

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 เส้นใยธรรมชาติ (Natural fiber)

เส้นใยธรรมชาติ (Natural fiber) คือเส้นใยที่เกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ สามารถแบ่งได้เป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ดังนี้คือ

- 1) เส้นใยจากพืช เส้นใยจากพืช หมายถึงเส้นใยที่มีองค์ประกอบหลักคือเซลลูโลส ได้แก่ฝ้าย ป่าน ปอ กระเจา มะพร้าว หรือ ปาล์ม เป็นต้น
- 2) เส้นใยจากสัตว์ หมายถึงเส้นใยที่มีองค์ประกอบหลักเป็นโปรตีน ได้แก่ขนสัตว์ ผม หรือเส้นไหม เป็นต้น
- 3) เส้นใยแร่ ได้แก่เส้นใยหิน เป็นต้น

โดยทั่วไปแล้วจะนิยมใช้เส้นใยพืชมาเป็นวัสดุเสริมแรงในคอมพอสิต แต่อย่างไรก็ตามเส้นใยก็มีข้อดีที่ต้องพิจารณา คือ

- สมบัติความสม่ำเสมอของเส้นใยธรรมชาติ
- การกำจัดกาบบนเส้นใยธรรมชาติ
- ความเป็นผลึกและดีกรีการพอลิเมอไรเซชันของเซลลูโลส
- การยึดเกาะผิวหน้าระหว่างเส้นใยธรรมชาติกับเมตริกซ์
- การดูดซึมความชื้น
- การหน่วงการตีไฟ

อย่างไรก็ดีแม้ว่าจะมีข้อจำกัดหลายประการ แต่ข้อดีของเส้นใยธรรมชาติเหล่านี้ก็คือเมื่อเทียบกับเส้นใยสังเคราะห์ได้แก่

- เส้นใยพืชเป็นวัสดุประเภทที่ผลิตขึ้นใหม่ได้(renewable resource) และมีปริมาณมากในธรรมชาติ
- การสึกหรอของเส้นใยธรรมชาติน้อยกว่าเส้นใยแก้ว ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบต่อการนำวัสดุมาทำกรรไกร หรือการขึ้นรูปวัสดุคอมพอสิต
- การใช้เส้นใยธรรมชาติเสริมแรงในพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ใช้วัสดุประเภท biodegradable polymer เป็นเมตริกซ์นั้น ทำให้ได้วัสดุคอมพอสิตประเภทเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งไม่ส่งผลกระทบต่อทางสิ่งแวดล้อมเมื่อสิ้นสุดอายุการใช้งาน

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลระหว่างเส้นใยธรรมชาติกับเส้นใยสังเคราะห์

Mechanical properties of natural fibres as compared to conventional reinforcing fibres

Fibre	Density (g/cm ³)	Elongation (%)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	References
Cotton	1.5–1.6	7.0–8.0	287–597	5.5–12.6	[74,131,133]
Jute	1.3	1.5–1.8	393–773	26.5	[74,76,131,134]
Flax	1.5	2.7–3.2	345–1035	27.6	[131]
Hemp	—	1.6	690	—	[135]
Ramie	—	3.6–3.8	400–938	61.4–128	[131,133]
Sisal	1.5	2.0–2.5	511–635	9.4–22.0	[74,131,136]
Coir	1.2	30.0	175	4.0–6.0	[74,136]
Viscose (cord)	—	11.4	593	11.0	[133]
Soft wood kraft	1.5	—	1000	40.0	[137]
E-glass	2.5	2.5	2000–3500	70.0	[138]
S-glass	2.5	2.8	4570	86.0	[74,138]
Aramid (normal)	1.4	3.3–3.7	3000–3150	63.0–67.0	[138]
Carbon (standard)	1.4	1.4–1.8	4000	230.0–240.0	[138]

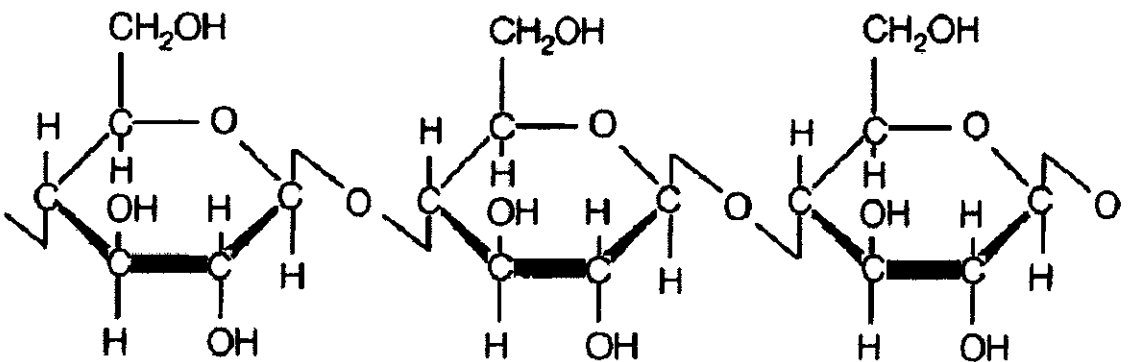
ที่มา (Bledzki A.K and Gassan J., 1999)

2.1.1 องค์ประกอบของเส้นใยพืช

โดยทั่วไปแล้วเส้นใยพืชมีส่วนประกอบที่สำคัญได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน เพคติน แวกซ์ ส่วนที่ละลายน้ำ (water soluble substance) และน้ำ

2.1.1.1 เซลลูโลส (Cellulose)

กลุ่มคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อนที่ประกอบด้วยหน่วยน้ำตาล โมเลกุลเดี่ยวชนิดเดียวกัน (homopolysaccharide) คือน้ำตาลกลูโคส เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ B-1,4-glycosidic เป็นสายยาวตลอดไม่มีการแตกกิ่ง อยู่ในลักษณะที่ขนานกันและยึดรวมกันเป็นกลุ่มก้อนด้วยพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแต่ละสายโซ่



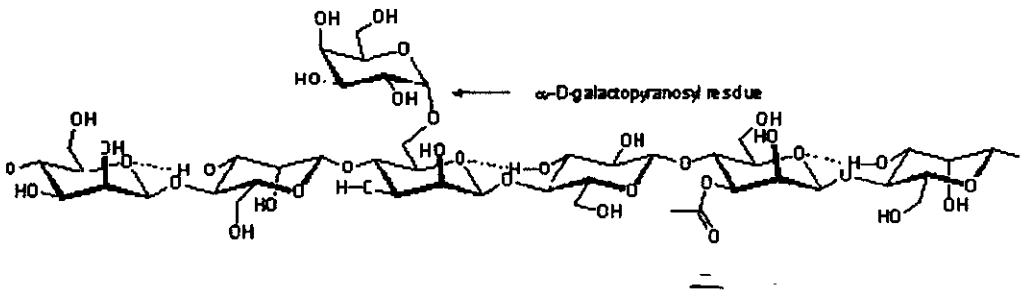
รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส

ที่มา : <http://www.greenspirit.org.uk/Resources/cellulose.gif>

เซลลูโลสพบอยู่ในธรรมชาติ เป็นส่วนประกอบของผนังเซลล์ของพืช ใบพืช ไม้ต่างๆ มีคุณสมบัติไม่ละลายในน้ำและค่อนข้างทนต่อปฏิกิริยาเคมีของเอนไซม์และค่างแต่ไม่ทนต่อกรดเข้มข้น การไฮโดรไลซ์ความยากง่ายต่างกัน เนื่องจากเซลลูโลสมีหลายชนิดบางชนิดมีรูปร่างโปร่ง เอนไซม์ย่อยได้ง่าย บางชนิดเรียงตัวแน่น รูปร่างคล้ายผลึก เอนไซม์ย่อยได้ยากกว่า

2.1.1.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses)

เป็นคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อน ที่ประกอบด้วยหน่วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิด (heteropolysaccharide) โดยที่สายโซ่หลัก(main chain)เป็นสายโซ่ยาวประกอบด้วย beta-1,4 linked D-xylopyranoyl units โดยมีสายโซ่ข้าง(side chain) ประกอบด้วย L-arabinose, D-glucuronic acid หรือ 4-O-methyl, D-galactose และ D-glucose

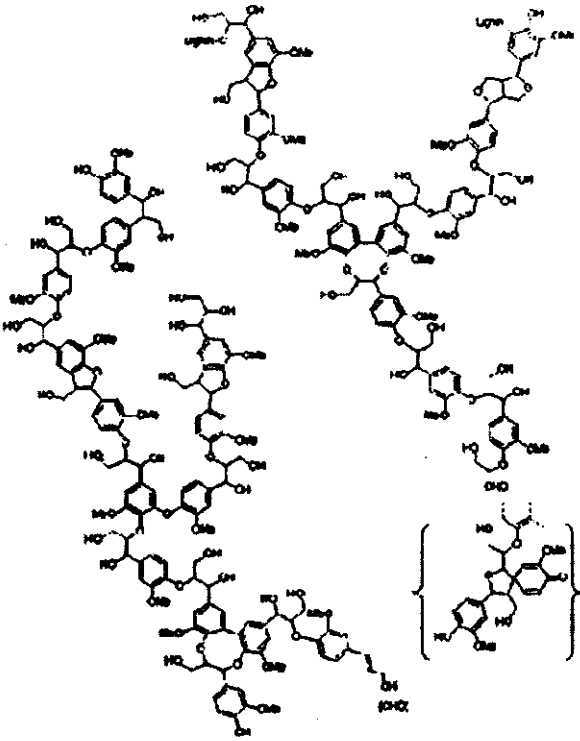


รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส

ที่มา : <http://www.pruittfamily.com/paul/images/Graminaceous%20hemicellulose.gif>

2.1.1.3 ลิกนิน (Lignin)

เป็นสารประกอบพอลิเมอร์ที่มีองค์ประกอบ อะลิฟาติกและอะโรมาติก ทำหน้าที่ในการปกป้องผนังเซลล์พืช ทำให้เอนไซม์เข้าไปย่อยสลายได้ยาก ในอุตสาหกรรมการทำกระดาษหรืออุตสาหกรรมเซลลูโลส จะมีลิกนินเป็นผลพลอยได้(by product) เสมอ ลิกนินมีราคาไม่แพงและส่วนใหญ่ใช้สำหรับเป็นเชื้อเพลิงและใน reformed composite material นอกจากนี้แล้วลิกนินยังสามารถนำไปใช้เป็นกาว หรือปรับเปลี่ยนโครงสร้างบางอย่างเพื่อให้สามารถนำไปละลายผสมในคอมพอสิตเรซินได้ หรือการนำไปใช้เป็นโคโมโนเมอร์และ interfacial agent สำหรับเส้นใยธรรมชาติและ soy based resin composites

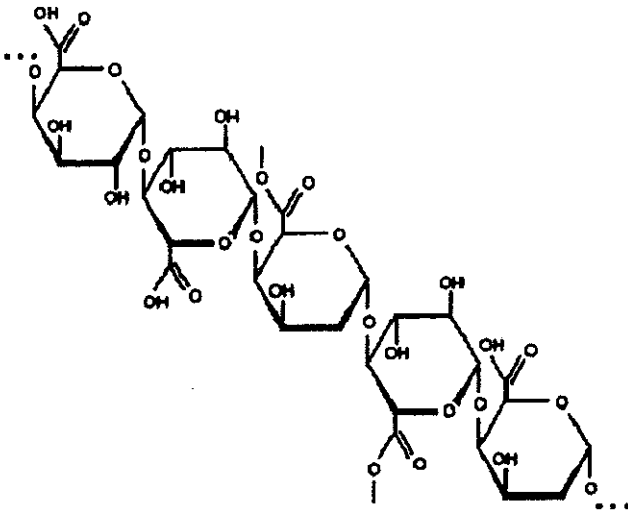


รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของสารประกอบลิกนิน

ที่มา : <http://www4.ncsu.edu/~dsargyro/images/lignin.gif>

2.1.1.4 เพกติน

เพกตินเป็นชื่อเรียกอย่างหนึ่งของ heteropolysaccharides ซึ่งประกอบด้วย polygalacturon acid



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของสารประกอบเพกติน

ที่มา : <http://www.daviddarling.info/images/pectin.gif>

2.1.1.5 แวกซ์

เป็นส่วนหนึ่งของเส้นใย สามารถสกัดออกได้โดยสารละลายอินทรีย์

ในเส้นใยธรรมชาติแต่ละชนิดต่างมีองค์ประกอบทางเคมีที่กล่าวมาข้างต้นนี้แตกต่างกันไป ซึ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตาราง 2.2 แสดงเปรียบเทียบองค์ประกอบของเส้นใยธรรมชาติแต่ละชนิด

Composition of different cellulose based natural fibres [10]

	Cotton	Jute	Flax	Ramie	Sisal
Cellulose	82.7	64.4	64.1	68.6	65.8
Hemi-cellulose	5.7	12.0	16.7	13.1	12.0
Pektin	5.7	0.2	1.8	1.9	0.8
Lignin	—	11.8	2.0	0.6	9.9
Water soluble	1.0	1.1	3.9	5.5	1.2
Wax	0.6	0.5	1.5	0.3	0.3
Water	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0

2.1.2 สมบัติผิวหน้า (Surface properties)

การนำเส้นใยธรรมชาติหรือไม้มานำใช้ในวัสดุคอมพอสิตนั้นปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึงคือการยึดเกาะระหว่างผิวหน้าของเส้นใยกับเมทริกซ์ เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติหรือไม้นั้นเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีส่วนประกอบหลัก ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ดังนั้นจึงมีสภาพความเป็นขั้ว (polar) เนื่องจากมีหมู่ไฮดรอกซิล(OH) ส่งผลให้เส้นใยมีสมบัติไฮโดรฟิลิก(hydrophilic) ซึ่งทำให้ไม่สามารถเข้ากันได้(incompatible)กับพลาสติก

จากการวัดค่า surface energy โดยใช้ dynamic contact angle พบว่าเส้นใยธรรมชาติดีค่า พลังงานผิวหน้า(surface energy) ที่สูง ดังนั้นเพื่อลดค่า Surface energy จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงผิวหน้าของเส้นใยซึ่งสามารถทำได้ทั้งวิธีทางกายภาพ(physical treatment)และทางเคมี(chemical treatment) ซึ่งทำให้เส้นใยธรรมชาติเหล่านี้มีค่า Surface energy ที่ต่ำเพียงพอที่และสามารถเข้ากันได้(compatible) และสามารถยึดเกาะระหว่างผิวหน้าเส้นใย(interfacial adhesion)กับพลาสติกในวัสดุคอมพอสิตได้

2.1.3 กระบวนการปรับปรุงผิวหน้าเส้นใยแบ่งได้เป็น

2.1.3.1 กระบวนการทางฟิสิกส์(Physical methods)

การปรับปรุงผิวหน้าเส้นใยธรรมชาติด้วยวิธีทางกายภาพนี้จะไปเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผิวหน้าของเส้นใยซึ่งมีผลต่อการเชื่อมพันธะแบบเชิงกล(mechanical bonding) กับพลาสติกเมทริกซ์ได้ ตัวอย่างการปรับปรุงด้วยเทคนิคนี้ได้แก่

2.1.3.1.1 Corona treatments

การทำ Corona นั้นเป็นวิธีการให้เกิดการออกซิเดชันบนผิวหน้า ซึ่งจะไปทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง surface energy ให้มีค่าต่ำเพียงพอ เพื่อเพิ่มความสามารถเข้ากันได้กับเมทริกซ์

2.1.3.1.2 Plasma treatments

การทำ Cold plasma บนผิวหน้าเส้นใยเป็นวิธีการตัดแปรผิวหน้าโดยการใช้ plasma ซึ่ง โมเลกุลภายใน gas phase ของพลาสมาจะเกิดการแตกตัวออกกลายเป็นอนุภาคซึ่งสามารถเข้าไปกระตุ้นหรือโจมตีบริเวณผิวหน้าของเส้นใย ได้มีการใช้เทคนิคนี้กับเส้นใยเซลลูโลสเพื่อปรับปรุงสมบัติ

การเปียก(wettability) ของเส้นใยเซลลูโลส และเพื่อเพิ่มการยึดเกาะระหว่างกระดาษกับพอลิเอเลฟีนส์ สำหรับก๊าซที่ใช้ในเทคนิคพลาสมานี้มีหลายชนิดขึ้นอยู่กับสมบัติที่ต้องการปรับปรุงเช่น ถ้าใช้ Oxygen plasma หรือ Hydrogen plasma จะเป็นเทคนิคสำหรับการทำให้เกิดการ ออกซิเดชัน(Oxidation) หรือ รีดักชัน(Reduction) บนผิวเส้นใยซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มสมบัติการเปียก(wettability) บนเส้นใย

2.1.3.1.3 Vacuum-ultraviolet treatments

วิธีนี้ใช้สำหรับปรับปรุงผิวหน้าเซลลูโลสโดยการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตในสภาพสุญญากาศ เพื่อให้เกิดการออกซิเดชันบนผิวหน้าเส้นใย

นอกจากนี้แล้วยังมีอีกหลายเทคนิคสำหรับการปรับปรุงผิวหน้าเส้นใยเช่นการใช้เลเซอร์ หรือการใช้รังสีเอ็กซ์เรย์ เป็นต้น

2.1.3.2 กระบวนการทางเคมี(Chemical methods)

เนื่องจากเส้นใยเซลลูโลสมีสมบัติไฮโดรฟิลิก(hydrophilic) ดังนั้นจึงไม่สามารถเข้ากันได้ (incompatible) กับพลาสติกซึ่งมีสมบัติไฮโดรโฟบิก(hydrophobic) ดังนั้นเพื่อให้เส้นใยเซลลูโลสกับพลาสติกเมตริกซ์ในวัสดุคอมพอสิตเข้ากันได้ จำเป็นต้องมีการปรับปรุงสมบัติผิวหน้าของเส้นใย ซึ่งมีหลายวิธี ได้แก่

2.1.3.2.1 Chemical coupling

เป็นวิธีการดัดแปรผิวหน้าเส้นใยด้วยวิธีการทางเคมีเพื่อปรับปรุงความสามารถยึดติดระหว่างผิวหน้า (interfacial adhesion) ของเส้นใยกับเมตริกซ์ ซึ่งมีหลายวิธี ได้แก่

- Esterification reaction

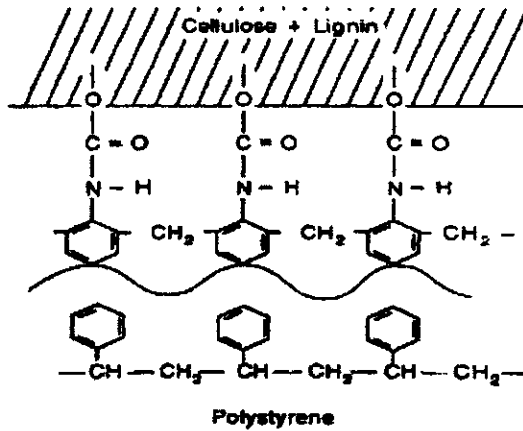
หลักการของเทคนิคนี้คือการดัดแปร โครงทางเคมีของเส้นใย โดยการเพิ่มหมู่เอสเตอร์ซึ่งมีสมบัติไฮโดรโฟบิกให้กับผิวหน้าเส้นใย ซึ่งจะช่วยให้สามารถเข้ากันได้(compatible) ได้กับเมตริกซ์ สารเคมีซึ่งทำหน้าที่เป็นรีเอเจนท์ในเทคนิคนี้มีหลายชนิด ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารเคมีจำพวก เอซิดแอนไฮไดรด์ เช่น acetic anhydride, propionic anhydride หรือ maleic anhydride ซึ่งจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลบนเส้นใยเซลลูโลส

- Treatments with compounds which contain methanol groups

ได้มีการใช้เทคนิคนี้ในการดัดแปรผิวหน้าเซลลูโลสโดยการทำปฏิกิริยากับสารประกอบ methanolmelamine ปรากฏว่าเส้นใยที่ผ่านการทำทรินดเมนต์ด้วยวิธีนี้แล้วนั้นจะการดูดซึมความชื้นน้อยลง และมีความสมบัติเปียก(wet strength) ต่อเรซินดีขึ้น

- Treatment with isocyanates

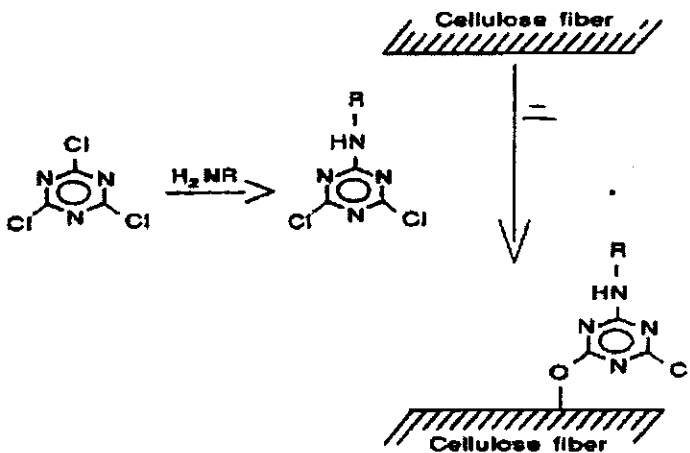
เทคนิคนี้เป็นการทรินดเมนต์เส้นใยโดยการทำปฏิกิริยาระหว่างเส้นใยเซลลูโลสกับสารประกอบไอโซไซยาเนต(isocyanate) เพื่อเพิ่มสมบัติการยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์เมตริกซ์ชนิดพอลิสไตรีน หรือ พอลิไวนิลคลอไรด์ ในวัสดุคอมพอสิต



รูปที่ 2.5 แสดงการทรานส์เฟอร์ด้วยสารประกอบไอโซไซยานเนต
ที่มา A.K. Bledzki, J. Gassan (1999)

● Triazine coupling agent

วิธีการนี้เป็นการนำ Triazine ไปทำปฏิกิริยาให้เกิดพันธะโควาเลนต์กับเซลลูโลส ผลที่ได้ก็คือเส้นใยเซลลูโลสดูดความชื้นลดลง พร้อมกับสมบัติไฮโดรฟิลิกที่ลดลงด้วยซึ่งส่งผลให้ผิวหนังเส้นใยเกาะซึดกับเมตริกซ์ได้ดีขึ้น



รูปที่ 2.6 แสดงการทรานส์เฟอร์โดยใช้สารประกอบไตรอะซีน
ที่มา A.K. Bledzki, J. Gassan (1999)

2.2 ปาล์มน้ำมัน (Oil Palm)

ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Elaeis guineensis* Jacq.

วงศ์ : Palmae

ชื่อสามัญ: Oil Palm

ชื่ออื่น: มะพร้าวลิง, มะพร้าวหัวลิง (กลาง) หมากมัน (ปัตตานี)

ลักษณะ : ปาล์มน้ำมันจัดอยู่ในพืชตระกูลปาล์ม (Palmae หรือ Recaceae) ซึ่งมีอยู่ 3 ชนิดคือ

1. *Elaeis guineensis* (African oil palm)
 2. *Elaeis oleifera* (South American oil palm)
 3. *Elaeis odora* (American oil palm) ไม่มีรายงานความสำคัญทางเศรษฐกิจ
- ทั้ง 3 ชนิดนี้ *Elaeis guineensis* มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ

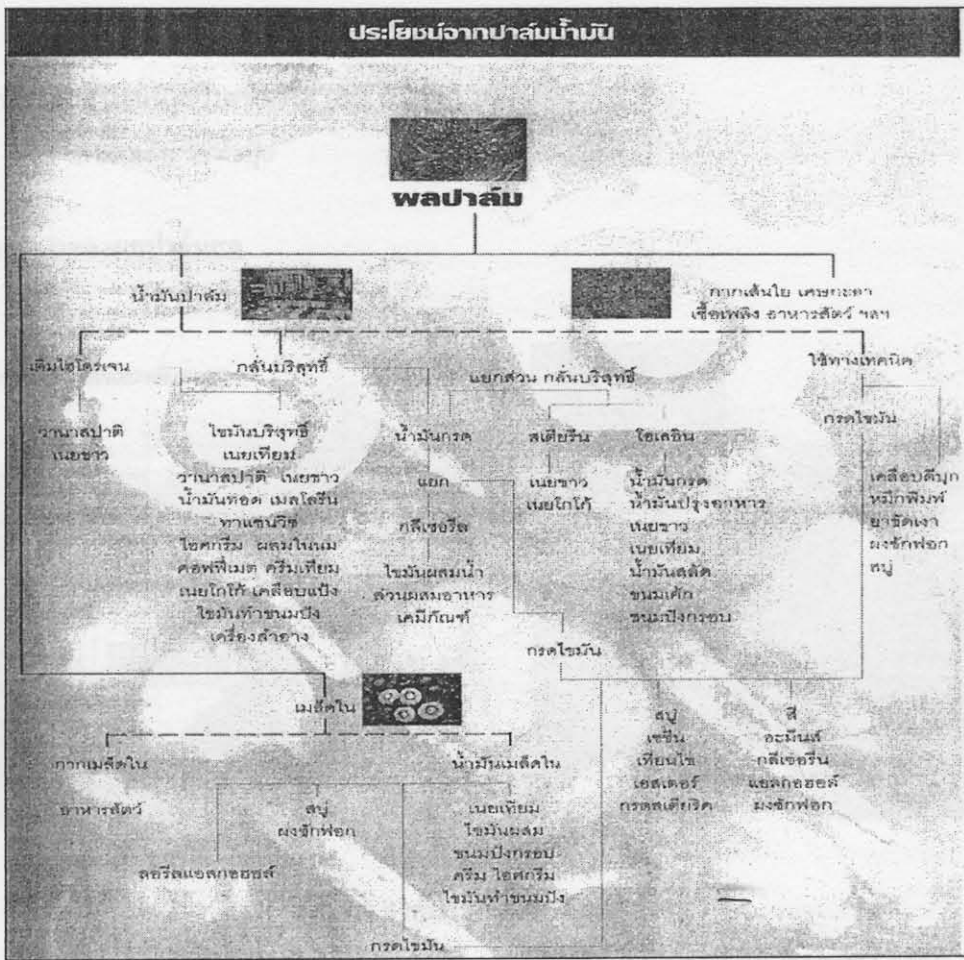


รูปที่ 2.7 ผลปาล์มน้ำมัน

ที่มา : www.rspg.thaigov.net/plants_data-pic-pd&sugar-oilpalm01_jpg ของ Google_files\oil

ปาล์มน้ำมัน เป็นพืชน้ำมันที่มีศักยภาพในการแข่งขันสูงกว่าพืชน้ำมันชนิดอื่นๆ ทั้งด้านการผลิตและการตลาด ส่วนแบ่งการผลิตน้ำมันปาล์มต่อน้ำมันพืชของโลก มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง และรวดเร็ว จากร้อยละ 11.7 ในช่วงปี 2519-2543 เพิ่มเป็นร้อยละ 27.5 ในช่วงปี 2544-2548 และคาดว่าจะเพิ่มสูงขึ้นเป็นร้อยละ 31.2 ในช่วงปี 2559-2563 โดยมีประเทศผู้ผลิตที่สำคัญคือ มาเลเซีย และอินโดนีเซีย

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชที่อนุรักษ์สภาพแวดล้อม (eco-friendly crop) เมื่อปลูกปาล์มน้ำมันเป็นระยะเวลายาวนานจะทำให้สภาพนิเวศที่เสียหายไปกลับคืนสู่สภาพธรรมชาติ นอกจากนี้ยังสามารถสกัดองค์ประกอบจากน้ำมันปาล์ม ได้แก่ กรดไขมันหลายชนิด วิตามินอี และวิตามินเอ นำมาใช้ประโยชน์และใช้เป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง อุตสาหกรรม Oleochemical และพลังงานทดแทน รวมทั้งพืชที่ปลอดภัยต่อผู้บริโภคเพราะไม่มีการตัดแต่งพันธุกรรม (GMOs)



รูปที่ 2.8 ประโยชน์จากผลปาล์มน้ำมัน

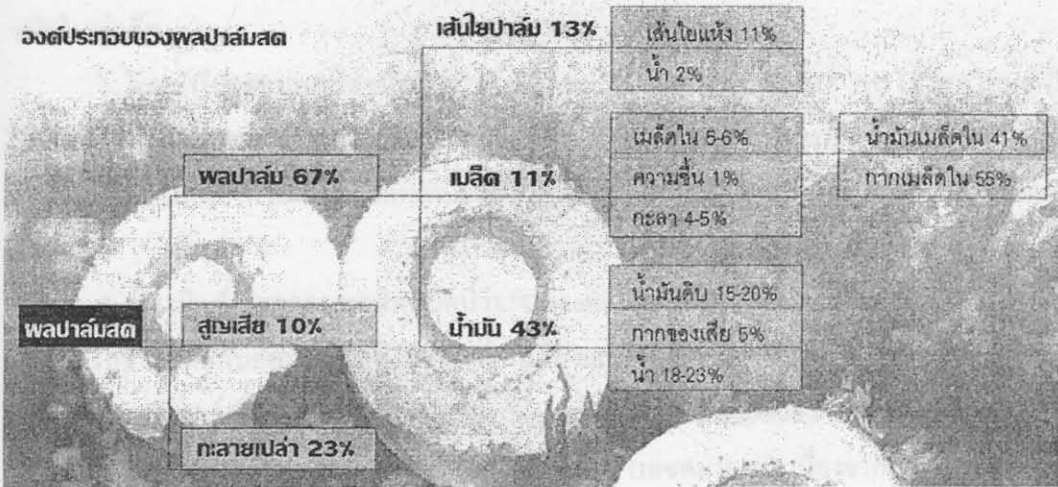
ที่มา : www.rspg-thaigov-net-plants_data-pic-pd&sugar-oilpalm01.jpg ของ Google_files\oil

นอกจากประโยชน์ดังกล่าวแล้ว ในการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ ยังมีวัสดุเหลือใช้จากการสกัดนำมาใช้ประโยชน์ได้แทบจะทุกชนิด ดังนี้

- ทะลายปาล์ม ใช้คลุมดินในสวนปาล์ม รักษาความชื้น และเพิ่มเนื้อดิน นำมาใช้เพาะเห็ด และข้อมูลจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มระบุว่า มีความเป็นไปได้ในการใช้เป็นเชื้อเพลิงในหม้อไอน้ำ เนื่องจากมีความร้อนสูง
- เส้นใยแห้ง ใช้เป็นเชื้อเพลิงในหม้อไอน้ำ
- กะลา ใช้ผสมกับเส้นใย เป็นเชื้อเพลิงในหม้อไอน้ำ ซึ่งปัจจุบัน โรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ใช้เป็นแหล่งพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้าใช้ในโรงงาน นำมาผลิตถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ใช้ในการกรองน้ำ และของเสีย หรือนำมาใช้ปลูกต้นไม้ เช่น กล้วยไม้ หรือ ใช้ซ่อมหัวถนนก็ได้เพราะแข็งมาก

- นำเสี้ยน ใช้รดน้ำในสวนปาล์ม เนื่องจากมีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูง หรือใช้ผลิตก๊าซมีเทน ใช้หุงต้ม โดยผ่านกระบวนการก๊าซชีวภาพ (Bio GAS)
- กากของเสี้ยน ใช้ทำปุ๋ย

องค์ประกอบของผลปาล์มสด



รูปที่ 2.9 องค์ประกอบของผลปาล์มสด

ที่มา : www.rspg.thaigov.net/plants_data-pic-pd&sugar-oilpalm01.jpg ของ Google_files\oil

2.3 วัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิต (Polymer composite material)

วัสดุพอลิเมอร์ผสมหรือพอลิเมอร์คอมพอสิต หมายถึง วัสดุพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วย ส่วนประกอบอย่างน้อยสองชนิดที่มีสมบัติแตกต่างกันเมื่อผสมเป็นคอมพอสิต (พอลิเมอร์เชิงประกอบ) แล้วจะมีความแข็งแรงมากกว่าแต่ละองค์ประกอบย่อยที่มาประกอบกัน พอลิเมอร์คอมพอสิตจัดเป็นวัสดุที่มีความสำคัญมาก ในปัจจุบันเป็นที่นิยมและมีปริมาณการใช้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากคอมพอสิตมีข้อดีหลายประการ เช่น น้ำหนักเบา ความแข็งแรง และค่ามอดูลัสต่อน้ำหนักสูง ขึ้นรูปได้ง่าย และต้นทุนการผลิตต่ำ ทั้งยังสามารถประยุกต์ใช้งานแทนวัสดุอื่นได้ เช่น โลหะและเซรามิกส์ ซึ่งสมบัติของพอลิเมอร์คอมพอสิต ขึ้นอยู่กับ

- การยึดเกาะระหว่างคอมพอสิตและตัวเสริมแรง
- คุณสมบัติของเมทริกซ์ และสารเสริมแรง
- ปริมาณสารเสริมแรง
- ขนาด และรูปร่างของตัวเสริมแรง
- กระบวนการผลิต
- การจัดเรียงตัว และการกระจายตัวของสารเสริมแรง

2.3.1 องค์ประกอบของคอมพอสิต มี 3 ส่วน ดังนี้

2.3.1.1 เมตริกซ์ (matrix)

เป็นวัสดุที่ทำหน้าที่ยึดส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกัน ให้อยู่ในตำแหน่งและการเรียงตัวที่กำหนด โดยจะล้อมรอบและปกป้องส่วนเสริมแรงจากการเสียดสภาพเนื่องจากสิ่งแวดล้อม โดยมักมีความแข็งแรงและมอดูลัสน้อยกว่าส่วนเสริมแรง เมตริกซ์เป็นองค์ประกอบที่มีความต่อเนื่อง จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางถ่ายเทแรงที่ได้รับไปสู่ส่วนเสริมแรง วัสดุเมตริกซ์ที่ใช้ในการผลิตคอมพอสิตมีมากมายหลายชนิด อาจแบ่งได้ 3 ชนิดใหญ่ๆคือ

1. โลหะ เรียกคอมพอสิตชนิดนี้ว่า “Metal Matrix Composite (MMC)” การใช้วัสดุโลหะเป็นเมตริกซ์สำหรับคอมพอสิตนิยมใช้กับเส้นใยโลหะเป็นส่วนเสริมแรง ซึ่งมีความแข็งแรงสูงและมีข้อจำกัดคือน้ำหนักของวัสดุมาก เมตริกซ์โลหะที่นิยมใช้ ได้แก่ อะลูมิเนียม ไททานเนียม แมกนีเซียม และทองแดง เป็นต้น

2. เซรามิกซ์ เรียกคอมพอสิตชนิดนี้ว่า “Ceramic Matrix Composites (CMC)” การใช้เซรามิกซ์เป็นเมตริกซ์นิยมใช้กับคอมพอสิตที่ใช้งานอุณหภูมิสูงและทนต่อสารเคมี

3. พอลิเมอร์ เรียกคอมพอสิตชนิดนี้ว่า “Polymer Matrix Composites (PMC)” สามารถใช้ได้ทั้งประเภทเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซต แต่นิยมใช้เทอร์โมเซตมากกว่า เนื่องจากการใช้สารตั้งต้นที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำมีความหนืดต่ำ สามารถผสมกับเส้นใยส่วนเสริมแรงขึ้นรูปเป็นวัสดุคอมพอสิตได้ง่าย ส่วนเทอร์โมพลาสติกไม่นิยมใช้เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลที่ด้อยกว่า ทนอุณหภูมิต่ำกว่า แต่สามารถขึ้นรูปได้หลายครั้ง ซึ่งพอลิเมอร์ที่ใช้โดยทั่วไปแบ่งได้เป็น 2 ชนิดได้แก่

เทอร์โมพลาสติกเรซิน (Thermoplastic resins)

เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกไม่จำเป็นต้องมีการเชื่อมโยงโครงสร้าง ความแข็งแรงของวัสดุจึงต้องมาจากความแข็งแรงของสายโซ่พอลิเมอร์และการพันกัน ดังนั้นเทอร์โมพลาสติกที่นำมาใช้งานเป็นเมตริกซ์สำหรับคอมพอสิตจะต้องมีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก หรือมีความยาวสายโซ่มากพอที่จะเกิดการพันกัน ข้อเสียของพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงก็คือความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลวจะสูง ไหลตัวยาก มักเป็นอุปสรรคในการขึ้นรูปคอมพอสิต อาจเกิดปัญหาของการสัมผัสหรือการเปียกของเมตริกซ์บนพื้นผิวของเส้นใยและการกระจายตัวที่สม่ำเสมอของเส้นใยในเมตริกซ์ นอกจากนี้เทอร์โมพลาสติกที่มีความแข็งแรงของสายโซ่สูงมักมีอุณหภูมิหลอมเหลวสูง ต้องให้ความร้อนหรือพลังงานมากในการขึ้นรูป เครื่องมือที่ใช้ในการขึ้นรูปราคาสูง นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทั้งเส้นใยและเมตริกซ์มาก อาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของทั้งสองส่วนที่ไม่เท่ากัน ทำให้เกิดช่องว่างหรือแรงเค้นภายในชิ้นงานคอมพอสิต โดยเฉพาะที่บริเวณอินเทอร์เฟซ หรือรอยต่อระหว่างเส้นใยและเมตริกซ์

เมตริกซ์ชนิดเทอร์โมพลาสติกนิยมใช้เส้นใยสั้น (short fibers) เป็นส่วนเสริมแรง โดยใช้การขึ้นรูปคอมพอสิตแบบการฉีดขึ้นรูป การอัดขึ้นรูป หรือการถ่ายเทขึ้นรูป เทอร์โมพลาสติกที่นิยมใช้เป็น

แมตริกซ์สำหรับคอมพอสิตต่างๆ ไป ได้แก่ พอลิโพรพิลีน (Polypropylene) พอลิเอไมด์หรือไนลอน (Polyamide)

เทอร์โมเซตเรซิน (Thermosetting resin)

เป็นแมตริกซ์ที่นิยมใช้ที่สุดสำหรับพอลิเมอร์คอมพอสิต มีขั้นตอนการขึ้นรูปได้ 3 ขั้นตอน คือ
ขั้นตอนที่ 1 ขั้นเอ (A stage)

ใช้เรียกขั้นตอนเริ่มแรกเมื่อสารตั้งต้นยังไม่เกิดการเชื่อมโยง ขั้นนี้วัสดุจะมีความหนืดต่ำ ไหลได้ง่าย สามารถเข้าแทรกระหว่างเส้นใยและสัมผัสกับพื้นผิวเส้นใยได้ดี

ขั้นตอนที่ 2 ขั้นบี (B stage)

ในบางขบวนการขึ้นรูปคอมพอสิต มีการทำแผ่นเส้นใยกับแมตริกซ์ที่เรียกว่า “พรีเพรก” (prepreg, preimpregnated sheet or tape) ขั้นตอนนี้แมตริกซ์จะถูกทำให้เชื่อมโยงบางส่วน (Partial curing) แต่ยังไม่สมบูรณ์ถึงจุดที่กลายเป็นเจล หรือจุดที่กลายเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติอย่างสมบูรณ์ แผ่นพรีเพรกนี้จะนำไปตัดและเรียงซ้อนกันเป็นชั้นตามทิศทางการเรียงของเส้นใยที่ต้องการ

ขั้นตอนที่ 3 ขั้นซี (C stage)

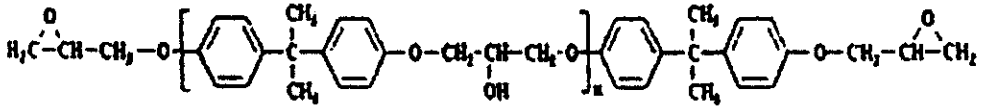
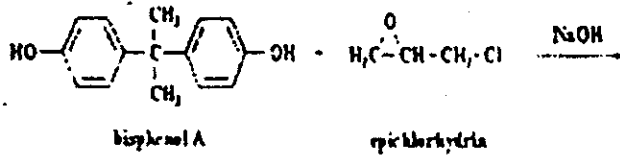
เป็นขั้นตอนสุดท้าย เมื่อทำการเชื่อมโยงแมตริกซ์เกิดจุดกลายเป็นเจล วัสดุเปลี่ยนเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติอย่างสมบูรณ์ คอมพอสิตแข็งตัวมีเสถียรภาพของรูปร่าง ไม่หลอมเหลวหรือละลายในตัวทำละลายใดๆ

การเชื่อมโยงของแมตริกซ์ชนิดเทอร์โมเซต จะทำให้เกิดการเชื่อมติดและการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลซึ่งทำให้วัสดุมีความแข็ง มีสมบัติเชิงกลที่ดี ทนทานต่อตัวทำละลาย มีเสถียรภาพต่อการออกซิเดชันและทนอุณหภูมิสูง เทอร์โมเซตเรซินที่นิยมใช้เป็นแมตริกซ์ มีดังนี้

1. อีพอกซี (Epoxy resins)

คือพอลิเมอร์ที่มีหมู่อีพอกซีซึ่งเป็นตำแหน่งที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเชื่อมโยง และทำให้เกิดการยึดเกาะที่ดีกับพื้นผิวเส้นใยเสริมแรง อีพอกซีเรซินนับเป็นพอลิเมอร์เทอร์โมเซตที่นิยมใช้มากที่สุดในการใช้เป็นแมตริกซ์สำหรับพอลิเมอร์คอมพอสิต เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลที่ดี มีสมบัติที่หลากหลายในช่วงกว้าง ขึ้นกับโครงสร้างโมเลกุล มีการยึดเกาะที่ดีกับเส้นใยต่างๆเป็นเรซินที่มีความสมดุลของสมบัติทางกายภาพเชิงกล ไฟฟ้า และมีการหดตัวต่ำ เมื่อเทียบกับเทอร์โมเซตชนิดอื่นๆ นอกจากนี้ยังมีความแข็งแรงสูง ทนต่อการเคมี มีเสถียรภาพของรูปร่างสูง ง่ายต่อการขึ้นรูป และราคาถูก

อีพอกซีสามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาของอีพิคลอโรไฮดริน (Epichlorohydrin) กับสารประกอบที่มีไฮโดรเจนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา โดยเตรียมจากปฏิกิริยาควมแน่นของ bis-phenol A กับ epichlorohydrin ดังปฏิกิริยา



รูปที่ 2.10 แสดงปฏิกิริยาการสังเคราะห์อีพอกซีเรซิน
ที่มา : สัมพันธ์ คัมภีรานนท์ (2525)

2. พอลิเอสเตอร์เรซิน (Polyester resin)

เป็นพอลิเมอร์ซึ่งประกอบด้วยหมู่เอสเตอร์ตั้งแต่สองหมู่ขึ้นไป เกิดการรวมตัวกันแบบควบแน่น (condensation polymerization) ของสารประกอบพวกไกลคอล (glycol) และ ไดเบสิกแอซิด (dibasic acid) คุณสมบัติของพอลิเอสเตอร์เรซิน มีดังนี้

คุณสมบัติทางกายภาพ

พอลิเอสเตอร์เรซินมีคุณสมบัติแข็ง ใส เหนียว และสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ดีกว่าพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติก แต่เมื่อเทียบกับโลหะ ความเหนียว ความยืดหยุ่น และความแข็งแรงจะเทียบกับโลหะไม่ได้ แต่ในปัจจุบันสามารถเพิ่มความแข็งแรงของพลาสติกชนิดนี้ได้โดยการเสริมใยแก้วหรือไฟเบอร์กลาส (fiber glass) ลงไปจะทำให้มีคุณสมบัติเบา เหนียว ไม่เปราะ และแข็งแรง

คุณสมบัติทางไฟฟ้า

พอลิเอสเตอร์เรซินมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าครบถ้วน สามารถนำไปใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าได้

คุณสมบัติทางเคมี

พอลิเอสเตอร์เรซินสามารถทนการกัดกร่อนของสารเคมี ไม่เป็นสนิม

พอลิเอสเตอร์เรซิน สามารถแบ่งตามองค์ประกอบเคมีได้ 5 ชนิด คือ

1. ออร์โธเรซิน (ortho resin)

เตรียมจากพทาสิกแอนไฮไดรด์ (phthalic anhydride) กับ (maleic anhydride) หรือ (fumaric acid) ได้เป็นออร์โธพทาติก (orthophthalics) ซึ่งเป็นพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดแรกเริ่มที่ยังคงเป็นที่นิยมใช้กันมากหลายๆ ด้าน แม้ว่าจะมีข้อจำกัดด้านเสถียรภาพต่อความร้อน สารเคมี และการใช้งานระหว่างกระบวนการผลิต แต่มีราคาถูก

2. ไอโซเรซิน (iso resins)

สามารถเตรียมได้จากกรดไอโซพทาสิก (isophthalic acid) กับ (maleic anhydride) หรือ (fumaric acid) ได้เป็นไอโซพทาสิก (isophthalics) ที่มีคุณสมบัติดีกว่า orthophthalics ในด้านคุณสมบัติทางกล ด้านการทนความร้อนและสารเคมี เพราะมีโครงสร้างโมเลกุลเป็นแบบเส้น และมีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า

3. บิสฟีนอลเอฟูมาเรต (bisphenol A(BPA)fumarates)

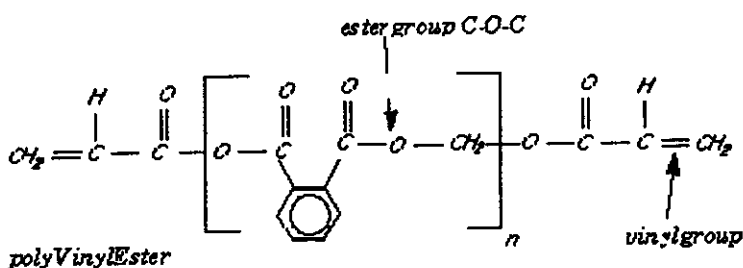
สามารถเตรียมจากพอกซีโพรพอกซีเลต (propoxylated) หรือเอทอกซีเลต (ethoxylated) ของ BPA กับ fumaric acid ซึ่งวงเบนซีนใน BPA ช่วยให้ทนอุณหภูมิได้สูงขึ้น แข็งและเปราะขึ้น รวมทั้งทนสารเคมีได้ดีขึ้น โดยเฉพาะในภาวะค้างแ่ จึงมักนำไปใช้งานที่ต้องการความทนทานมากขึ้น

4. กลอเรนดิค (chlorendics)

เตรียมได้จากกลอเรนดิคแอนไฮไดรด์ (chlorendic anhydride) หรือกรดกลอเรนดิค (chlorendic acid) กับ maleic anhydride หรือ fumaric acid เรซินพวกนี้ทนทานต่อสารเคมีได้ดีเยี่ยม เหมาะกับการใช้งานกับภาวะที่มีกรดแ่ โดยเฉพาะเมื่ออุณหภูมิสูงและหน่วงการลุกไหม้ เพราะมีหมู่คลอรีนอยู่ด้วย

5. ไวนิลเอสเทอร์ (vinyl ester)

เป็นชื่อสามัญของพอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัว (unsaturated polyester) ซึ่งสามารถเตรียมได้จากกรดไม่อิ่มตัว เช่น กรดเมธาคริลิก (methacrylic acid) หรือกรดอะคริลิก (acrylic acid) กับบิสฟีนอลไดอ็อกไซด์ (bisphenol diepoxide) พอลิเมอร์ที่ได้จะมีตำแหน่งไม่อิ่มตัวอยู่ที่ปลายโมเลกุล ซึ่งเมื่อนำไปผสมกับมอนอเมอร์ไม่อิ่มตัว เช่น สไตรีน รูปลักษณะภายนอก คุณสมบัติต่างๆ และการทำให้สุกจะทำได้เช่นเดียวกับพอลิเอสเทอร์สามัญอื่นๆ ดังนั้น ไวนิลเอสเทอร์ จึงนำไปใช้ได้เช่นเดียวกับพอลิเอสเทอร์อื่นๆ และมักใช้ทำคอมพอสิตสำหรับงานโครงสร้าง แม้ว่าจะมีราคาค่อนข้างแพงกว่า แต่ก็ให้คุณสมบัติทนความร้อนและคุณสมบัติทางกลได้มาก นอกจากนี้ไวนิลเอสเทอร์ยังทนทานต่อความล้าที่อุณหภูมิสูงได้ดี



รูปที่ 2.11 ไวนิลเอสเทอร์

ที่มา : <http://www.mse.mtu.edu/~drjohn/my4150/class10/fig7.gif>

คอมพอสิตที่ใช้พอลิเอสเตอร์เป็นเมทริกซ์ มักจะเกิดการหดตัวมากระหว่างการเกิดโครงตาข่ายหรือการทำให้สุก และไม่สามารถทนทานภาวะอากาศได้ดีเท่าอีพอกซี จึงไม่นิยมใช้เป็นคอมพอสิตขั้นสูง

2.3.1.2 วัสดุเสริมแรง (reinforcement material)

เป็นวัสดุที่ทำให้คอมพอสิตมีความแข็งแรงมักเป็นส่วนที่ไม่ต่อเนื่อง (discontinuous) วัสดุเสริมแรงมีลักษณะรูปร่างหลายแบบอาจเป็นแผ่น เส้นใย หรืออนุภาคเล็กๆ ก็ได้ วัสดุเสริมแรงที่นิยมใช้มีลักษณะเป็นเส้นใย (fiber) อาจเป็นเส้นใยต่อเนื่องหรือเส้นใยสั้น เส้นใยที่ใช้เสริมแรงในพอลิเมอร์คอมพอสิตมีหลายประเภทได้แก่

1)เส้นใยธรรมชาติ(natural fiber)

เส้นใยธรรมชาติที่รู้จักกันดีได้แก่ ป่าน ปอ ฝ้าย ไหม เป็นต้น ข้อดีของการนำเส้นใยธรรมชาติมาใช้สำหรับเป็นวัสดุเสริมแรงในวัสดุคอมพอสิตนั้นคือ ราคาต่ำ มีปริมาณในธรรมชาติ สามารถสร้างใหม่ได้(renewable resource) ย่อยสลายเองได้ตามธรรมชาติ แม้ว่าเส้นใยธรรมชาติส่วนใหญ่มีความแข็งแรงน้อยกว่าเส้นใยสังเคราะห์ เช่นเส้นใยแก้ว แต่ก็มเส้นใยธรรมชาติบางชนิดที่มีความแข็งแรงสูงกว่าเส้นใยแก้วเช่น ปอ ซึ่งมีค่ามอดูลัสสูงกว่าเส้นใยแก้ว ซึ่งทำให้วัสดุคอมพอสิตที่ได้มีค่าความแข็งตึง(stiffness) และความทนต่อแรงกระแทกสูง(high impact strength)

ตาราง 2.3 เปรียบเทียบสมบัติกายภาพของเส้นใยธรรมชาติ

ชนิดเส้นใย	ความหนาแน่น Mg/m ³	Cellulose (%)	Hemicellulose (%)	Lignin (%)
Wood	1.5	40	40	20
Jute	1.3	72	14	14
hemp	-	71	22	7
Sisal	0.7	74	-	26

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของเส้นใยธรรมชาติ

ชนิดเส้นใย	Young's modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Specific modulus GPa/(Mg/m ³)	Specific strength GPa/(Mg/m ³)
Wood	-	500	-	333
Jute	55.5	442	43	340
hemp	-	460	-	-
Sisal	17	530	24	757

2) เส้นใยสังเคราะห์ (synthetic fiber) ซึ่งแบ่งได้ 2 ประเภท

- เส้นใยอินทรีย์ได้แก่ เส้นใยอะรามิด เส้นใยพอลิเอสเตอร์ หรือเส้นใยพอลิเอทิลีน เป็นต้น
- เส้นใยอนินทรีย์ได้แก่ เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอนและแกรไฟต์ เส้นใยอะลูมินา เส้นใยโบรอน

และ เส้นใยซิลิกา

2.3.1.3 สารเติมแต่ง(additive)

สารเติมแต่งมีความสำคัญสำหรับพอลิเมอร์คอมพอสิตมาก ส่วนใหญ่แล้วเติมลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติการใช้งานให้ดีขึ้น หรือเติมลงไปในเรซินสำหรับการเตรียมวัสดุคอมพอสิตเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลของเรซิน ทำให้เกิดการสุกหรือแข็งตัว(curing agent) ซึ่งมักใช้คู่กับสารเคมีชนิดอื่น สารเคมีเติมแต่งที่สำคัญสำหรับการเตรียมวัสดุคอมพอสิตได้แก่

1) สารเร่งปฏิกิริยา (catalysts)

หมายถึงสารที่ทำให้สุก หรือสารทำให้แข็งตัว(hardener) ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดคือ Catalytic curing agents และ Coreactive

Catalytic curing agent หมายถึงสารเร่งการทำปฏิกิริยา ได้แก่สารที่ทำหน้าที่ก่ออนุมูลอิสระ (initiator) เพื่อก่อปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์ ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบประเภทเปอร์ออกไซด์ (organic peroxide) ซึ่งสารเปอร์ออกไซด์จะแตกตัวให้อนุมูลอิสระและเข้าทำปฏิกิริยา ณ ตำแหน่งที่มีพันธะคู่ในมอนอเมอร์ ซึ่งจะเกิดการสังเคราะห์กลายเป็นพอลิเมอร์ต่อไป สำหรับสารเร่งที่นิยมใช้ในพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว (unsaturated polyester resin) ได้แก่ methyl ethyl ketone peroxide(MEKPO), benzoyl peroxide, และ cumone hydroperoxide

MEKPO เป็นสารที่ระเบิดได้ดังนั้นห้ามผสมโดยตรงกับสารช่วยเร่ง (accelerators) คือ cobalt naphthenate เพราะจะเกิดปฏิกิริยารุนแรงจนลุกเป็นไฟได้

2) สารช่วยเร่งปฏิกิริยา(accelerators)

หมายถึงสารที่ใช้เพิ่มความว่องไวของการเกิดปฏิกิริยาการแข็งตัวของเรซิน หรือช่วยเร่งให้เกิดปฏิกิริยา ได้แก่ cobalt naphthenate ซึ่งมักใช้คู่กับ MEKPO หรือสาร diethyl aniline และ dimethyl aniline ซึ่งสารเหล่านี้จะเข้าไปช่วยให้ระยะเวลาการก่อเจลสั้นลงหรือทำให้เกิดเจลได้ที่อุณหภูมิต่ำลงหรือไม่ต้องใช้ความร้อนในการทำปฏิกิริยา

3) สารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยา (inhibitors)

ที่นิยมใช้คือ tertiary butyl catechol และ hydroquinone มักผสมมาแล้วในเรซิน โดยเฉพาะพอลิเอสเตอร์เรซิน ทั้งนี้เพื่อให้เรซินมีเสถียรภาพมอนอเมอร์ขณะเก็บ ป้องกันไม่ให้พอลิเมอร์เกิดการสังเคราะห์อย่างเต็มที่เร็วเกินไปในระหว่างการผลิต ป้องกันการเกิดเจลก่อนเวลาอันควร ในผลิตภัณฑ์กึ่งสมบูรณ์หรือขั้นตอนการนำไปใช้งานเช่นขึ้นการกวน หรือการใช้งานที่อุณหภูมิสูงมาก ๆ

4) สารลอกแบบจากแม่แบบ (mold releasing agent)

ใช้สำหรับการดึงลอกชิ้นงานออกจากแม่แบบให้ง่ายขึ้น ส่วนใหญ่เป็นสารหล่อลื่นเช่น ไข หรือ ซิลิโคน ที่ทาบนแม่แบบ ซึ่งสารที่ทาภายนอกนี้เรียกว่าสารหล่อลื่นภายนอก (external lubricant) นอกจากนี้ยังมีสารหล่อลื่นบางชนิดที่ผสมไปกับเรซินและเมื่อผ่านกระบวนการขึ้นรูปสารเหล่านี้จะแพร่ไปที่ผิวหน้าของชิ้นงานช่วยให้ชิ้นงานลอกออกจากแม่แบบได้ง่าย เราเรียกสารประเภทนี้ว่า สารหล่อลื่นภายใน (internal lubricants) เช่น zinc stearate

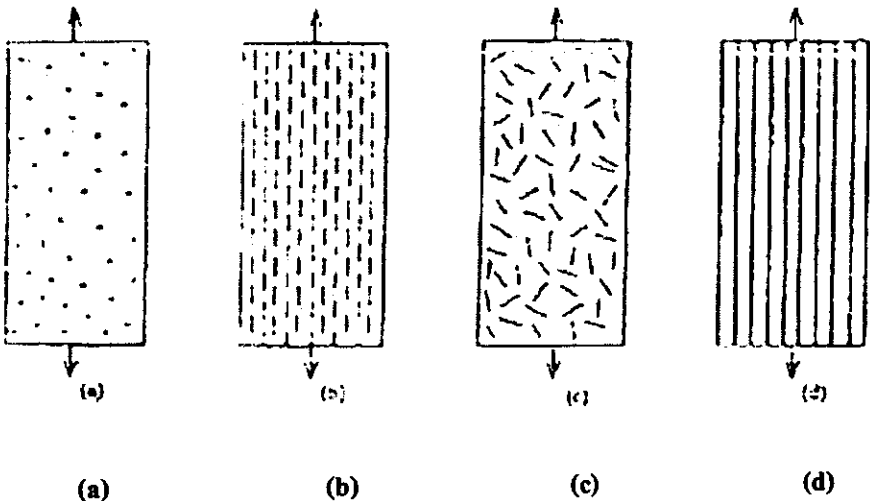
นอกจากนี้แล้วยังมีสารช่วยการกระจายอนุภาค (hyperdispersant) สารปรับความหนืด (rheology modifier) สารเชื่อมต้อ (coupling agent) สารลดการหดตัว (low shrink additive) สารดูดซับรังสีอุลตราไวโอเลต (UV stabilizers) เป็นต้น

2.4 ชนิดของคอมพอสิต

คอมพอสิตสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดใหญ่ๆ ดังนี้

- 2.4.1 คอมพอสิตแบบอนุภาค (particulate composites) เป็นคอมพอสิตที่เกิดจากการกระจายอนุภาคในเมทริกซ์ ซึ่งอนุภาคจะมีรูปร่างการจัดตัว และขนาดต่าง ๆ กัน อาจเป็นผง เม็ด หรือผลึก
- 2.4.2 คอมพอสิตแบบลามินาร์ (laminar composites) เป็นคอมพอสิตที่เกิดจากการยึดติดระหว่างแผ่นวัสดุกับเมทริกซ์ ในลักษณะคล้ายแซนวิช อัดด้วยความดันสูง ซึ่งจะให้เป็นชั้นๆ
- 2.4.3 คอมพอสิตแบบเส้นใย (fibrous composites) เกิดจากเส้นใยเสริมแรงในเมทริกซ์ ซึ่งเส้นใยอาจจะเป็นเส้นใยคาร์บอน (carbon fiber) เส้นใยอินทรีย์ (organic fiber) เส้นใยaramid (aramid fiber) เส้นใยธรรมชาติ (natural fiber)

นอกจากนี้คอมพอสิตสามารถเตรียมได้ในลักษณะต่างๆกัน ตามลักษณะ และการจัดเรียงตัวของสารเสริมแรง ดังแสดงในภาพที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การจัดเรียงตัวของวัสดุเสริมแรงในวัสดุคอมพอสิต

คุณหญิงนง อรรถภระวีสุนทร

- (a) ส่วนเสริมแรงเป็นอนุภาค จัดเรียงตัวแบบสุ่ม
- (b) ส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใยสั้น จัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน
- (c) ส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใยสั้น จัดเรียงตัวแบบสุ่ม
- (d) ส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใยยาว จัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน

ที่มา : เล็ก สีคง (2543)

2.5 การขึ้นรูปคอมพอสิต (composite fabrication)

ปัจจัยที่พิจารณาในการเลือกวิธีขึ้นรูปคอมพอสิต

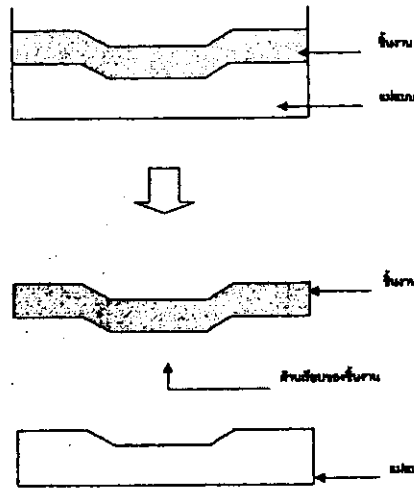
เมตริกซ์และส่วนเสริมแรงสามารถประกอบกันหรือขึ้นรูป (Fabrication) เป็นผลิตภัณฑ์คอมพอสิตได้หลายวิธี เช่น การขึ้นรูปคอมพอสิตด้วยเทคนิคการใช้มือ (hand lay up) การสเปรย์ (spray up) การคังรีค (pultrusion) การม้วนพัน (filament winding) เป็นต้น มีปัจจัยหลายประการที่จะต้องพิจารณาประกอบการเลือกวิธีขึ้นรูปคอมพอสิต ได้แก่

- รูปร่าง ขนาด และจำนวนผลิตภัณฑ์คอมพอสิตที่จะผลิต
- เส้นใยเสริมแรง ได้แก่ ชนิดและความยาวของเส้นใย สมบัติของเส้นใย เป็นต้น
- เมตริกซ์ ได้แก่ ชนิดของเมตริกซ์ สมบัติของเมตริกซ์ เป็นต้น
- การเรียงตัวของเส้นใยเส้นใยเส้นแรง
- เครื่องมือเครื่องจักรที่ใช้ในการขึ้นรูป
- ต้นทุนการผลิต

กระบวนการผลิตขึ้นรูปวัสดุคอมพอสิตแบ่งได้ 2 ประเภทคือกระบวนการผลิตแบบแม่แบบเปิด และแบบปิด

2.5.1 กระบวนการผลิตแบบแม่พิมพ์แบบเปิด (open mould processer)

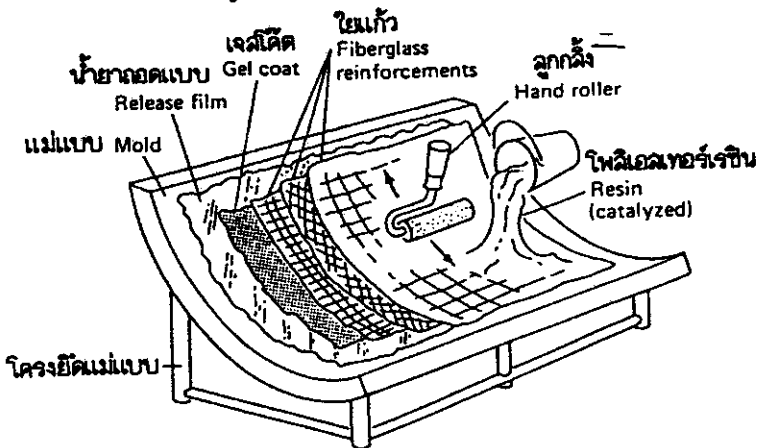
คือกระบวนการผลิตที่แม่แบบสัมผัสชิ้นงานเพียงด้านเดียว และเมื่อถอดชิ้นงานออกจากแม่แบบ จะได้ชิ้นงานที่มีหน้าเรียบเพียงด้านเดียว ซึ่งกระบวนการผลิตแบบนี้มีหลายเทคนิค



รูปที่ 2.13 กระบวนการผลิตแบบแม่พิมพ์เปิด

2.5.1.1 Hand lay up method

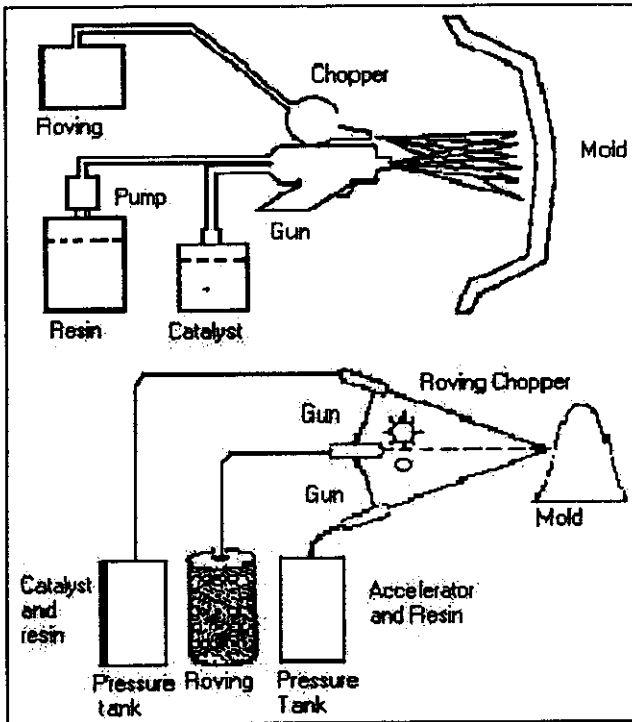
เป็นกระบวนการที่นิยมใช้กันแพร่หลายมากที่สุด สะดวกในการทำงานและง่าย ลงทุนค่าเครื่องมือหาง่าย สามารถใช้ได้ทั้งการผลิตชิ้นงานที่มีขนาดเล็กและใหญ่



รูปที่ 2.14 การผลิตแบบ Hand lay up method

2.5.1.2 Spray up

เป็นกระบวนการผลิตแบบใช้เครื่องพ่น โดยเครื่องพ่นจะพ่นใยแก้วพร้อมกับเรซินลงไปบนผิวหน้าของแม่แบบโดยตรง โดยเครื่องพ่นจะมีหัวพ่นที่สามารถตัดเส้นใยแก้วให้เป็นเส้นสั้นๆ ขณะเดียวกันเรซินและตัวทำปฏิกิริยาจะถูกบีบส่งมาผสมที่หัวพ่นเช่นกัน แล้วพ่นออกจากเครื่องพ่นด้วยแรงอัดจากปั๊มลม ทำให้เส้นใยและเรซินถูกพ่นออกมาเกาะที่แม่แบบ จากนั้นใช้ลูกกลิ้งรีดทับช่วยอัดเส้นใยและเรซินเกาะแนบสนิทบนผิวหน้าแม่แบบและรีดไล่ฟองอากาศอีกครั้ง

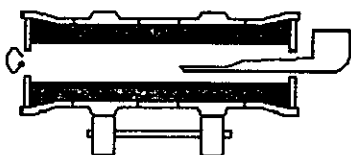
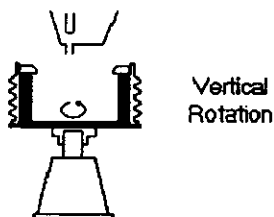
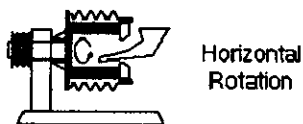


รูปที่ 2.15 การผลิตแบบ Spray up

http://www.highlineproducts.com/images/spray_lay-up.gif

2.5.1.3 Centrifugal casting

กระบวนการผลิตแบบหล่อเหวียงมีแม่แบบรูปทรงกระบอกและหมุนรอบตัวเองด้วยความเร็วสูง โยแก้วเสริมแรงอาจจะวางในแม่แบบหรือจะพันเส้นใยออกมาพร้อมกับเรซินที่ถูกฉีดจากหัวฉีดที่ขึ้นเข้าภายในแม่แบบได้ เมื่อเรซินถูกฉีดเข้าแม่แบบ ขณะเดียวกันที่แม่แบบหมุนรอบตัวเองด้วยความเร็วสูงจะเกิดแรงเหวียงให้เส้นใยเสริมแรงและเรซินแบบกับผิวด้านในของแม่แบบ ทำให้ชิ้นงานมีความหนาเท่ากันและผิวด้านนอกของชิ้นงานที่สัมผัสกับผิวแม่แบบด้านในจะเรียบ เมื่อปล่อยให้แข็งตัวก็สามารถถอดชิ้นงานออกจากแม่แบบได้ง่าย กระบวนการแบบนี้เหมาะสำหรับงานที่มีรูปทรงกระบอกและต้องการให้ผิวภายนอกของชิ้นงานเรียบเช่น ถัง ท่อ เสาไฟฟ้า เสาทรงท่อร้อยสายโทรศัพท์ เป็นต้น



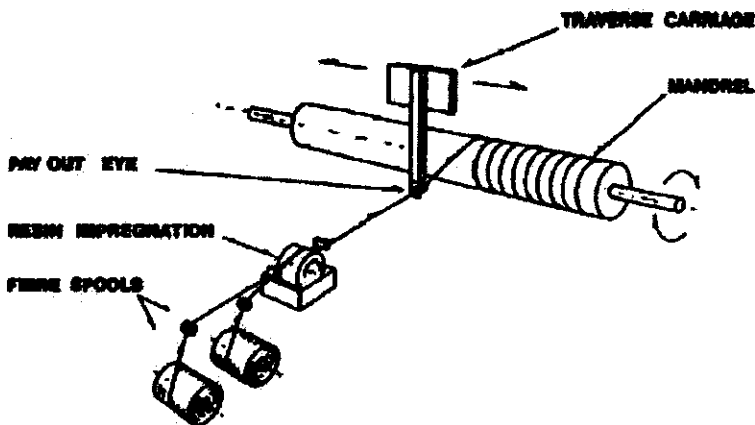
Sand Lined Mold Casting Machine

รูปที่ 2.16 การผลิตแบบ Centrifugal casting

<http://www.southwestcustom.com/images/centcast.gif>

2.5.1.4 Filament winding

กระบวนการแบบพัน จะใช้เส้นใยเสริมแรงแบบเส้นใยยาว ชุบผ่านอ่างน้ำยา เดิมเรซินที่ผสมแข็งตัวแล้วนำไปพันรอบบนแม่แบบที่หมุนรอบตัวเองได้ จนมีความหนาตามต้องการ จากนั้นปล่อยให้แข็งตัว และถอดแบบ

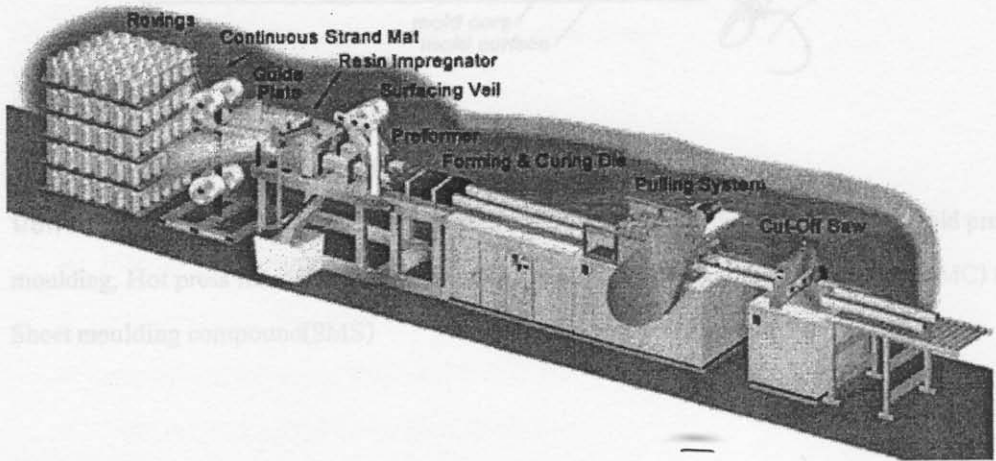


รูปที่ 2.17 การผลิตแบบ Filament winding

<http://www.tifac.org.in/news/acfil.jpg>

2.5.1.5 Pultrusion

กระบวนการผลิตแบบดึงรีด เส้นใยเสริมแรงจะวิ่งจากถาดบรรจุขึ้นที่ผสมตัวทำแข็งแล้ว (hardener) และถูกดึงผ่านเข้าแม่แบบหน้าตัด(die)ซึ่งติดเครื่องให้ความร้อน (heater) ชิ้นงานจะแข็งแรงสมบูรณ์ได้รูปร่างตามแบบแม่แบบที่พร้อมตัดได้ตามความยาวที่ต้องการ ชิ้นงานที่ผลิตได้จากกระบวนการนี้จะให้อัตราส่วนของเส้นใยเสริมแรงที่สูงมาก อีกทั้งเส้นใยเสริมแรงจะจัดเรียงตัวตามความยาวของชิ้นงาน ทำให้ค่าความแข็งแรงตามแนวยาวมีค่าสูงสุดที่พึงมีได้ กระบวนการแบบนี้เหมาะสำหรับชิ้นงานที่ต้องการความยาวเช่น แท่งตัน คันเบ็ดตกปลา ก้านร่ม เสาเด็ทท์ เป็นต้น



รูปที่ 2.18 การผลิตแบบ Pultrusion

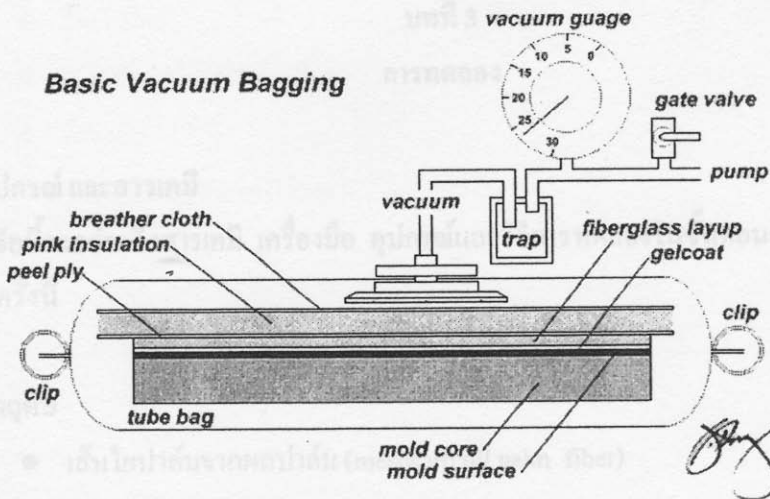
<http://www.housing.nu/pultrusion.jpg>

2.5.2 กระบวนการผลิตระบบแม่แบบปิด (close mould processor)

คือกระบวนการผลิตที่ใช้แม่แบบแบบปิดประกบกับชิ้นงาน เมื่อถอดแม่แบบออกจากกันจะได้ชิ้นงานที่มีความเรียบทั้งสองด้านเนื่องจากชิ้นงานสัมผัสแม่แบบทั้งชิ้น สามารถแบ่งได้หลายประเภทดังนี้

2.5.2.1 Vacuum bagging

กระบวนการผลิตแบบสุญญากาศเป็นกระบวนการที่ง่ายที่สุดโดยใช้ม้อัดวางเส้นใยเสริมแรงพร้อมทาระซินลงบนแม่แบบปิด จากนั้นวางฟิล์มลวดแบบ และฟิล์มสุญญากาศ คลุมผิวหน้าแม่แบบปิดยึดขอบให้แนบสนิทกับขอบแม่แบบ จากนั้นสูบลมอากาศภายในระหว่างชั้นฟิล์มสุญญากาศ และแม่แบบออก ความดันภายนอกจะกดทับแผ่นฟิล์มสุญญากาศให้แนบสนิทกับผิวแม่แบบ ซึ่งสามารถใช้ลูกกลิ้งช่วยรีด ไปบนฟิล์มสุญญากาศ เพื่อช่วยรีดชิ้นงานให้แนบสนิทกับผิวแม่แบบอย่างสมบูรณ์



รูปที่ 2.19 การผลิตแบบ Vacuum bagging

<http://www.bertram31.com/proj/tips/vacuum-bag.gif>

นอกจากนี้ยังมีกระบวนการผลิตระบบแม่แบบปิดชนิดอื่นๆ ได้แก่ Pressure bagging, Cold press moulding, Hot press moulding, Resin transfer moulding, Bulk moulding compound(BMC) และ Sheet moulding compound(SMS)

- unmodified polyester (POLYLITE P.C. 5001, MK Group)
- MEKPO PUTANOX M-60 (MK Group)
- CORAL (MK Group)
- Silicone resin (SILASTIC, MK Group)
- Hardener (MK Group)