

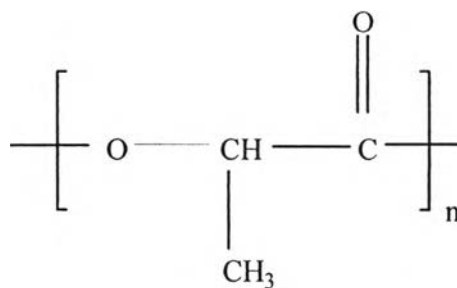


บทที่ 2

วารสารปริทรรศน์

2.1 พอลิแล็กติกแอซิด (Poly(lactic acid), PLA) [1-3]

พอลิแล็กติกแอซิดเป็นพอลิเมอร์ในกลุ่มพอลิเมอร์ชีวภาพ มีลักษณะโครงสร้างที่เป็นอะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ (aliphatic polyester) สังเคราะห์มาจากอนุพันธ์ของ แอลฟา-ไฮดรอกซีแอซิด (α - hydroxy acid) จึงสามารถย่อยสลายได้ด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ของพันธะเอสเทอร์ (ester linkage) โดยไม่จำเป็นต้องอาศัยเอนไซม์ หรือตัวเร่งปฏิกิริยาใดๆ เป็นตัวช่วยในการย่อยสลาย ซึ่งโครงสร้างทางเคมีโดยทั่วไปของพอลิแล็กติกแอซิด แสดงดังรูปที่ 2.1 พอลิแล็กติกแอซิด เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถสังเคราะห์ได้จากผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรที่สามารถปลูกทดแทนได้ เช่น อ้อย มันสำปะหลัง และมันฝรั่ง เป็นต้น โดยพอลิแล็กติกแอซิดสังเคราะห์จากกรดแล็กติก (lactic acid) ที่ได้จากกระบวนการหมักคาร์โบไฮเดรตด้วยแบคทีเรียพวก Lactobacilli ได้ L-enantiomer ของแล็กติกแอซิด ซึ่งการสังเคราะห์นี้ถูกค้นพบเป็นครั้งแรกในนมเปรี้ยว



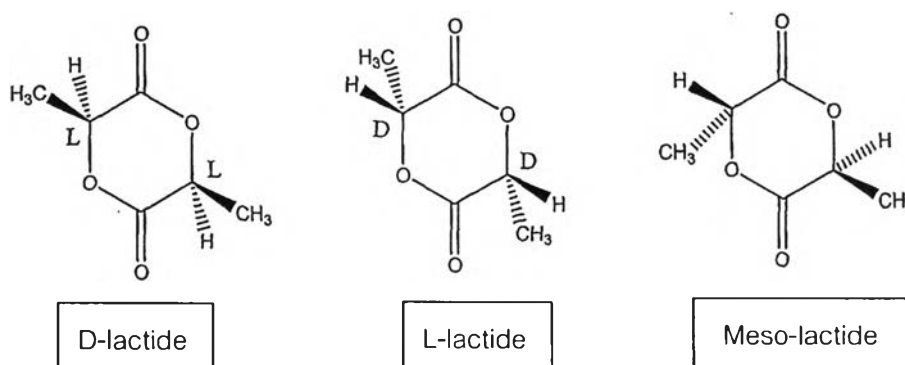
รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิแล็กติกแอซิด [1]

นอกจากพอลิแล็กติกแอซิดจะมีจะสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติแล้ว ยังมีสมบัติอื่นที่โดดเด่น เช่น ความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatible) และไม่เป็นพิษต่อเซลล์ (non-cytotoxic) ด้วยเหตุนี้จึงมีการนำพอลิแล็กติกแอซิดมาใช้เป็นวัสดุทางการแพทย์ เช่น

อุปกรณ์ที่นำมาใช้ใส่ในร่างกาย (implant device) โครงร่างเลี้ยงเซลล์ (tissue scaffold) รวมถึงการเย็บแผลภายใน (internal sutures)

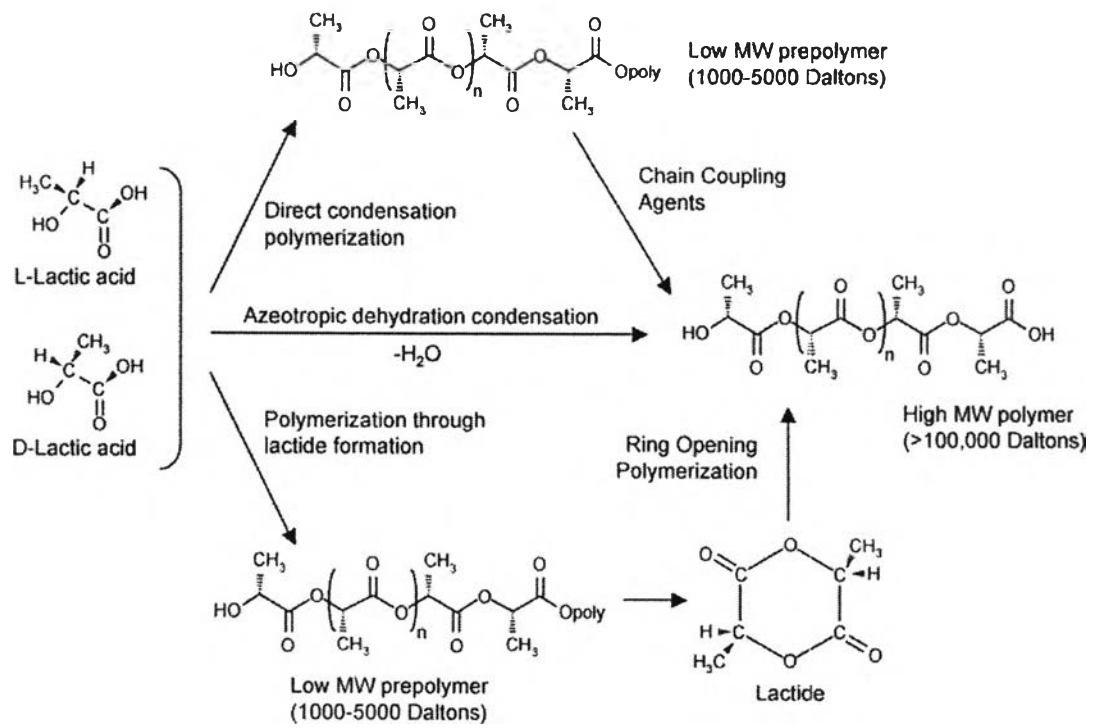
อย่างไรก็ตามพอลิแล็กติกแอซิดนั้นมีความเปราะที่อุณหภูมิห้อง และสมบัติการสกัดกันแก๊สไม่ดี จึงไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ แต่มีความแข็งแรงและสามารถขึ้นรูปได้เหมือนพอลิเมอร์ที่ผลิตจากปิโตรเลียม ด้านความทนแรงดึง และแรงดัดโค้งดีกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิโพรพิลีน (PP) และพอลิสไตรีน (PS) แต่ความทนแรงกระแทกและความยืดหยุ่นสูง จุดขาดมีค่าต่ำกว่าการสังเคราะห์พอลิแล็กติกแอซิด มี 2 วิธีคือ

1) *Polycondensation* โดยวิธีการสังเคราะห์นี้จะได้พอลิแล็กติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ มีสมบัติคล้ายแก้ว (brittle glassy) เนื่องจากหลังการเกิดปฏิกิริยาจะได้น้ำที่เป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะไปขัดขวางการเกิดปฏิกิริยา หรือเกิดปฏิกิริยา "back-biting" สร้างวงแหวนหกเหลี่ยมของแล็กไทด์ (six-member lactide ring) ที่เป็นของผสมของ L-lactide, D-lactide และ meso-lactide หรือ 1:1 racemic stereocomplex (D,L-Lactide) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ดังนั้นวิธีแก้ไขให้สามารถสังเคราะห์พอลิแล็กติกแอซิดให้มีน้ำหนักโมเลกุลสูงได้แก่ ทำปฏิกิริยาควบแน่น (condensation) ร่วมกับดึงน้ำที่เป็นผลิตภัณฑ์ของการเกิดปฏิกิริยาออกระหว่างปฏิกิริยา และการใช้สารคู่ควบ (coupling agent)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีไอโซเมอร์ต่างๆ ของพอลิแล็กไทด์

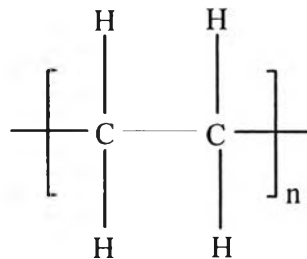
2) *Ring opening polymerization* วิธีนี้สามารถสังเคราะห์พอลิแล็กติกแอซิดให้มีน้ำหนักโมเลกุลสูงได้ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.3 สูงในกรณีทีสารตั้งต้นเป็น L-lactide หรือ D-lactide สามารถสังเคราะห์ poly(L-lactide) หรือ poly(D-lactide) ตามลำดับ ซึ่งมี configuration แบบ isotactic ส่วนสารตั้งต้นที่เป็น meso-lactide ก็สามารถที่จะสังเคราะห์เป็น poly(meso-lactide) ซึ่งมี configuration แบบ syndiotactic และส่วนที่สารตั้งต้นเป็น D,L-lactide ก็สามารถสังเคราะห์ poly(D,L-lactide) ซึ่งมี configuration แบบ atactic



รูปที่ 2.3 กระบวนการสังเคราะห์พอลิแล็กติกแอซิด

2.2 พอลิเอทิลีน (polyethylene, PE) [4-7]

พอลิเอทิลีนเป็นพอลิโอเลฟินส์ชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นเทอร์โมพลาสติก มีโครงสร้างทางเคมีทั่วไปดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ชนิดคือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (high density polyethylene, HDPE) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene, LDPE) และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (linear low density polyethylene, LLDPE)



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีน

2.2.1 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (high density polyethylene, HDPE)

พอลิเมอริชนิดนี้มีความหนาแน่นประมาณ 0.96 g/cm^3 มีโครงสร้างที่เป็นเส้นตรงที่เป็นระเบียบ ทำให้มีการจับตัวกันเป็นผลึกได้ง่ายจึงมีการเกิดผลึกในอัตราที่สูง ด้วยเหตุนี้พอลิเมอริชนิดนี้จึงมีความแข็งตึง (stiffness) แข็ง (hard) มีความลื่นเป็นไขน้อยกว่า พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และสามารถใช้งานในที่ที่มีอุณหภูมิสูงได้ ดังนั้นจึงมีความนิยมนำมาทำเป็นถุ่ร้อน ทางด้านสมบัติเชิงกลนั้นพอลิเมอริชนิดนี้มีความทนแรงดึงและความทนแรงด้นทะลุสูงกว่า พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ แต่มีความทนแรงกระแทกและความต้านแรงฉีกขาดที่ต่ำกว่า เนื่องจากการที่มันมีโครงสร้างเป็นเส้นตรงนั่นเอง จึงมีการจัดเรียงตัวในทิศทางยาว ซึ่งขึ้นงานในแนวตามเครื่องจักร (MD) จะมีความต้านทานแรงฉีกขาดได้ต่ำกว่าแนวขวางเครื่องจักร ส่วนสมบัติการสกัดกัน (permeability) อัตราการซึมผ่านของไอน้ำจะต่ำหรือสกัดกันไอน้ำได้ดีกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำและมีความทนสารเคมีที่สูงกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำด้วยเหตุนี้จึงมีความนิยมนำพอลิเมอริชนิดนี้มาทำเป็นขวดใส่สารเคมี เนื่องจากโมเลกุลของพอลิเอทิลีน

ความหนาแน่นสูงมีความเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี นอกจากนี้ยังทนทานต่อไขมันและน้ำมันได้ดีอีกด้วย เนื่องจากมีความเป็นขี้ด่ำ

2.2.2 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene, LDPE)

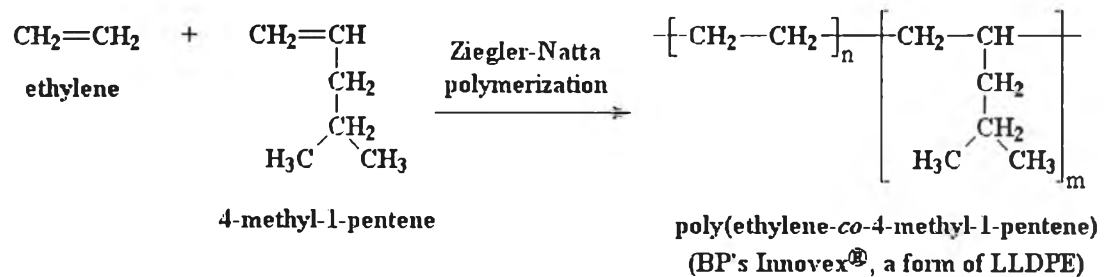
พอลิเมอร์ชนิดนี้ถูกสังเคราะห์จากปฏิกิริยาที่ใช้ความดันที่สูงมาก และเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนที่รุนแรง จึงต้องมีระบบควบคุมอุณหภูมิ LDPE ที่ได้จะมีสายโซ่ที่เป็นกิ่งยาวจำนวนมาก แต่มีความยาวไม่มาก เมื่อถูกผลิตจาก tubular reactor แต่ถ้ามีสายโซ่กิ่งยาวจำนวนน้อยกว่า แต่มีความยาวมากกว่า จะถูกผลิตจาก autoclave reactor โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก tubular reactor จะมีความใสมากกว่าที่ได้จาก autoclave reactor แต่ LDPE ที่ได้จาก autoclave reactor จะมีสมบัติด้านความเหนียวที่มากกว่า มีความหนาแน่นประมาณ 0.916-0.935 g/cm³

ด้านการใช้งานด้านฟิล์มบรรจุภัณฑ์ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำถูกนำมาใช้งานมากที่สุด ซึ่งส่วนใหญ่ใช้ทำถุงเย็น ฟิล์มหด (shrink film) และฟิล์มยืด โดยพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำมีความเป็นผลึกต่ำกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเนื่องจากโครงสร้างของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำนั้นมีโครงสร้างแบบกิ่ง ทำให้มีระยะห่างระหว่างสายโซ่มาก จึงมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลต่ำ จึงเกิดเป็นผลึกได้น้อย และยังมีความโปร่งแสงและยืดหยุ่นกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและเมื่อได้รับความร้อนจะเคลื่อนไหวและไหลได้ง่าย และสาเหตุที่พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำถูกนำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ทนความร้อนไม่สูงมากนั้น เนื่องจากจุดอ่อนตัว (softening point) ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำต่ำกว่าจุดเดือดของน้ำ จึงไม่สามารถบรรจุของที่มีอุณหภูมิที่สูงมากได้ เนื่องจากโครงสร้างและปริมาณผลึกที่ต่ำ นอกจากนี้ยังมีสมบัติเชิงกลที่ดี ได้แก่ ความทนแรงดึง ความทนแรงดันทะลุ ความทนแรงกระแทก และความทนแรงฉีกขาด และสามารถทนความเย็นได้ คือ มีความแข็งแรงที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนเรื่องของการสกัดกันแก๊สและไอน้ำ พบว่าสามารถสกัดกันไอน้ำได้ดี แต่การสกัดกันแก๊สนั้นไม่ค่อยดีนัก จึงไม่เหมาะสำหรับอาหารที่สามารถถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย เช่น อาหารจำพวกของทอด และขบเคี้ยว เป็นต้น

นอกจากนี้ยังมีความทนต่อสารเคมี และสารละลายอินทรีย์ได้ดีเยี่ยม เนื่องจากในโครงสร้างประกอบด้วยอะตอมคาร์บอนและไฮโดรเจนเท่านั้น จึงมีความเฉื่อยต่อปฏิกิริยา แต่จะไม่ทนอาหารจำพวกน้ำมันเนื่องจากความไม่มีขั้วของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำสมบัติอีกประการหนึ่งที่สำคัญของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำคือ การถูกปิดผนึกด้วยความร้อนได้ง่าย และให้ตะเข็บหรือรอยเชื่อมที่แข็งแรง ส่วนการผนึกด้วยกาวทำได้ยาก เนื่องจากส่วนผสมที่สำคัญของกาวคือน้ำ

2.2.3 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (linear low density polyethylene, LLDPE)

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นถูกผลิตครั้งแรกด้วยกระบวนการสารละลาย (solution process) เมื่อปี 1960 โดยบริษัทดูปองต์ ประเทศแคนาดา และได้รับการพัฒนาจนกระทั่งปี 1977 ได้ถูกผลิตด้วยกระบวนการแก๊สเฟส (gas-phase process) เป็นกระบวนการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนที่ความดันต่ำ โดยนำมอนอเมอร์และตัวเร่งปฏิกิริยาป้อนเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ (reactor) ซึ่งปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5 จะได้พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่มีความหนาแน่น 0.91-0.94 g/cm³



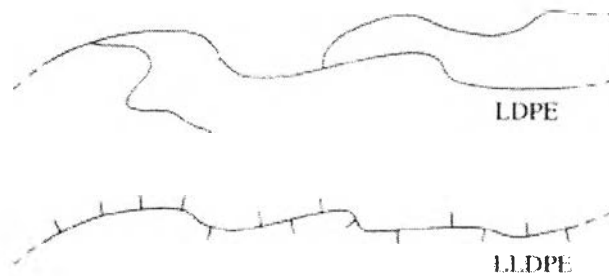
รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น

กระบวนการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นสามารถสังเคราะห์ได้ด้วยทั้ง 2 วิธี [8] คือ

1. กระบวนการสารละลาย (solution process) ทำให้เกิดพอลิเมอร์โรเซชันที่ 2.5-10 MPa ที่อุณหภูมิ 25-300 องศาเซลเซียส

2. กระบวนการแก๊สเฟส (gas phase process) เป็นกระบวนการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนที่ความดันต่ำ โดยมอนอเมอร์และตัวเร่งปฏิกิริยาถูกป้อนเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ที่ความดัน 0.7-2.1 MPa และอุณหภูมิ 100°C หรือต่ำกว่า พอลิเมอร์ที่ได้จะสัมผัสกับแก๊สเอทิลีนเท่านั้น กระบวนการนี้เรียกว่า unipol ซึ่งเป็นกระบวนการที่สามารถควบคุมความหนาแน่น ดัชนีการหลอมไหล การกระจายของน้ำหนักโมเลกุล และความยาวโมเลกุลได้แน่นอน

โครงสร้างของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นจะมีความแตกต่างจากพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำคือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นจะไม่มีโซ่กิ่งยาว ดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยความหนาแน่นจะถูกควบคุมด้วยการเติมโคมอนอเมอร์ลงไป เช่น บิวทีน เฮกซีน หรือ ออกทีน เข้าไปในแก๊สเอทิลีน ซึ่งโคมอนอเมอร์เหล่านี้จะทำให้เกิดเป็นสายโซ่กิ่งสั้น โดยสมบัติจะขึ้นกับชนิดและปริมาณโคมอนอเมอร์ที่ใช้ ซึ่ง octane-based LLDPE จะมีสมบัติดีกว่าและราคาแพงกว่า hexene-based LLDPE และ hexane-based LLDPE ดีกว่า butane-based LLDPE



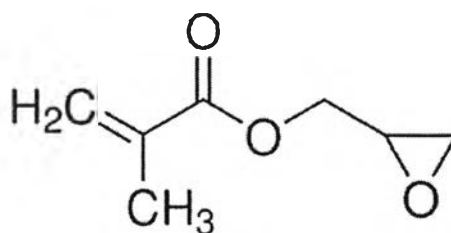
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) [9]

สมบัติที่สำคัญของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่ดีกว่า พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำคือ มีความเหนียว และสามารถผลิตฟิล์มที่บางกว่าได้ ซึ่งเป็นการประหยัดเม็ดพลาสติกในการผลิต ดังนั้นเมื่อใช้เม็ดพลาสติกในปริมาณที่เท่ากัน ปริมาณของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ จะมากกว่าปริมาณของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำในการผลิตพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นจะใช้เวลาและความดันและอุณหภูมิที่ต่ำกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

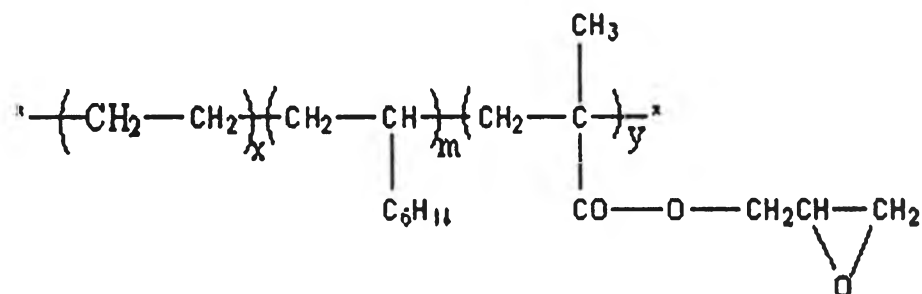
จุดอ่อนของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นเมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำคือ มีความขุ่นมากกว่า เนื่องจาก พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นมีโครงสร้างที่เป็นเส้นตรงมากกว่า แรงยึดเหนี่ยวของสายโซ่จึงมากกว่า ส่งผลให้มีความเป็นผลึกที่สูงกว่า จึงมีความขุ่นเนื่องจากผลึกมากกว่า เนื่องจากสมบัติดังกล่าวของทั้งสอง จึงถูกนิยมนำมาผสมกันด้วยอัตราส่วน 50/50

2.3 ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์

ไกลซิดิลเมทาคริเลต หรือ 2,3-อีพอกซีโพรพิล เมทาคริเลต (2,3-Epoxypropyl methacrylate), เมทาคริลิกแอซิด 2,3-อีพอกซีโพรพิล เอสเทอร์ (Methacrylic acid 2,3-epoxypropyl ester) มีสูตรโครงสร้างทางเคมี คือ $C_7H_{10}O_3$ เป็นของเหลวใส ไม่มีสี โดยแสดงโครงสร้างทางเคมีของไกลซิดิลเมทาคริเลตดังรูปที่ 2.7 และโครงสร้างทางเคมีของไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ แสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่เอพอกซีกับหมู่ปลายของพอลิแล็กติกแอซิด และการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์กับพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น แสดงดังรูปที่ 2.9 และ 2.10 ตามลำดับ



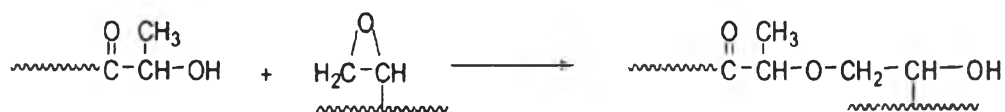
รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของไกลซิดิลเมทาคริเลต [10]



รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ [11]

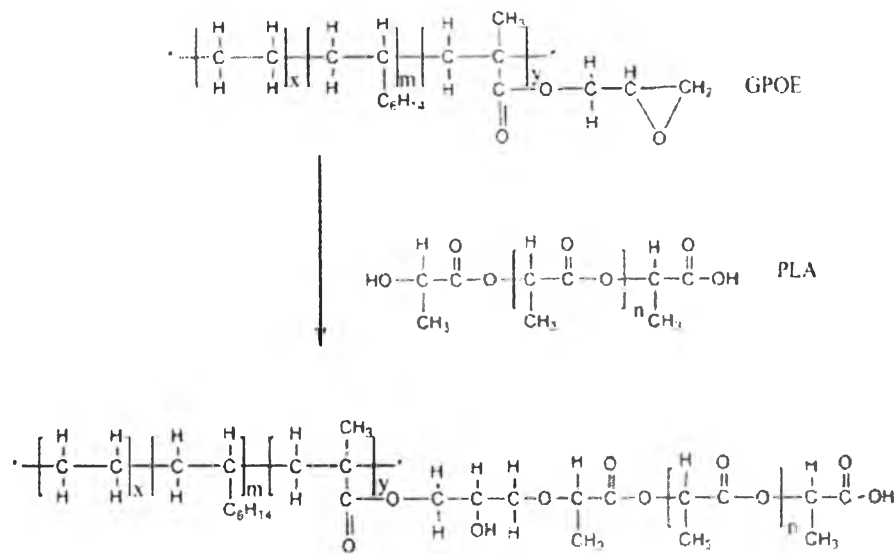


Reaction with Carboxyl



Reaction with Hydroxyl

รูปที่ 2.9 การเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่ฟอกซีกับหมู่ปลายของพอลิเล็กทริกแอซิด [12]



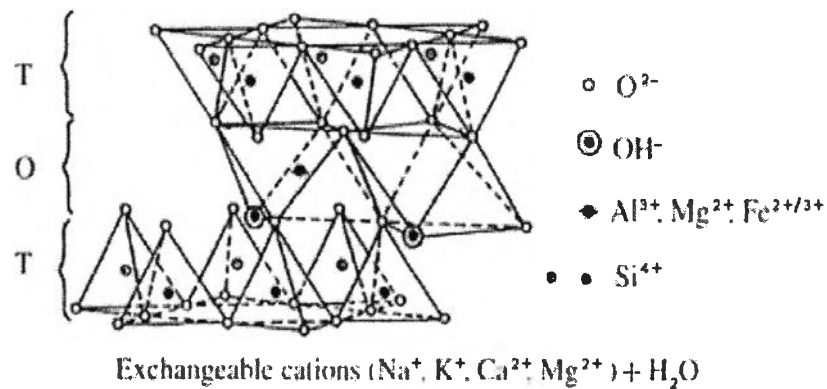
รูปที่ 2.10 การเกิดปฏิกิริยาระหว่างไกลซิดิลเมทาคริลเลตกราฟต์พอลิเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ กับพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น

2.4 มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร (modified montmorillonite, MLS) [13]

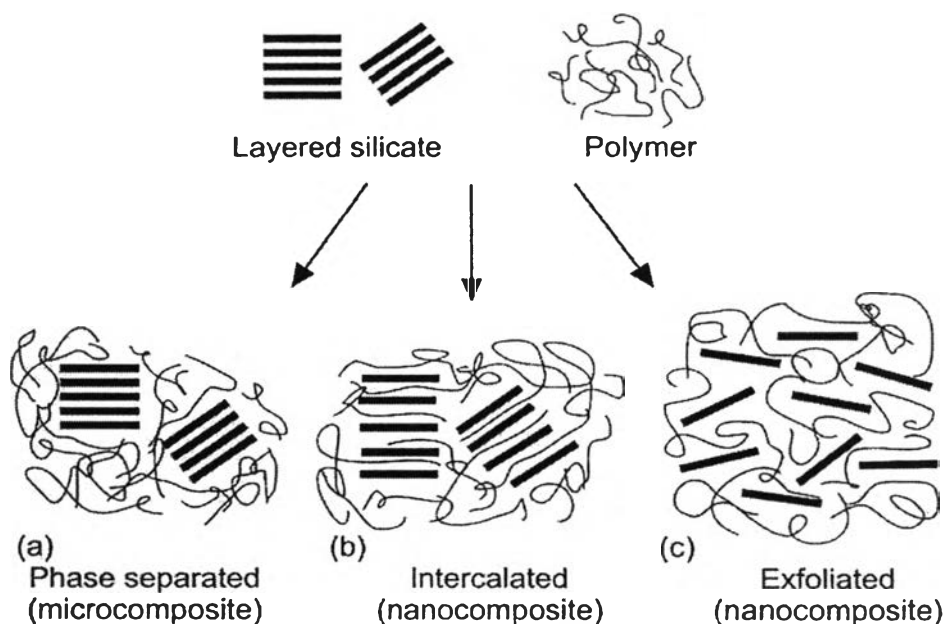
มอนต์มอริลโลไนต์ (montmorillonite) มีขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตร ประกอบด้วยชั้นซิลิเกต (layered silicates) ซึ่งถูกใช้เป็นสารเสริมแรงสำหรับวัสดุนาโนคอมโพสิต จะมีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบ 2:1 ฟิลโลซิลิเกต (phyllosilicates) ผลึกจะประกอบด้วยโครงสร้างผลึก 2 ชั้น ซึ่งส่วนกลางของชั้นออกตะฮีดรอลเป็นอลูมินา หรือแมกนีเซียมและมีชั้นของซิลิกาเตตระฮีดรอล 2 ชั้นประกบอยู่ภายนอก โดยมีออกซิเจนไอออนของออกตะฮีดรอลเป็นตัวเชื่อมกับชั้นของเตตระฮีดรอล โครงสร้างชั้นของมอนต์มอริลโลไนต์แสดงในรูปที่ 2.11 ชั้นเคลือบจะมีความหนาประมาณ 1 นาโนเมตร และขนาดด้านข้างของชั้นเหล่านี้อาจเปลี่ยนแปลงจาก 30 นาโนเมตรถึงหลายไมโครเมตร และจะมากขึ้นตามลักษณะชนิดของซิลิเกต ชั้นซิลิเกตเหล่านี้จัดเรียงเป็นกองซ้อนกัน โดยระหว่างชั้นของซิลิเกตจะถูกยึดเหนี่ยวด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ การแทนที่ของธาตุภายในชั้น เช่น Al^{3+} ถูกแทนที่โดย Mg^{2+} หรือ Fe^{2+} หรือ Mg^{2+} ถูกแทนที่โดย Li^+ ทำให้เกิดประจุลบขึ้น ซึ่งจะถูกทำให้สมดุลประจุโดยธาตุประจุบวกของหมู่ 1 และ 2 แทรกอยู่ระหว่างชั้นซิลิเกต เนื่องจากแรงที่ทำให้ชั้นของซิลิเกตสามารถรวมตัวกันได้นั้นเป็นแรงที่อ่อน ดังนั้นจึงสามารถแทรก

โมเลกุลเล็กเข้าไประหว่างชั้นได้ง่าย เพื่อให้ไฮโดรฟิลิกไฟโรซิลิเกตมีความเป็นออร์แกโนฟิลิกมากขึ้น โดยธาตุประจุบวกที่อยู่ระหว่างชั้นเคลย์สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนด้วยสารลดแรงตึงผิว เช่น แอลคิลเอมโมเนียม หรือ แอลคิลฟอสโฟเนียม เคลย์ที่ถูกปรับปรุงหรือออร์แกโนเคลย์เป็นออร์แกโนฟิลิกนั้นพลังงานพื้นผิวจะลดลงและสามารถเข้ากับพอลิเมอร์ชนิดอินทรีย์ได้มากขึ้น พอลิเมอร์เหล่านี้อาจจะสามารถแทรกเข้าไประหว่างชั้นของซิลิเกตได้ ภายใต้สภาวะของการทดลองที่เหมาะสม

โดยทั่วไปในการทำวัสดุนาโนคอมโพสิตจะมีการดัดแปรอนุภาคมอนต์มอริลโลไนต์ให้มีระยะห่างระหว่างระนาบเหมาะสมในการที่สายโซ่พอลิเมอร์จะเข้าไปแทรกอยู่ได้ ซึ่งการกระจายตัวของอนุภาคมอนต์มอริลโลไนต์ในเนื้อพลาสติกจะแบ่งเป็น 3 แบบคือ phase-separated, intercalated และ exfoliated ดังแสดงในรูปที่ 2.12

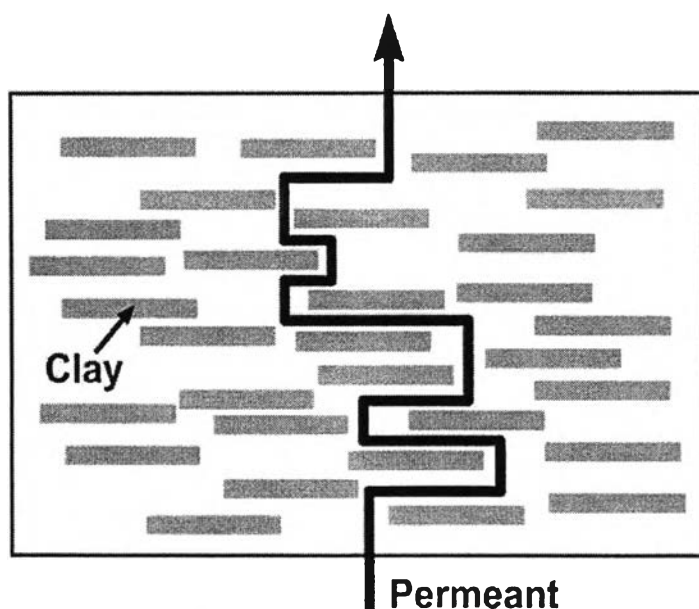


รูปที่ 2.11 โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ (montmorillonite structure)



รูปที่ 2.12 การกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์ในพอลิเมอร์

โดยการกระจายตัวแบบ exfoliated นั้นเป็นการกระจายตัวแบบอุดมคติ ซึ่งเป็นที่ต้องการในวัสดุนาโนคอมโพสิต เนื่องจากเป็นการกระจายตัวที่เหมาะสมที่จะสามารถเสริมแรงได้ดีที่สุด แต่ในทางปฏิบัติอาจเป็นไปได้ยาก ซึ่งงานวิจัยในปัจจุบันทำได้เพียงแค่อัตราส่วนของ intercalated และ exfoliated เท่านั้น นอกจากนี้ยังพบว่าหากมีการกระจายตัวแบบ exfoliated ในวัสดุนาโนคอมโพสิต จะมีสมบัติการสกัดกั้นที่ดีเนื่องจากเกิดเส้นทางที่เรียกว่า เส้นทางคดเคี้ยว (tortuous pathway) ทำให้เพิ่มระยะทางและเวลา รวมถึงชะลอความเร็วในการซึมผ่านของแก๊สและไอน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ทางคดเคี้ยว (tortuous pathway) ของนาโนคอมโพสิต

2.5 พลาสติก [14]

2.5.1 แผ่นและฟิล์มพลาสติก (plastic sheet and film)

ข้อแตกต่างระหว่างแผ่นซีสและฟิล์มพลาสติก คือ ความหนาและลักษณะการม้วนพับ กล่าวคือ ฟิล์มพลาสติก คือพลาสติกที่มีหน้ากว้างและมีลักษณะผิวเรียบ ซึ่งฟิล์มสามารถมีความหนาได้ถึง 0.25 มิลลิเมตร (0.010 in) นอกจากนี้ยังสามารถม้วนได้โดยไม่มีการบิดรูปอย่างถาวร แต่แผ่นซีส จะมีความหนาตั้งแต่ 0.25 มิลลิเมตรขึ้นไป และการม้วนพับจะเกิดการบิดรูปอย่างถาวร

2.5.2 ประวัติความเป็นมาของฟิล์ม

ฟิล์มเซลลูโลสไนเตรท (cellulose nitrate) เป็นฟิล์มทางการค้าชนิดแรกที่มีสมบัติบางประเภทที่ดีเยี่ยม เช่น ด้านความใส ความแข็งแรง ความต้านความชื้น รวมถึงความคงตัวของฟิล์ม จากสมบัติที่ดีเยี่ยมดังกล่าวของฟิล์มเซลลูโลสไนเตรท จึงเป็นที่นิยมในการนำไปผลิตเป็นฟิล์มถ่ายรูป รวมถึงฟิล์มภาพยนตร์ แต่ฟิล์มประเภทนี้มีข้อเสียบางประการ เช่น ติดไฟได้ง่าย

ความเสถียรภาพต่อแสงต่ำ และมีความทนทานต่อตัวทำละลายต่ำ ในภายหลังจึงมีการนำฟิล์มพลาสติกชนิดอื่นเข้ามาแทนที่

การผลิต regenerated cellulose เป็นการพัฒนาต่อมาจากที่กำเนิดฟิล์มเซลลูโลสในเตรท หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า cellophane ซึ่งมาจากภาษาฝรั่งเศสที่มีการผสมคำระหว่าง cellulose กับ diaphane ซึ่ง cellophane แปลว่า โปร่งใส หรือ transparent เช่น กระดาษแก้วที่เห็นในปัจจุบัน ซึ่งสามารถเขียนหรือพิมพ์ได้เนื่องจากตัวมันเองมีขี้ผึ้ง ในการใช้งานครั้งแรกของฟิล์มชนิดนี้ใช้ในการห่อพวกสินค้าฟุ่มเฟือย หรือสินค้าหรูหรา ฟิล์ม regenerated cellulose ยังคงเป็นผู้นำของฟิล์มจนถึงประมาณปี 1950 ด้วยความที่ฟิล์มชนิดนี้เป็นฟิล์มชนิดใหม่ จึงมีราคาแพง อาจแพงสำหรับการนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์มากเกินไปทำให้ใช้งานได้อย่างไม่คุ้มค่านัก จนกระทั่งในปีต่อมาฟิล์ม regenerated cellulose ได้มีคู่แข่งเพื่อจะมาแทนที่มากมาย เช่น ฟิล์มพอลิเอทิลีน (PE) รวมถึงพอลิโพรพิลีน (PP) และพอลิโพลีเอทิลีนชนิดอื่น ๆ ด้วย

ต่อมาในปี 1946 มีการพัฒนากระบวนการขึ้นรูปฟิล์ม ได้แก่ กระบวนการอัดรีดฟิล์ม (extrusion process) ตามด้วย chill roll casting method เป็นการแช่เย็นลูกกลิ้ง ทำให้ลูกกลิ้งมีความเย็นจึงมีผลต่อฟิล์มเมื่อมีการสัมผัสเช่น มีความมันเงามากขึ้น และโปร่งใสมากขึ้น เนื่องจากฟิล์มถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วทำให้ผลึกไม่มีเวลาในการจัดเรียงตัวเกิดเป็นเล็ก ๆ ทำให้แสงส่องผ่านได้ และในปีต่อมาจึงได้มีการผลิตถุงพลาสติกที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการเป่าได้ (blown tubular film)

2.6 ฟิล์มหลายชั้น (multilayer film) [14]

ฟิล์มหลายชั้นประกอบไปด้วยฟิล์มพลาสติกต่างชนิดหรือพลาสติกกับวัสดุอื่น โดยจะเป็นการนำจุดเด่นของวัสดุแต่ละชนิดมาใช้ร่วมกัน ซึ่งจะให้ประโยชน์ที่แตกต่างกันออกไปแล้วแต่ชนิดของพอลิเมอร์ที่นำมาใช้เป็นชั้นกลาง เพราะไม่มีวัสดุใดที่มีสมบัติดีในทุกๆ ด้าน การผลิตฟิล์มหลายชั้นจะเกี่ยวข้องกับการพัฒนาพอลิเมอร์ชนิดใหม่ หรือการปรับปรุงพอลิเมอร์ที่มีอยู่แล้วให้มีสมบัติดีขึ้น

2.6.1 วิธีการผลิตฟิล์มหลายชั้น

การผลิตฟิล์มหลายชั้นสำหรับงานบรรจุภัณฑ์ จะมี 3 วิธีหลักๆ ได้แก่

2.6.1.1 Co-extrusion หรือ การอัดรีดร่วม

เป็นการนำเทอร์โมพลาสติกตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป มาทำให้หลอมเหลวแล้วอัดรีดออกมาเป็นฟิล์มหลายชั้น ซึ่งมักจะมีชั้นกาวหรือชั้นที่เพิ่มการยึดติด (tie layer) ระหว่างชั้นพลาสติก เครื่องจักรที่ใช้ประกอบด้วยเครื่องอัดรีด (extruder) มากกว่า 1 เครื่อง ต่ออยู่กับหัวตาย (die head) เพียงหัวเดียว ซึ่งต้องมีการควบคุมอัตราเร็วของสกรู (screw speed) ความดันหลอมละลาย (melt pressure) อุณหภูมิ และพลังขับเคลื่อนของเครื่องอัดรีดอย่างถูกต้องแม่นยำ การอัดรีดร่วมไม่ต้องใช้ตัวทำละลาย จึงไม่ก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมเหมือนเช่นเทคนิคการประกบ (lamination)

2.6.1.2 Extrusion coating

เป็นการนำพอลิเมอร์ที่เป็นเทอร์โมพลาสติกมาทำให้หลอมเหลวในเครื่องอัดรีด แล้วอัดรีดผ่านหัวตายลงบนผิววัสดุที่เคลื่อนที่อยู่ เช่น กระดาษ อะลูมิเนียมฟอยล์ และฟิล์มเซลลูโลส เป็นต้น เพื่อเคลือบให้ติดอยู่บนวัสดุเหล่านั้น ซึ่งอัตราการเคลื่อนที่ของวัสดุรองพื้นจะเป็นตัวควบคุมความหนาของฟิล์ม โดยฟิล์มของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ถูกอัดรีดออกมาจะถูกอัดลงบนวัสดุรองพื้นโดยไม่ต้องใช้กาว เมื่อฟิล์มที่หลอมเหลวผ่านหัวตายออกมา ก็จะถูกดึงลงไปในช่วงนี้ระหว่างลูกกลิ้งสองลูกที่อยู่ใต้หัวตายพอดี โดยวัสดุรองพื้นจะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วกว่าฟิล์มที่ถูกอัดรีดออกมา พร้อมกับดึงฟิล์มที่ร้อนให้ติดไป และมีความหนาตามต้องการ ซึ่งความดันระหว่างลูกกลิ้งเย็น และลูกกลิ้งอัด จะกดฟิล์มให้ติดกับวัสดุรองพื้น ในระหว่างนั้นฟิล์มที่หลอมเหลวจะถูกทำให้เย็นลงโดยน้ำที่หล่ออยู่ภายในลูกกลิ้งเย็นซึ่งชุบด้วยโครเมียม ส่วนลูกกลิ้งอัดก็ทำจากโลหะ แต่จะมียางสวมทับอยู่ ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ยางนีโอพรีน (neoprene rubber) หรือ ยางซิลิโคน (silicone rubber) วัสดุที่ถูกเคลือบเมื่อผ่านลูกกลิ้งเย็นออกมาแล้วจะถูกดึงไปบนลูกกลิ้งตัด (slitter roll) ซึ่งเคลื่อนที่เพื่อตัดขอบที่ไม่ได้ถูกเคลือบ และกำจัดเม็ดพลาสติกที่เกิดตาม

ขอบของฟิล์มออกไป เมื่อตกแต่งขอบเรียบร้อยแล้วก็จะถูกม้วนเก็บ โดยการทำให้ extrusion coating ต้องใช้อุณหภูมิสูงเพื่อลดความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลว

2.6.1.3 Adhesive lamination หรือ การประกบด้วยกาว

เป็นเทคนิคที่นำฟิล์มพลาสติกหรือวัสดุอื่น เช่น กระดาษ อะลูมิเนียมฟอยล์ มาประกบติดกันโดยใช้กาวเป็นตัวเชื่อมประสานที่ผิว แบ่งออกได้เป็น 3 แบบ ได้แก่

1) การประกบเปียก (*wet lamination*) ใช้กาวที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ ทั้งกาวธรรมชาติและกาวสังเคราะห์ ซึ่งจะสะดวกและปลอดภัยในการนำไปใช้งาน มีการยึดติดที่แข็งแรง และราคาค่อนข้างถูก โดยมีการนำกาวสังเคราะห์ที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบมาใช้ในงานบรรจุภัณฑ์อย่างมาก โดยกาวสังเคราะห์ที่นำมาใช้จะมีสมบัติได้หลากหลายโดยการเติมพลาสติกไซเซออร์ฟิลเลอร์ สารรักษาสภาพ และสารกำจัดฟอง ซึ่งจะติดได้ทั้งกระจก กระดาษ พลาสติกส่วนใหญ่ และโลหะ จะสามารถแข็งตัวได้เร็ว มีกลิ่น รส และความเป็นพิษไม่มาก

2) การประกบแห้ง (*dry lamination*) จะใช้กาวที่มีตัวทำละลายเป็นส่วนประกอบ ซึ่งจะเป็นกาวสังเคราะห์ โดยจะมีการใช้งานที่ค่อนข้างแคบเนื่องจากมีปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม และความปลอดภัย จากความเป็นพิษและติดไฟได้ง่าย แต่กาวสังเคราะห์นี้จะแห้งและแข็งตัวเร็วกว่ากาวที่มีตัวทำละลายเป็นน้ำ

3) การประกบร้อน (*hot lamination*) เป็นการใช้กาวซึ่งเป็นของแข็ง 100 เปอร์เซ็นต์ ได้จากเทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์ จะถูกใช้งานเมื่ออยู่ในสถานะหลอมเหลว และเมื่อทิ้งไว้ให้เย็นจะเกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วทำให้มีอัตราการผลิตสูง แต่ต้องระวังไม่ให้แข็งตัวก่อนที่จะทำให้ผิวเปียก เพราะจะทำให้เกิดการยึดติดที่ไม่ดี

2.7 กระบวนการขึ้นรูป

2.7.1 กระบวนการอัดรีด (extrusion process) [15-17]

การอัดรีดเป็นกระบวนการแปรรูปพื้นฐานที่สำคัญกระบวนการหนึ่งในอุตสาหกรรมพลาสติก ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันมาก เนื่องจากค่าใช้จ่ายในเรื่องของต้นทุนและการดำเนินการมีราคาถูกลงกว่ากระบวนการอื่น โดยกระบวนการนี้เป็นการเปลี่ยนวัสดุให้มีรูปร่างที่ต้องการได้ โดยการป้อนพลาสติกเข้าไปแล้วให้ความร้อนแก่พลาสติกเพื่อหลอมเหลวแล้วอัดผ่านหัวดายที่มีรูปร่างต่างๆ ซึ่งการแปรรูปพลาสติกโดยกระบวนการอัดรีดนี้จัดเป็นกระบวนการแปรรูปแบบต่อเนื่อง (continuous process) และผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นผลิตภัณฑ์ในลักษณะของผลิตภัณฑ์แบบกึ่งสำเร็จรูป (semi-finish product) ที่ต้องนำไปผ่านกระบวนการแปรรูปอื่นๆ ต่อไปก่อนที่จะนำไปใช้งาน นอกจากกระบวนการอัดรีดจะเป็นการแปรรูปที่สำคัญในอุตสาหกรรมพลาสติกแล้ว ยังมีความสำคัญกับอุตสาหกรรมอื่นๆ อีกหลายประเภท เช่น การผลิตเซรามิกส์ การผลิตวัสดุก่อสร้างต่างๆ เช่น อิฐ และการแปรรูปอาหาร เป็นต้น

กระบวนการอัดรีดเป็นกระบวนการแปรรูปพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) เนื่องจากพลาสติกชนิดดังกล่าวสามารถหลอมเหลวได้เมื่อได้รับความร้อน จึงง่ายต่อการแปรรูป วัตถุดิบที่ใช้ในการอัดรีดส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นพลาสติกผง (plastic powder) หรือเป็นเม็ดพลาสติก (pellets) โดยป้อนวัตถุดิบเข้าไปแล้วให้ความร้อนเพื่อหลอมเป็นเนื้อเดียวกันด้วยการให้ความร้อนผ่านบาร์เรล (barrel) จากนั้นจะถูกอัด ผสม ด้วยความดันสวนทางที่เกิดขึ้นในระหว่างที่มีการไหลผ่านไปตามท่อในบาร์เรล และพลาสติกหลอมจะถูกผลักดันด้วยการหมุนขับเคลื่อนของสกรูไหลผ่านไปยังหัวดาย (die) และแข็งตัวเมื่อผ่านกระบวนการหล่อเย็น (cooling) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอัดรีด ได้แก่ ท่อขนาดต่างๆ (pipe) แผ่นพลาสติก (sheet) ฟิล์มพลาสติก (film) เส้นใย (fiber) และชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นโพรไฟล์ (profiles) รูปแบบต่างๆ เป็นต้น นอกจากการอัดรีดจะเป็นการแปรรูปพลาสติกโดยตรงแล้ว ยังเป็นอุปกรณ์หลักที่สำคัญในเครื่องแปรรูปพลาสติกประเภทอื่นๆ เช่น การเคลือบพลาสติกลงบนวัสดุชนิดอื่น (extrusion covering process) การอัดรีดเป่า (extrusion blow molding) และการเป่าฟิล์ม (extrusion blow film process) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีความสำคัญในการใช้เป็นเครื่องผสมเพื่อเตรียมคอมพาวด์พลาสติก

2.7.1.1 เครื่องอัดรีด (extruder)

เครื่องอัดรีดส่วนใหญ่ที่มีการใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติกนั้นมีอยู่หลายชนิดแตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น ในเรื่องของลักษณะการใช้งานของเครื่อง (mode of operation) ซึ่งมีอยู่ 2 แบบคือ การใช้งานแบบต่อเนื่อง (continuous) และแบบไม่ต่อเนื่อง (discontinuous) ซึ่งเครื่องอัดรีดที่มีการทำงานในลักษณะต่อเนื่องจะเป็นเครื่องอัดรีดที่มีสกรู (screw extruder) และแบบดิสก์ (disk extruder) ส่วนเครื่องอัดรีดที่ทำงานในลักษณะที่ไม่ต่อเนื่อง จะเป็นเครื่องอัดรีดที่มีสกรูเลื่อนไปมาในแนวแกนของสกรูได้ (reciprocating screw extruder) และเครื่องอัดรีดแบบลูกสูบ (ram extruder) เครื่องอัดรีดในลักษณะแบบนี้จะถูกใช้เป็นส่วนประกอบสำคัญในกระบวนการฉีดพลาสติก (injection molding) ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงเพียงเครื่องอัดรีดที่มีสกรู ที่มีการทำงานแบบต่อเนื่อง

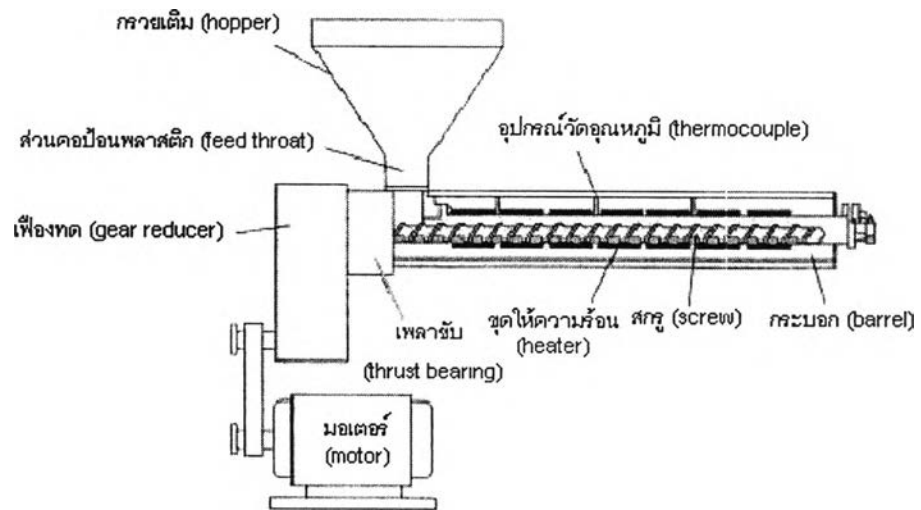
อุตสาหกรรมพลาสติกที่มีการผลิตและแปรรูปพลาสติกจะมีการใช้เครื่องอัดรีดอยู่ 3 ชนิด ได้แก่ เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (single screw) เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin screw extruder) และเครื่องอัดรีดแบบหลายสกรู (multi screw extruder) ซึ่งในอุตสาหกรรมพลาสติกนิยมใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวและคู่มากกว่า ในที่นี้จะอธิบายเพียงสองชนิดนี้เท่านั้น

1. เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (single screw extruder)

เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ดังแสดงในรูปที่ 2.14 มีส่วนประกอบหลักที่ประกอบด้วยมอเตอร์ (motor) เพื่อลดความเร็ว (gear reducer) เพลาขับ (thrust bearing) บาร์เรล (barrel) ชุดให้ความร้อน (heater) สกรู (screw) อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (thermocouple) ส่วนคอป้อนพลาสติก (feed throat) และกรวยเติมพลาสติก (hopper) ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.14 เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว

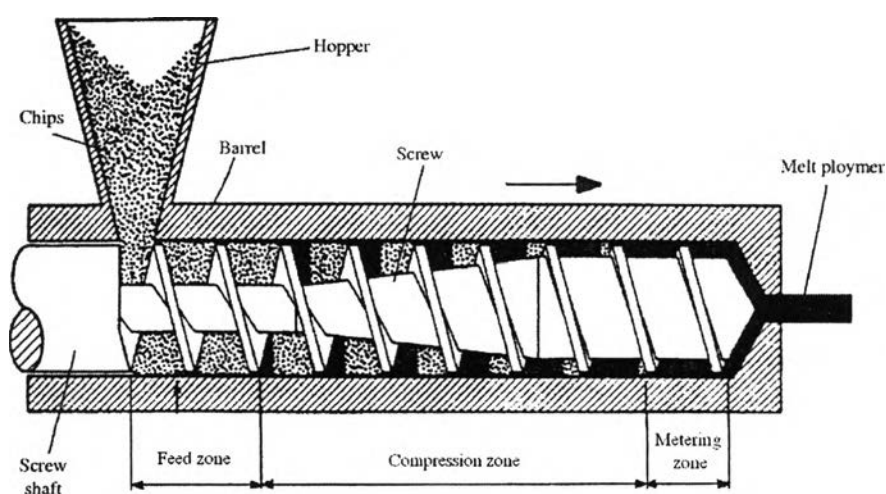


รูปที่ 2.15 ส่วนประกอบหลักของเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว [16]

1.1 สกรู (screw)

สกรูของเครื่องอัดรีดถือเป็นส่วนที่สำคัญที่สุด ซึ่งต้องให้ความละเอียดรอบคอบในการออกแบบเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีผลต่อการผสมและแปรรูปเทอร์โมพลาสติก ถ้าออกแบบไม่ดีอาจทำให้การผสม หรือ การหลอมเหลวของพลาสติกเกิดได้แบบไม่สมบูรณ์ หน้าที่หลักของสกรูคือ รับเม็ดหรือผงพลาสติกชนิดต่างๆ จากกรวยเติมพลาสติก (hopper) เข้ามาในบาร์เรล (barrel) โดยมีการผสมสารเติมแต่งพลาสติกเช่น สี สารคู่ควบ สารป้องกันการเสื่อมสภาพ และสารเพิ่มความเสถียร กับเม็ดหรือผงพลาสติกเข้าด้วยกันในอัตราส่วนต่างๆ จากนั้นพลาสติกจะถูกหลอมด้วยความร้อนที่ได้จากชุดให้ความร้อน (heater) ซึ่งสกรูจะหมุนและให้แรงเฉือน (shear force) เพื่อช่วยเพิ่มความดันและเอาชนะแรงต้านของพลาสติกจนเกิดความร้อนด้วยเช่นกัน ทำให้พลาสติกหลอมได้ดีขึ้น และสกรูจะทำการขับเคลื่อนพลาสติกหลอมนี้่ออกสู่ด้านนอกโดยผ่านหัวตาย

สกรูของเครื่องอัดรีดจะแบ่งออกเป็นส่วนต่างๆเพื่อทำหน้าที่ในการช่วยผสมและขับเคลื่อนพลาสติกไปยังส่วนอื่นๆของสกรูและหัวตาย โดยจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนสำคัญคือ ส่วนป้อน (feed zone) ส่วนหลอมอัด (compression zone หรือ transition zone) และส่วนส่งพลาสติกหลอม (metering zone) [17] ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ส่วนสำคัญ 3 ส่วนของสกรูในเครื่องอัดรีด [17]

เมื่อทำการเติมเม็ดหรือผงพลาสติกผ่านทางกรวยเติมส่วนแรกคือส่วนป้อน (feed zone) จะเป็นตัวรับเข้ามา เมื่อสังเกตที่ความลึกของร่องสกรูในโซนนี้จะมีค่าความลึกมากที่สุด เพื่อสำหรับการดึงเม็ดหรือผงพลาสติกลงมาเติมในบาร์เรล (barrel) และเริ่มให้ความร้อนแก่พลาสติก จากนั้นจะเกิดการผสมกันขึ้นระหว่างสารเติมแต่งกับพลาสติก ความลึกและความยาวของร่องของสกรูที่เหมาะสมทำให้ส่วนนี้สามารถบรรจุเม็ดหรือผงพลาสติกได้มากพอที่จะป้อนเข้าสู่ช่วงต่อไป นั่นก็คือ ส่วนหลอมอัด (compression zone)

ส่วนที่ถัดจากส่วนป้อนคือ ส่วนหลอมอัด (compression zone) เมื่อสังเกตที่ความลึกของร่องในโซนนี้จะมีค่าความลึกค่อยๆ น้อยลง เพื่อให้พลาสติกที่ถูกป้อนเข้ามาจากส่วนป้อนเกิดแรงดันที่สูงขึ้น และทำให้ความหนาของชั้นพลาสติกที่ห่อหุ้มสกรูลดลง เนื้อพลาสติกมีระยะที่ใกล้ชิดกับบาร์เรลมากขึ้นทำให้เกิดการส่งผ่านของความร้อนจากบาร์เรลสู่พลาสติกได้ดีขึ้น รวมถึงเกิดแรงเสียดทานที่สูงเนื่องจากการหมุนของสกรูในโซนนี้ด้วย ทำให้พลาสติกหลอมผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกัน

ส่วนสุดท้ายของสกรูในเครื่องอัดรีดคือ ส่วนส่งพลาสติกหลอม (metering zone) เมื่อสังเกตที่ความลึกของร่องสกรูจะพบว่ามีความคงที่ไปจนถึงหัวตาย และความลึกจะน้อยกว่าส่วนป้อน พลาสติกหลอมที่เข้ามาอยู่ในส่วนนี้จะมีค่าความดันเพิ่มขึ้นและมีความเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสมบูรณ์ก่อนที่จะออกสู่ออกหัวตาย

1.2 บาร์เรล (barrel)

บาร์เรลเป็นส่วนที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งของเครื่องอัดรีด เนื่องจากทำหน้าที่เป็นตัวบรรจุสกรูไว้ และเป็นตัวกลางในการรับความร้อนจาก heater แล้วถ่ายเทมายังพลาสติกเพื่อให้พลาสติกหลอมเหลว พื้นที่ระหว่างสกรูและบาร์เรลจะมีช่องว่าง ซึ่งสกรูจะไม่สัมผัสถูกกับผนังบาร์เรลและลอยอยู่ขณะที่มีการผสมและอัดหลอมพลาสติก โดยทั่วไปแล้วส่วนของบาร์เรลบริเวณส่วนป้อนพลาสติก (feed zone) ด้านล่างจะมีการใช้น้ำหล่อเย็นในบริเวณนี้เพื่อป้องกันไม่ให้พลาสติกที่ถูกป้อนเข้ามาติดกันเป็นก้อนเนื่องจากความร้อน และสามารถไหลลงไปสู่ส่วนอื่นๆ ได้ ถัดมาจากส่วนป้อนจะมีการห่อหุ้มบาร์เรลด้วยแผ่นให้ความร้อนเป็นช่วงๆ และรอบๆ ก็จะมีระบบ

น้ำหล่อเย็นเพื่อสามารถควบคุมอุณหภูมิของบาร์เรลรวมถึงพลาสติกหลอมด้วย เช่น การปรับเพิ่มหรือลดอุณหภูมิ โดยเฉพาะการลดอุณหภูมิต้องใช้ระบบน้ำหล่อเย็น หรือถ้าความร้อนสูงกว่าที่ระบบตั้งไว้ ระบบหล่อเย็นก็จะทำงานเช่นกัน ในเรื่องของวัสดุที่นำมาใช้ทำบาร์เรลนั้นต้องเป็นวัสดุที่ทนต่อความดันที่สูงมาก รวมถึงการขัดสี และการกัดกร่อน เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการผสมหรือขับเคลื่อนพลาสติกหลอม ต้องใช้ความดันหลายค่าขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติก ซึ่งอาจใช้ความดันที่สูงสำหรับพลาสติกบางชนิด ดังนั้นจึงต้องทนความดันให้ครอบคลุมชนิดของพลาสติกทั้งหมด รวมถึงแรงเสียดทานจนเกิดการขัดสี และกัดกร่อนของพลาสติกบางชนิดด้วย ดังนั้นปัจจุบันจึงมีการใช้วัสดุที่เป็นโลหะสองชนิด (bimetallic barrel) ด้านนอกเป็นอัลลอยด์ของอลูมิเนียม ส่วนด้านในเป็นชั้นบาง ซึ่งผสมด้วยอัลลอยด์ชนิดต่างๆของเหล็ก นิกเกิล โครเมียม อัลลอยด์ของคาร์บอน และโครเมียม ซึ่งมีความแข็ง มีความคงทนต่อการขัดสี และการสึกกร่อนสูง ส่วนนอกของบาร์เรลจะทำจากอัลลอยด์ของอลูมิเนียม ซึ่งมีการนำความร้อนดีมากโดยจะมีการติดตั้งชุดให้ความร้อนชุดหล่อเย็น และอุปกรณ์เซ็นเซอร์อื่นๆ (sensors)

1.3 แผ่นเบรกเกอร์ ตะแกรงกรอง และอะแดปเตอร์ (breaker plate, dcreen pack and adapter)

แผ่นเบรกเกอร์ ตะแกรงกรอง และอะแดปเตอร์ ทั้งสามส่วนนี้จะอยู่ที่ส่วนปลายของบาร์เรลของเครื่องอัดรีด โดยจะมีอะแดปเตอร์ยึดตะแกรงกรองและแผ่นเบรกเกอร์ไว้ แผ่นเบรกเกอร์จะเป็นแผ่นโลหะกลมที่มีการเจาะรูเป็นจำนวนมากซึ่งรูจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3 – 5 มิลลิเมตร ทำหน้าที่ปรับลักษณะการไหลที่เป็นเกลียวของพลาสติกหลอมที่เกิดจากการหมุนของสกรูในขณะขับเคลื่อนให้มีลักษณะการไหลแบบลามินาร์หรือการไหลแบบเป็นชั้นๆ ให้เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงมากขึ้น การไหลผ่านเบรกเกอร์นี้จะช่วยให้พลาสติกหลอมเกิดการผสมเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น และมีอุณหภูมิของพลาสติกหลอมที่ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้เบรกเกอร์ยังทำหน้าที่เป็นตัวรองรับตะแกรงกรอง เพื่อกรองสิ่งสกปรกหรือพลาสติกที่เกิดการหลอมไม่สมบูรณ์ไม่ให้ผ่านออกมาจากหัวตาย เป็นการป้องกันการบดพองของชิ้นงาน ส่วนอะแดปเตอร์จะเป็นตัวยึดแผ่นเบรกเกอร์ เป็นตัวกำหนดทิศทางการไหลของพลาสติกหลอมไหลให้ผ่านไปยังหัวตาย ซึ่งมีการ

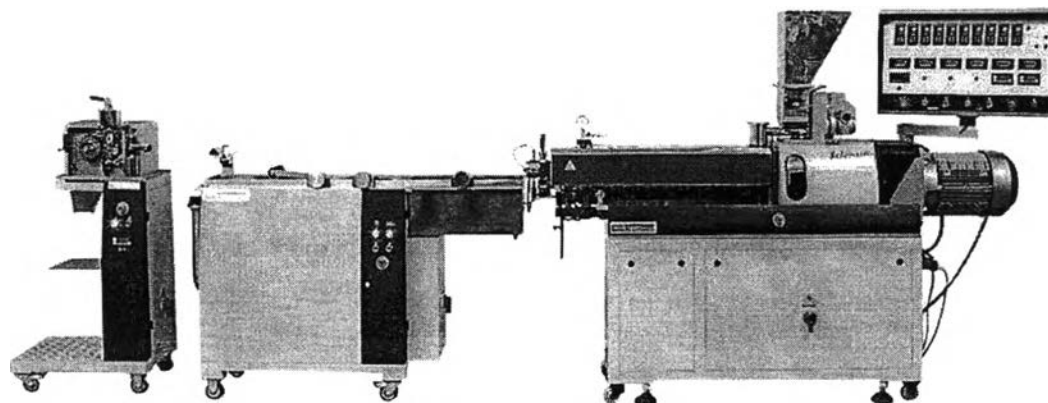
ติดตั้งชุดให้ความร้อน ชุดวัดอุณหภูมิและความดันของพลาสติกหลอมบริเวณหัวตาย เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความดันสูงเกินไป

1.4 หัวตาย (die)

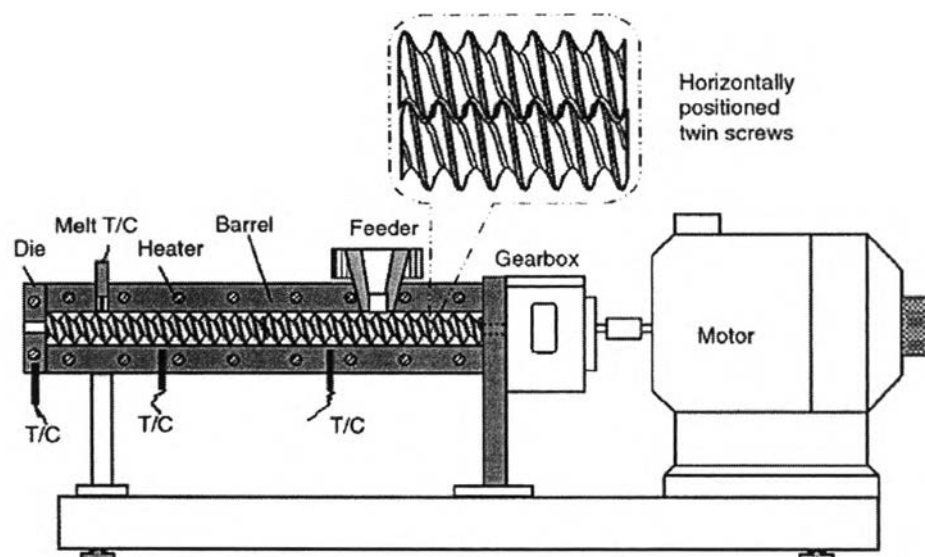
หัวตายของเครื่องอัดรีดเป็นส่วนสุดท้ายที่ติดอยู่ส่วนปลายของบาร์เรล ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนพลาสติกหลอมให้มีรูปร่างตามลักษณะของหัวตาย ซึ่งรูปร่างหลากหลายขึ้นกับความต้องการของผู้ผลิตและออกแบบรวมถึงชนิดของผลิตภัณฑ์ โดยชนิดของผลิตภัณฑ์ที่นิยมผลิตได้แก่ แผ่นพลาสติก ฟิล์มพลาสติก ท่อต่างๆ และเส้นใย เป็นต้น

2.7.1.2 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin screw extruder) [18-19]

เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ประกอบด้วยสกรูสองตัวอยู่ในบาร์เรลของเครื่องอัดรีดและส่วนประกอบอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.17 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่



รูปที่ 2.18 ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ [18]

การแบ่งประเภทของเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่จะแบ่งตามทิศทางการหมุนของสกรู และระดับของการอินเทอร์เมท (intermeshing) หมายถึงการหมุนของสกรูในลักษณะที่สัมผัสเกี่ยวของสกรูตัวหนึ่งแทรกตัวอยู่ในร่องของสกรูอีกตัวหนึ่ง หรือการขบกันของฟันเฟืองของสกรู ทิศทางการหมุนของสกรูจะแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ หมุนในทิศทางเดียวกัน (co-rotating screws) ดังแสดงในรูปที่ 2.19 การหมุนของสกรูจะหมุนไปในทางเดียวกันทั้งคู่ จะเกิดการส่งผ่านพลาสติกจากร่องของสกรูตัวหนึ่งไปยังร่องสกรูอีกตัวหนึ่ง ทำให้เกิดแรงเฉือน และในการออกออกแบบจะให้เกลียวขบกันอย่างสนิททำให้เกิดการนวดผสม จึงนิยมมาใช้ในการทำเม็ดผสม (compounding) และการหมุนในทิศทางตรงข้ามกันหรือสวนทางกัน (counter rotating screws) ดังแสดงในรูปที่ 2.20 กลไกจะต่างกับแบบสกรูที่หมุนทางเดียวกันตรงที่ทำหน้าที่แค่ลำเลียง ทำให้มีการเฉือนต่ำ และได้รับความร้อนจากการเฉือนน้อย จึงไม่เหมาะกับการทำคอมพาวด์



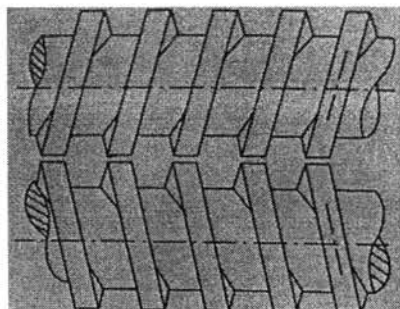
รูปที่ 2.19 สกรูคู่แบบหมุนในทิศทางเดียวกัน (co-rotating screws) [19]



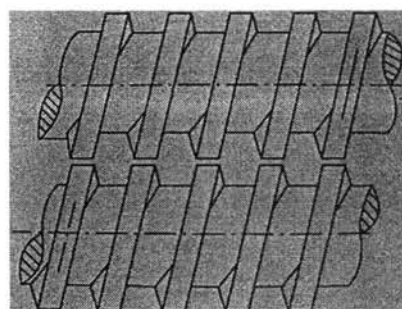
รูปที่ 2.20 สกรูคู่แบบหมุนในทิศทางตรงข้ามกันหรือสวนทางกัน (counter rotating screws) [19]

นอกจากนี้การขบกันของฟันเฟืองของสกรูยังแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ แบบฟันไม่ขบกัน (non-intermeshing) แบบฟันขบกันหลวมๆ (partially intermeshing) และแบบฟันขบกันสนิท (fully intermeshing) ดังแสดงในรูปที่ 2.21

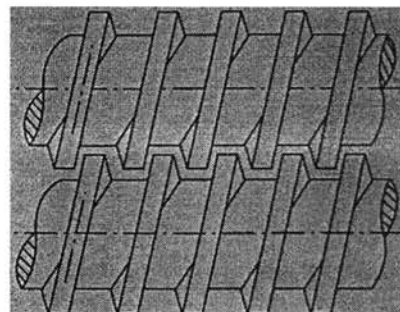
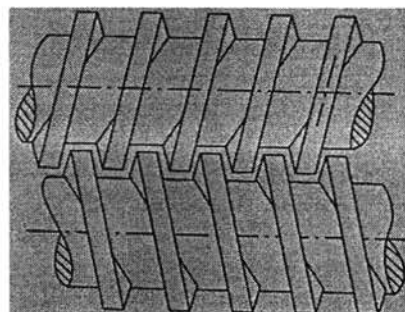
หมุนในทิศทางเดียวกัน



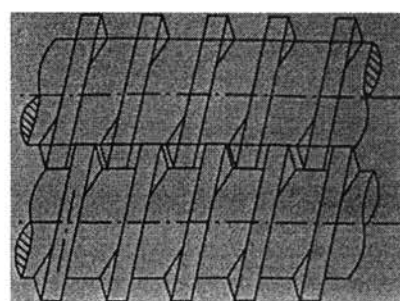
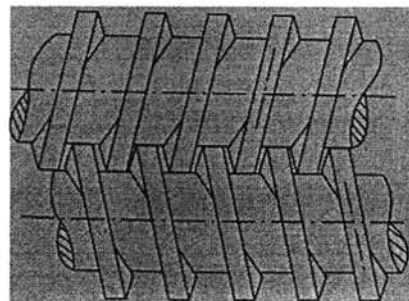
หมุนในทิศทางสวนทางกัน



พื้นไม่ขบกัน



พื้นขบกันหลวมๆ

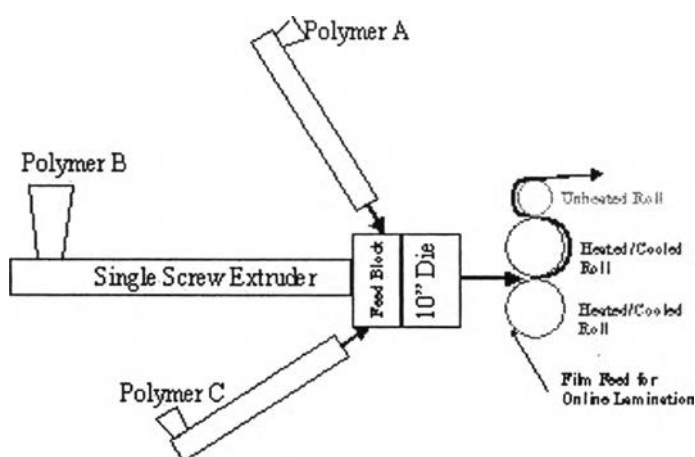


พื้นขบกันสนิท

รูปที่ 2.21 ลักษณะการขบกันของพื้นเฟืองของสกรูในทั้งสองทิศทางการหมุน [19]

2.7.2 กระบวนการอัดรีดร่วม (co-extrusion process) [20]

การอัดรีดร่วม เป็นกระบวนการอัดรีดพอลิเมอร์หลอมด้วยเครื่องอัดรีดมากกว่า 2 ตัวขึ้นไป โดยอัดรีดผ่านหัวตายของเครื่องอัดรีดแต่ละตัวต่างชุดกันตามจำนวนชนิดของพอลิเมอร์ แล้วมารวมกันได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ซึ่งแผนภาพเครื่องอัดรีดร่วมได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.22 โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเทคนิคนี้ ได้แก่ ชิ้นงาน แผ่นซีส แผ่นฟิล์ม ฟิล์มเป่า และอื่นๆ ที่ต้องการได้พลาสติกหลายชนิดประกอบเข้าด้วยกันเป็นชั้นๆ เพื่อช่วยในเรื่องของการปรับปรุงสมบัติให้ได้ชิ้นงานที่มีสมบัติตามความต้องการ ซึ่งพลาสติกแต่ละชั้นจะทำหน้าที่แตกต่างกันออกไป ทำให้ชิ้นงานหนึ่งมีคุณสมบัติหลายประการด้วย



รูปที่ 2.22 แผนภาพเครื่องอัดรีดร่วม (co-extruder)

ประโยชน์ของการอัดรีดร่วมจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติที่ดี ได้แก่ มีสมบัติเป็นตัวสกัดกันที่ดี (barrier properties) สกัดกันแก๊สและไอน้ำที่ดี ทำให้เหมาะแก่การนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์ต่างๆ ที่สามารถยืดอายุให้กับผลิตภัณฑ์ ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติหลายด้านทำให้สามารถใช้งานได้หลากหลาย ลดต้นทุนในเรื่องค่าใช้จ่ายของวัสดุพอลิเมอร์หรือสารเติมแต่ง รวมถึงไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องลามิเนทเพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ดังกล่าว จึงลดค่าใช้จ่ายลงในเรื่องของการผลิต ส่วนข้อเสียของการอัดรีดร่วมก็คือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเทคนิคนี้จะมีวัสดุหลายชนิด จึงทำการ รีไซเคิลได้ยาก เช่น ถูขมขบเคี้ยวต่างๆ ซึ่งทำจากวัสดุเรียงเป็นชั้นๆ ที่ประกอบไปด้วย

พลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีน ชั้นกาว (adhesive layer) ชั้นอลูมิเนียม ชั้น PVDC (SARAN) และ Scrap (recycled material) และประกบปิดด้วยพอลิโพรพิลีนอีกที ซึ่งเครื่องมือในการทำผลิตภัณฑ์ดังกล่าวมีราคาแพงมาก และกระบวนการผลิตก็ทำได้ยากเช่นกัน

2.7.2.1 วัสดุพอลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิตด้วยการอัดรีดร่วม

พอลิเมอร์ที่ใช้ในการอัดรีดร่วม ต้องมีคุณสมบัติพิเศษและเหมาะสมกับกระบวนการผลิต กล่าวคือ พอลิเมอร์ดังกล่าวต้องมีความแข็งแรงขณะหลอมเหลวและมีความหนืดที่เหมาะสมเพื่อให้พอลิเมอร์หลอมสามารถที่จะค้ำตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างตาย ถ้าต้องการเป่าเป็นฟิล์มควรมีความหนืดที่สูงเพื่อให้พอลิเมอร์หลอมเหลวสามารถถูกประคองขึ้นไปและเป่าเป็นลูกโป่งได้ ถ้าต้องการขึ้นรูปแผ่นซีส ก็ต้องมีความหนืดสูงเช่นกันเพื่อสามารถดึงเป็นแผ่นซีสได้ และถ้าต้องการขึ้นรูปแบบฉีด ความหนืดก็ควรที่จะต่ำเพื่อให้พอลิเมอร์หลอมสามารถไหลได้ดีในแม่แบบ ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีความสวยงาม พอลิเมอร์ที่นิยมนำมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ด้วยกระบวนการขึ้นรูปนี้ คือ

1) พอลิเอทิลีน แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene, LDPE) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (linear low density polyethylene, LLDPE) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (high density polyethylene, HDPE) ซึ่งพวกที่มีความหนาแน่นสูงจะให้จุดหลอมเหลว ความแข็งแรงทางกายภาพ ความทนต่อสารเคมี และความทนทานต่อการแตกหักเนื่องจากสภาวะแวดล้อม (ESCR) สูงกว่าพวกที่มีความหนาแน่นต่ำ

2) พอลิโพรพิลีน (polypropylene, PP) มีจุดหลอมเหลวสูงกว่าพอลิเอทิลีน มีความแข็งแรง ทนต่อแรงดัดงอ ทนทานต่อสารเคมีได้ดีกว่า LDPE แต่มีราคาแพงเป็นสองเท่าของ LDPE นอกจากนี้ยังมีความหนืด และความแข็งแรงขณะหลอมเหลวต่ำกว่า

3) เรซินสกัดกัน (barrier resins) ไม่นิยมใช้ในการเคลือบโดยกระบวนการอัดรีด เนื่องจากอุณหภูมิการหลอมเหลวจะสูงขึ้นเมื่อทำการกระบวนการ ที่อุณหภูมิสูงกว่า 316 °C เรซิน

ทั้งหมดจะเสื่อมสภาพในระหว่างการอัดรีด จึงต้องมีอุปกรณ์พิเศษเพื่อที่จะเคลือบเอทิลีนไวนิล แอลกอฮอล์ (EVOH) ในกระบวนการอัดรีด

4) เรซินทนอุณหภูมิสูง (*high temperature resins*) โดยปกติต้องการเรซินที่ทนอุณหภูมิได้สูงกว่า 204 °C เช่น กระจาดแข็งทนไฟ (*ovenable resins*) และผลิตภัณฑ์บรรจุไมโครเวฟ นอกจากนี้ พอลิเอสเทอร์และไนลอนจัดเป็นเรซินดูดน้ำ (*hygroscopic resin*) จะต้องอบให้แห้งก่อนลงมือทำ

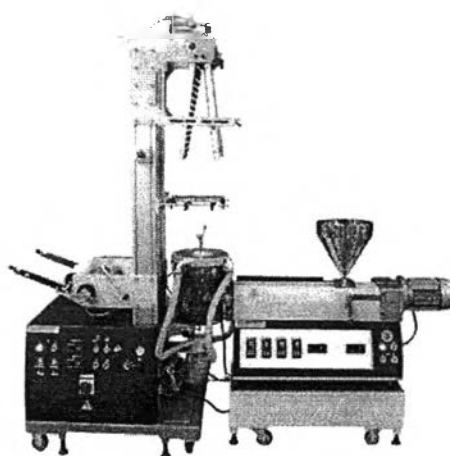
5) กาวและเรซินหุ้มความร้อน (*adhesive and heat seal resins*) ในบางกรณีต้องนำออกไปเชื่อมติดด้วยเรซินในตอนหลังจากที่ออกจากเครื่องอัดรีดแล้ว เพื่อให้เกิดการยึดติดกัน เช่น EVOH และ PP หรือมีแผ่นอลูมิเนียมอยู่เป็นโครงสร้าง ในสภาวะแบบนี้ต้องอาศัยเรซินเพื่อช่วยในการยึดติดวัสดุสองชนิดเข้าด้วยกัน เรซินที่ใช้เป็นกาวยึดติด เช่น เอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (EVA) หรือกาวยาง เอทิลีนอะคริลิก แอซิด โคพอลิเมอร์ (EAA) เอทิลีนเมทาอะคริเลต โคพอลิเมอร์ (EMA) และไอโอโนเมอร์ (ionomer) ซึ่งเชื่อมโครงสร้างเป็นร่างแหกับ EMAA ซึ่งโคพอลิเมอร์ดังกล่าวจะช่วยทำให้โครงสร้างผลึกแตกออกและยังสามารถเตรียมให้มีโครงสร้างมีหมู่ฟังก์ชันในการยึดเกาะกับหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์อื่นๆ

2.7.3 กระบวนการเป่าอัดรีด (*blown film extrusion process*) [15]

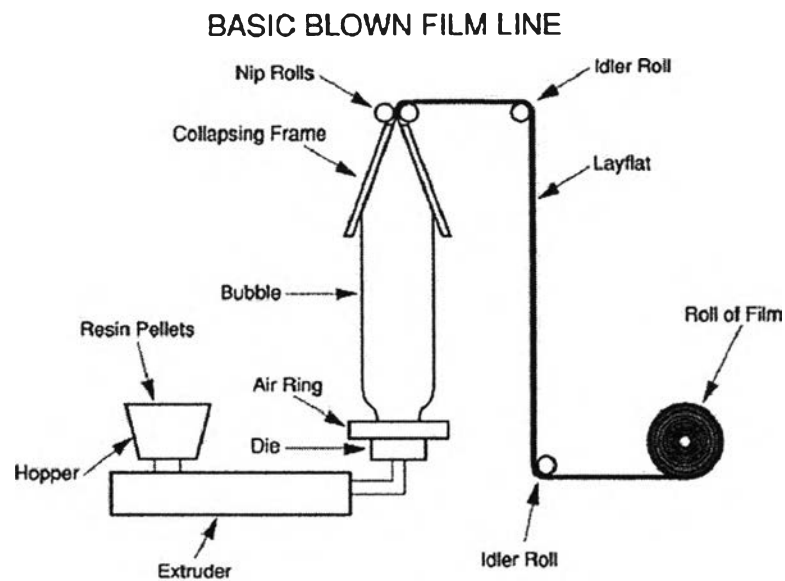
ในชีวิตประจำวัน ฟิล์มเป็นผลิตภัณฑ์ที่ถูกนำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อย่างแพร่หลาย เช่น บรรจุภัณฑ์ทางการแพทย์ อุตสาหกรรมทางการแพทย์ และอื่นๆ ทั้งนี้ในการเลือกวัสดุที่นำมาทำฟิล์มขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการใช้งาน

การเป่าฟิล์มเป็นกระบวนการแปรรูปพลาสติกแบบต่อเนื่องเช่นเดียวกับกระบวนการอัดรีด (*extrusion*) โดยการแปรรูปเป็นฟิล์มนั้นจะเป็นกระบวนการแปรรูปด้วยเครื่องเป่าฟิล์ม (*blown film extruder*) ดังแสดงในรูปที่ 2.23 และแผนภาพเครื่องเป่าฟิล์ม ดังแสดงในรูปที่ 2.24 โดยจะเริ่มจากการนำเม็ดพลาสติกมาใส่ใน *hopper* เพื่อนำเม็ดพลาสติกลงสู่ช่วงหลอมในเครื่องอัดรีด (*extruder*) ซึ่งเม็ดพลาสติกจะถูกให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิหลอมเหลว จากนั้นเนื้อพลาสติกเหลวจะถูกสกรูเดี่ยว (*single screw*) ขับเคลื่อนไปยังหัวดายทรงกลม (*circular die*)

ออกมาเป็นท่อพลาสติกทรงกลมและทำการดึงในแนวแกนของการอัดรีด (machine direction, MD) แล้วใช้ลมเป่าให้ท่อพลาสติกพองเป็นลูกโป่ง (bubble) ที่มีผนังบาง ซึ่งพองออกในแนวขวางแกนของการอัดรีด (transverse Direction, TD) คือทำให้มีการจัดเรียงตัวในสองทิศทาง (biaxial orientation) และมีเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกโป่งมากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวตายหลายเท่า ซึ่งขึ้นอยู่กับข้อกำหนดหน้ากว้างของฟิล์ม ระหว่างที่มีการเป่าเป็นลูกโป่งพร้อมๆกันนั้นตรงบริเวณปากตายจะมีแหวนลม (cooling ring) ไว้สำหรับหล่อเย็นโดยมีการเป่าลมออกมาหล่อเย็นลูกโป่งที่ร้อนที่บริเวณรอบนอกของลูกโป่ง ต่อมาลูกโป่งจะถูกปรับให้มีขนาดที่เหมาะสม และถูกจำกัดอยู่ในส่วนที่ช่วยพยุงลูกโป่ง (sizing basket หรือ calibration unit) หลังจากนั้นลูกโป่งจะถูกเข้าไปที่ชุดบีบ (collapsing unit) ซึ่งปิดอากาศที่ใช้เป่าเข้าไปภายในลูกโป่งและถูกบีบให้แฟบก่อนที่จะถูกลูกกลิ้งรีดให้เรียบ และถูกป้อนเข้าในช่องว่างของลูกกลิ้งสองตัว (nip rolls) โดยที่ลูกกลิ้งหนึ่งเป็นผิวโลหะ และอีกลูกกลิ้งหนึ่งเป็นผิวยาง ทำให้ลูกโป่งแบนลงเป็นฟิล์มสองชั้น หลังจากนั้นจึงทำการดึงฟิล์มโดยใช้หน่วยดึง (haul-off unit) และสุดท้ายฟิล์มที่ได้จะถูกพันเป็นม้วนด้วยตัวม้วนฟิล์ม (winder) แล้วนำไปทำถุงต่างๆหรือผลิตภัณฑ์อื่นๆ หลังจากทีกระบวนการผลิตฟิล์มเข้าสู่สมดุคแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นๆที่มีความสำคัญต่อการเป่าฟิล์ม เช่น ความเร็วของสกรู (speed screw) อัตราการดึง (draw down ratio) และขนาดที่เหมาะสมของลูกโป่งที่ควบคุมโดยส่วนที่ช่วยพยุงฟิล์ม เป็นต้น



รูปที่ 2.23 เครื่องเป่าฟิล์ม (blown film extruder)



รูปที่ 2.24 แผนภาพเครื่องเป่าฟิล์ม [21]

มีการใช้เทอมในการอธิบายกระบวนการแปรรูปพลาสติกให้เป็นฟิล์มโดยการเป่าฟิล์มหลายเทอม แต่เทอมที่สำคัญ เช่น อัตราการพองของลูกโป่ง (blow-up ratio) และ อัตราการดึง (draw down ratio)

อัตราการพองของลูกโป่ง (blow-up ratio) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกโป่งกับเส้นผ่านศูนย์กลางของด้าย โดยทั่วไปอัตราการพองของลูกโป่งของการเป่าฟิล์ม จะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 2:1 ถึง 6:1 ซึ่งหมายความว่า ด้ายหนึ่งตัวสามารถทำถุงพลาสติกได้หลายขนาด

อัตราการดึง (draw down ratio) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างความเร็วของฟิล์มที่ดึงโดยลูกกลิ้งหรือหน่วยดึง กับความเร็วของการอัดรีด ซึ่งความเร็วการอัดรีดสามารถคำนวณได้จากน้ำหนักของพลาสติกที่ผลิตได้ต่อหน่วยเวลา แล้วแปรให้เป็นปริมาตร แล้วค่อนำปริมาตรหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของด้าย

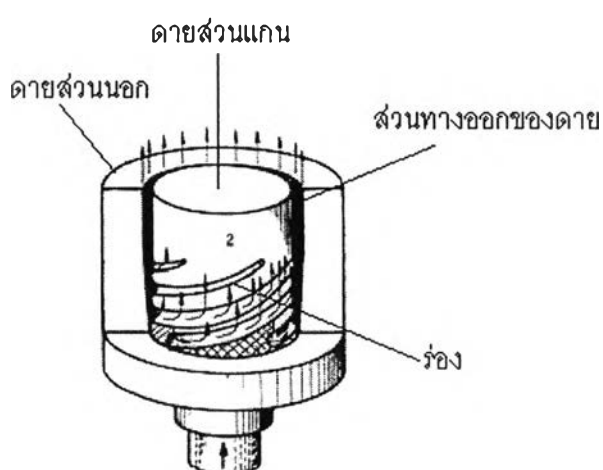
2.7.3.1 เครื่องอัดรีดของเครื่องเป่าฟิล์ม (blown film extruder)

ในการเป่าฟิล์มทั่วไป เครื่องอัดรีดที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นแบบสกรูเดี่ยว (single screw extruder) ซึ่งมีอัตราส่วนของความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) ของสกรูอยู่ในช่วง 20:1 ถึง 34:1 ส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางจะอยู่ในช่วง 4 ถึง 20 เซนติเมตร ซึ่งปกติแล้วโซนของสกรูจะแบ่งออกเป็น 3 โซน ได้แก่ โซนป้อน (feed zone) โซนหลอมอัด (compression zone) และโซนส่ง (metering zone) โดยความลึกของร่องสกรูในส่วนของโซนส่ง จะขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติกแต่ละชนิดที่ใช้ หน้าที่ของเครื่องอัดรีดคือ ให้ความร้อนแก่เม็ดพลาสติกเพื่อทำการหลอมให้เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งมีอุณหภูมิคงที่และสม่ำเสมอ และให้มีแรงดันมากพอที่จะทำให้พลาสติกที่หลอมสามารถไหลขับเคลื่อนไปยังหัวตายด้วยอัตราเร็วสม่ำเสมอด้วยอัตราเร็วของสกรูที่ถูกป้อนเข้าไป ขนาดของเครื่องอัดรีดจะขึ้นกับขนาดหน้ากว้าง (lay-flat width) และความหนาของฟิล์มที่ผลิต รวมถึงอัตราการดึงของเครื่องม้วนฟิล์ม การใช้ขนาดของเครื่องอัดรีดควรเลือกให้เหมาะสมกับความหนาและหน้ากว้างของฟิล์ม เช่น การใช้เครื่องอัดรีดที่มีขนาดเล็กเกินไปในการเป่าขึ้นรูปฟิล์มที่มีหน้ากว้างและความหนามากๆ ทำให้ต้องลดอัตราการดึงของเครื่องม้วนฟิล์มให้ต่ำลงจนทำให้แรงดึงเกิดความไม่สม่ำเสมอทำให้เกิดการกระตุก ซึ่งส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีความไม่สม่ำเสมอ และถ้าใช้เครื่องอัดรีดที่มีขนาดใหญ่เกินไป ในการเป่าขึ้นรูปฟิล์มที่มีหน้ากว้างที่แคบและบาง จะต้องลดอัตราเร็วสกรู ทำให้พลาสติกหลอมอยู่ในเครื่องอัดรีดที่มีอุณหภูมิสูงและเวลานานจนเกินไป ทำให้พลาสติกดังกล่าวเกิดการเสื่อมสภาพหรือสลายตัวได้ ส่งผลให้สมบัติของฟิล์ม มีสมบัติที่ไม่ดีเท่าที่ควร

2.7.3.2 หัวตาย (die)

หัวตายที่ใช้ในเครื่องเป่าฟิล์ม จะเป็นแบบวงแหวนสองชั้น (annular die) ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนด้านนอกของตาย (outer die body) และส่วนที่เป็นแกนของตาย (die mandrel) ดังแสดงในรูปที่ 2.25 โดยทั่วไปตายที่ใช้ในเครื่องเป่าฟิล์มจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 2.5 – 15 เซนติเมตร อาจมีขนาดใหญ่ถึง 40 เซนติเมตร ในกรณีที่ต้องการขนาดฟิล์มหน้ากว้างที่ใหญ่ การออกแบบตายที่ใช้ขึ้นอยู่กับความต้องการและความสะดวกในการใช้งาน แบ่ง

ออกเป็น 3 ประเภทคือ ดายป้อนด้านข้าง (side-fed die) ดายขาแมงมุม (spider leg-type die) และดายแบบไหลเวียน (spiral mandrel die) ซึ่งดายไหลเวียนจะถูกใช้มากที่สุดในการเป่าฟิล์ม เนื่องจากมีลักษณะเป็นการเซาะร่อง (manifold) จำนวนมากเป็นแนววนรอบๆ แกนจากจุดที่พลาสติกหลอมเข้าจนถึงจุดไหลออก ความลึกของร่องจะลดลงเรื่อยๆ



รูปที่ 2.25 หัวดายที่ใช้ในเครื่องเป่าฟิล์ม

2.7.3.3 สมบัติของฟิล์มเป่า [21]

สมบัติของฟิล์มที่ถูกขึ้นรูปด้วยกระบวนการเป่า จะมีความแข็งแรงต่อการฉีกขาด (tear strength) ความแข็งแรงต่อการดึง (tensile strength) ทั้งในทิศตามแนวตามเครื่องจักร (machine direction, MD) และในทิศทางตามแนวขวาง (transverse Direction, TD) ความทนทานต่อแรงกระแทก เปอร์เซ็นต์การยืดออก และสมบัติอื่นๆ เช่น ความหนา การจัดเรียงตัว ความเป็นผลึก ความเงาของผิวฟิล์ม ความใสและความขุ่นของฟิล์ม เป็นต้น ซึ่งมีปัจจัยที่สำคัญที่เป็นตัวแปรในการควบคุมสมบัติเหล่านี้ ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมเหลว ความหนาของฟิล์ม ความสม่ำเสมอของความหนาของฟิล์ม อัตราส่วนการดึง (draw-down ratio) อัตราส่วนการเป่า (blow-up ratio) ความสูงของแนวเส้นแข็งตัว (frost line height) และความสม่ำเสมอของความดัน ซึ่งตัวแปรเหล่านี้สามารถช่วยลดหรือกำจัดการเกิดเป็นคลื่น (surging) ได้

ในการควบคุมความหนาของฟิล์ม จะถูกควบคุมด้วยอุณหภูมิของการหลอมเหลว อัตราส่วนในการเป่า และอัตราส่วนในการดึง ส่วนความสูงของแนวเส้นแข็งตัวคือระยะทางเหนือตายที่เกิดความขุ่น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการเกิดผลึกของพลาสติกแต่ละชนิดที่นำมาทำเป็นฟิล์ม ซึ่งจัดเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญต่อความหนาของฟิล์ม ถ้าแนวเส้นแข็งตัวของฟิล์มมีความสูงเพิ่มมากขึ้น ความขุ่นและความเงาของฟิล์มก็จะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ความสูงของแนวเส้นแข็งตัวยังขึ้นกับอุณหภูมิของการหลอมเหลวพลาสติกและอัตราการอัดรีดด้วย ถ้าตัวแปรทั้งสองสูงขึ้นก็จะส่งผลให้ความสูงของแนวเส้นแข็งตัวเพิ่มขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้อัตราส่วนการเป่าก็มีผลต่อความแข็งแรงด้านแรงดึง โดยจะเพิ่มความแข็งแรงในทิศทางตามขวาง (TD) แต่ความแข็งแรงในทิศทางตามแนวตามเครื่องจักร (MD) จะลดลง

2.7.3.4 วัสดุที่ใช้ในการเป่าฟิล์ม

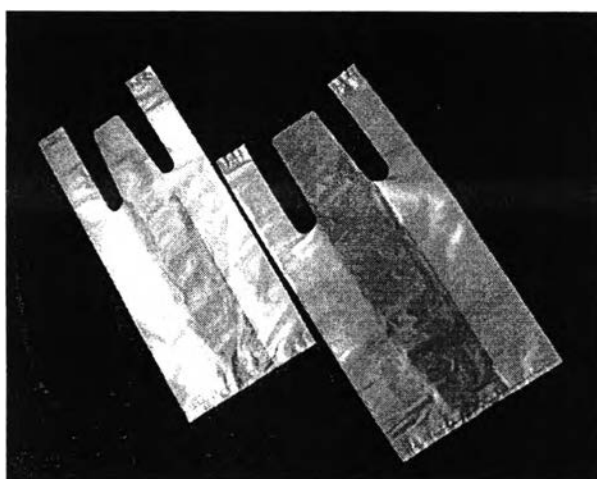
วัสดุในการทำฟิล์มพลาสติก ส่วนใหญ่จะเป็นประเภทเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) ในกลุ่มของพอลิโอเลฟินส์ (polyolefins) เช่น พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) เป็นต้น พอลิโอเลฟินส์เหล่านี้มักถูกนำมาทำเป็นฟิล์มเนื่องจากราคาถูก สามารถขึ้นรูปด้วยกระบวนการต่างๆได้ง่าย โดยเฉพาะการขึ้นรูปด้วยวิธีการเป่าฟิล์ม และยังให้สมบัติทางด้านฟิล์มที่ดีอีกด้วย ซึ่งพอลิโอเลฟินส์ที่นิยมนำมาทำเป็นฟิล์มมากที่สุดคือ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ นอกจากนี้ยังมีพลาสติกชนิดอื่นๆที่นิยมนำมาทำเป็นฟิล์มนอกเหนือจากพอลิโอเลฟินส์ เช่น พอลิโพรพิลีน (PP) พอลิคาร์บอนเนต (PC) พอลิเอทิลีนเทเลฟทาเลต (PET) และพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) เป็นต้น ซึ่งสมบัติที่สำคัญในการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกโดยการเป่าฟิล์ม ได้แก่ ค่าความหนืด (viscosity) และค่าดัชนีการหลอมไหล (melt flow index, MFI) ซึ่งค่าความหนืดต้องมีค่าสูง และค่าดัชนีการหลอมไหลต้องต่ำ ผลจากสองค่านี้จะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของพอลิเมอร์ขณะหลอม (melt strength) เพิ่มขึ้น ทำให้พอลิเมอร์หลอมสามารถที่จะถูกดึงและเป่าฟิล์มออกมาเป็นลูกโป่งได้ ทำให้ง่ายต่อการขึ้นรูปด้วยวิธีการเป่าฟิล์ม แต่ถ้ามีค่าความหนืดที่ต่ำ ค่าดัชนีการหลอมไหลสูง และค่าความแข็งแรงของพอลิเมอร์ขณะหลอมต่ำ จะทำให้ยากต่อการขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีการเป่า ตัวอย่างเช่นในกรณีของ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ที่ทำฟิล์มด้วย

วิธีการเป่า จะมีค่าดัชนีการหลอมไหลอยู่ที่ 0.1 ถึง 1.0 กรัมต่อ 10 นาที ในขณะที่ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ที่ผลิตฟิล์มด้วยวิธีการอัดรีด มีค่าอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 6 กรัมต่อ 10 นาที จะเห็นได้ว่าค่าดัชนีการหลอมไหลจะขึ้นอยู่กับกระบวนการการขึ้นรูป

2.7.3.5 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากฟิล์มเป่า

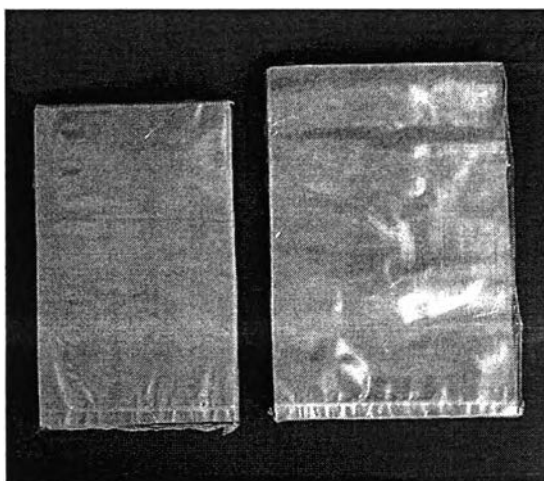
1) ถุงพลาสติก (plastic bags)

ถุงพลาสติกที่ได้จากกระบวนการเป่าฟิล์มส่วนใหญ่ที่ใช้กันในปัจจุบัน เช่น ถุงหูหิ้ว (T-shirt bags) ถุงร้อน (hot food bags) และถุงเย็น (cold food bags) เป็นต้น ซึ่งวิธีการทำถุงจากฟิล์มพลาสติกนั้นจะขึ้นอยู่กับสมบัติเฉพาะของพลาสติกแต่ละชนิดที่ถูกนำมาทำเป็นฟิล์ม เช่น การยึดปิดผนึกด้วยความร้อน (heat sealing) พลาสติกที่มีสมบัติเหมาะสมคือ พอลิเอทิลีน (PE) และพอลิโพรพิลีน (PP) ซึ่งสมบัติการปิดผนึกด้วยความร้อนมีความจำเป็นต่อการทำถุงพลาสติก โดยวิธีการทำถุงพลาสติกจะมีขั้นตอนคือ สำหรับถุงหูหิ้ว จะต้องผ่านกระบวนการเป่าฟิล์มออกมาเป็นท่อหรือหลอดพลาสติกตามขนาดที่ต้องการ จากนั้นทำการพับด้านข้างแล้วปิดผนึกด้วยความร้อนทั้งหัวและท้าย ต่อมาทำการตัดปากถุงให้ได้ในลักษณะถุงหูหิ้ว ดังแสดงในรูป 2.26



รูปที่ 2.26 ถุงหูหิ้ว

ส่วนถุงร้อนและถุงเย็นจะมีวิธีการผลิตใกล้เคียงกับการผลิตถุงหูหิ้วคือ จะต้องทำการเป่าฟิล์มออกมาเป็นท่อหรือหลอดให้ได้ขนาดที่ต้องการก่อน แต่ต่างกันตรงที่ทำการปิดผนึกด้วยความร้อนแค่ด้านก้นถุงเท่านั้น ไม่ต้องด้านข้างและไม่ต้องตัดปากถุง ทำให้ได้ถุงในลักษณะดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 ถุงร้อน ถุงเย็น

2) ฟิล์มหด (shrink film)

ฟิล์มหดนี้มาจากศัพท์เทคนิคว่า "shrink film" ดังแสดงในรูปที่ 2.28 ซึ่งเรียกตามคุณสมบัติของฟิล์มนั่นเอง กล่าวคือ ฟิล์มพลาสติกจะหดลงเมื่อได้รับความร้อน ได้แก่ พลาสติกที่ถูกนำมาดึงยืดให้เกิดการจัดเรียงตัว (orientation) ของโมเลกุลระหว่างกระบวนการผลิต โดยให้ความร้อนที่สูงกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) ของฟิล์มพลาสติกชนิดนั้นๆ ซึ่งพลาสติกที่นิยมใช้เป็นฟิล์มหดคือ พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ส่วนฟิล์มหดรัดสินค้า คือ พอลิไวนิลคลอไรด์ ชนิดกึ่งแข็งที่มีน้ำหนักโมเลกุลปานกลาง ใช้ในการผลิตเป็นแผ่นฟิล์มห่อหุ้มผลิตภัณฑ์ มีคุณสมบัติดีในการยืดและหดตัว ซึ่งแผ่นฟิล์มหดนี้อาจผลิตมาจากกระบวนการบดรีด (calendering) ของแผ่นพอลิไวนิลคลอไรด์ บางๆ หรือการเป่าฟิล์ม (blown film) เช่น ฉลากข้างขวดน้ำดื่มต่างๆ ในการใช้งาน

มีวิธีการง่ายๆ ดังนี้ นำฟิล์มดังกล่าวมาทำถุงแล้วสวมครอบผลิตภัณฑ์อย่างหลวมๆ จากนั้นนำไปผ่านลมร้อน เพื่อให้ฟิล์มหดแน่นกับตัวสินค้าที่สวมอยู่



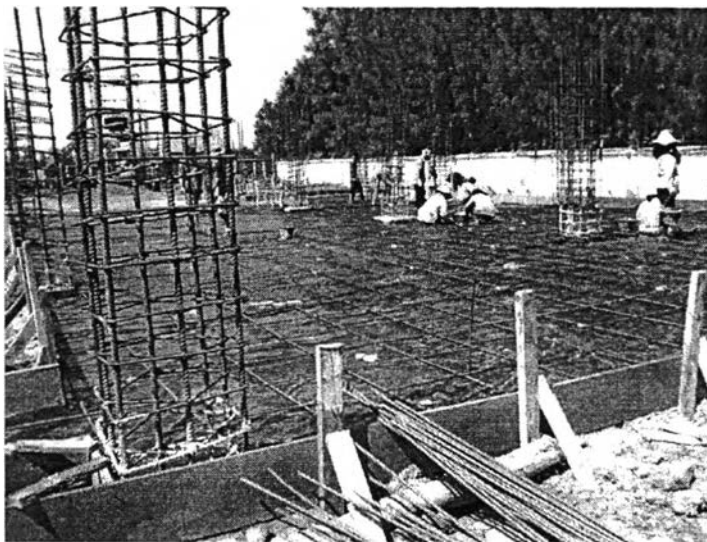
รูปที่ 2.28 ฟิล์มพลาสติกหดรัดสินค้า

3) ฟิล์มชนิดหนา (thick gauge films)

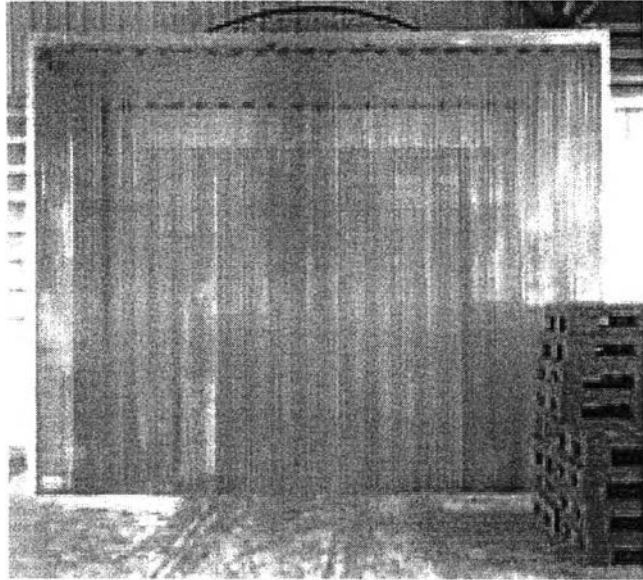
เป็นฟิล์มที่ถูกผลิตด้วยวิธีการเป่า ซึ่งเป็นฟิล์มที่เหมาะสมกับการใช้งานด้านงานหนัก (heavy-duty films) มีความหนาอยู่ที่ประมาณ 0.1 - 0.2 มิลลิเมตร ฟิล์มชนิดนี้มักนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านงานเกษตรกรรม ตัวอย่างเช่น ปูบ่อกุ้งบ่อปลา ดังแสดงในรูปที่ 2.29 งานก่อสร้าง เช่น รองพื้นก่อนเทคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 2.30 และในอุตสาหกรรมต่างๆ ตัวอย่างเช่น ม่านรีวพลาสติกที่ใช้สำหรับกันฝุ่นละออง ลม กลิ่น และเสียงในโรงงานอุตสาหกรรม ดังแสดงในรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.29 फिल्मพลาสติกปูบ่อกึ่ง บ่อปลา



รูปที่ 2.30 फिल्मพลาสติกรองพื้นก่อนเทคอนกรีต



รูปที่ 2.31 ม่านรีพลาสติก

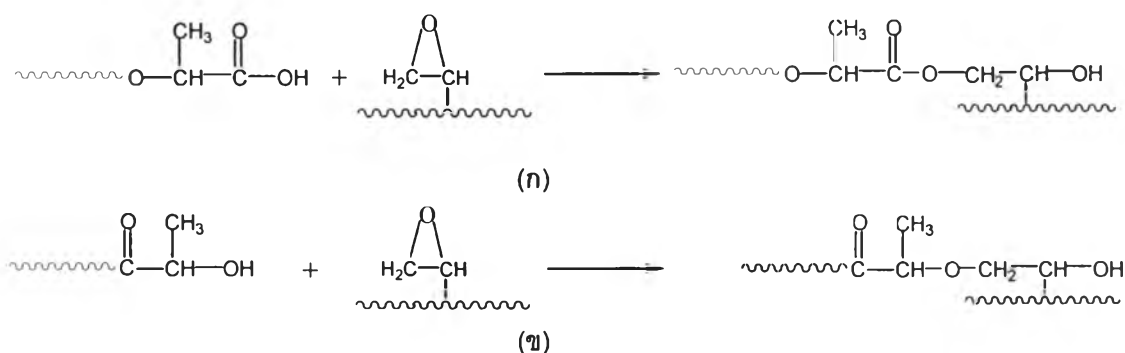
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันพอลิแล็กติกแอซิดสามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการทั่วไป ทั้งการฉีด การอัดรีด การอัดรีดฟิล์ม รวมทั้งการเป่าอัดรีด อย่างไรก็ตามพบว่าชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดมักค่อนข้างกรอบและเปราะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งฟิล์มที่ได้จากการเป่าอัดรีด จึงมีการวิจัยเพื่อพยายามปรับปรุงข้อเสียต่างๆ ของพอลิแล็กติกแอซิดให้สามารถใช้งานได้กว้างขวางมากขึ้น เช่น การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับยางธรรมชาติเพื่อเพิ่มความเหนียวและยืดหยุ่น หรือ การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีนอดิเพทเทเลฟทาเลทโคพอลิเมอร์ (poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT) เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิด เป็นต้น

โดย Balakrishnan และคณะ [22] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิด (polylactic acid, PLA) กับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (linear low density polyethylene, LLDPE) ในอัตราส่วนของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นระหว่างร้อยละ 5 – 15 โดยน้ำหนักของพอลิแล็กติกแอซิด เตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/LLDPE ในเครื่องอัดรีดสกรูคู่ที่หมุนตรงข้ามกัน (counter-rotating twin screw extruder) จากนั้นขึ้นรูปเป็นชิ้นงานด้วยกระบวนการฉีดแบบ (injection molding) แล้วนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ สมบัติด้านแรงดึง ความต้านแรงดัดโค้ง และความทนแรงกระแทก พร้อมทั้งวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (scanning electron microscopy, SEM) พบว่าพอลิเมอร์ทั้งสองประเภทเข้ากันได้ไม่ดีนัก ทำให้ความทนแรงดึง ความต้านแรงดัดโค้ง และค่ามอดุลัสของยังลดลง เมื่อมีปริมาณของ LLDPE เพิ่มขึ้น แต่ในขณะเดียวกันกลับช่วยเพิ่มค่าความทนแรงกระแทกให้สูงมากขึ้น ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาชี้ว่าเมื่อปริมาณของ LLDPE เพิ่มขึ้น ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ทั้งสองยิ่งลดลง

Su และคณะ [23] เตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิด (polylactic acid, PLA) กับพอลิเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ (poly(ethylene-co-octene), POE) เปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับพอลิเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ที่กราฟต์ด้วยไกลซิديلเมทาคริเลต (mPOE) ซึ่งทำหน้าที่เสริมสภาพเข้ากันได้ จากนั้นขึ้นรูปเป็นชิ้นงานด้วย

กระบวนการอัดแบบ (compression molding) แล้วนำชิ้นตัวอย่างไปทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ สมบัติด้านแรงดึง ความต้านแรงดัดโค้ง และความทนแรงกระแทก พบว่าพอลิเมอร์ผสม PLA/mPOE มีค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด และความทนแรงกระแทกสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม PLA/POE ในขณะที่ค่าความทนแรงดึงและความต้านแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสม PLA/mPOE มีค่าน้อยกว่าพอลิเมอร์ผสม PLA/POE เล็กน้อย จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างไปวิเคราะห์ความเข้ากันได้ด้วยเทคนิค SEM พบว่าพอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้มากขึ้นเมื่อปริมาณของ mPOE มากขึ้น เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาเคมีของหมู่ปลายของพอลิแล็กติกแอซิด (carboxyl group/hydroxyl group) กับหมู่อีพอกซีของ mPOE ดังแสดงในรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 ปฏิกิริยาเคมีระหว่าง PLA กับ mPOE (ก) ปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอกซิล

(ข) ปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล

ต่อมา Su และคณะ [24] ได้เตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิด (polylactic acid, PLA) กับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (linear low density polyethylene, LLDPE) โดยมีการใช้ mPOE เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้ ในอัตราส่วน 0 – 15 phr ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการอัดแบบ จากการทดลองพบว่า mPOE ช่วยให้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/LLDPE มีความเข้ากันได้เพิ่มมากขึ้น โดย mPOE สามารถกระจายตัวในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นอย่างทั่วถึง

ธนวรรณ ชำเกตุ [25] ได้อาศัยแนวคิดจากงานวิจัยทั้งสามชิ้นดังกล่าว มาเตรียมฟิล์มโคเอ็กทิวชันจาก PLA และ PLA/LLDPE โดยเริ่มจากเตรียมพอลิเมอร์ผสม PLA/LLDPE เพื่อ

ทำหน้าที่เป็นชั้นกลางด้วยการผสมในเครื่องอัดรีดสกรูคู่ โดยใช้ไกลซิโดลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิเอทิลีนโคพอลิเมอร์ (mPOE) เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้ ขึ้นรูปฟิล์ม 3 และ 5 ชั้น สลับกันระหว่าง PLA และ PLA/LLDPE ผ่านเครื่องอัดรีดร่วม (co-extruder) ด้วยวิธีการใช้เครื่องอัดรีดฟิล์ม (chill roll casting) จากนั้นนำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ สมบัติด้านแรงดึงและความต้านแรงฉีกขาด (tear strength) พบว่าฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชันที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น โดยมีค่าความทนแรงดึงและความต้านแรงฉีกขาดสูงกว่าฟิล์ม PLA

ในการผลิตฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหาร นอกจากจะต้องมีสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมแล้ว สำหรับอาหารบางประเภท ฟิล์มยังต้องมีสมบัติการสกัดกั้นก๊าซ (gas barrier properties) ที่ดีอีกด้วย Lehermeier และคณะ [26] ได้ศึกษาสมบัติการซึมผ่านของแก๊สไนโตรเจน ออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทน ของพอลิแล็กติกแอซิด (polylactic acid, PLA) เทียบกับพอลิเอทิลีนทเลฟทาเลต (poly(ethylene terephthalate, PET) พอลิสไตรีน polystyrene, PS) และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene, LDPE) พบว่า อัตราการซึมผ่านของก๊าซไนโตรเจน ออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทนของPLAมีค่าที่ใกล้เคียงกับPS น้อยกว่าLDPE แต่สูงกว่าPET เพื่อปรับปรุงสมบัติการสกัดกั้นก๊าซและไอน้ำของPLA Thellen และคณะ [27] ได้ศึกษาผลของการเติมมอนต์มอริลโลไนต์ลงใน PLA ที่มีสารเสริมสภาพพลาสติก (plasticizer) โดยผสมพอลิเมอร์กับสารเติมแต่งด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ก่อนนำไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการเป่าฟิล์ม (blown films extrusion) และทำการวิเคราะห์สมบัติการสกัดกั้นไอน้ำและก๊าซออกซิเจน พบว่ามอนต์โลริลโลไนต์สามารถกระจายตัวได้ดีในเมทริกซ์ของPLA มีความสามารถในการสกัดกั้นแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้นร้อยละ 48 และมีความสามารถในการสกัดกั้นไอน้ำเพิ่มขึ้นร้อยละ 50 เมื่อเทียบกับฟิล์มPLAบริสุทธิ์ ส่วนผลของการทดสอบสมบัติทางความร้อนพบว่ามีความหนืดการสลายตัวทางความร้อนสูงขึ้น อีกทั้งยังพบว่ามีค่าความทนแรงดึงและความยืดสูงสุด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นอีกด้วย