระดับพลังงาน (energy level) ต่ำสุด ถัดออกมา ได้แก่ ชั้น L, M, N, ... ซึ่งจะมีระดับพลังงานสูงขึ้นตามลำดับ นอกจากอิเล็กตรอนในชั้น K ที่มีระดับพลังงานเดียวแล้วอิเล็กตรอนในชั้นอื่นยังแบ่งเป็นชั้นย่อย ได้แก่ LI, LII, LIII และ MI, MII, MIII, MIV, MV ซึ่งอะตอมของธาตุแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างของพลังงานของอิเล็กตรอนในแต่ละชั้นไม่เท่ากัน [25]



ภาพที่ 2.21 ชั้นของอิเล็กตรอนในวงโคจร

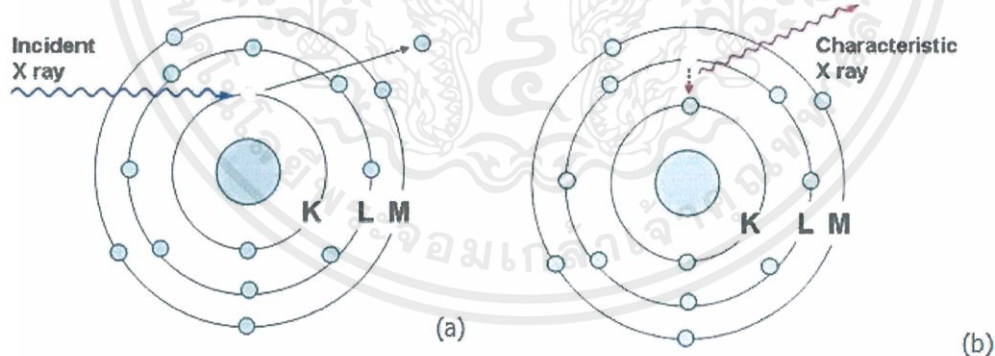
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนในแต่ละชั้นของวงโคจรมีพลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy) ที่ได้รับจากนิวเคลียสแตกต่างกัน อิเล็กตรอนวงในที่อยู่ใกล้นิวเคลียสจะได้รับพลังงานยึดเหนี่ยวมากกว่าอิเล็กตรอนวงนอก และธาตุที่มีเลขอะตอม (Z) สูงขึ้น จะมีพลังงานยึดเหนี่ยวต่ออิเล็กตรอนมากขึ้น ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 พลังงานยึดเหนี่ยวในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์ (eV) ของอิเล็กตรอนในแต่ละชั้น

ธาตุ	Z	K _I	L _I	L _{II}	L _{III}	M _I	M _{II}	M _{III}
C	6	284.2						
Al	13	1559.6	117.8	72.95	72.55			
Si	14	1839	149.7	99.82	99.42			
K	19	3608.4	378.6	297.3	294.6	34.8	18.3	18.3
Ca	20	4038.5	438.4	349.7	346.2	44.3	25.4	25.4
Cu	29	8979	1096.7	952.3	932.7	122.5	77.3	75.1
Zn	30	9659	1196.2	1044.9	1021.8	139.8	91.4	88.6

เมื่อยิงรังสีเอกซ์ อิเล็กตรอนหรือโปรตอนไปยังอะตอมของธาตุจะชนกับอิเล็กตรอนในวงโคจร และทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกไปจากอะตอม ทำให้ตำแหน่งนั้นว่าง อิเล็กตรอนในชั้นที่มีพลังงานสูงกว่าจะเข้ามาแทนที่ เช่น จากชั้น L ไปชั้น K จากชั้น M ไปชั้น K หรือจากชั้น M ไปชั้น L โดยคายพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานจำเพาะ (characteristic X-ray) ของแต่ละธาตุ

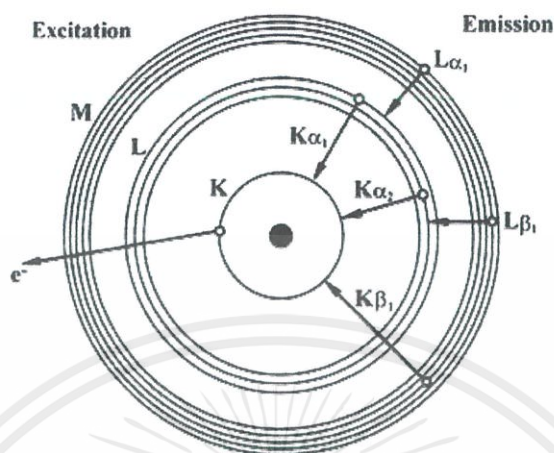


ภาพที่ 2.22 (a) รังสีเอกซ์พลังงานสูงทำให้อิเล็กตรอนในชั้น K หลุดออกไปจากวงโคจร
(b) อิเล็กตรอนในชั้น M ที่มีพลังงานสูงกว่าลงมาแทนที่โดยคายรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานจำเพาะออกมา

รังสีเอกซ์จำเพาะ (characteristic X-ray) ที่เกิดจากอิเล็กตรอนในชั้นที่สูงกว่าลงไปแทนที่ว่างในชั้น K เรียกว่า K radiation หรือ K X-ray และเรียกว่า L radiation หรือ L X-ray ถ้าเป็นรังสีเอกซ์ที่เกิดจากอิเล็กตรอนลงไปแทนที่ว่างในชั้น L โดยส่วนใหญ่อิเล็กตรอนที่หลุดออกไปจากวงโคจรจะเป็นอิเล็กตรอนในชั้น K ทำให้รังสีเอกซ์จำเพาะที่คายออกมา มีความเข้มของ K X-ray มากกว่า L X-ray

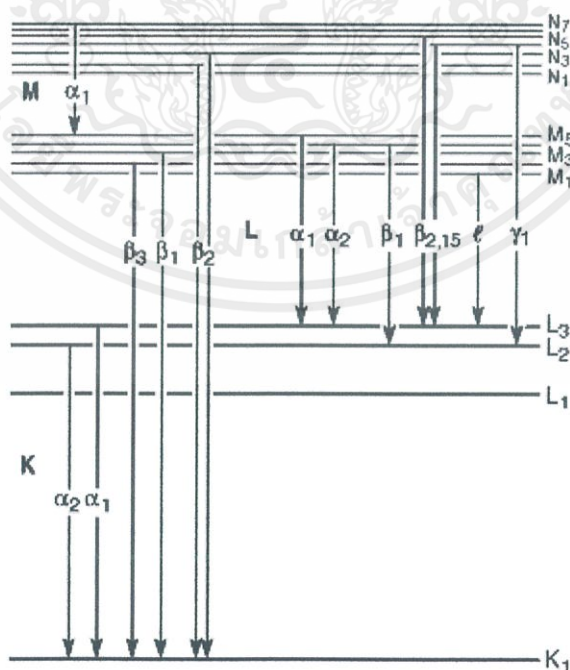
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รังสีเอ็กซ์จำเพาะจากอิเล็กตรอนในชั้นที่สูงกว่าหนึ่งระดับจะกำกับด้วยเครื่องหมาย α เช่น อิเล็กตรอนจากชั้น L ไป K = $K\alpha$ หรืออิเล็กตรอนจากชั้น M ไป L = $L\alpha$



ภาพที่ 2.23 สัญลักษณ์ของรังสีเอ็กซ์จำเพาะจากการเปลี่ยนชั้นของอิเล็กตรอน

รังสีเอ็กซ์จำเพาะจากอิเล็กตรอนในชั้นย่อยของแต่ละระดับที่ลงไปแทนที่ว่างจะกำกับด้วยหมายเลข เช่น อิเล็กตรอนจากชั้นย่อยของ LIII ไป K = $K\alpha_1$ และ LII ไป K = $K\alpha_2$ หรือ MV ไป LIII = $L\alpha_1$ และ MIV ไป LIII = $K\alpha_2$ นอกจากนี้ รังสีเอ็กซ์จากอิเล็กตรอนจากชั้นอื่นที่ลงมาแทนที่ จะมีเครื่องหมายและหมายเลขกำกับแตกต่างกัน เช่น $K\beta_1$, $K\beta_2$, $L\beta_1$, $L\beta_2$, $L\gamma_1$, $L\gamma_2$ ดังภาพที่ 2.24



ภาพที่ 2.24 สัญลักษณ์ของรังสีเอ็กซ์จำเพาะจากการเปลี่ยนชั้นของอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาชนิดของธาตุสามารถทำได้โดยการวิเคราะห์พลังงานของรังสีเอ็กซ์จำเพาะ ขณะที่การหาปริมาณธาตุสามารถทำได้โดยการวิเคราะห์ความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่คายออกมาตารางที่ 2.5 แสดงค่าของ absorption edge ของอิเล็กตรอนในชั้น K และชั้น L และค่าของพลังงานรังสีเอ็กซ์จำเพาะของแต่ละธาตุ

ตารางที่ 2.5 แอปซอร์บชันเอจ (absorption edge) และพลังงานของรังสีเอ็กซ์จำเพาะ (keV) ของธาตุ

Element	Z	Kabs	K α 1	K β 1	L-IIIabs	L α 1	L β 1
F	9	0.687	0.677				
Na	11	1.072	1.041	1.067			
Mg	12	1.305	1.253	1.295			
Al	13	1.559	1.486	1.553			
Si	14	1.838	1.740	1.829			
P	15	2.142	2.013	2.136			
S	16	2.472	2.307	2.464			
Cl	17	2.822	2.622				
Ar	18	3.202	2.957	3.190			
K	19	3.607	3.313	3.589			
Ca	20	4.038	3.691	4.012	0.346	0.341	0.345
Sc	21	4.496	4.090	4.460	0.403	0.395	0.400
Ti	22	4.965	4.510	4.931	0.454	0.452	0.458
V	23	5.465	4.951	5.426	0.513	0.511	0.519
Cr	24	5.989	5.414	5.946	0.574	0.573	0.583
Mn	25	6.540	5.898	6.489	0.641	0.637	0.649
Fe	26	7.112	6.403	7.057	0.709	0.705	0.718
Co	27	7.709	6.929	7.648	0.779	0.776	0.791
Ni	28	8.333	7.477	8.263	0.855	0.851	0.869
Cu	29	8.979	8.046	8.904	0.932	0.930	0.950
Zn	30	9.659	8.637	9.570	1.021	1.012	1.034
Sr	38	16.105	14.163	15.833	1.940	1.806	1.871
Zr	40	17.998	15.772	17.665	2.223	2.042	2.124
Ba	56	37.441	32.188	36.372	5.247	4.465	4.827
La	57	38.925	33.436	37.795	5.483	4.650	5.041
Ce	58	40.449	34.714	39.251	5.724	4.839	5.261
Nd	60	43.571	37.355	42.264	6.208	5.229	5.721
Hf	72	65.351	55.781	63.222	9.561	7.898	9.021
Pb	82	88.006	74.965	84.922	13.035	10.550	12.612
Th	90	109.646	93.334	105.591	16.300	12.967	16.199
U	92	115.036	98.422	111.281	17.167	13.612	17.217

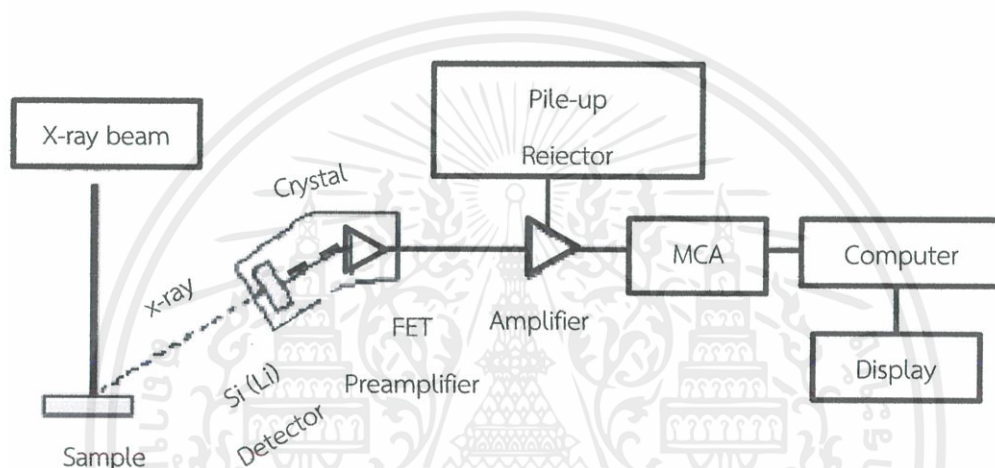
การวิเคราะห์โดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์โดยทั่วไปจะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมโดยใช้รังสีเอ็กซ์พลังงานสูงจากหลอดรังสีเอ็กซ์ (X-raytube) หรือไอโซโทปรังสี (radioisotope) ที่ให้รังสีเอ็กซ์หลอดรังสีเอ็กซ์ประกอบด้วยไส้หลอด (filament) ที่เป็นแคโทด (cathode) หรือขั้วลบ และแอโนด (anode) หรือขั้วบวกที่มีความต่างศักย์สูง (high voltage) ทำด้วยโลหะที่มีเลขอะตอมสูงและทนความร้อนได้ดี เช่น W Mo หรือ Rh เมื่อป้อนไฟฟ้าเข้าไป จะทำให้เกิดความร้อนที่แคโทดและมีอิเล็กตรอนหลุดออกมา ความต่างศักย์จะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้าชนแอโนดที่เป็นเป้า (target) และปล่อยรังสีเอ็กซ์แบบต่อเนื่องหรือเบรมสตราห์ล (Bremsstrahlung) ออกมาโดยมีความเข้ม (I) แปรผันตามกระแสไฟฟ้า (i) ศักย์ไฟฟ้า (V) และเลขอะตอม (Z) ของธาตุที่ใช้ทำแอโนดตามสมการที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I = kiZV^2 \quad (2.3)$$

โดย k เป็นค่าคงที่

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดรังสีเอ็กซ์โดยทั่วไปประกอบด้วยหัววัดรังสี(detector) ส่วนสร้างสัญญาณ (preamplifier) ส่วนขยายสัญญาณ (amplifier) ส่วนวิเคราะห์สัญญาณ (multichannel analyzer) หรือ MCA ประกอบกับคอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรมประมวลผลและแสดงผลการวิเคราะห์ดังภาพที่ 2.25



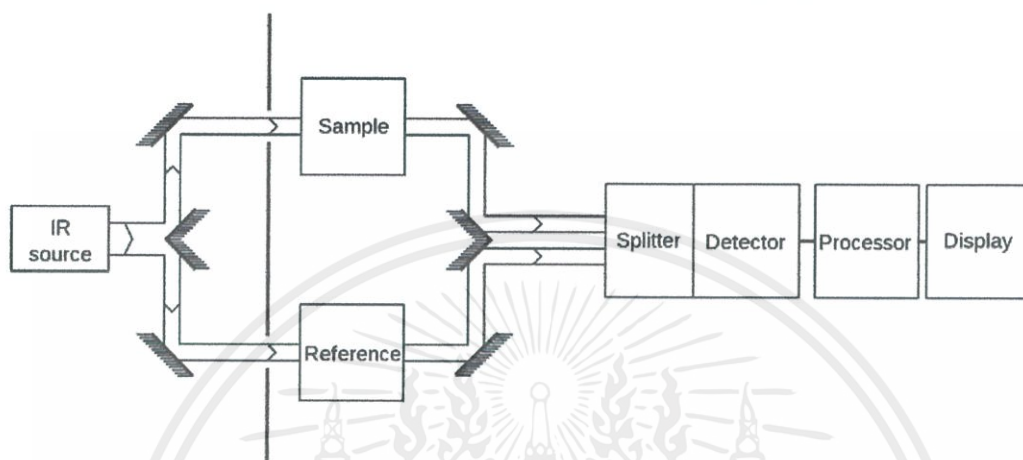
ภาพที่ 2.25 การจัดต่อประกอบอุปกรณ์การวิเคราะห์โดยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์

รังสีเอ็กซ์พลังงานสูงจากต้นกำเนิดรังสีเอ็กซ์แบบไอโซโทปหรือหลอดรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบตัวอย่างจะทำให้ธาตุที่อยู่ภายในตัวอย่างปลดปล่อยรังสีเอ็กซ์จำเพาะของแต่ละธาตุออกมาซึ่งแสดงผลการวัดเป็นแถบพลังงานหรือสเปกตรัมของรังสีเอ็กซ์ ตำแหน่งที่แสดงผลการวัดรังสีเอ็กซ์ของแต่ละธาตุเรียกว่าโฟโตพีค (photopeak) ซึ่งมีพื้นที่ของพีค (peak area) เป็นค่านับวัด (count) ของรังสีเอ็กซ์ที่มีค่าแปรผันตามปริมาณธาตุในตัวอย่าง

2.6.5 การวิเคราะห์จำแนกประเภทและพันธะเคมีด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared (FT-IR) [26]

หลักการ Fourier Transform Infrared (FT-IR) เป็นเทคนิคที่ใช้จำแนกประเภทของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์และพันธะเคมีในโมเลกุลรวมถึงสามารถบอกถึงปริมาณองค์ประกอบที่มีอยู่ในโมเลกุลของสารผสมตัวอย่างที่ไม่ทราบชนิด โดยทำการตรวจวัดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของตัวอย่างที่การสั่นความถี่ต่าง ๆ กัน ซึ่งมีความจำเพาะของแต่ละพันธะ การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิสูงกว่าศูนย์องศาสมบูรณ์อะตอมทุกตัวในโมเลกุลจะมีการสั่นอยู่ตลอดเวลาเมื่อความถี่ของเอกซเรย์เป็นเอกซเรย์ที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสั่นมีค่าเท่ากับความถี่ของรังสีอินฟราเรดที่ฉายมายังโมเลกุลและทำให้การดูดกลืนรังสีจำนวนแถบ การดูดกลืนทั้งหมดที่ได้จะมีค่าไม่เท่ากับการสั่นมูลฐานของโมเลกุลทั้งหมดโดยจะมีค่าลดลงเพราะมี บางแถบพลังงานที่ไม่มีการตอบสนองต่อพลังงานในช่วงรังสีอินฟราเรด ส่วนประกอบของเครื่องวัด ระบบ FT-IR มีส่วนประกอบหลักดังนี้



ภาพที่ 2.26 ส่วนประกอบและลำดับการทำงานของเครื่องตรวจวัดแหล่งกำเนิดรังสีของ Infrared Spectrometer คือ สารเฉื่อยที่ถูกทำให้ร้อนจนมีอุณหภูมิระหว่าง 1,000-1,800 องศาเซลเซียส [27]

หลักการทำงาน ตัวแยกรังสีแบบ Interferometer มีหน้าที่แยกลำรังสีออกทำให้เกิดทางเดินแสง (Path difference) ระหว่างลำแสงแล้วทำการรวมสัญญาณการแทรกสอดซึ่งที่เป็นฟังก์ชันกับทางเดินแสง โดยเครื่องตรวจวัด เครื่องตรวจวัดทำหน้าที่ประมวลผลจากสัญญาณการแทรกสอดที่ส่งผ่านมาจากตัวแยกรังสี รังสีอินฟราเรดจากแหล่งกำเนิดจะถูกฉายแสงไปยังอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ (Interferometer) ซึ่งเครื่องนี้ประกอบด้วยกระจกที่สามารถเคลื่อนที่ได้ กระจกที่ตรึงอยู่กับที่โดยทั้งสองตั้งฉากซึ่งกันและกันและตัวแยกแสงซึ่งเป็นอุปกรณ์กึ่งสะท้อนแสงลำรังสีครึ่งหนึ่งจะทะลุผ่านไปยังกระจกที่ตรึงอยู่กับที่และอีกครึ่งหนึ่งจะสะท้อนไปยังกระจกที่สามารถเคลื่อนที่ได้ หลังจากนั้นรังสีก็จะสะท้อนจากกระจกกลับมารวมกันที่ตัวแยกแสงเกิดการแทรกสอดขึ้น จากนั้นลำรังสีก็จะผ่านไปยังตัวอย่างและในที่สุดก็จะตกลงบนเครื่องตรวจวัด Path difference ระหว่างลำรังสีที่ถูกแยกออกจากกัน เกิดขึ้นจากระยะทางสัมพัทธ์ระหว่างกระจกทั้งสองข้างถ้าแขนยึดกระจกทั้งสองข้างของอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ยาวเท่ากัน ลำรังสีทั้งสองจะเดินทางมาด้วยระยะทางที่เท่ากันมีเฟสตรงกัน ทำให้สัญญาณที่ไปถึงเครื่องตรวจวัดมีค่ามากที่สุด เมื่อกระจกเคลื่อนที่เป็นระยะทาง $\lambda/4$ ระยะทางเดินของรังสีจะเปลี่ยนเป็น $\lambda/2$ รังสีทั้งสองมีเฟสต่างกัน 180 องศา การแทรกสอดจะอยู่ในตำแหน่งหักล้างเมื่อเคลื่อนกระจกเป็นระยะทางอื่น ระยะทางเดินของรังสีจะเปลี่ยนเป็น $\lambda/4$ รังสีทั้งสองจะกลับมามีเฟสตรงกันเมื่อกระจกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ความเข้มเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของสัญญาณที่เครื่องตรวจวัดได้จะมีลักษณะของ interferogram เป็นรูปคลื่นไซน์ โดยกราฟจะพล็อตระหว่างการตอบสนองที่เครื่องตรวจวัดบันทึกได้และเวลาที่กระจกมีการเคลื่อนที่ ถ้าตัวอย่างเกิดการดูดกลืนที่ค่าความถี่นี้ขนาดของแอมพลิจูดจะลดลงโดยสัมพันธ์กับปริมาณของตัวอย่างหลังจากนั้นใช้ Fourier Transform ซึ่งเป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ในการแปลงผลที่ได้ (ขึ้นกับเวลา) ให้กลายเป็นค่าความเข้มกับความถี่

2.6.6 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer ; XRD)

ในการวิเคราะห์วัสดุต่าง ๆ เพื่อหาปริมาณและชนิดของสารประกอบแบบผลึกหรือแม้กระทั่งการศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับผลึกของสารตัวอย่างนั้น ๆ นิยมใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เนื่องจากผลึกในวัสดุแต่ละชนิดนั้นมีขนาดของหน่วยเซลล์ (unit cell) ไม่เท่ากันทำให้รูปแบบของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในผลึกแต่ละชนิดต่างกัน นอกจากนี้ยังสามารถใช้เพื่อคำนวณหาปริมาณขององค์ประกอบต่าง ๆ ที่อยู่ภายในวัสดุความเป็นผลึกของตัวอย่างได้อีกด้วย โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์นี้อาศัยกฎของแบรกก์ (Bragg's law) ดังสมการ

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (2.4)$$

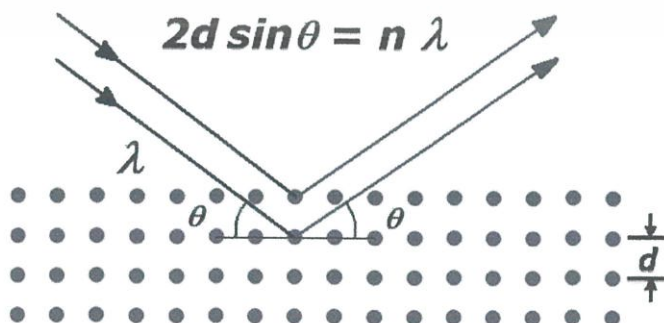
โดยที่ d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก

θ คือ มุมของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบ

n คือ จำนวนเต็มใดๆ

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ มีค่าเท่ากับ 1.54 อังสตรอม

เมื่อรังสีเอ็กซ์ตกกระทบลงบนพื้นผิวของวัตถุหรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของรังสีสะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบดังแสดงในภาพ 2.27



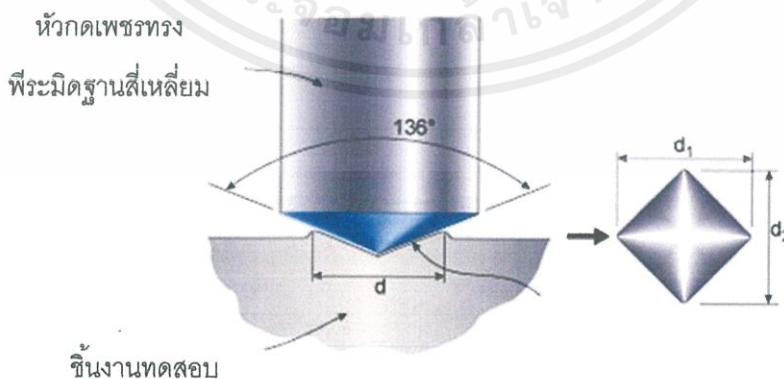
ภาพที่ 2.27 แสดงการตกกระทบของรังสีเอ็กซ์ [28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.7 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test) [29]

ในการตรวจวัดความแข็งของวัสดุ วิธีหนึ่งที่ยอมรับ คือ การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ วิธีนี้จะใช้หัวกดเพชรทรงพีรามิดมุม 130 °C ฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสกดลงบนผิวชิ้นงาน หลักการทำงาน คือ กดหัวกดเพชรลงบนผิวชิ้นงานทดสอบด้วยแรงกด F ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 1–120 kgf โดยกดลงตั้งฉากกับผิวชิ้นงาน การเคลื่อนที่ของหัวกดที่กดลงบนชิ้นงานจะใช้เวลา 15 วินาที แต่จะคงค่าแรงกดไว้อีกระยะหนึ่งขึ้นกับชนิดของวัสดุ เช่น เหล็กกล้าคงแรงกดไว้ประมาณ 10 วินาที ในขณะที่วัสดุอ่อนจะคงแรงกดไว้นานกว่า เมื่อหัวกดถูกยกขึ้นรอยกดที่เกิดขึ้นจะถูกวัดขนาดโดยการวัดเส้นทแยงมุม d_1 และ d_2 ด้วยความละเอียดการวัด 0.002 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 2.28 ค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุม (d) จะถูกนำไปคำนวณค่าความแข็งดังนี้ เช่นเดียวกับการวัดความแข็งแบบบริเนลล์ ค่าความแข็งจะถูกคำนวณไว้แล้วว่าที่ความยาวรอยกดและรอยกดขนาดต่าง ๆ ในรูปของตารางหรืออาจมีการแสดงค่าความแข็งด้วยระบบอัตโนมัติเป็นตัวเลขจากเครื่องทดสอบโดยตรงหน่วยความแข็งคือ HV หรือ VHN แสดงความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\begin{aligned} \text{ความแข็งวิกเกอร์} &= \frac{\text{แรงกด}}{\text{พื้นที่ผิวรอยกด}} \\ &= \frac{0.101F \times 2 \cos 22^\circ}{d^2} \\ &= \frac{0.189F}{d^2} \end{aligned}$$



ภาพที่ 2.28 หัวกดความแข็งแบบวิกเกอร์ [30]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดีของการทดสอบแบบวิกเกอร์ หัวกดมีขนาดเล็กและแรงกดที่ใช้ต่ำ รอยกดจึงอาจมีขนาดเล็กกว่าเกรนของโลหะ จึงสามารถวัดความแข็งได้ถึงระดับโครงสร้างจุลภาค เหมาะกับงานทดสอบที่ต้องการความละเอียดของค่าความแข็งสูง สามารถทดสอบได้ทั้งวัสดุอ่อนและวัสดุแข็ง

ข้อเสียของการทดสอบแบบวิกเกอร์ ต้องเตรียมผิวชิ้นงานให้เรียบและสะอาดมากในระดับที่สามารถส่องดูผิวเรียบภายใต้กำลังขยาย 40 เท่าได้โดยไม่ต้องไม่มีคราบน้ำมัน รอยขีดข่วนหรือฟิล์มออกไซด์อยู่บนผิวชิ้นงานทดสอบ

ข้อจำกัดของการทดสอบแบบวิกเกอร์ ความหนาของชิ้นงานทดสอบไม่ควรน้อยกว่า 1.2 เท่าของเส้นทแยงมุมรอยกด ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางรอยกดกับขอบชิ้นงานทดสอบหรือขอบของรอยกด ควรมีขนาดไม่น้อยกว่า 3 เท่าของความยาวเส้นทแยงมุมเฉลี่ยของรอยกด

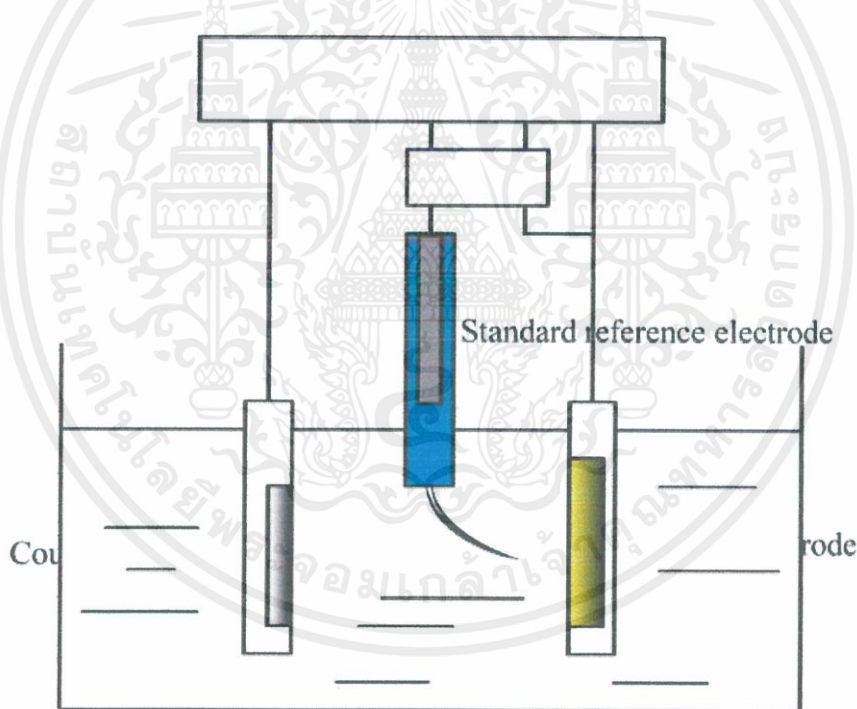
2.6.8 การทดสอบการต้านทานต่อการกัดกร่อนของโลหะ (Corrosion Test) [31]

การกัดกร่อน (corrosion) ของโลหะสามารถเกิดขึ้นได้ตลอดเพราะเป็นพฤติกรรมธรรมชาติของโลหะ เมื่อเกิดขึ้นแล้วย่อมทำให้เกิดความเสียหายได้ทั้งในด้านทรัพย์สิน เศรษฐกิจ ถ้าเราสามารถประเมินความเสียหายจากการกัดกร่อนของโลหะได้ก่อนก็จะช่วยยับยั้งความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในอนาคต การประเมินอัตราการกัดกร่อนของโลหะ สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การทดสอบการกัดกร่อนโดยการฝังในบรรยากาศ การทดสอบความทนละอองน้ำเกลือ การใช้คู่มือการกัดกร่อน การทดสอบด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้าโดยประเมินผลการกัดกร่อนจากเส้นโค้งโพลาไรเซชัน (polarization curve) ที่ช่วยลดปัญหาที่จะเกิดขึ้นได้

การทดสอบการกัดกร่อนของโลหะโดยเทคนิคเคมีไฟฟ้า (electrochemical technique) เป็นวิธีหนึ่งซึ่งช่วยประเมินอัตราการกัดกร่อนได้ดีและเร็ว และเป็นการจำลองการเกิดกระบวนการกัดกร่อนของโลหะ โดยปกติแล้วการเกิดการกัดกร่อนเป็นปฏิกิริยาทางกายภาพของโลหะกับสภาพแวดล้อมรอบๆ โลหะ ซึ่งเกิดจากการถ่ายเทประจุไฟฟ้าหรือแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนในสารละลายของน้ำ เรียกว่า ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า (electrochemical reaction) การเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของการกัดกร่อนเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน เมื่อน้ำหรือสารละลายที่สัมผัสกับโลหะ หลักการของการทดสอบการกัดกร่อนโลหะโดยใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้า คือการป้อนศักย์ไฟฟ้าเร่งการกัดกร่อน โดยใช้เครื่อง potentiostat/galvanostat ในสถานะที่มีสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ทำหน้าที่เป็นทางเดินของไอออน และเป็นการเชื่อมต่อเซลล์เคมีไฟฟ้า (electrochemical cell) ดังภาพที่ 2.29 ทำให้เราสามารถคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนได้

เซลล์เคมีไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบการกัดกร่อนของโลหะมีส่วนประกอบดังนี้

1. ขั้วทำงาน (working electrode หรือ specimen electrode) เป็นขั้วแอโนด ก็คือชิ้นตัวอย่างทดสอบ เป็นขั้วที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและให้อิเล็กตรอน
2. ขั้วมาตรฐานอ้างอิง (standard reference electrode) เป็นขั้วแคโทด (cathode) ที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันและรับอิเล็กตรอน เช่น SCE (saturated calomel electrode) หรือ Ag/AgCl ที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่
3. ขั้วอิเล็กโทรดกระแส (counter electrode) มักจะใช้โลหะที่เสถียร เช่น แพลตินัมหรือกราไฟต์ หรือ เหล็กกล้าไร้สนิม
4. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) ซึ่งเป็นทางเดินของไอออน และเซลล์ไฟฟ้าเคมีแสดงดังภาพที่ 2.29



ภาพที่ 2.29 เซลล์เคมีไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบการกัดกร่อน [32]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงสารเคมี วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับกระบวนการเตรียมชิ้นงานคอมโพสิตระหว่างอีพอกซีเรซิน (Epoxy Resin) กับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ด้วยกระบวนการหล่อ (casting) และกระบวนการขึ้นรูปเป็นฟิล์มโดยการเทเคลือบบนผิวโลหะ (pour) รวมไปถึงเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ปริมาณธาตุในวัสดุผสม สมบัติทางกายภาพ เช่น ความแข็งแรง การทนต่อการเสียดสีและการทนต่อการกัดกร่อน เป็นต้น โดยขั้นตอนการทดลองทั้งหมดได้แสดงไว้เป็นแผนผังดังภาพที่ 3.1 และ 3.2 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 ขวดชา “Fuku matcha”
- 3.1.4 เอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$) ความบริสุทธิ์ 95%
- 3.1.5 น้ำกลั่น (DI Water)

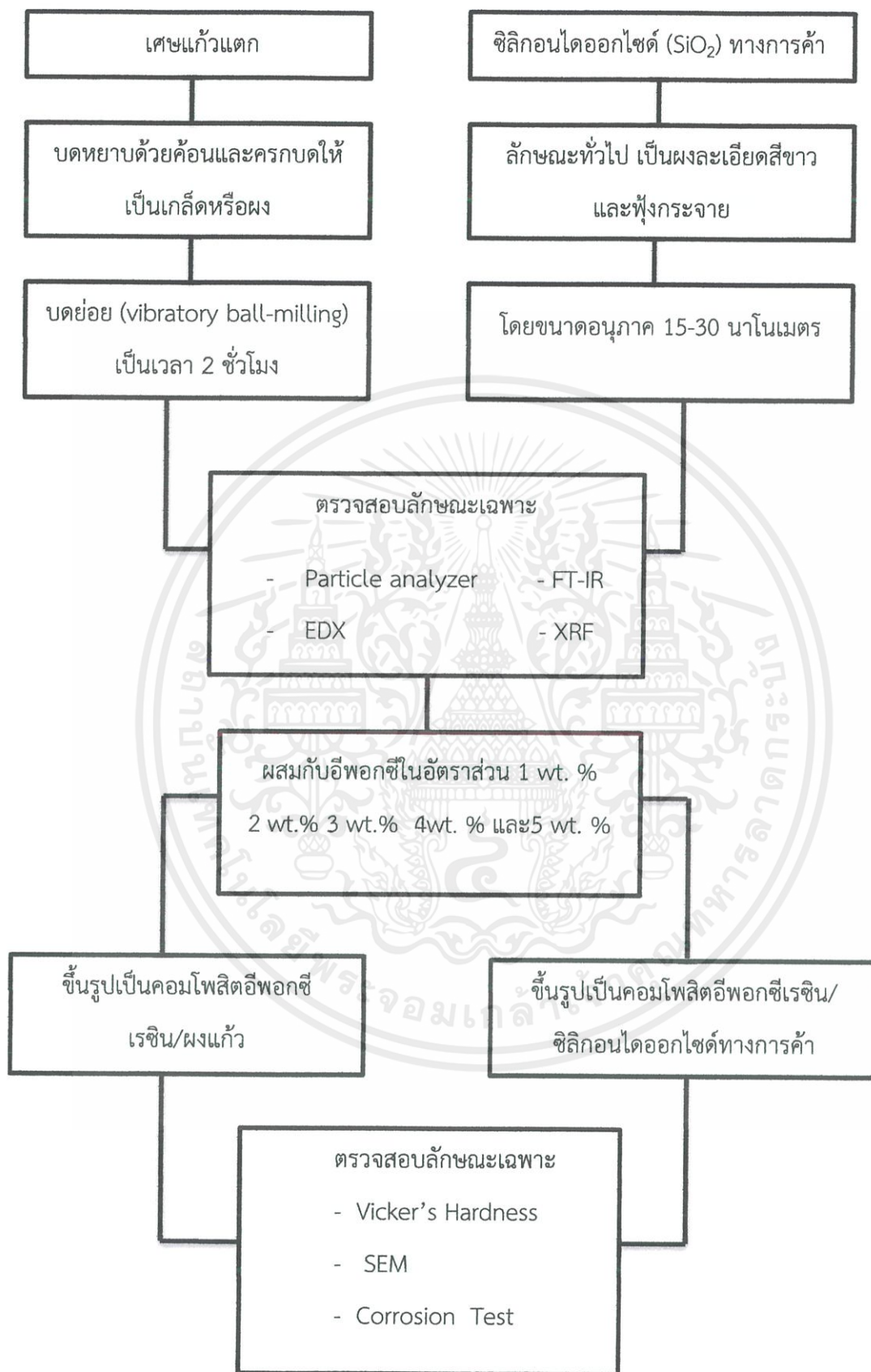
3.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้

- 3.2.1 เครื่องตรวจสอบขนาดอนุภาค (Particle Analyzer) ยี่ห้อ Beckman Coulter รุ่น DelsaNano C ผลิตโดยประเทศออสเตรเลีย
- 3.2.2 เครื่องตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer) ยี่ห้อ Phillips รุ่น X’Pert MPD ผลิตโดยบริษัท Phillips ประเทศฮอลแลนด์
- 3.2.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) รุ่น JSM-6335F ผลิตโดยบริษัท JEOL ประเทศญี่ปุ่น
- 3.2.4 เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence Spectroscopy)
- 3.2.5 เครื่องทดสอบความแข็งวิกเกอร์ส (Micro Hardness Test) ยี่ห้อ SHIMADZU
- 3.2.6 เครื่องตรวจสอบปริมาณองค์ประกอบของธาตุ (Fourier Transform Infrared ยี่ห้อ PerkinElmer UART Two

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

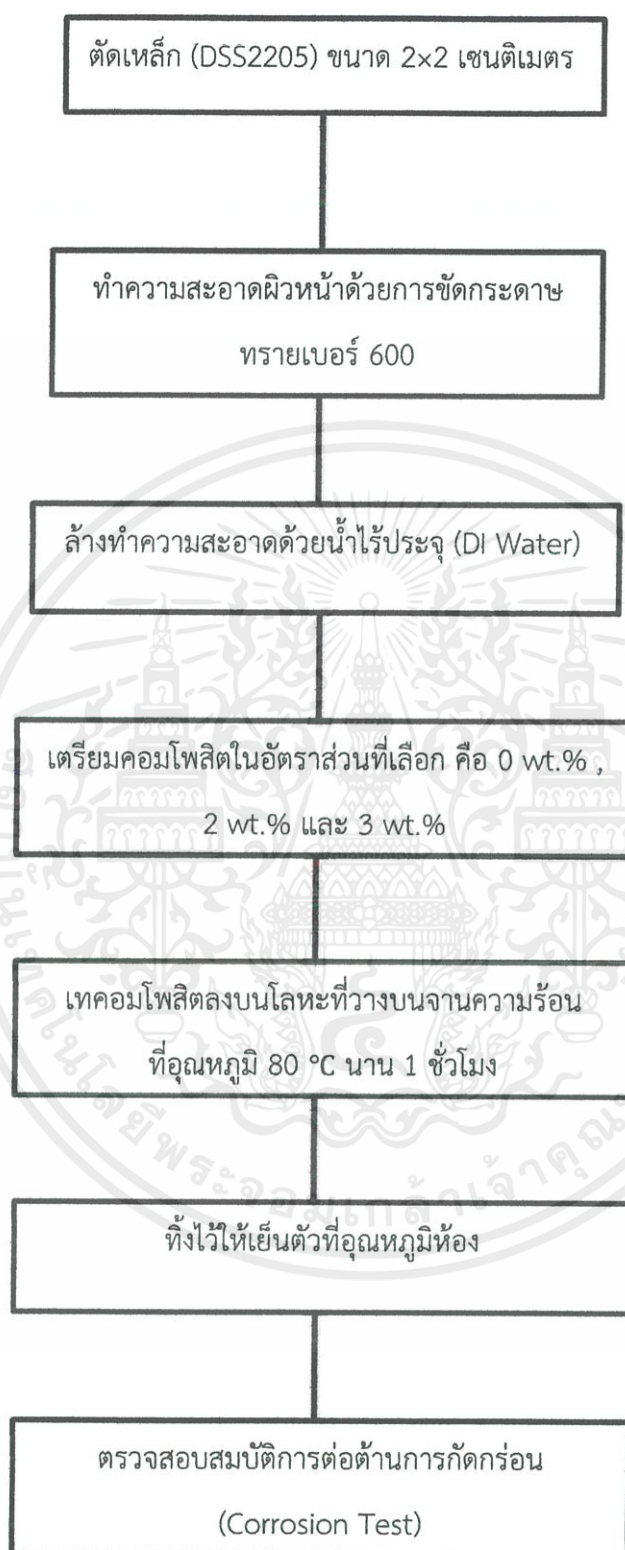
- 3.2.7 เครื่องวิเคราะห์หาธาตุต่าง ๆ (Energy Dispersive X-ray Spectrometer)
- 3.2.8 เครื่องบดย่อยสารแนวตั้งด้วยลูกบอล (Vibrational ball-milling)
- 3.2.9 ลูกบดเซอร์โคเนีย (ZrO_2) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร
- 3.2.11 เครื่องอัดแกนเดี่ยวด้วยระบบไฮดรอลิก (hydraulic uniaxial pressing)
- 3.2.12 ตู้อบสาร
- 3.2.13 เครื่องชั่งดิจิตอล
- 3.2.14 เวอร์เนียคาร์ลิเปอร์ (electronic digital calipers)
- 3.2.15 ช้อนตักสาร
- 3.2.16 ปีกเกอร์ขนาด 1000 600 250 และ 50 มิลลิตร
- 3.2.17 ตะแกรงร่อน
- 3.2.18 หลอดหยดสาร (dropper)
- 3.2.19 คีมคีบ (forceps)
- 3.2.20 แก้วกระดาษขนาดเล็ก (ใช้ในการผสมเรซิน)
- 3.2.21 กระดาษฟอยล์ (อลูมิเนียม)
- 3.2.22 กระดาษทิชชู
- 3.2.23 กระดาษทรายเบอร์ 400 600 800 และ 1000
- 3.2.24 ขวดพลาสติก
- 3.2.25 ขวดสำหรับใส่เอทานอล
- 3.2.26 ถุงซิปล็อคขนาดต่าง ๆ
- 3.2.27 นาฬิกาจับเวลา
- 3.2.28 ครกหยก
- 3.2.29 แม่แบบสำหรับหล่อเรซิน
- 3.2.30 เจลวาสลิน
- 3.2.31 เครื่องให้ความร้อน (Hot plate)
- 3.2.32 เครื่องสั่นสะเทือน (ultrasonic cleaner)
- 3.2.33 เทปทองแดง (Cu tape)
- 3.2.34 เทปสีดำพันท่อ
- 3.2.35 หลอดทดลองแบบมีฝาปิด
- 3.2.36 กรรไกร
- 3.2.37 ค้อน (สำหรับการบดแก้ว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.1 แผนผังการเตรียมคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับเฟสเสริมแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



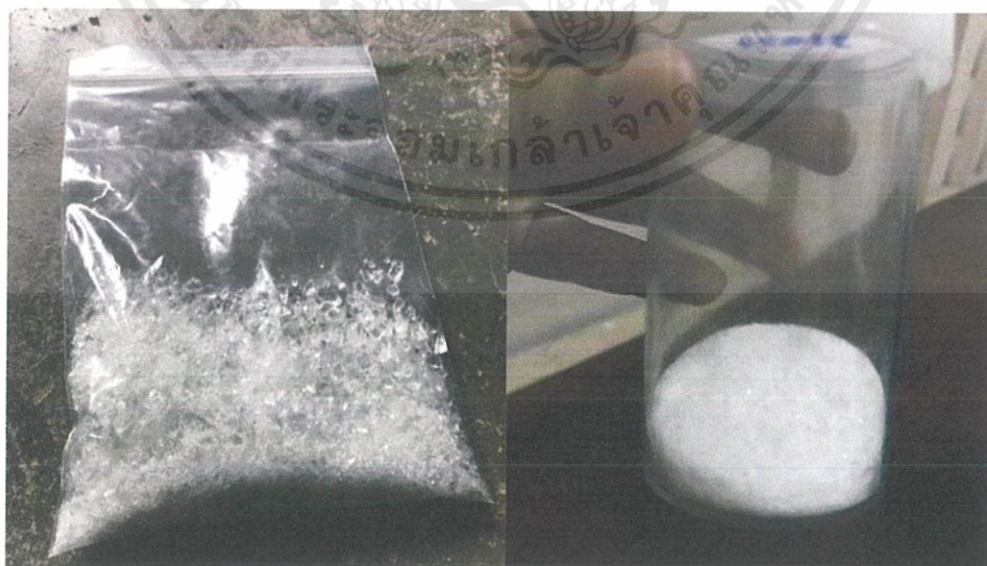
ภาพที่ 3.2 แผนผังการเตรียมผิวเคลือบคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับเฟสเสริมแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 กระบวนการบดหยาบและบดย่อยเศษแก้ว (glass powder)

การเตรียมผงแก้วจากเศษแก้วประเภทโซดาไลม์ (Sodalime)

ในการเตรียมผงจากเศษแก้วนั้นเริ่มจากนำเศษแก้วมาบดหยาบเพื่อให้มีขนาดเล็กพอสมควร มองเห็นด้วยตาเปล่าจะมีลักษณะเป็นผงหรือเกล็ด (แสดงดังภาพที่ 3.3) จากนั้นนำผงแก้วที่ผ่านการบดหยาบแล้ว ไปเข้าสู่กระบวนการบดย่อย (vibratory ball-milling) (แสดงดังภาพที่ 3.4) โดยนำผงแก้วเทลงขวดพลาสติกที่บรรจุด้วยลูกบดเซอร์โคเนีย (ZrO_2) (แสดงดังภาพที่ 3.5) จากนั้นเติมเอทานอลลงไปเพื่อช่วยในการกระจายตัวของผงแก้ว ปิดฝาขวดให้สนิท พันด้วยเทปกาวสีดำบริเวณฝาเกลียวเพื่อป้องกันการรั่วซึมและนำไปบดย่อยด้วยเครื่องบดย่อยเป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากครบกำหนดเวลาแล้วจึงนำของเหลวที่มีส่วนผสมของผงแก้ว เอทานอลและลูกบดเซอร์โคเนียออกมาล้างเพื่อแยกสารที่ต้องการออก โดยทำการล้างด้วยเอทานอลและเทลูกบดใส่ตะแกรงกรองสาร (แสดงดังภาพที่ 3.6) ทำการล้างจนกระทั่งไม่มีสารติดอยู่ที่ลูกบด นำสารที่มีส่วนผสมของผงแก้วและเอทานอล เทใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส (แสดงดังภาพที่ 3.7) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อระเหยเอทานอลออกเหลือไว้เพียงเนื้อสารที่ต้องการ นอกจากนี้แล้วการอบยังช่วยให้สารแห้งและปราศจากความชื้นอีกด้วย เมื่อสารแห้งสนิทแล้วนำสารออกจากตู้อบแล้วนำสารบรรจุในถุงซิปล็อคและเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้นเพื่อป้องกันความชื้น (แสดงดังภาพที่ 3.8 และ 3.9)

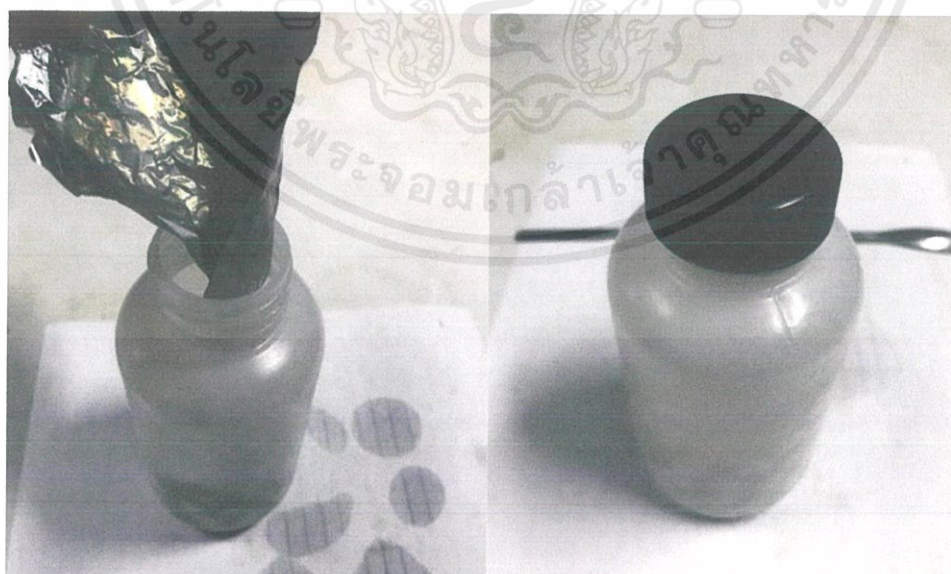


ภาพที่ 3.3 ผงแก้วที่ผ่านการบดหยาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

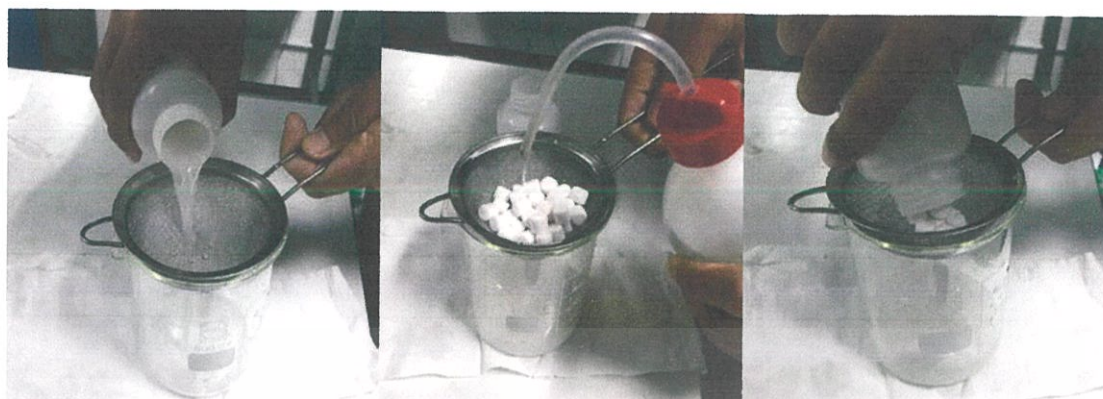


ภาพที่ 3.4 เครื่องบดย่อยแนวตั้งด้วยลูกบอล

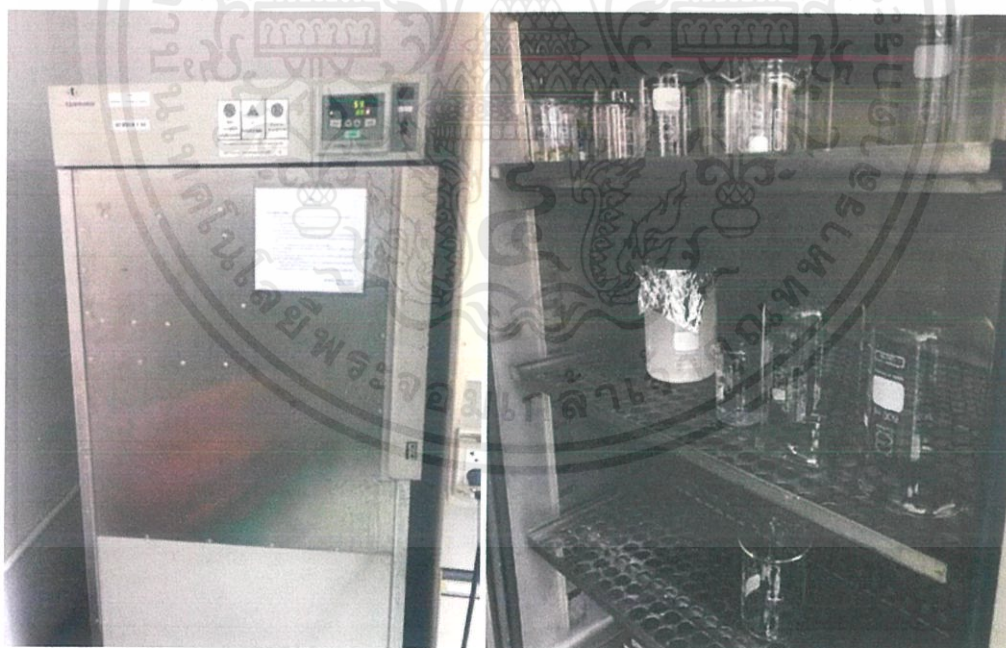


ภาพที่ 3.5 การเตรียมผงแก้วเพื่อนำไปบดย่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

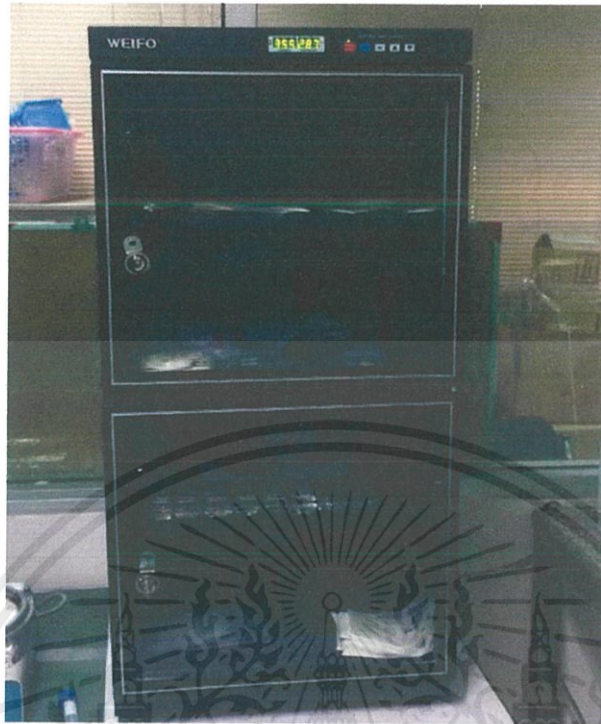


ภาพที่ 3.6 การแยกสารที่ต้องการออกจากขวดและลูกบิด

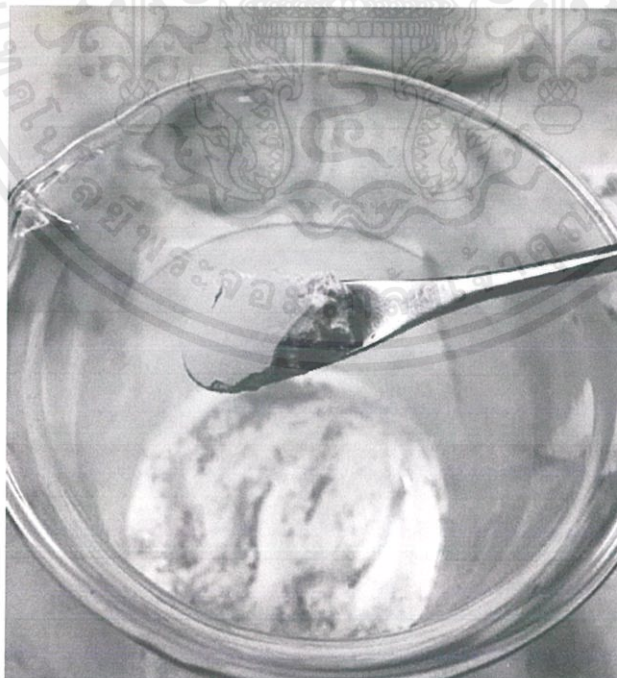


ภาพที่ 3.7 ตู้อบสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.8 ตู้ดูดความชื้น



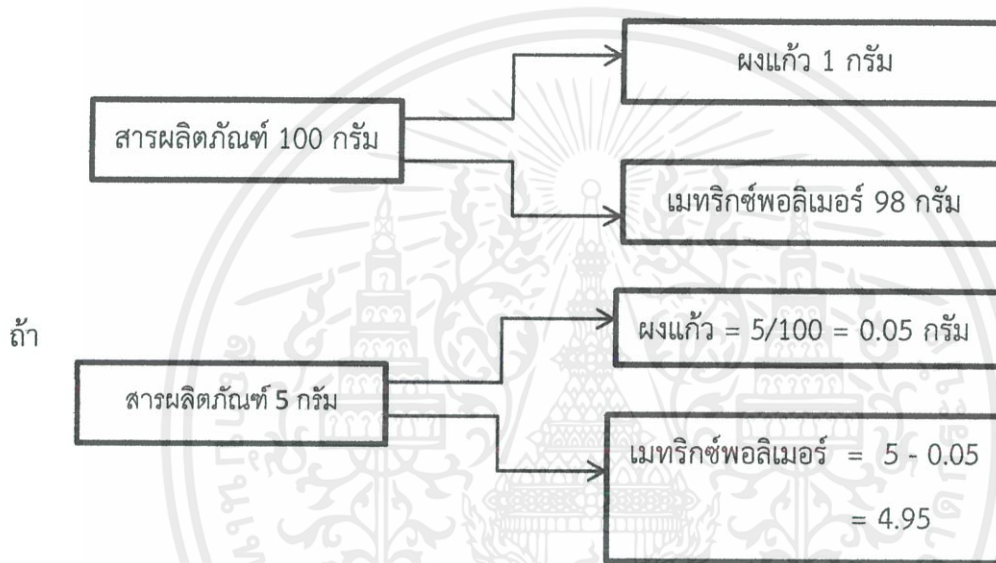
ภาพที่ 3.9 ลักษณะของผงแก้วหลังผ่านกระบวนการบดย่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

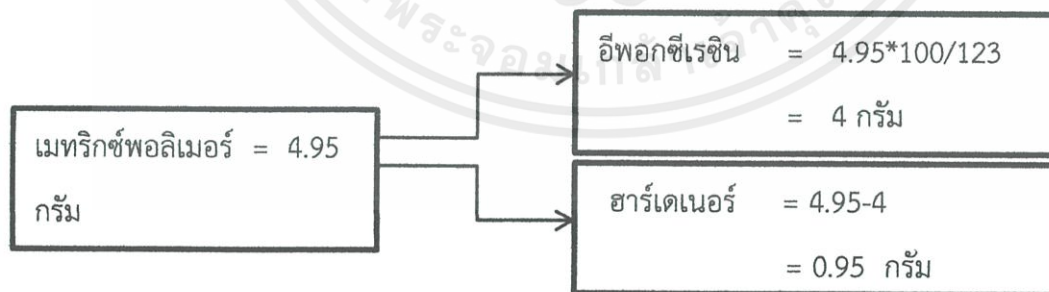
3.4 กระบวนการเตรียมอีพอกซีเรซิน

ในการหล่ออีพอกซีเรซิน เริ่มจากการคำนวณอัตราส่วนของอีพอกซีเรซิน (Epoxy Resin) กับ สารเชื่อมโยง (hardener) โดย ณ ทีนี้กำหนดให้ส่วนผสมทั้งหมดเท่ากับ 5 กรัม สำหรับการหล่ออีพอกซีแบบดั้งเดิม และ 4 กรัม สำหรับการเคลือบบนผิวโลหะ ในส่วนของอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ และผงแก้วที่เจือลงไปอีพอกซีเรซิน มีอัตราส่วน คือ 1 wt. % 2 wt.% 3 wt.% 4 wt.% และ 5 wt.% ตามลำดับ แสดงการคำนวณดังนี้

- อัตราส่วน 1 wt. % สามารถเทียบบัญญัติได้ตรงๆ ดังนี้



อัตราส่วนอีพอกซีเรซิน : ฮาร์ดเดนเนอร์ เท่ากับ 100 : 23 ส่วน



อัตราส่วน 1 wt.% มีปริมาณ/น้ำหนักดังนี้

- อีพอกซีเรซิน 4 กรัม
- ฮาร์ดเดนเนอร์ 0.95 กรัม
- ซิลิกอนไดออกไซด์ 0.05 กรัม

อัตราส่วน 2 wt. % มีปริมาณ/น้ำหนักดังนี้

- อีพอกซีเรซิน 3.98 กรัม
- ฮาร์ดเดนเนอร์ 0.92 กรัม
- ซิลิกอนไดออกไซด์ 0.1 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วน 3 wt.% มีปริมาณ/น้ำหนักดังนี้

- อีพอกซีเรซิน 3.94 กรัม
- ฮาร์ดเดเนอร์ 0.91 กรัม
- ซิลิกอนไดออกไซด์ 0.15 กรัม

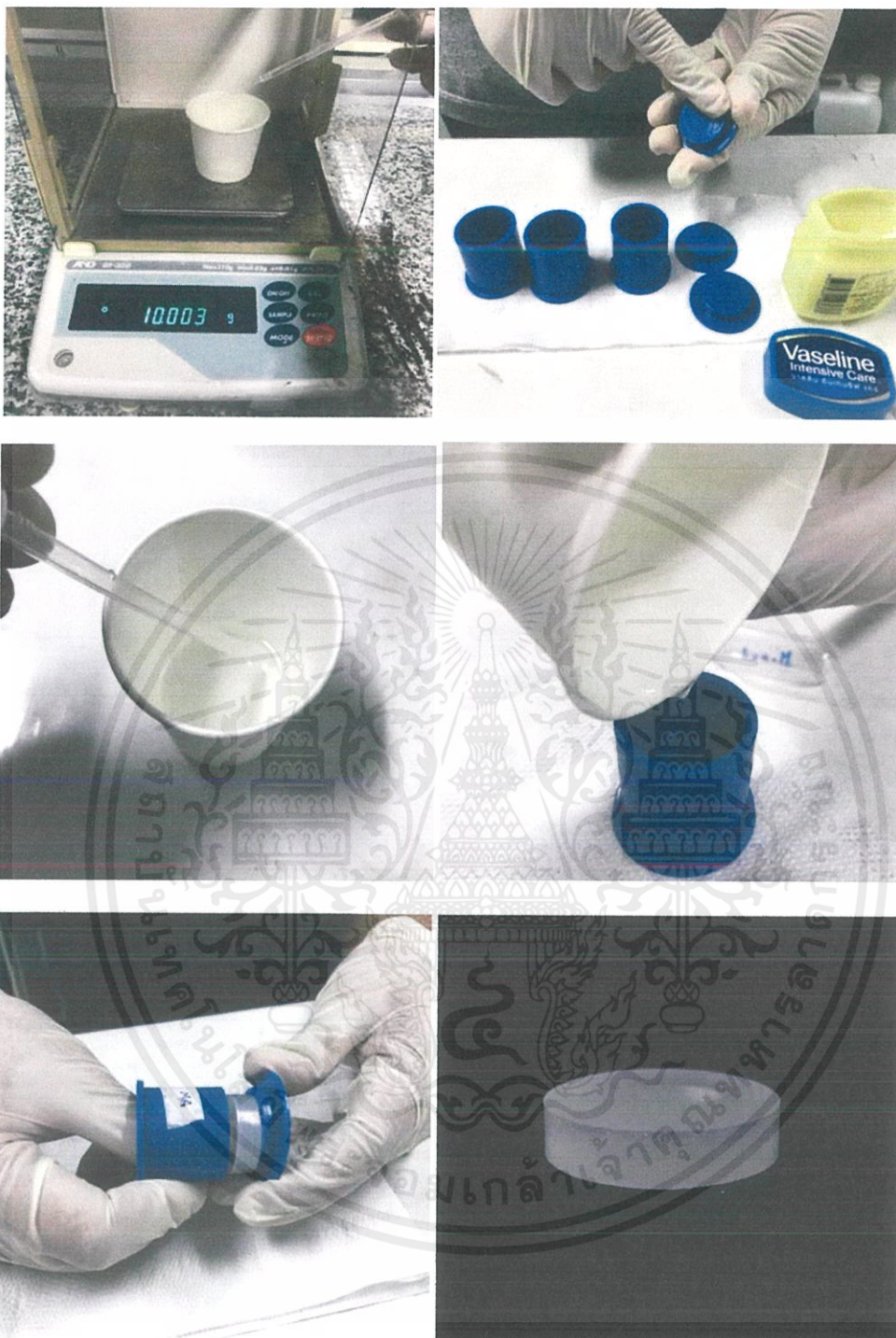
อัตราส่วน 4 wt. % มีปริมาณ/น้ำหนักดังนี้

- อีพอกซีเรซิน 3.90 กรัม
- ฮาร์ดเดเนอร์ 0.90 กรัม
- ซิลิกอนไดออกไซด์ 0.20 กรัม

อัตราส่วน 5 wt. % มีปริมาณ/น้ำหนักดังนี้

- อีพอกซีเรซิน 3.86 กรัม
- ฮาร์ดเดเนอร์ 0.89 กรัม
- ซิลิกอนไดออกไซด์ 0.25 กรัม

จากนั้นทำการผสมสารทั้งสององค์ประกอบในทุกสัดส่วนตามที่คำนวณได้ เพื่อเตรียมเป็นชิ้นงานคอมโพสิตด้วยเทคนิคการหล่อแบบดั้งเดิม (conventional casting) ซึ่งเป็นเทคนิคการขึ้นรูปเรซินจากแม่แบบหรือแม่พิมพ์ ในงานวิจัยนี้ใช้แม่แบบพีวีซีสำเร็จรูปและมีขั้นตอนดังนี้ คือ ทำการชั่งอีพอกซีเรซิน ฮาร์ดเดเนอร์และผงแก้วในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่คำนวณไว้ และเตรียมแม่แบบโดยทำความสะอาดด้วยเอทานอลและทาวาสลินให้ทั่ว เพื่อให้ง่ายต่อการนำชิ้นงานออกจากแม่แบบ จากนั้นผสมอีพอกซีเรซินกับฮาร์ดเดเนอร์ลงในถ้วยกระดาษและใช้หลอดดูดสารคนเบา ๆ และคนให้ทั่ว จับเวลา 2 นาที เมื่อครบกำหนดเวลาให้ทำการเติมผงแก้วที่ชั่งไว้ลงไปและคนอีกครั้ง จับเวลา 4 นาที จากนั้นเมื่อครบกำหนดเวลาแล้วให้เทสารลงในแม่แบบที่เตรียมไว้ โดยค่อย ๆ เทและใช้หลอดดูดสารช่วยกวาดสารที่ติดอยู่ที่ภาชนะลงให้ได้มากที่สุด เพื่อที่จะได้น้ำหนักตามที่ต้องการ เมื่อชิ้นงานแข็งตัวแล้วให้นำชิ้นงานออกจากแม่แบบ โดยขั้นตอนทั้งหมดได้แสดงไว้ในภาพที่ 3.11 จากนั้นทำการเตรียมคอมโพสิตระหว่างอีพอกซีเรซินกับผงนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้าในสัดส่วนและวิธีการเดียวกันเพื่อใช้เป็นชุดเปรียบเทียบ

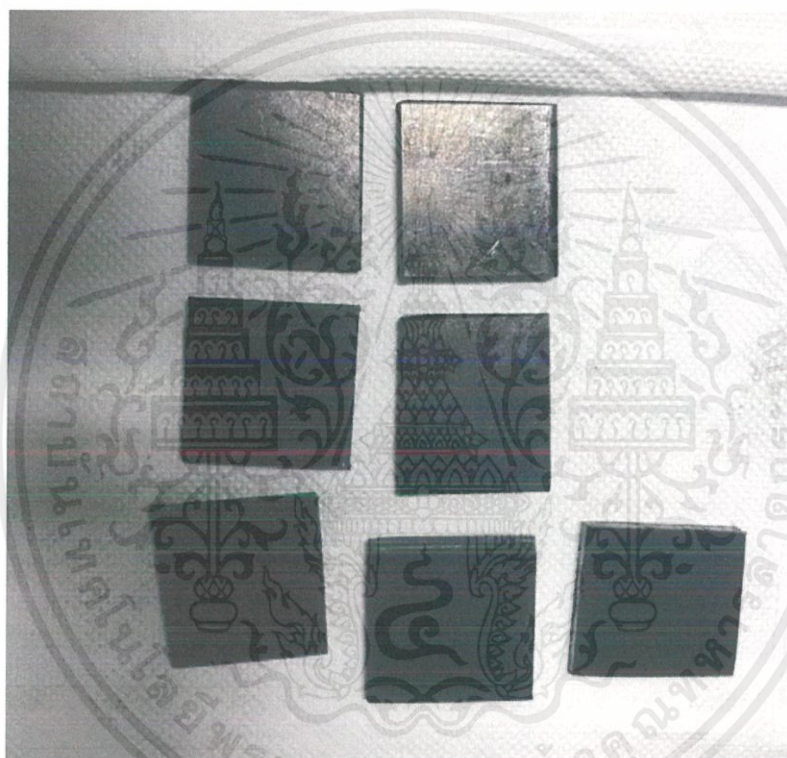


ภาพที่ 3.11 ขั้นตอนการขึ้นรูปด้วยเทคนิคการหล่อแบบดั้งเดิม (conventional casting)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การเตรียมผิวเคลือบคอมโพสิตอีพอกซี/ผงแก้ว

ทำการตัดชิ้นโลหะ (DSS 2205) ความหนา 4 มิลลิเมตร ตัดให้มีขนาด 2×2 เซนติเมตร และทำความสะอาดผิวหน้าโลหะด้วยการขัดกระดาษทรายน้ำ ใช้กระดาษทรายเบอร์ 600 จากนั้นทำการล้างด้วยน้ำไร้ประจุ (DI water) และใช้ไดร์เป่าให้แห้งปราศจากความชื้น จากนั้นเลือกคอมโพสิตอีพอกซีเรซิน/ผงแก้ว ในสัดส่วนที่ให้ความแข็งแรงสูงสุดมา 3 สัดส่วน แล้วทำการเคลือบลงบนแผ่นโลหะด้วยเทคนิคการเท



ภาพที่ 3.12 ชิ้นโลหะขนาด 2×2 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.13 การทำความสะอาดผิวหน้าโลหะด้วยกระดาษทราย

โดยการเคลือบผิวจะใช้วิธีการเทคอมโพสิตที่เตรียมได้ ในขั้นตอนนี้ใช้ขนาด 4 กรัม ลงบนชิ้นโลหะที่วางอยู่บนจานความร้อน (Hot plate) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสในระบบปิด ทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง ในสัดส่วนของผงนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ ก็ทำการเลือกสัดส่วนที่เหมาะสมแล้วนำมาเคลือบบนผิวโลหะด้วยวิธีการเดียวกัน



ภาพที่ 3.14 การเคลือบผิวโลหะด้วยคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับเฟสเสริมแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเรซินด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ; SEM)

นำอนุภาคนาโนซิลิกอนไดออกไซด์และผงแก้วที่เตรียมจากเศษแก้วแตกที่ผ่านกระบวนการบดย่อย (vibrational ball-milling) มาตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาใช้ประกอบการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบ โครงสร้างจุลภาคของอนุภาคที่สกัดขึ้น โดยนำอนุภาคทั้ง 2 ได้แก่ อนุภาคนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และผงแก้ว (glass powder) ไปผ่านกระบวนการเตรียมชิ้นงานที่จะนำไปถ่ายภาพ SEM โดยเตรียมตัวอย่างโดยใช้วิธีการ “Cu tape” จากนั้นนำชิ้นงานไปติดบนแท่งทองเหลือง (stub) ด้วยเทปคาร์บอนสองหน้า โดยจัดชิ้นตัวอย่างให้วางตัวในแนวที่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM จากนั้นนำแท่งทองเหลือง (stub) ที่มีตัวอย่างชิ้นงานติดอยู่ด้านบนไปเคลือบผิวหน้าด้วยโลหะทอง (Au coat) โดยใช้เทคนิคสปัตเตอริง (sputtering) จากนั้นนำชิ้นงานไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างของชิ้นงานต่อไป



ภาพที่ 3.15 Sputtering

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.16 Scanning Electron Microscope (SEM)

3.7 ตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ ด้วยเครื่องตรวจวัดธาตุเชิงปริมาณและคุณภาพ (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy ; EDX)

นำผงแก้วที่เตรียมได้ ไปทำการตรวจวัดธาตุเชิงปริมาณและคุณภาพ (EDX) เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาใช้อธิบายปริมาณธาตุต่าง ๆ ที่ผสมอยู่ในผงแก้วและใช้อธิบายปริมาณธาตุต่าง ๆ ว่ามีอยู่มากน้อยเพียงใดและมีซิลิกอนไดออกไซด์ประกอบอยู่หรือไม่ ซึ่งเครื่องนี้สามารถตรวจสอบตัวอย่างได้ทั้งของแข็ง ของเหลวและผง หลักการทำงานของเทคนิคนี้ คือ ให้รังสีเอ็กซ์จากแหล่งกำเนิดเข้าไปชนกับอนุภาคของผงแก้ว รังสีเอ็กซ์จะทำให้อิเล็กตรอนในวงในสุดของอะตอมของธาตุหลุดออก ส่งผลให้อิเล็กตรอนวงถัดมาจะเข้ามาแทนที่ซึ่งจะมีค่าพลังงานที่เป็นค่าจำเพาะของธาตุนั้นซึ่งเป็นพื้นฐานการวิเคราะห์เชิงคุณภาพและความเข้มข้นของรังสีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ที่เกิดขึ้นจะเป็นพื้นฐานการวิเคราะห์เชิงปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.17 เครื่อง Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX)

3.8 การวิเคราะห์จำแนกประเภทและพันธะเคมีด้วยเทคนิค

Fourier Transform Infrared ; (FT-IR)

ในการตรวจสอบด้วยเทคนิคนี้ จะนำอนุภาคนาโนซิลิกอนไดออกไซด์และผงแก้วนำไปผ่านกระบวนการตรวจสอบโดยเครื่องวิเคราะห์สามารถตรวจวัด หลักการ Fourier Transform Infrared (FT-IR) โดยเป็นเทคนิคที่ใช้จำแนกประเภทของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์และพันธะเคมีในโมเลกุล รวมถึงสามารถบอกถึงปริมาณองค์ประกอบที่มีอยู่ในโมเลกุลของสารผสมตัวอย่างที่ไม่ทราบชนิดโดยทำการตรวจวัดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของตัวอย่างที่การสั่นความถี่ต่าง ๆ กันซึ่งมีความจำเพาะของแต่ละพันธะ การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิสูงกว่าศูนย์องศาสมบูรณ์อะตอมทุกตัวในโมเลกุลจะมีการสั่นอยู่ตลอดเวลาเมื่อความถี่ของการสั่นมีค่าเท่ากับค่าความถี่ของรังสีอินฟราเรดที่ฉายมายังโมเลกุล และทำให้การดูดกลืนรังสีจำนวนแถบการดูดกลืนทั้งหมดที่ได้จะมีค่าไม่เท่ากับการสั่นมูลฐานของโมเลกุลทั้งหมดโดยจะมีค่าลดลงเพราะมีบางแถบพลังงานที่ไม่มีการตอบสนองต่อพลังงานในช่วงรังสีอินฟราเรด เช่น ตัวอย่างที่เป็นผงหรือชิ้นงานที่เป็นของแข็ง เทคนิคนี้สามารถบอกถึงปริมาณองค์ประกอบที่มีอยู่ในโมเลกุลของสารตัวอย่างที่ไม่ทราบชนิดได้ เช่น สามารถบอกได้ว่ามีการสั่นของพันธะของธาตุใดและสามารถนำไปเปรียบเทียบการฐานข้อมูลอ้างอิงของธาตุในโปรแกรมได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ต้องการตรวจสอบว่าในผงแก้วมีองค์ประกอบของธาตุใดนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

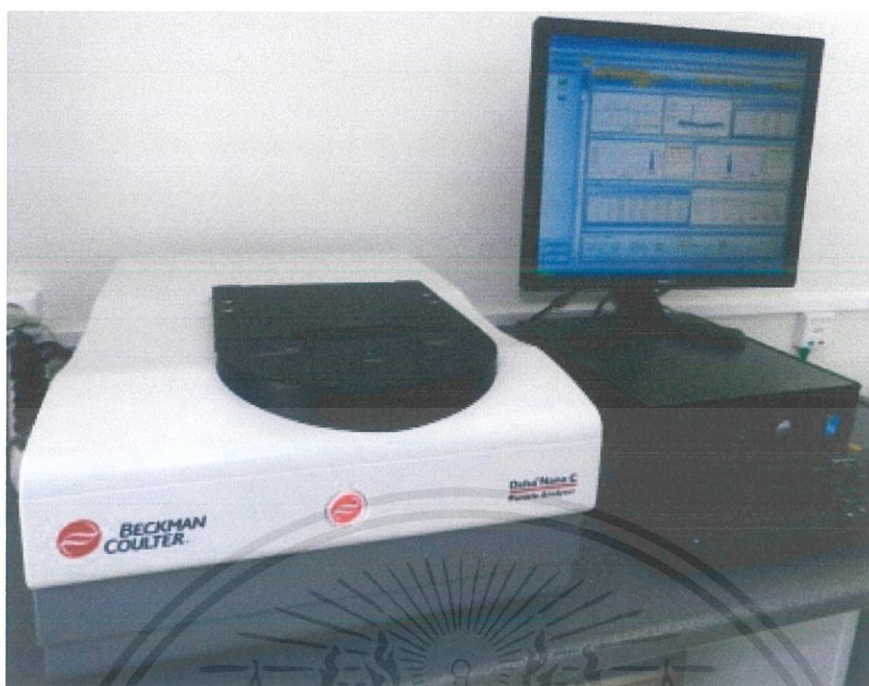


ภาพที่ 3.18 เครื่อง Fourier Transform Infrared (FT-IR)

3.9 ตรวจสอบขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค (Particle size distribution analyzer)

การตรวจสอบด้วยเทคนิคนี้เป็นการแสดงว่าผงแก้วที่ผ่านกระบวนการบดหยาบและบดย่อยมาแล้วนั้นมีขนาดอนุภาคเล็กถึงระดับใด รวมถึงค่าเฉลี่ยอนุภาค ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของสารตัวอย่าง โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของเลเซอร์ (LASER Diffraction) จากแหล่งกำเนิดเลเซอร์ชนิด แก๊สฮีเลียม-นีออน (He-Ne Laser) ซึ่งเป็นแสงสีแดงมีความยาวคลื่น 632.82 นาโนเมตร ลำแสงจะถูกขยายขนาดโดย Beam expander แล้วส่องผ่านไปยังอนุภาคที่เป็นสารแขวนลอย (Emulsion) อยู่ในตัวกลางที่เป็นของเหลวที่มีความโปร่งใสและมีค่าดัชนีหักเหแตกต่างจากอนุภาค จนเกิดการกระเจิงของแสงที่บริเวณผิวของอนุภาคได้และไม่ทำปฏิกิริยากับอนุภาคของสารที่ต้องการวิเคราะห์ โดยการเตรียมตัวอย่างเพื่อวัดขนาดอนุภาคสามารถเตรียมได้โดยวิธีสารละลาย คือ ใช้สารละลายที่เป็นเอทานอลเติมลงไปในแท่งใส่ตัวอย่างและใส่ผงแก้วลงไป ปริมาณเล็กน้อย จากนั้นนำแท่งใส่ตัวอย่างใส่ลงในบีกเกอร์นำบีกเกอร์ใส่ลงในเครื่องสั่นสะเทือน (ultrasonic cleaner) เป็นเวลานาน 2 นาที จากนั้น นำแท่งใส่สารออกจากบีกเกอร์และเช็ดให้สะอาดด้วยกระดาษทิชชูไร้ฝุ่น (พยายามอย่าให้เกิดรอยนิ้วมือบริเวณแท่งใส่สาร) จากนั้นนำแท่งใส่สารเข้าไปในเครื่องและเริ่มดำเนินการเพื่อให้เครื่องทำงาน เมื่อเสร็จสิ้นการดำเนินการจะแสดงผลที่หน้าจอคอมพิวเตอร์ ซึ่งจากข้อมูลขนาดอนุภาคที่ได้สามารถนำไปอธิบายในเรื่องการนำไปใช้งานเป็นอนุภาคที่เจือลงในอีพอกซีเรซินเพื่อใช้เป็นตัวเสริมแรงและเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุคอมโพสิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

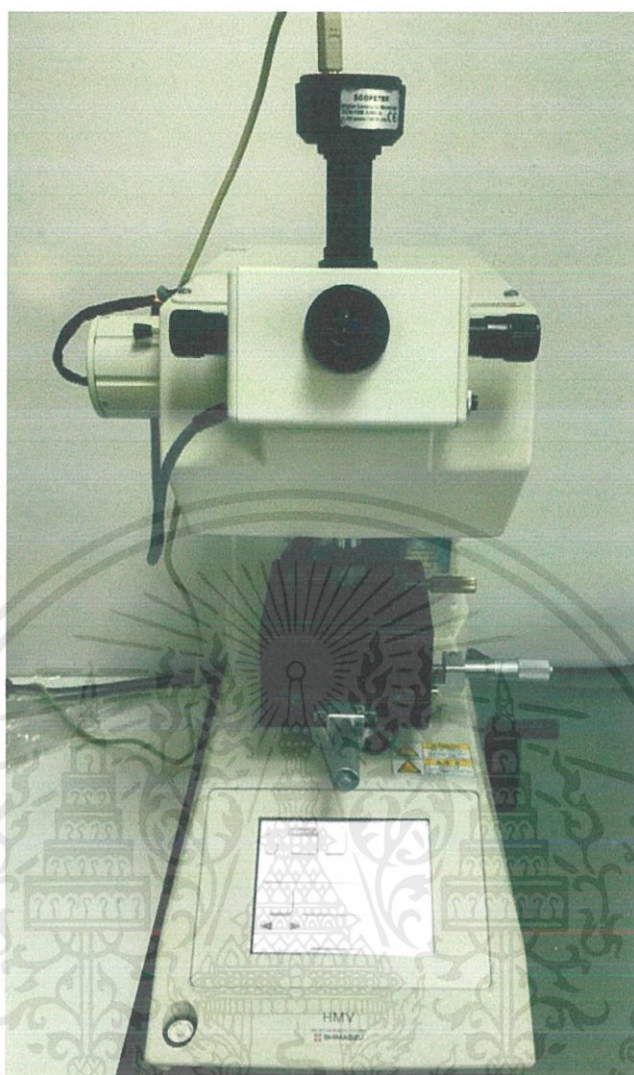


ภาพที่ 3.19 Particle size distribution analyzer

3.10 ตรวจสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vicker's Hardness)

เทคนิคนี้ใช้ตรวจสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน โดยจะใช้หัวกดเพชรทรงพีรามิดมุม 130 °C ฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสกดลงบนผิวชิ้นงาน หลักการทำงาน คือ กดหัวกดเพชรลงบนผิวชิ้นงานทดสอบด้วยแรงกด F ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 1–120 kgf โดยกดลงตั้งฉากกับผิวชิ้นงาน การเคลื่อนที่ของหัวกดที่กดลงบนชิ้นงานจะใช้เวลา 15 วินาที แต่จะคงค่าแรงกดไว้อีกระยะหนึ่งขึ้นกับชนิดของวัสดุ เช่น เหล็กกล้า จะคงแรงกดไว้ประมาณ 10 วินาที ในขณะที่วัสดุอ่อนจะคงแรงกดไว้นานกว่า เมื่อหัวกดถูกยกขึ้นรอยกดที่เกิดขึ้นจะถูกวัดขนาดโดยการวัดเส้นทแยงมุม d_1 และ d_2 ด้วยความละเอียดการวัด 0.002 มิลลิเมตร ดังรูป ค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุม (d) จะถูกนำไปคำนวณค่าความแข็งดังนี้ เช่นเดียวกับการวัดความแข็งแบบบริเนลล์ ค่าความแข็งจะถูกคำนวณไว้แล้วว่าที่ความยาวรอยกดและรอยกดขนาดต่าง ๆ ในรูปของตารางหรืออาจมีการแสดงค่าความแข็งด้วยระบบอัตโนมัติเป็นตัวเลขจากเครื่องทดสอบโดยตรงหน่วยความแข็งคือ HV หรือ VHN โดยในขั้นตอนนี้จะตรวจสอบสมบัติของวัสดุคอมโพสิตระหว่างเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์ที่หล่อขึ้นรูปแล้ว โดยใช้แรงในการกดเท่ากับ 9.807 นิวตันเป็นเวลา 5 วินาที กดทั้งหมด 3 จุด ต่อ 1 ชิ้นงาน เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย จากนั้นทำการถ่ายภาพรอยกดและบันทึกเพื่อนำไปวิเคราะห์ผลต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.20 เครื่อง Vicker's Hardness

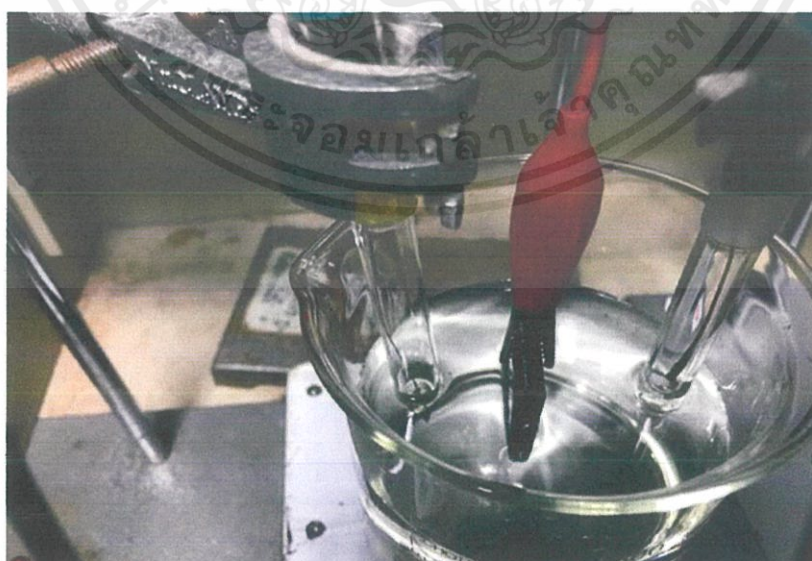
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.11 การตรวจสอบการต้านทานต่อการกัดกร่อนของผิวเคลือบคอมโพสิต

ในการตรวจสอบความสามารถการต้านทานต่อการกัดกร่อนของผิวเคลือบคอมโพสิตนี้ใช้เทคนิค "Potentiodynamic" (Linear polarization mode) เทคนิคนี้เตรียมโดยนำชิ้นโลหะที่เคลือบด้วยคอมโพสิตไปแช่ในโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 3.5 % ทิ้งไว้ 1 ชั่วโมงจากนั้นนำไปวัดโดยนำชิ้นโลหะต่อเข้ากับขั้วไฟฟ้าและจุ่มลงในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ความเข้มข้น 3.5 % และวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อัตราการสแกนเท่ากับ 1 มิลลิโวลต์ / วินาที (scan rate 1mV s^{-1}) โดยชุดทดสอบแสดงดังภาพที่ 3.26 และ 3.27



ภาพที่ 3.21 การแช่โลหะในน้ำเกลือความเข้มข้น 3.5 %



ภาพที่ 3.22 การตรวจสอบการต้านทานต่อการกัดกร่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

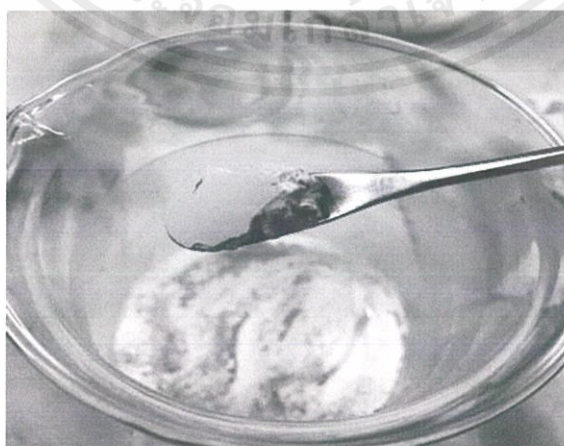
ผลการทดลองและการอภิปรายผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองที่ได้จากการเตรียมคอมโพสิตระหว่างอีพอกซีเรซินกับผงแก้วด้วยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม (conventional casting) โดยแบ่งเป็นสองเงื่อนไขโดยมีอัตราส่วนการเติมเฟสเสริมแรงเท่ากับ 1 % , 2%, 3%, 4% และ 5 % โดยน้ำหนัก โดยจะมีรายละเอียดของสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ โครงสร้างจุลภาคและความแข็งของคอมโพสิต พร้อมกันนี้ยังได้แสดงผลการทดลองในส่วนของคุณสมบัติการดูดซับน้ำ ซึ่งเป็นการใช้ผงนาโนซิลิกาทางการค้าแทนผงแก้วควบคู่กันไป จากนั้นเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมนำไปขึ้นรูปเป็นฟิล์มเคลือบบนผิวโลหะ (เหล็กกล้าธรรมดา DSS 2205) และนำไปตรวจสอบการกัดกร่อนของผิวโลหะด้วยเทคนิคการกัดกร่อนโดยไฟฟ้าเคมี (Potentiodynamic) มีรายละเอียดดังนี้

4.1 ผลการตรวจสอบผงแก้ว

4.1.1 สมบัติทางกายภาพและขนาดอนุภาคของผงแก้ว

ลักษณะภายนอกของอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ที่เตรียมจากเศษแก้ว โดยขั้นตอนการเตรียมผงแก้ว คือ นำเศษแก้วประเภทโซดาไลม์มาทำความสะอาด จากนั้นนำมาบดหยาบด้วยค้อนปอนด์ และนำไปบดย่อยด้วยเครื่องบดย่อยในแนวตั้ง (vibratory ball milling) เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง จะได้ลักษณะอนุภาคที่ได้มีความละเอียด เมื่อมองด้วยตาเปล่ามีลักษณะเป็นผงสีขาวคล้ายผงแป้งและไม่ละลายน้ำ มีลักษณะดังภาพที่ 4.1 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้าแล้วพบว่าผงทางการค้ามีลักษณะเป็นผงสีขาวละเอียดและมีความฟุ้งกระจายมากกว่าผงแก้วเนื่องจากอนุภาคมีขนาดเล็กกว่านั่นเอง แสดงดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.1 ผงแก้ว

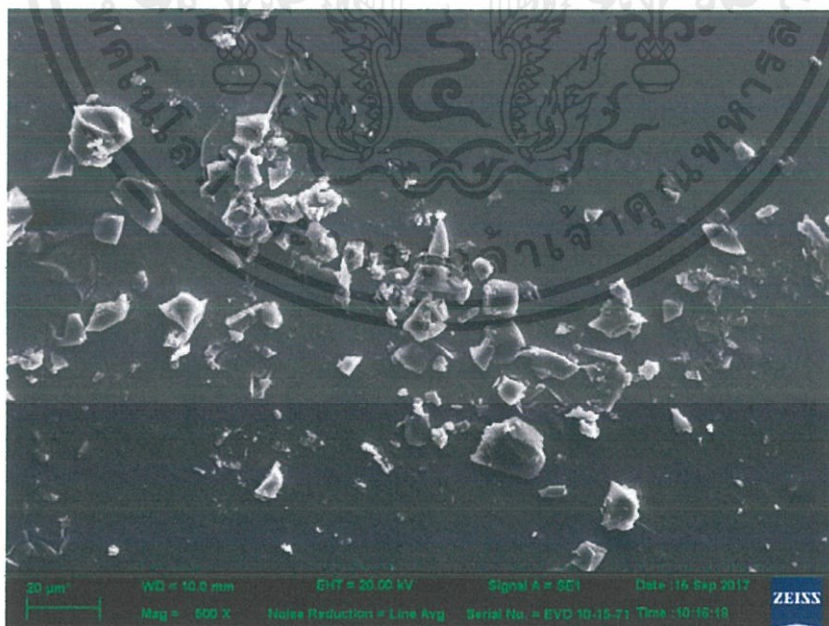
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.2 อนุภาคนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า

4.1.2 ลักษณะโครงสร้างจุลภาค

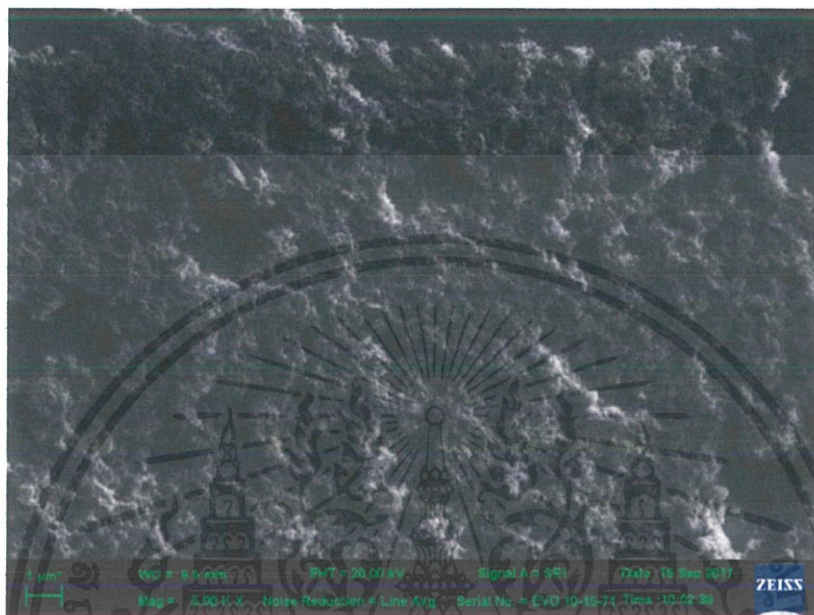
หลังจากกระบวนการบดหยาบและบดย่อยเศษแก้วประเภทโซดาไลม์แล้ว ได้นำผงแก้วที่ได้ไปตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) พบว่าผงแก้วที่ได้มีรูปทรงเป็นทรงเหลี่ยมและมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กระจายตัวอยู่ทั่วไป ไม่มีการจับตัวเป็นกลุ่มก้อน แสดงดังภาพที่ 4.3 มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 1.2 -9.5 ไมโครเมตร และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4.36 ไมโครเมตร



ภาพที่ 4.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผงแก้ว (กำลังขยาย 500 เท่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับอนุภาคนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ ก็ได้นำไปตรวจวัดลักษณะโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ด้วยเช่นกัน พบว่าอนุภาคมีขนาดเล็กมากและมีการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน มีขนาดอยู่ในช่วง 15-30 นาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่ระบุไว้ในผลิตภัณฑ์ทางการค้า

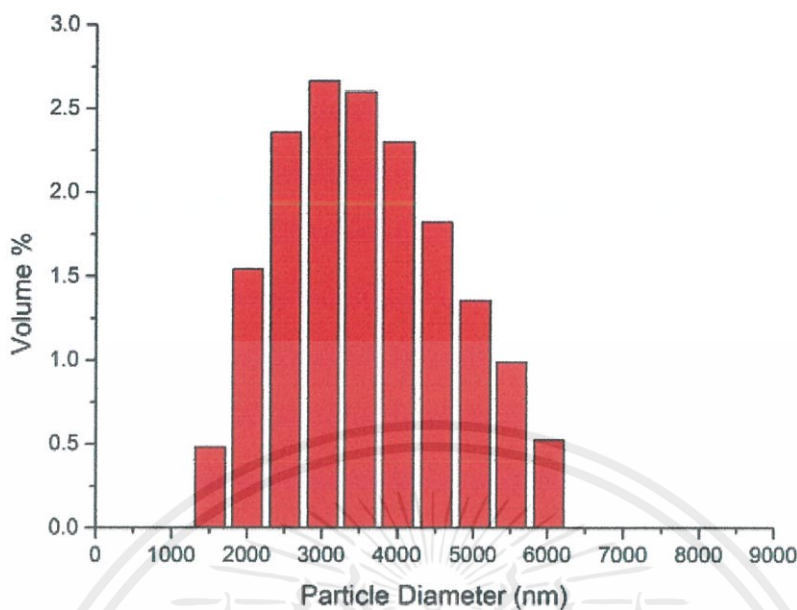


ภาพที่ 4.4 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของอนุภาคนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ (กำลังขยาย 500 เท่า)

4.1.3 ขนาดและการกระจายตัว

นำผงแก้วที่ผ่านการบดย่อยมาตรวจสอบขนาดอนุภาคด้วยเครื่องตรวจสอบขนาดอนุภาค (Particle size distribution analyzer) โดยนำผงไปแก้วเจือจางในเอทานอลแล้วนำไปใส่ในคิวเวตและนำเข้าเครื่องทดสอบ โดยผลการตรวจสอบขนาดอนุภาคพบว่าผงแก้วมีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 1500 ถึง 6000 นาโนเมตร และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 3149.1 นาโนเมตร แสดงดังภาพที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.5 กราฟแสดงขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงแก็ว

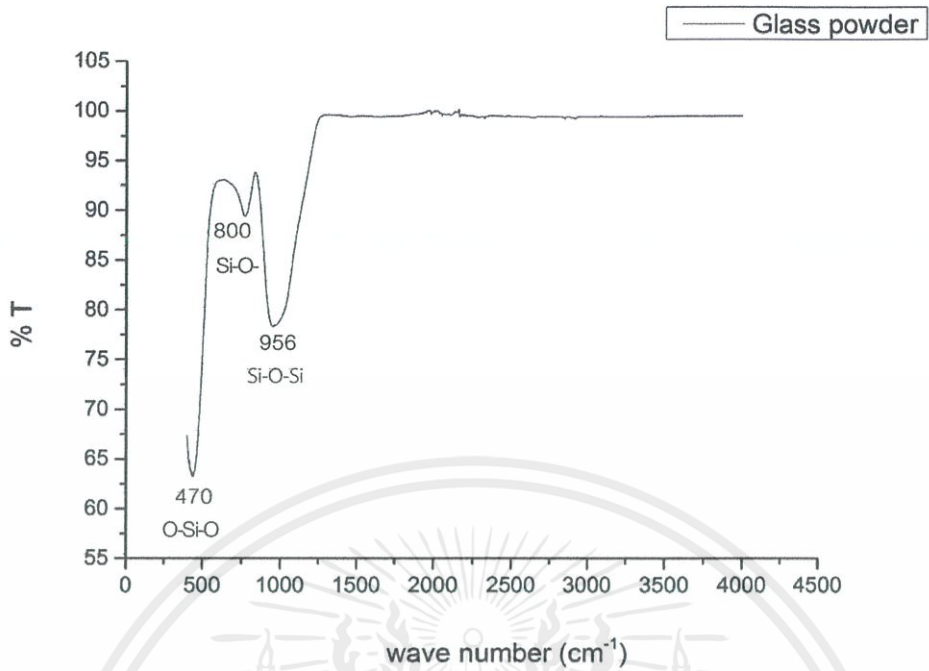
4.1.4 องค์ประกอบของธาตุและสารประกอบของผงแก็ว

เมื่อทราบขนาดอนุภาคของผงแก็วแล้วจึงนำไปตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ FT-IR EDX และ XRF โดยมีรายละเอียดดังนี้

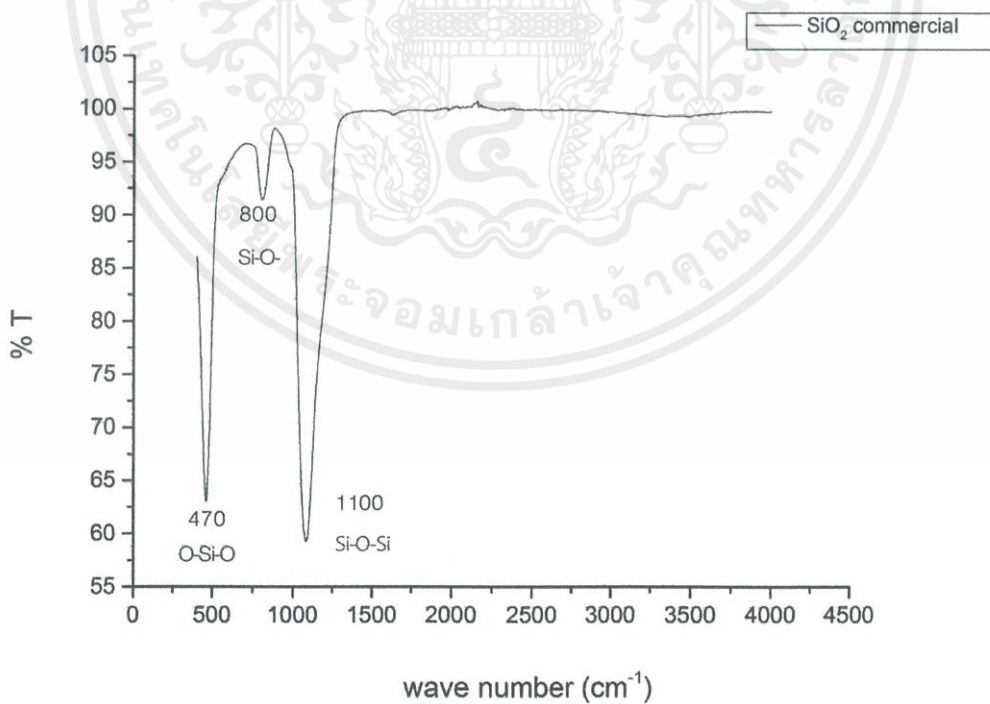
4.1.4.1 การตรวจสอบด้วยเทคนิค FT-IR

ทำการตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุและสารประกอบด้วยเทคนิค FT-IR โดยเทคนิคที่ใช้จำแนกสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ พันธะเคมีในโมเลกุล จึงสามารถบอกถึงปริมาณองค์ประกอบที่มีอยู่ในโมเลกุลของสารผสมที่ไม่ทราบชนิดได้ โดยทำการตรวจวัดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของสารตัวอย่างที่การสั่นความถี่ต่าง ๆ ซึ่งมีความจำเพาะของแต่ละพันธะ ซึ่งภาพที่ 4.6 และ 4.7 กราฟแสดงให้เห็นถึงการขึ้นของพีค 3 ตำแหน่ง ตำแหน่งที่ 1 คือ 470 cm^{-1} ตำแหน่งที่ 2 คือ 800 cm^{-1} และตำแหน่งที่ 3 คือ $956\text{-}1000\text{ cm}^{-1}$ จากการสืบค้นงานวิจัยพบว่าเป็นการสั่นในช่วงความถี่ของพันธะ O-Si-O bending vibration , Si-O-Stretching และ Si-O-Si asymmetric ตามลำดับ ซึ่งพันธะที่แสดงมีความใกล้เคียงกันกับการตรวจสอบผงแก็วและอนุภาคนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า จึงสามารถสรุปได้ว่าสารตัวอย่างทั้งสองเป็นสารที่มีซิลิกอนไดออกไซด์ประกอบอยู่จริงแต่อาจต่างกันที่ความบริสุทธิ์ของสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนและการสั่นของพันธะในผงแก้ว

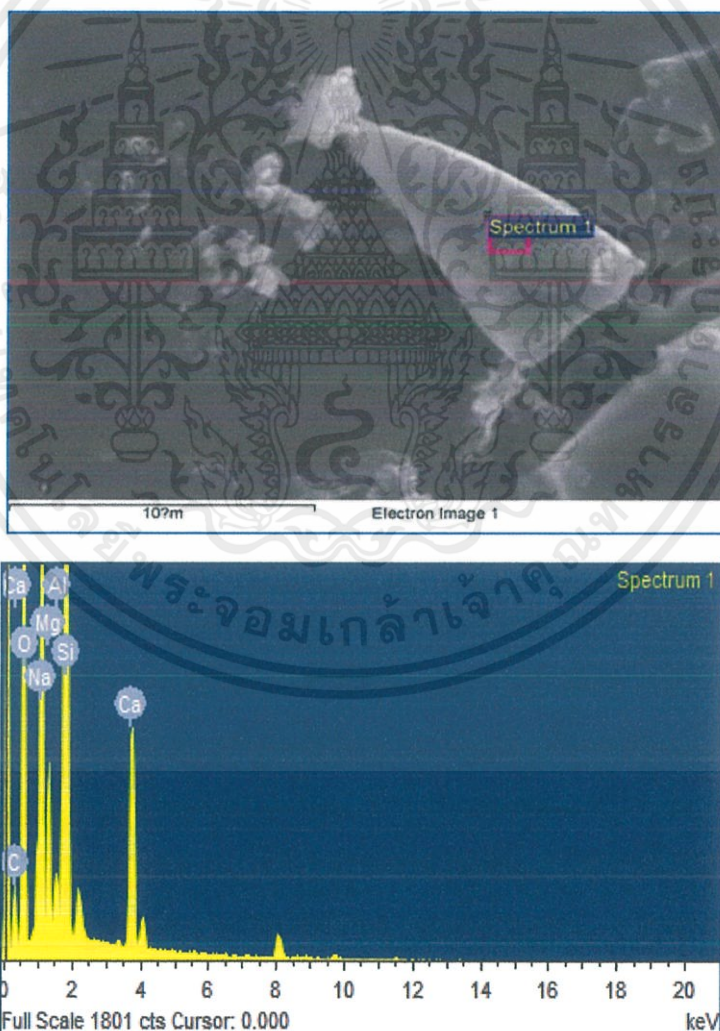


ภาพที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ของการดูดกลืนและการสั่นของพันธะของอนุภาคนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4.2 การตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิค EDX

ทำการตรวจสอบประกอบปริมาณธาตุของผงแก้วพบว่าธาตุอยู่หลากหลายชนิดและแสดงปริมาณของธาตุดังตารางในภาพที่ 4.8 ซึ่งจะเห็นได้ว่าธาตุที่มีปริมาณมากที่สุดได้แก่ธาตุออกซิเจน เท่ากับ 49.03 % โดยน้ำหนัก นอกจากนี้แล้วยังพบว่าธาตุที่มีปริมาณรองลงมาคือธาตุซิลิกา เท่ากับ 26.03 % โดยน้ำหนัก ซึ่งพบธาตุอื่นๆประกอบอยู่ด้วย ได้แก่ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) โซเดียม (Na) แมกนีเซียม (Mg) และอลูมิเนียม (Al) แสดงดังภาพ 4.8 และตารางที่ 4.1 โดยผลที่ได้ยืนยันว่าผงแก้วที่ได้มีปริมาณซิลิกา (Si) และออกซิเจน (O) เป็นองค์ประกอบที่มีอยู่จริงและมีอยู่ในปริมาณที่มาก ซึ่งสอดคล้องกับจุดประสงค์ที่จะเตรียมซิลิกอนไดออกไซด์จากแหล่งที่หาได้ง่ายหรือมีราคาถูกและมีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์เพียงพอที่จะนำมาใช้ทดแทนอนุภาคนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้าได้ ในขั้นตอนนี้ไม่ได้ทำการตรวจสอบผงซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า เนื่องจากถือว่ามี ความบริสุทธิ์สูงอยู่แล้ว



ภาพที่ 4.8 แสดงชนิดและปริมาณของธาตุที่พบในผงแก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

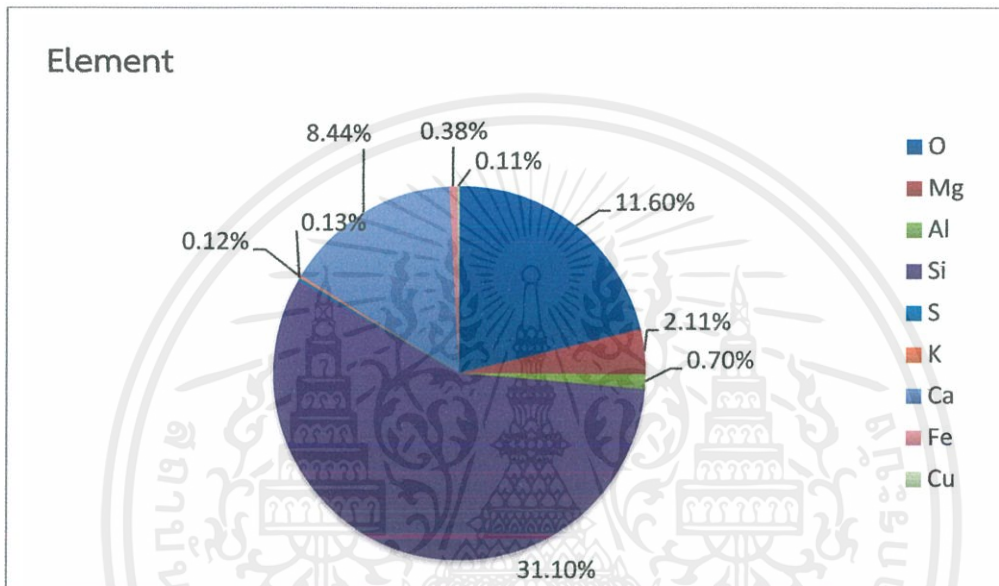
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงชนิดและปริมาณของธาตุที่พบในผงแก้ว

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	

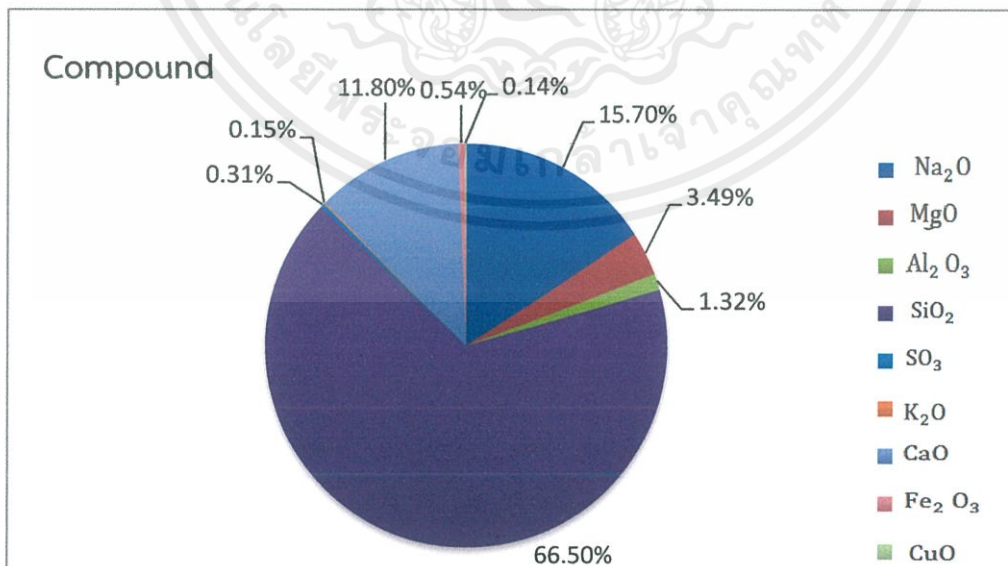
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4.3 การตรวจสอบด้วยเทคนิค XRF

การตรวจสอบด้วยเทคนิค X-ray fluorescence (XRF) คือการตรวจสอบองค์ประกอบและปริมาณของธาตุอีกวิธีหนึ่ง โดยจะแสดงผลเป็นปริมาณของธาตุและปริมาณของสารประกอบในผงแก้ว โดยผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 4.9 และ 4.10 จะเห็นว่าในผงแก้วมีปริมาณซิลิกา (Si) เท่ากับ 31.10 % และมีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เท่ากับ 66.50 % โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นปริมาณที่มากพอที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้ สอดคล้องกับการตรวจสอบด้วยเทคนิคอื่น ๆ



ภาพที่ 4.9 กราฟแสดงปริมาณของธาตุต่าง ๆ ที่พบในผงแก้ว



ภาพที่ 4.10 กราฟแสดงปริมาณของสารประกอบที่พบในผงแก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

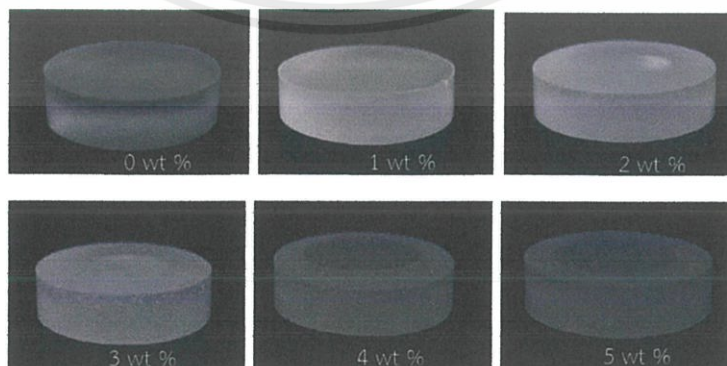
4.2 ผลการตรวจสอบคอมโพลีอ็อกซีเรซินกับผงแก้ว

4.2.1 ลักษณะและสมบัติทางกายภาพ

โดยในขั้นตอนนี้จะเป็นการการหล่อขึ้นรูปอ็อกซีเรซินกับผงแก้ว (Glass powder) โดยจะเตรียมคอมโพลีระหว่างอ็อกซีเรซินกับผงแก้วในอัตราส่วนดังนี้ คือ 1 wt.%, 2 wt.%, 3 wt.%, 4 wt.% และ 5 wt.% โดยน้ำหนัก ซึ่งคอมโพลีที่ได้จะแสดงดังภาพที่ 4.11 และ 4.12 จะเห็นว่าที่อัตราส่วนของผงแก้วที่ 1 wt. % โดยน้ำหนักจะโปร่งแสงและมีลักษณะใสมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับคอมโพลีที่เจือผงแก้วในอัตราส่วนเพิ่มที่สูงขึ้นจะมีลักษณะขุ่นขึ้นและมีการกระจายตัวของอนุภาคหนาแน่นเพิ่มขึ้นตามลำดับ (เมื่อมองด้วยตาเปล่า)



ภาพที่ 4.11 ลักษณะผิวหน้าของคอมโพลีอ็อกซีเรซินกับผงแก้ว



ภาพที่ 4.12 ลักษณะด้านข้างของคอมโพลีอ็อกซีเรซินกับผงแก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

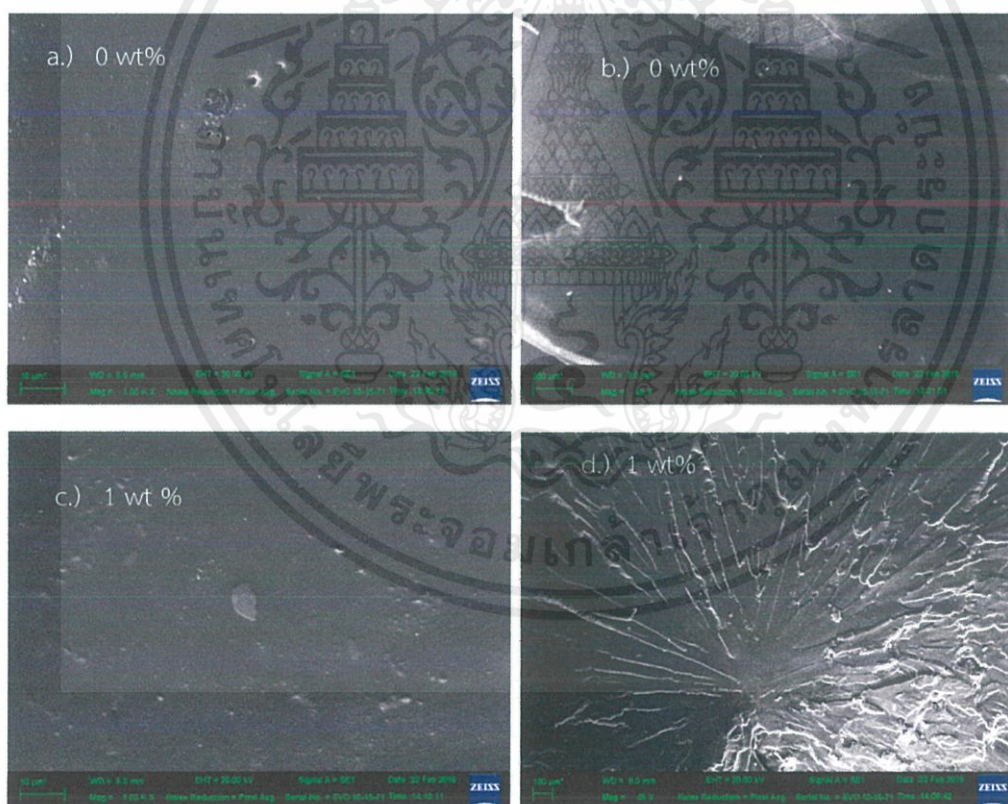
ตารางที่ 4.2 แสดงสมบัติทางกายภาพของคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับผงแก้ว

เรซิน : ผงแก้ว (โดยน้ำหนัก)	ความหนา (mm)	รัศมี (mm)	ความหนาแน่น (g/cm ³)	ลักษณะทางกายภาพ
0 wt. %	10.78	25.24	1.015	สีใส
1 wt. %	8.30	25.24	0.8104	มีการกระจายตัวของอนุภาค แต่น้อย และมีความโปร่งใส
2 wt. %	8.29	25.24	0.8343	มีการกระจายตัวของอนุภาคหนาแน่นขึ้น เริ่มมีสีขาวขุ่น
3 wt. %	8.31	25.24	0.7801	มีการกระจายตัวของอนุภาคหนาแน่นขึ้นตามลำดับ มีสีขาวขุ่น
4 wt. %	8.30	25.24	0.7797	มีการกระจายตัวของอนุภาคหนาแน่นค่อนข้างมาก มีสีขาวขุ่น ผิวเรซินด้านบนมีลักษณะเรียบ
5 wt. %	8.28	25.24	0.6376	มีการกระจายตัวของอนุภาคหนาแน่นมาก มีสีขาวขุ่น ผิวเรซินด้านบนมีลักษณะเรียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

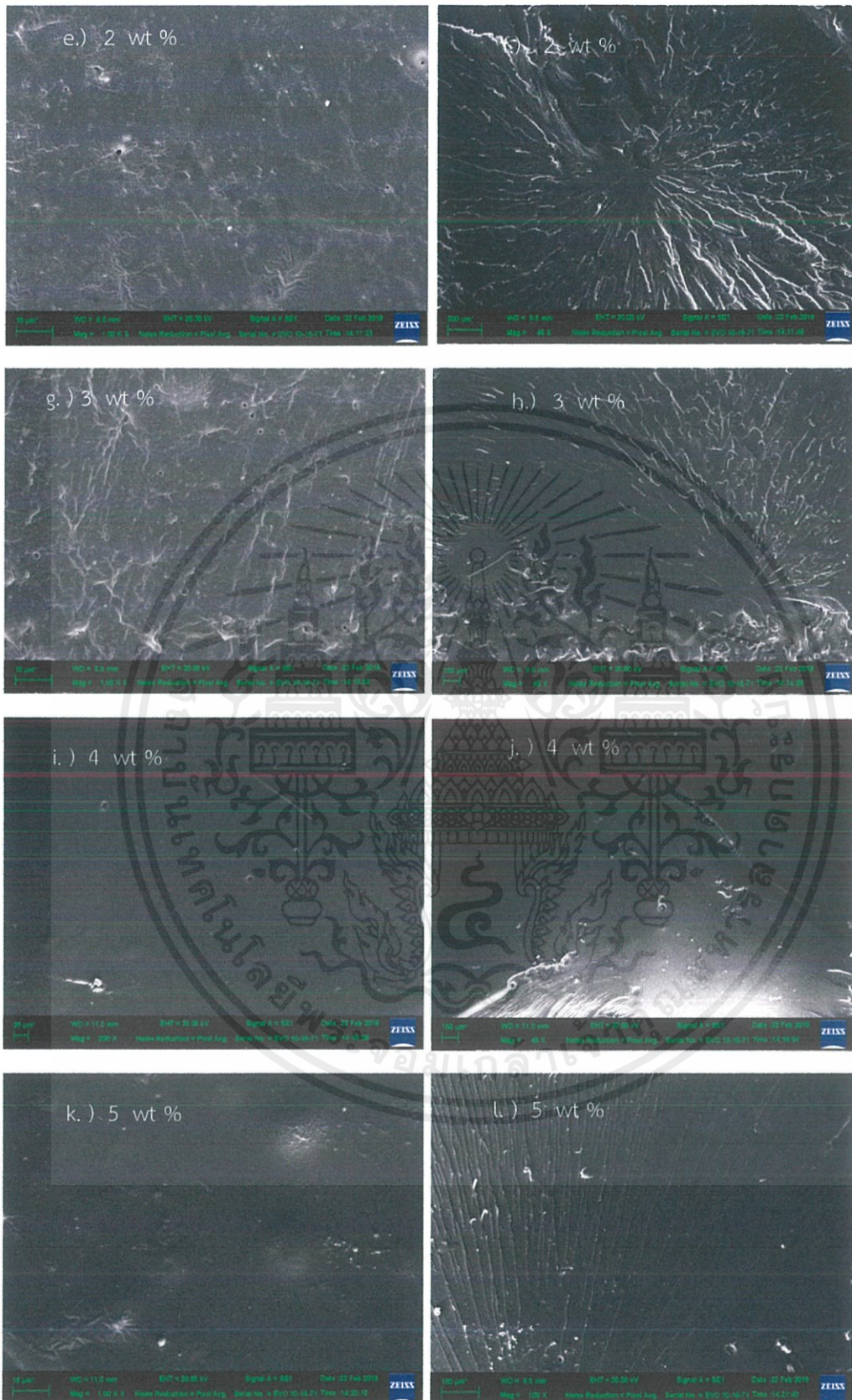
4.2.2 โครงสร้างจุลภาคของคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับผงแก้ว

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้างจุลภาคของอีพอกซีเรซินกับผงแก้วและซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้าโดยนำชิ้นงานที่หล่อขึ้นรูปในอัตราส่วนต่าง ๆ ได้แก่ อีพอกซีเรซินบริสุทธิ์ อีพอกซีที่เจือสารตัวเติมในอัตราส่วน 1 wt.% , 2 wt.% , 3 wt.% ,4 wt.% และ 5 wt.% นำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยถ่ายภาพผิวหน้าของชิ้นงานคอมโพสิต และถ่ายภาพผิวดัดขวางของชิ้นงาน ทั้งนี้เพื่อดูลักษณะทั่วไปของชิ้นงาน รวมถึงการกระจายตัวของอนุภาคของผงแก้วในคอมโพสิต หรือการเกิดความเป็นรูพรุนในชิ้นวัสดุคอมโพสิต ซึ่งพบว่าความแตกต่างไม่มากนักเนื่องจากการเจือผสมเสริมแรงมีการเจือที่น้อยมากเมื่ออยู่ในเฟสของพอลิเมอร์เมทริกซ์ ร่วมกับอนุภาคของผงแก้วมีขนาดใหญ่จึงทำให้ไม่เกิดการเสริมแรงในระดับอะตอมหรือโมเลกุล จึงทำให้มองไม่เห็นการกระจายตัวที่ชัดเจนมากนัก และมองเห็นการกระจายตัวในบางอัตราส่วนที่เพิ่มสูงขึ้น คือ ที่อัตราส่วน 5 wt.% โดยน้ำหนัก ซึ่งจะแสดงดังภาพที่ 4.13



ภาพที่ 4.13 a.) แสดงภาพผิวหน้าของคอมโพสิตอีพอกซีบริสุทธิ์
 b.) แสดงภาพตัดขวางของคอมโพสิตอีพอกซีบริสุทธิ์
 c.) แสดงภาพผิวหน้าของคอมโพสิตอีพอกซีกับผงแก้วอัตราส่วน 1 wt.
 d.) แสดงภาพผิวดัดขวางของคอมโพสิตอีพอกซีกับผงแก้วอัตราส่วน 1 wt.%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

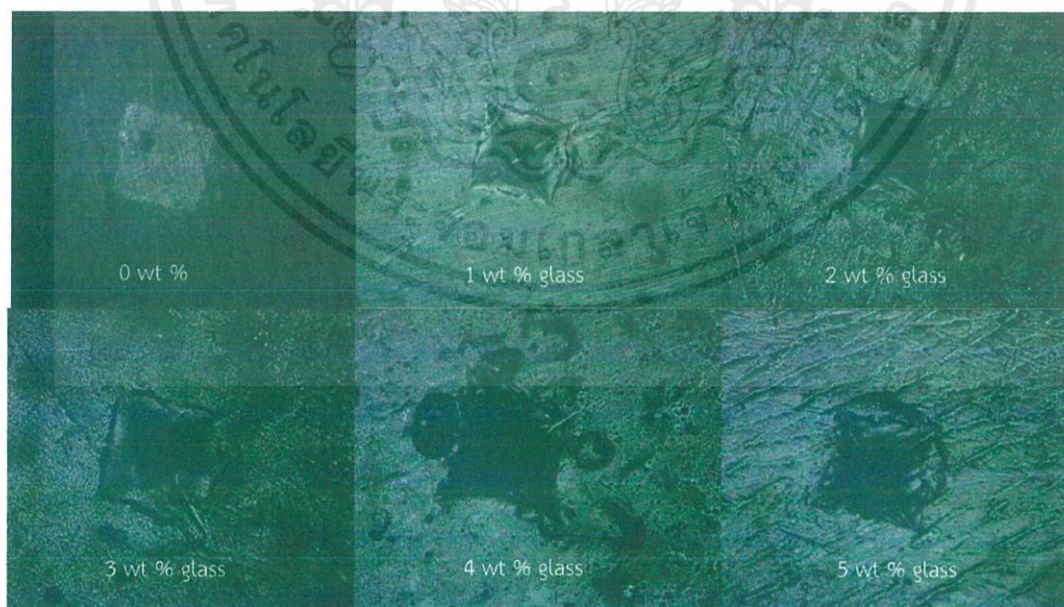


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ภาพที่ 4.13 e.) แสดงภาพผิวหน้าของอีพอกซีกับผงแก้วอัตราส่วน 2 wt.%
 f.) แสดงภาพผิวตัดขวางของคอมโพสิตอีพอกซีกับผงแก้วอัตราส่วน 2 wt.%
 g.) แสดงภาพผิวหน้าของคอมโพสิตอีพอกซีกับผงแก้วอัตราส่วน 3 wt.%
 h.) แสดงภาพผิวตัดขวางของคอมโพสิตอีพอกซีกับผงแก้วอัตราส่วน 3 wt.%
 i.) แสดงภาพผิวหน้าของคอมโพสิตอีพอกซีกับผงแก้วอัตราส่วน 4 wt.%
 j.) แสดงภาพผิวตัดขวางของคอมโพสิตอีพอกซีกับผงแก้วอัตราส่วน 4 wt.%
 k.) แสดงภาพผิวหน้าของคอมโพสิตอีพอกซีกับผงแก้วอัตราส่วน 5 wt.%
 l.) แสดงภาพผิวตัดขวางของคอมโพสิตอีพอกซีกับผงแก้วอัตราส่วน 5 wt.%

4.2.3 สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับผงแก้ว

Vickers's Hardness เทคนิคนี้เป็นการตรวจวัดค่าความแข็งของวัสดุ โดยใช้หัวกดพีรามิด โดยหัวกดเป็นเพชรซึ่งมีความแข็งมากและเหมาะกับการตรวจสอบชิ้นงานขนาดเล็กและมีพื้นที่น้อย โดยในที่นี้ได้นำคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับซิลิกาที่ขึ้นรูปแล้วให้แรงกดโดยใช้น้ำหนัก 0.9 นิวตัน เป็นเวลา 5 วินาที และถ่ายภาพรอยกดของแต่ละชิ้นงาน โดยชิ้นงานจะมีอีพอกซีที่เจือซิลิกาจากเศษแก้ว และอีพอกซีที่เจือซิลิกาทางการค้าทำควบคู่กันไป ซึ่งจะเรียงลำดับได้ดังนี้ ได้แก่ อีพอกซีเรซินบริสุทธิ์ , อีพอกซีที่เจือซิลิกา 1 wt.% , 2 wt.% , 3 wt.% , 4 wt.% และ 5 wt.% ตามลำดับ ซึ่งขนาดรอยกดจะแสดงดังภาพที่ 4.14 และแสดงค่าความแข็งเฉลี่ย จะแสดงดังตารางที่ 4.3



ภาพที่ 4.14 แสดงรอยกดบนคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับผงแก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความแข็งของวิกเกอร์ของผงแก้ว

Glass powder	HV _v (Average)	S.D. (±)
0 wt. %	1.45	0.94
1 wt. %	1.55	0.10
2 wt. %	1.50	0.21
3 wt. %	1.61	0.14
4 wt. %	1.74	0.19
5 wt. %	1.85	0.22

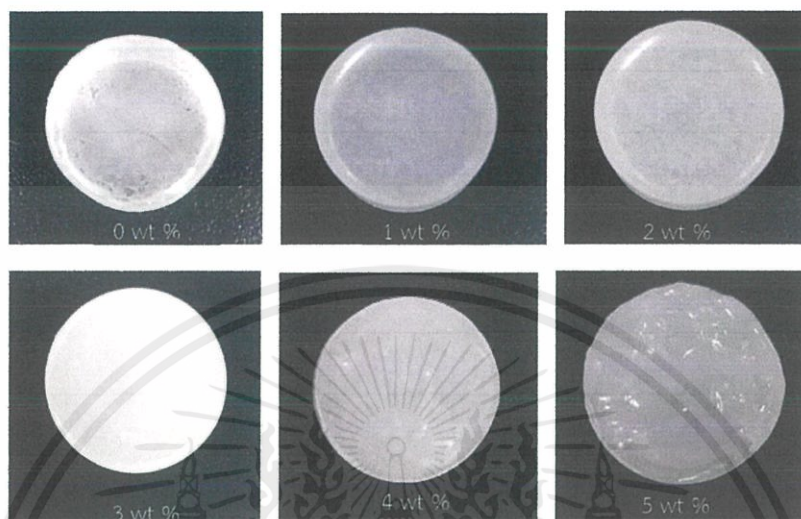
จากภาพที่ 4.14 แสดงรอยกดบนคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับผงแก้ว โดยเรียงลำดับการเจือผงแก้วในอัตราส่วนตั้งแต่ 0 – 5 % โดยน้ำหนัก ตามลำดับและจากตารางที่ 4.3 แสดงค่าความแข็งที่ได้พบว่าอีพอกซีบริสุทธิ์มีค่าความแข็งเท่ากับ 1.45 HV และพบว่าการเจือผงแก้วในอัตราส่วน 1 wt.% โดยน้ำหนักมีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 1.55 HV , ที่ 2 wt.% มีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 1.50 HV , ที่ 3 wt.% โดยน้ำหนักมีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 1.61 HV , ที่ 4 wt.% โดยน้ำหนักมีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 1.74 HV และ 5 wt.% โดยน้ำหนักมีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 1.85 HV จากข้อมูลที่ได้พบว่าการเจือผงแก้วที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มให้ค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นด้วย คือ ที่อัตราส่วน 4 wt.% และ 5 wt.% สอดคล้องกับการเติมเฟสเสริมแรงที่มีอัตราส่วนหนึ่ง อัตราส่วนที่มากพอและมีความเหมาะสมจะช่วยเพิ่มค่าความแข็งแรงให้กับคอมโพสิตได้

4.3 ผลการตรวจสอบคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า

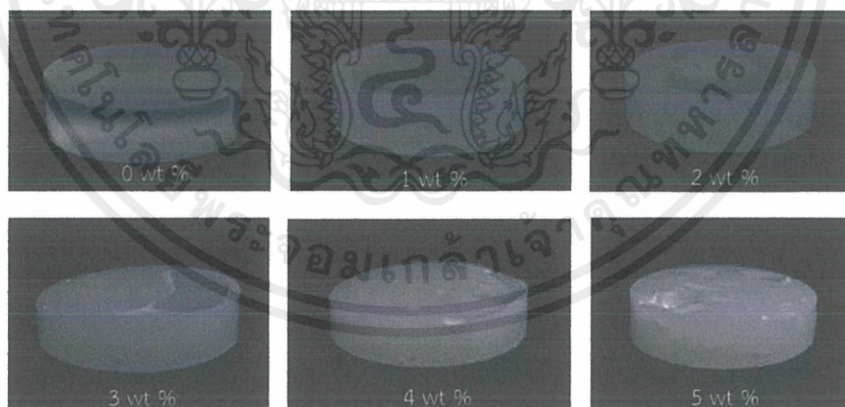
4.3.1 ลักษณะและสมบัติทางกายภาพ

โดยในขั้นตอนนี้จะเป็นการการหล่อขึ้นรูปอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า (SiO₂ nanoparticles) โดยจะเตรียมคอมโพสิตระหว่างอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์ในอัตราส่วนดังนี้ คือ 1 wt%, 2 wt.%, 3 wt.%, 4 wt.% และ 5 wt.% โดยน้ำหนัก ซึ่งคอมโพสิตที่ได้จะแสดงดังภาพที่ 4.15 จะเห็นว่าที่อัตราส่วนซิลิกอนไดออกไซด์ที่ 1 wt. % จะโปร่งใสและมีการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ในอีพอกซีน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับคอมโพสิตที่เจือซิลิกอนไดออกไซด์ในอัตราส่วนที่เพิ่มสูงขึ้นจะมีลักษณะขุ่นขึ้นและมีการกระจายตัวของอนุภาคหนาแน่นมากกว่าตามลำดับ โดยที่อัตราส่วนซิลิกอนไดออกไซด์ 4 และ 5 wt% โดยน้ำหนัก คอมโพสิตที่ได้มีลักษณะผิวหน้าขรุขระเนื่องจากมีปริมาณอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรเจืออยู่มากและทำให้เกิด

ความหนืดขึ้นมากกว่าคอมโพลิตที่มีซิลิกอนไดออกไซด์ที่เจืออยู่ในปริมาณที่น้อย ซึ่งภาพถ่ายทางกายภาพที่ผิวหน้าและผิวด้านข้างของชิ้นงานจะแสดงดังภาพที่ 4.15 และ 4.16



ภาพที่ 4.15 ลักษณะผิวหน้าของคอมโพลิตอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า



ภาพที่ 4.16 ลักษณะผิวด้านข้างของคอมโพลิตอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

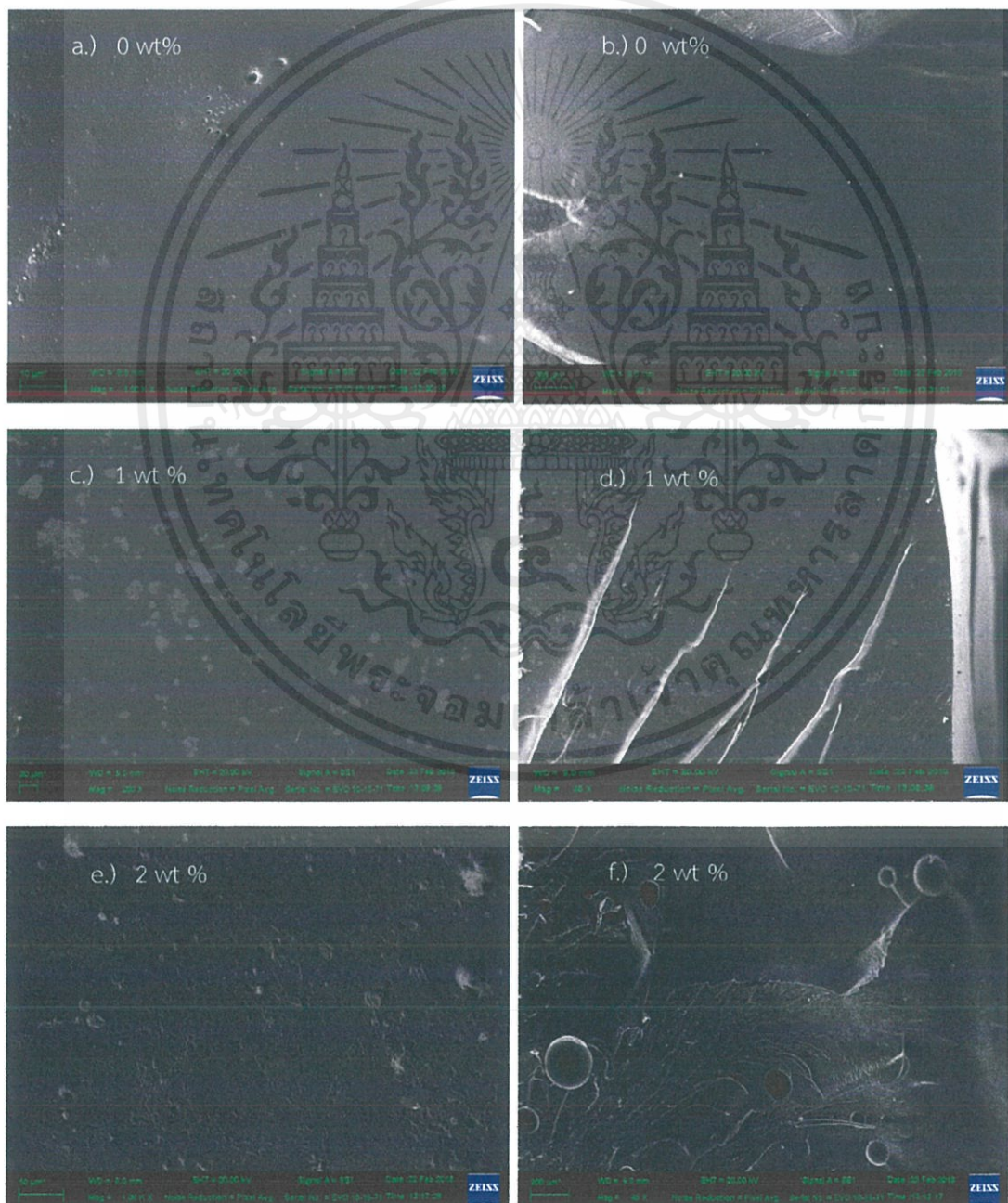
ตารางที่ 4.4 แสดงสมบัติทางกายภาพของคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์จากการค้า

เรซิน : ซิลิกา (โดยน้ำหนัก)	ความหนา (mm)	รัศมี (mm)	ความหนาแน่น (g/cm ³)	ลักษณะทางกายภาพ
0 wt.%	10.78	25.24	1.015	สีใส
1 wt.%	8.31	25.24	0.7110	มีการกระจายตัวของอนุภาค แต่น้อย และมีความโปร่งใส
2 wt.%	7.82	25.24	0.6833	มีการกระจายตัวของอนุภาค หนาแน่นขึ้น เริ่มมีสีขาวขุ่น
3 wt.%	5.30	25.24	0.5472	มีการกระจายตัวของอนุภาค หนาแน่นขึ้นตามลำดับ มีสีขาวขุ่น
4 wt.%	4.80	25.24	0.5458	มีการกระจายตัวของอนุภาค หนาแน่นค่อนข้างมาก มีสีขาวขุ่น ผิวเรซินด้านบนเริ่มขรุขระ
5 wt.%	4.26	25.24	0.4376	มีการกระจายตัวของอนุภาค หนาแน่นมาก มีสีขาวขุ่น ผิวเรซิน ด้านบนไม่มีความเรียบและขรุขระ

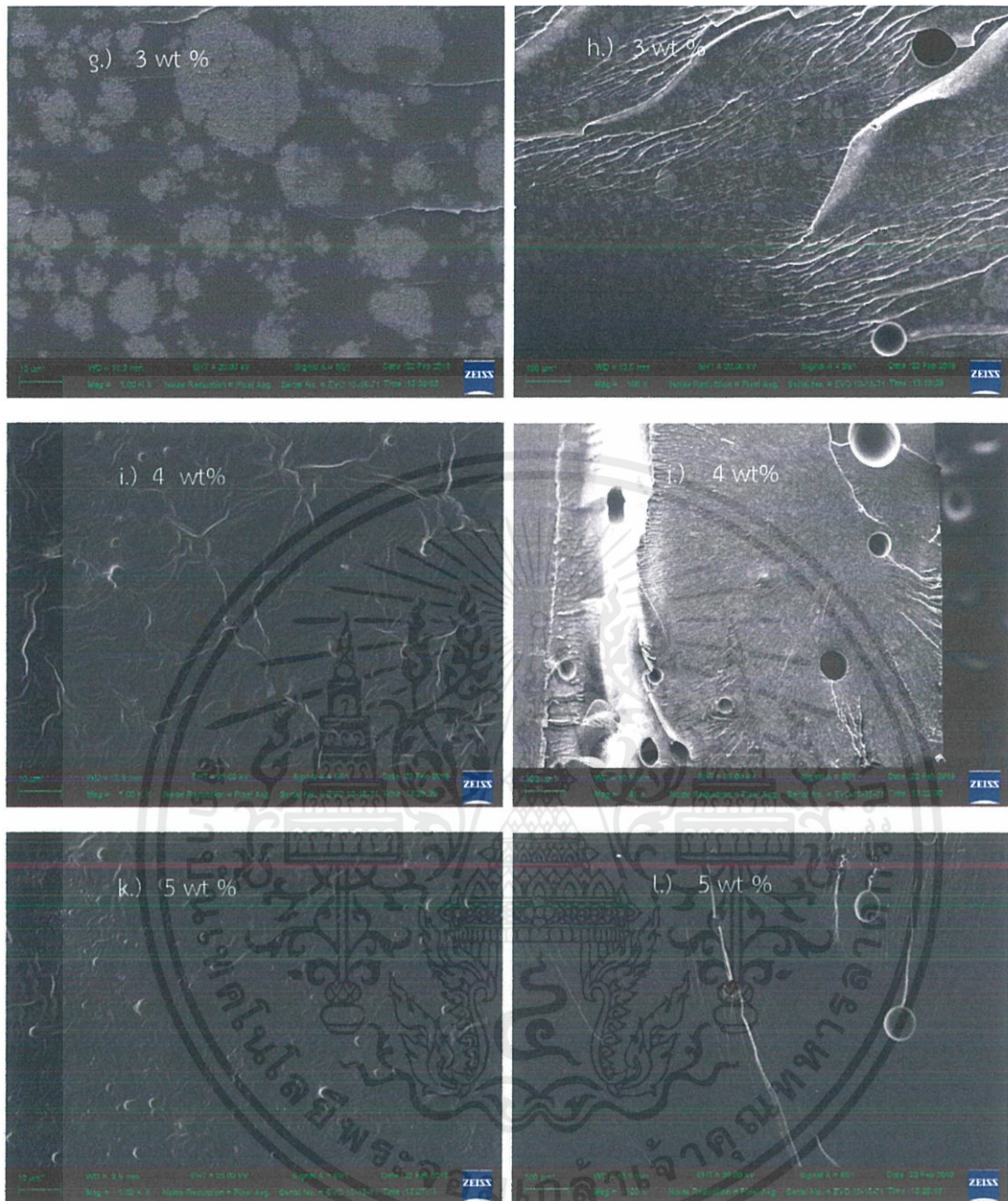
4.3.2 โครงสร้างจุลภาคของคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้างจุลภาคของอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้าโดยนำชิ้นงานที่หล่อแบบดั้งเดิมในอัตราส่วนต่าง ๆ ได้แก่ อีพอกซีเรซินบริสุทธิ์ อีพอกซีที่เจือซิลิกอนไดออกไซด์ในอัตราส่วน 1 wt.% , 2 wt.% , 3 wt.% , 4 wt.% และ 5 wt.% นำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยถ่ายภาพผิวหน้าของชิ้นงานคอมโพสิตและถ่ายภาพผิวดัดขวางของชิ้นงาน ทั้งนี้เพื่อดูลักษณะทั่วไปของชิ้นงาน รวมถึงการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ในคอมโพสิต จากภาพถ่ายผิวหน้าพบว่าบางอัตราส่วน ได้แก่ 1-3 wt.% เห็นการกระจายตัวของอนุภาคบนเฟสเมตริกซ์ โดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชัดเจนที่อัตราส่วน 3 wt.% อย่างไรก็ตามการกระจายตัวดังกล่าวก็ถือว่ายังเป็นการกระจายตัวที่ไม่ดี เพราะยังเห็นการรวมตัวและการเกาะตัวเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคอยู่ ส่วนภาพถ่ายตัดขวางก็ยังไม่เห็นการกระจายตัวของอนุภาคที่ชัดเจน เนื่องจากเฟสเสริมแรงมีขนาดในระดับนาโนเมตร ทำให้อนุภาครวมตัวกันเป็นก้อนและกระจายตัวได้ไม่ดีเมื่ออยู่ในเฟสพอลิเมอร์เมทริกซ์ แต่เกิดความเป็นรูพรุนในชั้นวัสดุคอมโพสิตแทนและพบว่ามีการเกิดรูพรุนเกิดขึ้นในชั้นงานในอัตราส่วนที่มีการเจืออนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ในอัตราส่วนตั้งแต่ 2 -5 wt.% โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นการเจือที่มีอัตราส่วนที่เพิ่มสูงขึ้น ภาพถ่ายผิวหน้าและภาพถ่ายตัดขวางจะแสดงดังภาพที่ 4.17



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.17 a.) แสดงภาพผิวหน้าของคอมโพสิตอีพอกซีบริสุทธิ์

b.) แสดงภาพตัดขวางของคอมโพสิตอีพอกซีบริสุทธิ์

c.) แสดงภาพผิวหน้าของคอมโพสิตอีพอกซีกับซิลิกอนไดออกไซด์อัตราส่วน 1 wt.%

d.) แสดงภาพผิวตัดขวางของคอมโพสิตอีพอกซีกับซิลิกอนไดออกไซด์อัตราส่วน 1 wt.%

e.) แสดงภาพผิวหน้าของอีพอกซีกับซิลิกอนไดออกไซด์อัตราส่วน 2 wt.%

f.) แสดงภาพผิวตัดขวางของคอมโพสิตอีพอกซีกับซิลิกอนไดออกไซด์อัตราส่วน 2 wt.%

g.) แสดงภาพผิวหน้าของคอมโพสิตอีพอกซีกับซิลิกอนไดออกไซด์อัตราส่วน 3 wt %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- h.) แสดงภาพผิวตัดขวางของคอมโพสิตอีพอกซีกับซิลิกอนไดออกไซด์อัตราส่วน 3 wt.%
- i.) แสดงภาพผิวหน้าของคอมโพสิตอีพอกซีกับซิลิกอนไดออกไซด์อัตราส่วน 4 wt.%
- j.) แสดงภาพผิวตัดขวางของคอมโพสิตอีพอกซีกับซิลิกอนไดออกไซด์อัตราส่วน 4 wt.%
- k.) แสดงภาพผิวหน้าของคอมโพสิตอีพอกซีกับซิลิกอนไดออกไซด์อัตราส่วน 5 wt.%
- l.) แสดงภาพผิวตัดขวางของคอมโพสิตอีพอกซีกับผงแก้วอัตราส่วน 5 wt.%

4.3.3 สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า

Vickers's Hardness เทคนิคนี้เป็นการตรวจวัดค่าความแข็งของวัสดุโดยใช้หัวกดรูปพีระมิด หัวกดเป็นเพชรและแข็งมาก โดยในที่นี้ได้นำคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้าที่ขึ้นรูปแล้ว ไปให้แรงกดโดยใช้น้ำหนัก 0.9 นิวตัน เป็นเวลา 5 วินาที และถ่ายภาพรอยกดของแต่ละชิ้นงาน โดยชิ้นงานจะมีอีพอกซีที่เจือซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า ซึ่งจะเรียงลำดับได้ดังนี้ ได้แก่ อีพอกซีเรซินบริสุทธิ์, อีพอกซีที่เจือซิลิกา 1 wt.%, 2 wt.%, 3 wt.%, 4 wt.% และ 5 wt.% ตามลำดับ ซึ่งขนาดรอยกดจะแสดงดังภาพที่ 4.18 และแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยของรอยกดที่อัตราส่วนต่าง ๆ จะแสดงดังตารางที่ 4.5



ภาพที่ 4.18 แสดงรอยกดบนคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าความแข็งของวิกเกอร์ของอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า

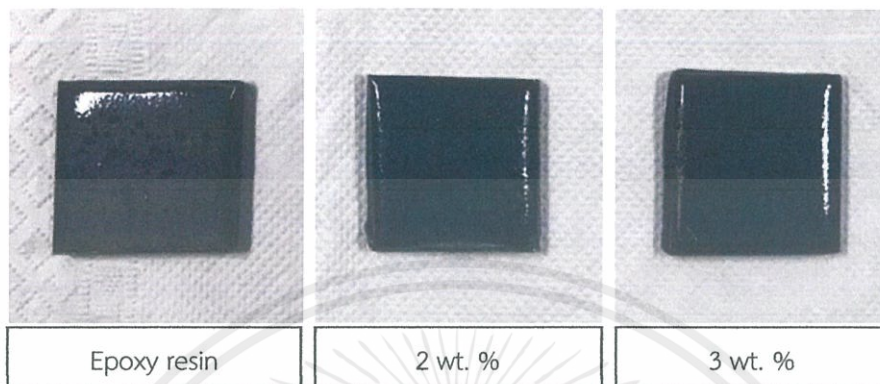
SiO ₂ Commercial	HV _v (Average)	S.D.(±)
0 wt. %	1.45	0.94
1 wt. %	2.99	0.44
2 wt. %	4.58	0.91
3 wt. %	4.71	0.86
4 wt. %	2.35	0.95
5 wt. %	2.26	1.32

จากภาพที่ 4.18 แสดงรอยกดบนคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า โดยเรียงลำดับการเจืออนุภาคซิลิกา ตั้งแต่ 0 - 5 wt.% ตามลำดับและจากตารางที่ 4.5 แสดงค่าความแข็งที่ได้ พบว่าอีพอกซีบริสุทธิ์มีค่าความแข็งเท่ากับ 1.45 HV และพบว่าการเจืออนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ในอัตราส่วน 1 wt.% โดยน้ำหนักมีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 2.99 HV , ที่ 2 wt.% มีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 4.58 HV , ที่ 3 wt.% โดยน้ำหนักมีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 4.71 HV , ที่ 4 wt.% โดยน้ำหนักมีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 2.35HV และ 5 wt.% โดยน้ำหนักมีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 2.26 HV จากข้อมูลที่ได้พบว่าการเจืออนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ที่อัตราส่วน 2 และ 3 wt.% โดยน้ำหนัก มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นโดยเด่นกว่าอัตราส่วนอื่นๆ มีค่าความแข็งเฉลี่ยอยู่เท่ากับ 4.58 และ 4.71 ตามลำดับเนื่องมาจากอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้ามีขนาดเล็กอยู่ในระดับนาโนเมตรและการเสริมแรงที่ดีจะต้องมีอนุภาคที่เจือในอัตราส่วนหรือสัดส่วนที่เหมาะสมกับเฟสเมตริกซ์ เพราะจะส่งผลถึงการกระจายตัวที่ดีด้วย ที่อัตราส่วน 2 wt.% และ 3 wt.% เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดทำให้เกิดการกระจายตัวที่ดี และมีการรวมตัวกันน้อยกว่าอัตราส่วนอื่นๆ นอกจากนี้การยังมีปัจจัยอื่นมาเกี่ยวข้อง คือ การเสริมแรงด้วยอนุภาคระดับนาโนเมตรเป็นการเพิ่มสมบัติเชิงกลในระดับอะตอมหรือพันธะในโมเลกุล การเสริมแรงด้วยอนุภาคนาโนนี้จึงทำให้มีการเกิดยึดกันของพันธะระหว่างสองเฟสที่ดีและแข็งแรงกว่าการเสริมแรงด้วยอนุภาคขนาดใหญ่ ส่งผลให้คอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้ามีค่าความแข็งที่มากกว่าคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับผงแก้ว

4.4 ผลการตรวจสอบผิวเคลือบคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับกับผงแก้ว

จากผลการทดลองในตอนที่แล้วได้ทำการเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสม คือมีความแข็งแรงมากที่สุดมาเตรียมเป็นผิวเคลือบโลหะ โดยในขั้นตอนนี้จะเป็นการเคลือบอีพอกซีเรซินกับซิลิกาจากผงแก้ว (Glass powder) ลงบนแผ่นโลหะที่เตรียมไว้ (DSS 2205) โดยจะเตรียมคอมโพสิตระหว่างอีพอกซีเรซินกับซิลิกาในอัตราส่วนที่เหมาะสมที่จะเคลือบดังนี้ คือเคลือบด้วยอีพอกซีบริสุทธิ์ 0 wt.% เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

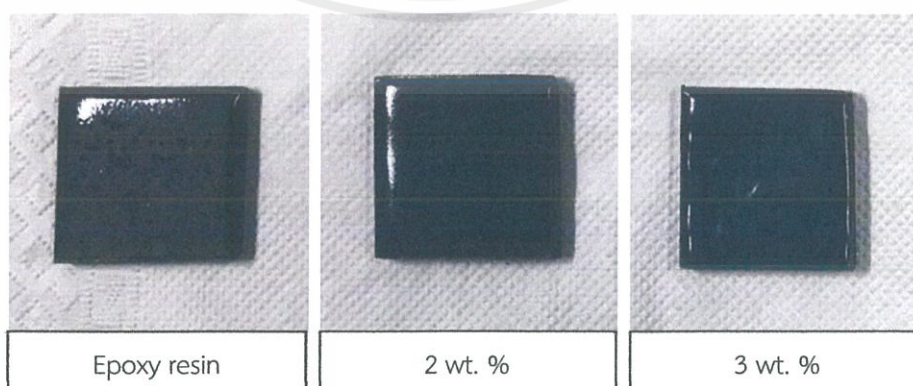
2 wt.% และ 3 wt.%, โดยน้ำหนัก ซึ่งคอมโพสิตที่ได้จะแสดงดังภาพที่ 4.19 จะเห็นว่าเหล็กที่เคลือบด้วยอีพอกซีบริสุทธิ์ จะมีลักษณะแข็งและใส ส่วนเหล็กที่เคลือบด้วยอีพอกซีกับซิลิกาในอัตราส่วน 2 wt.% และ 3 wt.% จะมีลักษณะแข็งและใสเช่นกันและมองเห็นถึงอนุภาคที่กระจายตัวกันภายในคอมโพสิตชัดเจนมากขึ้นตามลำดับของปริมาณการเจือ



ภาพที่ 4.19 ผิวเคลือบคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับผงแก้ว

4.5 ผลการตรวจสอบผิวเคลือบคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับกับซิลิกอนไดออกไซด์

โดยในขั้นตอนนี้จะเป็นการเคลือบอีพอกซีเรซินกับซิลิกาทางการค้า (SiO_2 nanoparticle) ลงบนแผ่นโลหะที่เตรียมไว้ (DSS 2205) โดยจะเตรียมคอมโพสิตระหว่างอีพอกซีเรซินกับซิลิกาทางการค้าในอัตราส่วนที่เหมาะสมที่จะเคลือบดังนี้ คือเคลือบด้วยอีพอกซีบริสุทธิ์ 0 wt. % 2 wt.% และ 3 wt.%, โดยน้ำหนัก ซึ่งคอมโพสิตที่ได้จะแสดงดังภาพที่ 4.20 จะเห็นว่าเหล็กที่เคลือบด้วยอีพอกซีบริสุทธิ์ จะมีลักษณะแข็งและใส ส่วนเหล็กที่เคลือบด้วยอีพอกซีกับซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้าในอัตราส่วน 2 wt.% และ 3 wt.% โดยน้ำหนัก จะมีลักษณะแข็งและใสเช่นกันแต่จะมองไม่เห็นถึงอนุภาคที่กระจายตัวกัน เนื่องจากอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ที่เจือลงไปมีขนาดเล็กและเจือในปริมาณที่น้อย

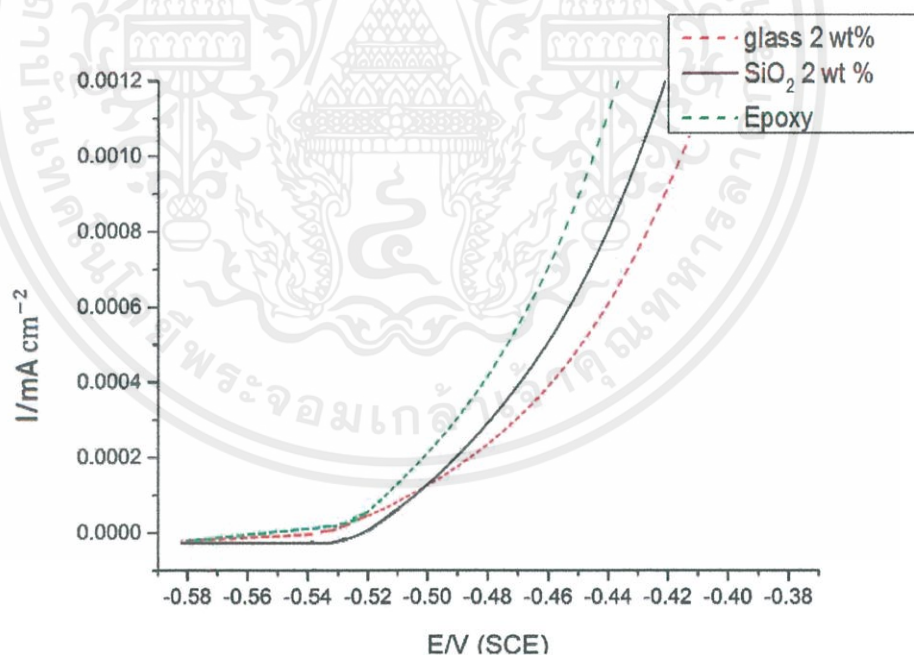


ภาพที่ 4.20 ผิวเคลือบคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

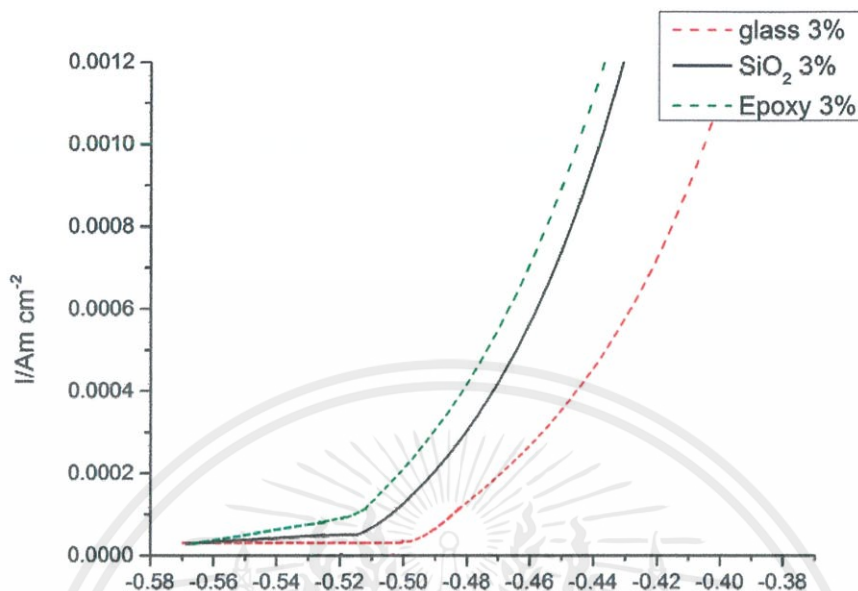
4.6 การตรวจสอบความต้านทานต่อการกัดกร่อน

ตรวจสอบด้วยเทคนิค Potentiodynamic (Linear polarization mode) เทคนิคนี้เตรียมโดยนำชิ้นโลหะที่เคลือบด้วยคอมโพสิตไปแช่ในโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 3.5 % ทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวัดโดยนำชิ้นโลหะต่อเข้ากับขั้วไฟฟ้าและจุ่มลงในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ความเข้มข้น 3.5 % และวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อัตราการสแกนเท่ากับ 1 มิลลิโวลต์ต่อวินาที (scan rate 1 mV s^{-1}) แสดงดังภาพที่ 4.21 และ 4.22 จากกราฟที่ได้เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันที่ให้กับโลหะที่เคลือบด้วยคอมโพสิตอีพอกซีกับสารเจืออัตราส่วน 2 wt.% และ 3 wt.% โดยน้ำหนัก ได้แก่ ผงแก้ว ซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้าและอีพอกซีบริสุทธิ์ แสดงการเปลี่ยนแปลงของเส้นโค้งโพลาริเซชันดังภาพที่ 4.21 พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของศักย์การกัดกร่อนของฟิล์มที่ไม่แตกต่างกันมากนัก คือ ผงแก้วมีค่าศักย์การกัดกร่อน เท่ากับ -0.54 และ -0.52 ตามลำดับ ส่วนภาพที่ 4.22 เป็นพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงที่ให้ค่าศักย์การกัดกร่อนของฟิล์มที่ไม่แตกต่างกันมากเช่นกัน คือ ผงแก้วมีค่าศักย์การกัดกร่อน เท่ากับ -0.49 และ -0.51 ตามลำดับ และแสดงค่าศักย์การกัดกร่อนเพื่อเปรียบเทียบดังตารางที่ 4.6



ภาพที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันที่ให้กับโลหะที่เคลือบด้วยคอมโพสิตอีพอกซีกับเฟสเสริมแรงในอัตราส่วน 2 wt.% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันที่ให้กับโลหะที่เคลือบด้วยคอมโพสิตอีพอกซีกับเฟสเสริมแรงในอัตราส่วน 3 wt.% โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.6 แสดงค่า Break down potential (E_b) ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 3.5%

อัตราส่วนอีพอกซี/เฟสเสริมแรง	E_b (V/SCE)	
	อัตราส่วน 2 wt.%	อัตราส่วน 3 wt.%
อีพอกซีเรซิน/ผงแก้ว	- 0.54	- 0.49
อีพอกซีเรซิน/ซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า	- 0.52	- 0.51

จากตารางที่ 4.6 สามารถเรียงลำดับคอมโพสิตที่มีความสามารถในการต้านทานต่อการกัดกร่อนจากมากที่สุดไปน้อยที่สุด ได้แก่ อีพอกซีเรซิน/ผงแก้ว 3 wt.% > อีพอกซีเรซิน/ซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า 3 wt.% > อีพอกซีเรซิน/ผงแก้ว 2 wt.% > อีพอกซีเรซิน/ซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า 2 wt.% ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการเจือสารเจือในอัตราส่วนที่เหมาะสมคือ 3 wt.% โดยน้ำหนักมีผลต่อความสามารถในการต้านทานต่อการกัดกร่อนคือมีค่ามากกว่าอัตราส่วน 2 wt.% ทั้งนี้ด้วยค่าศักย์การต้านทานต่อการกัดกร่อนที่มีค่าไม่แตกต่างกันมากนักของทั้งผงแก้วและซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า จึงนำไปสู่ผลสรุปที่ว่าคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับผงแก้วสามารถใช้งานเป็นผิวเคลือบที่มีความแข็งแรงทนทานได้เทียบเท่ากับคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้เป็นการสรุปผลการทดลองที่ได้จากการเตรียมผงแก้วจากเศษแก้วแตก ด้วยเทคนิคบดหยาบและบดย่อย (Vibratory ball milling) และการเตรียมคอมโพสิตระหว่างอีพอกซีเรซินกับผงแก้วและอีพอกซีกับซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้า โดยการหล่อขึ้นรูปแบบดั้งเดิม (conventional casting) ในอัตราส่วน 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 2 ชั่วโมง โดยซิลิกาที่เตรียมได้จากเศษแก้วแตกถูกนำไปตรวจสอบขนาดอนุภาคด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle size distribution analyzer) พบว่ามีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 3149.1 นาโนเมตร ซึ่งเป็นถือได้ว่าอนุภาคมีขนาดใหญ่ และจากการนำอนุภาคไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าขนาดอนุภาคมีขนาดที่แตกต่างกัน แต่ก็ไม่มีจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน

2.สามารถเตรียมอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์จากเศษแก้วแตกได้ โดยผลิตจากสิ่งที่เหลือใช้แล้วและไม่เกิดประโยชน์ โดยมีขนาดอนุภาคที่สามารถใช้งานทดแทนซิลิกอนไดออกไซด์นาโนทางการค้าได้ จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค EDX , FT-IR และ XRF พบว่าซิลิกอนไดออกไซด์จากผงแก้วมีปริมาณธาตุซิลิกาอยู่ 31.10 % และมีปริมาณสารประกอบซิลิกอนไดออกไซด์มากถึง 66.50 % ซึ่งใกล้เคียงกับปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ในแก้วประเภทโซดาไลม์จากข้อมูลพื้นฐานและสามารถใช้ทดแทนกันได้ อีกทั้งยังสามารถลดค่าใช้จ่ายได้เป็นอย่างมาก

3.การขึ้นรูปคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์จากผงแก้ว และขึ้นรูปอีพอกซีเรซินกับอนุภาคนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้าเพื่อใช้เป็นชุดควบคุม โดยมีอัตราส่วนในการขึ้นรูปคือ 0 wt.% , 2 wt.% , 3 %wt. , 4 wt.% และ 5 wt. % โดยน้ำหนัก ผลที่ได้พบว่าคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์จากผงแก้วสามารถขึ้นรูปสม่ำเสมอในทุกอัตราส่วนและมีการกระจายตัวของอนุภาคที่ดีในอัตราส่วน 4 % wt. และ 5 wt.% ตรวจสอบด้วยการวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ มีค่าดังนี้ คือ 1.74 HV และ 1.85 HV ในส่วนของการขึ้นรูปอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้าที่อัตราส่วน 2 %wt. และ 3 %wt. มีค่าความแข็งที่มากที่สุด คือ 4.58 HV และ 4.71 HV และมีบางอัตราส่วนที่ขึ้นรูปแล้วชิ้นงานไม่สม่ำเสมอ คือ อัตราส่วนที่เจืออนุภาคนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การค้ำในปริมาณมาก คือ 4 wt. % และ 5 wt. % เนื่องจากขนาดของอนุภาคมีขนาดเล็ก (15-30 นาโนเมตร) เมื่อเจือในปริมาณที่มากจะทำให้อนุภาคเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนและกระจายตัวได้ไม่ดีในเมตริกซ์อีพอกซี จึงส่งผลต่อค่าความแข็งแรงที่ได้ อย่างไรก็ตามที่อัตราส่วนดังกล่าวก็ยังให้ค่าความแข็งแรงที่สูงกว่าคอมโพสิตอีพอกซีกับซิลิกอนไดออกไซด์จากผงแก้ว เนื่องจากผงแก้วมีขนาดอนุภาคใหญ่ ทำให้กลไกการเสริมแรงเป็นความแข็งแรงของรอยต่อบริเวณเฟสเมตริกซ์และเฟสเสริมแรงเท่านั้น ไม่ได้เป็นการเสริมแรงในระดับอะตอมหรือพันธะในโมเลกุลแต่อย่างใด

4. การเคลือบผิวโลหะด้วยคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับผงแก้วและอีพอกซีเรซินกับอนุภาคนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้าโดยเลือกอัตราส่วน 0 wt. % , 2 wt.% และ 3 wt.% ผิวเคลือบที่ได้มีลักษณะแข็งและใสเมื่อมองด้วยตาเปล่าและเมื่อนำไปตรวจสอบความต้านทานต่อการกัดกร่อนด้วยเทคนิค Potentiodynamic (mode linear polarization) พบว่าโลหะที่เคลือบด้วยคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์จากผงแก้ว ที่อัตราส่วน 2 wt.% มีค่าศักย์การต้านทานต่อการกัดกร่อน breakdown potential (E_b) เท่ากับ -0.54 และที่อัตราส่วน 3 wt.% มีค่าเท่ากับ -0.49 ส่วนโลหะที่เคลือบด้วยคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับอนุภาคนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ทางการค้าที่อัตราส่วน 2 wt.% มีค่าศักย์การต้านทานต่อการกัดกร่อน เท่ากับ -0.52 และที่อัตราส่วน 3 wt.% มีค่าเท่ากับ -0.51 สามารถสรุปได้ว่าโลหะที่เคลือบด้วยคอมโพสิตอีพอกซีเรซินกับซิลิกอนไดออกไซด์จากผงแก้วที่อัตราส่วน 3 wt.% สามารถทนการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 % สามารถทนต่อการกัดกร่อนได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนอื่น ๆ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในขั้นตอนการเตรียมซิลิกอนไดออกไซด์จากเศษแก้วแตก ควรเพิ่มเวลาในการบดย่อย (Vibratory ball milling) ให้นานมากยิ่งขึ้นเพื่อให้ขนาดอนุภาคอยู่ในระดับที่เล็กลงและเพื่อให้อนุภาคมีขนาดและการกระจายตัวที่ใกล้เคียงและสม่ำเสมอมากยิ่งขึ้น

2. ในขั้นตอนการตรวจสอบควรเพิ่มเทคนิคอื่น ๆ ที่สามารถตรวจวัดความแข็งหรือการโค้งงอหรือการแตกหักของคอมโพสิตหรือรอยแตกของฟิล์มโดยตรงเช่น Three point bending (3PB) และ Acoustic emission เป็นต้น

3. ในขั้นตอนการเคลือบคอมโพสิตลงบนโลหะควรเคลือบให้ครอบคลุมพื้นที่ผิวโลหะให้ทั่วทั้งชิ้น อาจเปลี่ยนวิธีการเคลือบจากการเทเป็นการจุ่มเคลือบแทน เนื่องจากเวลาตรวจวัดจะได้ค่าความสามารถในการต้านทานต่อการกัดกร่อนจะได้อายุที่ถูกต้องและเป็นค่าจริง

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] [Online]. Available : <http://www.smartcoating.com/epoxy-floor.html>
- [4] [Online]. Available : [http://myanmapurchase.com/article/p-259#googtrans\(my\)](http://myanmapurchase.com/article/p-259#googtrans(my))
- [5] [Online]. Available : <https://resinsj.com/2015/>
- [6] [Online]. Available :
http://web.eng.nu.ac.th/eng2012/cei/nanodatabase/info2.php?cat_id=5&p_id=167
- [7] [Online]. Available :
http://www.teacher.ssru.ac.th/reudee_ni/file.php/1/CeramicTechnology/c1-glass.pdf
- [8] [Online]. Available : <https://www.mtec.or.th/academic-services/mtec-knowledge/>
- [9] [Online]. Available : file:///C:/Users/User/Downloads/289_60-72.pdf
- [10] [Online]. Available : <file:///C:/Users/User/Downloads/>
- [11] Conradi , Kocijan, Kek-Merl, M. Zorko, I. Verpoest 2014 “Mechanical and anticorrosion properties of nanosilica-filled epoxy-resin composite coatings” J.Applied Surface Science : 432-437.
- [12] Gazala Ruhi และ S.K. Dhawan 2010 “Conducting Polymer Nano Composite Epoxy Coatings for Anticorrosive Applications” J.INTECH : 1-40.
- [13] [Online]. Available : http://www.thaiceramicsociety.com/pc_pre_grindmore.php
- [14] [Online]. Available :
<http://www.allartcenter.com/index.php?lay=show&ac=article&id=482737>
- [15] [Online]. Available : <http://th.eo-hi.com/grinding-machine/ball-mill-machine/energy-saving-ball-mill-machine.html>
- [16] [Online]. Available : http://www.thaiceramicsociety.com/pc_pre_grindmore.php
- [17] [Online]. Available : <http://web2.mfu.ac.th/center/stic/micro-analysis-instrument-menu/item/96-scanning-electron-microscrope.html>
- [18] [Online]. Available : <http://nwoodwerks.com>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [19] [Online]. Available : <http://www.intertek.com/analysis/microscopy/edx/>
- [20] [Online]. Available : <https://www.quora.com/What-is-the-cause-of-higher-magnification-in-electron-microscope>
- [21] [Online]. Available : <http://web2.mfu.ac.th/center/stic/micro-analysis-instrument-menu/item/113-particle-size-analyzer.html>
- [22] [Online]. Available : <https://www.iitk.ac.in/dord/energy-dispersive-spectroscopye>
- [23] [Online]. Available : <http://www.nst.or.th/article/article494/article49418.htm>
- [24] [Online]. Available : <http://web2.mfu.ac.th/center/stic/micro-analysis-instrument-menu/item/113-particle-size-analyzer.html>
- [25] [Online]. Available : http://digi.library.tu.ac.th/thesis/ra/0126/19APPENDIX_E.pdf
- [26] [Online]. Available : <https://nuc2011.wordpress.com/>
- [27] [Online]. Available : <http://share.psu.ac.th/blog/aym2/16857>
- [28] [Online]. Available : http://www.slri.or.th/th/index.php?option=com_content&view=article&id=120:-6-micro-xrfxrd&catid=45:2010-11-01-18-55-39
- [29] [Online]. Available : http://personal.sut.ac.th/heattreatment/context/Measurement_Of_Hardness.html
- [30] [Online]. Available : <http://twiprofessional.com/content/jk74.html>
- [31] รศ. ศิริลักษณ์ นิรัฐจรรยา ปีพ.ศ. 2545 “การกัดกร่อนและการเลือกใช้วัสดุ” คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ พิมพ์ครั้งที่ 1
- [32] 2004 “Standard Practice for Convention Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing “ J.ASTM G : 3 – 89 .

ประวัติผู้เขียน

นางสาวนิตยา พันธุ์สะอาด เกิดวันที่ 23 พฤษภาคม พ.ศ. 2538 ณ โรงพยาบาลตำรวจ เขต ปทุมวัน จังหวัดกรุงเทพมหานคร จบการศึกษาระดับชั้นประถมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนสมคิดจิตต์วิทยา ในปีการศึกษา 2550 จบการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนบ่อทองวงษ์จันทร์วิทยา ปีการศึกษา 2556 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับอุดมศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้