

บทที่ 1

บทนำ

1.1 พอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer composites)[1-2]

พอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer composites) คือ วัสดุที่ประกอบด้วยส่วนประกอบอย่างน้อย 2 ชนิดที่มีสมบัติต่างกัน ทำให้ได้สารที่มีสมบัติที่ดีขึ้น และสามารถนำไปใช้งานได้ โดยทั่วไปประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน คือส่วนที่เป็นเมทริกซ์ (Matrix) ซึ่งจะเป็นสารพอลิเมอร์ และส่วนเสริมแรง (Reinforcement) ซึ่งตัวเสริมแรงจะมีลักษณะรูปร่างได้หลายแบบ อาจเป็นแผ่น เส้นใย หรือ อนุภาคเล็กๆ ก็ได้ ตัวเสริมแรงที่นิยมใช้ส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นเส้นใย (Fibre) โดยเส้นใยอาจมีความยาวต่อเนื่องตลอดความยาวของเมทริกซ์ หรืออาจจะเป็นเส้นใยขนาดสั้นกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ก็ได้ ความแข็งแรงของพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยจะถูกกำหนดโดยสมบัติของเส้นใย สัดส่วนโดยปริมาตรของเส้นใยในเมทริกซ์ ความยาวและการกระจายตัวของเส้นใย และความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ซึ่งต้องแข็งแรงเพียงพอที่จะป้องกันไม่ให้แรงกระทำจากภายนอกสามารถแยกเส้นใยและเมทริกซ์ออกจากกันได้

1.1.1 เมทริกซ์ (Matrix)

ในพอลิเมอร์คอมโพสิต เมทริกซ์ที่ใช้ อาจจะเป็นพวกเทอร์มอพลาสติก (Thermoplastic) หรือ เทอร์มอเซต (Thermosets) โดยที่เมทริกซ์มีหน้าที่ดังต่อไปนี้

- (1) ให้เส้นใยกระจายตัวและยึดเกาะตามทิศทางที่ต้องการ
- (2) ช่วยป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายกับเส้นใย
- (3) สามารถกระจายหรือส่งถ่ายแรงที่ได้รับจากภายนอกไปยังเส้นใยได้
- (4) ช่วยกำหนดรูปร่างและขนาดของวัสดุคอมโพสิต
- (5) ต้องเชื่อมต่อกับตัวเสริมแรง

พอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ใช้โดยทั่วไปแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่

- (1) เทอร์มอเซต (Thermoset)

พอลิเมอร์กลุ่มนี้เมื่อผ่านกรรมวิธีการผลิตจะมีรูปทรงถาวร ผลผลิตที่ได้นำไปหลอมอีกไม่ได้ และไม่ละลายในตัวทำละลาย คือ ไม่เกิดกระบวนการย้อนกลับ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้

เพราะว่าก่อนผ่านกระบวนการเตรียม โครงสร้างพอลิเมอร์ยังไม่เป็นร่างแห แต่เมื่อผ่านกระบวนการ โดยให้ความร้อนหรือความดันเข้าไป จะมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในโครงสร้าง โดยเกิดการเชื่อมโยง (Crosslinking) ระหว่างสายโซ่โมเลกุล มีการสร้างพันธะโควาเลนต์ระหว่างสายโซ่โมเลกุล ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความคงทนไม่หลอมเหลว ไม่ละลาย แต่ถ้าให้ความร้อนมากๆ จะไหม้เกรียมเกิดการสลายตัว และสมบัติเปลี่ยนไปจากเดิม

เทอร์โมเซตที่ใช้เป็นเมทริกซ์ส่วนใหญ่ ได้แก่ อีพอกซี พอลิเอสเทอร์ และ ไวนิลเอสเทอร์ เมื่อเทอร์โมเซตเรซินที่หลอมเหลวเริ่มแข็งตัว จะเกิดการเชื่อมโยงขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดรอยต่อที่แน่นของโครงสร้างสามมิติ การเกิดการเชื่อมโยงจะทำให้พอลิเมอร์แข็งตัว มีความต้านทานสารละลาย มีเสถียรภาพทางความร้อน และต้านทานการเกิดออกซิเดชันได้ดี สมบัติเหล่านี้จะสัมพันธ์โดยตรงกับความหนาแน่นของการเกิดการเชื่อมโยง นอกจากนี้เมื่อมีการเชื่อมโยงเกิดขึ้น น้ำหนักโมเลกุลของสายโซ่ระหว่างการเชื่อมโยง (Crosslinking) จะมีค่าลดลง ซึ่งทำให้การเคลื่อนที่ของโมเลกุลเกิดได้ยาก เกิดความเปราะ มีความสามารถในการยึดตัวต่ำ ความต้านทานต่อแรงกระแทกน้อย และไม่เหนียว

(2) เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic)

เทอร์โมพลาสติกจะละลายได้ดีในตัวทำละลายบางชนิด เมื่อถูกความร้อนสามารถหลอมตัวได้ และเมื่อเย็นลงก็จะแข็งตัว สามารถทำให้หลอมและแข็งตัวหลายๆ ครั้ง โดยไม่ทำให้สมบัติทางเคมีเปลี่ยนไป อาจแยกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มเทอร์โมพลาสติกอสัญฐาน (Amorphous thermoplastic) และ เทอร์โมพลาสติกที่มีผลึกบางส่วน (Semi-crystalline thermoplastic)

เทอร์โมพลาสติกจะไม่เกิดการเชื่อมโยง ดังนั้นความแข็งแรงและความแข็งของเมทริกซ์ที่ได้ นั้น เป็นผลโดยตรงจากสมบัติของหน่วยซ้ำหรือมอนอเมอร์ และน้ำหนักโมเลกุลที่สูง ตัวอย่างเทอร์โมพลาสติก เช่น พอลิสไตรีน พอลิพรอพิลีน และพอลิเอทิลีน เป็นต้น

1.1.2 ตัวเสริมแรง (Reinforcement)

เป็นส่วนที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรง (Reinforcement) ให้กับวัสดุ มีรูปร่างได้หลายแบบ อาจเป็นแผ่น เส้นใย หรือนอนุภาคก็ได้ ซึ่งส่วนใหญ่จะนิยมใช้ตัวเสริมแรงที่มีลักษณะเป็นเส้นใย ตัวอย่างเส้นใยที่ใช้เสริมแรงในพอลิเมอร์คอมโพสิต ได้แก่ เส้นใยแก้ว (Glass fibre) เส้นใยคาร์บอน (Carbon fibre) เส้นใยอะรามิด (Aramid fibre) และเส้นใยธรรมชาติต่างๆ

หน้าที่ของตัวเสริมแรงในคอมโพสิตมีดังต่อไปนี้

(1) เพิ่มความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์คอมโพสิต

(2) สามารถรับแรงกระแทกจากภายนอกที่กระทำต่อพอลิเมอร์คอมโพสิตได้ ช่วยไม่ให้เกิดการเสียหายหรือการผิครูปภายใต้แรงกระทำนั้นๆ โดยแรงกระทำนั้นจะถูกถ่ายทอดไปตามเส้นใย

โดยที่ลักษณะของเส้นใยที่เป็นตัวเสริมแรงที่ดี จะต้องมึลักษณะดังนี้

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

1.2 คอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ[3-5]

ในอดีตเส้นใยที่ใช้ในการเสริมแรงพอลิเมอร์คอมโพสิตจะนิยมใช้เส้นใยสังเคราะห์เป็นตัวเสริมแรง ได้แก่ เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน และเส้นใยอะรามิด โดยในกลุ่มเส้นใยสังเคราะห์เส้นใยที่ได้รับความนิยมมากที่สุด คือ เส้นใยแก้ว เนื่องจากมีราคาถูกเมื่อเทียบกับเส้นใยสังเคราะห์ด้วยกันเอง แต่เป้าหมายในการพัฒนาวัสดุคอมโพสิตในปัจจุบัน นอกจากจะมุ่งไปในเรื่องการปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของวัสดุให้ดีขึ้นแล้ว ยังต้องคำนึงถึงเรื่องของราคา และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมควบคู่กันไปด้วย ด้วยเหตุนี้เองจึงได้มีความสนใจที่จะนำเส้นใยธรรมชาติหลายชนิดมาใช้ประโยชน์ โดยใช้เป็นเส้นใยเสริมแรงในพอลิเมอร์คอมโพสิตทดแทนเส้นใยสังเคราะห์ เส้นใยธรรมชาติที่ถูกนำมาใช้เป็นเส้นใยเสริมแรงมีอยู่หลายชนิด แต่ส่วนใหญ่มักนิยมใช้เส้นใยจากพืช เช่น เส้นใยป่าน ปอ กัญชง ไชซอล (Sisal) ใยสับปะรด กาบกล้วย และไผ่ เป็นต้น

การที่เส้นใยธรรมชาติสามารถนำมาใช้เป็นเส้นใยในพอลิเมอร์เสริมแรงได้ เนื่องจากเส้นใยเหล่านี้มีสมบัติเด่นหลายด้าน ดังนี้

- ราคาถูกกว่าเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด เช่น เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน และเส้นใยอะรามิด เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติบางชนิดอาจได้มาจากขยะหรือของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมหรือเกษตรกรรม
- หาง่าย มีมากในธรรมชาติ
- ลดการสึกหรอที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต ทำให้อุปกรณ์ในการผลิตมีอายุการใช้งานยาวนาน
- ความหนาแน่นต่ำ น้ำหนักเบา เป็นผลให้วัสดุมีสมบัติจำเพาะ (สมบัติต่อน้ำหนักของวัสดุ) เช่น ความแข็งแรงจำเพาะ และมอดุลัสจำเพาะสูง
- ย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ ทำให้ไม่เป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม
- ไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของผู้ผลิตอย่างเช่นเส้นใยแก้ว

ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุคอม โพลีที่ใส่เส้นใยธรรมชาติเป็นตัวเสริมแรงกับวัสดุคอม โพลีที่ใส่อยู่ทั่วไป เช่น พวกที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว พบว่าคอม โพลีจากเส้นใยธรรมชาติมีน้ำหนักเบากว่า และมีความแข็งแรงจำเพาะดี

แต่อย่างไรก็ดี การใช้เส้นใยธรรมชาติเป็นตัวเสริมแรงในพอลิเมอร์คอม โพลีก็ยังมีข้อจำกัดที่ต้องการการปรับปรุงคือ

- เส้นใยธรรมชาติดูดซึ่มความชื้นได้ดี ทั้งนี้เพราะเส้นใยธรรมชาติชนิดที่มีโครงสร้างเป็นเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group; -OH) เป็นองค์ประกอบ จึงทำให้เส้นใยมีปริมาณความชื้นอยู่สูง ซึ่งส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอม โพลีที่ได้ เนื่องจากในระหว่างการขึ้นรูปพอลิเมอร์คอม โพลีที่มีเทอร์มอพลาสติกเป็นเมทริกซ์ ความชื้นที่มีอยู่ในเส้นใยจะส่งผลทำให้กระบวนการขึ้นรูปเสียหายและชิ้นงานที่ได้มีฟองอากาศ
- มีการยึดเกาะที่ไม่ดีกับวัสดุอื่น เช่น พอลิเมอร์เมทริกซ์ เนื่องจากเส้นใยมีสมบัติเข้ากันได้ดีกับน้ำ (Hydrophilic) แต่ในขณะที่พอลิเมอร์ส่วนใหญ่จะมีสมบัติเข้ากันกับน้ำได้ไม่ดี (Hydrophobic) สมบัติที่แตกต่างกันนี้เองทำให้การยึดเกาะระหว่างผิวของเส้นใยธรรมชาติกับพอลิเมอร์ไม่ดี เมื่อความแข็งแรงของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวเสริมแรงกับเมทริกซ์ต่ำ ทำให้พันธะไฮโดรเจนที่เกิดระหว่างเส้นใยด้วยกันเองมีความแข็งแรงกว่าเส้นใยจึงเกาะกลุ่มกันไม่กระจายตัวในเมทริกซ์

นอกจากนี้การใช้เส้นใยธรรมชาติมาเป็นส่วนเสริมแรง ยังมีข้อจำกัดอีกบางประการคือ เส้นใยธรรมชาติส่วนใหญ่จะมีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำ โดยทั่วไปจะเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 240°C ทำให้สมบัติต่างๆ ของเส้นใยธรรมชาติเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอม โพลีที่ได้ด้วย

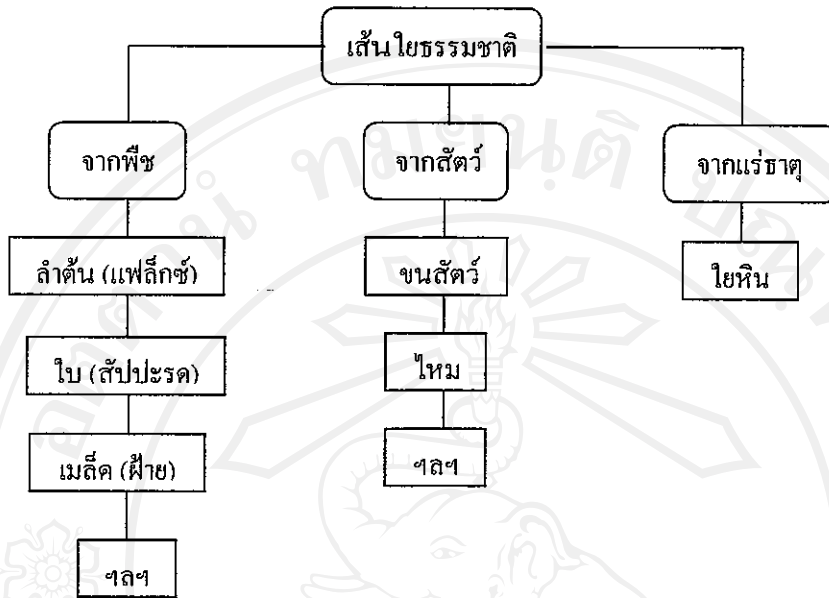
1.3 เส้นใยธรรมชาติ[3-6]

เส้นใยธรรมชาติเป็นวัสดุอินทรีย์ที่สำคัญ พบได้ง่ายทั่วไปตามธรรมชาติ เส้นใยธรรมชาติสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม ตามแหล่งกำเนิดเส้นใยแสดงดังรูป 1.1 ซึ่งจำแนกได้ดังนี้

(1) เส้นใยที่ได้มาจากพืช (Vegetable fibre) ซึ่งรวมถึงเส้นใยฝ้าย (Cotton) เส้นใยแฟลกซ์ (Flax) เส้นใยป่าน ปอ และพืชชนิดอื่นๆ เช่น สับปะรด ผักตบชวา และกล้วย เป็นต้น เส้นใยเหล่านี้จะมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นพวกเซลลูโลส (Cellulose)

(2) เส้นใยที่ได้มาจากสัตว์ (Animal fibre) เป็นเส้นใยที่ได้มาจากสัตว์ เช่น แพะ แกะ และไหม เป็นต้น ซึ่งเส้นใยเหล่านี้จะมีส่วนประกอบของกรดอะมิโนต่างๆ ประกอบเป็นโปรตีน

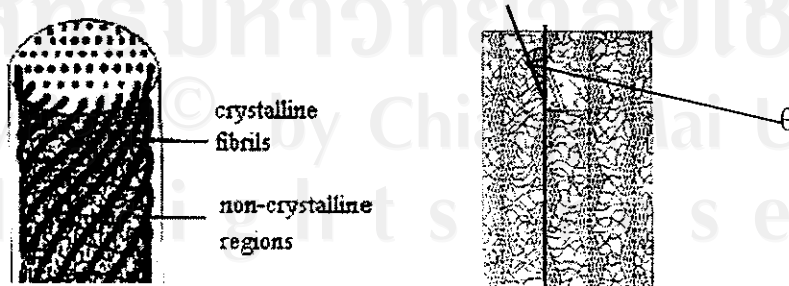
(3) เส้นใยที่ได้มาจากแร่ธาตุ (Mineral fibre) ซึ่งไม่ค่อยจะนิยมใช้ในงานสิ่งทอปกติ แต่จะนิยมใช้กับงานด้านทนไฟ และความร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเส้นใยหิน (Asbestos)



รูป 1.1 การจำแนกเส้นใยตามแหล่งกำเนิด[6]

1.3.1 โครงสร้างของเส้นใยเซลลูโลส

เส้นใยธรรมชาติจำพวกเส้นใยพืชเป็นเส้นใยเซลลูโลส ประกอบด้วย ไมโครไฟบริล (Microfibrils) ซึ่งเป็นส่วนที่มีการจัดเรียงตัวอยู่ในส่วนอสัญฐานที่เป็นพวกลิกนิน (lignin) และเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) โดยไมโครไฟบริลจะเรียงตัวตามความยาวของเส้นใย มุมที่เกิดขึ้นระหว่างการจัดเรียงตัวของ fibril กับแนวแกนเส้นใย เรียกว่า Microfibrillar angle ซึ่งลักษณะโครงสร้างภายในของเส้นใยเซลลูโลสแสดงดังรูป 1.2 การเกิดพันธะไฮโดรเจนและการพันกันภายในเส้นใยทำให้เกิดความแข็งแรง (Strength) และความแข็งตึง (Stiffness) ของเส้นใย



รูป 1.2 โครงสร้างภายในของเส้นใยเซลลูโลส (θ = Microfibrillar angle) [5]

1.3.2 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยเซลลูโลส

องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยเซลลูโลสขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใย โดยทั่วไปเส้นใยจะประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส เพคติน และลิกนิน ซึ่งสมบัติของแต่ละองค์ประกอบจะส่งผลกระทบต่อสมบัติของเส้นใยด้วย เฮมิเซลลูโลสจะเกี่ยวข้องกับการย่อยสลายตัวตามธรรมชาติของเส้นใย การดูดซึมน้ำ และการสลายตัวทางความร้อนของเส้นใย ส่วนลิกนินค่อนข้างเสถียรต่อความร้อนแต่จะสลายตัวเมื่อได้รับแสงแดด ดังนั้นถ้าสัดส่วนของแต่ละองค์ประกอบที่มีอยู่ในเส้นใยนั้นแตกต่างกันจึงส่งผลทำให้สมบัติของเส้นใยเซลลูโลสนั้นๆ แตกต่างกันไป สัดส่วนขององค์ประกอบของเส้นใยเซลลูโลสโดยทั่วไปจะมี เซลลูโลส 60-80% ลิกนิน 5-20% และความชื้นสูงสุด 20%

1.3.3 การดัดแปรเส้นใย (Fibre modification)

จากสมบัติการเข้ากันได้ดีกับน้ำของเส้นใยธรรมชาตินี้เองที่ทำให้เกิดปัญหาความไม่เข้ากันระหว่างเส้นใยเซลลูโลสกับเมทริกซ์ การยึดเกาะระหว่างผิวของเส้นใยเซลลูโลสกับพอลิเมอร์เกิดได้ไม่ดี การถ่ายเทความร้อนและกระจายแรงกระทำที่ได้รับจากภายนอกระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์จึงทำได้ไม่ดีด้วย ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต การกำจัดปัญหาดังกล่าวของเส้นใยเซลลูโลสสามารถทำได้โดยทำการดัดแปรสมบัติของเส้นใย เพื่อเพิ่มสมบัติการต้านทานการดูดซึมน้ำและเพิ่มการยึดเกาะระหว่างผิวของเส้นใยกับพอลิเมอร์ การดัดแปรสมบัติของเส้นใยสามารถทำได้ทั้งทางกายภาพ (Physical method) และทางเคมี (Chemical method).

(1) การดัดแปรสมบัติทางกายภาพของเส้นใย จะเป็นการเปลี่ยนแปลงเฉพาะโครงสร้างและสมบัติทางพื้นผิวของเส้นใยเท่านั้น ไม่ได้ทำการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย เช่น วิธีทางไฟฟ้า (Electrical discharge method และ Corona treatment)

(2) การดัดแปรสมบัติทางเคมีของเส้นใย จะเป็นการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย โดยนำสารเคมีบางอย่างมาทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (-OH groups) ของเส้นใย ทำให้เกิดการต่อกิ่งของหมู่ฟังก์ชัน หรือเกิดการยึดเกาะที่ผิวนอก เช่น การทำปฏิกิริยากับสารคู่ควบ (Coupling agent treatments) การทำโคพอลิเมอร์ด้วยการต่อกิ่ง (Graft copolymerization) และอะเซทิลเลชัน (Acetylation)

ซึ่งพอลิเมอร์แต่ละชนิดก็มีความชอบที่จะเข้ากันได้กับเส้นใยเซลลูโลสที่ผ่านการดัดแปรแตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากพอลิเมอร์แต่ละชนิดนั้นมีโครงสร้างทางเคมีแตกต่างกัน ดังนั้นการเลือกที่จะใช้การดัดแปรเส้นใยด้วยวิธีใดก็ต้องคำนึงถึงเรื่องการเข้ากันได้กับตัวเมทริกซ์ที่ใช้ด้วย

1.4 เส้นใยจากใบสับปะรด (Pineapple leaf fibre)[7-8]

สับปะรด (Pineapple) เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวที่มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Ananas comosus(L) Marr.* ในตระกูล Bromelaceae การปลูกสับปะรดในประเทศไทยในปี 2543 มากถึง 608,235 ไร่ และให้ผลผลิตสับปะรดมากที่สุดในโลก มีปลูกอยู่ทั่วทุกภาคของประเทศไทย ภาคกลางมีปลูกที่ สุพรรณบุรี ราชบุรี และกาญจนบุรี ภาคเหนือที่ ลำปาง เชียงราย และอุทัยธานี ภาคตะวันออกที่ ชลบุรี ระยอง จันทบุรี และตราด ภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่ อุดรธานี หนองคาย และนครพนม และภาคใต้ที่เพชรบุรี ประจวบคีรีขันธ์ และชุมพร

ลักษณะทั่วไปของสับปะรดคือ มีใบสีเขียวเข้มและเป็นร่องตรงกลาง ผิวใบด้านบนเป็นมันเงา ส่วนใต้ใบจะมีสีออกเทาเงิน ขอบใบเรียบมีหนามเล็กน้อยบริเวณปลายใบ กลีบดอกมีสีม่วงอมน้ำเงิน ผลมีขนาดและรูปร่างต่างกันไป เปลือกผลเมื่อดิบมีสีเขียวคล้ำ เมื่อแก่จัดจะเป็นสีเหลืองอมส้มทางด้านล่างสับปะรดประมาณครึ่งผล

การปลูกสับปะรดสามารถทำได้โดยใช้จุกหรือหน่อ มีอายุตั้งแต่ปลูกจนถึงการเก็บผลประมาณ 15-21 เดือน เกษตรกรรับเทคโนโลยีการใช้สารเคมีแคลเซียมคาร์ไบด์ (CaC_2) บังคับให้สับปะรดออกผลและแก่พร้อมกันในเวลาที่ต้องการเพื่อตัดผลส่งโรงงาน จึงมีการตัดผลสับปะรดหมุนเวียนเพื่อป้อนโรงงานตลอดทั้งปี หลังการเก็บผลแล้วใบจะถูกตัดแล้วถูกนำมากองรวมกันไว้ในแปลงปลูก ทำให้เกิดการหมักเน่าเป็นแหล่งเพาะจุลินทรีย์ และส่งผลให้เกิดการระบาดของโรคพืชหลายโรค เช่น โรคยอดเน่า โรคโคนเน่า โรครากเน่า เป็นต้น เกษตรกรต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการกำจัดเชื้อรา ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มขึ้น นับว่าใบสับปะรดเป็นเศษเหลือทางการเกษตรที่ต้องการการวิจัยและพัฒนาเพื่อเพิ่มมูลค่า

1.4.1 ประโยชน์ของสับปะรด

สับปะรดมีส่วนต่างๆ ที่ใช้ประโยชน์ได้กว้างขวางดังนี้

(1) เนื้อ ใช้รับประทานสดหรือแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์สับปะรดอื่นๆ เช่น สับปะรดกวน แยมสับปะรด หรือนำมาบรรจุกระป๋อง ผลพลอยได้จากเศษเหลือของเนื้อสับปะรดจากอุตสาหกรรมบรรจุกระป๋อง สามารถนำมาแปรรูปทำอย่างอื่นได้ เช่น น้ำเชื่อม น้ำส้มสายชู ไวน์

(2) เปลือก มีการใช้เปลือกสับปะรดที่เป็นเศษเหลือทิ้งจากโรงงานเพื่อเลี้ยงวัว

(3) ใบ ใบสับปะรดให้เส้นใยซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ทางด้านสิ่งทอได้ มีการผลิตในเชิงการค้าที่ฟิลิปปินส์ตั้งแต่ศตวรรษที่ 17 เส้นใยที่ได้จากใบสับปะรดมีความยาวเท่าขนาดใบ สามารถจัดแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ

- เส้นใยหยาบ (Coarse fibre) หรือ Bastos เป็นเส้นใยมีสีน้ำตาล เส้นใยหยาบ มีปริมาณ 75% ของเส้นใยทั้งหมด ใช้ทำเชือกผูกกรองเท้า เชือกเย็บรองเท้า ใช้ร้อยสายสร้อยคอ ทำพมตุ๊กตา และด้ายเย็บผ้าสมัยสงครามโลกครั้งที่ 2
- เส้นใยละเอียด (Fine fibre) หรือ Pinarupok เป็นเส้นใยสีขาวนวลสะอาด เส้นใยมีขนาดเล็กและนุ่ม มีความมันและเงางามคล้ายไหม มีความเหนียวทนต่อการหักพับมากแต่เหนียวน้อยกว่าเส้นใยหยาบ มีปริมาณ 25% ของเส้นใยทั้งหมด สามารถทอเป็นผ้าบางเนื้อละเอียดที่มีความนุ่มนวล แต่มีความคงรูปในเนื้อผ้า จับโค้งได้ และรูปทรงดี สามารถปกคลุมลายอันวิจิตรลงบนพื้นผ้าได้ นอกจากนี้การย้อมสีหรือเติมสารตกแต่งผ้าทำได้ง่ายและหลายหลาย รวมทั้งการดูแลรักษาง่าย ใช้ประโยชน์ในทำเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น เส้นด้าย ทอเป็นผ้าพันคอ ชุดแต่งงาน ชุดราตรี และเสื้อเชิ้ตบารอง
- เส้นใยละเอียดมาก (Finest fibre) หรือ Liniuan เป็นเส้นใยที่มีการคัดเลือกแยกออกมาอย่างประณีต

1.4.2 การแยกเส้นใยจากใบสับปะรด

สิ่งสำคัญในการแยกเส้นใยจากใบสับปะรดเพื่อนำเส้นใยไปใช้ประโยชน์ ก็คือ การคัดเลือกใบที่จะให้เส้นใยที่เหนียวและยืดหยุ่นได้ดี เส้นใยที่มีคุณภาพจะแยกได้จากใบสับปะรดที่ไม่แก่จัดจนเกินไป ใบสด และมีความสมบูรณ์ ใบอ่อนจะให้เส้นใยนุ่มแต่ไม่เหนียว ส่วนใบที่แก่เกินไปจะได้อะไรเส้นใยค่อนข้างสั้นและกระด้าง

การแยกเส้นใยเป็นขั้นตอนของการผลิตเส้นใยที่สำคัญ วิธีในการแยกเส้นใยจากพืชอาจแตกต่างกัน เช่น เส้นใยที่ได้จากลำต้นหรือกิ่ง นิยมใช้วิธีการแช่หมัก เส้นใยที่ได้จากใบนิยมขูดแยกเส้นใยด้วยมือหรือใช้เครื่องทุ่นแรงช่วยแยก ซึ่งการแยกเส้นใยจากใบสับปะรดสามารถทำได้ 3 วิธี คือ

(1) การแยกเส้นใยจากใบสับปะรดสดด้วยมือ (Scraping) โดยใช้อุปกรณ์ช่วยขูดแยก เป็นวิธีการแยกเส้นใยที่สิ้นเปลืองเวลามากและเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน เพราะเวลาน้ำจากใบสับปะรดสดมีสภาพเป็นกรดจัด ทำให้ผิวหนังของผู้ปฏิบัติงานที่สัมผัสเปียก ผู้ที่แพ้มากๆ ผิวหนังบริเวณนี้ก็จะแตกเป็นร่องลึกตามรอยย่นของผิวหนัง จะมีน้ำเหลืองหรือโลหิตไหลซึม ซึ่งเส้นใยที่ได้จากการขูดแยกด้วยมือมีคุณภาพดี

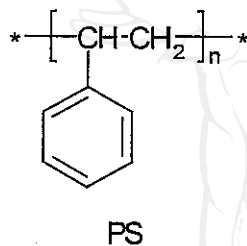
(2) การแช่หมักเพื่อแยกเส้นใยออกจากใบสับปะรดสด (Water retting) ในการแช่หมักแบคทีเรียจะเป็นตัวทำลายเนื้อเยื่อให้เน่าเปื่อย แล้วจึงแยกเส้นใยออกจากผิวและเนื้อใบ แบคทีเรียจะไปย่อยสลายเพคติน (Pectin) จากเนื้อเยื่อรอบกลุ่มเส้นใย (Fibre bundle) ออก ให้แยกออกเป็นเส้น

เดี่ยว การแช่หมักใช้เวลาประมาณ 5-12 วัน ต้องระมัดระวังให้ใบสับปะรดจมอยู่ใต้น้ำตลอดเวลา แช่หมัก จึงควรใช้วัสดุหนักพอควรวางทับข้างบนเพื่อให้ใบอยู่ใต้น้ำตลอดเวลาที่แช่หมัก ถ้าแช่หมักในทางน้ำไหล จะช่วยให้สีของเส้นใยสวยขึ้นและไม่มึกลื่นเหนียว การควบคุมการแช่หมัก ต้องมีความปราณีตและชำนาญมากจึงจะไม่เกิดความเสียหาย การแช่หมักนานเกินไปมีผลให้เส้นใย เปื่อยขาดง่าย

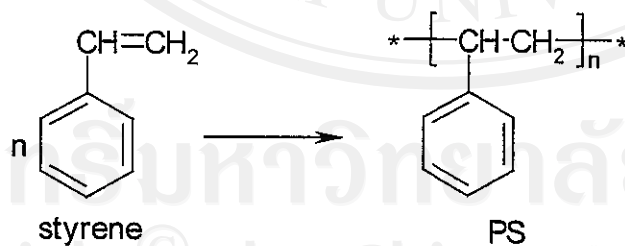
(3) การแยกเส้นใยจากใบสับปะรดสดด้วยเครื่อง (Decorticating machine) พบว่าการแยกเส้นใยจากใบสับปะรดด้วยเครื่องแยกเส้นใย สามารถแยกเส้นใยได้รวดเร็วกว่าการชูดด้วยมือ หรือการแช่หมัก แต่ก็ยังมีข้อจำกัดบางอย่าง เช่น การขาดของเส้นใย และได้เปอร์เซ็นต์ของเส้นใย แห่งต่ำ

1.5 พอลิสไตรีน (Polystyrene)[9-11]

พอลิสไตรีน มีสูตร โครงสร้างคือ



พอลิสไตรีนเตรียมจากมอนอเมอร์สไตรีน โดยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบรวมตัว ได้ตั้งสมการ



มักใช้ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันที่มีกลไกแบบเรดิคัลอิสระในการเตรียมพอลิสไตรีน โดยเทคนิคแบบบับเบิล (Bulk) หรือแบบแขวนลอย (Suspension) แต่ก็สามารถเตรียมได้โดยเทคนิคสารละลายและแบบอิมัลชันได้ด้วย

1.5.1 สมบัติของพอลิสไตรีน

พอลิสไตรีนมีความหนาแน่น 1.05 g/cm^3 มีโครงสร้างเชิงเส้นตรงแบบอะแทกติก และเป็นอสัณฐาน (Amorphous) หรือไม่มีความเป็นผลึกเลย จึงมีสมบัติโปร่งแสงและใส มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature; T_g) 80°C จุดความชื้นได้ต่ำ เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี ถ้ายังไม่ได้ผ่านการผสมสารอื่นลงไปจะมีสมบัติแข็ง ไม่ยืดหยุ่น เปราะ แตกหักง่าย ทนต่อแรงกระแทกได้ต่ำ พอลิสไตรีนสามารถละลายในตัวทำละลายหลายชนิด ได้แก่ ตัวทำละลายจำพวกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน เช่น เบนซีนและโทลูอีน ในตัวทำละลายจำพวกคลอริเนตไฮโดรคาร์บอน เช่น คาร์บอนเตตระคลอไรด์ คลอโรฟอร์ม ไตรคลอโรเอทิลีน คลอโรเบนซีน และ 1,2-ไดคลอโรเบนซีน ในตัวทำละลายจำพวกคีโตน เช่น เมทิลเอทิลคีโตน และตัวทำละลายจำพวกเอสเตอร์ เช่น เอทิลอะซิเตต แต่พอลิสไตรีนจะไม่ละลายในแอลกอฮอล์ และ ไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว เช่น เฮกเซน เฮปเทน เป็นต้น พอลิสไตรีนมีสมบัติเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีทั่วไป พอลิเมอร์นี้สามารถทนทานต่อกรดแก่และเบสแก่ทั่วไปเป็นอย่างดี สามารถทนต่อกรดเฮไลด์ ตัวออกซิไดส์ และตัวรีดิวซ์ทั่วไป อย่างไรก็ตามสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์นี้จะเสื่อมลงถ้าให้พอลิเมอร์นี้สัมผัสกับแสงแดดที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานๆ เช่น อาจเปลี่ยนเป็นสีเหลืองและเกิดรอยแตกได้

พอลิสไตรีนที่ผลิตทางการค้ามี 2 แบบ คือ แบบใช้งานทั่วไป (General purpose; GPPS) กับแบบทนแรงกระแทกได้สูง (High impact; HIPS) ซึ่งแบบหลังนี้จะเป็นพอลิเมอร์ร่วมกับบิวตะไดอินประมาณ 5%

1.5.2 การนำไปใช้ประโยชน์ของพอลิสไตรีน

พอลิสไตรีนใช้ประโยชน์ในการทำฉนวน ฟิล์มวิดิทัศน์ ไม้บรรทัด ค้ำปากกา ลูกกอล์ฟ ของเล่น องค์ประกอบของเครื่องใช้ไฟฟ้า ภาชนะและขวดบรรจุอาหาร ใช้ทำโฟม ใช้ทำเรซิน แลกเปลี่ยนไอออน เป็นต้น

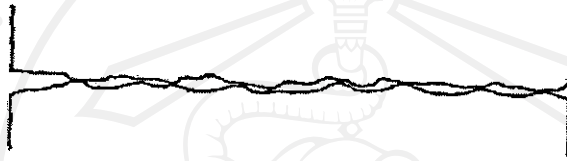
1.6 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ (Fibre-matrix interface)[1, 12-13]

สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีเส้นใยเป็นตัวเสริมแรงไม่ได้ขึ้นกับความแข็งแรงของเส้นใยและเมทริกซ์เท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับลักษณะของผิวสัมผัสระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ซึ่งพบว่าผิวสัมผัสระหว่างเส้นใย และ เมทริกซ์เป็นส่วนสำคัญทำให้พอลิเมอร์คอมโพสิตมีสมบัติเชิงกลใกล้เคียงกับทฤษฎี ในทางปฏิบัติ ระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์จะต้องมีแรงยึดเหนี่ยวที่ดีเพื่อใช้ในการถ่ายเทแรงกระทำจากเมทริกซ์สู่เส้นใย ซึ่งแรงยึดเหนี่ยวนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดและธรรมชาติของพันธะที่เกิดขึ้น อาจมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของเมทริกซ์และเส้นใยที่ใช้ในแต่ละระบบ

แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์แบ่งออกเป็น 5 ประเภท คือ

(1) การดูดซับและการเปียก (Adsorption and Wetting)

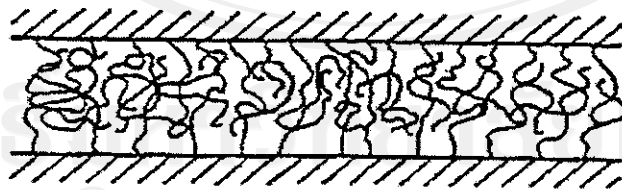
เมื่อผิวสัมผัสของวัตถุ 2 ชนิดที่ผิวหยาบเข้าใกล้กันจะเกิดแรงยึดเหนี่ยวที่เรียกว่า แรงแวน-เดอร์วาลส์ (Van der waals force) ซึ่งที่ผิวสัมผัสของวัตถุทั้ง 2 ชนิดจะเข้าใกล้ชิดกันและทำให้แรงยึดเหนี่ยวมีค่ามากขึ้น ต้องทำให้ผิวสัมผัสของวัตถุทั้ง 2 ชนิดเกิดการดูดซับและการเปียกได้ดี โดยทำให้วัตถุชนิดหนึ่งเป็นของเหลวที่มีความหนืดต่ำ เพื่อทำให้เกิดการกระจายไปยังพื้นผิวอีกชนิดหนึ่งทำให้เกิดการสัมผัสระหว่างผิวสูงสุด (Maximum interface contact) ดังรูป 1.3



รูป 1.3 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสัมผัสสองผิวหยาบ[1]

(2) การแพร่ (Diffusion)

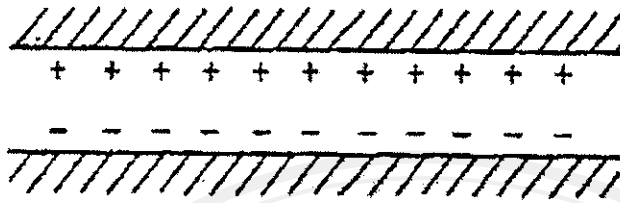
การยึดติดระหว่างผิวของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดอาจเกิดได้จากการแพร่ระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์บนผิวสัมผัสหนึ่งไปยังโครงสร้างตาข่ายโมเลกุลของอีกผิวสัมผัสหนึ่งทำให้เกิดการยึดติดกันของวัตถุทั้ง 2 ชนิด ความแข็งแรงของการยึดเหนี่ยวขึ้นอยู่กับความยืดหยุ่น (Flexibility) และสภาพการเคลื่อนที่ได้ (Mobility) ของสายโซ่โมเลกุลในพอลิเมอร์ การแพร่จะแบ่งออกเป็นสองชนิด คือ การแพร่ของโมเลกุลในทิศทางเดียว และการแพร่ของโมเลกุลในสองทิศทาง แสดงดังรูป 1.4



รูป 1.4 การแพร่ระหว่างโมเลกุล[1]

(3) การดึงดูดในทางไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic attraction)

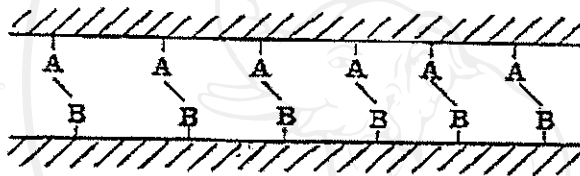
แรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์ จะทำให้เกิดการยึดติดระหว่างผิวสัมผัสที่มีขั้วไฟฟ้าต่างกัน จะยึดติดกันดีขึ้น เช่น กรณีแรงกระทำระหว่างกรดและเบสหรือแรงดึงดูดไอออนิก แสดงดังรูป 1.5



รูป 1.5 แรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์[1]

(4) พันธะเคมีระหว่างผิวสัมผัส (Chemical bonds across the interface)

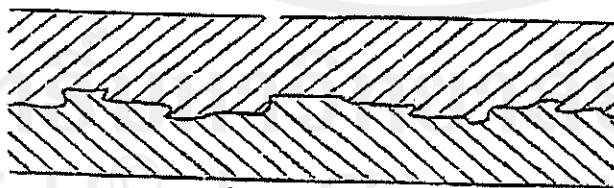
การยึดติดแบบนี้โดยทั่วไปเกิดในกรณีที่มีการใช้ตัวประสานคู่ควบ (Coupling agent) คือ พันธะเคมีถูกสร้างขึ้นโดยหมู่ทางเคมีที่มาจากผิวของเส้นใยและเมทริกซ์ ความแข็งแรงของการยึดติดขึ้นอยู่กับจำนวนและชนิดของพันธะที่เกิดขึ้น แสดงดังรูป 1.6



รูป 1.6 พันธะเคมีระหว่างผิวสัมผัส[1]

(5) การยึดติดเชิงกล (Mechanical adhesion)

เกิดจากการแพร่กระจายของเมทริกซ์บนเส้นใยที่มีรูพรุน เมทริกซ์จะทำหน้าที่เป็นตัวยึดเหนี่ยวเส้นใยไว้ โดยทั่วไปแล้วเส้นใยจะต้องถูกปรับสภาพผิว ซึ่งจะทำให้ผิวของเส้นใยหยาบขึ้น โดยการละลายส่วนที่เป็นออสซิลลูแลนที่ผิวออกไป ทำให้เมทริกซ์สามารถแผ่กระจายและแทรกตัวไปบนผิวของเส้นใยได้ดีขึ้น ดังนั้นกลไกนี้จะขึ้นกับระดับความหยาบของเส้นใย แสดงดังรูป 1.7



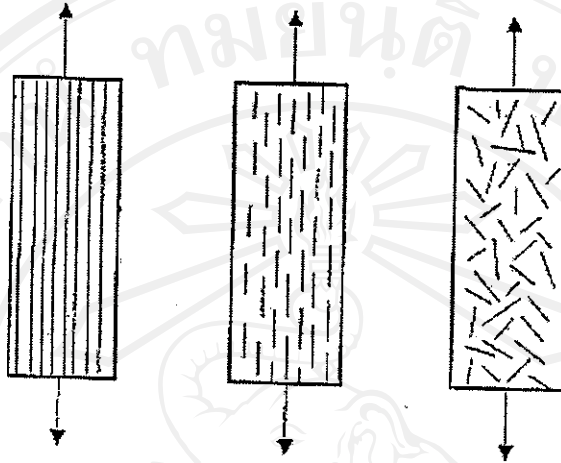
รูป 1.7 การยึดติดเชิงกล[1]

1.7 การเสริมแรง (Reinforcement)[1,14]

1.7.1 ชนิดของการเสริมแรง

การเรียงตัวของเส้นใยในเมทริกซ์ ในพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใย เส้นใยอาจจะมีการเรียงตัวเป็น 3 แบบ ดังรูป 1.8 คือ

- (1) เส้นใยต่อเนื่องเรียงตัวในทิศทางเดียว (Unidirectional continuous fibres)
- (2) เส้นใยไม่ต่อเนื่องเรียงตัวในทิศทางเดียว (Aligned discontinuous fibres)
- (3) เส้นใยไม่ต่อเนื่องเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ (Randomly oriented discontinuous fibres)



รูป 1.8 การเรียงตัวของเส้นใยในพลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใย[14]

1.7.2 กลไกการเสริมแรงด้วยเส้นใย

เมื่อเส้นใยต่อเนื่องเรียงตัวในทิศทางเดียว พอลิเมอร์คอมโพสิตชนิดนี้จะมีเส้นใยยาวเรียงตัวในทิศทางเดียวกันอย่างต่อเนื่องตลอดความยาวของเมทริกซ์ ถ้าสมมุติว่าเส้นใยทุกเส้นเหมือนกัน และพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์สมบูรณ์ ถ้าให้แรงกระทำจากภายนอกอยู่ในทิศทางเดียวกับทิศทางที่เส้นใยเรียงตัวอยู่ในเมทริกซ์ ความเครียด (strain; ϵ) ในพอลิเมอร์คอมโพสิตจะเท่ากับความเครียดของเส้นใยและเมทริกซ์ แรงกระทำต่อพอลิเมอร์คอมโพสิต (W_c) จะถูกแบ่งไปยังเส้นใย (W_f) และเมทริกซ์ (W_m) แสดงดังรูป 1.9

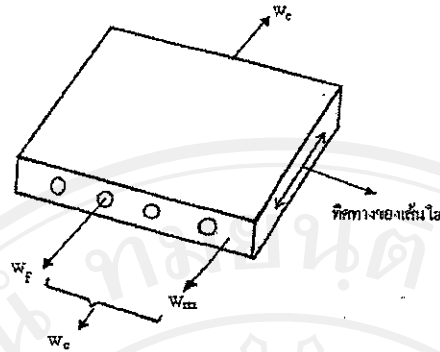
ในกรณีที่ให้แรงกระทำในทิศทางเดียวกับทิศทางที่เส้นใยเรียงตัวอยู่ในเมทริกซ์

$$\text{ดังนั้น} \quad W_c = W_f + W_m \quad (1.1)$$

$$\text{เนื่องจาก} \quad W = \sigma A \quad (1.2)$$

เมื่อ σ คือค่าความเค้นเฉลี่ย (Average stress) และ A คือพื้นที่หน้าตัด

$$\text{ดังนั้น} \quad \sigma_c A_c = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m \quad (1.3)$$



รูป 1.9 แรงกระทำต่อพอลิเมอร์คอมโพสิตกรณีเส้นใยต่อเนื่องเรียงตัวในทิศทางเดียวตลอดความยาวของเมทริกซ์

ค่าความเค้น σ_c , σ_f และ σ_m เป็นค่าความเค้นเฉลี่ยของพอลิเมอร์คอมโพสิต เส้นใย และเมทริกซ์ ตามลำดับ และ A_c , A_f และ A_m เป็นพื้นที่หน้าตัดของพอลิเมอร์คอมโพสิต เส้นใย และเมทริกซ์ ส่วน l_c , l_f และ l_m เป็นความยาวของพอลิเมอร์คอมโพสิต เส้นใย และ เมทริกซ์ ตามลำดับ จะได้สมการใหม่ ดังนี้

$$\sigma_c = \frac{\sigma_f A_f}{A_c} + \frac{\sigma_m A_m}{A_c} \quad (1.4)$$

$$\text{สัดส่วนโดยปริมาตรของเส้นใย} (V_f) = \frac{\text{ปริมาตรของเส้นใย}}{\text{ปริมาตรของวัสดุผสม}} = \frac{A_f l_f}{A_c l_c} = \frac{V_f}{V_c}$$

เมื่อ ความยาวของเส้นใยเท่ากับความยาวของพอลิเมอร์คอมโพสิต จะได้

$$\text{สัดส่วนโดย ปริมาตรของ เส้นใย} (V_f) = \frac{\text{ปริมาตรของ เส้นใย}}{\text{ปริมาตรของ วัสดุผสม}} = \frac{A_f}{A_c} \quad (1.5)$$

$$\text{สัดส่วนโดยปริมาตรของเมทริกซ์} (V_m) = \frac{\text{ปริมาตรของเมทริกซ์}}{\text{ปริมาตรของวัสดุผสม}} = \frac{A_m l_m}{A_c l_c} = \frac{V_m}{V_c}$$

เมื่อความยาวของเมทริกซ์เท่ากับความยาวของพอลิเมอร์คอมโพสิต จะได้

$$\text{สัดส่วนโดยปริมาตรของเมทริกซ์} (V_m) = \frac{\text{ปริมาตรของเมทริกซ์}}{\text{ปริมาตรของวัสดุผสม}} = \frac{A_m}{A_c} \quad (1.6)$$

แทนสมการ (1.5) และ (1.6) ลงในสมการ (1.4) จะได้

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad (1.7)$$

และ $V_f + V_m = 1 \quad (1.8)$

ดังนั้น $\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m (1 - V_f) \quad (1.9)$

เมื่อพอลิเมอร์คอมโพสิต เส้นใยและเมทริกซ์มีสมบัติของความยืดหยุ่น ค่าความเค้น (Stress; σ) จะมีความสัมพันธ์กับค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus; E) ดังนี้

$$\sigma_c = E_c \epsilon_c, \quad \sigma_f = E_f \epsilon_f, \quad \sigma_m = E_m \epsilon_m \quad (1.10)$$

เนื่องจากค่าความเครียดของพอลิเมอร์คอมโพสิต (ϵ_c) เส้นใย (ϵ_f) และเมทริกซ์ (ϵ_m) ในพอลิเมอร์คอมโพสิต เท่ากัน

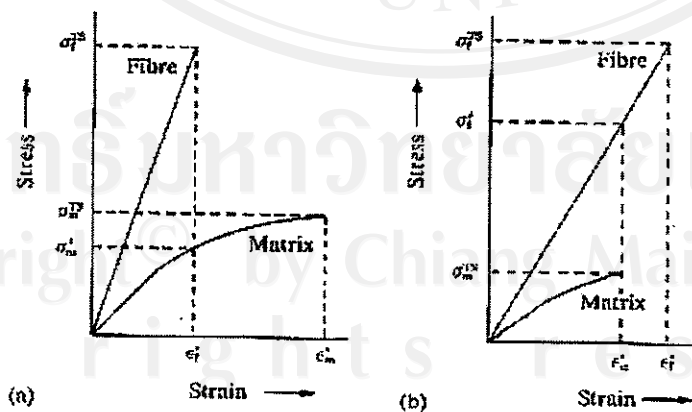
$$\epsilon_c = \epsilon_f = \epsilon_m \quad (1.11)$$

ดังนั้น $E_c = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (1.12)$

เมื่อ E_c , E_f และ E_m คือค่ามอดูลัสของยังของพอลิเมอร์คอมโพสิต เส้นใย และเมทริกซ์ตามลำดับ

ซึ่งค่าความเค้นของพอลิเมอร์คอมโพสิต (σ_c) ที่ได้จากสมการ (1.9) จะเป็นเพียงค่าความเค้นเฉลี่ยของพอลิเมอร์คอมโพสิต ณ จุดที่ความเครียดคงที่ค่าหนึ่งเท่านั้น ไม่ใช่ความเค้นที่จุดแตกหักหรือความทนแรงดึงสูงสุด (σ_c^{TS}) ของพอลิเมอร์คอมโพสิต ซึ่งในการพิจารณาถึงค่า σ_c^{TS} ของพอลิเมอร์คอมโพสิตนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กรณี โดยคำนึงถึงความสัมพันธ์ของค่าความเครียด ณ จุดแตกหัก (ϵ^*) ของทั้งเส้นใยและเมทริกซ์ที่ใช้ในระบบเป็นสำคัญ

กรณีที่ 1 เมื่อพอลิเมอร์คอมโพสิตได้จากการผสมระหว่างเมทริกซ์ที่ยืดหยุ่นกับเส้นใย กรณีนี้ค่าความเครียด ณ จุดแตกหักของเมทริกซ์มีค่ามากกว่าของเส้นใย ($\epsilon_m^* > \epsilon_f^*$) ดังรูป 1.10(a)



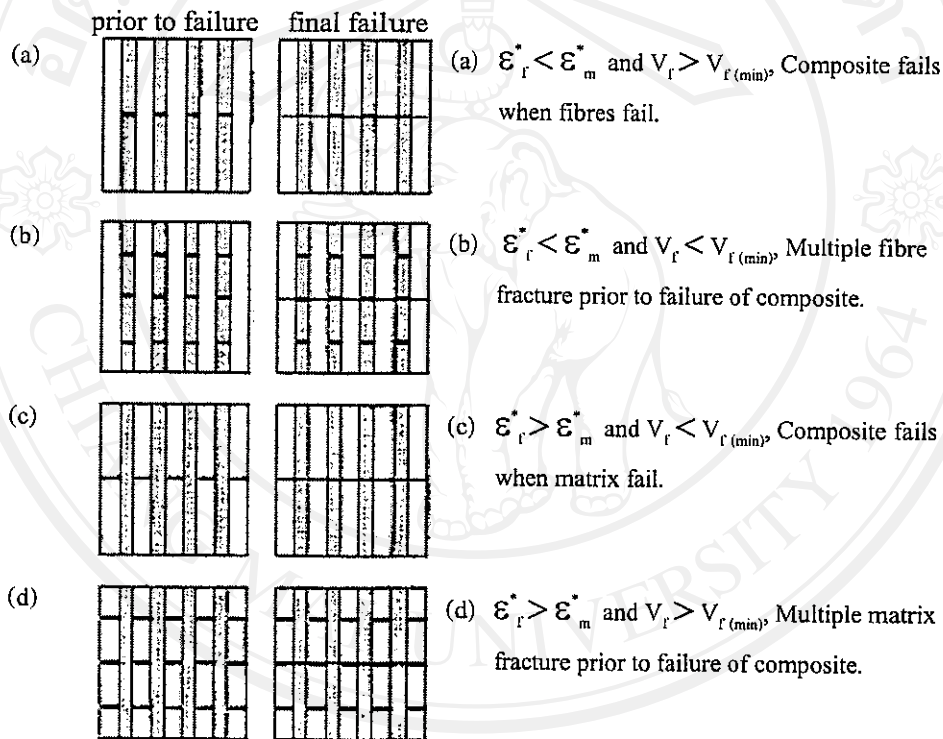
รูป 1.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเส้นใยและเมทริกซ์ เมื่อ (a) เป็นระบบที่ใช้เมทริกซ์ที่ยืดหยุ่น ($\epsilon_m^* > \epsilon_f^*$) ส่วน (b) เป็นระบบที่ใช้เมทริกซ์ที่เปราะ ($\epsilon_m^* < \epsilon_f^*$) [14]

เมื่อสัดส่วนโดยปริมาตรของเส้นใย (V_f) สูงเกินกว่า สัดส่วนโดยปริมาตรของเส้นใยที่ต่ำที่สุด ($V_{f(min)}$) พอลิเมอร์คอมโพสิตจะเกิดการเสียหายเมื่อเส้นใยเสียหาย ดังนั้น

$$\sigma_c^{TS} = \sigma_f^{TS} V_f + \sigma'_m V_m \quad (1.13)$$

- เมื่อ σ_c^{TS} = ค่าความทนแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิต
- σ_f^{TS} = ค่าความทนแรงดึงของเส้นใย
- σ'_m = ค่าความเค้นแบบดึงของเมทริกซ์ในพอลิเมอร์คอมโพสิต ณ ความเครียดที่ทำให้พอลิเมอร์คอมโพสิตเสียหาย

ซึ่งในกรณีนี้ วัสดุมีลักษณะของการเสียหายดังรูป 1.11(a)



รูป 1.11 ลักษณะการแตกหักในแบบต่างๆ ของพอลิเมอร์คอมโพสิต ที่สัมพันธ์กับค่าความเครียด ณ จุดแตกหักของทั้งเส้นใย (ϵ_f^*) และเมทริกซ์ (ϵ_m^*) และสัดส่วนโดยปริมาตรของเส้นใย (V_f) [14]

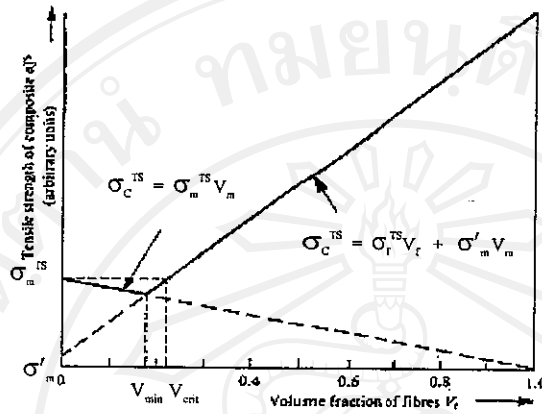
แต่เมื่อสัดส่วนโดยปริมาตรของเส้นใย (V_f) มีค่าต่ำกว่าสัดส่วนโดยปริมาตรของเส้นใยที่ต่ำที่สุด ($V_{f(min)}$) พอลิเมอร์คอมโพสิตจะเสียหายเมื่อเมทริกซ์เสียหาย

ดังนั้น
$$\sigma_c^{TS} = \sigma_m^{TS} V_m \quad (1.14)$$

- เมื่อ σ_m^{TS} = ค่าความทนแรงดึงของเมทริกซ์
- โดยในกรณีนี้ วัสดุมีลักษณะของการเสียหายดังรูป 1.11(b)

เมื่อนำสมการ (1.13) และ (1.14) มาสร้างเส้นกราฟความสัมพันธ์จะได้ค่า $V_{f(min)}$ ดังแสดงในรูป 1.12 และค่า $V_{f(min)}$ จะหาได้จากสมการ (1.15)

$$\sigma_c^{TS} = \sigma_f^{TS} V_{f(min)} + \sigma'_m V_m = \sigma_m^{TS} V_m \tag{1.15}$$



รูป 1.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตกับสัดส่วนโดยปริมาตรของเส้นใยที่เรียงตัวตลอดความยาวของเมทริกซ์ตามสมการ(1.13)และ (1.14)[14]

ตามที่

$$V_m = 1 - V_f$$

$$V_{f(min)} = \frac{\sigma_m^{TS} - \sigma'_m}{\sigma_f^{TS} + \sigma_m^{TS} - \sigma'_m} \tag{1.16}$$

สำหรับค่าวิกฤตของสัดส่วนโดยปริมาตรของเส้นใย ($V_{f(crit)}$) เป็นอัตราส่วนโดยปริมาตรเส้นใยที่มากที่สุด ที่ทำให้ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตเท่ากับความทนแรงดึงของเมทริกซ์ ซึ่งค่า $V_{f(crit)}$ จะมีค่ามากกว่า $V_{f(min)}$ โดยหาได้จากสมการ (1.19)

เนื่องจาก

$$\sigma_c^{TS} = \sigma_m^{TS} \text{ และ } V_m = 1 - V_{f(crit)}$$

$$\sigma_m^{TS} = \sigma_c^{TS} = \sigma_f^{TS} V_{f(crit)} + \sigma'_m (1 - V_{f(crit)}) \tag{1.17}$$

ดังนั้น

จัดรูปสมการใหม่จะได้

$$V_{f(crit)} = \frac{\sigma_m^{TS} - \sigma'_m}{\sigma_f^{TS} - \sigma'_m} \tag{1.18}$$

$$\sigma'_m \ll \sigma_m^{TS} \text{ และ } \sigma'_m \ll \sigma_f^{TS}$$

ดังนั้น

$$V_{f(crit)} \cong \frac{\sigma_m^{TS}}{\sigma_f^{TS}} \tag{1.19}$$

กรณีนี้ 2 เมื่อพอลิเมอร์คอมโพสิตได้จากการผสมระหว่างเมทริกซ์ที่เปราะกับเส้นใย กรณีนี้ความเครียด ณ จุดแตกหักของเมทริกซ์มีจะน้อยกว่าของเส้นใย ($\epsilon_m^* < \epsilon_f^*$) ดังรูป 1.10(b)

เมื่อสัดส่วนโดยปริมาตรของเส้นใย (V_f) ต่ำกว่าสัดส่วนโดยปริมาตรของเส้นใยที่ต่ำที่สุด ($V_{f(min)}$) ในกรณีนี้เมื่อเมทริกซ์เสียหาย เส้นใยที่มีอยู่จะไม่สามารถช่วยรับแรงกระทำที่ได้รับได้ พอลิเมอร์คอมโพสิตจะเกิดการเสียหายเมื่อเมทริกซ์เสียหาย ดังนั้น

$$\sigma_c^{TS} = \sigma'_f V_f + \sigma_m^{TS} V_m \quad (1.20)$$

เมื่อ σ'_f = ค่าความเค้นแบบดึงของเส้นใยในพอลิเมอร์คอมโพสิต ณ ความเครียดที่ทำให้พอลิเมอร์คอมโพสิตเสียหาย

ซึ่งลักษณะการเสียหายของพอลิเมอร์คอมโพสิตกรณีนี้เป็นดังรูป 1.11(c)

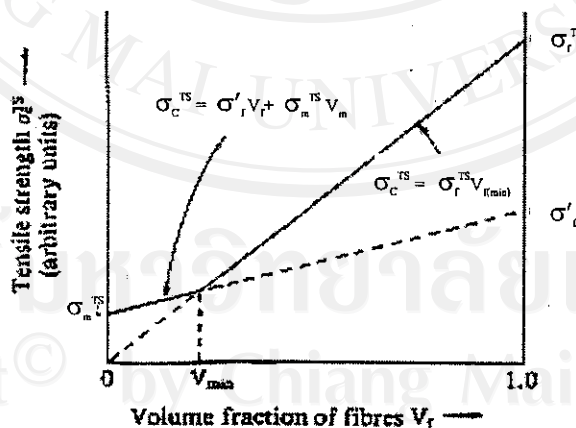
เมื่อสัดส่วนโดยปริมาตรของเส้นใย (V_f) มากกว่าสัดส่วนโดยปริมาตรของเส้นใยที่ต่ำที่สุด ($V_{f(min)}$) ในกรณีนี้เมื่อเมทริกซ์เกิดการเสียหาย ปริมาณเส้นใยที่มีอยู่ในพอลิเมอร์คอมโพสิตจะเป็นตัวช่วยรับแรงที่ถ่ายทอดมาจากเมทริกซ์ พอลิเมอร์คอมโพสิตจะเกิดการเสียหายเมื่อเส้นใยเสียหาย ดังนั้น

$$\sigma_c^{TS} = \sigma_f^{TS} V_f \quad (1.21)$$

ซึ่งลักษณะการเสียหายของพอลิเมอร์คอมโพสิตกรณีนี้เป็นดังรูป 1.11(d)

เมื่อนำสมการ (1.20) และ (1.21) มาสร้างเส้นกราฟความสัมพันธ์จะได้ค่า $V_{f(min)}$ ดังแสดงในรูป 1.13 และค่า $V_{f(min)}$ จะหาได้จากสมการ (1.22)

$$\sigma_c^{TS} = \sigma'_f V_{f(min)} + \sigma_m^{TS} V_m = \sigma_f^{TS} V_{f(min)} \quad (1.22)$$



รูป 1.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตกับสัดส่วนโดยปริมาตรของเส้นใยที่เรียงตัวตลอดความยาวของเมทริกซ์ตามสมการ (1.20) และ (1.21)[14] ตามที่

$$V_m = 1 - V_f$$

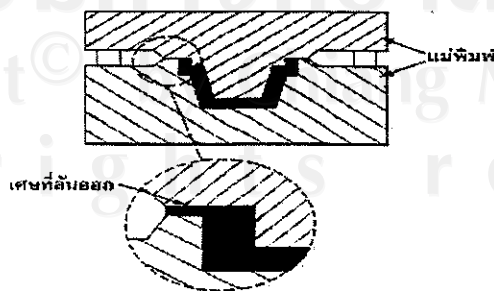
$$V_{f(min)} = \frac{\sigma_m^{TS}}{\sigma_f^{TS} - \sigma'_f + \sigma_m^{TS}} \quad (1.23)$$

1.8 การขึ้นรูปโดยวิธีการอัด (Compression moulding)[15-17]

การขึ้นรูปพลาสติกโดยวิธีการอัดเป็นกรรมวิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมอย่างมาก เป็นกรรมวิธีแบบหนึ่งในการขึ้นรูปพลาสติกที่ง่ายและธรรมดาที่สุด ผลิตได้ไม่เร็วนัก พลาสติกที่ใช้ส่วนมากเป็นพลาสติกชนิดเทอร์โมเซต การผลิตด้วยวิธีนี้สามารถทำได้หลายลักษณะ ทั้งทางด้าน รูปร่าง ลวดลาย หรือพื้นผิวเรียบ ผลิตภัณฑ์ที่นิยมใช้วิธีนี้ผลิต เช่น จาน ชาม ถ้วยเมลามีน สวิตซ์ไฟฟ้า พื้นรองเท้า เป็นต้น

การขึ้นรูปโดยวิธีการอัดนี้ เป็นเทคนิคที่อาศัยการไหลตัวของพลาสติกร้อนภายในแม่แบบ (mould) ในขณะที่ทำการอัด แม่แบบจะถูกปิดลงอย่างช้าๆ พลาสติกจะเริ่มหลอมตัวและไหลตัวในขณะที่แม่แบบถูกปิดสนิท พลาสติกส่วนเกินจะไหลล้นออกมาแม่แบบ (Flash) แม่แบบจะถูกเปิดอยู่ช่วงเวลาหนึ่งซึ่งเรียกว่า เวลาการบ่ม (Cured time) ในช่วงเวลานี้พลาสติกจะเกิดการจัดเรียงตัวของโมเลกุล ถ้าเป็นพลาสติกชนิดเทอร์โมเซตจะเกิดการเชื่อมโยงได้โครงสร้างแบบ โครงสร้างตาข่าย ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีรูปร่างเป็นเหมือนแม่แบบทำให้เกิดความแข็งแรงทนทานของชิ้นงานด้วย สำหรับระยะเวลาในการกดอัดจะขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง อันได้แก่ ชนิดของพลาสติกที่ใช้ ขนาดและความหนาของผลิตภัณฑ์ อุณหภูมิและความดันที่ใช้ในการกดอัด เป็นต้น หากเรซินที่ใช้เป็นพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติก ในการเอาชิ้นผลิตภัณฑ์ออกจากแม่แบบจะต้องทำให้เย็นตัวก่อน ถ้านำเอาผลิตภัณฑ์ออกจากแม่แบบในขณะที่แม่แบบยังร้อนจะทำให้รูปร่างของผลิตภัณฑ์เสียหายได้ แต่สำหรับเทอร์โมเซตแล้วไม่จำเป็นต้องรอให้แม่แบบเย็นตัวก่อนก็สามารถนำผลิตภัณฑ์ออกได้ทันที เพราะเกิดการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลแล้ว นอกจากนี้ในการผลิตอาจได้ผลิตภัณฑ์ดีหรือไม่ดีขึ้นอยู่กับแม่แบบ โดยเฉพาะพื้นผิวสัมผัสของแม่แบบกับผลิตภัณฑ์จะต้องเรียบและนำเอาผลิตภัณฑ์ออกได้ง่าย แม่แบบจะต้องมีความแข็งแรง ทนต่อความดันได้สูงด้วย แม่แบบที่ใช้โดยทั่วไปจะเป็นโลหะ และสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามลักษณะ โครงสร้างดังนี้ คือ

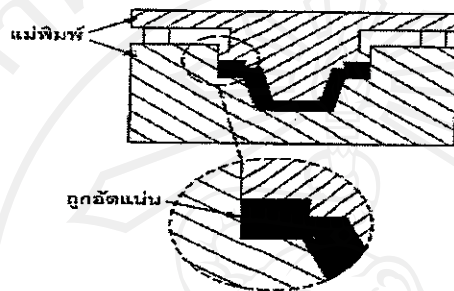
(1) Flash mould เป็นแบบที่ง่ายที่สุดแสดงลักษณะของแม่แบบดังรูป 1.14



รูป 1.14 แม่แบบชนิด Flash mould[16]

สำหรับแม่แบบชนิดนี้ปริมาณของพลาสติกที่ใช้ไม่จำเป็นต้องแน่นอนส่วนที่เกินจะถูกดันออกนอกแม่แบบในแนวระดับ แม่แบบมีราคาถูก ไม่ต้องใช้แรงอัดมากแต่มีข้อเสียคือเนื้อของพลาสติกไม่ค่อยแน่น ทำให้ความแข็งแรงน้อยกว่าชนิดอื่นๆ และต้องนำชิ้นของผลิตภัณฑ์ไปขัดตกแต่งมากเพราะมีพลาสติกส่วนเกินมาก ผลิตภัณฑ์ขึ้นรูปด้วยแม่แบบชนิดนี้ควรบางและดัน

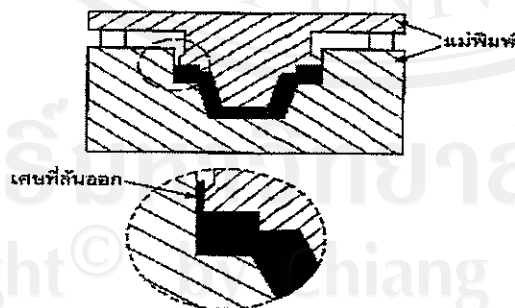
(2) Fully positive mould เป็นแบบตรงข้ามกับ Flash mould คือยอมให้พลาสติกไหลออกน้อยที่สุดหรือไม่ให้ไหลออกเลย แสดงลักษณะแม่แบบดังรูป 1.15



รูป 1.15 แม่แบบชนิด Fully positive mould[16]

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแม่แบบชนิดนี้จะมีเนื้อที่แน่นและแข็งแรง พลาสติกที่ใช้ต้องมีปริมาณแน่นอน ถ้าใส่มากเกินไปแรงอัดจะทำให้แม่แบบแตกเสียหายได้

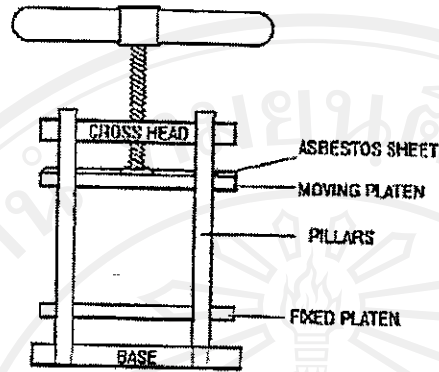
(3) Semi-positive mould เป็นแบบผสมระหว่าง Flash mould กับ Fully positive mould ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความแข็งแรงสูงกว่าแบบ Flash mould แต่ต่ำกว่าแบบ Fully positive mould พลาสติกส่วนที่เกินสามารถไหลออกได้ทั้งในแนวระดับและในแนวตั้ง เหมาะสมกับงานทั่วไป แสดงลักษณะของแม่แบบดังรูป 1.16



รูป 1.16 แม่แบบชนิด Semi-positive mould[16]

แม่แบบส่วนใหญ่จะทำจากเหล็กกล้า (Steel) ทนความดันสูง เพื่อไม่ให้ชิ้นงานติดแม่แบบจะต้องชุบด้วยโครเมียม (Chrome-plated surface) หรือทาน้ำยาถอดแบบ (Mould release หรือ Releasing agent) เช่น Silicone oil waxes stearate หรือใช้น้ำยาถอดแบบที่ผสมเข้าไปกับเม็ดพลาสติกเลย เรียกว่า Internal releasing agent

เครื่องมือที่ใช้ในการขึ้นรูปด้วยวิธีการนี้ เรียกว่า Compression moulding press ซึ่งมีทั้งแบบที่ทำงานด้วยระบบไฮดรอลิกและแบบที่ทำงานด้วยมือ (Hand-operated) แสดงลักษณะดังรูป 1.17

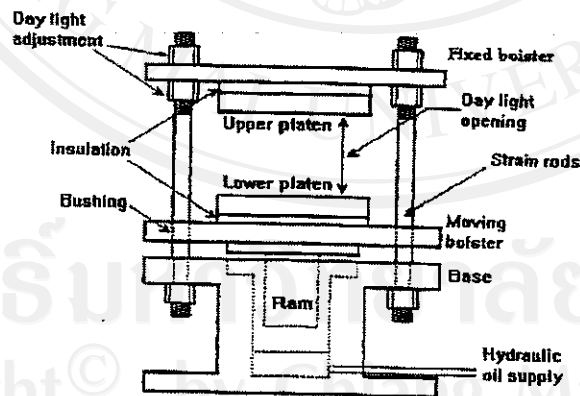


รูป 1.17 เครื่อง Compression press แบบทำงานด้วยมือ[17]

สำหรับการทำงานด้วยระบบไฮดรอลิก (Hydraulic) ซึ่งมี 2 แบบด้วยกัน คือ

1. Upstroke type ดังแสดงในรูป 1.18
2. Downstroke type

Upstroke type และ Downstroke type ต่างกันตรงการเคลื่อนที่ของลูกสูบ (Ram) คือ Upstroke type ส่วนของลูกสูบจะเคลื่อนที่ยกแทนล่าง (Lower platen) ขึ้น ในขณะที่แทนบน (Upper platen) จะถูกยึดติดอยู่กับที่ ส่วน Downstroke type จะมีลักษณะตรงกันข้ามกับ Upstroke type



รูป 1.18 เครื่อง Compression press ชนิด Upstroke type[17]

ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้แม่พิมพ์แบบ Flash mould และใช้เครื่องกดอัดด้วยระบบไฮดรอลิกแบบ Upstroke type

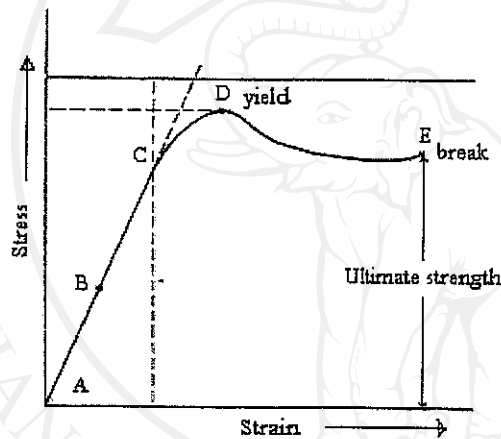
1.9 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)[11, 18-20]

1.9.1 ความทนแรงดึง (Tensile strength)

ความทนแรงดึงของวัสดุคือ ความต้านทานของวัสดุนั้นต่อการยืด (Elongation) หรือการแตกหัก (Breaking) เมื่อมีแรงดึงวัสดุ พฤติกรรมความเค้นและความเครียดของวัสดุส่วนมากขึ้นอยู่กับเวลา ดังนั้นต้องคำนึงถึงความเร็วที่ทำให้ความเค้นด้วย เช่น ถ้าดึงวัสดุอย่างรวดเร็วทันทีทันใด อาจทำให้วัสดุขาดออกได้ แต่ถ้าใช้แรงเท่ากันแต่ดึงช้าๆ อาจทำให้วัสดุเพียงแต่ยืดออกเท่านั้น ความต้านทานต่อการขาดของวัสดุมีค่าสูงขึ้น

ในการทดสอบความทนแรงดึงมักเขียนกราฟระหว่างความเค้นกับความเครียด ดังรูป

1.19



รูป 1.19 แผนภาพแสดงความเค้น-ความเครียด (Stress-strain) [18]

คำจำกัดความเทอมต่างๆ ของกราฟระหว่างความเค้นกับความเครียด

ความเค้น (Stress) คือ แรงที่ใช้เพื่อทำให้เกิดการเสียรูป (Deformation) ในหนึ่งหน่วยพื้นที่ของชิ้นทดสอบหรือบอกได้ว่า ความเค้นเป็นอัตราส่วนที่ใช้ต่อพื้นที่หน้าตัด

ความเครียด (Strain) คือ อัตราส่วนของส่วนที่เพิ่มขึ้นต่อความยาวเดิมของชิ้นทดสอบ หรือความยาวที่เปลี่ยนไปต่อหน่วยความยาวเริ่มต้น

จุดคราก (Yield point) คือ จุดแรกบนเส้นกราฟระหว่างความเค้น-ความเครียด ที่เกิดการเพิ่มความเครียดขึ้นในขณะที่ความเค้นไม่ได้เพิ่มขึ้น

ความเค้นที่จุดคราก (Yield stress) คือ ความเค้น ณ จุดที่ความชันของเส้นกราฟระหว่างความเค้น-ความเครียดเป็นศูนย์

ความเค้นสูงสุด (Ultimate strength) คือ ค่ามากที่สุดของความเค้นซึ่งวัสดุสามารถทนอยู่ได้ภายใต้แรงดึง ค่านี้จะอยู่ที่จุดขาด (Break point) ซึ่งเป็นจุดที่วัสดุที่ใช้ทดสอบขาดหรือแยกออกจากกัน

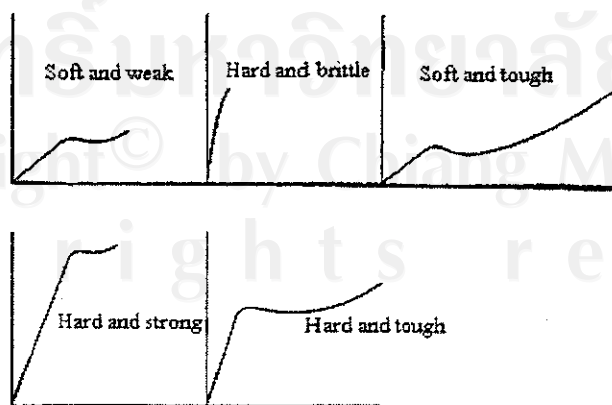
ความทนแรงดึงสูงสุด (Tensile strength) คือ ค่าความเค้นที่มากที่สุดที่ชิ้นงานสามารถทนได้ระหว่างการทดสอบ เมื่อปรากฏความเค้นที่มากที่สุดที่จุดครากก็จะเป็นค่าความทนแรงดึงที่จุดคราก แต่เมื่อเกิดความเค้นมากที่สุดที่จุดขาดก็กำหนดว่าเป็นความทนแรงดึงที่จุดขาด สำหรับความทนแรงดึง กำหนดได้โดยค่าแรงสูงสุดหารด้วยพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นงาน

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

มอดุลัส หรือมอดุลัสของยัง (Young's modulus) หรือมอดุลัสแบบยืดหยุ่น (Elastic modulus) คือ อัตราส่วนของความเค้นต่อความเครียดที่เกิดขึ้นในบริเวณที่ความเครียดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเค้น ค่ามอดุลัสของยังเป็นสิ่งวัดความแข็งแกร่งหรือแข็งตึง (Stiffness) ของวัสดุ ซึ่งเป็นความสามารถในการต้านทานการแปรรูปหรือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุในช่วงขีดจำกัดความยืดหยุ่น (Elastic limit) ขณะรับแรง การหาค่ามอดุลัสยังคงสามารถหาได้จากกราฟความเค้น-ความเครียด โดยมอดุลัสแบบยืดหยุ่นจะเป็นความชันในช่วงเริ่มต้นที่ความเค้นและความเครียดมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง

พื้นที่ภายใต้กราฟระหว่างความเค้น-ความเครียดเป็นสิ่งบ่งชี้ถึงความเหนียว (Toughness) ของวัสดุ ถ้าวัสดุใดมีพื้นที่ใต้เส้นกราฟมากจึงเป็นวัสดุที่มีความเหนียวมาก ส่วนวัสดุที่มีพื้นที่ใต้เส้นกราฟน้อยจึงเป็นวัสดุที่เปราะ

ซึ่งพลาสติกแต่ละประเภทก็มีลักษณะกราฟระหว่างความเค้นกับความเครียดที่แตกต่างกันดังรูป 1.20 ซึ่งลักษณะเส้นโค้งที่ปรากฏ ทำให้สามารถจำแนกสมบัติของพลาสติกได้ดังตาราง 1.1



รูป 1.20 ประเภทของกราฟความเค้น-ความเครียด[18]

ตาราง 1.1 ลักษณะของกราฟความเค้น-ความเครียดที่เกี่ยวข้องกับสมบัติของพอลิเมอร์[18]

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

การคำนวณเกี่ยวกับสมบัติความทนแรงดึง

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

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

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

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความทนแรงดึง การยืดตัว และมอดุลัสของยัง

1) การเตรียมชิ้นทดสอบและขนาดชิ้นทดสอบ

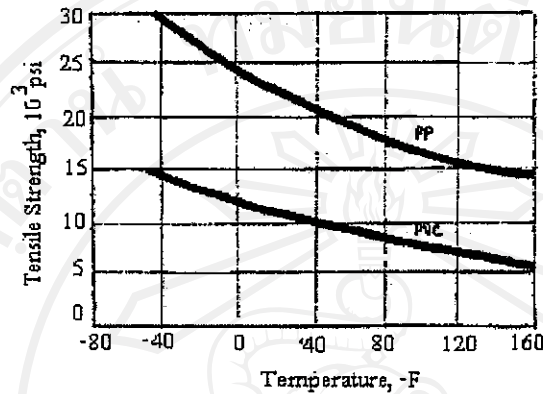
การจัดเรียงโครงสร้างโมเลกุล มีผลกระทบมากต่อค่าความทนแรงดึง การให้แรงขนานกับทิศทางการจัดเรียงตัวของ โมเลกุลอาจให้ผลการทดสอบที่ได้สูงกว่าให้แรงตั้งฉากกับการจัดเรียงตัวของ โมเลกุล กระบวนการเตรียมชิ้นทดสอบก็มีผลกระทบสำคัญ

2) อัตราของความเครียด (Rate of straining)

ถ้าอัตราความเครียดเพิ่มขึ้นจะให้ค่าความทนแรงดึงและมอดุลัสของยังเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการยืดยาวออกจะแปรผกผันกับสัดส่วนของอัตราความเครียด นั่นคือเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น การยืดตัวจะลดลง

3) อุณหภูมิ (Temperature)

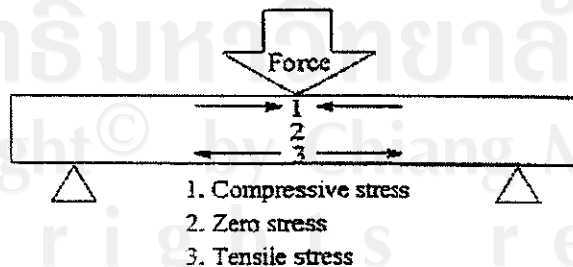
สมบัติความทนแรงดึงของพลาสติกบางอย่างจะเปลี่ยนอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความทนแรงดึงและมอดุลัสจะลดลง ขณะที่การยืดยาวเพิ่มขึ้น รูป 1.21 แสดงผลของอุณหภูมิต่อค่าความทนแรงดึง



รูป 1.21 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อความทนแรงดึง[18]

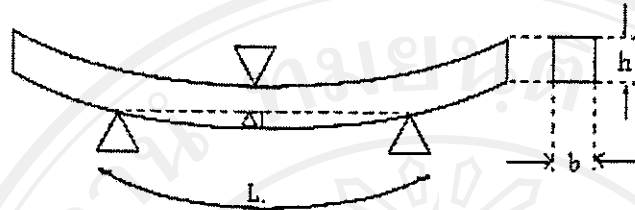
1.9.2 ความทนแรงโค้งงอ (Flexural strength)

ความทนแรงโค้งงอเป็นค่าความเค้นที่ได้จากการทดสอบให้เกิดการงอตัวโดยใช้หัวกด (Indenter) ซึ่งกดลงตั้งฉากกับชิ้นทดสอบที่อยู่ในลักษณะแนวนอน โดยมีตัวรองรับ (Supporting jig) เป็นตัวกำหนดช่วงห่าง (Span) การทดสอบแบบนี้ชิ้นทดสอบจะได้รับทั้งแรงเค้นดึง (Tensile stress) และแรงเค้นกด (Compressive stress) แสดงดังรูป 1.22 ซึ่งแรงเค้นกดจะเกิดขึ้นบนชิ้นทดสอบ ส่วนแรงเค้นดึงจะเกิดใต้ชิ้นทดสอบ การทดสอบนี้สามารถทดสอบได้ 2 ลักษณะ คือ การทดสอบแรงโค้งงอแบบ 3 จุด (Three point bending) และการทดสอบแรงโค้งงอแบบ 4 จุด (Four point bending)



รูป 1.22 แรงเค้นในชิ้นทดสอบที่หาความทนแรงโค้งงอแบบ 3 จุด[11]

การทดสอบความทนแรงโค้งงอแบบ 3 จุด เป็นการทดสอบความเค้นโดยจะมีตัวกด
สำหรับให้แรงกด 1 จุด ซึ่งจะอยู่ด้านบนของชิ้นทดสอบ และมีตัวรองรับที่กำหนดระยะห่างอยู่ด้าน
ล่างชิ้นทดสอบ 2 จุด แสดงดังรูป 1.23



รูป 1.23 การทดสอบความทนแรงโค้งงอแบบ 3 จุด[11]

สามารถคำนวณความเค้นมากที่สุด หรือความเค้นโค้งงอ (Maximum stress or flexural stress; σ_{\max}) ที่เกิดตรงกลางชิ้นทดสอบตรงส่วนผิวนอก ตามสมการ (1.24)

$$\sigma_{\max} = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (1.24)$$

โดยค่าความทนแรงโค้งงอ (Flexural strength; σ^{FS}) ก็คือค่าความเค้นโค้งงอ ณ จุดที่วัสดุเสียสภาพ ซึ่งได้จากสมการ (1.25)

$$\sigma^{FS} = \frac{3F_{\max}L}{2bh^2} \quad (1.25)$$

เมื่อ F = แรงกระทำที่ตรงกลางชิ้นทดสอบ

F_{\max} = แรงกระทำสูงสุดที่ตรงกลางชิ้นทดสอบ ณ ที่วัสดุเสียสภาพ

L = ระยะห่างของตัวรองรับชิ้นทดสอบ

b = ความกว้างของชิ้นทดสอบ

h = ความหนาของชิ้นทดสอบ

ส่วนค่ามอดุลัสของความยืดหยุ่นในการโค้งงอ (E_b) สามารถคำนวณได้ดังสมการ (1.26)

$$E_b = \frac{L^3 F}{4bh^3 \Delta l} \quad (1.26)$$

1.9.3 ความทนแรงกระแทก (Impact strength)

การทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทกเป็นการทดสอบเชิงกลในลักษณะการได้รับแรงกระทำอย่างทันทีทันใด จึงนับว่าเป็นสมบัติที่มีความสำคัญในเชิงวัสดุศาสตร์ วัสดุต่างๆ ที่ต้องทดสอบสมบัติความต้านทานแรงกระแทกจึงควรเป็นวัสดุที่นำไปใช้งานที่มีโอกาสที่รับแรงในลักษณะดังกล่าว เช่น วัสดุเพื่อการหีบห่อ การขนส่ง เป็นต้น

สมบัติความทนแรงกระแทกสนใจในเชิงพลังงานที่ถูกดูดกลืนไว้จากการได้รับแรงเชิงกลฟาดกระทบต่อพื้นที่หน้าตัดตามแนวเดียวกับแนวแรง ซึ่ง จากค่าพลังงานที่ถูกดูดกลืนไว้โดยชิ้นทดสอบ (E_{ab}) สามารถทราบค่าพลังงานของการทนการกระแทกของชิ้นทดสอบ (E_{Im}) ได้ดังสมการ (1.27)

$$E_{Im} = \frac{E_{ab}}{B \times h} \quad (1.27)$$

เมื่อ B = ความกว้างของชิ้นทดสอบ

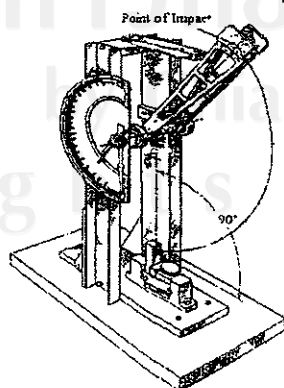
h = ความหนาของชิ้นทดสอบ (หากมีรอยบาก หักส่วนความลึกรอยบากออก)

เครื่องทดสอบความต้านทานแรงกระแทกของวัสดุที่ใช้กันมากแบ่งได้ 2 แบบ คือ

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

การทดสอบโดยใช้ตุ้มน้ำหนักเหวี่ยงกระแทกแบบอิซอด ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256, BS 2782 method 306A, ISO R180 ซึ่งมีการใช้เครื่องทดสอบความต้านทานแรงกระแทกแสดงดังรูป 1.24

การทดสอบการกระแทกแบบอิซอดนี้แสดงถึงพลังงานที่ต้องใช้ในการทำให้ชิ้นทดสอบที่รอยบากเกิดการแตกหัก คำนวณออกมาเป็นหน่วย ฟุต-ปอนด์ต่อตารางนิ้วของรอยบาก



รูป 1.24 เครื่องทดสอบความต้านทานแรงกระแทกโดยตุ้มน้ำหนักแบบอิซอด[11]

ค่าความต้านทานแรงกระแทกแบบอิชอด เป็นประโยชน์ในการเปรียบเทียบพลาสติกเกรดต่างๆ การทดสอบการต้านทานแรงกระแทกแบบอิชอดอาจจะช่วยให้ทราบถึงความจำเป็นในการหลีกเลี่ยงการมีมุมที่คมในการใช้งานชิ้นงานที่ทำด้วยวัสดุอื่นๆ

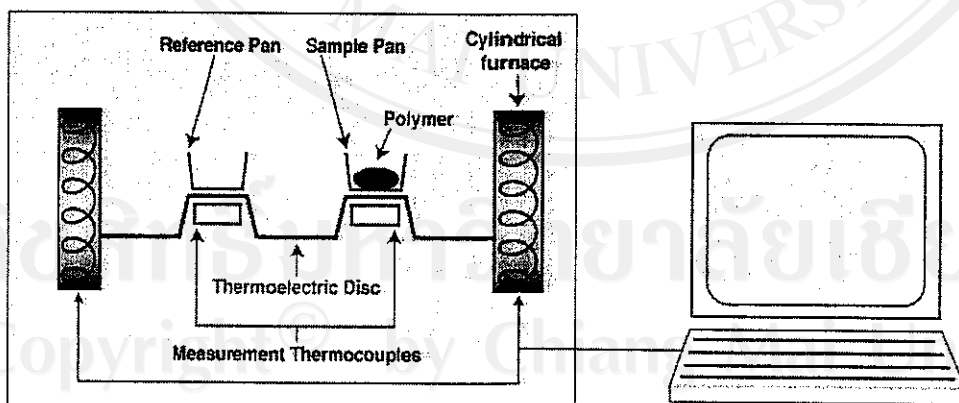
1.10 การทดสอบสมบัติทางความร้อนโดยใช้วิธีวิเคราะห์ปริมาณความร้อนเชิงผลต่าง

(Differential scanning calorimetry; DSC)[18, 21-25]

ในปัจจุบันเทคนิคการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงสถานะฐานในพอลิเมอร์ คือ Differential scanning calorimetry (DSC) เป็นกลุ่มของเทคนิคโดยให้ความร้อนซึ่งหาจากลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์

DSC เป็นเทคนิคที่วัดถึงการแตกต่างของพลังงานที่ใส่เข้าไปในสารตัวอย่างและวัสดุเพื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ให้กับสารทั้งสองในขณะนั้น ดังนั้น DSC จึงเป็นการวัดพลังงานความร้อนที่ให้เข้าไปหรือปล่อยออกมากับสารตัวอย่างในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลง ถ้าสารเกิดปฏิกิริยาคูดความร้อนในขณะที่เกิดการเปลี่ยนแปลง แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงนั้นเป็นแบบคูดความร้อน (endothermic) เช่น การเปลี่ยนแปลงสถานะแก้ว และการหลอมเหลว ถ้าสารเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนในขณะที่เปลี่ยนแปลง แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงนั้นเป็นแบบคายความร้อน (Exothermic) เช่น การตกผลึก

เครื่องมือที่ใช้ในเทคนิคนี้เรียกว่า Differential scanning calorimeter ส่วนที่สำคัญที่สุดของเครื่อง คือ Sample pan และ Reference pan แสดงดังรูป 1.25



รูป 1.25 ส่วนประกอบของเครื่อง DSC[25]

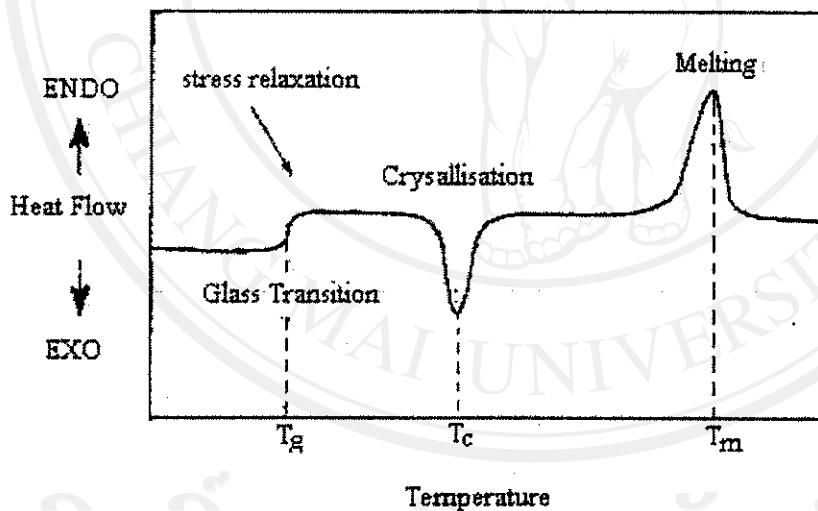
Reference pan จะเป็น Aluminum pan เปล่าไม่มีอะไรอยู่เลย หรือจะบรรจุสารอ้างอิง ซึ่ง เป็นสารพวกที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงอุณหภูมิที่สนใจ เช่น MgO , Al_2O_3 หลักการทำงานของ

เครื่องมือ คือ การชดเชยพลังงานเพื่อให้อุณหภูมิของสารตัวอย่าง (T_s) และสารอ้างอิง (T_r) มีค่าเท่ากันตลอดการทดลองของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ นั่นคือ

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

เพื่อให้อุณหภูมิมีค่าเท่ากันตลอด เครื่อง DSC จะต้องใช้หลักการ Null balance คือ ถ้าสารตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบดูดความร้อน จะมีการดูดกลืนพลังงานทำให้ T_s ลดลงเมื่อเทียบกับ T_r ($T_s < T_r$) ดังนั้นเครื่อง DSC จะทำการชดเชยโดยให้ความร้อนจากพลังงานไฟฟ้าให้กับสารตัวอย่าง ซึ่งเท่ากับจำนวนที่สารตัวอย่งนั้นดูดกลืนเข้าเปลี่ยนแปลงสภาวะ ทำให้ $T_s = T_r$ ดังเดิมและค่าพลังงานการชดเชยนี้เครื่อง DSC จะบันทึกไว้ ถ้าสารตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบคายความร้อน จะมีการคายพลังงานทำให้ T_s เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ T_r ($T_s > T_r$) ดังนั้นเครื่อง DSC จะทำการชดเชยโดยให้ความร้อนจากพลังงานไฟฟ้าให้กับสารอ้างอิง ทำให้ $T_s = T_r$

ผลการวัดค่าที่ได้จาก DSC แสดงออกมาในรูปกราฟระหว่างพลังงานที่สารดูดเข้าหรือคายออกมาจากสารตัวอย่างกับอุณหภูมิที่ให้ เรียกว่า เทอร์มोगราม แสดงดังรูป 1.26



รูป 1.26 เทอร์มोगรามที่ได้จาก DSC [21]

จากเทอร์มोगราม DSC จะเห็นว่าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงของพอลิเมอร์ เกิดขึ้นเป็นช่วงมากกว่าที่จะเป็นค่าใดค่าหนึ่ง อย่างไรก็ตามในการรายงานผลจะรายงานเป็นอุณหภูมิต่างๆ ดังนี้ คือ T_g จะใช้ Mid-point temperature ค่า T_c และ T_m เป็น Peak temperature

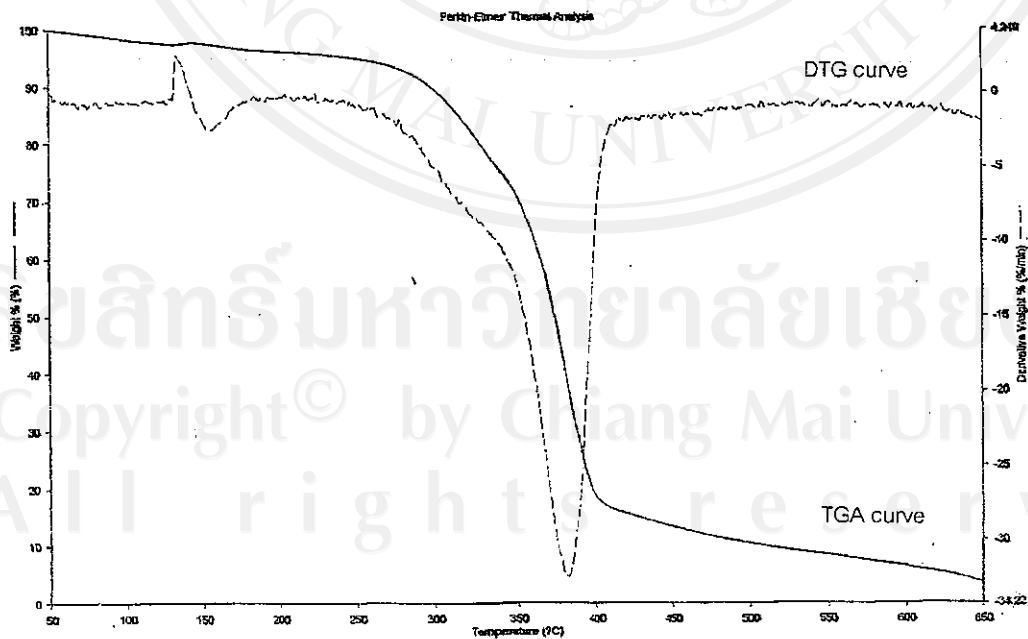
DSC เป็นเทคนิคที่มีประโยชน์และประยุกต์ใช้ในการใช้งานในพอลิเมอร์ ทั้งในด้านวิเคราะห์ทางคุณภาพและปริมาณ ดังตัวอย่าง เช่น

- * หาอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature; T_g)
- * ศึกษาการหลอมเหลว หาค่า T_m และ ΔH_m

- * ศึกษาการเกิดผลึก หาค่า T_c และ ΔH_c
- * หาค่า % Crystallinity
- * ศึกษาประวัติทางด้านความร้อน
- * การวิเคราะห์ Copolymer และ Polymer blends
- * ศึกษาจลนพลศาสตร์ เช่น Curing kinetic
- * การวิเคราะห์ถึงความบริสุทธิ์ เช่น Monomer purity

1.11 การทดสอบอุณหภูมิการสลายตัวโดยเทคนิคการวัดการเปลี่ยนแปลงมวลเนื่องจากความร้อน (Thermogravimetry analysis; TGA)[18, 21-22, 26-27]

เทคนิค Thermogravimetry analysis (TGA) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของสารตัวอย่าง โดยการวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อนภายใต้บรรยากาศที่สามารถควบคุมได้ ข้อมูลที่ได้จะแสดงในรูปของกราฟซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของสารตัวอย่างกับอุณหภูมิหรือเวลา เรียกกราฟนี้ว่า Thermogravimetric curve; TGA curve นอกจากนี้ยังอาจแสดงข้อมูลออกมาในรูปของกราฟที่เรียกว่า Derivative thermogravimetric curve; DTG curve ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเทียบกับเวลา ดังรูป 1.27

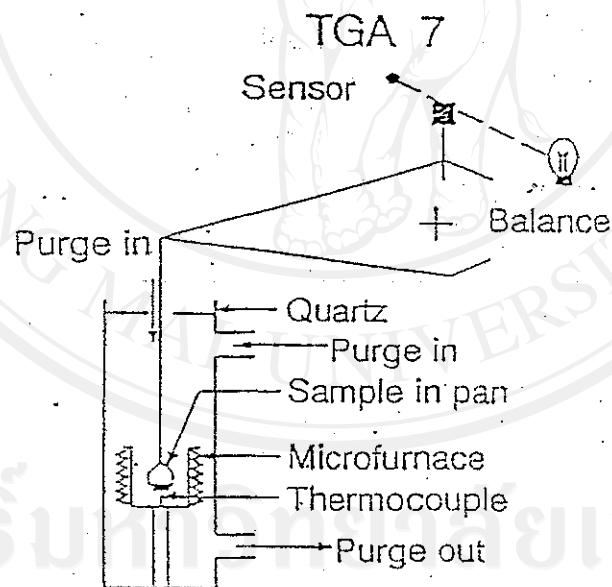


รูป 1.27 เทอร์มอแกรมที่ได้จาก TGA

จากรูปเทอร์โมแกรมที่ได้จาก TGA จะแสดงขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารตัวอย่าง เมื่อสารตัวอย่างได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงอุณหภูมิที่เกิดการสลายตัว น้ำหนักของสารตัวอย่างนั้นจะลดลง อุณหภูมิที่แต่ละองค์ประกอบในวัสดุนั้นเกิดการสลายตัวเป็นอุณหภูมิเฉพาะ ดังนั้นจึงอาจแยกองค์ประกอบแต่ละอย่างในสารตัวอย่างนั้นได้ เมื่อองค์ประกอบนั้นมีการสลายตัวที่อุณหภูมิต่างๆ

รูป 1.28 แสดงส่วนประกอบของเครื่อง TGA จะประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญคือ

- (1) ส่วนวัดน้ำหนัก (Balance)
- (2) เตาเผาให้ความร้อน (Furnace)
- (3) ส่วนวัดอุณหภูมิ (Thermocouple)
- (4) ส่วนควบคุมบรรยากาศภายในระบบ (Gas controller)



รูป 1.28 ส่วนประกอบของเครื่อง TGA[26]

การทำงานจะเริ่มขึ้นเมื่อสารตัวอย่างซึ่งบรรจุภายในภาชนะรองรับ (Sample pan) ได้รับความร้อนจากเตาภายใต้บรรยากาศที่ควบคุม เมื่อถึงอุณหภูมิที่เหมาะสม องค์ประกอบในสารตัวอย่างจะสลายตัว ทำให้น้ำหนักรวมของสารตัวอย่างลดลง ในขณะที่ให้ความร้อนและองค์ประกอบในสารตัวอย่างสลายตัวนี้เครื่อง TGA จะบันทึกค่าอุณหภูมิและค่าน้ำหนักไปพร้อมกันและแสดงผลออกมาในรูปแบบ TGA เทอร์โมแกรม

1.12 เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Infrared spectroscopy; IR)[28-29]

เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี หรือ IR เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ พิสูจน์ และศึกษาเกี่ยวกับโมเลกุลของสาร เช่น การหาหมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏออกมาที่ความถี่ในอินฟราเรดสเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชันต่างกัน เพื่อใช้ติดตามการดำเนินไปของปฏิกิริยาเคมี หรือใช้หาสูตรโครงสร้างของสารตัวอย่าง (ซึ่งอาจจะอยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซก็ได้) เป็นต้น

เทคนิคนี้อาศัยอันตรกิริยาระหว่างรังสีอินฟราเรดกับมวลของสารตัวอย่าง เมื่อโมเลกุลดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่มีความถี่ตรงกับความถี่ของการสั่นของพันธะแบบยืดหรือตรงกับความถี่ของการสั่นแบบงอของพันธะใด จะทำให้ช่วงความกว้างของการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมในโมเลกุลเพิ่มขึ้น ซึ่งหมายถึงโมเลกุลอยู่ในภาวะเร้า (Excited vibrational state) เมื่อจะกลับคืนสู่ภาวะปกติ (Ground state) พลังงานที่ถูกดูดเข้าไปจะถูกปล่อยออกมาในรูปความร้อน

พันธะระหว่างอะตอมต่างชนิดกัน เช่น C—H C=O O—H จะดูดกลืนพลังงานจากรังสีอินฟราเรดที่มีความถี่ (หรือความยาวคลื่น) แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับชนิดของพันธะ และมวลของอะตอมระหว่างพันธะนั้น

ในบรรดาการสั่นของโมเลกุลใดๆ เฉพาะการสั่นที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง Dipole moment ในโมเลกุลเท่านั้นจึงจะทำให้เกิดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดแล้วเกิด สเปกตรัม IR ขึ้น จัดเป็น Infrared active ยิ่งมีความแตกต่างของ Dipole moment ในโมเลกุลมาก ยิ่งทำให้การดูดกลืนมีความเข้มมาก ได้แถบหรือ Band ที่มีความเข้มมาก (Strong intensity) แต่ถ้ามีความแตกต่างระหว่าง Dipole moment ใน โมเลกุลน้อย จะให้ Band ที่เป็นพวก Weak intensity

ช่วงของอินฟราเรดสเปกตรัมแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงใกล้อินฟราเรด (Near IR region หรือ Overtone region) ช่วงกลางอินฟราเรด (Middle IR หรือ Fundamental region) ช่วงไกลอินฟราเรด (Far IR region) ช่วงที่จะใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์นั้นเป็นช่วงกลางอินฟราเรดเป็นส่วนใหญ่ คือ 4,000 ถึง 400 cm^{-1} หรือ 2.5 ถึง 5 μm

อินฟราเรดสเปกตรัมที่ปรากฏบนกระดาษสเปกตรัมจะมีลักษณะเป็นพีคชี้ลง จะแสดงลักษณะของฟังก์ชันของเลขคลื่น (Wave number) หรือความยาวคลื่น (Wave length) หรือเป็นข้อมูลระหว่าง Percent transmittance (%T) กับความยาวคลื่น (Wave length) หรือความถี่ (Frequency) ในบางช่วงของสเปกตรัม ถ้าไม่มีการดูดรังสีเลย %T จะมีค่าเป็น 100% ถ้าดูดกลืนรังสีมากที่สุด %T จะมีค่าเป็นศูนย์ พีคจะลงไปต่ำสุดในกระดาษบันทึกสเปกตรัม ตำแหน่งของการดูดกลืนที่แน่นอนทำให้สามารถหาหมู่ฟังก์ชันที่อยู่ในสารตัวอย่างที่วิเคราะห์ได้

เทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม-อินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (FT-IR Spectrometer) เป็นเทคนิคที่วัดความเข้มของแสง หรือกำลังของแสงที่ความยาวคลื่นต่างกันอย่างต่อเนื่องเทียบกับเวลา ต่างจากวิธีอื่นที่สเปกตรัมได้จากการวัดการดูดกลืนแสงที่ความถี่ต่างๆ กันทีละครั้งในช่วงระยะเวลาอันหนึ่ง ทำให้เทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มช่วยในการวิเคราะห์ที่รวดเร็วยิ่งขึ้น การแยก (Resolution) ดีขึ้น

1.13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM)[21]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron microscope) เกิดจากการคิดค้นเพื่อที่จะทำการพัฒนาประสิทธิภาพในการมองเห็นวัตถุของกล้องจุลทรรศน์ให้สามารถมองแจ่มแจ้งรายละเอียดของภาพได้มากกว่าเดิม โดยการประยุกต์นำเอาอิเล็กตรอนในช่วงคลื่นแสง และใช้เลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้ามาแทนเลนส์กระจก และมีตัวตรวจวัดที่มาจับสัญญาณอิเล็กตรอนที่เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนไปกระทบผิวตัวอย่าง จากนั้นก็มีอุปกรณ์ในการแปลงสัญญาณที่ได้เป็นสัญญาณภาพปรากฏบนจอรับภาพต่อไป ผลที่ได้คือ ภาพของวัตถุ

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) สัญญาณภาพที่ได้เกิดจากการใช้ตัวตรวจวัดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron detector; SE Detector) มาจับสัญญาณตัวตรวจวัดอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดขึ้น หรือใช้ตัวตรวจวัดอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscatter electron detector; BSE Detector) มาจับสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับที่เกิดขึ้น ดังนั้นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบนี้จะสามารถประกอบอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์ได้ทั้งแบบ Energy dispersive X-ray spectrophotometry; EDS และ Wavelength dispersive X-ray spectrophotometry; WDS เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ธาตุโดยอาศัยหลักการการแยกรังสีตามระดับพลังงาน