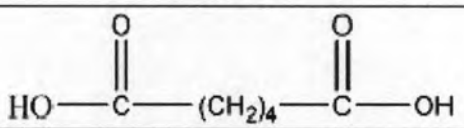
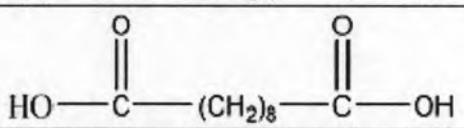
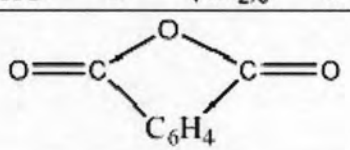
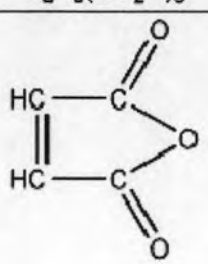
บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 พอลิเอสเทอร์ (Polyester) [1]

พอลิเอสเทอร์ คือ พอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยหมู่เอสเทอร์ (-COO-) อยู่ภายในโครงสร้างของโมเลกุลส่วนที่เป็นสายโซ่หลัก สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันชนิดควบแน่น (condensation polymerization) ระหว่างกรดพอลิเบสิก (polybasic acids) ที่มีหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) อย่างน้อย 2 หมู่ กับพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ (polyhydric alcohols) ที่มีหมู่ ไฮดรอกซิล (OH) อย่างน้อย 2 หมู่ ตัวอย่างของกรดพอลิเบสิกและพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างกรดที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์ [2]

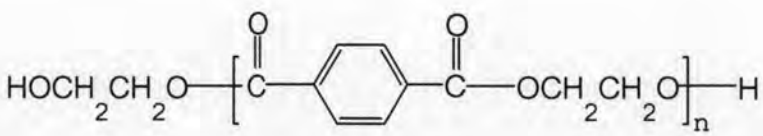
ชื่อ	สูตรโครงสร้าง	หมู่ฟังก์ชัน
Adipic		2
Sebacic		2
Phthalic anhydride	 ortho	2
Isophthalic	$C_6H_4(CO_2H)_2$ meta	2
Terephthalic	$C_6H_4(CO_2H)_2$ para	2
Benzenetricarboxylic	$C_6H_3(CO_2H)_3$	3
Maleic (anhydride)		2 (as acid)

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์ [2]

ชื่อ	สูตรโครงสร้าง	หมู่ฟังก์ชัน
Ethylene glycol	$HOCH_2CH_2OH$	2
Diethylene glycol	$HOCH_2CH_2OCH_2CH_2OH$	2
1,2-Propylene glycol	$HOCH_2CHMeOH$	2
Trimethylene glycol	$HOCH_2CH_2CH_2OH$	2
1,4-Butanediol	$HOCH_2CH_2CH_2CH_2OH$	2
Neopentyl glycol	$HOCH_2CMeCH_2OH$	2
Glycerol	$HOCH_2CH(OH)CH_2OH$	3

2.2 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate) [3, 4]

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเป็น พอลิเมอร์ที่จัดอยู่ในประเภทพอลิเอสเทอร์แบบเส้นที่อิ่มตัวมีลักษณะเป็นเทอร์โมพลาสติก มีสูตรโครงสร้างทางเคมี ดังแสดงในรูปที่ 2.1 การสังเคราะห์เพตในครั้งแรกอยู่ในรูปของเส้นใยที่เรียกว่า "เส้นใยพอลิเอสเทอร์ " โดยวินฟิลด์และดิกสัน (Whinfield & Dickson) แห่งบริษัท The Calico Printers Association Ltd. ของประเทศอังกฤษ เขาพบว่าการนำไดเบสิดแอสิด (dibasic acid) ที่เป็นอะโรมาติกมาใช้แทนอะลิฟาติก จะทำให้พอลิเอสเทอร์ที่ได้มีสมบัติต่างๆ ดีขึ้น เช่น มีจุดหลอมเหลวสูงขึ้น การละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์ทั่วไปลดลง จึงเหมาะสำหรับงานด้านเส้นใยและฟิล์ม ลิขสิทธิ์นี้ได้ขายให้กับบริษัทดูปองต์ (Dupont) แห่งสหรัฐอเมริกา และบริษัทไอซีไอ (Imperial Chemical Industries Ltd.,ICI) แห่งสหราชอาณาจักร ซึ่งบริษัททั้งสองก็ได้ทำการพัฒนาพอลิเมอร์นี้อย่างจริงจัง จนกระทั่งสามารถผลิตเส้นใยสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตออกวางตลาดในปี ค.ศ.1953 ภายใต้ชื่อเรียกทางการค้าว่า Dacron และ Terylene



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเพต [3]

การพัฒนาเพตเพื่อใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ เริ่มเมื่อปี ค.ศ.1970 ในประเทศสหรัฐอเมริกา โดยเริ่มจากการที่บริษัทผู้ผลิตน้ำอัดลมผลิตขวดน้ำอัดลม ที่มีทั้งความเหนียว ใส และกันการซึม

ผ่านของแก๊สได้ดี เพื่อทดแทนบรรจุภัณฑ์ที่ทำจากแก้วและอะลูมิเนียมที่ต้องใช้พลังงานในการผลิตและมีอัตราการแตกสูง ซึ่งบรรจุภัณฑ์จากเพตได้รับการยอมรับอย่างรวดเร็ว และมีปริมาณการใช้งานเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากมีสมบัติเด่น ดังนี้

1. มีความทนต่อแรงกระแทกและการตกกระทบดี จึงปลอดภัยในการใช้งาน
2. มีความใส
3. น้ำหนักเบาเพียงหนึ่งในสิบของขวดแก้ว ทำให้ประหยัดค่าขนส่งและลดภาระการเคลื่อนย้าย
4. สามารถป้องกันการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีแม้ที่ความดันสูง
5. ปลอดภัยต่ออาหารที่สัมผัสและไม่ทำให้รสชาติอาหารเสียไป

จากสมบัติของเพตที่เหนือกว่าพลาสติกชนิดอื่นๆ ทำให้มีการนำไปใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์อย่างกว้างขวาง เช่น ผลิตขวดน้ำมันพืช ขวดน้ำดื่ม ขวดน้ำแร่ บรรจุภัณฑ์อาหาร ยา และสารเคมี เป็นต้น จะเห็นได้ชัดว่าอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์มีแนวโน้มที่ดีขึ้นมากเมื่อตลาดเพตถูกพัฒนาขึ้น แต่เนื่องจากการใช้งานของเพตเป็นแบบใช้แล้วทิ้ง จึงส่งผลให้ขยะเพตมีปริมาณสูงขึ้นตามปริมาณการใช้งาน ดังนั้น การนำเพตกลับมาใช้ใหม่หรือการรีไซเคิลเพต จึงกำลังเป็นที่ได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากเป็นการลดปริมาณขยะพลาสติกและใช้วัตถุดิบอย่างคุ้มค่า

2.2.1 **สมบัติของเพต** [5]

เพตเป็นพอลิเมอร์แข็งเกร็ง ไม่มีสี มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลสูงทำให้มีความเป็นผลึกสูง มีจุดหลอมตัว (T_m) ที่ อุณหภูมิ 265 องศาเซลเซียส เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี ณ อุณหภูมิห้องละลายได้เฉพาะในตัวทำละลายที่สามารถให้โปรตอนได้ เช่น จะละลายได้ ณ อุณหภูมิห้องในคลอริเนเตดฟลูออริเนเตด อะซิติกแอซิด ฟีนอล และกรดไฮโดรฟลูออริก ส่วน ณ อุณหภูมิสูงจะละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์บางชนิด เช่น แอนนิโซล อะโรมาติกคีโตน ไดบิวทิลฟทาเลต และไดเมทิลซัลโฟน เป็นต้น มีสมบัติทนทานต่อน้ำและกรดอินทรีย์ที่เจือจาง สลายตัวได้ด้วยกรดไนตริกและกรดซัลฟูริก ส่วนเบสได้แก่พวกสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะทำให้พอลิเมอร์เสื่อมสภาพลง

2.2.2 **การนำไปใช้งาน** [5]

เพตมีการใช้งานในอุตสาหกรรมหลายประเภท ได้แก่ อุตสาหกรรมพลาสติก เช่น ของเด็กเล่น ชิ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้า ชิ้นส่วนรถยนต์ อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ เช่น ขวดน้ำดื่ม ขวดน้ำอัดลม ขวดใส่ยาและสารเคมี อุตสาหกรรมฟิล์ม เช่น ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ต่างๆ เทปบันทึกเสียง และ อุตสาหกรรมเส้นใยสิ่งทอ เช่น ผ้าเพต ผ้า T/C

2.3 การรีไซเคิลเพต (PET Recycling) [6, 7]

การรีไซเคิลพลาสติกตามความหมายของ ASTM D5033-90 จะเป็นการนำพลาสติกที่ผ่านกระบวนการผลิตหรือที่ผ่านการใช้งานแล้วมาผ่านกระบวนการผลิตเพื่อทำผลิตภัณฑ์พลาสติกอีกครั้ง ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 4 ประเภท ดังนี้

1. การรีไซเคิลระดับที่ 1 (primary recycling) เป็นการนำเศษพลาสติกที่เกิดจากกระบวนการผลิตมาผ่านกระบวนการผลิตอีกครั้งเพื่อนำไปใช้ในการทำผลิตภัณฑ์เดิมหรือใกล้เคียง

2. การรีไซเคิลระดับที่ 2 (secondary recycling) เป็นการนำผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ใช้แล้วมาผ่านกระบวนการผลิตให้เป็นผลิตภัณฑ์แบบอื่นที่แตกต่างจากการใช้งานครั้งแรก ซึ่งมักพบว่ามีพลาสติกชนิดอื่นปนเปื้อนอยู่เป็นจำนวนมาก

3. การรีไซเคิลระดับที่ 3 (tertiary recycling) เป็นการนำขยะพลาสติกมาใช้ผลิตสารเคมีพื้นฐานทั่วไป โดยมุ่งเน้นขยะพลาสติกจากแหล่งชุมชนหรือขยะพลาสติกที่ผ่านการคัดแยก ซึ่งกระบวนการที่ใช้จะเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมีต่างๆ เช่น กระบวนการไพโรลิซิส (pyrolysis) ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส (hydrolysis) เป็นต้น

4. การรีไซเคิลระดับที่ 4 (quaternary recycling) เป็นการนำพลังงานที่ได้จากการเผาขยะพลาสติกมาใช้

การรีไซเคิลเพตมีทั้งแบบทางกายภาพและทางเคมี ซึ่งการรีไซเคิลทางกายภาพจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี แต่จำเป็นต้องแยกประเภทและทำความสะอาด ก่อนที่จะนำกลับมาใช้เป็นวัตถุดิบใหม่ สำหรับการรีไซเคิลทางเคมีจัดเป็นเทคโนโลยีที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อเปลี่ยนพลาสติกให้กลายเป็นผลิตผลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ซึ่งสามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสารเคมีต่างๆ รวมทั้งพอลิเมอร์ได้อีกด้วย การรีไซเคิลทางเคมีเป็นกระบวนการที่ไม่จำเป็นต้องคัดแยกพลาสติก เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีที่ใช้จะเกิดกับพลาสติกแต่ละชนิดอยู่แล้ว ซึ่งผลผลิตที่ได้สามารถนำไปกลั่นลำดับส่วนเพื่อแยกสารโมเลกุลเล็กชนิดต่างๆ ออกจากกัน

2.4 แป้ง (Starch) [8 - 10]

แป้งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักที่สะสมไว้ในเมล็ด หัว และรากของพืช แป้งเป็นวัตถุดิบที่สามารถหาได้ง่าย ราคาถูก และสามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานได้ แป้งแต่ละชนิดจะมีส่วนประกอบต่างกัน จึงทำให้แป้งมีสมบัติในทางโภชนาการ ทางเคมี และทางกายภาพที่แตกต่างกันออกไปด้วย แป้งเป็นของแข็งสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส และไม่ละลายในน้ำเย็น ถ้าส่องดู

ด้วยกล้องจุลทรรศน์จะเห็นแป้งมีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ รูปร่างและขนาดต่างๆ กันไปตามชนิดของพืช มีความหนาแน่นประมาณ 1.5×10^{3} กิโลกรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 1-100 ไมโครเมตร ขึ้นอยู่กับแหล่งผลิต เม็ดแป้งขนาดใหญ่ที่สุดมีขนาดตั้งแต่ 25-35 ไมโครเมตร และเม็ดแป้งขนาดเล็กที่สุดมีขนาดตั้งแต่ 5-15 ไมโครเมตร

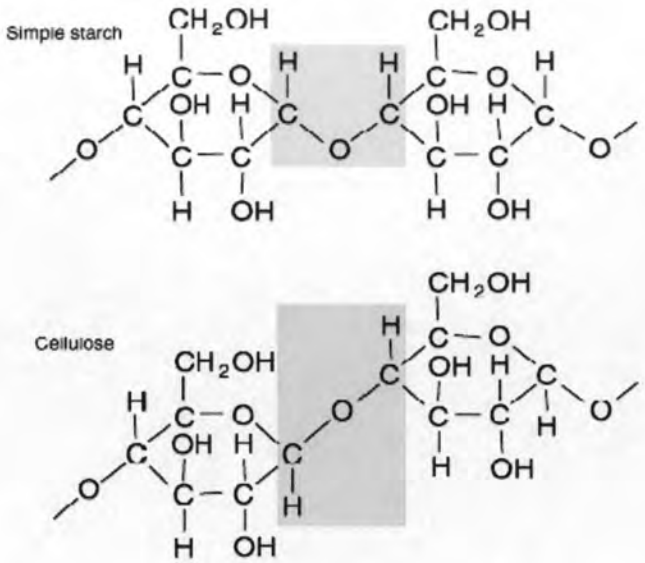
แป้งเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก ดังนั้น แป้งจึงไม่สามารถละลายได้ในน้ำเย็น แต่เกิดการดูดซึมน้ำและบวมตัว โดยทั่วไปแป้งมีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบมากที่สุด โดยแป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อนที่เกิดจากกลูโคสแต่ละหน่วยมาต่อกันเป็นสายยาว รองลงมาคือ โปรตีน นอกจากนี้ยังมีไขมัน เถ้า วิตามิน สารสี เอนไซม์ และความชื้น หน่วยย่อยที่สุดของแป้งประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนในอัตราส่วน 6:10:5 สามารถเขียนสูตรเอมพิริคัลได้เป็น $C_6H_{10}O_5$ แป้งจัดเป็นพอลิเมอร์แบบควบแน่นของกลูโคส หน่วยของกลูโคสที่อยู่ในแป้งจัดเป็นหน่วยของกลูโคสที่ปราศจากน้ำ (anhydroglucose unit) น้ำในโมเลกุลของกลูโคสนั้นหายไปขณะที่มีการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบขั้น (step polymerization)

ประเภทของแป้งสามารถแยกได้ตามสมบัติเป็น 2 ประเภท คือ

1. สตาร์ช (Starch) ผลิตได้จากพืชผลทางการเกษตรหลายชนิด เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี และจากพืชหัวชนิดต่างๆ เช่น มันฝรั่ง มันสำปะหลัง สำหรับการผลิตแป้งต้องใช้การผลิตแบบเปียก (Wet Grinding) ซึ่งจะทำให้แยกสตาร์ชออกมาได้
2. ฟลาวร์ (Flour) ผลิตจากการโม่แบบแห้ง และยังคงเหลือองค์ประกอบของโปรตีนอยู่ด้วย จึงทำให้มีสมบัติต่างไปจากสตาร์ช

2.4.1 **โครงสร้างทางเคมีของแป้ง** [11, 12]

แป้งเป็นพอลิแซกคาไรด์ (polysaccharide) เกิดจากมอนอเมอร์ที่เรียกว่า แอนไฮโดรกลูโคไพราโนส (anhydroglucopyranose) เช่นเดียวกับเซลลูโลส แต่ต่างกันที่มาต่อกันด้วยพันธะแอลฟา-1,4-ไกลโคซิดิก (α-1,4-glycosidic) ดังรูปที่ 2.2 จึงทำให้แป้งมีสมบัติที่แตกต่างไปจากเซลลูโลส

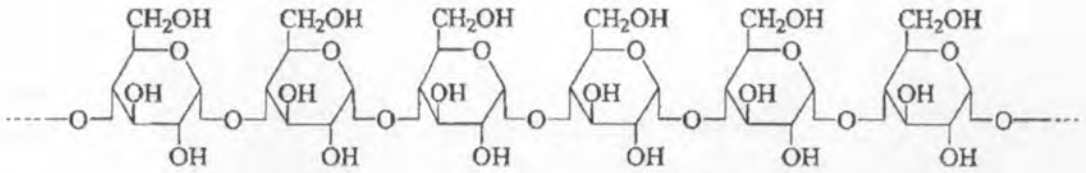


รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของแป้งและเซลลูโลส [11]

แป้งประกอบไปด้วยโมเลกุลหลัก 2 ชนิด คือ อะไมโลส (amylose) และอะไมโลเพกติน (amylopectin) โดยปกติแป้งมีอะไมโลสประมาณ 20-30 เปอร์เซ็นต์ และมีอะไมโลเพกติน ประมาณ 70-80 เปอร์เซ็นต์ โดยโครงสร้างของอะไมโลสนั้นเป็นส่วนที่ทำให้เกิดความแข็งแรง เนื่องจากมีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลที่แน่นกว่าและเป็นระเบียบมากกว่า เกิดเป็นส่วนที่มีลักษณะเป็นผลึก (crystalline region) ส่วนอะไมโลเพกตินนั้นมีการจัดเรียงตัวที่ไม่แข็งแรง ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นส่วนอสัณฐาน (amorphous region) ขึ้น นอกจากนี้ แป้งยังอาจมีส่วนประกอบที่เป็นไขมัน โปรตีน และฟอสฟอรัสอีกในปริมาณเล็กน้อย

2.4.1.1 อะไมโลส (Amylose) [11, 12]

อะไมโลสเป็นพอลิเมอร์สายยาวที่ประกอบด้วยหน่วยของแอนไฮโดรกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะแอลฟา-1,4-ไกลโคซิดิก (α-1,4-glycosidic) ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 2,000 ถึง 500,000 กรัมต่อโมล ทั้งนี้อะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันออกไปขึ้นกับแหล่งที่มาของแป้งและภาวะของกระบวนการที่ใช้แยกแป้ง อะไมโลสประกอบด้วยแอนไฮโดรกลูโคไพราโนสประมาณ 200-2,000 หน่วย โดยแป้งส่วนใหญ่มีอะไมโลสเป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 25 ในธรรมชาติพบว่า อะไมโลสมีกิ่งอยู่บ้างแต่ไม่มาก อะไมโลสสามารถทำปฏิกิริยากับไอโอดีน และสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ เช่น บิวทานอล กรดไขมัน สารลดแรงตึงผิว ฟีนอล และไฮโดรคาร์บอน ได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่ละลายน้ำ โดยอะไมโลสจะพันเกลียวล้อมรอบสารอินทรีย์ นอกจากนี้อะไมโลสที่รวมตัวกับไอโอดีนจะให้สีน้ำเงิน ซึ่งใช้เป็นลักษณะเฉพาะที่บ่งบอกถึงแป้งที่มีองค์ประกอบของอะไมโลส

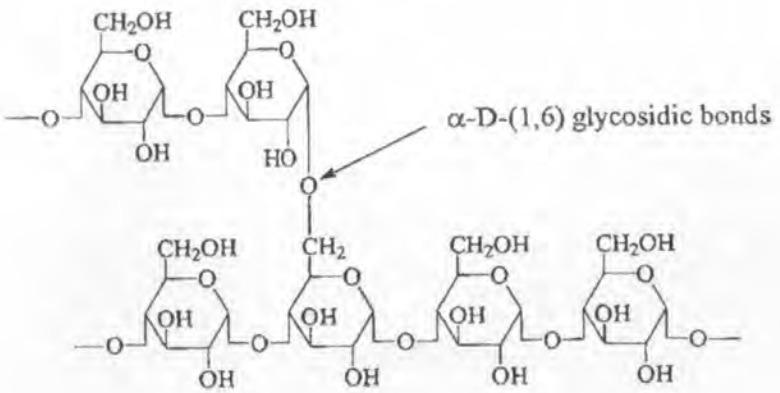


รูปที่ 2.3 โครงสร้างโมเลกุลของอะไมโลส [11]

ผลจากการที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) ในโมเลกุลเป็นจำนวนมาก ทำให้อะไมโลสเป็นพอลิเมอร์ที่มีลักษณะชอบน้ำ (hydrophilic characteristic) กล่าวคือ สามารถดูดความชื้นได้ นอกจากนี้ การที่อะไมโลสมีโครงสร้างเป็นเส้นตรงและเป็นพอลิเมอร์ที่มีขั้ว จึงทำให้โมเลกุลมีแนวโน้มสามารถเกิดการจัดเรียงตัวแบบขนานและอยู่ใกล้กันมากจนสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลที่อยู่ใกล้เคียงกัน ทำให้พอลิเมอร์มีสมบัติทึบแสงและเกิดการละลายได้น้อยลง ในสารละลายเจือจาง พอลิเมอร์สามารถเกิดการรวมกลุ่มกัน ทำให้มีโอกาสตกตะกอนเพิ่มขึ้น ส่วนในสารละลายเข้มข้น ความเกะกะของหมู่ด้านข้างสายโซ่โมเลกุลเข้าไปขัดขวางการจัดเรียงตัวในบางส่วนของพอลิเมอร์ ทำให้เกิดเป็นเจลที่มีลักษณะเป็นโครงสร้างร่างแห 3 มิติ โมเลกุลจึงหดตัวลงและมีความหนาแน่นมากขึ้น ปรากฏการณ์ที่โมเลกุลของแป้งเกิดการรวมตัวกัน และตกตะกอนออกมาในสารละลายเข้มข้นของแป้งนี้เรียกว่า **รีโทรเกรเดชัน** (retrogradation)

2.4.1.2 **อะไมโลเพกติน (Amylopectin)** [11]

อะไมโลเพกตินเป็นพอลิเมอร์ที่แตกสาขามากมาย โครงสร้างเป็นสายประกอบด้วยกลูโคสเชื่อมต่อกันเป็นเส้นตรงด้วยพันธะแอลฟา-1,4-ไกลโคซิดิก (α-1,4-glycosidic) ส่วนบริเวณรอยต่อระหว่างโซ่หลักกับกิ่งจะต่อกันด้วยพันธะแอลฟา-1,6-ไกลโคซิดิก (α-1,6-glycosidic) ดังรูปที่ 2.4 อะไมโลเพกตินเป็นโมเลกุลของพอลิเมอร์ ที่มีขนาดใหญ่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าอะไมโลส ประมาณ 1,000 เท่า



รูปที่ 2.4 โครงสร้างโมเลกุลของอะไมโลเพกติน [11]

สมบัติที่สำคัญมากที่สุดของแป้ง คือ การเกิดความหนืดเมื่อรวมตัวกับน้ำ ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดเจลาติไนเซชัน (gelatinization) ในแป้ง กล่าวคือน้ำสามารถเข้าไปในโมเลกุลของแป้งในส่วนที่มีการจัดเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบได้ ถ้าให้ความร้อนกับแป้งที่อุณหภูมิ 60-70 องศาเซลเซียส แป้งจะเกิดการพองตัว อุณหภูมิในช่วงนี้เรียกว่า อุณหภูมิเจลาติไนเซชัน (gelatinization temperature) ณ อุณหภูมินี้ โมเลกุลของแป้งในส่วนที่เป็นระเบียบจะคลายตัวลง เกิดการดูดน้ำได้เป็นสารละลายแป้งที่มีความหนืดและใสขึ้น นอกจากนี้ ความหนืดของแป้งยังเป็นผลมาจากการมีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระ ซึ่งทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของแป้ง ทำให้สารละลายแป้งมีความหนืด

ส่วนของแป้งที่เอื้ออำนวยต่อการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ คือ โครงสร้างที่เป็นสายตรง โดยจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายด้วยเอนไซม์เบตาอะไมเลส (β-amylase) ทำลายเฉพาะพันธะไกลโคซิดิกแบบ α-1,4 เท่านั้น ส่วนพันธะไกลโคซิดิกแบบ α-1,6 ไม่สามารถทำลายได้ ดังนั้น การย่อยแป้งซึ่งส่วนใหญ่มีโครงสร้างเป็นอะไมโลเพกติน จึงได้เป็นสายสั้นของแป้งที่เรียกว่า เดกซ์ทริน (dextrin) เท่านั้น

2.4.2 การนำแป้งมาทำเป็นเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch หรือ TPS) [13]

ในระยะเริ่มต้นมีการใช้แป้งเป็นสารเติม (filler) ในพอลิโอเลฟินส์ (polyolefins) ต่อมาได้มีการปรับปรุงโครงสร้างของแป้งให้สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการอัดรีดกลายเป็นแผ่นฟิล์มที่มีสมบัติคล้ายคลึงกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ แป้งไม่ใช่เทอร์โมพลาสติกอย่างแท้จริง แต่เมื่อมีการเติมพลาสติไซเซอร์ที่เหมาะสม เช่น น้ำ กลีเซอรอล ซอร์บิทัล (sorbital) ภายใต้อุณหภูมิสูงประมาณ 90-180 องศาเซลเซียส และได้รับแรงเฉือนอย่างเพียงพอ จะทำให้แป้งสามารถหลอม

และไหลได้ ซึ่งสามารถนำมาขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการอัดฉีด (injection) อัดรีด (extrusion) หรือเป่าขึ้นรูป (blow molding) ได้ เช่นเดียวกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ทั่วไป

2.4.3 **สมบัติของแป้ง** [15]

2.4.3.1 **การดูดซับน้ำ การพองตัวและการละลาย**

น้ำที่อยู่ในเม็ดแป้งมีอยู่ด้วยกัน 3 แบบ คือ น้ำในผลึก โมเลกุลน้ำยึดกับโมเลกุลแป้ง (bound water) และน้ำในรูปอิสระ (free water) โดยมีการจับกับแป้งได้แน่นตามลำดับ และแป้งที่มีความชื้นร้อยละ 8–10 สามารถจับกับน้ำได้แน่นกว่าแป้งที่มีความชื้นสูงกว่านี้ เนื่องจากการจับของน้ำกับหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ของกลูโคสแต่ละหน่วยของแป้ง จะได้สตาร์ชโมโนไฮเดรต [$n(C_6H_{10}O_5 \cdot H_2O)$]

แป้งดิบจะไม่ละลายในน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนซ์เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งที่อยู่ใกล้ๆกัน หรือ water bridges แต่เมื่ออุณหภูมิของสารผสมน้ำแป้งเพิ่มสูงกว่าช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนซ์ พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำจะเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ เม็ดแป้งเกิดการพองตัว ทำให้การละลาย ความหนืดและความใสเพิ่มขึ้น

2.4.3.2 **การเกิดเจลาติไนเซชัน** (gelatinization)

โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) จำนวนมาก ยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีสมบัติชอบน้ำ แต่เนื่องจากเม็ดแป้งอยู่ในรูปของร่างแห ไมเซลล์ (micelles) ดังนั้นการจัดเรียงตัวลักษณะนี้จะทำให้เม็ดแป้งละลายในน้ำเย็นได้ยาก ดังนั้นขณะที่แป้งอยู่ในน้ำเย็นเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย แต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายน้ำแป้ง พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง เม็ดแป้งจะดูดน้ำแล้วพองตัว ส่วนผสมของน้ำแป้งจะมีความหนืดและใสขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่เหลืออยู่รอบๆเม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้นทำให้เกิดความหนืด ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดเจลาติไนเซชัน (gelatinization) อุณหภูมิที่สารละลายเริ่มเกิดความหนืดเรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเจลาติไนซ์ การเกิด เจลาติไนซ์ของแป้งจะทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของแป้งสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆได้ดีขึ้น รวมทั้งพร้อมที่จะถูกย่อยด้วยน้ำย่อยต่างๆได้ดีกว่า

2.5 แป้งมันสำปะหลัง [15]

2.5.1 คุณภาพของแป้งมันสำปะหลัง

แป้งมันสำปะหลังมีขนาดเป็นผงละเอียด สีขาว ลักษณะเด่นของแป้งมันสำปะหลัง คือ มีความบริสุทธิ์สูง มีสิ่งปนเปื้อนต่ำ โดยจะมีสตาร์ชอยู่มากกว่าร้อยละ 95 และมีปริมาณโปรตีนและไขมันอยู่ค่อนข้างต่ำ (น้อยกว่าร้อยละ 1) มีฟอสฟอรัสน้อยว่าร้อยละ 0.04 (Davies และคณะ,1980) ลักษณะของเม็ดแป้งเมื่อตรวจดูด้วยกล้องจุลทรรศน์จะมีรูปร่างเป็นเม็ดกลม หรือรูปไข่ และอาจมีรอยบุ๋มที่ปลายด้านหนึ่งของเม็ด เม็ดแป้งโดยส่วนใหญ่จะมีขนาดปานกลางคืออยู่ในช่วง 3-40 ไมครอนและมีขนาดโดยเฉลี่ยประมาณ 12-15 ไมครอน แป้งมันสำปะหลังจัดเป็นแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสค่อนข้างต่ำ คือร้อยละ 18-23 และมีขนาดแตกต่างกัน โดยมีค่าดีกรีของพอลิเมอไรเซชัน(degree of polymerization , DP) ตั้งแต่ 1,100-3,220

สมบัติในการเกิดปฏิกิริยากับน้ำเป็นสมบัติที่สำคัญในการนำแป้งไปใช้ประโยชน์ เม็ดแป้งที่แขวนลอยอยู่ในน้ำเมื่อได้รับความร้อน พลังงานความร้อนจะไปทำลายพันธะไฮโดรเจนในโครงสร้างของเม็ดแป้ง ทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถเข้าไปจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระของเม็ดแป้งได้ เม็ดแป้งจะเริ่มพองขึ้น แป้งที่มีอะไมโลสสูงจะมีกำลังการพองตัวต่ำกว่าแป้งที่มี อะไมโลสต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของอะไมโลสที่เป็นเส้นตรงจะทำให้เกิดพันธะระหว่างโมเลกุลได้ดี และอะไมโลสอาจจับกับไขมันทำให้ขัดขวางการพองตัวของเม็ดแป้งได้ แป้งมันสำปะหลังจัดเป็นแป้งที่มีอะไมโลสต่ำ จึงมีกำลังการพองตัวที่ดี และมีค่าความสามารถในการละลายได้ซึ่งสัมพันธ์กับการพองตัวสูง อุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชัน (gelatinization) จะอยู่ในช่วง 58-70 องศาเซลเซียส (Moorthy,1985) และพลังงานที่ใช้ในกระบวนการเจลาติไนเซชัน (gelatinization) จะประมาณ 14-17 กิโลจูล/กิโลกรัม

โดยทั่วไปเมื่อเม็ดแป้งที่พองตัวได้รับความร้อน เม็ดแป้งจะเปลี่ยนไปอยู่สภาพของแป้งเปียก (paste) ที่มีความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างมาก และเมื่อแป้งเปียกเย็นลงจะเกิดเป็นเจลขึ้น ลักษณะความหนืดของแป้งมันสำปะหลังจะเปลี่ยนแปลงไปภายใต้สภาวะที่มีการเปลี่ยนอุณหภูมิและมีการกวนอยู่ตลอดเวลา แป้งมันสำปะหลังเมื่อได้รับความร้อนจะมีค่ากำลังการพองตัวสูงจึงให้ความหนืดสูง แต่แป้งเปียกก็ยังคงได้รับความร้อนและแรงกลอย่างต่อเนื่องจะมีความหนืดลดลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นแป้งเปียกของแป้งมันสำปะหลังจะไม่คงตัวมากนัก ซึ่งลักษณะเช่นนี้เป็นข้อจำกัดในการใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นสารให้ความหนืดในผลิตภัณฑ์บางชนิด จึงจำเป็นต้องมีการดัดแปรแป้ง เพื่อช่วยเพิ่มความคงตัวของแป้งเปียก เนื่องจากแป้งมันสำปะหลัง

มีอะไมโลสค่อนข้างต่ำ ทำให้เกิดการจับกันของหมู่ไฮดรอกซิลของอะไมโลสในระหว่างเย็นตัวต่ำ แป้งมันสำปะหลังจึงเป็นแป้งที่มีการคืนตัวต่ำ และให้ลักษณะของแป้งเปียกที่ใส ไม่ทึบแสง

2.6 แนวทางในการศึกษาพลาสติกที่สามารถสลายตัวได้ในทางชีวภาพ [16]

พลาสติกที่สลายตัวได้ทางชีวภาพเป็นพลาสติกที่สามารถสลายตัวได้โดยกระบวนการย่อยสลายชีวเคมีของพลาสติกอันเนื่องมาจากการกระทำของจุลินทรีย์ เช่น แบคทีเรีย และรา เป็นต้น การค้นคว้าวิจัยเพื่อผลิตพลาสติกประเภทนี้สามารถจำแนกออกเป็น 3 แนวทางใหญ่ ๆ คือ

2.6.1 การปรับปรุงสารพอลิเมอร์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ (Modified Natural Polymer)

เป็นการนำเอาสารพอลิเมอร์ที่มีอยู่แล้วในธรรมชาติมาปรับปรุงโดยใช้กระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมี (chemical modification) หรือทางชีวภาพ เพื่อทำการผลิตพลาสติกให้มีสมบัติเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งาน

พลาสติกชนิดนี้มีประโยชน์มาก สามารถใช้ทำชิ้นส่วนสำหรับยึดอวัยวะที่เป็นกระดูกในร่างกายของมนุษย์ ในกรณีที่กระดูกเกิดชำรุดหรือแตกหักและครบกำหนด พลาสติกดังกล่าวก็จะสลายตัวไปโดยไม่เป็นพิษต่อร่างกาย สามารถใช้ทำเป็นฟิล์มสำหรับห่อหุ้มผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ

2.6.2 การสังเคราะห์พอลิเมอร์ที่มีสมบัติสามารถย่อยสลายได้ในทางชีวภาพ

จากที่กล่าวมาแล้วว่ามีพลาสติกสังเคราะห์ประเภทพอลิเอสเทอร์ สามารถถูกย่อยสลายได้ จะต้องมีโครงสร้างเป็นอะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์เท่านั้น เช่น พอลิคาร์โปแลคโทน (polycarpolactone) เรียกย่อว่า พีซีแอล (PCL) และพอลิไกลคอลิค แอซิค (polyglycolic acid) เป็นต้น

พอลิเมอร์สังเคราะห์ตัวอื่น ๆ ที่สามารถย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ เช่น อะโครลีน-อะคริลิคแอซิคโคพอลิเมอร์ (acrolein-acrylic acid copolymer) เช่น พอลิเมอร์ร่วมแบบกราฟของแป้งกับอะคริโลไนไตรล์ ซึ่งเป็นสารพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติดูดซึมน้ำ เป็นต้น

2.6.3 การเติมสารเติมแต่งเพื่อให้พลาสติกมีความสามารถในการย่อยสลายได้ในทางชีวภาพ

วิธีการนี้จะแตกต่างจาก 2 วิธีที่กล่าวมาแล้ว โดยจะทำการศึกษาเพื่อนำสารเติมแต่งใส่ลงไปในพลาสติกที่ใช้กันทั่วไป ซึ่งจะทำให้พลาสติกมีความสามารถในการย่อยสลายได้ในทางชีวภาพ สารเติมแต่งที่ได้รับความสนใจทำการศึกษากันมาก ได้แก่ แป้ง

การเติมแป้งเพียงอย่างเดียวลงไปในพลาสติกโดยไม่ใส่สารเติมแต่งชนิดอื่น พลาสติกประเภทนี้จะถูกจุลินทรีย์ย่อยสลายในส่วนที่เป็นแป้ง ทำให้โครงสร้างของพลาสติกในรูปโครงสร้างแบบรูพรุน (porous structure) ต่อมาก็จะกลายเป็นผงละเอียด ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการย่อยสลายของจุลินทรีย์ พลาสติกที่ใช้ส่วนมากจะเป็นเทอร์โมพลาสติก พลาสติกชนิดนี้สามารถทำการผลิตได้โดยใช้กระบวนการผลิตแบบเดิมได้โดยไม่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงเครื่องจักร

การเติมแป้งผสมกับสารเติมแต่งบางประเภท เช่น กรดไขมัน และ เอสเทอร์ของกรดไขมัน (fatty acid ester) เป็นต้น กรดไขมันที่ใช้ต้องเป็นกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัว ซึ่งจะมีพันธะคู่อย่างน้อยหนึ่งตัว เช่น อัลคินิล เอสเทอร์ (alkenyl ester) หรือไขมันธรรมชาติ (natural fats) พลาสติกชนิดนี้มีการสลายตัวเกิดขึ้น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกจุลินทรีย์จะเข้าไปย่อยสลายแป้งจนหมด เหลือไว้เฉพาะเนื้อพลาสติกที่ง่ายต่อการทำลายและมีพื้นที่ผิวมาก ขั้นตอนที่สอง เกลือของโลหะในดินหรือน้ำบริเวณที่สัมผัสกับพลาสติกจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นได้ด้วยตนเอง (autooxidation) สารเติมแต่งที่สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นได้ด้วยตนเอง เช่น กรดไขมัน โดยจะเกิดเป็นเปอร์ออกไซด์ และ/หรือ ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ขึ้น เปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้เกิดการสลายตัวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ และเป็นผลทำให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ลดลง จนกระทั่งมีน้ำหนักโมเลกุลเพียงพอที่จุลินทรีย์จะสามารถย่อยสลายได้ โดยพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะผ่านกระบวนการเมตาบอลิซึมของจุลินทรีย์เพื่อเปลี่ยนให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ

2.7 สารเติม สารเสริมแรงและความสามารถในการเข้ากันได้ [17]

วัสดุที่มีสถานะเป็นของแข็งจำนวนมากสามารถกระจายตัวได้ดีในเมตริกซ์พอลิเมอร์ เรียกวัสดุเหล่านี้ว่าเป็นสารเติม (fillers) และ/หรือสารเสริมแรง (reinforcements) วัสดุประเภทนี้จัดเป็นสารปรับแต่งที่นิยมใช้สำหรับพลาสติกทุกชนิด เพียงแต่ปริมาณที่ใช้แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติกชนิดนั้น

2.7.1 ลักษณะทั่วไปของสารเติมและสารเสริมแรง

วัสดุประเภทพลาสติกที่นำมาใช้แบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด โดยสามารถใช้สารเติมได้แตกต่างกัน กล่าวคือ

ก. พลาสติกเพื่อการอุปโภค (commodity plastics) ได้แก่ การใช้แป้งทัลคัม (talcum) เป็นสารเติมในพอลิพรอพิลีน และการใช้แร่หินทนไฟเป็นสารเติมผสมลงในพอลิเมอร์ร่วมระหว่าง พอลิไวนิลคลอไรด์ และไวนิลแอซีเตต เป็นต้น

ข. พลาสติกทางวิศวกรรม (engineering plastics) ได้แก่ การใช้เส้นใยแก้วผสมกับพอลิคาร์บอเนต หรือการใช้เศษผ้า (chopped rag) ผสมกับฟีนอลิก เป็นต้น

ค. พลาสติกชนิดพิเศษ (specialty plastics) ได้แก่ การเติมกราไฟท์ลงในเอฟอกซีพรีเพร็กซ์ เป็นต้น

ส่วนสารเติมที่ใช้แบ่งออกเป็น

ก. สารเติมเพิ่มเนื้อ (extender filler) จัดเป็นสารเติมที่มีอนุภาคละเอียดใช้เติมเป็นสารหลักในพลาสติก เพื่อลดค่าใช้จ่ายของวัตถุดิบที่นำมาทำเป็นสารประกอบ เช่น การใช้ผงไม้ในการอัดแบบสารประกอบประเภทฟีนอลิก หรือ โนโวแลค (phenolic molding compound, Novolac) เป็นต้น

ข. สารเติมตามหน้าที่ (functional filler) จัดเป็นสารเติมที่มีราคาถูก ช่วยส่งเสริมหรือสนับสนุนสมบัติตามหน้าที่ตั้งแต่หนึ่งหน้าที่ขึ้นไป ได้แก่ สารเติมแป้งทัลคัม หรือ ไมกาในพอลิพรอพิลีน และสารเติมวอลลาสโทไนท์ในไนลอน เป็นต้น

ค. สารเติมเสริมแรง (reinforcing filler) จัดเป็นสารปรับแต่งที่แตกต่างไปจากสารเติมเพิ่มเนื้อและสารเติมตามหน้าที่ ในเรื่องของขนาดอนุภาค (มีขนาดใหญ่กว่า) วัตถุประสงค์ ช่วยเพิ่มสมบัติของพอลิเมอร์ตั้งแต่ 1 สมบัติขึ้นไปและราคาจะแพงกว่าตัวพอลิเมอร์หลักที่ใช้ เช่น เส้นใยกราไฟต์ในพรีเพร็กซ์เอฟอกซี, เส้นใยเหล็กไร้สนิมและเส้นใยโบรอนในพรีเพร็กค์อิพอกซี เป็นต้น ซึ่งสมบัติดังกล่าวได้แก่

1. ราคาถูก
2. ความถ่วงจำเพาะต่ำ
3. มีเสถียรภาพทางความร้อน
4. หาได้ง่าย
5. สามารถจัดการและร่วมผสมได้ดี
6. มีความเป็นกลางในทางเคมี
7. การดูดซับความชื้นต่ำ
8. ทำให้เข้ากันได้ง่ายโดยใช้สารช่วยประสานพอลิเมอร์
9. ช่วยในกระบวนการได้ดี

2.7.2 สารปรับสภาพพลาสติก

สารปรับสภาพพลาสติก (plasticizers) จัดเป็นของเหลวที่มีความสามารถในการระเหยต่ำ (low volatility) ซึ่งเมื่อเติมลงในพอลิเมอร์แล้วทำให้อ่อนและยืดหยุ่นตัว (soft and flexible) สิ่ง

สำคัญที่ควรพิจารณา คือ ความสามารถเข้ากันได้ (compatibility) ความถาวร (permanence) อายุการใช้งาน (aging) และผลที่มีต่อสมบัติอื่น ๆ ส่วนมากได้แก่ เอสเทอร์ของกรดพลาทาลิก ฟอสฟอริก และ อะดิปิก ใช้มากในพอลิไวนิลคลอไรด์ และ นิยมใช้เพื่อปรับปรุงความสามารถในการหลอมเหลว (melt processability) รวมทั้งความเหนียว (toughness) ของพลาสติกชนิดแข็งเกร็ง (rigid plastics) เช่น เซลลูโลส เอสเทอร์ และอีเทอร์ ในบางกรณีอาจทำหน้าที่เป็นทั้งสารเสถียรภาพทางความร้อน (themal stability) และ สารช่วยหน่วงการติดไฟ (flame retardance) อีกด้วย

ลักษณะของสารปรับสภาพพลาสติกในทางอุดมคติควรมีลักษณะทั่วไปดังนี้คือ

1. ช่วยลดค่าใช้จ่ายลง
2. ช่วยลดตัวแปรในกระบวนการ
3. มีความสามารถในการระเหยต่ำ
4. มีความเสถียรโดยสามารถต้านทานต่อการไหลซึมออกมา (exudation) ต่อการเคลื่อนย้าย (migration) และต่อการขัดออก (rub-off)
5. มีเสถียรภาพต่อสารเคมี
6. ไม่เป็นพิษ ไม่มีกลิ่น ไม่มีสี และไม่มีรส
7. ไม่สามารถติดไฟได้
8. หาได้ง่าย
9. ง่ายต่อการจัดเก็บและจัดการ

การมีสารปรับสภาพพลาสติกร่วมอยู่ในระบบทำให้สมบัติดังต่อไปนี้ดีขึ้น

1. ความสามารถในการทำกระบวนการ
2. ความอ่อนนุ่ม
3. ความสามารถในการคืนกลับ
4. ความสามารถในการดึงยืดเป็นเส้น
5. ความสามารถในการยืดออก
6. ความทนทานต่อแรงกระแทก
7. ความสามารถในการยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ
8. ความใส

แต่การมีสารปรับสภาพพลาสติกร่วมอยู่ในระบบทำให้สูญเสียสมบัติดังต่อไปนี้

1. ความแข็งแรง
2. ความต้านทานต่อการคืบ

3. เสถียรภาพในเรื่องของขนาด
4. มอดุลัสซึ่งเป็นสมบัติที่ระบุถึงความแข็งตึง (stiffness) และความแข็งเกร็ง (rigidity)
5. ความต้านทานต่อสารเคมี
6. ความต้านทานต่อความร้อน
7. ความสามารถในการติดไฟ
8. ความต้านทานต่อไฟฟ้า
9. ความทนทานต่อเชื้อรา และความร้อนในเตาอบ
10. ราคา

2.7.3 **ความสามารถในการเข้ากันได้** (Compatibility) [17]

สิ่งที่จำเป็นอันดับแรกของสารปรับสภาพพลาสติก คือ การเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ กล่าวคือ สารช่วยผสมพลาสติกซึ่งเป็นของเหลวจะต้องผสมกันได้อย่างสม่ำเสมอและเป็นเนื้อเดียวกันกับ พอลิเมอร์ที่เป็นของแข็ง และยังคงสามารถผสมอยู่ได้เมื่อทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง รวมทั้งเมื่อผ่านการใช้งานตลอดอายุของผลิตภัณฑ์

2.7.3.1 **องค์ประกอบของความสามารถในการเข้ากันได้**

วิธีที่ง่ายที่สุด คือ การสมมติว่าโครงสร้างทางเคมีที่คล้ายกันของสารช่วยผสมพลาสติกและพอลิเมอร์สามารถผสมเข้ากันได้ แต่สารที่มีสมบัติแบบนี้ค่อนข้างกว้างจนเกินไป ในทางปฏิบัติส่วนมากระบุว่าสารปรับสภาพพลาสติกและพอลิเมอร์จะต้องมีขั้ว (polarity) ที่คล้ายกัน จึงจะเกิดการผสมเข้ากันได้ ซึ่งสามารถวัดได้จากตัวแปรความสามารถในการละลาย (solubility parameter) และโดยทั่วไปสารปรับสภาพพลาสติกและพอลิเมอร์จะต้องอยู่ภายใน 1-2 หน่วยของการผสมเข้ากันได้แต่ละชนิด ตัวแปรความสามารถในการละลายเกิดจากแรงกระทำ 3 ชนิด คือ แรงดิสเพอร์ชัน (dispersion force) แรงไดโพล (dipole force) และพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bonding)

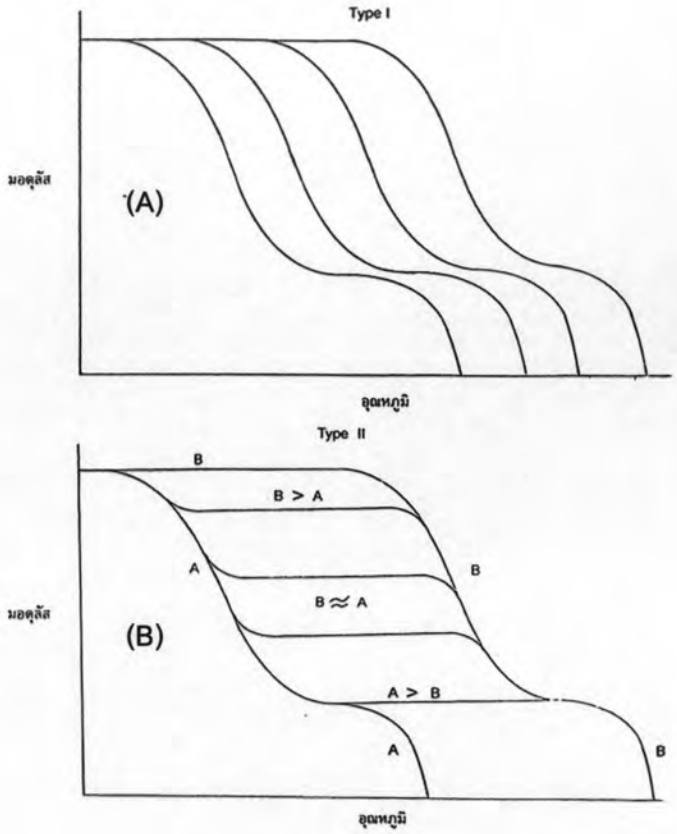
อีกแนวทางหนึ่งสำหรับความมีขั้ว (polarity) คือ การวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) เช่น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก 4-8 บ่งบอกให้ทราบถึงการเข้ากันได้ของพอลิไวนิลคลอไรด์ เป็นต้น ในการวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ใช้พลังงานอิสระในการผสม (free energy of mixing) เป็นตัวแปรบอกให้ทราบถึงการเข้ากันได้ โดยพวกที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะมีค่าเอนโทรปีของการผสมสูงกว่าและอันตรกิริยาของตัวแปร (interaction parameter) จะเป็นตัววัดแรงดึงดูดระหว่างสารปรับสภาพพลาสติกพอลิเมอร์ ทั้งหมดนี้จะต้องนำมาพิจารณาประกอบในเรื่องความสามารถของการเข้ากันได้

2.7.3.2 **ความสามารถในการละลายเข้ากันได้และความสามารถในการผสมเข้ากันได้ (Miscibility and Compatibility)** [17]

ความสามารถในการละลายเข้ากันได้ (miscibility) ในระดับโมเลกุลจัดอยู่ในทฤษฎีเทอร์โมไดนามิกส์ กล่าวคือ เมื่อเกิดขึ้นจะทำให้เกิดระบบวัฏภาคเดี่ยวเนื้อเดียว (homogeneous single-phase system) มีสมบัติอยู่ระหว่างพอลิเมอร์ 2 ชนิด และโดยทั่วไปจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของพอลิเมอร์ชนิดนั้นๆ พอลิเมอร์ผสมจัดเป็นสิ่งที่มีประโยชน์ในทางการค้า โดยเฉพาะเมื่อองค์ประกอบมีส่วนเกี่ยวข้องกับความสามารถในการละลายเข้ากันได้ของโมเลกุล (molecular miscibility) ได้แก่

- น้ำหนักโมเลกุลต่ำ
- ความเป็นผลึกมีค่าเท่ากับศูนย์
- ความมีขั้วคล้ายกัน
- พันธะไฮโดรเจนร่วมกัน

ความสามารถในการผสมเข้ากันได้ (compatibility) จัดเป็นสมบัติในทางปฏิบัติของพอลิเมอร์ผสมบางชนิด ซึ่งละลายได้ในระดับโมเลกุลและมีประโยชน์ในทางการค้า อย่างไรก็ตาม ระบบพอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่ในทางการค้าเป็นระบบที่ไม่ละลาย (immiscible) ในระดับโมเลกุล และแยกออกเป็นระบบหลายวัฏภาค (multi–phase system) ในขณะที่ระบบหลายวัฏภาคนี้เมื่อเวลานานขึ้นจะมีแรงยึดเกาะระหว่างผิวมากขึ้น (strong interfacial adhesion) ทำให้สามารถรวมสมบัติที่ดีที่สุดของแต่ละวัฏภาคและเกิดเป็นความสมดุลของสมบัติทั้งหมดที่ไม่สามารถได้จากสมบัติของพอลิเมอร์บริสุทธิ์โดยลำดับ ยิ่งไปกว่านั้นระบบชั้นนำหลายๆ ระบบมีการปรับปรุงระบบผสมร่วมที่สำคัญ (major synergistic improvement) มากกว่า 1 สมบัติ



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสและอุณหภูมิของพอลิเมอร์ผสม
(A) แบบที่ 1 (B) แบบที่ 2

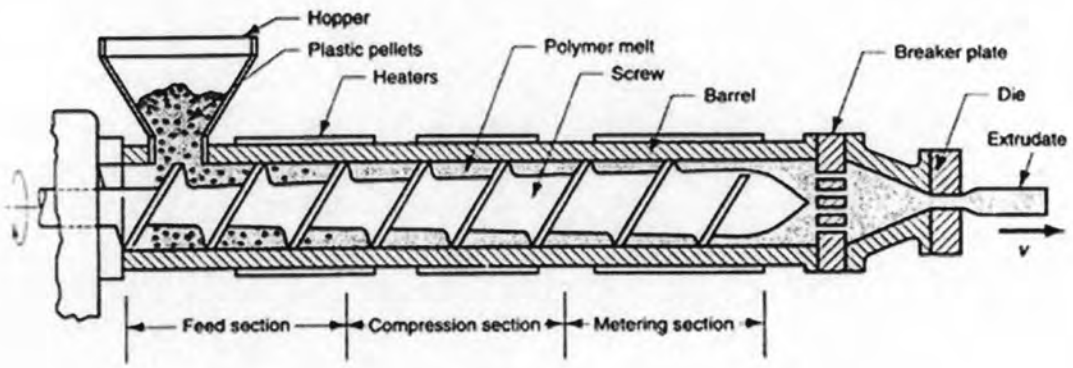
พฤติกรรมของระบบพอลิเมอร์ผสม เมื่อพอลิเมอร์สองชนิดละลายเข้ากันได้อย่างสมบูรณ์ในระดับโมเลกุลและเกิดเป็นวัฏภาคเดี่ยวชนิดเนื้อเดียวกัน (แบบที่ 1) แสดงเป็นเส้นกราฟระหว่างมอดุลัสกับอุณหภูมิโดยจะเลื่อนตามแนวนอน ตามแกนของอุณหภูมิในสัดส่วนที่สัมพันธ์กับปริมาณของพอลิเมอร์ A และ พอลิเมอร์ B ในส่วนผสมแบบเนื้อเดียว (homogeneous blend)

ในทางตรงกันข้าม เมื่อพอลิเมอร์สองตัวไม่ละลายเข้ากันและพอลิเมอร์ผสมแยกออกเป็นสองวัฏภาค (แบบที่ 2) แต่ละวัฏภาคจะแสดงอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้วในแต่ละพอลิเมอร์ และระหว่างอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้วทั้งสองนี้พอลิเมอร์ผสมจะแสดงช่วงระหว่างกลาง (intermediate plateau) ซึ่งขึ้นอยู่กับสัดส่วนของพอลิเมอร์ทั้งสองในส่วนผสมและสมบัติที่ได้ว่ามีประโยชน์มากขึ้นกว่าพอลิเมอร์วัฏภาคเดี่ยวชนิดเนื้อเดียวกัน แต่ต่ำกว่าอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้วของพอลิเมอร์ทั้งสอง และระบบทั้งหมดจัดเป็นระบบแข็งเกร็งและแข็งเปราะ (rigid and brittle) เหนืออุณหภูมิของระบบทั้งสองโดยจะเคลื่อนที่และเกิดความสามารถทางกระบวนการเทอร์โมพลาสติกจากอัตราส่วน A และ B ที่สูง โดยพอลิเมอร์ A จะเกิดเป็นวัฏภาคเมทริกซ์ชนิดต่อเนื่อง

และแสดงลักษณะเด่นของช่วงระหว่างกลางซึ่งจัดเป็นพื้นฐานของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ ด้วยอัตราส่วนระหว่าง B และ A ที่สูง พอลิเมอร์ B จะเกิดเป็นวัฏภาคเมทริกซ์ชนิดต่อเนื่อง และแสดงลักษณะเด่นของช่วงระหว่างกลางซึ่งจัดเป็นเทอร์โมพลาสติกชนิดแข็งและทนทานต่อแรงกระแทก เป็นที่คาดคะเนว่าถ้าได้มีการศึกษาวิจัยอย่างต่อเนื่องและพัฒนาพื้นฐานนี้อาจจะขยายสมดุลของสมบัติไปอย่างกว้างขวาง และมีการนำไปใช้ในทางปฏิบัติโดยตระเตรียมพื้นฐานที่เด่นชัดระหว่างการละลายได้ในระดับโมเลกุลทางทฤษฎีและความสามารถเข้ากันได้ในทางปฏิบัติ

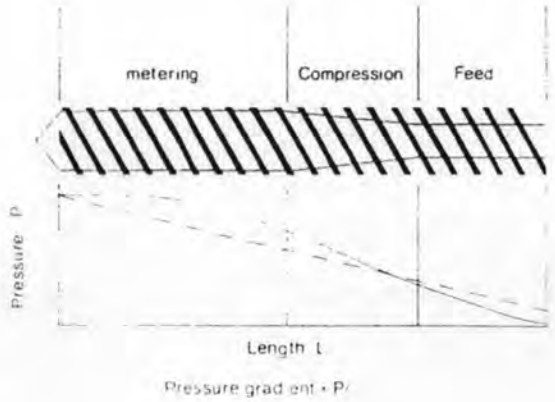
2.8 การขึ้นรูปพลาสติกโดยวิธี Extrusion [18]

Extrusion เป็นขบวนการที่มีการดันพลาสติกหรือ molten material ผ่าน shaped die โดยอาศัยแรงดัน ขบวนการสมัยใหม่จะใช้สกรูเป็นตัวพาหรือนำให้พอลิเมอร์ที่หลอมเหลวและไหลได้ไปตามท่อ barrel ของเครื่อง ในสมัยก่อนหลักการของขบวนการนี้ใช้ในการผลิตโลหะแล้วพัฒนามาใช้กับพอลิเมอร์



รูปที่ 2.6 แสดงเครื่องอัดรีด (extruder) แบบสกรู [18]

เครื่อง Extruder จะประกอบด้วย Archimedian Screw ที่หมุนอยู่ใน cylindrical barrel พอลิเมอร์ที่ยังเป็นของแข็งและมีลักษณะเป็น granule หรือเม็ดเล็กๆ จะถูก feed เข้าด้านหนึ่งของเครื่อง extruder แล้วหลอมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน ถูกดันออกที่ปลายอีกด้านหนึ่งของเครื่อง พอลิเมอร์ที่ใช้ไม่นิยมใช้เป็นผงเพราะจะฟุ้งกระจายเมื่อเทลงใน hopper



รูปที่ 2.7 แสดงส่วนต่าง ๆ ภายในเครื่อง Single screw extruder [18]

2.8.1 ส่วนต่าง ๆ ในเครื่อง Extruder มีดังนี้

1. Feed zone เป็นส่วนที่เริ่มให้ความร้อนกับพอลิเมอร์อย่างช้าแล้วพาพอลิเมอร์เคลื่อนไปยังส่วนต่อไป ส่วนนี้เป็นตัวกำหนดปริมาณของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการขึ้นรูปจะต้องควบคุมอุณหภูมิให้คงที่และการทำ feed พอลิเมอร์อย่างต่อเนื่อง เพราะหากช่วง feed zone หลอมพอลิเมอร์ไม่ทัน ทำให้ขาดตอนหรือเกิดอุดตันอยู่ในท่อ ซึ่งอาจทำให้เกิดการไหม้ขึ้นได้

2. Compression zone หรือ Transition zone เป็นส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงต่างๆ เกิดขึ้นมากมาย กล่าวคือ ความลึกของฟันสกรู (channel depth) ค่อยๆมีขนาดลดลง เนื่องจากขนาดของแกนสกรูจะใหญ่ขึ้น ทำให้เกิดแรงอัด ในส่วนนี้ยังมีการให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องเพื่อให้เม็ด พอลิเมอร์หลอมเต็มที่ ช่องว่างระหว่างเม็ดพอลิเมอร์จะถูกกำจัดจนหมดก่อนไหลผ่านไปส่วนต่อไป ส่วนนี้เป็นตัวกำหนดการเลือกชนิดของสกรูเพื่อให้เหมาะสมกับชนิดของพอลิเมอร์เช่น พอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นต่ำต้องเลือกสกรูที่มี compression zone ยาวเพื่อให้พลาสติกเกิดการหลอมเหลวอย่างช้าๆ เพราะพอลิเมอร์ชนิดนี้มีโครงสร้างเป็นกิ่งก้านจึงมีโอกาสเกิดผลึกค่อนข้างช้า สำหรับไนลอนหลอมเหลวช้าเพราะเกิดผลึกค่อนข้างดี แต่ช่วงการหลอมเหลวสั้น ดังนั้น compression zone ที่เหมาะสมจึงไม่ต้องมีขนาดใหญ่ เป็นต้น

3. Metering zone เป็นส่วนที่ทำให้พอลิเมอร์ที่หลอมเหลวรวมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน (homogenize) และเป็นที่สะสมพอลิเมอร์ที่หลอมเหลวดีแล้วให้เพียงพอก่อนถูกดันออกไปสู่หัว die ความลึกของฟันสกรูในส่วนนี้จะคงที่อีกครั้งแต่น้อยกว่าในส่วน feed zone เป็นส่วนที่พอลิเมอร์ถูกอัดด้วยแรงมากที่สุดจนเป็นเนื้อเดียวกัน โดยอุณหภูมิและความดันเท่ากันทั้งหมด

4. Die zone เป็นส่วนสุดท้ายของเครื่อง extruder จะมี screen pack ติดอยู่มีหน้าที่หลักคือ เพื่อกรองสิ่งแปลกปลอม เช่น เม็ดพลาสติกที่ยังไม่หลอมตัวดี และช่วยทำให้เกิดความดันสูงมากขึ้น ซึ่งเป็นแรงต้านทาน pumping action ใน Metering zone อีกทั้งยังช่วยกำจัด turning

memory ของพอลิเมอร์ที่หลอมเหลว ระหว่าง Metering zone กับ Die zone จะมี breaker plate ซึ่งมีลักษณะเป็นตะแกรง ช่วยเพิ่มแรงดันให้กับเนื้อพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ไหลผ่านไปรวมกันเป็นเนื้อเดียวมากขึ้นที่หัว die

พอลิเมอร์เป็น viscoselastic ประกอบด้วยสายโซ่ของพอลิเมอร์พันกัน ขณะที่ผ่านสกรูมาจะถูกบิดไปตามสกรู ทำให้สายโซ่บิดเบี้ยวไปตามสกรู เกิด turning memory ถ้าไม่มี breaker plate พอลิเมอร์ที่ออกมาจากหัว die จะมีลักษณะบิดเบี้ยวตามสกรู นอกจากนี้ Breaker plate ยังช่วยทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการเรียงตัวในทิศทางเดียวกันของสายโซ่โมเลกุล เพราะ Breaker plate จะเป็นช่อง ๆ ถ้าพอลิเมอร์เรียงตัวกันอยู่ในแนวตั้งฉากเพื่อที่จะไหลผ่านออกไปได้ ดังนั้นโมเลกุลที่ไหลผ่านออกมาจะเรียงตัวขนานในทิศทางเดียวกัน

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Funke และคณะ [19] ได้ทดลองเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (TPS) โดยนำแป้งผสมกับน้ำ กลีเซอรอล หรือซอร์บิทัล และเส้นใย แล้วทำการอัดรีด (extrusion) จากนั้นจึงตัดเป็นเม็ดเพื่อนำเข้าสู่กระบวนการฉีด (injection) ขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบ ผลการทดลองสรุปได้ว่า TPS ที่เตรียมได้จากแป้งที่มีอะไมโลเพกตินซึ่งมีความเป็นกิ่งอยู่มากในปริมาณสูงเกิดการแตกหักได้ง่ายในระหว่างกระบวนการผลิต ในขณะที่ TPS ที่เตรียมจากแป้งที่มีอะไมโลสซึ่งโครงสร้างหลักเป็นเส้นตรงในปริมาณสูงมีความแข็งแรงมากกว่า

กาญจนา อุทัยฉาย และคณะ [20] เตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (TPS) โดยการนำแป้งและกลีเซอรอลมาผสมกันด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ แล้วจึงนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นตัวอย่างด้วยกระบวนการอัดเข้าแม่พิมพ์ โดยทดลองใช้แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวเจ้า และแป้งข้าวเหนียว ผสมกับกลีเซอรอลที่อัตราส่วนร้อยละ 15 20 25 และ 30 โดยน้ำหนักของแป้ง รวมถึงศึกษาการพัฒนาสมบัติเชิงกลของ TPS ด้วยการเติมผงแกลบขนาด 0.250-0.355 มิลลิเมตร และ 0.038-0.150 มิลลิเมตร ผสมกับแป้งในอัตราส่วนร้อยละ 1 และ 3 โดยน้ำหนักของแป้ง นอกจากนี้ได้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติด้านความว่องไวต่อความชื้น โดยการเคลือบผิวชิ้นตัวอย่างด้วยชันสนและการปรับปรุงทางเคมีด้วย เฮกซะเมทิลีนไดไอโซไซยาเนต (hexamethylene diisocyanate) ผลการทดลองพบว่า TPS ที่เตรียมจากแป้งข้าวเหนียวและกลีเซอรอล ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก มีความทนแรงดึงมากที่สุด การเติมผงแกลบขนาด 0.038-0.150 มิลลิเมตร ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ทำให้ TPS มีความทนแรงดึง และความทนแรงกระแทกมากขึ้น และการเคลือบผิวด้วยชันสนช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความว่องไวต่อความชื้น แต่การปรับปรุงทางเคมีที่ผิวชิ้นตัวอย่างด้วยเฮกซะเมทิลีนไดไอโซไซยาเนต (hexamethylene diisocyanate) ไม่ช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความว่องไวต่อความชื้น

Glenn และ Orts [21] ศึกษาสมบัติ และศักยภาพในการทำบรรจุภัณฑ์ใช้ครั้งเดียวทิ้ง โดยนำแป้งข้าวสาลี แป้งข้าวโพด และแป้งมันสำปะหลัง มากวนในน้ำ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และให้ความร้อนจนความหนืดไม่เพิ่มขึ้น แล้วนำไปแช่เย็นที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ค้างคืนไว้เพื่อให้เกิดเจล จากนั้นนำแป้งเจล 1.8 กิโลกรัม มาผสมกับผงแป้ง 3.2 กิโลกรัม แล้วทำการอัดรีดโดยไม่ให้ความร้อนและผ่านเข้าเครื่องตัดเป็นเม็ด และนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นเติมน้ำให้มีความชื้น 8 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ แล้วใส่ถุงเก็บไว้ 24 ชั่วโมง แล้วนำมาอัดเข้าแบบโดยใช้ความร้อน 230 องศาเซลเซียส ด้วยความดัน 3.5 MPa พบว่า แป้งข้าวสาลี แป้งข้าวโพด และแป้งมันสำปะหลัง ที่มีความชื้น 17 และ 14 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ให้โฟมที่มีสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลบางประการที่คล้ายกับบรรจุภัณฑ์ตามท้องตลาด โฟมจากแป้งมีรูปร่างคล้ายพอลิสไตรีน โครงสร้างระดับไมโครแสดงให้เห็นโครงสร้างของโฟมเป็นแบบเซลล์ปิดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร แต่บางส่วนของโฟมมีโครงสร้างคล้ายกับพอลิสไตรีนเซลล์มีขนาดเล็กมาก (น้อยกว่า 0.1 มิลลิเมตร)

Firas, A. และคณะ [22] และ Pang, K. และคณะ [23] ศึกษาพฤติกรรมการหลอมเหลวของเพต พบว่าเพตจะมีอุณหภูมิหลอมเหลว (Tm) อยู่ระหว่าง 255 ถึง 265 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Tg) ของเพตที่ยังไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน (virgin PET) จะพบอยู่ระหว่าง 67 ถึง 140 องศาเซลเซียส เพตและ virgin PET จะมีอัตราการเกิดผลึกที่ช้ามาก ดังนั้นการลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วจากอุณหภูมิหลอมเหลว ไปยังอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว และได้พลาสติกที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน กล่าวคือพลาสติกยังคงความโปร่งแสงสูง

Stojanovic, L. และคณะ [24] ศึกษาความเสถียรต่ออุณหภูมิของแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้ อัตราการให้ความร้อน ที่ 2.5,10,20,40 องศาเซลเซียส ต่อนาที โดยพบว่าแป้งมันสำปะหลังมีอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ที่ 323-353 องศาเซลเซียส และเมื่อให้อุณหภูมิจนถึง 700 องศาเซลเซียส จะมีขี้เถ้าเหลืออยู่ร้อยละ 9.2 ของน้ำหนักทั้งหมด และมีพลังงานกระตุ้นที่ทำให้เกิดการสลายตัวทางความร้อน (activation energies of thermal degradation) ที่ 167 Ea (kJ/mol)

Long, Y. และคณะ [25] ได้ทำการศึกษาการผสมพอลิเมอร์ และพอลิเมอร์คอมพอสิตจากวัสดุทดแทนธรรมชาติเพื่อเสนอแนวทางการค้นหาของวัสดุชนิดใหม่ตลอดจนความคุ้มค่าในการผลิต ในด้านราคาและการนำมาใช้งาน พบว่าข้อเสียหลักของแป้งธรรมชาติเข้ากันได้ยากเมื่อผสม

กับพอลิเมอร์สังเคราะห์ ส่งผลให้เกิดปัญหาความไม่เข้ากันของส่วนผสมทั้งสอง อัตราการย่อยสลายที่เร็วเกินไป และในบางกรณีพบว่า วัสดุจะมีสมบัติเชิงกลลดลงเมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมที่เปียก การผลิตอลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ (aliphatic polyesters) ที่สามารถย่อยสลายได้ เช่น พอลิเอสเทอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางธรรมชาติ (biodegradable polyesters), พอลิแลกติก (polylactic) น่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากมันสามารถผลิตมาจากวัสดุทดแทน เช่น แป้งซึ่งสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ มีพิษต่ำหรือไม่มีอันตรายต่อมนุษย์เลย อีกทั้งยังมีสมบัติเชิงกลที่สามารถทดแทนพอลิเมอร์ที่ใช้กันอยู่ทุกในปกติได้ และการเตรียมในรูปพอลิเมอร์ ยังช่วยทำให้ต้นทุนของการผลิตถูกกว่าการใช้ aliphatic polyesters อย่างเดียว แต่อย่างไรก็ตาม aliphatic polyesters และ พอลิเมอร์ธรรมชาติอาจจะเกิดการผสมที่ไม่ดี ซึ่งทำให้ได้สมบัติที่แย่ลง จึงต้องมีการพัฒนาการเติมสารเติมแต่ง หรือ สารช่วยผสมเพื่อช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ของวัสดุทั้ง 2 ชนิด

Girija, B.G. และคณะ [26] ทำการศึกษาสมบัติการสลายตัวทางความร้อน และสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเพต และสารตัวเติมต่างๆได้แก่ แป้ง, ไซยาโนเอทิเลเตดเซลลูโลส (cyanoethylated cellulose), ผงไม้ดัดแปร (cyanoethylated wood flour) และพอลิแลกไทด์ โดยผลการศึกษาชี้ว่า เพตเกิดการสลายตัวเนื่องจากความร้อน และเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ขึ้น นำไปสู่การลดลงของสมบัติเชิงกล และพบว่าการผสมยังไม่สามารถทำให้การเข้ากันได้ดีระหว่างพอลิเมอร์กับสารตัวเติมต่างๆ

Ramaswamy, M. และคณะ [27] ได้ทำการศึกษาสมบัติของพอลิเอสเทอร์ ที่ถูกดัดแปรให้ย่อยสลายได้ ที่ได้จากกระบวนการฉีดเข้าแม่พิมพ์ โดยทำการปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิ-เอสเทอร์กับแป้งโดยใช้สารช่วยผสมที่โครงสร้างมีองค์ประกอบของหมู่ฟังก์ชันแอนไฮไดร์ด ซึ่งพอลิ-เมอร์ผสมจะถูกหลอมโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ และความเข้มข้นของแป้งในพอลิเมอร์ผสมมีอัตราส่วนตั้งแต่ร้อยละ 10-70 โดยน้ำหนัก การเติมสารช่วยผสมลงไปจะทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นมากกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้เติมสารช่วยผสมสำหรับพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมสารช่วยผสมค่าความแข็งแรงที่ได้จะไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณแป้ง เมื่อเทียบกับพอลิเอสเทอร์ตั้งต้น ขณะที่พอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมสารช่วยผสมค่าความแข็งแรงจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณแป้ง

Wang, S. และคณะ [28] ศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสมและสมบัติของแป้งเทอร์โม-พลาสติก (thermoplastic starch) หรือ TPS และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) โดยใช้มาเลอิกแอนไฮไดร์ด (MAH) เป็นสารช่วยผสมพบว่าสามารถเตรียมพอลิเมอร์ผสมในเครื่อง

อัดรีดเกลียวเดี่ยวโดยเทคนิค one-step reactive extrusion พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติการไหล และรูปร่างสัณฐาน ที่ดีเมื่อใช้สารช่วยผสมหน้าที่ของสารช่วยผสมคือ จะเข้าไปช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ของ TPS และ LLDPE ซึ่งสามารถยืนยันได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยอินฟราเรดสเปกโทรสโกรปี จากการสังเกตการเปลี่ยนตำแหน่งของพีกที่เกิดขึ้นในพอลิเมอร์ผสม

Averous, L. และคณะ [29] ศึกษาเกี่ยวกับสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPS และพอลิคาโปรแลกโทน (PCL) เทคนิคการผสมได้อาศัยการอัดรีด และขึ้นรูปด้วยเทคนิคกระบวนการฉีดเข้าแม่พิมพ์ ซึ่งพบว่าสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนขึ้นอยู่กับความเข้ากันได้ของเฟสทั้งสอง และพฤติกรรมของเฟสแป้ง ถ้าเฟสแป้งมีพฤติกรรมคล้ายแก้ว (glassy behavior) จะทำให้ค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันถ้าเฟสแป้งมีพฤติกรรมคล้ายยาง (rubbery behavior) จะทำให้ค่ามอดุลัสลดลง