บทที่ 2

พัฒนาการของวัสดุผสม

ในบทนี้จะกล่าวถึงประวัติความเป็นมาของวัสดุผสม การจำแนกวัสดุผสม วิธีการทำวัสดุผสมในปัจจุบัน รวมถึงการแสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุผสมกับโลหะที่ใช้งานอย่างกว้างขว้าง เช่น โลหะอลูมิเนียม เป็นต้น สุดท้ายกล่าวถึงที่มาที่เกี่ยวข้องกับวัสดุผสมซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

2.1 ประวัติของวัสดุผสม

มนุษย์รู้จักการใช้ประโยชน์จากการผสมร่วมกันของวัสดุสองชนิดมานาน ตามหลักฐานพบว่า ได้มีการนำเอาฟางหญ้า ฟางข้าว มาผสมกับดินโคลนเพื่อก่อสร้างเป็นกำแพงตั้งแต่สมัยโบราณ

วัสดุผสม (Composites material) แปลตามรากศัพท์ที่นำมาจากภาษาอังกฤษหมายถึงวัสดุชนิดใหม่ที่ประกอบขึ้นด้วยวัสดุตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป วัสดุที่นำมาประกอบกันนั้น มิใช่ผสมกันเป็นเนื้อเดียว แต่เป็นการนำวัตถุดิบที่เป็นเส้นใยมาถักทอให้เป็นผืนผ้า แล้วมาวางเรียงซ้อนทับกันเป็นชั้น ๆ จากนั้นทำขึ้นรูปให้เป็นชิ้นส่วนตามความต้องการ

การผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ ด้วยวัสดุผสมสามารถทำเองได้ที่บ้านโดยไม่ยุ่งยากมากนัก เครื่องจักสานพื้นบ้านของไทยที่นำไม้ไผ่มาจักตอกแล้วสานเป็นเครื่องใช้ เช่น กระด้ง กระบุ้ง ตะกร้า เป็นของใช้พื้นบ้าน เมื่อนำชันมาทาแล้วปล่อยให้แห้ง สามารถนำมาเป็นภาชนะเก็บน้ำได้ เป็นตัวอย่างหนึ่งของวัสดุผสม

วัสดุสองชนิดที่นำมาประกอบกันชนิดหนึ่งเรียกว่า วัสดุหลัก (Matrix) มีคุณสมบัติเป็นกาวจับยึดวัสดุอื่นให้คงรูป และอีกชนิดหนึ่งคือ วัสดุเสริมแรง (Reinforcement หรือ Inclusion) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและแข็งแกร่งในรูปของเส้นใย (Fiber)

วัสดุผสมจัดแบ่งตามวัสดุหลักมี 3 ชนิด ที่รู้จักกันดีในรูปของพลาสติกชนิดต่าง ๆ ได้แก่ epoxy bismaleimide polyimide เป็นต้น

2.1.1 **วัสดุหลัก** (Matrix)

1. Polymer Matrix Composites (PMC) เป็นวัสดุผสมที่ใช้งานกันแพร่หลายในชีวิตประจำวัน เช่น ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากไฟเบอร์กลาสต่าง ๆ โพลิเมอร์ ซึ่งอาจจะเป็นพลาสติก หรือยางเป็นวัสดุหลัก และใช้วัสดุเสริมแรงได้หลายชนิด เช่น เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน เส้นลวดโลหะ เป็นต้น พลาสติกที่มีใช้ในปัจจุบันสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดได้ดังนี้

1.1 Thermoplastic พลาสติกประเภทนี้ สามารถนำมาหลอมเหลวและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้ เมื่ออุณหภูมิสูงพลาสติกจะหลอมตัว และเมื่ออุณหภูมิเย็นพลาสติกจะแข็งตัวเป็นรูปภัณฑ์ต่าง ๆ ตามแบบแม่พิมพ์ อาจรวมถึงโพลีเอทิลีน โพลีโพรไพลีน โพลีสไตร์รีน ไนล่อนและอื่น ๆ

1.2 Thermo Setting เทอร์โมเซ็ท พลาสติกประเภทนี้จัดว่าเป็นประเภทที่ไม่สามารถละลายหรือหลอมเหลวได้อีกจากความร้อน พลาสติกประเภทนี้จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีขึ้นเพื่อทำให้ของเหลวนั้นกลายเป็นของแข็ง เช่น อีพอกซี่ เมลามีน และซิลิโคน เป็นต้น

ภาพที่ 2.1
แสดงตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ใช้วัสดุหลักเป็น Polymer [16]

2. Metal Matrix Composites (MMC) เป็นวัสดุผสมที่ใช้โลหะเป็นวัสดุหลัก เช่น อะลูมิเนียม วัสดุชนิดนี้มีการนำมาใช้งานมากขึ้นในวงการรถแข่งและชิ้นส่วนเครื่องบิน

ภาพที่ 2.2
เครื่องบิน The Boeing 787 “Dreamliner” เป็นเครื่องบินลำแรกที่ใช้วัสดุผสมที่ใช้วัสดุหลักเป็นโลหะ [15]

3. Ceramic Matrix Composites (CMC) เป็นวัสดุผสมที่ใช้เซรามิคเป็นวัสดุหลัก สามารถทนความร้อนได้สูงมาก นำไปใช้ผลิตเป็น Turbine Fan Blades หรือทนแรงอัดสูง เช่น คอนกรีต เสริมด้วยเหล็กเพื่อให้ทนต่อแรงดึงได้ด้วย ซึ่งเป็นตัวอย่างอย่างง่ายที่ใช้กันแพร่หลายในปัจจุบัน

ภาพที่ 2.3
วัสดุผสมที่ใช้เซรามิคเป็นวัสดุหลัก
http://www.rmutphysics.com/charud/oldnews/174/index174.htm

2.1.2 วัสดุเสริมแรง

วัสดุที่นำมาเสริมความแข็งแรงของโครงสร้าง คือเส้นใยไฟเบอร์ชนิดต่าง ๆ ได้แก่ Glass fiber Boron fiber Carbon fiber และ Kevlar ซึ่งหากแบ่งตามวัสดุที่นำมาผสมสามารถแบ่งได้ดังต่อไปนี้

1. วัสดุที่เป็นรูปร่างเป็นอนุภาคหรือเป็นเม็ดผง (Particulate) คือวัสดุเสริมแรงที่มีลักษณะเป็นเม็ด อาจมีรูปร่างที่เป็นทรงกลม ทรงกระบอก หรือรูปร่างต่าง ๆ โดยสามารถแบ่งลักษณะของอนุภาคเหล่านั้นได้เป็น 2 ชนิดคือ

1.1 กลุ่มที่เพิ่มความแข็งแรงโดยการกระจายอนุภาค คือ เป็นการเพิ่มความแข็งแรงในระดับอะตอมหรือโมเลกุล ขนาดของอนุภาคจะเล็กมาก โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจะอยู่ระหว่าง 10-250 นาโนเมตร อนุภาคที่เพิ่มความแข็งแรงเหล่านี้ปกติแล้วจะเป็นโลหะออกไซด์ที่กระจายตัวอยู่ในวัสดุหลักหรือเฟสของวัสดุหลัก โดยอนุภาคที่กระจายตัวจะไม่มีการยึดเหนี่ยวหรือเชื่อมโยงกับวัสดุหลักแต่อย่างใด อนุภาคที่กระจายตัวอยู่จะทำหน้าที่ในการขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน ซึ่งจะทำให้วัสดุมีความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้น ความแข็งแรงของวัสดุผสมประเภทนี้จะมีน้อยกว่าโลหะผสม ที่ผ่านการอบชุบแบบตกตะกอน กรณีใช้งานที่อุณหภูมิห้อง อย่างไรก็ตามปัญหาเรื่องการใช้งานที่อุณหภูมิสูงความแข็งแรงจะลดลงนั้น มีน้อยกว่าโลหะผสมที่ทำการอบชุบ ทั้งนี้เพราะโลหะที่ผ่านการอบชุบมาจะมีปัญหาเกี่ยวกับการบ่มเกินขนาด การทำเทมเปอร์ที่อุณหภูมิสูงเกิน และเกรนโตเกินขนาด

1.2 วัสดุผสมรูปร่างเป็นเม็ดผง คือ การเพิ่มความแข็งแรงจะอาศัยการถ่ายเทความเค้นระหว่างเม็ดของวัสดุเสริมแรงกับวัสดุหลัก วัสดุเสริมแรงที่เป็นเม็ดผง จะประกอบไปด้วยอนุภาคขนาดใหญ่ที่ไม่มีผลต่อการเกิดดิสโลเคชันหรือการเลื่อนผ่านเหมือนกลุ่มแรก แต่จะมีการเพิ่มหรือทำให้เกิดสมบัติใหม่ขึ้น โดยอาศัยสมบัติร่วมระหว่างวัสดุที่มาผสมกันทำให้เกิดความแข็งแรงหรือคุณสมบัติใหม่ ๆ ที่เราต้องการ เช่น ซีเมนต์คาร์ไบด์ (Cement Carbide) เป็นวัสดุผสมที่ประกอบไปด้วยอนุภาคหรือเม็ดของเซรามิกชนิดแข็งกระจายตัวอยู่ในวัสดุหลัก ที่เป็นโลหะตัวอย่างของวัสดุผสมกลุ่มนี้ได้แก่ ทังสเตนคาร์ไบด์ ที่ใช้ทำเครื่องมือคมตัดในงานกัดแต่งต่าง ๆ ซึ่งมีสมบัติที่แข็งและจุดหลอมเหลวสูงหากต้องการเพิ่มความเหนียวให้กับทังสเตนคาร์ไบด์ จะใช้วิธีการนำผงของทังสเตนคาร์ไบด์ผสมกับผงของโคบอลต์และอัดด้วยแรงดันสูงให้เป็นรูปทรงแบบต้องการ จากนั้นให้ความร้อนจนโคบอลต์หลอมละลายกลายเป็นวัสดุหลักที่ยึดเหนี่ยวเม็ดของของทังสเตนคาร์ไบด์ เมื่อปล่อยให้แข็งตัว โคบอลต์จะช่วยให้มีสมบัติต้านทานแรงกระแทกได้ดีขึ้น

ถัดไปคือ วัสดุขัดถู หินเจียระไนและไฟเบอร์สำหรับตัดโลหะเป็นวัสดุผสมที่ขึ้นรูปจากอะลูมินา ซิลิคคอนคาร์ไบด์ และคิวบิกโบรอนไนไตรด์ และเพื่อเพิ่มความเหนียว วัสดุผงขัดเหล่านี้จะถูกจับยึดโดยแก้วหรือโพลิเมอร์ที่เป็นวัสดุหลัก ขณะมีการใช้ เม็ดวัสดุแข็งที่เกิดการเสียดสีจะเกิดการแตกหรือหลุดออกจากวัสดุหลัก ไปทำให้วัสดุคมตัดตัวใหม่โผล่ขึ้นมาทดแทน

ภาพที่ 2.4
ตัวอย่างเม็ดซิลิคอนคาร์ไบด์ที่นำมาใช้อย่างแพร่หลายในวัสดุขัดถู
http://www.freeforum101.com/chaychan/viewtopic.php?p=94&sid=6bdee03a07077a7d09703e12fca6d795&mforum=chaychan

ตัวอย่างสุดท้ายคือ หน้าสัมผัสทางไฟฟ้า (Electrical Contact) วัสดุที่ใช้เป็นหน้าสัมผัสทางไฟฟ้าจะต้องมีสมบัติต้านทานการเสียดสีและความนำไฟฟ้าที่ดี ไม่เช่นนั้นแล้วหน้าสัมผัสจะเกิดการสึกกร่อนได้ง่ายวัสดุผสมที่ประกอบไปด้วยทังสเตนที่มีความแข็งแรงและมีเงินเป็นวัสดุผสมที่ให้สมบัติทางไฟฟ้าที่ดี การผลิตใช้ผงทังสเตนอัดเป็นแท่งที่มีรูพรุนอยู่ทั่วไป จากนั้นนำเงินหลอมเหลวมาอัดเข้าไปในสภาวะสุญญากาศ เงินหลอมเหลวจะเติมเต็มช่องว่างเป็นตัวยึดเหนี่ยวให้เม็ดทังสเตนติดกันคือจะมีการนำไฟฟ้าที่ดีจากเงิน ทนการเสียดทานดีขึ้นจากทังสเตน

2. วัสดุที่เป็นเส้นใย (Fiber) เส้นใยเสริมแรงจะช่วยเพิ่มความแข็งแรง ความต้านทานการล้าตัว มอดูลัสยังและอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักของวัสดุผสมให้สูงขึ้น คุณสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้จะเกิดขึ้นร่วมกันระหว่างความแข็งแรง ความเหนียวของเส้นใยประสานกับความอ่อนเหนียวของวัสดุหลัก วัสดุที่เป็นวัสดุหลักจะทำหน้าที่ในการถ่ายแรงที่กระทำสู่เส้นใย (Fiber) ประกอบไปด้วยวัสดุดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1

แสดงคุณสมบัติของเส้นใยเสริมแรงชนิดต่าง ๆ

Fiber	Advantages	Disadvantages
E-, S-Glass	High strength Low cost	Low stiffness Short fatigue life High temp sensitivity
Aramid (Kevlar)	High tensile strength Low density	Low comp. strength High moisture absorp.
Boron	High stiffness High comp. strength	High cost
Carbon (AS4, T300)	High strength High stiffness	Moderate cost
Graphite (pitch)	Very high stiffness	Low strength High cost
Ceramic (silicon carbide, alumina)	High stiffness High use temp	Low strength High cost

ที่มา : http://composite.about.com/library/weekly/aa980323.htm

2.1 เส้นใยแก้ว ผลิตจากทรายซิลิกาที่ผสมสารออกไซด์บางชนิดเพื่อลดอุณหภูมิหลอมเหลวและความหนืดขณะทรายแก้วหลอมเหลว เส้นใยแก้วแบ่งออกเป็น 4 ชนิด

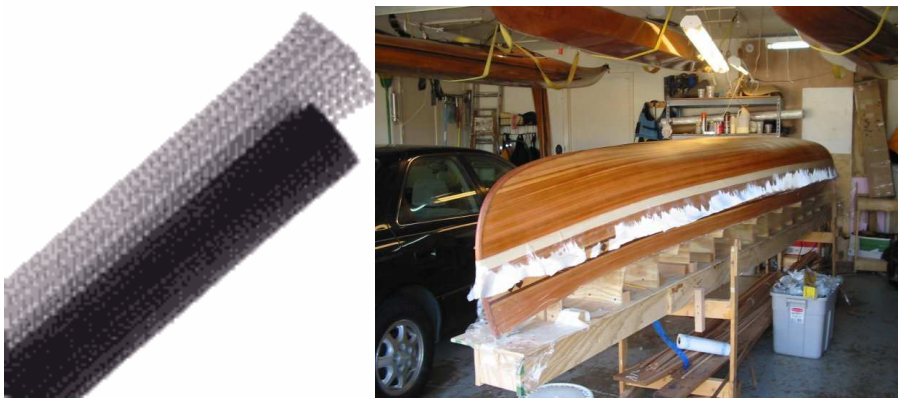
2.1.1 ใยแก้วชนิด A-กลาส (A-glass) เป็นเกรดแอลคาไลสูงที่มีส่วนผสมของโซดา-ไลม์-ซิลิกา ใช้ในงานที่ต้องการทนสารเคมี

2.1.2 ใยแก้วชนิด E-กลาส (E-glass) เป็นเกรดทางไฟฟ้า จะมีส่วนผสมของอะลูมิโน-โบโรซิลิเกต มีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีและทนทานมากจึงนิยมใช้เป็นเส้นใยเสริมแรงมากที่สุด

2.1.3 ใยแก้วชนิด ECR-กลาส (ECR-glass) มักใช้ในงานที่ต้องการสมบัติทางไฟฟ้าควบคู่กับความต้านทานทางเคมีไปพร้อมกัน

2.1.4 ใยแก้วชนิด S-กลาส (S-glass) จะมีส่วนผสมของแมกนีเซียมอะลูมิโนซิลิเกต ซึ่งจะไม่มีโบรอนออกไซด์และใช้ในงานที่ต้องการความแข็งแรงที่สูงมาก ๆ คงสภาพได้ที่อุณหภูมิสูง ๆ แต่ราคาของ S-กลาสจะแพงกว่ากลุ่มอื่น

เส้นใยแก้วนิยมใช้ในการผลิตเครื่องบินและยานอากาศ หากเปรียบเทียบอายุของความทนทานต่อความชื้นแล้วเส้นใย ECR และ S-กลาสจะดีกว่า A-กลาสมาก เส้นใย E-กลาสนิยมใช้ทำแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์มาก ทั้งนี้เพราะสมบัติทางด้านไฟฟ้าของ E-กลาสนั้นดีมาก อีกทั้งยังรักษาขนาดและรูปทรงได้ดีทนทานต่อความชื้น และมีราคาต่ำ



ภาพที่ 2.5

ตัวอย่าง ลักษณะของ Fiberglass และการใช้งาน

http://www.youngmancn.com/product.htm

http://www.outdoorplace.org/paddling/Prospector/Prospector1.htm

2.2 เส้นใยคาร์บอนและเส้นใยแกรไฟต์ วัสดุผสมผลิตจากการใช้ใยคาร์บอนไปเสริมแรงให้กับพลาสติกเรซิน (PlasticResin) เช่น Epoxy เพื่อให้วัสดุนั้นมีคุณสมบัติเฉพาะ คือ ทำให้มีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรงสูง มีความแข็งตัว ไม่โค้งงอง่าย จากสมบัตินี้จึงนิยมนำมาใช้กับอุตสาหกรรมการบิน แต่เนื่องจากราคาของเส้นใยคาร์บอนค่อนข้างสูง จึงเป็นข้อจำกัดในอุตสาหกรรมยานยนต์ เส้นใยคาร์บอนที่ใช้ผลิตวัสดุผสมนี้ ทำมาจากแหล่งที่สำคัญ 2 แหล่งคือ

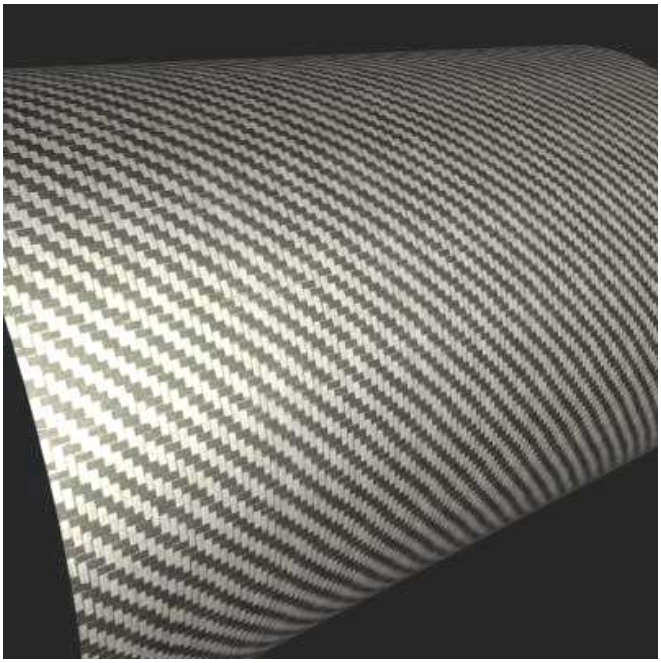
2.2.1 พอลิอะครีโลไนไทรล์ (Polyacrylonitrile, PAN) โดยทั่วไปเส้นใยคาร์บอนผลิตมาจาก PAN-precursor ด้วยกระบวนการ 3 ขั้นตอนด้วยกันคือ

2.2.1.1 กระบวนการทำให้เสถียร (Stabilization) ขั้นตอนนี้เส้นใย PAN จะถูกดึงให้ยืดตรง โดยให้เส้นใยแต่ละเส้นขนานกันกับแกนเส้นใย แล้วทำให้เกิดออกซิเดชันด้วยอากาศที่อุณหภูมิประมาณ 200-220 องศาเซลเซียส ทั้งที่ยังดึงอยู่

2.2.1.2 กระบวนการทำให้เกิดคาร์บอน (Carbonization) เป็นการผลิตเส้นใยคาร์บอนที่มีความแข็งแรงสูง กระบวนการนี้ต่อมาจากกระบวนการแรก โดยเส้นใยPAN ที่เสถียรจะถูกเผาจนกระทั้งกลายเป็นเส้นใยคาร์บอนด้วยการกำจัดออกซิเจน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนจากเส้นใย PAN จะเผาที่อุณหภูมิ 1000-1500 องศาเซลเซียส

2.2.1.3 กระบวนทำให้เป็นแกรไฟต์ (Graphitization) การทำให้เส้นใยเป็นแกรไฟต์ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้สำหรับเพิ่มอีลาสติกมอดุลัสจากการที่มีความแข็งแรง ในระหว่างที่มีการเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 1800 องศาเซลเซียส เส้นใยแต่ละเส้นจะมีการเปลี่ยนโครงสร้างกลายเป็นผลึกคล้ายแกรไฟต์เพิ่มขึ้นเส้นใยคาร์บอนที่ผลิตจากวัสดุ PAN จะได้ tensile strength อยู่ประมาณ 450-650 ksi (3.10-4.45 GPa) และมีอีลาสติมอดุลัสอยู่ในช่วงประมาณ 28-35 Msi (193-248 GPa)

2.2.2 ยางมะตอย (pitch)ซึ่งเป็นตัวที่เกิดขึ้นมาก่อนที่จะเป็นเส้นใยคาร์บอนเรียกว่า พรีเคอเซอร์(Precursor)



ภาพที่ 2.6
ตัวอย่าง เส้นใยคาร์บอนและเส้นใยแกรไฟต์
http://www.rc-composites.com/page008.html

2.3 เส้นใยอะรามิด (Aramid) หรือที่เรียกว่า เคฟลาร์ (Kevlar) เป็นเส้นใยที่ผลิตจากอะโรเมติกโพลิเอไมด์โพลิเมอร์ (aromatic polyamide polymer) ซึ่งมีการเพิ่มความแข็งแรงโดยการเสริมวงแหวนของเบนซิน เข้าไปเชื่อมต่อสายโซ่โพลิเมอร์ ขณะเกิดกระบวนการโพลิเมอไรเซชัน ลักษณะของสายโซ่ที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะยาวคล้ายเส้นลวด ส่งผลให้เส้นใยมีความแข็งแรงตามแนวยาวที่สูงมาก เคฟลาร์ที่นิยมใช้มี 3 ชนิด โดยสมบัติทางกล เคฟลาร์ 29 มีความหนาแน่นต่ำ แต่มีความแข็งแรงสูง นิยมใช้ทำอุปกรณ์ป้องกันกระสุนปืนและขีปนาวุธ ใช้ทำเชือกและสายเคเบิล ส่วนเคฟลาร์ 49 มีความหนาแน่นต่ำ แต่มีความแข็งแรงสูงและมอดุลัสสูง นิยมสำหรับผลิตยานอวกาศและเครื่องบิน

ตารางที่ 2.2

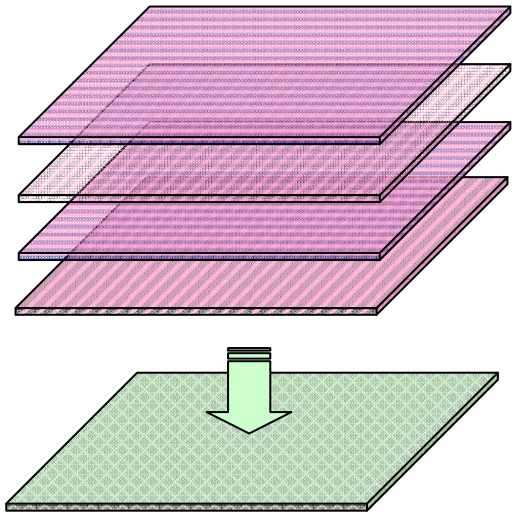
แสดงคุณสมบัติต่าง ๆ ของเคฟลาร์ ทั้ง 3 ชนิด

Grade	Density g/cm^3	Tensile Modulus GPa	Tensile Strength GPa	Tensile Elongation %
29	1.44	83	3.6	4.0
49	1.44	131	3.6--4.1	2.8
149	1.47	186	3.4	2.0

ที่มา : http://composite.about.com/library/weekly/aa980323.htm

2.4 เส้นใยโบรอน เป็นเส้นใยที่ใช้ทำวัสดุผสมเส้นใยเสริมแรงที่มีโลหะเป็นวัสดุหลัก วิธีการผลิตเส้นใยโบรอนจะใช้วิธีการที่เรียกว่า CVD (chemical vapor deposition) ซึ่งเป็นวิธีการทำให้โบรอนกลายเป็นไอแล้ววิ่งไปเกาะที่ลวดทังสเตน แล้วเกิดการตกตะกอนขึ้นที่ผิวของลวดทังสเตน การผลิตเส้นใย SiC ก็จะอาศัยวิธีการเดียวกัน โดยเส้นใยคาร์บอนจะถูกไอระเหยของซิลิคอนคาร์ไบด์เคลือบที่บริเวณผิว

3. วัสดุที่เป็นชั้นบาง ๆ (Laminar) เป็นการจัดเรียงเส้นใยเป็นชั้น ๆ แล้วนำมาอัดขึ้นรูปตามที่ต้องการเพื่อให้ได้วัสดุที่รับแรงในทิศทางที่ออกแบบไว้ โดยส่วนมากจะนิยมทำเป็นโครงสร้างภายในของเครื่องบิน หรือโครงสร้าง ๆ



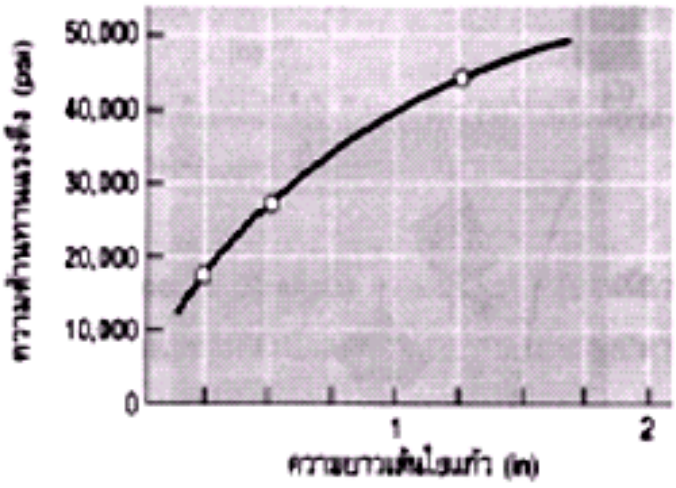
ภาพที่ 2.7
ตัวอย่างวัสดุที่จัดเรียงเป็นชั้น ๆ

2.2 คุณสมบัติอื่น ๆ ของวัสดุผสม

2.2.1 ความยาวและความโตของเส้นใย

เส้นใยอาจมีขนาดที่สั้น ยาว หรือมีความต่อเนื่องของเส้นใย เหล่านี้ล้วนมีผลต่อความแข็งแรงของวัสดุผสมทั้งสิ้น ขนาดของเส้นใยจะถูกกำหนดโดยอัตราส่วนของความยาวต่อความโตของเส้นใย โดยทั่วไปแล้วเส้นใยจะมีความโตอยู่ระหว่าง 10 ไมครอน ($10X10^{-4}$ cm) ถึง 150 ไมครอน ($150X10^{-4}$ cm)

ความแข็งแรงของวัสดุผสมจะมีค่าเพิ่มขึ้นหากอัตราส่วนความยาวต่อความโต มีค่าสูง การขาดของเส้นใยโดยมากมีสาเหตุมาจากผิวหน้าของเส้นใยที่ไม่สมบูรณ์ หากลดขนาดความโตของเส้นใยลงจะเป็นการลดพื้นที่ผิวที่ไม่สมบูรณ์ลงด้วย การเพิ่มความยาวเส้นใย จะช่วยทำให้ความแข็งแรงของวัสดุผสมมีมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8

แสดงความสัมพันธ์ ระหว่างความยาวของเส้นใยกับความต้านทางแรงดึง [22]

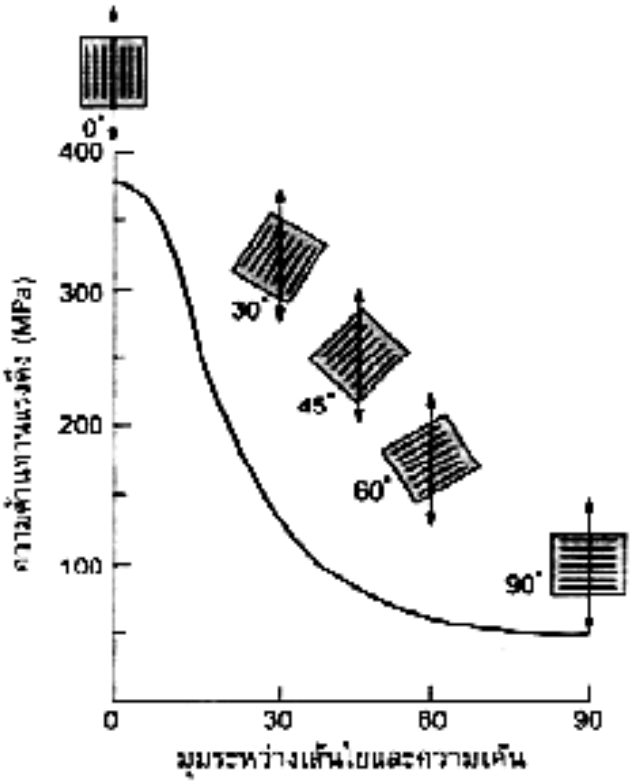
2.2.2 ปริมาณของเส้นใย

ค่าเศษส่วนปริมาตรของเส้นใยที่สูงจะทำให้ค่าความแข็งแรงของวัสดุผสมสูงขึ้นตาม โดยสามารถประเมินค่าจากกฎของของผสม อย่างไรก็ตาม ค่าเศษส่วนปริมาตรก็ไม่ควรสูงกว่า 80% ทั้งนี้เพราะว่า หากมีปริมาณของเส้นใยมากเกินไป จะทำให้วัสดุที่เป็นวัสดุหลัก ไม่สามารถจับตัวได้รอบเส้นใยทั้งหมด

2.2.3 การจัดเรียงตัวของเส้นใย

การจัดเรียงตัวของเส้นใยภายในวัสดุหลักนั้นทำได้หลายวิธี กรณีที่เส้นใยมีลักษณะสั้นและจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบในวัสดุหลัก จะทำให้ค่าของอัตราส่วนความยาวต่อความโตของเส้นใยต่ำ แต่การผลิตวัสดุผสมจะทำได้ง่าย โดยเฉพาะขั้นตอนการใส่เส้นใยลงในวัสดุหลัก อีกทั้งการกระจายตัวของความแข็งแรงจะมีอย่างสม่ำเสมอตลอดในเนื้อของวัสดุผสม

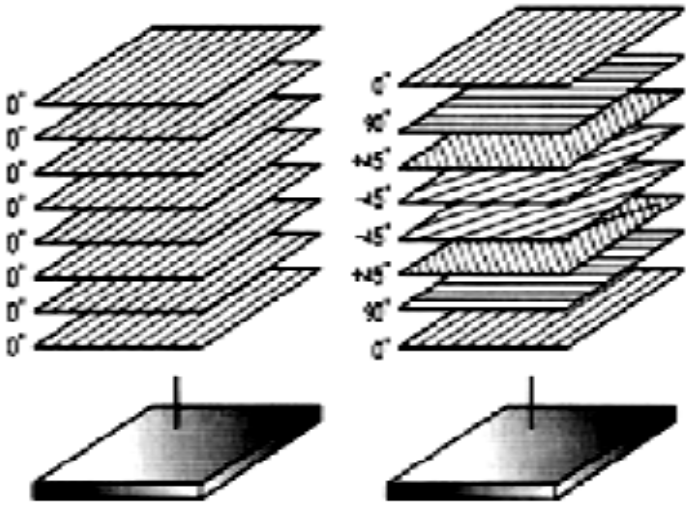
เส้นใยที่มีความต่อเนื่องและเรียงตัวในทิศทางเดียว จะทำให้คุณสมบัติการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอทั่วทุกด้าน โดยความแข็งแรงและความเหนียวจะมีมากเพียงด้านที่ขนานกับเส้นใยเท่านั้น การออกแบบการจัดเรียงเส้นใยจะทำให้มีมุมที่แตกต่างกันเป็น 0 องศา โดยทิศทางของเส้นใยที่จัดเรียงจะเป็นทิศทางเดียวกับทิศทางของการรับแรง หรือความเค้น ข้อจำกัดของการจัดเรียงตัวของเส้นใยแบบนี้คือ ทิศทางที่ตั้งฉากกับเส้นใยจะรับแรงได้ไม่ดี ดังแสดงในภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9

แสดงความสัมพันธ์ของมุมระหว่างเส้นใยและความเค้นกับความต้านทานแรงดึง [22]

หากเราต้องการวัสดุผสมที่มีการรับแรงในหลาย ๆ ทิศทาง เราสามารถกระทำได้โดยการจัดเรียงทิศทางของเส้นใยที่มีมุมแตกต่างกัน โดยใช้เส้นใยที่ต่อเนื่อง



ภาพที่ 2.10

ลักษณะการจัดเรียงตัวของชั้นเส้นใยในทิศทางเดียวและหลายทิศทาง

http://eng.sut.ac.th/me/437201%20%20Aircraft%20.html

2.3 **วิธีการทำวัสดุผสม** [18]

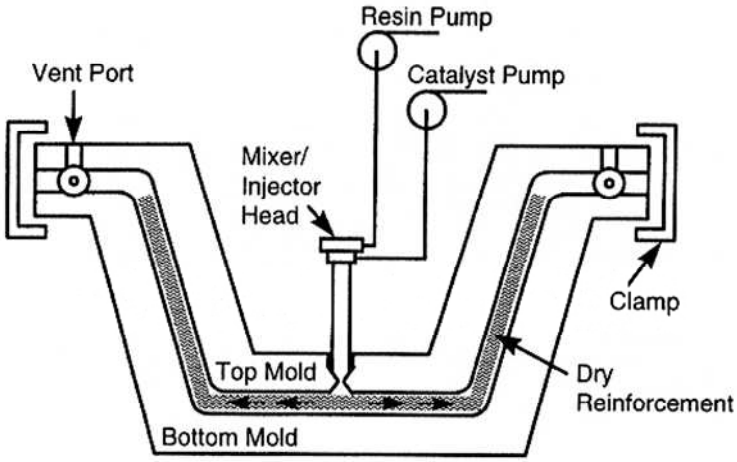
2.3.1 **วิธีการผลิตด้วยมือ**

การทำชิ้นส่วนตัวถังด้วยวัสดุผสม (พลาสติกเสริมแรง)ในยุคเริ่มแรก เช่น การผลิตเรือลำเล็ก ๆ หรือหลังคารถกระบะ ต้องอาศัยการลงมือลงแรงทำ จึงจะได้ชิ้นงานออกมาเป็นผลน่าพอใจ วิธีนี้เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายมานานแล้ว เหมาะกับชิ้นงานจำนวนไม่มากนัก โดยนำเส้นใยมาวางในแม่พิมพ์แล้วเคลือบด้วยพลาสติกเรซิน (เทอร์โมเซ็ทติ้ง) ผลจากการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี จะทำให้เรซินแข็งตัวและยึดเกาะกับเส้นใยแก้ว เมื่อชิ้นงานแข็งตัวได้ที่แล้วจะถูกแกะออกจากแม่พิมพ์ นำมาตกแต่งให้มีขอบและสวยงามยิ่งขึ้น การผลิตด้วยวิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายที่สุด ราคาถูกที่สุด แต่ต้องใช้ช่างที่มีฝีมือจึงจะสามารถควบคุมคุณภาพได้อย่างสม่ำเสมอ

ภาพที่ 2.11
ตัวอย่างการขึ้นรูปวัสดุผสมด้วยมือ[18]

2.3.2 วิธีการพ่น

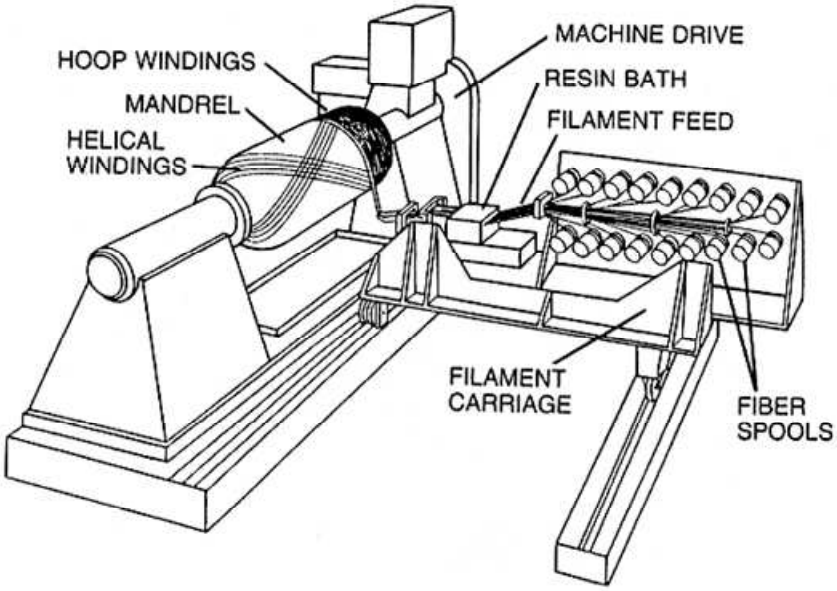
วิธีการพ่นนี้พัฒนาขึ้นจากการผลิตด้วยมือเล็กน้อย สามารถผลิตชิ้นงานได้มีคุณภาพในปริมาณมากขึ้น วิธีนี้คล้ายกับการผลิตด้วยมือ ในขณะที่เส้นใยถูกพ่นออกลงบนแม่พิมพ์ เรซินก็จะถูกพ่นออกมาพร้อมกันและเคลือบลงบนแม่พิมพ์นั้นเอง วิธีสามารถผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างสลับซับซ้อนได้มากกว่าการผลิตด้วยมือ ในขณะที่เรซินถูกพ่นออกไปจะต้องใช้สารเร่งปฏิกิริยาควบคู่กันไปด้วย หลังจากที่เส้นใยและเรซินผสมกันอยู่ในแม่พิมพ์ จะต้องนำลูกกลิ้งมาไล่ฟองอากาศออก เพื่อทำให้เส้นใยผนึกตัวกันแน่น ปล่อยทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง แล้วจึงสามารถแกะชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ได้ หลังจากขึ้นรูปเป็นชิ้นงานต้นแบบแล้ว ความหนาของชิ้นงานขึ้นอยู่กับจำนวนชั้นของแผ่นใยที่ปูทับและเรซินที่เทลงไป



ภาพที่ 2.12
ภาพจำลองการทำงานของการขึ้นรูปวัสดุผสมแบบพ่น [18]

2.3.3 วิธีการพัน

วิธีนี้สามารถเรียงเส้นใยไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งเพื่อให้รับแรงได้สูงตามที่ต้องการ การเรียงเส้นใยจะทำให้เกิดแรงต้าน (Tensile) ได้สูงขึ้นอย่างมาก วิธีนี้ใช้ในการผลิตวัสดุที่มีรูปร่างไส้ในกลวง เช่น ท่อ หรือลำตัวจรวดจะใช้เส้นใยที่มีความยาวมาก ๆ ต่อเนื่อง เส้นใย และเรซินนี้จะถูกวางตามแบบที่กำหนด จะถูกนำไปอบที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้ชิ้นงานแข็งตัวอย่างเต็มที่ เช่นการผลิตใบพัดเฮลิคอปเตอร์ และท่อต่าง ๆ



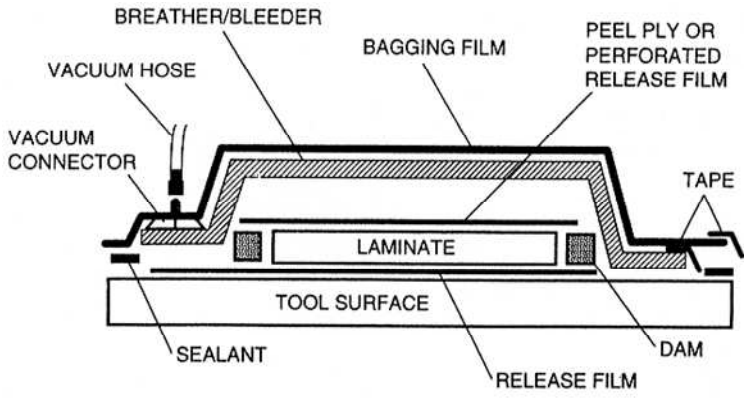
ภาพที่ 2.13
ภาพจำลองการทำงานของการขึ้นรูปวัสดุผสมแบบพัน [18]

ภาพที่ 2.14
ตัวอย่างผลิตผลของการขึ้นรูปวัสดุผสมโดยวิธีการพัน [18]

2.3.4 **วิธีการอัดขึ้นรูป** (Compression molding)

วิธีการนี้เหมาะสมเมื่อต้องการชิ้นงานจำนวนมาก และออกมาเป็นมาตรฐานเดียวกัน การอัดขึ้นรูปนี้ใช้แรงอัดบนแม่พิมพ์ และสามารถผลิตชิ้นงานที่มีคุณลักษณะค่อนข้างสลับซับซ้อน เช่น การผลิตชิ้นส่วนอุปกรณ์ไฟฟ้า หรือชิ้นงานขนาดใหญ่ เช่น ฝากระโปรงรถยนต์ได้ การอัดขึ้นรูปทำให้ชิ้นงานมีผิวเรียบได้ทั้งสองด้าน ข้อดีอีกประการหนึ่งคือสามารถใส่ชิ้นส่วนที่เป็นโลหะ เช่น นอต หรือ สกรู ลงไปได้ในขณะที่ทำการผลิต

วิธีการผลิตด้วยการอัดขึ้นรูปทำควบคู่ไปกับขั้นตอนแบบเย็น และแบบร้อน (Cold molding and Hot molding) แบบเย็นเป็นการปล่อยให้เรซินเย็นตัวลงเองที่อุณหภูมิห้อง 70 องศาฟาเรนไฮต์ ส่วนแบบร้อนนั้นเป็นการเพิ่มความร้อนเข้าไปถึง 250 องศาฟาเรนไฮต์ ซึ่งจะทำให้วัสดุจับตัวกันได้ดีขึ้น และเพื่อที่จะควบคุมไม่ให้อากาศเข้าไปแทรกตัวอยู่ การทำด้วยวิธีการอัดขึ้นรูปอาจทำในระบบสุญญากาศ ด้วยการห่อชิ้นงานด้วยถุงพลาสติกแล้วดูดลมออก เรียกวิธีนี้ว่า การผลิตภายใต้ความดันต่ำ The Low Pressure Cure (LPC)



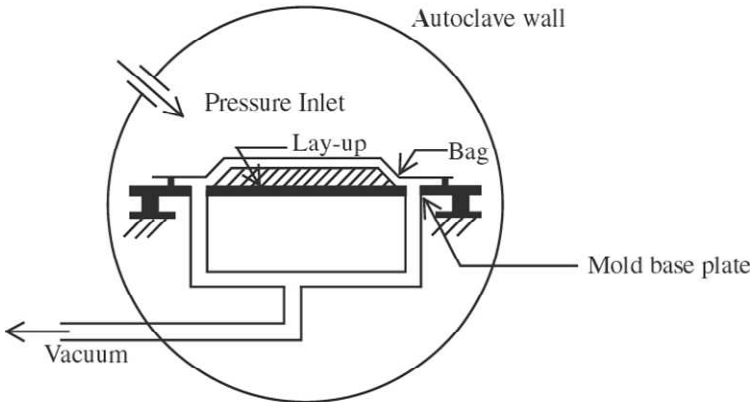
ภาพที่ 2.15

ภาพจำลองการขึ้นรูปวัสดุผสมโดยวิธีการผลิตภายใต้ความดันต่ำ The Low Pressure Cure (LPC) [18]

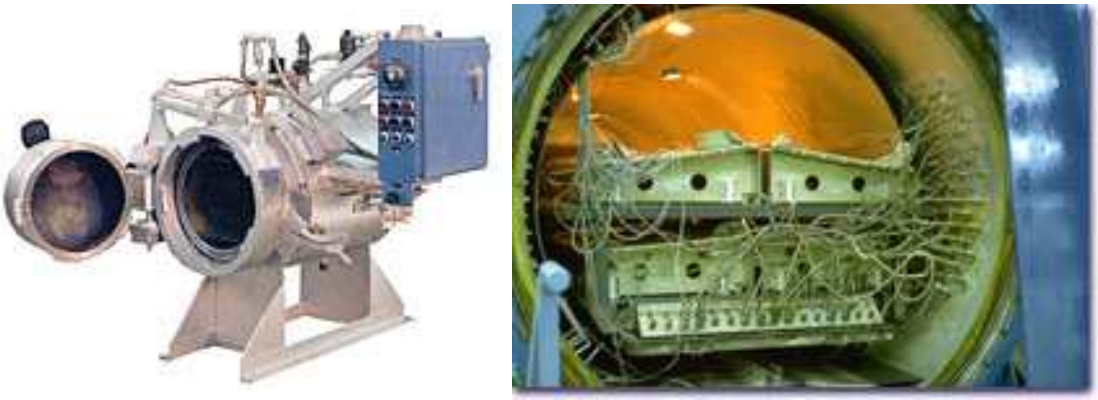
ภาพที่ 2.16
ตัวอย่างวิธีการขึ้นรูปวัสดุผสมโดยวิธีการผลิตภายใต้ความดันต่ำ The Low Pressure Cure (LPC) [18]

2.3.5 Autoclaves

กรรมวิธีการผลิตแบบความดันต่ำ LPC เหมาะสำหรับโครงสร้างที่เป็นชิ้นส่วนเล็กๆ แต่ในกรณีที่เป็นชิ้นส่วนโครงสร้างขนาดใหญ่เพื่อรองรับน้ำหนักมาก ๆ ต้องใช้วัสดุผสมวางซ้อนกันหลายชั้น จึงต้องควบคุมกระบวนการผลิต ด้วยความดันที่สูงกว่าพร้อมกับให้ความร้อนเสริมเข้าไปด้วย ซึ่งเรียกว่า autoclave อาจเข้าใจง่าย ๆ ว่าคล้ายการอบขนมปัง โดยทั่วไปเพิ่มความกดดัน 100 PSI (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) แต่บางชิ้นงานอาจต้องการความดันถึง 300 PSI ซึ่งต้องใช้เงินลงทุนสูงมากในการสร้างเตาอบ autoclave ขนาดใหญ่



ภาพที่ 2.17
ภาพจำลองการขึ้นรูปวัสดุผสมด้วยวิธี Autoclaves [18]



ภาพที่ 2.18
ตัวอย่างเครื่องมือที่ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุผสมแบบ Autoclave [18]

2.4 การเปรียบเทียบวัสดุผสมกับโลหะอลูมิเนียม

คุณสมบัติของวัสดุที่แข็งแรงและน้ำหนักเบามีความสำคัญอย่างมากกับเทคโนโลยีการผลิตเครื่องบิน ในปัจจุบันวัสดุผสมกำลังจะก้าวเข้ามาแทนที่โลหะอลูมิเนียม ที่นำมาใช้ผลิตเครื่องบินนับเป็นเวลากว่า 80 ปีมาแล้ว วัสดุผสมเริ่มถูกนำมาใช้ผลิตเครื่องบินตั้งแต่ปี ค.ศ.1950

ในสัดส่วนเพียง 2% ของเครื่องบินทั้งลำ ยี่สิบปีต่อมาเครื่องบินขับไล่ F-14 ของกองทัพเรือสหรัฐฯ เป็นเครื่องบินรบลำแรกที่ได้นำ Boron fiber มาผลิตเป็นแพนหางระดับ (Horizontal stabilizers) ต่อมาในปี 1980 เครื่องบิน AV-8B “Harrier” มีส่วนประกอบเป็นวัสดุผสมถึง 25% เมื่อวิศวกรและนักบินมีความมั่นใจในคุณสมบัติของวัสดุชนิดนี้ในวงการทหาร จึงได้นำมาใช้ในวงการบินพาณิชย์ เครื่องบิน Boeing 777 ที่สร้างในปี ค.ศ.1995 มีส่วนประกอบเป็นวัสดุผสมถึง 10% เครื่องบินรบรุ่นใหม่ F-22 โครงสร้างประกอบไปด้วยวัสดุผสมมากกว่า 30% ผู้เชี่ยวชาญการออกแบบเครื่องบินรบคาดการณ์ว่า ในอนาคตอันใกล้เครื่องบินทหารจะใช้วัสดุผสมในการสร้างถึงกว่า 70%

ข้อได้เปรียบของวัสดุผสมเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะอลูมิเนียมคือ แข็งแรงกว่าในขณะที่น้ำหนักเบากว่า สามารถขึ้นรูปให้เป็นชิ้นส่วนต่างๆได้โดยง่าย และพื้นผิวของชิ้นส่วนจะราบเรียบไร้รอยหมุด ไร้รอยเชื่อมต่อ เมื่อแรกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการบินมักนำมาสร้างเป็นชิ้นส่วนที่มีความโค้งเว้า หรือชิ้นส่วนที่ต้องเคลื่อนไหว (Flight Control และ ประตู) ซึ่งเป็นชิ้นส่วนขนาดไม่ใหญ่มากนัก ต่อมาได้นำมาสร้างเป็นเครื่องบินขนาดเล็กได้ทั้งลำ เช่น เครื่องบิน Fan Trainer เครื่องบินที่ผลิตขึ้นด้วยวัสดุผสมทั้งลำ มักจะดึงดูดใจผู้ชมตามงานแสดงเครื่องบินอยู่เสมอ เพราะรูปทรงที่กลมกลืน ไม่ว่าจะเป็นความโค้งมนหรือเหลี่ยมสัน วัสดุผสมสามารถถูกทำให้เป็นรูปทรงต่างๆได้ตามต้องการ ชิ้นงานมีผืนผิวเรียบสนิท ไร้รอยต่อ

โลหะอลูมิเนียมคือโลหะของอุตสาหกรรมการบิน กว่าร้อยปีของวงการบิน คุณสมบัติของอลูมิเนียมตอบสนองความต้องการของอุตสาหกรรมการบินได้เป็นอย่างดี อลูมิเนียมผสมกับโลหะอื่นมีความทนทานเป็นอย่างมาก และสามารถทนต่อภาระกรรมได้อย่างมากมาย ก่อนที่จะแตกหัก และมักจะมีการล้าตัวให้เห็น เป็นสิ่งบอกเหตุให้ทราบก่อนที่จะถึงจุดอันตราย ถึงแม้ว่ามันจะบุบหรือถูกกระแทก ยังคงยึดรวมตัวคงรูปอยู่ ซึ่งคุณสมบัติเช่นนี้ในวัสดุผสมยังต้องรอการทดสอบ วิจัย และใช้เวลาเป็นเครื่องพิสูจน์

อลูมิเนียมมีความทนทานมาก สามารถทนต่อแรงกระแทกกระทั้นได้อย่างมหาศาลก่อนที่จะหมดสภาพ แม้จะถูกทุบให้บุบแต่มันจะไม่แตกออก ยังคงรวมอยู่ในรูปเดิม ซึ่งในอดีตคุณสมบัติของวัสดุผสมยังเป็นเช่นนี้ไม่ได้ เครื่องบินที่สร้างจากอลูมิเนียมเมื่อบุบสามารถซ่อมแซมคืนรูปได้อย่างไม่ยาก โดยใช้เทคนิคและค่าใช้จ่ายไม่สูง วัสดุผสมจึงเหมาะสำหรับเครื่องบินทางทหารที่มีระบบซ่อมบำรุงเฉพาะทางดีกว่าเครื่องบินโดยสารพาณิชย์เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว และสร้างความมั่นใจในการนำวัสดุผสมมาใช้งานนักวิจัยได้ค้นคว้าและพัฒนา และทดสอบคุณสมบัติด้านต่างๆ ของวัสดุผสมดังต่อไปนี้

1. ความแข็งและความเหนียว

2. ทางการยึดเกาะ (Adhesive properties)

3. ความทนทานต่อการแตกร้าว (Toughness properties)

4. ต้านทานต่อภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป

วัสดุผสมจะต้องได้รับการทดสอบเพื่อให้มีคุณสมบัติตรงกับการใช้งาน เช่น สามารถทนต่อแรงกระแทก ความแข็งแรงต่อภาระกรรม (Strength under load) แรงดึงต่อการอัดตัว (Tensile Compression) แรงเฉือน (Shear) การโค้งงอ (Flexure) ความคงทน (Durability) ความเปราะ การฉีกลอก และด้านอื่น ๆ ที่สำคัญวัสดุผสมจะต้องได้รับการปรับแต่งเพื่อให้มีคุณสมบัติคงที่ตามต้องการ(Tailored)

วัสดุใด ๆ ก็ตามมักจะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไปตามสภาวะแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความกดดัน ความชื้น น้ำทะเล และอื่น ๆ ปีกและลำตัวเครื่องบินต้องสามารถรับภาระกรรมสลับไปมา ได้ตั้งแต่ที่อุณหภูมิร้อนจัด 45 องศาเซลเซียส/ความกดดันบรรยากาศระดับน้ำทะเล (14.7 PSI) ไปจนถึงอุณหภูมิเย็นจัดลบ 40 องศาเซลเซียส ที่ระดับความสูง 50,000 ฟุต/ความกดดันบรรยากาศ 2 PSI อุณหภูมิแตกต่างกันเกือบ 100 องศา ความกดดันแตกต่างกันกว่า 10 PSI กลับไปมาในเวลาไม่ถึงครึ่งชั่วโมง และการปรับแต่งคุณสมบัติของคอมโพสิตส์ให้ผ่านการทดสอบนั้นสามารถกระทำได้หลายวิธี

ข้อได้เปรียบของวัสดุผสมคือ สามารถรับภาระกรรมจากแรงกระทำได้ทุกทิศทางตามความต้องการด้วยการ "ปูผ้าและวางแนว" ให้เหมาะสมในแต่ละส่วนของเครื่องบิน ซึ่งวิธีนี้โลหะอลูมิเนียมไม่สามารถทำได้ วัสดุผสมเบากว่าอลูมิเนียมและจะไม่ล้าตัว (fatigue) แบบเดียวกับที่เกิดขึ้นกับโลหะ ทำให้เครื่องบินที่ใช้วัสดุผสม มีอายุการใช้งานที่นานกว่าเครื่องบินที่สร้างจากโลหะอลูมิเนียมอยู่มาก วิศวกรสามารถออกแบบปีกเครื่องบินให้ถูกดัดโค้งงอไปด้านเดียว รับภาระกรรมได้ด้านเดียว ด้วยวิธีง่าย ๆ โดยการปูผ้าให้แนวเส้นใยเรียงไปในทิศทางต่างกัน ซึ่งวิธีนี้ไม่สามารถทำได้โดยโลหะที่น้ำหนักเท่ากัน

อีกวิธีหนึ่งคือการผสมผสานระหว่างอลูมิเนียมและวัสดุผสม (Hybrids combine aluminum and composite construction) วิธีการนี้กำลังถูกพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อหาวิธีในการปูผ้าวางแนวให้เข้ากับแผ่นอลูมิเนียม ซึ่งจะทำให้สามารถลดน้ำหนักชิ้นงาน

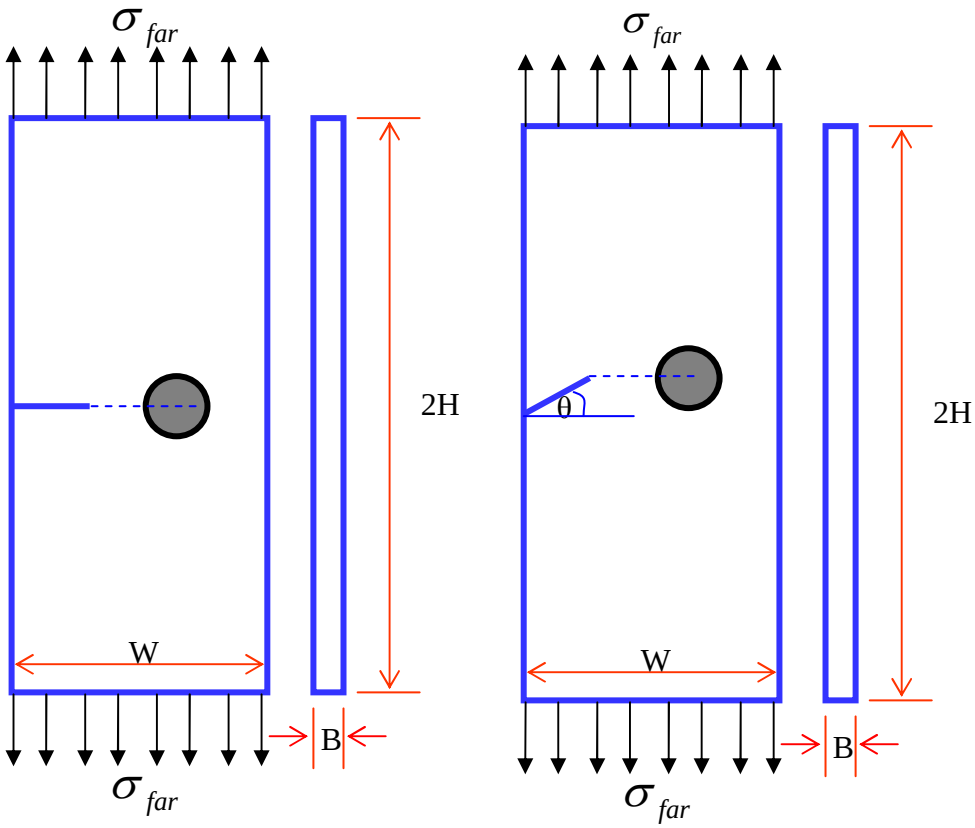
2.5 ที่มาและความสำคัญที่เกี่ยวข้องกับวัสดุผสม

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า วัสดุผสมมีการนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง ด้วยคุณสมบัติที่โดดเด่นในเรื่องของความแข็งแรงเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักที่สูงมาก ทำให้วัสดุผสมกำลังเป็นที่สนใจอยู่ในขณะนี้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ วิจัยเรื่องของวัสดุผสมที่มีวัสดุหลักเป็นโพลีเมอร์และวัสดุเสริมแรง ในที่นี้เรียกว่า Inclusion 2 ชนิด คือแบบแข็ง (Hard inclusion) และแบบอ่อน (Soft inclusion)

เหตุที่ต้องศึกษาชนิดของ Inclusion นั้น เนื่องจาก คุณสมบัติของวัสดุผสมมีที่การผสมแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยคงคุณสมบัติเดิมของวัสดุนั้น ๆ ไว้ หากวัสดุที่นำมาผสมมีคุณสมบัติด้านความแข็งแรงต่ำกว่า (Soft inclusion) กล่าวคือมี Young's modulus ต่ำกว่าวัสดุหลักคือโพลีคาร์บอเนต แต่คุณสมบัติด้านอื่น ๆ เป็นที่ต้องการ เช่น เทฟลอน (Teflon) ด้วยคุณสมบัติที่ไม่ละลายในตัวทำละลายใด ๆ และมีผิวเรียบป้องกันการเกาะติดของน้ำและน้ำมัน จึงเป็นคุณสมบัติที่ดีที่มีผู้นำเทฟลอนมาผสมกับวัสดุหลัก เพื่อให้ได้คุณสมบัติ ต่าง ๆ ดังที่กล่าว ทำให้วัสดุเสริมแรงไม่ได้ยึดติดที่ความแข็งแรงเพียงอย่างเดียว แต่กลับขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและการใช้งานที่หลายหลายด้วย

การจัดเรียงตัวของ Inclusion มีผลอย่างมากต่อคุณสมบัติของวัสดุผสม จากการศึกษาพบว่า การเรียงตัวของ Inclusion แบบต่อเนื่องในทิศทางเดียวกันจะทำคุณสมบัติกระจายตัวไม่สม่ำเสมอทั่วทุกด้าน โดยความแข็งแรงและความเหนียวเพียงด้านที่ขนานกับความยาวของ Inclusion เท่านั้น หากเกิดรอยร้าวขึ้นในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางของเส้นใย จะส่งผลเสียหายมากที่สุด วิทยานิพนธ์นี้จึงมุ่งเน้นศึกษาในสภาพที่รุนแรงที่อาจเกิดขึ้นเมื่อนำวัสดุผสมมาใช้งาน คือการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างรอยร้าว และInclusionที่วางตัวในแนวเดี่ยวกับการขยายตัวของรอยร้าว

ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้ช่วยสนับสนุนการศึกษาถึงคุณสมบัติของวัสดุผสม ในเรื่องของความทนทานต่อการแตกร้าว โดยเลือกศึกษาพารามิเตอร์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นในรูปแบบเปิดและรูปแบบเฉือน เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของปัญหาที่มีรอยร้าวกับวัสดุผสม โดยมีวัสดุเสริมแรง ทั้ง 2 แบบ คือวัสดุเสริมแรงแบบแข็ง (Hard inclusion) และวัสดุเสริมแรงแบบอ่อน (Soft inclusion) โดยเลือกศึกษาการวางตัวของวัสดุเสริมแรงในแนวเดียวกับการขยายตัวของรอยร้าว ดังตัวอย่างในภาพที่ 2.19



(ก) (ข)

ภาพที่ 2.19

แสดงรูปร่างของชิ้นทดสอบที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

(ก) ปัญหาแผ่นสี่เหลี่ยมแบบมีรอยร้าวข้างเดียวภายใต้แรงดึง

(ข) ปัญหาแผ่นสี่เหลี่ยมแบบมีรอยร้าวเฉียงมุม θ ภายใต้แรงดึง