

บทที่ 6

วัสดุเชิงประกอบ

1. ความหมายของวัสดุเชิงประกอบ

วัสดุเชิงประกอบ (Composite Materials) คือ วัสดุที่เกิดจากการนำวัสดุตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปที่มีสมบัติทางเคมีหรือกายภาพแตกต่างกันมาผสมรวมกัน เพื่อสร้างเป็นวัสดุใหม่ที่มีคุณสมบัติโดดเด่นกว่าวัสดุเดิมที่เป็นองค์ประกอบเดี่ยว เช่น มีความแข็งแรงมากขึ้น แต่น้ำหนักเบา

2. ประเภทและโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบ

วัสดุเชิงประกอบ โดยทั่วไปจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

2.1 วัสดุเนื้อหลัก (Matrix) ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการยึดเกาะ ห่อหุ้ม และถ่ายเทแรงไปยังส่วนเสริมแรง สามารถจำแนกออกได้อีก 3 ประเภท ดังนี้

2.1.1 วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ (Polymer matrix composite, PMC) คือ วัสดุที่เกิดจากการนำ พอลิเมอร์มาเป็นเนื้อวัสดุหลัก และเสริมแรงด้วย เส้นใยชนิดต่างๆ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติให้แข็งแรง ทนทาน เบา และต้านทานการกัดกร่อนได้ดีกว่าพอลิเมอร์ทั่วไป ทำให้สามารถนำไปใช้แทนโลหะในงานโครงสร้างได้ โดย PMC มีจุดเด่นคือ น้ำหนักเบา แข็งแรงสูง ทนการกัดกร่อน และมีราคาต้นทุนต่ำกว่าโลหะ

ตารางที่ 6.1 วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ (Polymer matrix composite, PMC)

ชนิดของ PMC	ลักษณะการใช้งาน
พอลิเมอร์เสริมแรงด้วยใยแก้ว	ตัวถังเรือ ชิ้นส่วนรถยนต์ ถึงบรรจุสารเคมี ท่อน้ำ แข็งแรงสูง และอุปกรณ์ก่อสร้าง
พอลิเมอร์เสริมแรงด้วยคาร์บอนไฟเบอร์	โครงสร้างเครื่องบินและเฮลิคอปเตอร์ ตัวถัง รถแข่ง ไม้อัดกีฬ จักรยานเสือหมอบ และ อุปกรณ์กีฬาประสิทธิภาพสูง
พอลิเมอร์เสริมแรงด้วยใยอะรามิด	เสื้อกันกระสุน ชุดเกราะป้องกัน ชิ้นส่วน โครงสร้างเครื่องบินที่ต้องการความเหนียว และ ผ้าเบรก
วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้	ไม้ระแนง ไม้เทียมสำหรับปูพื้นภายนอก รั้วบ้าน และชิ้นส่วนตกแต่งภายในรถยนต์

วัสดุเชิงประกอบในงานการแพทย์	รากฟันเทียม วัสดุอุดฟัน อุปกรณ์ช่วยพยุงกระดูก และแขนขาเทียม
วัสดุเชิงประกอบในงานอิเล็กทรอนิกส์	แผงวงจรพิมพ์ (PCB) ซึ่งมักทำจากแผ่นใยแก้ว เคลือบด้วยอีพ็อกซีเรซิน

จุฑาศินี พรพุทธศรี (2568)

2.1.2 วัสดุเชิงประกอบโลหะ (Metal matrix composite, MMC) คือ วัสดุผสมที่มีโลหะหรือโลหะผสม เป็นวัสดุเนื้อพื้นและเสริมแรงด้วยวัสดุชนิดอื่น เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติที่โลหะปกติทำไม่ได้ MMC จะเบากว่าเหล็กแต่แข็งแรงทนทาน ทนความร้อนได้ดี สามารถใช้งานในอุณหภูมิสูงได้ดีกว่า PMC ทนทานต่อการสึกหรอ มีความแข็งแรงสูงและทนต่อการขัดสีได้ดีเยี่ยม นำความร้อนและไฟฟ้าได้ดี ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่ใช้เป็นเนื้อพื้น

ตารางที่ 6.2 วัสดุเชิงประกอบโลหะ (Metal matrix composite, MMC)

ชนิดของ MMC	ลักษณะการใช้งาน
อะลูมิเนียมคอมโพสิต	เป็นกลุ่มที่นิยมใช้มากที่สุดเนื่องจากมีน้ำหนักเบา และราคาคุ้มค่า
Al + Silicon Carbide	ใช้ทำ จานเบรกและลูกสูบเครื่องยนต์ ในรถยนต์ สมรรถนะสูง ช่วยลดน้ำหนักและทนต่อการสึกหรอได้ดีเยี่ยม
ไททาเนียมคอมโพสิต	เน้นการใช้งานในสภาวะสุดโต่งที่ต้องการความแข็งแรงสูงมากและทนความร้อน
Ti + Ceramic Particles	ใช้ทางการแพทย์สำหรับ รากฟันเทียมและข้อต่อเทียม เนื่องจากมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพสูง และทนต่อการกัดกร่อน
แมกนีเซียมคอมโพสิต	เป็นวัสดุโครงสร้างที่เบาที่สุดตัวหนึ่ง
Mg + Silicon Carbide	ใช้ใน อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พกพา เช่น โครง โน้ตบุ๊กหรือมือถือ และชิ้นส่วนระบบส่งกำลังในรถยนต์ เพื่อลดน้ำหนักให้ได้มากที่สุด

ทองแดงคอมโพสิต Cu + Carbon Nanotubes	เน้นการนำไฟฟ้าและความร้อน ใช้ทำ อุปกรณ์ระบายความร้อน (Heat Sinks) สำหรับชิปประมวลผลประสิทธิภาพสูงและโมดูล พลังงานในรถยนต์ไฟฟ้า
วัสดุอื่นๆ ในกลุ่ม MMC Cobalt + Tungsten Carbide	ใช้ทำ ดอกสว่านและเครื่องมือตัด ใน อุตสาหกรรมหนัก ซึ่งมีความแข็งแรงเกือบเท่าเพชร

จุฑา ศินี พรพุทธรศรี (2568)

2.1.3 วัสดุเชิงประกอบเซรามิก (Ceramic matrix composite, CMC) คือ วัสดุวิศวกรรมขั้นสูงที่เกิดจากการรวมกันของวัสดุ 2 ส่วนคือ เนื้อพื้นเซรามิก และ วัสดุเสริมแรง ซึ่งมักอยู่ในรูปของเส้นใยเซรามิก โดยปกติเซรามิกทั่วไปจะมีความแข็งแรง ทนความร้อนสูงแต่มีข้อเสียคือ ความเปราะ (Brittleness) แตกหักง่ายเมื่อเกิดแรงกระแทกหรืออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง ฉะนั้น การเติมเส้นใยเสริมแรงเข้าไปใน CMC จึงมีเป้าหมายเพื่อ เพิ่มความเหนียวเส้นใยจะช่วยยับยั้งการขยายตัวของรอยแตก ทำให้วัสดุไม่แตกหักแบบทันทีทันใด ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ มีความต้านทานต่อการช็อกความร้อน น้ำหนักเบาแต่แข็งแรง มีความหนาแน่นต่ำกว่าโลหะผสม สามารถคงความแข็งแรงได้ในอุณหภูมิที่สูง

ตารางที่ 6.3 วัสดุเชิงประกอบเซรามิก (Ceramic matrix composite, CMC)

ชนิดของ CMC	ลักษณะการใช้งาน
กลุ่มคาร์บอน Carbon/Carbon	ระบบเบรกของเครื่องบินพาณิชย์และรถแข่ง Formula 1 ฝาครอบจุมุกและขอบปีกของยานอวกาศ ทนความร้อนได้สูงกว่า 2,000°C
กลุ่มซิลิกอนคาร์ไบด์ Silicon Carbide/Silicon Carbide	ชิ้นส่วน โซนร้อน ในเครื่องยนต์เจ็ทสมัยใหม่ เช่น ใบพัดเทอร์ไบน์ และห้องเผาไหม้ ซึ่งช่วยให้เครื่องยนต์ทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 1,600°C ช่วยประหยัดน้ำมันได้มากขึ้น

กลุ่มออกไซด์

Oxide/Oxide

ปลายท่อไอเสียเครื่องบิน อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในโรงไฟฟ้า และระบบป้องกันความร้อนสำหรับอาวุธความเร็วเหนือแสง

การใช้งานด้านการแพทย์และเทคโนโลยีขั้นสูง

อะลูมินาผสมเซอร์โคเนีย

ใช้ผลิตหัวสโปกเทียม และวัสดุอุดฟัน เนื่องจากมีความแข็งแรงสูงและเข้ากับร่างกายได้ดี

จุฑาศินี พรพุทธศรี (2568)

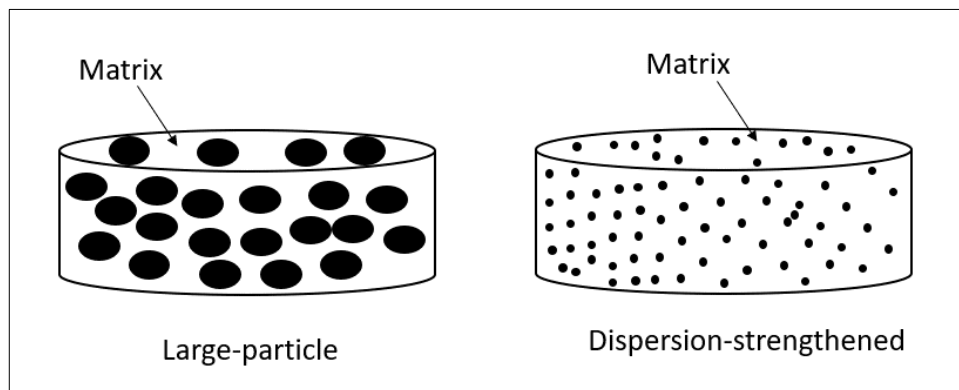
2.2 วัสดุส่วนเสริมแรง (Reinforcement) เป็นส่วนที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อหลัก เพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรง ความแข็งแกร่ง หรือคุณสมบัติเฉพาะด้านอื่นๆ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทตามลักษณะการเสริมแรง ดังนี้

2.2.1 การเสริมแรงด้วยอนุภาค (Particle Reinforced)

วัสดุเชิงประกอบ ที่มีส่วนเสริมแรงด้วยอนุภาค สามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ วัสดุเชิงประกอบที่มีการเพิ่มความแข็งแรงด้วยอนุภาคขนาดใหญ่ และวัสดุเชิงประกอบที่มีการเพิ่มความแข็งแรงด้วยอนุภาคขนาดเล็ก

1) วัสดุเชิงประกอบที่มีการเพิ่มความแข็งแรงด้วยอนุภาคขนาดใหญ่ (Large-particle composite) คำว่าอนุภาคขนาดใหญ่ คือการมองในภาพของอนุภาคไม่ใช่การมองเห็นในระดับอะตอม หรือโมเลกุล อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการเสริมแรงให้มีประสิทธิภาพขนาดของอนุภาคไม่ควรมีขนาดใหญ่เกินไป ควรมีอนุภาคกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และมีรูปร่างของอนุภาคหลายแบบ ควรจะมีลักษณะที่สมมาตรกันขนาดเท่ากันในทุกๆทิศทาง ซึ่งจะทำให้วัสดุเชิงประกอบมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น

2) วัสดุเชิงประกอบที่เพิ่มความแข็งแรงด้วยอนุภาคขนาดเล็ก (Dispersion-strengthened composite) คือวัสดุเชิงประกอบ ที่มีอนุภาคเล็กๆ ในวัสดุ ซึ่งโดยทั่วไปอนุภาคจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 – 100 นาโนเมตร จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงในระดับอะตอม หรือโมเลกุล



ภาพที่ 6.1 การเสริมแรงด้วยอนุภาค (Particle Reinforced)

ที่มา (จุฑาศินี พรพุทศรี, 2568)

2.2.2 วัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยเส้นใย (Fiber-reinforced Composite) คือ วัสดุที่เกิดจากการรวมตัวกันของ เส้นใยเป็นตัวเสริมแรง เช่น ใยแก้ว ใยคาร์บอน เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและคุณสมบัติเชิงกล กับ วัสดุเมทริกซ์ ซึ่งเป็นตัวประสาน อาจเป็นโพลิเมอร์ โลหะ หรือเซรามิก เพื่อขึ้นรูปให้เป็นวัสดุใหม่ที่มีคุณสมบัติโดดเด่นกว่าเดิม เช่น แข็งแรงสูง น้ำหนักเบา ทนทานต่อการกัดกร่อน เหมาะสำหรับงานอุตสาหกรรมหลากหลาย เช่น ยานยนต์ การบิน และโครงสร้างต่างๆ วัสดุที่ใช้เป็นเส้นใยมีหลายรูปแบบ ดังนี้

1) วิสเกอร์ (Whisker) คือวัสดุเสริมแรงประเภทหนึ่งในวัสดุเชิงประกอบที่มีลักษณะเป็น ผลึกเดี่ยว รูปทรงเข็ม มีโครงสร้างผลึกที่สมบูรณ์ มีโครงสร้างอะตอมที่เรียงตัวอย่างเป็นระเบียบทำให้มันมีความแข็งแรงสูงมากจนเกือบเท่ากับค่าทางทฤษฎีของวัสดุนั้นๆ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมากระดับไมโครเมตรหรือนาโนเมตร มีค่ามอดูลัสยืดหยุ่น และความต้านทานแรงดึงสูงกว่าเส้นใยโพลีคริสตัลไลน์ทั่วไป มีข้อจำกัดในกระบวนการผลิตเนื่องจากเป็นผลึกเดี่ยวที่สมบูรณ์จึงมีความซับซ้อนและราคาแพง มักใช้เสริมแรงในวัสดุหลักประเภท เซรามิก เพื่อเพิ่มความเหนียว และป้องกันการขยายตัวของรอยร้าว รวมถึงใช้ในโลหะและพอลิเมอร์ประสิทธิภาพสูง

ตารางที่ 6.4 วัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดวิสเกอร์ (Whisker-Reinforced Composite)

ชนิดของวิสเกอร์	คุณสมบัติและการใช้งาน
อะลูมินา (Al_2O_3 Whiskers)	มีจุดเด่นด้านความเสถียรทางเคมี ทนต่อการออกซิเดชัน และทนอุณหภูมิสูงได้ดีเยี่ยม มักใช้เสริมแรงในวัสดุผสมประเภทโลหะและเซรามิก
ซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC Whiskers)	ได้รับฉายาว่าเป็น "ราชาแห่งวิสเกอร์" เนื่องจากมีความแข็งแรง ค่ามอดูลัส และทนความร้อนสูงที่สุด นิยมใช้เสริมแรงในเซรามิก เพื่อทำเครื่องมือตัดประสิทธิภาพสูง
ซิลิกอนไนไตรด์ (Si_3N_4 Whiskers)	มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับซิลิกอนคาร์ไบด์แต่ราคาอาจสูงกว่า นิยมใช้เพิ่มความเหนียว ให้กับโครงสร้างเซรามิก
แกรไฟต์ (Graphite Whiskers)	เป็นผลึกเดี่ยวของคาร์บอนที่มีความแข็งแรงและค่ามอดูลัสสูงมากในแนวระนาบผลึก มักถูกกล่าวถึงในฐานะวัสดุเสริมแรงยุคแรกๆ และใช้เป็นแม่แบบในการสังเคราะห์วิสเกอร์ชนิดอื่น

จุฑาศินี พรพุทธศรี (2568)

2) ไฟเบอร์ (Fiber) คือวัสดุที่เกิดจากการผสมระหว่าง วัสดุพื้น เช่น พอลิเมอร์ โลหะ หรือเซรามิก เข้ากับ เส้นใยเสริมแรง (Reinforcement fibers) เพื่อให้ได้วัสดุใหม่ที่มีคุณสมบัติเชิงกลดีกว่าเดิม โดยเส้นใยทำหน้าที่รับภาระแรงดึงหลัก ในขณะที่วัสดุพื้นช่วยยึดเกาะและป้องกันความเสียหายให้กับเส้นใย มีความแข็งแรงเท่าโลหะแต่น้ำหนักเบากว่ามาก ทนทานต่อการกัดกร่อน: ไม่เป็นสนิมเหมือนเหล็ก จึงนิยมใช้ในงานโครงสร้างที่ต้องสัมผัสสารเคมีหรือน้ำทะเล สามารถปรับทิศทางของเส้นใยเพื่อรับแรงในทิศทางที่ต้องการได้

ตารางที่ 6.5 วัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดไฟเบอร์ (Fiber-reinforced composite)

ชนิดของไฟเบอร์	คุณสมบัติและการใช้งาน
เส้นใยแก้ว (Glass Fiber)	มีราคาถูกและมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีเมื่อเทียบกับราคา มักใช้ในงานก่อสร้าง และอุตสาหกรรมทั่วไป
เส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber)	มีน้ำหนักที่เบามาก มีความแข็งแรงและความแข็งแกร่งสูงมาก นิยมใช้ในอากาศยาน รถยนต์สมรรถนะสูง และอุปกรณ์กีฬา
เส้นใยอะรามิด (Aramid Fiber)	มีความเหนียวและทนต่อแรงกระแทกได้ดีเยี่ยม นิยมใช้ในเสื้อเกราะกันกระสุนและชิ้นส่วนอากาศยาน
เส้นใยธรรมชาติ (Natural Fiber)	เช่น ปอ กัญชง หรือเส้นใยจากพืชอื่นๆ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ย่อยสลายได้

จุฑาศินี พรพุทศรี (2568)

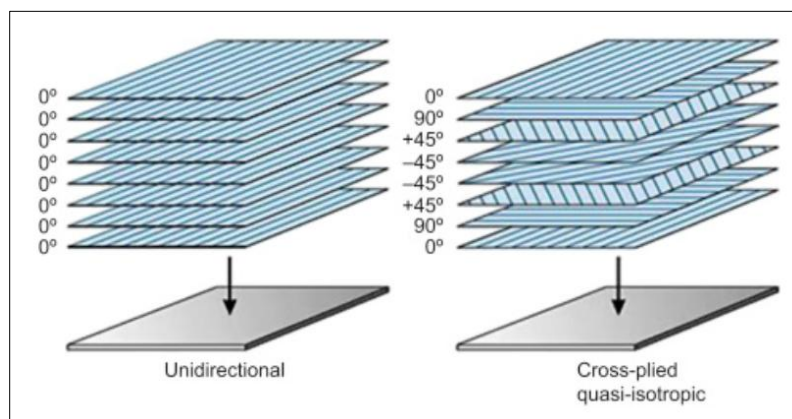
3) ลวดเล็ก (Fine wire) โดยทั่วไปลวดเล็กจะมีขนาดใหญ่กว่าวิสเกอร์ และไฟเบอร์ เช่น ลวดเหล็กกล้า โมลิบดีนัม ทังสเตน เป็นตัวเสริมแรง เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและเหนียวให้กับวัสดุเนื้อพื่น ที่อาจเป็น โลหะ พอลิเมอร์ หรือเซรามิก นิยมใช้ในงานที่ต้องการความทนทานสูง เช่น เสริมแรงยางรถยนต์ หรือเคสจรวด เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ดีกว่าวัสดุเดี่ยวๆ

ตารางที่ 6.6 วัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยลวดเล็ก (Fine wire reinforced composite)

ชนิดของลวดเสริมแรง	คุณสมบัติและการใช้งาน
เหล็กกล้า (Steel)	มีความแข็งแรงเชิงดึงสูงมาก (600,000 psi) และราคาประหยัด
สแตนเลส (Stainless Steel)	ทนต่อการกัดกร่อนได้ดีเยี่ยม
โลหะทนความร้อน	โมลิบดีนัม หรือทังสเตน มีจุดหลอมเหลวสูง
เบอริลเลียม (Beryllium)	ให้ความหนาแน่นต่ำแต่มีความแข็งแรงสูง

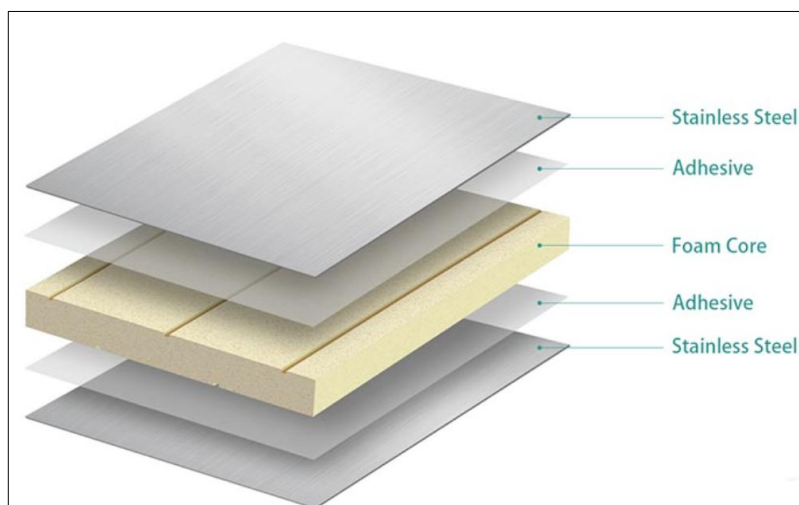
2.2.3 วัสดุเชิงประกอบโครงสร้าง (Structural Composite) คือวัสดุที่ออกแบบมาเพื่อใช้ในงานที่ต้องการความแข็งแรงและการคงตัวทางโครงสร้างสูง โดยเกิดจากการนำวัสดุตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปมาประกอบกันในระดับที่มองเห็นได้ เพื่อให้ได้สมบัติที่เหนือกว่าวัสดุเดิม สามารถแบ่งตามลักษณะการจัดเรียงโครงสร้างได้เป็น 2 ประเภทหลัก ดังนี้

1) วัสดุเชิงประกอบแบบลามิना (Laminar Composites) คือ วัสดุเชิงประกอบโครงสร้างที่เกิดจากการนำแผ่นวัสดุบางๆ หลายชั้นมาวางซ้อนทับกันและยึดติดกันด้วยตัวเชื่อมหรือกาว โดยการ จัดเรียงทิศทาง ของแต่ละชั้นให้ต่างกันเพื่อเสริมความแข็งแรงในหลายทิศทาง แสดงดังที่ 6.2



ภาพที่ 6.2 โครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบแบบลามิना (Laminar Composites) ที่มา (Sohel Rana and Raul Figueiro, 2016)

2) แผงประกบแบบแซนด์วิช (Sandwich Panels) คือวัสดุทางวิศวกรรมแบบวัสดุเชิงประกอบ มีส่วนประกอบแกนกลาง เรียกว่า Core วัสดุที่นิยมใช้ เช่น Polyisocyanurat (PIR), Polyurethane (PU), Expanded Polystyrene (EPS) และ Rock Wool (ใยหิน) และประกบที่ด้านบนและด้านล่างด้วยแผ่นที่เป็นผิวนอก จะเรียกว่า Face มักทำจากวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง เช่น แผ่นเหล็กเคลือบสี (PPGI), อลูมิเนียม หรือสแตนเลส ทำหน้าที่รับแรงดึง แรงกด และป้องกันแกนกลาง มีกาว (Adhesive) ทำหน้าที่เชื่อมให้แผ่น Core และ Face ให้ยึดติดกัน หน้าที่ของแผ่น Face คือเป็นตัวรองรับน้ำหนักเกือบทั้งหมดที่กระทำต่อโครงสร้าง ส่วน Core จะช่วยเพิ่มค่า Shear rigidity ในระนาบตั้งฉากกับแผ่น Face ส่วนใหญ่จะเป็นโครงสร้างโปร่งหรือมีรูพรุนที่แบบโครงสร้างของ Core ที่นิยมใช้ คือแบบรังผึ้ง (Honeycomb)



ภาพที่ 6.3 โครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบแผงประกบแบบแซนด์วิช (Sandwich Panels) ที่มา (Sandwich Panel Machinery Co., Ltd., n.d.)

จุดเด่นและการใช้งานในงานวิศวกรรมของแผงประกบแบบแซนด์วิช คือ มีความแข็งแรงต่อน้ำหนักมี โครงสร้างคล้ายคาน I-Beam ทำให้รับแรงดัด ได้ดีมากในขณะที่มีน้ำหนักเบา ช่วยลดต้นทุนโครงสร้างอาคารได้ถึง 40%, การประหยัดพลังงาน เนื่องจากเป็นฉนวนกันความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง ช่วยรักษาอุณหภูมิภายในอาคารและประหยัดค่าไฟฟ้า, สามารถติดตั้งได้อย่างรวดเร็วเนื่องจากเป็นแผงสำเร็จรูป จึงประหยัดเวลาและค่าแรงในการติดตั้งเมื่อเทียบกับผนังก่ออิฐฉาบปูน มี มาตรฐานความปลอดภัย มักถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม ห้องเย็น ห้องคลีนรูม และอาคารสำเร็จรูปตามมาตรฐาน GMP และ HACCP

3. สมบัติของวัสดุเชิงประกอบ

สมบัติของวัสดุเชิงประกอบ คือคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่เกิดขึ้นจากการรวมตัวกันของวัสดุตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป เพื่อให้ได้คุณลักษณะที่วัสดุเดิมไม่สามารถให้ได้ สมบัติที่สำคัญประกอบด้วยด้านต่างๆ ดังนี้

3.1 สมบัติทางกล (Mechanical Properties) มีอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง เป็นสมบัติเด่นที่สุด โดยมีความแข็งแรงและแข็งแรงสูง น้ำหนักเบา มีความแข็งแรงสูงเฉพาะทิศทางสามารถออกแบบให้รับแรงได้อย่างมหาศาลตามแนวการเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรงและมีความทนทานต่อการขีดสีและแรงกระแทก ป้องกันการแตกร้าวและการสึกหรอได้ดีกว่าวัสดุพื้นฐาน

3.2 สมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical & Chemical Properties) มีความต้านทานการกัดกร่อน ไม่เป็นสนิมและทนทานต่อสารเคมี กรด หรือด่างได้ดี เหมาะสำหรับงานทางทะเลและอุตสาหกรรมเคมีมีเสถียรภาพทางขนาด มีการขยายตัวทางความร้อนต่ำ ทำให้คงรูปทรงได้ดีแม้ใน

สภาพแวดล้อมที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลง และทนความร้อน สามารถคงสมบัติเชิงกลได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่าพอลิเมอร์ทั่วไป

3.3 สมบัติสมัยใหม่ (Smart & Multifunctional Properties) หรือเรียกว่า วัสดุฉลาด เริ่มมีการฝังเซนเซอร์ลงในเนื้อวัสดุเพื่อตรวจสอบความแข็งแรงเชิงโครงสร้าง เป็นวัสดุชีวภาพมีสมบัติการย่อยสลายได้หรือรีไซเคิลได้ง่ายขึ้นตามมาตรฐานเศรษฐกิจหมุนเวียน โดยใช้ใยธรรมชาติเสริมแรง มีความสามารถในการออกแบบ สามารถปรับเปลี่ยนสัดส่วนผสมเพื่อเลือกเฉพาะคุณสมบัติที่ต้องการ เช่น การนำไฟฟ้าหรือการเป็นฉนวนความร้อน

4. กระบวนการผลิตวัสดุเชิงประกอบ

กระบวนการผลิตวัสดุเชิงประกอบ (Composite Manufacturing Processes) มีการแบ่งประเภทตามลักษณะการขึ้นรูปและเทคโนโลยีที่ใช้ เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่ตรงตามความต้องการทั้งในด้านความแข็งแรงและต้นทุน โดยมีกระบวนการหลักดังนี้

4.1 การขึ้นรูปในแม่พิมพ์เปิด (Open Molding) เป็นวิธีแบบดั้งเดิมที่เข้าถึงง่ายและค่าใช้จ่ายอุปกรณ์ต่ำ การขึ้นรูปในแม่พิมพ์เปิดจึงเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากวัสดุเชิงประกอบ ที่ต้องการความยืดหยุ่นในการออกแบบและต้นทุนไม่สูงมากนัก มีประเภทหลักๆ ดังนี้

4.1.1 การขึ้นรูปด้วยมือ (Hand Lay-up) เป็นวิธีที่พื้นฐานที่สุด โดยวางใยแก้วลงในแม่พิมพ์ทีละชั้น แล้วทาเรซินด้วยแปรงหรือลูกกลิ้งด้วยมือ เหมาะสำหรับงานหลากหลาย

4.1.2 การขึ้นรูปด้วยการพ่น (Spray-up) คือการใช้ปืนพิเศษพ่นใยแก้วสับและเรซินผสมกันลงบนแม่พิมพ์ ทำได้รวดเร็ว เหมาะกับการผลิตปริมาณมาก

4.1.3 การขึ้นรูปด้วยเส้นใยพัน (Filament Winding) คือการพันเส้นใยที่ชุบเรซินรอบแกนหมุน แม่พิมพ์ทรงกระบอก เหมาะสำหรับท่อ ถังเก็บสารเคมี และชิ้นส่วนทรงกระบอก

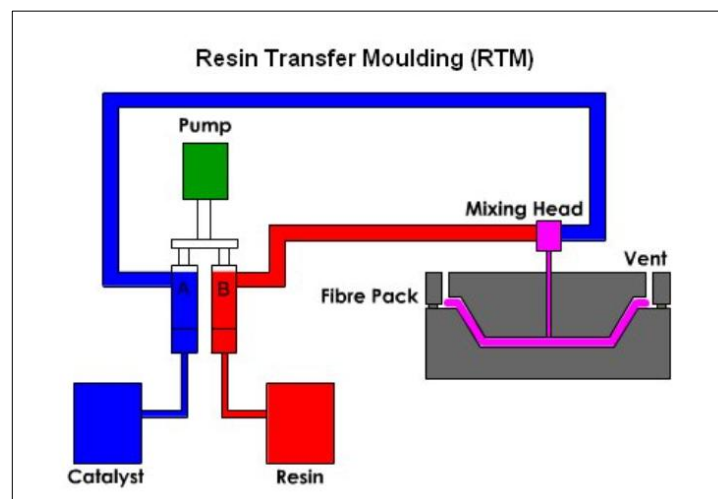
ตารางที่ 6.6 ข้อดีและข้อเสียของการขึ้นรูปในแม่พิมพ์เปิด (Open Molding)

ข้อดีของการขึ้นรูปในแม่พิมพ์เปิด	ข้อเสียการขึ้นรูปในแม่พิมพ์เปิด
ต้นทุนต่ำ : แม่พิมพ์มีราคาถูก ไม่ต้องปิดแม่พิมพ์เพื่อป้องกันเรซินรั่ว	คุณภาพไม่สม่ำเสมอ : คุณภาพผิวงานขึ้นอยู่กับฝีมือผู้ปฏิบัติงาน
ความยืดหยุ่นสูง : ออกแบบขนาดและรูปทรงได้หลากหลายแทบไร้ขีดจำกัด	สภาพแวดล้อมการทำงาน : อาจมีไอระเหยจากเรซินและฝุ่นใยแก้ว
เหมาะกับการใหญ่ : ผลิตชิ้นงานขนาดใหญ่ได้ง่าย	

จุฑาศินี พรพุทธศรี (2568)

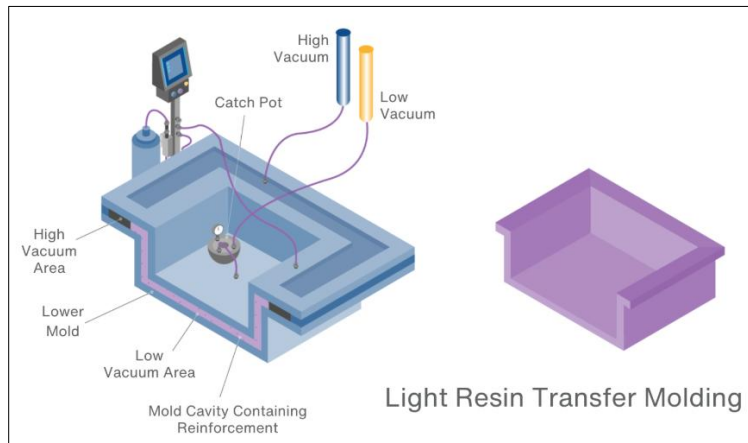
4.2 การขึ้นรูปในแม่พิมพ์ปิด (Closed Molding) คือกระบวนการผลิตชิ้นส่วนวัสดุเชิงประกอบโดยใช้วัสดุเรซินและเส้นใยภายในแม่พิมพ์ที่ปิดสนิท ทำให้ควบคุมการไหลของเรซินและได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพสูง ผิวสวย สม่ำเสมอ และมีของเสียน้อยกว่าการขึ้นรูปแบบเปิด โดยมีเทคนิคที่เกี่ยวข้องดังนี้

4.2.1 Resin Transfer Molding (RTM) คือกระบวนการผลิตชิ้นส่วนวัสดุเชิงประกอบประสิทธิภาพสูง โดยการฉีดเรซินเหลว เช่น อีพอกซี, โพลีเอสเตอร์ ที่ผ่านการผสมแล้วเข้าไปในแม่พิมพ์ปิดที่มีเส้นใยเสริมแรง เช่น คาร์บอนไฟเบอร์, ไฟเบอร์กลาส ที่เตรียมไว้ล่วงหน้า จากนั้นปล่อยให้เรซินแข็งตัว ภายในแม่พิมพ์ ทำให้ได้ชิ้นส่วนวัสดุเชิงประกอบที่มีความแข็งแรงสูง น้ำหนักเบา มีความแม่นยำ และพื้นผิวเรียบสวยงาม เหมาะสำหรับอุตสาหกรรมที่ต้องการความทนทานและรูปทรงซับซ้อน



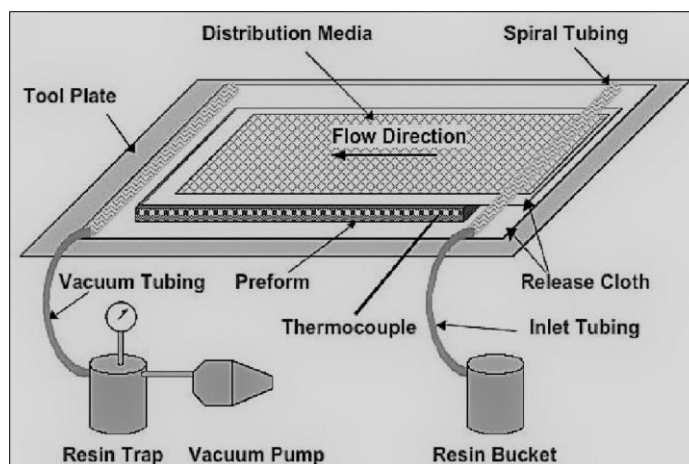
ภาพที่ 6.4 เทคนิคการขึ้นรูปในแม่พิมพ์ปิด แบบ RTM
ที่มา (BPE, n.d.)

4.2.2 Light Resin Transfer Molding (LRTM) คือ กระบวนการผลิตชิ้นส่วนวัสดุเชิงประกอบโดยใช้แม่พิมพ์แบบปิด ที่มีน้ำหนักเบากว่า RTM โดยการวางเส้นใยเสริมแรงลงในแม่พิมพ์ ปิดประกบด้วยแม่พิมพ์ A/B และใช้ระบบสุญญากาศช่วยดึงให้แม่พิมพ์แนบสนิท พร้อมฉีดเรซินที่มีความหนืดต่ำเข้าไปให้อิ่มตัว ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพผิวสวยงามทั้งสองด้าน และมีความแข็งแรงสูง โดยเป็นทางเลือกที่เบาและต้นทุนต่ำกว่า RTM แบบดั้งเดิม



ภาพที่ 6.5 เทคนิคการขึ้นรูปในแม่พิมพ์ปิด แบบ LRTM
ที่มา (Composites one, n.d.)

4.2.3 Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM) คือการขึ้นรูปเรซินด้วยสุญญากาศ เป็นกระบวนการผลิตวัสดุเชิงประกอบ ในระบบแม่พิมพ์ปิดแบบด้านเดียวที่ใช้แรงดันสุญญากาศช่วยในการฉีดและกระจายเรซิน ข้อดีของเทคนิคการขึ้นรูป แบบ VARTM คือ ต้นทุนต่ำ ไม่ต้องใช้แม่พิมพ์โลหะคู่ที่มีราคาสูง หรือหม้ออัดแรงดัน สามารถผลิตชิ้นงานขนาดใหญ่ได้ เหมาะสำหรับการทำใบพัดกังหันลม ตัวเรือ หรือชิ้นส่วนเครื่องบินขนาดใหญ่ มีคุณภาพสูงและมีสัดส่วนของเส้นใยสูงทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงมาก เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ลดการปล่อยสารระเหย (เพราะเป็นระบบปิด)



ภาพที่ 6.6 เทคนิคการขึ้นรูปในแม่พิมพ์ปิด แบบ VARTM
ที่มา (Wikipedia, 2025)

4.3 การขึ้นรูปโดยเทคโนโลยีขั้นสูง (Advanced Trends) มุ่งเน้นไปที่การสร้างวัสดุที่มีความแข็งแรง น้ำหนักเบา เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยมีแนวโน้มที่สำคัญดังนี้

4.3.1 การเปลี่ยนแปลงสู่ระบบดิจิทัลและ AI (Digitalization & AI)

1) มีการใช้แบบจำลองเสมือน (Digital Twin) เพื่อจำลองการไหลของเรซินในแม่พิมพ์แบบเรียลไทม์ ช่วยให้ผู้ผลิตสามารถคาดการณ์และป้องกันการเกิดจุดแห้ง (Dry Spots) หรือฟองอากาศก่อนที่จะเริ่มการผลิตจริง

2) การใช้ AI วิเคราะห์ข้อมูลจากเซนเซอร์ (AI-Driven Optimization) เพื่อปรับแรงดันสุญญากาศและอัตราการไหลของเรซินโดยอัตโนมัติ ช่วยลดความผิดพลาดจากผู้ผลิตและเพิ่มความสม่ำเสมอของชิ้นงาน

4.3.2 วัสดุอัจฉริยะและความยั่งยืน (Smart & Sustainable Materials)

1) มีการนำเรซินที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพและเส้นใยธรรมชาติ (Bio-based Resins & Natural Fibers) เช่น เส้นใยจากพืชมาใช้ในกระบวนการ VARTM มากขึ้น เพื่อตอบโต้ภัยเศรษฐกิจหมุนเวียนโดยไม่ลดทอนประสิทธิภาพของชิ้นงาน

2) การหันมาใช้เรซินเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) ซึ่งสามารถนำกลับมาหลอมใหม่ได้ แทนเทอร์โมเซตแบบเดิม ช่วยให้ชิ้นงานคอมโพสิตสามารถรีไซเคิลได้ง่ายขึ้น

4.3.3 เทคนิคการฉีดเรซินขั้นสูง (Enhanced Infusion Techniques)

1) พัฒนาโดยอุตสาหกรรมการบิน (Advanced VARTM) เพื่อใช้ผลิตโครงสร้างหลักของเครื่องบิน ซึ่งช่วยเพิ่มสัดส่วนปริมาณเส้นใย ให้สูงถึง 60-70% และลดน้ำหนักชิ้นงานได้อย่างมีนัยสำคัญ

2) การติดตั้งเซนเซอร์วัดความดันและอุณหภูมิแบบฝังตัว (Embedded Sensors) ภายในชิ้นวัสดุ เพื่อติดตามสถานะการบ่มตัว (Curing) อย่างแม่นยำ

4.3.4 ระบบการผลิตอัตโนมัติ (High-Rate Manufacturing) การใช้หุ่นยนต์ในการวางแผ่นเส้นใย แทนการวางด้วยมือ เพื่อลดระยะเวลาในขั้นตอนการเตรียมการและรองรับการผลิตจำนวนมาก ในอุตสาหกรรมการบินและพลังงานสะอาด

5. การประยุกต์ใช้วัสดุเชิงประกอบ

การประยุกต์ใช้วัสดุเชิงประกอบ ในงานอุตสาหกรรม มุ่งเน้นไปที่การลดน้ำหนักเพื่อประหยัดพลังงานและการใช้ความยั่งยืนเป็นตัวตั้ง โดยมีอุตสาหกรรมหลักที่นำไปใช้ดังนี้

5.1 อุตสาหกรรมการบินและอวกาศ

5.1.1 โครงสร้างเครื่องบิน ในเครื่องบินรุ่นใหม่อย่าง Airbus A350 XWB ใช้คาร์บอนคอมโพสิตถึง 53% ของโครงสร้าง ช่วยลดการใช้เชื้อเพลิงและก๊าซ CO₂ ได้ถึง 25%

5.1.2 ตลาดคาร์บอนไฟเบอร์ในอุตสาหกรรมการบินคาดว่าจะพุ่งสูงถึง 1.93 พันล้านดอลลาร์ในปี 2026

5.1.3 วงการการรีไซเคิล เริ่มมีการนำชิ้นส่วนวัสดุเชิงประกอบจากเครื่องบินที่ปลดระวางมาแปรรูปเป็นชิ้นส่วนใหม่ เพื่อใช้ในโครงสร้างรอง

5.2 อุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้า

5.2.1 การลดน้ำหนัก โดยใช้วัสดุเชิงประกอบในโครงสร้างตัวถัง แซสซี และฝาครอบแบตเตอรี่ เพื่อเพิ่มระยะทางการขับขี่ต่อการชาร์จหนึ่งครั้ง

5.2.2 ด้านความปลอดภัย วัสดุเสริมแรงด้วยใยแก้วหรือคาร์บอนช่วยเพิ่มความแข็งแรงของห้องโดยสารและทนทานต่อแรงกระแทกได้ดีกว่าโลหะบางชนิด

5.3 อุตสาหกรรมพลังงานสะอาด

5.3.1 กังหันลม วัสดุเชิงประกอบเป็นวัสดุหลักในการผลิตใบพัดกังหันลมที่มีขนาดยาวพิเศษ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดักจับลม

5.3.2 พลังงานไฮโดรเจน ใช้ในการผลิตถังเก็บไฮโดรเจนความดันสูงที่มีน้ำหนักเบาและปลอดภัย

5.4 อุตสาหกรรมการก่อสร้างและโครงสร้างพื้นฐาน

5.4.1 วัสดุทางเลือก ใช้แทนเหล็กเส้น ในงานสะพานและโครงสร้างริมทะเล เพื่อแก้ปัญหาการกัดกร่อนจากสนิม

5.4.2 แผงแซนด์วิช ใช้ทำผนังอาคารสำเร็จรูปและห้องเย็นเพื่อความเป็นฉนวนความร้อน ช่วยประหยัดพลังงานในอาคาร

5.4.3 การใช้เส้นใยธรรมชาติ เช่น กล้วย ช่างไม้ ผสมกับพลาสติกกรีซไคเคิลเพื่อทำวัสดุตกแต่งอาคารรักษ์โลก

5.5 อุตสาหกรรมเครื่องจักรและบรรจุภัณฑ์

5.5.1 ส่วนประกอบเครื่องจักร ใช้ผลิตแขนหุ่นยนต์หรือชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง เพื่อลดแรงเฉื่อยและเพิ่มความแม่นยำ

5.5.2 บรรจุภัณฑ์ที่ยั่งยืน มุ่งสู่การใช้คอมโพสิตชีวภาพที่ย่อยสลายได้หรือรีไซเคิลได้ 100%

6. บทสรุป

วัสดุเชิงประกอบคือ วัสดุที่ถูกออกแบบและสังเคราะห์ขึ้น โดยการนำวัสดุตั้งแต่ 2 ชนิดที่มีสมบัติต่างกันอย่างสิ้นเชิงมารวมกันในระดับมหภาค (Macroscale) เพื่อสร้างวัสดุชนิดใหม่ที่มีคุณสมบัติเหนือกว่าวัสดุตั้งต้นในทุกมิติ โดยยังคงรักษาเอกลักษณ์ของแต่ละส่วนประกอบไว้ ไม่ละลายกลายเป็นเนื้อเดียวกันเหมือนโลหะผสม (Alloys)

วัสดุเชิงประกอบในปัจจุบันไม่ใช่เพียงแค่การนำวัสดุมาผสมกัน ไม่ใช่แค่เรื่องของ ความแข็งแรง แต่เป็นเรื่องของ ความฉลาดและความยั่งยืน โดยมีการฝังเซนเซอร์ เพื่อตรวจวัดความแข็งแรงจากภายใน และใช้กระบวนการผลิตแบบอัตโนมัติ เพื่อลดข้อเสียในกระบวนการผลิต