วัสดุเสริมแรง

ดร. สมศักดิ์ นะวิโรจน์
บริษัท เอเชียกาสไฟเบอร์ อินดัสตรี จำกัด
เลขที่ 80-86 ถ. อโศก-ดินแดง
ห้วยขวาง กทม. 10310

ความเป็นมาของวัสดุเสริมแรง

1. ประวัติและการใช้วัสดุเสริมแรง

จากอดีตกาล มนุษย์ได้อาศัยทรัพยากรธรรมชาติในการพัฒนาที่อยู่อาศัยและข้าวของเครื่องใช้ของตนมาโดยตลอด เช่น การพักอาศัยตามถ้ำเพื่อหลบภัยธรรมชาติของมนุษย์ยุคหิน การนำหิมะมาสร้างที่พักของชาวเอสกิโม การนำดินเหนียวมาสร้างที่พักของชาวญี่ปุ่น ฯลฯ มนุษย์พยายามคิดค้นสร้างสรรค์วิธีการต่าง ๆ ในการทำให้ที่พักอาศัยและข้าวของเครื่องใช้มีความแข็งแรงทนทานยิ่งขึ้น โดยการนำวัสดุอื่น ๆ มาเสริมแรง เช่น การนำหญ้าหรือฟางมาเป็นตัวเสริมแรงให้ดินเหนียวมีความยึดเกาะกันและแข็งแรง คงทน เป็นต้น ในลักษณะการดังกล่าวนี้จึงเป็นจุดเริ่มต้นความเป็นมาของวัสดุเสริมแรงนั่นเอง

มาเมื่อสมัย 250 ปีก่อนคริสต์ศักราช ประเทศทางยุโรป เช่น ประเทศกรีกมีเทคนิคในการหลอมทรายเพื่อการผลิตแก้ว ประเทศซีเรียและอียิปต์ก็มีเทคนิคในการดึงน้ำแก้วให้เป็นเส้นเพื่อใช้ในการตกแต่ง เทคนิคในการดึงน้ำแก้วได้แพร่หลายมาทางด้านประเทศออสเตรียและอิตาลีในศตวรรษที่ 16-17 ในปี ค.ศ. 1650-1720 ผู้ผลิตแก้วต่าง ๆ ในประเทศอังกฤษ ประเทศเยอรมัน และประเทศฝรั่งเศส สามารถดึงน้ำแก้วซึ่งหลอมเหลวนี้ออกมาเป็นเส้นใยซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กมาก และในปี ค.ศ. 1832 สามารถนำเส้นใยแก้วนี้มาพันเป็นกระสวยและทอเป็นผืนเพื่อใช้ในการตกแต่ง ในปี ค.ศ. 1893 มีผู้ลงทุนชาวอเมริกันในเมืองแม็กซิโกชื่อ Edward Drummond Libbey และ Michael J. Owens พยายามผลิตเส้นใยแก้วเพื่อออกสู่ตลาดจนเป็นผลสำเร็จในปี ค.ศ. 1930 อย่างไรก็ตามการใช้เส้นใยแก้วก็ไม่ได้แพร่หลายในปี ค.ศ. 1937 มีการจัดตั้งบริษัทในประเทศสหรัฐอเมริกาเพื่อการผลิตเส้นใยแก้วออกสู่ตลาด จากการค้นคว้าที่ Purdue University ปรากฏว่า ผลิตภัณฑ์จากแก้วนี้มีลักษณะขาวคล้ายขนสัตว์ซึ่งนิยมใช้เป็นฉนวนกันความร้อนและฟิวเตอร์ ส่วนเส้นใยที่มีความยาวก็ได้ถูกนำมาถักเป็นผ้าเพื่อใช้เป็นแผงวงจรไฟฟ้า ในปี ค.ศ. 1935 ได้มีการค้นพบพลาสติกซึ่งเรียกว่า โพลีเอสเตอร์เรซิน การค้นพบนี้เองทำให้พลาสติกเสริมแรงเริ่มมีความแพร่หลายมากขึ้น

การขยายการใช้งานของวัสดุเสริมแรงนั้นมีมากขึ้นเนื่องจากการพัฒนาการผลิตวัสดุเสริมแรงโดยวิธีต่าง ๆ ในสมัยสงครามโลกครั้งที่ 2 พลาสติกเสริมแรงในสมัยนั้นถูกนำมาใช้เป็นผลิตภัณฑ์ด้านอากาศยานและเกราะป้องกันกระสุนเป็นส่วนใหญ่ หลังจากเสร็จสิ้นสงครามผลิตภัณฑ์ทางทหารเหล่านั้นได้ถูกประยุกต์มาเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อใช้ในครัวเรือน ในปี ค.ศ. 1965 การใช้วัสดุเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วเติบโตขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากคุณสมบัติของเส้นใยแก้วนั้นมีการพัฒนาให้แข็งแรงขึ้น ในปัจจุบันวัสดุเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วได้เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย รวมทั้งเส้นใยประเภทอื่น ๆ เช่น เส้นใยคาร์บอนกราไฟท์และเส้นใยอะรามิด

2. ความหมายและองค์ประกอบของวัสดุเสริมแรง

2.1 ความหมาย

ความหมายของคำว่า วัสดุเสริมแรง (Fiber Reinforced Plastics (FRP)) หรืออีกชื่อหนึ่งที่รู้จักกันทั่วไปก็คือ วัสดุผสม (Composite Material) ควบคุมกว้างขวาง อธิบายได้ว่า วัสดุ 2 ชนิดหรือมากกว่าเมื่อนำมา

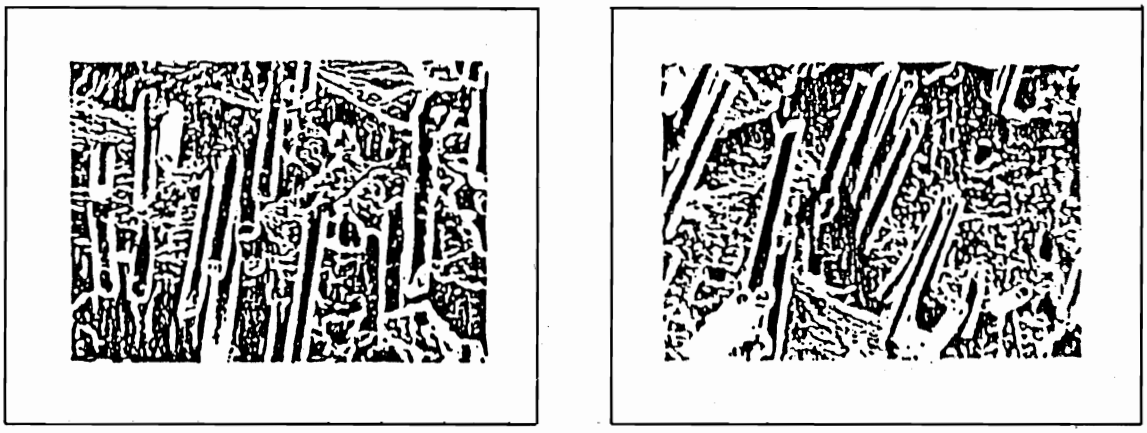
ผสมเข้ากันแล้วก็จะได้วัสดุอีกประเภทหนึ่งซึ่งมีคุณสมบัติดี เช่น การนำไฟเบอร์กล้าสมาผสมกับเรซิ่นหรือพลาสติก เราก็จะได้พลาสติกเสริมแรงที่เรียกว่า Fiber reinforced plastics หรือย่อว่า "FRP"

Definition of composite / FRP :

Material A + Material B = COMPOSITE

FIBERGLASS + RESIN = F R P

STEEL ROD + CEMENT = CONCRETE



รูปที่ 1 รูปขยายของวัสดุเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว

เมื่อเราจะเปรียบเทียบไฟเบอร์กล้าส เพื่อความง่ายเราอาจจะมาดูว่า ไฟเบอร์กล้าสนั้นเปรียบเหมือนเหล็กเส้นในคอนกรีต และซีเมนต์ก็เปรียบเหมือนเรซิ่นนั่นเอง คอนกรีตเสริมเหล็กจะใช้เหล็กเพื่อเป็นที่ยึดเกาะของซีเมนต์ ให้คอนกรีตนั้นมีความแข็งแรงมากกว่าซีเมนต์ธรรมดา เหล็กเส้นให้ความแข็งแรงทางด้านโครงสร้างของคอนกรีต ถ้าไม่ใช้เหล็กเส้น คอนกรีตก็จะไม่มีความแข็งแรง ไฟเบอร์-กล้าสก็เช่นเดียวกันให้ความแข็งแรงในพลาสติก หากไม่มีไฟเบอร์กล้าส พลาสติกก็มีความแข็งแรงน้อยลง

2.2 องค์ประกอบหลักของวัสดุเสริมแรง

อะไรที่เป็นส่วนผสมของพลาสติกเสริมแรง ส่วนผสมต่าง ๆ ในพลาสติกเสริมแรงรวมทั้งการยึดเกาะระหว่างผิวของส่วนผสมต่าง ๆ นั้น ทำให้คุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ใหม่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น FRP จะมีส่วนผสมหลัก 3 ส่วนด้วยกัน คือ

1. REINFORCEMENT/FILLER
2. RESINS
3. ADDITIVES

ส่วนที่ 1 สารเสริมแรง (REINFORCEMENT / FILLER)

- Fibrous : Fiberglass, Carbon
- Powder : Calcium, Kaolin
- Flake : Mica

โดยทั่วไปแล้วสารที่ใช้ในการเสริมแรงหรือเราเรียกว่า รีอินฟอซซิ่ง เอเจ้น (Reinforcing agent) อาจจะผลิตขึ้นมาจากผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น พวกเส้นไฟเบอรัส (Fibrous) ผง (Powdered) หรือพวกเป็นแผ่นชิ้นเล็ก ๆ ต่าง ๆ ที่เราเรียกว่า Flake หรือ Whisker ในรูปร่างลักษณะต่าง ๆ ของตัวเสริมแรงนี้ทางเคมียังแยกออกมาได้เป็นอินทรีย์ อนินทรีย์หรือโลหะ

ส่วนที่ 2 เรซิ่น (RESINS)

THERMOPLASTIC	THERMOSET
– Polyethylene	– Unset. Polyester
– Polypropylene	– Epoxy
– Polystyrene	– Phenolic
– Nylon	– Polyimide

เรซิ่นอาจจะถูกแยกออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ เช่น

1. เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic)

เทอร์โมพลาสติกเรซิ่นหรือพลาสติกประเภทนี้สามารถนำมาหลอมเหลวและขึ้นรูปเป็นรูปผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้ เมื่ออุณหภูมิสูงพลาสติกก็จะหลอมตัว และเมื่อ

อุณหภูมิเย็นพลาสติกก็จะแข็งตัวเป็นรูปผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ตามแม่แบบแม่พิมพ์เทอร์โมพลาสติกนี้ก็อาจจะรวมถึง โพลีเอทิลีน โพลีโพรไพลีน โพลีสไตร์รีน ไนลอนและอื่น ๆ

2. เทอร์โมเซ็ท (Thermoset)

พลาสติกประเภทนี้จัดอยู่ว่าเป็นประเภทที่ไม่สามารถละลายหรือหลอมเหลวได้อีกหรือจากความร้อน พลาสติกประเภทนี้จะมีการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีขึ้นเพื่อทำให้ของเหลวนั้นกลายเป็นของแข็ง เราอาจจะยกตัวอย่างของเทอร์โมเซ็ทพลาสติกได้หลายประเภทด้วยกันเช่น อันเซ็ททูเรทเต็ท โพลีเอสเตอร์ (Unsaturated Polyester) ฟีโนลิค (phenolic) อีพอกซี่ (epoxy) ซิลิโคน (silicone) เมลามีน (melamine) โพลีอีมิด (polyimide) และอื่น ๆ ในปัจจุบันนี้การใช้เทอร์โมเซ็ทเรซิ่นนั้นมีอยู่มากด้วยกัน ตัวโพลีเมอร์หลัก ๆ ของเทอร์โมเซ็ทก็คือ โพลีเอสเตอร์ ฟีโนลิค และอีพอกซี่ 3 ประเภทนี้เป็นตัวที่ใช้มากที่สุดในตลาดโลก

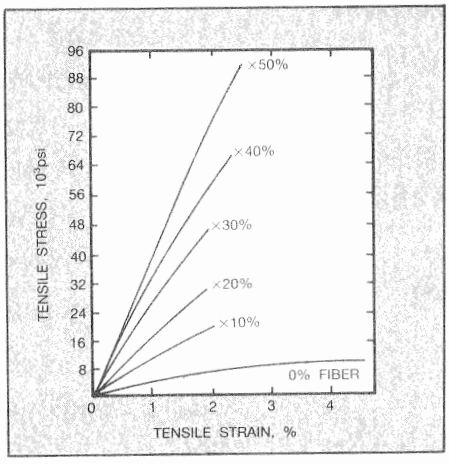
ส่วนที่ 3 สารเสริมแต่ง (Additives) คือสารผสมเติมแต่งที่ช่วยให้พลาสติกเสริมแรงมีสีสันสวยงามและทนต่อแสงแดด ได้แก่

- U V Stabilizer
- Colorant
- Low Profile Agent
- etc

2.3 ประโยชน์ของการใช้วัสดุเสริมแรง

การเพิ่มความแข็งแรงทางด้านเทนไซล์ (Tensile) และเฟลกชัวรัล (Flexural) การเพิ่มความแข็งแรง โมดูลัส (Modulus) หรือความแกร่ง การเพิ่มความแข็งแรงต่อน้ำหนัก การเพิ่มความแข็งแรงต่อการรับแรงกระแทกการใช้งานในอุณหภูมิสูง การที่มีเสถียรภาพในด้านขนาดและความยาวต่าง ๆ ไม่เกิดการหดตัวหรือยืดตัวง่ายโดยความร้อน คุณสมบัติที่ดีขึ้นในด้านการล้า เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี และสามารถใช้งานโครงสร้างต่าง ๆ ได้ดี เมื่อเราขยายความออกไปให้มากไปกว่านี้เราอาจจะบอกไปได้ว่า เนื่องจากเส้นใยนั้นมีโมดูลัสหรือความแกร่งค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่น ๆ แก้วนั้นมีโมดูลัสค่อนข้างสูง ส่วนเรซิ่นเองมีการยืดหยุ่นได้ดี ฉะนั้นเมื่อเรานำเอาวัสดุ 2 อย่างนี้ คือ เส้นใยแก้วและเรซิ่นมาผสมกันให้เกิดเป็นวัสดุผสมหรือที่เรียกว่า Composite เราจะได้คุณสมบัติของ Composite นี้ดีกว่าวัสดุแต่ละอย่างที่แยกกันอยู่ ความแข็งแรงต่อน้ำหนักมีความสำคัญยิ่ง เช่นในการใช้การในด้านเครื่องบินก็ตามเราต้องการความเบา และในขณะเดียวกันก็ต้องการความแข็งแรงของโครงสร้าง ความแข็งแรงและเบาเป็นคุณลักษณะดีที่ถูกนำมาใช้กับรถยนต์หรือเรือเพื่อให้การเผาผลาญเชื้อเพลิงนั้นน้อยลง การรับแรงกระแทกก็ตาม เนื่องจากไฟเบอร์กล้าสมีเส้นใยที่ต่อเนื่องหรือที่เรียกว่า คอนทินิวอัส (continuous) แรงกระแทกนั้นก็จะถูกถ่ายทอดไปตามเส้นใย ทำให้ชิ้นงานนั้นสามารถรับแรงกระแทกนั้นได้ดีขึ้น

นอกจากเส้นใยแก้วแล้วยังมีเส้นใยประเภทอื่นที่มีโมดูลัสสูง เช่น เส้นใยอะรามิด (Aramid) ในรูปที่ 2 นี้เป็นกราฟความแข็งแรง (Stress-Strain) ของเส้นใยอะรามิด (Aramid) (Kevlar 49) ในเรซินประเภท Polymethylemethacrylate (PMMA) จะเห็นได้ว่าความแข็งแรงของวัสดุนั้นเพิ่มขึ้นอย่างมาก เมื่อเสริมเส้นใยถึง 50%



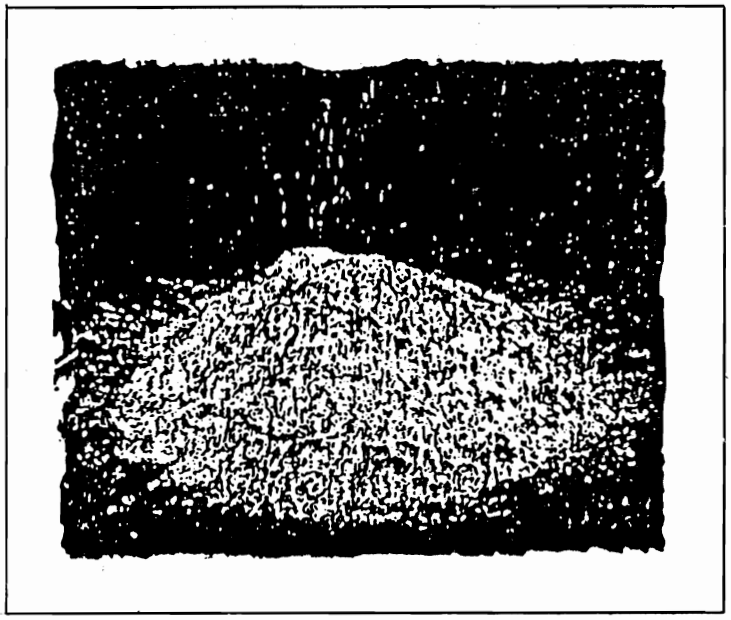
รูปที่ 2 กราฟ STRESS-STRAIN ของเส้นใย ARAMID ใน PMMA

2.4 รูปแบบและคุณลักษณะของสารเสริมแรง (Reinforcement)

รูปแบบของสารเสริมแรงนั้นมีหลายแบบและควรเลือกใช้ให้เหมาะสมในแต่ละงาน การกล่าวต่อไปนี้คือรูปแบบต่าง ๆ ของเส้นใยที่สามารถนำมาใช้ในงานเสริมแรงได้ :

2.4.1 เส้นใยสั้น (Chopped Strand)

เส้นใยสั้นที่ถูกตัดให้มีความยาวประมาณ 1/8 ถึง 1/2 นิ้ว เส้นใยสั้นนี้จะนำมาผสมกับโพลีเมอร์เรซิ่นให้เกิด molding compound เพื่อใช้ในการอัดขึ้นรูปหรือการฉีดต่อไป เส้นใยสั้นนี้ได้ถูกนำมาใช้ในเทอร์โมพลาสติกเป็นส่วนมาก สามารถนำมาใช้แทนการ Extrusion การรีดและการฉีด (Injection) การใช้งานทั่ว ๆ ไปของเส้นใยก็มีในตัวถังรถยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ เครื่องใช้สำนักงาน และชิ้นส่วนอิเล็คทรอนิค



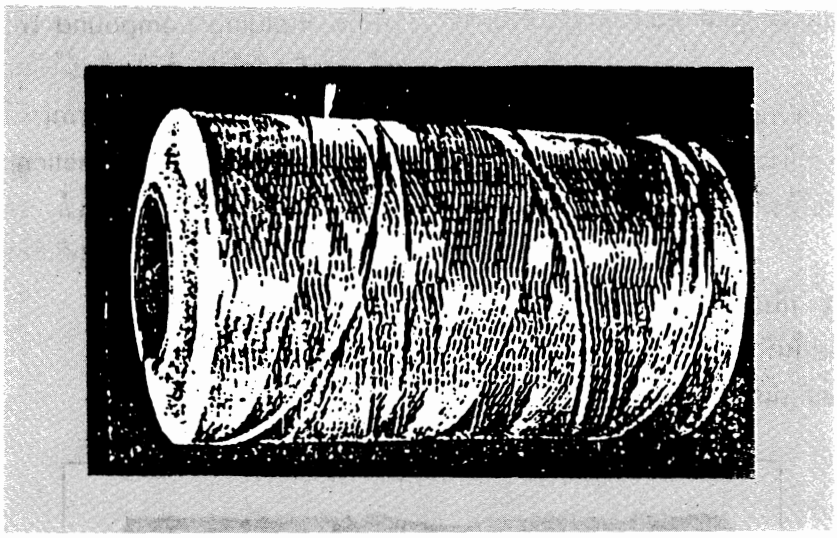
รูปที่ 3 Chopped Strand

2.4.2 เส้นใยปั่น (Milled fiber)

เส้นใยประเภทนี้เป็นเส้นใยที่มีความยาวค่อนข้างสั้นตั้งแต่ 1/32 นิ้ว จนถึง 1/4 นิ้ว การใช้งานของเส้นใยประเภทนี้ก็ใช้ได้ทั้งในเทอร์โมพลาสติก เทอร์โมเซ็ท การใช้งานของเทอร์โมพลาสติกนั้นอาจจะนำมาผสมในโพลีเมอร์เรซิ่นเพื่อใช้ในการฉีด หรือที่เรียกว่า (Injection) เส้นใยประเภทนี้สามารถนำมาผสมได้ในเทอร์โมพลาสติกหลายประเภทด้วยกันไม่จำกัดการผสม เส้นใยประเภทนี้เทอร์โมพลาสติกก็จะทำให้ชิ้นงานมีคุณสมบัติดีขึ้นและรับแรงได้สูงขึ้น เส้นใยประเภทนี้ก็ยังถูกนำมาใช้ในเทอร์โมเซ็ทอีกด้วยเพื่อใช้ในการหล่อ (Casting) หรือว่าในการขึ้นรูปด้วยวิธีการอัด (Compression Molding)

2.4.3 เส้นใยยาว (Continuous roving)

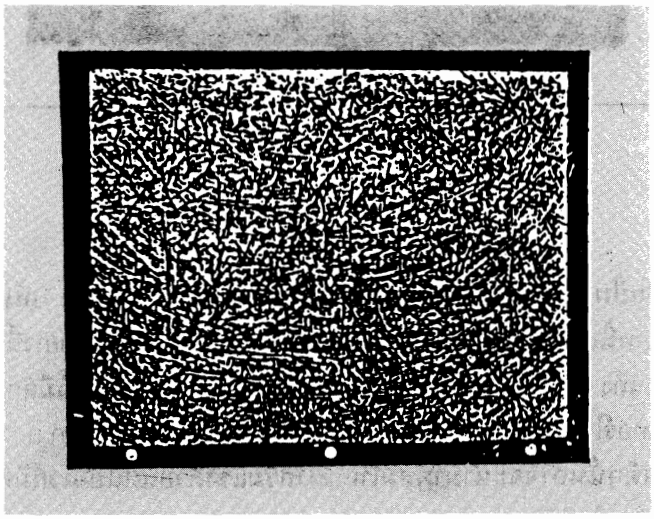
เส้นใยยาวนี้เป็นเส้นใยยาวที่มีความต่อเนื่อง เราจะเห็นได้ว่าเส้นใยนี้มีลักษณะเป็นม้วน ม้วนหนึ่งอาจจะหนักประมาณ 15 ก.ก. ในการผลิตชิ้นงานพลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใยยาวก็มีหลายวิธีด้วยกัน เช่น การพัน (Filament winding) การพ่น (Spray-up) การทำเป็นแผ่นอย่างต่อเนื่อง (Continuous laminating) ประเภทของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่ใช้เส้นใยยาวก็คือ การผลิตท่อ ถังเสาไฟฟ้า แกนปีกเครื่องบิน (spar) หรือใบพัด Helicopter (Rotor Blade) เป็นต้น



รูปที่ 4 Continuous Roving

2.4.4 เส้นใยเสริมแรงประเภทเสื่อ (Reinforcing mat) หรือ (Chopped strand mat)

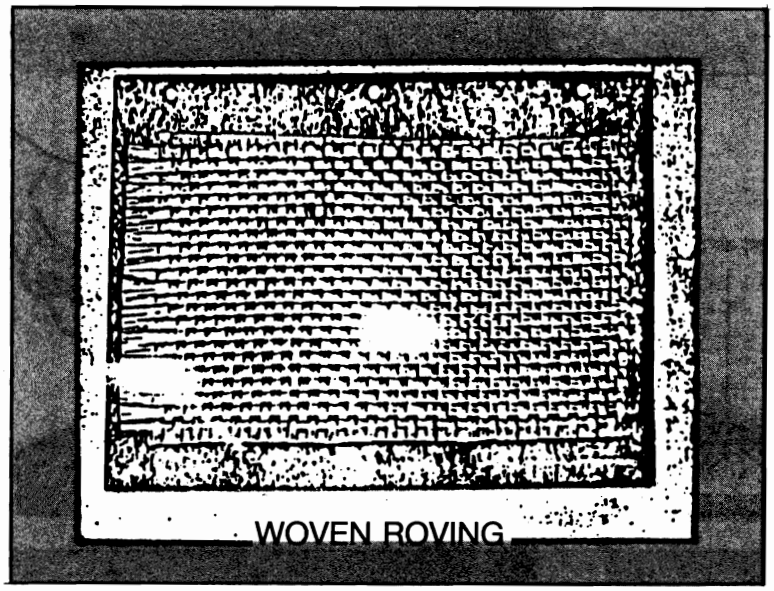
เส้นใยแบบเสื่อนี้ใช้กันมากทั้งในและต่างประเทศ เส้นใยประเภทนี้ได้มาใช้ในระบบเทอร์โมเซ็ทเป็นส่วนใหญ่ กองทัพอากาศก็ใช้เส้นใยประเภทนี้ในการผลิตครีบหางของลูกระเบิด แม่แบบในการหล่อและอื่น ๆ เนื่องจากเส้นใยนี้มีความแข็งแรงและจะดึงตัวกันในทุกทิศทาง (Random Orientation) จึงทำให้ชิ้นงานที่ผลิตขึ้นมาด้วยระบบเส้นใยเสื่อมีความแข็งแรงเท่ากันในทุกทิศทาง และอาจจะนำมาใช้ในกรรมวิธีการผลิตที่เรียกว่า (Hand lay-up)



รูปที่ 5 Chopped Strand Mat

2.4.5 เส้นใยสาน (Woven roving)

เส้นใยสานนี้มีคุณสมบัติเป็นพิเศษ ลักษณะคล้ายกับผ้า ซึ่งถูกนำมาทอให้มีเส้นใยวิ่งตั้งฉากกัน 90 องศา เส้นใยสานนี้สามารถให้ปริมาณของเส้นใยแก้วในพลาสติกค่อนข้างสูงและสามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กับผลิตภัณฑ์ได้มาก การใช้เส้นใยสานนั้นเน้นอยู่ที่ว่าผลิตภัณฑ์ต้องการความแข็งแรงสูง เช่น โครงเรือ โครงสร้างเครื่องบิน Fan Trainer ที่ต้องการความแข็งแรงสูง



รูปที่ 6 Woven Roving

2.4.6 สิ่งทอ (Woven Fabric)

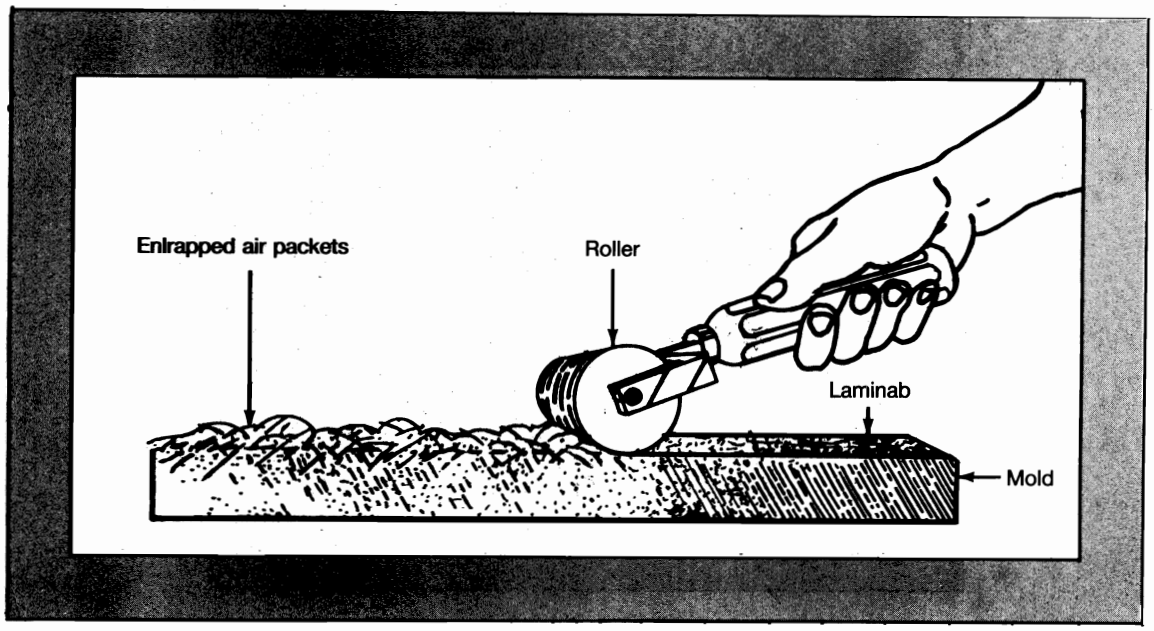
เส้นใยแก้วสามารถนำมาทอให้เป็นลักษณะของผ้าได้เป็นอย่างดี การใช้สิ่งทอที่ทำด้วยเส้นใยแก้วนั้นก็ให้ความแข็งแรงต่อผลิตภัณฑ์นั้น เช่น การทำแผงวงจรไฟฟ้า (Print circuit board) และผลิตภัณฑ์ทางด้านการบินต่าง ๆ เช่น พื้นของเครื่องบินโดยสาร

3. วิธีการผลิตต่าง ๆ

กรรมวิธีการผลิตวัสดุเสริมแรงนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายวิธีแต่ละกรรมวิธีนั้นมีข้อดีแตกต่างกันไป เราจะกล่าวถึงกรรมวิธีการผลิตวัสดุเสริมแรงดังต่อไปนี้

3.1 วิธีการผลิตด้วยมือ (Hand lay-up)

การผลิตพลาสติกเสริมแรงโดยวิธีนี้เป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลายมานานแล้ว การผลิตประเภทนี้ใช้เงินลงทุนค่อนข้างน้อย สามารถผลิตจำนวนชิ้นงานได้ตั้งแต่ 5 ชิ้น, 10 ชิ้น จนถึงเป็นร้อย ๆ ชิ้น ยกตัวอย่างในการผลิตเรือ อ่างอาบน้ำ เส้นใยแก้วก็จะถูกนำมาวางภายในเรือ และเคลือบด้วยเทอร์โมเซ็ทติ้งพลาสติกเรซิ่น การผลิตถังน้ำ หลังคารถกระบะ ในประเทศไทยก็ใช้ระบบนี้เป็นส่วนใหญ่ การผลิตโดยวิธีใช้มือนี้มีข้อดี คือ สามารถผลิตชิ้นงานได้ด้วยขนาดไม่จำกัด สามารถผลิตเรือขนาด 10 เมตร ถึง 30 เมตร และก็ยังสามารถผลิตชิ้นงานซึ่งมีขนาดเล็กได้เช่นกันอีกด้วย จึงทำให้มีความคล่องตัวในการผลิตสูง วิธีการผลิตด้วยมือนั้นจะใช้เส้นใยประเภทเสื่อ หรือเรียกว่า Chopped strand mat หรืออีกประการหนึ่งก็คือ พวกใยสาน (Woven roving) เส้นใยประเภทนี้ก็จะถูกนำไปวางใน mold ในแม่แบบ หลังจากนั้นเทอร์โมเซ็ทก็ได้ถูกนำไปเคลือบบนเส้นใยนี้ และผลจากการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีก็จะทำให้เรซิ่นนั้นแข็งตัวและยึดเกาะกับเส้นใยแก้ว ผลิตภัณฑ์ที่แข็งตัวแล้วก็จะถูกแกะออกจาก mold นำมาตกแต่งให้มีขอบ และมีความสวยงามขึ้น วิธีการผลิตด้วยมือนี้เป็นวิธีที่ง่ายที่สุด ถูกที่สุด และเป็นที่แพร่หลายเป็นอย่างมาก การออกแบบชิ้นงานก็ทำด้วยวิธีง่าย และการเปลี่ยนแปลงก็เป็นไปอย่างง่ายดาย แต่การผลิตชิ้นงานประเภทนี้ต้องใช้คนผู้ผลิตที่มีความสามารถเพื่อให้ได้คุณภาพที่สม่ำเสมอ

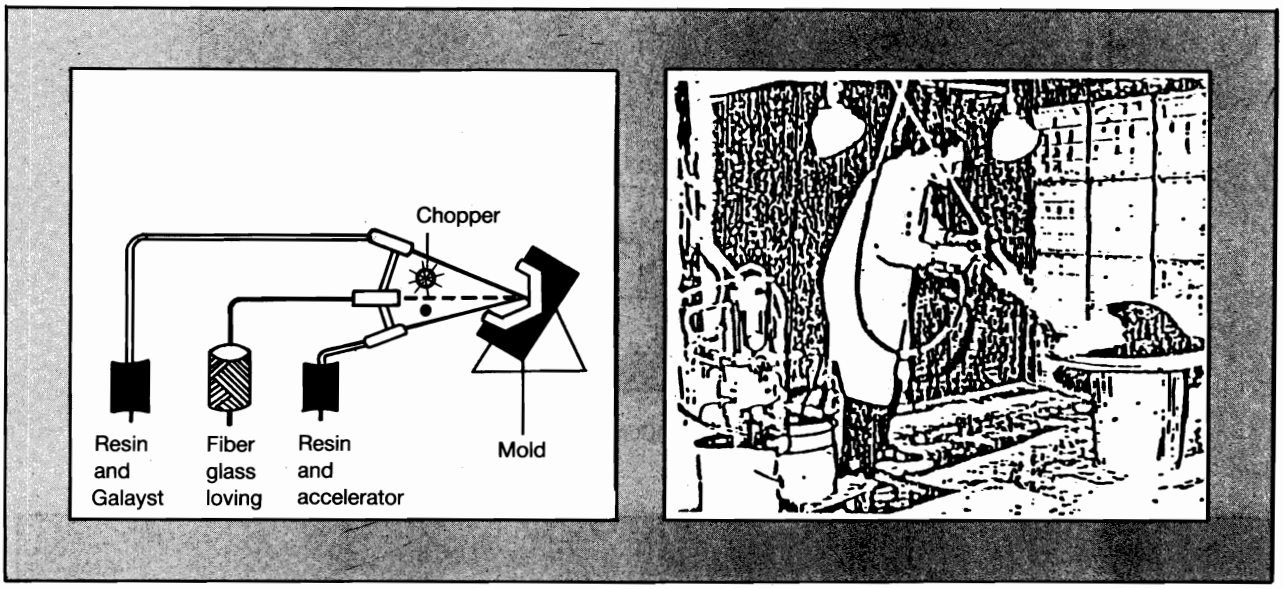


รูปที่ 7 การผลิตด้วยมือ (Hand lay-up)

3.2 วิธีการพ่น (Spray-up)

วิธีนี้เป็นวิธีซึ่งนำหน้าวิธีการผลิตด้วยมือขึ้นมาเล็กน้อย การผลิตวิธีนี้สามารถผลิตจำนวนผลิตภัณฑ์ได้ตั้งแต่น้อยจนกระทั่งมากถึงเป็น 1,000 ชิ้น การผลิตวิธีพ่นนี้คล้ายคลึงกับการผลิตด้วยมือ หรือ Hand lay-up โดยที่แม่แบบนั้นจะเปิดอยู่ และเส้นใยก็ถูกตัดด้วยเครื่องตัดที่เรียกว่า Chopper ขณะที่เส้นใยถูกพ่นออกมาจากเครื่องตัด พลาสติกเรซิ่นก็ได้ถูกพ่นออกมาในขณะเดียวกัน และก็เคลือบลงไปในแม่แบบนั้นเอง การผลิตโดยวิธีนี้สามารถผลิตได้ค่อนข้างเร็วกว่าระบบการผลิตด้วยมือ (Hand lay-up) ผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่ผลิตโดยวิธีการพ่นนี้ก็คือ เรือ แท้งค์น้ำ อ่างอาบน้ำในห้องน้ำ เก้าอี้ หลังคารถกระบะ ก็ผลิตด้วยวิธีนี้ได้เช่นกัน การผลิตด้วยวิธีนี้ก็สามารถใช้กับชิ้นงานที่มีรูปร่างค่อนข้างสลับซับซ้อนได้มากกว่าการผลิตโดยใช้มือ การลงทุนการผลิตชิ้นงานโดยวิธีการพ่นนั้นก็ต้องมีเครื่องพ่น (Spray-up Gun) เครื่องพ่นนี้จะนำเส้นใย roving หรือเส้นใยยาวที่มีลักษณะเป็นม้วนมาตัดเป็นเส้น ซึ่งมีความยาวประมาณ 2.4 นิ้ว ในขณะเดียวกันที่เทอร์โมเซ็ทเรซิ่นถูกพ่นออกไปนั้นก็มีสารเคมีสารทำปฏิกิริยาถูกพ่นออกไป ขณะเดียวกัน สารทำปฏิกิริยานี้ (catalyst) ก็ถูกพ่นออกมาเพื่อทำปฏิกิริยากับเทอร์โมเซ็ทตั้งเรซิ่น หลังจากที่เส้นใยและน้ำยาเรซิ่นได้เคลือบอยู่บนแม่แบบแล้ว พนักงานการผลิตก็ต้องนำลูกกลิ้งมากลิ้งเพื่อไล่ฟองอากาศ และทำให้เส้นใยนั้นผนึกตัวกันแน่น หลังจากที่เรซิ่นได้แข็งตัวที่อุณหภูมิห้องแล้ว ชิ้นงานก็สามารถแกะชิ้นงานออกจากแม่แบบได้ การผลิตประเภทนี้ไม่มีข้อจำกัดในด้านขนาดของชิ้นงาน เราสามารถผลิตชิ้นงานได้ใหญ่เท่าที่เราต้องการ วิธีการผลิตประเภทนี้ก็สามารถทำให้เป็น automatic ได้โดยการใช้หุ่นยนต์ (Robot) หรือการควบคุมโดย นิว เมติค (Pneumatic) เพียงเล็กน้อย

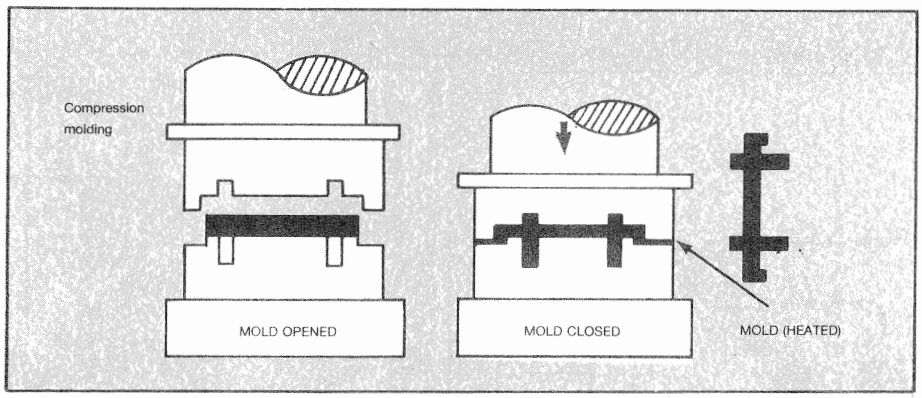
การผลิตที่ทำให้มีความแข็งแรงของชิ้นงานนั้นสูงก็อาจจะมีการผลิตอีกหลายวิธีด้วยกัน เช่น ถุงสูญญากาศ (vacuum bag) ถุงอัดอากาศ (pressure bag) และ autoclave กรรมวิธีประเภทนี้ก็สามารถทำชิ้นงานนั้นเรียบได้ทั้งสองฝั่ง ส่วน mold แม่แบบนั้นจะต้องมีความแข็งแรงมากขึ้นกว่าการผลิตโดยใช้มือหรือการผลิตโดยการพ่น



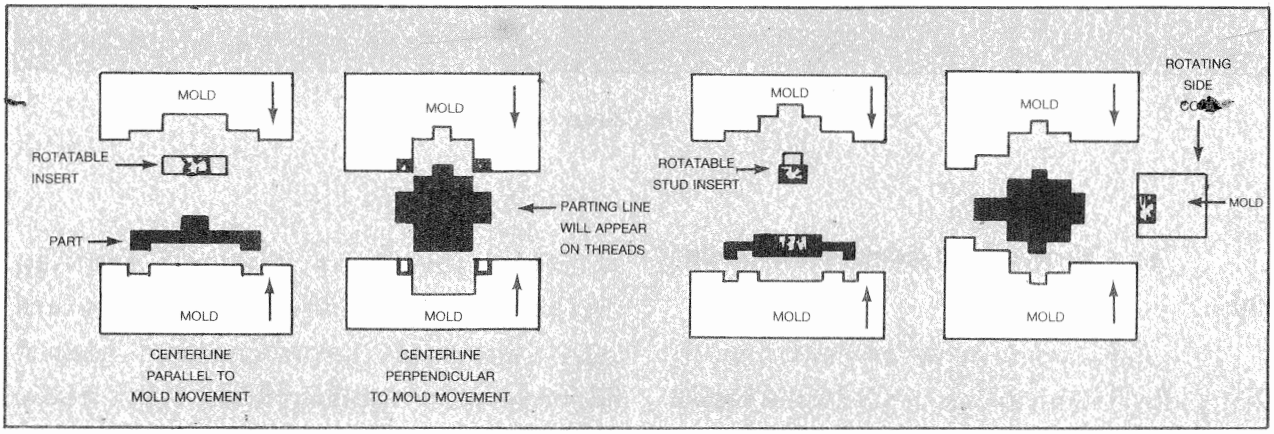
รูปที่ 8 การพ่น (Spray-up)

3.3 วิธีการอัดขึ้นรูป (compression molding)

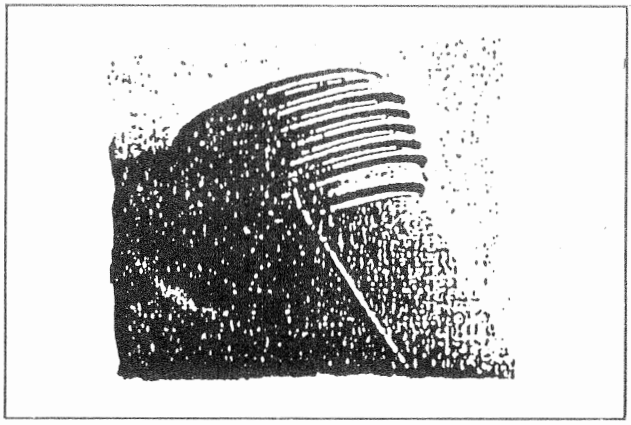
เมื่อต้องการจำนวนผลิตภัณฑ์ค่อนข้างมาก การอัดขึ้นรูปเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุด การอัดขึ้นรูปนี้ใช้แรงอัดบนแม่พิมพ์ และสามารถทำให้ชิ้นงานนั้นมีคุณลักษณะค่อนข้างสลับซับซ้อนได้เป็นอย่างมาก เช่นการผลิตชิ้นส่วนในรถยนต์อุปกรณ์อิเล็คทรอนิคต่าง ๆ หรืออุปกรณ์การใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ ชิ้นงานอาจจะมีขนาดค่อนข้างใหญ่ได้ เช่น การผลิตฝากระโปรงรถยนต์หรือการผลิตอ่างอาบน้ำก็ตามในต่างประเทศนั้นใช้การอัดขึ้นรูปทั้งสิ้น การอัดขึ้นรูปยังทำให้ชิ้นงานมีผิวเรียบสวยงามเป็นอย่างมาก และยังมีความเรียบทั้งสองด้าน เทอร์โมเซ็ทติ้งพลาสติก เช่น โพลีเอสเตอร์ก็เป็นที่นิยมในการอัดขึ้นรูป การอัดขึ้นรูปนี้ใช้เครื่องไฮโดลิคที่มีกำลังกดต่าง ๆ กันแล้วแต่ขนาดของชิ้นงาน ตัวแม่แบบนั้นจะต้องเป็นเหล็กโลหะ และใช้ความร้อนในการทำให้เทอร์โมพลาสติกแข็งตัว ในการผลิตแต่ละชิ้นอาจใช้เวลา (cycle time) ประมาณ 1-3 นาที แล้วแต่ความหนาของชิ้นงาน หลังจากที่ได้ใช้ความร้อนประมาณ 1-3 นาที เทอร์โมเซ็ทติ้งเรซิ่นก็จะแข็งตัว และแม่แบบก็จะถูกเปิดออก และนำชิ้นงานออกมา คุณสมบัติที่ดีที่สุดของระบบการอัดขึ้นรูปนี้ก็คือ จำนวนการผลิตนั้นสูง ได้ชิ้นงานซึ่งมีขนาดเป็นมาตรฐาน การผลิตแบบอัดขึ้นรูปนี้สามารถนำมาทำได้ด้วยวิธีออโตเมติค การออกแบบชิ้นงานก็ทำด้วยความคล่องตัว และยังมีคุณสมบัติทางเชิงกล ข้อดีอีกประการหนึ่งก็คือ การรวมชิ้นโลหะต่าง ๆ เช่น ชิ้นส่วนของน็อตหรือสกรู (Metal Insert) เข้าไปในชิ้นงานนั้นในขณะที่ทำการผลิต จะทำให้ประหยัดเวลาในการประกอบและชิ้นงานแลดูสวยงามสีสันและผิวของชิ้นงานที่ผลิตด้วยระบบอัดนั้นก็มีความเรียบมัน เนื่องจาก mold ที่เป็นโลหะมันนั้นทำให้ผิวทั้งภายนอกและภายในมีความมันตลอด การตัดตกแต่งขอบของชิ้นงานก็ทำได้โดยใช้เวลาไม่มาก เนื่องจาก mold แม่พิมพ์ของชิ้นงาน แม่พิมพ์เองก็มีขั้นตอนในการตัดขอบอยู่แล้ว



รูปที่ 9 การอัดขึ้นรูป (Compression Molding)



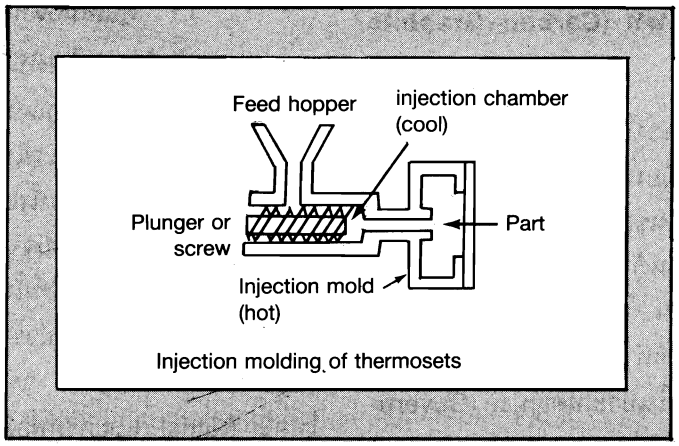
รูปที่ 10 การใส่ Metal Insert



รูปที่ 11 ตัวอย่างชิ้นงานที่มี Metal Insert

3.4 วิธีการฉีดขึ้นรูป (Injection molding)

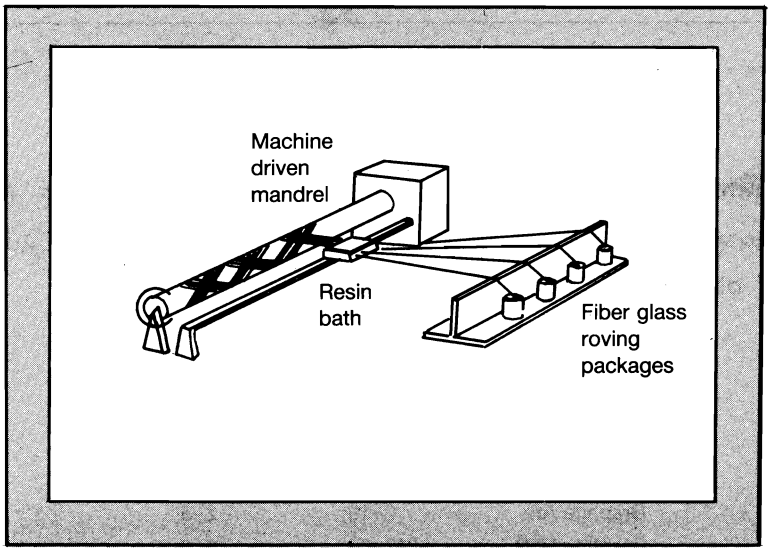
วัสดุซึ่งทำจากเทอร์โมเซ็ทติ้งพลาสติกนั้นสามารถนำมาฉีดขึ้นรูปได้คล้ายคลึงกับวิธีการฉีดเทอร์โมพลาสติกทั่ว ๆ ไป การฉีดขึ้นรูปของเทอร์โมเซ็ทนั้นเราจะใช้อุณหภูมิในการฉีดที่ต่ำแต่ว่าในตัวของแม่พิมพ์เองจะมีอุณหภูมิที่สูง ซึ่งตรงกันข้ามกับการฉีดขึ้นรูปของเทอร์โมพลาสติก การขึ้นรูปด้วยโพลีเอสเตอร์เรซิ่นผสมเส้นใยแก้ว ซึ่งมีขนาด $^1/_2$ นิ้ว สามารถทำให้ชิ้นงานนั้นมีความแข็งแรงขึ้นมาได้อีกหลายเท่าตัว



รูปที่ 12 การฉีด Injection Molding

3.5 วิธีการพัน (Filament winding)

ระบบการพันนี้สามารถเรียงเส้นใยไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง เพื่อให้รับแรงได้สูงในทิศทางนั้น การที่เรียงเส้นใยไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งนั้นจะทำให้แรงทางด้าน Tensile สูงขึ้นอย่างมาก การผลิตโดยวิธีการพันจะได้ชิ้นงานซึ่งกลวง ท่อน้ำยาเคมี ลำตัวของจรวด และอื่น ๆ ในการผลิตโดยใช้การพันนี้ เราก็จะใช้เส้นใยยาวซึ่งมีความต่อเนื่อง (continuous strand) การใช้เส้นใยยาวนี้ เราก็จะพันเส้นใยซึ่งเคลือบน้ำยาเรซิ่นพันลงบนแผ่นแม่แบบ ซึ่งรูปร่างเป็นทรงกลมหรือเป็นถังก็ตาม เส้นใยยาวนี้จะถูกวางตามแผนผังที่กำหนด เพื่อให้รับแรงได้สูงที่สุด หลังจากที่ผ่านเส้นใยพร้อมทั้งเรซิ่นบนแม่แบบทรงกลมแล้ว ชิ้นงานนี้ก็จะถูกนำไปอบที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้ชิ้นงานนั้นแข็งตัวอย่างเต็มที่ **ผลดี** หลักของการผลิตด้วยวิธีการพันนี้คือ จะได้ของแข็งต่อน้ำหนักมากที่สุดและจะได้ปริมาณเส้นใยในเนื้อพลาสติกได้สูงที่สุดอีกด้วย



รูปที่ 13 การพัน (Filament winding)

วัสดุเสริมแรงที่มีความแข็งแรงสูง

เส้นใยบางประเภทมีคุณสมบัติดีและมีประโยชน์ในด้านความเบา ความแข็งแกร่งและความแข็งแรงต่อการดึง เส้นใยที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้ซึ่งสามารถนำมาใช้งานในด้านต่าง ๆ ของกองทัพอากาศมี 3 ประเภทหลักด้วยกันคือ เส้นใยแก้ว (กล่าวในบทที่ 1) เส้นใยคาร์บอนกราไฟท์และเส้นใยอะรามิด

1. เส้นใยคาร์บอนกราไฟท์ (Carbon-Graphite Filaments)

เส้นใยคาร์บอนกราไฟท์นั้นได้ถูกค้นพบมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1883 แต่ในสมัยนั้นยังไม่มีการนำมาใช้งาน จนกระทั่งในปี 1950 การใช้งานของเส้นใยคาร์บอนกราไฟท์ได้พัฒนาสูงขึ้น โดยเฉพาะในด้านของอากาศยานในการทำชิ้นส่วนเครื่องยนต์ไอพ่น ในปี 1957 Air Force Materials Laboratory ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับเส้นใยประเภทนี้ร่วมกับสถาบันวิจัยในประเทศญี่ปุ่น (Government Industrial Research Institute, Osaka, Japan) จนได้ลิขสิทธิ์ในปี 1963 เส้นใยคาร์บอนกราไฟท์ที่ผลิตมาจาก Polyacrylonitrile (PAN) มีความแข็งแรงด้าน Tensile 260,000 ปอนด์/นิ้ว^2 และ Young's Modulus 6,000,000 ปอนด์/นิ้ว^2 คุณสมบัติอื่น ๆ มีดังต่อไปนี้

1.1 คุณสมบัติทางเคมี

เส้นใยกราไฟท์มีความคงทนต่อการผุกร่อน เนื่องจากสารเคมีภายใต้อุณหภูมิปกติ การเคลือบผิวของเส้นใยทำให้เกิดความแข็งแรงในชิ้นงานเพิ่มขึ้น ในสมัยก่อนปัญหาของการเคลือบผิวนั้นทำให้ชิ้นงานที่เสริมแรงด้วยกราไฟท์ไม่คงทน แต่ในปัจจุบันเทคนิคของการเคลือบผิวเส้นใยทำให้เส้นใยกราไฟท์นั้นมีความคงทนต่อสภาพกรดและด่างได้เป็นอย่างดีไม่ว่าจะอยู่ในกรดไฮโดรคลอริค (Hydrochloric acid) กรดซัลฟุริค (Sulfuric) กรดไนตริค (Nitric) และกรดฟอมิค (Formic) ฯลฯ

1.2 คุณสมบัติทางกายภาพ

ในปัจจุบันเส้นใยกราไฟท์มีหลายประเภทด้วยกัน และมีเส้นผ่าศูนย์กลางโดยประมาณ 7.5-8 Micron มีความหนาแน่นและความแข็งแรงตามตารางในรูปที่ 14

Fiber Type	Density lb/cu in.	Tensile Strength × 10^3 psi	Tensile Modulus × 10^4 psi
High modulus	0.0700	250-325	50-60
High tensile	0.0635	350-450	35-42
A or III	0.0628	275-325	28-35

รูปที่ 14 Typical properties of PAN carbon-graphite filaments

1.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

เส้นใยซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 9 Micron มีความต้านทานไฟฟ้า 12×10^{-4} ohm − cm และนำความร้อนได้ 0.24 BTU in./hr./ft^2°F เนื่องจากเส้นใยมีความต้านทานไฟฟ้าต่ำจึงถูกนำมาใช้เป็นสื่อไฟฟ้าในชิ้นงานประเภทต่าง ๆ ดังตารางในรูปที่ 15

Type Material	CONDUCTIVITY (Btu-ft/hr-ft^2-°F)	
	0°	0°, ±45, 90°
Graphite AS	6-10	2-3
Graphite HTS	12-20	3-6
Graphite HMS	28-35	6-12
Fiberglass	2	0.2
Aluminum	80-125	
Steel	9-27	

Courtesy : Hercules, Inc.

รูปที่ 15 Thermal conductivity

1.4 คุณสมบัติด้านความร้อน

เส้นใยกราไฟท์มีสัมประสิทธิ์การขยายตัว -0.55×10^{-6} in./in./°F ในทิศทางตามแกนของเส้นใย และ 9.3×10^{-6} in./in./°F ในทิศทางขวาง เนื่องจากการขยายตัวของเส้นใยประเภทนี้ต่ำมากจึงถูกนำมาใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ ซึ่งต้องการความเที่ยงตรงของขนาด ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะแล้ว การยืดหดตัวของชิ้นงานซึ่งผลิตด้วยเส้นใยกราไฟท์นั้นมีมากกว่าโลหะ

1.5 คุณสมบัติอื่น ๆ

เส้นใยคาร์บอนกราไฟท์มีคุณสมบัติดีในด้านการทนทานต่อความล้าเมื่อเปรียบเทียบกับอลูมินั่ม 7075-T6 ที่อุณหภูมิ 250°F ดังตารางที่แสดงการเปรียบเทียบความคงทนต่อความล้าในรูปที่ 16

Material	Orientation (Degrees)	Tensile Strength (ksi)	Creep[a] Load (%)	Creep Rupture (hr)
S-Glass	0	260	85	0.01
			60	60
			51	10^4
Kevlar-49	0	200	80	2
			70	150
			60	10^4
AS graphite	0	200	80	>1000[b]
HTS graphite @ 250°F	0/90	83	90	455
7075-T6 aluminum		70	96	100
		70	93	350

[a]Percent of static ultimate.
[b]No failure in 1000 hr.

รูปที่ 16 Creep rupture resistance of composites

นอกจากนี้ การทนต่อแรงกระแทกก็เป็นจุดหนึ่งที่น่าให้ความสนใจในการออกแบบ ตารางในรูปต่อไปนี้แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบในด้านการรับแรงกระแทกของโลหะชนิดต่าง ๆ กับวัสดุเสริมแรงซึ่งมีเส้นใยคาร์บอนกราไฟท์เป็นส่วนประกอบ

Material	Impact Energy (ft-lb), Onset of Plastic Deformation	Total Impact Energy (ft-lb)
2024-T6 aluminum	0.05	65.0
7075-T6 aluminum	0.60	3.0
17-7 PH stainless steel	0.75	67.0
4130 steel (R_C20)	1.60	102.0
6AL-4V titanium	2.10	10.5
4340 steel (R_C55)	3.40	6.0
3501/AS Hercules composite	3.40	6.0

Courtasy : Hercules, Inc.

รูปที่ 17 Damage tolerance levels, notched charpy impact

1.6 ราคา

ในปี 1970 ราคาโดยเฉลี่ยของเส้นใยคาร์บอนกราไฟท์ประมาณ $325/1b ในปี 1975 ราคาลดลงเหลือ $300/1b ในปัจจุบันราคาของเส้นใยประเภทนี้ได้ลดลงอย่างมากจนถึงประมาณ $32/1b และคาดว่ามีแนวโน้มที่จะลดลงไปอีกจนถึง $10/1b เนื่องจากการพัฒนาทางด้านการผลิต ในปัจจุบันมีโรงงานผลิตหลายแห่งที่เกิดขึ้นใหม่และมีแนวโน้มว่าราคาของเส้นใยประเภทนี้จะลดลง

1.7 การใช้งาน

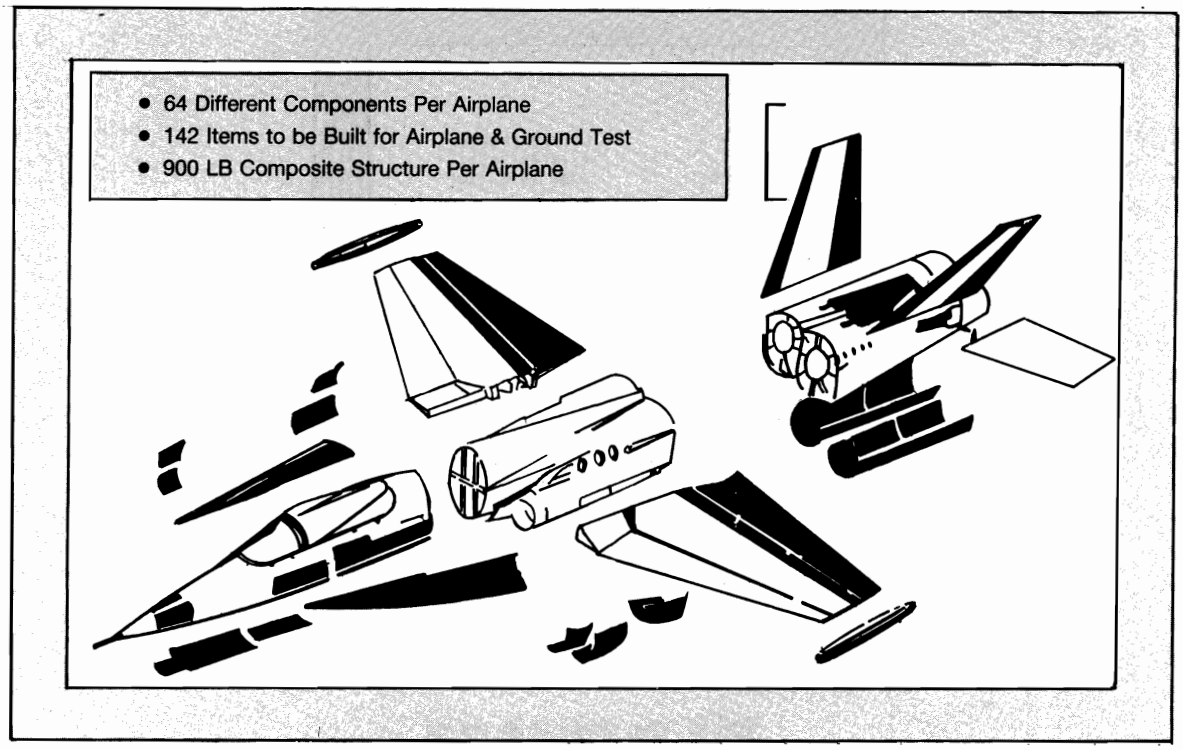
การใช้งานส่วนใหญ่ของวัสดุเสริมแรงซึ่งมีเส้นใยคาร์บอนกราไฟท์เป็นส่วนผสมนั้นจะใช้กับงานทางด้านอวกาศซึ่งจะเห็นได้ว่าโครงการใหญ่ ๆ เช่น Space shuttle ได้ใช้เส้นใยคาร์บอนกราไฟท์ในการสร้างเกราะป้องกันความร้อนและชุดพวงหาง ในต่างประเทศก็มีการใช้เส้นใยประเภทนี้ในการผลิตจรวดขนาดใหญ่ซึ่งมีคุณสมบัติเบากว่าการผลิตด้วยโลหะ แนวโน้มในการใช้เส้นใยประเภทนี้ก็คือทางด้านการบิน เนื่องจากสามารถลดน้ำหนักของชิ้นส่วนต่าง ๆ ได้ทำให้ประหยัดเชื้อเพลิง ยกตัวอย่างเช่น การลดน้ำหนัก 1 ปอนด์ในใบพัดเครื่องบินสามารถลดน้ำหนักโครงสร้างที่ใช้ในการรับแรงได้อีก 5-8 ปอนด์ ดังนั้นเครื่องบินจึงมีสมรรถนะดีขึ้น บรรทุกน้ำหนักได้มากขึ้น ใช้พลังงานน้อยลงและประหยัดเชื้อเพลิง ตารางในรูปที่ 18 แสดงให้เห็นถึงการประหยัดในการสร้างเครื่องบินชนิดต่าง ๆ

Value/lb Saved ($)	Application
10,000-15,000	Space Shuttle
10,000	Synchronous orbit satellite
1,000	Near orbit satellite
200-500	SST
150-200	Fighter plane
150-200	Boeing 747
100-200	Aircraft engines
100	Commercial planes
50-75	Transport type aircraft

รูปที่ 18 Value of weight saved in aerospace structures

โดยทั่วไปแล้วอุตสาหกรรมการสร้างเครื่องบินจะใช้โลหะ เช่น อะลูมิเนียมและไทเทเนี่ยม ราคาเริ่มต้นต่อหน่วยของโลหะทั้ง 2 ประเภทนี้ต่ำกว่าราคาของวัสดุเสริมแรงด้วยกราไฟท์ แต่เมื่อนำโลหะทั้ง 2 ประเภทนี้มาผลิตเป็นชิ้นส่วนของเครื่องบิน จะต้องเสียค่าเครื่องมือค่าแรง และสูญเสียวัสดุเนื่องจากการขึ้นรูปชิ้นงาน โดยทั่วไปแล้วชิ้นงานซึ่งหนัก 1 ปอนด์จะต้องใช้วัตถุดิบ 4-12 ปอนด์ ดังนั้นราคาต่อหน่วยของชิ้นงานที่ผลิตสำเร็จแล้วด้วยวัสดุเสริมแรงกราไฟท์จะถูกกว่าชิ้นงานซึ่งผลิตด้วยโลหะ

บริษัท McDonnell Aircraft ซึ่งเป็นหน่วยงานในบริษัท McDonnell Douglas Corporation ได้แถลงว่าเครื่องบินขับไล่ F – 18 ซึ่งผลิตร่วมกันระหว่าง McDonnell และ Northrop Corporation จะใช้วัสดุเสริมแรงประมาณ 10% ของน้ำหนักโครงสร้างทั้งหมด ซึ่งมากกว่าการใช้ในการผลิตเครื่องบินขับไล่ F – 15 (2.1%) ลำตัวของเครื่องบิน Northrop VF – 17 ใช้ชิ้นส่วนวัสดุเสริมแรงด้วยกราไฟท์ประมาณ 900 ปอนด์ (รายละเอียดดังรูปที่ 19) นอกจากนี้วัสดุเสริมแรงด้วยกราไฟท์ยังถูกนำมาใช้กับเครื่องบิน F – 14 และ B – 1, จรวด C – 4 Trident Missile



รูปที่ 19 VF-17 advanced composed components. (Courtesy Hercules, Inc.)

2. เส้นใยอะรามิด (ARAMID)

คำว่า "ARAMID" มาจากชื่อของ Aromatic polyamide fibers ซึ่งปัจจุบันนี้มีชื่อทางการค้าว่า "Kevlar" และ "Nomex" เป็นผลิตภัณฑ์จากประเทศสหรัฐอเมริกา เส้นใยอะรามิดมีคุณสมบัติทนความร้อนสูงและจะสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 400 °C ที่อุณหภูมินี้โดยทั่ว ๆ ไปแล้วเรซิ่นจะมีการสลายตัวก่อน ดังนั้นอุณหภูมิใช้งานอย่างต่อเนื่องของวัสดุเสริมแรงที่มีเส้นใยอะรามิดเป็นส่วนประกอบจะอยู่ประมาณ 180 °C หากใช้เรซิ่นที่มีคุณสมบัติดีก็จะมีอุณหภูมิใช้งานถึง 300 °C เส้นใยอะรามิดมีหลายรูปแบบด้วยกัน เช่น เป็นเส้นยาวต่อเนื่อง ถักเป็นผืน เป็นผง เป็นเส้นใยสั้นซึ่งมีความยาวประมาณ $^1/_2$ นิ้ว และยังมีการใช้งานรวมกับเส้นใยกราไฟท์อีกด้วย (Hybrids)

2.1 คุณสมบัติทางเคมี

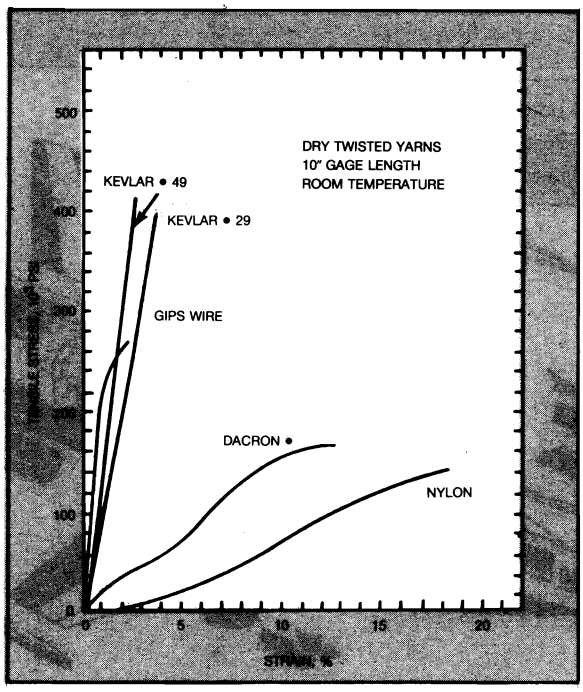
เส้นใยอะรามิดโดยทั่วไปแล้วมีความคงทนต่อสารเคมี เช่น สารละลาย (Solvents) น้ำมันหล่อลื่น น้ำ ฯลฯ ยกเว้นกรดและด่างที่มีความเข้มข้นสูง

2.2 คุณสมบัติทางกายภาพ

เส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใยแต่ละเส้นมีขนาด 0.00046 นิ้ว (~ 12 micron) ความหนาแน่น 1.44 g/cm^3 รูปที่ 20 นี้แสดงให้เห็นถึงความแข็งแรงของเส้นใยอะรามิดเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยประเภทอื่น ความแข็งแรงทาง tensile ของ "Kevlar" 29 และ 49 อยู่ประมาณ 525×10^3 ปอนด์/นิ้ว^2 ในรูปที่ 21 แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบของความถ่วงจำเพาะและความแข็งแรงของเส้นใยไนล่อน "Kevlar" เส้นใยแก้วและเหล็ก ส่วนรูปที่ 22 นั้นแสดงการเปรียบเทียบความแข็งแรงจำเพาะของวัสดุประเภทต่าง ๆ จะเห็นได้ว่า "Kevlar" มีความแข็งแรงจำเพาะด้าน tensile สูงสุดในบรรดาวัสดุทุกชนิด ในขณะที่กราไฟท์มีโมดูลัสจำเพาะสูงที่สุดในบรรดาวัสดุทั้งหลาย

2.3 ราคา

"Kevlar" ได้ถูกแนะนำเข้ามาใช้วงการตลาดในปี ค.ศ. 1972 ในราคา $50/1bs ปลายปี 1972 ราคาลดลงเหลือ $20/1 bs ในปัจจุบันนี้ราคาของ "Kevlar" ขายอยู่ประมาณ $10/1 bs ในอนาคตคาดว่าจะมีเส้นใยสังเคราะห์ ประเภทอะรามิดมากขึ้นและมีแนวโน้มว่าราคาจะถูกลงกว่าปัจจุบันมาก

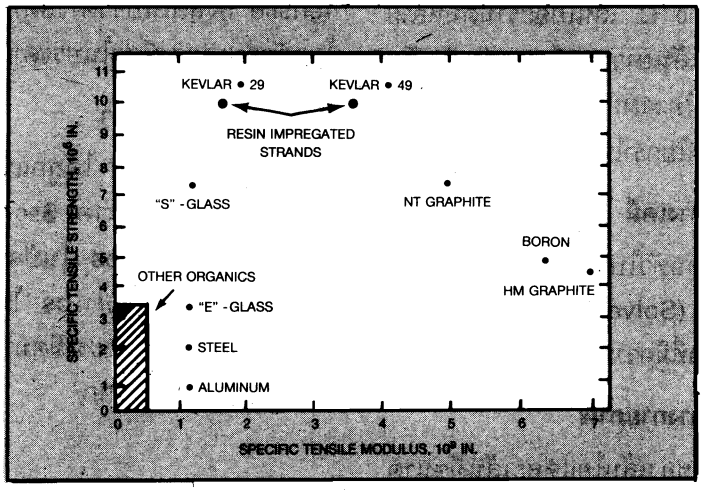


รูปที่ 20 Yarn stress-strain curves

	Nylon	"Kevlar" and "Kevlar" 29	E-Glass[b]	"Kevlar" 49	Steel
Specific gravity	1.14	1.44	2.55	1.45	7.86
Tensile strength (10^3 psi)	145	400	220	400	285
Tensile modulus (10^6 psi)	0.8	12	10	19	29
Elongation (%)	18	4	3	2.4	2

[a]10-In. gage length, bare yarn, 3 tpi added to organics.
[b]Owens-Corning Fiberglas Corp. publication No. 1-GT-1375-C.

รูปที่ 21 Properties[a] of bare reinforcing yarns



รูปที่ 22 Specific tensile strength and tensile modulus of fiber

2.4 การใช้งาน

2.4.1 เครื่องบิน (Aircraft)

ในด้านการบินนั้นเส้นใยอะรามิดได้ถูกนำมาใช้แทนเส้นใยแก้วเนื่องจากมีความแกร่งและน้ำหนักเบา NASA ได้ทำการวิจัยและออกแบบ AAH helicopter และเครื่องบินขับไล่น้ำหนักเบา YF-17 โดยใช้เส้นใยอะรามิดเพื่อประโยชน์ในด้านการลดน้ำหนัก นอกจากนั้นข้อดีของเส้นใยประเภทนี้ก็คือ การลดการตรวจจับของเรดาร์ได้อีกด้วย เนื่องจากคุณสมบัติในด้านความทนทานต่อการสึกกร่อนและการเสียดสี ใบพัดของเครื่องยนต์ Jet ก็ผลิตขึ้นโดยใช้เส้นใย "Kevlar" ในการอัดขึ้นรูป การทนต่อแรงกระแทกและมีน้ำหนักเบาก็เป็นอีกประการหนึ่งที่เส้นใยอะรามิดได้ถูกนำมาใช้ในห้องขนถ่ายสัมภาระของเครื่องบินล่าเลียง คุณสมบัติในการไม่ติดไฟของเส้นใยประเภทนี้ทำให้เป็นที่ยอมรับในวงการบินและได้รับอนุมัติจากสถาบัน FAA

2.4.2 ภาชนะที่รับความดันสูง (Pressure Vessels)

เส้นใยอะรามิดมีคุณสมบัติในด้าน tensile และ modulus ดังนั้นจึงถูกนำมาใช้ในการผลิตชิ้นส่วนที่ต้องรับแรงอัดสูง เช่น ลำตัวจรวดขนาดใหญ่และถังเชื้อเพลิง (Hydrogen และ Oxygen เหลว) ในกระสวยอวกาศ (space shuttle) การผลิตในระบบของ Filament และ Winding ทำให้ภาชนะเหล่านี้รับความดันได้สูงกว่าภาชนะทุกประเภทในน้ำหนักที่เท่ากัน

2.4.3 เกราะ (Composite Armor)

เนื่องจากเส้นใยอะรามิดมีความเหนียวจึงถูกนำมาใช้ในด้านการป้องกันกระสุน เส้นใยอะรามิดสามารถป้องกันกระสุนเช่นเดียวกับเส้นใยแก้ว แต่มีน้ำหนักเพียง 75% เท่านั้น และเกราะป้องกันกระสุนเหล่านี้ได้ถูกนำมาใช้ในการผลิตเครื่องบินและเฮลิคอปเตอร์ นอกจากนั้นยังสามารถออกแบบตัดเย็บผืนผ้าของเส้นใยอะรามิดให้เป็นเสื้อ ถุงมือ หมวก และรองเท้า เพื่อป้องกันอันตรายจากการถูกบาด

2.4.4 เรือ (Marine)

เส้นใยอะรามิดมีประโยชน์ในด้านการสร้างเรือต่าง ๆ เช่น เรือ Canoes เรือเร็ว เรือบด ฯลฯ เนื่องจากความแข็งแรงและมีน้ำหนักที่เบาจึงทำให้เกิดความคล่องตัวและมีประสิทธิภาพในการแล่นบนผิวน้ำ

2.4.5 เชือก (Ropes and Cables)

โดยปกติแล้วเชือกที่ทำด้วยไนล่อนหรือโพลีเอสเตอร์ก็มีความเหนียว แต่เชือกที่ทำจากเส้นใยอะรามิดสามารถให้ความเหนียวมากกว่าและยังมีน้ำหนักน้อยกว่า เนื่องจากน้ำหนักของเส้นใยอะรามิดค่อนข้างน้อยจึงทำให้สามารถลอยอยู่บนผิวน้ำทะเลได้ เมื่อเปรียบเทียบกับสาย Cable ที่ทำด้วยโลหะซึ่งมีน้ำหนักเบามาก สาย Cable โลหะเหล่านี้ไม่สามารถลอยบนผิวน้ำทะเลได้ เชือกที่ทำด้วยเส้นใยอะรามิดจึงถูกนำมาใช้งานในด้านต่าง ๆ เช่น ใช้แทนสายสลิงบนเฮลิคอปเตอร์ ใช้แทนเชือกที่ยึดเหนี่ยวบอลลูน เป็นต้น

2.4 การผลิต

การผลิตผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ด้วยเส้นใยอะรามิดนั้นเหมือนวิธีการผลิตด้วยเส้นใยแก้วตามที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 2.3 ดังนั้น จะเห็นได้ว่าการลงทุนในการผลิตชิ้นงานด้วยเส้นใยอะรามิดไม่ได้แตกต่างกับการผลิตด้วยเส้นใยแก้วเลย กองทัพอากาศซึ่งมีขีดความสามารถในการผลิตชิ้นงานด้วยเส้นใยแก้วอยู่ในปัจจุบันก็สามารถผลิตชิ้นงานด้วยเส้นใยอะรามิดได้เช่นเดียวกัน

การคำนวณน้ำหนักความหนาของวัสดุเสริมแรง

1. ข้อดีด้านความแข็งแรงในการใช้เส้นใยอะรามิด

จากที่ได้กล่าวถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ของเส้นใยอะรามิดมาแล้วจะเห็นได้ว่าเส้นใยอะรามิดนั้นมีความแข็งแรงทางเชิงกลสูงมาก ดังนั้นเมื่อถูกนำมาใช้ในการผลิตชิ้นงาน เช่นชิ้นส่วนของเครื่องบินก็จะได้ความแข็งแรงสูงและน้ำหนักเบา ตารางในรูปที่ 23 จะแสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบความแข็งแรง น้ำหนักและความหนา โดยการใช้เส้นใยแก้วหรือเส้นใยอะรามิดเป็นตัวเสริมแรง

2. การคำนวณความแข็งแรงและน้ำหนักของวัสดุที่ใช้

เนื่องจากเส้นใยอะรามิดมีความแข็งแรงเฉพาะตัวสูงมาก ดังนั้นเมื่อนำมาผลิตเป็นชิ้นงานก็สามารถให้ความแข็งแรงต่อชิ้นงานนั้น และสามารถลดน้ำหนักของชิ้นงานนั้นได้อีกด้วย การลดน้ำหนักนั้นสามารถคำนวณได้ดังตัวอย่างต่อไปนี้

ตัวอย่างที่ 1 การผลิตพื้นฐานโดยใช้เส้นใยแก้ว 100%

Layer	Material	Weight lb/ft² (g/m²)	Thickness Inch (mm)
Gel Coat	20 mil resin (0.51 mm)	0.14 (0.68)	0.20 (0.51)
Laminate	1½ oz/ft² (460 g/m²) CSM*	0.36 (1.76)	0.050 (1.27)
	[1½ oz/ft² (460 g/m²) CSM + 24 oz/yd² (815 g/m²) WR+] 4 ply	2.76 (13.47)	0.356 (9.04)
	[1½ oz/ft² (460 g/m²) CSM + 24 oz/yd² (815 g/m²) WR] 2 ply	1.38 (6.74)	0.178 (4.52)
		4.64 (22.65)	0.604 (15.34)

Modulus (E_b) = 1.4×10^4 lb/in² (9.7 GPa) – from Table in figure 23

Stiffness ($E_b t^3$) = $1.4 \times 10^6 \times (0.604)^3 = 3.08 \times 10^5$ lb·in²/in (34.8 kN·m²/m)

*CSM - glass chopped strand mal. ↑ WR - fiberglass woven roving

NOMINAL WEIGHTS, THICKNESSES, AND FLEXURAL MODULI (E_b) OF PLIES AND PLY COMBINATIONS OF FIBERGLASS AND KEVLAR® 49 ARAMID

	Typical Fiber Content – %		Weight Lb/Ft²(kg/m²)	Thickness Inch (mm)	Flexural Modulus (E_b) 10^6 lb/in² (GPa)
	weight	volume			
SINGLE PLIES					
GLASS					
¾ oz/ft² CSM*(230 g/m²)	26	14	0.18 (0.88)	0.025 (0.64)	0.9 (6.2)
1½ oz/ft² CSM (460 g/m²)	26	14	0.36 (1.76)	0.050 (1.27)	0.9 (6.2)
6 oz/yd² Cloth (200 g/m²)	60	40	0.07 (0.34)	0.0075 (0.19)	2.0 (13.8)
10 oz/yd² Cloth (340 g/m²)	60	40	0.115 (0.56)	0.0125 (0.32)	2.0 (13.8)
18 oz/yd² WR** (610 g/m²)	50	32	0.25 (1.22)	0.029 (0.74)	2.1 (14.5)
22 oz/yd² WR (750 g/m²)	50	32	0.31 (1.51)	0.035 (0.89)	2.1 (14.5)
24 oz/yd² WR (815 g/m²)	50	32	0.33 (1.61)	0.039 (0.99)	2.1 (14.5)
KEVLAR 49					
5 oz/yd² S-500 Cloth (170 g/m²)	45	41	0.08 (0.39)	0.012 (0.31)	2.8 (19.3)
13.5 oz/yd² S-1350 WR (460 g/m²)	39	35	0.24 (1.17)	0.036 (0.91)	3.2 (22.1)
15 oz/yd² S-1033 WR (510 g/m²)	34	30	0.32 (1.56)	0.048 (1.22)	2.9 (20.0)
PLY COMBINATIONS					
GLASS					
¾ oz/ft² CSM + 24 oz/yd² WR (230 g/m²) (815 g/m²)	42	25	0.51 (2.49)	0.064 (1.63)	1.7 (11.7)
1½ oz/ft² CSM + 24 oz/yd² WR (460 g/m²) (815 g/m²)	37	22	0.69 (3.37)	0.089 (2.26)	1.4 (9.7)
1½ oz/ft² CSM + 22 oz/yd² WR (460 g/m²) (750 g/m²)	37	22	0.67 (3.27)	0.085 (2.16)	1.3 (9.0)
GLASS PLUS KEVLAR 49					
¾ oz/ft² CSM + S-1350 (13.5 oz/yd²) WR (230 g/m²) (460 g/m²)	32	25	+ 0.44 (2.15)	0.064 (1.63)	2.1 (14.5)
1½ oz/ft² CSM + S-1350 (13.5 oz/yd² WR (460 g/m²) (460 g/m²)	30	22	+ 0.62 (3.03)	0.089 (2.26)	2.0 (13.8)
¾ oz/ft² CSM + S-1033 (15 oz/yd²) WR (230 g/m²) (510 g/m²)	31	25	0.50 (2.44)	0.073 (1.85)	2.0 (13.8)
1½ oz/ft² CSM + S-1033 (15 oz/yd²) WR (460 g/m²) (510 g/m²)	30	22	0.68 (3.32)	0.098 (2.49)	1.9 (13.1)

* CSM = chopped strand mat

** WR = woven roving

+ Style 1350 Individual and ply combinations differ due to different amounts of resin pickup.

รูปที่ 23 ตารางการเปรียบเทียบความแข็งแรง น้ำหนัก และความหนา โดยการใช้เส้นใยแก้วหรือเส้นใยอะรามิดเป็นตัวเสริมแรง

การที่จะเพิ่มความแข็งแรงนั้นสามารถกระทำได้โดยการใช้เส้นใยอะรามิดเข้าทดแทนเส้นใยแก้ว ดังกรณีที่ 1-4 ต่อไปนี้

กรณีที่ 1 การใช้เส้นใยอะรามิด 460 g/m^2 เพื่อทดแทนเส้นใยแก้ว 815 g/m^2

ผลลัพธ์ : - ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น 43% $= \dfrac{4.41 - 3.08}{3.08}$

- น้ำหนักลดลง 9% $= \dfrac{4.64 - 4.22}{4.64}$

- ความหนาคงเดิม

* ความแข็งแรงโดยใช้เส้นใยแก้ว 100% ($E_b t^3$)

$= 3.08 \times 10^5$ (lb/in^2) in^3

$= 34.8$ (kN/m^2) m^3

*โมดูลัสจากการใช้ "Kevlar" 1 ชิ้น (E_b)

$= 2.0 \times 10^6$ lb/in^2

$= 13.8$ GPa จากตารางในรูปที่ 23

- ความแข็งแรง $= 2.0 \times 10^6$ lb/in$^2 \times (0.604)^3$

$= 4.41 \times 10^5$ (lb/in^2) in^3

$= 49.8$ (kN/m^2) m^3

Layer	Material	Weight lb/ft^2(kg/m^2)	Thickness inch (mm.)
Gel Coat	20 mil resin (0.51 mm)	0.14 (0.68)	0.020 (0.51)
Laminate	1½ oz/ft^2 glass CSM (460 g/m^2)	0.36 (1.76)	0.050 (1.27)
	[1½ oz/ft^2 CSM (460 g/m^2) + S-1350] 4 ply	2.48 (12.10)	0.356 (9.04)
	[1½ oz/ft^2 CSM (460 g/m^2) + S-1350] 2 ply	1.24 (6.05)	0.178 (4.52)
		4.22 (20.59)	**0.604 (15.34)**

กรณีที่ 2 การใช้เส้นใยอะรามิด 460 g/m^2 เพื่อทดแทนเส้นใยแก้ว 460 g/m^2

ผลลัพธ์ : - ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น 2% $= \dfrac{3.15 - 3.08}{3.08}$

- น้ำหนักลดลง 18% $= \dfrac{4.64 - 3.78}{4.64}$

- ความหนาลดลง 10% $= \dfrac{0.604 - 0.540}{0.604}$

* ความแข็งแรงโดยใช้เส้นใยแก้ว 100% ($E_b t^3$)

$= 3.08 \times 10^5$ (lb/in^2) in^3

$= 34.8$ (kN/m^2) m^3

*โมดูลัสจากการใช้ "Kevlar" 1 ชิ้น (E_b)

$= 2.0 \times 10^6$ lb/in^2

$= 13.8$ GPa จากตารางในรูปที่ 23

- ความแข็งแรง $= 2.10 \times 10^6 \times (0.540)^3$

$= 3.15 \times 10^5$ (lb/in^2) in^3

$= 35.6$ (kN/m^2) m^3

Layer	Material	Weight lb/ft²(kg/m²)	Thickness inch (mm.)
Gel Coat	20 mil resin (0.51 mm)	0.14 (0.68)	0.020 (0.51)
Laminate	1½ oz/ft² (460 g/m²) glass CSM	0.36 (1.76)	0.050 (1.27)
	[1½ oz/ft² (460 g/m²) CSM + S-1350] 3 ply	1.86 (9.08)	0.267 (6.78)
	¾ oz/ft² (230 g/m²) CSM	0.18 (0.88)	0.025 (0.64)
	[1½ oz/ft² (460 g/m²) CSM + S-1350] 2 ply	1.24 (6.05)	0.178 (4.52)
		3.78 (18.45)	**0.540 (13.72)**

กรณีที่ 3 การใช้เส้นใยอะรามิด 460 g/m² เพื่อทดแทนเส้นใยแก้ว 230 g/m²

ผลลัพธ์ : - ความหนาของ Laminate ที่ต้องการ = 0.527 in (13.4 mm) (เพื่อให้เข้ากับ E_bt^3 ของเส้นใยแก้ว)

- ความหนาของ Laminate ทั่วไป = 0.518 in (13.2 mm) (บางกว่าที่ต้องการ 1.7%)

ฉะนั้น : - ความแข็งแรงลดลง 5% = $\frac{3.08 - 2.92}{3.08}$

- น้ำหนักลดลง 23% = $\frac{4.64 - 3.58}{4.64}$

- ความหนาลดลง 14% = $\frac{0.604 - 0.518}{0.604}$

* ความแข็งแรงโดยใช้เส้นใยแก้ว 100% (E_bt^3)

$= 3.08 \times 10^5 \text{ (lb/in}^2\text{) in}^3$

$= 34.8 \text{ (kN/m}^2\text{) m}^3$

* โมดูลัสจากการใช้ "Kevlar" 1 ชิ้น (E_b)

$= 2.1 \times 10^6 \text{ (lb/in}^2\text{)}$

= (14.5 GPa) จากตารางในรูปที่ 23

- ความแข็งแรง $= 2.1 \times 10^6 \times (0.518)^3$

$= 2.92 \times 10^5 \text{ (lb/in}^2\text{) in}^3$

$= 32.9 \text{ (kN/m}^2\text{) m}^3$

Layer	Material	Weight lb/ft²(kg/m²)	Thickness inch (mm.)
Gel Coat	20 mil resin (0.51 mm)	0.14 (0.68)	0.020 (0.51)
Laminate	1½ oz/ft² (460 g/m²) glass CSM	0.36 (1.76)	0.050 (1.27)
	[¾ oz/ft² (230 g/m²) CSM + S-1350] 4 ply	1.76 (8.59)	0.256 (6.50)
	[¾ oz/ft² (230 g/m²) CSM + S-1350] 3 ply	1.32 (6.44)	0.192 (4.88)
		3.58 (17.47)	**0.518 (13.16)**

กรณีที่ 4 การใช้เส้นใยอะรามิด 460 g/m² เพื่อทดแทนเส้นใยแก้ว 230 g/m²

ผลลัพธ์ : - ความหนาของ Laminate ที่ต้องการ = 0.458 in (11.6 mm) (เพื่อให้เข้ากับ E_bt^3 ของเส้นใยแก้ว)

- ความหนาของ Laminate ทั่วไป = 0.455 in (11.56 mm) (บางกว่าที่ต้องการ 0.6%)

ฉะนั้น : - ความแข็งแรงลดลง 2% $= \frac{3.08 - 3.01}{3.08}$

- น้ำหนักลดลง 34% $= \frac{4.64 - 3.08}{4.64}$

- ความหนาลดลง 25% $= \frac{0.604 - 0.455}{0.604}$

* ความแข็งแรงโดยใช้เส้นใยแก้ว 100% ($E_b t^3$)

$= 3.08 \times 10^5 \text{ (lb/in}^2\text{) in}^3$

$= 34.8 \text{ (kN/m}^2\text{) m}^3$

*โมดูลัสจากการใช้ "Kevlar" 1 ชิ้น (E_b)

$= 3.2 \times 10^6 \text{ lb/in}^2$

$= 22.1$ GPa จากตารางในรูปที่ 23

- ความแข็งแรง $= 3.2 \times 10^6 \times (0.455)^3$

$= 3.01 \times 10^5 \text{ (lb/in}^2\text{) in}^3$

$= 34.6 \text{ (kN/m}^2\text{) m}^3$

Layer	Material	Weight lb/ft²(kg/m²)	Thickness inch (mm.)
Gel Coat	20 mil resin (0.51 mm)	0.14 (0.68)	0.020 (0.51)
Laminate	– ¾ oz/ft² (230 g/m²) glass CSM	0.18 (0.88)	0.025 (0.64)
	– ¾ oz/ft² (230 g/m²) CSM	0.18 (0.88)	0.025 (0.64)
	S-1350 WR/7 ply	1.68 (8.20)	0.252 (6.40)
	– ¾ oz/ft² (230 g/m²) CSM	0.18 (0.88)	0.025 (0.64)
	S-1350 WR/3 ply	0.72 (3.51)	0.108 (2.74)
		3.08 (15.03)	0.455 (11.56)

ตัวอย่างที่ 2 การผลิตโดยใช้ Polyvinyl Chloride (PVC) Foam เป็นแกน

การผลิตชิ้นงานโดยมีแกนด้านในซึ่งอาจจะทำด้วยโฟม ไม้ หรือรังผึ้ง (honey comb) เป็นการเพิ่มความแข็งแรงและลดน้ำหนัก ตัวอย่างต่อไปนี้จะแสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบการผลิต Laminate โดยมีโฟม PVC เป็นแกนกลาง Laminate นั้น จะใช้เส้นใยแก้ว 100% เปรียบเทียบกับเส้นใยแก้วผสม Kevlar บางส่วน

- เส้นใยแก้ว 100%

100% FIBERGLASS LAY-UP	Weight lb/ft²(kg/m²)	Thickness inch (mm.)
1½ oz/ft² CSM (460 g/m²)	0.36 (1.76)	0.050 (1.27)
24 oz/yd² WR (815 g/m²)	0.33 (1.61)	0.039 (0.99)
1½ oz/ft² CSM (460 g/m²)	0.36 (1.76)	0.050 (1.27)
⅜ in (9.5 mm) PVC Foam	0.14 (0.68)	0.375 (9.53)
1½ oz/ft² CSM (460 g/m²)	0.36 (1.76)	0.050 (1.27)
24 oz/yd² WR (815 g/m²)	0.33 (1.61)	0.039 (0.99)
	1.88 (9.18)	0.603 (15.32)

การทดแทนเส้นใยแก้วด้วยเส้นใยอะรามิด

REPLACEMENT WITH WR of Kevlar • 49 aramid

1 ½ oz/ft^2 CSM (460 g/m^2)	0.36 (1.76)	0.050 (1.27)
S-1350 – 13.5 oz/yd^2 WR (460 g/m^2)	0.24 (1.17)	0.036 (0.91)
1 ½ oz/ft^2 CSM (460 g/m^2)	0.36 (1.76)	0.050 (1.27)
⅜ in (9.5 mm) PVC Foam	0.14 (0.68)	0.375 (9.53)
¾ oz/ft^2 CSM (230 g/m^2)	0.18 (0.88)	0.025 (0.64)
S-1350 – 13.5 oz/yd^2 WR (460 g/m^2)	0.24 (1.17)	0.036 (0.91)
	1.52 (7.42)	**0.572 (14.53)**

– ผลลัพธ์ : สามารถลดน้ำหนักได้ถึง 20% และลดความหนาได้ 5.1%

สรุป

วัสดุเสริมแรงมีองค์ประกอบหลัก 3 ส่วน คือ

1. สารเสริมแรง (Reinforcement/Filler)
2. เรซิ่น (Resins)
3. สารเสริมแต่ง (Additives)

สารเสริมแรงนั้นมีหลายประเภทเป็นเส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอนกราไฟท์และเส้นใยอะรามิด เรซิ่นนั้นแบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลักคือ Thermoplastic และ Thermoset การเลือกใช้เรซิ่นให้เหมาะสมขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมและการใช้ของผลิตภัณฑ์ ส่วนสารเติมแต่งทั้งหลายทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีสันงดงามและคงทนต่อแสงแดด

ประโยชน์ของวัสดุเสริมแรงนั้นมีมากมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ชิ้นงานและมีน้ำหนักเบา รูปร่างลักษณะของสารเสริมแรง (Reinforcement) มี

1. เส้นใยสั้น (Chopped Strand)
2. เส้นใยยาว (Continuous Roving)
3. เส้นใยปั่น (Milled Fiber)
4. เส้นใยเสริมแรงประเภทเสื่อ (Reinforcement Mat/Chopped Strand Mat)
5. เส้นใยสาน (Woven Roving)
6. สิ่งทอ (Woven Fabric)

กรรมวิธีการผลิตชิ้นงานของวัสดุเสริมแรงนั้นมีด้วยกันหลายวิธี แต่ละวิธีมีข้อดีหรือข้อเสียแตกต่างกันไป กรรมวิธีหลักในการผลิตมีดังนี้

1. วิธีการผลิตด้วยมือ (Hand Lay-up)
2. วิธีการพ่น (Spray-up)
3. วิธีการอัดขึ้นรูป (Compression Molding)
4. วิธีการฉีดขึ้นรูป (Injection Molding)
5. วิธีการพัน (Filament Winding)

สารเสริมแรงที่มีความแข็งแรงสูงกว่าเส้นใยแก้ว เช่น กราไฟท์และอะรามิดสามารถนำมาใช้เพื่อลดน้ำหนักของชิ้นงานได้ แต่สารเสริมแรงเหล่านี้ยังมีราคาค่อนข้างสูง แต่คาดว่าในอนาคตจะมีการผลิตมากขึ้นและราคาลดต่ำลง

จากการคำนวณดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า สารเสริมแรงที่มีโมดูลัสสูงสามารถนำมาใช้ในการผลิตชิ้นงานที่มีความหนาคงเดิม แต่ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นถึง 43% ตามตัวอย่างที่ 1 ดังนั้นในการลงทุนใด ๆ ผู้ออกแบบควรคำนึงถึงการใช้งานในระยะเวลายาวนานและข้อจำกัดต่าง ๆ เช่น น้ำหนัก ความหนา และความแข็งแรง