

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง



แนวคิดและทฤษฎี

2.1 หลักการและทฤษฎีของตัวเติม (Fillers) [15-18]

ตัวเติม คือ ของแข็งที่ใช้ใส่ในพอลิเมอร์เพื่อลดต้นทุนการผลิตหรือปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ซึ่งตัวเติมที่ใช้กัน โดยทั่วไปมีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างตัวเติมที่ใช้ในพอลิเมอร์ [15]

ตัวเติมประเภทสารอนินทรีย์ (Inorganic fillers)	ตัวเติมประเภทสารอินทรีย์ (Organic fillers)
แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3)	ผงไม้ (Wood flour)
ไมกา (Mica)	เยื่อไม้ (Wood pulp)
ทัลค์ (Talc)	แป้ง (Starch)
เคโอลิน (Kaolin)	
วอลลาสโทไนต์ (Wollastonite)	
ใยหิน (Asbestos)	
ซิลิกา (Silica)	
Glass spheres	
ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide)	
อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Aluminium hydroxide) หรือ อะลูมินาไตรไฮเดรต (Alumina trihydrate)	
ผงโลหะ เช่น Al, Zn, Cu, Ni เป็นต้น	
คาร์บอนแบล็ค (Carbon black)	

จากตารางที่ 2.1 ตัวเติมที่ใช้ในพอลิเมอร์ส่วนใหญ่เป็นสารอนินทรีย์ สำหรับตัวเติมที่เป็นสารอินทรีย์ เช่น ผงไม้ ส่วนใหญ่ใช้กับเรซินฟีนอลิก เรซินยูเรีย เป็นต้น ตัวเติมที่ใช้เพิ่มเนื้อผลิตภัณฑ์และลดต้นทุนการผลิตเป็นหลัก เรียกว่า สารเพิ่มเนื้อ (Extender) หรือ Inert fillers ตัวอย่าง เช่น หินปูน หรือแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ที่ได้จากธรรมชาติ ทัลค์ เคโอลิน ผงไม้ เป็นต้น ส่วนตัวเติมที่ใส่เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกล หรือสมบัติเรื่องอื่นๆ เช่น การนำไฟฟ้า การนำความร้อน

เรียกว่า ฟังก์ชันแนลฟิลเลอร์ (Functional fillers) หรือ Active fillers และตัวเติมที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์ เรียกว่า ฟิลเลอร์เสริมแรง (Reinforcing fillers หรือ Reinforcement)

สัดส่วนของตัวเติมที่ใช้กับพลาสติกทั่วโลกในปี ค.ศ. 1999 ประมาณ 10 ล้านตัน แสดงดังตารางที่ 2.2 CaCO_3 มีปริมาณการใช้งานมากเป็นอันดับหนึ่ง เนื่องจาก CaCO_3 มีความขาวสูง มีการขัดสีเครื่องมือเครื่องจักรที่ใช้ในการขึ้นรูปต่ำ และมีหลายเกรดซึ่งแตกต่างกันที่ขนาดอนุภาค นอกจากนี้ยังหาซื้อได้ง่าย และมีราคาถูก

ตารางที่ 2.2 ปริมาณการใช้ตัวเติมทั่วโลกในปี ค.ศ. 1999 [18]

ตัวเติม	CaCO_3	ทัลค์	เคโอลิน	วอลลาสโทไนต์	อื่นๆ
ปริมาณการใช้	66 %	6%	6 %	3%	19%

ตัวเติมที่ดีควรมีสมบัติดังต่อไปนี้

1. สะอาด ปราศจากสารเจือปน และความชื้น นอกจากนี้ต้องไม่เป็นพิษ
2. มีสมบัติเฉื่อย ไม่ละลายในของเหลวใดๆ ที่สารประกอบพอลิเมอร์นั้นสัมผัส
3. มีเสถียรภาพทางความร้อน
4. ดูดซับความชื้นและสารเคมีต่างชนิดอื่นต่ำ
5. ทำให้กระจายตัวในพอลิเมอร์ได้ง่าย
6. โครงสร้างและสมบัติไม่เปลี่ยนแปลงในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป
7. มีการกระจายขนาดของอนุภาคที่สม่ำเสมอ
8. ไม่ขัดสีเครื่องมือเครื่องจักรที่ใช้ในการขึ้นรูป
9. ไม่ทำให้สีและผิวหน้าของผลิตภัณฑ์เสียไป

การใช้งานตัวเติมควรพิจารณาดังต่อไปนี้

1. ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค (Particle size and particle size distribution) กรณีที่ต้องการให้ผลิตภัณฑ์มีความทนแรงดึงสูง ตัวเติมที่เหมาะสมควรมีความแข็งแรงสูง และสามารถกระจายในพอลิเมอร์ได้ดี

2. รูปร่างและความพรุนของอนุภาค (Shape and porosity) กรณีที่ต้องการให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพผิวที่ดีควรเลือกใช้ตัวเติมที่มีอนุภาคขนาดเล็กและกลม เช่น Glass spheres หรืออนุภาคแบบแผ่น เช่น ทัลค์ เคโอลิน เป็นต้น

3. ธรรมชาติทางเคมีของพื้นผิว (Chemical nature of the surface) กรณีที่ต้องการปรับปรุงสมบัติเชิงกลหรือสมบัติ การนำไฟฟ้า การนำความร้อนของผลิตภัณฑ์ควรเลือกใช้ ฟังก์ชันแนลฟิลเลอร์

4. สารปนเปื้อน (Impurity)

2.1.1 CaCO₃ [15]

CaCO₃ เป็นตัวเติมที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมพลาสติก ยาง สารเคลือบผิว และอุตสาหกรรมอื่นๆ โดยทั่วไป CaCO₃ แบ่งเป็น 2 ชนิด ได้แก่

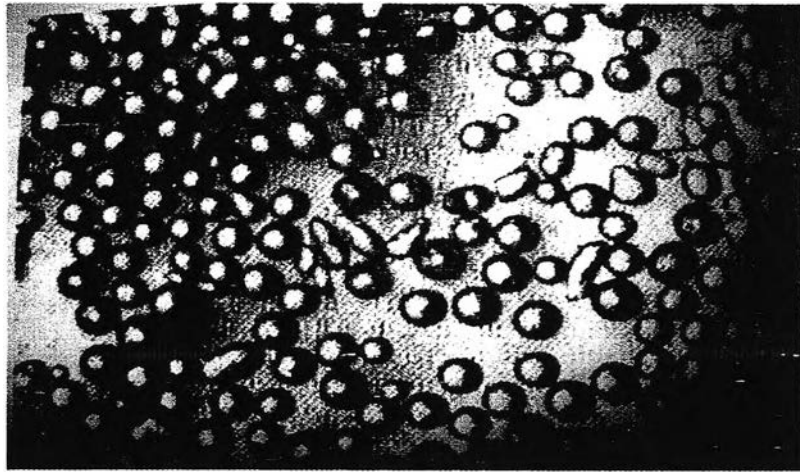
1. CaCO₃ ที่ได้จากธรรมชาติ แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ ซอล์ก และหินปูน อุตสาหกรรมที่นิยมใช้ตัวเติมชนิดนี้ ได้แก่ อุตสาหกรรมพลาสติกโดยเฉพาะพอลิไวนิลคลอไรด์ CaCO₃ ที่ได้จากธรรมชาติมีข้อดีดังนี้

- มีความบริสุทธิ์ทางเคมีสูง
- มีอนุภาคอ่อนจึงไม่ขัดสีเครื่องจักร
- มีความขาวสูง จึงสามารถแทนผงสีขาวที่มีราคาแพงได้บางส่วน
- มีพื้นที่ผิวหน้าน้อย จึงไม่ค่อยดูดซับพลาสติกไฮเซอรและสารเติมแต่งอื่นๆ
- ไม่จับกันเป็นก้อน
- ช่วยปรับปรุงคุณภาพผิวของผลิตภัณฑ์
- ลดการหดตัวของผลิตภัณฑ์
- ไม่เป็นพิษ ไม่มีกลิ่น และทนความร้อนได้สูง
- มีราคาถูกกว่า CaCO₃ ที่ได้จากการสังเคราะห์

2. CaCO₃ ที่ได้จากการสังเคราะห์ หรือเรียกว่า PCC (Precipitated calcium carbonate) หรือ CCP (Calcium carbonate precipitate) CaCO₃ ที่ได้จากการสังเคราะห์นี้มีข้อดีกว่า CaCO₃ ที่ได้จากธรรมชาติในเรื่องของความบริสุทธิ์ ความขาว และขนาดอนุภาค ทำให้พลาสติกมีความทนแรงกระแทกสูงกว่า แต่มีข้อด้อยในเรื่องของราคาที่แพงจึงทำให้ไม่สามารถใช้ในปริมาณมากได้ และยังคงดูดซับพลาสติกไฮเซอรและสารเติมแต่งอื่นๆ สูงกว่า CaCO₃ ที่ได้จากธรรมชาติ งานวิจัยนี้เลือกใช้ CaCO₃ ชนิดที่ได้จากธรรมชาติ เนื่องจากหาซื้อได้ง่ายและมีราคาถูก

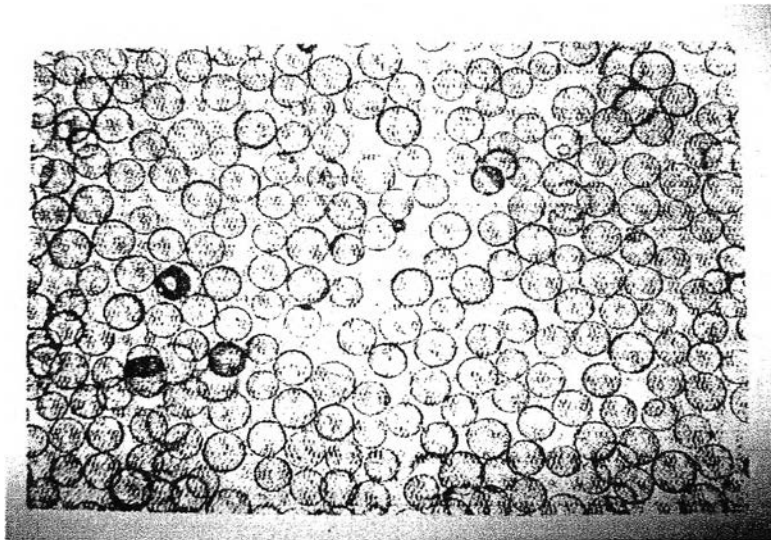
2.1.2 Glass spheres

Glass spheres มี 2 ประเภท คือ Solid glass spheres และ Hollow glass spheres ซึ่งมีลักษณะพื้นผิวทางกายภาพดังรูปที่ 2.1 และ 2.2 Glass spheres นำมาใช้เป็นตัวเติมทั้งในพลาสติกจำพวกเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซต เนื่องจากมีสมบัติที่ดี คือ มีขนาดและรูปร่างของอนุภาคที่เหมือนกันและสม่ำเสมอ มีความโปร่งใส มีความทนทานต่อแรงอัด มีเสถียรภาพทางความร้อนสูง และมีความทนทานต่อสารเคมี จากการที่ Glass spheres มีรูปทรงที่กลมจึงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์พลาสติกมีสมบัติไอโซโทรปิก (Isotropic behavior) คือ มีสมบัติเหมือนกันทุกทิศทาง การใช้ Glass spheres ในปริมาณมากทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งที่ผิวและความทนทานต่อการขัดสีเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.1 Glass spheres ชนิด Solid glass spheres กำลังขยาย 50 เท่า [15]

ส่วนใหญ่ Solid glass spheres ที่ผลิตขึ้นมีอนุภาคทรงกลมอย่างน้อย 90% มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3-80 μm มีความหนาแน่นเท่ากับ 2.4 – 2.6 g/cm^3 อนุภาคมีความแข็ง (Mohs scale) เท่ากับ 6.0 การใช้ Solid glass spheres ทำให้ผลิตภัณฑ์พลาสติกมีความแข็งที่ผิวและความทนทานต่อการขีดสีเพิ่มขึ้น



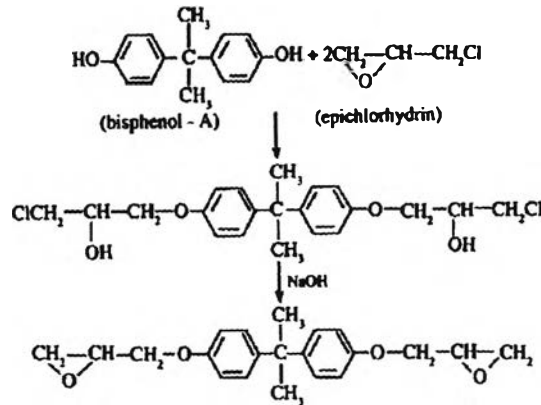
รูปที่ 2.2 Glass spheres ชนิด Hollow glass spheres, 3M type BB กำลังขยาย 63 เท่า [15]

Hollow glass spheres ส่วนใหญ่มีอนุภาคทรงกลมอย่างน้อย 80% มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วง 10 – 250 μm มีความหนาแน่นเท่ากับ 0.1- 1.1 g/cm^3 อนุภาคมีความแข็ง

(Mohs scale) เท่ากับ 5 เนื่องจาก Hollow glass spheres มีความหนาแน่นต่ำ เมื่อนำมาใช้เป็นตัวเติมในผลิตภัณฑ์พลาสติกจึงทำให้ความหนาแน่นและน้ำหนักของผลิตภัณฑ์พลาสติกลดลง

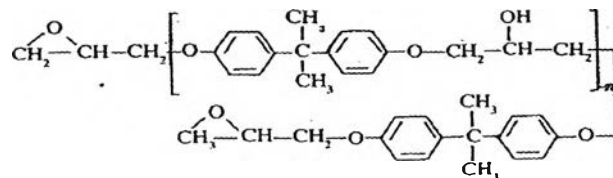
2.2 หลักการและทฤษฎีของเรซินอีพ็อกซี [10, 14, 19-21]

เรซินอีพ็อกซี (Epoxy resin) เป็นเรซินที่ใช้มากในอุตสาหกรรมเนื่องจากมีความแข็งแรงสูง นอกจากนี้ยังทนทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมีและความชื้น เรซินอีพ็อกซีค้นพบโดย พี.คาสตัน (P.Caston) ชาวสวิสเซอร์แลนด์และเป็นผู้จดทะเบียนสิทธิบัตรเรซินอีพ็อกซีในปี ค.ศ. 1938 เรซินอีพ็อกซี คือ พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบร่างแหที่แข็งแรงซึ่งเกิดจากไดเอมีนเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่อีพ็อกซีของสายโซ่พรีพอลิเมอร์อีพ็อกซี พรีพอลิเมอร์อีพ็อกซีเกิดจากปฏิกิริยาควมแน่นระหว่างบิสฟีนอลเอกับเอพิคลอโรไฮดริน (Epichlorohydrin) โดยมีสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังรูปที่ 2.3



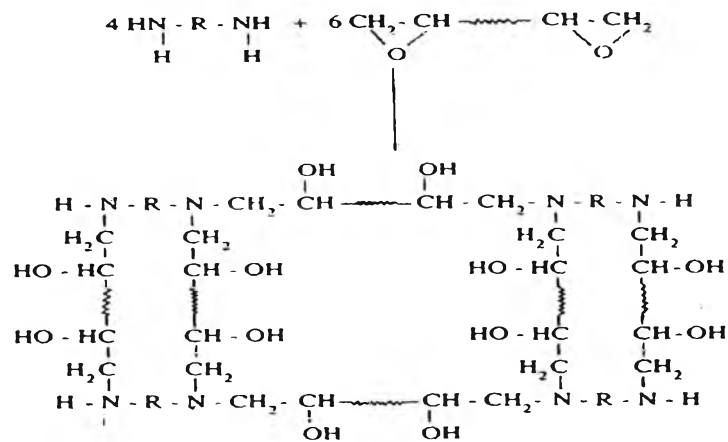
รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาระหว่างบิสฟีนอลเอและเอพิคลอโรไฮดริน [14]

พรีพอลิเมอร์ที่ได้อาจมีโมเลกุลขนาดเล็กตั้งแต่ไดเมอร์ (n มีค่าเท่ากับ 2) ถึงพวที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ (n มีค่าถึง 25) ขึ้นกับอัตราส่วนของบิสฟีนอลเอกับเอพิคลอโรไฮดริน พรีพอลิเมอร์อาจอยู่ในสภาพของเหลว กึ่งของแข็ง และของแข็งเมื่อขนาดโมเลกุลใหญ่ขึ้น สูตรโครงสร้างทางเคมีของพรีพอลิเมอร์อีพ็อกซี แสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 สูตรโครงสร้างทางเคมีของพรีพอลิเมอร์อีพ็อกซี [14]

พรีพอลิเมอร์อีพ็อกซีมีหมู่อีพ็อกซี (Epoxy group) เป็นวงสามเหลี่ยมประกอบด้วยออกซิเจน 1 อะตอม และคาร์บอน 2 อะตอม หมู่อีพ็อกซีเป็นหมู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยามาก จึงสามารถทำปฏิกิริยาได้ง่ายที่อุณหภูมิห้องโดยอะมิโนไฮโดรเจนของหมู่เอมีนในสารทำแข็ง (Hardener) หรือสารเชื่อมขวาง (Crosslinking agent) ทำปฏิกิริยากับพรีพอลิเมอร์อีพ็อกซี ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาระหว่างไคเอมีนในสารทำแข็งกับพรีพอลิเมอร์อีพ็อกซี [14]

พรีพอลิเมอร์อีพ็อกซีสามารถใช้งานเคลือบผิวได้ดี ทั้งนี้เพราะ

1. มีความทนทานต่อสารเคมีต่างๆ เนื่องจากโมเลกุลของพรีพอลิเมอร์อีพ็อกซีมีแต่พันธะอีเทอร์และพันธะคาร์บอน-คาร์บอนเท่านั้น ไม่มีหมู่เอสเทอร์ที่จะเกิดปฏิกิริยาสะปอนิฟิเคชัน
2. มีสมบัติยึดผิวหน้าต่างๆ ได้ดี เนื่องจากโซ่พอลิเมอร์ของพรีพอลิเมอร์อีพ็อกซีมีปริมาณหมู่ที่มีขั้วสูง นอกจากนี้การมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ห่างกันอย่างเป็นระเบียบในโมเลกุลทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนได้ดี มีผลให้มีแรงดึงดูดระหว่างโซ่พอลิเมอร์สูง
3. มีความแข็งแรงและอ่อนตัวไม่เปราะ ทั้งนี้เนื่องจากหมู่อีเทอร์ทำให้โมเลกุลสามารถเกิดการหมุนรอบพันธะเดี่ยวได้ และหมู่อะโรมาติกส์ที่อยู่บนโซ่ทำให้พรีพอลิเมอร์อีพ็อกซีทนความร้อนได้ดี
4. หมู่อีพ็อกซีและหมู่ไฮดรอกซิลที่มีอยู่ในโมเลกุล ทำให้พรีพอลิเมอร์อีพ็อกซีสามารถเกิดพอลิเมอร์ได้เป็นโครงสร้าง 3 มิติ ที่แข็งแรงทนทานและใช้ประโยชน์ได้ดี

พรีพอลิเมอร์อีพ็อกซีมีหลายชนิดแต่ละชนิดมีสมบัติและมีภาวะการนำไปใช้งานต่างกัน ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ชนิดและสมบัติของพรีพอลิเมอร์อีพ็อกซี [21]

ชนิดของพรีพอลิเมอร์อีพ็อกซี	ลักษณะเฉพาะ	ภาวะการนำไปใช้งาน
Diglycidyl ether of bisphenol A (DGEBA)	ใช้ในงานทั่วไป	อุณหภูมิห้อง เพิ่มอุณหภูมิ
Bisphenol F diluted DGEBA	มีความหนืดน้อยมาก	อุณหภูมิห้อง เพิ่มอุณหภูมิ
Epoxy novolac	มีค่าความยืดสูงและทนต่อแรงอัด	เพิ่มอุณหภูมิ
Flexibilizing	มีค่าความยืดสูงและทนต่อแรงอัด	อุณหภูมิห้อง เพิ่มอุณหภูมิ
Brominated DGEBA	ทนต่อเปลวไฟ	อุณหภูมิห้อง เพิ่มอุณหภูมิ
Aliphatic	ไวต่อปฏิกิริยามากและมีความหนืดน้อย	อุณหภูมิห้อง เพิ่มอุณหภูมิ
Cycloaliphatic	เหมาะกับงานด้านไฟฟ้าและมีความทนทานต่อสารเคมี	เพิ่มอุณหภูมิ
High functionality	ทนต่อความร้อนและทนทานต่อสารเคมี	เพิ่มอุณหภูมิ
Film formers	มีลักษณะเด่นในเรื่องการยึดติดและความยืดหยุ่น	อุณหภูมิห้อง เพิ่มอุณหภูมิ

สารทำแข็งหรือสารเชื่อมขวางที่นำมาใช้มีหลายชนิดแต่ละชนิดมีข้อดีและข้อเสียรวมถึงการนำไปใช้งานต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ข้อดี/ ข้อเสียและการประยุกต์ใช้งานของสารทำแข็งแต่ละประเภท [21]

ชนิดสารทำแข็ง	ข้อดี	ข้อเสีย	การใช้งาน
Polyamides	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้งานง่าย - ทำปฏิกิริยาได้ที่อุณหภูมิห้อง - มีความเป็นพิษต่ำ - มีความแข็งแรงระหว่างพันธะและความยืดหยุ่นดี - ทนต่อแรงกระแทกและแรงอัดได้ดี 	<ul style="list-style-type: none"> - ราคาค่อนข้างสูง - ใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้องค่อนข้างนาน - มีความหนืดสูง - ทนต่อความร้อนและสารเคมีต่ำ 	<ul style="list-style-type: none"> - อุตสาหกรรมกาวทั่วไป - งานหล่อแบบและเคลือบผิว
Polysulfides and mercaptan	<ul style="list-style-type: none"> - ทนต่อความชื้นได้ดี - สามารถแข็งตัวได้เร็วที่อุณหภูมิห้อง - มีความยืดหยุ่นที่ดี 	<ul style="list-style-type: none"> - กลิ่นค่อนข้างแรง - ใช้งานที่อุณหภูมิห้องไม่ได้ - มีความแข็งแรงต่อแรงดึงต่ำ 	<ul style="list-style-type: none"> - อุตสาหกรรมกาวทั่วไป - งานโครงสร้าง - งานหล่อแบบและเคลือบผิว

ตารางที่ 2.4 (ต่อ)

ชนิดสารทำแข็ง	ข้อดี	ข้อเสีย	การใช้งาน
Aliphatic amines	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้งานง่าย - ทำปฏิกิริยาและแข็งตัวได้เร็วที่อุณหภูมิห้อง - ความหนืดต่ำ - ราคาไม่แพง - ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีได้ปานกลาง 	<ul style="list-style-type: none"> - เนื่องจากแข็งตัวได้เร็วจึงไม่สะดวกในการผสมใช้งาน - ระคายเคืองต่อผิวหนัง - มีความดันไอสูง - แข็งตัวเร็วและเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน - เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 80°C ความแข็งแรงของพันธะจะลดลง - แข็งแต่ไม่ทนต่อแรงอัดกระแทก 	<ul style="list-style-type: none"> - อุตสาหกรรมกาวทั่วไป - งานหล่อแบบและเคลือบผิว
Amidoamines	<ul style="list-style-type: none"> - ไม่ระเหยง่าย - สะดวกในการผสมใช้งาน - มีความเหนียวที่ดี 	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้งานที่อุณหภูมิห้องได้ไม่ดี - อาจผสมกับพริพอลิเมอร์อีพอกซีได้ไม่ค่อยดี 	<ul style="list-style-type: none"> - อุตสาหกรรมกาวทั่วไป - งานโครงสร้าง - งานคอนกรีต
Aromatic amines	<ul style="list-style-type: none"> - ทนอุณหภูมิสูง - ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีได้ปานกลาง 	<ul style="list-style-type: none"> - เป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง - ใช้งานที่อุณหภูมิห้องได้ไม่ค่อยดีเนื่องจากใช้ระยะเวลาการแข็งตัวนาน 	<ul style="list-style-type: none"> - งานด้านอิเล็กทรอนิกส์ - อุตสาหกรรมกาวทั่วไป
Dicyandiamide	<ul style="list-style-type: none"> - ปฏิกิริยาเป็นแบบ latent cure - ใช้งานที่อุณหภูมิห้องได้ดี - ทนต่อสารเคมี - มีสมบัติการทนแรงอัดและแรงกระแทกได้ดี 	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้ระยะเวลาในการแข็งตัวค่อนข้างนาน - ไม่ละลายในเรซิน 	<ul style="list-style-type: none"> - กาวประเภท one component - งานประเภทกาวผง - ฟิล์มและ กาวที่เป็นของแข็ง - งานที่เกี่ยวข้องกับการทำเป็นแผ่น
Anhydride	<ul style="list-style-type: none"> - ทนต่อความร้อนและทนทานต่อสารเคมีได้ดี 	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้ระยะเวลาในการแข็งตัวค่อนข้างนาน - เนื่องจากแข็งตัวได้เร็วจึงไม่สะดวกในการผสมใช้งาน 	<ul style="list-style-type: none"> - งานเกี่ยวกับวัสดุเชิงประกอบ - งานด้านอิเล็กทรอนิกส์ - อุตสาหกรรมกาวทั่วไป
Catalytic curing agents (e.g. tertiary amines)	<ul style="list-style-type: none"> - มีอายุใช้งานนาน - ทนต่ออุณหภูมิสูงได้ดี 	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้ระยะเวลาในการแข็งตัวค่อนข้างนาน - ไม่ทนต่อความชื้น - แข็ง ทำให้ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาก 	<ul style="list-style-type: none"> - อุตสาหกรรมกาวทั่วไป - งานด้านอิเล็กทรอนิกส์ - งานที่เกี่ยวข้องกับการทำเป็นแผ่น - งานประเภทกาวผง

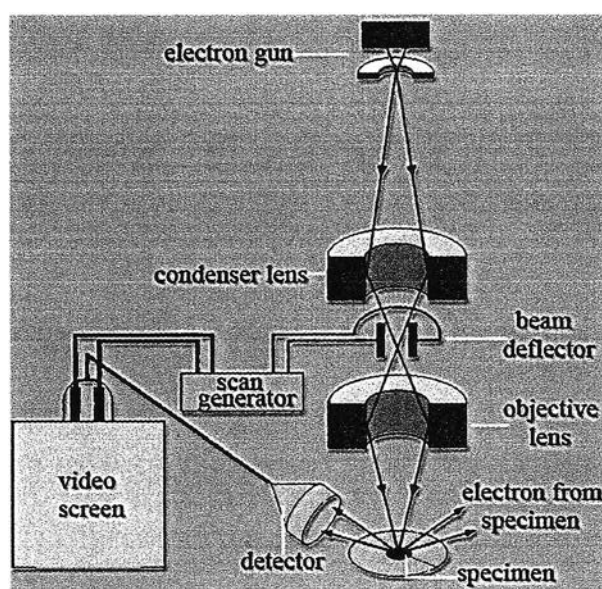
สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้สารทำแข็งเป็นประเภท Polyamides เนื่องจากมีความแข็งแรงทนทานและสามารถทำปฏิกิริยาได้ที่อุณหภูมิห้องได้ จึงเหมาะสมต่องานซ่อมแซมเรือประมง นอกจากนี้ยังมีความเป็นพิษต่ำปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน

2.3 การทดสอบสมบัติของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอีพ็อกซี

2.3.1 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอีพ็อกซี

2.3.1.1 การศึกษาลักษณะพื้นผิวทางกายภาพโดยใช้เครื่อง Scanning electron microscope (SEM) หรือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [22]

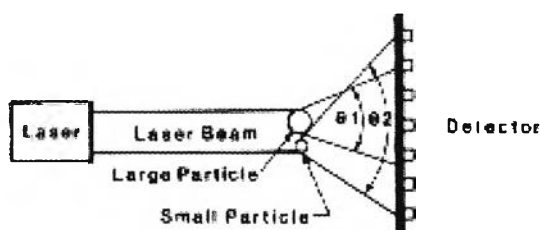
SEM ใช้ศึกษาพื้นฐานและลักษณะพื้นผิวของวัสดุ เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเชื้อและเซลล์หน้าตัดของโลหะหรือวัสดุ ภาพที่ได้เป็นภาพลักษณะ 3 มิติ การทำงานเริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนผลิตอิเล็กตรอนให้กับระบบ ซึ่งอิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกเร่งด้วยกระแสไฟฟ้าและผ่านเลนส์ควมรู้งสี (Condenser lens) ที่สามารถปรับลำอิเล็กตรอนให้ใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับโฟกัสด้วยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ลงบนผิวของชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากทีลำอิเล็กตรอนโฟกัสไปที่ผิวของชิ้นงานจะเกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ซึ่งจะถูกบันทึกและแปลงเป็นสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อนำไปสร้างเป็นภาพบนจอ ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [21]

2.3.1.2 การศึกษาขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง (Laser diffraction technique) [23]

เทคนิคการเลี้ยวเบนของแสงใช้ศึกษาขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค โดยอาศัยสมมติฐานของฟรอนโฮเฟอร์ (Fraunhofer approximation) คือ ความเข้มของแสงที่เกิดการเลี้ยวเบนมีความสัมพันธ์กับปริมาณของอนุภาคแต่ละขนาด มุมเลี้ยวเบนจะเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของอนุภาค อนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าความยาวคลื่นของลำแสงเลเซอร์จะเกิดการเลี้ยวเบนแบบฟรอนโฮเฟอร์ การใช้ตัวกรองแสง เลนส์ และตัวตรวจจับทางแสงร่วมกับคอมพิวเตอร์ช่วยให้สามารถประมวลผลจากข้อมูลการเลี้ยวเบนได้ เทคนิคนี้ไม่จำเป็นต้องทราบความหนาแน่นของวัสดุทดสอบ ทั้งนี้อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าช่วงความสามารถของเครื่องตรวจจับจะไม่ได้รับการบันทึก



Diffraction Angle θ_1 For Large Particles
Diffraction Angle θ_2 For Small Particles.

รูปที่ 2.7 เทคนิคการเลี้ยวเบนแบบฟรอนโฮเฟอร์ [23]

2.3.1.3 ความหนาแน่น [24]

ความหนาแน่น คือ ค่าน้ำหนักต่อปริมาตรหนึ่งหน่วยของสาร ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหนาแน่น ได้แก่ ขนาดและน้ำหนักขององค์ประกอบ การจัดเรียงตัวของอะตอมในระบบผลึกและปริมาณรูพรุนในโครงสร้างของวัสดุ

ความหนาแน่นจริง (True density : ρ_t) เป็นค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีของสารซึ่งคำนวณจากมวลของอนุภาคหารด้วยปริมาตรที่ไม่รวมรูพรุนเปิดและรูพรุนปิด ใช้หลักการของอาร์คิมิดีส (Archimedes principle) โดยการวัดน้ำหนักแห้ง (Dry weight) ของชิ้นงาน (w_1) จากนั้นชั่งน้ำหนักแทนที่น้ำ (w_2) และชั่งน้ำหนักอีกครั้งเป็นน้ำหนักอิมมersion (w_3) โดยแช่ชิ้นงานกับฟองน้ำหมาดๆ ก่อนเพื่อซับน้ำส่วนที่เกินออก

ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent density : ρ_A) เป็นค่าความหนาแน่นของสารซึ่งคำนวณจากมวลของอนุภาคหารด้วยปริมาตรที่รวมรูพรุนปิด ความหนาแน่นปรากฏจึงมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับความหนาแน่นจริง การคำนวณใช้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\rho_A = \frac{w_1}{w_1 - w_2} \text{ g/cm}^3$$

ความหนาแน่นกลุ่ม (Bulk density : ρ_B) เป็นค่าความหนาแน่นของของอนุภาคซึ่งวัดจากมวลของกลุ่มอนุภาคหารด้วยปริมาตรของกลุ่มอนุภาคที่รวมรูพรุนปิด รูพรุนเปิด และส่วนที่เป็นช่องว่างระหว่างอนุภาค (Voidage : ϵ) ความหนาแน่นกลุ่มเป็นสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของวัสดุเทกอง เช่น ผง เกล็ด และเม็ด เป็นต้น ความหนาแน่นกลุ่มหาได้จากความสัมพันธ์

$$\rho_B = \frac{w_1}{w_3 - w_2} \text{ g/cm}^3$$

ความหนาแน่นกลุ่มแบ่งเป็น ความหนาแน่นกลุ่มแบบหลวม (Aerated bulk density) และความหนาแน่นกลุ่มแบบอัด (Packed bulk density หรือ Tap density)

2.3.1.4 ระยะเวลาการแห้งตัว (Drying time) [14]

วิธีการที่ง่ายที่สุดในการหาระยะเวลาการแห้งของสารเคลือบผิวที่ใช้กันมานาน คือ ใช้นิ้วแตะเบาๆ ที่ผิวของฟิล์มซึ่งแตกต่างกันตามระยะเวลาการแห้ง ดังนี้

1. แห้งฝุ่นไม่ติด (Dust-free stage or Dust dry) เมื่อใช้นิ้วแตะเบาๆ ที่ผิวของฟิล์มแล้วสารเคลือบผิวไม่ติดนิ้วออกมา

2. แห้งที่ผิว (Surface dry) แห้งเฉพาะผิวหน้าแต่ข้างล่างยังนิ่ม และเหนียว

3. แห้งสัมผัสหรือแห้งแตะได้ (Touch dry) เป็นการแห้งที่แตะเบาๆ แล้วไม่มีรอยนิ้วมือติดอยู่

4. แห้งแตะไม่ติด (Tack-free stage) คือ การแห้งถึงขั้นที่ผิวไม่อยู่ในสภาพเหนียวติดแม้ว่าจะมีแรงกด การแห้งขั้นนี้เป็นระยะเวลาที่เมื่อใช้นิ้วกดเบาๆ ที่ผิวของฟิล์มแล้วจะไม่มีรอยใดๆ เกิดขึ้นบนผิวของฟิล์มเลย

5. แห้งแข็ง (Hard dry) คือ การแห้งถึงขั้นที่สามารถเคลือบอีกชั้นหนึ่งทับได้ด้วยแปรงทดสอบได้โดยใช้นิ้วหัวแม่มือกดลงบนผิวของฟิล์มแล้วหมุนรอบๆ ถ้าผิวไม่แตกร้าวหรือเสียหาย แสดงว่าผิวเคลือบนั้นแห้งแข็งแล้ว หรือทดสอบโดยใช้เครื่องมือทดสอบการแห้งแข็ง (Hard dry

apparatus) ซึ่งประกอบด้วยหัวทดสอบ หนักประมาณ 1.8 กิโลกรัม ที่สามารถหมุนได้โดยใช้กลไกทางไฟฟ้า นำแผ่นทดสอบที่ต้องการตรวจสอบวางไว้ได้หัวทดสอบ จากนั้นเปิดสวิทช์ให้หัวทดสอบหมุนเคลื่อนลงมาบนแผ่นทดสอบเป็นมุมประมาณ 270 องศา หัวทดสอบจะเคลื่อนที่กลับที่เดิม นำแผ่นทดสอบมาตรวจสอบดูถ้าผิวไม้หลุดจนเห็นพื้นทดสอบแสดงว่าผิวเคลือบนั้นแห้งแข็งแล้ว [14]

2.3.1.5 ความหนืด [25]

ความหนืด คือ ความสามารถในการต้านทานการไหลของของไหล ของไหลที่มีความหนืดสูงจะมีค่าความต้านทานการไหลสูงกว่าของไหลที่มีความหนืดต่ำ ความหนืดเป็นลักษณะเฉพาะของของไหลแต่ละชนิด ขึ้นกับชนิดของของไหล เช่น น้ำหนักโมเลกุล การกระจายตัวของโครงสร้างโมเลกุล เป็นต้น ดังนั้นจึงสามารถใช้ความหนืดเป็นตัวชี้วัดชนิดของผลิตภัณฑ์ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ หรือควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ระหว่างกระบวนการผลิต เป็นต้น

เมื่อพิจารณาจากค่าความหนืดและลักษณะของการไหลแบ่งของไหลได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. ของไหลแบบนิวโทเนียน (Newtonian fluids) เป็นของไหลที่ประพฤติตามกฎของนิวตัน คือ ที่อุณหภูมิหนึ่งของไหลจะมีความหนืดคงที่ ความหนืดของของไหลจะขึ้นกับอุณหภูมิและองค์ประกอบของของไหลนั้น และไม่ขึ้นกับอัตราเฉือน (Shear rate) หรือ ความเร็วในการกวนไม่ว่าจะกวนช้าหรือเร็ว เช่น น้ำ น้ำมัน น้ำเชื่อม น้ำผึ้ง แอลกอฮอล์ เป็นต้น

2. ของไหลแบบนอนนิวโทเนียน (Non-newtonian fluids) เป็นของไหลที่ไม่เป็นไปตามกฎของนิวตัน คือ ความหนืดไม่คงที่ การเปลี่ยนแปลงของความหนืดขึ้นอยู่กับอัตราเฉือนหรือความเร็วในการกวน ของไหลแบบนอนนิวโทเนียนแบ่งเป็น 2 ประเภท ดังนี้

- 2.1 ของไหลแบบนอนนิวโทเนียนที่ไม่ขึ้นกับเวลา (Time-independent non-newtonian fluids) ความหนืดของของไหลประเภทนี้จะขึ้นกับความเค้นเฉือน (Shear stress) และอัตราการเฉือน แต่จะไม่ขึ้นอยู่กัระยะเวลาที่ของไหลได้รับความเค้นเฉือน นั่นคือ ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราการเฉือนมีค่าคงที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลา ของไหลแบบนอนนิวโทเนียนประเภทนี้ ได้แก่

- 2.1.1 ของไหลซูโดพลาสติก (Pseudoplastic fluids) ความหนืดของของไหลซูโดพลาสติกมีค่าลดลงเมื่อแรงเฉือนเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งของไหลแบบนอนนิวโทเนียนที่ไม่ขึ้นกับเวลาโดยมากจะมีลักษณะนี้ ของไหลซูโดพลาสติกอาจเรียกอีกอย่างว่า ของไหลแบบพฤติกรรมแรงเฉือนลด (Shear thinning fluids) ตัวอย่างเช่น นํ้านม มาของเนส มีสคาด สารละลายพอลิเมอร์ทั้งที่ได้จากธรรมชาติและการสังเคราะห์ เป็นต้น

- 2.1.2 ของไหลไดลาแทนต์ (Dilatant fluids) ความหนืดของของไหลไดลาแทนต์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแรงเฉือนเพิ่มสูงขึ้น ของไหลประเภทนี้พบน้อยกว่าของไหลซูโดพลาสติก ของไหล

ไคลาแทนต์มีชื่อเรียกอีกอย่างว่า ของไหลแบบพฤติกรรมแรงเฉือนเพิ่ม (Shear thickening fluids) ตัวอย่างเช่น น้ำแป้งข้าวโพด น้ำคินซัน เป็นต้น

2.1.3 ของไหลพลาสติก (Plastic fluids) ลักษณะการไหลของของไหลประเภทนี้คือ ที่ค่าแรงเค้นเฉือนต่ำๆ จะไม่มีการเคลื่อนที่แต่อย่างใด จนกระทั่งค่าแรงเค้นเฉือนเพิ่มขึ้นจนถึงจุดคราก (Yield stress) หรือจุดที่แรงเค้นเฉือนมีผลทำให้ของไหลเกิดการเคลื่อนที่ ของไหลพลาสติกจึงเริ่มไหลและมีพฤติกรรมการไหลเหมือนกับของไหลซูโคพลาสติก ตัวอย่างเช่น ซอสมะเขือเทศ สีคินเหนียว เป็นต้น

2.1.4 ของไหลบิงแฮม (Bingham plastic fluids) ของไหลประเภทนี้มีความคล้ายกับของไหลพลาสติก แตกต่างที่เมื่อถึงจุดครากและเริ่มไหลจะมีพฤติกรรมการไหลเหมือนกับของไหลแบบนิวโทเนียน ตัวอย่างเช่น ยาสีฟัน นมช็อคโกแลต เป็นต้น

2.2 แบบนอนนิวโทเนียนที่ขึ้นกับเวลา (Time-dependent non-newtonian fluids) ความหนืดของของไหลประเภทนี้นอกจากขึ้นกับความเค้นเฉือนและอัตราการเฉือนแล้ว ยังขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ของไหลได้รับความเค้นเฉือน แบ่งเป็น

2.2.1 Thixotropic fluids ความหนืดจะลดลงตามระยะเวลาที่ของไหลได้รับแรงเค้นเฉือนในอัตราคงที่ ลักษณะการไหลประเภทนี้พบได้น้อย ตัวอย่างเช่น สีทาบ้าน น้ำหมึกสำหรับเครื่องพิมพ์ขนาดใหญ่ เป็นต้น

2.2.2 Rheopectic fluids ความหนืดจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ของไหลได้รับแรงเค้นเฉือนในอัตราคงที่ ลักษณะการไหลประเภทนี้พบได้ยาก

2.3.2 การทดสอบสมบัติทางกลของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอีพ็อกซี

สมบัติทางกลของวัสดุมีความสำคัญอย่างมากต่อการนำวัสดุไปใช้งานหรือออกแบบผลิตภัณฑ์ได้อย่างเหมาะสมเพื่อให้สามารถใช้งานผลิตภัณฑ์นั้นได้ตามวัตถุประสงค์อย่างปลอดภัย สมบัติทางกลที่สำคัญของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอีพ็อกซีที่จำเป็นต้องทดสอบ ได้แก่ ความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength) ความทนแรงอัด (Compressive strength) ความแข็ง (Hardness) เป็นต้น งานวิจัยนี้ทดสอบความทนแรงอัดและความแข็งแบบชอร์ดูโรมิเตอร์ ประเภท D ของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอีพ็อกซีตามมาตรฐานของบริษัทเนื่องจากผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอีพ็อกซีเป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมเซต

2.3.2.1 การทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึง [26]

การทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงมักใช้ในการทดสอบวัสดุประเภท โลหะและพอลิเมอร์ เป็นส่วนใหญ่ ไม่นิยมใช้ทดสอบเซรามิกเนื่องจากข้อจำกัดในการทดสอบและความยากของการเตรียมชิ้นงาน การจับยึด รวมทั้งการติดตั้งในการทดสอบเพราะเซรามิกมีความเปราะ ชิ้นงานสำหรับการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงจะอยู่ในรูปของชิ้นงานที่มีลักษณะเรียวยาว (อัตราส่วนระหว่างความยาวและความกว้างมีค่ามาก) และปลายทั้งสองสามารถถูกจับยึด โดยเครื่องทดสอบได้ ประเภทของชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงแบ่งได้ 4 ประเภท ได้แก่

1. คัมเบลแบบเอวแคบ (Narrow-waisted dumbbell) เหมาะสำหรับการทดสอบชิ้นงานพลาสติกทั้งแข็งและอ่อน
2. คัมเบลแบบเอวกว้าง (Broad-waisted dumbbell) เหมาะสำหรับการทดสอบชิ้นงานพลาสติกอ่อนนุ่ม
3. คัมเบลแบบกระดูกสุนัข (Dog-bone dumbbell) เหมาะสำหรับการทดสอบชิ้นงานพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตในกรณีที่ชิ้นงานแบบคัมเบลโค้งเข้าไม่เหมาะสม
4. แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Parallel-side strip) เหมาะสำหรับวัสดุเชิงประกอบ (Composite materials)

2.3.2.2 การทดสอบความทนแรงอัด [26]

การทดสอบแรงอัดจะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกับการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงเพียงแต่ลักษณะของแรงที่ใช้ในการทดสอบนั้นเกิดขึ้นในทิศทางตรงกันข้าม ลักษณะของชิ้นงานทดสอบแรงอัดสามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภทหลัก ได้แก่

1. ปริซึมหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Right rectangular prism)
2. ปริซึมหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Right square prism)
3. ทรงกระบอกตัน (Right cylinder)
4. ท่อทรงกระบอก (Right circular tube)

2.3.2.3 การทดสอบความแข็ง [26]

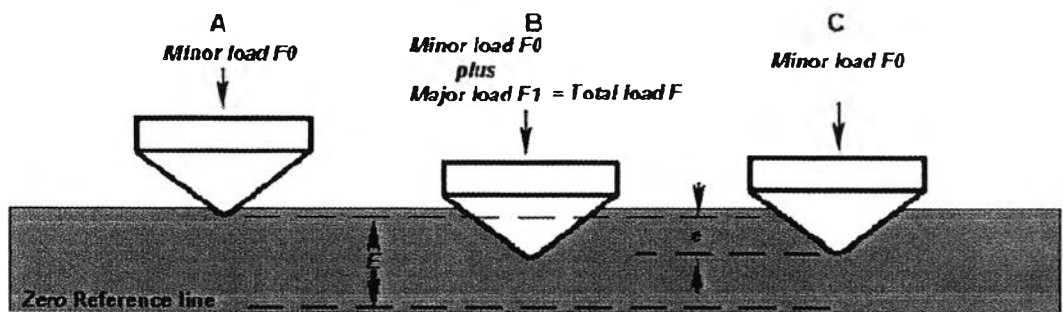
ความแข็งเป็นสมบัติพื้นฐานทางกลของวัสดุที่มีการทดสอบอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ ความแข็งมีหลายคำจำกัดความ เช่น

- ความสามารถของวัสดุต่อการต้านทานการขีดข่วน (Resistance to scratch)
- ความสามารถของวัสดุต่อการต้านทานการกดหรือเจาะทะลุโดยวัสดุอื่น (Resistance to indentation)

- ความสามารถของวัสดุต่อการต้านทานการขัดสี (Resistance to abrasion)
- ความสามารถของวัสดุต่อการต้านทานการกัดแต่งหรือการตัด (Resistance to machining)

2.3.2.3.1 การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์ (Rockwell) [26-27]

การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์ ASTM D785-08 Standard Test Method for Rockwell Hardness of Plastics and Electrical Insulating Materials เป็นการทดสอบที่ง่ายต่อการปฏิบัติ รวดเร็ว และมีหลายสเกล หัวทดสอบที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์มี 2 แบบ คือ หัวทดสอบทรงกรวยมุม 120 องศาโดยมีปลายกรวยรูปร่างมนรัศมี 0.2 มิลลิเมตร ซึ่งทำด้วยเพชรเหมาะสมสำหรับการทดสอบวัสดุที่มีความแข็งสูง ส่วนอีกแบบคือหัวทดสอบแบบลูกบอลซึ่งทำจากเหล็กชุบแข็งหรือทังสเตนคาร์ไบด์เหมาะสำหรับวัสดุที่มีความแข็งต่ำ การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 รูปแสดงการทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์ [27]

จากรูปเมื่อหัวทดสอบกดลงบนผิววัสดุ เข็มชี้ของเครื่องทดสอบจะเคลื่อนที่ตามการเคลื่อนที่ของหัวทดสอบและตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความลึกของรอยกดจากหัวทดสอบซึ่งถูกกำหนดให้เป็นตำแหน่งศูนย์เมื่อแรงกดคงที่และไม่สามารถกดลงผิววัสดุได้อีก และเมื่อปล่อยหัวทดสอบออกจะส่งผลให้มีการคืนตัวของวัสดุทดสอบเป็นผลให้ความลึกของรอยกดที่เกิดจากหัวทดสอบจะลดลง จากนั้นทำการเปรียบเทียบการคืนตัวของวัสดุทดสอบ ถ้ามีการคืนตัวต่ำจะเป็นวัสดุที่มีความแข็งสูง แต่ถ้าคืนตัวได้มากแสดงว่ามีความแข็งต่ำ การเลือกใช้สเกลในการทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์ขึ้นอยู่กับระดับความแข็งพลาสติก

ข้อจำกัดและข้อควรระวังของการทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์ [26]

- ไม่ควรใช้หัวทดสอบลูกบอลสำหรับวัดความแข็งของวัสดุที่มีค่าเกิน 100 kg_f เพราะค่าที่ได้จะมีความแม่นยำต่ำเนื่องจากอาจเกิดการยุบตัวของลูกบอล
- เนื่องจากสเกลสำหรับการทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์ค่อนข้างหยาบ ดังนั้นอาจไม่สามารถใช้วิธีการนี้ได้กับวัสดุทดสอบที่มีความแข็งใกล้เคียงกับหัวทดสอบ
- ความสะอาดของอุปกรณ์และชิ้นงานมีผลต่อความถูกต้องของค่าความแข็งที่วัดได้
- เมื่อมีการเปลี่ยนหรือใส่อุปกรณ์ของเครื่องทดสอบต้องให้จุดเชื่อมต่างๆ สนิทและอยู่ในตำแหน่ง ซึ่งอาจทดสอบการกดวัสดุทดสอบด้วยหัวทดสอบ 2-3 ครั้งก่อนการทดสอบจริง

2.3.2.3.2 การทดสอบความแข็งแบบชอร์คูโรมิเตอร์ (Shore durometer) [26]

การทดสอบความแข็งแบบชอร์คูโรมิเตอร์ ASTM D 2240000 Standard Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness นิยมใช้สำหรับวัสดุที่มีความแข็งไม่สูงมาก เช่น ยาง และพลาสติก ผลการทดสอบจะขึ้นอยู่กับอัตราการให้แรงกดในการทดสอบ ผลที่ได้จากการทดสอบจะมีความถูกต้องเมื่อแรงกดที่ให้แก่อุปกรณ์ในการทดสอบมากเพียงพอ เนื่องจากพลาสติกจะแสดงสมบัติที่ขึ้นอยู่กับเวลาในการทดสอบ ความแข็งของวัสดุจะเปลี่ยนไปตามเวลาในการกดหัวทดสอบบนชิ้นงานทดสอบ ดังนั้นเวลาระหว่างการกดหัวทดสอบและอ่านผลทดสอบจะต้องมีค่าคงที่ โดยทั่วไปแล้วจะกำหนดให้อ่านค่าทดสอบภายใน 1 วินาที หลังการกดและหัวทดสอบจะต้องถูกกดลงในแนวตั้งฉากกับพื้นผิวของวัสดุทดสอบที่ทำการทดสอบทุกครั้ง การทดสอบความแข็งแบบชอร์คูโรมิเตอร์ขึ้นกับชนิดของวัสดุที่นำมาทดสอบ แรงกด และลักษณะของหัวทดสอบ ดังตารางที่ 2.5 ซึ่งเป็นบางส่วนของข้อมูลที่ระบุในเอกสารอ้างอิง จากตารางถ้าใช้เกณฑ์การทดสอบความแข็งแบบชอร์คูโรมิเตอร์ ประเภท D เหมาะสำหรับวัสดุทดสอบประเภทพลาสติกแข็ง ซึ่งผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอีพ็อกซีจัดอยู่ในลักษณะนี้ ต้องใช้หัวทดสอบที่มีแรงกด 4.53 กิโลกรัม ถ้าอ่านค่าความแข็งจากสเกลได้ในช่วง 30 - 90 แสดงว่าวัสดุที่ถูกทดสอบนี้มีความเหมาะสมกับการทดสอบความแข็งแบบชอร์คูโรมิเตอร์ ประเภท D แต่ถ้าค่าความแข็งที่อ่านได้จากสเกลมากกว่า 90 ต้องเปลี่ยนไปใช้การทดสอบความแข็งแบบชอร์คูโรมิเตอร์ ประเภท A จะมีความเหมาะสมในการให้ค่าความถูกต้องกว่า

ข้อจำกัดและข้อควรระวังของการทดสอบความแข็งแบบชอร์คูโรมิเตอร์ [26]

- ผลการทดสอบขึ้นกับอัตราการให้แรงกดในการทดสอบ
- ต้องให้แรงกดมากพอเพื่อให้ผลการทดสอบถูกต้อง
- จำเป็นต้องอ่านค่าความแข็งภายใน 1 วินาที เนื่องจากความแข็งของวัสดุจะเปลี่ยนไปตามเวลาในการกดหัวทดสอบบนชิ้นงาน

- ในการทดสอบจะต้องกดหัวทดสอบลงไปในแนวตั้งฉากกับพื้นผิวของวัสดุทดสอบทุกครั้ง เพื่อไม่ให้กระทบต่อค่าความแข็งที่วัด

ตารางที่ 2.5 ประเภทของการทดสอบความแข็งแบบชอร์คูโรมิเตอร์ [26]

ประเภท	แรงกด	วัสดุสำหรับการทดสอบ	ช่วงการวัด	การใช้งาน
A	822 กรัม	ยางวัลคาไนซ์นึ่ง ยางธรรมชาติ นีโอพรีน ยางไนไตรล์ แวกซ์ หนั ง พอลิเอสเตอร์นึ่ง	$10 \leq A \leq 90$	10 – 90 : A
B	822 กรัม	ยางแข็งปานกลาง เช่น ลูกกลิ้งเครื่องพิมพ์ ยางรอง	$10 \leq B \leq 90$	> 90 : A < 20 : D
C	4.53 กิโลกรัม	ยางแข็งปานกลาง พลาสติก	$10 \leq C \leq 90$	> 90 : A < 20 : D
D	4.53 กิโลกรัม	ยางแข็ง พลาสติกแข็ง เช่น พอลิเมทิล เมทาคริเลต พอลิสไตรีน เทอร์โมเซต พลาสติก	$30 \leq D \leq 90$	> 90 : A
D0	4.53 กิโลกรัม	ยางแข็งปานกลาง เทอร์โมเซตพลาสติก วัสดุยึดหยุ่น (อีลาสโตเมอร์)	$10 \leq D0 \leq 90$	> 90 : C < 20 : D
0	822 กรัม	ยางนึ่ง พลาสติกนึ่ง	$10 \leq 0 \leq 90$	< 20 : D0
00	113 กรัม	ฟองน้ำยาง พลาสติกนึ่งมาก โฟม เนื้อเยื่อ	$10 \leq 00 \leq 90$	< 20 : 0

2.3.3 การทดสอบสมบัติทางเคมี

2.3.3.1 การทดสอบเพื่อประเมินสภาพผิวเคลือบด้วยหมอกเกลือ [28]

สำหรับงานผิวเคลือบ โดยทั่วไปการทดสอบสมบัติทางเคมีมักทำการทดสอบเพื่อประเมินสภาพและการซีดเกาะของผิวเคลือบด้วยหมอกเกลือ (Salt fog testing) ASTM B117 “Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus” เพื่อทำนายการเสื่อมสภาพจากการกัดกร่อนในภาวะบรรยากาศที่มีไอเกลือเป็นองค์ประกอบ โดยเฉพาะภาวะบรรยากาศที่อยู่ใกล้ชายฝั่งทะเลหรืออยู่ในทะเลระหว่างการขนส่งวัสดุหรือผลิตภัณฑ์ ซึ่งอัตราการกัดกร่อนจะมีค่าแตกต่างกันไปตามตำแหน่งหรือทำเล มาตรฐานการทดสอบด้วยหมอกเกลือเป็นการทดสอบแบบเร่งให้เกิดผล เพื่อศึกษาสมบัติของวัสดุในช่วงระยะเวลาอันสั้น ตัวอย่างการประเมินผิวเคลือบสังกะสีของชิ้นงานหล่อจากแม่พิมพ์ตามข้อกำหนดของ ASTM B-117-97 กำหนด pH ของสารละลายน้ำเกลือที่ใช้ระหว่าง 6.5 – 7.2 และ ASTM B287 สำหรับการทดสอบที่ pH ต่ำ คือทดสอบในกรดอะซิติกที่ pH ระหว่าง 3.1 – 3.3

2.4 การวิเคราะห์ขนาดของอนุภาค [23]

อนุภาค หมายถึง สสารที่ประกอบด้วยผลึกเดี่ยวหรือหลายผลึกมีและรูปร่างหลายแบบ หมายถึง อนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็ และแห้ง มีขนาดของอนุภาคในช่วง 0.1 – 1,000 ไมครอน [29] ในการผลิตผลิตภัณฑ์หรือปรับปรุงกระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพจำเป็นต้องทราบข้อมูลเกี่ยวกับวัตถุดิบ ได้แก่ สมบัติโดยรวม (Bulk properties) ซึ่งหมายถึง การศึกษาการไหลและการอัดตัวของอนุภาค (Powder flow and packing) การตอบสนองต่อความร้อนของอนุภาค (Thermal response) และการเกาะตัวอย่างหลวม (Agglomeration) เป็นต้น

การวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคมีหลายเทคนิค เช่น เทคนิคการแยกขนาดด้วยตะแกรง (Sieving techniques) เทคนิคการตกตะกอน (Sedimentation techniques) เทคนิคทางไฟฟ้า (Electrical sensing techniques) เทคนิคทางแสง (Optical techniques) และเทคนิคสเปคโตรสโคปทางอะคูสติก (Acoustic spectroscopy) เป็นต้น ซึ่งแต่ละเทคนิคสามารถวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคได้เพียงบางช่วงขนาดภายใต้สมบัติของอนุภาคในบางภาวะ เช่น เทคนิคการแยกขนาดด้วยตะแกรงอาศัยความสามารถของอนุภาคในการลอดผ่านรูเปิดในแต่ละขนาดของตะแกรงที่เบอร์ต่างๆ เพื่อวิเคราะห์ขนาดของอนุภาค โดยปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถของอนุภาคในการลอดผ่านรูเปิดของตะแกรง ได้แก่ ขนาด รูปร่าง เวลาในการดำเนินการ เป็นต้น ทั้งนี้แต่ละเทคนิคจำเป็นต้องรู้ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อหลักการของเทคนิคนั้นๆ เพื่อป้องกันความผิดพลาดในการเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์ผล

2.5 Balanced scorecard สำหรับวิเคราะห์ความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์ [30]

Balanced scorecard คือ ระบบหรือกระบวนการที่กำหนดตัวชี้วัด (Key performance index : KPI) เป็นกลไกสำคัญในการวัดประสิทธิผลของงานหรือของประเด็นที่สนใจ การทำ Balanced scorecard เริ่มต้นด้วยกระบวนการด้านกลยุทธ์ก่อน คือ การวิเคราะห์ด้านกลยุทธ์และจัดทำกลยุทธ์หลัก (Strategic themes) การจัดทำแผนที่ทางกลยุทธ์ (Strategy map) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ในเชิงเหตุและผลของวัตถุประสงค์ต่างๆ ภายใต้มุมมองของ Balanced scorecard ทั้ง 4 ด้าน คือ ด้านการเงิน ลูกค้า กระบวนการภายใน และการเรียนรู้และการพัฒนา สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำหลักการของ Balanced scorecard มาประยุกต์ใช้พิจารณาความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์ของการใช้กากตะกอนจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตลาเท็กซ์ซึ่ง โดยปกติต้องเสียค่าจ้างในการบำบัดมาใช้ทดแทนตัวเดิมสำหรับผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเรซินอีพ็อกซีและเปรียบเทียบคุณภาพกับ

สูตรควบคุมโดยพิจารณาจากสมบัติต่างๆ ทางกายภาพ ทางกล ทางเคมี และการทนทานต่อการกัดกร่อนจากน้ำทะเลเทียม รวมทั้งความสะดวกในการใช้งานของลูกค้ำและราคาของผลิตภัณฑ์

2.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พชรพงศ์ ชื่นศิริ และ แสง เกตุโคโประการ (พ.ศ. 2540) [31] ศึกษาการนำกากตะกอนสีน้ำทาบ่านจากบ่อบำบัดน้ำทิ้งของโรงงานผลิตสีมาเป็นส่วนผสมในการทำคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น เพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อมและการนำกากตะกอนที่เป็นภาระจะต้องกำจัดมาทำให้เกิดประโยชน์ โดยศึกษาสมบัติเบื้องต้นทางกายภาพและทางเคมีของกากตะกอนสี และทดลองหาสูตรส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น แล้วทดสอบสมบัติทางกลในการรับแรงและอัตราการละลายออกมาของโลหะหนักของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น เปรียบเทียบราคาระหว่างคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่ทำขึ้นในงานวิจัยกับผลิตภัณฑ์ตามท้องตลาด จากการศึกษาพบว่าคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่ผสมกากตะกอนสี 20% (w/w) รับแรงกดได้สูงสุด 13.17 MPa และพบว่าอัตราการละลายออกมาของโลหะหนักในน้ำไม่เกินค่ามาตรฐานที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนด นอกจากนี้ราคายังถูกกว่าท้องตลาดประมาณ 50%

อาภาวดี เบ็ญจมธารกุล (พ.ศ. 2546) [32] ศึกษาการนำกากตะกอนน้ำเสียอุตสาหกรรมจากโรงงานผงชูรสและโรงงานนมมาใช้ผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง ซึ่งได้มีการปรับปรุงคุณภาพการตกตะกอนของน้ำเสียโดยการหมักและหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการใช้กากตะกอนผสมกับแกลบเพื่อผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง ศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัตีด้านเชื้อเพลิงตามมาตรฐาน ASTM ผลการวิจัยพบว่าสามารถใช้กากตะกอนและแกลบในการอัดขึ้นรูปผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งได้ดีและใช้เวลาน้อย นอกจากนี้พบว่ากากตะกอนจากทั้งสองโรงงานหลังการหมักมีประสิทธิภาพการใช้ความร้อนต่ำลง เมื่อวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางด้านเชื้อเพลิงพบว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งดังกล่าวมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานเนื่องจากแตก่วนน้อย มีค่าความร้อนใกล้เคียงกับไม้ฟืน และมีปริมาณกำมะถันน้อยกว่าถ่านหิน สำหรับเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ปรับปรุงคุณภาพโดยการเผาให้เป็นถ่านจะมีประสิทธิภาพการใช้งานและการให้พลังงานแก่น้ำดีกว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ไม่เผาเป็นถ่าน

ประริญา รำไพ (พ.ศ. 2546) [33] ศึกษาการนำกากตะกอนน้ำเสียทางชีววิทยาจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษและโรงงานฟอกย้อมมาใช้ผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง กากตะกอนถูกนำมาผสมกับเปลือกมะพร้าวอ่อนในอัตราส่วนต่างๆ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการนำไปอัดแท่ง อัตราส่วนที่ศึกษา คือ 1:1, 1:2 และ 1:3 การปรับปรุงคุณภาพกากตะกอนใช้การหมัก 2 แบบ คือ แบบไม่มีอากาศและแบบมีอากาศ จากนั้นเผาเชื้อเพลิงอัดแท่งให้เป็นถ่าน แล้วนำไปทดสอบการใช้ความร้อนเปรียบเทียบกับถ่านไม้ จากผลการศึกษาพบว่าผลจากการหมักกากตะกอนทั้ง 2 แบบ ทำให้กลิ่น

ลดลง และผลการใช้งานความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากตะกอนที่หมักแบบไม่มีอากาศให้ผลดีกว่าแบบมีอากาศ อัตราส่วนของกากตะกอนต่อเปลือกมะพร้าวอ่อนที่ดีที่สุด คือ 1:3 และผลของการปรับปรุงคุณภาพเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ได้จากทั้งสองโรงงาน โดยการเผาให้เป็นถ่านดีกว่าการปรับปรุงคุณภาพโดยการหมักกากตะกอนทั้งสองแบบ เมื่อนำไปทดสอบการใช้ความร้อนเปรียบเทียบกับถ่านไม้พบว่าการใช้ความร้อนเทียบเท่ากับถ่านไม้และใช้เวลาในการคิดไฟน้อยกว่า

Zou, et al. (ค.ศ. 2008) [34] ศึกษาการใช้ประโยชน์จากกากตะกอนของน้ำเสียครัวเรือนและโรงงานผลิตน้ำดื่มในจังหวัดนานกิง ประเทศจีน มาทำเซรามิก และลดต้นทุนในการกำจัดกากตะกอน ผลการวิเคราะห์กากตะกอนทั้งสองมีองค์ประกอบ Fe_2O_3 , CaO และ MgO ซึ่งเป็นส่วนผสมที่สำคัญในการผลิตเซรามิก จากการศึกษาพบว่าเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ Fe_2O_3 , CaO และ MgO ที่เหมาะสมในการเป็นส่วนผสมของเซรามิก คือ 5-8, 2.75- 7 และ 1.6 – 4% (w/w) ตามลำดับ และวิเคราะห์เซรามิกที่ได้เชิงความร้อน (Thermal analysis), X-ray diffraction (XRD), SEM และการทดสอบแรงอัด

Kalenda และ Kalendov'a (ค.ศ. 1994) [35] ศึกษาความทนต่อสารเคมีของเรซินอีพ็อกซีที่ใช้ตัวเติม Inert fillers และ Reactive fillers จากการแพร่ของกรดอินทรีย์และกรดอนินทรีย์ พบว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) ขึ้นกับปริมาณของตัวเติม คือเมื่อเพิ่มตัวเติมมากขึ้นสัมประสิทธิ์การแพร่จะลดลง การใช้ Inert fillers จะให้สัมประสิทธิ์การแพร่ที่สูงกว่า Reactive fillers ทั้งนี้เนื่องมาจากสมบัติของ Reactive fillers นอกจากนี้สัมประสิทธิ์การแพร่ยังขึ้นกับรูปร่างและขนาดของอนุภาค โดยอนุภาคที่เป็นทรงกลมจะมีสัมประสิทธิ์การแพร่สูงกว่าอนุภาคที่เป็นแบบแผ่น และอนุภาคขนาดใหญ่จะให้สัมประสิทธิ์การแพร่สูงกว่าอนุภาคขนาดเล็ก

ชัยพฤกษ์ เกตเพชร และคณะ (พ.ศ. 2547) [36] ศึกษาการเตรียมเจลอีพ็อกซีสำหรับการเคลือบผิว (Epoxy gel coat) ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ และศึกษาวิธีการลดฟองอากาศที่เกิดขึ้นในเนื้อของเจล การปรับปรุงสมบัติทางกลทำโดยเติมสารลดฟองและสารปรับปรุงความทนทานต่อแรงกระแทก จากการทดลองพบว่าเมื่อปริมาณของผงเบาประเภทซิลิกาที่มีปริมาณมากขึ้นจะทำให้ความหนืดของเจลมากขึ้นและมีค่ามอดูลัสคืดโค้งเพิ่มขึ้น นอกจากนี้อัตราส่วนระหว่างสารทำแข็งและสารเร่งปฏิกิริยาเคมีของการเคลือบผิวที่ต่างกันมีผลต่อระยะเวลาการแห้งตัวและสมบัติทางกล นอกจากนี้การเติมสารปรับปรุงความทนทานต่อแรงกระแทกทำให้เจลอีพ็อกซีสามารถทนต่อแรงกระแทกได้มากขึ้น

นพรัตน์ ไทยวัฒนาพร (พ.ศ. 2548) [37] ศึกษาสมบัติทางกายภาพ ทางกล และทางเคมีของเรซินอีพ็อกซีที่ปราศจากสารเสริมแรงและสารปรับแต่ง เปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบระหว่างเรซินอีพ็อกซีและทรายที่มีสารปรับแต่งประเภทต่างๆ ในปริมาณและอัตราส่วนที่แตกต่างกัน สารปรับแต่ง 3 ประเภท ที่ใช้ในการศึกษา คือ สารปรับแต่งประเภท Levelling สารปรับแต่งประเภท Air release และสารปรับแต่งประเภท Wetting and dispersing ทำให้สมบัติทางกายภาพและทางกล ได้แก่ ความหนาแน่น ความต้านทานแรงอัด และความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นและใกล้เคียงกับเรซินอีพ็อกซีที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ และจากการทดลองพบว่าสารปรับแต่งไม่มีผลต่อความทนทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมี ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติทางเคมีขึ้นอยู่กับชนิดของเรซินอีพ็อกซีและสารทำแข็ง เมื่อพิจารณาทางด้านราคาแล้วพบว่าต้นทุนการผลิตวัสดุเชิงประกอบเรซินอีพ็อกซีนี้มีมูลค่าต่ำกว่าการนำเข้าถึง 66.00%

Liang, et al. (ค.ศ. 2009) [38] ศึกษาปริมาณน้ำสมดุลและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในพรีพอลิเมอร์อีพ็อกซี ได้แก่ Diglycidyl ether of bisphenol A epoxy resin (DGEBA), triglycidyl-p-aminophenol epoxy resin (TGAP) และ tetraglycidyl-4,4'-diaminodiphenylmethane epoxy resin (TGDDM) ซึ่งมีสูตรโครงสร้างต่างกันและใช้สารทำแข็งเป็น 4,4'-diaminodiphenylsulfone (DDS) และ 4,4'-diaminodiphenylmethane (DDM) ทำการวิเคราะห์โดยเครื่อง Gravimetric measurement, เครื่อง Positron annihilation lifetime spectroscopy (PALS) และเครื่อง Attenuate total reflection Fourier transform infrared spectroscopy (ATR-IR) เนื่องจากน้ำมีผลต่อเรซินเพราะทำให้ประสิทธิภาพในการปกป้องพื้นผิวลดลง จากการศึกษาพบว่าปริมาณน้ำสมดุลของพรีพอลิเมอร์อีพ็อกซีที่มีโครงสร้างต่างกันเรียงลำดับจากมากไปน้อยดังนี้ TGAP, TGDDM, DGEBA และพรีพอลิเมอร์อีพ็อกซีที่มีความเข้มข้นมากจะมีปริมาณน้ำสมดุลมากขึ้นด้วย เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำพบว่าพรีพอลิเมอร์อีพ็อกซีชนิด DGEBA มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำมากที่สุด รองลงมาคือ TGDDM และ TGAP ตามลำดับ แสดงว่าพรีพอลิเมอร์อีพ็อกซีชนิด DGEBA มีประสิทธิภาพในการปกป้องพื้นผิวดีที่สุด นอกจากนี้พบว่าปริมาณน้ำสมดุลของพรีพอลิเมอร์อีพ็อกซีเมื่อใช้สารทำแข็งชนิด DDM มีค่ามากกว่าเมื่อใช้สารทำแข็งชนิด DDS