

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 พอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer composites)

ความหมายของคำว่าคอมโพสิต [7] คือ การนำเอาวัสดุที่มีสมบัติแตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิด หรือมากกว่า มาประกอบกัน สร้างเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างใหม่ โดยทั่วไปคอมโพสิตจะมีวัสดุที่เป็นเนื้อหลัก (matrix) และวัสดุเสริมแรง (reinforcement materials) ที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อหลักนั้น วัสดุที่เป็นเนื้อหลักจะรองรับวัสดุเสริมแรงให้อยู่ในรูปร่างที่กำหนด ขณะที่วัสดุเสริมแรงจะช่วยเพิ่มหรือปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุเนื้อหลักให้สูงขึ้น ซึ่งวัสดุเสริมแรงอาจมีลักษณะเป็นเส้น ก้อน อนุภาค หรือเกล็ดก็ได้ แทรกอยู่ในวัสดุเนื้อหลัก เพื่อใช้งานเป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินชีวิตประจำวัน ไม่ว่าจะเป็นในส่วนของอุตสาหกรรม ซึ่งรวมถึงอากาศยาน การขนส่งทางภาคพื้นดิน ทางน้ำ บรรจุก๊าซ อุตสาหกรรมผลิตอุปกรณ์ที่มีคุณภาพมากกว่าในอดีต เช่น ไมเทนนิส ไมกอล์ฟ ตัวถังรถแข่ง เรือแข่ง และรวมไปถึงงานทางด้านวิศวกรรมก่อสร้างต่างๆ วัสดุคอมโพสิต (composite materials) มีส่วนเหนือกว่าวัสดุดั้งเดิม (conventional materials) อยู่หลายประการ เช่น มีค่าความแข็งแรงและความแข็งแกร่ง (stiffness and strength) สูง แต่มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำ หมายความว่า เป็นวัสดุที่เบาแต่แข็งแรงกว่า ถ้าเปรียบเทียบความแข็งแรงต่อน้ำหนัก การขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ทำได้ง่ายและสามารถออกแบบให้เกิดประโยชน์ด้านความสวยงามควบคู่ไปกับการใช้ความรู้ด้านวิศวกรรมโครงสร้าง (innovative functional and structural design concepts) นอกจากนั้นยังมีความได้เปรียบเรื่องความทนทานต่อการกัดกร่อนจากสารเคมี (corrosion resistances) และสภาพดินฟ้าอากาศ (environmental resistance) ได้ดีอีกด้วย สิ่งต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ทำให้ คอมโพสิต เป็นวัสดุที่นำมาใช้ประโยชน์ได้สูง โดยมีราคาที่เหมาะสม ถ้าเลือกใช้วัสดุพื้นฐานที่ไม่แพง เช่น ใยแก้วและใยธรรมชาติ รวมทั้งสามารถผลิตและออกแบบผลิตภัณฑ์ที่มีรูปแบบซับซ้อนใช้งานได้ดี สวยงาม (complex functional and beautiful shapes) และมีอายุการใช้งานที่นานการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่ใช้คอมโพสิต จะมีความยุ่งยาก และใช้ความรู้ในหลายๆ ด้านมาประกอบกัน ทำให้เป็นสิ่งท้าทายสำหรับนักออกแบบผลิตภัณฑ์ เพราะไม่เพียงแต่มีความรู้เรื่องการออกแบบรูปแบบเท่านั้น แต่จะต้องออกแบบโดยใช้วัสดุให้เหมาะสมกับการใช้งาน และกระบวนการในการใช้เทคโนโลยีการผลิตที่ถูกต้อง เพื่อผลลัพธ์ที่ออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ที่มี

คุณภาพสูง ราคาเหมาะสมกับคุณภาพ รวมไปถึงอายุการใช้งานที่ยาวนาน ปัจจุบันวัสดุคอมโพสิตแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ [7]

1. พอลิเมอร์คอมโพสิต (polymer matrix composites- PMC's)

พอลิเมอร์คอมโพสิตมีพอลิเมอร์ซึ่งอาจจะเป็นพลาสติก หรือยางเป็นเนื้อหลัก และใช้วัสดุเสริมแรงได้หลายชนิด เช่น เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน เส้นลวดโลหะ เป็นต้น

ข้อดี : น้ำหนักเบา

ข้อเสีย : ความแข็งแรงต่ำ ทนความร้อนสูงไม่ได้ ไม่นำไฟฟ้า

2. เซรามิกคอมโพสิต (ceramic matrix composites- CMC's)

คอมโพสิตกลุ่มนี้ที่รู้จักและคุ้นเคย คือ คอนกรีตและคอนกรีตเสริมเหล็ก (ปูน กรวด ทราโยเหล็กเส้น) เป็นตัวแทนที่พบเห็นได้ทั่วไปของวัสดุกลุ่มนี้ ขณะที่วัสดุเซรามิกคอมโพสิตครุหน้า (advanced ceramic composite) มีเนื้อหลักเป็นเซรามิก และใช้วัสดุเสริมแรงเป็นเส้นใย คอมโพสิตกลุ่มนี้มักนำมาใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง เช่น กังหันใบพัดของเครื่องยนต์ไอพ่น

ข้อดี : มีความแข็งแรงสูง ทนต่อการสึกหรอและการผุกร่อนได้ดี ทนความร้อนได้ดี

ข้อเสีย : เปราะ มีความเหนียวต่ำ

3. เมทัลคอมโพสิต (metal matrix composites- MMC's)

คอมโพสิตกลุ่มนี้พบมากในผลิตภัณฑ์กลุ่มอุตสาหกรรมยานยนต์ เมทัลคอมโพสิตมีโลหะเป็นเนื้อหลัก เช่น อะลูมิเนียม เป็นต้น สำหรับวัสดุเสริมแรงของคอมโพสิตกลุ่มนี้เป็นวัสดุเซรามิก เช่น กลุ่มคาร์ไบด์ และ กลุ่มไนไตรด์ เป็นต้น

ข้อดี : โลหะจะมีความแข็งแรงและความเหนียวสูง แก๊สสามารถซึมผ่านเนื้อโลหะได้ยาก มีการนำไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดี

ข้อเสีย : เป็นสนิมง่ายและหนัก

นอกจากนี้ ยังอาจแบ่งตามลักษณะของวัสดุที่นำมาผสมกันคือ กลุ่มที่สารเสริมแรงมีลักษณะเป็นผง (particulate composites) กลุ่มที่มีสารเสริมแรงมีลักษณะเป็นเส้นใย (fibrous composites) ซึ่งอาจจะแบ่งย่อยออกไปเป็นกลุ่มเส้นใยสั้นและกลุ่มเส้นใยยาว กลุ่มสุดท้ายคือกลุ่มวัสดุผสมชนิดซ้อนแผ่น (laminated composites)

แม้ว่าคอมโพสิตมีขอบข่ายกว้างครอบคลุมวัสดุ 3 ประเภทข้างต้น แต่ในที่นี้กล่าวถึงเฉพาะพอลิเมอร์คอมโพสิตเท่านั้น ซึ่งในการนำเอาผลิตภัณฑ์ที่สร้างขึ้นจากวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต มาใช้เพื่อทดแทน หรือ แข่งกับวัสดุที่ใช้งานดั้งเดิม แต่ได้มีวิวัฒนาการและพัฒนาการใช้อย่างสูงสุดมาแล้ว เช่น ไม้ เหล็ก คอนกรีต เป็นเรื่องที่ลำบากซับซ้อนมากเนื่องจากจะต้องผ่านกระบวนการ

ผลิตที่อำนวยความสะดวกการแข่งขันด้านราคาโดยเปรียบเทียบกับความจำเป็นในการใช้งาน และสมรรถนะของวัสดุอุปกรณ์นั้นๆ องค์ประกอบของพอลิเมอร์คอมโพสิต มีดังนี้

2.2 เมทริกซ์

หน้าที่ของเมทริกซ์

- ให้เส้นใยกระจายตัวและยึดเกาะตามทิศทางที่ต้องการ
- ป้องกันไม่ให้เส้นใยเกิดความเสียหายเนื่องมาจากสิ่งแวดล้อม
- ทำหน้าที่ถ่ายเทแรงกระทำจากภายนอกไปสู่เส้นใยหรืออนุภาค
- ช่วยกำหนดรูปร่างของวัสดุผสม

สำหรับพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นเมทริกซ์โดยทั่วไปจะแบ่งเป็น 2 ประเภทได้แก่

(1) เทอร์โมเซต (thermoset)

พอลิเมอร์กลุ่มนี้เมื่อผ่านกรรมวิธีการผลิตจะมีรูปทรงถาวร ผลิตผลที่ได้นำไปหลอมอีกไม่ได้ และไม่ละลายในตัวทำละลาย คือไม่เกิดกระบวนการย้อนกลับ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ เพราะวก่อนผ่านกระบวนการเตรียม โครงสร้างพอลิเมอร์ยังไม่เป็นร่างแห แต่เมื่อผ่านกระบวนการให้ความร้อนและความดันเข้าไป จะมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในโครงสร้าง โดยเกิดการเชื่อมโยง (cross linking) ระหว่างสายโซ่โมเลกุล มีการสร้างพันธะโควาเลนต์ระหว่างสายโซ่โมเลกุล ทำให้ผลิตผลที่ได้มีความคงทนไม่หลอมเหลว ไม่ละลาย แต่ถ้าให้ความร้อนมากๆ จะไหม้เกรียมเกิดการสลายตัว และสมบัติเปลี่ยนไปจากเดิม

เทอร์โมเซตที่นิยมใช้เป็นเมทริกซ์ส่วนใหญ่ได้แก่ อีพอกซี พอลิเอสเทอร์ และไวนิลเอสเทอร์ เมื่อเทอร์โมเซตเรซินที่เหลวเริ่มแข็งตัว จะเกิดการเชื่อมโยงกันขึ้น ทำให้เกิดโครงร่างแหสามมิติ การเกิดการเชื่อมโยงจะทำให้พอลิเมอร์มีความต้านทานสารละลาย มีความเสถียรภาพทางความร้อน และต้านทานการเกิดออกซิเดชันได้ดี สมบัติเหล่านี้จะสัมพันธ์โดยตรงกับความหนาแน่นของการเกิดการเชื่อมโยง [8, 9]

(2) เทอร์โมพลาสติก (thermoplastic)

พอลิเมอร์กลุ่มนี้ละลายได้ดีในตัวทำละลายบางชนิด เมื่อได้รับความร้อนสามารถหลอมได้ และเมื่อเย็นลงจะแข็งตัว สามารถทำให้หลอมและแข็งตัวหลายๆ ครั้ง โดยไม่ทำให้สมบัติทางเคมีเปลี่ยนไป อาจแยกเป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มเทอร์โมพลาสติก ออสัญฐาน (amorphous thermoplastic) และเทอร์โมพลาสติก ที่มีผลึกบางส่วน (semi-crystalline thermoplastic) พลาสติกกลุ่มนี้จะไม่เกิดการเชื่อมโยง ดังนั้นความแข็งแรง จะเป็นผลโดยตรง มาจากสมบัติของหน่วยซ้ำหรือมอนอเมอร์ และ

น้ำหนักโมเลกุลที่สูง ตัวอย่างพลาสติกในกลุ่มนี้ ได้แก่ พอลิเอทิลีน พอลิพรอพิลีน และพอลิสไตรีน เป็นต้น [8, 9]

2.3 ตัวเสริมแรง

เป็นวัสดุที่ไม่ต่อเนื่อง (discontinuous phase) ซึ่งเป็นส่วนที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุ อาจอยู่ในรูปของเส้นใย (fiber) หรืออนุภาค (particles) ส่วนที่นิยมใช้เป็นตัวเสริมแรงคือ เส้นใยแก้ว (glass fiber) เส้นใยคาร์บอน (carbon fiber) และเส้นใยอะรามิด (aramid fiber)

หน้าที่ของตัวเสริมแรง

- (1) เพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุ
- (2) สามารถรับแรงกระแทกจากภายนอกที่กระทำต่อวัสดุได้ ช่วยให้ไม่เกิดการเสียหายหรือการผิดรูปภายใต้แรงกระทำนั้นๆ โดยแรงกระทำนั้นจะถูกถ่ายทอดไปตามเส้นใย

ลักษณะของเส้นใยที่เป็นตัวเสริมแรงที่ดี

- (1) เส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดเล็ก
- (2) อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าสูง
- (3) มีความโค้งงอและความยืดหยุ่นสูง

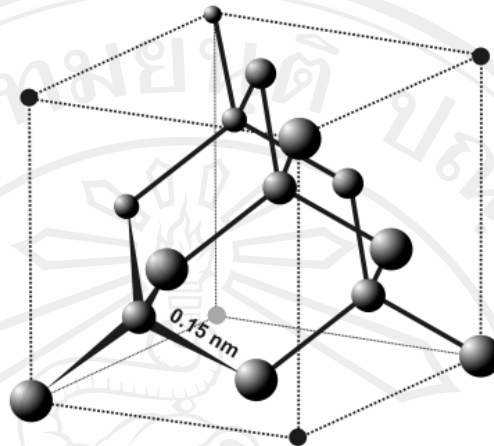
2.4 รูปแบบโครงสร้างของคาร์บอน [10]

คาร์บอนมีมวลโมเลกุลเท่ากับ 12 และเป็นธาตุลำดับที่ 6 ของตารางธาตุ ด้วยเหตุนี้ทำให้ 1 อะตอมคาร์บอน จะประกอบไปด้วยอิเล็กตรอน 6 ตัว โดยอิเล็กตรอน 2 ตัว จะถูกเติมในระดับชั้นพลังงาน 1s สำหรับอิเล็กตรอนที่เหลืออีก 4 ตัวจะสามารถจัดเรียงอิเล็กตรอนได้ 3 แบบ ซึ่งจากการจัดเรียงอิเล็กตรอนในระดับชั้นพลังงานที่แตกต่างกันทำให้คาร์บอนมีโครงสร้างหลายรูปแบบ แต่ละรูปแบบก็มีสมบัติแตกต่างกันไป เราสามารถจำแนกโครงสร้างของคาร์บอนตามมิติของสารออกเป็น 4 แบบดังนี้

1. แบบมีโครงสร้างเป็น 3 มิติ

อะตอมของคาร์บอนทั้งหมดจะเกาะยึดด้วยพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) ดังรูปที่ 2.1 อิเล็กตรอนจัดเรียงแบบ sp^3 ไม่มีอิเล็กตรอนดิโลคอลไลซ์ (delocalized) จึงทำให้โครงสร้างดังกล่าว

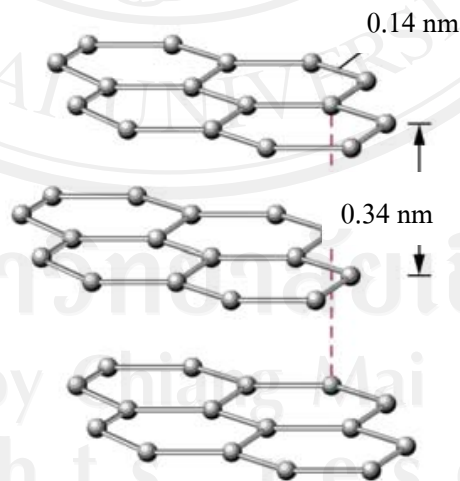
จะเป็นโครงสร้างที่แข็งแรงที่สุด ทัวไปพบในรูปของเพชรซึ่งเป็นอัญมณีราคาแพง นอกจากเครื่องประดับแล้วยังนิยมนำไปทำเป็นหัวตัดและเจาะ



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของเพชร [11]

2. แบบมีโครงสร้างเป็น 2 มิติ

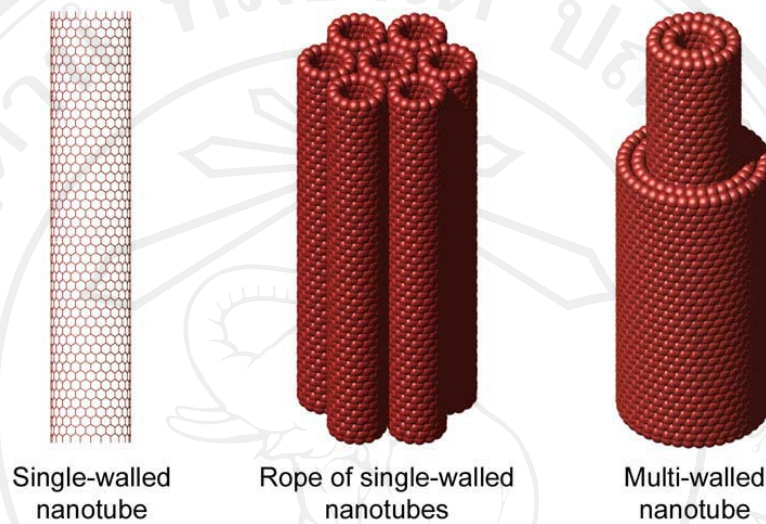
มีลักษณะเป็นแผ่นวางซ้อนทับเป็นชั้นๆ ยึดระหว่างชั้นเข้าด้วยกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals Force) ดังรูปที่ 2.2 โครงสร้างแบบ 2 มิตินี้บนระนาบพันธะจะยึดกันแน่นกว่า โครงสร้างแบบเพชร หากแต่ระหว่างชั้นจะมีการยึดเกาะกันอย่างหลวมๆ โครงสร้างแบบนี้จะพบในโครงสร้างของแกรไฟต์ เช่น ไม้ดินสอ



รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างของแกรไฟต์ [12]

3. แบบมีโครงสร้างเป็น 1 มิติ

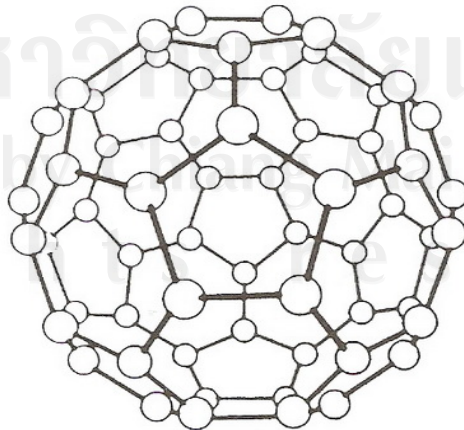
โครงสร้างมีลักษณะเป็นท่อกลวง ผนังท่อมีโครงสร้างเช่นเดียวกันกับแผ่นแกรไฟต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยมาก จนทำให้ดูเหมือนเป็นเส้นยาวในแนวหนึ่งมิติ โครงสร้างแบบนี้ เรียกว่า ท่อนาโนคาร์บอน ดังรูป 2.3 ซึ่งแสดงโครงสร้างแบบต่างๆของท่อนาโนคาร์บอน



รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างแบบต่างๆของท่อนาโนคาร์บอน [13]

4. โครงสร้างแบบศูนย์มิติ

มีลักษณะเป็นก้อนเล็กมาก จนอาจถือได้ว่าเป็นจุดที่ไม่มีมิติ เรียกว่า ฟูลเลอรีนส์ (Fullerenes) ซึ่งส่วนใหญ่ที่พบเป็นคาร์บอนหกสิบ (C₆₀) โดยแต่ละโมเลกุลจะประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนจำนวนทั้งหมด 60 อะตอม มาจับกันด้วยพันธะโควาเลนต์ ทำให้ได้รูปทรงเป็นแบบก้อนทรงกลมกลวงคล้ายลูกเตะกร้อหรือลูกบอลขนาดจิ๋ว ดังรูป 2.4

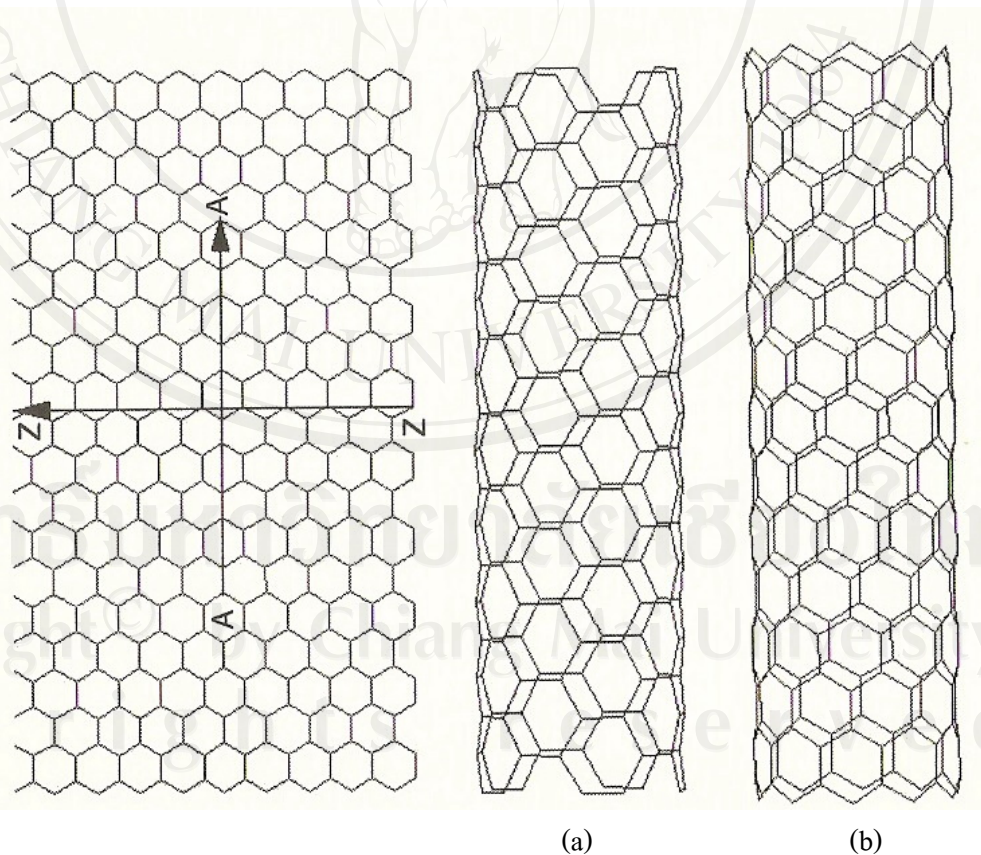


รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างของคาร์บอนหกสิบ[14]

2.5 ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotubes)

ท่อนาโนคาร์บอน คือ วัสดุที่มีรูปทรงเป็นท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับนาโนเมตร ผนังท่ออาจมีเพียงแค่ชั้นเดียว (single-walled) หรือหลายชั้น (multi-walled) ซึ่งประกอบขึ้นจากอะตอมของธาตุคาร์บอนเพียงธาตุเดียว ค้นพบครั้งแรกเมื่อปี 1991 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่นชื่อ Sumio Iijima ปัจจุบันพบว่ามีสมบัติที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์หลายด้าน เช่น ทำเส้นใยเสริมความแข็งแรงในวัสดุคอมโพสิต ทำอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มกำลังไฟ และอายุการใช้งานในแบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุ เป็นต้น ท่อนาโนคาร์บอนมีโครงสร้างและสมบัติหลากหลายซึ่งขึ้นกับวิธีที่ใช้ในการสังเคราะห์ ท่อนาโนคาร์บอนมีโครงสร้างเป็นแผ่นแกรไฟต์ม้วนเป็นท่อไร้ตะเข็บ ดังรูป 2.5 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางได้หลายขนาด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอนมีความกว้างประมาณ 2.5 นาโนเมตรจนถึง 30 นาโนเมตร

เมื่อเทียบกับความยาวของท่อ (ซึ่งยาวมากถึงหลายไมโครเมตร) ทำให้สัดส่วนระหว่างความยาวของท่อและเส้นผ่านศูนย์กลางมากถึง 1000 เท่า ส่งผลให้ท่อนาโนคาร์บอนประพฤติตนเสมือนเป็นวัตถุ 1 มิติ



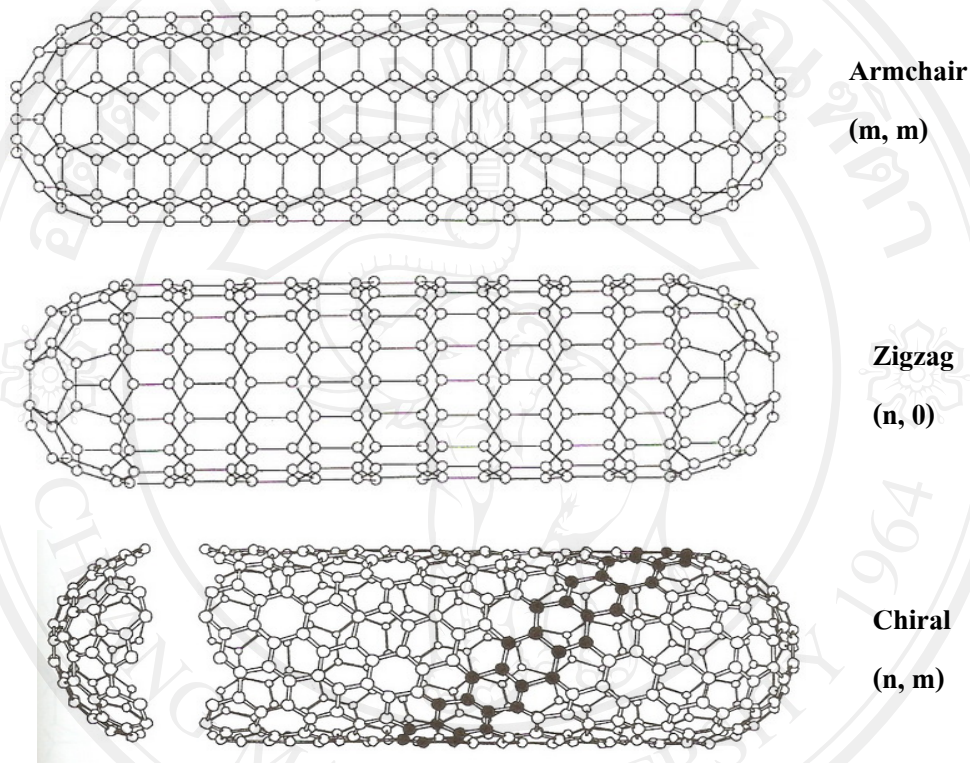
รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะพื้นฐานของท่อนาโนคาร์บอน (a) ลักษณะการม้วน A,A

(b) ลักษณะการม้วน Z,Z [15]

2.5.1 โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube structure)

ท่อนาโนคาร์บอนแบ่งตามชั้นของคาร์บอนออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. ท่อนาโนของคาร์บอนผนังชั้นเดียว (Single Walled Nanotubes, SWNTs) จะประกอบด้วยผนังคาร์บอน 1 ชั้น มีโครงสร้าง 3 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงรูปแบบโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน [14]

ดัชนี (n, m) จะบ่งบอกรูปแบบการจัดเรียงตัวของอะตอมบนท่อนาโนคาร์บอน โดยเวกเตอร์ผลัดพัทธ์ของผลรวมเวกเตอร์ $\vec{C} = n\vec{a}_1 + m\vec{a}_2$ คือ เส้นรอบวง

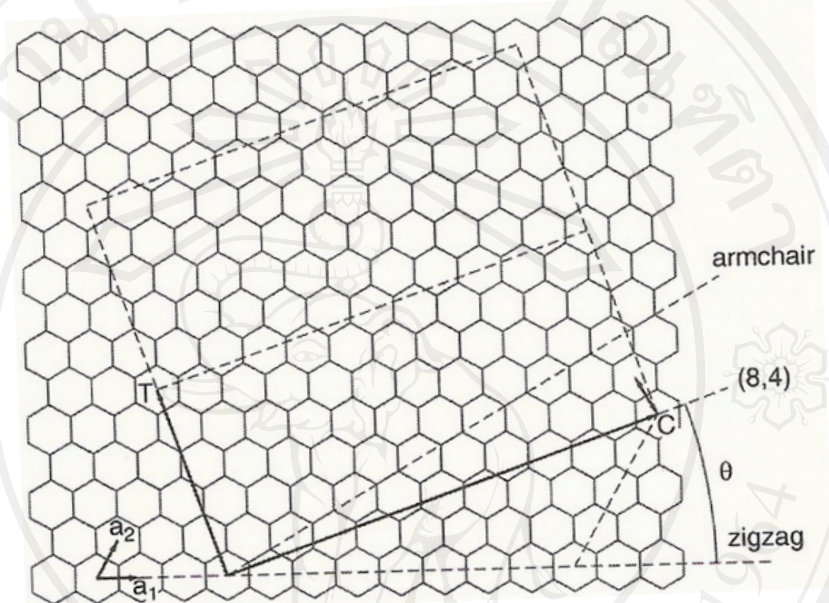
โดยมีดัชนี (n, m) เป็นตัวบ่งบอกรูปแบบการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนบนท่อนาโนคาร์บอน โดยกำหนดให้เวกเตอร์ผลัดพัทธ์ของผลรวมเวกเตอร์ $n + m$ คือ เส้นรอบวงของท่อนาโนคาร์บอน ดังแสดงในรูปที่ 2.7

ถ้า $m = n$ จะได้ ท่อนาโนคาร์บอนที่มีการจัดเรียงอะตอมแบบ Armchair (n, n) ซึ่งแบบจำลองเกิดจากการหมุนให้ตำแหน่ง $(0, 0)$ ไปพบกับตำแหน่ง (n, n) มีขนาดมุม θ เท่ากับ 30 องศา ดังแสดงในรูปที่ 2.8

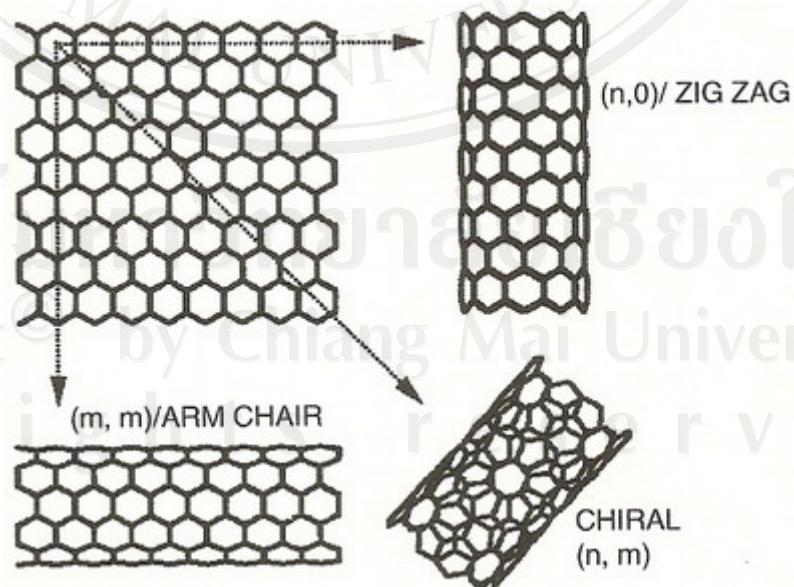
ถ้า $m = 0$ จะได้ ท่อนาโนคาร์บอนที่มีการจัดเรียงอะตอมแบบ Zig-zag $(n, 0)$ ซึ่ง

แบบจำลองเกิดจากการม้วนให้ตำแหน่ง $(0, 0)$ ไปพบกับตำแหน่ง $(n, 0)$ มีขนาดมุม θ เท่ากับ 0 องศา ดังแสดงในรูปที่ 2.8

ถ้า $m \neq n$ จะได้ ท่อนาโนคาร์บอนที่มีการจัดเรียงอะตอมแบบ Chiral (n, m) ซึ่งแบบจำลองเกิดจากการม้วนให้ตำแหน่ง $(0, 0)$ ไปพบกับตำแหน่ง (n, m) มีขนาดมุม θ เท่ากับ 0-30 องศา ดังแสดงในรูปที่ 2.8

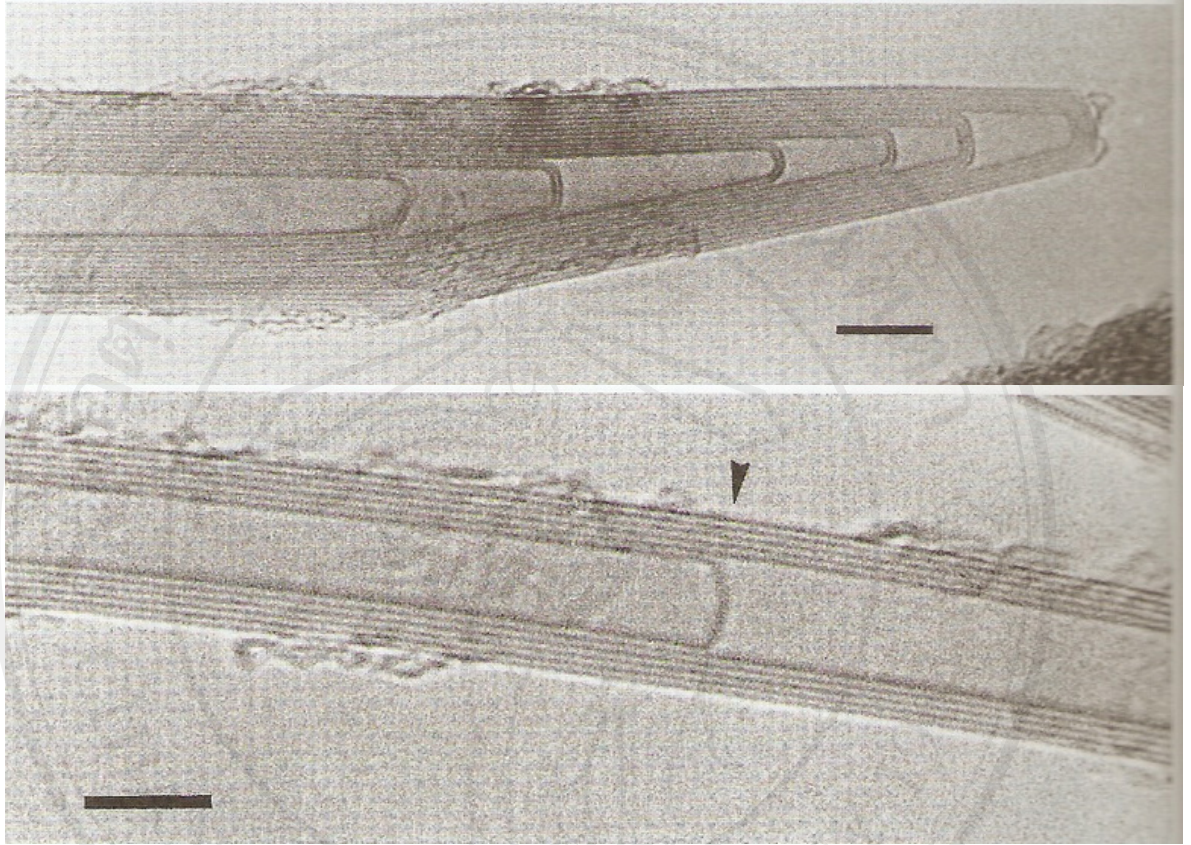


รูปที่ 2.7 ดัชนีบ่งบอกรูปแบบการจัดเรียงตัวของอะตอมบนท่อนาโนคาร์บอน [15]



รูปที่ 2.8 รูปจำลองการม้วนแผ่นแกรไฟต์ให้เป็นท่อนาโนคาร์บอน [15]

2. ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น (Multi Walled Nanotubes, MWNTs) คือ ท่อนาโนคาร์บอนที่มีผนังซ้อนกันหลายชั้น ดังแสดงในรูป 2.9



รูปที่ 2.9 ภาพของท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน [14]

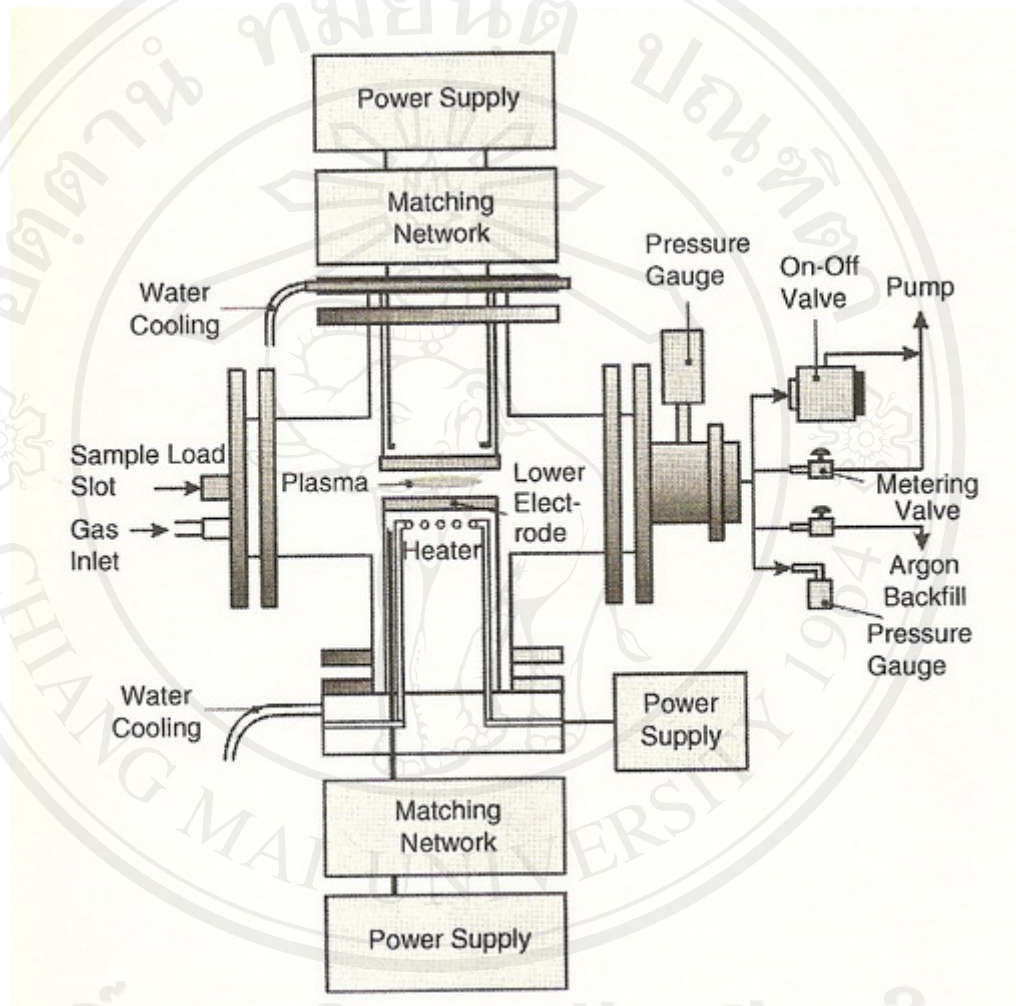
2.6 วิธีการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน

การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนนั้น มีหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียต่างกันไป ทั้งในด้านของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว ปริมาณ คุณภาพ และความบริสุทธิ์ของท่อนาโนคาร์บอนที่ได้ โดยทั่วไปแล้วอาจแบ่งออกเป็น 3 วิธีหลักๆ ได้แก่

2.6.1. การตกสะสมไอเคมี (Chemical vapor deposition คำย่อ: CVD)

โดยการผ่านไอหรือแก๊สของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนซึ่งใช้ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน เช่น มีเทน (CH_4) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) อะเซทิลีน (C_2H_2) และเอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) เป็นต้น เข้าไปในเตาเผาที่มีอุณหภูมิประมาณตั้งแต่ $600\text{--}1200^\circ\text{C}$ ซึ่งต้องมีอนุภาคนาโนของโลหะจะตะลิสต์อยู่บริเวณนั้นด้วย ดังรูปที่ 2.10 ทำให้โมเลกุลของแก๊สให้แตกตัว (decomposed) ออกเป็นอะตอมของคาร์บอน โดยการควบคุมอุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหลของแก๊ส สัดส่วนอะตอมของ

ธาตุ C:O:H ในระบบ การคุมขนาดของอนุภาคตะกอน และระยะเวลาในการสังเคราะห์ สามารถกำหนดขนาด ความยาว ทิศทางการเติบโต และตำแหน่งที่ต้องการปลูกของท่อนาโนคาร์บอนได้ แต่อาจมีข้อเสียที่ปริมาณข้อบกพร่องหรือความไร้ระเบียบของโครงสร้างสูง ทำให้ท่อที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีนี้มักเป็นท่อโค้งงอ



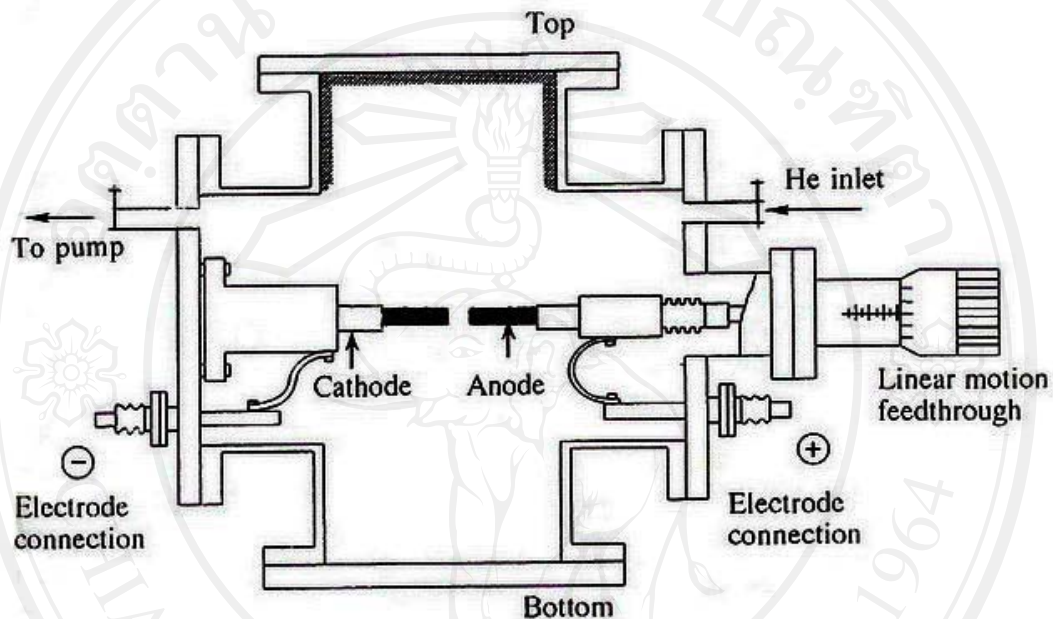
รูปที่ 2.10 เครื่องมือสำหรับการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยวิธีการตกตะกอนไอเคมี

(Chemical vapor deposition) [15]

2.6.2. อาร์คดิสชาร์จ (Arc-discharge)

ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงตั้งแต่ 20 - 200 แอมแปร์ ที่ความต่างศักย์ประมาณ 20 - 40 โวลต์ ตกคร่อมแท่งแกรไฟต์สองแท่งที่วางจ่อใกล้ๆ กัน โดยให้ระยะห่างระหว่างปลายแท่งประมาณ 1 - 3 มิลลิเมตร ภายใต้บรรยากาศแก๊สเฉื่อย เช่น ฮีเลียม หรือ อาร์กอน ที่ความดันต่ำระหว่าง 100 - 500 Torr จนทำให้เกิดเป็นสถานะพลาสมา และมีอุณหภูมิสูงบริเวณระหว่างขั้วอิเล็กโทรด ส่งผลให้แท่งแกรไฟต์ระเหิดกลายเป็นไอแล้วมีการควบแน่นกลายเป็นท่อนาโนคาร์บอน บริเวณปลายแท่ง

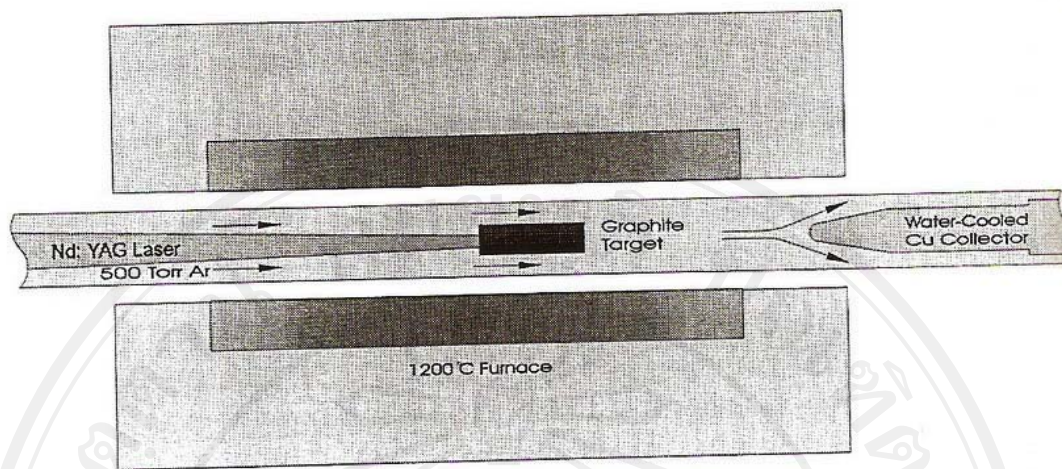
แกรไฟต์ที่ต่อกับขั้วลบ (cathode) การควบคุมขนาดหรือจำนวนชั้นของท่อนาโนคาร์บอน สามารถทำได้โดยการควบคุมความดัน อุณหภูมิ และการเติมผงโลหะคะตะลิสต์ปริมาณเล็กน้อย เช่น เหล็ก นิกเกิล หรือโคบอลต์ อย่างใดอย่างหนึ่ง หรือผสมกันลงในแท่งแกรไฟต์ที่ต่อกับขั้วบวก (anode) รูปที่ 2.11 แสดงเครื่องมือสำหรับการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยวิธีอาร์คดิสชาร์จ



รูปที่ 2.11 เครื่องมือการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยวิธีอาร์คดิสชาร์จ (Arc-discharge) [14]

2.6.3. การระเหยด้วยเลเซอร์ (Laser vaporization)

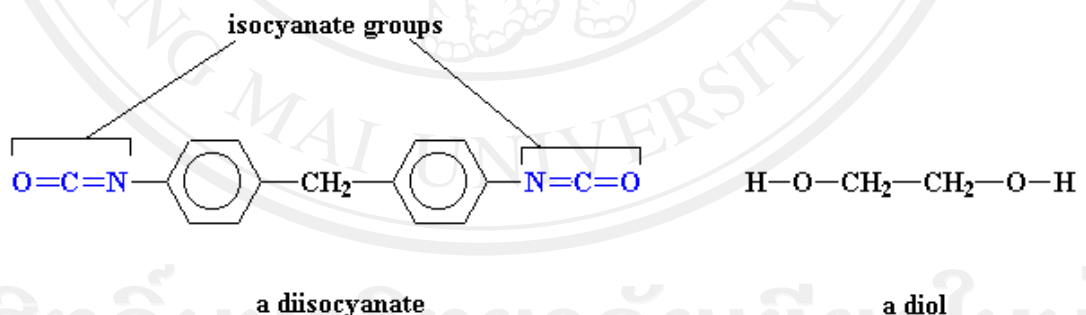
วิธีนี้จะใช้พัลส์แสงเลเซอร์ที่มีความเข้มแสงสูงยิงไปยังเป้าซึ่งเป็นแกรไฟต์ผสมกับผงโลหะคะตะลิสต์ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สเฉื่อย ที่ความดันต่ำประมาณ 500 Torr และอุณหภูมิ 1200 °C ดังรูปที่ 2.12 เทคนิคนี้คล้ายกับวิธีอาร์คดิสชาร์จ โดยจะได้ปริมาณและคุณภาพของท่อนาโนคาร์บอนดีกว่า แต่มีข้อเสียที่ จำเป็นต้องใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์กำลังสูง และมีราคาแพงมาก



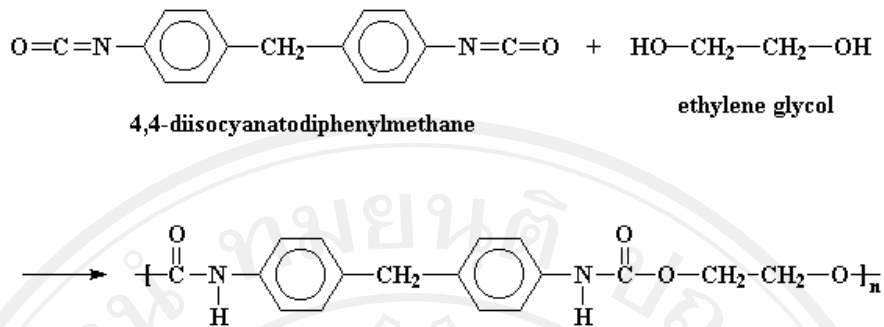
รูปที่ 2.12 การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยวิธีระเหด้วยเลเซอร์ [14]

2.7 พอลิยูรีเทน [16]

พอลิยูรีเทนเป็นพอลิเมอร์ที่มีหมู่ยูรีเทน $\text{—}\overset{\text{O}}{\parallel}\text{C—O—N—}\overset{\text{H}}{|}$ เป็นหมู่แสดงสมบัติเฉพาะตัวซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างไดไอโซไซยานต (diisocyanate) และไดออล (diol)



จากปฏิกิริยาข้างต้นนี้จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์หลักที่มีประโยชน์สี่ชนิดคือ โฟม เส้นใย อีลาสโตเมอร์ (elastomer) และสารเคลือบผิว



ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยานี้ส่วนมากใช้ทำโฟม ฟองน้ำ

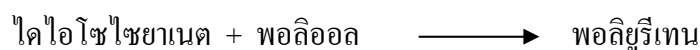
พอลิยูรีเทนถูกนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย เช่น ใช้ทำโฟม ฟองน้ำ สารเคลือบผิว ใ้บูเก้านั่ง ซึ่งเบาะส่วนมากทำมาจากโฟมพอลิยูรีเทน พอลิยูรีเทนสามารถใช้ผลิตอีลาสโตเมอร์ เพื่อใช้เป็นกาว และที่สำคัญยังใช้ในการผลิตเส้นใยอีกด้วย ที่เรียกพอลิยูรีเทนก็เพราะพอลิยูรีเทนเป็นพอลิเมอร์ที่มีหมู่ยูรีเทนเป็นหมู่ที่เชื่อมต่อกัน

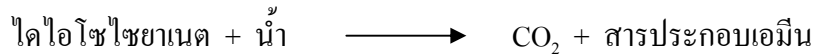
เส้นใยชนิดหนึ่งที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ได้แก่ เส้นใยสแปนเดกซ์ (spandex fibers) เป็นเส้นใยสังเคราะห์ที่ใช้ในการผลิตเครื่องนุ่งห่ม และชุดกีฬา ผลิตโดยปฏิกิริยาผันกลับได้ของพอลิเอสเทอร์ กับไดไอโซไซยานต เส้นใยดังกล่าวนี้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อทดแทนการใช้อย่าง ซึ่งเส้นใยนี้มีสมบัติที่ดีกว่ายางธรรมชาติเพราะมีความแข็งแรงที่มากกว่า เบากว่า ย้อมสีติดได้ง่ายกว่า สามารถปรับใช้ประโยชน์ได้หลากหลายกว่ายาง และยังสามารถยืดได้กว่าห้าเท่า นอกจากนี้เส้นใยดังกล่าวยังสามารถทำให้ยืดและหดกลับโดยที่รูปร่างและขนาดคงเดิม

การพอลิเมอร์ไรเซชันของพอลิยูรีเทน

1. การเตรียมพอลิยูรีเทนโฟมชนิดยืดหยุ่นได้ (flexible urethane foam)

พอลิยูรีเทนที่ยืดหยุ่นได้มีโครงสร้างแบบเซลล์เปิด (open-cell structure) มีความหนาแน่น 1.5-3.0 lb/ft³ มีค่าเทนไซค์สูง ยืดหยุ่นได้ดี แต่แข็ง สามารถต่อต้านตัวทำลายได้หลายชนิดแต่สลายตัวโดย กรด เบสและไอน้ำ พอลิยูรีเทนที่ยืดหยุ่นได้ส่วนใหญ่ใช้ทำเบาะเฟอร์นิเจอร์และเบาะรถยนต์ แก๊สที่ใช้ผลิตพอลิยูรีเทนโฟมที่ยืดหยุ่นได้ทั่วไปคือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง ไอโซไซยานตและน้ำ ดังนั้นระบบจึงประกอบด้วย ไดไอโซไซยานต พอลิอลและน้ำ (พอลิอล คือแอลกอฮอล์ที่มีหมู่OH มากกว่าสองหมู่)ปฏิกิริยาหลักที่เกิดควบคู่กันไปในการพอลิเมอร์ไรเซชัน คือ





2. การเตรียมพอลิยูรีเทนโฟมชนิดไม่ยืดหยุ่น

พอลิยูรีเทนโฟมชนิดไม่ยืดหยุ่นมีโครงสร้างแบบเซลล์ปิด (close-cell structure) มีความหนาแน่นประมาณ 2 lb/ft^3 มีสมบัติคล้ายกับพอลิยูรีเทนโฟมที่ยืดหยุ่นได้ นอกจากนี้ยังสามารถต่อต้านน้ำมัน และแก๊สโซลีนเป็นอย่างดี และมีความสามารถในการดูดความชื้นและน้ำต่ำ พอลิยูรีเทนโฟมชนิดไม่ยืดหยุ่น ส่วนใหญ่ใช้งานเป็นตัวอินซูลเตอร์สำหรับความร้อนในตู้เย็น ในการก่อสร้าง ภาชนะเก็บของร้อนและเย็น เป็นส่วนประกอบของเรือเพื่อลดน้ำหนักของเรือ การเตรียมพอลิยูรีเทนโฟมชนิดไม่ยืดหยุ่นใช้หลักการเดียวกันกับการเตรียมพอลิยูรีเทน โฟมชนิดยืดหยุ่นได้ แตกต่างกันเพียงองค์ประกอบของการเชื่อมโยง ซึ่งโฟมที่ไม่ยืดหยุ่นนี้ มีองค์ประกอบเชื่อมโยงที่สูงมาก ซึ่งทำได้โดยใช้พอลิออลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และมีหมู่ OH มากกว่าสองหมู่

3. การเตรียมพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์

พอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ทนต่อแรงเสียดทานได้ดีมาก มีความยืดหยุ่นสูง สามารถทนต่อน้ำมัน และตัวทำละลายทั่วไปได้ดี พอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ ส่วนใหญ่ใช้ทำยางรถยนต์ พื้นรองเท้า และยางที่ทนน้ำมัน การเตรียมพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ ในขั้นตอนแรกได้แก่การเตรียมอินเตอร์มีเดียต ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และมีหมู่ -OH อยู่ปลายโซ่อินเตอร์มีเดียต อาจเป็นพอลิเอสเทอร์ที่เตรียมจากเอทิลีนไกลคอล และกรดอะดิพิก หรือเป็นพอลิอีเทอร์ หรือเป็นของผสมระหว่าง พอลิเอสเทอร์และพอลิเอไมด์ จากนั้นนำอินเตอร์มีเดียตไปทำปฏิกิริยากับไดไอโซไซยาเนต ได้ผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่า พรีพอลิเมอร์ (prepolymer) จากนั้นนำพรีพอลิเมอร์ไปผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน เพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล โดยใช้ไกลคอล ไดอะมิน ไดเบซิลเอซิด หรืออะมิโนแอลกอฮอล์ โดยการเชื่อมโยงจะเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างหมู่ไอโซไซยาเนต และสารตัวเติม

เส้นใยพอลิยูรีเทนแบบยืดหยุ่น [17] ซึ่งมีชื่อทางการค้าคือ เส้นใยสเปนเด็กซ์ มีความสามารถดึงยืดออกได้ถึง 450 – 700 เปอร์เซ็นต์ และสามารถคืนตัวกลับได้ทั้งหมดในทันทีที่ปล่อยแรงดึง ความสามารถในลักษณะเช่นนี้เป็นประโยชน์ต่อผลิตภัณฑ์เสื้อผ้า เครื่องนุ่งห่ม ซึ่งโดยทั่วไปการยืดตัวมีสองชนิดคือ การยืดเพื่อการใช้งาน และการยืดเพื่อความสบาย เส้นใยสเปนเด็กซ์ ได้จากการทำปฏิกิริยา ระหว่างโมเลกุลของพอลิเอสเทอร์ หรือพอลิอีเทอร์ กับไดไอโซไซยาเนต จากนั้นทำให้เกิดพอลิเมอร์เป็นสายโซ่โมเลกุลของพอลิยูรีเทน โครงสร้างในโมเลกุลของเส้นใยสเปนเด็กซ์ของพอลิยูรีเทน จะประกอบด้วยส่วนที่มีความอ่อนนุ่ม ทำหน้าที่ในด้านความสามารถในการดึงยืด และส่วนที่มีความแข็ง ทำหน้าที่ให้ความแข็งแรง เส้นใยสเปนเด็กซ์เป็น

เส้นใยพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติก จะมีจุดหลอมเหลวประมาณ 230 องศาเซลเซียส แต่ที่อุณหภูมิประมาณ 121 องศาเซลเซียส ก็เริ่มส่งผลเสียต่อเส้นใยชนิดนี้

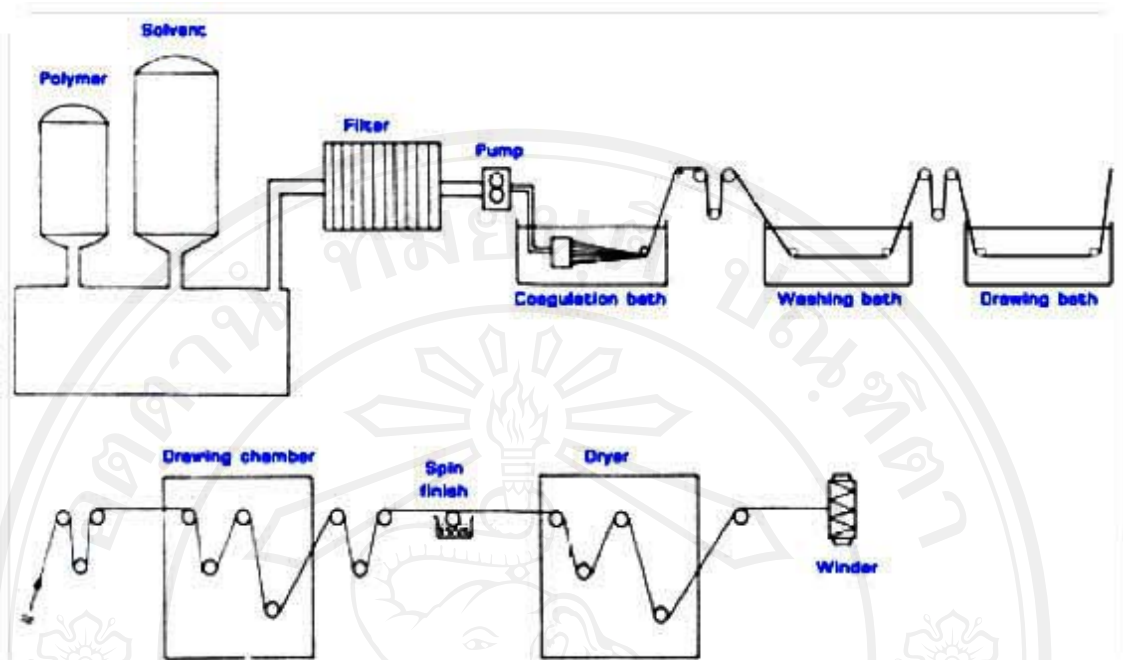
2.8 การขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์

กระบวนการขึ้นรูปเส้นใยสามารถทำได้หลายวิธี ขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ตั้งต้น การขึ้นรูปเส้นใยมี 3 วิธีคือ ได้แก่ แบบปั่นหลอมเหลว (melt spinning) ซึ่งเป็นวิธีการขึ้นรูปเส้นใยที่ง่ายและถูกที่สุด เริ่มต้นด้วยการให้ความร้อนแก่พอลิเมอร์ เพื่อให้พอลิเมอร์เกิดการหลอมเหลว แล้วอัดผ่านหัวฉีด แล้วผ่านลมเพื่อให้เส้นใยแข็งตัว แต่ในกรณีพอลิเมอร์ที่ต้องการขึ้นรูปเป็นเส้นใยที่มีจุดหลอมเหลวที่สูงหรือมีโอกาสเกิดการสลายตัวเนื่องจากความร้อนได้ง่ายนั้น วิธีการปั่นแบบหลอมเหลวจะไม่เหมาะสม จึงเตรียมในรูปสารละลายพอลิเมอร์ที่มีความหนืดค่อนข้างมากแทนซึ่งมีทั้งกระบวนการปั่นแบบแห้ง (dry spinning) ซึ่งเมื่อฉีดผ่านหัวฉีด (spinerets) ให้เป็นเส้นแล้วจะทำการระเหยตัวทำละลายส่วนที่เหลือในเส้นใยที่ฉีดออกมาโดยการใช้ลมร้อนเป่า แต่หากตัวทำละลายนั้นเป็นสารที่ระเหยยากการขึ้นรูปเส้นใยที่เหมาะสม ได้แก่ การขึ้นรูปเส้นใยด้วยวิธีปั่นแบบเปียก (wet spinning) จากนั้นทำการดัดยัดเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของเส้นใย

การเตรียมเส้นใยโดยวิธีการปั่นแบบเปียก เป็นวิธีที่คัดสรรละลายพอลิเมอร์ผ่านรูเล็กๆของหัวฉีด ทำให้เป็นเส้นใยยาวลงไปอ่างตกตะกอน (coagulating bath) สารละลายนี้จะทำให้เส้นใยแข็งตัว เนื่องจากการถ่ายโอนตัวทำละลายจากเส้นใยสู่สารละลายที่อยู่ในอ่างตกตะกอน ในบางครั้งการผลิตเส้นใยโดยวิธีนี้จะใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้น เนื่องจากสารละลายพอลิเมอร์มีความเข้มข้นสูง ซึ่งทำให้ความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์จะสูงด้วย ทำให้ยากแก่การกดอัด ดังนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์จะลดลง และยังทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์จัดเรียงตัวได้ดีขึ้น มีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เส้นใยมีความหนาแน่น และความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

วิธีการปั่นแบบเปียกที่อาศัยการตกตะกอน สามารถกำหนดตัวแปรในการผลิตได้ เช่น ความเข้มข้น อุณหภูมิ และองค์ประกอบของสารละลายพอลิเมอร์ อุณหภูมิของอ่างตกตะกอน และแรงที่ให้อำนาจการปั่น ข้อดีของกระบวนการปั่นแบบเปียก คือ ใช้อุณหภูมิต่ำในการปั่น รูปที่ 2.13 แสดงหน่วยปฏิบัติการต่างๆ ในกระบวนการปั่นเส้นใยโดยวิธี การปั่นแบบเปียก

ลิขสิทธิ์โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
Copyright © by Chulalongkornrajavidyalaya University
All rights reserved



รูปที่ 2.13 แสดงการขึ้นรูปเส้นใยโดยวิธีการปั่นแบบเปียก [18]

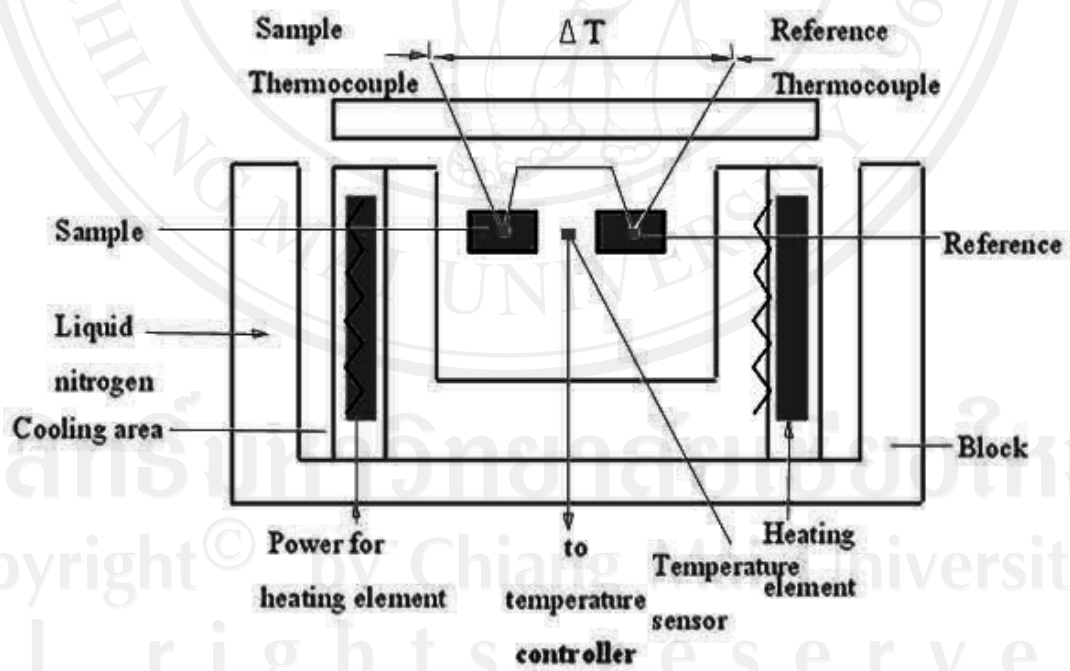
2.9 สมบัติทางความร้อน (Thermal property) [19]

ในปัจจุบันมีการใช้เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ (analytical instruments) ชนิดต่างๆ ทั้งในภาครัฐและเอกชน เหตุผลหนึ่งคือเพื่อการวิจัยและพัฒนา ซึ่งเครื่องมือดังกล่าว แต่ละชนิดมีเทคนิคการวิเคราะห์ (analytical techniques) ที่แตกต่างกัน การวิเคราะห์โดยใช้ความร้อน (thermal analysis) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ชนิดหนึ่ง ที่วัดสมบัติทางกายภาพ (physical properties) ของสารต่างๆ เปรียบเทียบกับอุณหภูมิหรือเวลา เทคนิคชนิดนี้ที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ การทดสอบสมบัติทางความร้อนโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ปริมาณ ความร้อนเชิงผลต่าง (Differential Scanning Calorimeter) หรือเรียกย่อๆว่า DSC ซึ่งวัดอุณหภูมิ และการไหลถ่ายความร้อน (heat flow) จากการเปลี่ยนแปลงความร้อน (thermal transition) ของวัสดุเปรียบเทียบกับอุณหภูมิหรือเวลา ทำให้ได้ข้อมูลทั้งทางด้านคุณภาพและปริมาณ (qualitative and quantitative) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมี การเปลี่ยนแปลงนี้จะเกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดหรือคายความร้อน (endothermic or exothermic processes) หรือการเปลี่ยนแปลงความจุความร้อน (heat capacity changes) จึงนำมาใช้เพื่อศึกษาสมบัติที่เป็นลักษณะพิเศษของวัสดุต่างๆ ได้แก่ พอลิเมอร์ ยา อาหาร และตัวอย่างทางชีววิทยา วัสดุอินทรีย์และอนินทรีย์ สำหรับการวิจัยและพัฒนา การควบคุมคุณภาพ และการผลิต ปกติแล้วการเปลี่ยนแปลงที่วัด ได้แก่ อุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว (glass transition, T_g) การหลอมเหลว (melting) กระบวนการตกผลึก (crystallization process) การ

เกิดปฏิกิริยาทางเคมีของพลาสติกเทอร์โมเซตที่เปลี่ยนจากผงหรือของเหลวไปเป็นของแข็งจากการเชื่อมโยงและสร้างพันธะใหม่ตามระยะเวลาหรืออุณหภูมิที่เหมาะสม (curing) จลนศาสตร์ของการบ่ม (cure kinetics) จุดเริ่มการออกซิเดชัน (onset of oxidation) และความจุความร้อน (heat capacity) เป็นต้น

2.9.1 การทดสอบสมบัติทางความร้อนโดยใช้วิธี Differential Scanning Calorimetry (DSC) [20]

เทคนิคนี้เป็นเทคนิคการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและการเปลี่ยนสถานะในพลาสติก โดยการวัดค่าความแตกต่างของพลังงานที่ใส่เข้าไปในสารตัวอย่าง และวัสดุเฉื่อยเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ให้กับสารทั้งสองในขณะนั้น ดังนั้น DSC จึงเป็นการวัดพลังงานความร้อนที่ใส่เข้าไปหรือปล่อยออกมากับสารตัวอย่างในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลง ถ้าสารดูดความร้อนในขณะการเปลี่ยนแปลงเรียกการเปลี่ยนแปลงนั้นว่า endothermic (เช่นการเปลี่ยนแปลงสถานะแก้วและการหลอมเหลว) ถ้าสารปล่อยความร้อนในขณะเปลี่ยนแปลง เรียกการเปลี่ยนแปลงนั้นว่า exothermic (เช่น การตกผลึก) เครื่องมือที่ใช้เรียกว่า Differential Scanning Calorimeter แสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.14 ส่วนประกอบของเครื่อง DSC [21]

ระบบการทำงานของเครื่องประกอบด้วยเตาของสารตัวอย่าง (sample microfurnace) และเตาของสารอ้างอิง (reference microfurnace) ซึ่งภายในเตามีแหล่งให้ความร้อน (heater) และตัว

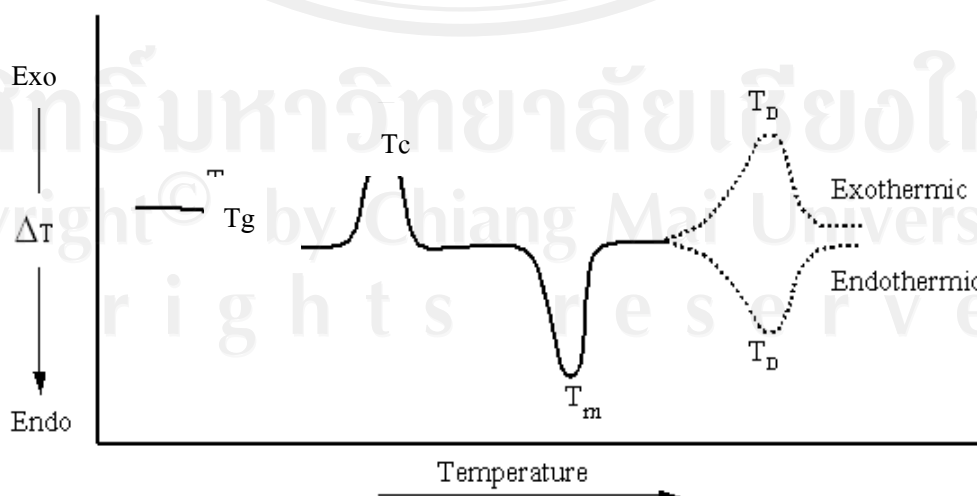
ตรวจวัดอุณหภูมิ (thermocouple) ติดตั้งอยู่ด้านล่างของสารตัวอย่างและสารอ้างอิง เมื่อแหล่งให้ความร้อนให้ความร้อนกับสารตัวอย่างและสารมีการเปลี่ยนสถานะ ซึ่งอาจเกิดในรูปของปฏิกิริยาคูดความร้อน (Endothermic reaction) หรือปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction) การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นไม่ว่าอยู่ในรูปปฏิกิริยาคูดหรือคายความร้อน มีผลทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างสารตัวอย่างและสารอ้างอิงไม่เท่ากับศูนย์ ดังนั้นจะมีสัญญาณไฟฟ้าให้แหล่งให้ความร้อนเพิ่มอุณหภูมิให้กับสารตัวอย่างและสารอ้างอิง เพื่อชดเชยอุณหภูมิที่หายไป ขณะเดียวกันก็มีการแปลงสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นพลังงานความร้อน (Enthalpy) ซึ่งมีปริมาณเท่ากับพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะของสารตัวอย่าง

หลักการทำงานของเครื่องมือ คือ การชดเชยพลังงานเพื่อให้อุณหภูมิของสารตัวอย่าง (T_s) สารอ้างอิง (T_r) มีค่าเท่ากันตลอดการทดลองของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ นั่นคือ

$$\Delta T = T_s - T_r = 0$$

เพื่อให้อุณหภูมิมียค่าเท่ากันตลอด เครื่อง DSC จะต้องใช้หลักการ null balance คือ ถ้าสารตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบคูดความร้อน มีการดูดกลืนพลังงานทำให้ T_s ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ T_r ดังนั้นเครื่องจะทำการชดเชยโดยให้ความร้อนจากพลังงานไฟฟ้าให้กับสารตัวอย่างซึ่งเท่ากับจำนวนที่ดูดกลืนเข้าเปลี่ยนแปลงสภาวะ ทำให้ $T_s = T_r$ ดังเดิม และค่าพลังงานการชดเชยจะถูกบันทึกไว้ ถ้าตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบคายความร้อน มีการคายพลังงานทำให้ T_s เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ T_r ดังนั้นเครื่องจะทำการชดเชยโดยให้ความร้อนจากพลังงานไฟฟ้าแก่สารอ้างอิง ทำให้ $T_s = T_r$

ดังนั้น DSC curve หรือ Thermogram ได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง Heat flow rate และอุณหภูมิ แสดงดังรูป 2.16



รูปที่ 2.15 เทอร์โมแกรมที่ได้จากเครื่อง DSC [21]

จากเทอร์โมแกรมจะเห็นว่าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงของพลาสติก เกิดขึ้นเป็นช่วงมากกว่าที่จะเป็นค่าใดค่าหนึ่ง อย่างไรก็ตามในการรายงานผลจะรายงานเป็นอุณหภูมิค่าหนึ่งดังนี้ คือ T_g จะ

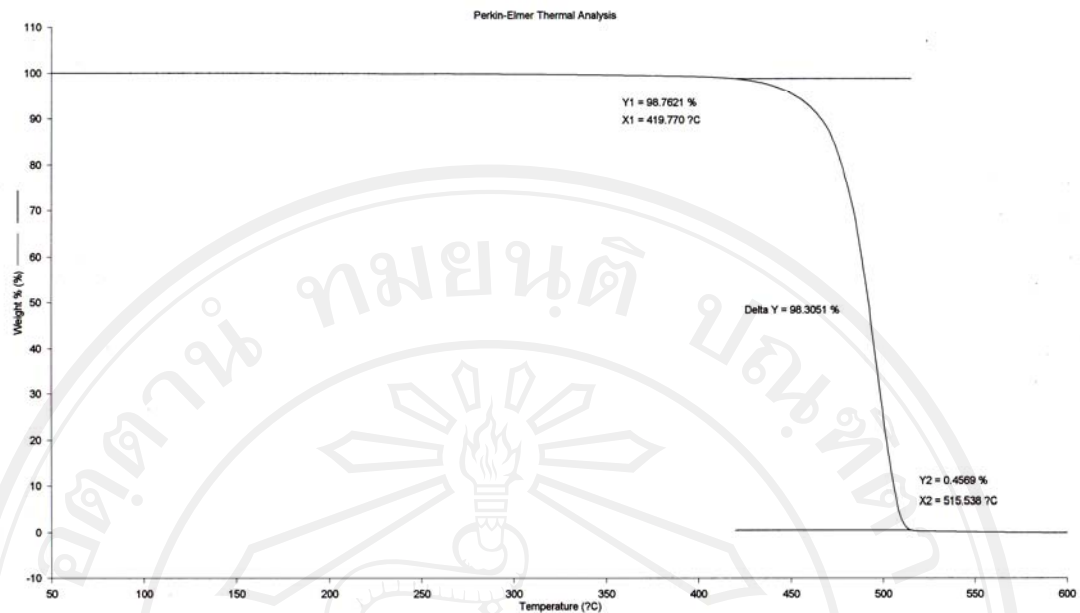
ใช้ Mid-point temperature ค่า T_c และ T_m เป็น Peak temperature

DSC เป็นเทคนิคที่มีประโยชน์และประยุกต์ในการใช้งานในทางพลาสติก ทั้งทางด้านวิเคราะห์ทางคุณภาพ และปริมาณ เช่น

- (1) หาอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature: T_g)
- (2) ศึกษาการหลอมเหลว หาค่า T_m และ ΔH_m
- (3) ศึกษาการเกิดผลึก หาค่า T_c และ ΔH_c
- (4) หาค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก
- (5) วิเคราะห์ Copolymer และ Polymer blends

2.9.2 การทดสอบอุณหภูมิการสลายตัวโดยเทคนิคการวัดการเปลี่ยนแปลงมวลเนื่องจากความร้อน (Thermogravimetry analysis: TGA) [20]

เป็นวิธีในการวิเคราะห์ความเสถียรของพอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อน โดยใช้พื้นฐานการวัดน้ำหนักอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง (thermo balance) ในระหว่างการวิเคราะห์อุณหภูมิของตัวอย่างซึ่งอยู่ในบรรยากาศปกติ หรือก๊าซเฉื่อยจะถูกทำให้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ข้อมูลการวิเคราะห์จะถูกบันทึกเป็นเทอร์โมแกรมที่แสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่าง และอุณหภูมิ การสูญเสียน้ำหนักในช่วงแรกของการวิเคราะห์ หรือที่อุณหภูมิต่ำอาจเกิดจากการระเหยของน้ำหรือตัวทำละลาย แต่ที่อุณหภูมิสูงมักเกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ ข้อมูลเหล่านี้ทำให้ทราบเกี่ยวกับความเสถียรต่ออุณหภูมิของพอลิเมอร์ เทคนิคนี้ยังมีประโยชน์มากในการวิเคราะห์หาสารที่ระเหย หรือสารเติมแต่งที่ไต่ลงไปในพอลิเมอร์อีกด้วย เรียกกราฟนี้ว่า Thermogravimetric curve ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.16 เทอร์โมแกรมที่ได้จาก TGA

จากรูปเทอร์โมแกรมที่ได้จาก TGA จะแสดงขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารตัวอย่าง เมื่อสารตัวอย่างได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงอุณหภูมิที่เกิดการสลายตัว น้ำหนักของสารตัวอย่างนั้นจะลดลง อุณหภูมิที่แต่ละองค์ประกอบในวัสดุนั้นเกิดการสลายตัวเป็นอุณหภูมิเฉพาะ ดังนั้นจึงอาจแยกองค์ประกอบแต่ละอย่างในสารตัวอย่างนั้นได้ เมื่อองค์ประกอบนั้นมีการสลายตัวที่อุณหภูมิต่างๆ

2.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) [22]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด คือกล้องจุลทรรศน์ ที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนฉายหรือส่องกราด ไปบนผิวของตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบ ให้ได้ข้อมูลของลักษณะพื้นผิวปรากฏเป็นภาพขยายที่สามารถมองเห็นได้ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนส่องกราด มีชื่อเต็มว่า Scanning Electron Microscope, (SEM) ส่วนกล้อง จุลทรรศน์อีกชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นต้นกำเนิดของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดคือ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM) คือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนส่องผ่านตัวอย่างที่บางมาก และภาพที่เกิดขึ้นก็คือ ภาพที่ปรากฏบนแผ่นรับภาพซึ่งสามารถบันทึกเป็นภาพถ่ายได้เช่นกัน ทั้งกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน มีลักษณะพื้นฐานคล้ายคลึงกันในระบบโดยเฉพาะที่เกี่ยวข้องกับระบบสุญญากาศ การทำให้มีลำแสงอิเล็กตรอนและระบบเลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีความสำคัญในการรวมหรือกระจายลำแสงอิเล็กตรอน ระบบอื่นๆ ของกล้องทั้งสองประเภทมีความแตกต่างกัน อย่างเห็นได้ชัดคือ

ระบบของการสร้างภาพและลักษณะของภาพ ที่ปรากฏนั้นคือ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน มีระบบของการเกิดภาพได้ง่ายๆ ภาพที่เกิดขึ้นจะปรากฏให้ผู้สังเกตเห็นได้โดยตรงบนแผ่นรับภาพ และภาพนั้นเกิดความแตกต่าง ระหว่างความโปร่งใส และความทึบแสงที่ลำแสงอิเล็กตรอนผ่าน หรือไม่ผ่านได้ภาพที่ปรากฏ คือเงาของตัวอย่าง ส่วนระบบการเกิดภาพในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นระบบที่เกิดจากลำแสงอิเล็กตรอนผ่านและไม่สามารถจะผ่านตัวอย่างภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ภาพที่เกิดขึ้นเป็นภาพเสมือน ซึ่งเป็นการรวบรวมสัญญาณที่เกิดภายหลังการกระทบ ลำแสงอิเล็กตรอนแล้วเปลี่ยนไปเป็นภาพ ให้ปรากฏบนจอภาพ หรืออีกนัยหนึ่งภาพที่เกิดขึ้นจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ก็คือผลจากการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นภาพ

ข้อมูลที่ได้รับมาโดยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนทั้ง 2 ประเภทดังกล่าวคือ ทั้งกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะเป็นภาพของตัวอย่างที่มีกำลังขยายและมีรายละเอียดสูง แต่ภาพที่เกิดจากการกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนทั้ง 2 ประเภทมีลักษณะที่แตกต่างกัน ภาพที่ได้รับจากการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านเป็นภาพขยายที่มีการแจ่มแจ้งรายละเอียดสูง และมีลักษณะ 2 มิติ ส่วนภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด นอกจากเป็นภาพที่มีสมบัติในด้านกำลังขยายและรายละเอียดสูงแล้ว ภาพที่ปรากฏจากการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยังมีลักษณะเป็นภาพประเภท 3 มิติ ตารางที่ 2.2 เป็นการเปรียบเทียบสมบัติต่างๆของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนทั้ง 2 ประเภทนี้

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติและลักษณะของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [22]

Property	TEM	SEM
กำลังขยาย (Magnification)	1000X- 500,000X	10X-100,000X
การแจ่มแจ้งรายละเอียด (Resolution)	0.14 -0.2 nanometer	6-10 nanometer
การปรากฏของภาพ (Image formation)	เงาเกิดขึ้นโดยตรง	ภาพเกิดจากสัญญาณ
ลักษณะ ของภาพ (Type of image)	ภาพ 2 มิติ	ภาพ 3 มิติ (เห็นความลึก)
การประยุกต์ (Applications)	ศึกษารายละเอียดภายใน	ศึกษารายละเอียดของพื้นผิว
ขนาด ตัวอย่าง	เล็กกว่า 0.2 nm	50 nm
เทคนิคการเตรียมตัวอย่าง (Preparation technical)	ต้องใช้ความชำนาญพิเศษ ใช้เวลายาวนาน	ง่ายสะดวกและรวดเร็ว

2.11 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

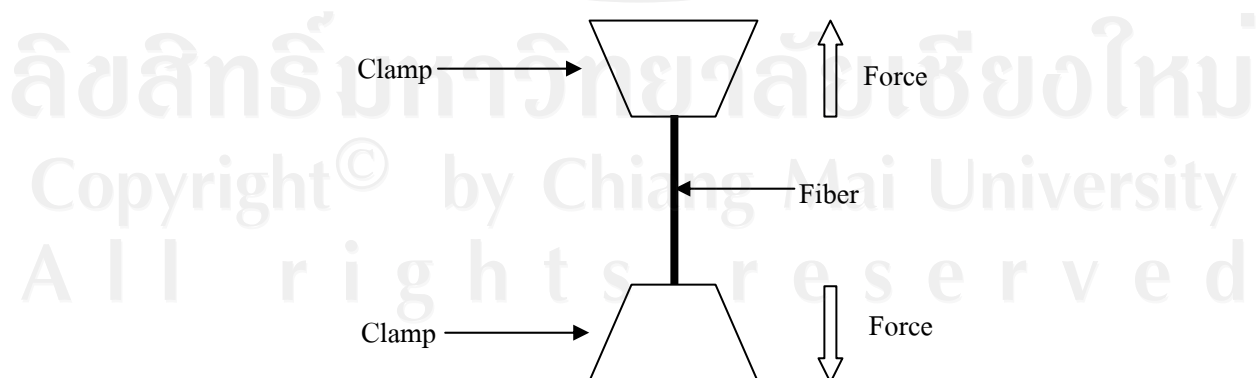
การศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของพอลิเมอร์ โดยทั่วไปพบว่าไม่สามารถทำนายสมบัติเชิงกล ของพอลิเมอร์โดยอาศัยความรู้จากโครงสร้างพื้นฐานทางเคมีได้อย่างแม่นยำ เช่น ความแข็งแรง (strength) ที่แท้จริงของพอลิเมอร์อาจมีค่าเพียง 0.01 - 0.1 เท่าของค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ความรู้พื้นฐานจากความแข็งแรงของพันธะ และแรงระหว่างโมเลกุล เพราะฉะนั้นในปัจจุบันการทดสอบสมบัติเชิงกล จึงเป็นวิธีที่ดีที่จะศึกษาถึงสมบัติและความเป็นไปได้ในการนำเอาพอลิเมอร์ไปใช้งาน

2.11.1 ความทนแรงดึง (Tensile strength) [23]

ความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ สามารถทดสอบจากลักษณะการยืดออกของตัวอย่างเมื่อได้รับแรงดึงจากภายนอก โดยอาศัยเทอม 2 เทอมที่สัมพันธ์กัน คือ ความเค้น (stress : σ) และความเครียด (strain : ϵ) ความเค้น คือ แรงที่ใช้ในการดึงหรือยืดตัวอย่าง ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัด

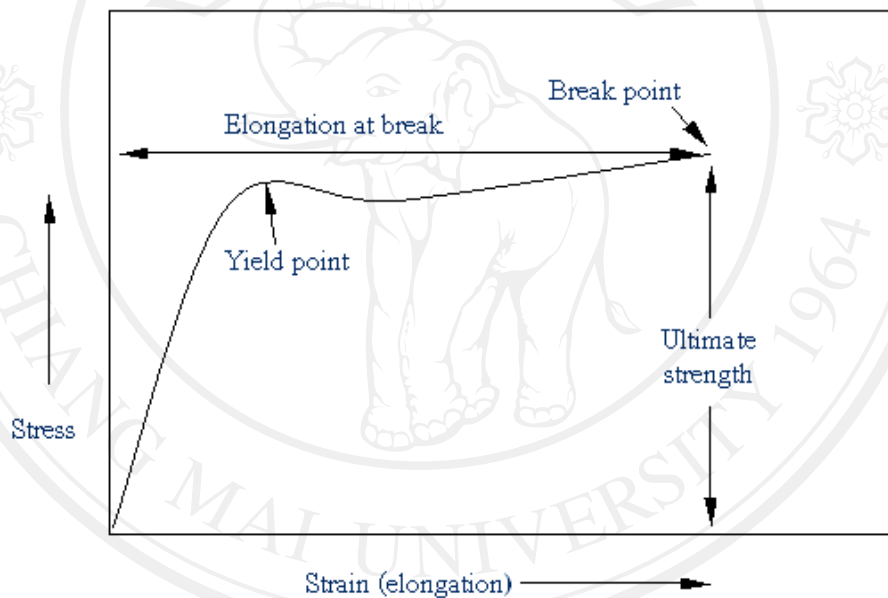
ความเครียด (ϵ) คือ อัตราส่วนระหว่างความยาวที่เปลี่ยนไปของตัวอย่างเมื่อได้รับแรงดึง ต่อความยาวเริ่มต้น

เนื่องจากพฤติกรรมความเค้นและความเครียดของวัสดุเป็นลักษณะที่ขึ้นกับเวลา อัตราเร็วที่ความเค้นหรือแรงถูกให้กับตัวอย่างจึงมีผลต่อการยืดของตัวอย่าง หรือความเครียดเป็นอย่างมาก เช่น เมื่อนำตัวอย่างประเภทเส้นใยมาทดสอบ โดยใช้แรงดึงอย่างรวดเร็วจนทำให้เส้นใยขาดออกโดยง่าย แต่เมื่อใช้แรงขนาดเดิมแต่ดึงอย่างช้า ๆ จะทำให้เส้นใยยืดออกและทนต่อแรงดึงอยู่ได้นานก่อนที่จะขาด

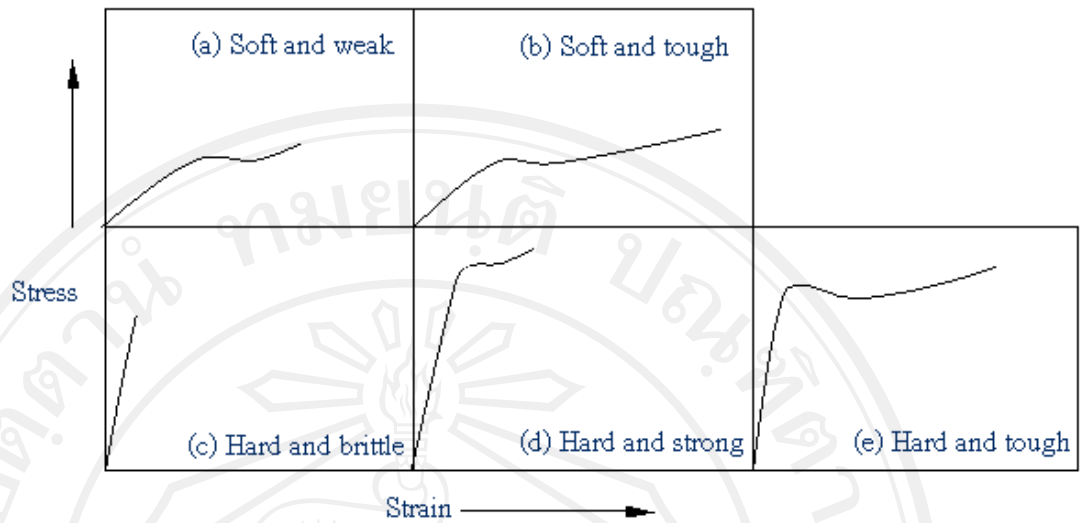


รูปที่ 2.17 รูปร่างตัวอย่างของพอลิเมอร์ที่ใช้ทดสอบความเค้น และ ความเครียด

ปลายของตัวอย่างถูกยึดด้วยที่จับ และจะถูกดึงให้ยืดออกด้วยแรงที่รู้ขนาดแน่นอน ดังรูป 2.18 จากนั้นจึงนำข้อมูลไปพลอตกราฟระหว่างความเค้นและความเครียด (stress-strain curve) สำหรับพอลิเมอร์ที่มีลักษณะคล้ายยาง (elastomer) ซึ่งเกิดการยืดออกได้ง่ายเมื่อได้รับแรงดึง กราฟที่ได้มีลักษณะดังรูปที่ 2.19 นอกจากความเค้นและความเครียด แล้วยังมีเทอมที่แสดงสมบัติเชิงกลประเภทอื่นของพอลิเมอร์ อีก เช่น ค่ามอดุลัส หรือความแข็งแรง ซึ่งแสดงโดยค่าอัตราส่วนระหว่างความเค้นและความเครียด (หรือความชันในช่วงแรกของเส้นกราฟ) และ ความเหนียว ซึ่งแสดงควมต้านทานต่อการขาดเป็นต้น รูปที่ 2.20 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของพอลิเมอร์ที่มีสมบัติต่างกันและตารางที่ 2.3 แสดงค่าสมบัติต่างๆที่ได้จากกราฟความเค้น – ความเครียดของพลาสติก ต่างๆกัน



รูปที่ 2.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด



รูปที่ 2.19 กราฟการทดสอบความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ที่มีสมบัติต่าง ๆ กัน

ตารางที่ 2.2 สมบัติของพลาสติกและค่าสมบัติต่างๆที่ได้จากกราฟ ความเค้น – ความเครียด [24]

ประเภทของ พลาสติก	ประเภทของกราฟความเค้น-ความเครียด			
	มอดุลัส	ความเค้น ณ จุดคราก	ความเค้นสูงสุด	ระยะการยืดตัว ณ จุดขาด
นิ่มและไม่แข็งแรง	ต่ำ	ต่ำ	ต่ำ	ปานกลาง
นิ่มและเหนียว	ต่ำ	ต่ำ	ปานกลาง	สูง
แข็งเปราะ	สูง	ไม่ชัดเจน	ปานกลาง	ต่ำ
แข็งแรง	สูง	สูง	สูง	ปานกลาง
แข็งและเหนียว	สูง	สูง	สูง	สูง

การคำนวณเกี่ยวกับสมบัติความทนแรงดึง

$$\text{ความทนแรงดึงสูงสุด} = \frac{\text{แรงดึงสูงสุด}}{\text{พื้นที่หน้าตัดที่น้อยที่สุดของชิ้นทดสอบ ณ จุดเริ่มต้น}}$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์การยืดตัว} = \frac{\text{ความยาวที่เพิ่มขึ้น ณ จุดขาด} \times 100}{\text{ความยาวเดิมของชิ้นทดสอบ}}$$

$$\text{มอดุลัส} = \frac{\text{ความเค้น}}{\text{ความเครียด}} = \frac{\text{แรง/พื้นที่หน้าตัด}}{\text{ความยาวที่ยืดออก/ความยาวเดิม}}$$

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความทนแรงดึง การยืดตัว และมอดุลัสของยัง

(1) การเตรียมชิ้นทดสอบและขนาดชิ้นทดสอบ

การจัดเรียงโครงสร้างโมเลกุล มีผลกระทบมากต่อค่าความทนแรงดึง การให้แรงขนานกับทิศทางการจัดเรียงตัวของโมเลกุลอาจให้ผลการทดสอบที่ได้สูงกว่าให้แรงตั้งฉากกับการจัดเรียงตัวของโมเลกุล การกระบวนการเตรียมชิ้นทดสอบก็มีผลกระทบสำคัญ

(2) อัตราความเครียด (rate of straining)

ถ้าอัตราความเครียดเพิ่มขึ้นจะให้ค่าความทนแรงดึงและมอดุลัสของยังเพิ่มขึ้นอย่างไรก็ตามการยืดยาวออกจะแปรผกผันกับสัดส่วนของอัตราความเครียด นั่นคือเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น การยืดตัวจะลดลง

(3) อุณหภูมิ (temperature)

สมบัติความทนแรงดึงของพลาสติกบางอย่างจะเปลี่ยนอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงน้อย เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความทนแรงดึงและมอดุลัสจะลดลง ขณะที่การยืดยาวเพิ่มขึ้น