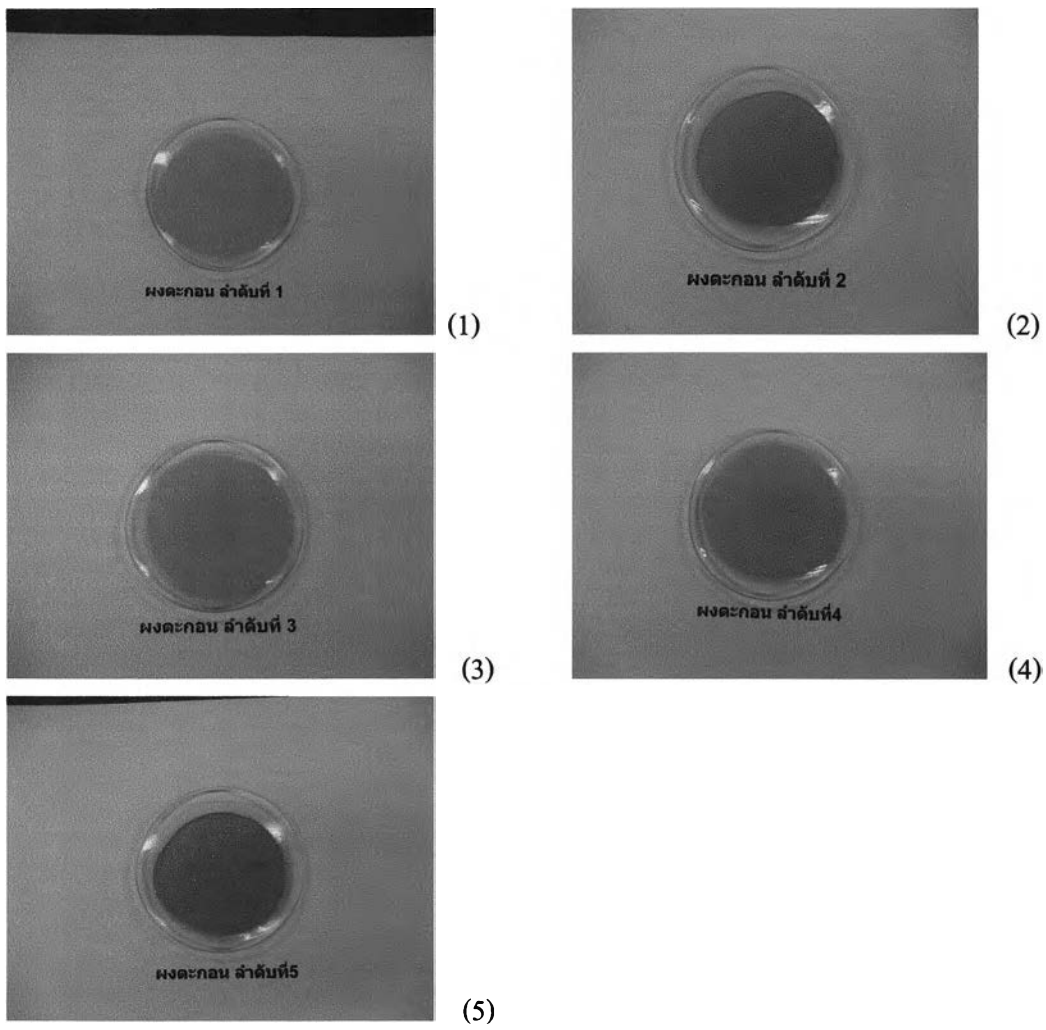
สำนักงานวิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของผงตะกอน

ลักษณะทางกายภาพของผงตะกอน 5 ตัวอย่าง หลังการคัดขนาดด้วยตะแกรงร่อน100 mesh แสดงดังรูปที่ 4.1

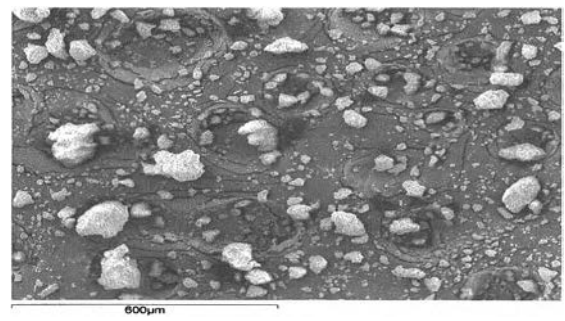


รูปที่ 4.1 ผงตะกอนจากกระบวนการสร้างและรวมตะกอนหลังการคัดขนาด

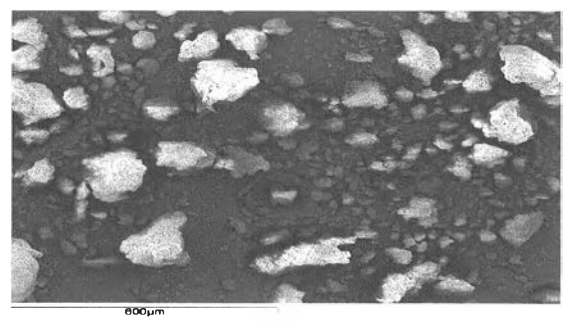
จากรูปที่ 4.1 พบว่าผงตะกอนทั้ง 5 ตัวอย่าง เป็นผงสีน้ำตาลละเอียดใกล้เคียงกัน และจากรูปที่ 4.2 -4.6 โดยเครื่อง SEM พบว่าลักษณะพื้นผิวทางกายภาพและรูปร่างของผงตะกอนคล้ายกัน คือ มีรูปทรงที่ไม่แน่นอน และที่กำลังขยายที่เท่ากันผงตะกอนมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า $CaCO_3$ และ

I96877053

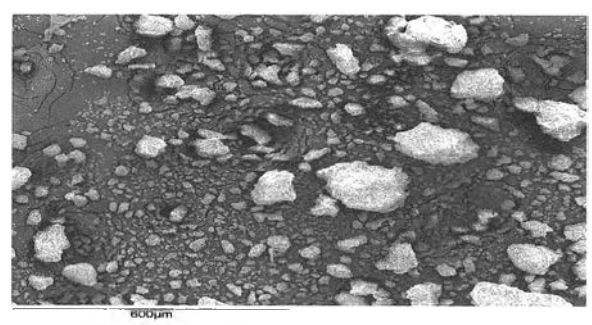
Glass spheres ซึ่งเป็นตัวเติมสำหรับผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ดังรูปที่ 4.7 และ 4.8



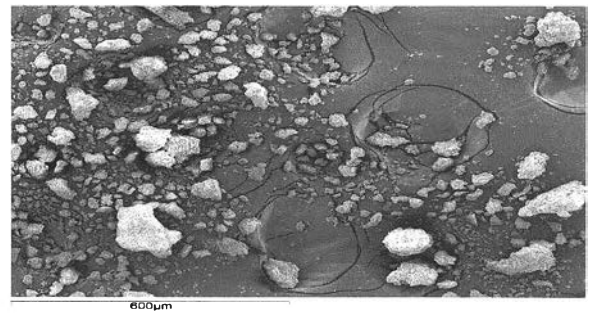
รูปที่ 4.2 ลักษณะพื้นผิวทางกายภาพของผงตะกอนตัวอย่างที่ 1 จากเครื่อง SEM ด้วยกำลังขยาย 100 เท่า



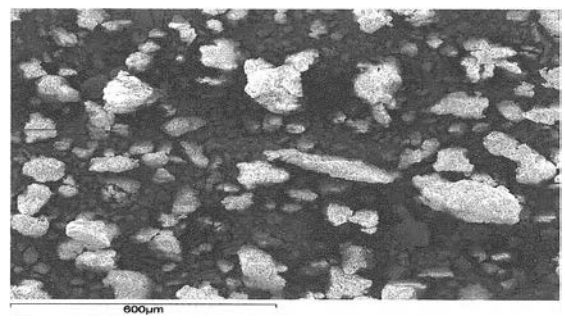
รูปที่ 4.3 ลักษณะพื้นผิวทางกายภาพของผงตะกอนตัวอย่างที่ 2 จากเครื่อง SEM ด้วยกำลังขยาย 100 เท่า



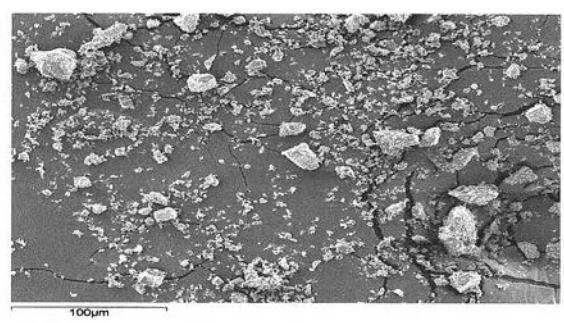
รูปที่ 4.4 ลักษณะพื้นผิวทางกายภาพของผงตะกอนตัวอย่างที่ 3 จากเครื่อง SEM ด้วยกำลังขยาย 100 เท่า



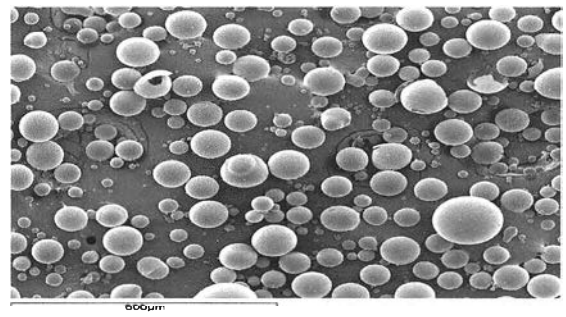
รูปที่ 4.5 ลักษณะพื้นผิวทางกายภาพของผงตะกอนตัวอย่างที่ 4 จากเครื่อง SEM ด้วยกำลังขยาย 100 เท่า



รูปที่ 4.6 ลักษณะพื้นผิวทางกายภาพของผงตะกอนตัวอย่างที่ 5 จากเครื่อง SEM ด้วยกำลังขยาย 100 เท่า



รูปที่ 4.7 ลักษณะพื้นผิวทางกายภาพของ $CaCO_3$ จากเครื่อง SEM ด้วยกำลังขยาย 100 เท่า



รูปที่ 4.8 ลักษณะพื้นผิวทางกายภาพของ Glass spheres จากเครื่อง SEM ด้วยกำลังขยาย 100 เท่า

จากรูปที่ 4.7 และ 4.8 พบว่า $CaCO_3$ เป็นอนุภาคที่มีรูปทรงไม่แน่นอนและมีการกระจายตัวของอนุภาคไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังมีขนาดอนุภาคเล็กว่า Glass spheres ซึ่งเป็นรูปทรงกลม มีขนาดอนุภาคเล็กและใหญ่ปนกัน

เมื่อวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของผงตะกอนจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย ความหนาแน่น เปอร์เซ็นต์ความชื้น pH และการนำไฟฟ้า ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.1 และเปรียบเทียบกับ $CaCO_3$ และ Glass spheres แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย ความหนาแน่น pH การนำไฟฟ้า และเปอร์เซ็นต์ความชื้นของผงตะกอน

ตัวอย่างผงตะกอน	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (μm)	ความหนาแน่น (g/cm^3)	pH	การนำไฟฟ้า (μS)	เปอร์เซ็นต์ความชื้น (%)
1	46.50	1.4295	7.15	750	6.35
2	57.77	1.4422	7.55	800	6.32
3	53.48	1.4548	7.40	670	7.55
4	45.79	1.4911	7.20	1475	8.24
5	62.35	1.4062	7.60	785	6.26
ค่าเฉลี่ย	53.18	1.4448	7.38	896	6.94

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาค ความหนาแน่น pH การนำไฟฟ้า และเปอร์เซ็นต์ความชื้นของผงตะกอนกับ $CaCO_3$ และ Glass spheres

ข้อมูล	ผงตะกอน*	$CaCO_3$	Glass spheres
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (μm)	53.18	9	60
ความหนาแน่น (g/cm^3)	1.4448	2.7	0.19
pH	7.38	7.1	7.0
การนำไฟฟ้า (μS)	896	500	600
เปอร์เซ็นต์ความชื้น (%)	6.94	0.01	6.59

* ค่าเฉลี่ยจากผงตะกอน 5 ตัวอย่าง

จากตารางที่ 4.2 พบว่าผงตะกอนมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า $CaCO_3$แต่ใกล้เคียงกับ Glass spheres ความหนาแน่นของผงตะกอนต่ำกว่า $CaCO_3$ แต่สูงกว่า Glass spheres อย่างชัดเจน เมื่อพิจารณา pH พบว่ามีความเป็นกลางเช่นเดียวกัน นอกจากนี้ผงตะกอนมีการนำไฟฟ้าและเปอร์เซ็นต์ความชื้นมากกว่า $CaCO_3$ และ Glass spheres

4.2 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของพรีพอลิเมอร์อิพ็อกซีและผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซี

4.2.1 ความหนืดของพรีพอลิเมอร์อิพ็อกซีเมื่อใช้ผงตะกอนแทน $CaCO_3$

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบความหนืดของพรีพอลิเมอร์อิพ็อกซีเมื่อใช้ผงตะกอนแทน $CaCO_3$ ที่ 25 , 50 , 75 และ 100% (w/w) แทน $CaCO_3$ ตามสูตรจากตารางที่ 3.1 พบว่าเมื่อใช้ผงตะกอนแทน $CaCO_3$ ความหนืดของพรีพอลิเมอร์อิพ็อกซีเพิ่มขึ้นตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม เพราะความต้านทานการไหลของอนุภาคผงตะกอนที่มีขนาดอนุภาคใหญ่จะมากกว่า

สูตรที่เติมผงตะกอนแทน$CaCO_3$ ปริมาณ 25% (w/w) มีความหนืดที่ 30°C เท่ากับ 1.60×10^6 cP ซึ่งอยู่ในช่วงความหนืดของพรีพอลิเมอร์อิพ็อกซีสูตรควบคุมหรือสูตรมาตรฐานที่บริษัทใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีมากที่สุด ($1.40 - 1.60 \times 10^6$cP) ถ้าเติมผงตะกอนแทน $CaCO_3$ มากเกินกว่าที่ 25% (w/w) ความหนืดของพรีพอลิเมอร์อิพ็อกซีจะมากเกินไปทำให้การใช้ผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีในการทาเคลือบผิวยากขึ้น

ตารางที่ 4.3 ความหนืดของพรีพอลิเมอร์อิพ็อกซีเมื่อใช้ผงตะกอนแทน $CaCO_3$

สูตร	อัตราส่วนผสม	ความหนืด x 10^{-6} (cP) ที่ 30 ^{o}C
Control	epoxy prepolymer + diluent + silica fume + TiO_2 + $CaCO_3$ 100% + glass spheres 100% + solvent No.1	1.50
1	epoxy prepolymer + diluent + silica fume + TiO_2 + $CaCO_3$ 75 % + glass spheres + solvent No.1+ ผงตะกอน 25 %	1.60
2	epoxy prepolymer + diluent + silica fume + TiO_2 + $CaCO_3$ 50% + glass spheres + solvent No.1+ ผงตะกอน 50 %	1.80
3	epoxy prepolymer + diluent + silica fume + TiO_2 + $CaCO_3$ 25% + glass spheres + solvent No.1+ ผงตะกอน 75 %	2.80
4	epoxy prepolymer + diluent + silica fume + TiO_2 + glass spheres + solvent No.1+ ผงตะกอน 100%	3.00

สูตรควบคุม (Control) หมายถึง สูตรมาตรฐานที่บริษัทใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซี

4.2.2 ระยะเวลาการแห้งสัมผัสของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีเมื่อใช้ผงตะกอนแทน $CaCO_3$

ผลของระยะเวลาการแห้งสัมผัสของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีเมื่อใช้ผงตะกอนแทน $CaCO_3$ ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.4 ในทำนองเดียวกันกับการทดสอบความหนืด พบว่าเมื่อเติมผงตะกอนแทน $CaCO_3$ ปริมาณ 25% (w/w) ระยะเวลาการแห้งสัมผัสของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีจะใกล้เคียงกับสูตรควบคุม แต่ระยะเวลาการแห้งสัมผัสเร็วเกินไปไม่เป็นที่ต้องการสำหรับงานที่ใช้ผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซี เพราะแสดงว่าปฏิกิริยาระหว่างพรีพอลิเมอร์อิพ็อกซีกับสารทำแข็งเกิดเร็วทำให้การปรับแต่งผิวงานทำได้ยาก

ตารางที่ 4.4 ระยะเวลาการแห้งสัมผัสของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีเมื่อใช้ผงตะกอนแทน $CaCO_3$

สูตร	อัตราส่วนผสม	ระยะเวลาการแห้งสัมผัส (นาที)
Control	epoxy prepolyemer + diluent + silica fume + TiO_2+ $CaCO_3$ 100% + glass spheres 100% + solvent No.1	165
1	epoxy prepolyemer + diluent + silica fume + TiO_2+ $CaCO_3$ 75 % + glass spheres + solvent No.1+ ผงตะกอน 25 %	150
2	epoxy prepolyemer + diluent + silica fume + TiO_2 + $CaCO_3$ 50% + glass spheres + solvent No.1+ ผงตะกอน 50 %	140
3	epoxy prepolyemer + diluent + silica fume + TiO_2+ $CaCO_3$ 25% + glass spheres + solvent No.1+ ผงตะกอน 75 %	135
4	epoxy prepolyemer + diluent + silica fume + TiO_2 + glass spheres + solvent No.1+ ผงตะกอน 100%	120

4.2.3 ความหนืดของพรีพอลิเมอร์อิพ็อกซีเมื่อใช้ผงตะกอนแทน Glass spheres

ความหนืดของพรีพอลิเมอร์อิพ็อกซีเมื่อใช้ ผงตะกอนแทน Glass spheres ที่ 25 , 50 , 75 และ 100 % (w/w) แสดงดังตารางที่ 4.5 เนื่องจากขนาดอนุภาคของผงตะกอนเล็กกว่า Glass spheres เพียงเล็กน้อย ดังนั้นเมื่อใช้ผงตะกอนแทน Glass spheres เพียง 25% (w/w) ความหนืดของพรีพอลิเมอร์อิพ็อกซีจะมากกว่าความหนืดของพรีพอลิเมอร์อิพ็อกซีสูตรควบคุมเล็กน้อย แต่การเติมผงตะกอนซึ่งมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าแทน Glass spheres ในปริมาณเพิ่มขึ้นผลรวมของความต้านทานการไหลจะลดลงจึงทำให้ความหนืดของพรีพอลิเมอร์อิพ็อกซีลดลง แต่ก็ไม่มากเนื่องจากขนาดอนุภาคไม่ได้แตกต่างกันมาก ดังนั้นปริมาณผงตะกอนที่เหมาะสมในการใช้แทน Glass spheres ในพรีพอลิเมอร์อิพ็อกซี คือ 25% (w/w)

ตารางที่ 4.5 ความหนืดของพรีพอลิเมอร์อิพ็อกซีเมื่อใช้ผงตะกอนแทน Glass spheres

สูตร	อัตราส่วนผสม	ความหนืด x 10^{-6} (cP) ที่ 30 ^{o}C
Control	epoxy prepolymer + diluent + silica fume + TiO_2 + $CaCO_3$ 100% + glass spheres 100% + solvent No.1	1.50
1	epoxy prepolymer + diluent + silica fume + TiO_2 + $CaCO_3$ + glass spheres 75% + solvent No.1+ ผงตะกอน 25 %	1.45
2	epoxy prepolymer + diluent + silica fume + TiO_2 + $CaCO_3$ + glass spheres 50% + solvent No.1+ ผงตะกอน 50 %	1.40
3	epoxy prepolymer + diluent + silica fume + TiO_2 + $CaCO_3$ + glass spheres 25% + solvent No.1+ ผงตะกอน 75 %	1.30
4	epoxy prepolymer + diluent + silica fume + TiO_2 + $CaCO_3$ + solvent No.1+ ผงตะกอน 100%	1.20

4.2.4 ระยะเวลาการแห้งสัมผัสของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีเมื่อใช้ผงตะกอนแทน Glass spheres

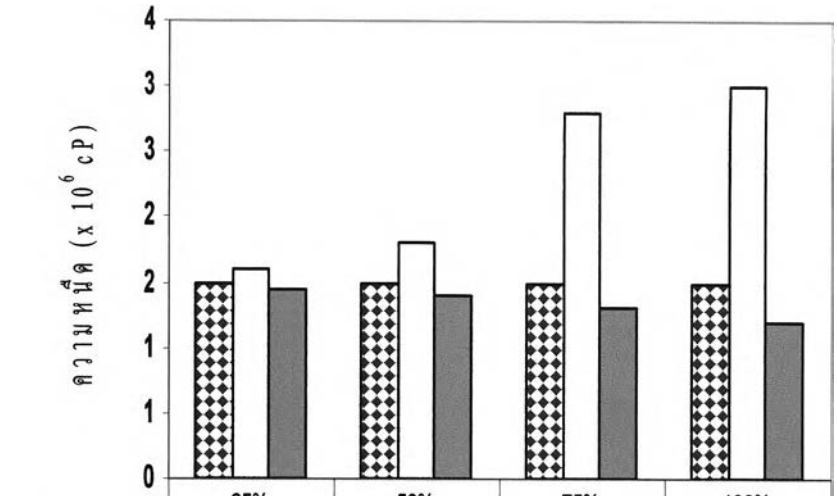
จากตารางที่ 4.6 เมื่อใช้ผงตะกอนแทน Glass spheres ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น พบว่าระยะเวลาการแห้งสัมผัสของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีจะนานขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาการแห้งสัมผัสของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีที่ใช้ผงตะกอนกับสูตรควบคุม สูตรที่เติมผงตะกอนแทน Glass spheres ปริมาณ 25% (w/w) จะมีระยะเวลาการแห้งสัมผัสของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีใกล้เคียงสูตรควบคุมมากที่สุด

ตารางที่ 4.6 ระยะเวลาการแห้งสัมผัสของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีเมื่อใช้ผงตะกอนแทน Glass spheres

สูตร	อัตราส่วนผสม	ระยะเวลาการแห้งสัมผัส (นาที)
Control	epoxy prepolymer + diluent + silica fume + TiO_2 + $CaCO_3$ 100% + glass spheres 100% + solvent No.1	165
1	epoxy prepolymer + diluent + silica fume + TiO_2 + $CaCO_3$ + glass spheres 75% + solvent No.1+ ผงตะกอน 25 %	180
2	epoxy prepolymer + diluent + silica fume + TiO_2 + $CaCO_3$ + glass spheres 50% + solvent No.1+ ผงตะกอน 50 %	190
3	epoxy prepolymer + diluent + silica fume + TiO_2 + $CaCO_3$ + glass spheres 25% + solvent No.1+ ผงตะกอน 75 %	195
4	epoxy prepolymer + diluent + silica fume + TiO_2 + $CaCO_3$ + solvent No.1+ ผงตะกอน 100%	200

4.2.5 การเปรียบเทียบความหนืดของพรีพอลิเมอร์อิพ็อกซีเมื่อใช้ผงตะกอนแทน $CaCO_3$ และ Glass spheres

เนื่องจากผงตะกอนจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียมีขนาดใกล้เคียงกับ Glass spheres มากกว่า $CaCO_3$ การใช้ผงตะกอนแทน Glass spheres ในพรีพอลิเมอร์อิพ็อกซีจึงมีความเหมาะสมมากกว่า จากรูปที่ 4.9 ความหนืดที่ 30 ^{o}C ความหนืดของพรีพอลิเมอร์อิพ็อกซีที่ใช้ผงตะกอนแทน Glass spheres ปริมาณ 25% (w/w) อยู่ในช่วงของค่าที่กำหนดผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีที่ต้องการ คือ 1,400,000 – 1,600,000 cP



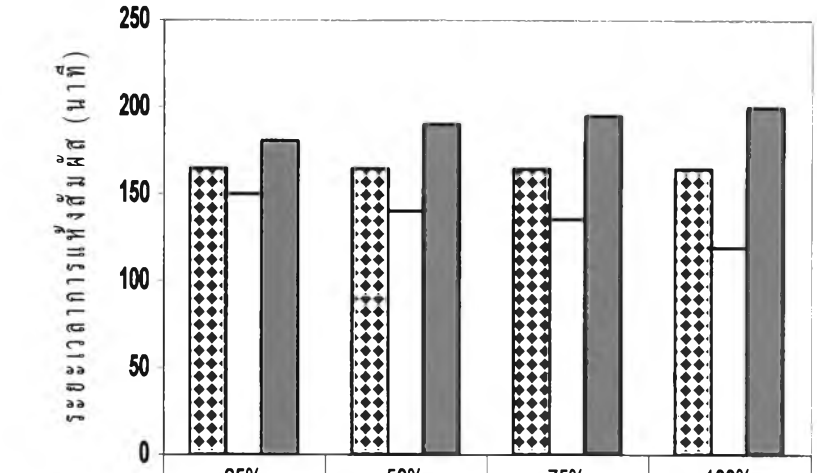
	25%	50%	75%	100%
Control	1.50	1.50	1.50	1.50
CaCO3	1.60	1.80	2.80	3.00
Glass Spheres	1.45	1.40	1.30	1.20

ผงตะกอน (% w/w)

รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบความหนืดของพรีพอลิเมอร์อิพ็อกซีเมื่อใช้ผงตะกอนแทน $CaCO_3$ และ Glass spheres

4.2.6 การเปรียบเทียบระยะเวลาการแห้งสัมผัสเมื่อใช้ผงตะกอนแทน $CaCO_3$ และ Glass spheres

รูป 4.10 แสดงความสัมพันธ์ของระยะเวลาการแห้งสัมผัสของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีเมื่อใช้ผงตะกอนแทน $CaCO_3$ และ Glass spheres ผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีที่ใช้ผงตะกอนทุกอัตราส่วนที่ศึกษา คือ 25, 50, 75 และ 100 % (w/w) แทน $CaCO_3$ หรือ Glass spheres มีระยะเวลาการแห้งสัมผัสอยู่ในช่วงค่าที่กำหนดของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีที่ต้องการ คือ 120 – 240 นาที



	25%	50%	75%	100%
Control	165	165	165	165
CaCO3	150	140	135	120
Glass Spheres	180	190	195	200

ผงตะกอน (% w/w)

รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบระยะเวลาการแห้งสัมผัสของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีเมื่อใช้ผงตะกอนแทน $CaCO_3$ และ Glass spheres

4.3 การวิเคราะห์สมบัติทางกลของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซี

4.3.1 ความทนแรงอัดเมื่อใช้ผงตะกอนแทน $CaCO_3$

ความทนแรงอัดของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีมีค่าลดลงเมื่อใช้ผงตะกอนแทน $CaCO_3$ ดังตารางที่ 4.7 เนื่องจากความหนาแน่นของผงตะกอนน้อยกว่า $CaCO_3$ ดังนั้นเมื่อปริมาณผงตะกอนมากขึ้นจึงทำให้ความทนแรงอัดของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีมีค่าลดลง ซึ่งสูตรที่ทำให้มีความทนแรงอัดของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีใกล้เคียงสูตรควบคุมมากที่สุด (46.76 – 51.82 MPa) คือสูตรที่นำผงตะกอนแทน $CaCO_3$ ปริมาณ 25% (w/w)

ตารางที่ 4.7 ความทนแรงอัดของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีเมื่อใช้ผงตะกอนแทน $CaCO_3$

สูตร	อัตราส่วนผสม	Maximum strength (MPa)
Control	epoxy prepolymer + diluent + silica fume + TiO_2 + $CaCO_3$ 100% + glass spheres 100% + solvent No.1	49.28
1	epoxy prepolymer + diluent + silica fume + TiO_2 + $CaCO_3$ 75 % + glass spheres + solvent No.1+ ผงตะกอน 25 %	43.86
2	epoxy prepolymer + diluent + silica fume + TiO_2 + $CaCO_3$ 50% + glass spheres + solvent No.1+ ผงตะกอน 50 %	39.52
3	epoxy prepolymer + diluent + silica fume + TiO_2 + $CaCO_3$ 25% + glass spheres + solvent No.1+ ผงตะกอน 75 %	36.34
4	epoxy prepolymer + diluent + silica fume + TiO_2 + glass spheres + solvent No.1+ ผงตะกอน 100%	33.51

4.3.2 ความแข็งเมื่อใช้ผงตะกอนแทน $CaCO_3$

ผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีมีความแข็งลดลงเพราะความหนาแน่นของผงตะกอนน้อยกว่า $CaCO_3$ ดังนั้นเมื่อปริมาณผงตะกอนมากขึ้นจึงทำให้ทำให้ความแข็งของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีมีค่าลดลงตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม ซึ่งสูตรที่ทำให้มีความแข็งของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีใกล้เคียงสูตรควบคุมมากที่สุด (79.71 – 81.49 MPa) คือ สูตรที่นำผงตะกอนแทน $CaCO_3$ ปริมาณ 25% (w/w) ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ความแข็งของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีเมื่อใช้ผงตะกอนแทน $CaCO_3$

สูตร	อัตราส่วนผสม	Hardness (MPa)
Control	epoxy prepolymer + diluent + silica fume + TiO_2 + $CaCO_3$ 100% + glass spheres 100% + solvent No.1	80.6
1	epoxy prepolymer + diluent + silica fume + TiO_2 + $CaCO_3$ 75% + glass spheres + solvent No.1+ ผงตะกอน 25 %	78.8
2	epoxy prepolymer + diluent + silica fume + TiO_2 + $CaCO_3$ 50% + glass spheres + solvent No.1+ ผงตะกอน 50 %	76.0
3	epoxy prepolymer + diluent + silica fume + TiO_2 + $CaCO_3$ 25% + glass spheres + solvent No.1+ ผงตะกอน 75 %	77.2
4	epoxy prepolymer + diluent + silica fume + TiO_2 + glass spheres + solvent No.1+ ผงตะกอน 100%	75.2

4.3.3 ความทนแรงอัดเมื่อใช้ผงตะกอนแทน Glass spheres

ผลจากการใช้ผงตะกอนแทน Glass spheres พบว่าความทนแรงอัดของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม ทั้งนี้เนื่องจากผงตะกอนมีความหนาแน่นมากกว่า Glass spheres และเมื่อพิจารณาจากอัตราส่วนผสมของ Glass spheres ที่ใช้ในสูตรจากตาราง 3.2 แล้วพบว่ามีปริมาณค่อนข้างน้อย ดังนั้นความทนแรงอัดของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีจึงไม่ต่างจากสูตรควบคุมมากนัก (46.76 – 51.82 MPa) แสดงตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ความทนแรงอัดของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีเมื่อใช้ผงตะกอนแทน Glass spheres

สูตร	อัตราส่วนผสม	Maximum Strength (MPa)
Control	epoxy prepolymer + diluent + silica fume + TiO_2 + $CaCO_3$ + glass spheres 100% + solvent No.1	49.28
1	epoxy prepolymer + diluent + silica fume + TiO_2 + $CaCO_3$ + glass spheres 75% + solvent No.1+ ผงตะกอน 25 %	50.19
2	epoxy prepolymer + diluent + silica fume + TiO_2 + $CaCO_3$ + glass spheres 50% + solvent No.1+ ผงตะกอน 50 %	48.59
3	epoxy prepolymer + diluent + silica fume + TiO_2 + $CaCO_3$ + glass spheres 25% + solvent No.1+ ผงตะกอน 75 %	47.73
4	epoxy prepolymer + diluent + silica fume + TiO_2 + $CaCO_3$ + solvent No.1+ ผงตะกอน 100%	47.88

4.3.4 ความแข็งเมื่อใช้ผงตะกอนแทน Glass spheres

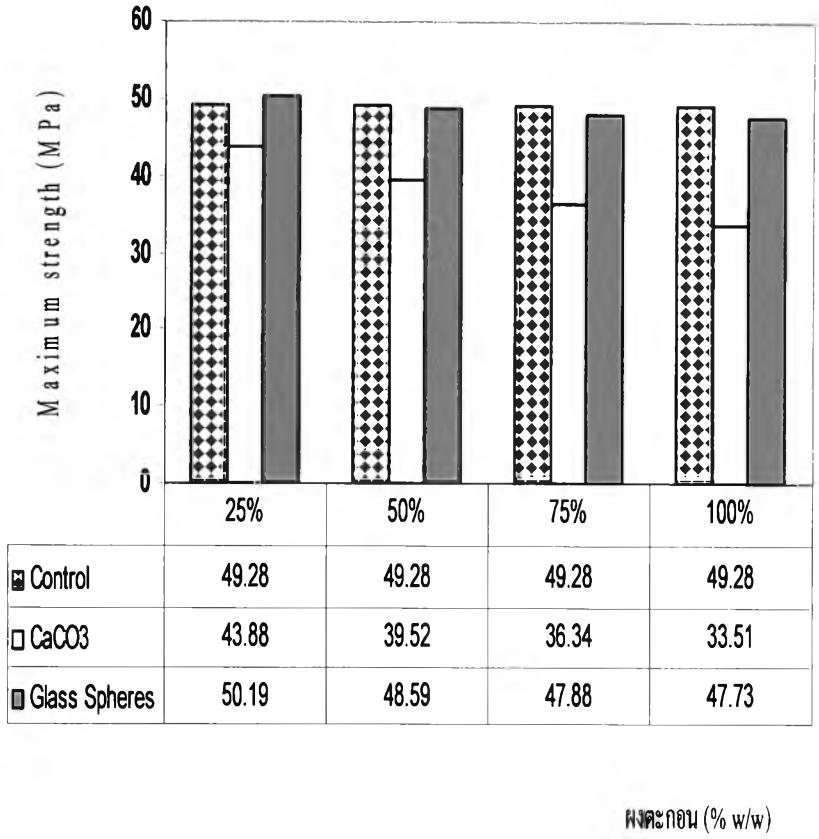
ความแข็งของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีที่นำผงตะกอนแทน Glass spheres มีค่าใกล้เคียงสูตรควบคุม (79.71 – 81.49 MPa) ทุกอัตราส่วนที่ศึกษา คือ 25, 50, 75 และ 100 % (w/w) ดังตาราง 4.10 ถึงแม้ว่าผงตะกอนมีความหนาแน่นมากกว่า Glass spheres แต่เนื่องจากอัตราส่วนผสมของ Glass spheres ที่ใช้มีปริมาณค่อนข้างน้อย จึงไม่ส่งผลต่อความแข็งของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีอย่างชัดเจน

ตารางที่ 4.10 ความแข็งของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีเมื่อใช้ผงตะกอนแทน Glass spheres

สูตร	อัตราส่วนผสม	Hardness (MPa)
Control	epoxy prepolymer + diluent + silica fume + TiO_2 + $CaCO_3$ + glass spheres 100% + solvent No.1	80.6
1	epoxy prepolymer + diluent + silica fume + TiO_2 + $CaCO_3$ + glass spheres 75% + solvent No.1+ ผงตะกอน 25 %	81.0
2	epoxy prepolymer + diluent + silica fume + TiO_2 + $CaCO_3$ + glass spheres 50% + solvent No.1+ ผงตะกอน 50 %	80.0
3	epoxy prepolymer + diluent + silica fume + TiO_2 + $CaCO_3$ + glass spheres 25% + solvent No.1+ ผงตะกอน 75 %	79.8
4	epoxy prepolymer + diluent + silica fume + TiO_2 + $CaCO_3$ + solvent No.1+ ผงตะกอน 100%	79.6

4.3.5 การเปรียบเทียบความทนแรงอัดเมื่อใช้ผงตะกอนแทน $CaCO_3$ และ Glass spheres

ความสัมพันธ์ของความทนแรงอัดของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซี เมื่อใช้ผงตะกอนแทน $CaCO_3$ และ Glass spheres พบว่าความทนแรงอัดของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีค่าลดลงอย่างชัดเจนเมื่อปริมาณผงตะกอนที่แทน $CaCO_3$ มากขึ้น และความทนแรงอัดของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีที่ใช้ผงตะกอนแทนGlass spheres มีค่าไม่ต่างจากสูตรควบคุมทุกอัตราส่วนที่ศึกษา ดังรูป 4.11

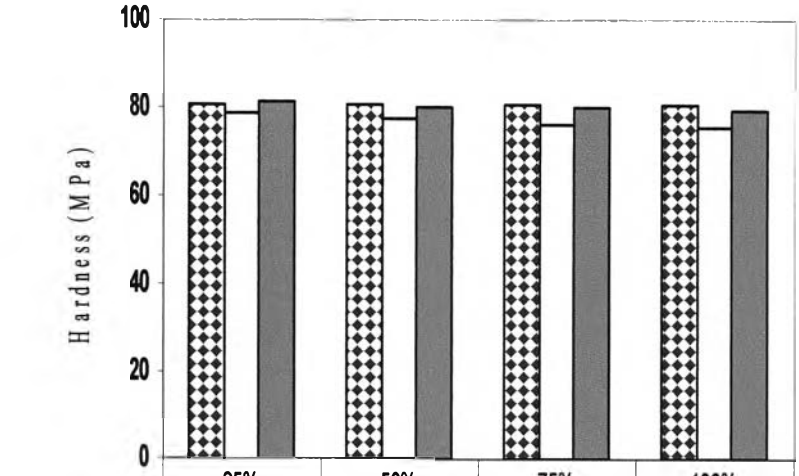


	25%	50%	75%	100%
Control	49.28	49.28	49.28	49.28
CaCO3	43.88	39.52	36.34	33.51
Glass Spheres	50.19	48.59	47.88	47.73

รูปที่ 4.11 ความทนแรงอัดของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีเมื่อใช้ผงตะกอนแทน $CaCO_3$ และ Glass spheres

4.3.6 การเปรียบเทียบความเข็งเมื่อใช้ผงตะกอนแทน $CaCO_3$ และ Glass spheres

จากรูปที่ 4.12 พบว่าเมื่อใช้ผงตะกอนแทน $CaCO_3$ ทุกอัตราส่วนที่ศึกษา คือ 25, 50, 75 และ 100 % (w/w) ทำให้ความแข็งของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีมีค่าน้อยกว่าค่ากำหนดของผลิตภัณฑ์ (79.71 – 81.49 MPa) และเมื่อใช้ผงตะกอนแทน Glass spheres ทุกอัตราส่วนที่ศึกษา พบว่าความแข็งของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีมีค่าไม่ต่างจากสูตรควบคุม



	25%	50%	75%	100%
Control	80.60	80.60	80.60	80.60
CaCO3	78.80	77.20	76.00	75.20
Glass Spheres	81.00	80.00	79.80	79.60

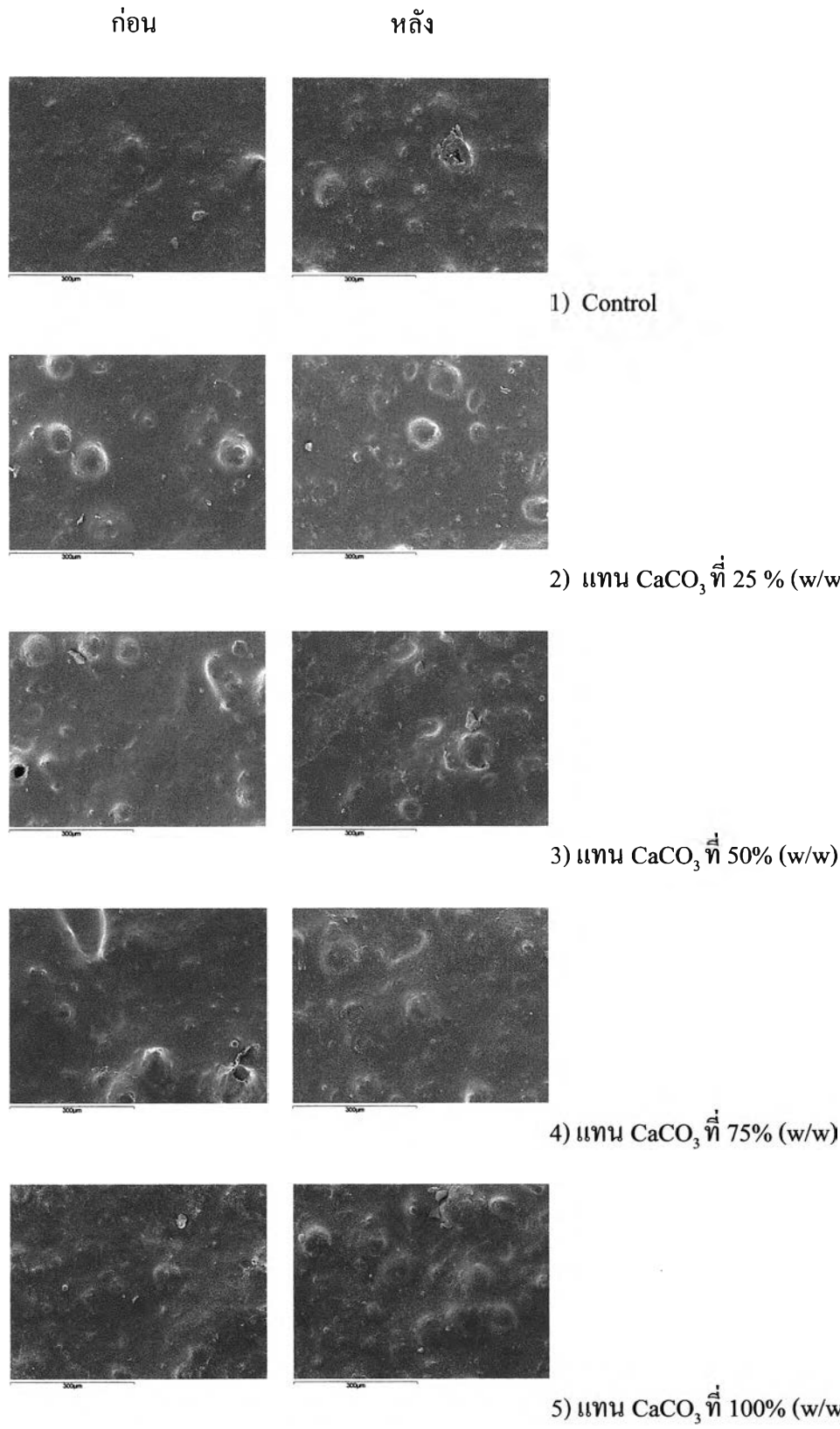
ผงตะกอน (% w/w)

รูปที่ 4.12 ความแข็งของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีเมื่อใช้ผงตะกอนแทน $CaCO_3$ และ Glass spheres

4.4 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีในการทนทานต่อการกัดกร่อนจากน้ำทะเล

4.4.1 การทนทานต่อการกัดกร่อนจากน้ำทะเลเทียมเมื่อใช้ผงตะกอนแทน $CaCO_3$

ผลการทดสอบการทนทานต่อการกัดกร่อนของน้ำทะเลเทียมเมื่อใช้ผงตะกอนแทน $CaCO_3$ โดยศึกษาลักษณะพื้นผิวทางกายภาพของชิ้นงานก่อนและหลังการทดสอบ แสดงผลดังรูปที่ 4.13

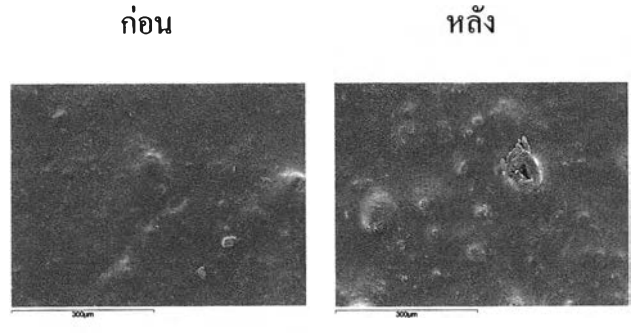


รูปที่ 4.13 ลักษณะพื้นผิวทางกายภาพของชิ้นงานก่อนและหลังการทดสอบการทนทานต่อการกัดกร่อนจากน้ำทะเลเทียมเมื่อใช้ผงตะกอนแทน $CaCO_3$ โดยเครื่อง SEM ด้วยกำลังขยาย 200 เท่า

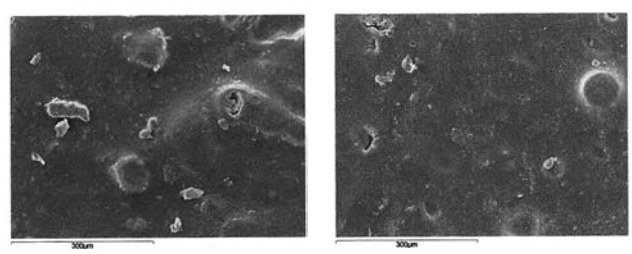
จากการทดสอบเรื่องการทนทานต่อการกัดกร่อนจากน้ำทะเลเทียมของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีเมื่อใช้ผงตะกอนแทน $CaCO_3$ พบว่าลักษณะพื้นผิวทางกายภาพของชิ้นงานผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีสามารถทนการกัดกร่อนได้ ดังนั้นผงตะกอนไม่มีผลต่อการนำมาใช้แทน $CaCO_3$ โดยติดตามผลเป็นระยะเวลา 60 วัน

4.4.2 การทนทานต่อการกัดกร่อนจากน้ำทะเลเทียมเมื่อใช้ผงตะกอนแทน Glass spheres

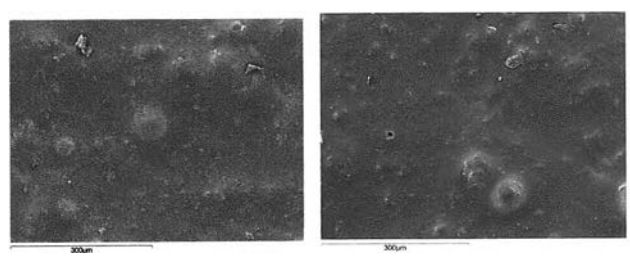
ผลการทดสอบการทนทานต่อการกัดกร่อนของน้ำทะเลเทียมเมื่อใช้ผงตะกอนแทน Glass spheres โดยเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวทางกายภาพของชิ้นงานก่อนและหลังการทดสอบแสดงผลดังรูปที่ 4.14



1) Control

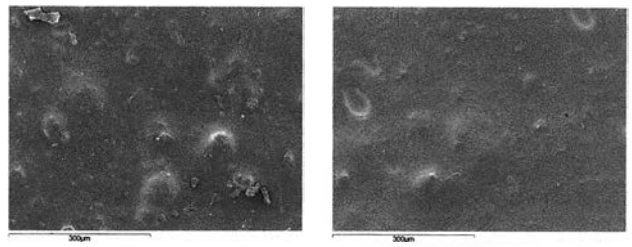


2) แทน Glass spheres ที่ 25%(w/w)

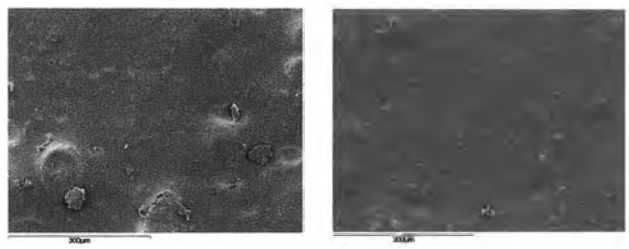


3) แทน Glass spheres ที่ 50%(w/w)

ก่อน หลัง



4) แทน Glass spheres ที่ 75%(w/w)



5)แทน Glass spheres ที่100%(w/w)

รูปที่ 4.14 ลักษณะพื้นผิวทางกายภาพของชิ้นงานก่อนและ หลังการทดสอบการทนทานต่อการกัดกร่อนจากน้ำทะเลเทียมเมื่อใช้ผงตะกอนแทน Glass spheres โดยเครื่อง SEM ด้วยกำลังขยาย 200 เท่า

ลักษณะพื้นผิวทางกายภาพของชิ้นงานผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีที่ใช้ผงตะกอนแทน Glass spheres สามารถทนการกัดกร่อนได้ ดังนั้นผงตะกอนไม่มีผลต่อการนำมาใช้แทน Glass spheres ติดตามผลเป็นระยะเวลา 60 วัน

4.5 ตารางสรุปผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพ ทางกลและทางเคมีของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซี

จากผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพ ทางกล และทางเคมีของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซี สามารถสรุปดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 สรุปผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพ ทางกล และทางเคมีของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซี

ข้อมูล	ปริมาณผงตะกอนแทน $CaCO_3$				ปริมาณผงตะกอนแทน Glass spheres			
	25 % (w/w)	50 % (w/w)	75 % (w/w)	100 % (w/w)	25 % (w/w)	50 % (w/w)	75 % (w/w)	100 % (w/w)
ความหนืด (cP)	✓	X	X	X	✓	✓	X	X
ระยะเวลาการแห้งสัมผัส (นาที)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ความทนแรงอัด (MPa)	X	X	X	X	✓	✓	✓	✓
ความแข็ง (MPa)	X	X	X	X	✓	✓	✓	X
การทนการกัดกร่อนจากน้ำทะเลเทียม	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

หมายเหตุ : เครื่องหมาย ✓ หมายถึง มีผลการทดสอบที่อยู่ในช่วงค่ากำหนดของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีที่ต้องการ

เครื่องหมาย X หมายถึง มีผลการทดสอบที่ไม่อยู่ในช่วงค่ากำหนดของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีที่ต้องการ

จากตารางที่ 4.11 สามารถสรุปผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพ ทางกล และทางเคมีของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีได้โดยสูตรที่มีสมบัติทางกายภาพ ทางกล และทางเคมีใกล้เคียงกับสูตรควบคุมหรือสูตรมาตรฐานมากที่สุดคือ สูตรที่นำผงตะกอนแทน Glass spheres ที่ 25 และ 50 % (w/w)

4.6 การวิเคราะห์ความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์

ในการวิเคราะห์ความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์ได้นำหลักการของ Balanced scorecard มาประยุกต์ใช้โดยพิจารณาจากสมบัติต่างๆ ทางกายภาพ ทางกล ทางเคมี และการทนทานต่อการกัดกร่อนจากน้ำทะเลเทียม รวมทั้งความสะดวกในการใช้งานของลูกค้าและราคาของผลิตภัณฑ์ โดยราคาต้นทุนของสูตรต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.12 ซึ่งคำนวณจากราคาของวัตถุดิบซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

Epoxy prepolymer	126	บาท/กิโลกรัม
ไดลูเอนต์	185	บาท/กิโลกรัม
Silica fume	780	บาท/กิโลกรัม
TiO_2	85	บาท/กิโลกรัม
$CaCO_3$	5.5	บาท/กิโลกรัม
Glass spheres	222	บาท/กิโลกรัม
Solvent No.1	58	บาท/กิโลกรัม

ตารางที่ 4.12 ราคาต้นทุนของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีเมื่อใช้ผงตะกอนแทน $CaCO_3$ และ Glass spheres สูตรต่างๆ (บาท /กิโลกรัม)

สูตรที่	อัตราส่วนผสม	ราคา (บาท /กิโลกรัม)
ผงตะกอน แทน $CaCO_3$ 25% (w/w)	epoxy prepolymer + silica fume + TiO_2 + $CaCO_3$ 75% + glass spheres + solvent No.1+ ผงตะกอน 25 %	151.49
ผงตะกอน แทน $CaCO_3$ 50% (w/w)	epoxy prepolymer + silica fume + TiO_2 + $CaCO_3$ 50% + glass spheres + solvent No.1+ ผงตะกอน 50 %	151.25
ผงตะกอน แทน $CaCO_3$ 75% (w/w)	epoxy prepolymer + silica fume + TiO_2 + $CaCO_3$ 25% + glass spheres + solvent No.1+ ผงตะกอน 75 %	151.00
ผงตะกอน แทน $CaCO_3$ 100% (w/w)	epoxy prepolymer + silica fume + TiO_2 + glass spheres + solvent No.1+ ผงตะกอน 100 %	150.75
ผงตะกอน แทน Glass spheres 25% (w/w)	epoxy prepolymer + silica fume + TiO_2 + $CaCO_3$ + glass spheres 75 % + solvent No.1+ ผงตะกอน 25 %	149.52
ผงตะกอน แทน Glass sphere 50% (w/w)	epoxy prepolymer + silica fume + TiO_2 + $CaCO_3$ + glass spheres 50 % + solvent No.1+ ผงตะกอน 50 %	147.30
ผงตะกอน แทน Glass sphere 75% (w/w)	epoxy prepolymer + silica fume + TiO_2 + $CaCO_3$ + glass spheres 25% + solvent No.1+ ผงตะกอน 75 %	145.08
ผงตะกอน แทน Glass sphere 100% (w/w)	epoxy prepolymer + silica fume + TiO_2 + $CaCO_3$ + solvent No.1+ ผงตะกอน 100 %	142.86
สูตรควบคุม (Control)	epoxy prepolymer + silica fume + TiO_2 + $CaCO_3$100 % + glass sphere 100 % + solvent No.1	151.74

จากตารางที่ 4.12 แสดงราคาต้นทุนของของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีเมื่อใช้ผงตะกอนแทน $CaCO_3$ และ Glass spheres พบว่าสูตรที่นำผงตะกอนแทน Glass spheres ที่ 25 และ 50 % (w/w) มีสมบัติทางกายภาพและทางกลใกล้เคียงกับสูตรควบคุมมากที่สุดและเมื่อเปรียบเทียบราคาต้นทุนกับสูตรควบคุม (151.74 บาท/กิโลกรัม) พบว่ามีราคาต้นทุนเท่ากับ 149.52 และ 147.30 บาท/กิโลกรัม จากข้อมูลทางด้านราคาต้นทุนนี้สามารถนำมาทำ Balanced scorecard ซึ่งพิจารณาสมบัติทางกายภาพ ทางกล และทางเคมีร่วมกับความสะดวกในการนำผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีไปใช้งานสำหรับทาเคลือบผิวได้สะดวก

ตารางที่ 4.13 การทำ Balance scorecard เพื่อพิจารณาความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์

สูตรที่	ความหนืด	ระยะเวลาแห้งสัมผัส	การทนทานต่อการกัดกร่อนจากน้ำทะเลเทียม	การทนแรงอัด	ความแข็ง	ความสะดวกในการใช้งาน	ราคา	รวมคะแนน
ผงตะกอนแทน $CaCO_3$ 25 % (w/w)	7	8	9	4	4	7	2	41
ผงตะกอนแทน $CaCO_3$ 50 % (w/w)	5	7	9	3	3	6	3	36
ผงตะกอนแทน $CaCO_3$ 75 % (w/w)	4	6	9	2	2	4	4	31
ผงตะกอนแทน $CaCO_3$ 100% (w/w)	3	4	9	1	1	3	5	26
ผงตะกอนแทน Glass spheres 25% (w/w)	8	8	9	8	8	8	6	55
ผงตะกอนแทน Glass spheres 50% (w/w)	7	7	9	7	7	5	7	49
ผงตะกอนแทน Glass spheres 75% (w/w)	6	6	9	6	6	2	8	43
ผงตะกอนแทน Glass spheres 100% (w/w)	5	5	9	5	5	1	9	39
สูตรควบคุม (Control)	9	9	9	9	9	9	1	55

หมายเหตุ : เรียงคะแนนตามลำดับสมบัติต่างๆ จากน้อยไปมาก

โดย 1 = สมบัติต่ำหรือ ราคาแพง

9 = สมบัติสูงสุดหรือ ราคาถูก

คะแนนเต็มแต่ละสูตรเท่ากับ 63

ดังนั้นแนวโน้มในการขยายสู่ภาคอุตสาหกรรมและความเป็นไปได้ในการลงทุน จึงควรเลือกสูตรที่ใช้ผงตะกอนแทน Glass spheres ปริมาณ 25 % (w/w) เพื่อเป็นทางเลือกในการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์มาตรฐานของบริษัท

เมื่อพิจารณาข้อจำกัดของงานวิจัยพบว่าผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอิพ็อกซีเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องทดสอบสมบัติทางกายภาพ และ ทางกลดังนั้นจึงต้องเตรียมตัวอย่างชิ้นงานสำหรับทดสอบให้กับหน่วยงานทางราชการหรือหน่วยงานเอกชนทดสอบในปริมาณมากจึงมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง แต่ทั้งนี้ถือเป็นการนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่และลดปัญหามลภาวะให้สิ่งแวดล้อม