

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 วัสดุผสม (composites)

วัสดุผสมหรือวัสดุเชิงประกอบเป็นวัสดุที่มีวัสดุ 2 ชนิดขึ้นไปเป็นองค์ประกอบ วัสดุผสมส่วนใหญ่ประกอบด้วยสารเติมที่เหมาะสมหรือวัสดุเสริมแรงกับสารเชื่อมประสานพวกเรซินที่เข้ากันได้ เมื่อผสมผสานกันแล้วจะได้ลักษณะที่เป็นสมบัติที่ต้องการ ตัวแปรที่จะทำให้วัสดุผสมมีสมบัติต่าง ๆ กัน มีมากมายทั้งนี้รวมถึงรูปร่าง ปริมาตร และส่วนประกอบของสารเติมหรือวัสดุเสริมแรงที่ฝังกระจายในเนื้อวัสดุผสม แบบอย่างของวัสดุผสมมีพวกดิสเพอร์ชันฮาร์ดเดนด (dispersion hardened) และไฟเบอร์สเตรงเทนด (fiber-strengthened) ในโลหะ เซรามิก แก้ว คอนกรีต และพลาสติก

ตัวอย่างของวัสดุผสมพวกดิสเพอร์ชันฮาร์ดเดนด ได้แก่ การมีอนุภาคของวัสดุแข็งฝังในเนื้อวัสดุอ่อน เช่น อนุภาคของเหล็กหรือโครเมียมฝังในทองแดง อนุภาคของทอเรีย (thoria) ในนิกเกิล หรือวัสดุผสมของทองแดง-ซิลิมาไนต์ (silimanite) ที่ใช้ในการห้ามล้อเครื่องบิน

ตัวอย่างของวัสดุผสมพวกไฟเบอร์สเตรงเทนด ได้แก่ เส้นใยแก้ว เส้นใยที่เสริมแรงในพลาสติก (FRP) โฟมพอลิเอทิลีนในพีวีซีที่ใช้ทำเบาะนั่ง หรือโฟมพอลิสไตรีน (polystyrene form) ใช้ทำหุ่นลอยน้ำ เป็นต้น

วัสดุผสมส่วนใหญ่จะเป็นพลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใย ซึ่งประกอบด้วยส่วนประกอบสองส่วนหรือมากกว่า คือ ส่วนที่เป็นเส้นใย และส่วนที่เป็นเมทริกซ์ (matrix) โดยเส้นใยอาจมีความยาวต่อเนื่องตลอดความยาวของเมทริกซ์ หรือกรณีที่เส้นใยมีความยาวไม่ต่อเนื่อง เช่น เส้นใยขนาดสั้นกระจายไม่เป็นระเบียบอยู่ในเมทริกซ์ หรืออาจมีส่วนที่สาม ที่เรียกว่าอินเตอร์เฟส (interphase) อยู่รอบๆ เส้นใยทำหน้าที่เป็นตัวยึดเกาะระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์

โดยทั่วไปเส้นใยและเมทริกซ์จะมีสมบัติทางกายภาพ (physical properties) และสมบัติเชิงกล (mechanical properties) ต่างกัน เส้นใยจะมีความแข็งแรงมากกว่าเมทริกซ์ และสามารถรับแรงกระแทกจากภายนอกที่กระทำต่อวัสดุผสมได้ช่วยไม่ให้เกิดการเสียหายหรือการผิดรูปภายใต้แรงกระทำนั้นๆ เมทริกซ์โดยทั่วไปจะเป็นพอลิเมอร์หรือพลาสติก ทำหน้าที่ให้เส้นใยกระจายตัวและยึดเกาะ และช่วยถ่ายเทแรงกระทำจากภายนอกที่กระทำต่อวัสดุผสมมายังเส้นใย ตลอดจนช่วยกำหนดรูปร่างของวัสดุผสม

ความแข็งแรงของวัสดุผสมจะถูกกำหนดโดยสมบัติเส้นใย สัดส่วนโดยปริมาตรของเส้นใยในเมทริกซ์ ความแข็งแรงและการกระจายตัว ความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ ซึ่งจะต้องแข็งแรงเพียงพอที่จะป้องกันไม่ให้อ่อนแอจากภายนอกสามารถแยกเส้นใยและเมทริกซ์ออกจากกัน

2.2 องค์ประกอบของวัสดุผสม

1) เมทริกซ์

ในพลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใยหรืออนุภาค เมทริกซ์เป็นเทอร์มอพลาสติก (thermoplastic) หรือเทอร์มอเซต (thermoset)

เทอร์มอเซตพอลิเมอร์ จะหลอมตัวในเฉพาะครั้งแรกที่ได้รับความร้อน และเกิดการเชื่อมโยง (crosslinking) ระหว่างสายโซ่โมเลกุลด้วยความร้อนหรือตัวเชื่อมโยง (crosslinking agent) ทำให้มีเครือข่ายเป็นแบบร่างแห (network) โครงสร้างของพอลิเมอร์จะคงตัวไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้อีกเมื่อได้รับความร้อน ตัวอย่างของเทอร์มอเซตพอลิเมอร์ ได้แก่ อีพ็อกซีเรซิน (epoxy resin) พอลิเอสเตอร์ (polyester) ฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์ (phenol-formaldehyde) เป็นต้น

เทอร์มอพลาสติก สามารถหลอมตัวเมื่อให้ความร้อน แล้วแข็งตัวเมื่อทำให้เย็นตัวลง การหลอมตัวด้วยความร้อนสามารถทำได้หลายครั้ง เนื่องจากไม่มีการเชื่อมโยงกันระหว่างสายโซ่โมเลกุล และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมี และสมบัติทางกายภาพอีกด้วย ตัวอย่างของเทอร์มอพลาสติกพอลิเมอร์ ได้แก่ พอลิเอทิลีน (polyethylene) พอลิพรอพิลีน (polypropylene) ไนลอน (nylon) พอลิสไตรีน (polystyrene) เป็นต้น

อีพ็อกซีเรซิน (epoxy resins)

อีพ็อกซีเรซิน หรืออีพ็อกซีเป็นเมทริกซ์ สำหรับคอมโพสิตที่มีให้เลือกใช้มากมายหลายชนิดในท้องตลาด แม้ว่าพอลิเอสเตอร์ชนิดไม่อิ่มตัวจะมีราคาถูกกว่า หรือพอลิอิมิดจะสามารถทนความร้อนได้ดีกว่า แต่อีพ็อกซีจะมีสมบัติทางกายภาพที่กว้าง มีความแข็งแรงเข้ากันได้ดีกับเส้นใยทุกชนิดและสามารถผ่านกระบวนการได้สะดวก ทำให้อีพ็อกซีเป็นสารที่ได้รับการเลือกใช้มากที่สุด ส่วนใหญ่แล้วอีพ็อกซีจะใช้ในงานโครงสร้างต่างๆ ทั้งนี้โครงสร้างทางเคมีของเรซินของสารทำให้สุก (during agents) ชนิดของสารตัดแปรโครงสร้าง (modifying reactants) ที่มีให้เลือกมากมาย และสภาวะการก่อโครงสร้างตาข่าย (curing conditions) จะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติความเหนียวทน ความทนทานต่อสารเคมีและตัวทำละลาย คุณสมบัติทางกลตั้งแต่ที่มีความยืดหยุ่นสูงจนถึงมีความแข็งแรงสูง (high strength) และความแข็ง (hardness) คุณสมบัติต้านทานการไหลคลาน (creep) และความล้า นอกจากนี้อีพ็อกซียังเด่นในด้านการยึดเกาะ (adhesion) เส้นใยได้ดีเยี่ยม ความทนทานความร้อนและคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี ปฏิริยาก่อโครงสร้างตาข่ายไม่ก่อให้เกิดสารข้างเคียง (by products) และมีการหดตัวต่ำหลังปฏิริยาก่อโครงสร้างตาข่าย เรซินที่ยังไม่สุก (uncured resin) ก็มีให้เลือกตั้งแต่ที่เป็นของเหลวความหนืดต่ำจนเป็นของแข็ง ซึ่งเมื่อรวมกับสารก่อโครงสร้างตาข่ายที่มีให้เลือกมากมาย จะทำให้สามารถเลือกสภาวะของกระบวนการเตรียมคอมโพสิตได้หลากหลาย ข้อเสียของอีพ็อกซีที่สำคัญ คือ การดูดความชื้น และความเปราะ

ตาราง 2.1 แสดงคุณสมบัติของอีพ็อกซี

คุณสมบัติ	
อุณหภูมิการอ่อนตัว (heat-deflection temperature) ที่ 1.82 MPa, °C	140
ความคงทนความร้อนสูงสุดเมื่อให้ความร้อนอย่างต่อเนื่อง °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 M90	M105
ความถ่วงจำเพาะ	1.0

หน้าที่เมทริกซ์

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



2) ตัวเสริมแรง (reinforce)

ตัวเสริมแรง ได้แก่ พวกที่เป็นอนุภาคหรือเส้นใย ส่วนใหญ่นิยมใช้เป็นตัวเสริมแรง ซึ่งเส้นใยที่นิยมใช้โดยทั่วไป คือเส้นใยแก้ว (glass fiber) เส้นใยคาร์บอน (carbon fiber) และเส้นใยอะรามิด (aramid fiber)

หน้าที่ของตัวเสริมแรง

1. เพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุผสม
2. สามารถรับแรงกระทำจากภายนอก โดยแรงกระทำนั้นจะถูกถ่ายทอดไปตามเส้นใยหรืออนุภาค

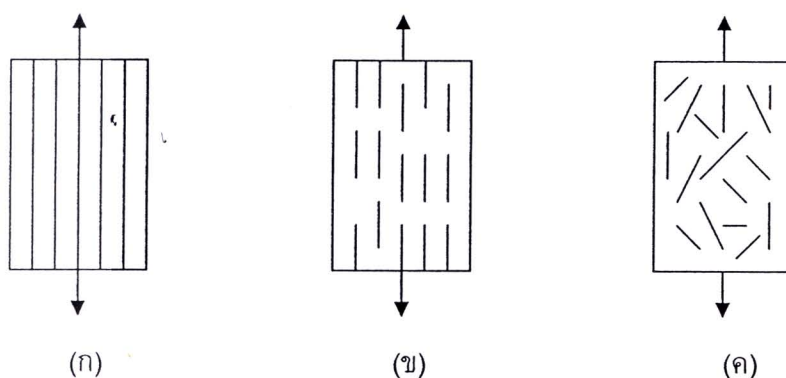
3) สารเติมและสารปรับแต่ง (filler and additives)

สารเติมและสารปรับแต่ง นำมาใช้ทั้งเทอร์มอพลาสติกและเทอร์มอเซตเพื่อเปลี่ยนลักษณะการทำงานของระบบเรซิน กระบวนการ หรือตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับราคาของสารเติมอาจเป็นเรซินที่มีราคาโดยมุลต่ำ ซึ่งไม่มีผลต่อการนำไปประยุกต์ใช้เลย สารเติมอื่นๆ ซึ่งจะมีผลต่อการทำสารประกอบ และ/หรือชิ้นงานสำเร็จรูป เช่น แคมเซียมคาร์บอเนตช่วยปรับปรุงความเงางามของผิวพอลิไวนิลคลอไรด์ชนิดแข็ง และแทลคัม (talc) ช่วยปรับปรุงอุณหภูมิเบี่ยงเบนทางความร้อน (heat deflection temperature) ของพอลิพรอพิลีน โดยสารเติมทั้งสองมีการใช้ทั่วไปเนื่องจากมีราคาต่ำ และใช้ได้ปริมาณสูง การเติม



อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์จะช่วยทำให้เกิดเปลวไฟช้าลง (flame retardant) นอกจากนี้ยังมีสารปรับแต่งที่ช่วยยับยั้งการเสียคุณภาพจากแสงอัลตราไวโอเลต สารปรับแต่งที่นำไฟฟ้าได้ (conductive additives) ใช้ในพลาสติกชนิดเสริมแรงเพื่อป้องกันการสอตแทรกจากความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และวัตถุ ส่วน สารให้สี (colorants) ช่วยทำให้เกิดสี การเติมเมทัลลิกสเตียเรท (metallic stearates) ในสารประกอบอัดแบบเพื่อให้ชิ้นงานสำเร็จรูปหลุดออกจากพื้นผิวแม่แบบได้ง่าย และสารปรับแต่งประเภทเทอร์มอพลาสติกที่ใช้ในสูตรผสมเทอร์มอเซตเพื่อควบคุมการหดตัวที่เกิดขึ้นในระหว่างการบ่มตัว ซึ่งมีผลดีทำให้แบบที่ได้ใกล้เคียงกับข้อกำหนดที่ต้องการ พื้นผิวจึงเรียบจัดอยู่ในสินค้าสำเร็จรูปประเภทเกรดเอ

การกระจายตัวของเส้นใยในเมทริกซ์



รูป 2.1 แสดงการเรียงของเส้นใยพลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใย

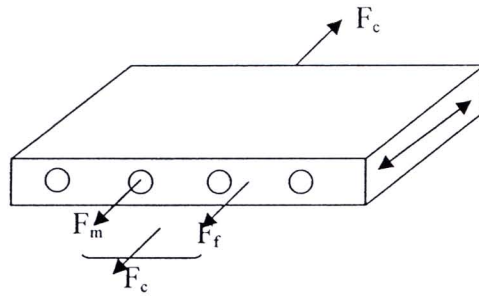
เส้นใยอาจจะมีการจัดเรียงตัวเป็น 3 แบบ ดังรูป 2.1 คือ

- 1) เรียงตัวแบบต่อเนื่องในทิศทางเดียวกันตลอดความยาวของเมทริกซ์ (unidirectional continuous fibers)
- 2) เรียงตัวเปรี๊ยะแบบไม่ต่อเนื่อง (aligned discontinuous fibers)
- 3) เรียงตัวไม่เป็นระเบียบแบบไม่ต่อเนื่อง (randomly oriented discontinuous fibers)

2.3 กลไกของการเสริมแรงด้วยเส้นใย

2.3.1 เส้นใยเรียงตัวแบบต่อเนื่องในทิศทางเดียวกันตลอดความยาวของเมทริกซ์

วัสดุผสมชนิดนี้จะมีเส้นใยยาวเรียงตัวในทิศทางเดียวกันอย่างต่อเนื่องตลอดความยาวของเมทริกซ์ โดยทิศทางที่เส้นใยเรียงตัวจะเป็นทิศทางเดียวกับทิศทางของแรงกระทำจากภายนอก ถ้าสมมติว่าเส้นใยทุกเส้นเหมือนกันและพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างเส้นใยของเมทริกซ์สมบูรณ์ ความเครียด (strain, ϵ) ในวัสดุผสมจะเท่ากับความเครียดของเส้นใยและเมทริกซ์ แรงกระทำต่อวัสดุผสม (W_c) จะถูกแบ่งไปยังเส้นใย (W_f) และเมทริกซ์ (W_m) ดังรูป 2.2



รูป 2.2 แรงกระทำต่อวัสดุผสมกรณีเส้นใยเรียงตัวแบบต่อเนื่องตลอดความยาวของเมทริกซ์

ดังนั้น $W_c = W_f + W_m$ (2.1)

เนื่องจาก $W = \sigma A$ (2.2)

เมื่อ σ = ความเค้น (stress)

A_c = พื้นที่หน้าตัด (cross-sectional area)

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

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

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

แทนสมการ 2.5 และ 2.6 ลงในสมการ 2.4 จะได้

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad (2.7)$$

และ $V_f + V_m = 1$ (2.8)

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

เมื่อวัสดุผสม เส้นใย และเมทริกซ์ มีสมบัติของความยืดหยุ่น ค่าความเค้น จะมีความสัมพันธ์กับค่ามอดูลัสของยัง (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 ค่ามอดูลัสของยังของวัสดุผสม, เส้นใยและเมทริกซ์ ตามลำดับ

จากสมการ 2.7 $\sigma_c = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m$

เมื่อสัดส่วนโดยปริมาตรของเส้นใย (V_f) สูงเกินกว่าค่าสัดส่วนโดยปริมาตรต่ำสุด (V_{min}) วัสดุผสมจะเกิดการเสียสภาพเมื่อเส้นใยเสียสภาพ

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 ความเครียดที่ทำให้วัสดุผสมเสียสภาพ

เมื่อสัดส่วนโดยปริมาตรของเส้นใย (V_f) มีค่าต่ำกว่าสัดส่วนโดยปริมาตรที่ต่ำที่สุด (V_{min}) วัสดุผสมจะเสียสภาพเมื่อค่าความเค้นของเมทริกซ์มีค่าเท่ากับ ค่าความทนแรงดึงของเมทริกซ์

ดังนั้น

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

2.3.2 เส้นใยเรียงตัวแบบไม่ต่อเนื่อง

วัสดุผสมที่นำไปใช้ในงานวิศวกรรม โดยส่วนใหญ่มีการจัดเรียงของเส้นใยแบบไม่ต่อเนื่อง โดยเส้นใยที่ใช้จะเป็นเส้นใยสั้น ถึงแม้ว่าความแข็งแรงจะน้อยกว่าวัสดุผสมที่มีการจัดเรียงตัวของเส้นใยแบบต่อเนื่อง เมื่อพิจารณาที่สัดส่วน โดยปริมาตรของเส้นใยที่เท่ากัน ข้อดีของเส้นใยสั้น คือ สะดวกในการเตรียมวัสดุ เช่น เทคนิคการฉีดขึ้นรูป

การจัดเรียงตัวของเส้นใยสั้นมี 2 ลักษณะ คือ

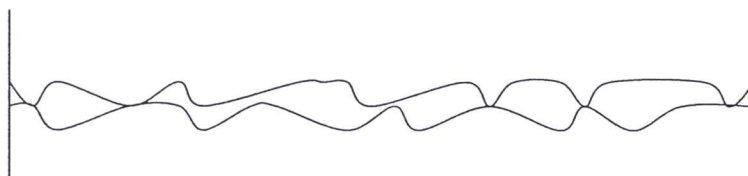
- 1) เรียงตัวขนานกันอย่างเป็นระเบียบ
- 2) เรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ

2.4 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเมทริกซ์กับเส้นใย

2.4.1 การดูดซับและการชุบ (adsorption and wetting)

เมื่อผิวสัมผัสของวัตถุ 2 ชนิดเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันอย่างพอเพียง แรงกระทำทางกายภาพที่ดีที่สุดคือการชุบพื้นผิวของของแข็ง โดยของเหลว เพราะเนื่องจากพื้นผิวสัมผัสของวัตถุทั้งสองจะมีความ

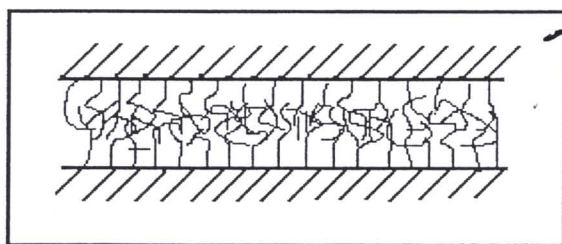
ขรุขระในระดับขนาดเล็ก ทำให้การสัมผัสกันนั้น ไม่แนบสนิทกัน โดยจะยังมีช่องว่างอยู่ ดังรูป 2.3 ซึ่งเป็นจุดอ่อนหายไปส่งผลให้มีการยึดติดที่ดีขึ้น สำหรับการยึดติดกันของพื้นผิวเส้นใยกับพอลิเมอร์เมทริกซ์นั้น เมทริกซ์ที่หลอมเหลวจะเข้าไปแทนที่ในส่วนบริเวณที่ขรุขระขนาดเล็กของผิวเส้นใย จุดอ่อนของรอยต่อที่จะเกิดขึ้นคือฟองอากาศภายใน (void)



รูป 2.3 แสดงการดูดซับและการซบ

2.4.2 การแพร่ (diffusion)

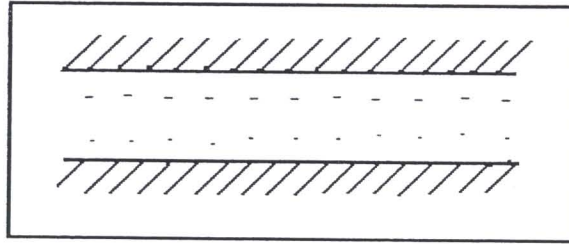
การแพร่กระจายของโมเลกุลพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งไปยังโมเลกุลของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งสามารถทำให้เกิดพันธะระหว่างพื้นผิวของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด การแพร่กระจายโมเลกุลของพอลิเมอร์เข้าหากันนั้นจะทำให้สายโซ่โมเลกุลเกี่ยวพันกันเป็นร่างแห ดังรูป 2.4 ความแข็งแรงของพันธะจะขึ้นกับจำนวนสายโซ่โมเลกุลที่แพร่เข้าไป และพันกันยุ่งเหยิง ถ้ามีมากก็จะมีค่าความแข็งแรงของการยึดติดกันมาก การแพร่กระจายสามารถทำให้เกิดขึ้นได้ โดยใช้พวกสารละลายหรือตัวกลางพลาสติก (plasticizing agents) ที่มีองค์ประกอบที่ทำให้สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนที่ได้สะดวก สำหรับเส้นใยเสริมแรงอาจมีการเคลือบผิวด้วยพอลิเมอร์ก่อนที่จะนำไปผสมกับเมทริกซ์



รูป 2.4 การแพร่กระจาย และการเกี่ยวพันกันของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์

2.4.3 แรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic attraction)

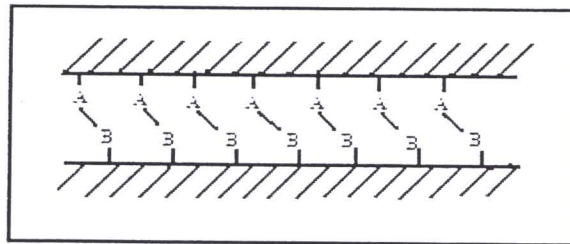
เมื่อพื้นผิวของวัสดุสองชนิดที่มีประจุไฟฟ้าต่างขั้วกันมาสัมผัสกันจะเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต ทำให้เกิดการยึดติดระหว่างผิวสัมผัส ดังรูป 2.5 ความแข็งแรงของการยึดติดจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า



รูป 2.5 แรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตที่ผิวสัมผัส

2.4.4 การเกิดพันธะทางเคมี (chemical bonding)

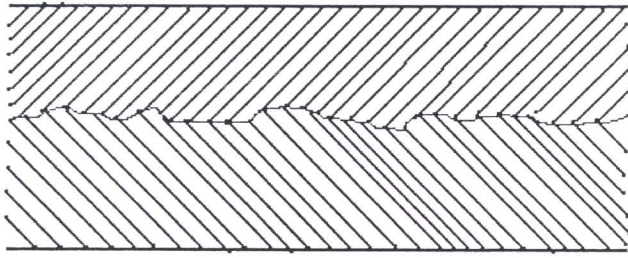
การเกิดพันธะทางเคมีเกิดจากหมู่เคมีของเมทริกซ์เกิดพันธะกับหมู่เคมีของผิวเส้นใย ความแข็งแรงของพันธะขึ้นอยู่กับจำนวน และชนิดของพันธะ สำหรับพื้นผิวที่เกิดความเสียหายจะทำให้พันธะทางเคมีขาดกันได้ ในส่วนของเส้นใยเสริมแรงจะมีการใช้ตัวประสานคู่ควบเพื่อให้เกิดพันธะทางเคมีระหว่างผิวเส้นใยกับเมทริกซ์



รูป 2.6 พันธะทางเคมีระหว่างผิวสัมผัส 2 ชนิด

2.4.5 การยึดติดทางกล (mechanical adhesion)

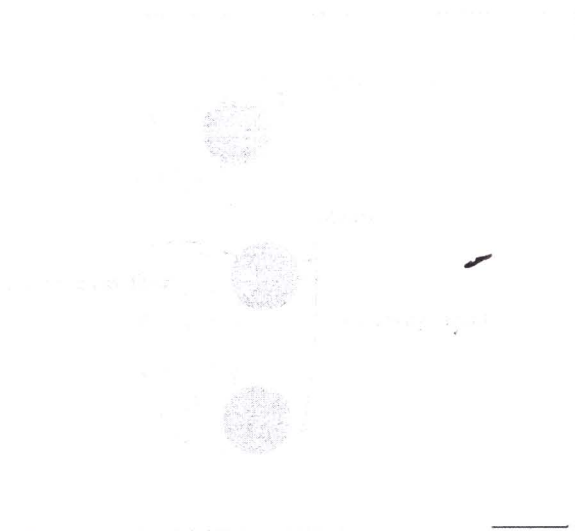
การยึดติดทางกลเป็นการยึดติดที่เกิดจากการยึดเหนี่ยวทางกลระหว่างผิวเส้นใยที่ขรุขระ และเมทริกซ์ โดยเมทริกซ์จะเข้าไปแทรกในส่วนที่ขรุขระ และเป็นมุมที่ไม่สามารถหลุดออกมาได้ (re-entrant angle) ของผิวเส้นใย ดังรูป 2.7 ซึ่งถ้ามีส่วนนี้มาก ความแข็งแรงของการยึดติดก็มากด้วย นอกจากนี้ผิวที่ขรุขระของเส้นใยยังเป็นการเพิ่มพื้นผิวสัมผัสอีกด้วย



รูป 2.7 การยึดติดทางกล

2.5 ตัวประสานคู่ควบ

ตัวประสานคู่ควบจะช่วยเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใย และเมทริกซ์ ทั้งทางกายภาพและทางเคมี อีกทั้งยังช่วยป้องกันผิวของเส้นใยจากความชื้น และป้องกันความเสียหายที่เกิดจากกระบวนการผสม และการผลิตวัสดุผสม โดยทั่วไปแล้วการใช้ตัวประสานคู่ควบจะอยู่ในขั้นตอนการปรับปรุงผิวเส้นใยในกระบวนการผลิตเส้นใย และในส่วนมากจะใช้สารประกอบของไฮดรอกไซด์และไททาเนต (titanate) เป็นตัวประสานคู่ควบ ซึ่งกลไกการประสานของเส้นใยกับเมทริกซ์ที่มีตัวประสานคู่ควบเป็นตัวประสานแสดงดังรูป 2.8



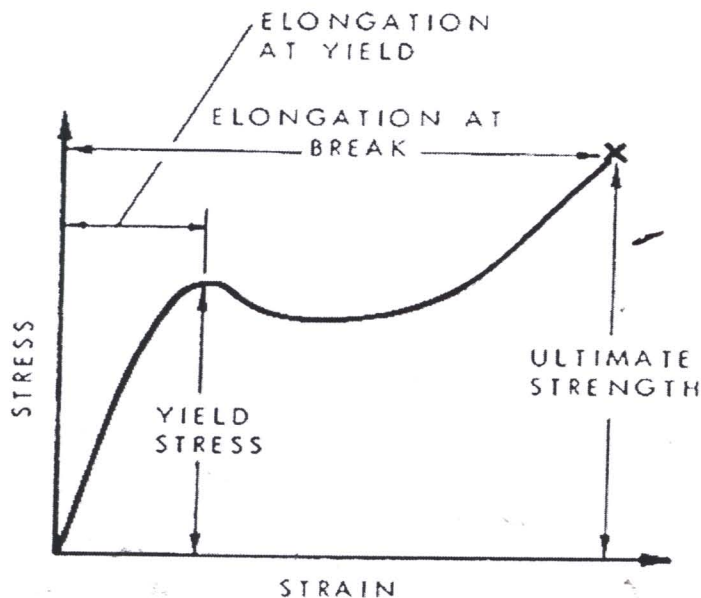
รูป 2.8 กลไกของตัวประสานคู่ควบ

2.6 สมบัติเชิงกล (mechanical properties)

ความแข็งแรงของวัสดุขึ้นอยู่กับความสามารถของวัสดุที่จะรับแรงกระทำโดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง หรือการแตกหัก สมบัติของวัสดุนั้นจะเป็นลักษณะเฉพาะตัวของวัสดุแต่ละชนิด และสามารถทดสอบได้โดยการทำการทดลอง การทดสอบที่สำคัญ คือ การทดสอบโดยการดึงหรือการอัด (tension or compression test) การทดสอบตัวอย่างของวัสดุไม่ว่าจะเป็น โลหะ เซรามิก 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

2.6.1 ความทนแรงดึง (tensile strength) [29-30]

ความทนแรงดึงสามารถอธิบายได้ว่า ขณะที่ดึงวัสดุด้วยแรงภายนอก แรงกระทำจะถ่ายทอดตลอดแนวของชิ้นตัวอย่าง ทิศทางการเคลื่อนที่ภายในแกนตามแนวแรงจะมีการต้านกัน การเกิดแรงต้านนี้เกิดขึ้นทั่วบริเวณของชิ้นตัวอย่าง จะส่งผลให้เกิดความเค้น (stress) และความเครียด (strain) ขึ้นภายในวัสดุ โดยความสัมพันธ์ของความเค้น และความเครียดสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟแสดงพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุได้เรียกว่า กราฟความเค้น – ความเครียด ดังรูป 2.9



รูป 2.9 กราฟความเค้น – ความเครียดของวัสดุ

กราฟความเค้น – ความเครียดของวัสดุจะแสดงความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นระหว่างหน่วยแรงและความเครียดภายในขอบเขตของความยืดหยุ่น 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 โมดูลัสของความยืดหยุ่น หรือ โมดูลัสของยัง (modulus of elasticity or Young's modulus) σ แทนค่าความเค้น และ ε แทนค่าความเครียด สมการนี้เป็นสมการของแนวเส้นที่เหยียดตรงเริ่มต้นของกราฟความเค้น – ความเครียด ดังนั้นโมดูลัสของความยืดหยุ่นจึงเท่ากับความชัน (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/m^2) หรือ ปาสคาล (Pa) โดยแสดงดังสมการ

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

แรงภายนอกที่มากระทำต่อวัสดุ และส่งผลให้เกิดความเค้นนั้นมีดังนี้

- ความเค้นแรงดึง (tensile stress)
- ความเค้นแรงอัด (compressive stress)
- ความเค้นแรงเฉือน (shear stress)
- ความเค้นแรงดัดโค้ง (bending or flexural stress)

ความเค้นแรงดึง คือ ค่าความเค้นที่เกิดจากการดึงโดยแรงภายนอกมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัด ซึ่งเป็นหน่วยแรงต่อพื้นที่

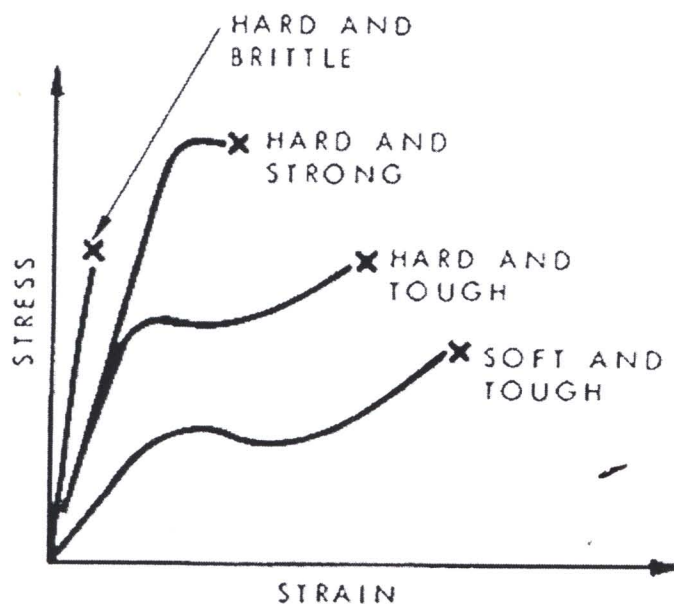
ความเค้นแรงอัด คือ ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจากแรงดัดหรือกด ซึ่งพยายามให้วัสดุอัดแน่นติดกัน หรือ ทำให้อะตอมของวัสดุอัดแน่น การทดสอบแบบนี้วัสดุจะเกิดแรงต้านจากแรงอัดเพื่อให้เกิดการคืนตัวของวัสดุในการรักษาสภาพของตัวเองให้สมดุล

ความเค้นแรงเฉือน คือ ค่าความเค้นที่เกิดจากการทดสอบการดึงหรือการอัดเพื่อให้วัสดุเลื่อนผ่านกัน ซึ่งพื้นที่จะขนานกับทิศทางของแรงภายนอกที่กระทำ

ความยืด (elongation) เป็นความสามารถของวัสดุในการยืดตัว เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ การทดสอบหาค่าความยืดนี้มักใช้หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์เพื่อเปรียบเทียบกับความยาวเดิมของวัสดุว่ายืดได้กี่เปอร์เซ็นต์

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความยืด (\% elongation)} = \left(\frac{\Delta L}{L_0} \right) \times 100 \quad (2.18)$$

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดสามารถบอกสมบัติของวัสดุได้ว่าเป็นวัสดุประเภทใด เช่นเป็นวัสดุที่เหนียว (ductile) หรือ เป็นวัสดุที่เปราะ (brittle) ดังรูป 2.10

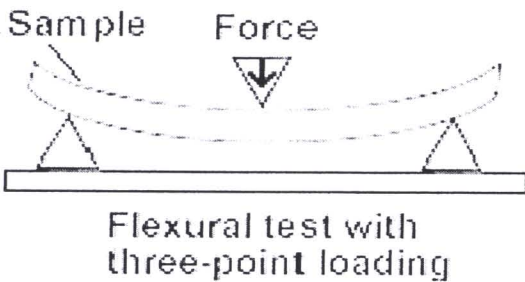


รูป 2.10 กราฟความเค้น – ความเครียดของวัสดุพอลิเมอร์ 4 ประเภท

2.6.2 ความทนแรงโค้งงอ (flexural strength)

ความทนแรงโค้งงอ คือ เป็นค่าความเค้นที่ได้จากการทดสอบกดขึ้นตัวอย่างให้เกิดการงอตัวโดยใช้หัวกด ซึ่งกดลงตั้งฉากกับชิ้นตัวอย่างที่อยู่ในลักษณะแนวนอน โดยมีตัวรองรับเป็นตัวกำหนดช่วงห่าง การทดสอบแบบนี้คล้ายกับว่าเป็นการรวมเอาการทดสอบการดึงและการอัดเข้าไว้ด้วยกัน ซึ่งแรงอัดจะ

เกิดขึ้นบนชิ้นตัวอย่าง ส่วนแรงดึงจะเกิดขึ้นที่ได้ชิ้นงานตัวอย่าง การทดสอบนี้สามารถทดสอบได้เป็น 2 ลักษณะ คือ การทดสอบแรงดัดโค้งแบบ 3 จุด (three point bending) ดังรูป 2.11 และการทดสอบแรงดัดโค้งแบบ 4 จุด (four point bending)



รูป 2.11 การทดสอบแรงดัดโค้งแบบ 3 จุด

สำหรับชิ้นทดสอบรูปทรงสี่เหลี่ยมค่าความเค้นในการโค้งงอ;
$$\sigma = \frac{3PL}{2Wh^2} \quad (2.19)$$

ค่ามอดุลัสความยืดหยุ่นในการโค้งงอ;
$$E = \frac{PL^3}{4Wh^3 \Delta L} \quad (2.20)$$

- เมื่อ P คือ แรงกระทำของการโค้งงอ
L คือ ระยะห่างของตัวรองรับชิ้นตัวอย่าง
W คือ ความกว้างของชิ้นตัวอย่าง
h คือ ความหนาของชิ้นตัวอย่าง
 ΔL คือ ระยะทางที่เปลี่ยนไปเมื่อได้รับแรง



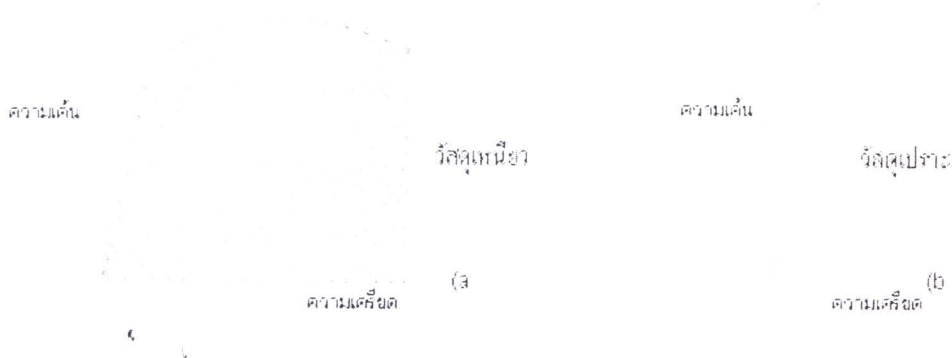
2.6.3 ความแข็ง (Hardness) [29]

ความหมายของค่าความแข็งของวัสดุ นั้น หมายถึง ความสามารถของวัสดุในการต้านทานการเจาะผ่าน (indentation) หรือ ความสามารถในการทนต่อการขีดข่วน ดังนั้นค่าความแข็งของตัวอย่างการทดสอบจะเป็นหน่วยที่ขึ้นอยู่กับวิธีการ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ ค่าของความแข็งมักจะเพิ่มเมื่อวัสดุมีความแข็งแรงสูงขึ้นนั่นคือ พลาสติก และเซรามิกจะแข็งกว่าพวกพอลิเมอร์

2.6.4 ความเหนียว (toughness) ของวัสดุ

ความเหนียว (toughness) คือ ความสามารถของวัสดุที่จะดูดซับพลังงานไว้ได้โดยไม่เกิดการแตกหัก สามารถวัดคุณสมบัติด้วยการทดสอบแรงกระแทก (impact test) ซึ่งความเหนียวมีความสัมพันธ์กับความแข็งแรง และความสามารถในการยืดตัวของวัสดุ เนื่องจากโดยทั่วไปเรา มักจะประเมินค่าความเหนียวจากมอดุลัสของความเหนียว (modulus of toughness) ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับพื้นที่ใต้เส้นโค้งความเค้น (σ) – ความเครียด (ϵ) ที่ได้จากการทดสอบแรงดึง (tensile test) ซึ่งค่ามอ

คุณสมบัติของความเหนียว (modulus of toughness) นี้ จะแสดงถึงพลังงานต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุที่ต้องใช้ในการทำให้วัสดุเกิดการแตกหักเสียหาย วัสดุที่มีความเหนียวสูงกว่าจะใช้พลังงานต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุที่สูงกว่าในการทำให้วัสดุเกิดการแตกหักเสียหายจากรูปที่ 2.12 แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างวัสดุเหนียวและวัสดุเปราะ



รูปที่ 2.12 แสดง Modulus of Toughness ของวัสดุเหนียว (a) และวัสดุเปราะ (b)

2.7 ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon Nanotube : CNT)

ท่อนาโนคาร์บอนเป็นอีกโครงสร้างหนึ่งของคาร์บอน ซึ่งเพิ่งค้นพบในปี ค.ศ. 1991 กล่าวคือ มีลักษณะคล้ายกับ ฟูลเลอร์ีน (fullerene) ต่างกันที่ฟูลเลอร์ีนมีโครงสร้างเป็นทรงกลม (spherical shape) แต่ CNT มีโครงสร้างเป็นทรงกระบอก (cylindrical shape) ชื่อของ CNT มาจากขนาดที่อยู่ในระดับนาโน (10^{-9} เมตร) หรือมีความกว้างประมาณ 1 ใน 10,000 ของความกว้างของเส้นผม

2.7.1 การค้นพบ CNT

การค้นพบ CNT เกิดจากความบังเอิญที่ Sumio Iijima นักวิจัยจากห้องปฏิบัติการของบริษัท NEC ในญี่ปุ่น ขณะกำลังสังเคราะห์ฟูลเลอร์ีนโดยวิธีการระเหิดด้วยการอาร์ก (arc-evaporation) แล้วพบว่าที่ขั้วคาโทดเกิดมีวัสดุโครงสร้างแบบแกรไฟต์ที่เป็นทั้งอนุภาคนาโนและท่อนาโน ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ไม่เคยมีผู้ใดสังเกตเห็นมาก่อน ต่อมาทีมงานของอิจิมาสามารถสังเคราะห์วัสดุดังกล่าวในปริมาณมาก โดยปรับสภาวะของวิธีการระเหิดด้วยการอาร์ก ท่อนาโนที่เกิดขึ้นนี้มีลักษณะเป็นท่อแกรไฟต์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3-10 นาโนเมตร (nm) และมีความยาวในช่วง 1 ไมโครเมตร (μm) และเป็นท่อซ้อนกัน 2-50 ชั้น เรียกว่า Multi-Walled Carbon Nanotube (MWNT) ต่อมา มีการสร้างและทำให้บริสุทธิ์ แพร่หลายไปตามห้องปฏิบัติการต่างๆ ทั่วโลก รวมถึงการพัฒนาเป็นท่อเดี่ยวที่เรียกว่า Single-Walled Carbon Nanotube (SWNT) ในอีกสองปีต่อมา

ท่อนาโนนาโนของแกรไฟต์นี้สามารถเป็นได้ทั้งแบบท่อปลายเปิดหรือปลายปิด (cap) ถ้าเป็นแบบปลายปิดจะครอบด้วยครึ่งทรงกลมของ ฟูลเลอร์ีน C 60 ขนาดของท่อสำหรับ SWNT มีตั้งแต่ 0.7 ถึง 2 nm ส่วน MWNT มีขนาดระหว่าง 10 ถึง 300 nm โดยมีช่องว่างระหว่างชั้นของแต่ละท่อมีขนาดอยู่

ในระหว่าง 0.34 ถึง 0.36 nm สามารถทำให้ยาวได้ถึง 20 เซนติเมตร และมีรายงานว่าสามารถทำให้ยาวได้ถึง 100 เมตร ล่าสุดสามารถทำท่อ คาร์บอนนาโนทิวบ์ ขนาดเล็กสุดได้ถึง 3 อังสตรอม (Å)

2.7.2 คุณสมบัติของ CNT

เราทราบกันดีว่าเพชรมีความแข็งแกร่งมาก ด้วยโครงสร้างโครงตาข่ายสามมิติจากการเชื่อมต่อระหว่างพันธะของอะตอมคาร์บอนที่มีสี่ตำแหน่งอย่างลงตัว ขณะที่โครงสร้างของแกรไฟต์นั้นคาร์บอนหนึ่งอะตอมเชื่อมพันธะกับคาร์บอนอีกสามอะตอมในระนาบเดียวกันและอีกหนึ่งพันธะที่เหลือจะยึดกับระนาบถัดไป พันธะในระนาบเดียวกันของแกรไฟต์ (กราฟีน) มีความแข็งแกร่งมาก (มากกว่าเพชร) แต่พันธะระหว่างระนาบไม่แข็งแรงมากนักและเลื่อนไหลได้ ด้วยลักษณะโครงสร้าง CNT ดังกล่าวรวมถึงพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนที่ยาวเพียง 0.14 nm (สั้นกว่าเพชร) จึงทำให้ CNT แข็งแรงกว่าเพชร และแกรไฟต์ ค่าความยืดหยุ่น (Young's modulus of elasticity) ของ CNT มีค่าสูงถึง 1 TPa หรือ 1000 GPa และ CNT มีพื้นที่ผิวได้ถึง 1500 ตารางเมตรต่อกรัม (m^2/g) โดยมีความหนาแน่น 1.33 ถึง 1.40 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3) ซึ่งน้อยมากเมื่อเทียบกับบอลูมิเนียมที่มีความหนาแน่นสูงถึง $2.7 \text{ g}/\text{cm}^3$ CNT มีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดีกว่าทองแดง มัดหนึ่งของ CNT สามารถนำไฟฟ้าได้ถึง 109 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร (A/cm^2) ขณะที่ทองแดงได้สูงสุดเพียง $106 \text{ A}/\text{cm}^2$ สมบัติเชิงไฟฟ้าอีกอย่างหนึ่งที่น่าสนใจของ CNT คือ สามารถปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของ CNT ในสภาวะสุญญากาศได้ เมื่อวางอยู่ในสนามไฟฟ้าที่ใช้ค่าศักย์ต่ำกว่า เช่น จะกระตุ้นฟอสเฟอร์ (phosphors) ที่วางไว้ห่าง 1 มิลลิเมตร (mm) ใช้ศักย์ไฟฟ้าเพียง 1 - 3 โวลต์ (V) ขณะที่ต้องใช้ศักย์ไฟฟ้าสูงถึง 50 - 100 V สำหรับปลายที่เป็นขั้วโมลิบดีนัม (molybdenum)

CNT มีความสามารถนำความร้อนได้ดีมากตามแนวยาวของท่อ CNT แต่เป็นฉนวนความร้อนได้ดีมากเช่นกันตามแนวขวางของท่อ CNT ยังทนต่ออุณหภูมิได้ถึง 2800°C ภายใต้สุญญากาศ และ 750°C ในสภาวะปกติ คุณสมบัติเหล่านี้เป็นที่น่าสนใจอย่างมากในเชิงกายภาพ นอกจากนี้ยังมีการค้นพบสมบัติอีกหลายประการเพิ่มขึ้นเมื่อมีการประยุกต์ใช้เพื่อประโยชน์ในด้านต่างๆ อีกมาก

2.7.3 การสังเคราะห์และการผลิต

เทคนิคในการผลิตคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีดังนี้

1. เทคนิคแรกเริ่มคือดิสชาร์จแบบอาร์ก (arc discharge) ซึ่งเป็นการใช้กระแสไฟตรงขนาด 100 A และศักย์ประมาณ 20 V โดยควบคุมอุณหภูมิที่ $2,000$ ถึง $3,000^\circ\text{C}$ ซึ่งทำให้เกิดไอพลาสมาร้อนระหว่างขั้วคาร์บอน 2 ขั้ว จะเกิดการควบแน่นที่ขั้วคาโทด (เป็น water-cooled electrode) ได้ผลิตผลเป็น MWNT ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัก และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 - 20 nm ด้วยความยาวน้อยกว่า 50 nm และถ้ามีการใช้โลหะคะตะลิสต์ร่วมด้วยจะได้เป็น MWNTs

2. ใช้แสงเลเซอร์ (pulsed-laser vaporation) ไปทำให้เป่าคาร์บอนผสมโลหะกลายเป็นไอในเตาเผาที่อุณหภูมิ $1,100 - 1,200^\circ\text{C}$ และใช้ก๊าซเฉื่อย เช่น อาร์กอนหรือไนโตรเจนไปกวาดท่อนาโนที่ได้ออกจากเตาเผาไปหล่อเย็นที่ตัวเก็บกัก (collector) ทองแดงด้านนอกเตาเผา เทคนิคนี้ใช้โคบอลต์และนิกเกิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ SWNTs ที่เป็นระเบียบมากกว่าวิธีแรกแต่มีข้อเสียคือต้นทุนการผลิตสูงทั้ง

สองเทคนิคข้างต้นมีปัญหาในเรื่องของการสังเคราะห์ให้ได้ปริมาณมาก และทำให้ได้ CNT ที่มีระเบียบยาก

3. การตกเคลือบด้วยไอทางเคมี (chemical vapor deposition : CVD) เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีต้นทุนต่ำ โดยอาศัยการก่อรูปของท่อนาโนบนวัสดุรองรับ (substrate) เมื่อทำปฏิกิริยาของก๊าซผสมพวกไฮโดรคาร์บอน (เช่น acetylene methane หรือ ethylene) และไนโตรเจนภายในห้องปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 600 - 800 °C สำหรับการผลิต MWNT และ 900 - 1200 °C สำหรับการผลิต SWNT ในบรรยากาศปกติ การเร่งปฏิกิริยาทำได้โดยใช้วัสดุรองรับพวกโลหะหรือโลหะออกไซด์ หรือป้อนก๊าซดังกล่าวร่วมกับโลหะคะตะลิสต์เข้าไปในห้อง ซึ่งทำให้สามารถผลิต CNT ได้ในปริมาณมาก และสามารถควบคุมขนาดและความยาวของ CNT ได้ง่ายโดยควบคุมอัตราการไหลของก๊าซและระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา

2.7.4 การประยุกต์ใช้ CNT

CNT สามารถช่วยเสริมความแข็งแรง (reinforce) ของวัสดุเดิมให้มากยิ่งขึ้น น้ำหนักเบา และสามารถสร้างได้หลายรูปแบบได้แก่ ฟิล์มบาง ไฟเบอร์ โฟม สารเคลือบ และ ผง เป็นต้น

ปัจจุบันมีการผลิตวัสดุคอมโพสิตของ CNT ได้ปริมาณมาก เช่น พลาสติกเสริม CNT เพื่อนำมาใช้ในรถยนต์ ใช้เป็นชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์หรือเครื่องใช้ไฟฟ้า ด้วยคุณสมบัติที่ทนต่อสารเคมี ทนต่อการหลุดลอก รวมถึงป้องกันไฟฟ้าสถิตย์ได้มากขึ้น นอกจากนี้ยังนำไปใช้ประโยชน์สำหรับการสร้างจอภาพอย่างแบน และเซลล์เชื้อเพลิง (fuel cells) ซึ่ง CNT จะไปแทนที่คะตะลิสต์เดิม คือ แพลตินัม

เนื่องจาก CNT มีขนาดเล็กมาก ดังนั้นการจัดเรียงอนุภาคของ CNT ให้ได้ตามต้องการนั้นเป็นสิ่งที่ยาก แต่ได้มีรายงานออกมาว่าสามารถใช้ลำแสงเลเซอร์สองเส้นทำงานคล้ายตะเกียบคือ จะคีบและเคลื่อนย้ายอนุภาคของ CNT ได้ตามต้องการ ซึ่งเรียกเทคนิคนี้ว่า "Optical Trapping" จึงคาดว่าน่าจะสามารถนำ CNT มาใช้ในการสร้างไมโครชิพที่มีความไวสูงและใช้พลังงานต่ำได้ในอนาคต

ในทางการแพทย์แนวคิดสำคัญที่จะใช้ประโยชน์จาก CNT คือการที่ท่อนาโนนี้สามารถเข้าถึงโครงสร้างในระดับเซลล์ได้ คือสามารถใช้เป็นโพรบ (probe) ตรวจวัด หรือใช้เป็นปิเปตขนาดเล็กมากสำหรับปลดปล่อยสารหรือโมเลกุล (ultrasmall pipette) เข้าสู่เซลล์เป้าหมายได้ อันหลังนี้คือศักยภาพของ CNT ในการขนถ่ายและปลดปล่อยยาเข้าสู่อวัยวะเป้าหมาย (targeted drug delivery)

2.8 เส้นใยนาโนซิลิกอนคาร์ไบด์

ซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon carbide) เป็นวัสดุทนไฟประเภทที่มีซิลิกอน (Si) และคาร์บอน (C) เป็นองค์ประกอบ คุณสมบัติต่าง ๆ ของซิลิกอนคาร์ไบด์ แสดงดังตาราง 2.2

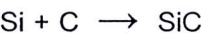
ตาราง 2.2 คุณสมบัติของซิลิกอนคาร์ไบด์

น้ำหนักโมเลกุล	40.10
ค่าการขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่ 25-400°C	$4.4 \times 10^{-6} \text{ (}^{\circ}\text{C)}^{-1}$
ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (modulus of electricity)	410 Gpa
จุดหลอมตัว (melting point)	2700°C
ค่าความร้อนจำเพาะ (specific heat)	0.285 แคลอรี/กรัม-องศาเซลวิน
ความแข็ง (hardness)	9.0-9.5 Moh's scale
ความหนาแน่น (bulk density)	0.069 กรัม/เซนติเมตร ³
ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity)	3.2

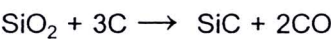
ข้อเสียของสารประกอบซิลิกอนคาร์ไบด์ คือ ถูกเผาไหม้ได้ในบรรยากาศออกซิเดชัน (Oxidation atmosphere) ซิลิกอนคาร์ไบด์มีจุดหลอมตัวที่ 2700°C ค่าความร้อนจำเพาะของซิลิกอนคาร์ไบด์มีค่า 0.285 แคลอรี/กรัม-องศาเซลวิน มีค่าการนำความร้อนสูง การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนค่อนข้างต่ำ ทนต่อความร้อนสูง ทนต่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วได้ดี (Thermal shock resistance) มีค่าความแข็งแรงทางกลสูง ทนทานต่อการสึกกร่อน ทนทานทางเคมี (Chemical resistance) เป็นต้น ด้วยเหตุนี้ซิลิกอนคาร์ไบด์จึงเป็นที่น่าสนใจของนักวิทยาศาสตร์หลายท่านเป็นอย่างมาก ในการจะนำซิลิกอนคาร์ไบด์มาใช้ประโยชน์ในยุคของนาโนเทคโนโลยีนี้

ซิลิกอนคาร์ไบด์ไม่ใช่สารที่เกิดขึ้นโดยธรรมชาติ แต่เป็นสารที่สังเคราะห์ขึ้นมาใช้ โดยปกติซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ มีโครงสร้างผลึกอยู่สองแบบ คือ แบบลูกบาศก์ (Cubic form) และแบบทรงหกเหลี่ยม (Hexagonal form) ซิลิกอนคาร์ไบด์แบบลูกบาศก์นั้น เรียกว่า เบตาซิลิกอนคาร์ไบด์ สามารถสังเคราะห์ขึ้นได้โดยใช้ส่วนประกอบของซิลิกอนกับคาร์บอน ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 2000°C ส่วนซิลิกอนคาร์ไบด์แบบทรงหกเหลี่ยมนั้นเรียกว่า แอลฟาซิลิกอนคาร์ไบด์ ดังรูปที่ 2.13 การสังเคราะห์ซิลิกอนคาร์ไบด์มีอยู่หลายวิธีด้วยกันคือ

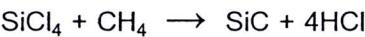
- สังเคราะห์จากปฏิกิริยาโดยตรงระหว่างซิลิกอนกับคาร์บอน.



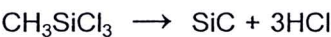
- สังเคราะห์จากปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction reaction) ระหว่างซิลิกากับคาร์บอน

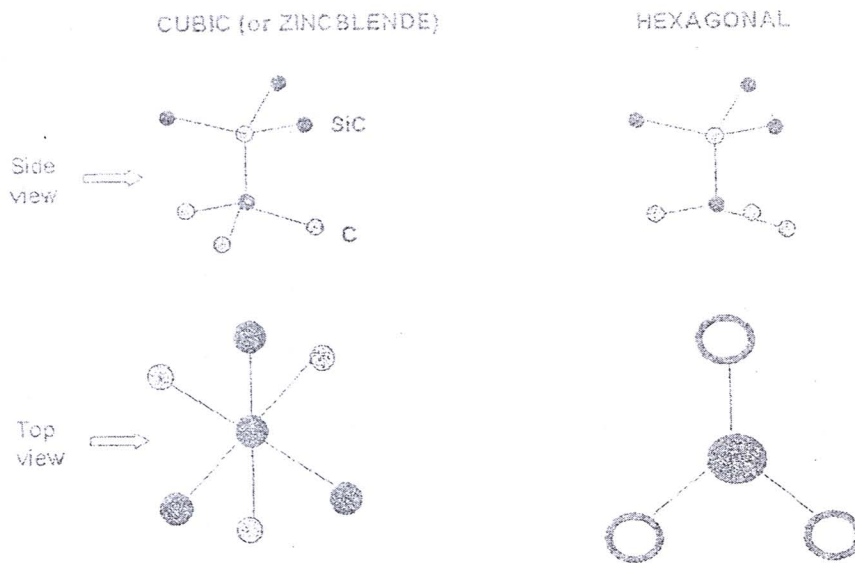


- สังเคราะห์จากปฏิกิริยาในสภาวะไอ (Vapor phase reaction or chemical vapor deposition, CVD) การเตรียมโดยวิธีนี้จะใช้ซิลิกอนเตตระคลอไรด์ (SiCl₄) ที่อยู่ในสภาวะไอ ทำปฏิกิริยากับก๊าซมีเทน (DH₄)



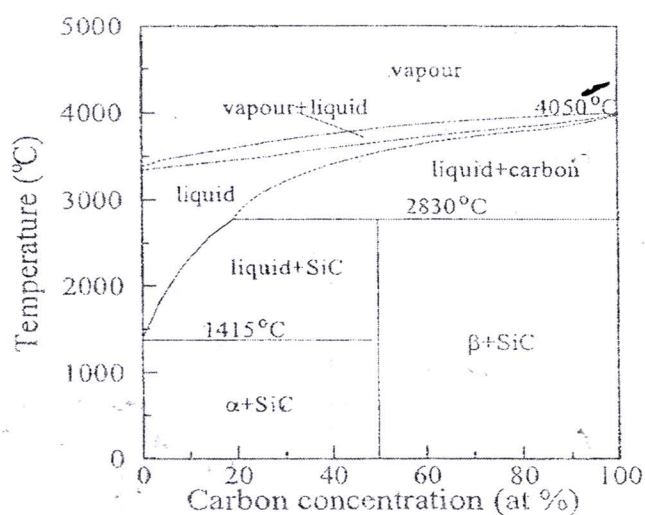
- สังเคราะห์จากปฏิกิริยาการสลายตัวของเมทิลซิลิกอนไตร่คลอไรด์ (Methyl silicon trichloride)





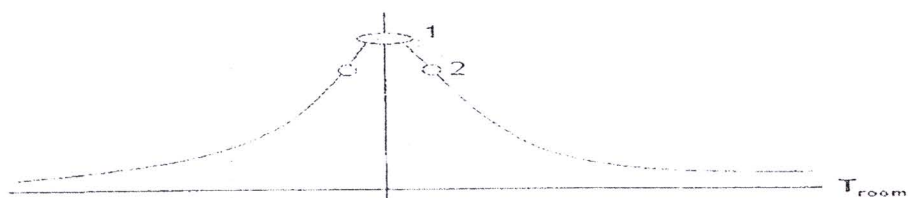
รูปที่ 2.13 โครงสร้างซิลิกอนคาร์ไบด์แบบทรงลูกบาศก์ และแบบทรงหกเหลี่ยม

ในกระบวนการสังเคราะห์ซิลิกอนและคาร์บอน จะเริ่มทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิประมาณ 1050°C และจะเห็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิประมาณ 1500°C - 1900°C ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะสมบูรณ์ ทำให้ได้ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่อยู่ในรูปแบบเตาซิลิกอนคาร์ไบด์ ดังรูปที่ 2.14 ส่วนการสังเคราะห์เบตาซิลิกอนคาร์ไบด์สามารถสังเคราะห์ต่อได้จากปฏิกิริยาการเตรียมเบตาซิลิกอนคาร์ไบด์ เมื่อได้เบตาซิลิกอนคาร์ไบด์จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 1500°C - 1900°C จนอุณหภูมิสูงถึง 2100°C เบตาซิลิกอนคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นจะค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นแอลฟาซิลิกอนคาร์ไบด์ จนอุณหภูมิเพิ่มสูงถึง 2400°C การเปลี่ยนจากเบตาซิลิกอนคาร์ไบด์ไปเป็นแอลฟาซิลิกอนคาร์ไบด์จะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์



รูปที่ 2.14 เฟสไดอะแกรมในระบบ Si-C ; คือ α สารละลายของแข็งของ C ใน Si
 β สารละลายของแข็งของ Si ใน C

กลไกพื้นฐานอันหนึ่งที่ใช้อธิบายการสร้างตัวของเส้นใยนาโนซิลิกอนคาร์ไบด์คือ Vapor-Liquid-Solid (VLS) Mechanism ซึ่งอธิบายว่าเมื่อให้ความร้อนแก่วัตถุ อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้คาร์บอนและธาตุอื่น ๆ ที่เป็นส่วนประกอบของวัตถุดิบเปลี่ยนสถานะจากของแข็งกลายเป็นไอ ซึ่งอะตอมของไอจะแพร่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ทำให้เกิดการรวมตัว (Deposit) เป็นของเหลว และสุดท้ายของเหลวจะตกตะกอน (Precipitation) เป็นของแข็ง ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการสร้างตัวของเส้นใยนาโนซิลิกอนคาร์ไบด์ หรือเส้นใยนาโนในแนวใดแนวหนึ่ง (Anisotropic growth)



รูปที่ 2.15 แผนภาพแสดงเงื่อนไขการเกิดเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์โดยเทคนิคการให้ความร้อนด้วยไฟฟ้ากระแสสูง

จากรูปที่ 2.15 อธิบายได้ว่า ณ ตำแหน่งที่ 1 คือบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงพอที่จะทำให้วัตถุดิบเปลี่ยนจากของแข็งกลายเป็นไอ (Vapor) ส่วนในตำแหน่งที่ 2 คือบริเวณรอยต่อที่ไอของอะตอมแพร่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า จึงทำให้เกิดการรวมตัวกันกลายเป็นของเหลว (Liquid) และสุดท้ายกลายเป็นของแข็ง (Solid) ส่งผลให้เกิดการสร้างตัวเป็นเส้นใยนาโนขึ้น สำหรับเงื่อนไขในการเกิดเส้นใยนาโนโดยเทคนิคการให้ความร้อนด้วยไฟฟ้ากระแสสูงคือ จะต้องมีความร้อนที่เพียงพอต่อการเปลี่ยนสถานะของแข็งให้กลายเป็นไอ และจะต้องมีความดันสูง