

พอลิเมอร์เชิงประกอบจากพอลิแล็กติกแอซิด
ด้วยเทคนิคการฉีดขึ้นรูปแบบแทรก

POLYMER COMPOSITE FROM POLYLACTIC ACID
BY INSERT-INJECTION MOLDING TECHNIQUE

จิตาภา กรมสุริยศักดิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

พอลิเมอร์เชิงประกอบจากพอลิแลกติกแอซิด
ด้วยเทคนิคการฉีดขึ้นรูปแบบแทรก

จิตาภา กรมสุริยศักดิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2565
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

พอลิเมอร์เชิงประกอบจากพอลิแลกติกแอซิดด้วยเทคนิคการฉีดขึ้นรูปแบบแทรก

Polymer Composite from Polylactic acid by Insert-Injection Molding Technique

ชื่อ - นามสกุล

นางสาวจิตาภา กรมสุริยศักดิ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมวัสดุ

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณรงค์ชัย โอเจริญ, Ph.D.

ปีการศึกษา

2565

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ธีรเมธชัย ไชยชนธาส

ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์สุนทรมาลย์ เนียมกลาง, Ph.D.)



กรรมการ

(รองศาสตราจารย์อภิรัตน์ เล่าห์บุตรี, Ph.D.)

ฉัตรชัย วีระนิตสกุล

กรรมการ


(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ฉัตรชัย วีระนิตสกุล, Ph.D.)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณรงค์ชัย โอเจริญ, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาสุปรีย์, Ph.D.)

วันที่ 16 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2566

หัวข้อวิทยานิพนธ์	พอลิเมอร์เชิงประกอบจากพอลิแลกติกแอซิดด้วยเทคนิคการฉีดขึ้นรูปแบบแทรก
ชื่อ-นามสกุล	นางสาวจิตาภา กรมสุริยศักดิ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณรงค์ชัย โอเจริญ, Ph.D.
ปีการศึกษา	2565

บทคัดย่อ

พอลิแลกติกแอซิด (Polylactic acid; PLA) ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ทดแทนพลาสติกที่ได้จากกระบวนการปิโตรเลียม แต่พบว่า PLA มีความแข็ง เปราะ และมีการยืดตัวที่ต่ำ นั่นจึงเป็นผลให้ความสามารถในการทำงานถูกจำกัดในสมบัติทางกลบางประการ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นถึงการปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของ PLA ในการฉีดขึ้นรูป โดยการใช้เทคนิคการแทรกด้วยสิ่งทอและแผ่นฟิล์ม ซึ่งวัสดุที่ใช้ในการเสริมแรงและวัสดุเนื้อหลักนั้นเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน ได้แก่ PLA

งานวิจัยนี้นำผ้าไม่ถักไม่ทอหรือแผ่นฟิล์ม PLA ใส่เข้าไปในโพรงแบบ (Cavity) ของแม่พิมพ์ จากนั้นจึงทำการฉีดขึ้นรูปเป็นพอลิเมอร์เชิงประกอบ เพื่อนำมาศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางกลของพอลิเมอร์เชิงประกอบ

ผลการวิจัยพบว่า พอลิเมอร์เชิงประกอบในทุกกรณี แสดงค่ามอดูลัสสูงกว่า PLA ที่ไม่มีการเสริมแรงถึง 96.6% และมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่ใกล้เคียงกันในทุกกรณี จากผลการทดสอบการทนต่อแรงกระแทกแสดงค่าที่ใกล้เคียงกัน ผลการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดัดแบบ 3 จุด ในส่วนของ การรับแรงจากด้านหน้าของวัสดุเสริมแรง พบว่าแผ่นฟิล์มมีการรับแรงได้สูงกว่าผ้าไม่ถักไม่ทอ 13.2% สำหรับความแข็งแรงต่อแรงดัดลอกที่ผิวระหว่างวัสดุเสริมแรงและวัสดุเนื้อหลัก พบว่าผ้าไม่ถักไม่ทอนั้นมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดัดลอกที่ผิวสูงกว่าแผ่นฟิล์ม 21.2% โดยภาพถ่ายทางสัณฐานวิทยาแสดงให้เห็นถึงลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์เชิงประกอบหลังจากวัสดุเสริมแรงถูกดึงลอกออกจากพอลิเมอร์หลัก

คำสำคัญ : พอลิแลกติกแอซิด พอลิเมอร์เชิงประกอบ เทคนิคการฉีดขึ้นรูปแบบแทรก

Thesis Title	Polymer Composite from Polylactic Acid by Insert-Injection Molding Technique
Name-Surname	Miss Jidapa Kromsuriyasak
Program	Materials Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Narongchai O-Charoen, Ph.D.
Academic Year	2022

ABSTRACT

Polylactic acid (PLA) was developed to replace plastic derived from petroleum processes. However, it was found that PLA is stiff, brittle, and has low elongation. As a result, its workability is limited in some mechanical properties. This research focused on improving some properties of PLA in the injection molding using textile and film insert techniques, while the materials used for reinforcement and matrix were the same as those of PLA.

In this research, the PLA non-woven fabric or PLA film was inserted into the cavity of the injection mold and then proceeded through the injection molding technique to produce a polymer composite for studying morphological characteristics, physical and mechanical properties of the polymer composite.

The research results showed that the composites in all cases exhibited higher modulus than unreinforced PLA by 96.2% and had the similar value of tensile strength in all cases. The results of the impact test showed similar values. The results of the 3-point flexural strength test in terms of loading from the front side of the reinforced material showed that the film had a compressive strength 13.2% higher than that of non-woven fabric. For the peel strength test between reinforced material and the matrix, it was found that the non-woven fabric had peeling strength at the surface 21.2 % higher than that of the film. The morphological photographs displayed the surface appearance of the polymer composite after the reinforced material had been stripped from the main polymer.

Keywords: polylactic acid (PLA), polymer composite, insert-injection molding

กิตติกรรมประกาศ

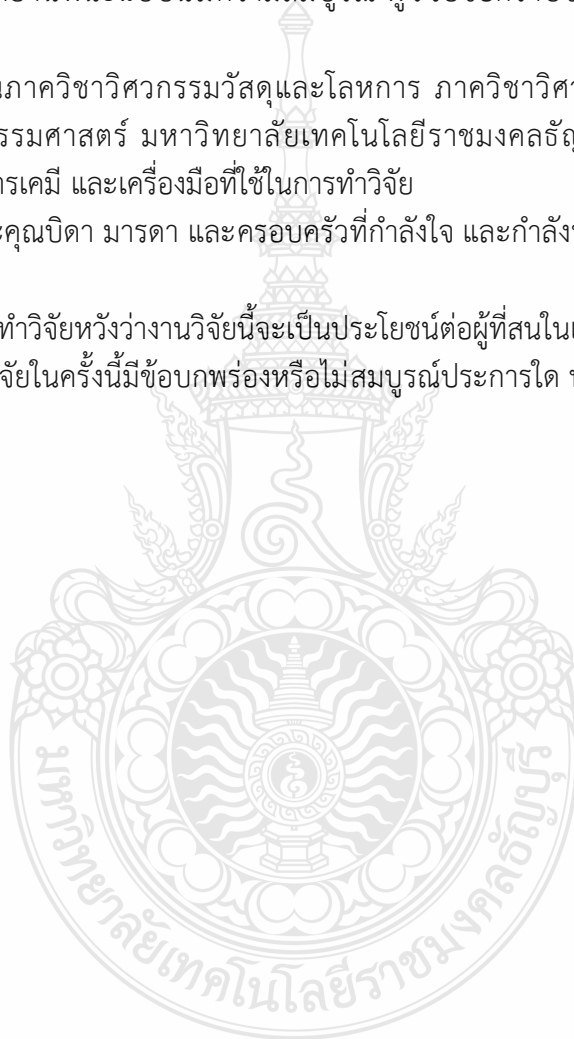
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือ ความกรุณา และความอนุเคราะห์จาก ผศ.ดร.ณรงค์ชัย โอเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้เสียสละเวลาในการให้ความปรึกษา คำแนะนำและข้อเสนอแนะต่างๆ ตลอดจนความช่วยเหลือ ช่วยแก้ไขในเรื่องของปัญหาและข้อบกพร่องต่างๆ จนสำเร็จลุล่วงได้ และขอขอบคุณ รศ.ดร.สมหมาย ผิวสะอาด ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุสำหรับใช้ในงานวิจัย เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ อาจารย์และบุคลากร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้คำแนะนำ ความอนุเคราะห์ด้านวัสดุ สารเคมี และเครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่กำลังใจ และกำลังทรัพย์ รวมถึงบุคคลที่ให้การสนับสนุนทุกท่าน

สุดท้ายนี้ ผู้ทำวิจัยหวังว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจและต้องการศึกษาต่อไม่ทางใดก็ทางหนึ่งหากงานวิจัยในครั้งนี้มีข้อบกพร่องหรือไม่สมบูรณ์ประการใด ทางผู้วิจัยขอกราบขออภัยไว้ในโอกาสนี้ด้วย

จิตาภา กรมสุริยศักดิ์

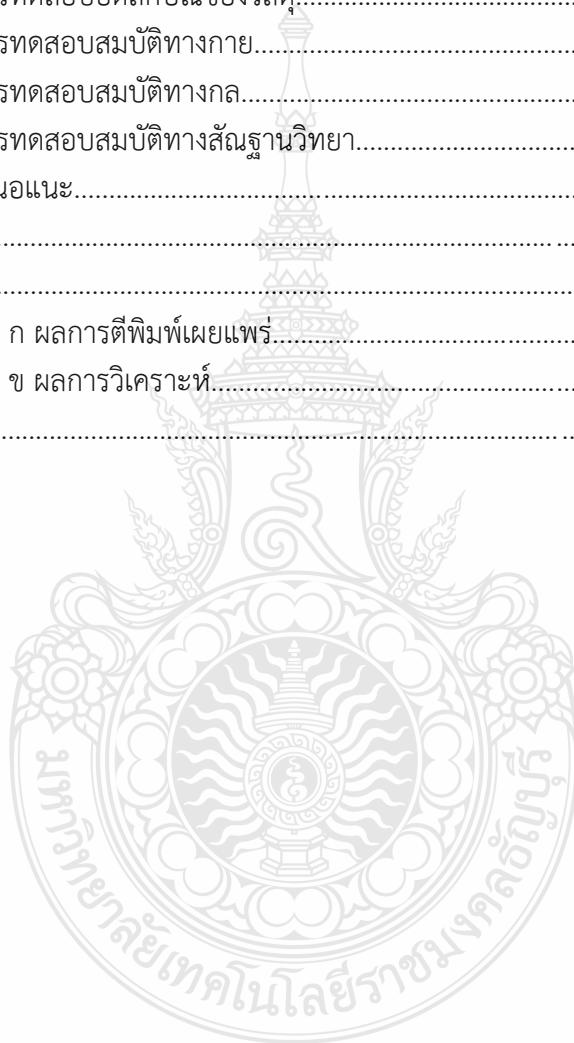


สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(12)
บทที่ 1 บทนำ.....	13
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	13
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	15
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	15
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	16
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	17
2.2 พอลิแลคติกแอซิด.....	19
2.3 ผ้าไม่ถักไม่ทอ.....	24
2.4 กระบวนการฉีดขึ้นรูป.....	29
2.5 รอยเชื่อมขวาง.....	40
2.6 การฉีดแบบแทรก.....	45
2.7 พอลิเมอร์เชิงประกอบ.....	48
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	52
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	55
3.1 แผนการดำเนินงาน.....	55
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	57
3.3 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	59
3.4 การขึ้นรูปพอลิเมอร์เชิงประกอบ.....	59
3.5 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	61
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	67
4.1 อັตลักษณ์ของวัสดุ.....	67
4.2 สมบัติทางกายภาพ.....	69

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 สมบัติทางกลของพอลิเมอร์เชิงประกอบ.....	71
4.4 สมบัติทางสัณฐานวิทยา.....	75
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	77
5.1 ผลการทดสอบอัตลักษณ์ของวัสดุ.....	77
5.2 ผลการทดสอบสมบัติทางกาย.....	77
5.3 ผลการทดสอบสมบัติทางกล.....	78
5.4 ผลการทดสอบสมบัติทางสัณฐานวิทยา.....	78
5.5 ข้อเสนอแนะ.....	78
บรรณานุกรม.....	79
ภาคผนวก.....	83
ภาคผนวก ก ผลการตีพิมพ์เผยแพร่.....	84
ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์.....	86
ประวัติผู้เขียน.....	95



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมบัติเชิงกลของพอลิแลกติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลสูง.....	22
ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน.....	55
ตารางที่ 4.1 แสดงผลดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ PLA 6100D และ PLA 32551D.....	69



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงคำจำกัดความ ตัวอย่างและโครงสร้างทางเคมีของพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	18
รูปที่ 2.2 วัฏจักรของพอลิแลคติกแอซิด.....	20
รูปที่ 2.3 สูตรโครงสร้างของพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid; PLA).....	21
รูปที่ 2.4 โครงสร้างในผ้าทอ (ซ้าย) และผ้าไม่ถักไม่ทอ (ขวา).....	24
รูปที่ 2.5 กระบวนการผลิตผ้าไม่ถักไม่ทอแบบดราย-เลด (Dry-laid nonwovens).....	26
รูปที่ 2.6 กระบวนการผลิตผ้าไม่ถักไม่ทอแบบบอแบบเว็ตเล (Wet-laid nonwovens).....	27
รูปที่ 2.7 กระบวนการผลิตผ้าไม่ถักไม่ทอแบบสปันบอนด์ (Spunbond nonwovens).....	28
รูปที่ 2.8 ชุดฉีด (Injection Unit).....	30
รูปที่ 2.9 zone การหลอมเหลวของสกรู (Screw).....	31
รูปที่ 2.10 การขึ้นรูปพลาสติกโดยการฉีด.....	33
รูปที่ 2.11 (a) ชิ้นงานฉีดไม่เต็มแบบ และ (b) รอยยุบ.....	35
รูปที่ 2.12 (a) ชิ้นงานติดภายในแม่พิมพ์และ (b) การเกิดครีบบนชิ้นงาน.....	35
รูปที่ 2.13 (a) การเกิดรอยเชื่อมประสานบนชิ้นงาน และ (b) การเปรียบเทียบผลวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์และการทดลองฉีดขึ้นรูปจริง.....	36
รูปที่ 2.14 (a) การเกิดรอยพ่น และ (b) รอยพุพองที่เกิดบนชิ้นงาน.....	37
รูปที่ 2.15 แสดงสาเหตุการโพรงอากาศภายในชิ้นงาน.....	37
รูปที่ 2.16 (a) การเกิดรอยประกายเงิน และ (b) การเกิดรอยไหม้บนผิวของชิ้นงาน.....	37
รูปที่ 2.17 (a) การเกิดรอยปนเปื้อนบนผิวของชิ้นงาน และ (b) การเกิดรอยผ้าที่บริเวณใกล้ทางเข้า.....	39
รูปที่ 2.18 (a) การหดตัว และ (b) การบิดเบี้ยวของชิ้นงานภายหลังการฉีดขึ้นรูป.....	39
รูปที่ 2.19 กระบวนการเกิดรอยเชื่อมขวาง.....	40
รูปที่ 2.20 แสดงโครงสร้างของพื้นที่ที่เกิดรอยเชื่อมขวาง.....	41
รูปที่ 2.21 แสดงตัวอย่างชิ้นงานฉีดที่แสดงให้เห็นรอยเชื่อมขวางอย่างชัดเจน.....	42
รูปที่ 2.22 รอยเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นต่อจำนวนทางเข้าของเนื้อพลาสติกที่ต่างกัน.....	43
รูปที่ 2.23 การออกแบบรูและครีบนานาเพื่อช่วยในการปรับปรุงความแข็งแรงบริเวณที่มีรอยเชื่อมขวาง.....	43
รูปที่ 2.24 การวางแผนการจัดเรียงตัวของโมเลกุลของพอลิเมอร์และเส้นใยในบริเวณเกิดรอยเชื่อมขวาง.....	44
รูปที่ 2.25 (a) เม็ดสั้นธรรมดา (b) เม็ดจากเส้นใยยาว.....	46

สารบัญญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.26 (a) เครื่องฉีดขึ้นรูปแบบปกติ (b) เครื่องฉีดขึ้นรูปแบบมีเครื่องเป่าแห้ง (Hopper dryer).....	47
รูปที่ 2.27 เทคนิคการแทรกสิ่งทอในกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Textile insert injection molding).....	48
รูปที่ 2.28 ลักษณะการกระจายตัวของเฟสที่ส่งผลต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ.....	49
รูปที่ 2.29 การจำแนกประเภทของวัสดุเชิงประกอบตามชนิดของเมทริกซ์และลักษณะของสารเสริมแรง.....	49
รูปที่ 2.30 สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์เปรียบเทียบกับวัสดุองค์ประกอบ.....	50
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย.....	56
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย (ต่อ).....	57
รูปที่ 3.3 (a) เครื่องขึ้นรูปผ้าไม่ถักไม่ทอ (Nonwoven) และ (b) ชิ้นงานที่ถูกตัดและวัดความหนา.....	60
รูปที่ 3.4 (a) ม้วนฟิล์มจากพอลิแลคติกแอซิด (b) ชิ้นงานฟิล์มที่ถูกตัดและวัดความหนา.....	60
รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะการวางผ้าไม่ถักไม่ทอ หรือแผ่นฟิล์มลงในแม่พิมพ์ (Cavity).....	61
รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบดัชนีการไหลของพอลิเมอร์.....	61
รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์.....	62
รูปที่ 3.8 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง.....	62
รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบสมบัติความแข็งแรงต่อแรงดึง.....	63
รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงที่ผิว.....	63
รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดัดแบบ 3 จุด	64
รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อการกระแทก.....	64
รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบความแข็งที่ผิว.....	65
รูปที่ 3.14 เครื่องอัดรีด (Thermo HAAKE® PolyDrive).....	65
รูปที่ 3.15 เครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection Molding, ARBURG 470 C) แม่พิมพ์ (Mold) แบบรอยเชื่อมประสาน (Weld Line).....	66
รูปที่ 4.1 แสดงผลทางความร้อนของพอลิเมอร์สามชนิดด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimetry : DSC).....	68
รูปที่ 4.2 กราฟเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของผ้าไม่ถักไม่ทอกับแผ่นฟิล์ม.....	69
รูปที่ 4.3 กราฟแท่งแสดงผลการวัดความหนาและน้ำหนักมาตรฐาน.....	70
รูปที่ 4.4 กราฟแท่งแสดงผลการทดสอบการวัดค่าความแข็งที่ผิว (Rockwell Hardness).....	71

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.5 กราฟแท่งแสดงผลการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของวัสดุเสริมแรง (Tensile Strength).....	71
รูปที่ 4.6 กราฟแท่งแสดงผลการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile Strength).....	72
รูปที่ 4.7 กราฟแท่งแสดงผลการทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก (Izod Impact).....	73
รูปที่ 4.8 กราฟแท่งแสดงผลการทดสอบความแข็งแรงต่อการดัดแบบ 3 จุด (Three Point Bending).....	74
รูปที่ 4.9 กราฟแท่งแสดงผลการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงที่ผิว (Peel Strength).....	75
รูปที่ 4.10 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM) กำลังขยายที่ 100 เท่า.....	76
a. พื้นผิวพอลิเมอร์เชิงประกอบเสริมแรงด้วยผ้าไม้ถักไม้ทอ หลังถูกดึงแผ่นผ้าออก	
b. พื้นผิวพอลิเมอร์เชิงประกอบเสริมแรงด้วยแผ่นฟิล์ม หลังถูกดึงแผ่นฟิล์มออก	



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ASTM	มาตรฐานการทดสอบจากประเทศสหรัฐอเมริกา (American Society of Testing and Materials)
°C	องศาเซลเซียส
g	กรัม
mm	มิลลิเมตร
g/cm ³	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
g/10min	กรัมต่อ 10 นาที
g/m ³	กรัมต่อตารางเมตร
J/m	จูลต่อเมตร
m/min	เมตรต่อนาที
MFI	ดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ (Melt Flow Index)
DSC	ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimetry : DSC)
PLA	พอลิแลคติกแอซิด [Polylactic Acid, (PLA)]
rpm	รอบต่อนาที (Round per minute)
psi	หน่วยวัดความดัน (Pound per Square Inch)
T	อุณหภูมิ (Temperature)
T _m	อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting Temperature)
T _g	อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature)
µm	หน่วยการวัด ไมโครเมตร
MPa	หน่วยการวัด เมกะปาสคาล

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่มีบทบาทในชีวิตประจำวันเกือบทั้งหมด ที่มีการตอบสนองด้านการใช้งาน มีความคงทนถาวร ตลอดจนราคาที่เหมาะสม ได้มาจากกระบวนการทางปิโตรเคมี ด้วยปัญหาในการกำจัด ไม่ย่อยสลาย ตกค้างในธรรมชาติ และต้องเผาเพื่อทำลาย ปัจจุบันจึงมีแนวคิดใหม่ในการนำพลาสติกที่ใช้แล้วไปรีไซเคิลและนำกลับมาใช้ใหม่ เพื่อลดปริมาณขยะ แต่ในกระบวนการการรีไซเคิล ขั้นตอนแรกที่ต้องทำคือการคัดแยกชนิดของพลาสติก แต่เนื่องด้วยขยะส่วนใหญ่ที่พบต่อหนึ่งชิ้นมักจะประกอบด้วยพลาสติกหลายชนิดจึงทำให้ยากต่อการคัดแยกเพื่อนำไปรีไซเคิลและนำกลับมาใช้ใหม่ ส่งผลทำให้เกิดเป็นปัญหาทางมลภาวะที่เป็นพิษต่อโลก เช่น ปรากฏการณ์ภาวะเรือนกระจก (Greenhouse effect) จากการผลิตผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมและผลิตภัณฑ์เหล่านี้ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ จากปัญหาดังกล่าว จึงได้มีการกระตุ้นให้นักวิจัยสำรวจ คิดค้นพัฒนาและปรับปรุงวัสดุใหม่ในการผลิตพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Bioplastic) หมุนเวียนได้ รีไซเคิลได้ [1] และใช้วัตถุดิบที่สามารถผลิตทดแทนขึ้นใหม่ได้ในธรรมชาติ (Renewable resource) เพื่อนำมาทดแทนพลาสติกที่ผลิตจากปิโตรเคมี เพื่อลดปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อธรรมชาติ สิ่งแวดล้อม แนวคิดในการปรับปรุงและพัฒนาพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพนั้นเป็นที่น่าสนใจในปัจจุบันมาก

พลาสติกชีวภาพ (Bioplastic) [2,3] หรือพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้ (Biodegradable plastic) คือพลาสติกที่ผลิตขึ้นจากวัสดุธรรมชาติซึ่งส่วนใหญ่เป็นพืช สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ (Biodegradable) ช่วยลดปัญหาหมอกพิษในสิ่งแวดล้อม ซึ่งถือว่าเป็นทางเลือกที่ยั่งยืนสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแหล่งปิโตรเคมีและเป็นอีกทางเลือกที่เป็นไปได้ในการทดแทนพลาสติกสังเคราะห์ที่ได้จากปิโตรเลียม วัสดุธรรมชาตินี้ที่สามารถนำมาผลิตเป็นพลาสติกชีวภาพมีหลายชนิด เช่น แป้ง (Starch) โปรตีนจากถั่ว และข้าวโพด เป็นต้น และในบรรดาวัสดุธรรมชาติ แป้งถือว่าเป็นวัตถุดิบทางธรรมชาติที่นิยมในการนำมาผลิตพลาสติกทางชีวภาพมากที่สุด เนื่องจากแลคไทด์ (Lactide) ที่ได้นั้นผลิตได้จากการหมักจุลินทรีย์และสามารถสกัดแป้งมาจากพืชได้ทางการเกษตรส่วนใหญ่ เช่น ข้าวสาลี ข้าวโพด มันสำปะหลัง และอ้อย นั้นล้วนแต่เป็นสารที่อุดมไปด้วยแป้ง หรือคาร์โบไฮเดรต ด้วยจุลินทรีย์ เกิดเป็นกรดแลคติก (Lactic acid : $C_3H_6O_3$) ซึ่งมีกรรมวิธีคล้ายกับการหมักเบียร์ จากนั้นนำกรดแลคติกที่ได้มาเปลี่ยนโครงสร้างให้เป็น แลคไทด์ (Lactide) แล้วนำมาหมักในระบบสุญญากาศเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างเป็นพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) [4] พลาสติกชีวภาพที่ผลิตจากแป้งโดยตรงจึงมีขีดจำกัด เพราะจะเกิดการพองตัว การเสียรูปร่างเมื่อได้รับความชื้น เนื่องจากการไวต่อความชื้น จึงได้มีการใช้เชื้อจุลินทรีย์เข้าไปย่อยสลายแป้ง ที่เรียกว่ากรดแลคติก (Lactic acid) จากนั้นผ่านกระบวนการ polymerization ทำให้กรดแลคติกเชื่อมกันเป็นพอลิเมอร์ (Polymer) ซึ่งกำลังเป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมปัจจุบัน นั่นคือ พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid; PLA) [5] เป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพชนิดพอลิเอสเทอร์ (Polyester) ซึ่งทำมาจากวัตถุดิบที่สามารถทดแทนขึ้นมา

ใหม่จากธรรมชาติ โดยเม็ดพอลิเมอร์ที่ได้หลังจากการสังเคราะห์นั้นจะมีความใส มีการถ่ายเทต่อความร้อนและความชื้นได้เป็นอย่างดี มีความแข็ง มีความแข็งแรงทางกลที่ดี นอกจากนี้การประเมินวัฏจักรชีวิตของพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid; PLA) ระบุว่าต้องใช้พลังงานฟอสซิลเรซินเกือบหนึ่งในสิบเท่า เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ [6-9] มีอัตราการไหลที่ค่อนข้างดีจึงเหมาะกับกระบวนการต่าง ๆ ทั้งกระบวนการอัดรีดเส้นใย กระบวนการฉีดขึ้นรูป การอัดรีดทำแผ่นฟิล์ม และยังสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ทำให้ ณ ตอนนี้ พลาสติก พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid; PLA) ถูกนำไปใช้งานค่อนข้างหลากหลาย สามารถนำไปใช้เป็นฟิล์มสำหรับห่อหุ้มอาหาร ใช้ทำเส้นใยและสิ่งทอ เพื่อนำไปผลิตเป็นเสื้อผ้าและผ้าเบาะรถยนต์ กระทั่งหมอนเย็บแผล, ชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ด้านการแพทย์อื่น ๆ ได้อีกด้วย

พบว่าปัญหาหลักของ พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid; PLA) คือ ความเปราะ ซึ่งนั่นจึงทำให้ถูกจำกัดในเรื่องของประสิทธิภาพการใช้งานที่มีต่อสมบัติทางกลบางประการ ฉะนั้นการฉีดขึ้นรูปขึ้นงานแล้วเสริมแรงด้วยวัสดุเสริมแรง อาจส่งผลให้ชิ้นงานที่ได้ขึ้นรูปพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid; PLA) มีความแข็งแรงที่ดีขึ้นในบางด้าน แต่เนื่องด้วยปัญหาหลักของการคอมโพสิตส่งผลต่อการนำกลับมาใช้ใหม่ การรีไซเคิล และการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ นั่นจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ที่ศึกษาการขึ้นรูปพอลิเมอร์เชิงประกอบ (Polymer Composite) [10] ได้จากวัสดุสอง (หรือมากกว่า) ชนิดเป็นส่วนประกอบ ที่แตกต่างกัน ส่วนแรกคือส่วนที่เสริมแรง นั้นเป็นส่วนที่เป็นโครงสร้างที่ให้ความแข็งแรงแก่พอลิเมอร์เชิงประกอบ ซึ่งทำหน้าที่เป็นส่วนที่รับแรงหลัก (Principle load-carrying members) ของพอลิเมอร์เชิงประกอบ ส่วนที่สองคือ เมทริกซ์ (Matrix) เป็นวัสดุที่ทำหน้าที่ยึดส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกันให้อยู่ในตำแหน่งและเรียงตัวตามกำหนด พอลิเมอร์เชิงประกอบได้ถูกนำมาใช้ และเป็นที่ยึดกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งมีข้อดีหลายประการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการรวมกันของคุณสมบัติของพอลิเมอร์ที่แตกต่างกัน 2 ชนิด หรือมากกว่านั้น ซึ่งนั่นจะส่งผลทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณสมบัติในด้านต่าง ๆ ที่โดดเด่นมากขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ชนิดเดียว และข้อจำกัดอีกประการหนึ่งของพอลิเมอร์เชิงประกอบที่มีส่วนประกอบที่แตกต่างกันทำให้การนำกลับมาใช้ใหม่และการรีไซเคิลเป็นไปได้ค่อนข้างยาก

ในการศึกษานี้จึงมุ่งเน้นถึงการปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid; PLA) ในรูปแบบการขึ้นรูปลักษณะของพอลิเมอร์เชิงประกอบที่ทำจากวัสดุที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพทั้งตัวเมทริกซ์หลักและตัวที่ใช้เสริมแรงเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน [11] จึงทำให้ส่งผลดีต่อการนำกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง หรือรีไซเคิลใหม่และการย่อยสลายทางชีวภาพ โดยใช้เทคนิคการฉีดแบบแทรกสิ่งทอ (Textile Insert Injection Molding) [12,13] และเสริมแรงด้วยแผ่นฟิล์มที่ทำจากวัสดุชนิดเดียวกันทั้งส่วนที่เสริมแรงและส่วนที่เป็นเมทริกซ์ ซึ่งนั่นจะส่งผลดีต่อการนำชิ้นงานที่ขึ้นรูปได้กลับไปรีไซเคิล และยังสามารถใช้งานเป็นวัสดุเสริมแรงในด้านต่าง ๆ ฉะนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการศึกษาเรื่องการนำผ้าไม้อัดไม่ทอและแผ่นฟิล์มใช้เสริมแรงในกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบแทรก (Insert Injection Molding)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการขึ้นรูปพอลิเมอร์เชิงประกอบทั้งแบบเสริมแรงด้วยผ้าไม่ถักไม่ทอและเสริมแรงด้วยแผ่นฟิล์ม จากกระบวนการฉีดแบบแทรก (Insert Injection Molding) เพื่อคุณลักษณะทางกายภาพของพอลิเมอร์เชิงประกอบ

1.2.2 เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกลบางประการของพอลิเมอร์เชิงประกอบทั้งแบบเสริมแรงด้วยผ้าไม่ถักไม่ทอและเสริมแรงด้วยแผ่นฟิล์ม จากกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบแทรก (Insert Injection Molding) โดยใช้แม่พิมพ์แบบรอยประสาน (weld line)

1.2.3 เพื่อนำพอลิเมอร์เชิงประกอบทั้งแบบเสริมแรงด้วยผ้าไม่ถักไม่ทอ และเสริมแรงด้วยแผ่นฟิล์มที่ทำการขึ้นรูปเรียบร้อยแล้วมาศึกษาและเปรียบเทียบคุณสมบัติบางประการ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงวัสดุให้ดีขึ้นและทดแทนวัสดุที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพแบบไม่มีการเสริมแรง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 วัสดุที่ใช้ขึ้นรูปผ้าไม่ถักไม่ทอ พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid; PLA) เกรด 6100D จากบริษัท Nature Work สำหรับทำผ้าไม่ถักไม่ทอ ทำการขึ้นรูปพอลิเมอร์เชิงประกอบด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection Molding, ARBURG 470 C) แม่พิมพ์ (Mold) Weld Line ใช้เม็ดพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid, PLA) เกรด 3052D สำหรับฉีดขึ้นรูป

1.3.2 ทำการขึ้นรูปผ้าไม่ถักไม่ทอด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว Thermo HAAKE® PolyDrive (Single Screw Extruder) โดยใช้ พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid, PLA) เกรด 6100D ในการขึ้นรูป จากบริษัท Nature Work โดยทำการอัดรีดภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 230 °C (Zone Extruder) Melt Pump ที่ 14 รอบต่อนาที ปรับแรงดันหัวพ่นเส้นใย (Drawing Jet Pressure) ที่ 10 psi และความเร็วสายพานรองรับ (Belt Speed) คงที่ที่ 2 m/min

1.3.3 แผ่นฟิล์มสำเร็จรูปจากพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid; PLA) เกรด 2003D จากบริษัท Nature Work

1.3.3 วิเคราะห์สมบัติของเม็ดพอลิเมอร์

- 1) ทดสอบสมบัติทางความร้อน (Differential Scanning Calorimeter; DSC)
- 2) ทดสอบดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ (Melt Flow Index, MFI)

1.3.3 ทำการขึ้นรูปพอลิเมอร์เชิงประกอบด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection Molding, ARBURG 470 C) แม่พิมพ์ (Mold) Weld Line ใช้เม็ดพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid; PLA) เกรด 3052D สำหรับฉีดขึ้นรูป

1.3.4 วิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์เชิงประกอบ

1.3.4.1 ทดสอบสมบัติเชิงกล

- 1) การทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของพอลิเมอร์เชิงประกอบ (Tensile strength) มาตรฐาน ASTM D638
- 2) การทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงผิวของพอลิเมอร์เชิงประกอบ (Peel strength)

3) การทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดัดแบบ 3 จุด ของพอลิเมอร์เชิงประกอบ (Three point bending)

4) การทดสอบแรงกระแทกของพอลิเมอร์เชิงประกอบ (Izod Impact Test) ASTM D256

1.3.4.2 ทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา

1) การทดสอบสัณฐานของพอลิเมอร์เชิงประกอบ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) (JEOL, JSM-65)

1.3.4.3 ทดสอบลักษณะทางกายภาพ

1) ความหนาของผ้าไม้สักไม้ทอและแผ่นฟิล์มที่ใช้ในการเสริมแรง

2) การทดสอบความแข็งที่ผิว (Rock Well Hardness) ASTM D785

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงข้อเสียบางประการของพอลิแลกติกแอซิดเพื่อลดปัญหาที่อาจพบในด้านของคุณสมบัติทางกลต่อวัสดุที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

1.4.2 สามารถใช้เป็นแนวทางในการผลิตพอลิเมอร์เชิงประกอบที่ทำจากวัสดุที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบแทรก (Insert-Injection molding) โดยใช้แม่พิมพ์แบบ Weld Line

1.4.3 สามารถใช้เป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาการนำไปใช้เชิงพาณิชย์ของพอลิเมอร์เชิงประกอบที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบแทรก โดยวัสดุที่ใช้ในการผลิตผ้าไม้สักไม้ทอเป็นพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันทั้งหมดซึ่งทำจากวัสดุที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

บทที่ 2

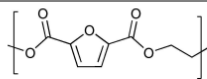

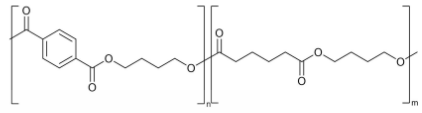
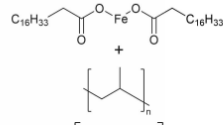
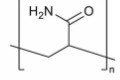
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

พลาสติกที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันนี้มีข้อดีกว่าโลหะและกระดาษอยู่หลายประการ ทั้งความต้องการพลังงานต่ำกว่าการผลิต การบำรุงรักษาต่ำ ความต้านทานการกัดกร่อน ความเบา และความทนทาน ทำให้ถูกนำมาปรับใช้งานอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมและภาคอาหาร เช่น พลาสติกบรรจุภัณฑ์อาหารเพิ่มอายุการเก็บรักษาโดยกั้นไม่ให้สัมผัสกับอากาศ [14] ทุกวันนี้พลาสติกเริ่มส่งผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม ทางอุตสาหกรรมจึงกำลังมองหาการพัฒนาพลาสติกที่มีคุณสมบัติหรือเป็นวัสดุใหม่ในบริบทนี้คือ ชีวภาพ และ ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งพลาสติกชนิดใหม่ได้ถูกนำมาทดแทนพลาสติกที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

2.1.1 ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของพลาสติกในสิ่งแวดล้อม

พลาสติกโดยทั่วไปที่เคยผลิตมานั้นยังคงไม่มีความเสื่อมคุณภาพ ยังไม่สามารถระบุหาจุดสิ้นสุดของอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ไม่มีการย่อยสลาย แต่ทว่าพลาสติกสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ ผังกลบ หรือรีไซเคิลในสิ่งแวดล้อมทั้งแบบดัดแปลงและไม่มีการดัดแปลงได้ [15] ซึ่งในปี 2556 พบว่า 32% ของพลาสติกทั้งหมด 78 ล้านตัน ที่ผลิตได้สิ้นสุดลงในสิ่งแวดล้อมซึ่งการประเมินล่าสุดได้ระบุถึงจำนวนของพลาสติกขนาดเล็กหรือไมโครพลาสติก (Microplastic) ที่พบมากที่สุด ในมหาสมุทร เป็นผลิตภัณฑ์สังเคราะห์ เช่น ไมโครบีดพลาสติกที่เติมลงในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง [16] รองลงมาคือ ไมโครพลาสติกที่เกิดจากการสลายตัวของพลาสติก ซึ่งแหล่งที่มาหลักของไมโครพลาสติกคือ การสึกหรอของล้อรถยนต์ ตามมาด้วยการสูญเสียเม็ดพลาสติกในอุตสาหกรรมระหว่างทำการขนส่ง และการซักล้างเสื้อผ้าสังเคราะห์ [17] ถึงอย่างไรก็ตาม น้ำหนักรวมของไมโครพลาสติกก็ยังคงน้อยมากเมื่อเทียบกับการผลิตทั่วโลก อย่างไรก็ตาม ขยะพลาสติกที่มีการจัดการอย่างไม่ถูกต้องในปริมาณมากจะก่อให้เกิดไมโครพลาสติกที่สะสมในสิ่งแวดล้อมในที่สุด ซึ่งนั่นอาจส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศที่ทำให้เกิดการปนเปื้อนด้วยพลาสติกและกลายเป็นส่วนหนึ่งของโซ่อาหารทั้งคนและสัตว์ ดังนั้นการลดไมโครพลาสติกทุกประเภทจะก่อให้เกิดประโยชน์มหาศาล พลาสติกทั้งหมดผ่านการย่อยสลายบางอย่างทั้งทางเคมีกายภาพ (Physicochemical) หรือทางชีวภาพ กระบวนการทางเคมีกายภาพ (Physicochemical) หมายรวมถึงการผุกร่อน การเสื่อมสภาพเนื่องจากแสงแดด ลม หรือคลื่น และการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) การออกซิเดชัน (Oxidation) ซึ่งกระบวนการเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อพลาสติกทั้งหมดและเป็นสาเหตุหลักของไมโครพลาสติก [18] ในทางกลับกันการย่อยสลายของพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพนั้นเกิดจากจุลินทรีย์ แบคทีเรียหรือเอนไซม์ที่ได้จากเชื้อรา ซึ่งความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพนั้นก็อาจแตกต่างกันออกไปตามความชื้น อุณหภูมิ และสภาวะแวดล้อมอื่นๆ ซึ่งจะไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสัตว์และพืช ดูภาพรวมได้จากรูปที่ 2.1

Table 1. Definitions, examples, and chemical structures of bio-based, biodegradable, and oxo- and hydro-degradable plastics.				
Plastic	Definition	Example ^[a]	Chemical structure	Ref.
bio-based	a plastic made from renewable resources, namely biomass or waste	PEF		[31]
bio-degradable	a plastic that can be assimilated by bacteria and/or fungi to give environmentally friendly products	PHB (bio-based)		[30]
		PBAT (fossil-carbon-based)		[30]
oxo-degradable	a plastic whose degradability is induced by additives that initiate oxidation reactions	Oxo-PP		[20, 21]
hydro-degradable	a plastic whose degradability is induced by the polar groups susceptible to hydrolysis	PA		[24-27]

[a] PEF = polyethylene furanoate; PHB = poly-4-hydroxybutyrate; PBAT = polybutylene adipate terephthalate; Oxo-PP = oxo-degradable polypropylene; PA = polyacrylamide.

รูปที่ 2.1 แสดงคำจำกัดความ ตัวอย่างและโครงสร้างทางเคมีของพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [7]

พลาสติกที่สามารถเสื่อมสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastics) [19] เป็นพลาสติกที่ได้จากแหล่งกำเนิดวัตถุดิบมวลชีวภาพ (Biomass) ได้จากวัตถุดิบทดแทนหรือสร้างใหม่ได้ (Bio-based materials) หรือจากปิโตรเคมี (Petro-based materials / non-renewable) นำมวลชีวภาพมาผ่านกระบวนการด้วยการหมักบ่ม หรือการหมักทำปุ๋ย (Composting) ซึ่งหลังการใช้งาน จะสามารถย่อยสลายได้ด้วยตัวเองในทางชีวภาพ (Degradable) และปลดปล่อย น้ำ ก๊าซคาร์บอน สารประกอบอินทรีย์ มวลชีวภาพ โดยไม่หลงเหลือสิ่งแปลกปลอม สิ่งอันตราย หรือสารพิษไว้โดยทั่วไปแล้ว ซึ่งจำแนกกลไกการย่อยสลายตัวของพลาสติกได้ [20] เป็นประเภทใหญ่ๆ ดังนี้

การย่อยหรือเสื่อมสภาพจากแสง (Photodegradation) ซึ่งการย่อยสลายตัวโดยเชิงแสง ซึ่งเป็นผลจากการเติมสารตัวเติมเพื่อเร่งปฏิกิริยาให้มีความไวต่อแสงในพลาสติก หรือจากการสังเคราะห์พันธะทางเคมีที่ไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้แตกหักง่ายได้เนื่องจากรังสี (UV) ซึ่งเมื่อหมุ่พันธะดังกล่าวได้ถูกสัมผัสโดยตรงจากแสงจะเกิดการแตกตัวของพันธะ (Free radical) ซึ่งไม่เสถียร จึงเข้าไปทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วที่พันธะในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ แต่การย่อยสลายโดยแสงนี้จะไม่เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบ หรือสภาพแวดล้อมที่ไม่โดนแสง หรือชิ้นงานถูกตกแต่งจากการทาสีที่มีความหนาบบนผิว เนื่องจากทำให้ตัวพลาสติกนั้นไม่สามารถสัมผัสกับรังสียูวีได้โดยตรง

การเสื่อมสภาพทางกล (Mechanical Degradation) ได้จากการให้แรงกระทำบนชิ้นงานทำให้บางส่วนของชิ้นงานพลาสติกเกิดการแตกและเสียหาย ซึ่งเป็นวิธีทั่วไปในการทำให้ชิ้นงานแตกเป็นชิ้นๆ

การเสื่อมสภาพได้ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative Degradation) ใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชันในการย่อยสลายพันธะภายใน เป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนในระดับโมเลกุลของพอลิเมอร์ และเกิดขึ้นได้ทั่วไปตามสิ่งแวดล้อม โดยมีแสงยูวี ความร้อน ออกซิเจน หรือแรงทางกลซึ่งเป็นปส่วน

สำคัญ เกิดเป็นไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxide, ROOH) เป็นสารประกอบในพลาสติกที่ไม่มี การเติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่ก่อให้เกิดความเสถียร (stabilizing additive) แสงและความร้อนจะทำให้ สารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ แตกตัว ที่ไม่เสถียรและทำปฏิกิริยาต่อพันธะในสายโซ่พอลิเมอร์ จึงทำ ให้เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลได้อย่างรวดเร็ว

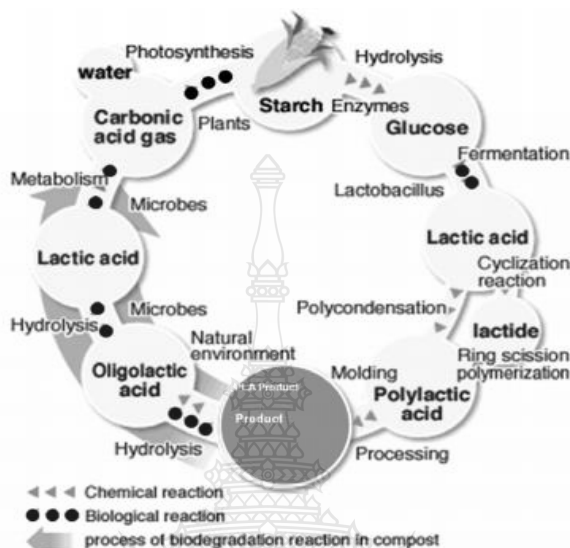
การเสื่อมสภาพได้ด้วยไฮโดรไลซิส (Hydrolytic Degradation) ซึ่งปฏิกิริยาเป็นเสื่อม สลายตัวของพอลิเมอร์หมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิคาร์บอเนต พอลิยูรีเทน และพอลิเอโนไฮดราลด์ สายโซ่โมเลกุลเกิดการแตกหักซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยา โดยปฏิกิริยานี้แบ่ง ออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ต้องการตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic hydrolysis) และไม่ต้องการ ตัวเร่งปฏิกิริยา (Non-Catalytic Hydrolysis) ซึ่งประเภทแรกยังแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ แบบที่ใช้ การย่อยสลายด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ภายนอกของโมเลกุล (External Catalytic Degradation) และแบบ ที่ใช้การย่อยสลายด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ภายในของโมเลกุล (Internal catalytic degradation) ซึ่งการ เสื่อมสภาพด้วยไฮโดรไลซิส เป็นการใช้น้ำในการทำให้เกิดปฏิกิริยาเพื่อให้น้ำเข้าไปทำลาย หรือสลายพันธะ จากพันธะที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ น้ำทำให้แตกตัวและมีอนุภาคที่ขนาดเล็กลง โดยใช้ตัวเร่งจากภายนอก ให้เกิดปฏิกิริยาจำแนกได้ 2 ชนิด คือตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาแบบเอนไซม์และอีกชนิดคือแบบที่ไม่ใช่เอน ไซม์ ซึ่งสามารถพบเจอได้ทั่วไปตามสภาพแวดล้อม

การเสื่อมสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradation) เป็นการให้จุลินทรีย์เข้าไปทำให้เกิด การเสื่อมสภาพ ซึ่งโดยทั่วไปมีขั้นตอน 2 ขั้นตอนหลักๆ เนื่องจากขนาดของสายพอลิเมอร์ยังมีขนาดใหญ่ ที่มีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำ ซึ่งลำดับแรงของการเสื่อมสภาพหรือย่อยสลายจะเกิดขึ้นภายนอก จาก การปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์สามารถเกิดได้ทั้งแบบใช้ endo-enzyme หรือ เอนไซม์ที่ทำให้เกิดการ แตกตัวของพันธะอย่างไม่เป็นระเบียบภายในสายโซ่ และแบบ exo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้พันธะ แต่ละหน่วยซ้ำที่ขนาดเล็กที่สุดที่อยู่ส่วนปลายของสายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกหัก เมื่อพอลิเมอร์แตกตัว ได้ขนาดที่เล็กพอจะสามารถแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไป และเกิดการย่อยสลายต่อในลำดับที่ 2 จนได้เป็น ผลิตภัณฑ์ในลำดับสุดท้าย (Ultimate biodegradation) เป็นพลังงาน และสารประกอบขนาดเล็กที่ เสถียรภาพทางธรรมชาติ (Mineralization) เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ แก๊สมีเทน กลีโกล แร่ธาตุ และชีวมวล (Biomass)

2.2 พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid; PLA)

พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid; PLA) [21] เป็นพลาสติกทางชีวภาพชนิดหนึ่งที่จัดใน กลุ่มของพอลิเอสเทอร์แบบสายโซ่ตรง (Aliphatic polyester) สังเคราะห์โดยตรงจากกรดแลคติก (Lactic acid) ซึ่งกรดนี้ได้มาจากการหมักแป้งหรือน้ำตาล ดังนั้นพืชที่มีแป้งหรือน้ำตาลเป็น ส่วนประกอบหลัก ตัวอย่างเช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง อ้อยหรือข้าว นั้นล้วนแต่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบ หลักในการผลิตได้ ซึ่งวัตถุดิบเหล่านี้สามารถปลูกขึ้นเพื่อทดแทนใหม่ได้อย่างต่อเนื่อง อีกทั้งพอลิเมอร์นี้ ยังจัดอยู่ในประเภทเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ที่สามารถใช้กระบวนการทั่วไปในการขึ้นรูปได้ เช่น กระบวนการขึ้นรูปแบบฉีด (Injection molding) การขึ้นรูปแบบความร้อน (Thermoforming) กระบวนการขึ้นรูปแบบอัด (Compression molding) การอัดรีด (Extrusion) และการเป่าขึ้นรูป

(Blow molding) เป็นต้น ซึ่งหลังจากถูกใช้งาน ผลิตภัณฑ์จากเหล่านี้จะสามารถย่อยสลายได้ด้วยชีวภาพเมื่อถูกนำไปฝังกลบใต้ดินโดยใช้ระยะเวลาไม่นานนักเมื่อเปรียบเทียบกับพลาสติกที่ได้จากกระบวนการทางอุตสาหกรรมปิโตรเคมี วัฏจักรของพอลิแลคติกแอซิด ดังแสดงในรูปที่ 2.2



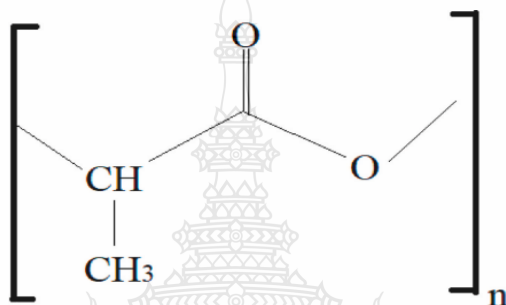
รูปที่ 2.2 วัฏจักรของพอลิแลคติกแอซิด [21]

สมัยก่อนการใช้งานของพอลิแลคติกแอซิดถูกจำกัดแค่เพียงในวงการแพทย์ เช่น ชิ้นส่วนการปลูกถ่ายอวัยวะ (Implant devices) วัสดุค้ำจุนสำหรับสเก็ลในโรงเลี้ยงเซลล์ (Tissue scaffolds) ไหมละลาย (Sutures) เนื่องจากการผลิตมีต้นทุนสูง พบได้ยากและพอลิเมอร์มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจึงทำให้มีสมบัติทางกลต่ำ จึงได้มีการพัฒนาเทคนิคใหม่เมื่อไม่นานนี้ ที่ช่วยในเรื่องการผลิตพอลิแลคติกแอซิดให้มีน้ำหนักโมเลกุลสูงในเชิงการค้าขึ้นได้ การใช้งานของวัสดุชนิดนี้จึงเริ่มแพร่ออกไป เนื่องจากพอลิแลคติกแอซิดเป็นวัสดุที่สลายตัวเองได้และผลิตมาจากวัตถุดิบที่สร้างหรือปลูกทดแทนขึ้นใหม่ได้ จึงคาดการณ์ได้ว่าปัญหาขยะจะลดลงหากใช้วัสดุนี้ และไม่ปล่อยสารพิษและส่งผลต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้ พอลิแลคติกแอซิดเป็นวัสดุในอุดมคติสำหรับงานด้านบรรจุภัณฑ์และผลิตภัณฑ์เพื่อการอุปโภคด้านอื่น ๆ แนวโน้มของงานวิจัยในปัจจุบันได้พัฒนาพอลิแลคติกแอซิดเพื่อใช้เป็นผลิตภัณฑ์กึ่งคงทน (Semidurable Products) และนำมาใช้ทดแทนพลาสติกที่ผลิตจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี

2.2.1 กระบวนการผลิตพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid; PLA) [22]

วัตถุดิบเตรียมได้ด้วยการปลูกข้าวโพดซึ่งใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และน้ำเป็นวัตถุดิบ ใช้กระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช ได้วัตถุดิบเป็นแป้ง แล้วจึงนำแป้งหรือข้าวโพด มาผ่านกระบวนการหมักบ่ม โดยใช้จุลินทรีย์เฉพาะ เพื่อย่อยโมเลกุลของแป้งและน้ำตาลขนาดใหญ่นเป็นกรดแลคติก (Lactic Acid, C₃H₆O₃) ซึ่งใช้เป็นมอนอเมอร์ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กระบวนการหลักๆ ได้แก่ กระบวนการจากควบแน่น (Polycondensation) หรือกระบวนการเปิดวง (Ring-opening Polymerization) ในกระบวนการถัดไปจะกรดแลคติก โดยการรวมตัวของ

ปฏิกิริยาในกรดแลคติก 2 โมเลกุล ทำให้เกิดเป็นสารประกอบแบบวงที่มีชื่อว่าแลคไทด์ (Lactide) ในอันดับแรก จากนั้นจึงนำเอาวงแหวนแลคไทด์นี้ สายโซ่ยาวของพอลิเมอร์ถูกสังเคราะห์ขึ้นในลำดับต่อมา นี่จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้เลือกชื่อผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ได้จากกระบวนการนี้ว่า พอลิแลคไทด์ ซึ่งเมื่อสังเคราะห์ผ่านการแล้วก็สามารถนำไปขึ้นรูปเพื่อไปประยุกต์ใช้ต่อไป เนื่องจากสารชนิดเดียวกันจากทั้งสองกระบวนการ โดย PLA เป็นพอลิเมอร์เทอร์โมพลาสติกที่มีความแข็งแรงและโมดูลัสสูง สามารถทำมาจากทรัพยากรหมุนเวียน เช่น ข้าวโพด หัวบีท เป็นต้นอยู่ในตระกูลอะลิฟาติกโพลีเอสเตอร์ซึ่งทำขึ้นโดยทั่วไปทำจากกรดอัลฟาไฮดรอกซี (Alpha Hydroxy Acid) ซึ่งถือว่าสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [23] โครงสร้างทางเคมีแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 สูตรโครงสร้างของพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid; PLA) [22]

2.2.2 สมบัติของพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid; PLA)

โดยภาพรวมแล้ว PLA มีลักษณะที่ใสเมื่อมองด้วยตาเปล่า และมีความแวววาวสูง ซึ่งได้จากสารเติมแต่งแต่ละชนิดที่ใส่รวมด้วย สมบัติทางกลของ PLA สามารถนำไปใช้งานได้เช่นเดียวกับพลาสติกทั่วไป ที่มีสมบัติของความเป็นเทอร์โมพลาสติก อีกทั้ง PLA ยังสามารถป้องกันการเสียดสีและกลืนได้เป็นอย่างดี มีความต้านทานต่อน้ำมันและไขมันสูง ในขณะที่แก๊สออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำสามารถแพร่ผ่านได้เป็นอย่างดี มีความคงทนต่อแรงกระแทกต่ำ ซึ่งมีค่าค่าความแข็งใกล้เคียงกับ PVC คงทนต่อการกระแทก และมีการยืดหยุ่นที่ใกล้เคียงกับ PET นอกจากนี้ PLA ยังมีสมบัติใกล้เคียงกับ PS และสามารถนำไปดัดแปลงให้มีสมบัติใกล้เคียงกับ PE หรือ PP ดังนั้น PLA จึงสามารถนำไปปรับปรุงสมบัติพื้นฐานทั้งด้านการขึ้นรูปและการใช้งานเช่นเดียวกับพลาสติกทั่วไปที่ผลิตจากกระบวนการปิโตรเคมี

ความบริสุทธิ์เชิงแสง (Optical Purity) ของ PLA ส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางความร้อน สมบัติทางกลและสมบัติการต้านทานการซึมผ่านของเหลวและก๊าซ (Barrier properties) ที่มีอัตราส่วนของแอล-ไอโซเมอร์สูงกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ มีแนวโน้มเป็นพอลิเมอร์แบบกึ่งผลึก (Semicrystalline polymer) ในขณะที่พอลิเมอร์ที่มีดี-ไอโซเมอร์ในส่วนประกอบเพิ่ม มีความบริสุทธิ์เชิงแสงลดลงและมีแนวโน้มเป็นอสัณฐานพอลิเมอร์ (Amorphous) นอกจากนี้คุณสมบัติการหลอมเหลว อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะจากแก้วและปริมาณผลึกมีแนวโน้มต่ำลงตามอัตราส่วนของแอล-ไอโซเมอร์ที่ลดลง

ด้วยอัตราส่วนของไอโซเมอร์ที่แตกต่างกันภายในสายโซ่จึงทำให้พอลิแลกติกแอซิดที่สังเคราะห์ขึ้นได้มีสมบัติที่หลากหลาย สามารถนำไปใช้งานและปรับได้ตามความต้องการที่หลากหลายขึ้น

สมบัติละลายตัวของพอลิแลกติกแอซิดขึ้นอยู่กับสัดส่วนส่วนประกอบหน่วยที่อยู่ในสายโซ่พอลิเมอร์ และปริมาณความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) แต่ไม่สามารถละลายน้ำ แอลกอฮอล์ และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีหมู่แทนที่ เช่น เฮกเซน (Hexane) และเฮปเทน (Heptane) ตัวทำละลายที่ดีสำหรับพอลิแลกติกแอซิดที่มีความบริสุทธิ์เชิงแสงสูง (Poly(L-lactic acid), PLLA) ได้แก่ ตัวทำละลายอินทรีย์กลุ่มคลอรีเนตและฟลูออรีเนต (Chlorinated or fluorinated organic solvents) ไดออกเซน (Dioxane) ไดออกโซเลน (Dioxolane) และฟูเรน (Furane) ราซิมีคพอลิแลกติกแอซิด (Poly(DL-lactic acid))

สมบัติทางกลและทางกายภาพของพอลิแลกติกแอซิดมีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ที่ 1.25 โดยไม่ผ่านการดึงยึดที่พอลิเมอร์ (Unoriented PLA) มีความเปราะมากแต่ยังคงคงรูปอยู่ (Stiffness) และมีความแข็งแรงสูง (Strength) เมื่อผ่านการดึงยึดออกแล้ว (Oriented) จะให้สมบัติที่คล้ายกับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรต (Polyethylene terephthalate, PET) แต่กลับดีกว่าพอลิสไตรีนที่ถูกดึงยึดออกแล้ว (Oriented PS) ค่ามอดูลัสและค่าความทนต่อแรงดัด (Tensile and flexural modulus) ของพอลิแลกติกแอซิดแสดงค่าที่สูงกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิสไตรีน (PS) และพอลิโพรพิลีน (PP) แต่การทนต่อแรงกระแทก (Izod Impact Strength) และการยืดที่จุดแตกหัก (Elongation at break) แสดงค่าน้อยกว่าพลาสติกชนิดอื่น ลักษณะทางกายภาพของ PLA ทั้งแบบผ่านและไม่ผ่านการดึงยึดออก ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ทั้งนี้ทิศทางการจัดเรียงตัว (Degree of orientation) และปริมาณของ Isomer อาจมีผลต่อการทดสอบ

ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติทางกลของพอลิแลกติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลสูง

สมบัติ	ไม่ผ่านการดึงยึด (Unoriented)	ผ่านการดึงยึด (Oriented)*
ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength, psi)	6,900-7,700	6,900-24,000
ความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก (Tensile yield strength, psi)	6,600-8,900	N/A
มอดูลัสแรงดึง (Tensile modulus, psi)	500,000-580,000	564,000-600,000
ความต้านทานแรงกระแทก (Notched Izod impact, ft lb in-1)	0.3-0.4	N/A
ร้อยละการยืดตัวที่จุดแตกหัก Elongation at break (%)	3.1-5.8	15-160
ความแข็ง (Rockwell hardness)	82-88	82-88

พอลิแลกติกแอซิดมีอุณหภูมิเปลี่ยนจากสถานะแข็งคล้ำแล้วเป็นนิ่มคล้ำยง (T_g) และจุดหลอมเหลว (T_m) ค่อนข้างสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกทั่วไป อุณหภูมิกลาสทรานสิชันมีค่าขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลและอัตราส่วนระหว่างอีแนนซีโอเมอร์ (L:D ratio) โดยพบว่าอุณหภูมิกลาสทรานสิชันมี

น้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้นตามแนวโน้ม การผสมแอล-อีแนนซีโอเมอร์เข้ากับดีอีแนนซีโอเมอร์ทำให้อุณหภูมิ กลาสทรานสิชันมีแนวโน้มลดต่ำลง เมื่ออัตราส่วนระหว่างแอลและดีใกล้เคียงกันมากขึ้น เช่น อัตราส่วน ระหว่างแอลต่อดีเป็น 50:50 อุณหภูมิกลาสทรานสิชันมีแนวโน้มลดต่ำลงมากที่สุด โดยทั่วไปอุณหภูมิ หลอมเหลวของพอลิแลกติกแอซิดมีค่าอยู่ในช่วง 130-160 °C การลดลงของอุณหภูมิหลอมเหลว เนื่องจากผลของมีโซ-แลคไทด์มีความสำคัญโดยช่วยให้ความสามารถในการขึ้นรูปง่าย อีกทั้งยังช่วยลด การเสถียรภาพจากความร้อน

สมบัติการป้องกันการซึมออกของของเหลวและก๊าซ (Barrier Properties) โดยสมบัติ การป้องกันการซึมออกของของเหลวและก๊าซในพอลิแลกติกแอซิดให้ผลใกล้เคียงกับพลาสติกทั่วไปที่ใช้ ในงานบรรจุภัณฑ์ปัจจุบัน เช่น พอลิสไตรีน หรือ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้ ก๊าซออกซิเจน ไนโตรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ ผ่านได้ของ PLA มีค่าน้อยกว่า พอลิสไตรีน (PS) แต่ สูงกว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรต (PET) ส่วนการยอมให้น้ำซึมผ่านมีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ PLA สามารถป้องกันการซึมผ่านของกลิ่นได้ดี โดยคำนึงจากการใช้สารประกอบอินทรีย์จากค่าสัมประสิทธิ์ การซึมผ่าน เช่น เอทิลอะซิเตท และ ดี-ไลโมนีน (D-limonene) ซึ่งพบว่ามีค่าที่ค่อนข้างใกล้เคียงในพอลิ เอทิลีนเทเรฟทาเรต

2.2.3 การสลายและเสื่อมสภาพของพอลิแลกติกแอซิด (Polylactic acid; PLA)

ส่วนใหญ่มักเกิดจากการขาดออกของสายโซ่หรือในส่วนด้านข้างโมเลกุล โดย ธรรมชาติแล้วการเสถียรภาพเกิดจากการมาจากความร้อนที่ถูกใช้เป็นตัวกระตุ้น หรือพฤติกรรมในทาง ชีวภาพ (เช่น เอนไซม์) ปฏิกิริยาออกซิเดชัน การแตกตัวด้วยแสง (Photolysis) และการแตกตัวจากรังสี (Radiolysis) เนื่องจากการเสถียรภาพลงเกิดขึ้นได้ทั้งทางกายภาพและทางชีวภาพ กลไกการสลายและ เสื่อมสภาพจึงมักเกี่ยวข้องกับการเสื่อมสภาพจากสิ่งแวดล้อม (Environmental degradation) ปัจจัยที่มี ผลต่อการเสถียรภาพของ PLA ประกอบด้วยหลายอย่าง อาทิ น้ำหนักโมเลกุล ปริมาณความผลึก อุณหภูมิ ความบริสุทธิ์ ระดับความเป็นกรด-ด่าง (pH) ปริมาณความเข้มข้นในเกลือ (Salinity) ปริมาณ ออกซิเจนที่มีอยู่ หรือความต้องการสารอาหารของจุลินทรีย์ในระบบ ดังนั้นในการทดสอบการเสถียรภาพ ของ PLA จึงต้องนำเอาสาเหตุและปัจจัยต่างๆมารวมด้วย นอกจากนี้การสลายหรือเสถียรภาพลงขึ้นอยู่กับ ลักษณะจำเพาะของลักษณะกายภาพและเคมี เช่น ระดับการแพร่ (Diffusivity) ความเป็นรูพรุน (Porosity) สัณฐาน (Morphology) และทางกล (Mechanical strength) เป็นต้น เมื่อสลายตัวแล้วจะ เกิดน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะการหมักที่ถูกควบคุม (Controlled composting environment) ในระยะเวลา 90 วัน หากเติมพอลิแลกติกแอซิดปริมาณเล็กน้อย (น้อยกว่า 30 %w/w) ในของเสียจากการทำบ่มปุ๋ยที่ยังไม่ผ่านการหมัก (Pre-Composted Yard Waste) ส่งผลให้การหมักมี ประสิทธิภาพ พอลิแลกติกแอซิดถูกไฮโดรไลสในไอน้ำหรือน้ำที่เดือดให้เป็นกรดแลกติกซึ่งสามารถนำ มอนอเมอร์กลับมาสังเคราะห์ขึ้นใหม่ พอลิ(แอล-แลกติกแอซิด) ถูกไฮโดรไลสที่ความร้อน 180-350 °C ในเวลา 30 นาที ได้กรดแอล-แลกติก การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation) ของพอลิแลกติก แอซิดและโคพอลิเมอร์เกิดขึ้นได้จากเอนไซม์ประเภทเอสเทอร์ส โปรติเอสและไลเปสที่ จุลินทรีย์ขับ ออกมา และผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหลังการแตกสลายด้วยน้ำทั้งหมดของพอลิแลกติกแอซิดสามารถถูก จุลินทรีย์ดูดซึมได้ เช่น แบคทีเรียและเห็ดรา

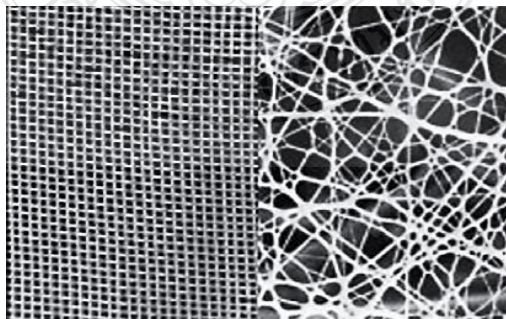
2.2.4 การนำไปใช้งานและผลิตภัณฑ์

เนื่องด้วยการเพิ่มขึ้นของราคาน้ำมัน การลดลงของน้ำมันสำรอง ทำให้ทั่วโลกตระหนักถึงการพัฒนาที่ยั่งยืนและการบังคับใช้กฎหมายต่างๆ มุ่งไปสู่การใช้พอลิเมอร์ชีวภาพทดแทนมากขึ้น PLA ได้กลายเป็นพอลิเมอร์ทางชีวภาพที่มีศักยภาพหลายหลายที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ เพื่อทดแทนพอลิเมอร์จากปิโตรเคมี ทั้งในด้านการแพทย์ เนื่องจาก PLA เป็นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable มีความเข้ากันกับเนื้อเยื่อ (Bioparticle) และสามารถดูดซึม (Bioresorbable) ได้ด้วยระบบทางชีวภาพ (Biological system) ในร่างกาย จึงทำให้เป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพเหมาะกับงานทางการแพทย์ เช่น ไหมเย็บแผล (Sutures) แม็กเย็บแผล (Staples) วัสดุปิดแผล (Wound dressing) ชิ้นส่วนฝังในร่างกาย (Surgical Implants) อุปกรณ์สำหรับยึดกระดูก (Orthopedic fixation devices) วัสดุสำหรับปล่อยตัวยาหรือตัวนำพาที่สามารถควบคุมระยะเวลาที่ใช้ในการนำพาหรือปลดปล่อยยาได้ดี ทางด้านการเกษตร เช่น ภาชนะปลูกพืช วัสดุห่อหุ้มและป้องกันจากยาฆ่าแมลง ยาฆ่าวัชพืช หรือปุ๋ยตามเวลาที่กำหนด ด้านบรรจุภัณฑ์ เช่น บรรจุภัณฑ์ที่ใช้แล้วทิ้ง ภาชนะบรรจุอาหาร ขวดน้ำ ถูหิ้ว ก่อโคม फिल्मสำหรับห่อ เม็ดโคมกันกระแทก ตัวเคลือบภาชนะกระดาษ ในส่วนของด้านเส้นใยและแผ่นผ้าแบบ Nonwoven เช่น ผลิตภัณฑ์อนามัย ผ้าอ้อมสำเร็จรูป เสื้อผ้าและเครื่องนุ่งห่ม เครื่องนอนที่บรรจุด้วยเส้นใย ด้านอุตสาหกรรมยานยนต์ เช่น อุปกรณ์ลดแรงการกระแทก (Bumpers) แผ่นรองพื้น (Floor mats) ด้านอิเล็กทรอนิกส์และการสื่อสาร และอุปกรณ์ตกแต่งภายใน เช่น ชิ้นส่วนประกอบในโทรศัพท์ ชิ้นส่วนประกอบในคอมพิวเตอร์ และแผ่นซีดี และอุปกรณ์เครื่องเขียน บัตรพลาสติก ผลิตภัณฑ์ใช้ในบ้านเรือน ท่อพลาสติก สารเชื่อมติด สารเคลือบกระดาษชั่วคราว

2.3 ผ้าไม่ถักไม่ทอ (Nonwoven)

2.3.1 กระบวนการผลิตผ้าไม่ถักไม่ทอ (Nonwoven) [24]

ผ้าไม่ถักไม่ทอเป็นผ้าที่ได้จากการขึ้นรูปโดยตรงจากเส้นใย ซึ่งต่างจากผ้าถักหรือผ้าทอที่ขึ้นรูปจากการถักหรือทอของเส้นด้าย ดังนั้นถ้านำเอาผ้าไม่ถักไม่ทอมาส่องดูโครงสร้างด้วยกล้องที่มีกำลังขยายจะเห็นเป็นเส้นใยที่มีลักษณะพาดสานกันแบบไร้ทิศทาง



รูปที่ 2.4 โครงสร้างในผ้าทอ (ซ้าย) และผ้าไม่ถักไม่ทอ (ขวา) [24]

ข้อดีของผ้าไม่ถักไม่ทอคือ สามารถออกแบบให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งานที่แตกต่างและมีสมบัติที่หลากหลายเหมาะกับการใช้งาน ซึ่งสมบัติและลักษณะที่หลากหลายของผ้าขึ้นอยู่กับเส้นใยที่ถูกเลือกใช้ ทั้งธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์ก็สามารถนำมาปรับใช้ได้หลายเทคนิคให้เหมาะกับขึ้นรูปของผ้าไม่ถักไม่ทอ กระบวนการขึ้นรูปผ้าไม่ถักไม่ทอสามารถผลิตได้อย่างรวดเร็วในปริมาณมากและขณะที่ต้นทุนการผลิตต่ำ จึงเหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง (Disposable) โดยขั้นตอนหลักในการผลิตผ้าไม่ถักไม่ทอ มี 3 ขั้นตอน คือ

2.3.1.1 การขึ้นรูปแผ่น (Web formation) เป็นขั้นตอนใช้วัสดุรองรับเส้นใยที่กระจายตัว เพื่อทำให้เป็นแผ่น (Web) โดยรูปแบบเส้นใยที่ใช้เป็นได้ทั้งแบบ dry-laid และ wet-laid หรือเม็ดพลาสติกที่ทำการขึ้นรูปเป็นเส้นใยแล้วจึงขึ้นรูปเป็นแผ่น (เทคนิคการปั่นหลอม (Melt Spinning)) เส้นใยที่ใช้สำหรับเทคนิคทราย-เลด และเว็ท-เลด เส้นใยที่ใช้จะเป็นเส้นใยสังเคราะห์โดยมีน้ำและลมเป็นตัวกลางในการกระจายตัวของเส้นใยลงบนแผ่นขึ้นรูป ส่วนเทคนิคการปั่นหลอมมีวิธีการคือ นำเม็ดพลาสติกผ่านการหลอมแล้วอัดรีดผ่านหัวด้ายเป็นเส้นใยยาวโรยลงบนสายพานที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่เพื่อขึ้นรูปเป็นผืนผ้าไม่ถักไม่ทอ

2.3.1.2 การเชื่อมติดเส้นใยในแผ่น (Bonding Process) เป็นการเชื่อมเส้นใยในแผ่นผ้าเข้าไว้ด้วยกัน ทำให้ผ้ามีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น สามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งอาจส่งผลต่อความแข็งแรงรวมถึงลักษณะของผ้าไม่ถักไม่ทอได้ โดยจะมีวิธีการเชื่อมยึดเส้นใยดังนี้

วิธีการใช้ความร้อนเชื่อมติด (Thermal Bonding) เป็นการใช้ลูกกลิ้งร้อน (Hot Calendars) และลมร้อน (Hot Air) เพื่อให้เส้นใยบางส่วนเกิดการหลอมและยึดติดกัน จากนั้นทำให้เย็นตัวลง ความร้อนของลูกกลิ้งร้อนที่ใช้จะส่งผลให้ผ้ามีความแข็งแรง และมีลักษณะที่แบนแตกต่างกันมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับพื้นผิวสัมผัสระหว่างลูกกลิ้งร้อนและผ้าไม่ถักไม่ทอที่สัมผัสกัน หากลูกกลิ้งที่มีพื้นผิวสัมผัสที่เรียบสัมผัสลงบนผ้าทั้งแผ่นก็จะทำให้ได้แผ่นผ้าไม่ถักไม่ทอที่มีความแข็งแรงสูง และมีความเรียบแบน หรือใช้ลูกกลิ้งที่มีพื้นผิวสัมผัสหยาบ เช่น ลูกกลิ้งลายขรุขระไม่เรียบเมื่อสัมผัสบนผ้าจะทำให้เส้นใยหลอมเชื่อมติดกันบางจุด ทำให้ผ้าที่ได้มีความฟู ความโค้งงอ และมีสัมผัสที่ดีขึ้น แต่ความแข็งแรงน้อยลง ดังนั้นควรปรับหรือเลือกใช้เทคนิคให้เหมาะสมกับสมบัติและลักษณะของผ้าไม่ถักไม่ทอตามต้องการ

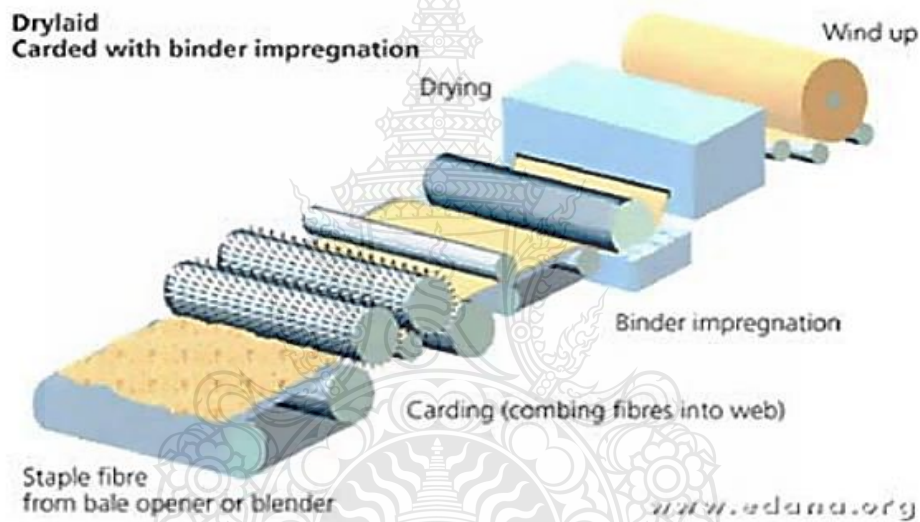
วิธีการใช้ทางเคมีในการเชื่อมติด (Chemical Bonding) เป็นการใช้กาวยาทั้งในรูปแบบสารละลายกาวยา โฟมกาวยา หรือสเปรย์กาวยา ในการเชื่อมติดกันของเส้นใยในผ้าที่ถูกเชื่อมด้วยสารละลายกาวยาจึงทำให้ผ้าที่มีความแข็งแรงและมีลักษณะเรียบ ในขณะที่ผ้าไม่ถักไม่ทอที่ใช้โฟมกาวยาหรือสเปรย์กาวยาจะคืนตัวได้ดี หนาฟู และมีความนุ่ม

วิธีการใช้กระบวนการทางกลเชื่อมติด (Mechanical Bonding) เป็นการใช้เข็มปัก (Needle Punching) และการใช้เข็มปักพร้อมน้ำ (Hydro Entanglement) เป็นต้น ผ้าไม่ถักไม่ทอที่ใช้เทคนิคปักด้วยเข็มปักส่วนใหญ่จะทำให้ผ้ามีลักษณะที่แข็งแรงและเป็นแผ่นหนา มีความแข็งแรงสูง หากใช้เข็มปักพร้อมน้ำในการขึ้นรูปผ้าจะมีความนิ่มคล้ายผ้ามากกว่า

2.3.1.3 การตกแต่งสำเร็จ (Finishing Process) ซึ่งขั้นตอนสุดท้ายเพื่อเพิ่มสมบัติและลักษณะพิเศษให้กับผ้า เช่น ให้การย้อมสี กลิ่นหอม ผิวสัมผัสนุ่ม เพิ่มความนุ่ม สมบัติทนไฟ ป้องกันไฟฟ้าสถิต เป็นต้น ซึ่งสามารถทำได้ด้วยวิธีการทางกายภาพและทางเคมี

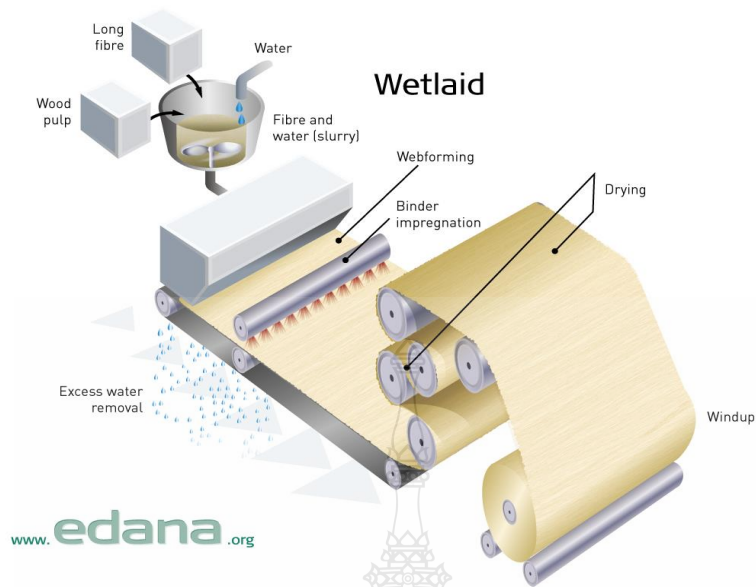
ซึ่งประเภทของผ้าไม่ถักไม่ทอ มีหลายประเภทขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้เทคนิคในการขึ้นรูปแผ่นผ้าและเทคนิคการยึดเส้นใยในแผ่น โดยจะตัวอย่างของผ้าไม่ถักไม่ทอบางประเภทดังนี้

2.3.2 กระบวนการผลิตแบบดราย-เลด (Dry-laid nonwovens) [37] ใช้เส้นใยสั้นในการขึ้นรูปแผ่นเป็นผ้าไม่ถักไม่ทอ (เช่น เส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์) โดยทำการกระจายเส้นใยสั้นให้มีความสม่ำเสมอลงบนสายพาน อาจทำให้เส้นใยมีการจัดเรียงตัวดีขึ้นอย่างสม่ำเสมอได้จากขั้นตอนการสาวเส้นใย (Carding) แล้วทำการเชื่อมติดของเส้นใยด้วยเทคนิคต่างๆ เช่น การใช้ความร้อนเชื่อมติด การยึดเชื่อมด้วยเคมี การใช้เข็มปัก (Needle Punch) และการปักด้วยเข็มพร้อมน้ำ (Hydro Entanglement) ซึ่งการขึ้นรูปผ้าไม่ถักไม่ทอแบบใช้เข็มปัก (Needle-punched Nonwoven) ก็จัดอยู่ในประเภทเดียวกัน โดยมีการประยุกต์ใช้เป็นพรมปูพื้นและแผ่นติดผนังรถยนต์ ฉนวน ธรณีสั่งทอ (Geotextiles) และวัสดุทำลูกเทนนิส เป็นต้น



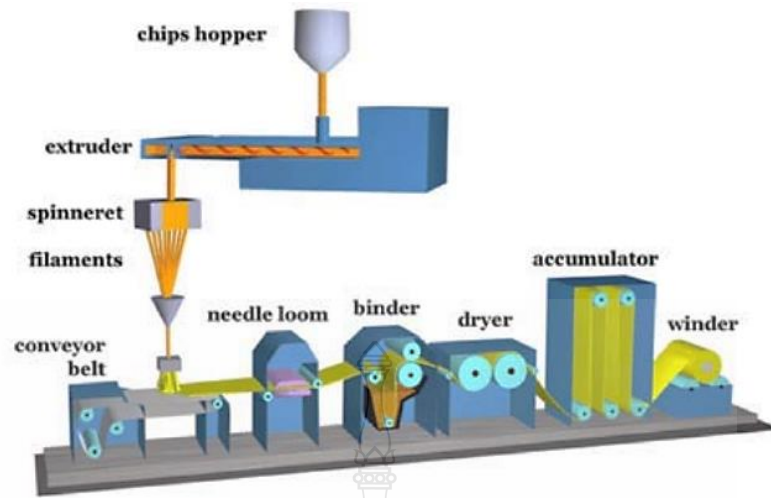
รูปที่ 2.5 กระบวนการผลิตผ้าไม่ถักไม่ทอแบบดราย-เลด (Dry-laid nonwovens) [37]

2.3.3 กระบวนการผลิตแบบเว็ต-เลด (Wet-laid nonwovens) [37] เป็นการขึ้นรูปผ้าไม่ถักไม่ทอจากเส้นใยที่มีลักษณะที่สั้นกว่าแบบแบบที่ใช้ในดราย-เลดผ้าไม่ถักไม่ทอ สามารถใช้สารชนิดอินทรีย์ และอนินทรีย์ในการทำเส้นใยได้ เช่น เส้นใยแก้ว โดยการขึ้นรูปนั้นจะกระจายเส้นใยในน้ำก่อนไหลลงบนสายพานเพื่อขึ้นรูปเป็นแผ่นผ้า ซึ่งกระบวนการนี้จะให้ผ้าไม่ถักไม่ทอที่มีความคล้ายกับกระดาษ มีโครงสร้างที่แน่น (ความหนาแน่นสูง) มีจุดเด่นคือ มีการดูดซับที่ดี การเชื่อมติดเส้นใยส่วนใหญ่จึงใช้เทคนิคการเชื่อมติดด้วยเคมี และความร้อน ปัจจุบันได้มีการใช้เทคนิคการปักด้วยเข็มพร้อมน้ำด้วย ได้แก่ กระดาษกรองกาแฟ (Coffee Filter) ใส่กรอง ผลิตภัณฑ์สำหรับทำความสะอาด (Wipes) แผ่นแยกในแบตเตอรี่ (Battery separator) เป็นต้น



รูปที่ 2.6 กระบวนการผลิตผ้าไม่ถักไม่ทอแบบเว็ทเล (Wet-laid nonwovens) [37]

2.3.4 กระบวนการผลิตแบบสปันบอนด์ (Spunbond Nonwovens) [37] เป็นการขึ้นรูปเส้นใยจากเม็ดพลาสติกโดยตรง ด้วยการนำเม็ดพลาสติกให้ความร้อนด้วยเครื่องอัดรีด (Extruder) พลาสติกหลอมเหลวผ่านหัวด้ายได้เส้นใยที่มีลักษณะของเส้นใยยาวต่อเนื่อง โปรยลงบนสายพานรองรับเพื่อขึ้นรูปเป็นแผ่นดังแสดงในรูปที่ 2.7 ฉะนั้นการผลิตผ้าไม่ถักไม่ทอด้วยเทคนิคนี้สามารถใช้ได้เพียงเส้นใยสังเคราะห์ในการขึ้นรูปเท่านั้นไม่เหมาะสมกับเส้นใยธรรมชาติ โดยวัสดุที่ใช้ส่วนใหญ่ ได้แก่ พอลิเอสเตอร์ พอลิโพรพิลีน ไนลอน และพอลิยูรีเทน กระบวนการสามารถใช้เทคนิคการเชื่อมติดด้วยความร้อน สารเคมี หรือการปักด้วยเข็มในเชื่อมติดเส้นใยในแผ่นผ้าไม่ถักไม่ทอ ลักษณะที่ได้มีความหลากหลาย ตั้งแต่เบาบาง ดัดงอได้ไปจนถึงแผ่นที่มีความหนาและแข็ง ในกรณีที่ใช้แบบการปักด้วยเข็มยึดติดเส้นใย จะเรียกผ้าไม่ถักไม่ทอที่ผ่านเทคนิคนี้ได้ว่า สปันเลส (Spunlace) ซึ่งจะได้ผ้าที่มีลักษณะใกล้เคียงกับผ้า ที่มีความอ่อนนุ่ม ประยุกต์ใช้กับงานเช่น ผลิตภัณฑ์ผ้าอ้อม และการแพทย์ (ชุดผ่าตัดของแพทย์ หน้ากากอนามัย วัสดุทำหรับทำความสะอาด) และบรรจุภัณฑ์ (บรรจุภัณฑ์แผ่น CD ของบรรจุเครื่องมือแพทย์) หรือใช้เป็นตัวเสริมแรงในงานเสริมแรง เป็นต้น



รูปที่ 2.7 กระบวนการผลิตผ้าไม่ถักไม่ทอแบบสปันบอนด์ (Spunbond nonwovens) [37]

2.3.5 กระบวนการผลิตแบบเมลต์โบลน (Melt blown nonwovens) เป็นกระบวนการขึ้นคล้ายกับสปันบอนด์ที่ใช้เม็ดพลาสติกขึ้นรูปโดยตรง แต่มีความแตกต่างตรงที่เส้นใยที่ฉีดออกมามีความเล็ก ละเอียดในขนาดนาโนเมตรไมโครเมตร แต่เส้นใยไม่ยาวต่อเนื่อง โดยพลาสติกจะถูกหลอมด้วยเครื่องอัดรีดผ่านหัวดายน์ที่ถูกออกแบบให้มีลมเย็นอยู่รอบบริเวณหัวขึ้นรูป จึงทำให้เนื้อพลาสติกที่ผ่านรูของหัวฉีดถูกลมเย็นที่มีความเร็วสูงบังคับทิศทางและพ่นกระจายเนื้อพอลิเมอร์ลงบนสายพาน จึงส่งผลให้เส้นใยมีขนาดเล็ก ละเอียด เพราะเหตุนี้เส้นใยมีโอกาสไหลผ่านจากรูฉีดย่อยและไม่ต่อเนื่อง ถูกดึงยึดให้เส้นใยมีความยาวเหมือนในการผลิตแบบสปันบอนด์ ทำให้เส้นใยของผ้าไม่ถักไม่ทอจากกระบวนการเมลต์โบลนมีความแข็งแรงต่ำ และเส้นใยยาวไม่ต่อเนื่อง เส้นใยที่ละเอียดจะถูกพ่นลงบนสายพานเป็นแผ่นผ้า เชื่อมติดเส้นใยในแผ่นด้วยเทคนิคทางความร้อน หรือเชื่อมยึดด้วยทางเคมี และการปักด้วยเข็มน้ำ แผ่นผ้าที่ขึ้นรูปจากกระบวนการผลิตแบบเมลต์โบลนจึงมีค่าความแข็งแรงน้อย จำเป็นต้องใช้ร่วมกับผ้าหรือวัสดุชนิดอื่น และเนื่องด้วยเส้นใยที่ได้มีขนาดเล็กและละเอียดมาจึงเหมาะกับการนำมาใช้กรอง เช่น แผ่นกรองของหน้ากากอนามัย ผลิตภัณฑ์ด้านการแพทย์ ใส่กรอง และฉนวน เป็นต้น ขึ้นรูปลงบนแผ่นสปันบอนด์ แล้วนำแผ่นคอมพอสิตที่ได้จะส่งต่อด้วยสายพานลำเลียง สปันบอนด์ที่สองเพื่อทำการขึ้นรูปแผ่นลงบนชั้นของแผ่นสปันบอนด์-เมลต์โบลน (Spunbond Meltblown-Spunbond, SMS) ก่อนที่แผ่นคอมพอสิตจะผ่านลูกกลิ้งทำให้เชื่อมติดมากยิ่งขึ้น เพื่อให้มีสมบัติด้านความแข็งแรง

2.4 กระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection Molding)

2.4.1 กระบวนการฉีดขึ้นรูป [25]

กระบวนการฉีดขึ้นรูปถือว่าเป็นกระบวนการที่พบมากที่สุดในอุตสาหกรรมการผลิตของประเทศไทย ซึ่งกระบวนการฉีดขึ้นรูปเป็นกระบวนการผลิตที่ช่วยให้สามารถผลิตชิ้นส่วนในปริมาณมากติดต่อกัน โดยผลิตสินค้าที่เหมือนกันหลายพันชิ้น หรือเป็นชิ้นส่วนชนิดเดียวกัน กระบวนการผลิตนี้มีความซับซ้อน ทั้งเรื่องของการใช้เครื่องจักรไฮดรอลิกหรือไฟฟ้าเฉพาะทาง กระบวนการจะหลอม ฉีด และเซตพลาสติกเป็นรูปร่างของแม่พิมพ์โลหะที่ติดตั้งเข้ากับเครื่องจักร

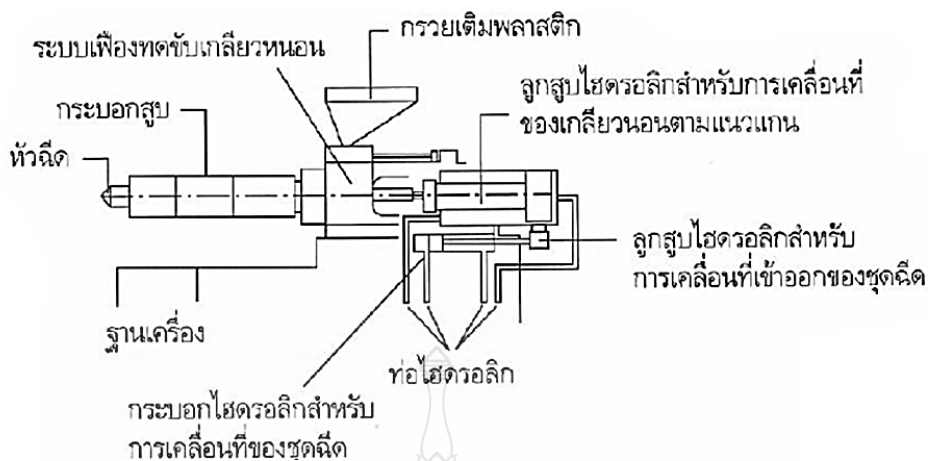
โดยการฉีดขึ้นรูปพลาสติกนั้นสามารถใช้ได้ทั้งพลาสติกที่เป็นเม็ดหรือผง ขึ้นอยู่กับการเครื่องฉีดที่ถูกต้องแบบให้เหมาะสมกับพลาสติกชนิดต่างๆ สำหรับเทอร์โมพลาสติกนั้น เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการอ่อนตัวและมีความเหลวไหล สามารถที่จะนำไปแปรรูป ผ่านกระบวนการได้หลายครั้ง มีทั้งสีธรรมชาติและแบบผสมสีกับเติมสารเติมแต่ง (Additives) เนื่องจากคุณสมบัติของพลาสติกขึ้นมกขึ้นอยู่กับ ความแข็งแรงนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ลักษณะของการรับแรงที่มากระทำ และระยะเวลาในการรับภาระ นอกจากนี้ยังมีอิทธิพลจากสารเคมีความชื้น รังสียูวีและอิทธิพลจากวิธีการผลิต

ชนิดของพลาสติก แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) หมายถึง พลาสติกที่สามารถอ่อนตัวเมื่อได้รับความร้อนและเปลี่ยนกลับเป็นสภาพเดิมเมื่อเย็นตัวลง จึงสามารถนำมาใช้ใหม่ได้ อีกทั้งยังสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้หลายๆครั้ง เพราะความร้อนไม่ทำให้โครงสร้างของพลาสติกเปลี่ยนไป ได้แก่ Polyethylene (PE), Polypropylene (PP), Polyvinyl Chloride (PVC), Polyamide (PA), Polyester (PET) และ Polystyrene (PS) พลาสติกอีกประเภทคือ เทอร์โมเซต (Thermoset) เป็นเมื่อนำพลาสติกขึ้นรูปโดยใช้ความดันและความร้อนแล้ว จะไม่เกิดการอ่อนตัวลงอีก เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลเปลี่ยนแปลงไปจากการให้ความร้อน จึงไม่สามารถนำมาหลอมใช้ใหม่ได้ เช่น Polyester, Phenol Formaldehyde (PF) เป็นต้น

คุณสมบัติที่ดีของพลาสติกคือควรมีน้ำหนักที่เบา เป็นฉนวนไฟฟ้า ทนความร้อนและทนต่อสารเคมี อีกทั้งขึ้นรูปได้ง่าย ส่วนข้อเสียคือ มีความแข็งแรงต่ำ ใช้ได้ขนาดจำกัดขยายตัวได้มากเมื่อรับความร้อน วิธีที่จำทำให้พลาสติกมีความแข็งแรงสูงขึ้น คงตัวมากยิ่งขึ้นคือต้องผสมสารเสริมความแข็งแรงเข้าไป เช่น ไยแก้วเม็ดแก้ว หรือแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น

2.4.2 เครื่องฉีดพลาสติก ประกอบด้วย 2 ส่วนสำคัญ ดังนี้ [26]

1) ชุดฉีด (Injection Unit) เป็นจังหวะการทำงานของชุดฉีดพลาสติก โดยการพาเอาพลาสติกจากกรวยเติมเข้าไปหลอมในกระบอกเครื่องที่เข้าฉีด ทำการอัดพลาสติกเหลวเข้าแม่พิมพ์ทำการย่ำ หลังจากขึ้นงานในแม่พิมพ์เย็นตัวลงจนปลดออกจากแม่พิมพ์ได้แล้ว ก็จะมีการหลอมพลาสติกใหม่เพื่อรอฉีดในจังหวะต่อไป แล้วถอยชุดฉีดกลับอีกครั้ง



รูปที่ 2.8 ชุดฉีด (Injection Unit) [25]

โดยชุดฉีดจะประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก ดังนี้

Hopper Throat (คอป้อน) ที่บริเวณช่องป้อนและลำเลียงเม็ดพลาสติก โดยรอบจะต่อด้วยระบบน้ำเย็น เพื่อป้องกันไม่ให้เม็ดพลาสติกเกิดการหลอมบริเวณคอป้อนเม็ดซึ่งเป็นเหตุทำให้สัดส่วนการไหลของเม็ดพลาสติกนั้นลงสู่กระบอกไม่สม่ำเสมอ จากนั้นเม็ดพลาสติกจะถูกลำเลียงไหลไปทั่วด้านในของกระบอกฉีด (Barrel) ในขณะที่เม็ดถูกลำเลียงไหลลงมา สำคัญอย่างมากต้องทำการตรวจเช็คระบบของน้ำหล่อ-เย็นเสมอ

Barrel (กระบอกฉีดขึ้นรูป) มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอก ภายในทำหน้าที่ในการลำเลียงเม็ดพลาสติก ติดตั้งคู่กับ Hopper Throat บริเวณภายนอกจะถูกติดตั้งด้วย Band Heater เพื่อใช้ในการควบคุมอุณหภูมิและให้ความร้อนที่ใช้ในการหลอม ในบริเวณส่วนปลายกระบอกจะถูกต่อกับหัวฉีด (Nozzle) และจะมี Screw อยู่ภายในเพื่อใช้ลำเลียงและช่วยหลอมเนื้อพลาสติกที่จะถูกฉีดเข้าแม่พิมพ์ ซึ่งถือว่าเป็นอีกส่วนประกอบหลักหนึ่งที่มีความสำคัญต่อเครื่องฉีดมาก

Thermo Couple เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจจับอุณหภูมิ โดยอาศัยคุณสมบัติของโลหะสองชนิดที่แตกต่างกัน ซึ่งค่าความต่างศักย์จะถูกวัดได้จากปลายสายทั้งสองฝั่ง Thermo couple นั้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่จุดต่อระหว่างโลหะสองชนิด Thermo Couple มีอยู่หลายชนิดแต่ที่พบได้บ่อยในเครื่องฉีดทั่วไปมี Type J และ Type K

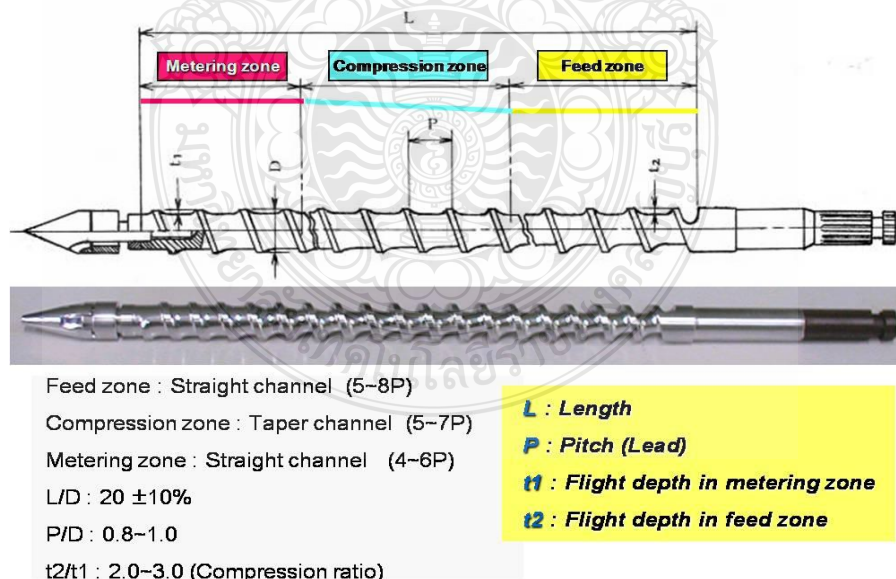
Screw (เกลียวร่อน) โดยที่ใช้ในงานฉีดขึ้นรูปทั่วไปนั้น ถูกออกแบบให้มีลักษณะที่แตกต่างกันเพื่อความเหมาะสมต่อการใช้งาน ซึ่ง Screw จะแบ่งออกเป็นโซนหลักๆ 3 โซน ดังนี้ Feed Zone, Compression Zone และ Metering Zone

(1) Feed Zone หรือโซนป้อน ของ Screw จะเป็นโซนที่ละเลียงและป้อนเม็ดพลาสติกที่ไหลลงมาจากคอฮอปเปอร์แล้วถูกส่งไปยังช่วง Compression Zone หรือโซนกดอัด ซึ่งความลึกร่องฟันสกรูในโซนนี้จะมีค่าความลึกเท่ากันทุกร่องสกรู และมีการความร้อนเปลี่ยนแปลงภายในกระบอกที่ช่วงนี้จะเกิดขึ้นจากเม็ดพลาสติกที่เสียดสีกัน ดังนั้นอุณหภูมิความร้อนจากฮีตเตอร์ทรงกระบอก

ในช่วงนี้ไม่ควรสูงมากเกินไป เพราะอาจทำให้พลาสติกหลอมบางส่วนจนเกาะเหนียวติดกันจนเป็นก้อน และยังช่วยในการลำเลียงของเม็ดพลาสติกให้มีความต่อเนื่องโดยไม่ขาดช่วง

(2) Compression Zone ของเกลียวหนอน (screw) หรือโซนที่เกิดการบีบอัด จะเป็นบริเวณที่มีขนาดความลึกของร่องฟันสกรูค่อย ๆ ลดลงเรื่อย ๆ จนทำให้เกิดการบีบตัวของเม็ดพอลิเมอร์แล้วก่อให้เกิดการเบียดเสียดกันเองภายในของเม็ดพอลิเมอร์ ทำให้เม็ดพลาสติกที่อยู่ในบริเวณนี้เกิดการหลอมเหลวและผสมเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น จนนำไปสู่อัตราการความร้อนสะสมภายในเม็ดที่สูงขึ้นตามขนาดของร่องฟันสกรูที่มีความลึกลดลง ซึ่งระดับความแตกต่างของร่องฟันสกรูนี้ เรียกว่า Compression Ratio โดยทั่วไปแล้วจะอยู่ที่ประมาณ 2:1 ของช่วง Compression Zone ซึ่งปริมาณเนื้อพลาสติกเหลวจะถูกลำเลียงผ่านร่องฟันไปยังส่วนปลายของสกรู หรือที่เรียกส่วนนั้นว่า Metering Zone ต่อไป

(3) Metering Zone ของเกลียวหนอน จะเป็นโซนที่เพิ่มการหลอมของเนื้อพอลิเมอร์ที่มีบางส่วนที่ยังไม่ถูกหลอมละลายหรือหลอมไม่ดีพอจากโซนก่อนหน้า โดยจะเกิดแรงเฉือนและแรงเสียดทานระหว่างเนื้อพลาสติก กระจบอกหลอม และความลึกของร่องฟันสกรูที่ตื้นขึ้น เพื่อทำการฉีดต่อไป ซึ่งการหลอมในบริเวณนี้จะเกิดการสะสมของแรงดันที่เพิ่มขึ้นตรงบริเวณส่วนปลายของกระจบอก ซึ่งในโซนสุดท้ายนี้มีหน้าที่ในการลำเลียงเนื้อพลาสติกที่หลอมแล้วไหลผ่านแหวนกันไหลย้อนกลับ ไปยังส่วนหน้าสุดของสกรู และไปรวมกันอยู่ที่บริเวณปลายสุดของกระจบอก ในขณะเดียวกันเนื้อพลาสติกที่ได้รวมกันอยู่นั้นมีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ สกรูทำการหมุนจนเกิดแรงดัน แรงนี้จะเป็นตัวดันให้สกรูเกิดการถอยกลับไปจนถึงระยะของ SM (ตำแหน่งหยุดการหมุนของ Screw) ตามที่กำหนดไว้ ซึ่งเป็นการรวมปริมาณของเนื้อให้ตรงตามที่กำหนด เพื่อที่จะทำการฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์ในแต่ละรอบการทำงานต่อไป



รูปที่ 2.9 zone การหลอมเหลวของสกรู (screw) [26]

(4) Nozzle หรือ หัวฉีดขึ้นรูป ซึ่งหัวฉีดจะเป็นส่วนเชื่อมกันระหว่างปลายกระบอบอก กับ Sprue Bush ทำหน้าที่เปรียบเสมือนทางไหลผ่านของเนื้อพลาสติกเหลวจากปลายกระบอบอกเข้าสู่แม่พิมพ์ ขนาดรัศมีที่ปลายหัวฉีด (Nozzle) ต้องมีขนาดที่สัมพันธ์หรือสมเข้าพอดีกับขนาดช่องของ Sprue Bush และต้องไม่เกิดการกระแทกหรือรอยยุบที่อาจเป็นตำหนิบริเวณรูฉีด เพราะจะทำให้การฉีดขึ้นรูปเกิดปัญหาตามมาได้ โดยทั่วไปแล้วหัวฉีด (Nozzle) แบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ กลุ่มแรกเป็นหัวฉีดแบบเปิด เหมาะกับการฉีดที่ใช้กับความหนืดพลาสติกสูง มีอัตราการไหลที่ค่อนข้างต่ำ ไหลได้ยากเมื่อหลอมเหลว มีราคาต่ำจึงเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมาก มีแรงเสียดทานในการไหลที่น้อยมาก จึงทำให้แรงดันที่เกิดขึ้นภายในมีการสูญเสียน้อยลง เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับหัวฉีดแบบปิด เนื่องจากหัวฉีดแบบเปิดไม่มีระบบเปิด-ปิดรูของหัวฉีด (Nozzle) อาจทำให้เนื้อพลาสติกเกิดการไหลย้อนกลับไปที่บริเวณหัวฉีดพลาสติกได้ จึงมีการป้องกันการหยดย่อยของเนื้อพลาสติกด้วยการดึงกลับของสกรู (Suck Back) จัดเป็นพื้นฐานการใช้งานหัวฉีดแบบเปิด ในส่วนกลุ่มสุดท้ายคือ หัวฉีดแบบปิด (Shut-off Nozzle) เป็นหัวฉีดที่นิยมใช้กับการขึ้นรูปพลาสติกที่มีความหนืดต่ำ มีลักษณะการไหลได้ง่ายเมื่อเกิดการหลอมเหลว หัวฉีดประเภทนี้จะมีกลไกการควบคุมการเปิด-ปิดของรูฉีด เพื่อไม่ให้เกิดพลาสติกเหลวไหลย้อนออกจากปลายหัวฉีด และมีอยู่มากมายหลายแบบ โดยรวมแล้วถือว่าขึ้นส่วนหัวฉีด (Nozzle) จัดเป็นส่วนประกอบที่มีสำคัญอย่างหนึ่งของชุดฉีดพลาสติก

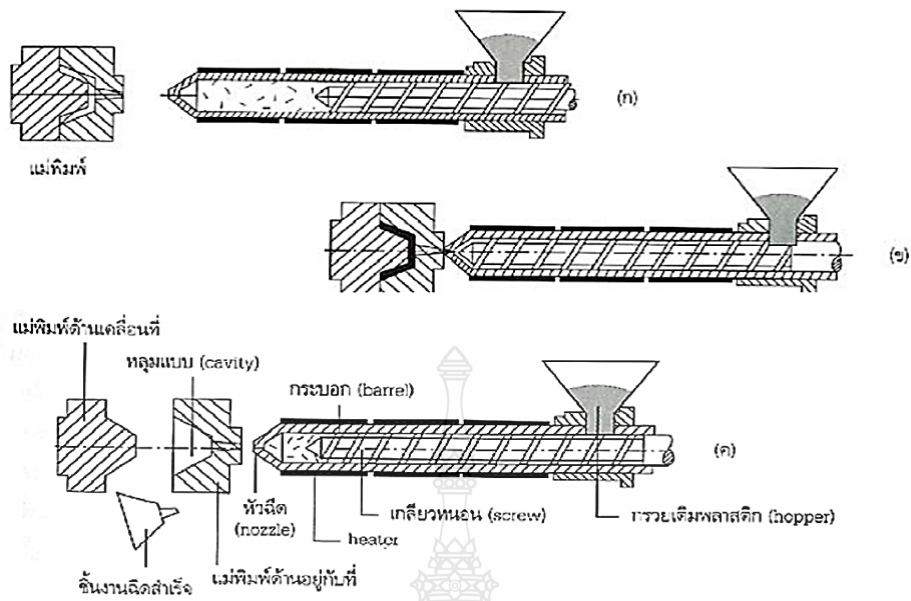
2) หน่วยเปิด-ปิดแม่พิมพ์ (Clamping Unit) จะทำหน้าที่เคลื่อนที่เปิดและปิดแม่พิมพ์ในจังหวะการทำงานของเครื่องฉีดพลาสติก โดยปกติแม่พิมพ์จะมีสองฝาประกบกันโดยด้านที่ฉีดพลาสติกเข้าจะเป็นด้านที่อยู่กับที่และอีกฝั่งหนึ่งจะทำหน้าที่เคลื่อนที่เปิด-ปิด ฝาประกบทั้งสองของแม่พิมพ์จะประกบอยู่กับแผ่นติดแม่พิมพ์ที่ติดมากับเครื่องฉีดพลาสติก หน่วยเปิด-ปิดแม่พิมพ์แบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือระบบปดด้วยแรง (Actuated by Force) โดยอาศัยแรงสูบลไฮดรอลิกทำหน้าที่เปิดและระบบปดด้วยกลไกรวม (Interlocking) ซึ่งจะปดแน่นด้วยระบบกลไก แต่การเคลื่อนที่เปิด-ปิดจะใช้แรงขับเคลื่อนจากไฮดรอลิกหรือมอเตอร์ไฟฟ้าทั้งสองระบบจะทำหน้าที่อัดแม่พิมพ์ให้ประกบกันแน่นตามความดันภายในแม่พิมพ์ โดยแรงที่เกิดขึ้นจากแรงดันภายในแม่พิมพ์จะต้องน้อยกว่าแรงดันด้านการเปิด-ปิดแม่พิมพ์

2.4.3 วิธีการฉีดพลาสติก มีดังนี้

1) พลาสติกที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปอาจจะเป็นเม็ดหรือผงเติมลงในกรวยเติมเม็ดพลาสติก เกลียวหนอน (screw) จะหมุนส่งไปยังด้านหน้าของกระบอบอกสูบ ซึ่งมีแผ่นความร้อนหรือน้ำมันร้อนหุ้มอยู่ จะซึ่งจะทำให้พลาสติกเกิดการหลอมเหลวดังรูป (ก)

2) หลังจากนั้นจะเคลื่อนเกลียวหนอน (screw) ใต้นพลาสติกผ่านหัวฉีดไปเพื่อเข้าสู่โพรงแม่พิมพ์ ซึ่งแม่พิมพ์จะถูกปดอยู่ ดังรูป (ข)

3) แม่พิมพ์ที่ถูกหล่อเย็นส่งผลต่อชิ้นงานที่เย็นและแข็งตัว สามารถถอดออกจากแบบได้ง่าย ดังรูป (ค) ซึ่งขณะที่แม่พิมพ์จะเปิดหลังจากพลาสติกเย็นตัวจะทำการหมุนเกลียวหนอน (screw) พรอมทั้งถอยสกรูเพื่อดึงเนื้อพลาสติกไว้ด้านหน้าเตรียมฉีดข้อต่อไป



รูปที่ 2.10 การขึ้นรูปพลาสติกโดยการฉีด [25]

2.4.4 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของการฉีดขึ้นงานพลาสติก มีดังต่อไปนี้

1) กำลังในการฉีด ผลกระทบที่เกิดในการฉีดที่ไม่พอจะทำให้ชิ้นงานไม่ได้รูปทรงตามแบบที่ต้องการ งานที่ได้จะเป็นลักษณะฉีดออกมาแล้วชิ้นงานไม่เต็ม เป็นรอยยุบหรือเกิดลายคลื่นบนผิวชิ้นงาน แต่หากใช้กำลังฉีดสูงเกินไปอาจส่งผลทำให้ชิ้นงานเกิดครีบหรือเกิดรอยร้าว เนื่องจากปริมาณพลาสติกที่เยอะไปส่งผลให้เกิดการจับตัวจนแน่นและล้นออกมาจากแม่พิมพ์ สำหรับกำลังในการฉีดจะขึ้นอยู่กับลักษณะประเภทของพลาสติกซึ่งแตกต่างกันออกไป

2) ความเร็วในการฉีด เป็นการปรับอัตราการเคลื่อนที่ของพลาสติกเหลวที่ไหลเข้าไปสู่แม่พิมพ์มีหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อวินาที (mm/s) ผลกระทบที่เกิดจากความเร็วในการฉีดน้อยไป จะทำให้ชิ้นงานที่ฉีดออกมาไม่เต็ม เกิดรอยเป็นเส้นที่ผิวงาน ในทางกลับกันถ้าหากความเร็วในการฉีดเร็วเกินไปจะทำให้เกิดรอยมันในชิ้นงานหรือฟองอากาศรอยไหมหรือสีเพี้ยน ประสิทธิภาพของเครื่องฉีดที่นำมาทดลองสามารถฉีดได้เร็วที่สุดที่อัตรา 150 (mm/s) แต่เนื่องจากการปรับความเร็วในการฉีดสำหรับทดลองฉีดครั้งแรกจึงไม่ควรที่จะใช้ความเร็วในการฉีดที่สูงมากนัก

3) ระยะเวลาการฉีด คือเวลาที่ไซในฉีดพลาสติกเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์รวมกับเวลาหยุดรอ เพื่อรักษาแรงดันในขณะที่ฉีด ให้พลาสติกเหลวไหลเข้าไปสู่แม่พิมพ์และไม่ย้อนกลับออกมา ซึ่งผลที่เกิดจากเวลาการฉีดไม่พอจะทำให้ชิ้นงานไม่เต็ม เป็นรอยยุบ หรือรูปทรงที่ได้ ไม่ได้ชิ้นงานในลักษณะที่ต้องการ แต่หากเวลาในการฉีดมากเกินไปจะส่งผลให้ชิ้นงานเกิดครีบหรือเกิดรอยร้าว ครีบที่ตัวชิ้นงานเนื่องจากปริมาณพลาสติกที่แน่นจนล้นออกมาจากแม่พิมพ์ ซึ่งเวลาในการบอมนวัตถุดิบ หมายถึง เวลาที่พลาสติกเหลวเคลื่อนที่ไปตามแนวเกลียวทวนย้อน (screw) เข้าไปสู่ในแม่พิมพ์จนหมดระยะการฉีด

4) ระยะเวลาหล่อเย็น เมื่อพลาสติกเหลวถูกฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์จะต้องใช้เวลาเพื่อรอให้พลาสติกเหลวเย็นตัว เปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง พร้อมทั้งจะเปิดแม่พิมพ์เพื่อปลด

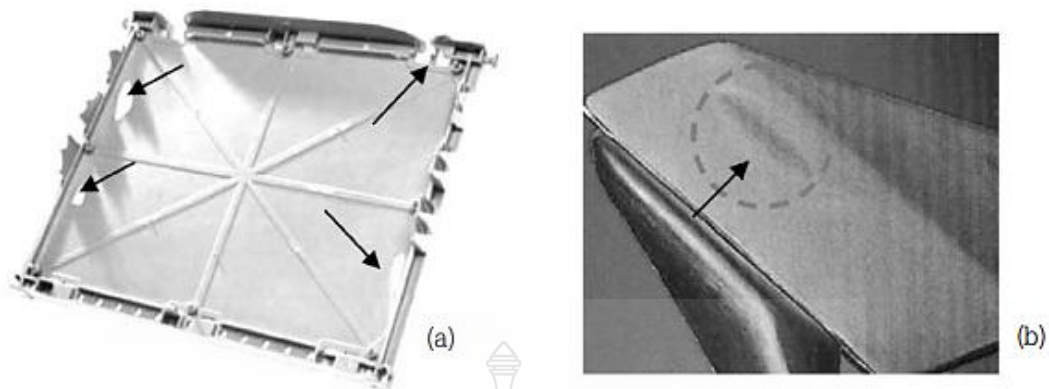
ชิ้นงานออกมาได้อย่างรวดเร็ว โดยปกติแล้วจะต้องมีระบบหล่อเย็นเพื่อช่วยในเรื่องของการเย็นตัวของพลาสติกเหลวได้อย่างรวดเร็วยิ่งขึ้น ผลกระทบที่อาจเกิดจากเวลาหล่อเย็นไม่พอจะทำให้ชิ้นงานเกิดรอยร้าว รอยปริหรือเป็นรอยสีขาว เกิดการโค้งงอ บิดเบี้ยวผิดรูป แต่ถ้าระยะเวลาหล่อ การจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลและผลึกยังไม่สมบูรณ์ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของชิ้นงาน หากเย็นนานเกินไปจะทำให้รอบการทำงานในแต่ละครั้งใช้เวลานาน ระยะเวลาหล่อเย็นในจะขึ้นอยู่กับรูปทรงความหนาและชนิดของเม็ดพลาสติก

5) อุณหภูมิในการฉีด ในการฉีดเทอร์โมพลาสติกนั้นช่วงการหลอมตัวของพลาสติกค่อนข้างแคบ พลาสติกจะสลายตัวในช่วงอุณหภูมิที่สูงเกินไป แต่ในทางกลับกันหากอุณหภูมิต่ำเกินไป จะส่งผลให้พลาสติกเหนียวติดตาม ไม่สามารถไหลเข้ามาพิมพ์ได้ อาจทำให้เกิดการอุดตันบริเวณหัวฉีดหรือทางเข้าของแม่พิมพ์ ดังนั้นการควบคุมอุณหภูมิในช่วงต่าง ๆ ระหว่างทำการหลอมและฉีดพลาสติกจึงมีความสำคัญมาก การปรับอุณหภูมิในการฉีดจะขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติกที่นำมาฉีดเนื่องจากอุณหภูมิล้อมเหลวของพลาสติกแต่ละชนิดนั้นจะไม่เท่ากัน ผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิในการฉีดต่ำไปจะทำให้พลาสติกเมื่อฉีดออกมาแล้วชิ้นงานจะไม่เต็มแบบ เกิดลายคลื่นบนผิวชิ้นงาน แต่ถาอุณหภูมิในการฉีดสูงเกินไปจะทำให้ชิ้นงานมีรอยไหมรอยดำ เกิดสีเพี้ยน ไม่ได้ตามลักษณะที่ต้องการ

2.4.5 ข้อบกพร่องในงานฉีดพลาสติก [27]

ชิ้นงานฉีดไม่เต็ม (Short shots) ชิ้นงานฉีดไม่เต็มแบบ แสดงในรูปที่ 2.10 (a) ซึ่งจะพบบ่อยในขั้นตอนแรกของการฉีดขึ้นรูป เพื่อการปรับตั้งปริมาตรการฉีด (Shot size) ที่เหมาะสม หากชิ้นงานเกิดเป็นรอยแหว่งในตำแหน่งสุดท้ายของการไหล เนื่องจากการไหลของพลาสติกเหลวไหลไปสู่ข้างในแม่พิมพ์ช้า จนพลาสติกเกิดการเย็นตัวก่อน ความหนืดที่เพิ่มมากขึ้นทำให้เนื้อพลาสติกเหลวไหลเข้าไปไม่เต็มในแบบจึงพบเห็นเป็นช่องแหว่ง ซึ่งสาเหตุหลักอีกอย่างอาจเกิดจาก เนื้อพลาสติกที่ไหลแ่กว่าที่ควรเลยเป็นผลให้เนื้อไม่สามารถแทรกเข้าไปได้ทั่วถึงแม่แบบ

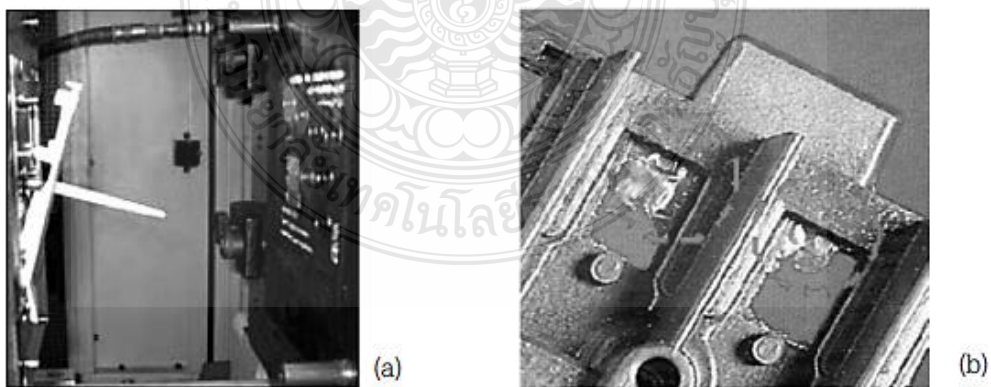
รอยยุบ (Sink marks) โดยปกติแล้วตัวชิ้นงานที่เกิดรอยยุบตัวบนผิว แสดงในรูปที่ 2.11 (b) ซึ่งจะเกิดหลังจากปรับตั้งค่าปริมาตรที่ใช้ฉีดให้เหมาะสม แต่ภายหลังจากจังหวะในการฉีดขึ้นรูป (Injection phase) นั้นต้องไม่ให้เกิดแรงดันย่ำ (Holding pressure) ซึ่งรอยที่ปรากฏบนผิวชิ้นงานมีสาเหตุหลักมาจากขณะชิ้นงานกำลังเย็นลง ชิ้นงานก็เกิดการหดตัว (Shrinkage) โดยเฉพาะชิ้นงานที่มีความหนามาก หรือบริเวณแนวเสริมและตำแหน่งสุดท้ายของการไหลของพลาสติกเหลวในแม่พิมพ์ โดยเฉพาะชิ้นส่วนจากพลาสติกที่มีการยุบตัวมากเกิดจากผลึกในชิ้นงาน สาเหตุอาจจะเกิดจากความหนาแน่นของเนื้อพลาสติกในชิ้นงานไม่เพียงพอที่จะต้านการหดตัวได้



รูปที่ 2.11 (a) ชิ้นงานฉีดไม่เต็มแบบ และ (b) รอยยุบ [27]

ชิ้นงานติดภายในแม่พิมพ์ (Part sticking) หรือไม่สามารถนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ฉีดได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 (a) ถึงแม้ว่าอาจไม่ใช่ข้อบกพร่องที่เกิดบนชิ้นงาน แต่เป็นปัญหาสำคัญที่อาจส่งผลกระทบต่อเวลาในกระบวนการ เนื่องจากเครื่องฉีดไม่สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องซึ่งมีสาเหตุมาจากการรอปลดชิ้นงานและอาจมีปัจจัยมาจากการออกแบบแม่พิมพ์ฉีด

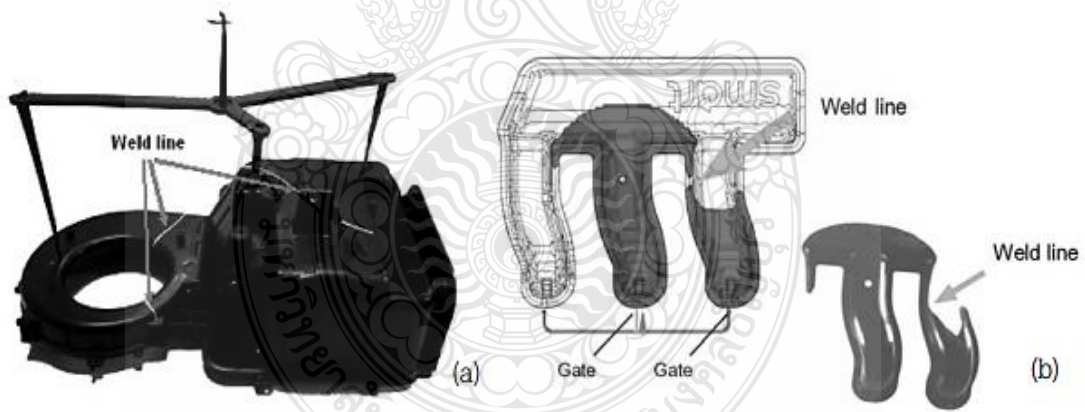
ครีบ (Flash) รูปที่ 2.12 (b) แสดงการเกิดครีบบนชิ้นงาน โดยทั่วไปอาจเกิดที่ตำแหน่งบริเวณที่แม่พิมพ์ประกบกัน (Parting line) หรือเกิดขึ้นในส่วนของชิ้นงานด้านหลัง ที่ตำแหน่งรอยกระทุ้ง (Ejector marks) การใช้ความเร็วในการฉีดสูงจะนำไปสู่การเกิดครีบที่ชิ้นงาน เพื่อป้องกันพลาสติกไม่เต็มแบบ (Short shot) และการเพิ่มแรงดันย้ำ (Holding pressure) ที่สูงเพื่อไม่ให้ชิ้นงานเกิดการยุบตัว (Sink) ภายในแม่พิมพ์มีแรงดันของพลาสติกเหลวสูงกว่าแรงดันที่ใช้ปิดแม่พิมพ์ (Clamping pressure) จนทำให้แม่แบบเกิดการแยกออกที่บริเวณแม่พิมพ์ฉีด จนส่วนของเนื้อพลาสติกเหลวไหลออกมาตามแนวประกบแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปพลาสติกได้



รูปที่ 2.12 (a) ชิ้นงานติดภายในแม่พิมพ์และ (b) การเกิดครีบบนชิ้นงาน [27]

รอยเชื่อมประสาน (Weld lines) เป็นปัญหาจากเนื้อพลาสติกหลอมเหลวไหลมาบรรจบกันภายในแม่พิมพ์ฉีด ซึ่งมีสาเหตุมาจากการที่ทางเข้ามากกว่า 1 ตำแหน่งของโพรงแม่พิมพ์มีและมีความซับซ้อนของชิ้นงานหรือความหนาผนังชิ้นงานมีที่แตกต่างกันมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.13 (a) ส่งผลให้ความแข็งแรงที่บริเวณรอยเชื่อมประสานมีค่าลดลงอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของพลาสติกที่เสริมแรงด้วยเส้นใย หรืออาจเกิดจาก ตรงตำแหน่งที่มีพลาสติกหลอมเหลวบรรจบกันนั้น รอยเชื่อมประสานของเนื้อพอลิเมอร์จะไม่ดีถ้าหากความร้อนที่ใช้หลอมเหลวต่ำเกินไปทำให้รอยต่อของเนื้อปรากฏเห็นได้ชัด ซึ่งก็เนื่องมาจากการใช้ความเร็วในการฉีดต่ำไปจนทำให้ความร้อนของพลาสติกหลอมลดลง ยังอาจส่งผลต่อความสวยงามของผลิตภัณฑ์ได้อีกด้วย อย่างไรก็ตาม การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์การไหลที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์ฉีดก่อนนำไปผลิตเป็นแม่พิมพ์ (เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดรอยเชื่อมประสานในตำแหน่งที่สำคัญ เช่น ตำแหน่งที่รับภาระแรงกระทำ) และการปรับตั้งค่าในการฉีดที่เหมาะสม อาจช่วยบรรเทาหรือลดปัญหาจากรอยเชื่อมประสานที่เกิดขึ้น

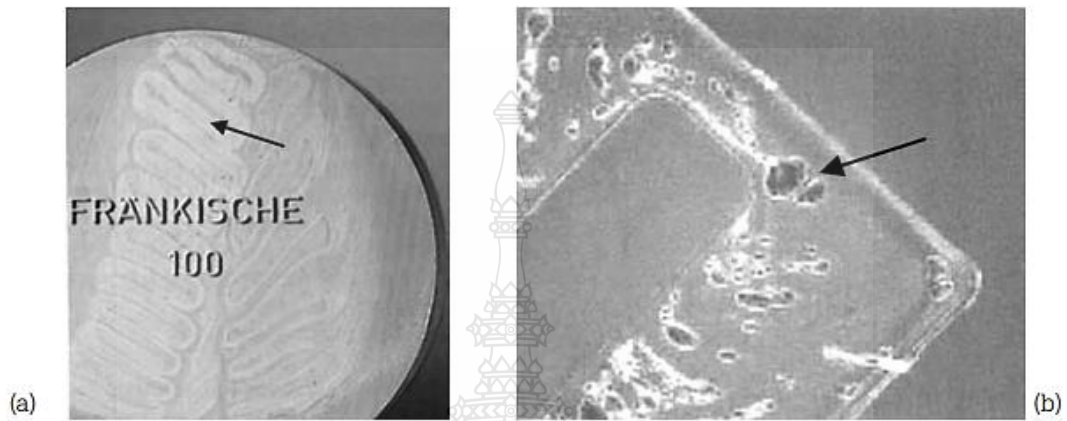
รอยพ่น (Jetting) ชิ้นงานที่เกิดรอยพ่นขึ้นมีสาเหตุมาจากการฉีดที่ใช้ความเร็วมากไปจนการไหลสูงเกินไปเมื่อเข้าสู่โพรงแม่พิมพ์จึงทำให้พลาสติกหลอมเหลวไม่สามารถไหลติดที่ผนังของแม่พิมพ์ หรือรอยพ่นอาจเกิดได้จากพลาสติกหลอมถูกฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ที่มีช่องทางเข้าเล็ก แคบด้วยความเร็วสูงไปยังส่วนของแม่พิมพ์ที่หนา จึงส่งผลให้การไหลวน (Turbulent flow) แล้วเนื้อที่ถูกฉีดเข้าไปก่อนจะไหลได้ดีกว่าเป็นแนวตรงยาวแทนที่การไหลออกไปแบบพร้อมกันตลอดทั้งแนวความกว้างของตัวชิ้นส่วน พลาสติกจึงเกิดการเย็นตัวไม่พร้อมกันจึงปรากฏให้เห็นเป็นรอยบนพื้นผิวชิ้นงาน



รูปที่ 2.13 (a) การเกิดรอยเชื่อมประสานบนชิ้นงาน และ (b) การเปรียบเทียบผลวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์และการทดลองฉีดขึ้นรูปจริง [27]

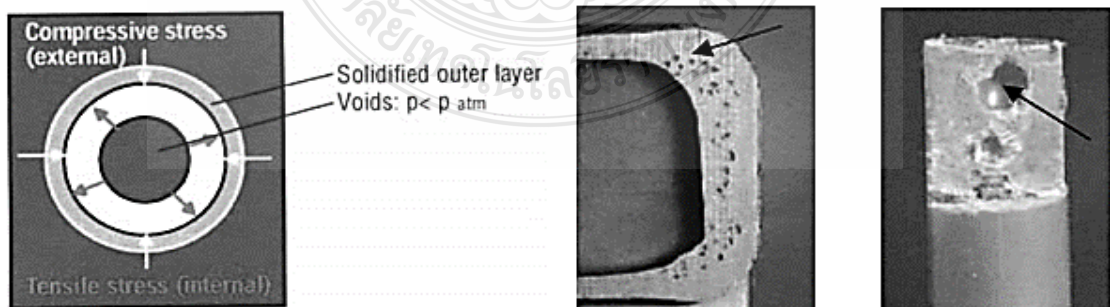
รอยพ่น (Jetting) มีสาเหตุมาจากความเร็วในการฉีดที่ส่งผลต่อการไหลของเนื้อพลาสติกที่สูงเกินไปจึงปรากฏให้เห็นเป็นรอยบนผิว เมื่อเข้าสู่โพรงแบบจึงทำให้เนื้อพลาสติกไม่สามารถไหลติดที่ผนังของโพรงแม่พิมพ์ฉีด ดังแสดงในรูปที่ 2.14 (a)

รอยพุพอง (Blister) สาเหตุที่ทำให้ชิ้นงานฉีดเกิดการพุพองมีสาเหตุมาจากแก๊ส หรือ อากาศที่เกิดจากความชื้นแตกตัวในเม็ดพลาสติก ไม่เกิดการถ่ายเทหรือออกจากโพรงแม่พิมพ์ได้ใน ขณะที่ทำการฉีดขึ้นรูปอยู่ จึงปรากฏเป็นลักษณะที่มาฟองอากาศอยู่บนผิวหรือภายในของชิ้นงาน ดัง ปรากฏในรูปที่ 2.14 (b)



รูปที่ 2.14 (a) การเกิดรอยฟอง และ (b) รอยพุพองที่เกิดบนชิ้นงาน [27]

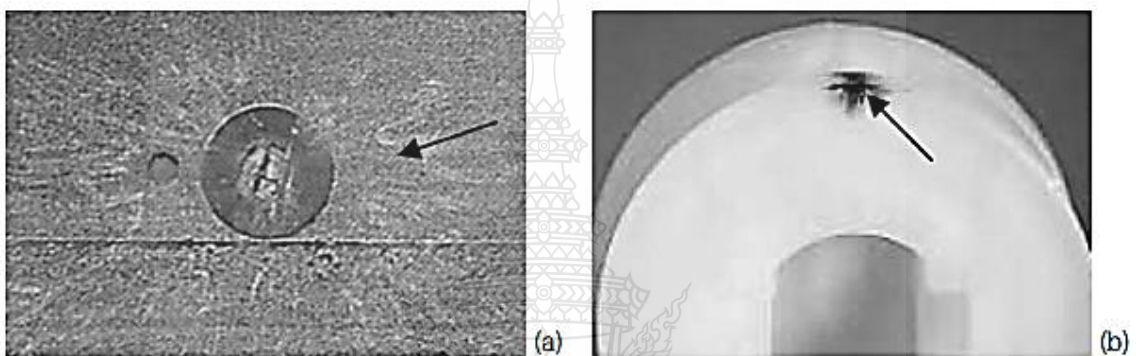
โพรงอากาศ (Voids/Bubbles) ภายในชิ้นส่วนฉีดพลาสติกขณะที่เกิดโพรงอากาศ ดัง แสดงในรูปที่ 2.15 แตกต่างจากรอยพุพอง (Blisters) ซึ่งปรากฏที่บริเวณผิวของชิ้นงาน โดยทั่วไปแล้ว การเกิดโพรงอากาศภายในชิ้นงาน มีสาเหตุจากการหดตัว (Shrinkage) ของแกนกลางภายในชิ้นงาน (Core layer) ในช่วงระหว่างแม่พิมพ์กำลังเย็นตัว ซึ่งหากบริเวณชั้นผิวของชิ้นงานที่แข็งตัว (Solidified skin layer/Frozen layer) มีความหนามาก ทำให้พลาสติกหลอมเหลวที่บริเวณชั้นแกนกลางไม่สามารถ ยุบตัวได้ ทำให้เกิดโพรงอากาศหรือช่องว่างสุญญากาศ (Vacuum) ที่บริเวณแกนกลางของชิ้นงาน โดย ปกติแล้วแนวทางการลดโพรงอากาศที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน สามารถทำได้เช่นเดียวกับการแก้ปัญหา รอย ยุบที่เกิดขึ้นบนผิวของชิ้นงาน



รูปที่ 2.15 แสดงสาเหตุการโพรงอากาศภายในชิ้นงาน [27]

รอยประกายเงิน (Silver streaks) ที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงาน มีสาเหตุหลักมาจากความชื้น (Moister) ภายในเม็ดพลาสติก โดยความชื้นภายในเม็ดพลาสติกเกิดการเสียดสีเนื่องจากความร้อนก่อเกิดเป็นแก๊สแล้วถูกฉีดเข้าไปในโพรงแบบ ซึ่งถ้าแม่พิมพ์การออกแบบรูระบายอากาศน้อยเกินไป หรือหากมีฉีดด้วยความเร็วสูง รอยประกายเงินจะปรากฏบนผิวชิ้นส่วน ดังแสดงในรูปที่ 2.16 (a)

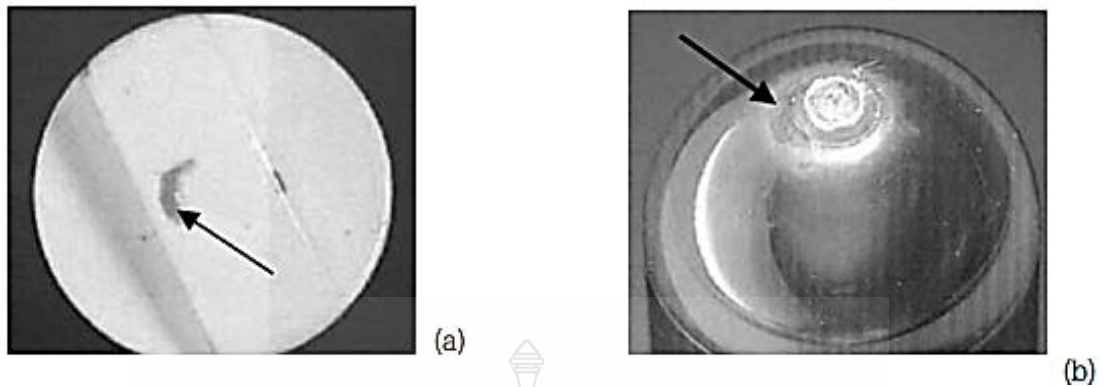
รอยไหม้ (Burn marks) บนผิวชิ้นงานมีสาเหตุจากอากาศหรือแก๊วที่อยู่ด้านในโพรงแม่พิมพ์ ซึ่งถูกพลาสติกหลอมเหลวอัดด้วยแรงดันที่สูงมาก จนเกิดความอุณหภูมิที่สูงถึง 800–1,000 °C ดังแสดงในรูปที่ 2.16 (b)



รูปที่ 2.16 (a) การเกิดรอยประกายเงิน และ (b) การเกิดรอยไหม้บนผิวของชิ้นงาน [27]

ชิ้นงานที่มีการปนเปื้อน (Contamination) แสดงดังรูปที่ 2.17 (a) มีปัจจัยหลายอย่างซึ่งมาจากการผลิตที่มีการควบคุมไม่เหมาะสม เช่น ผงสีหรือเม็ดสีที่มีการปนเปื้อน (Pigments) และเม็ดพลาสติกประเภทอื่นในเม็ดพลาสติกที่ต้องการฉีด นอกจากนี้การล้างสกรู (Purging) โดยใช้พลาสติกชนิดที่ต่อไปภายหลังจากการฉีดพลาสติกชนิดแรก เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการปนเปื้อนบนผิวของชิ้นงานได้ หากชิ้นงานที่ปนเปื้อนมีสีน้ำตาลหรือดำปรากฏขึ้นบนผิวของตัวชิ้นงาน อาจไม่ใช่รอยไหม้ (Burn marks) ซึ่งรอยไหม้มักจะเกิดในตำแหน่งเดิม ในขณะที่หากเป็นรอยจากการปนเปื้อน จะปรากฏที่ตำแหน่งไหนก็ได้บนหรือภายในชิ้นงาน เช่น รอยไหม้ของพลาสติกที่ติดกับสกรูแล้วหลุดมาปนบนผิวของชิ้นงาน หรืออาจแค่คราบน้ำมันจากแม่พิมพ์ที่ติดลงบนชิ้นงาน เป็นต้น

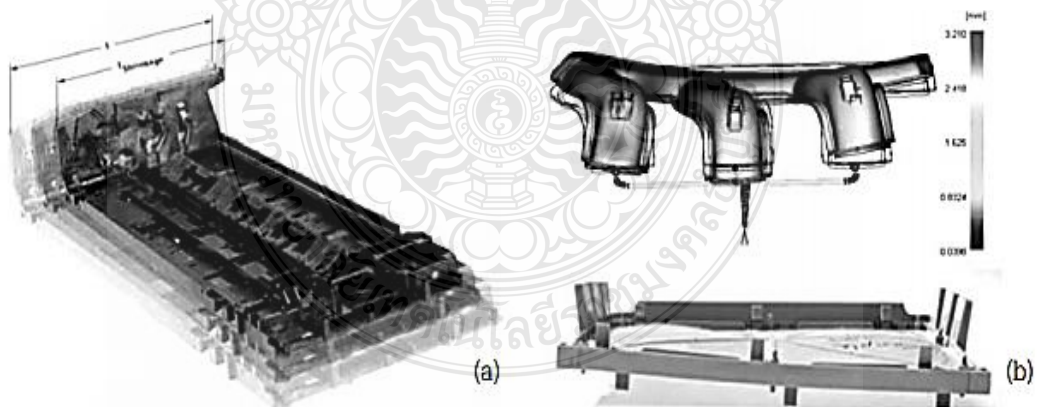
รอยฝ้าบริเวณใกล้ทางเข้า (Blush marks) มีสาเหตุหลักจากทางเข้าในการไหลที่เล็กไปและหารฉีดที่ความเร็วสูงไปมาก ทำให้พลาสติกหลอมเหลวไม่เกิดการไหลติดที่บริเวณผนังของแม่พิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.17 (b)



รูปที่ 2.17 (a) การเกิดรอยปนเปื้อนบนผิวของชิ้นงานและ (b) การเกิดรอยฝ้าที่บริเวณใกล้ทางเข้า [27]

ชิ้นงานหดตัว (Shrinkage) โครงสร้างของพลาสติกแต่ละชนิดมีโครงสร้างที่ต่างกักันจึงทำให้การหดตัวของชิ้นส่วนจากเทอร์โมพลาสติกจะน้อยหรือมาก ขึ้นอยู่กับโครงสร้างชนิดนั้นๆ โดยพลาสติกที่เป็นแบบกึ่งผลึก (Semicrystalline) จะเกิดการหดตัวที่มากกว่าพลาสติกที่เป็นแบบอสัญฐาน (Amorphous) ซึ่งปริมาณการหดตัวของชิ้นงานสามารถพิจารณาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (Pressure) ปริมาตร (Volume) และอุณหภูมิ (Temperature) หรือที่เรียกว่า PVT diagram ดังแสดงในรูปที่ 2.18 (b)

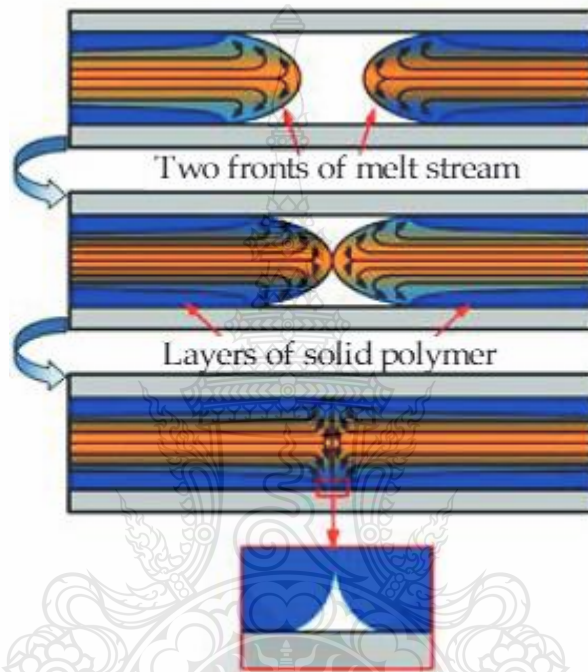
ชิ้นงานบิดเบี้ยว (Warpage/Distortion) หรือโก่งงอ มีสาเหตุหลักมาจากชิ้นงานที่เกิดการหดในแต่ละตำแหน่งที่ไม่เท่ากัน เป็นผลมาจากความไม่สม่ำเสมอของการเย็นตัวภายในแม่พิมพ์ จึงส่งผลให้เกิดการเสียรูปร่าง และบิดเบี้ยวดังแสดงในรูปที่ 2.18 (b)



รูปที่ 2.18 (a) การหดตัว และ (b) การบิดเบี้ยวของชิ้นงานภายหลังการฉีดขึ้นรูป [27]

2.5 รอยเชื่อมขวาง (Weld line)

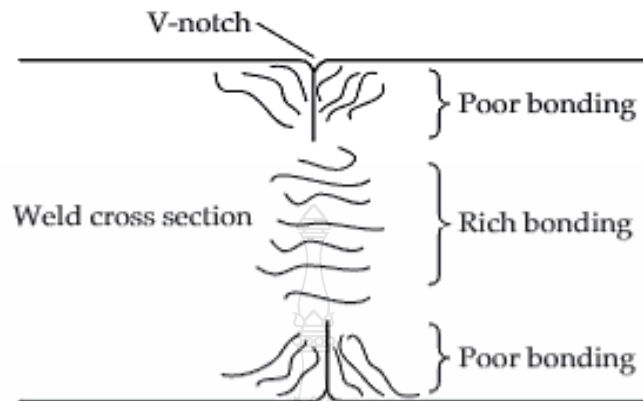
รอยเชื่อมขวาง ในการออกแบบชิ้นงานของกระบวนการฉีดขึ้นรูป รอยเชื่อมขวางนั้นเป็นจุดบกพร่องที่อาจเกิดขึ้นในกระบวนการฉีดขึ้นรูปที่อาจเกิดขึ้นได้บ่อยครั้งบางครั้งก็อาจหลีกเลี่ยงได้ยาก ซึ่งรอยเชื่อมขวางจะเกิดขึ้นในชั้นส่วนของแม่พิมพ์ฉีด ซึ่งเกิดขึ้นจากการไหลชนกันของพอลิเมอร์หลอมเหลว ซึ่งรอยดังกล่าวจะเกิดขึ้นหลังจากการหลอมรวมในส่วนหน้าของพลาสติกหลอมที่ไหลเข้าหากันในแม่พิมพ์และเกิดการแข็งตัวตามมาในบริเวณส่วนหน้าที่ไหลบรรจบกัน [28,29]



รูปที่ 2.19 กระบวนการเกิดรอยเชื่อมขวาง [9]

รอยเชื่อมในชั้นส่วนแม่พิมพ์นี้ทำให้คุณสมบัติทางกลนั้นลดลงและพื้นผิวด้านนอกของชิ้นงานเมื่อนำออกจากแม่พิมพ์ เนื่องจากการเชื่อมต่อกันบริเวณด้านหน้าของพอลิเมอร์หลอมเหลวนั้นเกิดการหลอมละลายเข้าหากันที่ไม่เพียงพอ ซึ่งกลไกของการเกิดร่องรอยที่สามารถปรากฏให้เห็นได้บนพื้นผิวของแม่พิมพ์ บริเวณจุดที่พอลิเมอร์หลอมเหลวทั้งสองฝั่งไหลเข้ามาบรรจบกันนั้นมีสมบัติพื้นฐานของสมบัติหนืดยืดหยุ่น (Viscoelastic property) ของพอลิเมอร์อีกทั้งยังขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่ใช้ในกระบวนการฉีด ทั้งนี้ที่พอลิเมอร์หลอมเหลวสัมผัสกับผนังของแม่พิมพ์ พอลิเมอร์จะเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ของเหลวด้านนอกสุดที่สัมผัสกับผนังแม่พิมพ์จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าส่วนแกนกลาง เมื่อพอลิเมอร์ทั้งสองด้านเย็นตัวลงจะเกิดเป็นรอยบากรูปตัว V (V-shaped notch) ขึ้นบริเวณของพื้นผิวของชิ้นงาน ซึ่งแนวการก่อตัวของรอยบากที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลจากการขับออกของอากาศหรือแก๊สที่ด้านหน้าของพอลิเมอร์ที่ไหลชนกัน อาจแก้ไขโดยการแม่พิมพ์เป็นสุญญากาศก่อนทำการฉีด รูปแบบการเกิดข้อบกพร่องของพื้นผิวนี้นี้ แสดงในรูปแบบที่ 2.19 รอยบากรูปตัว V (V-shaped notch) ที่เกิดขึ้นไม่ได้เป็นเพราะ

ข้อบกพร่องของพื้นผิวเท่านั้น แต่ยังเป็นการแทนที่ของความเครียดสะสมที่ส่งผลให้ชั้นส่วนอ่อนตัวลง ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งเมื่อถูกดึงยึดหรือตัดงอ



รูปที่ 2.20 แสดงโครงสร้างของพื้นที่ที่เกิดรอยเชื่อมขวาง [29]

รูปที่ 2.20 แสดงแบบจำลองโครงสร้างพื้นผิวรอยต่อที่พอลิเมอร์เกิดการเชื่อมกัน ในส่วนแกนกลางของชิ้นงานในแบบจำลองเกิดการเกาะยึดกันที่แข็งแรงในขณะที่ชั้นนอกสุดที่สัมผัสกับผิวแม่พิมพ์โดยตรง การจัดเรียงตัวของโมเลกุลขนาดใหญ่ไม่ค่อยดีนักซึ่งเป็นผลจากการไหลแบบน้ำพุ (Fountain Flow) ในแม่พิมพ์ เป็นเหตุให้เกิดรอยบากรูปตัววีและส่งผลต่อสมบัติเชิงกล การอ่อนตัวลงของวัสดุในบริเวณนี้

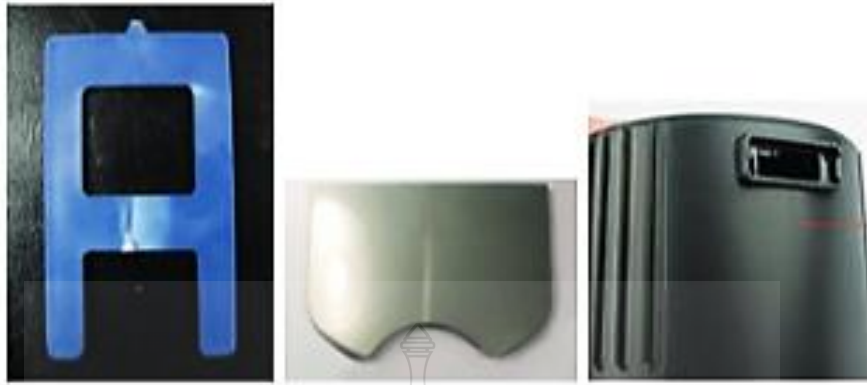
2.5.1 ปัจจัยที่ก่อให้เกิดรอยเชื่อมขวางบนผิวชิ้นงาน สามารถแบ่งปัจจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังนี้

การสร้างแม่พิมพ์ (ช่องทางเข้าของเนื้อพลาสติก รู ความหนาของผนังแม่พิมพ์ที่ต่างกัน โครงสร้างที่มีความซับซ้อนไม่สม่ำเสมอทำให้อุณหภูมิการไหลในช่องทางไหลของพอลิเมอร์ไหลอมเหลวแปรปรวนตามไปด้วย)

คุณสมบัติของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการฉีด (พอลิเมอร์ที่มีความหนืดสูง สารตัวเติม หรืออนุภาคของสารเติมแต่งสี)

การออกแบบแม่พิมพ์สำหรับฉีด (การออกแบบระบบระบายอากาศ อุณหภูมิที่ต่างกันของพอลิเมอร์ในช่องการไหล ทางเข้าของเนื้อพลาสติก)

สภาวะที่ใช้ในการฉีด (ความเร็วฉีดต่ำไป อุณหภูมิแม่พิมพ์และอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำเกินไป แรงในการดันย่ำต่ำ)

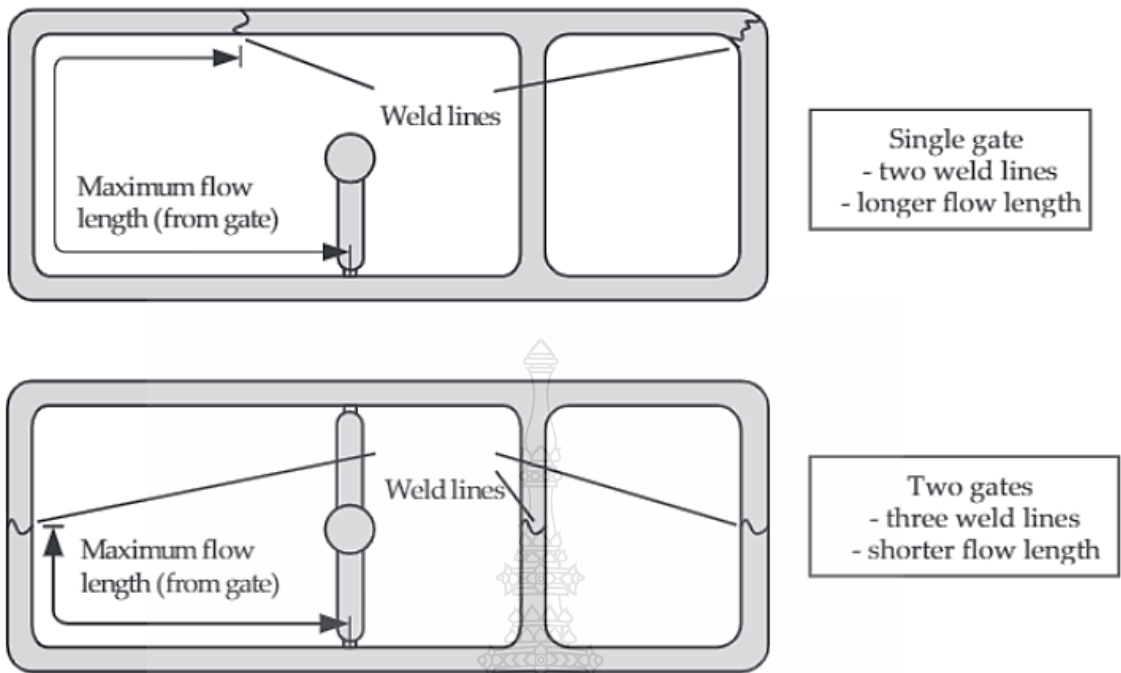


รูปที่ 2.21 แสดงตัวอย่างชิ้นงานฉีดที่แสดงให้เห็นรอยเชื่อมขวางอย่างชัดเจน [29]

บริเวณพื้นที่ที่เกิดรอยเชื่อมขวางในชิ้นงานฉีดมักเกิดจากความไม่สมบูรณ์จากพลาสติกที่ผ่านกระบวนการ เครื่องฉีดพลาสติก แม่พิมพ์ หรือกระบวนการเทคโนโลยีต่างๆที่ทำให้หลีกเลี่ยงได้ยาก ทำให้เกิดความไม่สมบูรณ์ได้ ซึ่งเป็นผลจากการออกแบบชิ้นส่วนแม่พิมพ์ที่ซับซ้อนไม่สม่ำเสมอ โดยเฉพาะอย่างยิ่งร่องรอยในบริเวณที่เกิดรอยเชื่อมขวางที่มีความไม่สม่ำเสมอทำให้มองเห็นได้ชัด เนื่องจากแม่พิมพ์มีความเรียบ เงาม และมันวาวสูง จึงทำให้มองเห็นได้ด้วยตาเปล่าอย่างชัดเจนได้ในชิ้นงานที่มีความเข้มหรือใส และสถานะที่อาจส่งผลกระทบต่อผลตามจะเป็นสถานะที่มีผลกระทบจากสารตัวเติม และอนุภาคของสารเติมแต่ง เช่น ผงสี ผงโลหะ หรือสารตัวเติมอื่นๆ

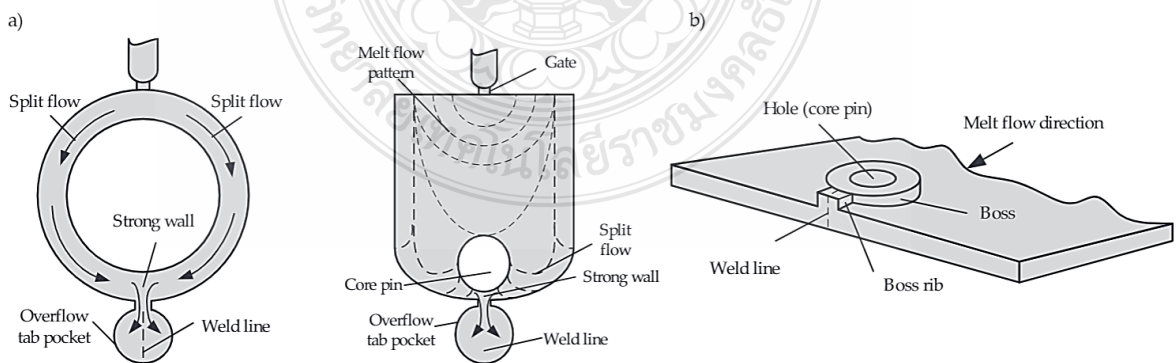
2.5.2 การออกแบบชิ้นส่วนของแม่พิมพ์ฉีด ทางการไหลของเนื้อพอลิเมอร์หลอมเหลวในโพรงส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงอย่างมาก และลักษณะของพื้นผิวบริเวณรอยเชื่อม ซึ่งสิ่งแรกคือจำเป็นต้องพิจารณาให้แน่ชัดว่าด้านหน้าของการไหล หลังจากเกิดการไหลชนกัน มีความเป็นไปได้ที่จะสามารถเกิดการเชื่อมติดกันอย่างมีเป็นอย่างไรหรือไม่

ตำแหน่งรอยเชื่อมขวางของพลาสติกขึ้นอยู่กับช่องทางเข้าของเนื้อพลาสติก ทางเข้า (gate) ของเนื้อพลาสติกต้องอยู่ในบริเวณที่สามารถเกิดรอยเชื่อมขวางได้ จำนวนทางเข้าที่มีหลายทางเข้าสามารถปิดช่องทางเพื่อจำกัดช่องทางไหล อย่างไรก็ตามการเพิ่มจำนวนทางเข้าของเนื้อพลาสติก เพื่อให้ระยะทางการไหลสั้นลง ซึ่งจะทำให้การไหลชนกันของเนื้อพอลิเมอร์ในบริเวณหน้ามีอุณหภูมิที่สูงเนื่องจากระยะทางในการไหลสั้นลงและความเร็วของการไหลสูงขึ้น จะส่งผลให้บริเวณที่เกิดการเชื่อมขวางมีความแข็งแรงมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 รอยเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นต่อจำนวนทางเข้าของเนื้อพลาสติกที่ต่างกัน [29]

การออกแบบชิ้นส่วนแม่พิมพ์ควรทำให้แน่ใจว่าทางการไหลของเนื้อพลาสติกมีความสม่ำเสมอ ราบรื่น ในการออกแบบควรคำนึงถึงการออกแบบทิศทางการไหลของเนื้อพลาสติกให้มีความเหมาะสม ในกรณีที่ชิ้นงานมีลักษณะเป็นวงแหวนที่ชิ้นงานมีความบางหรือมีรูภายในชิ้นงานก็เป็นสิ่งที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงในเรื่องของรอยเชื่อมขวางได้ ในกรณีดังกล่าวนี้อาจมีความจำเป็นที่จะต้องออกแบบช่องทางการไหลเพิ่มขึ้น เพื่อเพิ่มทางระบายอากาศหรือแก๊สในบริเวณที่เกิดรอยเชื่อมขวางให้มีการเชื่อมติดกันได้ดีขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.23 a) หรือการเพิ่มความหนาของคลิป (Boss rib) ให้มากขึ้นเพื่อเสริมความแข็งแรงให้กับบริเวณที่เกิดรอยเชื่อมขวางนั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.23 b)

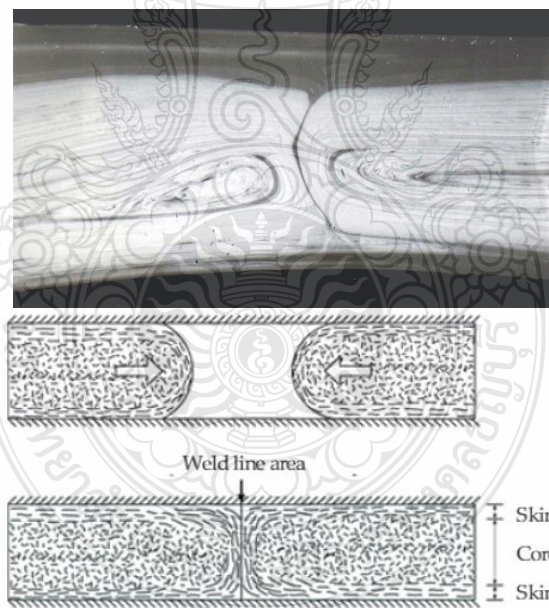


รูปที่ 2.23 การออกแบบรูและครีบบเพื่อช่วยในการปรับปรุงความแข็งแรงบริเวณที่มีรอยเชื่อมขวาง [29]

อีกประการหนึ่งของการของขึ้นรูปจากแม่พิมพ์ด้วยกระบวนการฉีดคือ ความหนาของผนังที่มีความเท่ากัน ประเภทของวัสดุที่ไหลเข้าไปและอัตราการหดตัวก็มีความสำคัญ ความแตกต่างของความหนาสำหรับการขึ้นรูปพอลิเมอร์แบบออสันฐาน อัตราการหดตัวต่ำที่ 25% ในขณะที่พอลิเมอร์แบบกึ่งผลึกอยู่ที่ 15%

2.5.3 สมบัติของวัสดุ ประเภทของวัสดุที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปจะส่งผลอย่างมากต่อความแข็งแรงบริเวณที่เกิดรอยเชื่อมขวาง ในกรณีพอลิเมอร์แบบออสันฐาน จะมีความแข็งแรงที่สูงกว่าแบบกึ่งผลึก ซึ่งพลาสติกที่มีความโดดเด่นด้วยอัตราการหลอมเหลวสูง ทำให้พอลิเมอร์ไหลได้ดีขึ้นในโพรงและส่งผลให้ชิ้นงานนั้นมีความแข็งแรงมากขึ้น ในกรณีของพอลิเอทิลีน แสดงค่าความต้านทานแรงดึงที่บริเวณรอยเชื่อมขวาง ซึ่งมีค่าดัชนีการไหลต่ำที่ 0.35 กรัม/10 นาที นั่นถือว่าต่ำกว่าประมาณ 16% เมื่อเทียบกับค่าความแข็งแรงบริเวณที่ไม่เกิดรอยเชื่อมขวาง ซึ่งในกรณีนี้พอลิเอทิลีนมีค่าดัชนีการไหลอยู่ที่ 21.30 กรัม/10 นาที ซึ่งถือว่ามีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยอยู่ระหว่าง 3-5% เท่านั้น

สมบัติที่ลดลงในบริเวณที่เกิดรอยเชื่อมขวางเป็นผลจากการจัดเรียงตัวของโมเลกุลขนาดใหญ่ บริเวณด้านหน้าของรอยประสานที่เกิดการไหลชนกันและการเติมสารตัวเติมหรือวัสดุเสริมแรง โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารที่เป็นเส้นใยลงในพอลิเมอร์ผสมส่งผลให้สมบัติด้านความแข็งแรงลดลง เนื่องจากการจัดเรียงตัวของอนุภาคของเส้นใยในแนวขนานกับด้านหน้าของการไหลของพลาสติกหลอมเหลวดังแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 การวางแนวการจัดเรียงตัวของโมเลกุลของพอลิเมอร์และเส้นใยบริเวณรอยเชื่อมขวาง [29]

2.5.4 สภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูป ความแข็งแรงที่บริเวณรอยเชื่อมขวาง สามารถปรับปรุงได้โดยการปรับเปลี่ยนสภาวะที่ใช้ในงานฉีด ซึ่งสภาวะที่มีผลต่อความแข็งแรงบริเวณที่เกิดรอยเชื่อมขวางคือ อุณหภูมิของแม่พิมพ์ อุณหภูมิที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูป หรือความเร็วในการฉีด เนื้อพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ถูกสัมผัสกับผนังแม่พิมพ์ที่มีความเย็นกว่าจะเริ่มแข็งตัวสร้างเป็นผนัง การไหลของพลาสติกที่ชน

กันบริเวณที่เกิดรอยเชื่อมขวาง ดังนั้นความหนาที่ก่อให้เกิดการแข็งตัวบริเวณของชิ้นส่วนจึงส่งผลต่อความกว้างและความลึกของรอยบากรูปตัว V ที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้ จากงานวิจัยพบว่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมประสานนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิหลอมเหลวและแรงยึดติดกันเป็นหลัก อีกทั้งอุณหภูมิหลอมเหลวที่สูงขึ้นนั้นส่งผลดีต่อความแข็งแรงบริเวณที่เกิดรอยเชื่อมประสาน

การออกแบบพื้นที่เกิดรอยเชื่อมขวางในแม่พิมพ์ฉีดเป็นปัญหาสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งชิ้นส่วนประกอบที่มีรูปร่างซับซ้อนและมีความต้องการด้านความแข็งแรง พื้นผิวชิ้นงานที่มีสีและความเงา เรียบบอย่างสม่ำเสมอ บริเวณที่เกิดรอยเชื่อมขวางที่มองเห็นได้ เนื่องจากแนวของการเย็นตัวแบบไล่ระดับอุณหภูมิอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งการเย็นตัวแบบระดับอุณหภูมินั้นส่งผลต่อวัสดุในแม่พิมพ์ทำให้เกิดความเครียดจากความร้อนที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์ ในตอนท้ายของกระบวนการหล่อเย็น แรงอัดจะเกิดขึ้นนอกของวัสดุในขณะที่แรงดันตั้งขึ้นด้านใน นอกจากนี้ยังมีความเครียดทางรีโอโลยีซึ่งเกี่ยวข้องกับ การไหลของวัสดุที่สัมผัสกับแม่พิมพ์ ทั้งหมดนี้ก่อให้เกิดสภาวะความเค้นภายในส่วนที่เกิดการแข็งตัว ซึ่งเกิดขึ้น ณ จุดที่เกิดการไหลชนกันของเนื้อพลาสติก ซึ่งอาจส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของชิ้นงานในบริเวณนี้ เป็นผลมาจากการไหลชนกันของเนื้อพลาสติกหลอมเหลว การจัดเรียงตัวของโมเลกุลขนาดใหญ่ โมเลกุลบางส่วนถูกจัดเรียงแบบตั้งฉากกับการไหลและส่วนอื่นอาจเกิดการโค้งงอหรือขาดตัว การจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลที่ไม่เป็นไปตามทิศทางไหลนั้นอาจเป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่ทำให้สมบัติทางกลของวัสดุลดลง หรือการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพลาสติกก็เป็นไปได้เช่นกัน

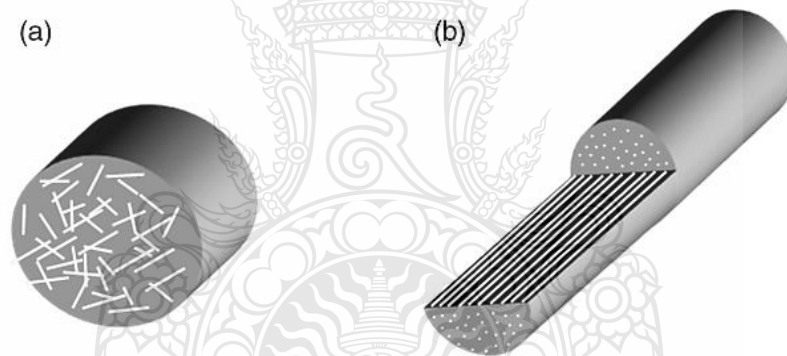
การออกแบบชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดนั้นควรพิจารณาถึงการไหลของเนื้อพลาสติกภายในแม่พิมพ์ และการเกิดรอยเชื่อมประสานให้อยู่ในจุดที่ไม่สำคัญหรือบริเวณที่ไม่สามารถมองเห็น ซึ่งทำได้โดยการปรับเปลี่ยนตำแหน่งทางเข้าของเนื้อพลาสติกในแม่พิมพ์ หรือการจำลองโดยใช้ระบบของคอมพิวเตอร์สามารถทำให้รู้ถึงจุดบกพร่องและการไหลภายในแม่พิมพ์ การทำให้รอยเชื่อมประสานสามารถเกิดการประสานเข้ากันได้ดีโดยการเลือกใช้พารามิเตอร์ในการฉีดให้เหมาะสม

2.6 การฉีดขึ้นรูปแบบแทรก (Insert Injection Molding)

การฉีดขึ้นรูปแบบแทรก (Insert Injection Molding) [30] เป็นกระบวนการขึ้นรูปชิ้นส่วนพลาสติกที่มีพลาสติกล้อมรอบชิ้นงาน หรือชิ้นส่วนของชิ้นงานนั้นๆ โดยองค์ประกอบที่ถูกแทรกเข้าไปในชิ้นงานนั้นมักเป็นวัสดุธรรมดาแบบสำเร็จ เช่น ผ้า เหล็ก ด้ายหรือแท่ง ซึ่งอาจเป็นกระบวนการที่ไม่ซับซ้อนมากนัก นอกจากนี้ การขึ้นรูปแบบแทรกยังรวมถึง โลหะและพลาสติก หรือวัสดุและส่วนประกอบหลายองค์ประกอบรวมกันเป็นชิ้นส่วนเดียว กระบวนการนี้ใช้พลาสติกวิศวกรรมเพื่อเพิ่มความต้านทานต่อการสึกหรอของความต้านทานต่อแรงดึง และน้ำหนักที่ลดลง รวมทั้งวัสดุที่ใช้แทรกในกระบวนการนั้นยังเพิ่มความแข็งแรง ซึ่งจะมีความคล้ายคลึงกับกระบวนการ Over molding แต่กระบวนการฉีดแบบแทรก (Insert Injection Molding) จะใช้การนำชิ้นส่วนติดลงในช่องของแม่พิมพ์ จากนั้นจึงทำการหล่อทับด้วยเทอร์โมพลาสติกเพื่อสร้างส่วนประกอบชิ้นสุดท้ายก่อนทำไปทำชิ้นส่วนต่างๆ

2.1.6 การผลิตคอมพอสิตจากเส้นใยธรรมชาติด้วยเทคนิคการฉีดขึ้นรูป [12]

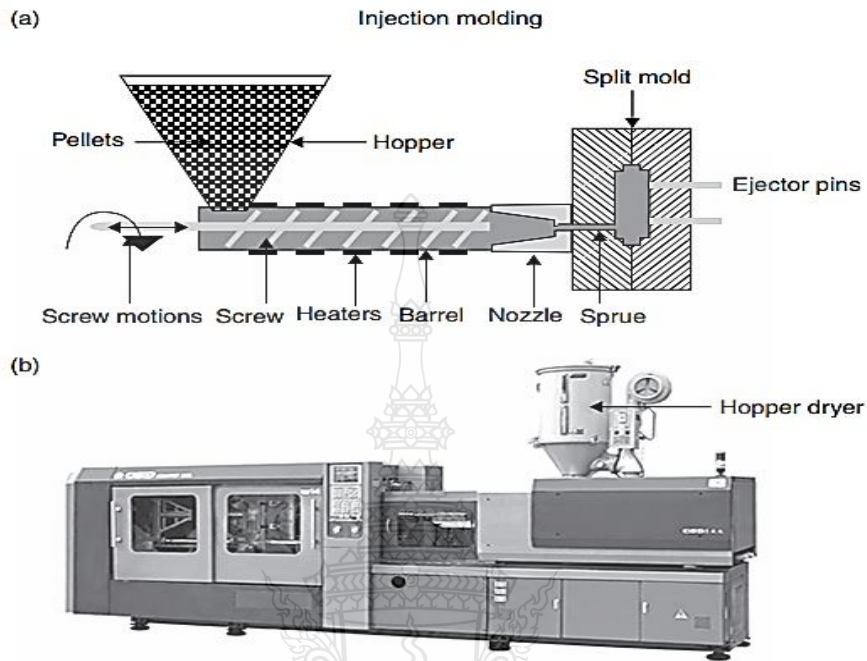
เทคนิคการผลิตขึ้นรูปเป็นเครื่องมือที่จำเป็นต่ออุตสาหกรรมการผลิตเพราะมันสามารถผลิตชิ้นงานออกมาได้อย่างถูกต้องแม่นยำและใช้เวลาน้อยมาก ชิ้นส่วนที่ขึ้นรูปด้วยการฉีดจำเป็นต้องผ่านกระบวนการผลิตน้อยที่สุดซึ่งจะช่วยลดต้นทุนในส่วนของการแรงงานและผลิตภัณฑ์เอง อย่างไรก็ตาม การฉีดขึ้นรูปจะดีกว่าการกดอัด (Compression) ในแง่ของประสิทธิภาพเชิงกล เนื่องจากในอดีตสามารถเสริมแรงด้วยเส้นใยสั้นและรวมเป็นเส้นใยแบบยาวอย่างต่อเนื่องได้ในภาพหลัง นอกจากนี้วิธีผลิตเส้นใยยาวยังแตกต่างจากเส้นใยสั้นอย่างมาก ตามที่กล่าวมาก่อนหน้าการป้อนเรซินและเส้นใยเข้าไปในกรวยเติมเม็ดพลาสติก (Hopper) ลำเลียงไปยังเครื่องอัดรีดเส้นใยเม็ดสั้น ซึ่งเรซินจะแทรกเข้าไปในเส้นใย ผ่านแรงเฉือนของสกรูและแรงดึงจากบาร์เรล สิ่งนี้จะผลิตเม็ดออกมาที่ด้านในจะเป็นเส้นใยสั้นกระจายแบบไร้ทิศทาง (แสดงในรูปที่ 2.25) เม็ดจากเส้นใยยาวผลิตด้วยกระบวนการพัลทรูชัน (Pultrusion) เส้นใยยาวอย่างต่อเนื่องถูกดึงผ่านเรซินและรวมเข้ากันเป็นเส้นใย ดังนั้นเส้นใยจะถูกเรียงตัวไปในทิศทางเดียวและความยาวของเส้นใยจะคล้ายกับความยาวของเม็ด แสดงในรูปที่ 2.25 การตั้งค่ากระบวนการพัลทรูชัน (Pultrusion) สำหรับการผลิตเม็ดจากเส้นใยยาวด้วยเครื่องอัดเม็ดเส้นใยยาว (Long Fiber Pellet Pultrusion Machine) ฉนวนความยาวของเม็ดสั้นโดยทั่วไปจะอยู่ที่ 2-4 มิลลิเมตร ในขณะที่ เม็ดจากเส้นใยยาวความยาวเม็ดอยู่ที่ประมาณ 10-12 มิลลิเมตร.



รูปที่ 2.25 (a) เม็ดสั้นธรรมดา (b) เม็ดจากเส้นใยยาว [12]

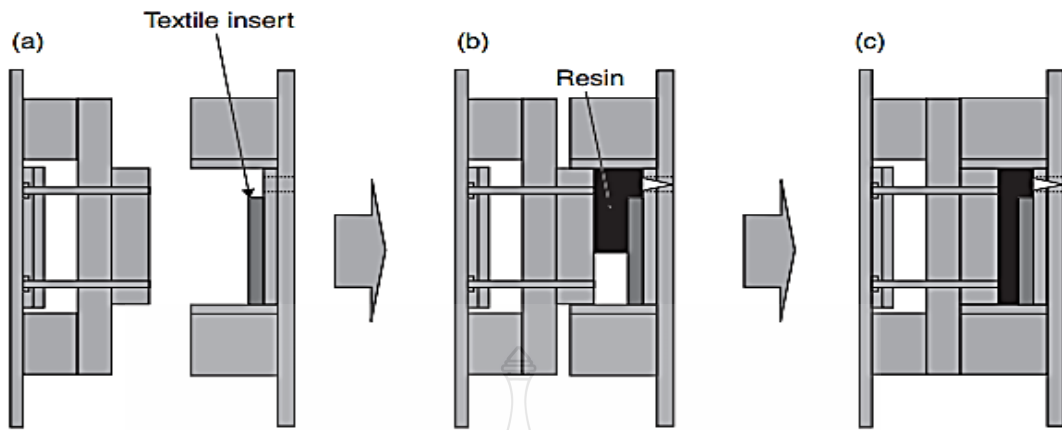
สิ่งที่ควรรู้อีกอย่างก็คือข้อจำกัดในเรื่องความยาวของเม็ดที่จะป้อนเข้าไปในกรวยเติมเม็ดพลาสติก (hopper) ควรมีขนาดที่ได้มาตรฐานในกระบวนการฉีดขึ้นรูป เทคนิคการผลิตเม็ดจากเส้นใยยาวด้วยเครื่องอัดเม็ดเส้นใยยาว (long fiber pellet pultrusion machine) ได้ถูกนำมาใช้เพื่อปรับปรุงความเหนียวและความมันคงของวัสดุคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกเสริมใยแก้วและคาร์บอนไฟเบอร์ อย่างไรก็ตามยังคงมีการศึกษาต่อเพื่อมีการพัฒนาให้สามารถใช้กับเส้นใยธรรมชาติได้ อีกหนึ่งอย่างที่สำคัญคือการลดความหนืดของเรซินเพื่อให้เส้นใยสามารถจุ่มลงไปในขณะที่อุณหภูมิต่ำเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน ดังนั้นกระบวนการผลิตขึ้นรูปโดยทั่วไปจะเกี่ยวข้องกับการป้อนวัสดุเข้าไปผ่านบาร์เรล แต่สำหรับเม็ดพลาสติกผสมเส้นใยธรรมชาติควรมีเครื่องเป่าแห้งที่กรวยเติมเม็ดพลาสติก รูปที่ 2.26 เพื่อให้เม็ดแห้งตลอดกระบวนการ จากนั้นเม็ดจะถูกลำเลียงไปยังห้องหลอมเหลวทรงกระบอกเพื่อให้เรซินเกิดการหลอมในบาร์เรล และเมื่อได้ตามปริมาตรที่ต้องการเครื่องจะทำการฉีด

ผ่านหัวฉีดเข้าไปยังแม่พิมพ์ (mold) และเย็นตัวอย่างรวดเร็วจากนั้นโมลจะถูกเปิดออก แล้วกระทุ้งปลดชิ้นส่วนออกมาด้วยอีเจ็คเตอร์ (ejector pin) ที่อยู่ด้านในแม่พิมพ์ (mold)



รูปที่ 2.26 (a) เครื่องฉีดขึ้นรูปแบบปกติ (b) เครื่องฉีดขึ้นรูปแบบเครื่องเป่าแห้ง (hopper dryer) [12]

แม้ว่ากระบวนการฉีดขึ้นรูปจะสามารถผลิตผลิตภัณฑ์ได้อย่างรวดเร็วแต่ก็ไม่สามารถผลิตเส้นใยเสริมแรง (fiber reinforced composites) ได้อย่างต่อเนื่อง ดังนั้นเทคนิค injection-compression molding จึงนิยมนำมาใช้ในการทำชิ้นส่วนสิ่งทอจากเส้นใยธรรมชาติที่มีความสำเร็จน้อยกว่าเทคนิคการแทรกผ้าจากเส้นใยธรรมชาติ (textile insert molding) แสดงในรูปที่ 2.27 เกี่ยวข้องกับการแทรกผ้าทอจากเส้นใยธรรมชาติในแม่พิมพ์ ในตอนแรกนั้นแม่พิมพ์จะเริ่มถูกปิดเพียงบางส่วนก่อนการฉีดเทอร์โมพลาสติกเรซิน เมื่อฉีดเรซินเข้าแม่พิมพ์จะถูกปิดด้วยแรงดันและความเร็วในการอัดเพื่อให้เรซินแทรกเข้าไปในผ้าได้ดีเต็มที่ ซึ่งในกรณีนี้ผ้าจะถูกติดอยู่บนผิวของแม่พิมพ์ อีกทั้งกระบวนการนี้สามารถผลิตได้อย่างต่อเนื่องและเป็นประโยชน์ในด้านการผลิตชิ้นงานแบบแทรกผ้าจากเส้นใยธรรมชาติจากด้านนอกหรือด้านในของแม่พิมพ์ได้



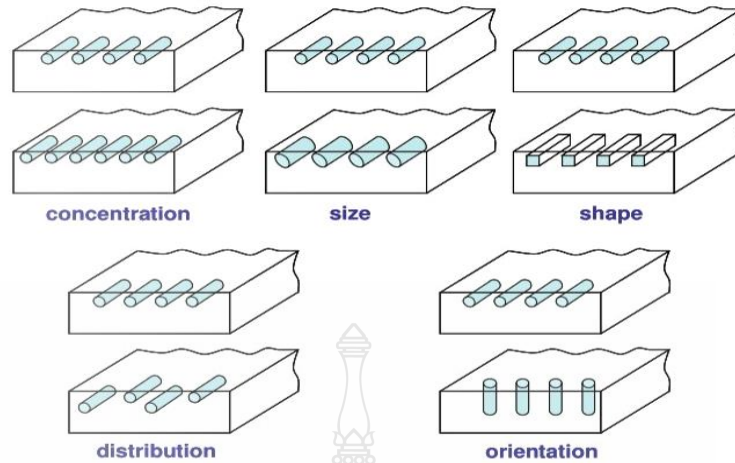
8.11 The textile insert injection-compression molding process:
(a) insertion of textile; (b) partial mold closing and injection of resin;
(c) full mold closing and compression of resin onto the textile insert.

รูปที่ 2.27 เทคนิคการแทรกสิ่งทอในกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Textile insert injection molding) [12]

2.7 พอลิเมอร์เชิงประกอบ (Polymer composite)

2.8.1 วัสดุเชิงประกอบหรือวัสดุคอมพอสิต (Composite materials) [31]

เป็นวัสดุที่มากกว่าหนึ่งชนิดเกิดการรวมตัวกัน หรืออาจมีองค์ประกอบทางเคมีหรือโครงสร้าง และทางฟิสิกส์ที่มีความแตกต่างกันตั้งแต่หรือมากกว่าสองชนิดมาผสมกันแล้วทำให้วัสดุมีสมบัติโดยรวมดีขึ้น โดยที่วัสดุไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้สมบัติที่ได้จากวัสดุคอมพอสิตมีการรวมกันของสมบัติวัสดุที่เป็นองค์ประกอบ ดังนั้นคาดการณ์ถึงสมบัติของวัสดุคอมพอสิตจึงไม่สามารถคาดเดาได้จากวัสดุเพียงชนิดเดียวที่เป็นองค์ประกอบ ซึ่งวัสดุคอมพอสิตจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนเมทริกซ์หรือวัสดุที่เป็นเนื้อหลัก เรียกว่า เมทริกซ์ (Matrix) ในส่วนที่ถูกกระจายอยู่ในเนื้อหลักซึ่งเป็นวัสดุที่เหลือจะเรียกว่าส่วนเสริมแรง (Reinforcement) โดยส่วนเมทริกซ์ จะเป็นส่วนที่ช่วยยึดชิ้นส่วนและครอบคลุมส่วนที่เสริมแรงเข้าไว้ด้วยกัน เพื่อให้ส่วนที่เสริมแรงอยู่ในตำแหน่งคงที่เป็นรูปร่างขึ้น และกระจายตัวตามที่กำหนด ส่วนของสารเสริมแรงจะทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงแก่วัสดุคอมพอสิตให้มีสมบัติตามต้องการ ในส่วนของวัสดุคอมพอสิตสังเคราะห์นั้นจะถูกเตรียมให้มีสมบัติที่ดีเหมาะต่อการใช้งานเฉพาะด้าน โดยสมบัติที่ได้จากวัสดุคอมพอสิตจะดีหรือใหม่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของเนื้อหลักหรือวัสดุตั้งต้น และลักษณะการกระจายตัวของเฟสที่เป็นอยู่ ซึ่งจะแสดงถึงลักษณะของเฟสที่กระจายตัวอยู่ชนิดเดียวกัน แต่ถ้ามีความเข้มข้น (ปริมาณ) รูปร่าง ขนาด ลักษณะการจัดเรียงตัวและการกระจายตัวของเฟสในตำแหน่งที่แตกต่างกันแล้ว ก็จะทำให้สมบัติของวัสดุคอมพอสิตที่แตกต่างกันตาม



รูปที่ 2.28 ลักษณะการกระจายตัวของเฟสที่ส่งผลต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ [31]

2.8.2 ประเภทของวัสดุเชิงประกอบ [11]

วัสดุคอมพอสิตสามารถจำแนกได้เป็น 2 ส่วนสำคัญ ได้แก่ เมทริกซ์และสารเสริมแรง ดังนั้นหากจำแนกชนิดของวัสดุที่เป็นเมทริกซ์ในวัสดุเชิงประกอบจะสามารถจำแนกได้ 3 แบบ ได้แก่ วัสดุคอมพอสิตพอลิเมอร์ (Polymer matrix composite, PMC) วัสดุคอมพอสิตโลหะ (Metal matrix composite, MMC) และวัสดุคอมพอสิตเซรามิก (Ceramic matrix composite, CMC) และสามารถจำแนกแยกย่อยได้อีกตามกายภาพของสารเสริมแรง ได้แก่ วิสเกอร์ (Whisker) เส้นใย (Fiber) และอนุภาค (Particle)

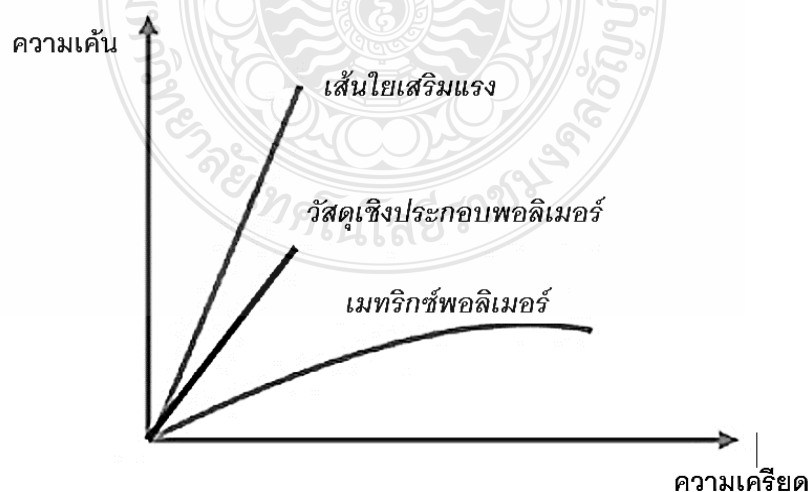


รูปที่ 2.29 การจำแนกประเภทของวัสดุเชิงประกอบตามชนิดของเมทริกซ์และลักษณะของสารเสริมแรง [11]

สารที่ใช้เสริมแรงจำแนกได้จาลักษณะและรูปร่างทั้งแบบ แผ่น เส้นใย หรืออนุภาค สามารถเป็นได้ทั้งรูปแบบผงหรือเม็ด เช่นผงถ่าน ผงอลูมิเนียม เป็นต้น ถ้านำสัดส่วนของความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect ratio) มาพิจารณา หากมีสัดส่วนที่มากกว่า 100 วัสดุเสริมแรงนั้นจะเป็นประเภทเส้นใย อาจเป็นได้ทั้งเส้นใยยาวต่อเนื่อง หรือเป็นเส้นใยสั้น (Short fiber) ก็ได้ ซึ่งมีค่าสัดส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางที่น้อยกว่า 1,000 ส่วนเส้นใยยาว (Long fiber) จะมีค่าสัดส่วนที่มากกว่า 1,000 เส้นใยมีทั้งแบบอนินทรีย์และอินทรีย์ ซึ่งเส้นใยส่วนใหญ่ที่นิยมใช้เป็นพวก เส้นใยแก้ว (Glass fiber) เส้นใยอะรามิด (Aramid fiber) เส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) เส้นใยเซลลูโลส และเส้นใยจากธรรมชาติ (Natural fiber) วัสดุเชิงประกอบควรมีคุณสมบัติ และลักษณะของพื้นผิวเส้นใยที่สม่ำเสมอ มีความอดุลัส และค่าความแข็งแรงสูง ไม่ก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพขณะขึ้นรูป ส่วนวิสเกอร์นั้นเป็นเส้นใยที่มีลักษณะขนาดเล็กมากที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับไมโครเมตรและความยาวเพียงไม่กี่มิลลิเมตร ซึ่งทำให้เกิดการจัดเรียงตัวในแนวเดียวกันกับผลึก (Elongated single crystal) ผลึกที่ได้มีแนวโมสมบูรณ์ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ (Dislocation) ทำให้วิสเกอร์นี้มีความแข็งแรงที่สูงมาก เช่น วิสเกอร์ซิลิกอนคาร์ไบด์

2.8.3 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เชิงประกอบ

พอลิเมอร์เชิงประกอบส่วนใหญ่แล้วจะเป็นสารประกอบที่ได้จากอินทรีย์ที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่เป็นหน่วยย่อยซ้ำ เชื่อมต่อกันเป็นสายโซ่เส้นยาว ส่งผลต่อความแข็งแรงของพอลิเมอร์ลดลง เนื่องจากความหนาแน่นที่ต่ำ ทนทานการกัดกร่อนได้ดี ซึ่งหากเสริมแรงในพอลิเมอร์เชิงประกอบทำได้ด้วยการเพิ่มเส้นใยลงไปทำให้สมบัติความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น โดยปกติเส้นใยที่ใช้เสริมแรงจะเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรงเพื่อรับและกระจายที่มากระทำ ความแข็งแรงที่สูงที่สุดจะขึ้นอยู่กับทิศทางการจัดเรียงตัวของเส้นใยที่ใช้เสริมแรง ซึ่งผลจากการเสริมแรงเข้าไปนี้ทำให้ตัวเนื้อหลักสามารถรับแรงที่มากระทำได้สูงขึ้นโดยที่รูปร่างไม่มีการเปลี่ยนแปลงดังแสดงรูปที่ 2.30 ที่แสดงถึงสมบัติทางเชิงกลอย่างง่ายของพอลิเมอร์เชิงประกอบมีแรงมากระทำตามทิศทางการจัดเรียงตัวของเส้นใยที่ใช้เสริมแรง



รูปที่ 2.30 สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์เปรียบเทียบกับวัสดุองค์ประกอบ [11]

สมบัติทางกลนี้จะเป็นสมบัติที่ได้จากสมบัติเนื้อหลักของพอลิเมอร์และสมบัติของเส้นใยที่ใช้เสริมแรง ทำให้วัสดุที่เสริมแรงมีความแข็งแรงที่มากกว่าวัสดุที่ไม่เสริมแรง ซึ่งเป็นผลจากหน้าที่รับแรงกระทำของเส้นใยเสริมแรง ความสามารถในการรับการดึงยืดสูงสุดนั้นขึ้นอยู่กับความสามารถในการรับแรงดึงของตัววัสดุที่ใช้เสริมแรง สำหรับส่วนของเนื้อพอลิเมอร์หลักคือเป็นส่วนที่มีความเหนียว ช่วยในการหล่อหุ้มและยึดส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกัน วัสดุเสริมแรงที่อยู่ในรูปแบบของอนุภาค หรือผงความสามารถในการรับแรงได้ไม่ดีเท่าวัสดุเสริมแรงที่เป็นพวกเส้นใยที่ให้การกระจายแรงกระทำได้ดีกว่า อนุภาคผงเหล่านี้ เรียกว่า สารตัวเติม (Filler) ซึ่งค่าความแข็งแรงจำเพาะสูงขึ้นเล็กน้อย เป็นอัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงต่อความหนาแน่นของวัสดุที่เพิ่มขึ้นของวัสดุเชิงประกอบ จึงทำให้สามารถนำวัสดุคอมพอสิตนี้มาใช้กับงานโครงสร้างที่ไม่มีการรับแรงมาก เช่น เฟอร์นิเจอร์ต่าง ๆ สำหรับพอลิเมอร์ที่นิยมใช้เป็นตัวเมทริกซ์จำแนกได้เป็น 2 ประเภท คือ เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic matrix) เทอร์โมเซตติง (Thermosetting matrix) มีพฤติกรรมการทางความร้อนที่ต่างกัน เทอร์โมพลาสติกนั้นมีโครงสร้างโมเลกุลที่มีสายโซ่เป็นเส้นตรงยาวหรือแบบกิ่ง เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการอ่อนตัวเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ตามสถานะและแข็งตัวคงรูปได้เมื่อได้รับความเย็น หรือเมื่อวัสดุถูกกระทำด้วยแรงกระทำที่สูงก็ไม่สามารถเข้าไปทำลายโครงสร้างภายในเดิมได้ จึงทำให้วัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติกสามารถนำกลับมาขึ้นรูปใช้ใหม่ได้อีกครั้งโดยสมบัติหลักของวัสดุไม่มีการเปลี่ยนแปลง ส่วนเทอร์โมเซตติงนั้น โครงสร้างเชื่อมโยงจับกันแน่นเป็นร่างแห เกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงโมเลกุลเมื่อเพิ่มความร้อน เกิดการคงรูปไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่แข็งแรงมาก จึงทำให้ไม่สามารถนำกลับมาหลอมใหม่ได้อีกครั้งเหมือนประเภทเทอร์โมพลาสติกได้ ซึ่งพฤติกรรมร้อนนี้มีผลต่อการขึ้นรูปวัสดุคอมพอสิต ขึ้นรูปพลาสติกที่เป็นเทอร์โมพลาสติกให้ความร้อนที่สูงกว่าจุดหลอมเหลวแล้วขึ้นรูปก่อนเกิดการเย็นตัว คงรูปเมื่อได้รับความร้อนอีกครั้งจะสามารถหลอมเหลวได้อีก การเลือกใช้วัสดุชนิดใดเป็นเมทริกซ์หรือเนื้อหลักนั้นขึ้นอยู่กับสมบัติเฉพาะที่ต้องนำมาใช้งาน พอลิเมอร์เชิงประกอบที่ถูกเสริมแรงด้วยไฟเบอร์กลาสหรือใยแก้วที่จัดอยู่ในกลุ่มเทอร์โมเซต เส้นใยแก้วจะถูกนำไปปรับใช้กับงานที่ต้องการความแข็งแรงปานกลางไปจนถึงเบามาก เช่น เฟอร์นิเจอร์ หลังการถนอมเป็นต้น ส่วนเมทริกซ์หรือเนื้อพอลิเมอร์หลักที่อยู่ในกลุ่มอีพ็อกซี จะถูกนำมาประยุกต์ใช้งานกับวัสดุที่ต้องการการรับแรง ความแข็งแรงที่สูง นอกจากนี้ยังสามารถนำเส้นใยชนิดอื่น ๆ มาใช้เป็นวัสดุในการเสริมแรงได้ เช่น เส้นใยเสริมแรงที่มีความแข็งแรงและต้องการสมบัติในการรับแรงที่สูงกว่าการเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว ได้แก่ เส้นใยคาร์บอนและเส้นใยอะรามิด โดยพอลิเมอร์เชิงประกอบที่เสริมแรงจากวัสดุเหล่านี้แสดงค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น และค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่สูงถึง 90% และ 50% ตามลำดับ โดยไม่เกิดการเสียหายขณะอยู่ระหว่างกระบวนการขึ้นรูป ในส่วนของการผลิตวัสดุคอมพอสิตจากเส้นใยของพอลิเมอร์นั้นสามารถผลิตได้หลากหลายกระบวนการ ซึ่งกระบวนการในที่นี้คือ

พัลทรูชัน (Pultrusion) เป็นกระบวนการที่นำเส้นใยจากม้วนของเส้นใยมาเรียงกัน จากนั้นดึงเส้นใยออกจากม้วนผ่านแผ่นนำทาง (guide plate) แล้วดึงผ่านอ่างที่มีเนื้อพอลิเมอร์ละลายอยู่ ตัวพอลิเมอร์หลอมเหลวที่อยู่ในอ่างจะไปเคลือบบนผิวเส้นใย ต่อมาจึงถูกอบให้แข็งตัว (curing) ก่อนจะผ่านไปยังขั้นตอนการตัดเพื่อให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ

การพันให้ยาว (Filament winding) กระบวนการนี้จะมีขั้นตอนเริ่มต้นคล้ายกับวิธีพัลทูลูชัน คือดึงเส้นใยผ่านอ่างพอลิเมอร์หลอมเหลว หลังจากนั้นนำเส้นใยไปพันรอบแกนด้วยแบบการพันยาว แบบต่างๆ ซึ่งวิธีพันยาวนิยมใช้ในการผลิตรูปทรงชิ้นงานที่กลวงจึงจำเป็นต้องมีสัดส่วนระหว่างความแข็งแรงต่อน้ำหนักที่สูงมาก ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้ ได้แก่ ท่อสามแฉก ท่อข้องอ และท่อกลวง ตรง เป็นต้น

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Mojdeh Reghat และคณะ (2021) [32] งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา การตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าและพฤติกรรมความเครียด (stain) ของคอมพอสิตอีพ็อกซีเสริมใยแก้ว เคลือบด้วยกราฟีน (graphene-coated glass fiber reinforced epoxy ; GGFRE) ชั้นแรกทำการเคลือบใยแก้วด้วยกราฟีน 2 wt% ด้วยวิธีการฉีเคลือบเรซินแบบสุญญากาศ จากที่เตรียมไว้ โดยทำการทดสอบทางไฟฟ้า ด้วยวิธี piezo-resistive properties ทดสอบทางกล ได้แก่การทดสอบแรงดึง และการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดัดแบบ 3 จุด ซึ่งพบว่า GGFRE มีความต้านทานเพิ่มขึ้น 4.46%, 10.5%, 11.07% และ 11.27% ตามสัดส่วนของแรงดึงที่ใช้ 2000N, 3000N, 4000N และ 5000N ตามลำดับ ซึ่งปัจจัยมาตรวัดที่สอดคล้องกันถูกคำนวณเป็น 14.56 ± 1 , 13.32 ± 1 , 11.23 ± 0.5 และ 8.69 ± 2 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าภายใต้การโหลดแรงดึงที่ 2000N ค่าความต้านทาน ($\Delta R/R_0$) จะสอดคล้องกันภายใน 11 รอบ ซึ่งบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพการตรวจจับที่เชื่อถือได้ การรวมกราฟีนกับคอมพอสิตได้แสดงให้เห็นว่าความต้านทานแรงดึงไปจนถึงความแข็งแรงดัด และโมดูลัสดัดลดลง 26%, 37% และ 39% ตามลำดับ ซึ่งเชื่อว่าค่าที่ลดลงนี้เกิดจากปริมาณเส้นใยที่ต่ำใน GGFRE เมื่อเทียบกับวัสดุคอมพอสิตใยแก้วแบบไม่เคลือบกราฟีน (neat composites) ไม่เกิดปฏิกิริยาต่อเส้นใยแก้วและการกระจายตัวของกราฟีนที่ไม่มีประสิทธิภาพ

นอกจากนี้การบีบอัดหลังการทดสอบแรงกระแทกพบว่าคอมพอสิตใยแก้วแบบไม่เคลือบกราฟีน (Neat Composites) มีค่าการรับแรงอัดที่สูงกว่าภายใต้แรงกระแทก อยู่ที่ 10, 20 และ 30 J อาจเป็นสาเหตุมาจากการยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยแก้วและการกระจายตัวของเรซินใน GGFRE อ่อนกว่าเมื่อเทียบกับคอมพอสิตที่ไม่เคลือบกราฟีน (Neat Composites) ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าการศึกษานี้ควรดำเนินการต่อโดยการตรวจสอบประสิทธิภาพของคอมพอสิตภายใต้แรงต่าง ๆ ที่มีจำนวนรอบมากขึ้น

Jacek Andrzejewski และคณะ (2018) [33] งานวิจัยนี้ได้นำเสนอแนวคิดการใช้วัสดุเสริมแรงด้วยตัวเองซึ่งเหมาะสมกับกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบแทรก โดย insert เสริมแรงที่ใช้ทำจากแผ่นโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต เสริมแรงในตัวเอง (Self-reinforced Poly(ethylene terephthalate) sheets ; srPET) ถูกหล่อทับ (Overmold) ด้วยเมทริกซ์พอลิเมอร์ ใช้ PET สองชนิดเป็นวัสดุเมทริกซ์ ได้แก่ PET (เรซินเกรดขวดบริสุทธิ์) และ G-PET (โคพอลิเมอร์จาก PET อสังฐาน) เตรียมตัวอย่างล่วงหน้าภายใต้สภาวะต่างๆ ของกระบวนการฉีดขึ้นรูป วัตถุประสงค์ของงานนี้ เพื่อประเมินประสิทธิภาพของแนวทางนี้ และตรวจสอบคุณสมบัติเชิงกลเชิงความร้อนขึ้นพื้นฐานของตัวอย่างที่เตรียมไว้ โดยทำการทดสอบ คุณสมบัติทางกล การวิเคราะห์ DMA และ DSC จากผลการทดสอบทางกลได้แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการแตกหักที่แตกต่างกันซึ่งเหมาะสมกับตัวอย่าง G-PET มาก ซึ่งค่าความต้านทานแรงดึงและ

โมดูลัสเพิ่มขึ้นถึง 60% และ 32% ตามลำดับการเพิ่มขึ้นที่สำคัญที่สุดสังเกตได้จากค่าความต้านทานแรงกระแทก สำหรับโพลีเอสเตอร์ทั้งสองประเภท ค่าความต้านทานแรงกระแทกอยู่ที่ประมาณ 50 kJ/m². จากค่าเริ่มต้นต่ำกว่า 5 50 kJ/m² โดยกล้อง SEM ถูกนำมาใช้เพื่อตรวจสอบสัญญาณวิทยาของรอยประสานกันของการเสริมแรงแบบเมทริกซ์ ซึ่งข้อสังเกตของการเชื่อมกันของอินเตอร์เฟสซึ่งทำให้เกิดการยึดเกาะในระดับสูงระหว่างวัสดุเมทริกซ์และการเสริมแรงแบบแทรก srPET จากผลลัพธ์ที่น่าเสนอนี้สามารถยืนยันว่าแนวคิดที่ใช้เทคโนโลยี overmolding สำหรับการเตรียมวัสดุผสมเสริมแรงในตัว มีศักยภาพในการนำไปใช้ในอุตสาหกรรม

ซึ่งผลการทดลองทดสอบแรงดึงยืนยันการยึดเกาะอย่างดีเยี่ยมระหว่างการเสริมแรงและวัสดุเมทริกซ์แบบฉีดขึ้นรูป ส่งผลให้ค่าโมดูลัสสูงสุดถึง 30% เกิดขึ้นจากการอุ่นวัสดุเสริมแรงก่อนทำการฉีดขึ้นรูปเพื่อช่วยให้วัสดุทั้งสองมีการยึดเกาะกันที่ดีขึ้น การนำแนวคิดที่น่าเสนอไปใช้ในอุตสาหกรรมจะช่วยให้สามารถลดน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้ายและอำนวยความสะดวกในการรีไซเคิลวัสดุ

Kengo Noda และคณะ (2012) [34] ได้ศึกษาผลกระทบของโครงสร้างสิ่งทอที่ถักและทอต่อสมรรถนะเชิงกลของสิ่งทอพอลิ (กรดแลกติก) ไส้แม่พิมพ์ด้วยกระบวนการฉีด-อัดขึ้นรูป ซึ่งปัญหาหลักๆของ PLA คือความเปราะซึ่งนั่นจะทำให้ถูกจำกัดประสิทธิภาพการใช้งานของตัวมันเอง จึงได้มีการพยายามที่จะปรับปรุงหรือ blend PLA กับวัสดุที่มีความแข็งแรงกว่า เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติให้ต่างไปจากเดิม งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การเพิ่มความแข็งแรง เหนียว ให้กับ PLA เป็นหลัก โดยไม่ใส่สารเติมแต่งใดๆ ดังนั้นผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จะเป็น Biodegradable 100% ที่มีความสามารถเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญโดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปสิ่งทอ (The textile-insert molding technique) โดยกรณีนี้จะใช้ผ้า PLA ติดกับเรซินของ PLA ด้วยกระบวนการฉีดอัดขึ้นรูป ซึ่งพบว่าสภาพการขึ้นรูปมีผลต่อการยึดเกาะระหว่างผ้ากับเนื้อเรซินซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการรับแรงกระแทก ซึ่งสามารถกระจายแรงกระแทกไปยังบริเวณกว้างได้ซึ่งนั่นจะช่วยเพิ่มความต้านทานต่อแรงกระแทกได้ อย่างไรก็ตามถ้าถักและผ้าทอจะให้การกระจายแรงที่แตกต่างกันเนื่องจากความสามารถในการยึดที่แตกต่างกัน อีกทั้งยังสามารถเพิ่มความสามารในเรื่องของความแข็งแรงและความเหนียวได้จริงโดยอาศัยการกระจายแรงและการยึดตัวของผ้าถักและผ้าทอ และการผสมผสานระหว่างผ้าถักและผ้าทอยังสามารถเพิ่มความสามารในการทนต่อแรงกระแทกได้ถึงสองเท่า

Y. W. LEONG และคณะ (2005) [35] เป็นการศึกษาผลกระทบของเงื่อนไขการขึ้นรูปต่อคุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติทางสัญญาณวิทยาที่ส่วนต่อประสานของฟิล์มแทรกฉีดขึ้นรูป Polypropylene-Film / Polypropylene Matrix เพื่อศึกษาความแข็งแรงต่อแรงดึงผิว (peel strength) ระหว่าง Polypropylene Film และ Polypropylene Matrix แล้วสังเกตทางสัญญาณวิทยาที่เกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อระหว่าง Polypropylene Film และ Polypropylene Matrix จากการทดสอบคุณสมบัติทางกล เช่น Three-point bending, Izod impact tests ได้อธิบายถึงการลอกของฟิล์มจากพื้นผิว การแยกชั้นฟิล์ม และการแตกของฟิล์ม เหตุการณ์เหล่านี้แสดงถึงความแข็งแรง ของการยึดเกาะระหว่างแผ่นฟิล์มกับพื้นผิวและการยึดเกาะระหว่างแผ่นฟิล์มลามิเนต การปรับปรุงที่สำคัญในกระบวนการนี้คือ การปรับอุณหภูมิบาร์เรลที่เพิ่มขึ้นให้ฟิล์มและพอลิเมอร์บางส่วนละลายติดกัน การ

แทรกฟิล์มลงบนพื้นผิวนั้นไม่ได้มีส่วนช่วยให้ทนต่อแรงกระแทกได้สูงขึ้นแม้ว่าข้อเท็จจริงแล้วฟิล์มสามารถทำให้แข็งแรงขึ้นก็ตาม

Justine Beauson และคณะ (2022) [36] ศึกษาผลกระทบของสภาวะการขึ้นรูปและความ เป็นผลึกของพอลิเมอร์ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของ PLA เสริมแรงด้วยตัวเองแบบทิศทางเดียว โดยในปัจจุบัน ได้ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพเชิงกลของ วัสดุผสม PLA ที่เสริมแรงด้วยตัวเอง ในระดับเส้นใยผลปรากฏว่า โมดูลัส (Young's modulus) ของ PLA เสริมแรงด้วยเส้นใยเพิ่มขึ้นเมื่อสัมผัสกับอุณหภูมิ (12%) และความแข็งแรงเมื่อขาด (strength at break) ลดลง (30%) ด้วยกระบวนการหลอมเพิ่มขึ้น โมดูลัส (Young's modulus) ของเมทริกซ์ PLA ผลึกอาจเพิ่มขึ้น ในขณะที่สมบัติของเส้นใยเสริมแรง PLA ไม่ได้รับผลกระทบ ซึ่งในระดับของวัสดุ เสริมแรง ผลแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิรวมที่ส่งผลให้ความแข็งแรงลดลงและความเครียด (strain at break) สูงขึ้น ขึ้นอยู่กับการค้นผลจากการทดสอบ ซึ่งสภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการเลือกเกรด PLA ที่ได้รับการแนะนำให้ใช้ในการผลิตวัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงในตัวเอง ซึ่งใน ระดับคอมพอสิตโดยทั่วไปพบว่า อุณหภูมิการรวมตัวเพิ่มขึ้นนำไปสู่ผลของการการลดลงของความเค้น และเพิ่มขึ้นของความเครียด ในขณะที่โมดูลัส (Young's modulus) ยังคงไม่ได้รับผลกระทบ อีกใน กรณีหนึ่ง ช่วงอุณหภูมิเกินไปที่ 155 °C สำหรับคอมพอสิต PLA เมทริกซ์ คุณภาพของวัสดุผสมไม่ค่อยดี นึกจากการเคลือบเส้นใยที่ไม่เหมาะสม มีรูพรุนรอยแตกขนาดใหญ่ ข้อสังเกตนี้กำลังอธิบายถึงลักษณะ ความเปราะบางของเมทริกซ์ PLA และลักษณะการยืดหยุ่นของเส้นใย ซึ่งกรณีที่ 2 พบว่าที่อุณหภูมิสูง 170 °C แสดงให้เห็นถึงเส้นใยเสริมแรง PLA มีบางเส้นที่มีรูปร่างที่ไม่ชัดเจนซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเริ่ม หลอมละลายของเส้นใยเนื่องจากอุณหภูมิที่หลอมละลายของเส้นใยเสริมแรง PLA คือ 177 °C อาจเป็น เพราะความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์นั้นจึงเป็นเหตุผลค่าของโมดูลัส (Young's modulus) เพิ่มขึ้น หลังจากการสัมผัสอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตาม

ผลกระทบของผลึกต่อประสิทธิภาพสมบัติทางกลคอมพอสิตจากการหลอมใน กระบวนการพบว่าค่าโมดูลัส (Young's modulus) ที่ทำจากเมทริกซ์ออสัญฐานยังคงไม่มีการ เปลี่ยนแปลง แต่โมดูลัส (Young's modulus) เมทริกซ์ก็งผลึกเพิ่มขึ้น 6% ซึ่งเกิดจากการตกผลึกของ เมทริกซ์ จากการรวบรวมผลของบทความนี้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพเชิงกลของ PLA เสริมแรงด้วย ตัวเองโดยไม่มีการอบอ่อน (annealing) ค่อนข้างสม่ำเสมออย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงโครงสร้างระดับ ไมโคร (microstructure) แนะนำให้ตั้งค่าอุณหภูมิรวมที่ 165 °C และสามารถลดได้ถึง 155 °C หากใช้ เมทริกซ์ออสัญฐาน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงข้อได้เปรียบเนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของเส้นใย เสริมแรงประมาณ 20 °C ในเรื่องของการอบอ่อน (Annealing) สามารถเพิ่มความแข็งแรงของคอมพอสิตที่มีเมทริกซ์ PLA แบบกึ่งผลึกอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามการอบอ่อน (Annealing) ในการศึกษา นี้ค่อนข้างใช้เวลานาน 60 นาที จึงไม่เหมาะกับงานอุตสาหกรรม

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

ศึกษาการขึ้นรูปพอลิเมอร์เชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผ้าไมก้าไม่ทอและเสริมแรงด้วยแผ่นฟิล์ม โดยแบ่งออกเป็นวัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมืออุปกรณ์ และการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ

3.1 แผนการดำเนินงาน

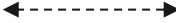

โดยงานวิจัยนี้มีแบบแผนและขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังแสดงในตารางที่ 3.1

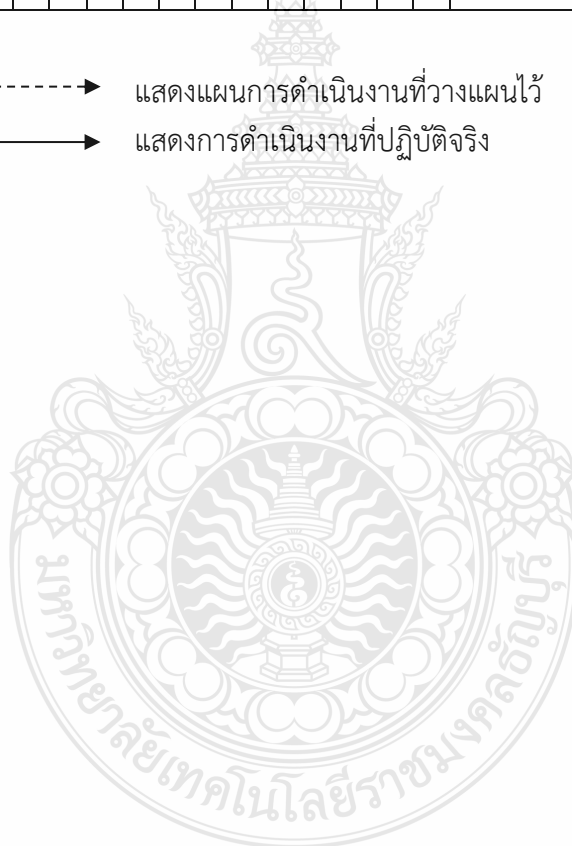
ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน

แผนการดำเนินงาน	ระยะเวลาดำเนินการ														
	2563						2564								
	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.-ธ.ค.								
1. ศึกษาค้นคว้าข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	←-----→														
2. รวบรวมข้อมูลและวางแผนดำเนินงาน			←-----→												
3. ทดสอบสมบัติทางกายภาพของวัสดุ			←-----→		←-----→										
4. เตรียมวัสดุเสริมแรงที่ใช้ขึ้นรูปพอลิเมอร์เชิงประกอบ				←-----→			←-----→								
5. ออกแบบสภาวะที่ใช้และทำการขึ้นรูป							←-----→		←-----→						
6. ทดสอบสมบัติทางกลและสมบัติทางสัณฐานวิทยา										←-----→		←-----→			

ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน (ต่อ)

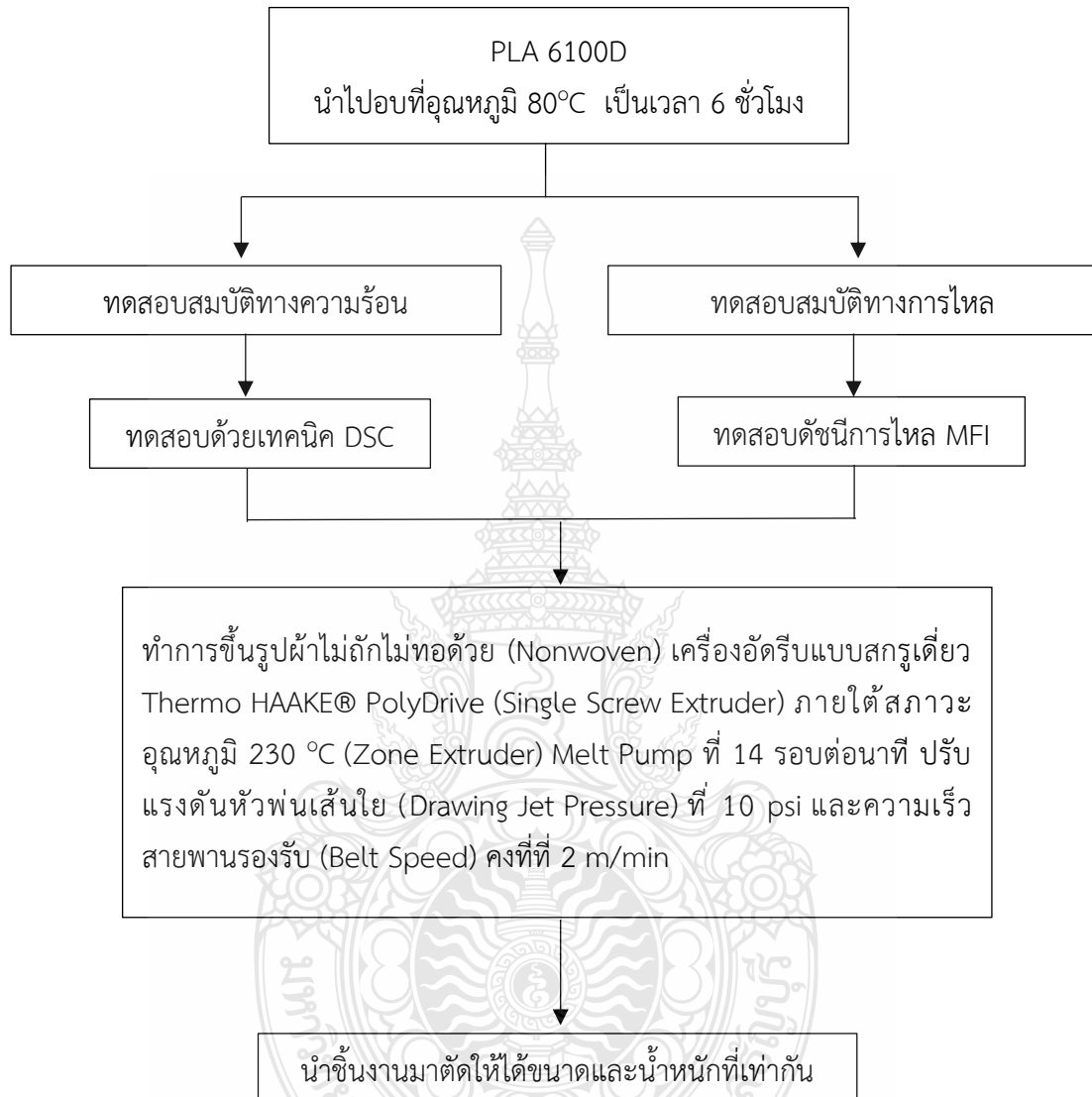
	ระยะเวลาดำเนินการ											
	2565						2566					
	ม.ค.-ธ.ค.						ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.			
7. รวบรวมผลการทดสอบเพื่อนำมาวิเคราะห์												
8. เผยแพร่งานวิจัย												
9. สรุป/รายงาน												

หมายเหตุ :  แสดงแผนการดำเนินงานที่วางแผนไว้
 แสดงการดำเนินงานที่ปฏิบัติจริง



3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

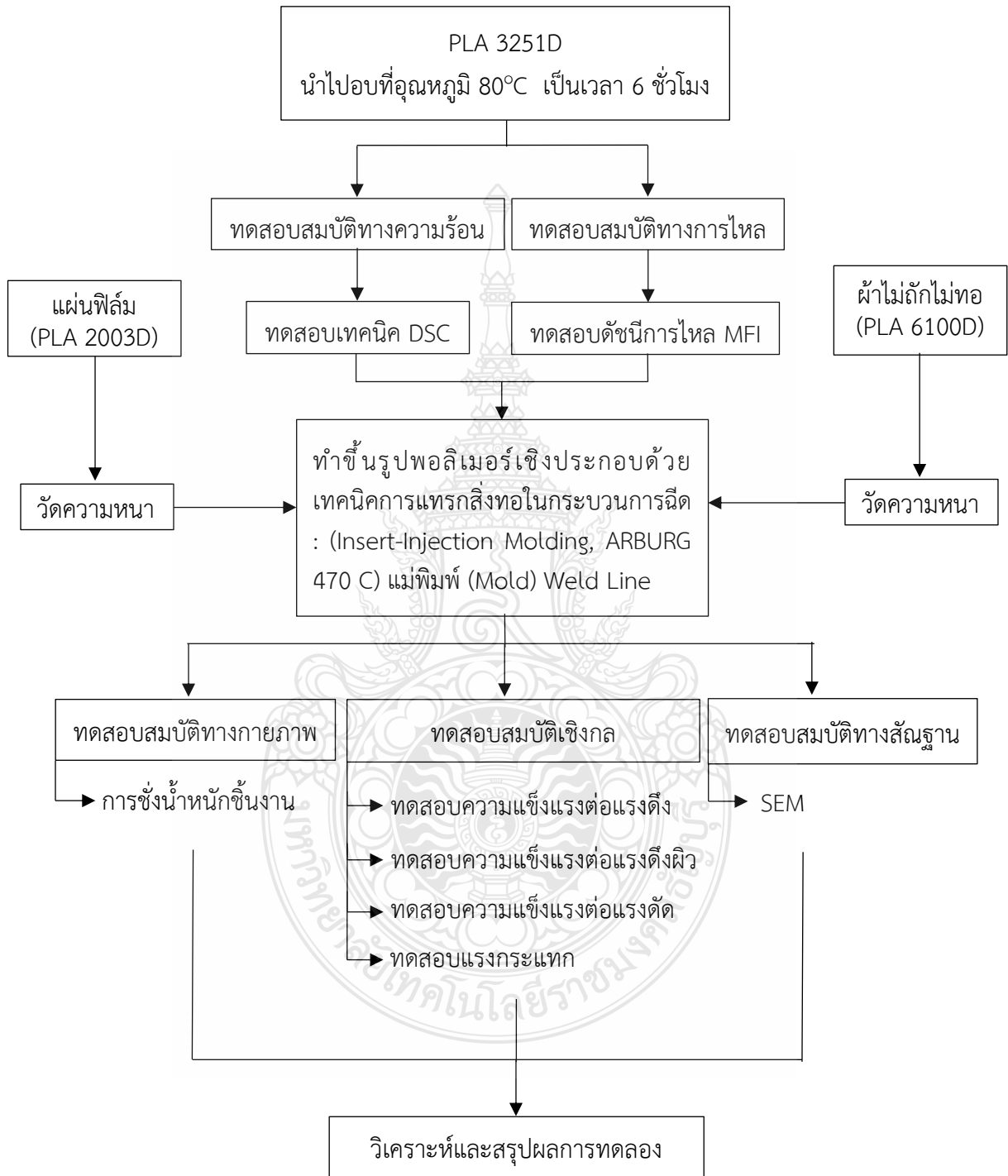
ในงานวิจัยได้มีการดำเนินงานตามขั้นตอนดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนดำเนินงานวิจัย

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย (ต่อ)

ในงานวิจัยได้มีการดำเนินงานตามขั้นตอนดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนดำเนินงานวิจัย (ต่อ)

3.3 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.3.1 วัสดุที่ใช้ขึ้นรูปผ้าไม่ถักไม่ทอ (Nonwoven) จากพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid; PLA) เกรด 6100D สำหรับใช้เป็นวัสดุเสริมแรง (Reinforcement) มีความหนาแน่น = 1.24 g/cm^3 , Melt Flow Rate, (ASTM1238) = 24 g/10min , $T_m = 165-180 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_g = 50-60 \text{ }^\circ\text{C}$ จากบริษัท Nature Work LLC product

3.3.2 แผ่นฟิล์มขึ้นรูปจากพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid; PLA) เกรด 2003D สำหรับใช้เป็นวัสดุเสริมแรง (Reinforcement) มีความหนาแน่น = 1.24 g/cm^3 , Melt Flow Rate, (ASTM1238) = 6 g/10min , $T_m = 190-210 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_g = 50-60 \text{ }^\circ\text{C}$ จากบริษัท Nature Work LLC product

3.3.3 วัสดุที่ใช้ฉีดขึ้นรูปพอลิเมอร์เชิงประกอบ พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid; PLA) เกรด 3251D สำหรับใช้เป็นพอลิเมอร์หลัก (Matrix) มีความหนาแน่น = 1.24 g/cm^3 , Melt Flow Rate, (ASTM1238) = $10-30 \text{ g/10min}$, $T_m = 145-155 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_g = 55-65 \text{ }^\circ\text{C}$ จากบริษัท Nature Work LLC product

3.4 การขึ้นรูปพอลิเมอร์เชิงประกอบ

3.4.1 นำเม็ดพอลิเมอร์ PLA ไปอบที่อุณหภูมิ $80 \text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง นำมาขึ้นรูปด้วยเครื่องเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว Thermo HAAKE® PolyDrive (Single Screw Extruder) โดยใช้พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid, PLA) เกรด 6100D ในการขึ้นรูปเส้นใย โดยทำการอัดรีดภายใต้สภาวะอุณหภูมิ $230 \text{ }^\circ\text{C}$ (Zone Extruder) Melt Pump ที่ 14 รอบต่อนาที ปรับแรงดันหัวพ่นเส้นใย (Drawing Jet Pressure) ที่ 10 psi และความเร็วสายพานรองรับ (Belt Speed) คงที่ที่ 2 m/min ทำการผลิตขึ้นรูปผ้าไม่ถักไม่ทอด้วยวิธีการ Spunbonded หลังจากที่พอลิเมอร์ถูกหลอมเหลวและอัดรีดด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวผ่านหัวสปินเนอเรต เส้นใยสังเคราะห์ที่ได้จะนำเข้าสู่เครื่องพ่นเส้นใย (Drawing Jet) เพื่อเก็บตัวอย่างผ้าไม่ถักไม่ทอต่อไป จากนั้นนำมาตัดและวัดความหนาให้มีขนาดเฉลี่ยเท่าๆกันในหลายๆชิ้นเพื่อใช้เป็นวัสดุในการเสริมแรง (Reinforcement) ของพอลิเมอร์เชิงประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.2



(a)



(b)

รูปที่ 3.2 (a) เครื่องขึ้นรูปผ้าไม่ถักไม่ทอ (Nonwoven) (b) ชิ้นงานที่ถูกตัดและวัดความหนา

3.4.2 แผ่นฟิล์มขึ้นรูปจากพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid; PLA) ทำการมาตัดแล้ววัดความหนาเฉลี่ยเท่าๆกัน ในทุกชั้น เพื่อนำใช้เป็นวัสดุในการเสริมแรง (Reinforcement) ของพอลิเมอร์เชิงประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.3



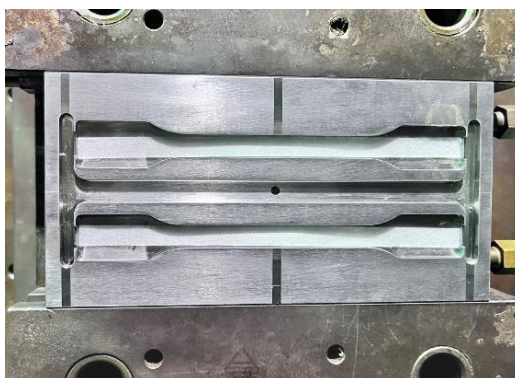
(a)



(b)

รูปที่ 3.3 (a) ม้วนฟิล์มจากพอลิแลคติกแอซิด (b) ชิ้นงานฟิล์มที่ถูกตัดและวัดความหนา

3.4.3 ทำการฉีดขึ้นรูปพอลิเมอร์เชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผ้าไม่ถักไม่ทอด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection Molding, ARBURG 470 C) แม่พิมพ์ (Mold) Weld Line โดยใช้เทคนิคการแทรกในงานฉีด (Insert Injection Molding) ใช้เม็ดพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid, PLA) เกรด 2003D ซึ่งทำโดยการนำชิ้นงานจากผ้าไม่ถักไม่ทอ หรือแผ่นฟิล์มมาติดลงบนแม่พิมพ์ แล้วจึงทำการฉีดขึ้นรูป ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะการวางผ้าไม่ถักไม่ทอ หรือแผ่นฟิล์มลงในแม่พิมพ์ (Cavity)

3.5 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

3.5.1 ตู้อบแห้งและควบคุมอุณหภูมิ

3.5.2 อุปกรณ์วัดความหนา (Thickness gauge)

3.5.3 การทดสอบดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ (Melt Flow Index, MFI) รุ่น Type 6542 Serial 8331 ใช้ในการทดสอบอัตราการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว ตามมาตรฐาน D1238 ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยการนำเม็ดพอลิเมอร์ที่ต้องการทดสอบมาอบเพื่อไล่ความชื้น ซึ่งน้ำหนักตัวอย่าง 8 กรัม เเทลงในกระบอกหลอม (Cylinder) ด้วยอุณหภูมิที่ 190 °C และ 230 °C ที่น้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม กดลงบนแท่งกด (Piston) พลาสติกเหลวจะไหลผ่านหัวคายน์ออกมา หลังจากนั้นจึงนำพลาสติกที่ไหลออกมาตัดเพื่อนำไปชั่งน้ำหนัก เทียบกับเวลา 10 นาที เราก็จะได้ค่าของ MFI ของพลาสติก ซึ่งจะมีหน่วยเป็น กรัม/10 นาที



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบดัชนีการไหลของพอลิเมอร์

3.5.4 การทดสอบทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter; DSC) รุ่น NETZSCH model DSC 200F3 เป็นเครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ ด้วยเทคนิค DSC ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ได้ถูกออกแบบมาเพื่อช่วยในการวิเคราะห์ และอธิบายการเปลี่ยนแปลงของการเกิดปฏิกิริยาเคมี การคายและดูดความร้อน โดยวัดปริมาณความร้อนที่แตกต่างกันของวัสดุตัวอย่างกับวัสดุที่ใช้อ้างอิงภายใต้สภาวะอุณหภูมิเดียวกัน อีกทั้งยังแสดงให้เห็นถึงลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์ซึ่งใช้บ่งบอกความเป็นสารนั้นในผลิตภัณฑ์สุดท้าย โดยการนำเม็ดหรือสารตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ ทำการชั่งน้ำหนักของสารตัวอย่างให้มีน้ำหนักไม่ต่ำกว่า 4 mg แต่ไม่เกิน 5 mg แล้วนำชิ้นตัวอย่างใส่ลงไปในภาชนะบรรจุ (Pan) ทำการอัดให้แน่นไม่ให้อากาศเข้าไปสู่ภายในได้ แล้วทำการทดสอบ



รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์

3.5.5 การทดสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope; OM) ชื่อทางการค้า LEICA ใช้สำหรับวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของวัสดุ และชิ้นงานหลังการทดสอบ ด้วยกำลังขยาย 100 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

3.5.6 การทดสอบสมบัติความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile Strength) มาตรฐานการทดสอบ ASTM D638 ด้วยเครื่อง Universal Materials Testing Machine รุ่น 0121 Model H50KS ดังแสดงในรูปที่ 3.8 โดยลักษณะชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบจะมีลักษณะเป็นดัมเบล โดยเตรียมชิ้นงานตามมาตรฐาน Type I มีความยาว 115 มิลลิเมตร กว้าง 13.5 มิลลิเมตร Gate length, (mm) 50 และความเร็วในการดึงชิ้นงานที่ 5 มิลลิเมตรต่อนาที โดยทำการทดสอบอย่างน้อย 10 ตัวอย่าง จากนั้นหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบสมบัติความแข็งแรงต่อแรงดึง

3.5.7 การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงที่ผิว (Peel Strength) Instron Machine Type 5966 R9474 ดังแสดงในรูปที่ 3.9 โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 เตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบโดยใส่แผ่นไว้ด้านหนึ่งของชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบเพื่อป้องกันการติดกันของผ้าไม่ถักไม่ทอและเนื้อเมตริกซ์ จะกำหนดความเร็วในการดึงชิ้นงานทดสอบที่ 5 มิลลิเมตรต่อนาที โดยใช้ Load 100N แล้วจึงทำการทดสอบอย่างน้อย 10 ตัวอย่าง



รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงที่ผิว

3.5.8 การทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดัดแบบ 3 จุด (Three-point bending) ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine Model H50KS ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ชั้นทดสอบกำหนดให้มีขนาดกว้าง 10.5 มิลลิเมตร ยาว 50 มิลลิเมตร หนา 4.16 มิลลิเมตร ความเร็วในการดึงขึ้นงานทดสอบที่ 5 มิลลิเมตรต่อนาที Support Span, (mm) 66.5 และ Position limit, (mm) 30 โดยใช้ Load 100N ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D790 ทำการทดสอบอย่างน้อย 10 ตัวอย่าง จากนั้นหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดัดแบบ 3 จุด

3.5.9 การทดสอบความต้านทานต่อการกระแทก (Izod Impact Testing) ด้วยเครื่อง CEST รุ่น 6542 Serial 8331 ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ใช้สำหรับการทนต่อแรงกระแทก ตามมาตรฐาน ASTM D 256 โดยก่อนทำการทดสอบนำชิ้นงานมาตัดให้ได้ขนาดตามมาตรฐาน กำหนดความยาวที่ 63.5 มิลลิเมตร ความหนาที่ 10.6 มิลลิเมตร เพื่อศึกษาลักษณะการแตกของวัสดุ โดยการตีขึ้นตัวอย่างทดสอบขนาดมาตรฐาน จนเกิดการแตกหัก ทำการทดสอบอย่างน้อย 10 ตัวอย่าง จากนั้นหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อการกระแทก

3.5.10 การทดสอบความแข็งที่ผิว (Rockwell Hardness) ด้วยเครื่อง Matsuzawa รุ่น DXT-1 ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ใช้สำหรับการทดสอบความแข็งที่ผิว ตามมาตรฐาน ASTM D785 โดยใช้ หัวกด HRL 1/4" Load 60 กดลงบนชิ้นงานทดสอบที่มีความหนา 6 mm.



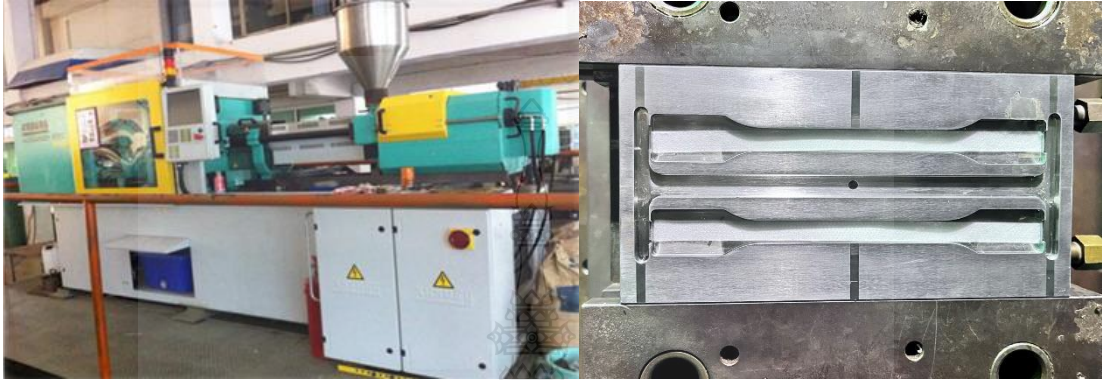
รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบความแข็งที่ผิว

3.5.5 ขึ้นรูปผ้าไม่ถักไม่ทอด้วยเครื่องอัดรีด Thermo HAAKE® PolyDrive (Single Screw Extruder) พร้อมเครื่องฟั่นเส้นใยและสายพานในการเก็บผ้าจากกระบวนการ Spunbonded ดังแสดงในรูปที่ 3.13 ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 230 °C (Zone Extruder) Melt Pump ที่ 14 รอบต่อนาที ปรับแรงดันหัวฟั่นเส้นใย (Drawing Jet Pressure) ที่ 10 psi และความเร็วสายพานรองรับ (Belt Speed) คงที่ที่ 2 m/min



รูปที่ 3.13 เครื่องอัดรีด (Thermo HAAKE® PolyDrive)

3.5.6 ชิ้นรูปพอลิเมอร์เชิงประกอบด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection Molding, ARBURG 470 C) แม่พิมพ์ (Mold) แบบรอยเชื่อมประสาน (Weld Line) ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ชิ้นรูปพอลิเมอร์เชิงประกอบด้วยเทคนิคการแทรกสิ่งทอในกระบวนการฉีด : (Insert-Injection Molding) อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป 150-210 °C จาก Feed Zone ถึง Nozzle ตามลำดับ โดยขึ้นรูปภายใต้สภาวะที่กำหนด



รูปที่ 3.14 เครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection Molding, ARBURG 470 C) แม่พิมพ์ (Mold) แบบรอยเชื่อมประสาน (Weld Line)



บทที่ 4

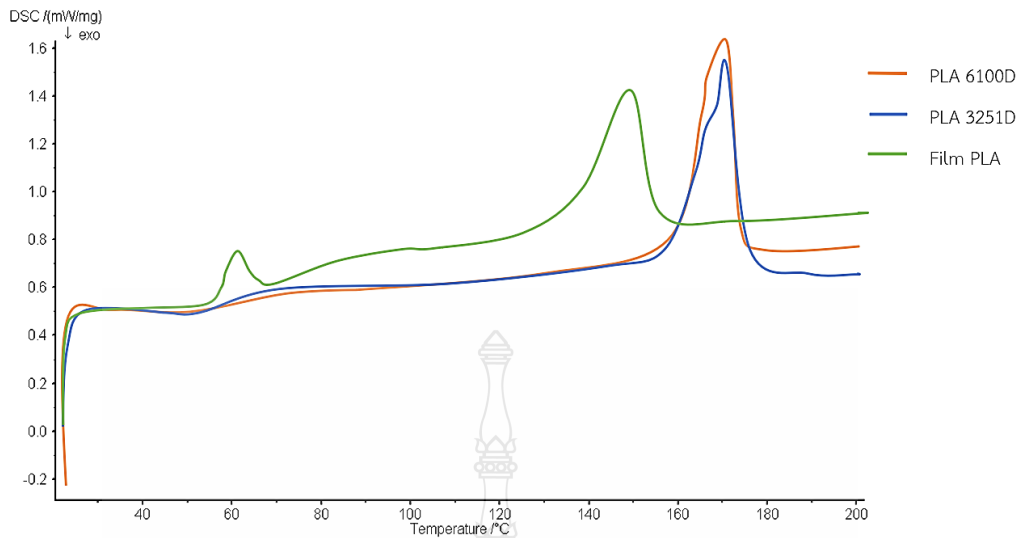
ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากำเนิดขึ้นรูปพอลิเมอร์เชิงประกอบด้วยกระบวนการฉีดที่ถูกระดมแรงด้วยผ้าไม่ถักไม่ทอด้วยเทคนิคแบบสปันบอนด์ (Spunbond) และพอลิเมอร์เชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยแผ่นฟิล์ม ซึ่งชิ้นงานทั้งหมดทำจากพอลิเมอร์ชนิดเดียวกัน โดยวัสดุทั้งหมดที่ใช้ในการขึ้นรูปนั้นเป็น PLA ทั้งส่วนที่เสริมแรงและส่วนที่เป็นเมทริกซ์ โดยกระบวนการขึ้นรูปนั้นจะใช้เทคนิคการฉีดขึ้นรูปแบบแทรก (Insert-Injection Molding) แล้วทำการฉีดเข้ายังแม่พิมพ์ที่มีทางเข้าของเนื้อพลาสติก 2 ทาง ซึ่งกระบวนการนี้จะถูกควบคุมให้อยู่ภายใต้สภาวะเดียวกันทั้งหมด เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพ การปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของพอลิเมอร์เชิงประกอบที่ถูกระดมแรงด้วยผ้าไม่ถักไม่ทอ และแบบเสริมแรงด้วยแผ่นฟิล์ม เพื่อเปรียบเทียบกับแบบที่ไม่มีการเสริมแรงในกระบวนการฉีด แล้วนำพอลิเมอร์เชิงประกอบที่ได้จากการขึ้นรูป มาศึกษาและเปรียบเทียบคุณสมบัติบางประการเพื่อใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงให้ดีขึ้น อาทิเช่น คุณสมบัติทางกล การทนต่อแรงดึง และการทนต่อแรงกระแทก เป็นต้น อีกทั้งยังเป็นทางเลือกเพื่อใช้ในการทดแทนวัสดุที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพแบบไม่มีการเสริมแรงได้อีกด้วย

4.1 การทดสอบอัตรลักษณ์ของวัสดุ

4.1.1 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน

การทดสอบสมบัติทางความร้อน ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimetry : DSC) แสดงถึงสมบัติการนำความร้อนของพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid; PLA) เกรดทางการค้าที่ใช้ในการขึ้นรูปผ้าไม่ถักไม่ทอด้วยเทคนิคแบบสปันบอนด์ (spunbond) PLA 6100D พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid; PLA) เกรดทางการค้าที่ใช้ในการขึ้นรูปพอลิเมอร์เชิงประกอบในกระบวนการฉีด PLA 3251D และแผ่นฟิล์มที่ขึ้นรูปจากพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid; PLA) PLA 2003D



รูปที่ 4.1 แสดงผลทางความร้อนของพอลิเมอร์สามชนิดด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimetry : DSC)

จากผลการทดสอบของพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid; PLA) ทั้ง 3 ชนิด แสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งประกอบด้วย พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid; PLA) ที่ใช้ในการขึ้นรูปผ้าไม่ถักไม่ทอด้วยเทคนิคสปันบอนด์ (spunbond) PLA 6100D พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid; PLA) ที่ใช้ในการขึ้นรูปพอลิเมอร์เชิงประกอบในกระบวนการฉีด PLA 3251D และแผ่นฟิล์มที่ได้จากขึ้นรูปของพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid; PLA) PLA 2003D ซึ่งพบว่าพอลิเมอร์ทั้งสาม มีอุณหภูมิหลอมเหลวใกล้เคียงกัน โดยพอลิแลคติกแอซิดที่ใช้ขึ้นรูปผ้าไม่ถักไม่ทออุณหภูมิอยู่ที่ 169°C เกรดที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูป 170°C และแผ่นฟิล์ม 151°C

4.1.2 ผลการทดสอบดัชนีการไหลของเม็ดพอลิเมอร์

จากการทดสอบการวัดดัชนีการไหลของเม็ดพอลิเมอร์ ตามมาตรฐาน ASTM 1238 จากการทดสอบเมื่อเปรียบเทียบดัชนีการไหลของเม็ดพอลิเมอร์เกรดทางการค้า PLA 6100D และ PLA 3251D ที่อุณหภูมิ 210°C โดยใช้น้ำหนักกดที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ 2.16 กิโลกรัม ดังแสดงในตารางที่ 4.1 เมื่อนำค่าดัชนีการไหลของพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid; PLA) มาเปรียบเทียบกับระหว่าง PLA 6100D กับ PLA 3251D ที่สภาวะเดียวกัน พบว่า PLA 3251D มีค่าดัชนีการไหลที่สูงกว่า PLA 6100D ซึ่งนั่นแสดงให้เห็นถึงอัตราการไหลของพอลิเมอร์ PLA 3251D ที่มีอัตราการไหลที่ดีกว่า เนื่องจาก PLA 3251D มีความหนืดที่ต่ำกว่า PLA 6100D ซึ่งสอดคล้องกับเอกสารประกอบ (Datasheet) นั้นแสดงให้เห็นถึงอัตราการไหลและสมบัติของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่มีผลต่อการขึ้นรูป

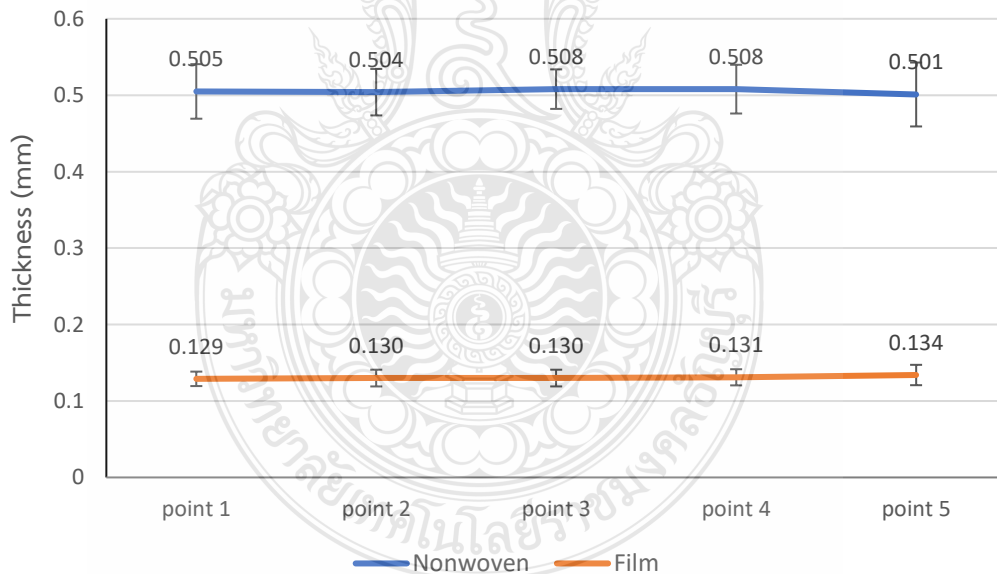
ตารางที่ 4.1 แสดงผลดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ PLA 6100D และ PLA 32551D

Materials	Melt Flow Index (g/10min)
PLA 6100D	21.95
PLA 3251D	73.56

4.2 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

4.2.1 ผลการทดสอบการวัดความหนา (Thickness)

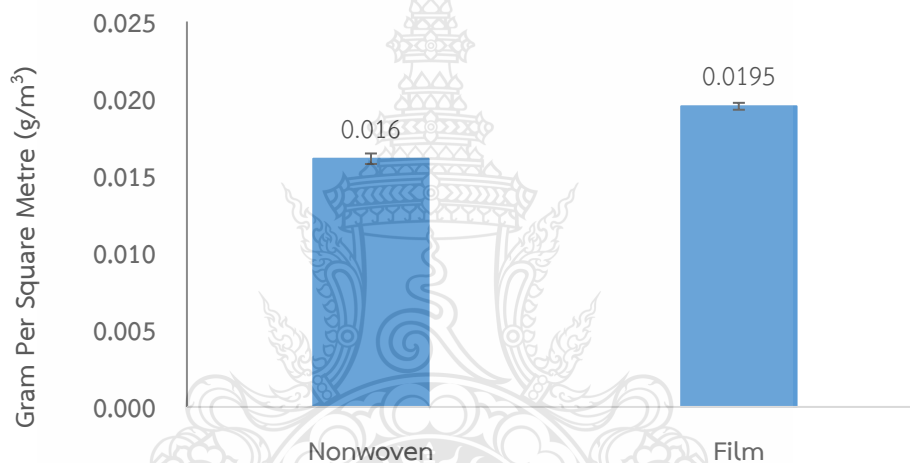
ผลการวัดความหนาด้วยเครื่อง Thickness Gauge โดยวัดการกระจายความหนาเฉลี่ยกันทั้งหมด 5 จุด ทั้งแบบผ้าไม่ถักไม่ทอและแผ่นฟิล์มที่ขึ้นรูปจาก PLA สังเกตได้ จากรูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของผ้าไม่ถักไม่ทอกับแผ่นฟิล์ม พบว่าการวัดความหนาของผ้าไม่ถักไม่ทอนั้นมีความหนาเฉลี่ยของแต่ละจุดอยู่ที่ 0.505 ,0.504 ,0.508 และ 0.501 ตามลำดับ ใน ส่วนของแผ่นฟิล์มนั้นมีความหนาเฉลี่ยอยู่ที่ 0.129 ,0.130 ,0.130 ,0.131 และ 0.134 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบความหนาระหว่างผ้าไม่ถักไม่ทอกับแผ่นฟิล์มที่ขึ้นรูปจาก PLA นั้น ผ้าไม่ถักไม่ทอมีความหนากว่าประมาณ 5 เท่า เมื่อเทียบกับแผ่นฟิล์ม



รูปที่ 4.2 กราฟเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของผ้าไม่ถักไม่ทอกับแผ่นฟิล์ม

4.2.2 ผลการทดสอบวัดความหนาและน้ำหนักมาตรฐาน (Gram Per Square Metre)

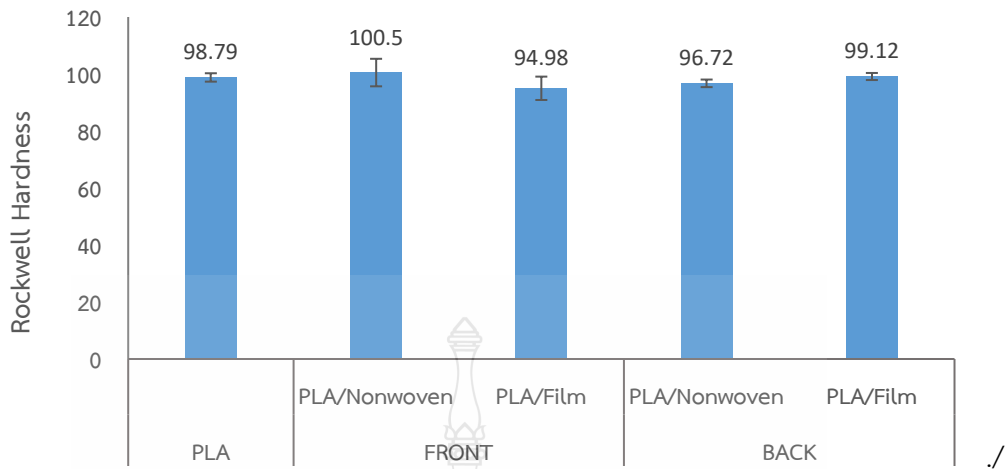
จากการทดสอบทำการตัดชิ้นงานผ้าไม่ถักไม่ทอและแผ่นฟิล์มให้ได้ขนาด 1x1 เซนติเมตร นำมาวัดความหนาด้วยเครื่อง Thickness Gauge แล้วชั่งน้ำหนัก ผลการทดสอบวัดความหนาและน้ำหนักมาตรฐานดังแสดงในรูปที่ 4.3 กราฟแท่งแสดงผลการวัดความหนาและน้ำหนักมาตรฐาน พบว่าผลการทดสอบค่าน้ำหนักต่อพื้นที่เฉลี่ยของแผ่นฟิล์มอยู่ที่ 0.0195 และของผ้าไม่ถักไม่ทอเฉลี่ยอยู่ที่ 0.0161 ซึ่งผลทดสอบแสดงให้เห็นถึงค่าเฉลี่ยน้ำหนักต่อพื้นที่ของฟิล์มมีค่าสูงกว่าผ้าไม่ถักไม่ทอ เนื่องจากผ้าไม่ถักไม่ทอมีเส้นใยที่กระจายตัวกันอยู่อย่างอิสระ มีการจัดเรียงตัวกับแบบหลวมๆทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเส้นใยจึงทำให้มีน้ำหนักที่น้อยกว่า ความหนาแน่นต่อพื้นที่จึงต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นฟิล์มที่มีการจัดเรียงตัวในทิศทางที่แน่นอนตามแนวการขึ้นรูปและมีความเป็นเนื้อเดียวกัน



รูปที่ 4.3 กราฟแท่งแสดงผลการวัดความหนาและน้ำหนักมาตรฐาน

4.2.3 ผลการทดสอบการวัดความแข็งที่ผิว (Rockwell Hardness)

จากการทดสอบการวัดความแข็งที่ผิว (Rockwell Hardness) ตามมาตรฐาน ASTM D785 จากรูปที่ 4.4 กราฟแท่งแสดงผลการทดสอบการวัดค่าความแข็งที่ผิว ทั้งแบบที่เสริมแรงด้วยผ้าไม่ถักไม่ทอและเสริมแรงด้วยแผ่นฟิล์ม การทดสอบนี้เป็นการทดสอบที่กดลงบนผิวของชิ้นงานโดยตรง ผลการทดสอบจึงแสดงให้เห็นว่า PLA ที่ไม่มีการเสริมแรง แสดงค่าการทดสอบความแข็งที่ผิวอยู่ที่ 98.76 นั้นแสดงให้เห็นว่าไม่มีการเกิดผลึกขึ้นที่บริเวณรอยเชื่อมประสาน ซึ่งยืนยันได้ว่าไม่เกิดการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันที่บริเวณรอยประสาน จากผลการทดสอบกำลังแสดงถึงวัสดุเสริมแรงและเนื้อพอลิเมอร์ (matrix) นั้นเกิดการรวมกันอยู่เพียงแค่ว่าบางส่วนเท่านั้น ซึ่งเมื่อเทียบกับการทดสอบด้านของผ้าไม่ถักไม่ทอนั้นมีค่าความแข็งอยู่ที่ 100.5 ซึ่งมากกว่า PLA ที่ไม่มีการเสริมแรงไม่มากนัก เนื่องจากการทดสอบได้กดสัมผัสลงบนตัวของเส้นใยซึ่งทำให้ถูกสัมผัสกับเส้นใยที่มีจัดเรียงตัวกันอย่างอิสระ ขนาดและความหนาของเส้นใยมีความเป็นผลึก และเส้นใยที่มีการทับซ้อนกันไปมา

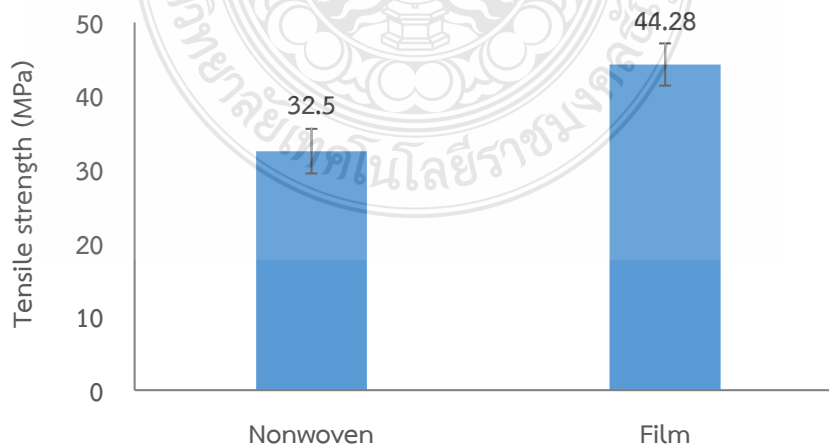


รูปที่ 4.4 กราฟแท่งแสดงผลการทดสอบการวัดค่าความแข็งที่ผิว (Rockwell Hardness)

4.3 การทดสอบสมบัติทางกลของพอลิเมอร์เชิงประกอบ

4.3.1 ผลการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของวัสดุเสริมแรง (Tensile Strength)

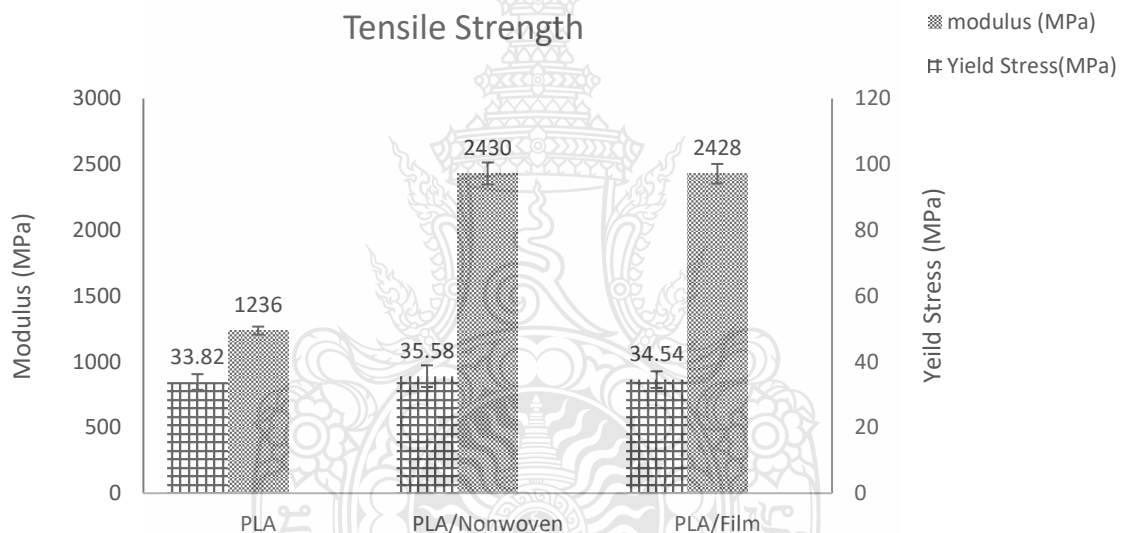
ผลการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของวัสดุเสริมแรง แผ่นฟิล์มและผ้าไม่ถักไม่ทอ จาก PLA จากรูปที่ 4.5 กราฟแท่งแสดงผลให้เห็นว่า ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มเท่ากับ 44.28 MPa ผ้าไม่ถักไม่ทอเท่ากับ 32.5 MPa พบว่าค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มสูงกว่าผ้าไม่ถักไม่ทอ เนื่องจากเส้นใยที่ใช้ในการขึ้นรูปของผ้าไม่ถักไม่ทอนั้นมีการทับกันไปมาเป็นชั้นๆ มีทิศทางการจัดเรียงตัวแบบอิสระ จึงทำให้เกิดความหนาและฟูกว่า แผ่นฟิล์มจึงมีความแข็งแรงกว่าเพราะแผ่นฟิล์มมีการจัดเรียงตัวในทิศทางที่แน่นอนตามแนวการขึ้นรูป และเป็นเนื้อเดียวกัน ฉะนั้นแผ่นฟิล์มที่มีความบางกว่าจึงมีความแข็งแรงกว่า



รูปที่ 4.5 กราฟแท่งแสดงผลการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของวัสดุเสริมแรง (Tensile Strength)

4.3.2 ผลการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile Strength)

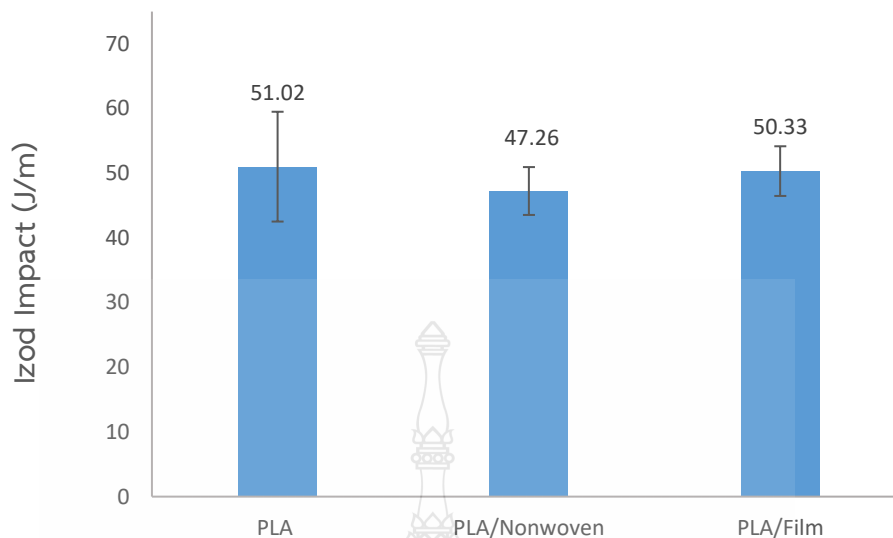
จากการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile Strength) ตามมาตรฐาน ASTM D638 จากรูปที่ 4.6 กราฟแท่งแสดงผลการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงระหว่างพอลิเมอร์เชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผ้าไม่ถักไม่ทอและแผ่นฟิล์ม เมื่อเทียบกับ PLA ที่ไม่มีการเสริมแรง พบว่าผลการทดสอบของ PLA ที่ไม่มีการเสริมแรง แผ่นฟิล์มและผ้าไม่ถักไม่ทอมีความแข็งแรงใกล้เคียงกัน ซึ่งหมายความว่าความสามารถในการรับแรงได้ที่ไม่แตกต่างกัน อาจมองได้ว่าการใส่วัสดุเสริมแรงทั้งแผ่นฟิล์มและผ้าไม่ถักไม่ทอที่ขึ้นรูปจาก PLA นั้น ไม่ได้ช่วยในเรื่องของการเสริมแรงมากนัก แต่ในส่วนของคุณสมบัติที่มีค่าแตกต่างกัน โดย PLA ที่เสริมแรงด้วยผ้าไม่ถักไม่ทอและแผ่นฟิล์มมีค่ามอดูลัสอยู่ที่ 2430 MPa และ 2428 MPa ตามลำดับ ซึ่งแสดงค่ามอดูลัสที่สูงกว่า PLA ที่ไม่มีการเสริมแรงคิดเป็นร้อยละ 96.6 จากผลการทดสอบนี้สรุปได้ว่า การใส่วัสดุเสริมแรงนั้นเพียงแต่ช่วยในเรื่องของการคงรูป (Modulus) เท่านั้น



รูปที่ 4.6 กราฟแท่งแสดงผลการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile Strength)

4.3.3 ผลการทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก (Izod Impact)

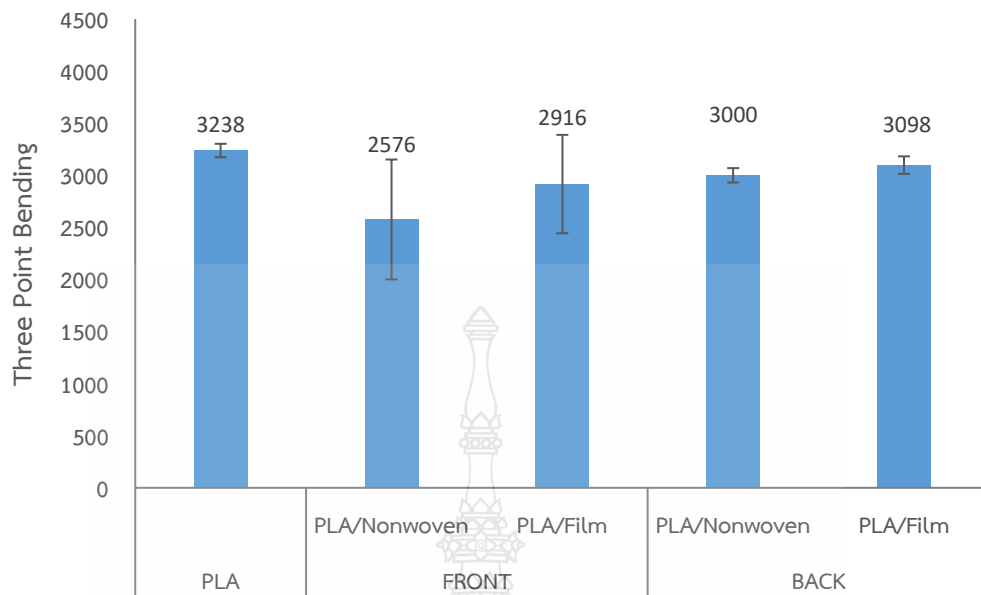
จากผลการทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์เชิงประกอบแบบเสริมแรงด้วยแผ่นฟิล์ม ผ้าไม่ถักไม่ทอ และแบบที่ไม่เสริมแรง ซึ่งการทดสอบนี้เป็นการรับแรงแบบฉับพลัน และรับแรงในแนวความหนาของชิ้นงานทดสอบ จากผลการทดสอบที่แสดงในรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นผลการทดสอบที่มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งส่งผลมาจากความหนาของชิ้นงาน วัสดุเสริมแรงส่งผลค่อนข้างน้อย เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการเสริมแรงเป็นวัสดุชนิดเดียวกันกับเนื้อแม่ทริกซ์ อีกทั้งวัสดุที่ใช้ในการเสริมแรงนั้นมีความบางมากจึงทำให้เมื่อขึ้นรูปชิ้นงานมีลักษณะความหนาที่แตกต่างกันค่อนข้างน้อย ฉะนั้นเมื่อเทียบกับ PLA ที่ไม่มีการเสริมแรงจึงมีค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนัก คือ 51.002 J/m, 41.256 J/m และ 50.330 J/m ตามลำดับ ผลจากการรับแรงกระทำด้านข้างใกล้เคียงกันทุกกรณี



รูปที่ 4.7 กราฟแท่งแสดงผลการทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก (Izod Impact)

4.3.4 ผลการทดสอบความแข็งแรงต่อการดัดแบบ 3 จุด (Three Point Bending)

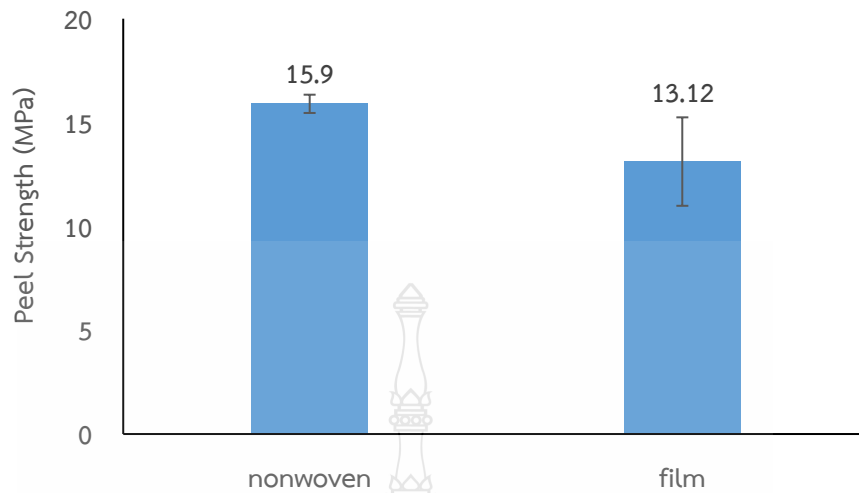
จากการทดสอบความแข็งแรงต่อการดัดแบบ 3 จุด ของพอลิเมอร์เชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยแผ่นฟิล์มและผ้าไม่ถักไม่ทอ โดยการทดสอบการดัดแบบ 3 จุดนี้จะแบ่งผลการทดสอบออกเป็นสองส่วนหลักๆคือ ส่วนรับแรงดัดจากด้านหน้าของวัสดุเสริมแรง และอีกส่วนจะรับแรงดัดจากด้านหลังหรือด้านเนื้อแมทริกซ์ของวัสดุเสริมแรง ซึ่งทั้งสองส่วนแสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 4.8 จากกราฟแสดงให้เห็นผลในส่วนของการรับแรงดัดจากด้านหลังหรือด้านเนื้อแมทริกซ์ของวัสดุเสริมแรงพบว่าผลการทดสอบออกมาไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อเทียบกับ PLA ที่ไม่มีการเสริมแรง เนื่องจากวัสดุเสริมแรงทั้ง 2 ชนิด อยู่อีกด้านของส่วนรับแรง แต่หากมองในส่วนที่รับแรงดัดจากด้านหน้าของวัสดุเสริมแรงแผ่นฟิล์ม พบว่าแผ่นฟิล์มมีการรับแรงได้สูงกว่าผ้าไม่ถักไม่ทอคิดเป็นร้อยละ 13.2 เนื่องจากแผ่นฟิล์มมีความสามารถในการรับแรงได้สูงกว่าซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของวัสดุเสริมแรง ที่แผ่นฟิล์มมีค่าการรับแรงได้มากกว่า หากเทียบกับผ้าไม่ถักไม่ทอซึ่งได้แสดงค่าความแข็งแรงต่อการดัดต่ำสุดที่ 2576 MPa เนื่องจากปริมาณของเส้นใยที่ใช้ในการเสริมแรงต่ำ มีการยึดเกาะระหว่างผิวสัมผัสอ่อนแอ วัสดุที่ใช้เสริมแรงมีความบางจึงทำให้ปริมาณเนื้อแมทริกซ์ไม่เท่ากัน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Mojdeh Reghat และคณะ [32]



รูปที่ 4.8 กราฟแท่งแสดงผลการทดสอบความแข็งแรงต่อการดัดแบบ 3 จุด (Three Point Bending)

4.3.5 ผลการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงที่ผิว (Peel Strength)

จากผลการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงที่ผิวของพอลิเมอร์เชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผ้าไม้อัดไม้ทอและแผ่นฟิล์มที่ขึ้นรูปจาก PLA ทั้งคู่ ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.9 จากผลพบว่าผ้าไม้อัดไม้ทอมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงที่ผิวสูงกว่า 15.9 MPa และแผ่นฟิล์มมีค่าเท่ากับ 13.12 MPa เมื่อเทียบกันจึงพบว่าผ้าไม้อัดไม้ทอมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงที่ผิวสูงกว่าแผ่นฟิล์มคิดเป็นร้อยละ 21.2 เนื่องจากผ้าไม้อัดไม้ทอมีความเป็นรูพรุนและความเป็นเส้นใยสูง การจัดเรียงตัวของเส้นใยเป็นไปอย่างอิสระและทับซ้อนกันไปมาเป็นชั้นๆ เมื่อทำการขึ้นรูปจึงทำให้เนื้อแมทริกซ์แทรกเข้าไปยังในตัวผ้าไม้อัดไม้ทอได้ดีกว่าซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบทางสัณฐานวิทยา ผ้าไม้อัดไม้ทอจึงแสดงค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงที่ผิวสูงกว่าแผ่นฟิล์ม ในขณะที่แผ่นฟิล์มมีความเรียบ ไม่มีช่องว่าง มีทิศทางการจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกัน ส่งผลให้การยึดเกาะกันระหว่างเนื้อแมทริกซ์และแผ่นฟิล์มจะยึดกันเฉพาะผิวสัมผัสของแผ่นฟิล์มเท่านั้น และไม่มีช่องว่างให้เนื้อแมทริกซ์แทรกเข้าไปในชั้นฟิล์มได้



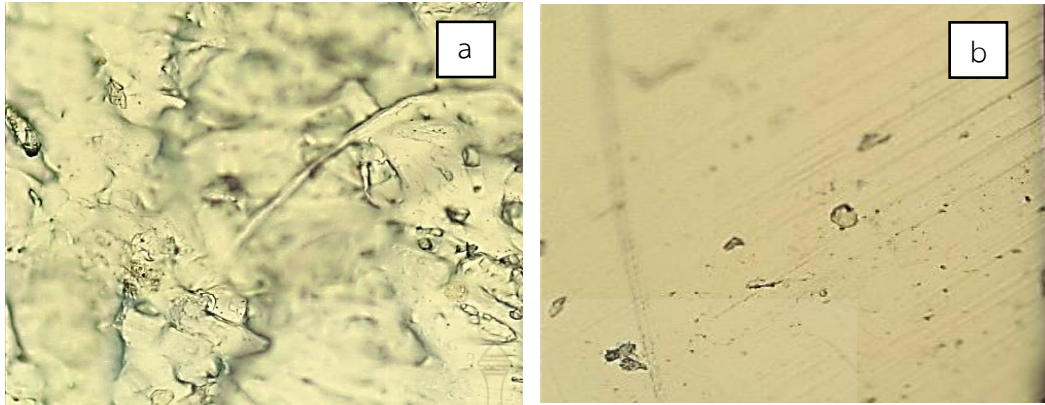
รูปที่ 4.9 กราฟแท่งแสดงผลการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงที่ผิว (Peel Strength)

4.4 ผลการทดสอบสมบัติทางสัณฐานวิทยา

4.4.1 ผลการทดสอบทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เชิงประกอบ

ผลการทดสอบทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผ้าไม่ถักไม่ทอ และแบบเสริมแรงด้วยแผ่นฟิล์ม โดยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM) กำลังขยายที่ 100 เท่า แสดงถึงการยึดติดกันระหว่างวัสดุเสริมแรงและเนื้อพอลิเมอร์

จากรูปที่ 4.10 ของพอลิเมอร์เชิงประกอบที่เสริมแรงผ้าไม่ถักไม่ทอได้แสดงถึงการยึดติดกันระหว่างผ้าไม่ถักไม่ทอกับเนื้อพอลิเมอร์ โดยภาพแสดงให้เห็นถึงลักษณะของผิวเนื้อพอลิเมอร์หลังถูกการดึงผ้าไม่ถักไม่ทอออก ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (a) พบว่าลักษณะของผิวพอลิเมอร์หลังถูกดึงผ้าไม่ถักไม่ทอออกนั้นมีลักษณะผิวขรุขระ ไม่เรียบ บางจุดมีลักษณะคล้ายแนวของเส้นใย ซึ่งเกิดจากการขึ้นรูปของผ้าไม่ถักไม่ทอที่มีลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยอิสระ ไร้ทิศทาง เส้นใยเกิดการพับซ้อนกันไปมาเป็นชั้นๆ จึงส่งผลให้มีผิวสัมผัสที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับแผ่นฟิล์ม ทำให้เส้นใยส่วนบริเวณชั้นนอกสุดเมื่อสัมผัสกับเนื้อพอลิเมอร์โดยตรงจึงเกิดการหลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ในส่วนของพอลิเมอร์เชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยแผ่นฟิล์ม แสดงถึงการยึดติดกันระหว่างแผ่นฟิล์มและเนื้อพอลิเมอร์โดยภาพจะแสดงให้เห็นถึงลักษณะของผิวหลังถูกการดึงลอกออกหลังจากการทดสอบ ดังรูปที่ 4.10 (b) พบว่าลักษณะของผิวเนื้อพอลิเมอร์หลังถูกดึงออกมีลักษณะเรียบสม่ำเสมอ มีความนิ่ม และมีแนวเส้นที่ปรากฏบนผิวของเนื้อพอลิเมอร์ซึ่งเป็นแนวเดียวกับแนวการจัดเรียงตัวของแผ่นฟิล์มที่ใช้เป็นวัสดุเสริมแรง เนื่องจากแผ่นฟิล์มมีผิวสัมผัสที่ต่ำกว่า และด้วยลักษณะผิวของแผ่นฟิล์มที่มีความเรียบ ซึ่งเมื่อทำการขึ้นรูปพอลิเมอร์เชิงประกอบจึงส่งผลให้เนื้อพอลิเมอร์มีการสัมผัสกับผิวของแผ่นฟิล์มได้ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผ้าไม่ถักไม่ทอ



รูปที่ 4.10 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM) กำลังขยายที่ 100 เท่า
a. พื้นผิวพอลิเมอร์เชิงประกอบเสริมแรงด้วยผ้าไม้ถักไม้ทอ หลังถูกดึงแผ่นผ้าออก
b. พื้นผิวพอลิเมอร์เชิงประกอบเสริมแรงด้วยแผ่นฟิล์ม หลังถูกดึงแผ่นฟิล์มออก



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการขึ้นรูปพอลิเมอร์เชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยแผ่นฟิล์มและผ้าไม่ถักไม่ทอ ซึ่งวัสดุเสริมแรงและเนื้อพอลิเมอร์หลักเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน ด้วยกระบวนการแทรกสิ่งทอในงานฉีดขึ้นรูป โดยใช้แม่ที่มีทางเข้าของเนื้อพลาสติก 2 ทิศทาง เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพของวัสดุเสริมแรงปรับปรุงสมบัติทางกล แล้วนำวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยแผ่นฟิล์มหรือผ้าไม่ถักไม่ทอนำมาเปรียบเทียบกับคุณสมบัติบางประการเพื่อใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid; PLA) ในรูปแบบการขึ้นรูปลักษณะของพอลิเมอร์เชิงประกอบชีวภาพที่ทำจากวัสดุที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพทั้งตัวเมทริกซ์หลักและตัวที่ใช้เสริมแรงเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน ซึ่งนั้นจะส่งผลดีต่อการนำชิ้นงานที่ขึ้นรูป ได้กลับไปรีไซเคิล และยังใช้งานเป็นวัสดุเสริมแรงในด้านต่าง ๆ โดยผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 ผลการทดสอบอัตลักษณ์ของวัสดุ

จากผลการทดสอบอัตลักษณ์ของวัสดุเป็นการทดสอบเพื่อยืนยันชนิดและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทำวิจัย โดยผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปเพื่อทำงานวิจัย ประกอบด้วยแผ่นฟิล์ม ผ้าไม่ถักไม่ทอ และเนื้อเมทริกซ์ที่ใช้ในกระบวนการฉีด พบว่าเมื่อทำการทดสอบสมบัติทางความร้อนวัสดุทั้ง 3 ชนิด ล้วนเป็นวัสดุเดียวกันคือ PLA โดยวัสดุทั้ง 3 มีจุดหลอมเหลวที่ใกล้เคียงกัน และทำการทดสอบดัชนีการไหลพบว่า มีค่าใกล้เคียงกับเอกสารประกอบการค้าว่าเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน

5.2 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพ

จากผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์เชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยแผ่นฟิล์มและผ้าไม่ถักไม่ทอ โดยการทดสอบการวัดความหนาของวัสดุที่ใช้เสริมแรง แผ่นฟิล์มและผ้าไม่ถักไม่ทอนั้นพบว่า ผ้าไม่ถักไม่ทอมีความหนากว่าประมาณ 5 เท่า เมื่อเทียบกับแผ่นฟิล์ม ในส่วนการทดสอบการหาค่าแรงต่อพื้นที่ของผ้าไม่ถักไม่ทอและแผ่นฟิล์ม พบว่าค่าเฉลี่ยของแผ่นฟิล์มมีค่าสูงกว่าผ้าไม่ถักไม่ทอ เนื่องจากเส้นใยของผ้าไม่ถักไม่ทอมีการกระจายตัวอย่างอิสระ ขณะที่แผ่นฟิล์มมีการจัดเรียงตัวในทิศทางที่แน่นอนตามแนวการขึ้นรูปและมีความเป็นเนื้อเดียวกัน และในส่วนของการทดสอบการวัดความแข็งที่ผิวของ PLA ที่ไม่มีการเสริมแรง เทียบกับวัสดุเสริมแรงด้วยแผ่นฟิล์มและผ้าไม่ถักไม่ทอพบว่าค่าความแข็งของผ้าไม่ถักไม่ทอสูงกว่า PLA ที่ไม่มีการเสริมแรงไม่มากนัก

5.3 ผลการทดสอบสมบัติทางกล

จากผลการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของของวัสดุเสริมแรง แผ่นฟิล์มและผ้าไม่ถักไม่ทอ ที่ขึ้นรูปจาก PLA ทั้ง 2 ชนิด พบว่าแผ่นฟิล์มมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงกว่าผ้าไม่ถักไม่ทอ เนื่องจากการจัดเรียงตัวเส้นใยในผ้าไม่ถักไม่ทอมีการจัดเรียงตัวแตกต่างกับแผ่นฟิล์มจึงมีความแข็งแรงกว่า

จากผลทดสอบความความแข็งแรงของพอลิเมอร์เชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยแผ่นฟิล์มและผ้าไม่ถักไม่ทอ โดยผลความแข็งแรงต่อแรงดึงพบว่า พอลิเมอร์เชิงประกอบในทุกกรณีแสดงค่ามอดูลัสสูงกว่า PLA ที่ไม่มีการเสริมแรงคิดเป็นร้อยละ 96.6 แต่อาจไม่ช่วยในเรื่องของการรับแรงในแนวตั้งซึ่งผลการทดสอบมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ส่วนผลการทนต่อแรงกระแทก ซึ่งเป็นการรับแรงแบบฉับพลันในแนวความหนาของชิ้นงาน พบว่าแสดงค่าการทดสอบออกมามากต่างกันมากนั้ก เนื่องจากการรับแรงด้านข้างซึ่งวัสดุเสริมแรงมีความบางสอดคล้องกับผลความหนาของวัสดุเสริมแรง ส่วนของผลความแข็งแรงต่อแรงดัดแบบ 3 จุด พบว่าในส่วนของการรับแรงจากด้านหน้าของวัสดุเสริมแรง แผ่นฟิล์มมีการรับแรงได้สูงกว่าผ้าไม่ถักไม่ทอคิดเป็นร้อยละ 13.2 ซึ่งสอดคล้องกับผลความแข็งแรงของวัสดุเสริมแรง และในส่วนผลการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงที่ผิว พบว่าผ้าไม่ถักไม่ทอมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงที่ผิวสูงกว่าแผ่นฟิล์มคิดเป็นร้อยละ 21.2 ซึ่งสังเกตได้จากภาพถ่ายทางสัณฐานวิทยา

5.4 ผลการทดสอบสมบัติทางสัณฐานวิทยา

จากภาพแสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ที่เสริมแรงด้วยแผ่นฟิล์ม แสดงให้เห็นถึงลักษณะของผิวพอลิเมอร์หลังผ่านการดึงแผ่นฟิล์มออกนั้นแสดงให้เห็นถึงความเรียบ และรอยแนวจัดเรียงตัวของแผ่นฟิล์ม ส่วนของผ้าไม่ถักไม่ทอหลังผ่านการดึงผ้าออกสังเกตเห็นได้ว่าผิวมีลักษณะขรุขระ ไม่เรียบตามลักษณะการหลอมของเส้นใย ซึ่งส่งผลต่อการแสดงค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงที่ผิว

5.5 ข้อเสนอแนะ

5.5.1 หากต้องการนำงานวิจัยนี้ศึกษาในเรื่องของพอลิเมอร์เชิงประกอบควรมีการพิจารณาในเรื่องของวัสดุ และความหนาของวัสดุที่ใช้ในการเสริมแรงให้มีความหนาเพิ่มมากขึ้น และควรศึกษาเพิ่มเติมเรื่องความหนาของวัสดุเสริมแรงที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับความหนาของชิ้นงาน

5.5.2 ควรศึกษาในเรื่องของการปรับตั้งพารามิเตอร์ให้เหมาะสมในกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบแทรก เพื่อให้ได้พอลิเมอร์เชิงประกอบที่มีความเข้ากันได้กับวัสดุเสริมแรงอย่างดีเยี่ยม

บรรณานุกรม

- [1] R. Scaffaro, A. Maio, E. F. Gulino, and B. Megna, 'Structure-property relationship of PLA-Opuntia Ficus Indica biocomposites', **Compos. Part B Eng.**, 2019 (167), pp. 199–206, doi:10.1016/j.compositesb.2018.12.025
- [2] enchemcom1po. (2012). **POLYMER | COMPUTER ENGINEERING 05**. Retrieved from <https://enchemcom1po.wordpress.com/> (accessed Feb. 21, 2023).
- [3] K. M. Nampoothiri, N. R. Nair, and R. P. John, 'An overview of the recent developments in polylactide (PLA) research', **Bioresour. Technol.**, 2010 (101), no. 22, pp. 8493–8501. doi: 10.1016/j.biortech.2010.05.092
- [4] O. Avinc and A. Khoddami, 'Overview of poly (lactic acid)(PLA) fibre: Part I: production, properties, performance, environmental impact, and end-use applications of poly (lactic acid) fibres', **Fibre Chem.**, 2009 (41), no. 6, pp. 391–401, Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1007/s10692-010-9213-z>
- [5] บทที่ 4 รายละเอียดข้อมูลพลาสติกชีวภาพประเภทพอลิแลคติกแอซิด (Poly(Lactic Acid)), สืบค้นจาก http://asp.plastics.or.th:8001/files/article_file/20180624235102u.pdf
- [6] R. Scaffaro, F. Lopresti, and L. Botta, 'PLA based biocomposites reinforced with Posidonia oceanica leaves', **Compos. Part B Eng.**, 2018 (139), pp. 1–11, doi: 10.1016/j.compositesb.2017.11.048
- [7] R. Scaffaro, A. Maio, E. F. Gulino, and G. Pitarresi, 'Lignocellulosic fillers and graphene nanoplatelets as hybrid reinforcement for polylactic acid: Effect on mechanical properties and degradability', **Compos. Sci. Technol.**, 2020 (190), p. 108008, doi:10.1016/j.compscitech.2020.108008
- [8] A. Bher, I. U. Unalan, R. Auras, M. Rubino, and C. E. Schvezov, 'Graphene modifies the biodegradation of poly (lactic acid)-thermoplastic cassava starch reactive blend films', **Polym. Degrad. Stab.**, 2019 (164), pp. 187–197, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2019.04.014
- [9] R. Gunti, A. v. Ratna Prasad, and A. v. s. s. k. s. Gupta, 'Mechanical and degradation properties of natural fiber-reinforced PLA composites: Jute, sisal, and elephant grass', **Polym. Compos.**, 2018 (39), no. 4, pp. 1125–1136, doi:10.1002/pc.24041.
- [10] H. S. S. Shekar and M. Ramachandra, 'Green Composites: A Review', **Mater. Today Proc.**, 2018 (5), no. 1, Part 3, pp. 2518–2526, doi:10.1016/j.matpr.2017.11.034.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [11] ผศ.ดร.สุภาสินี ลิ้มปานานภาพ ชีท, **คอมโพสิต**,. สืบค้นจาก <https://www.yumpu.com/fr/document/read/48945252/10>.
- [12] Y. W. Leong, S. Thitithanasarn, K. Yamada, and H. Hamada, '8 - Compression and injection molding techniques for natural fiber composites', in *Natural Fibre Composites*, A. Hodzic and R. Shanks, Eds., **Woodhead Publishing, 2014**, pp. 216–232. doi:10.1533/9780857099228.2.216.
- [13] J. Wang, Q. Mao, N. Jiang, and J. Chen, 'Effects of Injection Molding Parameters on Properties of Insert-Injection Molded Polypropylene Single-Polymer Composites', **Polymers**, **2022** (14), no. 1, Art. no. 1,doi:10.3390/polym14010023.
- [14] A. White and S. Lockyer, 'Removing plastic packaging from fresh produce – what's the impact?', **Nutr. Bull**, **2020** (45), pp. 35–50, doi:10.1111/nbu.12420.
- [15] L. Filiciotto and G. Rothenberg, 'Biodegradable plastics: Standards, policies, and impacts', **ChemSusChem**, **2021** (14), no. 1, pp. 56–72,doi: 10.1002/cssc.202002044
- [16] M. Eriksen *et al.*, 'Plastic pollution in the world's oceans: more than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea', **PloS One**, **2014** (9), no. 12, p. e111913, doi: 10.1371/journal.pone.0111913
- [17] S. Hann et al. (2018), **Investigating options for reducing releases in the aquatic environment of microplastics emitted by (but not intentionally added in) products**, Retrieved from https://bmbf-plastik.de/sites/default/files/2018-04/microplastics_final_report_v5_full.pdf
- [18] N. Kalogerakis *et al.*, 'Microplastics generation: onset of fragmentation of polyethylene films in marine environment mesocosms', **Front. Mar. Sci.**, **2017** (4), p. 84,. doi: 10.3389/fmars.2017.00084
- [19] S. Manlikanin, (ม.ป.ป.). '**ประเภทของพลาสติกที่ย่อยสลายได้**'. สืบค้นจาก <https://www.mtec.or.th/bio-plastic/plastics-degradation/biodegradable-plastic.html>
- [20] กลุ่มส่งเสริมอุตสาหกรรมชีวภาพ, '**พลาสติกที่สลายตัวได้ทางชีวภาพ: Polylactic acid (PLA)**', สืบค้นจาก <http://www.ocsb.go.th/upload/bioindustry/fileupload/9757-9874.pdf>.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [21] อมรรัตน์ เลิศวรสิริกุล, ‘พอลิแลกติกแอซิด : พอลิเอสเทอร์จากทรัพยากรที่สร้างทดแทนใหม่ได้’, *วิศวกรรมสาร มก.*, 2554 (77), pp. 99–110, สืบค้นจาก https://kukrdb.lib.ku.ac.th/journal/ENGJ/search_detail/result/202999
- [22] เทศบาลตำบลเทพราช_(ทต.เทพราช), (ม.ป.ป.). ‘กระบวนการผลิตพอลิแล็กติกแอซิด’, สืบค้นจาก http://www.bangkokideaeasy.com/informations/tepparad/index.php?op=dynamiccontent_detail&dynamiccontent_id=9016.
- [23] G. Rajeshkumar et al., ‘Environment friendly, renewable and sustainable poly lactic acid (PLA) based natural fiber reinforced composites – A comprehensive review’, *J. Clean. Prod.*, 2021 (10), p. 127483, doi:10.1016/j.jclepro.2021.127483.
- [24] ดร.จุรีรัตน์ ประसार, (ม.ป.ป.). ‘นอนูฟเว่น: ผ้าไม่ถักไม่ทอ’, สืบค้นจาก https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/246_21-27.pdf
- [25] ‘ความรู้เกี่ยวกับเครื่องฉีดพลาสติกและงานฉีดพลาสติก ขนาดของเครื่องฉีด’. สืบค้นจาก <https://www.cctgroup.co.th/%E0%B9%80%E0%B8%84%E0%B8%A3%E0%B8%B7%E0%B9%88%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B8%89%E0%B8%B5%E0%B8%94%E0%B8%9E%E0%B8%A5%E0%B8%B2%E0%B8%AA%E0%B8%95%E0%B8%B4%E0%B8%81/>.
- [26] มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, ‘พัฒนาวิธีการฉีดพลาสติก บทที่2’, สืบค้นจาก https://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2551/enin0851ww_ch2.pdf
- [27] สมเจตน์ พัชรพันธ์, ‘ข้อบกพร่องในชิ้นงานพลาสติกที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป:สาเหตุและแนวทางการแก้ไข Defects of Injection Molded Parts: Causes and Troubleshooting’, *วิศวกรรมสาร มก*, 2552 (22), no. 69, สืบค้นจาก https://kukrdb.lib.ku.ac.th/journal/ENGJ/search_detail/result/202219
- [28] A. Geyer and C. Bonten, ‘Enhancing the weld line strength of injection molded components’, *AIP Conf. Proc.*, 2019 (1), p. 070023, doi:10.1063/1.5084867.
- [29] ‘Characteristics of injection molded parts with the areas of weld lines’. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/341085423_Characteristics_of_injection_molded_parts_with_the_areas_of_weld_lines.
- [30] ‘Insert Injection Molding | Insert Molding | Plastic Injection Inserts’. Retrieved from <https://www.lomont.com/insert-molding>.
- [31] ทฤทท์ กิรติเสวี และคณะ, ‘ภาพรวมของวัสดุเชิงประกอบ An Overview of Composite Materials’, *วิศวกรรมสาร มก*, 2552 (22), no. 70, สืบค้นจาก https://kukr.lib.ku.ac.th/kukr_es/BKN_ENG/search_detail/download_digital_file/202204/58739

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [32] M. Reghat *et al.*, ‘Graphene as a piezo-resistive coating to enable strain monitoring in glass fiber composites’, **Compos. Sci. Technol.**, **2021** (211), p. 108842, doi:10.1016/j.compscitech.2021.108842.
- [33] J. Andrzejewski, P. Przyszczykowski, and M. Szostak, ‘Development and characterization of poly(ethylene terephthalate) based injection molded self-reinforced composites. Direct reinforcement by overmolding the composite inserts’, **Mater. Des.**, **2018** (153), pp. 273–286, doi:10.1016/j.matdes.2018.04.084.
- [34] K. Nodo, WY. Leong, H. Hamada, ‘Effect of knitted and woven textile structures on the mechanical performance of poly(lactic acid) textile insert injection-compression moldings’, **Journal of Applied Polymer Science**, **2012** doi:10.1002/app.34369
- [35] S. Yamaguchi, Y. W. Leong, ‘Effect of crystallization and interface formation mechanism on mechanical properties of film-insert injection-molded poly(propylene) (PP) film/PP substrate’, **Journal of Applied Polymer Science**, **2005** (98), p294-301, doi: 10.1002/app.21590
- [36] J. Beauson, G. Schillani, L. Van der Schueren, and S. Goutianos, ‘The effect of processing conditions and polymer crystallinity on the mechanical properties of unidirectional self-reinforced PLA composites’, **Compos. Part Appl. Sci. Manuf.**, **2022** (152), p. 106668, doi: 10.1016/j.compositesa.2021.106668
- [37] T. Christelle, (2004) **Edana the Voice of Nonwoven**. Retrieved From: <https://www.edana.org/nw-related-industry/how-are-nonwovens-made>

ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
ผลการตีพิมพ์เผยแพร่



เอกสารแสดงการตอบรับบทความเพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรม



ที่ อว 0604.8.1.3/2305

คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
เลขที่ 85 ถ.สดมภ์
ต.เมืองศรีโค อ.วารินชำราบ
จ.อุบลราชธานี 34190

18 ธันวาคม 2565

เรื่อง ตอบรับบทความเพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม

เรียน คุณณรงค์ชัย โอเจริญ

ตามที่ท่านได้ส่งบทความวิจัย เรื่อง "ผลกระทบของสภาวะการเตรียมผ้าไม่ถักไม่ทอ ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิแลกติกแอซิดจากกระบวนการสกัดขึ้นรูปแบบแทรกสิ่งทอ" โดยมีผู้เขียนร่วม คือ จิตภาภ กรรมสุริยศักดิ์ (ชื่อแรก), นิชนันท์ พานสร้อย, ฤพลดี สังข์สนธิ เพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม ตามความทราบนั้น

บัดนี้ บทความดังกล่าวของท่าน ได้ผ่านการประเมินจากกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ จำนวน 3 คน จากหลากหลายสถาบัน ตามแนวทางของประกาศ ก.พ.อ. และกองบรรณาธิการ ได้พิจารณาเห็นชอบในการนำบทความของท่าน เพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม ปีที่ 16 ฉบับที่ 4 ประจำเดือนกรกฎาคม - กันยายน 2566 ประเภท บทความวิจัย และหวังเป็นอย่างยิ่งว่า ท่านจะให้ความสนใจในการส่งบทความเพื่อตีพิมพ์ ในวารสารฯ ในโอกาสต่อไป

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

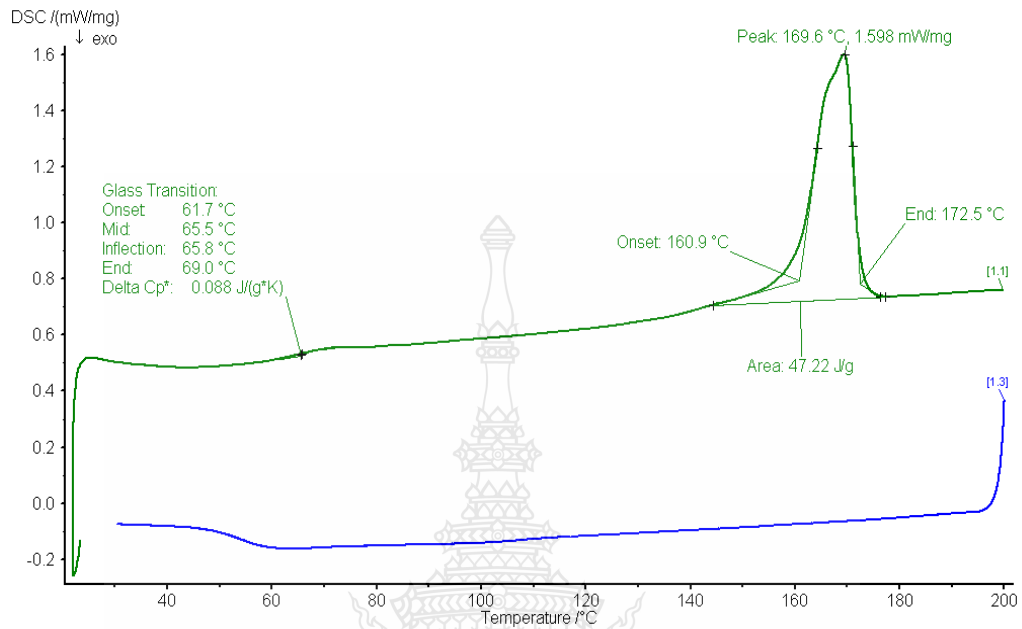
ขอแสดงความนับถือ

(ศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง)
บรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม

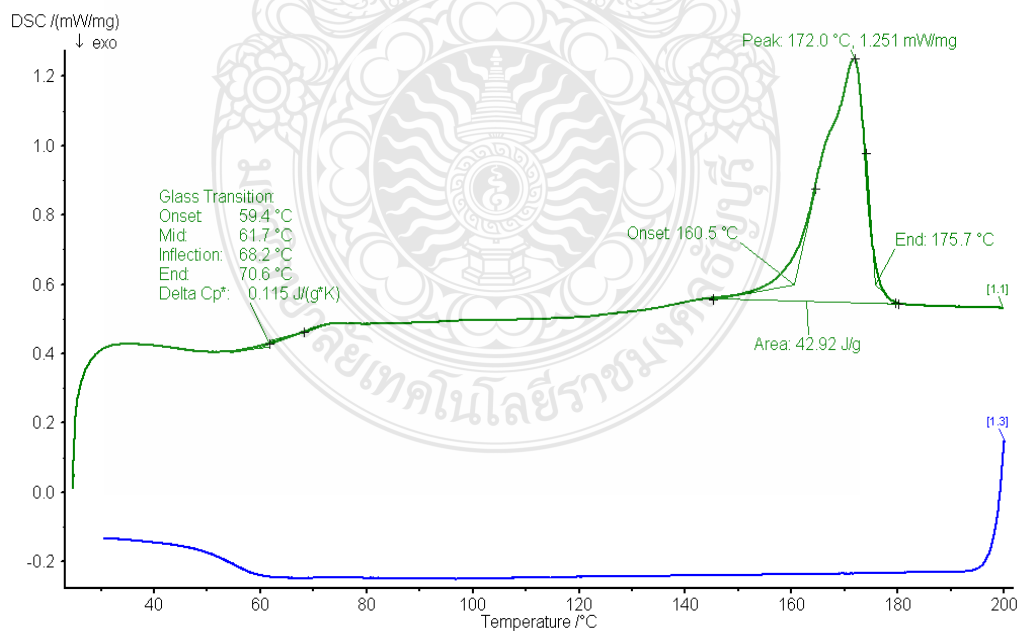


ภาคผนวก ข
ผลการวิเคราะห์

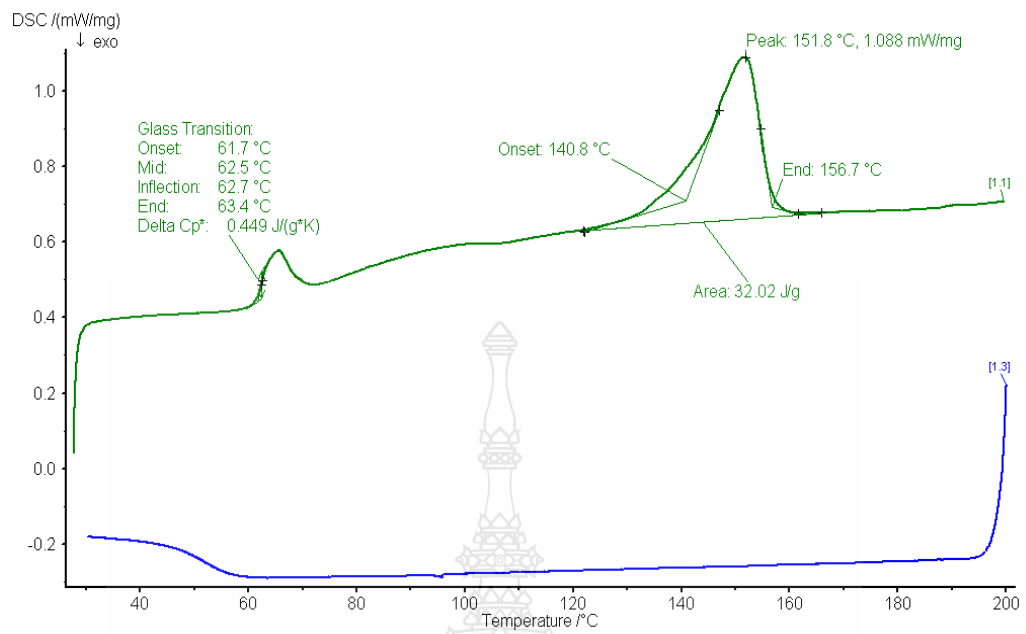
ข.1 การทดสอบอัตรลักษณ์ของวัสดุ



รูปที่ ข.1 เทอร์โมแกรมสมบัติทางความร้อนของ PLA 6100D ใช้ขึ้นรูปผ้าไม้ถักไม่ทอ



รูปที่ ข.2 เทอร์โมแกรมสมบัติทางความร้อนของ PLA 3251D ใช้ขึ้นรูปเนื้อพอลิเมอร์เชิงประกอบ



รูปที่ ข.3 เทอร์โมแกรมสมบัติทางความร้อนของ PLA 2003D ใช้ขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม



Ingeo™ Biopolymer 6100D Technical Data Sheet

Fiber Melt Spinning

Ingeo biopolymer 6100D, a NatureWorks product, is a thermoplastic fiber-grade resin derived primarily from annually renewable resources. Available in pellet form, 6100D is designed for extrusion into mechanically drawn staple fibers or continuous filament, using conventional fiber spinning and drawing equipment. 6100D is typically well suited for fiber processes where lower fiber shrinkage and higher dimensional stability is required. Ingeo biopolymer 6100D can be converted into a broad range of fiber products. See table for typical properties.

Applications

Potential applications for Ingeo biopolymer 6100D include:

- Staple fiber
- Nonwovens
- Agricultural woven and nonwoven fabrics
- Articles for household disposal
- Textiles
- Continuous filament – Textured and flat yarns
- Spunbond fabrics

Processing Information

Ingeo biopolymer 6100D will process on conventional extrusion spinning and drawing equipment. Thorough cleaning is required because PLA is not compatible with a wide variety of polymers.

Machine Configuration

General-purpose screws with L/D ratios of 24:1 to 30:1 and 3:1 compression ratios are recommended. However, screws with mixing sections or shallow metering channels may overheat the melt at high screw speeds. Typical melt spinning temperatures are 220-240°C. Like PET, Ingeo 6100D requires either high filament velocity or drawing and controlled heat setting to control shrinkage.

Drying

In-line drying capabilities are essential to process Ingeo Biopolymer 6100D, which is supplied with moisture content of less than 0.040% (400 ppm). The recommended moisture content to prevent viscosity degradation and potential loss of properties is less than 0.005% (50 ppm). Typical drying conditions are 4-8 hours at 80°C [176°F] at a dew point of –

Typical Material & Application Properties ⁽¹⁾		
Physical Properties	Ingeo 6100D	ASTM Method
Specific Gravity (g/cm ³)	1.24	D792
Relative Viscosity ⁽²⁾	3.1	D5225
Melt Index (g/10 min at 210°C)	24	D1238
Melt Density (g/cm ³ at 230°C)	1.08	
Glass Transition Temperature (°C)	55-60	D3417
Crystalline Melt Temperature (°C)	165-180	D3418
Typical Fiber Properties		
Denier per Filament (g/9000m)	≥0.5 dpf	
Tenacity (g/d)	3.0-6.0	D2256/D3822
Elongation (%)	10-70	D2256/D3822
Modulus (g/d)	55-65	D2256/D3822
Boiling Water Shrinkage (%)	3-10	D2102
Hot Air Shrinkage (% at 130°C, 10 min)	3-10	D2102

(1) Typical properties; not to be construed as specifications.

(2) RV measured at 1.0 g/dL in chloroform at 30°C

35°C [-30°F] or lower, with an airflow rate of greater than 0.5 cfm/lbs per hour of resin throughput. To prevent moisture regain, the resin should not be exposed to atmospheric conditions after drying.

Food Packaging Status

U.S. Status

On January 3, 2002 FCN 000178 submitted by NatureWorks LLC to FDA became effective. This effective notification is part of list currently maintained on FDA's website at

<http://www.fda.gov/food/ingredientspackaginglabeling/packagingfcs/notifications/default.htm>

This grade of Ingeo biopolymer may therefore be used in food packaging materials and, as such, is a permitted component of such materials pursuant to section 201(s) of the Federal, Drug, and Cosmetic Act, and Parts 182, 184, and 186 of the Food Additive Regulations. All additives and adjuncts contained in the referenced Ingeo biopolymer formulation meet the applicable sections of the Federal Food, Drug, and Cosmetic Act. The finished polymer is approved for all food types and B-H use conditions.

Migration testing for this product was done using rolled sheet with an approximate thickness of 0.020 inches. Depending on the application, the surface area of a fiber article may differ from the sheet sample tested. It is therefore the responsibility of the manufacturer of the finished food-

Ingeo™ Biopolymer 3251D Technical Data Sheet

Injection Molding Process Guide

Ingeo biopolymer 3251D is designed for injection molding applications. This polymer grade has a higher melt flow capability than other Ingeo resin grades currently in the marketplace. The higher flow capability allows for easier molding of thin-walled parts. It is designed for injection molding applications, both clear and opaque, requiring high gloss, UV resistance and stiffness.

Processing Information

Ingeo biopolymer 3251D can be processed on conventional injection molding equipment. The material is stable in the molten state, provided that the drying procedures are followed. Mold flow is highly dependent on melt temperature. In order to control melt temperature, it is recommended to balance screw speed, back pressure, and process temperature. Injection speed should be medium to fast.

Process Details

Startup and Shutdown

Ingeo biopolymer 3251D is not compatible with a wide variety of other resins, and special purging sequences should be followed:

1. Clean extruder and bring temperatures to steady state with low viscosity, general purpose polystyrene or polypropylene.
2. Vacuum out hopper system to avoid contamination.
3. Introduce Ingeo biopolymer into the extruder at the operating conditions used in step one.
4. Once Ingeo biopolymer has purged, reduce barrel temperatures to desired set points.
5. At shutdown, purge machine with high viscosity polystyrene or polypropylene.

Typical Material & Application Properties		
Physical Properties	Ingeo 3251D	ASTM Method
Specific Gravity	1.24	D792
MFR, g/10 min (210°C, 2.16kg)	80	D1238
MFR, g/10 min (190°C, 2.16kg)	35	D1238
Relative Viscosity	2.5	
Crystalline Melt Temperature (°C)	155-170	D3418
Glass Transition Temperature (°C)	55-60	D3418
Clarity	Transparent	
Mechanical Properties		
Tensile Yield Strength, psi (MPa)	9,000 (62)	D638
Tensile Elongation, %	3.5	D638
Notched Izod Impact, ft-lb/in (J/m)	0.3 (16)	D256
Flexural Strength (MPa)	15,700 (108)	D790
Notched Izod Impact, ft-lb/in (J/m)	0.3 (16)	D256
Heat Distortion Temperature (°C)	55	E2092

Note: These are starting points and may need to be optimized.

Processing Temperature Profile		
Melt Temp.	370-410°F	188-210°C
Feed Throat	70°F	20°C
Feed Temp.	330-350°F	166-177°C
Compression Section	360-380°F	182-193°C
Metering Section	370-400°F	188-205°C
Nozzle	370-400°F	188-205°C
Mold	75°F	25°C
Screw Speed	100-200 rpm	
Back Pressure	50-100 psi	
Mold Shrinkage	.004 in/in. +/- .001	

Ingeo™ Biopolymer 2003D Technical Data Sheet

For Fresh Food Packaging and Food Serviceware

Ingeo biopolymer 2003D, a NatureWorks LLC product, is a thermoplastic resin derived from annually renewable resources and is specifically designed for use in fresh food packaging and food serviceware applications. Ingeo biopolymer 2003D is a transparent general purpose extrusion grade that is used naturally or as part of a formulated blend. This is a high molecular weight biopolymer grade that processes easily on conventional extrusion equipment. Extruded roll stock is readily thermoformable. See table at right for properties.

Typical Material & Application Properties ⁽¹⁾		
Physical Properties	Ingeo 2003D	ASTM Method
Specific Gravity	1.24	D792
MFR, g/10 min (210°C, 2.16kg)	6	D1238
Clarity	Transparent	
Mechanical Properties		
Tensile Strength @ Break, psi (MPa)	7,700 (53)	D882
Tensile Yield Strength, psi (MPa)	8,700 (60)	D882
Tensile Modulus, kpsi (GPa)	500 (3.5)	D882
Tensile Elongation, %	6.0	D882
Notched Izod Impact, ft-lb/in (J/m)	0.3 (18)	D256
Shrinkage is similar to PET ⁽²⁾		
Heat Distortion Temperature (°C)	55	E2092

(1) Typical properties; not to be construed as specifications.
 (2) Refer to Ingeo biopolymer Sheet Extrusion Processing Guide

Applications

Potential applications for Ingeo biopolymer 2003D include:

- Dairy containers
- Food serviceware
- Transparent food containers
- Hinged-ware
- Cold drink cups

Processing Information

Ingeo biopolymer 2003D is easily processed on conventional extrusion equipment. The material is stable in the molten state, provided that the drying procedures are followed. More detailed recommendations and processing requirements are found in the Ingeo biopolymer sheet extrusion processing guide, the purging technical data sheet, and the drying and crystallizing processing guide, all of which can be found at www.natureworksllc.com.

Machine Configuration

Ingeo biopolymer 2003D will process on conventional extrusion machinery with the following equipment: General purpose screw with L/D ratios from 24:1 to 32:1 and compression ratio of 2.5:1 to 3:1. Smooth barrels are recommended.

Process Details

Startup and Shutdown

Ingeo biopolymer 2003D is not compatible with a wide variety of commodity resins, and special purging sequences should be followed:

Processing Temperature Profile ⁽¹⁾		
Melt Temperature	410°F	210°C
Feed Throat	113°F	45°C
Feed Temperature	355°F	180°C
Compression Section	375°F	190°C
Metering Section	390°F	200°C
Adapter	390°F	200°C
Die	375°F	190°C
Screw Speed	20-100 rpm	

(1) These are starting points and may need to be optimized.

1. Clean extruder and bring temperatures to steady state with low viscosity, general purpose polystyrene or polypropylene.
2. Vacuum out hopper system to avoid contamination.
3. Introduce Ingeo biopolymers into the extruder at the operating conditions used in Step 1.
4. Once Ingeo biopolymer has purged, reduce barrel temperatures to desired set points.
5. At shutdown, purge machine with high viscosity polystyrene or polypropylene.

Drying

In-line drying may be required. A moisture content of less than 0.025% (250 ppm) is recommended to prevent viscosity degradation. Typical drying conditions for crystallized granules are 2 hours at 195°F (90°C) or to a dew point of -40°F (-40°C), airflow rate of greater than 0.5 cfm/lbs per hour

ข.2 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์เชิงประกอบ

ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์เชิงประกอบ วัสดุที่ใช้เสริมแรงทั้งฟิล์ม และ ฝ้าไม้สักไม้ทอ เซึ่งตัวเลขดังแสดงในตารางที่ ข.1, ข.2, ข.3 ตามลำดับ

ตารางที่ ข.1 แสดงผลการทดสอบวัดความหนาของวัสดุเสริมแรง

Materials	point 1(mm)	point 2(mm)	point 3(mm)	point 4(mm)	point 5(mm)
Nonwoven	0.505	0.504	0.508	0.508	0.501
Film	0.129	0.130	0.130	0.131	0.134

ตารางที่ ข.2 แสดงผลการทดสอบวัดความหนาและน้ำหนักมาตรฐาน (Gram Per Square Metre)

sample	Film	Nonwoven
1	1.88	1.58
2	1.89	1.58
3	1.93	1.58
4	1.94	1.59
5	1.94	1.59
6	1.95	1.59
7	1.95	1.62
8	1.95	1.62
9	1.97	1.62
10	1.98	1.63
11	1.98	1.64
12	1.99	1.64
Average	1.95	1.61
S.D.	0.03	0.02

ตารางที่ ข.3 แสดงผลการทดสอบความแข็งที่ผิว

Materials	Average	S.D.
PLA100%	98.79	1.47
FRONT nonwoven	100.5	4.83
FRONT film	94.98	4.1
BACK nonwoven	96.72	1.33
BACK film	99.12	1.24

ข.3 การทดสอบสมบัติทางกลของพอลิเมอร์เชิงประกอบ

ผลการทดสอบสมบัติทางกลของพอลิเมอร์เชิงประกอบที่เสริมแรงทั้งฟิล์ม และผ้าไม่ถักไม่ทอเชิงตัวเลขดังแสดงในตารางที่ ข.4, ข.5, ข.6, ข.7 และ ข.8 ตามลำดับ

ตารางที่ ข.4 แสดงผลการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของวัสดุเสริมแรง

Sample	Film	Nonwoven
1	48.4	34.4
2	45.2	33.9
3	45.2	29.2
4	41.6	32.4
5	41	32.7
Average	44.28	32.5
S.D.	3.03	2.87

ตารางที่ ข.5 แสดงผลการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile Strength)

Sample	Modulus (MPa)	S.D.	Yield Stress (MPa)	S.D.
PLA100%	1236	30.5	33.82	2.38
Nonwoven	2430	83.67	35.58	3.3
Film	2428	74.63	34.54	2.52

ตารางที่ ข.6 แสดงผลการทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก (Izod Impact)

Materials	Izod Impact Testing	S.D.
PLA 100%	51.02	8.49
Nonwoven	47.26	3.7
Film	50.33	3.84

ตารางที่ ข.7 แสดงผลการทดสอบความแข็งแรงต่อการดัดแบบ 3 จุด (Three Point Bending)

Materials	Modulus (MPa)	S.D.	Ultimate force (N)	S.D.	
PLA100%	3238	64.58	92.48	3.84	
FRONT	Nonwoven	2576	575.7	78.02	9.81
	Film	2916	472.1	82.82	8.43
BACK	Nonwoven	3000	68.92	85.48	9.31
	Film	3098	84.08	88.38	12.24

ตารางที่ ข.8 แสดงผลการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงที่ผิว (Peel Strength)

Sample	Tensile Strength (MPa)	
	Nonwoven	Film
1	15.4	12.9
2	15.8	15.4
3	15.8	10.9
4	16.6	11.2
5	15.9	15.2
Average	15.9	13.12
S.D.	0.44	2.13



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล นางสาวจิตาภา กรมสุริยศักดิ์
วัน เดือน ปีเกิด 27 เมษายน 2540
ที่อยู่ 28/51 หมู่ 4 ตำบลบางตลาด อำเภอปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี 11120
ประวัติการศึกษา ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งทอและ
เส้นใย-พอลิเมอร์และเส้นใย จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประวัติการทำงาน ตำแหน่งผู้ช่วยนักวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
พ.ศ. 2562 ถึงปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์ 091-4320893
E-Mail Jidapa_k@mail.rmutt.ac.th



วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยที่เกิดจากการค้นคว้าและวิจัย ขณะที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ในคณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถือเป็น
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และข้อความต่างๆในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้า
ขอรับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำงานวิจัยของผู้อื่นมานำเสนอในชื่อของข้าพเจ้า

This thesis consists of research materials conducted at the Faculty of
Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi and hence the copyright
owner. I hereby certify that the thesis does not contain any forms of plagiarism.

จิตาภา กรมสุริยศักดิ์

(.นางสาวจิตาภา กรมสุริยศักดิ์.)

