

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 คอมโพสิต (อิทธิพล, 2544)

คอมโพสิต คือ วัสดุที่ประกอบด้วยองค์ประกอบสองส่วน (หรือมากกว่า) ที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด (distinct components) อยู่ด้วยกัน องค์ประกอบสองส่วนหลักของคอมโพสิตคือ

1. วัสดุเสริมแรง (reinforcing agent) คือส่วนที่เป็นโครงสร้างที่ให้ความแข็งแรงแก่วัสดุคอมโพสิต วัสดุที่เป็นวัสดุเสริมแรงจะมีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง ตัวอย่างของวัสดุเสริมแรงที่สำคัญได้แก่ เส้นใยชนิดต่างๆ เช่น เส้นใยแก้ว (glass fibers) เส้นใยคาร์บอน(carbon fibers) เส้นใยเคฟลาร์ (kevlar fibers) เป็นต้น อาจเป็นเส้นใยเดี่ยวยาว (continuous fibers) หรือ เส้นใยสั้น (discontinuous หรือ chopped short fibers) นอกจากนี้อาจเป็นเส้นใยพันกันหรือทอ (weaves) ให้มีโครงสร้างแบบต่างๆ และมีการจัดเรียง (orientation) ของวัสดุเสริมแรงแบบต่างๆ วัสดุเสริมแรงจะเป็นส่วนรับแรงหลักของวัสดุคอมโพสิต

2. เมทริกซ์ (matrix) เป็นวัสดุที่ทำหน้าที่ยึดวัสดุเสริมแรงเข้าด้วยกันเพื่อให้อยู่ในตำแหน่งและการเรียงตัวที่กำหนด เมทริกซ์มีความแข็งแรงและมอดุลัสต่ำกว่าวัสดุเสริมแรง เมทริกซ์เป็นองค์ประกอบที่มีความต่อเนื่อง (continuous phase) จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางถ่ายเทแรงที่ได้รับ ไปสู่วัสดุเสริมแรง วัสดุที่ใช้เป็นเมทริกซ์ได้แก่ พอลิเมอร์ โลหะและเซรามิกซ์

2.1.1 การแบ่งชนิดของคอมโพสิต

มีการแบ่งชนิดวัสดุคอมโพสิตได้หลายแบบ อาจแบ่งชนิดคอมโพสิตตามลักษณะของวัสดุเสริมแรง แบ่งชนิดคอมโพสิตตามวัสดุที่ใช้เป็นเมทริกซ์และสามารถแบ่งตามลักษณะการเกิดของคอมโพสิต

การแบ่งชนิดคอมโพสิตตามลักษณะของวัสดุเสริมแรง

1. คอมโพสิตแบบเส้นใย (fibrous composites) คือคอมโพสิตที่มีวัสดุเสริมแรงเป็นเส้นใย (fibers) อาจเป็นเส้นใยสั้น (short fibers) หรือเส้นใยยาวต่อเนื่อง (continuous fibers) มักเป็นเส้นใยขนาดเล็ก มีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง ทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรงตามแนวการเรียงตัวของเส้นใยสูงกว่าแนวอื่นๆ

2. คอมโพสิตแบบแผ่นหรือลามิเนต (laminar composites) คือคอมโพสิตที่ประกอบด้วยชั้นหรือแผ่นของวัสดุที่ยึดติดกันด้วยตัวเชื่อมเมทริกซ์ มีลักษณะเป็นชั้นๆ คล้ายแซนวิช (sandwich) หรือเป็นโครงสร้างคล้ายรังผึ้ง (honeycomb)

3. คอมโพสิตแบบเป็นก้อน (particulate composites) คือคอมโพสิตที่มีวัสดุเสริมแรงเป็นเม็ด (beads) แผ่น (flake) หรือผง (powder) ที่มีขนาดเล็ก (มักมีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน) การแบ่งชนิดคอมโพสิตตามวัสดุที่ใช้เป็นเมทริกซ์

1. พอลิเมอร์คอมโพสิตหรือพอลิเมอร์เชิงประกอบ (polymer composites) คือคอมโพสิตที่มีเมทริกซ์เป็นพอลิเมอร์ ทั้งประเภทเทอร์โมพลาสติก (thermoplastics) และเทอร์โมเซต (thermosets)

2. โลหะคอมโพสิตหรือโลหะเชิงประกอบ (metal composites) คือคอมโพสิตที่มีเมทริกซ์เป็นโลหะ

3. เซรามิกส์คอมโพสิตหรือเซรามิกส์เชิงประกอบ (ceramics composites) คือคอมโพสิตที่มีเมทริกซ์เป็นเซรามิกส์ การแบ่งตามลักษณะการเกิดของคอมโพสิต

1. คอมโพสิตจากธรรมชาติ (natural composites) คือวัสดุคอมโพสิตที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น ไม้ (wood) ฟัน (teeth) และกระดูก (bone) ไม้เป็นคอมโพสิตของเส้นใยเซลลูโลส (cellulose) เป็นวัสดุเสริมแรง โดยมีสารจำพวกลิกนิน (lignin) เป็นเมทริกซ์ยึดเซลลูโลสไว้ด้วยกัน ส่วนกระดูกและฟันเป็นคอมโพสิตของผลึกของแข็งอนินทรีย์ เช่น ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (hydroxy apatite) อยู่ในเมทริกซ์ของสารอินทรีย์เหนียวคอลลาเจน (collagen) เป็นต้น

2. คอมโพสิตจากการสังเคราะห์ (synthetic composites) คือวัสดุคอมโพสิตที่ได้จากการสังเคราะห์ เช่นพลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว เป็นต้น

2.1.2 ข้อดีและข้อเสียของวัสดุคอมโพสิต

1 ข้อดีของวัสดุคอมโพสิตมีดังนี้

- มีสมบัติต่อน้ำหนักหรือความหนาแน่น (properties to weight/density ratio) สูง เช่น ความแข็งแรงเฉพาะและโมดูลัสเฉพาะ เป็นต้น เนื่องจากวัสดุคอมโพสิตมีความหนาแน่นต่ำ น้ำหนักเบา ช่วยลดน้ำหนักของวัสดุ (พิจารณาตารางที่ 2.1)
- มีสมบัติหลากหลาย สามารถสร้างวัสดุคอมโพสิตให้เหมาะสมกับการใช้งาน เช่น จัดให้เส้นใย (วัสดุเสริมแรง) เรียงตัวตามแนวรับแรง

- มีอายุการใช้งานยาวนาน มักมีสมบัติความต้านทานต่อการสึกกร่อนดี
- มีสมบัติการรับแรงและความหน่วง (damping) ดี
- ความทนทานต่อการล้า (fatigue resistance) ดี
- มีเสถียรภาพของรูปร่าง (dimensional stability) สูง เนื่องจากมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (coefficients of thermal expansion, CTE) ต่ำ เมื่อเทียบกับวัสดุอื่น เช่น โลหะ

2. ข้อเสียของวัสดุคอมโพสิต

- ต้นทุนการผลิตสูง เนื่องจากราคาของวัตถุดิบและเครื่องมือการขึ้นรูปคอมโพสิตมีราคาแพง
- มักมีสมบัติแต่ละทิศทางไม่เท่ากัน หรือ มีสมบัติแอนไอโซโทรปี (anisotropy) เนื่องจากมีการจัดเรียงตัว (orientation) ของวัสดุเสริมแรง เป็นสาเหตุให้คอมโพสิตไม่แข็งแรงในแนวตั้งฉากกับแนวการเรียงตัว (transverse direction)
- ยากในการต่อ (attaching) หรือเชื่อมติดกับวัสดุอื่น
- ยากในการทำลายและนำกลับมาใช้ใหม่หรือรีไซเคิล (recycle)

2.1.3 การประยุกต์ใช้งานคอมโพสิต

ในปัจจุบันการใช้งานวัสดุคอมโพสิต สามารถประยุกต์ใช้ได้กับการใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ (automotive) เครื่องบิน (aircraft) อวกาศ (aerospace) อุปกรณ์กีฬา (sporting goods) เป็นต้น ตารางที่ 2.2 แสดงตัวอย่างการใช้งานของคอมโพสิตในอุตสาหกรรมต่างๆ การที่มีการใช้งานคอมโพสิตทดแทนวัสดุอื่นๆ เช่น โลหะ เนื่องจากมีน้ำหนักเบา ผลผลิตภัณฑ์คอมโพสิตมีชิ้นส่วนน้อยชิ้น ไม่ต้องการการประกอบมาก สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้

ตารางที่ 2.1 สมบัติบางประการของวัสดุต่างๆ เทียบกับวัสดุคอมโพสิต (อิทธิพล, 2544)

Materials	Density (ρ), g/cm ³	Modulus (E), GPa	Strength (σ), MPa	E/ ρ , 10 ⁶ N.m/kg	σ/ρ , 10 ³ N.m/kg
Al 6061-T6	2.70	68.9	310	25.7	115
SAE 1010 Steel (cold-worked)	7.87	207	365	26.3	46.4
Ti-6Al-4V	4.43	110	1171	25.3	26.4
Nylon 6/6	1.14	2	70	1.75	61.4
Unidirectional carbon fiber/epoxy	1.55	137.8	1550	88.9	1000
Unidirectional E-glass fiber/epoxy	1.85	39.3	965	21.2	522
Unidirectional Kevlar [®] 49 fiber/epoxy	1.38	75.8	1378	54.9	999
Quasi-isotropic carbon fiber/epoxy	1.55	45.5	579	29.3	374
Random glass fiber/epoxy	1.55	8.5	11	5.48	71

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างการใช้งานวัสดุคอมโพสิต (อิทธิพล, 2544)

อุตสาหกรรม	ตัวอย่างการใช้งาน
เครื่องบิน	ประตู ปีก โบพัด หางเสือ ตัวเครื่อง
ยานอวกาศ	กระสวยอวกาศ (space shuttle) สถานีอวกาศ (space station)
ยานยนต์	ตัวถัง ส่วนประกอบเครื่องยนต์ กันชน
เรือ	ตัวถังเรือ คาค้ำ
อุปกรณ์กีฬา	ไม้เทนนิส ไม้เบดมินตัน ก้านไม้กอล์ฟ ตัวถังจักรยาน สกี เรือแคนู
เคมี	ท่อส่งสารเคมี ถังเก็บ
อุปกรณ์ก่อสร้าง	ฝาผนัง ประตู เฟอร์นิเจอร์ โตะ แก้ว บันได
อุปกรณ์ไฟฟ้า	แผงวงจร ฉนวนไฟฟ้า ก่อสร้างคอมพิวเตอร์

2.2 พอลิเมอร์เมทริกซ์ (Hull, 1996)

พอลิเมอร์เมทริกซ์ที่นิยมใช้ในคอมโพสิต คือพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซตเนื่องจากใช้สารตั้งต้นน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่มีความหนืดต่ำ สามารถผสมกับเส้นใยขึ้นรูปเป็นคอมโพสิตได้ง่าย ส่วนพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติกใช้เป็นเมทริกซ์สำหรับคอมโพสิตน้อยกว่า เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลที่ด้อยกว่า ทนอุณหภูมิต่ำกว่าแต่สามารถขึ้นรูปได้หลายครั้ง ทำให้มีแนวโน้มประยุกต์ใช้เทอร์โมพลาสติกเป็นเมทริกซ์มากขึ้น สำหรับเทอร์โมเซต พอลิเมอร์เมทริกซ์ที่นิยมใช้ คืออีพ็อกซี พอลิเอสเทอร์และไวนิลเอสเทอร์ ซึ่งมีใช้กันอย่างกว้างขวาง มีสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงฟิสิกส์ที่กว้าง เรซินที่เป็นของเหลวสามารถกลายเป็นของแข็งได้ด้วยการเชื่อมขวางพันธะทางเคมี ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ คุณสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เมทริกซ์จำพวกเทอร์โมเซตขึ้นอยู่กับ การจัดเรียงตัวของโมเลกุล ความยาวและความหนาแน่นของการเชื่อมขวางพันธะ ซึ่งทำให้วัสดุมีความแข็งแรง ทนต่อตัวทำละลาย มีเสถียรภาพต่อการออกซิเดชัน และทนอุณหภูมิที่สูง สมบัติของเมทริกซ์จำพวกเทอร์โมเซตและเทอร์โมพลาสติกแสดงไว้ในตารางที่ 2.3 สำหรับเทอร์โมพลาสติกต่างจากเทอร์โมเซตที่ไม่มีการเชื่อมขวางพันธะ ดังนั้นความแข็งแรงของวัสดุจึงมาจากความแข็งแรงของสายโซ่พอลิเมอร์และการพันกันของสายโซ่พอลิเมอร์ ทั้งเทอร์โมพลาสติกชนิดที่เป็นผลึกและไม่มีผลึกสามารถเกิดการจัดเรียงตัวของโครงสร้าง ทำให้สมบัติแต่ละทิศทางไม่เหมือนกัน มักเกิดขึ้นเมื่อเกิดการไหลของเทอร์โมพลาสติกขณะขึ้นรูปหรือเสียรูปเมื่อได้รับแรงเส้นใยที่ผสมในเทอร์โมพลาสติกทำให้พฤติกรรมของเทอร์โมพลาสติกเปลี่ยนไป คือเส้นใยทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก ทำให้ปริมาณผลึกของเทอร์โมพลาสติกเพิ่มขึ้น ผลึกมักเกิดในทิศตั้งฉากกับผิวของเส้นใยช่วยเพิ่มความแข็งแรงของคอมโพสิตจำพวกเทอร์โมพลาสติก

2.3 เส้นใย (Hull, 1996)

เส้นใยเป็นวัสดุเสริมแรงที่สำคัญที่สุดชนิดหนึ่งของวัสดุคอมโพสิต เนื่องจากเส้นใยมีความแข็งแรง (strength) และมอดุลัส (modulus) สูงอาจอยู่ในรูปเส้นใยยาวต่อเนื่อง (continuous fibers or filaments) เส้นใยสั้น (short or chopped fibers) หรือวิสเกอร์ (whiskers) เส้นใยที่นิยมใช้ในวัสดุคอมโพสิตได้แก่ เส้นใยคาร์บอน (carbon fiber) เส้นใยแก้ว (glass fiber) เส้นใยอะรามิดหรือเคฟลาร์ (aramid fiber or kevlarTM) เส้นใยเหล่านี้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางแตกต่างกัน ตั้งแต่ไม่กี่ไมครอนจนถึงร้อยไมครอน อาจมีความยาวต่อเนื่องหรือเป็นเส้นใยถูกตัดสั้นไม่กี่ไมครอน สมบัติของเส้นใยชนิดต่างๆ สามารถพิจารณาได้จากตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.3 สมบัติบางประการของพอลิเมอร์เมทริกซ์ชนิดเทอร์โมเซตและเทอร์โมพลาสติก (Hull, 1996)

Matrix	Density ρ (Mgm ⁻³)	Young's modulus E (GPa)	Poisson's ratio ν	Tensile strength σ_* (GPa)	Failure strain ϵ_* (%)	Thermal expansivity α (10 ⁻⁶ K ⁻¹)
<i>Thermosets</i>						
epoxy resins	1.1-1.4	3-6	0.38-0.40	0.035-0.1	1-6	60
polyesters	1.2-1.5	2.0-4.5	0.37-0.39	0.04-0.09	2	100-200
<i>Thermoplastics</i>						
Nylon 6.6	1.14	1.4-2.8	0.3	0.06-0.07	40-80	90
polypropylene	0.90	1.0-1.4	0.3	0.02-0.04	300	110
PEEK	1.26-1.32	3.6	0.3	0.17	50	47
<i>Metals</i>						
Al	2.70	70	0.33	0.2-0.6	6-20	24
Mg	1.80	45	0.35	0.1-0.3	3-10	27
Ti	4.5	110	0.36	0.3-1.0	4-12	9
<i>Ceramics</i>						
borosilicate glass	2.3	64	0.21	0.10	3	12
SiC	3.4	400	0.20	0.4	4	50
Al ₂ O ₃	3.8	380	0.25	0.5	8	30

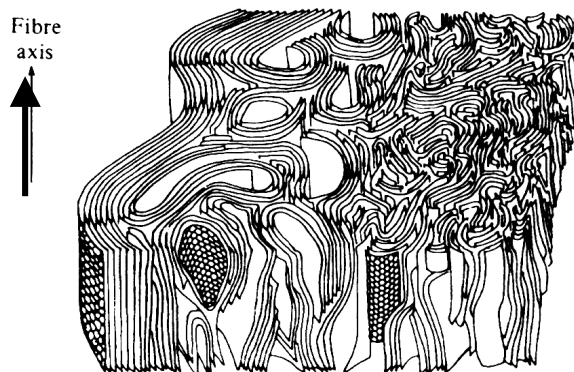
ตารางที่ 2.4 สมบัติของเส้นใยชนิดต่างๆ (Hull, 1996)

Fiber	Density ρ (Mgm ⁻³)	Young's modulus E (GPa)	Poisson's ratio ν	Tensile strength σ_* (GPa)	Failure strain ϵ_* (%)	Thermal expansivity α (10 ⁻⁶ K ⁻¹)
SiC monofilament	3.0	400	0.20	2.4	0.6	4.0
Boron monofilament	2.6	400	0.20	4.0	1.0	5.0
HM ^a carbon	1.95	axial 380 radial 12	0.20	2.4	0.6	axial -0.7 radial 10
HS ^b carbon	1.75	axial 230 radial 20	0.20	3.4	1.1	axial -0.4 radial 10
E-glass	2.56	76	0.22	2.0	2.6	4.9
Nicalon TM	2.6	190	0.20	2.0	1.0	6.5
Kevlar TM 49	1.45	axial 130 radial 10	0.35	3.0	2.3	axial -6 radial 54
FP TM fiber	3.9	380	0.26	2.0	0.5	8.5
Saffil TM	3.4	300	0.26	2.0	0.7	7.0
SiC whiswer	3.2	450	0.17	5.5	1.2	4.0
Cellulose (flax)	1.0	80	0.3	2.0	3.0	--

1. เส้นใยคาร์บอน (carbon fiber)

ในผลึกเดี่ยว (single crystal) ของแกรไฟต์ที่สมบูรณ์จะประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนจัดเรียงเป็นรูปหกเหลี่ยม (hexagonal arrays) จัดเรียงเป็นชั้นๆ สลับกัน (ABABAB...) อย่างเป็นระเบียบ อะตอมคาร์บอนในชั้นหรือแผ่นแกรไฟต์ยึดติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ที่แข็งแรง แต่ยึดระหว่างชั้นด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ที่ไม่แข็งแรง นั่นแสดงว่าเส้นใยคาร์บอนมีสมบัติแอนไอโซโทรปีหรือสมบัติในแต่ละทิศทางไม่เท่ากัน เส้นใยคาร์บอนมีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 8 μm โครงสร้างเส้นใยคาร์บอนประกอบด้วยผลึกของเทอร์โบสเตรคติก

แกรไฟต์ (turbostratic graphite) ซึ่งเป็นรูปที่ไม่สมบูรณ์ของแผ่นผลึกแกรไฟต์ จัดเรียงเป็นชั้นๆ ตามแนวเส้นใยซึ่งได้แสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเทอร์โบสเตรคติกแกรไฟต์ในเส้นใยคาร์บอน (Bennett and Johnson, 1978)

เส้นใยคาร์บอนสามารถได้จากการใช้ความร้อนและแรงดึงเส้นใยอินทรีย์ ชนิดพรีเคอร์เซอร์ (precursors) ทำให้โครงสร้างเส้นใยเปลี่ยนเป็นโครงสร้างผลึกของคาร์บอนที่มีการเรียงตัวสูง เส้นใยพรีเคอร์เซอร์ที่นิยมใช้ผลิตเส้นใยคาร์บอนได้แก่ พอลิอะคริโลไนไตร พิทซ์และเส้นใยเรยอน

2. เส้นใยแก้ว (glass fibers)

วัสดุเสริมแรงที่นิยมใช้มากที่สุดกับเมทริกซ์พอลิเมอร์ คือ เส้นใยแก้ว ข้อได้เปรียบของเส้นใยแก้ว คือราคาถูก ความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงกระแทกสูง และความต้านทานต่อสารเคมีสูง ข้อเสียของเส้นใยแก้ว คือมีค่ามอดุลัสค่อนข้างต่ำ ไม่ทนทานต่อการขัดถูเสียดสี ความต้านทานต่อการล้าต่ำและมีการยึดเกาะ (adhesion) กับเมทริกซ์ต่ำ

เส้นใยแก้วที่นิยมใช้ในปัจจุบันมี 3 ชนิดคือ

- เส้นใยแก้วชนิด E-glass (E มาจาก electrical) นิยมใช้มากที่สุดเพราะมีความแข็งแรงดี ค่ามอดุลัสสูง มีสมบัติทางไฟฟ้าและทนทานต่อดินฟ้าอากาศดี

- เส้นใยแก้วชนิด C-glass (C มาจาก corrosion) เส้นใยแก้วชนิดนี้มีความทนทานต่อการกัดกร่อนจากสารเคมีสูง แต่มีราคาแพงกว่าและความแข็งแรงต่ำกว่า
- เส้นใยแก้วชนิด S-glass (S มาจาก strength) เป็นเส้นใยที่มีค่ามอดุลัสสูงและทนอุณหภูมิใช้งานสูง แต่มีราคาแพง

องค์ประกอบและสมบัติของเส้นใยแก้วแต่ละชนิดแสดงไว้ในตารางที่ 2.5 เส้นใยแก้วแต่ละชนิดจะมีองค์ประกอบของออกไซด์ต่างๆ แตกต่างกันไป เส้นใยแก้วมีโครงสร้างเป็นอสัณฐาน (amorphous) แม้ว่าอาจเกิดเป็นผลึกได้บ้างถ้าให้ความร้อนเส้นใยที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน เส้นใยแก้วผลิตได้จากการหลอมเหลวแก้วในถัง แล้วส่งให้ผ่านรูเล็กๆหลายร้อยช่องตามแรงโน้มถ่วงของโลกทำให้เกิดเป็นเส้นใย จากนั้นเส้นใยจะถูกดึงยืดและพันรอบถังเก็บด้วยความเร็วสูง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใยควบคุมได้จากการปรับความหนืดของแก้วซึ่งขึ้นกับองค์ประกอบและอุณหภูมิขนาดของรูและความเร็วในการม้วนเก็บ ปกติเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใยแก้วชนิด E อยู่ในช่วง 8 -15 μm

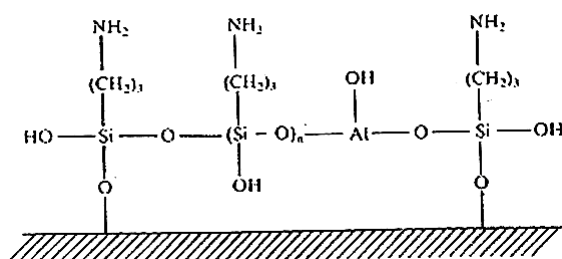
ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบและสมบัติของเส้นใยแก้วแต่ละชนิด (Hull, 1996)

	E-glass	C-glass	S-glass
<i>Composite (%)</i>			
SiO ₂	52.4	64.4	64.4
Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	14.4	4.1	25.0
CaO	17.2	13.4	–
MgO	4.6	3.3	10.3
Na ₂ O + K ₂ O	0.8	9.6	0.3
B ₂ O ₃	10.6	4.7	–
BaO	–	0.9	–
<i>Properties</i>			
ρ (Mg m ⁻³)	2.60	2.49	2.48
K (W m ⁻¹ K ⁻¹)	13	13	13
α (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	4.9	7.2	5.6
σ_* (GPa)	3.45	3.30	4.60
E (GPa)	76.0	69.0	85.5

ปกติความแข็งแรงและมอดูลัสของเส้นใยแก้ว ขึ้นกับโครงสร้างสามมิติของออกไซด์ที่เป็นองค์ประกอบ โครงสร้างพื้นฐานของแก้วเกิดจากพันธะโควาเลนต์ที่แข็งแรงของอะตอมของออกซิเจนกับอะตอมของซิลิกอน โขเดียมไอออนเกิดพันธะไอออนิกกับอะตอมของออกซิเจน โดยไม่มีการเชื่อมขวางโดยตรงกับโครงสร้าง โครงสร้างร่างแหและความแข็งแรงของโครงสร้างจะแตกต่างกันไป เมื่อมีออกไซด์ของโลหะอื่นๆอยู่ในโครงสร้าง ดังนั้นแก้วชนิดต่างๆที่มีองค์ประกอบของออกไซด์ต่างกันเป็นสาเหตุให้แก้วมีสมบัติต่างๆที่แตกต่างกัน เป็นที่สังเกตว่าเส้นใยแก้วมีสมบัติไอโซโทรปี (isotropy) นั่นคือมีสมบัติในทุกทิศทางเหมือนกัน ซึ่งต่างไปจากเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยเคฟลาร์ ตัวอย่างเช่น มอดูลัสของเส้นใยแก้วตามแนวเส้นใยมีค่าเท่ากับมอดูลัสตามขวางเส้นใย ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากโครงสร้างร่างแหสามมิติของโครงสร้างแก้วนั่นเอง

ปัจจัยสำคัญที่สุดที่มีผลต่อการลดลงของความแข็งแรงของเส้นใยแก้ว คือรอยตำหนิหรือช่องว่าง (flaws or voids) ที่เกิดขึ้นเมื่อเส้นใยแก้วถูกขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิต ดังนั้นจึงมีการใช้สารเคมีบางอย่างเคลือบเส้นใยแก้วบางๆ เพื่อป้องกันการถูกเสียดสีเกิดเป็นรอยตำหนิ สารที่ใช้เคลือบเส้นใยคือ “ไซซิง เอเจนต์” (sizing agent) ที่สำคัญได้แก่สารคู่ควบจำพวกไซเลน (silane coupling agent) ซึ่งทำหน้าที่ดังต่อไปนี้

- ป้องกันพื้นผิวของเส้นใยจากการทำลาย เป็นผลให้เกิดรอยตำหนิ
- เชื่อมเส้นใยเข้าด้วยกันเพื่อความสะดวกในกระบวนการผลิต
- หล่อลื่นเส้นใยเพื่อให้สามารถต้านทานต่อการขูดถูเสียดสีในระหว่างกระบวนการผลิต
- ให้สมบัติต่อต้านต่อไฟฟ้าสถิตย์ (antistatic properties)
- เกิดพันธะเคมีเชื่อมระหว่างพื้นผิวของเส้นใยแก้วกับเมทริกซ์ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของการยึดเกาะระหว่างเฟส (interface bond strength) ตัวอย่างกลไกการยึดเกาะของสารคู่ควบจำพวกไซเลนบนพื้นผิวเส้นใยแก้วดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การยึดเกาะของสารคู่ควบจำพวกไซเลนบนพื้นผิวเส้นใยแก้ว (อิทธิพล, 2544)

3. เส้นใยอะรามิด (aramide fibers)

เป็นเส้นใยที่มีความสำคัญมากเนื่องจากมีค่ามอดุลัสที่สูง เส้นใยอะรามิดสังเคราะห์จากพอลิเอไมด์ที่มีโครงสร้างประกอบด้วยวงแหวนอะโรมาติก (aromatic polyamide) จึงเรียกว่า “เส้นใยอะรามิด” มีสมบัติที่ดีเยี่ยมเนื่องจากมีน้ำหนักเบา มีเสถียรภาพต่ออุณหภูมิสูงและมีความเหนียว คำว่า “อะรามิด” (Aramide) นิยามให้แทนเส้นใยพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีโครงสร้างประกอบด้วยวงแหวนอะโรมาติก (aromatic ring) สลับกับหมู่เอไมด์ (หรือเอไมด์) (aromatic amide) ซึ่งเป็นโครงสร้างของเส้นใยเคฟลาร์ (Kevlar™) ผลิตโดยบริษัทดูปองท์ (DuPont) ซึ่งมีชื่อทางเคมีคือพอลิพาราฟีนิลีนเทอแรพทาলামิด (poly para – phenyleneterephthalamide, PPD-T) เตรียมได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น (condensation polymerization) ของมอนอเมอร์สองชนิดคือพาราฟีนิลีนไดเอมีน (para-phenylene diamine) และเทอแรพทาโลคลอไรด์ (terephthaloyl chloride)

2.4 อีพ็อกซีเรซิน (ปรีชา, 2540; อรอุษา, 2537; Saunders, 1988; Potter, 1970)

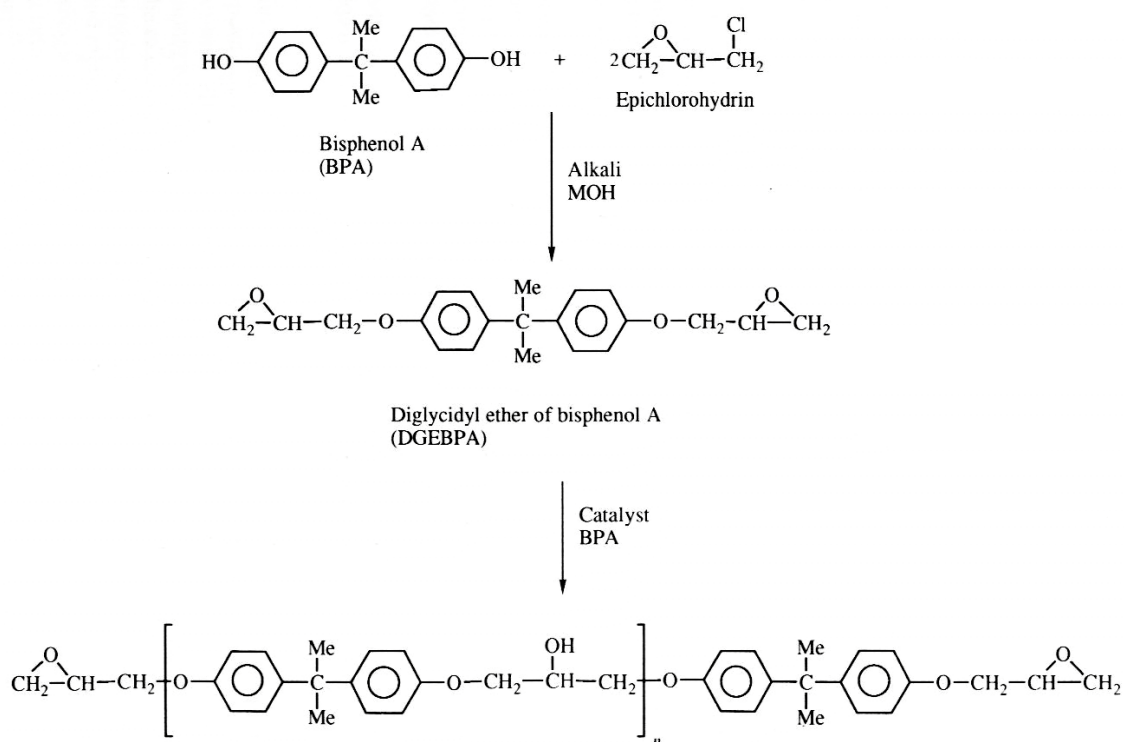
อีพ็อกซีเรซิน (epoxy resins) คือพอลิเมอร์ที่มีวงสามเหลี่ยมที่ประกอบด้วยคาร์บอนสองอะตอมและออกซิเจนหนึ่งอะตอมติดที่ปลายสายหมู่อีพ็อกซี (epoxy group) นี้ เป็นตำแหน่งที่ไวต่อปฏิกิริยาการเชื่อมขวาง อีพ็อกซีมีสมบัติหลากหลายในช่วงกว้างขึ้นอยู่กับโครงสร้างของโมเลกุล อีพ็อกซีมีการยึดเกาะกับเส้นใยต่างๆ ได้ดี เช่น เส้นใยแก้ว เส้นใยอะรามิด เส้นใยคาร์บอน เป็นต้น อีพ็อกซีมีการหดตัวต่ำเมื่อเทียบกับเทอร์โมเซตชนิดอื่นๆ เช่น พอลิเอสเตออร์ชนิดไม่อิ่มตัวและไวนิลเอสเตออร์ นอกจากนี้ยังมีความแข็งแรงสูง ทนทานต่อสารเคมี มีเสถียรภาพรูปร่างสูง ง่ายต่อการขึ้นรูป ถึงแม้ว่าต้นทุนการผลิตอีพ็อกซีคอมโพสิตจะสูงกว่าพอลิเอสเตออร์ชนิดไม่อิ่มตัวและไวนิลเอสเตออร์ และการใช้งานที่อุณหภูมิสูงไม่ดีเท่าพอลิเอไมด์ (polyamide) แต่สมบัติโดยรวมของอีพ็อกซีดีเยี่ยม

2.4.1 การพัฒนา

ผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์ของอีพ็อกซีพัฒนาโดยสองบริษัท ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกันคือ Ciba AG (ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ จดลิขสิทธิ์ในปี ค.ศ. 1943) และบริษัท Devoc and Reynolds Co. (สหรัฐอเมริกา จดลิขสิทธิ์ในปี ค.ศ. 1950) ถึงแม้พอลิเมอร์นี้จะมีราคาค่อนข้างแพง แต่ก็ใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม เช่น สารเคลือบผิว องค์ประกอบอิเล็กทรอนิกส์ (electronic components) และกาว เป็นต้น

2.4.2 การเตรียมอีพ็อกซีเรซินจาก บิสฟีนอล เอ (bisphenol A) และอีพิกลอโรไฮดริน (epichlorhydrin)

อีพ็อกซีเรซินมีหมู่อีพอกไซด์เป็นหมู่ที่อยู่ปลายโซ่ จำนวนหน่วยที่ซ้ำๆกันมีค่าเท่ากับ n โดยค่า n จะมากขึ้นเพียงใดขึ้นกับอัตราส่วน โมล/โมลของสารตั้งต้น อีพ็อกซีที่ได้จะมีค่า n ต่ำ (น้ำหนักโมเลกุลต่ำ) ถ้า โมล/โมลของ อีพิกลอโรไฮดริน:บิสฟีนอล เอ มีค่าสูง และจะมีค่า n สูงสุดเมื่อ โมล/โมลของสารตั้งต้นทั้งสองเป็น 1:1 สำหรับกลไกการเตรียมอีพ็อกซีเรซินจากบิสฟีนอล เอ และอีพิกลอโรไฮดริน สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 2.3 สถานะของอีพ็อกซีขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยถ้ามีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยต่ำ อีพ็อกซีจะมีสถานะเป็นของเหลวหนืด แต่ถ้ามีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยสูงจะเป็นของแข็งเปราะ มีจุดหลอมเหลวสูง



รูปที่ 2.3 กลไกการสังเคราะห์อีพ็อกซีจากบิสฟีนอล เอ และอีพิคลอโรไฮดริน (Ellis, 1993)

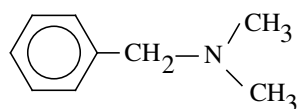
การนำอีพ็อกซีเรซินที่ได้ไปทำให้เกิดการเชื่อมขวางพันธะ ทำได้โดยใช้สารหลายประเภท เช่น พอลิเอมีน พอลิเอไมด์ พอลิซัลไฟด์ ยูเรีย-ฟอร์มาลดีไฮด์ ฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์ กรดหรือกรดแอนไฮไดรด์

2.4.3 สารเชื่อมขวางของอีพ็อกซีเรซิน

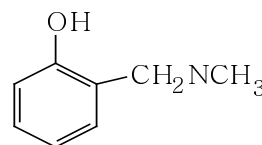
สารเชื่อมขวางของอีพ็อกซีโดยทั่วไปจะแบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือกลุ่มเอมีน (amine) กลุ่มกรดลิวอิส (Lewis acid) และกลุ่มกรดแอนไฮไดรด์ (acid anhydride) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. สารเชื่อมขวางกลุ่มเอมีน

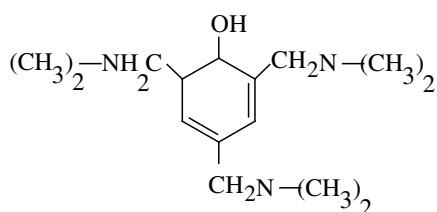
1.1 เอมีนตติยภูมิ (tertiary amine) โดยทั่วไปจะเหมาะสำหรับงานยึดเกาะและงานเคลือบ ตัวอย่างของสารเชื่อมขวางกลุ่มนี้ เช่น เบนซิลไดเมทิลเอมีน (benzyl dimethylamine, BDMA) ไดเมทิลอะมิโนเมทิลฟีนอล (dimethylaminomethyl phenol, DMP-10) 2, 4, 6 ไตรไดเมทิลอะมิโนเมทิลฟีนอล (2, 4, 6-tridimethylaminomethyl phenol, DMP-30) ไตรเอทานอลเอมีน (triethanol amine) และบิวทิลอิมิดาโซน (N-n-butylimidazone) สูตรโครงสร้างทางเคมีได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.4



BDMA

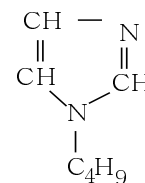


DMP-10



DMP-30

$\text{N}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH})$
Triethanolamine



N-n Butylimidazone

รูปที่ 2.4 สารเชื่อมขวางกลุ่มเอมีนตติยภูมิ (Saunders, 1988)

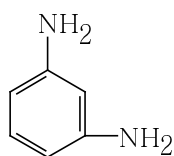
1.2 พอลิฟังก์ชันนอลเอมีน (polyfunctional amine) สารเชื่อมขวางกลุ่มนี้เป็นทั้งอะลิฟาติกเอมีนและอะโรมาติกเอมีน โดยมีไฮโดรเจนที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาอย่างน้อย 3 อะตอม ซึ่งจะอยู่ในรูปของเอมีนปฐมภูมิ (primary amine) และ/หรือเอมีนทุติยภูมิ (secondary amine) โดยทั่วไปอะลิฟาติกเอมีนจะเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางได้เร็ว และเกิดได้ที่อุณหภูมิห้อง ในขณะที่อะโรมาติกเอมีนมีความว่องไวค่อนข้างต่ำ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ทนอุณหภูมิได้สูง พอลิฟังก์ชันนอลเอมีนนิยมนำมาใช้ในการทำกาว ผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยการหล่อแบบ และแผ่นลามิเนต ตัวอย่างของสารเชื่อมขวางประเภทนี้ได้แก่ ไดเอทิลีนไตรเอมีน (diethylene triamine, DTA) ไตรเอทิลีนเตตระเอมีน (triethylenetetramine, TETA) ฟีนิลีนไดเอมีน (phenylene diamine, MPD) และไดอะมิโนไดฟีนิลมีเทน (diaminodiphenyl methane, DDM) สูตรโครงสร้างทางเคมีได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.5



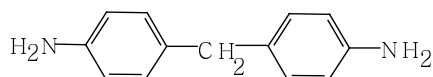
DTA



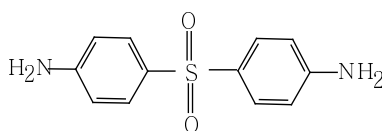
TETA



MPD



DDM



DDS

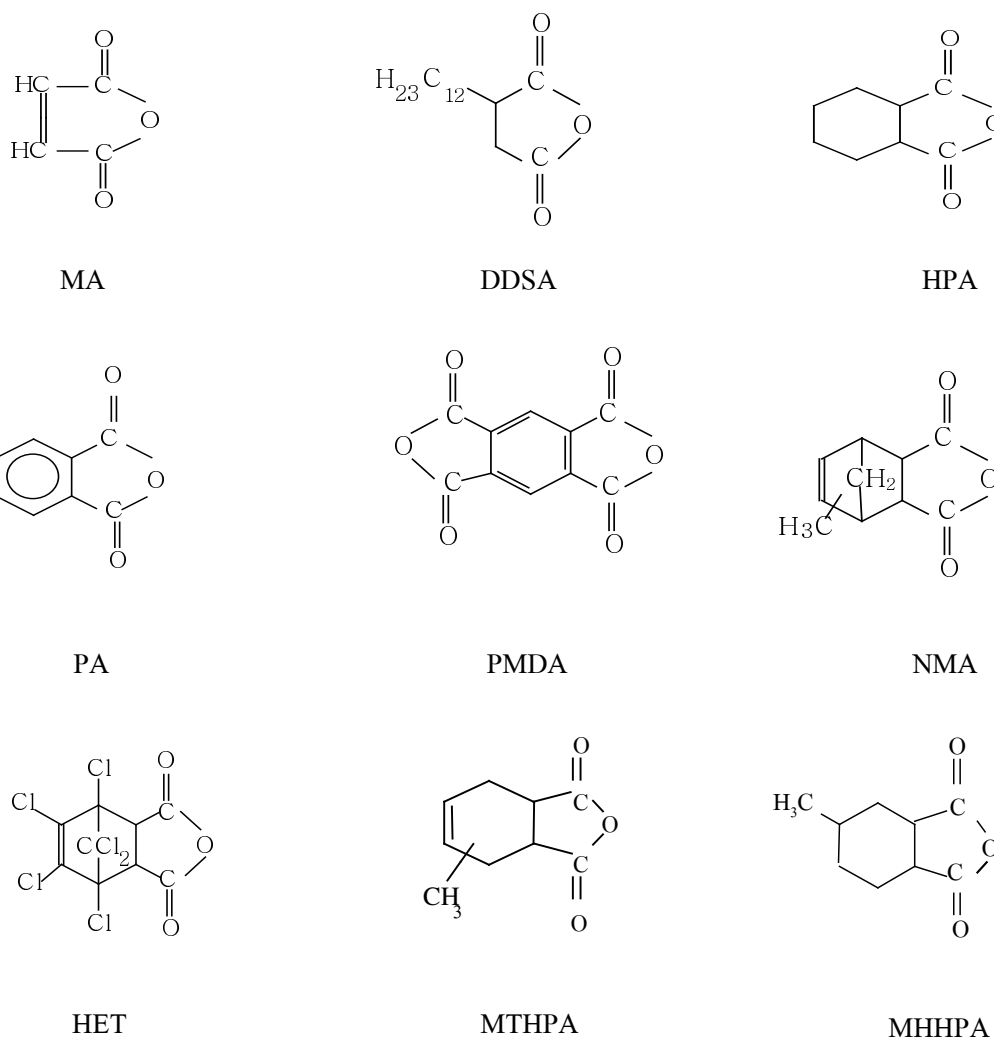
รูปที่ 2.5 สารเชื่อมขวางกลุ่มพอลิฟังก์ชันนอลเอมีน (Saunders, 1988)

2. สารเชื่อมขวางกลุ่มกรดลิวอิส (Lewis acid)

กรดลิวอิสที่ใช้เป็นสารเชื่อมขวาง เช่น โบรอนไตรฟลูออไรด์โมโนเอทิลีนเอมีน (boron trifluoride monoethyleneamine, BF_3MEA) เป็นสารเชิงซ้อนที่เสถียรที่อุณหภูมิห้อง และไม่ทำปฏิกิริยากับสารอื่น เป็นสารเชื่อมขวางที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ทำแผ่นลามิเนตมากกว่างานหล่อ

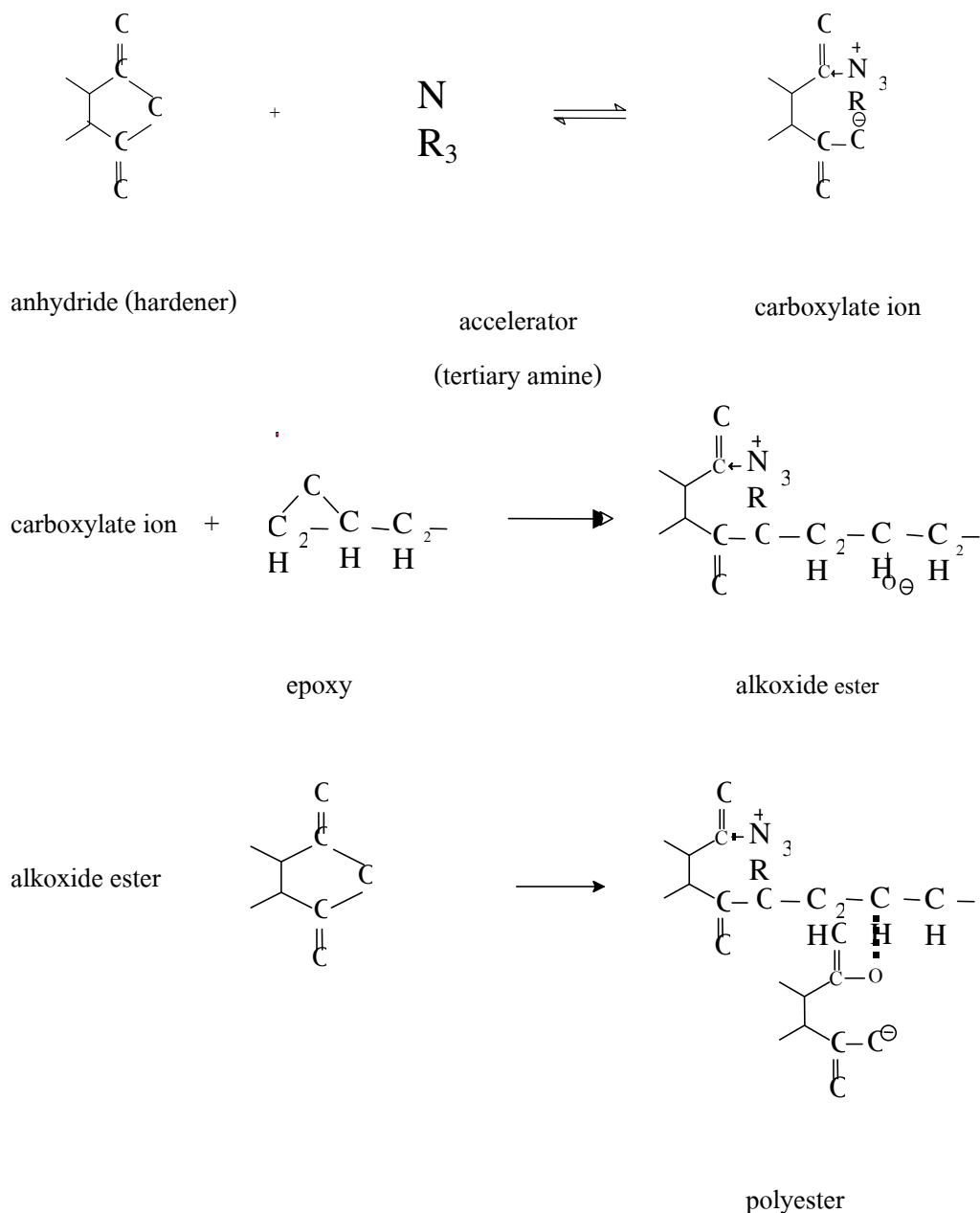
3. สารเชื่อมขวางกลุ่มกรดแอนไฮไดรด์ (acid anhydride)

กรดแอนไฮไดรด์ที่นิยมนำมาใช้เป็นสารเชื่อมขวางของอีพ็อกซีเรซิน อาจอยู่ในรูปโมโนแอนไฮไดรด์ (monoanhydride) หรือไดแอนไฮไดรด์ (dianhydride) ตัวอย่างของแอนไฮไดรด์ที่ใช้กัน เช่น มาลิกแอนไฮไดรด์ (maleic anhydride, MA) โดเดคซิลซัคซินิกแอนไฮไดรด์ (dodecylsuccinic anhydride, DDSA) เฮกซะไฮโดรฟาทาลิกแอนไฮไดรด์ (hexahydrophthalic anhydride, HPA) ฟาทาลิกแอนไฮไดรด์ (phthalic anhydride, PA) ไพโรเมลลิติกไดแอนไฮไดรด์ (pyromellitic dianhydride, PMDA) นาดีคเมทิลแอนไฮไดรด์ (nadicmethyl anhydride, NMA) คลอเรนดิกแอนไฮไดรด์ (chlorendic anhydride, HET) เมทิลเตตระไฮโดรฟาทาลิกแอนไฮไดรด์ (methyltetra hydrophthalic anhydride, MTHPA) และเมทิลเฮกซะไฮโดรฟาทาลิกแอนไฮไดรด์ (methylhexa hydrophthalic anhydride, MHHPA) สูตรโครงสร้างทางเคมีได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.6

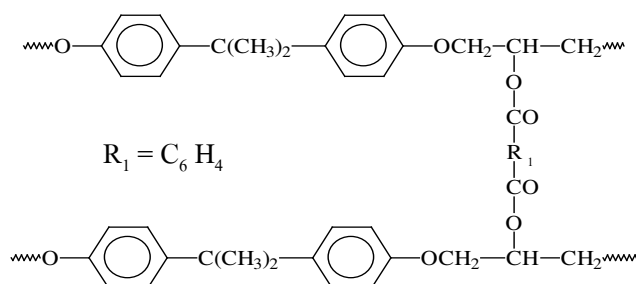


รูปที่ 2.6 สารเชื่อมขวางกลุ่มกรดแอนไฮไดรด์ (Saunders, 1988)

ปฏิกิริยาระหว่างอีพ็อกซีและแอนไฮไดรด์จะเกิดค่อนข้างช้า และเกิดที่อุณหภูมิสูง เช่นระบบ DGEBA/MTHPA ปฏิกิริยาจะเกิดที่อุณหภูมิประมาณ 300°C ซึ่งอาจจะทำให้อีพ็อกซีเกิดการเสื่อมสภาพ (degradation) ได้ง่าย แต่ถ้ามีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเอมีนตติยมุมิ (tertiary amine) เช่น BDMA พบว่าเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 75°C (Galy and Pascault, 1986; Montserrat *et al.*, 1995) เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำหน้าที่เปิดวงแหวนของแอนไฮไดรด์ เกิดเป็นคาร์บอกซีเลท อิออน (carboxylate ion) แล้วทำปฏิกิริยาต่อกับอีพ็อกซี เกิดเป็นอัลค็อกไซด์เอสเทอร์ (alkoxide ester) และทำปฏิกิริยาต่อกับแอนไฮไดรด์ เกิดเป็นพันธะพอลิเอสเทอร์ (polyester linkage) ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นต่อไปเรื่อยๆ ซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.7 เกิดเป็นโครงสร้างร่างแห (network) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 (Potter, 1970)



รูปที่ 2.7 กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอีพ็อกซีและแอนไฮไดรด์ (Potter, 1970)



รูปที่ 2.8 สูตรโครงสร้างของอีพ็อกซีที่ใช้สารเชื่อมขวางประเภทแอนไฮไดรด์ (Potter, 1970)

เมื่อเปรียบเทียบสารเชื่อมขวางประเภทแอนไฮไดรด์กับพอลิฟังก์ชันนอลเอมีน พบว่าแอนไฮไดรด์มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาช้า ดังนั้นเมื่อนำมาเป็นสารเชื่อมขวางของอีพ็อกซีเรซิน จะเกิดความร้อนเนื่องจากการทำปฏิกิริยาต่ำ การใช้แอนไฮไดรด์เป็นสารเชื่อมขวางทำให้อีพ็อกซีเสถียรต่อความร้อน มีความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูงและทนต่อสารเคมี (ยกเว้นสารอัลคาไลด์ซึ่งจะไปไฮโดรไลซ์หมู่อิเทอร์) ทาลิกแอนไฮไดรด์ (PA) เป็นสารเชื่อมขวางที่มีราคาถูกที่สุดแต่มีข้อเสีย คือผสมกับเรซินได้ยาก ดังนั้นจึงต้องใช้ความร้อนประมาณ 120°C ในการผสม ซึ่งอาจจะทำให้อายุของส่วนผสม (pot life) สั้นหรือถูกจำกัด

แอนไฮไดรด์ที่เป็นของเหลวเช่น ไดดีซีนิลซัคซีนิกแอนไฮไดรด์ (DDSA) และนาดิเมทิลแอนไฮไดรด์ (NMA) หรือแอนไฮไดรด์ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำจะผสมกับอีพ็อกซีได้ง่าย ในกรณีที่ใช้นาไดอิกแอนไฮไดรด์ (MA) เป็นสารเชื่อมขวางเพียงอย่างเดียว ผลิตรักษะที่ได้จะมีความเปราะ จึงมักผสมกับแอนไฮไดรด์ชนิดอื่นๆ ส่วนไดดีซีนิลซัคซีนิกแอนไฮไดรด์จะทำให้ผลิตรักษะที่ได้มีความยืดหยุ่น ในขณะที่คลอเรนดิคแอนไฮไดรด์ (HET) จะทำให้ผลิตรักษะที่ได้มีค่าทนต่อการตีไฟ (frame resistance) ได้ดี และไพโรเมลลิติกไดแอนไฮไดรด์ (PMDA) ซึ่งมีหมูฟังก์ชันมาก ทำให้ความหนาแน่นของการเชื่อมขวาง (crosslink density) สูง ผลิตรักษะที่มีอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (heat distortion temperature) สูงขึ้น

ส่วนผสมของอีพ็อกซีและแอนไฮไดรด์มีความหนืดต่ำ และสามารถเก็บไว้ได้นาน มีสารระเหยในระหว่างการอบตัว ทำให้มีการหดตัวและอัตราการคายความร้อนต่ำ ข้อจำกัดของการใช้แอนไฮไดรด์คือต้องใช้เวลานานและอุณหภูมิในการอบสูงถึงแม้ว่าจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบ

การอบีพ็อกซีและแอนไฮไดรด์ในระบบที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราเร็วในการเกิดพันธะเอสเทอร์ (ester link) และพันธะอีเทอร์ (ether link) ใกล้เคียงกัน ในระบบที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นด่าง ส่วนใหญ่จะเกิดการเชื่อมขวางด้วยพันธะเอสเทอร์ ส่วนในระบบที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นกรด ส่วนใหญ่จะเกิดการเชื่อมขวางด้วยพันธะอีเทอร์ แต่ในกรณีระบบที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา จะมีกรดอิสระ (free acid) อยู่เล็กน้อยทำหน้าที่เป็นตัวช่วยให้เกิดการเชื่อมขวางเกิดเป็นพันธะอีเทอร์ ทำให้สายโซ่มีความยืดหยุ่น ทำให้อุณหภูมิ T_g ที่ต่ำกว่าระบบที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (Montserrat *et al.*, 1995)

2.4.4 สมบัติของอีพ็อกซีที่มีการเชื่อมขวางโมเลกุล

อีพ็อกซีเรซินมีหมู่ที่แสดงสมบัติเฉพาะ (characteristic group) ขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงยากต่อการสังเคราะห์เพื่อให้ได้สมบัติตามที่ต้องการ แต่อีพ็อกซีมีสารเชื่อมขวาง (curing agent) หลายชนิดให้เลือกใช้ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติตามต้องการ นอกจากนี้ยังพบว่า เวลา อุณหภูมิ และสารเติมแต่ง (filler) จะมีผลต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ด้วย ในการทำปฏิกิริยาของอีพ็อกซีจะเกี่ยวข้องกับ การจัดเรียงตัวของโมเลกุล (molecular orientation) ซึ่งในกรณีที่ไม่มีสารระเหยออกจากระบบ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะไม่มีปัญหาเรื่องการหดตัวหรือมีการหดตัวน้อย โครงสร้างหลัก (main skeleton) ของอีพ็อกซีจะเสถียรต่อความร้อนได้ดี แต่การเสถียรทางความร้อนจะขึ้นอยู่กับ การเชื่อมขวางด้วย ดังนั้นระบบที่มีการเชื่อมขวางด้วยแอนไฮไดรด์จะเสถียรต่อความร้อนประมาณ $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ในขณะที่ระบบที่มีการเชื่อมขวางด้วยเอมีนจะเสถียรต่อความร้อนประมาณ $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ อีพ็อกซีเรซินจะมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) และความเป็นขั้วสูง ทำให้เกิดการยึดเกาะที่ดี

อีพ็อกซีที่มีการเชื่อมขวางโมเลกุลจะไม่ละลายในสารละลาย แต่จะบวมในของเหลวที่มีค่าความสามารถในการละลาย (solubility parameter) ใกล้เคียงกัน เช่น สารละลายคลอรีเนเตดไฮโดรคาร์บอน (chlorinated hydrocarbons) หรือแอลกอฮอล์ (alcohol) อีพ็อกซีที่มีการเชื่อมขวางด้วยพันธะอีเทอร์ จะมีความเสถียรต่อสารละลายกรดอินทรีย์ (organic acid) กรดอนินทรีย์ (inorganic acid) และสารอัลคาไลซ์ (alkalis) ในขณะที่อีพ็อกซีที่มีการเชื่อมขวางด้วยพันธะเอสเทอร์จะไม่เสถียรต่อสารแอลคาไลซ์เข้มข้น (strong alkalis) กรดอินทรีย์และอนินทรีย์ ส่วนอีพ็อกซีที่มีการเชื่อมขวางด้วยพันธะคาร์บอน-ไนโตรเจน (C-N) ซึ่งเกิดจากการใช้สารเชื่อมขวางกลุ่มเอมีน จะไม่ทนต่อกรดอนินทรีย์

สมบัติของอีพ็อกซีที่มีการเชื่อมขวางโมเลกุล นอกจากจะขึ้นอยู่กับวิธีการทำให้เกิดปฏิกิริยาและชนิดของสารทำให้แข็งแล้ว ยังขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างปริมาณอีพ็อกซีและสารทำให้แข็งที่ใช้ด้วย ดังนั้นจึงต้องมีการคำนวณอัตราส่วนปริมาณอีพ็อกซีต่อปริมาณสารทำให้แข็ง

(stoichiometric ratio, r หรือ A/E) ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่หมู่ฟังก์ชันของอีพ็อกซีทำปฏิกิริยาพอดีกับหมู่ฟังก์ชันของสารทำให้แข็ง ซึ่งสามารถคำนวณหาอัตราส่วนปริมาณสารทำให้แข็งชนิดแอนไฮไดรด์ที่ใช้ได้ตามสมการที่ 2.1

$$\text{ปริมาณแอนไฮไดรด์ที่ใช้ (g)} = \frac{(E) \times (AE) \times (r)}{WPE} \quad (2.1)$$

เมื่อ	E	=	น้ำหนักของเรซินที่ใช้ (g) (weight of resin)
	AE	=	น้ำหนักโมเลกุลของแอนไฮไดรด์ (anhydride equivalent weight)
	r	=	อัตราส่วนเป็น โมลของอีพ็อกซีต่อแอนไฮไดรด์ (ratio of molar concentration of anhydride to epoxy; A/E)
	WPE	=	น้ำหนักโมเลกุลของอีพ็อกซีเรซินต่อหมู่ฟังก์ชันของอีพ็อกซีเรซิน (weight per epoxide equivalent)

กรณีใช้สารช่วยให้แข็งกลุ่มแอนไฮไดรด์ พบว่าการหาปริมาณที่แน่นอนของแอนไฮไดรด์ต่ออัตราส่วนของอีพ็อกซีไม่สามารถจะอธิบายได้เพียงอย่างเดียว จำเป็นต้องพิจารณาตัวแปรอื่นด้วย เช่น ความเข้มข้นของกลุ่มไฮดรอกซิล ความว่องไวของการเกิดปฏิกิริยาของกลุ่มอีพ็อกซี ความเป็นกรดของกลุ่มคาร์บอกซิลิกและอุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยา

จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าโดยทั่วไปจะใช้แอนไฮไดรด์ประมาณ 80 - 90% โดยน้ำหนักของอีพ็อกซี จะทำให้อีพ็อกซีเรซินที่ได้มีสมบัติที่ดี (Boey and Qiang, 1999)

อีพ็อกซีที่เกิดการเชื่อมขวางพันธะเป็นโครงร่างตาข่ายแล้วจะมีสมบัติแข็ง แต่ยึดหยุ่น สมบัติของอีพ็อกซีขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลด้วย การอธิบายความสัมพันธ์ของสมบัติกับโครงสร้างก่อนข้างยุ่งยากเพราะ โครงสร้างซับซ้อน การใช้แอนไฮไดรด์เป็นตัวเชื่อมขวางจะทำให้ทนความร้อนได้สูงถึง 200 °C สมบัติการเป็นฉนวนไฟฟ้าดีมาก สมบัติด้านเคมีทนกรดทนด่างได้ดีปานกลาง อีพ็อกซีเรซินใช้ทั้งงานหล่อพลาสติก ใช้ผสมกับเส้นใยแก้วก็ได้ทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น ทำโฟมก็ได้ แต่ที่ใช้มากที่สุดคือใช้เป็นกาว ติดวัสดุต่างๆ ได้ดีมาก ใช้ทำวัสดุเคลือบผิว เช่น เคลือบโลหะ เป็นต้น

2.5 ปัจจัยที่พิจารณาในการเลือกวิธีขึ้นรูปคอมโพสิต (อิทธิพล, 2544)

เมทริกซ์และวัสดุเสริมแรงสามารถประกอบกันหรือขึ้นรูป (fabrication) เป็นผลิตภัณฑ์คอมโพสิตรูปร่างต่างๆได้หลากหลายวิธี เช่น การขึ้นรูปคอมโพสิตด้วยเทคนิคการใช้มือ (hand lay up) การสเปรย์ (spray up) การคังรีด (pultrusion) การพันด้วยเส้นใย (filament winding) การฉีดขึ้นรูป (injection molding) การถ่ายเทเรซินขึ้นรูป (resin transfer molding, RTM) การฉีดขึ้นรูปทำปฏิกิริยาเสริมแรง (reinforced reaction injection molding, RRIM) เป็นต้น มีปัจจัยหลายประการที่จะต้องพิจารณาประกอบการเลือกวิธีขึ้นรูปคอมโพสิต ได้แก่

1. รูปร่าง ขนาด และจำนวนผลิตภัณฑ์คอมโพสิตที่จะผลิต
2. เส้นใยเสริมแรง ได้แก่
 - ชนิดและความยาวของเส้นใย เช่น เส้นใยสั้น หรือเส้นใยยาวต่อเนื่อง
 - สมบัติของเส้นใย เช่น ความแข็งแรงของเส้นใย ความทนทานต่อความร้อนและความสามารถในการยึดติดกับเมทริกซ์
3. เมทริกซ์ ได้แก่
 - ชนิดของเมทริกซ์ เช่น เทอร์โมพลาสติกหรือเทอร์โมเซต
 - สมบัติของเมทริกซ์ เช่น ความหนืด ความทนทานต่อความร้อน สมบัติการไหล
4. การเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรง เช่น เรียงตัวตามแนวใดแนวหนึ่ง (unidirectional) เรียงตัวแบบสุ่ม (random) เป็นต้น
5. เครื่องมือเครื่องจักรที่ใช้ในการขึ้นรูป
6. ต้นทุนการผลิต

จากเทคนิคการขึ้นรูปคอมโพสิต แต่ละวิธีจะมีข้อจำกัดของรูปร่างลักษณะของผลิตภัณฑ์คอมโพสิตที่ได้ และมีทิศทาง การเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรงที่เฉพาะทาง อีกทั้งอาจมีข้อจำกัดในเรื่องลักษณะของเมทริกซ์และเส้นใยที่ใช้ผลิต ดังนั้นจำเป็นต้องพิจารณาเทคนิคการขึ้นรูปคอมโพสิตแต่ละวิธี โดยเฉพาะข้อได้เปรียบและข้อจำกัด เพื่อใช้ประกอบการตัดสินใจเลือกเทคนิคการขึ้นรูปคอมโพสิต

2.6 การขึ้นรูปคอมโพสิตด้วยเทคนิคการใช้มือ (อิทธิพล, 2544)

การขึ้นรูปคอมโพสิตแบบใช้มือเป็นวิธีการขึ้นรูปคอมโพสิตที่ง่าย ต้นทุนต่ำและสะดวก ไม่ต้องใช้เครื่องขึ้นรูปราคาแพงๆ เป็นวิธีที่นิยมใช้แพร่หลาย โดยเฉพาะการขึ้นรูปคอมโพ

ลิตจำนวนน้อยชิ้น เช่น ผลิตต้นแบบ (prototypes) หรือผลิตภัณฑ์คอมโพสิตขนาดใหญ่ ข้อดีของการขึ้นรูปคอมโพสิตวิธีนี้คือ

- ไม่ต้องใช้เครื่องมือขึ้นรูปราคาแพง ต้นทุนการผลิตจึงต่ำ
 - สามารถควบคุมการเรียงตัวของเส้นใยได้ง่าย
 - สามารถใช้ผลิต ผลิตภัณฑ์คอมโพสิตที่มีรูปร่างซับซ้อน มีมุมแหลม และมีความหนาของชิ้นงานที่แตกต่างกันได้
 - ง่ายต่อการเพิ่มขึ้นส่วนประกอบ (inserts) ที่เป็นวัสดุชนิดอื่น
 - เป็นเทคนิคที่ยืดหยุ่นสามารถขึ้นรูปคอมโพสิตที่มีรูปร่างและขนาดที่หลากหลาย
- อย่างไรก็ดี เทคนิคการขึ้นรูปคอมโพสิตแบบใช้มือมีข้อจำกัดบางประการ คือ
- เป็นเทคนิคที่ต้องใช้แรงงานสูง
 - คุณภาพของผลิตภัณฑ์คอมโพสิตขึ้นอยู่กับฝีมือและประสบการณ์ของผู้ผลิต
 - ผลิตภัณฑ์คอมโพสิตมีพื้นผิวที่สวยงามด้านเดียว
 - อัตราเร็วการผลิต (production rate) ต่ำ

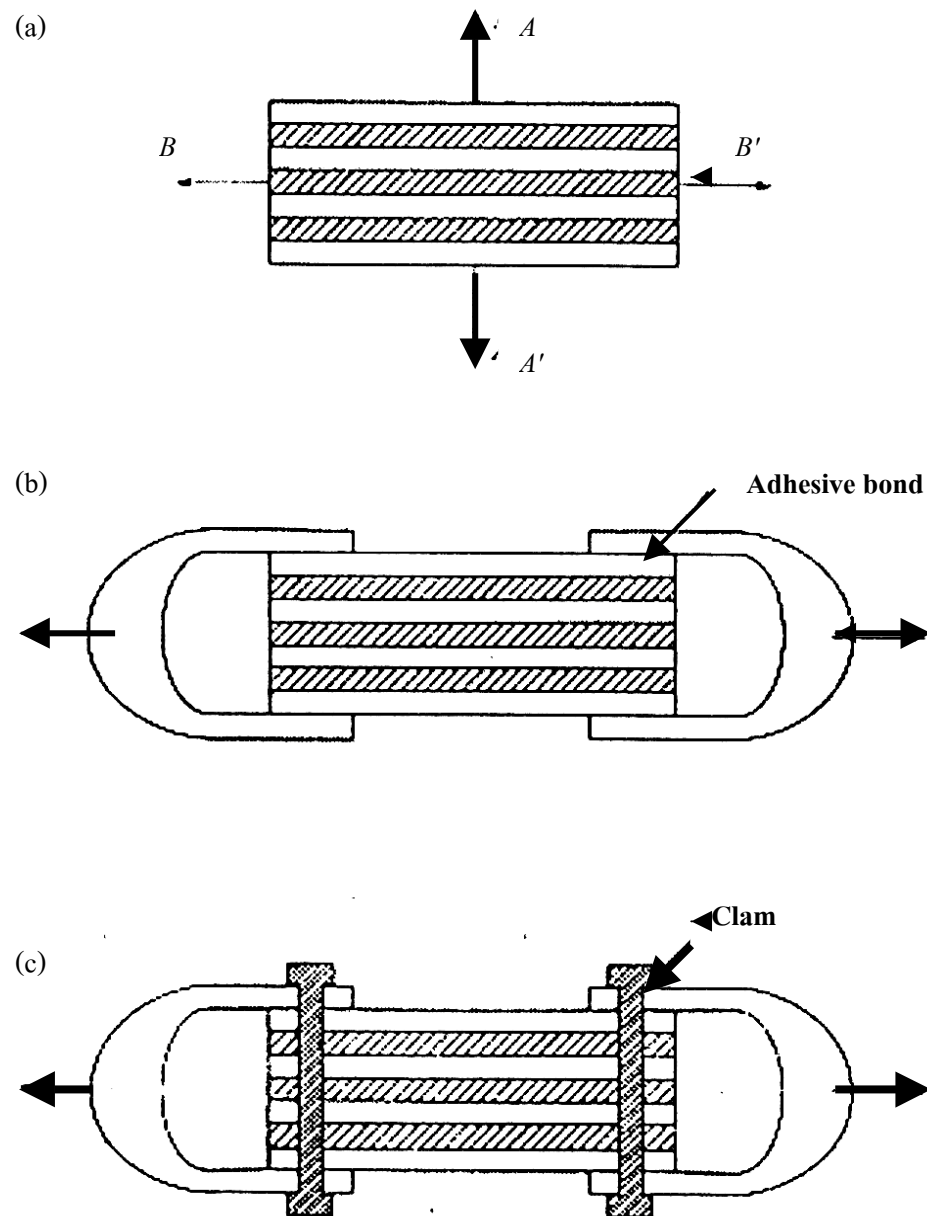
2.7 นิยามอินเตอร์เฟส (อิทธิพล, 2544)

อินเตอร์เฟส (interfaces) คือ เส้นรอยต่อ (boundary) ที่แยกเห็นเด่นชัดระหว่างวัฏภาคหรือเฟส (phase) ที่แตกต่างกัน เช่น เส้นใยกับเมทริกซ์ในคอมโพสิตหรือวัสดุที่มีหลายวัฏภาค จะมีคำสองคำที่เขียนคล้ายกันและใช้สับสนกัน คือคำว่า “Interface” และ “Interphase” Interphase คือพื้นที่ (region) ระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ที่เกิดปฏิกิริยาเคมี และ/หรือการรวมเชิงกล ทำให้บริเวณนี้มีลักษณะที่แตกต่างไปจากเดิม กล่าวคือไม่เหมือนทั้งเส้นใยและเมทริกซ์ Interphase อาจเป็นบริเวณที่เกิดการแพร่ของโมเลกุล (diffusion zone) เกิดปฏิกิริยาเคมี (reaction zone) การเกิดนิวเคลียส (nucleation zone) ของพอลิเมอร์ผลึก การเคลือบผิวเส้นใย (fiber coating layer) หรือเกิดหลายอย่างผสมกัน

2.7.1 ความสำคัญของอินเตอร์เฟส

ลักษณะและสมบัติของอินเตอร์เฟส (interfaces) ระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์มีความสำคัญต่อสมบัติต่างๆของคอมโพสิต โดยเฉพาะสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพ ในการใช้งานเมื่อวัสดุคอมโพสิตได้รับแรงเมทริกซ์จะทำหน้าที่ส่งผ่านแรงที่ได้รับไปยังเส้นใยที่ทำหน้าที่รับแรงข้ามผ่าน “อินเตอร์เฟส” รูปที่ 2.9 แสดงความสำคัญของความแข็งแรงของการยึดเกาะที่อินเตอร์เฟสของวัสดุคอมโพสิตแบบเป็นชั้นหรือลามิเนต

ในรูปที่ 2.9 (a) ไม่มีแรงยึดเกาะใดๆระหว่างชั้นหรือไม่มีความแข็งแรงของอินเตอร์เฟซ ดังนั้นถ้าให้แรงดึงตามระนาบ AA' ตั้งฉากกับแผ่นลามิเนต แต่ละแผ่นก็จะหลุดออกจากกันอย่างง่ายดาย ถ้าให้แรงดึงตามยาวหรือตามระนาบ BB' ความแข็งแรงของวัสดุจะขึ้นกับความแข็งแรงของการยึดเกาะที่อินเตอร์เฟซหรือขึ้นกับวิธีการยึดแผ่นลามิเนตไว้ด้วยกัน รูปที่ 2.9 (b) การใช้กาวทากยึดที่ด้านนอกบริเวณที่จับอย่างเดียวนั้น ความแข็งแรงของวัสดุจะเท่ากับความแข็งแรงของชั้นนอกสุดเท่านั้น แต่ถ้าวัสดุมีความแข็งแรงของการยึดเกาะสูง แสดงได้โดยการยึดแต่ละแผ่นไว้ด้วยกันด้วยแม่แรงหรือคีมจับดังรูปที่ 2.9 (c) วัสดุแต่ละแผ่นสามารถช่วยรับแรงเป็นผลให้วัสดุมีความแข็งแรงสูงสุด



รูปที่ 2.9 แบบจำลองวัสดุคอมโพสิตแบบเป็นชั้นหรือลามิเนต แสดงความสำคัญของความแข็งแรง
การยึดเกาะที่อินเตอร์เฟซ (อิทธิพล, 2544)
2.8 กลไกการยึดเกาะ (Hull, 1996; อิทธิพล, 2544)

ในวัสดุคอมโพสิต เมทริกซ์สามารถยึดเกาะกับเส้นใยที่อินเทอร์เฟซได้หลายวิธีกลไกการยึดเกาะหลักๆ ที่อินเทอร์เฟซของวัสดุคอมโพสิตมี 5 กลไก ซึ่งอาจเกิดอย่างใดอย่างหนึ่งหรือเกิดร่วมกัน กลไกการยึดเกาะหลักๆ มีรายละเอียดดังนี้

1. การดูดซับและการเปียก (adsorption and wetting)

เมื่อพื้นผิวสองพื้นผิวที่ไม่มีประจุไฟฟ้าอยู่ใกล้กันมากพอ จะเกิด “แรงดึงดูดทางกายภาพ” (physical attraction) เช่น การเปียก (wetting) ของของเหลวบนพื้นผิวของแข็ง ในกรณีของของแข็ง 2 ชนิดอยู่ใกล้กันมากถึงระดับจุลภาค (ไมครอน) หรือระดับอะตอม ความขรุขระ (roughness) ของพื้นผิวจะเป็นสิ่งขัดขวางไม่ให้เกิดการยึดเกาะหรือสัมผัส จะมีเพียงบางตำแหน่งเท่านั้นที่สามารถสัมผัสกันได้ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (a) ในกรณีของเหลวบนผิวของแข็งสามารถเกิดการเปียกได้ง่าย การเปียกจะเกิดมากหรือน้อยแสดงได้โดยใช้ “มุมสัมผัส” (contact angle, θ) แสดงดังรูปที่ 2.10 (b) ถ้าของเหลวมีความสามารถในการเปียกบนพื้นผิวของแข็งดี ของเหลวที่ชอบสัมผัสกับพื้นผิวของแข็งจะเกิดการแผ่กระจายบนผิวของแข็ง ทำให้มีค่ามุมสัมผัส θ น้อย ในทางตรงข้ามถ้าวัสดุมีความสามารถในการเปียกต่ำ ของเหลวไม่ชอบสัมผัสกับของแข็ง เป็นผลให้มีค่ามุมสัมผัส θ มาก สมบัติการเปียกของของเหลวบนพื้นผิวของแข็ง สามารถแสดงในรูปสมการง่ายๆ ของดูปรี (Dupre equation) สมการที่ 2.2 แสดงงานของการยึดเกาะ (work of adhesion, W_a) ของของเหลวบนของแข็งดังนี้

$$W_a = \gamma_{SV} + \gamma_{LV} - \gamma_{SL} \quad (2.2)$$

เมื่อ γ_{SV} และ γ_{LV} คือค่าพลังงานพื้นผิวอิสระ (surface free energy) ของของแข็งและของเหลวตามลำดับ γ_{SL} คือค่าพลังงานพื้นผิวอิสระของอินเทอร์เฟซระหว่างของเหลวและของแข็ง สมการนี้สามารถโยงให้สัมพันธ์กับกรณีของหยดของเหลวบนผิวของแข็งดังรูปที่ 2.10 (b) โดยใช้สมการของยัง (Young equation) สมการที่ 2.3 ทำให้สมมูลของแรงกระทำที่จุด “A” ตามแนวระนาบ สามารถเขียนสมการในรูป

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos\theta \quad (2.3)$$

เมื่อ γ_{SV} , γ_{SL} และ γ_{LV} คือค่าพลังงานพื้นผิวอิสระหรือแรงตึงผิว (surface tension) ของอินเทอร์เฟซระหว่างของแข็ง – ก๊าซ ของแข็ง – ของเหลว และของเหลว – ก๊าซ ตามลำดับ และ θ คือค่ามุมสัมผัสพื้นผิวของแข็งจะทำการวัดค่าแรงตึงผิวได้ยาก ในขณะที่สามารถทำการทดลอง

วัดค่าแรงตึงผิวของเหลวได้ง่าย การหาค่าแรงตึงผิวของของแข็งสามารถทำได้โดยใช้ของเหลวที่ทราบค่าแรงตึงผิวเทียบกับผิวของแข็ง โดยมีการนิยามค่า “แรงตึงผิววิกฤต” (critical surface tension, γ_c) กล่าวคือของเหลวที่มีค่าแรงตึงผิวน้อยกว่าแรงตึงผิววิกฤตของของแข็ง ($\gamma_{LV} < \gamma_c$) เท่านั้นที่สามารถเกิดการเปียกทันทีทันใด (spontaneous wetting) ทำให้ค่ามุมสัมผัส (θ) เท่ากับ 0° ค่าแรงตึงผิววิกฤตนี้ เป็นค่าที่สำคัญที่สามารถใช้ในการพิจารณาการเปียกของเรซินบนเส้นใยเสริมแรง ตัวอย่างเช่น ค่าแรงตึงผิววิกฤตของเส้นใยแก้วและเส้นใยคาร์บอนเท่ากับ 560 mJ/m^2 และ 70 mJ/m^2 ตามลำดับ สามารถทำการขึ้นรูปเป็นคอมโพสิตได้ง่ายกับเรซินพอลิเอสเตอร์ชนิดไม่อิ่มตัว และอีพ็อกซีซึ่งมีค่าแรงตึงผิวเท่ากับ 35 mJ/m^2 และ 43 mJ/m^2 ตามลำดับ เรซินสามารถเปียกบนพื้นผิวเส้นใยอย่างง่ายดาย อย่างไรก็ตามเรซินทั้งสองไม่สามารถเกาะเปียกบนพื้นผิวเส้นใยพอลิเอทิลีน (polyethylene, PE) ซึ่งมีค่าแรงตึงผิววิกฤต 31 mJ/m^2 เป็นสาเหตุให้เราต้องทำการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยพอลิเอทิลีนเพื่อให้สามารถเปียกและยึดติดกับเรซินทั้งสองได้

สามารถรวมสมการที่ 2.2 และ 2.3 ทำให้ได้สมการที่ 2.4 และ 2.5 ดังนี้

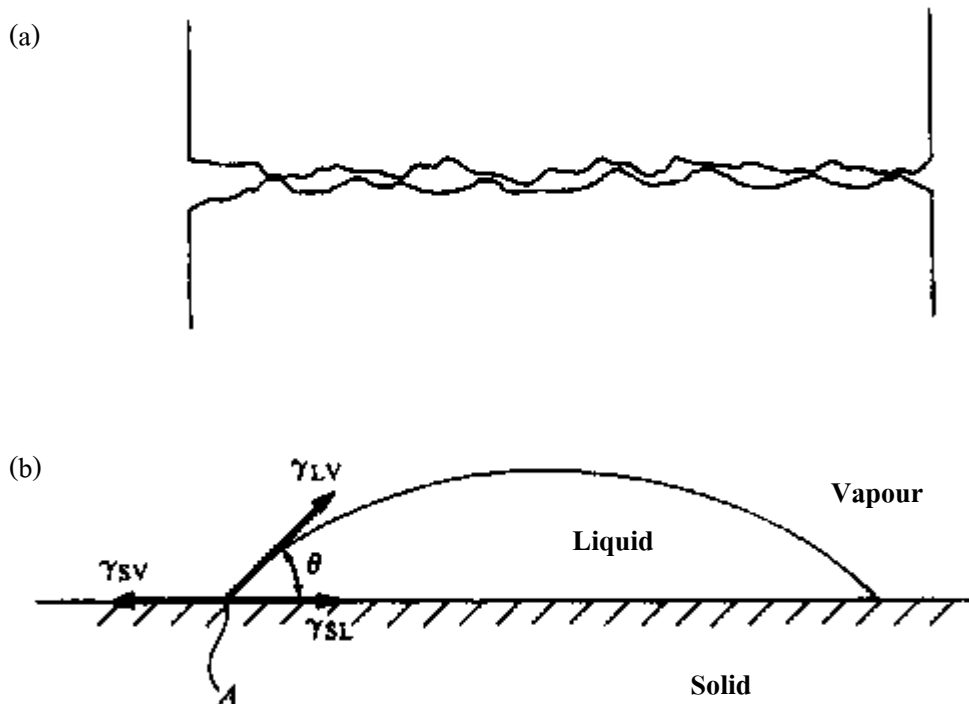
$$W_a = \gamma_{SV} + \gamma_{LV} - \gamma_{SL} \quad (2.4)$$

และ

$$W_a = \gamma_{LV} + \gamma_{LV} \cos\theta \quad (2.5)$$

ค่างานของการยึดเกาะ (W_a) แสดงถึงแรงหรือพันธะทางกายภาพที่เกิดเนื่องจากแรงกระจายตัวระหว่างโมเลกุล (intermolecular dispersion forces) ที่สัมผัสกันและเกิดการเปียกหรือการยึดเกาะกัน ตามทฤษฎีแรงยึดเกาะนี้มีความแข็งแรงสูงแต่ในทางปฏิบัติจะมีแรงทางกายภาพนี้ต่ำเนื่องจาก

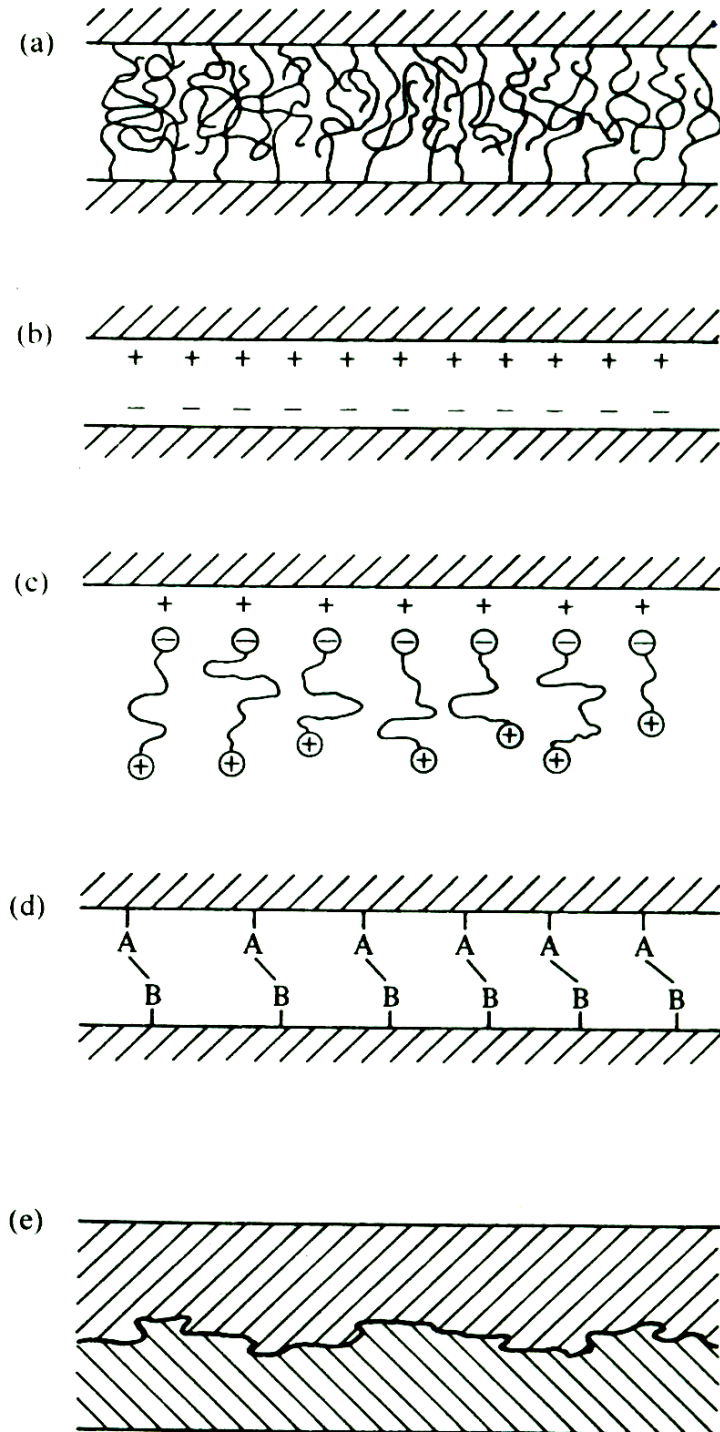
- พื้นผิวเส้นใยมีความสกปรก (contamination) เกิดเป็นชั้นของสิ่งสกปรกที่มีค่าพลังงานพื้นผิวอิสระหรือแรงตึงผิวดำ
- ในขั้นตอนการขึ้นรูปคอมโพสิตเกิดฟองอากาศของฟองก๊าซถูกขังอยู่บนพื้นผิวเส้นใยทำให้พื้นผิวสัมผัสน้อยลง
- เกิดการหดตัวของเรซินเมทริกซ์หลังการเชื่อมขวาง ทำให้เกิดแรงเค้น (stresses) และเกิดช่องว่างระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์



รูปที่ 2.10 (a) การยึดติดระหว่างพื้นผิวขรุขระของของแข็งสองชนิด สังกะยจุดสัมผัสเพียงเล็กน้อย ทำให้เกิดการยึดเกาะที่ไม่แข็งแรง (b) มุมสัมผัส (θ) และแรงตึงผิว (surface tension, γ) ของหยดของเหลวบนพื้นผิวของแข็ง สัญลักษณ์ SV, SL และ LV แทนของแข็ง – ก๊าซ ของแข็ง – ของเหลว และของเหลว – ก๊าซ ตามลำดับ (Hull, 1996)

2. การแพร่เข้าหากันหรืออินเทอร์ดิฟฟิวชัน (interdiffusion)

การยึดเกาะของพื้นผิวพอลิเมอร์สองชนิดสามารถเกิดได้ ถ้าโมเลกุลพอลิเมอร์ที่บริเวณพื้นผิวสัมผัสทั้งสองชนิดมีการแพร่เข้าหาซึ่งกันและกันดังรูปที่ 2.11 (a) ความแข็งแรงของการยึดเกาะชนิดนี้จะขึ้นกับปริมาณการพัวพันกันของสายโซ่โมเลกุลว่ามีมากหรือน้อย อีกทั้งขึ้นอยู่กับชนิดและจำนวนสายโซ่โมเลกุลที่เกิดการพัวพันกัน เนื่องจากความสามารถในการแพร่และการพัวพันกันของสายโซ่ขึ้นอยู่กับความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุล ดังนั้นการยึดเกาะแบบการแพร่เข้าหากันสามารถเพิ่มได้โดยการใช้ตัวทำละลายทาที่พื้นผิว หรือการใช้สารเติมแต่งจำพวกพลาสติกไซเซอร์ (plasticizers) ทำให้สายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์สามารถเคลื่อนที่ได้ง่าย กลไกการยึดเกาะแบบนี้สามารถเกิดกับเส้นใยที่มีการเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์เพื่อปรับปรุงพื้นผิวก่อนการผสมกับเมทริกซ์ แต่ไม่เกิดในคอมโพสิตที่มีพื้นผิวเส้นใยแข็ง ไม่มีการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุล เช่น เส้นใยคาร์บอน และเส้นใยแก้ว เป็นต้น



รูปที่ 2.11 กลไกการยึดเกาะชนิดต่างๆ: (a) อินเทอร์ดิฟฟิชั่น; (b) แรงดึงดูดไฟฟ้าสถิต; (c) แรงดึงดูดระหว่างประจุของโมเลกุลที่มีประจุกับพื้นผิวที่มีประจุบวก; (d) พันธะเคมีเกิดระหว่างหมู่ A บนพื้นผิวหนึ่งกับหมู่ B บนอีกพื้นผิวหนึ่ง; (e) การยึดเกาะเชิงกล (Hull, 1996)

3. แรงดึงดูดประจุหรือไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic attraction)

แรงดึงดูดจะเกิดขึ้นเมื่อพื้นผิวสองชนิดที่มีประจุต่างกันมาอยู่ใกล้กัน นั่นคือถ้าพื้นผิวหนึ่งมีประจุรวมเป็นบวกและอีกพื้นผิวหนึ่งมีประจุรวมเป็นลบตัวอย่างเช่น อันตรกิริยาระหว่างกรด-ด่าง และพันธะไอออนิก แสดงดังรูปที่ 2.11 (b) และ 2.11 (c) ความแข็งแรงของกลไกการยึดเกาะชนิดนี้ขึ้นกับความหนาแน่นของประจุ แรงดึงดูดระหว่างประจุหรือไฟฟ้าสถิตย์ จะไม่ ouse แรงยึดเกาะหลักระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ในคอมโพสิต แต่แรงดึงดูดชนิดนี้มีส่วนร่วมกับการยึดเกาะชนิดอื่น ช่วยให้เกิดการยึดเกาะในคอมโพสิตได้ดีขึ้น เช่นการยึดเกาะของสารคู่ควบประเภทไซเลน (silane coupling agent) ที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นประจุบวก มีการยึดติดที่ดีกับเส้นใยแก้วที่มีประจุลบของหมู่ไฮดรอกซี (-OH) บนพื้นผิว เป็นต้น

4. พันธะเคมี (chemical bonding)

เป็นกลไกการยึดเกาะที่สำคัญที่สุดชนิดหนึ่ง แสดงดังรูปที่ 2.11 (d) เกิดขึ้นเมื่อเส้นใยและเมทริกซ์มีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีเกิดเป็นพันธะเคมี ได้แก่ พันธะโควาเลนต์ระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ ซึ่งเป็นการยึดเกาะที่แข็งแรง ความแข็งแรงของกลไกการยึดเกาะชนิดนี้ขึ้นกับจำนวนและชนิดของพันธะที่เกิดขึ้น การเสียดสภาพของคอมโพสิตที่อินเตอร์เฟสจะเกี่ยวข้องกับ การแตกหักของพันธะเคมีนี้ ตัวอย่างการยึดเกาะด้วยพันธะเคมี ได้แก่ การเกิดพันธะโควาเลนต์ระหว่างสารคู่ควบ (coupling agents) กับหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวเส้นใยและเมทริกซ์ เป็นต้น

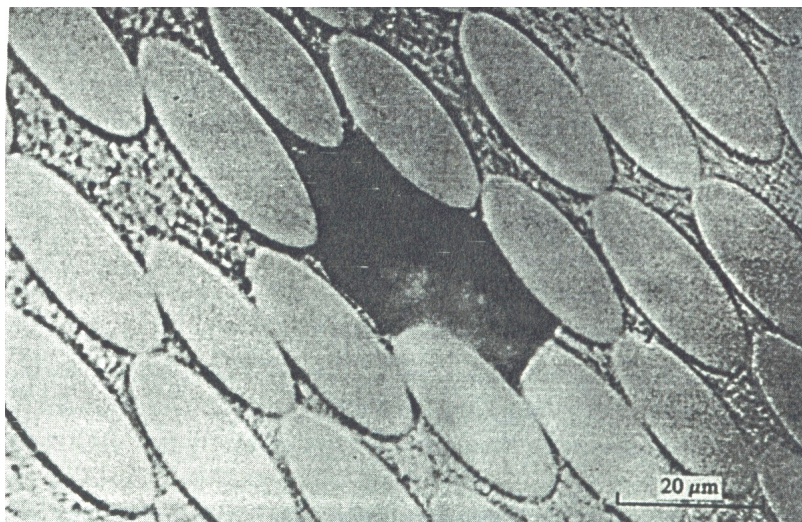
5. การยึดเกาะเชิงกล (mechanical adhesion)

การยึดเกาะเชิงกลเกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูปคอมโพสิต เรซินเมทริกซ์เปียกบนพื้นผิวเส้นใยในขณะที่เป็นของไหลสามารถที่จะแทรกตัวไปตามพื้นผิวที่ขรุขระของเส้นใย รวมทั้งซอกร่องรูและช่องว่างอื่นๆบนพื้นผิว เมื่อทำการเชื่อมโยงทำให้เกิดการแข็งตัวของเมทริกซ์ เป็นเหตุให้เมทริกซ์ถูกล็อกแข็งติดอยู่กับพื้นผิวของเส้นใย ความแข็งแรงของการยึดเกาะชนิดนี้ขึ้นอยู่กับความขรุขระของพื้นผิวเส้นใยที่ทำให้เกิดการแทรกตัวของเรซินในการเปียกและแทรกตัวในพื้นผิวเส้นใย เช่นความหนืดของเรซิน พื้นผิวเส้นใยที่เรียบจะเกิดการยึดเกาะเชิงกลน้อยหรือไม่เกิดเลย

2.9 ช่องว่างในคอมโพสิต (Hull, 1996; อธิพิพล, 2544)

ช่องว่าง (voids) ในวัสดุคอมโพสิตมีความสำคัญมาก เพราะเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้สมบัติเชิงกลโดยเฉพาะความแข็งแรงของคอมโพสิตลดลงอย่างมาก มีช่องว่าง 2 ชนิดที่พบบากในวัสดุคอมโพสิต คือ

1. ช่องว่างเนื่องจากการหายไปของเส้นใยเป็นรูปทรงกลมหรือยี่ดอออกเป็นรูปวงรีดังรูปที่ 2.12 ขนาดของช่องว่างจะสัมพันธ์กับขนาดของเส้นใยในคอมโพสิต มักอยู่ในช่วง 5–20 μm
2. ช่องว่างระหว่างแผ่นลามิनाหรือในบริเวณที่มีเมทริกซ์มาก



รูปที่ 2.12 ช่องว่างเนื่องจากการหายไปของเส้นใยในวัสดุคอมโพสิต (Hull, 1996)

การเกิดช่องว่างในคอมโพสิตมีสาเหตุหลัก 2 ประการคือ

1. เกิดจากการเปียกที่ไม่สมบูรณ์ของเมทริกซ์บนพื้นผิวของเส้นใย เป็นผลให้เกิดการกักของฟองอากาศอยู่ภายในวัสดุคอมโพสิต มักเกิดกับคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยปริมาณมาก เส้นใยมีพลังงานพื้นผิววิกฤตต่ำ และใช้เมทริกซ์ความหนืดสูง
2. เกิดก๊าซหรือสารระเหยจากปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของเมทริกซ์เทอร์โมเซต หรือการหลอมเหลวของเมทริกซ์เทอร์โมพลาสติก สารระเหยอาจเกิดจากตัวทำละลายตกค้าง ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเคมี หรือสารน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

ปริมาณและการกระจายของช่องว่างภายในวัสดุคอมโพสิตขึ้นกับปริมาณเส้นใยในคอมโพสิต การกระจายตัวของเส้นใย สมบัติของเมทริกซ์ สมบัติของเส้นใยและสภาวะการขึ้นรูปคอมโพสิต เช่น อุณหภูมิ ความดัน เวลา เป็นต้น

วิธีการหาปริมาณช่องว่างในคอมโพสิตสามารถคำนวณง่าย ๆ จากการหาความหนาแน่นของอัตราส่วนโดยปริมาตรของช่องว่างในคอมโพสิตตามสมการที่ 2.6 และ 2.7 ดังนี้

$$V_v = 1 - (V_f + V_m) \quad (2.6)$$

หรือ

$$V_v = 1 - (W_f/\rho_f + W_m/\rho_m) \quad (2.7)$$

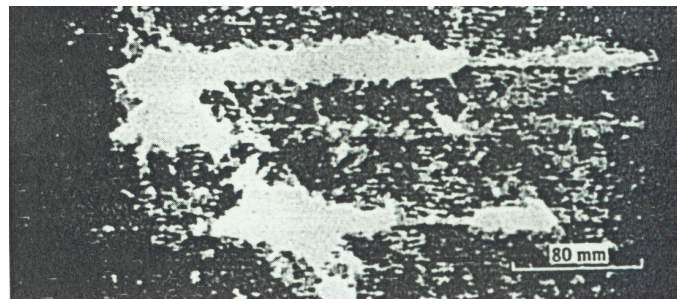
เมื่อ W_p, W_m = น้ำหนักของเส้นใยแก้วและเมทริกซ์ตามลำดับ

V_p, V_m = ปริมาตรเส้นใยและปริมาตรของเมทริกซ์ในคอมโพสิตตามลำดับ

V_v = ปริมาตรของช่องว่างในคอมโพสิต

ρ_p, ρ_m = ความหนาแน่นของเส้นใยแก้วและเมทริกซ์ตามลำดับ

อีกวิธีที่นิยมใช้ในการตรวจสอบหาช่องว่างในคอมโพสิตคือเทคนิคส่องกวาดด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิก (ultrasonic scanning technique) หรือที่รู้จักกันในชื่อ “ซี – สแกน” (C – scan) ซึ่งเป็นการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (non – destructive test) โดยการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงตกกระทบคอมโพสิตที่ต้องการตรวจสอบทำให้ได้ภาพสองมิติแสดงช่องว่างเป็นพื้นที่สีขาว ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ภาพสองมิติแสดงช่องว่างในวัสดุคอมโพสิตจากเครื่อง ซี-สแกน (Hull, 1996)

2.10 ประวัติความเป็นมาของไมโครเวฟ (สุระพล, 2541; ธนากร, 2544)

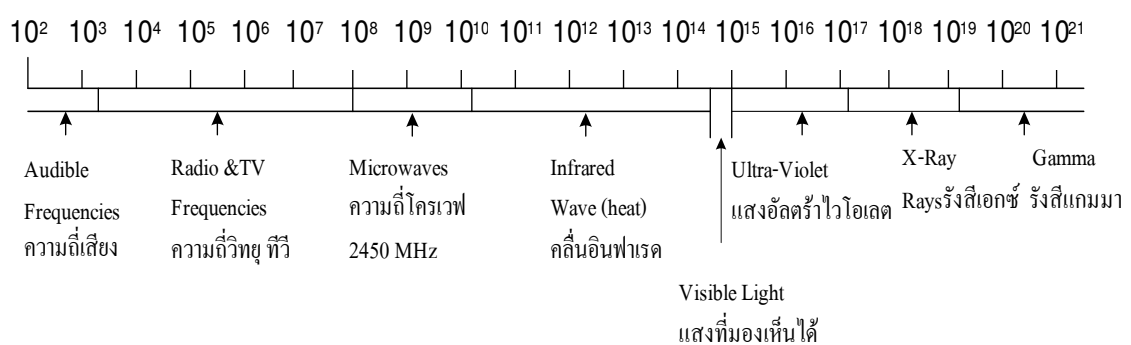
การค้นพบประโยชน์ของไมโครเวฟในการให้ความร้อนถูกค้นพบโดยบังเอิญภายในห้องทดลองของนักฟิสิกส์ชื่อ ดร.เปอร์ซี่ สเปนเซอร์ (Dr.Percy Spencer) ในปี ค.ศ. 1945 (พ.ศ. 2488) โดย ดร.เปอร์ซี่ ได้ผลอวางแซนวิชบนอุปกรณ์ที่ปล่อยคลื่นสั้นออกมา และเมื่อเขาเอาแซนวิช ออกใน 2-3 นาที ต่อมา พบว่าตรงกลางไส้ของขนมปังร้อน ความร้อนที่ได้รับนี้แตกต่างจากการได้รับความร้อนโดยทั่วไป ซึ่งปกติจะส่งความร้อนจากผิวด้านนอกเข้าไปหาด้านใน แต่วิธีที่รับคลื่น

สิ้นหรือไมโครเวฟนี้อาหารจะร้อนจากข้างในสู่ข้างนอก จากความรู้ที่ค้นพบในปี ค.ศ. 1945 ได้พัฒนาความคิดขึ้นมาเรื่อยๆ จนในปี ค.ศ. 1947 (พ.ศ. 2490) เตาไมโครเวฟเครื่องแรกที่ได้ถือกำเนิดขึ้นโดยใช้ในกิจการครัวของโรงพยาบาลและโรงครัวของทหาร ต่อมาได้นำไปใช้ในโรงแรมภัตตาคารต่างๆ ตลอดจนธุรกิจอาหารทั่วไป ไมโครเวฟที่ใช้ภายในบ้านมีการนำออกมาขายในปี ค.ศ. 1969 (พ.ศ. 2512) และ รู้จักแพร่หลายในปีถัดมา

ในปี ค.ศ. 1972 (พ.ศ. 2515) บริษัทมัตซึชิตะเฮาส์ซิงโปรดัก จำกัด (Matsushita Housing Product., LTD) ได้แนะนำหนังสือเกี่ยวกับเทคโนโลยีของไมโครเวฟเป็นครั้งแรก ซึ่งมาถึงทุกวันนี้ หลักการพื้นฐานของการปรุงอาหารด้วยไมโครเวฟยังคงเหมือนเดิม ไม่เปลี่ยนแปลง

ในปี ค.ศ. 1979 (พ.ศ. 2522) บริษัทซัมซุง อิเล็กทรอนิกส์ (Sumsung Electronics) เป็นบริษัทแรกของประเทศเกาหลีที่ผลิตเตาไมโครเวฟออกจำหน่าย ทั้งในประเทศเกาหลีและทั่วโลก

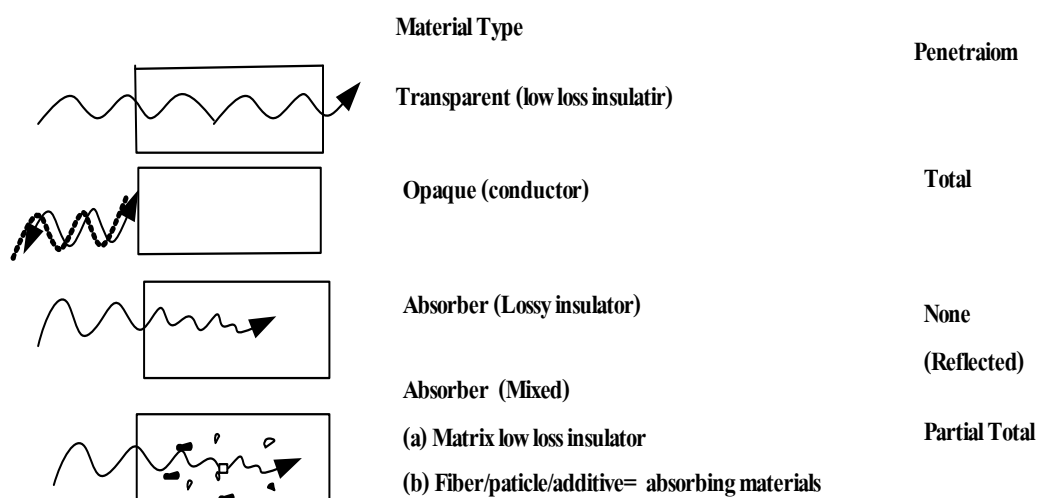
ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การส่งผ่านพลังงานจะใช้หลักการเดียวกับอินฟราเรด แสงที่มองเห็นได้ หรืออัลตราไวโอเลต เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 1 mm - 1 m และอยู่ในช่วงความถี่ 300 MHz - 300 GHz ได้แสดงในรูปที่ 2.14 (Fini and Breccia, 1999) คณะกรรมการกลางกำกับดูแลกิจการสื่อสาร (Federal Communication Commission; FCC) ได้จัดสรรความถี่เพื่อใช้ในทางอุตสาหกรรม ทางวิทยาศาสตร์ และทางการแพทย์ คือความถี่ 915, 2,450 5,800 MHz ส่วนความถี่ที่ใช้มากในเตาอบไมโครเวฟที่ใช้ในครัวเรือนคือความถี่ 2,450 MHz (2.45 GHz)



รูปที่ 2.14 ช่วงความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (สุระพล, 2541)

คลื่นไมโครเวฟ สามารถสะท้อน ทะลุผ่าน ทะลุผ่านบางส่วน หรือถูกดูดซับได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่นำมาใช้ วัสดุที่ใช้ในงานไมโครเวฟจึงสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดคือ

1. วัสดุที่คลื่นไมโครเวฟสะท้อนกลับ (reflection) เช่น พลาสติกโลหะ เมื่อคลื่นไมโครเวฟกระทบกับภาชนะที่เป็นโลหะ หรือมีส่วนผสมของโลหะคลื่นไมโครเวฟไม่สามารถทะลุผ่านภาชนะดังกล่าวได้ อาหารที่อยู่ภายในก็จะไม่สุก
2. วัสดุที่คลื่นไมโครเวฟทะลุผ่าน (transmission) ได้เช่น วัสดุที่ทำมาจากพอลิเอทิลีน (polyethylene) พอลิสไตรีน (polystyrene) เทฟลอน (teflon) และแก้วโบโรซิลิเกต (borosilicate glass) เป็นต้น
3. วัสดุที่คลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านได้เพียงบางส่วนและถูกดูดซับไว้บางส่วน เช่น น้ำ คอนกรีตเหลว และสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย เป็นต้น

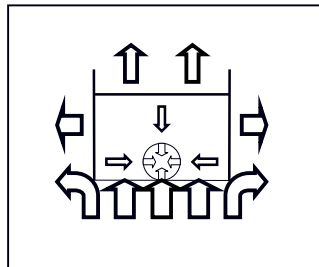


รูปที่ 2.15 การตอบสนองของวัสดุเนื่องจากคลื่นไมโครเวฟ (ชนากร, 2544)

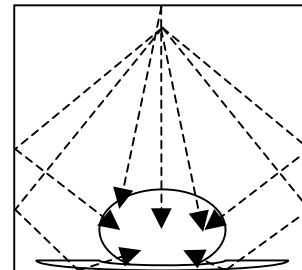
2.10.1 หลักการให้ความร้อน

การอบด้วยความร้อนแบบต่างๆไป วัสดุจะได้รับพลังงานความร้อนจากขดลวดไฟฟ้า โดยการถ่ายเทความร้อน คือการนำ (conduction) การพา (convection) และการแผ่รังสี (radiation) แต่สำหรับการอบด้วยเตาไมโครเวฟ วัสดุจะได้รับพลังงานความร้อนในระดับโมเลกุล

โดยตรง รูปที่ 2.16 แสดงให้ความแตกต่างระหว่างการให้ความร้อนของการอบด้วยเตาอบความร้อนกับการอบด้วยเตาไมโครเวฟ



การให้ความร้อนแบบธรรมดา



การให้ความร้อนด้วยเตาไมโครเวฟ

รูปที่ 2.16 การให้ความร้อนแบบธรรมดาและการให้ความร้อนด้วยเตาไมโครเวฟ

(<http://www.dss.go.th>)

ไมโครเวฟสามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานเพื่อให้ความร้อนแก่วัสดุได้ เมื่อไมโครเวฟทะลุผ่านเข้าไปในวัสดุไดอิเล็กทริก (dielectric material) ความสามารถในการดูดซับพลังงานของวัสดุแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับปัจจัยการสูญเสีย (loss factor) และค่าคงตัวไดอิเล็กทริก (dielectric constant) ของวัสดุนั้นๆ ซึ่งค่านี้เป็นส่วนจินตภาพและส่วนจริงของค่าสภาพยอมเชิงซ้อนสัมพัทธ์ (relative complex permittivity) ตามลำดับ โดยค่านี้จะบ่งบอกคุณลักษณะเฉพาะของวัสดุที่มีต่อสนามแม่เหล็กที่มากกระทำ

ค่าสภาพยอมเชิงซ้อนสัมพัทธ์ของวัสดุ (ϵ_r) ประกอบด้วยค่าส่วนจริง ที่เรียกว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r') และค่าส่วนที่เป็นจินตภาพ ที่เรียกว่าค่าประกอบการสูญเสีย (ϵ_r'') ดังแสดงในสมการที่ 2.8 และ 2.9

$$\epsilon_r = \epsilon_r' + j \epsilon_r'' \quad (2.8)$$

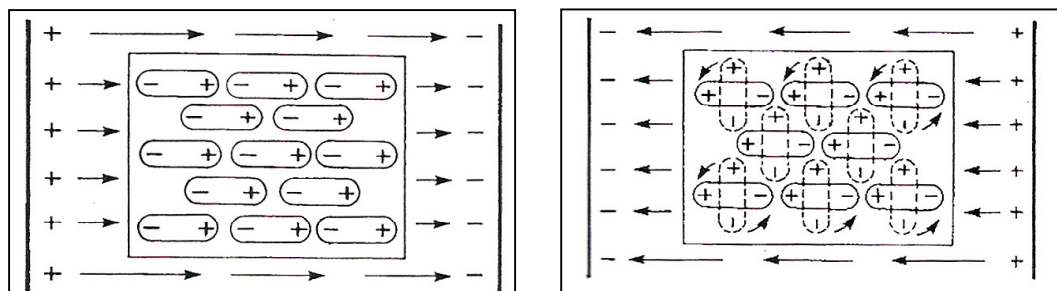
และค่าแทนเจนต์ของการสูญเสียหรือ $\tan \delta$ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\tan \delta = \epsilon_r'' / \epsilon_r' \quad (2.9)$$

โดยทั่วไปวัสดุสามารถดูดซับพลังงานไมโครเวฟ ทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายใน ปริมาตรของวัสดุได้ โดยการนำของไอออน (ionic conduction) และ/หรือการหมุนของสารประกอบ ที่มีสองขั้ว การนำของไอออนเป็นการเคลื่อนที่ในสารละลายเมื่อมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามากระทำ ทำให้มีการต่อต้านการเคลื่อนที่ดังกล่าว อันเนื่องมาจากแรงเสียดทานก่อให้เกิดความร้อนขึ้นภายใน วัสดุ ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการนี้คือ ความสามารถในการเคลื่อนที่ของไอออนและอุณหภูมิของ สารละลายเป็นต้น ส่วนการหมุนของสารประกอบที่มีสองขั้ว เป็นการจัดเรียงตัวของโมเลกุล ใน วัสดุที่มีไดโพลโมเมนต์แบบถาวร (permanent dipole moment) หรือเกิดจากการเหนี่ยวนำเมื่อมี สนามแม่เหล็กมากระทำต่อต้านการจัดเรียงตัวหรือการเคลื่อนที่ของโมเลกุลดังกล่าวก่อให้เกิด ความร้อนขึ้นภายในวัสดุเช่นเดียวกัน

2.10.2 การเปลี่ยนขั้วไฟฟ้าของโมเลกุลในสนามไฟฟ้า

สสารทุกชนิดจะประกอบด้วยอะตอม เมื่ออะตอมมาชิดเกาะกันเป็นกลุ่มเรียกว่า โมเลกุล โมเลกุลของสสารส่วนใหญ่จะไม่เป็นกลางทางไฟฟ้า เมื่อให้สนามไฟฟ้าซึ่งมีทั้งขั้วบวก และลบแก่โมเลกุลของสสาร โมเลกุลจะจัดเรียงโมเลกุลใหม่ตามสนามไฟฟ้า โดยข้างที่มีขั้วบวกจะ หันไปทางขั้วลบของสนามไฟฟ้า ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.17 เมื่อพิจารณาโมเลกุลของสารในการกลับ ตัวไปมาตามความถี่ของคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ เช่น 2.45 GHz พบว่าโมเลกุลจะกลับตัวในช่วงคลื่น ไมโครเวฟช่วงบวกเข้ามา 2,450 ล้านครั้ง/sec และเมื่อช่วงลบไมโครเวฟเข้ามาโมเลกุลจะกลับตัวอีก ครั้งเป็นจำนวน 2,450 ล้านครั้ง/sec รวมกันแล้วโมเลกุลของสสารจะกลับตัวถึง 4,900 ล้านครั้ง/sec ทำให้เกิดการชนกัน เสียดสีกัน ในที่สุดเกิดเป็นความร้อน และเนื่องจากโมเลกุลอยู่ภายในสสาร ดังนั้นจึงเกิดความร้อนจากภายในโมเลกุล แล้วค่อยส่งความร้อนออกมาด้านนอก



รูปที่ 2.17 รูปแสดงโมเลกุลกลับตัวไปมาตามสนามไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว (สุรพล, 2541)

2.11 การตรวจสอบเอกสาร

ในการประยุกต์ใช้เตาอบไมโครเวฟกับสารเคมี ที่เป็นสารละลายจำเป็นต้องใช้ภาชนะที่ทำจากเทฟลอน (Teflon) ซึ่งจะอำนวยความสะดวกในสภาวะการทดลองที่ต้องใช้ความดันสูง บริษัท IMA (Industrial Microwave Applications) ในประเทศออสเตรเลีย ได้ผลิตและจำหน่ายเตาอบไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลองภายใต้ชื่อ “ไมโครแล็บ” โดยมีจุดมุ่งหมายที่จะขยายการใช้ให้มีในทุกห้องปฏิบัติการทั่วโลก หลักการของไมโครแล็บนี้ก็เหมือนกับหลักการของเตาอบไมโครเวฟที่ใช้กันตามบ้านทั่วไป จากการทดลองเตรียม isopropyl acetate วัสดุไม้พบว่า ถ้าใช้เครื่องมือวิทยาศาสตร์ต่างๆ ไปจะใช้เวลาอย่างน้อย 18 h จึงจะให้ผลผลิตซึ่งยังต่ำกว่า 50% (เทียบกับปริมาณวัตถุดิบที่ใช้) แต่ถ้าใช้ “ไมโครแล็บ” จะได้ผลผลิตถึง 98% ด้วยเวลาเพียง 2 min 18 sec (ปราณี, 2532)

กลุ่มที่ 1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอีพ็อกซีคอมโพสิต

Laza และคณะ (1998) ได้ศึกษาผลปริมาณสัดส่วนของเอมีนที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่มีต่อจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาการอบอีพ็อกซีเรซินชนิด DGEBA กับสารทำให้แข็งกลุ่มเอมีน คือ triethylentetramine (TETA) ที่ความเข้มข้นต่างๆ (60-160%) ในระหว่างการอบ โดยใช้เทคนิค thermal scanning rheometer (TSR) และ เครื่องวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์ (dynamic mechanical thermal analyzer, DMTA) ศึกษาโมดูลัส (modulus) และแทนเจนต์ (tan δ) เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ ซึ่งเทคนิคที่ใช้ทดสอบคือ การทดสอบการดัดโค้งแบบการดัดโค้งสามจุด (three point bending) ด้วยเทคนิค dual cantilever ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 30 °C อัตราการให้ความร้อน 2 °C/min ที่ความถี่ต่างๆ คือ 2, 10, 30 Hz เพื่อศึกษาพลังงานกระตุ้น (activation energy, E_a) ตามสมการของอาร์เรเนียส โดยคำนวณค่า E_a จากความชันที่เกิดจากการพล็อตกราฟระหว่างลอการิทึมของความเร็วและส่วนกลับของอุณหภูมิที่ตำแหน่งพิก $\tan \delta$ จากผลของ DMTA พบว่าตัวอย่างที่ผ่านกาบอบซ้ำที่อุณหภูมิสูง (post cure) ความกว้างพิก $\tan \delta$ และพื้นที่ใต้กราฟของพิก $\tan \delta$ จะลดลงเนื่องจากในระหว่างการทำ post cure วัสดุจะมีการดูดซับพลังงานมากขึ้น และ T_g ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ตำแหน่ง $\tan \delta$ มีค่ามากที่สุด (maximum $\tan \delta$) จะเพิ่มขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อความถี่สูงขึ้นความสามารถในการเคลื่อนไหวของโมเลกุล (chain mobility) ก็จะมากขึ้นเมื่อปริมาณของความเข้มข้นของเอมีนเพิ่มขึ้นอุณหภูมิกลาสทรานสิชัน (T_g) ก็จะเพิ่มขึ้น ทำให้สมบัติเชิงกลดี

ขึ้นด้วย และจะมีค่าสูงที่สุดเมื่อความเข้มข้นของเอมีน 120% หลังจากนั้นก็จะลดลงเนื่องจากเอมีนที่เพิ่มขึ้นจะยึดจับกันเองซึ่งทำให้ช่องว่างภายในโมเลกุลเพิ่มขึ้น ทำให้ T_g ลดลง

Ellis และ Sanadi (1997) ทำการศึกษาถึงข้อจำกัดของวัสดุผสมระหว่างไม้ธรรมชาติกับวัสดุพอลิเมอร์โดยใช้เทคนิค DMTA ซึ่งทำการทดลองที่ความถี่ 1 Hz 1% ระยะเวลา (strain) ในช่วง อุณหภูมิ -50 °C ถึง 300 °C โดยโมโนเมอร์ที่เลือกใช้ได้แก่ isobornyl methacrylate (IBMA), glycidyl methacrylate (GMA), hydroxyethyl acrylate (HEA), hexanediol dimethacrylate (HDDMA)

จากการทดลองด้วยเทคนิค DMTA จะทำให้ทราบค่า T_g ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุคอมโพสิต และเข้าใจถึงปฏิกิริยาระหว่างพอลิเมอร์และไม้ สรุปได้คือ

- 1 IBMA polymer มี T_g สูงกว่าเมื่อเทียบกับ HEA polymer
- 2 Hydroxyl groups ของ GMA สามารถทำปฏิกิริยาผ่านทางพันธะไฮโดรเจนกับส่วนประกอบของไม้
- 3 วงแหวน oxirane ของ GMA สามารถเกิดพันธะโควาเลนต์กับไม้ได้
- 4 HEA polymer สามารถเกิดเชื่อมโยงพันธะแบบร่างแหกับ hexanediol dimethacrylate (HDDMA) ได้

Gojny และ Schulte (2004) ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตระหว่าง multi-wall carbon nanotubes (MWCNT) กับ อีพ็อกซีชนิด DEGBA โดยใช้เทคนิค DMTA โดย MWCNT ที่ใช้มีทั้งชนิด non-functionalised MWCNT และ functionalized MWCNT ทำการทดลองโดยตัดชิ้นตัวอย่างยาว 50 mm กว้าง 5 mm หนา 2 mm ทดสอบโดยใช้เทคนิคการดึงที่ความถี่ 10 Hz static strain 0.6% ระยะเวลา และ dynamic strain $\pm 0.1\%$ ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง -120 °C ถึง 150 °C ใช้อัตราการความร้อน 3 °C/min จากการทดสอบด้วย DMTA ทำให้ทราบการเพิ่มขึ้นของค่า T_g และค่าความเสถียรทางความร้อนขึ้นอยู่กับปริมาณของ CNT ที่เติมลงไป เนื่องจากเกิดปฏิกิริยายึดติดของอีพ็อกซีที่ผิวของคาร์บอน ช่วยลดการเคลื่อนไหวของโมเลกุลของอีพ็อกซีทำให้เมื่อปริมาณ CNT เพิ่มขึ้นจะเพิ่มพื้นที่ของการยึดติดของอีพ็อกซีที่ผิวของคาร์บอนเป็นผลทำให้ค่า T_g และค่าความเสถียรทางความร้อนสูงขึ้นด้วย

กลุ่มที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอีพ็อกซีที่อบด้วยไมโครเวฟ

Jow และคณะ (1988) ได้ทำการศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริกของตัวอย่างอีพ็อกซีที่อบในไมโครเวฟและอบด้วยความร้อน โดยใช้สารทำให้แข็งกลุ่มเอมีนได้แก่ ไดอะมิโนไดฟีนิล

(diaminodiphenyl sulfone, DDS) และใช้เทคนิค differential scanning calorimetry (DSC) หาปริมาณปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ไมโครเวฟที่ใช้ในงานวิจัยใช้ความถี่ 2.45 GHz ทดลองที่ระดับกำลังไฟ 5 W เวลาการอบระหว่าง 5-120 min จากการทดลองพบว่า ในขั้นตอนแรกค่าสภาพยอมไฟฟ้า (permittivity) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (dielectric loss factor) ของเรซินจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและปริมาณการเกิดปฏิกิริยาแล้วจะลดลงเมื่อมีปริมาณการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นถึง 40% อธิบายได้ว่าในกระบวนการเกิดปฏิกิริยาจะมีอยู่ 3 ขั้นตอนคือ

ขั้นตอนที่ 1 เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ สารตั้งต้นยังเป็นของเหลว (liquid monomer) โมเลกุลจะมีการหมุนและกลับขั้วมาก ทำให้ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ

ขั้นตอนที่ 2 เมื่ออุณหภูมิสูงถึงระดับหนึ่งจะเริ่มเกิดเป็นเจล (gel)

ขั้นตอนที่ 3 เกิดการเชื่อมโยงกันระหว่างโมเลกุลเป็นโครงสร้างสามมิติ ซึ่งมีปริมาณปฏิกิริยาเกิดขึ้นมาก ความสามารถในการหมุนของโมเลกุลจะลดลง ทำให้ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกมีค่าน้อยลง จากการทดลองดังกล่าวสรุปได้ว่าค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของตัวอย่างที่อบในเตาอบ (อุณหภูมิ 33 °C) และตัวอย่างที่อบในไมโครเวฟจะเป็นฟังก์ชันกับปริมาณการเกิดปฏิกิริยา และค่าที่ได้จากการอบด้วยเตาอบและการอบด้วยไมโครเวฟมีค่าใกล้เคียงกัน

Wei และคณะ (1993) ได้ศึกษาผลของคลื่นไมโครเวฟ ที่มีต่อค่า T_g ของตัวอย่างอีพ็อกซีที่มีเอมีนเป็นสารทำให้แข็ง 2 ชนิด คือ DDS และ *meta*-Phenylene (mPDA) ที่ได้จากการอบด้วยไมโครเวฟ และการอบด้วยเตาอบความร้อน โดยศึกษาปริมาณการเกิดปฏิกิริยา ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) และศึกษาอุณหภูมิ T_g ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) จากผลการทดลอง FT-IR พบว่าอัตราเร็วและปริมาณการปฏิกิริยาของตัวอย่างที่อบด้วยไมโครเวฟสูงกว่าการอบด้วยความร้อน การทดลองแสดงให้เห็นว่า คลื่นไมโครเวฟสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโพลาริเซชันของอีพ็อกซีเรซิน เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิเดียวกันการอบด้วยไมโครเวฟจะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วกว่าการอบด้วยความร้อน เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟจะให้ความร้อนแก่อีพ็อกซีในระดับโมเลกุลโดยตรง ซึ่งสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีผลต่อความเป็นขั้วของโมเลกุลของอีพ็อกซีทำให้เกิดการหมุนและสั่นมากขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น ส่วนผลจากการวิเคราะห์อุณหภูมิ T_g นั้นพบว่าที่ระดับปริมาณการเกิดปฏิกิริยาค่า T_g ที่ได้จากตัวอย่างที่อบในไมโครเวฟจะใกล้เคียงกับการอบด้วยเตาอบ แต่เมื่อระดับปริมาณการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น ค่า T_g ของตัวอย่างที่ได้จากการอบด้วยไมโครเวฟจะสูงกว่าการอบด้วยเตาอบ และนอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับสารทำให้แข็งด้วย

Bai และคณะ (1995) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของอีพ็อกซีที่อบในไมโครเวฟและอบด้วยความร้อน โดยใช้สารทำให้แข็งกลุ่มเอมีนคือ 3-ไดเมทิลไดไซโลเอ็กซิลเมเทน (3-dimethyldicyclohexyl methane, 3DCM) ไมโครเวฟที่ใช้มีความถี่ 2.45 GHz จากการทดลองพบว่าตัวอย่างที่อบในไมโครเวฟจะมีค่าการคงทนต่อแรงดึงและค่ามอดูลัสของยัง สูงกว่าตัวอย่างที่อบในเตาอบความร้อนเล็กน้อย คือประมาณ 3% และ 0.7% ตามลำดับ เนื่องจากการอบในเตาไมโครเวฟจะทำให้ตัวอย่างมีความเป็นเนื้อเดียวกันได้มากกว่า

Catherine, Jordan และ Jean-Pierre (1995) ทำการศึกษการเปรียบเทียบการอบอีพ็อกซีระหว่างการใช้คลื่นไมโครเวฟกับการใช้ทั้งคลื่นไมโครเวฟและความร้อน โดยศึกษาถึงความ เป็นเนื้อเดียวกันของตัวอย่าง และ อัตราการดำเนินไปของปฏิกิริยา เทคนิคที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ DSC และ size exclusion chromatography (SEC) โดยทำการทดลองผสมอีพ็อกซีชนิด DGEBA กับ 3DCM อบโดยใช้คลื่นไมโครเวฟเพียงอย่างเดียวเป็นเวลา 15 min (เป็นเวลาที่ทำให้ค่า T_g ที่ใกล้เคียงกันจากการทดสอบด้วย DSC) สามารถวัดการดำเนินไปของปฏิกิริยาได้ 89% จะให้ค่า มอดูลัสสูงกว่าอีพ็อกซีที่อบโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ 15 min แล้วนำไปอบด้วยความร้อนที่ 190 °C อีก 14 h ซึ่งวัดการดำเนินไปของปฏิกิริยาได้ 100 % แต่ T_g จะต่ำกว่า

Bao และ Martin (2000) ได้ทำการศึกษาการเปรียบเทียบอัตราการเกิดปฏิกิริยาของอีพ็อกซีเรซินที่ขึ้นรูปโดยใช้คลื่นไมโครเวฟใน 2 ระบบคือ ขึ้นรูปโดยปล่อยคลื่นไมโครเวฟอย่างต่อเนื่องตลอดกระบวนการและขึ้นรูปโดยปล่อยคลื่นไมโครเวฟเป็นช่วงๆ โดยผสมอีพ็อกซีชนิด DGEBA กับสารที่ช่วยทำให้เกิดการเชื่อมโยง (curing agents) 3 กลุ่มได้แก่ mPDA, DDS และ diaminodiphenyl methane (DDM) ทำการขึ้นรูปทั้งสองระบบโดยทำการทดลองที่ 3 อุณหภูมิได้แก่ 80 °C, 100 °C และ 120 °C จากผลการทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR ทำให้ทราบว่า การขึ้นรูปแบบใช้คลื่นไมโครเวฟแบบต่อเนื่องให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สูงกว่าแบบปล่อยคลื่นเป็นช่วงๆ อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ไม่ได้กล่าวถึงผลที่เกิดจากความร้อน

Boey และ Yap (1999) ได้ทำการศึกษาอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา (rate enhancement) ของอีพ็อกซีที่มีสารทำให้แข็งกลุ่มเอมีน 3 ชนิด อบด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยสารทำให้แข็งที่ใช้คือ DDS, mPDA และ DDM ศึกษาปริมาณการเกิดปฏิกิริยาและอุณหภูมิ T_g ด้วยเครื่อง DSC โดยเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างที่อบในไมโครเวฟที่มีความถี่ 2.45 GHz ระดับกำลัง 200, 300, 400, 500 และ 600 W จากการทดลองพบว่าชนิดของสารทำให้แข็งมีผลต่อปริมาณการเกิด

ปฏิกิริยา โดยพบว่าปริมาณการเกิดปฏิกิริยาของ DGEBA/DDS จะต่ำเมื่ออบด้วยเตาไมโครเวฟที่ระดับกำลังกำลังวัตต์ต่ำๆ เป็นผลเนื่องมาจาก DDS ไม่ว่องไว (sluggish) ต่อการทำปฏิกิริยา เนื่องจากเกิดการปิดกั้น (entrapment) ของหมู่ฟังก์ชัน ส่วน DDM และ mPDA จะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา ทำให้ใช้เวลาเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ (full curing time) เร็วกว่า DDS

Zhou และคณะ (2003) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของอีพ็อกซีเรซินที่อบในไมโครเวฟและอบในเตาอบ โดยใช้สารทำให้แข็งคือ มาลิกแอนไฮไดรด์ (maleic anhydride) จากการทดลองพบว่าการอบในไมโครเวฟมีข้อได้เปรียบหลายประการเช่น

- การอบในไมโครเวฟจะให้ค่าความแข็งแรงอัด (compressive strength) และความแข็งแรงดัด (bending strength) ของตัวอย่างที่อบในไมโครเวฟสูงกว่าการอบในเตาอบประมาณ 14% และ 38% ตามลำดับ
- การอบในไมโครเวฟสามารถลดอุณหภูมิในการอบเพื่อทำปฏิกิริยาได้ประมาณ 15-20°C
- การอบในไมโครเวฟจะลดเวลาการทำปฏิกิริยาลง 3 เท่าของการอบด้วยความร้อน
- การอบในไมโครเวฟจะลดปริมาณสารทำให้แข็งลงได้ประมาณ 5 %

เนื่องจากการอบด้วยไมโครเวฟจะทำให้เกิดการโพลาริเซชันของอะตอม ซึ่งทำให้เกิดการกระจายพลังงานและทำให้เกิดความร้อนภายในโมเลกุลของอีพ็อกซีเรซิน จึงทำให้เวลาที่ใช้ในการอบเพื่อทำปฏิกิริยาลดลง และในขณะเดียวกันการอบในไมโครเวฟจะช่วยให้เกิดพอลิเมอไรเซชันของอีพ็อกซีเรซิน ทำให้โมเลกุลจัดเรียงตัวกันแน่นขึ้นช่วยเพิ่มความหนาแน่นให้กับตัวอย่าง และช่วยลดปริมาณสารทำให้แข็งและอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ เนื่องจากความถี่ของไมโครเวฟที่ใช้ใกล้เคียงกับความถี่ที่ใช้ในการหมุนของ chemical radical ซึ่งมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุล

Tanrattanakul และ SaeTiaw (2005) งานวิจัยนี้ต้องการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของอีพ็อกซีที่อบด้วยเตาอบความร้อนและเตาอบไมโครเวฟชนิดที่ใช้ในครัวเรือน ชนิดของอีพ็อกซีที่ใช้ได้แก่ ไดโกลซิคลิอีเทอร์ บิสฟีนอล-เอ สารช่วยทำให้แข็งตัวที่ใช้เป็นกลุ่มแอนไฮไดรด์ ได้แก่ เมทิลเตตระไฮโดรทาลิกแอนไฮไดรด์และเมทิลเฮกซะไฮโดรทาลิกแอนไฮไดรด์ อีพ็อกซีที่อบด้วยเตาไมโครเวฟใช้เวลา 10, 14 และ 20 min กำลังไฟ 240 และ 320 W และที่อบด้วยเตาอบความร้อน อุณหภูมิ 150 °C เวลา 14 min ทดสอบสมบัติการต้านแรงดึง การต้านแรงกระแทกและสมบัติการดัดโค้ง ตามมาตรฐาน ASTM นอกจากนี้วิเคราะห์เปรียบเทียบอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g) และพลัง

งานกระตุ้น (E_u) ด้วยเทคนิคความร้อนเชิงพลศาสตร์ (DMTA) ผลการทดลองพบว่า สมบัติเชิงกลของพ็อกซีที่ได้จากการอบด้วยวิธีที่ต่างกันมีค่าไม่ต่างกันมากนัก โดยแต่ละสูตรจะให้สมบัติเชิงกลที่ต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาวะการอบและชนิดและปริมาณของสารช่วยให้แข็งและตัวเร่งปฏิกิริยาของแต่ละสูตรด้วย อีพ็อกซีบางสูตรที่ได้จากการอบด้วยเตาไมโครเวฟแสดงแนวโน้มสมบัติเชิงกลดีกว่าการอบด้วยเตาอบความร้อน การศึกษาในระดับโมเลกุลด้วยเทคนิค DMTA พบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระบบการให้ความร้อน อีพ็อกซีเรซินแต่ละสูตรจะมีการเปลี่ยนแปลง T_g ต่างกันแต่มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนค่า E_u จากการคำนวณตามสมการของอาร์รีเนียสมีก่าอยู่ในช่วงเดียวกัน การอบด้วยเตาไมโครเวฟสามารถลดเวลาการอบถึง 60-70 % เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการอบจริง (effective time) น้อยกว่าเวลาที่กำหนดไว้เพราะกำลังวัตต์ของเตาไมโครเวฟในแต่ละระดับกำลังขึ้นอยู่กับการควบคุมวงจรการทำงาน

กลุ่มที่ 3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุคอมโพสิตที่อบด้วยคลื่นไมโครเวฟ

Fang และ Scola (1999) ทำการศึกษาการใช้ไมโครเวฟอบวัสดุคอมโพสิตระหว่าง phenylethynyl-terminated polyimide (PETI) กับเส้นใยคาร์บอน โดยทำการศึกษาและวิเคราะห์การอบด้วยคลื่นไมโครเวฟที่หลายๆความถี่ เทียบกับการอบโดยใช้ความร้อน สมบัติทางกายภาพและค่า T_g ศึกษาโดยใช้เทคนิค DMTA สมบัติเชิงกลศึกษาโดยใช้ 3-point bending และ short-beam-shear โดยทดสอบที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิ 177°C ทดสอบคุณภาพผิวหน้าโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน จากการทดลองทำให้ทราบว่า

- ที่อุณหภูมิและเวลาอบที่เท่ากัน การอบโดยใช้คลื่นไมโครเวฟให้ค่า T_g สูงกว่าการอบโดยใช้ความร้อน
- การอบโดยใช้คลื่นไมโครเวฟให้ค่าความคงทนต่อการตัดโค้ง โมดูลัสของการตัดโค้งและความแข็งแรงเฉือนสูงกว่าการอบโดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาเท่ากัน
- การอบโดยใช้คลื่นไมโครเวฟแสดงให้เห็นว่าให้ค่า T_g ค่าความคงทนต่อการตัดโค้ง โมดูลัสของการตัดโค้งและความแข็งแรงเฉือนมีค่าใกล้เคียงหรือสูงกว่าการอบโดยใช้ความร้อนที่สภาวะการอบเหมือนกันแต่ใช้เวลาครึ่งหนึ่งของการอบโดยใช้ความร้อน

Thostenson และ Chou (2001) ทำการศึกษาเทคนิคการอบอีพ็อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิตแบบแผ่นโดยใช้หม้อนึ่งอัดไอ (autoclave) ให้ผลที่ไม่น่าพอใจ เนื่องจากชิ้นงานมีความร้อน

สูงทำให้เกิดความเค้นตึงในชิ้นงานสูง จึงให้ความสนใจอบอีพ็อกซีเส้นใยแก้วคอมโพสิตด้วยคลื่นไมโครเวฟ ศึกษาถึงผลของคลื่นไมโครเวฟกับความร้อนที่เกิดกับชิ้นงาน โดยวิเคราะห์ด้วยเครื่อง calorimetric จากผลการทดลองพบว่าการอบวัสดุคอมโพสิตด้วยคลื่นไมโครเวฟอุณหภูมิของชิ้นงานจะต่ำกว่าใช้หม้อนึ่งอัดไอควบคุมการแข็งตัวของชิ้นงานได้ดีกว่าและง่ายขึ้นและลดเวลาในกระบวนการอบ

Qiu, Y. และ Hawley, M.C. (2001) ทำการศึกษาการขึ้นรูปวัสดุผสมระหว่างอีพ็อกซีและแกรไฟต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยเปรียบเทียบกระบวนการที่ใช้ความถี่แบบคงที่อย่างต่อเนื่องกับกระบวนการที่ใช้หลายค่าความถี่ในการอบ โดยเตรียมตัวอย่างให้แกรไฟต์จัดตัวในทิศทางเดียว 48-ply ขนาด 2"x2" และ 3"x3", 24-ply V-shape และ tri-planar จากการศึกษาพบได้ว่ากระบวนการขึ้นรูปที่ใช้ความถี่หลายค่าจะให้ความร้อนได้เร็วกว่า เวลาที่ใช้ในกระบวนการน้อยกว่าและค่า T_g ที่ได้มีค่ามากกว่ากระบวนการที่ใช้ความถี่ค่าเดียวตลอดกระบวนการ

Hawkins, R. และคณะ (1996) ทำการศึกษาการอบวัสดุคอมโพสิตด้วยคลื่นไมโครเวฟทั้งระบบ single mode และ multi mode ในกระบวนการที่ใช้ multi mode พลังงานที่แผ่ออกมาให้ความร้อนในรูปแบบที่แตกต่างกัน การให้ความร้อนจึงไม่มีประสิทธิภาพมากพอ เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของความร้อน ในกระบวนการที่ใช้ single mode ความร้อนเกิดจากการใช้คลื่นความถี่เดียว ส่งผลให้สามารถให้พลังงานได้ตรงแก่ตำแหน่งที่ต้องการ จากการศึกษาพบว่าการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตให้มีประสิทธิภาพในเวลาสั้นๆ ควรเลือกใช้ระบบ single mode เพราะสามารถให้ความร้อนในอัตราที่สูง ให้ผลผลิตสูง แต่เกิดอุณหภูมิสูงอาจทำให้สมบัติบางประการของชิ้นทดสอบเสียไป และจากการทดลองพบว่า สมบัติของวัสดุคอมโพสิตขึ้นกับความถี่ของคลื่นไมโครเวฟที่ใช้อบ

Nightinigel และ Day (2002) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติการคัดโค้งและความแข็งแรงเหนียวระหว่างชิ้นของสารประกอบคอมโพสิตของอีพ็อกซี ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนที่อบด้วยความร้อนและด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยศึกษาจากตัวอย่าง 2 ระบบ คือ

- Triglycidyl p-aminophenol (TGPAP)/DDS อัตราส่วน 1:0.7 ซึ่งสารเคมีทั้งสองมีค่า dielectric loss factor 1.36 และ 0.87 ตามลำดับ
- Tetraglycidyl diaminodiphenylmethane (TGDDM)/tetrafunctional amine อัตราส่วน 1:0.9 ซึ่งสารเคมีทั้งสองมีค่า dielectric loss factor 0.57 และ 0.33 ตามลำดับ

ทั้งสองระบบจะมีสารเพิ่มความเหนียว (toughening agent) คือ polyetherimide (PEI) 15% โดยน้ำหนัก ตัวอย่างทั้งสองระบบจะเตรียมเป็น prepreg โดยวิธีการขึ้นรูปด้วยมือ (hand lay up) แล้วนำตัวอย่างทั้งสองระบบมาอบด้วยวิธีการต่างๆ 3 แบบคือ หม้อนึ่งอัดไอ การอบด้วยหม้อนึ่งอัดไอแล้วอบซ้ำด้วยไมโครเวฟ และการอบด้วยไมโครเวฟ จากผลการทดลองพบว่า การใช้หม้อนึ่งอัดไออบ ตัวอย่างระบบที่ 1 จะมีค่าความคงทนต่อการตัดโค้งและความคงทนต่อแรงเฉือนระหว่างชั้นลามิเนต สูงกว่าตัวอย่างระบบที่ 2 เนื่องจากในระบบที่ 2 PEI จะเกิดการแยกเฟสทำให้เปราะ แต่เมื่อมีการทำการอบซ้ำคลื่นไมโครเวฟ ค่าความคงทนต่อการตัดโค้งและความคงทนต่อแรงเฉือนระหว่างชั้นลามิเนตก็จะดีขึ้น เนื่องจากการแยกเฟสของ PEI ลดลง ทำให้เฟสต่อเนื้อมีความเป็นเนื้อเดียว กันมากขึ้น และเมื่อนำตัวอย่างทั้งสองระบบมาอบด้วยไมโครเวฟ พบว่าค่าความคงทนต่อการตัดโค้งและความคงทนต่อแรงเฉือนระหว่างชั้นลามิเนตจะมีค่าใกล้เคียงกัน และนอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณฟองอากาศของตัวอย่างที่อบในเตาไมโครเวฟจะมากกว่าตัวอย่างที่อบในหม้อนึ่งอัดไอ เนื่องจากการอบในหม้อนึ่งอัดไอเป็นการอบแบบลดความดันและสูญญากาศ แต่ถ้าเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างที่ทำการอบซ้ำด้วยไมโครเวฟกับตัวอย่างที่อบด้วยไมโครเวฟอย่างเดียว พบว่าค่าสมบัติการตัดโค้งของตัวอย่างที่อบในเตาไมโครเวฟจะสูงกว่า เนื่องจากการยึดเกาะของอีพ็อกซีที่ผิวของเส้นใยคาร์บอนดีกว่า ถึงแม้ว่าจะมีปริมาณฟองอากาศมากกว่า

Shuangjie และ Martin (2003) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบผลของอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาต่อความแข็งแรงเฉือนของกาวอีพ็อกซีที่อบในเตาไมโครเวฟและอบด้วยความร้อนโดยศึกษาจากตัวอย่าง 2 ระบบคือ

- เปรียบเทียบความแข็งแรงเฉือนของกาวอีพ็อกซีระบบ Eccobond A 401-37/Bexloy ที่อบในไมโครเวฟ อุณหภูมิ 120°C เวลา 20 min และอบด้วยความร้อน อุณหภูมิ 120°C เวลา 100 min จากผลการทดลองพบว่ากาวที่อบในไมโครเวฟ จะมีค่าความแข็งแรงเฉือน และการยึดเกาะระหว่างกาวกับพื้นผิวสูงกว่ากาวที่อบในเตาอบ
- เปรียบเทียบความแข็งแรงเฉือนของกาวอีพ็อกซีระบบ Eccobond A 401-37/Surlyn SD201U ที่อบในไมโครเวฟ อุณหภูมิ 100 °C เวลา 51 min และอบด้วยความร้อนอุณหภูมิ 120 °C เวลา 100 min จากผลการทดลองพบว่า ความแข็งแรงเฉือนของ กาวอีพ็อกซีที่อบในไมโครเวฟใกล้เคียงกับการอบในเตาอบ

จากการศึกษาพบว่ากาวที่อบในไมโครเวฟจะลดเวลาเกิดพันธะระหว่างวัสดุพื้นผิวหรือลดอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากการอบในไมโครเวฟจะมีกลไกการเกิดความร้อน

เฉพาะที่ (local superheat) ที่เกิดจากหมุ่ฟังก์ชันของกาว ซึ่งหมุ่ฟังก์ชันนี้จะเป็นตัวดูดซับความร้อนจากไมโครเวฟแล้วส่งผ่านไปยังสายโซ่โมเลกุล ดังนั้นความร้อนที่ตำแหน่งของหมุ่ฟังก์ชันจะสูงกว่าตำแหน่งอื่นๆในโมเลกุล

กลุ่มที่ 4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอีพ็อกซี การอบวัสดุด้วยเตาไมโครเวฟและวัสดุคอมโพสิต

Cukierman, Halary และ Monnerie (1991) ได้ศึกษา การวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ ความร้อนเชิงพลศาสตร์ (DMTA) ของอีพ็อกซีที่เชื่อมขวางในสถานะคล้ายแก้ว (glassy state) โดยใช้สารทำให้แข็งกลุ่มเอมีน 4 ชนิดคือ DDM, Hexamethylene diamine (HMDA), Aniline (AN) และ Hehyl amine (HA)

โดยจะแบ่งกลุ่มของสารทำให้แข็งออกเป็น 3 กลุ่มคือ (1) กลุ่มที่มีโครงสร้างของการเชื่อมโยงแบบแน่น คือ DDM และ HMDA (2) กลุ่มที่มีโครงสร้างของการเชื่อมขวางแบบหลวมๆ (loosely crosslinked networks) คือ DDM/AN และ HMDA/HA (3) กลุ่มที่ไม่มีมีการเชื่อมขวาง (uncrosslinked material) คือ AN และ HA

ในการทดสอบ DMTA ทดสอบที่ความถี่ 1 – 3 Hz อุณหภูมิระหว่าง 123-350 K ขนาดของชิ้นตัวอย่าง 3x10x35 mm ศึกษาผลของความหนาแน่นของการเชื่อมขวางของไนโตรเจนที่เป็นอะลิฟาติกเอมีน (aliphatic amine) ซึ่งมีความยืดหยุ่นมาก และอะโรมาติกเอมีน (aromatic amine) ซึ่งมีความแข็งแรงมาก และศึกษาความยืดหยุ่นของสายโซ่ไนโตรเจนเชื่อมขวางของ β -relaxation จากการทดลองพบว่าเมื่อความหนาแน่นของการเชื่อมขวางเพิ่มขึ้นความสูงและความกว้างของพีคโมดูลัสสูญเสีย (E'') จะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากการลดลงของ elastic modulus ที่อุณหภูมิห้อง

จากการวัดความกว้างของ E'' พบว่าเมื่อปริมาณความหนาแน่นของการเชื่อมขวางพันธะสูงขึ้น ความสูงและความกว้างของพีค E'' จะมากขึ้นด้วยเนื่องจากการเชื่อมขวางพันธะของไนโตรเจนระหว่างอีพ็อกซีและสารทำให้แข็ง ทำให้ความสามารถในการหมุนของกลุ่ม $O-CH_2-CHOH-CH_2$ บางส่วนลดลง ทำให้ความหนาแน่นของการเชื่อมขวางไม่เป็นเนื้อเดียวกันบริเวณที่มีการเชื่อมขวางพันธะมากทำโมเลกุลใหญ่ขึ้น ทำให้ขัดขวางการหมุนของกลุ่ม $O-CH_2-CHOH-CH_2$ ทำให้ต้องใช้พลังงานมากขึ้น และความสามารถในการหมุนก็จะลดลงเรื่อยๆเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สำหรับระบบที่เป็นกลุ่มที่มีโครงสร้างของการเชื่อมโยงแบบแน่นพบว่า ความกว้างของ E'' ของ DDM จะมากกว่าระบบที่มีการเชื่อมขวางพันธะแบบหลวมๆของ HDMA เนื่องจาก HDMA ซึ่งเป็นอะลิฟาติกเอมีน (aliphatic amine) มีความแข็งแรงน้อยกว่าอะโรมาติกเอมีน (aromatic amine)

จากการวัดความสูงของพีค E'' ความสูงของพีคจะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นของการเชื่อมขวางพันธะสูงขึ้น อธิบายในระบบที่เป็นกลุ่มที่มีโครงสร้างของการเชื่อมขวางแบบแน่น พบว่าการหมุน (local motion) ของกลุ่ม $\text{CH}_2\text{-CHOH-CH}_2$ เพื่อต้องการที่จะมีการจัดเรียงตัวที่ดีโดยการหมุนรอบๆพันธะเดี่ยว (conformation) เนื่องจากมีการเชื่อมขวางกันมากขึ้น ทำให้ความหนาแน่นของการเชื่อมขวางพันธะมากขึ้นทำให้พีค E'' สูงและกว้างมากขึ้น และจะขึ้นอยู่กับความแข็งของสายโซ่ด้วย (chain rigidity) ถ้าเปรียบเทียบกับระหว่างอะดิพาทิกเอมีนซึ่งมีความยืดหยุ่นมากกว่าและอะโรมาติกเอมีนซึ่งมีความแข็งมากกว่า พบว่าอะโรมาติกเอมีนจะมีพีค E'' สูงและกว้างกว่า

จากการทดลองหาค่า E_a จากสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenious) พบว่า E_a จะขึ้นอยู่กับความยืดหยุ่นของสายโซ่ (chain flexibility) นอกจากนี้สามารถคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อน (activation enthalpy, ΔH) และความไม่เป็นระเบียบ (activation entropy, ΔS) พบว่ามีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย ซึ่งจะขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของโครงสร้างการเชื่อมขวาง โดยพบว่า ΔH จะเกี่ยวข้องกับการจัดเรียงตัว (rearrangement) การหมุนและจากการทดลองพบว่า ΔS จะลดลงเมื่อปริมาณความหนาแน่นของการเชื่อมขวางพันธะลดลงและ ΔS ของ DDM จะสูงกว่า HMDA เนื่องจากมีความสามารถในการหมุนมีน้อยกว่า

Guerrero และคณะ (1995) ได้ทำการศึกษาอีพ็อกซี (N, N, N',N' tetraglycidyl-4, 4'-diamino diphenylmethane, TGDDM) ด้วย DMTA โดยใช้สารทำให้แข็งกลุ่มแอนไฮไดรด์ (cis-1,2,3,6-tetrahydrophthalic anhydride, THPA) ตามอัตราส่วนปริมาณสัมพันธ (stoichiometric ratio, r) ตั้งแต่ 0.3-1.0 เพื่อศึกษาอุณหภูมิ T_g ที่ตำแหน่งอุณหภูมิสูงสุดของพีค Tan δ , ความสูงของพีค Tan δ และ elastic rubber modulus (E_r) ที่ตำแหน่งอุณหภูมิ $T_g + 40^\circ\text{C}$ และศึกษาผลของการอบซ้ำ (post cure) ของตัวอย่างอีพ็อกซีที่อุณหภูมิต่างๆ จากการทดลองด้วย DMTA ความถี่ 10 Hz อัตราการให้ความร้อน $2^\circ\text{C}/\text{min}$ จากการศึกษาพบว่า

(1) เมื่อปริมาณของแอนไฮไดรด์เพิ่มมากขึ้น T_g ที่ได้ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึง $r = 0.8$ และ 0.9 T_g ที่ได้มีค่ามากที่สุด เนื่องจากปริมาณการเชื่อมขวางที่มาก เกิดจากการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางที่เกิดจาก etherificaion และ estherificaion ที่เกิดในระบบอีพ็อกซีและแอนไฮไดรด์ที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา

(2) ตัวอย่างอีพ็อกซีที่มีปริมาณแอนไฮไดรด์ต่ำๆ เมื่อนำมาอบซ้ำที่อุณหภูมิสูงขึ้นพบว่า T_g จะสูงขึ้นเนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะมีการเกิดการเชื่อมโยงของอีพ็อกซีที่เหลือเกิดเป็นพันธะ etherificaion

(3) T_g จะขึ้นอยู่กับ E_r ของทุกๆค่า r และอุณหภูมิการอบ พบว่าเมื่อค่า r เพิ่มขึ้นและอบที่อุณหภูมิสูงขึ้น ค่า T_g จะขึ้นอยู่กับค่า E_r ส่วนความสูงของพีค $\tan \delta$ ลดลงเนื่องจากมีความหนาแน่นของการเชื่อมขวางมากขึ้น

Dyakonov และคณะ (1996) ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนปริมาณสัมพันธ์ที่พอดี (stoichiometrically balanced) และความหนาแน่นของการเชื่อมขวางพันธะของอีพ็อกซีที่มีสารทำให้แข็ง 2 ชนิด คือ เอมีนซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันนัลกรุป 2 กลุ่ม (difunctional amine) และ mPDA ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันนัลกรุป 4 กลุ่ม (tetrafunctional amine) โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์หลายอย่างเช่น FT-IR, DSC, DMTA และ Nuclear magnetic resonance (NMR) ในที่นี้จะขอลำรายละเอียดเฉพาะการวิเคราะห์ด้วย DMTA ซึ่งจะศึกษาถึงการเปลี่ยนสถานะทางความร้อนของอีพ็อกซีเรซินจากค่ามอดุลัสสะสม (G'), มอดุลัสสูญเสีย (G'') และแทนเจนต์ ($\tan \delta$) ที่ความถี่ต่างๆ คือ 0.3, 1, 5, 10 และ 20 Hz แล้วคำนวณค่า E_a , ΔH และ ΔS ตามความสัมพันธ์ของ Arrhenius และ Eyring

(a) คำนวณ E_a จากความชัน $m = E_a/R$ ที่เกิดจากการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(f)$ และ $1/T_g$ ตามสมการดังนี้

$$\ln(f) = \ln A - (E_a/R) \cdot 1/T_g$$

โดย $f =$ ความถี่ที่ทดสอบ

$$1/T_g = \text{ส่วนกลับของอุณหภูมิที่ตำแหน่ง } \tan \delta_{\max} \text{ หรืออุณหภูมิ } T_g$$

(b) คำนวณ ΔH โดยการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(f/T_g)$ และ $1/T_g$ คำนวณ (ΔH) จากค่าความชัน $m = (\Delta H/R)$ ตามสมการดังนี้

$$\ln(f/T_g) = \ln(k/2\pi h) - (\Delta H/R) \cdot 1/T_g - \Delta S/R$$

(c) คำนวณ ΔS จากจุดตัด $C = \ln(k/2\pi h) - \Delta S/R$ ของการพล็อตกราฟระหว่าง $\ln(f/T_g)$ และ $1/T_g$

จากการทดลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของการเชื่อมขวางพันธะเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงชนิดของสารทำให้แข็งและปริมาณส่วนผสมทางเคมี จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า E_a , ΔH และ ΔS ของ α และ β transition โดยพบว่า E_a และ ΔH ที่ได้จากการ

ทดลองมีแนวโน้มเหมือนกันและค่าที่ได้แตกต่างกันเล็กน้อย (ประมาณ 300-500 kJ/mol) ตัวอย่างที่มีสัดส่วนเป็นไปตาม stoichiometrically balanced จะมี E_a แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ส่วนบางตัวอย่างที่มีปริมาณสารทำให้แข็งน้อยจะพบว่าค่า E_a จะต่ำกว่าตัวอย่างที่มีปริมาณสารทำให้แข็งมาก เนื่องจากความยืดหยุ่นของโมเลกุลที่มีเกิดจากปริมาณหมู่ฟังก์ชันของอีพ็อกซีที่ส่วนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ทำให้แข็งเกิดการเชื่อมโยงกันเป็นพอลิเอเทอร์ (polyether) บางตัวอย่างที่มีปริมาณสารทำให้แข็งมากเกินไป ทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนกันเองภายในโมเลกุลทำให้มีค่า E_a สูงขึ้น