

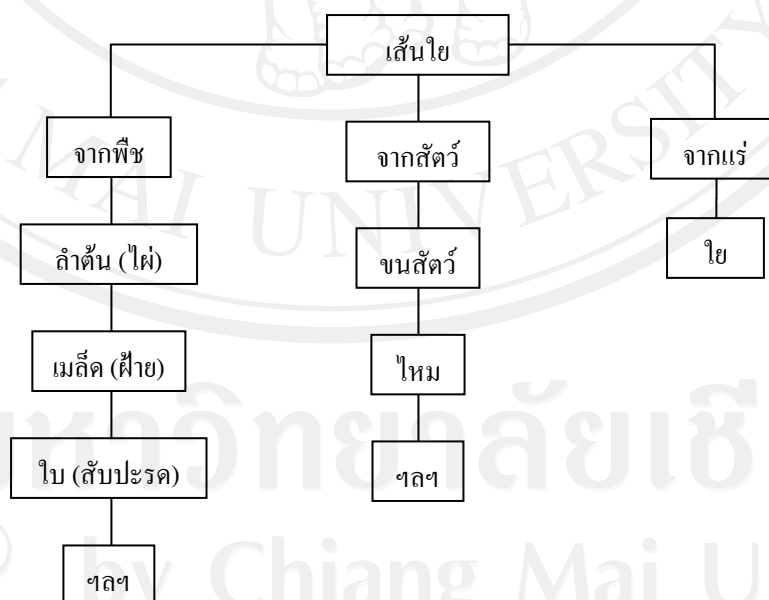
บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 เส้นใยธรรมชาติ [2, 7-10]

เส้นใยธรรมชาติเป็นวัสดุอินทรีย์ที่สำคัญ พบได้ง่ายทั่วไปตามธรรมชาติ เส้นใยธรรมชาติสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม ตามแหล่งกำเนิดเส้นใยแสดงดังรูป 2.1 ซึ่งจำแนกได้ดังนี้

1. เส้นใยที่ได้มาจากพืช (Vegetable fiber) ซึ่งรวมถึงเส้นใยฝ้าย เส้นใยแฟลกซ์ เส้นใยป่าน ปอ และพืชชนิดอื่นๆ เช่น สับปะรด ผักตบชวา ใผ่ และกล้วย เป็นต้น เส้นใยเหล่านี้จะมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ (Cellulose)
2. เส้นใยที่ได้มาจากสัตว์ (Animal fiber) เป็นเส้นใยที่ได้มาจากสัตว์ เช่น แพะ แกะ และไหม เป็นต้น ซึ่งเส้นใยเหล่านี้จะมีส่วนประกอบของกรดอะมิโนต่างๆ ประกอบเป็นโปรตีน
3. เส้นใยที่ได้มาจากแร่ธาตุ (Mineral fiber) ซึ่งไม่ค่อยจะนิยมใช้ในงานสิ่งทอปกติแต่จะนิยมใช้กับงานด้านทนไฟและความร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเส้นใยหิน (Asbestos)



รูป 2.1 การจำแนกเส้นใยตามแหล่งกำเนิด [10]

2.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติ [11]

องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติ มีความหลากหลายขึ้นกับชนิดของเส้นใย โดยเส้นใยธรรมชาติประกอบด้วยพอลิเมอร์หลัก 4 ชนิด คือ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิ-เซลลูโลส (Hemicellulose) เพกทิน (Pectin) และลิกนิน (Lignin) ซึ่งสมบัติแต่ละองค์ประกอบจะส่งผลต่อสมบัติของเส้นใยด้วย องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติชนิดต่างๆ แสดงดังตาราง 2.1

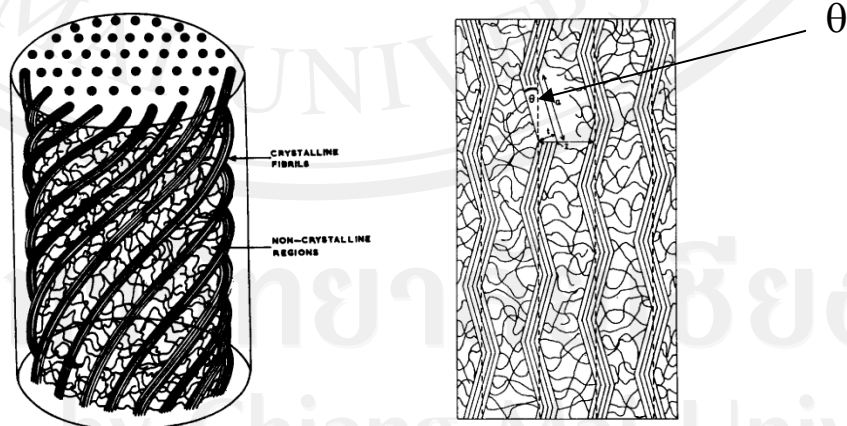
ตาราง 2.1 องค์ประกอบทางเคมี ปริมาณความชื้น และมุมไมโครไฟบริลลา (Microfibrillar angle) [1, 12]

Fiber	Cellulose (wt%)	Hemicell- uloses (wt%)	Lignin (wt%)	Pectin (wt%)	Moisture content (wt%)	Waxes (wt%)	Microfibrillar Angle (deg)
Bamboo	60.8		32.2				2-10
Flax	71	18.6-20.6	2.2	2.3	8-12	1.7	5-10
Hemp	70-74	17.9-22.4	3.7-5.7	0.9	6.2-12	0.8	2-6.2
Jute	61-71.5	13.6-20.4	12-13	0.2	12.5- 13.7	0.5	8
Kenaf	45-57	21.5	8-13	3-5			
Ramie	68.6-76.2	13.1-16.7	0.6-0.7	1.9	7.5-17	0.3	7.5
Nettle	86				11-17		
Sisal	66-78	10-14	10-14	10	10-22	2	10-22
Henequen	77.6	4-8	13.1				
Banana	63-64	10	5		10-12		
Abaca	56-63		12-13	1	5-10		
Oil palm EFB	65		19				42
Oil palm mesocarp	60		11				46
Cotton	85-90	5.7		0-1	7.85-8.5	0.6	-
Coir	32-43	0.15-0.25	40-45	3-4	8		30-49

ในปี ค.ศ.1838 Anselme [13,14] ศึกษาว่าผนังเซลล์ของพืชส่วนใหญ่ประกอบด้วย เซลลูโลส ซึ่งเป็นวัสดุเสริมแรงภายในผนังเซลล์ โดยเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้น (Linear polymer) ส่วนเฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยกลุ่มของพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharides) เมื่อกำจัด ลิกนินออกไปองค์ประกอบที่ยังคงเหลืออยู่กับเซลลูโลส คือ เฮมิเซลลูโลส ซึ่งสมบัติทั่วไปของเฮมิเซลลูโลส คือ มีมวลโมเลกุลต่ำกว่าเซลลูโลส และเนื่องจากมันเป็นพอลิเมอร์ชอบน้ำ (Hydrophilic polymer) ดังนั้นจึงส่งผลต่อสมบัติการสลายตัวตามธรรมชาติ การดูดความชื้น และการสลายตัวโดยความร้อน องค์ประกอบที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งคือ ลิกนิน ทำหน้าที่เป็นสารยึดติดภายในผนังเซลล์ มีความเสถียรทางความร้อนสูง แต่มีผลกระทบกับการย่อยสลายโดยรังสีอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet) ส่วนองค์ประกอบสุดท้าย คือ เพกทิน เป็นเฮเทอโรพอลิแซ็กคาไรด์ (Heteropolysaccharides) เป็นเมทริกซ์ภายในผนังเซลล์

2.1.2 โครงสร้างของเส้นใยธรรมชาติ

เส้นใยธรรมชาติจำพวกเส้นใยพืชเป็นเส้นใยเซลลูโลส ประกอบด้วย ไมโครไฟบริล (Microfibrils) ซึ่งเป็นส่วนที่มีการจัดเรียงตัวอยู่ในส่วนอสัณฐานที่เป็นพวกลิกนิน (Lignin) และเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) โดยไมโครไฟบริลจะเรียงตัวตามความยาวของเส้นใย มุมที่เกิดขึ้นระหว่างการจัดเรียงตัวของ Fibril กับแนวแกนเส้นใย เรียกว่า Microfibrillar angle ซึ่งลักษณะโครงสร้างภายในเส้นใยเซลลูโลสแสดงดังรูป 2.2 การเกิดพันธะไฮโดรเจนและการพันกันภายในเส้นใยทำให้เกิดความแข็งแรง (Strength) และความแข็งตึง (Stiffness) ของเส้นใย



รูป 2.2 โครงสร้างภายในของเส้นใยเซลลูโลส (θ = Microfibrillar angle) [9]

สมบัติทางกายภาพของเส้นใยธรรมชาติขึ้นอยู่กับ โครงสร้างทางเคมี เช่น

- ปริมาณของเซลลูโลส (Cellulose)
- Degree of polymerization
- การจัดเรียงตัวขององค์ประกอบทางเคมี
- สมบัติการเป็นผลึก

โดยสามารถที่จะปรับปรุงสมบัติของเส้นใยธรรมชาติได้มากมายขึ้นกับชนิดของพืช แหล่งที่มา ความแตกต่างของความยาว และขนาดของเส้นใย

2.1.3 การดัดแปรเส้นใย (Fiber modification) [2]

จากสมบัติการเข้ากันได้กับน้ำของเส้นใยธรรมชาตินี้เองที่ทำให้เกิดปัญหาความไม่เข้ากันระหว่างเส้นใยเซลลูโลสกับเมทริกซ์ การยึดเกาะระหว่างผิวของเส้นใยเซลลูโลสกับพอลิเมอร์เกิดได้ไม่ดี การถ่ายทอดความเค้นและกระจายแรงกระทำที่ได้รับจากภายนอกระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์จึงทำได้ไม่ดีด้วย ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุผสม การกำจัดปัญหาดังกล่าวของเส้นใยเซลลูโลสสามารถทำได้โดยทำการดัดแปรสมบัติของเส้นใย เพื่อเพิ่มสมบัติการต้านทานการดูดซับน้ำและเพิ่มการยึดเกาะระหว่างผิวของเส้นใยกับพอลิเมอร์ การดัดแปรสมบัติของเส้นใยสามารถทำได้ทั้งทางกายภาพ (Physical method) และทางเคมี (Chemical method)

1. การดัดแปรสมบัติทางกายภาพของเส้นใย จะเป็นการเปลี่ยนเฉพาะโครงสร้างและสมบัติทางพื้นผิวของเส้นใยเท่านั้น ไม่ได้ทำการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย เช่น วิธีทางไฟฟ้า (Electrical discharge method และ Corona treatment)

2. การดัดแปรสมบัติทางเคมีของเส้นใย จะเป็นการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย โดยนำสารเคมีบางอย่างมาทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (-OH groups) ของเส้นใยทำให้เกิดการต่อกิ่งของหมู่ฟังก์ชัน หรือเกิดการยึดเกาะที่ผิวนอก เช่น การทำปฏิกิริยากับสารคู่ควบ (Coupling agent treatments) การทำให้โคพอลิเมอร์ด้วยการต่อกิ่ง (Graft copolymerization) และอะเซทิลเลชัน (Acetylation)

ซึ่งพอลิเมอร์แต่ละชนิดก็มีความชอบที่จะเข้ากันได้กับเส้นใยเซลลูโลสที่ผ่านการดัดแปรแตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากพอลิเมอร์แต่ละชนิดนั้นมีโครงสร้างทางเคมีแตกต่างกัน ดังนั้นการเลือกจะใช้การดัดแปรเส้นใยด้วยวิธีใดก็จะต้องคำนึงถึงเรื่องการเข้ากันได้กับตัวเมทริกซ์ที่ใช้ด้วย

2.1.4 สมบัติเชิงกลของเส้นใยธรรมชาติ [1]

สมบัติเชิงกลของเส้นใยธรรมชาติไม่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใยธรรมชาติเท่านั้น สมบัติต่างๆ ยังขึ้นอยู่กับปริมาณของเซลลูโลส และปัจจัยอื่นๆ เช่น จำนวนเซลล์ ขนาดของเซลล์ และขนาดของลูเมน เส้นใยที่มีการยืดมากกว่า 5% จะนุ่มแต่เหนียว ในขณะที่เส้นใยธรรมชาติที่มีการยืดน้อยกว่า 5% จะเหนียวแต่เปราะ สมบัติเชิงกลของเส้นใยธรรมชาติแสดงในตาราง 2.2

ตาราง 2.2 แสดงค่าลักษณะเฉพาะเกี่ยวกับความหนาแน่น เส้นผ่านศูนย์กลาง และสมบัติเชิงกลของเส้นใยจากธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์ [1, 12]

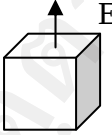
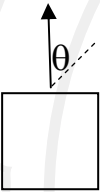
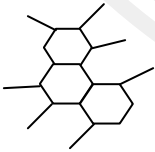
Fiber	Density (g cm ⁻³)	Diameter (μm)	Tensile Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Elongation at Break (%)
Bamboo	1.15	300-380	518	2.0-4.5	2
Flax	1.5	40-600	345-1500	27.6	2.7-3.2
Hemp	1.47	25-500	690	70	1.6
Jute	1.3-1.49	25-200	393-800	13-26.5	1.16-1.5
Kenaf			930	53	1.6
Ramie	1.55	-	400-938	61.4-128	1.2-3.8
Nettle			650	38	1.7
Sisal	1.45	50-200	468-700	9.4-22	3-7
Oil palm EFB	0.7-1.55	150-500	248	3.2	25
Oil palm mesocarp			80	0.5	17
Cotton	1.5-1.5	12-38	287-800	5.5-12.6	7-8
Coir	1.15-1.46	100-460	131-220	4-6	15-40
E-glass	2.55	<17	3400	73	2.5
Kevlar	1.44		3000	60	2.5-3.7
Carbon	1.78	5-7	3400 ^a -4800 ^b	240 ^b -425 ^a	1.4-1.8

^a Ultra high modulus carbon fibers

^b Ultra high tenacity carbon fibers

โดยทั่วไปเส้นใยธรรมชาติเหมาะสำหรับนำมาเสริมแรงพอลิเมอร์ เนื่องจากความแข็งแรง ความเหนียวและความหนาแน่นต่ำ ความหนาแน่นของเส้นใยธรรมชาติต่ำกว่าเส้นใยแก้ว ดังนั้นจึงสามารถผลิตวัสดุผสมที่มีน้ำหนักเบาได้ อย่างไรก็ตามสมบัติอื่นๆ ของเส้นใยแก้วก็ยังคงดีกว่าเส้นใยธรรมชาติ เช่น ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) อัตราร้อยละของการยืด (Percentage of elongation) และ โมดูลัสการยืดหยุ่น (Elastic modulus) อย่างไรก็ตาม สามารถปรับปรุงสมบัติของเส้นใยธรรมชาติเพื่อให้มีสมบัติที่ดีขึ้นได้ ความแตกต่างของโครงสร้างเส้นใยที่เกิดจากกระบวนการผลิตต่างๆ จะให้ค่าโมดูลัสของยัง (Young's modulus) แตกต่างกันไป ดังแสดงในตาราง 2.3

ตาราง 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างของเส้นใย วิธีการผลิต และมอดุลัสของยัง [13]

โครงสร้าง	การผลิต	ผลผลิต	มอดุลัสของยัง
		ไม้	10 GPa
	การบดละเอียด (Pulping)	เส้นใย	40 GPa
	การแยกสลายด้วยน้ำ ตามด้วยการแยกสลายเชิงกล (Mechanical disintegration)	ไมโครไฟบริล	70 GPa
	ยังไม่มีเทคโนโลยี	การตกผลึก	250 GPa

2.1.5 เส้นใยไฟ [6]



รูป 2.3 ลักษณะของต้นไผ่ ชนิดไผ่รวก

ไม้ไผ่เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวที่มีอายุยืนยาวหลายปีอยู่ในวงศ์ Gramineae เช่นเดียวกับหญ้ามีถิ่นกำเนิดและการกระจายพันธุ์อย่างกว้างขวางเกือบทุกส่วนของโลก ทั้งในเขตนานา เขตอบอุ่น และเขตร้อน ยกเว้นทวีปยุโรป (Liese, 1986) ไม้ไผ่มีการกระจายพันธุ์มากที่สุดในแถบร้อนทางใต้ และตะวันออกเฉียงใต้ของทวีปเอเชีย คือ มีการกระจายพันธุ์ถึง 45 สกุล (Genus) 750 ชนิด (Species) (Dransfield, 1980) ในขณะที่ไม้ไผ่ทั่วโลกมีประมาณ 75 สกุล 1,250 ชนิด (FAO, 1978) ส่วนที่พบในประเทศไทยมีประมาณ 13 สกุล 60 ชนิด ซึ่งคาดว่าจะยังมีบางชนิดที่หลงเหลือจากการสำรวจอยู่บ้าง เนื่องจากขึ้นอยู่ในป่าลึกและขาดแคลนผู้เชี่ยวชาญในการจำแนกชนิดพันธุ์

สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้เส้นใยไฟชนิดไผ่รวก มาเป็นกรณีศึกษา ซึ่งไฟชนิดนี้มีชื่อวิทยาศาสตร์ คือ *Thyrsostachys slamensis* Gamble ไผ่รวกจะเป็นไผ่ลำเล็ก ขึ้นชิดแน่นทึบ เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 9.5 cm. สูง 5-10 m. ไม่มีหนาม หน้าใบมีขนเล็กๆ กาบหุ้ม กาบหน่อ สีขาว ลำปล้อง แต่ละปล้อง ยาว 7-23 cm. ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ มักขึ้นเองตามป่าราบและบนเขาสูงๆ แพร่พันธุ์ด้วยหน่อ ซึ่งแทงออกมาจากโคนต้น จากการศึกษาสมบัติบางประการทางกายภาพและเชิงกลของไม้ไผ่รวก พบว่า ความแข็งแรงของไผ่รวกที่สภาวะสดและสภาวะแห้ง พบว่า มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ทั้งไม้ไผ่ในสภาวะสดและสภาวะแห้งนั้นในส่วนของท่อนโคนมีความแข็งแรงมากกว่าท่อนกลาง และท่อนกลางมีความแข็งแรงมากกว่าท่อนปลาย นอกจากค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่านั้นที่ท่อนปลายมีค่ามากกว่าท่อนกลางและท่อนโคน [15] และพบอีกว่า ไผ่รวกอายุ 2 ปี ที่ใช้เสริมแผ่นพื้นสำเร็จรูปเพื่อใช้สำหรับส่วนของโครงสร้างอาคารขนาดเบา

โดยการหาหน่วยแรงดึงประลัยและมอดุลัสยืดหยุ่น มีค่า 1776 kg/cm^2 และ 2.40×10^5 ตามลำดับ [16] สมบัติเหล่านี้เป็นที่น่าสนใจอย่างมากในเชิงกายภาพ สามารถนำไปค้นคว้าวิจัยและประยุกต์ใช้เพื่อประโยชน์ในด้านต่างๆ อีกมาก

ประโยชน์ของไม้ไผ่

ไม้ไผ่ ซึ่งเมื่อแบ่งออกเป็นหมวดหมู่ และแยกออกเป็นประเภทๆ แล้ว สามารถใช้ไม้ไผ่มาทำเป็นประโยชน์ได้ดังนี้

1. ด้านการอนุรักษ์ธรรมชาติ เช่น

- ป้องกันการพังทลายของดินตามริมฝั่ง
- ช่วยเป็นแนวป้องกันลมพายุ
- ชะลอความเร็วของกระแสน้ำป่าเมื่อฤดูน้ำหลากกันภาวะน้ำท่วมฉับพลัน

2. ประโยชน์จากลักษณะทางฟิสิกส์ จากความแข็งแรง ความเหนียว การยืดหด ความโค้งงอ และการสปริงตัว ซึ่งเป็นคุณลักษณะประจำตัวของไม้ไผ่ เราสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมในงานคอนกรีต และเป็นส่วนต่างๆ ของการก่อสร้างที่อยู่อาศัยแบบประหยัดได้เป็นอย่างดีอีกด้วย

3. ประโยชน์จากลักษณะทางเคมีของไม้ไผ่

- เนื้อไม้ใช้บดเป็นเชื้อกระดาษ
- เนื้อไม้บางชนิดสามารถสกัดทำยารักษาโรคได้
- ใช้ในงานอุตสาหกรรมนาโนชนิด

4. การใช้ไม้ไผ่ในผลิตภัณฑ์หัตถกรรม และอุตสาหกรรม แบ่งออกได้ ดังนี้ ผลิตภัณฑ์เครื่องจักสานจากเส้นตอก ได้แก่ กระจาด กระบุง ฯลฯ ผลิตภัณฑ์จากลำต้น และกิ่งของไม้ไผ่ ได้แก่ เก้าอี้ โต๊ะ ชั้นวางหนังสือ ทำด้ามไม้กวาด ฯลฯ ผลิตภัณฑ์จากเนื้อไม้ไผ่ ได้แก่ ถาดใส่ขนม ทัพพีไม้ ตะเกียบ ไม้เสียบอาหาร ฯลฯ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากไม้ซีกได้แก่ โครงโคมกระดาษ โครงพัด โครงร่ม ลูกกระนวด คันธนู ฯลฯ

5. ประโยชน์ทางด้านการบริโภค เช่น การนำหน่อไม้ไผ่มาทำเป็นอาหาร ไม่ว่าจะเป็นซุบแกง ต้ม หรือนำมาดองจิ้ม น้ำพริก

การทำเส้นใยไผ่จะทำจากส่วนของลำต้นของต้นไผ่ ความยาวและความแข็งแรงของเส้นใยจะขึ้นอยู่กับต้นไผ่ และสมบัติของเส้นใยจะพิจารณาจากความยาว ความแข็งแรง ความทนทาน ความสามารถในการดูดซึม และความต้านทานจากเชื้อรา เป็นต้น

2.2 ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon Nanotube : CNTs) [17]

ท่อนาโนคาร์บอนเป็นอีกโครงสร้างหนึ่งของคาร์บอน ซึ่งเพิ่งค้นพบในปี ค.ศ.1991 กล่าวคือ มีลักษณะคล้ายกับ ฟูลเลอรีน (Fullerene) ต่างกันที่ฟูลเลอรีนมีโครงสร้างเป็นทรงกลม (Spherical shape) แต่ CNTs มีโครงสร้างเป็นทรงกระบอก (Cylindrical shape) ชื่อของ CNTs มาจากขนาดที่อยู่ในระดับนาโน (10^{-9} m) หรือมีความกว้างประมาณ 1 ใน 10,000 ของความกว้างของเส้นผม

2.2.1 การค้นพบ CNTs

การค้นพบ CNTs เกิดจากความบังเอิญที่ Sumio Iijima นักวิจัยจากห้องปฏิบัติการของบริษัท NEC ในญี่ปุ่น ขณะกำลังสังเคราะห์ฟูลเลอรีน โดยวิธีการระเหยด้วยการอาร์ก (Arc-evaporation) แล้วพบว่าที่ขั้วคาโทดเกิดมีวัสดุโครงสร้างแบบแกรไฟต์ที่เป็นทั้งอนุภาคนาโนและท่อนาโน ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ไม่เคยมีผู้ใดสังเกตเห็นมาก่อน ต่อมาทีมงานของอิิจิมาสามารถสังเคราะห์วัสดุดังกล่าวในปริมาณมาก โดยปรับสภาวะของวิธีการระเหยด้วยการอาร์ก ท่อนาโนที่เกิดขึ้นนี้มีลักษณะเป็นท่อแกรไฟต์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3-10 nm และมีความยาวในช่วง 1 μ m และเป็นท่อซ้อนกัน 2-50 ชั้น เรียกว่า Multi-Walled Carbon Nanotube (MWNT) ต่อมา มีการสร้างและทำให้บริสุทธิ์ แพร่หลายไปตามห้องปฏิบัติการต่างๆ ทั่วโลก รวมถึงการพัฒนาเป็นท่อเดี่ยวที่เรียกว่า Single-Walled Carbon Nanotube (SWNT) ในอีกสองปีต่อมาท่อขนาดนาโนของแกรไฟต์นี้สามารถเป็นได้ทั้งแบบท่อปลายเปิดหรือปลายปิด (Cap) ถ้าเป็นแบบปลายปิดจะครอบด้วยครึ่งทรงกลมของฟูลเลอรีน C-60 ขนาดของท่อสำหรับ SWNT มีตั้งแต่ 0.7 ถึง 2 nm ส่วน MWNT มีขนาดระหว่าง 10 ถึง 300 nm โดยมีช่องว่างระหว่างชั้นของแต่ละท่อยาวอยู่ในระหว่าง 0.34 ถึง 0.36 nm สามารถทำให้ยาวได้ถึง 20 cm และมีรายงานว่าสามารถทำให้ยาวได้ถึง 100 m ล่าสุดสามารถทำท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ ขนาดเล็กสุดได้ถึง 3 Å

2.2.2 สมบัติของ CNTs

เราทราบกันดีว่าเพชรมีความแข็งแกร่งมาก ด้วยโครงสร้างโครงตาข่ายสามมิติจากการเชื่อมต่อระหว่างพันธะของอะตอมคาร์บอนที่มีสี่ตำแหน่งอย่างลงตัว ขณะที่โครงสร้างของแกรไฟต์นั้นคาร์บอนหนึ่งอะตอมเชื่อมพันธะกับคาร์บอนอีกสามอะตอมในระนาบเดียวกันและอีกหนึ่งพันธะที่เหลือจะยึดกับระนาบถัดไป พันธะในระนาบเดียวกันของแกรไฟต์ (กราไฟน์) มีความแข็งแกร่งมาก (มากกว่าเพชร) แต่พันธะระหว่างระนาบไม่แข็งแรงมากนักและเลื่อนไหลได้ ด้วยลักษณะโครงสร้าง CNTs ดังกล่าวรวมถึงพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนที่ยาวเพียง 0.14 nm (สั้น

กว่าเพชร) จึงทำให้ CNTs แข็งแรงกว่าเพชร และแกรไฟต์ ค่าความยืดหยุ่น (Young's modulus of elasticity) ของ CNTs มีค่าสูงถึง 1 TPa หรือ 1000 GPa และ CNTs มีพื้นที่ผิวได้ถึง $1500 \text{ m}^2/\text{g}$ โดยมีความหนาแน่น 1.33 ถึง 1.40 g/cm^3 ซึ่งน้อยกว่าเมื่อเทียบกับบอรัมที่มีค่าความหนาแน่นสูงถึง 2.7 g/cm^3 CNTs มีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดีกว่าทองแดง มัดหนึ่งของ CNTs สามารถนำไฟฟ้าได้ถึง 109 A/cm^2 ขณะที่ทองแดงได้สูงสุดเพียง 106 A/cm^2 สมบัติเชิงไฟฟ้าอีกอย่างหนึ่งที่น่าสนใจของ CNTs คือ สามารถปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของ CNTs ในสถานะสุญญากาศได้ เมื่อวางอยู่ในสนามไฟฟ้าที่ใช้ค่าศักย์ต่ำกว่า เช่น จะกระตุ้นฟอสเฟอร์ (Phosphors) ที่วางไว้ห่าง 1 mm ใช้ศักย์ไฟฟ้าเพียง 1-3 V ขณะที่ต้องใช้ศักย์ไฟฟ้าสูงถึง 50-100 V สำหรับปลายที่เป็นขั้วโมลิบดีนัม (Molybdenum)

CNTs มีความสามารถนำความร้อนได้ดีมากตามแนวยาวของท่อ CNTs แต่เป็นฉนวนความร้อนได้ดีมากเช่นกันตามแนวขวางของท่อ CNTs ยังทนต่ออุณหภูมิได้ถึง 2800°C ภายใต้สุญญากาศ และ 750°C ในสถานะปกติ สมบัติเหล่านี้เป็นที่น่าสนใจอย่างมากในเชิงกายภาพ นอกจากนี้ยังมีการค้นพบสมบัติอีกหลายประการเพิ่มขึ้นเมื่อมีการประยุกต์ใช้เพื่อประโยชน์ในด้านต่างๆ อีกมาก

2.2.3 การสังเคราะห์และการผลิต

เทคนิคในการผลิตคาร์บอนนาโนทิวส์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีดังนี้

1. เทคนิคแรกเริ่มคือดิสชาร์จแบบอาร์ค (Arc discharge) ซึ่งเป็นการใช้กระแสไฟตรงขนาด 100 A และศักย์ประมาณ 20 V โดยควบคุมอุณหภูมิที่ $2,000$ ถึง $3,000^\circ\text{C}$ ซึ่งทำให้เกิดไอพลาสมาร้อนระหว่างขั้วคาร์บอน 2 ขั้ว จะเกิดการควบแน่นที่ขั้วแคโทด (เป็น Water-cooled electrode) ได้ผลิตผลเป็น MWNT ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัก และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2-20 nm ด้วยความยาวน้อยกว่า 50 nm และถ้ามีการใช้โลหะคะตะลิสต์ร่วมด้วย จะได้เป็น MWNTs

2. ใช้แสงเลเซอร์ (Pulsed-laser vaporization) ไปทำให้เป่าคาร์บอนผสมโลหะกลายเป็นไอในเตาเผาที่อุณหภูมิ $1,100$ – $1,200^\circ\text{C}$ และใช้ก๊าซเฉื่อย เช่น อาร์กอนหรือไนโตรเจนไปกวาดท่อนาโนที่ได้ออกจากเตาเผาไปหล่อเย็นที่ตัวเก็บกัก (Collector) ทองแดงด้านนอกเตาเผา เทคนิคนี้ใช้โคบอลต์และนิกเกิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ SWNTs ที่เป็นระเบียบมากกว่าวิธีแรกแต่มีข้อเสียคือต้นทุนการผลิตสูงทั้งสองเทคนิคข้างต้นมีปัญหาในเรื่องของการสังเคราะห์ให้ได้ปริมาณมาก และทำให้ได้ CNTs ที่มีระเบียบยาก

3. การตกเคลือบด้วยไอทางเคมี (Chemical vapor deposition : CVD) เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีต้นทุนต่ำ โดยอาศัยการก่อรูปของท่อนาโนบนวัสดุรองรับ (Substrate) เมื่อทำปฏิกิริยาของแก๊สผสมพวกไฮโดรคาร์บอน (เช่น Acetylene methane หรือ Ethylene) และไนโตรเจน ภายในห้องปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 600 - 800 °C สำหรับการผลิต MWNT และ 900 - 1200 °C สำหรับการผลิต SWNT ในบรรยากาศปกติ การเร่งปฏิกิริยาทำได้โดยใช้วัสดุรองรับพวกโลหะหรือโลหะออกไซด์ หรือป้อนแก๊สดังกล่าวร่วมกับโลหะคะตะลิสต์เข้าไปในห้อง ซึ่งทำให้สามารถผลิต CNTs ได้ในปริมาณมาก และสามารถควบคุมขนาดและความยาวของ CNTs ได้ง่ายโดยควบคุมอัตราการไหลของแก๊สและระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา

2.2.4 การประยุกต์ใช้ CNTs

CNTs สามารถช่วยเสริมความแข็งแรง (Reinforce) ของวัสดุเดิมให้มากยิ่งขึ้น น้ำหนักเบา และสามารถสร้างได้หลายรูปแบบได้แก่ ฟิล์มบาง ไฟเบอร์ โฟม สารเคลือบ และผง เป็นต้น

ปัจจุบันมีการผลิตวัสดุผสมของ CNTs ได้ปริมาณมาก เช่น พลาสติกเสริม CNTs เพื่อนำมาใช้ในรถยนต์ ใช้เป็นชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์หรือเครื่องใช้ไฟฟ้า ด้วยสมบัติที่ทนต่อสารเคมี ทนต่อการหลุดลอก รวมถึงป้องกันไฟฟ้าสถิตย์ได้มากขึ้น นอกจากนี้ยังนำไปใช้ประโยชน์สำหรับการสร้างจอภาพอย่างแบน และเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cells) ซึ่ง CNTs จะไปแทนที่คะตะ-ลิสต์เดิมคือ แพลตตินัม

เนื่องจาก CNTs มีขนาดเล็กมาก ดังนั้นการจัดเรียงอนุภาคของ CNTs ให้ได้ตามต้องการนั้นเป็นสิ่งที่ยาก แต่ได้มีรายงานออกมาว่าสามารถใช้ลำแสงเลเซอร์สองเส้นทำงานคล้ายตะเกียบคือ จะจับและเคลื่อนย้ายอนุภาคของ CNTs ได้ตามต้องการ ซึ่งเรียกเทคนิคนี้ว่า “Optical Trapping” จึงคาดว่าน่าจะสามารถนำ CNTs มาใช้ในการสร้างไมโครชิพที่มีความไวสูงและใช้พลังงานต่ำได้ในอนาคต

ในทางการแพทย์แนวคิดสำคัญที่จะใช้ประโยชน์จาก CNTs คือการที่ท่อนาโนนี้สามารถเข้าถึงโครงสร้างในระดับเซลล์ได้ คือสามารถใช้เป็นโพรบ (Probe) ตรวจวัด หรือใช้เป็นปิเปตขนาดเล็กมากสำหรับปลดปล่อยสารหรือโมเลกุล (Ultrasmall pipette) เข้าสู่เซลล์เป้าหมายได้ อันหลังนี้คือศักยภาพของ CNTs ในการขนถ่ายและปลดปล่อยยาเข้าสู่อวัยวะเป้าหมาย (Targeted drug delivery)

2.3 วัสดุผสม (Composites) [18-20]

วัสดุผสมเป็นวัสดุที่มีวัสดุ 2 ชนิดขึ้นไปเป็นองค์ประกอบ วัสดุผสมส่วนใหญ่ประกอบด้วยสารเติมที่เหมาะสมหรือวัสดุเสริมแรงกับสารเชื่อมประสานพวกเรซินที่เข้ากันได้ เมื่อผสมผสานกันแล้วจะได้ลักษณะที่เป็นสมบัติที่ต้องการ ตัวแปรที่จะทำให้วัสดุผสมมีสมบัติต่างๆ กัน มีมากมายทั้งนี้รวมถึงรูปร่าง ปริมาตร และส่วนประกอบของสารเติมหรือวัสดุเสริมแรงที่ฝังกระจาย ในเนื้อวัสดุผสม แบบอย่างของวัสดุผสมมีพวกคิสเปอร์ชันฮาร์ดเดนด (Dispersion hardened) และไฟเบอร์สเตรงเทนด (Fiber-strengthened) ในโลหะ เซรามิก แก้ว คอนกรีต และพลาสติก

ตัวอย่างของวัสดุผสมพวกคิสเปอร์ชันฮาร์ดเดนด ได้แก่ การมีอนุภาคของวัสดุแข็งฝังในเนื้อวัสดุอ่อน เช่น อนุภาคของเหล็กหรือโครเมียมฝังในทองแดง อนุภาคของทอเรีย (Thoria) ในนิกเกิล หรือวัสดุผสมของทองแดง-ซิลิมาไนต์ (Silimanite) ที่ใช้ในการห้ามล้อเครื่องบิน

ตัวอย่างของวัสดุผสมพวกไฟเบอร์สเตรงเทนด ได้แก่ เส้นใยแก้ว เส้นใยที่เสริมแรงในพลาสติก (FRP) โฟมพอลิเอทิลีนในพีวีซีที่ใช้ทำเบาะนั่ง หรือโฟมพอลิสไตรีน (Polystyrene form) ใช้ทำทุ่นลอยน้ำ เป็นต้น

วัสดุผสมส่วนใหญ่จะเป็นพลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใย ซึ่งประกอบด้วยส่วนประกอบสองส่วนหรือมากกว่า คือ ส่วนที่เป็นเส้นใย และส่วนที่เป็นเมทริกซ์ (Matrix) โดยเส้นใยอาจมีความยาวต่อเนื่องตลอดความยาวของเมทริกซ์ หรือกรณีที่เส้นใยมีความยาวไม่ต่อเนื่อง เช่น เส้นใยขนาดสั้นกระจายไม่เป็นระเบียบอยู่ในเมทริกซ์ หรืออาจมีส่วนที่สาม ที่เรียกว่าอินเตอร์เฟส (Interphase) อยู่รอบๆ เส้นใยทำหน้าที่เป็นตัวยึดเกาะระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์

โดยทั่วไปเส้นใยและเมทริกซ์จะมีสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) และสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) ต่างกัน เส้นใยจะมีความแข็งแรงมากกว่าเมทริกซ์ และสามารถรับแรงกระทำจากภายนอกที่กระทำต่อวัสดุผสมได้ช่วยไม่ให้เกิดการเสียหายหรือการผิดรูปภายใต้แรงกระทำนั้นๆ เมทริกซ์โดยทั่วไปจะเป็นพอลิเมอร์หรือพลาสติก ทำหน้าที่ให้เส้นใยกระจายตัวและยึดเกาะ และช่วยถ่ายเทแรงกระทำจากภายนอกที่กระทำต่อวัสดุผสมมายังเส้นใย ตลอดจนช่วยกำหนดรูปร่างของวัสดุผสม

ความแข็งแรงของวัสดุผสมจะถูกกำหนดโดยสมบัติเส้นใย สัดส่วนโดยปริมาตรของเส้นใยในเมทริกซ์ ความแข็งแรงและการกระจายตัว ความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ ซึ่งจะต้องแข็งแรงเพียงพอที่จะป้องกันไม่ให้แรงกระทำจากภายนอกสามารถแยกเส้นใยและเมทริกซ์ออกจากกัน

2.4 องค์ประกอบของวัสดุผสม [18-20]

2.4.1 เมทริกซ์ (Matrix)

ในวัสดุผสม เมทริกซ์ที่ใช้อาจจะเป็นพอลิเมอร์พลาสติก (Thermoplastic) หรือเทอร์โมเซต (Thermoset) โดยที่เมทริกซ์มีหน้าที่ดังต่อไปนี้

1. ให้เส้นใยหรืออนุภาคกระจายตัวและยึดเกาะตามทิศทางที่ต้องการ
2. ป้องกันไม่ให้เส้นใยหรืออนุภาคเกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากสิ่งแวดล้อม
3. ถ่ายเทแรงกระทำจากภายนอกไปสู่เส้นใยหรืออนุภาค
4. ช่วยกำหนดรูปร่างของวัสดุผสม
5. ต้องเชื่อมด้วยตัวเสริมแรงได้

พอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ใช้โดยทั่วไปแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. เทอร์โมเซตพอลิเมอร์ (Thermoset)

พอลิเมอร์กลุ่มนี้จะหลอมตัวในเฉพาะครั้งแรกที่ได้รับความร้อน และเกิดการเชื่อมโยง (Cross linking) ระหว่างสายโซ่โมเลกุลด้วยความร้อนหรือตัวเชื่อมขวาง (Cross linking agent) ทำให้มีเครือข่ายเป็นแบบร่างแห (Network) โครงสร้างของพอลิเมอร์จะคงตัวไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้อีกเมื่อได้รับความร้อน ตัวอย่างของเทอร์โมเซตพอลิเมอร์ ได้แก่ อีพ็อกซีเรซิน (Epoxy resin) พอลิเอสเตอร์ (Polyester) ฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์ (Phenol-formaldehyde) เป็นต้น

2. เทอร์มอพลาสติก (Thermoplastic)

สามารถหลอมตัวเมื่อให้ความร้อน แล้วแข็งตัวเมื่อทำให้เย็นตัวลง การหลอมตัวด้วยความร้อนสามารถทำได้หลายครั้ง เนื่องจากไม่มีการเชื่อมโยงกันระหว่างสายโซ่โมเลกุล และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมี และสมบัติทางกายภาพอีกด้วย ตัวอย่างของเทอร์มอพลาสติกพอลิเมอร์ ได้แก่ พอลิเอทิลีน (Polyethylene) พอลิพรอพิลีน (Polypropylene) ไนลอน (Nylon) พอลิสไตรีน (Polystyrene) เป็นต้น

อีพ็อกซีเรซิน (Epoxy resins) [3]

อีพ็อกซีเรซิน หรืออีพ็อกซีเป็นเมทริกซ์ ที่มีสมบัติทางกายภาพที่กว้าง มีความแข็งแรง เข้ากันได้ดีกับเส้นใยทุกชนิดและสามารถผ่านกระบวนการได้สะดวก ทำให้อีพ็อกซีเป็นสารที่ได้รับการเลือกใช้มากที่สุด ส่วนใหญ่แล้วอีพ็อกซีจะใช้งานโครงสร้างต่างๆ ทั้งนี้โครงสร้างทางเคมีของเรซินของสารทำให้สุก (During agents) ชนิดของสารคัดแปรโครงสร้าง (Modifying reactants) ที่มีให้เลือกมากมาย และสภาวะการก่อโครงสร้างตาข่าย (Curing conditions) จะเป็นตัวกำหนดสมบัติความเหนียวทน ความทนทานต่อสารเคมีและตัวทำลาย สมบัติทางกลตั้งแต่ที่มี

ความยืดหยุ่นสูงจนถึงมีความแข็งแรงสูง (High strength) และมีความแข็ง (Hardness) สมบัติด้านทานการคืบ (Creep) และความล้า (Fatigue) นอกจากนี้อีพ็อกซียังเด่นในด้านการยึดเกาะ (Adhesion) เส้นใยได้ดีเยี่ยม ความทนทานความร้อนและสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี ปฏิกริยาก่อโครงสร้างตาข่ายไม่ก่อให้เกิดสารข้างเคียง และมีการหดตัวต่ำหลังปฏิกริยาก่อโครงสร้างตาข่าย ข้อเสียของอีพ็อกซีที่สำคัญ คือ การดูดความชื้น และความเปราะ

ตาราง 2.4 แสดงสมบัติของอีพ็อกซี [3]

สมบัติ	
อุณหภูมิการอ่อนตัว (Heat-deflection temperature) ที่ 1.82 MPa, °C	140
ความทนความร้อนสูงสุดเมื่อให้ความร้อนอย่างต่อเนื่อง °C	120
สัมประสิทธิ์การขยายตัว $\text{cm/cm/}^{\circ}\text{C} \times 10^{-5}$	2.5
ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) MPa	52
เปอร์เซ็นต์การยืด (% elongation)	5
ความทนแรงโค้งงอ (Flexural strength) MPa	124
ความทนแรงอัด (Compressive strength) MPa	70
ความทนแรงกระแทก (Notched Izod impact strength) J/m	11
ความแข็ง (Hardness) Rockwell M 90	M105
ความถ่วงจำเพาะ	1.0

2.4.2 ตัวเสริมแรง (Reinforcement)

ตัวเสริมแรง ได้แก่ พวกที่เป็นอนุภาคหรือเส้นใย ส่วนใหญ่นิยมใช้เป็นตัวเสริมแรง ซึ่งเส้นใยที่นิยมใช้โดยทั่วไป คือเส้นใยแก้ว (Glass fiber) เส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) และเส้นใยอะรามิด (Aramid fiber)

หน้าที่ของตัวเสริมแรง ดังต่อไปนี้

1. เพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุผสม
2. สามารถรับแรงกระทำจากภายนอก โดยแรงกระทำนั้นจะถูกถ่ายทอดไปตาม

เส้นใยหรืออนุภาค

โดยที่ลักษณะของเส้นใยที่เป็นตัวเสริมแรงที่ดี จะต้องมึลักษณะดังนี้

1. เส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดเล็ก
2. อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าสูง

3. มีความโค้งงอและความยืดหยุ่นสูง
4. มีค่ามอดุลัสของยังและค่าความแข็งแรงสูง

2.4.3 สารเติมและสารปรับแต่ง (Filler and Additives)

สารเติมและสารปรับแต่ง นำมาใช้ทั้งเทอร์มอพลาสติกและเทอร์มอเซตเพื่อเปลี่ยนลักษณะการทำงานของระบบเรซิน กระบวนการหรือตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับราคาของสารเติมอาจเป็นเรซินที่มีราคาโดยมวลต่ำ ซึ่งไม่มีผลต่อการนำไปประยุกต์ใช้เลย สารเติมอื่นๆ ซึ่งจะมีผลต่อการทำสารประกอบ และ/หรือขึ้นงานสำเร็จรูป เช่น แคลเซียมคาร์บอเนตช่วยปรับปรุงความเงาของผิวพอลิไวนิลคลอไรด์ชนิดแข็ง และแทลคัม (Talc) ช่วยปรับปรุงอุณหภูมิเบี่ยงเบนทางความร้อน (Heat deflection temperature) ของพอลิพรอพิลีน โดยสารเติมทั้งสองมีการใช้ทั่วไปเนื่องจากมีราคาต่ำ และใช้ได้ปริมาณสูง การเติมอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์จะช่วยทำให้เกิดเปลวไฟช้าลง (Flame retardant) นอกจากนี้ยังมีสารปรับแต่งที่ช่วยยับยั้งการเสียคุณภาพจากแสงอัลตราไวโอเลต สารปรับแต่งที่นำไฟฟ้าได้ (Conductive additives) ใช้ในพลาสติกชนิดเสริมแรงเพื่อป้องกันการสอดแทรกจากความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและวิทยุ ส่วนสารให้สี (Colorants) ช่วยทำให้เกิดสี การเติมเมทัลลิกสเตียเรท (Metallic stearates) ในสารประกอบอัดแบบเพื่อให้ขึ้นงานสำเร็จรูปหลุดออกจากพื้นผิวแม่แบบได้ง่าย และสารปรับแต่งประเภทเทอร์มอพลาสติกที่ใช้ในสูตรผสมเทอร์มอเซตเพื่อควบคุมการหดตัวที่เกิดขึ้นในระหว่างการบ่มตัว ซึ่งมีผลดีทำให้แบบที่ได้ใกล้เคียงกับข้อกำหนดที่ต้องการ พื้นผิวจึงเรียบจัดอยู่ในสินค้าสำเร็จรูปประเภทเกรดเอ

2.5 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเมทริกซ์กับเส้นใย (Fiber-matrix interface) [20]

สมบัติเชิงกลของวัสดุผสมที่มีเส้นใยเป็นตัวเสริมแรงไม่ได้ขึ้นกับความแข็งแรงของเส้นใยและเมทริกซ์เท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับลักษณะของผิวสัมผัสระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ซึ่งพบว่าผิวสัมผัสระหว่างเส้นใย และ เมทริกซ์เป็นส่วนสำคัญทำให้วัสดุผสมมีสมบัติเชิงกลใกล้เคียงกับทฤษฎี ในทางปฏิบัติระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์จะต้องมีแรงยึดเหนี่ยวที่ดีเพื่อใช้ในการถ่ายเทแรงกระทำจากเมทริกซ์สู่เส้นใย ซึ่งแรงยึดเหนี่ยวนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดและธรรมชาติของพันธะที่เกิดขึ้น อาจมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของเมทริกซ์และเส้นใยที่ใช้ในแต่ละระบบ

แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์แบ่งออกเป็น 5 ประเภท คือ

1. การดูดซับและการชุบ (Adsorption and Wetting)

เมื่อผิวสัมผัสของวัตถุ 2 ชนิดเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันอย่างพอเพียง แรงกระทำทางกายภาพที่ดีที่สุดคือการชุบพื้นผิวของของแข็งโดยของเหลว เพราะเนื่องจากพื้นผิวสัมผัสของวัตถุทั้งสองจะ

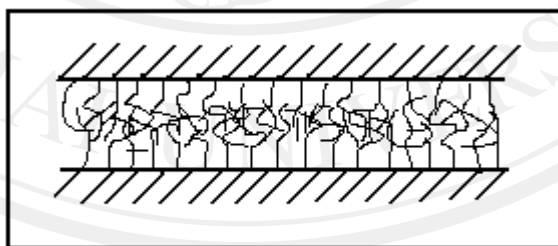
มีความขรุขระในระดับขนาดเล็ก ทำให้การสัมผัสกันนั้นไม่แนบสนิทกัน โดยจะยังมีช่องว่างอยู่ ดังรูป 2.4 ซึ่งเป็นจุดอ่อนหายไปถึงผลให้มีการยึดติดที่ดีขึ้น สำหรับการยึดติดกันของพื้นผิวเส้นใยกับพอลิเมอร์เมทริกซ์นั้น เมทริกซ์ที่หลอมเหลวจะเข้าไปแทนที่ในส่วนบริเวณที่ขรุขระขนาดเล็กของพื้นผิวเส้นใย จุดอ่อนของรอยต่อที่จะเกิดขึ้นคือฟองอากาศภายใน (Void)



รูป 2.4 แสดงการดูดซับและการชุบ [21]

2. การแพร่ (Diffusion)

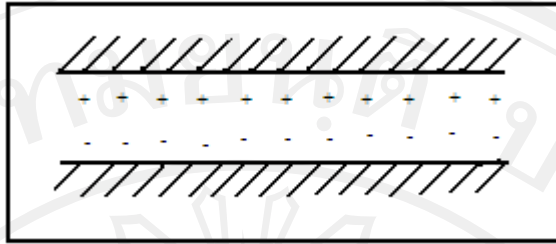
การแพร่กระจายของโมเลกุลพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งไปยังโมเลกุลของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งสามารถทำให้เกิดพันธะระหว่างพื้นผิวของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด การแพร่กระจายโมเลกุลของพอลิเมอร์เข้าหากันนั้นจะทำให้สายโซ่โมเลกุลเกี่ยวพันกันเป็นร่างแห ดังรูป 2.5 ความแข็งแรงของพันธะจะขึ้นกับจำนวนสายโซ่โมเลกุลที่แพร่เข้าไป และพันกันยุ่งเหยิง ถ้ามีมากก็จะมี ความแข็งแรงของการยึดติดกันมาก การแพร่กระจายสามารถทำให้เกิดขึ้นได้ โดยใช้พวกสารละลายหรือตัวกลางพลาสติก (Plasticizing agents) ที่มีองค์ประกอบที่ทำให้สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนที่ได้สะดวก สำหรับเส้นใยเสริมแรงอาจมีการเคลือบผิวด้วยพอลิเมอร์ก่อนที่จะนำไปผสมกับเมทริกซ์



รูป 2.5 การแพร่กระจาย และการเกี่ยวพันกันของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ [20]

3. การดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic attraction)

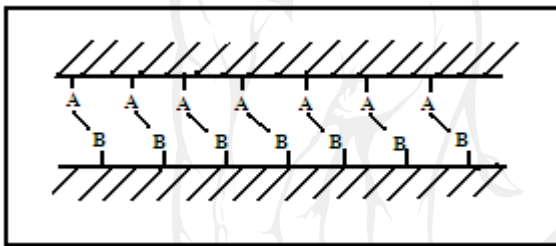
เมื่อพื้นผิวของวัสดุสองชนิดที่มีประจุไฟฟ้าต่างขั้วกันมาสัมผัสกันจะเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตทำให้เกิดการยึดติดระหว่างผิวสัมผัส ดังรูป 2.6 ความแข็งแรงของการยึดติดจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า



รูป 2.6 แรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตที่ผิวสัมผัส [20]

4. การเกิดพันธะทางเคมี (Chemical bonding)

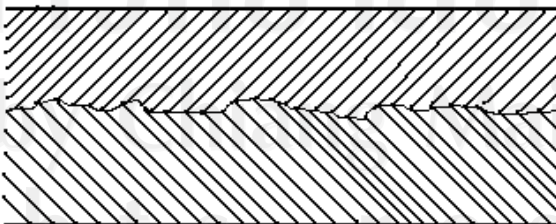
การเกิดพันธะทางเคมีเกิดจากหมู่เคมีของเมทริกซ์เกิดพันธะกับหมู่เคมีของผิวเส้นใย ความแข็งแรงของพันธะขึ้นอยู่กับจำนวน และชนิดของพันธะ สำหรับพื้นผิวที่เกิดความเสียหายจะทำให้พันธะทางเคมีขาดกันได้ ในส่วนของเส้นใยเสริมแรงจะมีการใช้ตัวประสานกลุ่มควมเพื่อให้เกิดพันธะทางเคมีระหว่างผิวเส้นใยกับเมทริกซ์ แสดงดังรูป 2.7



รูป 2.7 พันธะทางเคมีระหว่างผิวสัมผัส 2 ชนิด [20]

5. การยึดติดทางกล (Mechanical adhesion)

การยึดติดทางกลเป็นการยึดติดที่เกิดจากการยึดเหนี่ยวทางกลระหว่างผิวเส้นใยที่ขรุขระ และเมทริกซ์ โดยเมทริกซ์จะเข้าไปแทรกในส่วนที่ขรุขระ และเป็นมุมที่ไม่สามารถหลุดออกมาได้ (Re-entrantangle) ของผิวเส้นใย ดังรูป 2.8 ซึ่งถ้ามีส่วนนี้มาก ความแข็งแรงของการยึดติดก็มากด้วย นอกจากนี้ผิวที่ขรุขระของเส้นใยยังเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสอีกด้วย

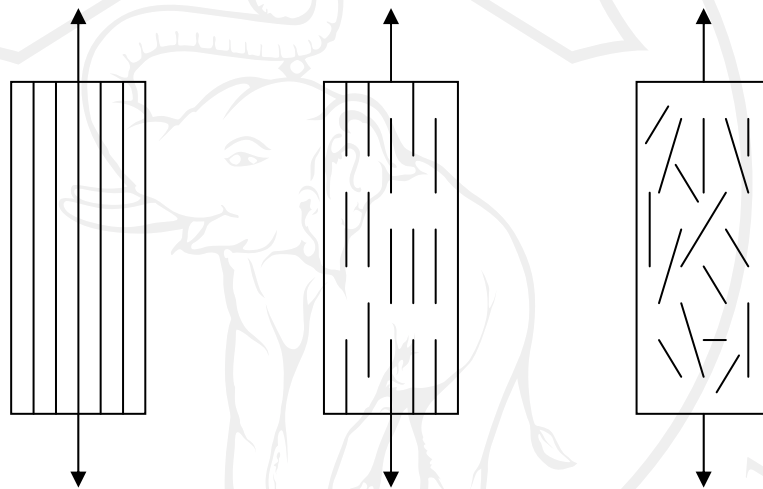


รูป 2.8 การยึดติดทางกล [20]

2.6 การเสริมแรง (Reinforcement)

การเรียงตัวของเส้นใยในเมทริกซ์ ในวัสดุผสมที่เสริมแรงด้วยเส้นใย เส้นใยอาจมีการเรียงตัวเป็น 3 แบบ ดังรูป 2.9 คือ

1. เรียงตัวแบบต่อเนื่องในทิศทางเดียวกันตลอดความยาวของเมทริกซ์ (Unidirectional-continuous fibers)
2. เรียงตัวเป็นระเบียบแบบไม่ต่อเนื่อง (Aligned discontinuous fibers)
3. เรียงตัวไม่เป็นระเบียบแบบไม่ต่อเนื่อง (Randomly oriented discontinuous fibers)

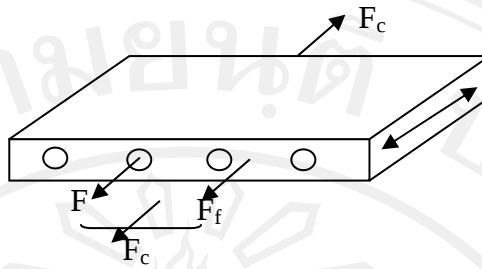


รูป 2.9 แสดงการเรียงของเส้นใยพลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใย [12, 14, 21]

2.7 กลไกของการเสริมแรงด้วยเส้นใย [20]

2.7.1 เส้นใยเรียงตัวแบบต่อเนื่องในทิศทางเดียวกันตลอดความยาวของเมทริกซ์ (Unidirectional continuous fiber)

วัสดุผสมชนิดนี้จะมีเส้นใยยาวเรียงตัวในทิศทางเดียวกันอย่างต่อเนื่องตลอดความยาวของเมทริกซ์ โดยทิศทางที่เส้นใยเรียงตัวจะเป็นทิศทางเดียวกับทิศทางของแรงกระทำจากภายนอก ถ้าสมมติว่าเส้นใยทุกเส้นเหมือนกันและพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างเส้นใยของเมทริกซ์สมบูรณ์ ความเครียด (Strain, ϵ) ในวัสดุผสมจะเท่ากับความเครียดของเส้นใยและเมทริกซ์ แรงกระทำต่อวัสดุผสม (W_0) จะถูกแบ่งไปยังเส้นใย (W_f) และเมทริกซ์ (W_m) ดังรูป 2.10



รูป 2.10 แรงกระทำต่อวัสดุผสมกรณีเส้นใยเรียงตัวแบบต่อเนื่องตลอดความยาวของเมทริกซ์ [21]

ดังนั้น

$$W_c = W_f + W_m \quad (2.1)$$

เนื่องจาก

$$W = \sigma A \quad (2.2)$$

เมื่อ

σ = ความเค้น (Stress)

A = พื้นที่หน้าตัด (Cross-sectional area)

ดังนั้น

$$\sigma_c A_c = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m \quad (2.3)$$

เมื่อ

$\sigma_c, \sigma_f, \sigma_m$ เป็นค่าความเค้นของวัสดุผสม เส้นใยและเมทริกซ์ ตามลำดับ

A_c, A_f, A_m เป็นพื้นที่หน้าตัดของวัสดุผสมเส้นใยและเมทริกซ์ ตามลำดับ

จัดรูปสมการ 2.3 ใหม่ จะได้

$$\sigma_c = \left[\frac{\sigma_f \sigma_f}{A_c} \right] + \left[\frac{\sigma_m \sigma_m}{A_c} \right] \quad (2.4)$$

นำสัดส่วนโดยปริมาตรของเมทริกซ์ (V) มาใช้

เช่น กรณีของเส้นใย (ความยาวของเส้นใยเท่ากับความยาวของวัสดุผสม)

$$\text{สัดส่วนโดยปริมาตรของเส้นใย } V_f = \frac{\text{Volume of fiber}}{\text{Volume of composite}} = \frac{A_f}{A_c} \quad (2.5)$$

$$\text{สัดส่วนโดยปริมาตรของเมทริกซ์ } V_m = \frac{\text{Volume of matrix}}{\text{Volume of composite}} = \frac{A_m}{A_c} \quad (2.6)$$

แทนสมการ 2.5 และ 2.6 ลงในสมการ 2.4 จะได้

$$\sigma_c = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m \quad (2.7)$$

และ

$$V_f + V_m = 1 \quad (2.8)$$

ดังนั้น

$$\sigma_c = \sigma_f A_f + \sigma_m (1 - V_f) \quad (2.9)$$

เมื่อวัสดุผสม เส้นใย และเมทริกซ์ มีสมบัติของความยืดหยุ่น ค่าความเค้น จะมี
ความสัมพันธ์กับ ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus, E) ดังนี้

$$\sigma_c = E_c \varepsilon_c, \sigma_f = E_f \varepsilon_f, \sigma_m = E_m \varepsilon_m \quad (2.10)$$

เนื่องจากค่าความเครียดของวัสดุผสม (ε_c) , เส้นใย (ε_f) และเมทริกซ์ (ε_m) เท่ากัน

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f = \varepsilon_m \quad (2.11)$$

ดังนั้น

$$E_c = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (2.12)$$

เมื่อ E_c , E_f และ E_m คือ ค่ามอดุลัสของยังของวัสดุผสม, เส้นใยและเมทริกซ์ ตามลำดับ

จากสมการ 2.7

$$\sigma_c = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m$$

เมื่อสัดส่วนโดยปริมาตรของเส้นใย (V_f) สูงเกินกว่าค่าสัดส่วนโดยปริมาตรต่ำสุด (V_{min}) วัสดุผสม จะเกิดการเสียหายเมื่อเส้นใยเสียหาย

ดังนั้น

$$\sigma_c^{TS} = \sigma_f^{TS} V_f + \sigma'_m V \quad (2.13)$$

เมื่อ

σ_c^{TS} = ค่าความทนแรงดึงของวัสดุ

σ_f^{TS} = ค่าความทนแรงดึงของเส้นใย

σ'_m = ค่าความเค้นแรงดึงที่เกิดจากเมทริกซ์ ณ ความเครียดที่ทำให้วัสดุผสมเสียหาย

เมื่อสัดส่วนโดยปริมาตรของเส้นใย (V_f) มีค่าต่ำกว่าสัดส่วนโดยปริมาตรที่ต่ำที่สุด (V_{min}) วัสดุผสม จะเสียหายเมื่อค่าความเค้นของเมทริกซ์มีค่าเท่ากับ ค่าความทนแรงดึงของเมทริกซ์

ดังนั้น

$$\sigma_c^{TS} = \sigma_m^{TS} V_m \quad (2.14)$$

2.7.2 เส้นใยเรียงตัวแบบไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous fiber)

วัสดุผสมที่นำไปใช้งานวิศวกรรม โดยส่วนใหญ่มีการจัดเรียงของเส้นใยแบบไม่ต่อเนื่อง โดยเส้นใยที่ใส่จะเป็นเส้นใยสั้น ถึงแม้ว่าความแข็งแรงจะน้อยกว่าวัสดุผสมที่มีการจัดเรียงตัวของเส้นใยแบบต่อเนื่อง เมื่อพิจารณาที่สัดส่วน โดยปริมาตรของเส้นใยที่เท่ากัน ข้อดีของเส้นใยสั้น คือ สะดวกในการเตรียมวัสดุ เช่น เทคนิคการฉีดขึ้นรูป

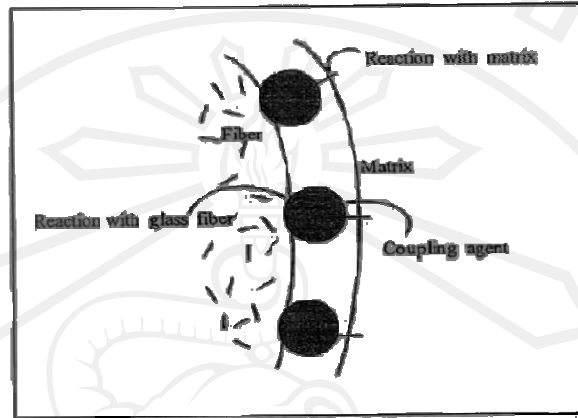
การจัดเรียงตัวของเส้นใยสั้นมี 2 ลักษณะ คือ

1. เรียงตัวขนานกันอย่างเป็นระเบียบ
2. เรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ

2.8 ตัวประสานคู่ควบ [18, 22, 23]

ตัวประสานคู่ควบจะช่วยเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใย และเมทริกซ์ ทั้งทางกายภาพและทางเคมี อีกทั้งยังช่วยป้องกันผิวของเส้นใยจากความชื้น และป้องกันความเสียหายที่เกิดจากกระบวนการผสม และการผลิตวัสดุผสม โดยทั่วไปแล้วการใช้ตัวประสานคู่ควบจะอยู่ในขั้นตอนการปรับปรุงผิวเส้นใยในกระบวนการผลิตเส้นใย และในส่วนมากจะใช้สารประกอบของซิลิโคน

และไททานิค เป็นตัวประสานคู่ควบ ซึ่งกลไกการประสานของเส้นใยกับเมทริกซ์ที่มีตัวประสานคู่ควบเป็นตัวประสานแสดงดังรูป 2.11



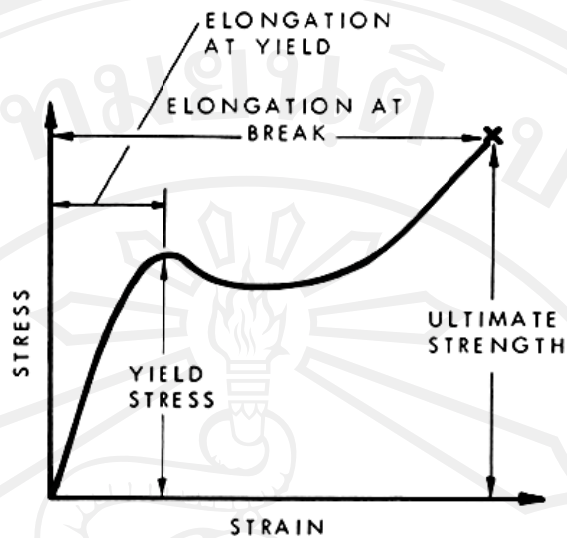
รูป 2.11 กลไกของตัวประสานคู่ควบ [22]

2.9 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) [18, 23-25]

ความแข็งแรงของวัสดุขึ้นอยู่กับความสามารถของวัสดุที่จะรับแรงกระทำโดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง หรือการแตกหัก สมบัติของวัสดุนั้นจะเป็นลักษณะเฉพาะตัวของวัสดุแต่ละชนิด และสามารถทดสอบได้โดยการทำการทดลอง การทดสอบที่สำคัญ คือ การทดสอบโดยการดึง หรือการอัด (Tension or Compression test) การทดสอบตัวอย่างของวัสดุไม่ว่าจะเป็น โลหะ เซรามิกส์ พอลิเมอร์ และวัสดุผสมชนิดต่าง ๆ จะต้องทำเป็นรูปทรง และขนาดตามมาตรฐานก่อนที่จะทำการทดสอบ เช่น มาตรฐานสมาคมอเมริกันสำหรับการทดสอบวัสดุ (American Society for Testing and Materials Standard ASTM) มาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น (Japanese Industrial Standard; JIS) หรือมาตรฐานอื่น ๆ ที่ยอมรับกันทั่วโลก ซึ่งมาตรฐานเหล่านี้เป็นตัวบ่งชี้ และสามารถเป็นแนวทางในการทดสอบได้

2.9.1 ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) [18, 23-29]

ความต้านทานแรงดึงสามารถอธิบายได้ว่า ขณะที่ดึงวัสดุด้วยแรงภายนอก แรงกระทำจะถ่ายทอดตลอดแนวของชิ้นตัวอย่าง ทิศทางการเคลื่อนที่ภายในแกนตามแนวแรงจะมีการต้านกัน การเกิดแรงต้านนี้เกิดขึ้นทั่วบริเวณของชิ้นตัวอย่าง จะส่งผลให้เกิดความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ขึ้นภายในวัสดุ โดยความสัมพันธ์ของความเค้น และความเครียดสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟแสดงพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุได้เรียกว่า กราฟความเค้น – ความเครียด ดังรูป 2.12



รูป 2.12 กราฟความเค้น – ความเครียดของวัสดุ [29]

กราฟความเค้น – ความเครียดของวัสดุจะแสดงความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นระหว่างหน่วยแรง และความเครียดภายในขอบเขตของความยืดหยุ่น การเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงจะทำให้เพิ่มความเครียดอย่างเป็นสัดส่วน หลักการนี้ค้นพบโดย โรเบิร์ต ฮุก (Robert Hooke) โดยใช้สปริง จึงเรียกชื่อว่า กฎของฮุก (Hooke's law) ซึ่งแสดงในรูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์ คือ

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.15)$$

โดย E แทนค่าคงที่ของความเป็นสัดส่วน (Constant of proportionality) ซึ่งเรียกว่า มอดุลัสของความยืดหยุ่น หรือ มอดุลัสของยัง (Modulus of elasticity or Young's modulus) σ แทนค่าความเค้น และ ε แทนค่าความเครียด สมการนี้เป็นสมการของแนวเส้นที่เหยียดตรงเริ่มต้นของกราฟความเค้น – ความเครียด ดังนั้นมอดุลัสของความยืดหยุ่นจึงเท่ากับความชัน (Slope) ของเส้นกราฟ

ความเครียดเป็นผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอะตอมที่เคลื่อนที่ไปขณะถูกแรงมากระทำ ค่านี้จะเกิดขึ้นพร้อมกับค่าความเค้น มีหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อมิลลิเมตร (mm/mm) หรือนิ้วต่อนิ้ว (in/in) บางครั้งอาจใช้หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ก็ได้ การคำนวณค่าความเครียดหาได้จากอัตราส่วนระหว่างส่วนต่างของความยาว (ΔL) ต่อ ความยาวเดิม (L_0) ดังสมการ

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.16)$$

ความเค้นสามารถคำนวณได้จากแรงภายนอก (F) ที่มากระทำต่อพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ (A) และเกิดการต่อต้านขึ้น โดยมีหน่วยการวัดเป็นแรงต่อพื้นที่ เช่น ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) นิวตันต่อตารางเมตร (N/m²) หรือ ปาสคาล (Pa) โดยแสดงดังสมการ

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.17)$$

แรงภายนอกที่มากระทำต่อวัสดุ และส่งผลให้เกิดความเค้นนั้นมีดังนี้

1. ความเค้นแรงดึง (Tensile stress)
2. ความเค้นแรงอัด (Compressive stress)
3. ความเค้นแรงเฉือน (Shear stress)
4. ความเค้นแรงดัดโค้ง (Bending or Flexural stress)

ความเค้นแรงดึง (Tensile stress) คือ ค่าความเค้นที่เกิดจากการดึงโดยแรงภายนอกมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัด ซึ่งเป็นหน่วยแรงต่อพื้นที่

ความเค้นแรงอัด (Compressive stress) คือ ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจากแรงดัดหรือกด ซึ่งพยายามให้วัสดุอัดแน่นติดกันหรือ ทำให้อะตอมของวัสดุอัดแน่น การทดสอบแบบนี้วัสดุจะเกิดแรงต้านจากแรงอัดเพื่อให้เกิดการคืนตัวของวัสดุในการรักษาสภาพของตัวเองให้สมดุล

ความเค้นแรงเฉือน (Shear stress) คือ ค่าความเค้นที่เกิดจากการทดสอบการดึงหรือการอัดเพื่อให้วัสดุเลื่อนผ่านกัน ซึ่งพื้นที่จะขนานกับทิศทางของแรงภายนอกที่กระทำ

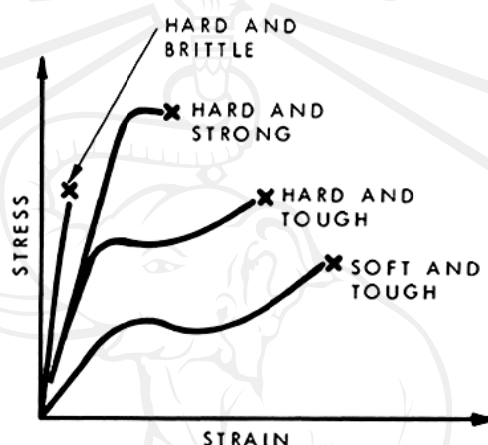
ความเค้นแรงดัดโค้ง (Bending or Flexural stress) คือ ค่าความเค้นที่ได้จากการทดสอบกดขึ้นตัวอย่างให้เกิดการงอตัวโดยใช้หัวกด ซึ่งกดลงตั้งฉากกับชิ้นตัวอย่างที่อยู่ในลักษณะแนวนอน โดยมีตัวรองรับเป็นตัวกำหนดช่วงห่าง

เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Elongation) คือ การยืดออกของชิ้นงานที่แสดงเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ของความยาวเริ่มต้น ซึ่งเปอร์เซ็นต์การยืดตัวนี้เป็นการเพิ่มขึ้นของความยาวของชิ้นงานที่ถูกดึง ถ้าเป็นเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่จุดขาด (%Elongation at break) จะเป็นการคิดเปอร์เซ็นต์การยืดขณะที่ชิ้นงานขาดหรือแตกออก

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความยืด (\% Elongation)} = \left(\frac{\Delta L}{L_o} \right) \times 100 \quad (2.18)$$

พื้นที่ภายใต้กราฟระหว่างความเค้น-ความเครียดเป็นสิ่งบ่งชี้ถึงความเหนียว (Toughness) ของวัสดุ ถ้าวัสดุใดมีพื้นที่ใต้เส้นกราฟมากจึงเป็นวัสดุที่มีความเหนียวมาก ส่วนวัสดุที่มีพื้นที่ใต้เส้นกราฟน้อยจึงเป็นวัสดุที่เปราะ

ซึ่งพลาสติกแต่ละประเภทก็มีลักษณะกราฟระหว่างความเค้นกับความเครียดที่ต่างกันดังรูป 2.13 ซึ่งลักษณะเส้นโค้งที่ปรากฏ ทำให้สามารถจำแนกสมบัติของพลาสติกได้ดังตาราง 2.5



รูป 2.13 กราฟความเค้น – ความเครียดของวัสดุพอลิเมอร์ 4 ประเภท [29]

ตาราง 2.5 ลักษณะของกราฟความเค้น-ความเครียดที่เกี่ยวข้องกับสมบัติของพอลิเมอร์ [30]

สมบัติของพลาสติก	ลักษณะของกราฟระหว่างความเค้น-ความเครียด			
	Modulus	Yield stress	Ultimate strength	Elongation at break
Soft, weak	Low	Low	Low	Moderate
Soft, tough	Low	Low	Yield stress	High
Hard, brittle	High	None	Moderate	Low
Hard, strong	High	High	High	Moderate
Hard, tough	High	High	High	High

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความทนแรงดึง การยืดตัว และมอดูลัสของยัง

1. การเตรียมชิ้นทดสอบและขนาดชิ้นทดสอบ

การจัดเรียงโครงสร้างโมเลกุล มีผลกระทบมากต่อค่าความต้านทานแรงดึง การให้แรงขนาดกับการทดสอบการจัดเรียงตัวของโมเลกุลอาจให้ผลการทดสอบที่ได้สูงกว่าให้แรงตั้งฉากกับการจัดเรียงตัวของโมเลกุล กระบวนการเตรียมชิ้นทดสอบก็มีผลกระทบสำคัญ

2. อัตราของความเครียด (Rate of straining)

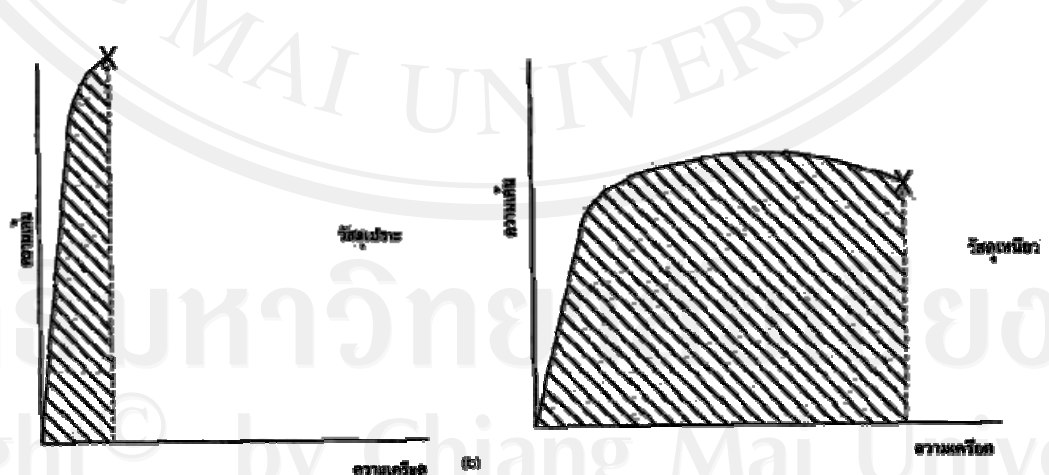
ถ้าอัตราความเครียดเพิ่มขึ้นจะให้ค่าความทนแรงดึงและมอดุลัสของยังเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการยืดยาวออกจะแปรผกผันกับสัดส่วนของอัตราความเครียด นั่นคือเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น การยืดตัวจะลดลง

3. อุณหภูมิ (Temperature)

สมบัติความทนแรงดึงของพลาสติกบางอย่างจะเปลี่ยนอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความทนแรงดึงและมอดุลัสจะลดลง ขณะที่การยืดยาวเพิ่มขึ้น

2.9.2 ความต้านทานแรงกระแทก (Impact strength) [25]

ทัพเนสส์ (Toughness) คือ ความสามารถของวัสดุที่จะดูดซับพลังงานไว้ได้โดยไม่เกิดการแตกหักสามารถวัดสมบัติด้วยการทดสอบแรงกระแทก (Impact test) ซึ่งความเหนียวมีความสัมพันธ์กับความแข็งแรงและความสามารถในการยืดตัวของวัสดุ เนื่องจากโดยทั่วไปเรามักจะประเมินค่าความเหนียวจากมอดุลัสของความเหนียว (Modulus of Toughness) ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับพื้นที่ใต้เส้นโค้งความเค้น (σ) – ความเครียด (ϵ) ที่ได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile test) ซึ่งค่ามอดุลัสของความเหนียว (Modulus of toughness) นี้ จะแสดงถึงพลังงานต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุที่ต้องใช้ในการทำให้วัสดุเกิดการแตกหักเสียหาย วัสดุที่มีความเหนียวสูงกว่าจะใช้พลังงานต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุที่สูงกว่าในการทำให้วัสดุเกิดการแตกหักเสียหาย จากรูป 2.14 แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างวัสดุเหนียวและวัสดุเปราะ



รูป 2.14 กราฟ Modulus of Toughness ของวัสดุเหนียว (a) และวัสดุเปราะ (b) [24, 26]

สมบัติความทนแรงกระแทกสนใจในเชิงพลังงานที่ถูกดูดกลืนไว้จากการได้รับแรงเชิงกลพากระทบต่อพื้นที่หน้าตัดตามแนวเดียวกับแนวแรง ซึ่งจากค่าพลังงานที่ถูกดูดกลืนไว้โดยชิ้นทดสอบ (E_{ab}) สามารถทราบค่าพลังงานของการทนการกระแทกของชิ้นทดสอบ (E_{Im}) ได้ดังสมการ 2.19

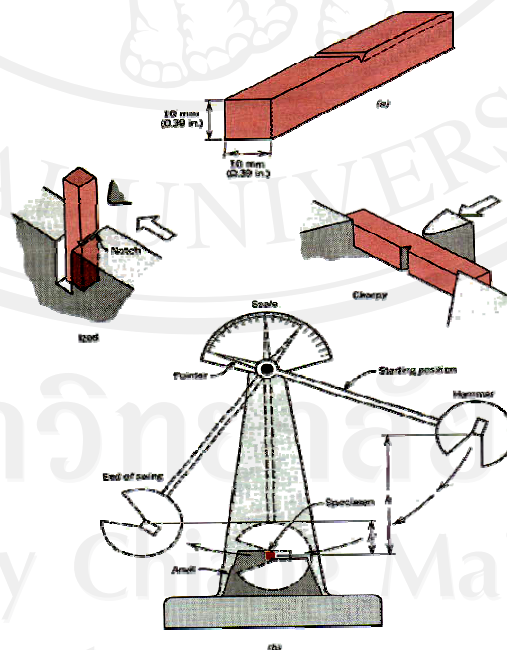
$$E_{Im} = \frac{E_{ab}}{B \times h} \quad (2.19)$$

เมื่อ B = ความกว้างของชิ้นทดสอบ
 h = ความหนาของชิ้นทดสอบ (หากมีรอยบาก หักส่วนความลึกรอยบากออก)

เครื่องทดสอบความต้านทานแรงกระแทกของวัสดุที่ใช้

1. แบบตุ้มน้ำหนักเหวี่ยงกระแทก (Pendulum impact) ซึ่งอาจใช้การทดสอบแบบอิชอด (Izod type) หรือ แบบชาร์ปี (Charpy type) แสดงดังรูป 2.15
2. แบบน้ำหนักตกกระแทก (Drop weight impact)

การทดสอบโดยใช้ตุ้มน้ำหนักเหวี่ยงกระแทกทั้งแบบอิชอดและแบบชาร์ปี จะแสดงถึงพลังงานที่ต้องใช้ในการทำให้ชิ้นทดสอบที่รอยบากเกิดการแตกหัก คำนวณออกมาเป็นหน่วย ฟุต-ปอนด์ต่อตารางนิ้วของรอยบาก



รูป 2.15 การทดสอบแรงกระแทกแบบ Charpy และ Izod [31]

2.9.3 ความต้านทานแรงอัด (Compressive strength) [32-33]

การทดสอบแรงอัดเป็นการทดสอบที่มีลักษณะการใส่แรงกระทำในแบบตรงข้ามกับการทดสอบแรงดึง คือการทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบในลักษณะการดึงยืดขึ้นทดสอบ ส่วนการทดสอบแรงอัดเป็นการทดสอบในลักษณะการกดอัดขึ้นทดสอบ โดยการพิจารณาเลือกการทดสอบแรงอัดแทนกระบวนการทดสอบอื่นจะขึ้นอยู่กับประเภทของการนำไปใช้งานของวัสดุ

แรงเค้นอัดเกิดจากแรงอัดที่ให้กับชิ้นทดสอบ ซึ่งทำให้ชิ้นทดสอบเกิดการหดตัวหรืออัดตัวภายใต้แรงอัดนั้น ชิ้นทดสอบที่ใช้ในการทดสอบแรงอัดนี้ต้องมีลักษณะสั้นและมีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าความยาว เนื่องจากการทดสอบแรงอัดกับชิ้นทดสอบที่มีขนาดยาวจะเกิดการโค้งงอด้านข้าง ซึ่งมีรูปแบบการเกิดที่ไม่แน่นอนจากการเสียรูปแบบยืดหยุ่น ดังรูปที่ 2.16 ดังนั้นโดยปกติชิ้นทดสอบที่ใช้ในการทดสอบแรงอัดมักเตรียมเป็นทรงกระบอก อย่างไรก็ตามบางวัสดุเช่น อิฐ ซึ่งเตรียมเป็นทรงกระบอกได้ยาก กรณีเช่นนี้จะเตรียมชิ้นทดสอบในรูปทรงที่สะดวกที่สุด

การทดสอบแรงอัดมีประโยชน์ในการวัดค่ามอดุลัสอีลาสติก ค่าความเค้นจุดคราก ความต้านทานแรงอัดสูงสุด และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างภายหลังจุดคราก วิธีทดสอบแรงอัดนี้จะมีการกำหนดในมาตรฐาน ASTM D695



รูป 2.16 การเสียรูปแบบโค้งงอออกด้านข้างของวัสดุภายใต้แรงอัด [32]

มาตรฐานกำหนดให้ชิ้นงานทดสอบถูกอัดด้วยอัตราเร็ว 1.3 mm/min จนกว่าจะแตกหัก ก่อนการทดสอบ ชิ้นงานทดสอบจะต้องมีขนาดตามที่ระบุในมาตรฐาน และไม่มีข้อบกพร่องบนผิวที่มองเห็น ในการทดสอบแรงอัด พบว่าการได้ศูนย์ของชิ้นงานทดสอบมีความสำคัญอย่างมากต่อการกระจายของแรงอย่างสม่ำเสมอซึ่งจะส่งผลต่อความสม่ำเสมอของผลการทดสอบ

2.10 การหาความหนาแน่นด้วยเครื่องชั่งไฟฟ้า (Density Determination with Electrical Balance) [26]

ความหนาแน่น (Density) ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) จัดเป็นสมบัติทางกายภาพอย่างหนึ่งของวัสดุที่สามารถใช้แปลงจากค่ามวลไปสู่ปริมาตร หรือจากปริมาตรไปสู่มวลได้ ประโยชน์ที่สำคัญทางด้านวัสดุคือ การอาศัยค่าความหนาแน่นเป็นตัวชี้วัดถึงประสิทธิภาพในการอัดแน่นตัวของวัสดุในระหว่างขั้นตอนการขึ้นรูป ซึ่งสูตรที่ใช้ในการคำนวณนั้นยังสามารถนำไปสู่การหาความพรุนของวัสดุได้อีกด้วย

การหาความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะของชิ้นงานนั้นอาศัยหลักการเดียวกันแต่ใช้วิธีการคำนวณที่แตกต่างกัน เนื่องจากการหาความถ่วงจำเพาะนั้นเป็นการนำค่าความหนาแน่นของวัสดุไปเทียบกับค่าความหนาแน่นของน้ำ และเนื่องจากค่าความหนาแน่นของน้ำ ณ อุณหภูมิต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกัน คือ ประมาณ 1 g/cm^3 จึงทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะและความหนาแน่นของวัสดุมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นในที่นี้จึงอาจกล่าวเฉพาะค่าใดค่าหนึ่งเท่านั้น

การหาความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ อาศัยหลักการของอาร์คิมิดีสที่กล่าวไว้ว่า “เมื่อจุ่มของแข็งลงในของเหลวจะมีแรงพยุงเกิดขึ้นบนของแข็งนั้น โดยแรงพยุงที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับน้ำหนักของของเหลวที่ถูกแทนที่ด้วยปริมาตรของของแข็ง” วิธีการจึงทำได้โดยหาค่ามวลของวัตถุในอากาศและขณะที่จุ่มอยู่ในน้ำ

$$\rho = \frac{W_a}{W_a - W_f} \cdot \rho_f \quad (2.20)$$

เมื่อ ρ คือ ค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน (g/cm^3)

ρ_f คือ ค่าความหนาแน่นของของเหลว (g/cm^3)

W_a คือ น้ำหนักแห้งของชิ้นงาน (g)

W_f คือ น้ำหนักของชิ้นงานในของเหลว (g)

2.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM)

[18, 23, 26]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นการประยุกต์นำเอาอิเล็กตรอนที่มีช่วงคลื่นสั้นกว่าคลื่นแสงมาใช้แทนคลื่นแสง และใช้เลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้ามาแทนเลนส์กระจก และมีตัวตรวจวัดที่จะมาจับสัญญาณอิเล็กตรอนที่เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนไปกระทบผิวตัวอย่าง จากนั้นก็จะมีอุปกรณ์ในการแปลงสัญญาณที่ได้ให้เป็นสัญญาณภาพปรากฏบนจอรับภาพต่อไป ผลที่ได้คือภาพของวัตถุหรือตัวอย่างที่กำลังขยายมากกว่า 3,000 เท่า ถึงระดับมากกว่า 100,000 เท่าซึ่งมากกว่า

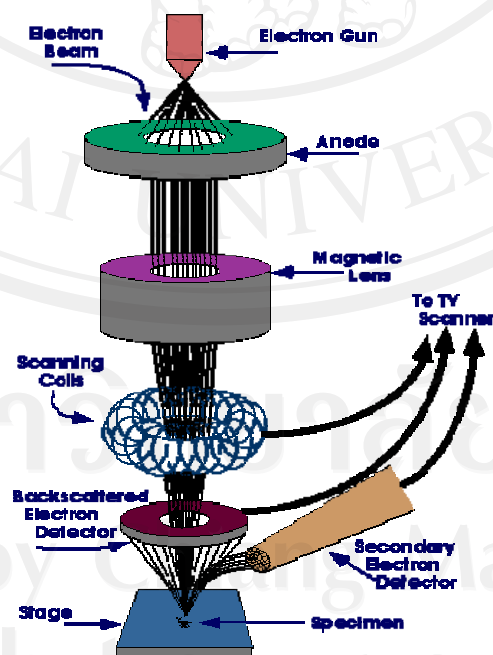
กล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดาที่มีกำลังขยายได้เต็มที่ไม่เกิน 3,000 เท่า และยังสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพซึ่งขึ้นกับลักษณะตัวอย่างได้ตั้งแต่ 3 ถึง 100 nm ในขณะที่กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงส่องสว่างธรรมดามีกำลังแยกแยะใช้วัตถุเล็กสุดเพียง 0.2 μm เท่านั้น

ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด สัญญาณภาพที่ได้เกิดจากการใช้ตัวตรวจวัดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) มาจับสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดขึ้น หรือใช้ตัวตรวจวัดอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscatter electron)

2.11.1 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังรูป 2.17 ประกอบด้วยส่วนหลัก ๆ ที่สำคัญดังต่อไปนี้

1. แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron source)
2. อิเล็กโทรแมกเนติกเลนส์ (Electromagnetic lens) หรือ ขดลวดทำหน้าที่ควบคุมการส่องกราดของลำอิเล็กตรอน
3. ป้อนสุญญากาศ และระบบควบคุมความดัน (Control pressure system)
4. ช่องใส่ตัวอย่าง (Specimen chamber)
5. ตัวตรวจวัดสัญญาณอิเล็กตรอน (Electron signal detector)
6. อุปกรณ์สร้างภาพ (Imaging devices)



รูป 2.17 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนส่องกราด [34]

2.11.2 การเตรียมชิ้นตัวอย่างสำหรับทดสอบ

ในการวิเคราะห์ และศึกษาการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อให้ได้ภาพที่ดีนั้น นอกจากจะขึ้นกับประสิทธิภาพ หรือความสามารถของเครื่องแล้ว ยังขึ้นกับชนิดของตัวอย่าง และเทคนิคการเตรียมตัวอย่างที่เหมาะสมอีกด้วย ประเภทของตัวอย่างจะเป็นวัสดุ หรือผง วัสดุที่เป็นของแข็งความดันไอลดต่ำกว่า 1 หรือเท่ากับ 10^{-3} ทอร์ ขนาดของตัวอย่างถูกจำกัดโดยขนาดของช่องใส่ตัวอย่าง และตำแหน่งวางตัวอย่างของเครื่อง

กรณีตัวอย่างเป็นชิ้นงาน ก่อนนำเข้าศึกษาในเครื่องต้องทำการติดชิ้นงานเข้ากับก้านวางตัวอย่าง ซึ่งส่วนใหญ่ทำด้วยโลหะจำพวกเหล็ก อลูมิเนียม ทองเหลือง ทองแดง มีลักษณะเป็นรูปทรงกลมมีก้านที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงพอเหมาะใส่ได้พอดีกับช่องว่างในฐานวางตัวอย่าง และใช้สารยึดติดตัวอย่างเข้ากับก้านวางตัวอย่างซึ่งส่วนใหญ่ใช้วัสดุจำพวกเทปกาวยาง หน้า เทปกาวยางคาร์บอน หรือน้ำยาทาเล็บ กรณีที่ตัวอย่างไม่นำไฟฟ้าต้องนำตัวอย่างนั้นไปผ่านขั้นตอนการฉาบผิวด้วยโลหะก่อนนำไปศึกษา

กรณีตัวอย่างเป็นผง มักใช้สารยึดติดตัวอย่างจำพวกที่เป็นเทปกาวยางหน้า หรือเทปกาวยางคาร์บอนติดด้านบนของก้านวางตัวอย่าง และ โรงผงตัวอย่างให้กระจายลงบนด้านหน้าของก้านวางตัวอย่างที่มีเทปกาวยางอยู่ จากนั้นใช้ลูกยางเป่าลม และปัดฝุ่นเศษของผงตัวอย่างที่ไม่ยึดติดบนก้านวางตัวอย่างออก จากนั้นจึงนำเข้าเครื่อง หรือทำการฉาบผิวด้วยโลหะกรณีตัวอย่างไม่นำไฟฟ้า

การเคลือบฉาบผิวตัวอย่างนิยมใช้สารตัวนำไฟฟ้าจำพวกโลหะหนักที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น คาร์บอน ทอง และ โลหะผสมทอง-พัลลาเดียม เป็นต้น โดยมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มสมบัติในการนำไฟฟ้าให้กับตัวอย่าง ทั้งนี้หลักการเบื้องต้นของการฉาบผิวต้องกระทำภายใต้ภาวะสุญญากาศ และให้กระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมเพื่อให้โลหะหนักเปลี่ยนสภาพจากแท่งโลหะมาเป็นโมเลกุล และตกลงบนผิวตัวอย่างในอัตราส่วนเดียวกัน ทำให้โลหะฉาบผิวตัวอย่างได้เป็นเนื้อเดียวกัน