

บทที่ 2

ทฤษฎีและวารสารปริทรรศน์

2.1 พลาสติกกับการย่อยสลาย [2]

พลาสติก เป็นวัสดุที่มีการใช้งานกันแพร่หลายมาก แต่องค์ประกอบทางเคมีของพลาสติกส่วนใหญ่มีความเฉื่อยต่อสารเคมีและจุลินทรีย์ ทำให้ยากต่อการกำจัด นำมาซึ่งปัญหาการเพิ่มปริมาณของขยะพลาสติกเป็นจำนวนมากจนถึงปัจจุบันนี้ การศึกษาการสลายตัวของพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบของพลาสติก จึงเป็นแนวทางที่สามารถนำมาประยุกต์เพื่อการวิจัยและพัฒนาในการผลิตพลาสติกที่สามารถย่อยสลายด้วยกระบวนการทางธรรมชาติได้

2.1.1 การสลายตัวของพอลิเมอร์

การสลายตัวของพอลิเมอร์ สามารถเกิดขึ้นได้โดยอาศัยปฏิกิริยาการขาดของพันธะเคมี และการเกิดปฏิกิริยาต่างๆที่สายโซ่หลักของโมเลกุลพอลิเมอร์ รวมทั้งที่หมู่ข้างเคียงด้วย ประเภทของการสลายตัวของพอลิเมอร์ แบ่งได้เป็น

1. การสลายตัวทางเคมี

เกิดขึ้นในกระบวนการที่มีสารเคมีต่างๆ เช่น กรด ด่าง และสารละลาย เป็นต้น ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยานี้ขึ้นที่อุณหภูมิสูง หรือในสภาวะที่มีพลังงานกระตุ้นเพียงพอในกระบวนการ

2. การสลายตัวทางความร้อน

เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง โดยจะไปเร่งการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ซึ่งยากที่จะแยกแยะว่าเกิด การสลายตัวทางความร้อนอย่างเดียว หรือการสลายตัวทางความร้อนและทางเคมีร่วมกัน เพราะว่าสารประกอบของพอลิเมอร์มักมีสิ่งเจือปนอยู่ เช่น สารเติมแต่งต่างๆ ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับพอลิเมอร์ได้

3. การสลายตัวทางชีวภาพ

เป็นปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมี โดยจุลินทรีย์จะผลิตน้ำย่อยชนิดต่างๆออกมาเพื่อใช้ในการย่อยสลายพอลิเมอร์เป็นอาหาร ซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม (ประมาณ 60–70 องศาเซลเซียส)

4. การสลายตัวเชิงกล

เป็นผลมาจากแรงเฉือน ซึ่งเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้พอลิเมอร์แตกหักเมื่อนำวัสดุไปใช้งาน และจากหลักการนี้เองสามารถนำไปใช้ในการสังเคราะห์โคพอลิเมอร์แบบกลุ่มและแบบกิ่ง

5. การสลายตัวโดยการเหนี่ยวนำด้วยแสง

เป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมี โดยเกิดจากการฉายแสงในช่วงที่มองเห็น (visible light) หรือช่วงแสงที่เหนือม่วง (ultraviolet) ไปยังพอลิเมอร์ ซึ่งแสงจะมีผลกระทบต่อพอลิเมอร์ก็ต่อเมื่อพอลิเมอร์นี้มีหมู่โครโมฟอร์ (chromophore) ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีความสามารถในการดูดกลืนแสง หรือมีสารเติมแต่งที่สามารถดูดกลืนแสงได้ เช่น โฟโตเซนซิไทเซอร์ (photosensitizer)

6. การสลายตัวด้วยรังสีพลังงานสูง

เป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมี โดยเกิดจากการฉายรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าพลังงานสูง (high energy electromagnetic radiation) ไปยังพอลิเมอร์ เช่น รังสีเอกซ์ (X-ray) รังสีแกมมา (γ -ray) หรือรังสีอนุภาค (particle radiation) ตัวอย่างเช่น รังสีแอลฟา (α -ray) เป็นต้น ซึ่งวิธีนี้ไม่จำเป็นที่จะต้องหมู่โครโมฟอร์เหมือนในกรณีของการสลายตัวโดยการเหนี่ยวนำด้วยแสง ทั้งนี้เพราะทุกส่วนของโมเลกุลสามารถถูกกระตุ้นได้ด้วยรังสีที่มีพลังงานสูงเหล่านี้

ความสัมพันธ์ระหว่างประเภทของการสลายตัวต่างๆของพอลิเมอร์นั้น ในภาวะหนึ่งๆอาจจะเกิดการสลายตัวได้หลายประเภทพร้อมๆกัน แต่สำหรับการสลายตัวของขยะพลาสติก แนวโน้มในการศึกษามักเน้นไปที่การนำพอลิเมอร์ธรรมชาติมาผสมกับพลาสติกสังเคราะห์ เพื่อให้เกิดการสลายตัวทางชีวภาพ

2.1.2 พลาสติกที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ

ปัจจุบันได้มีการนำพลาสติกซึ่งเตรียมจากพอลิเมอร์สังเคราะห์มาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งบรรจุภัณฑ์พลาสติก ซึ่งมีปริมาณการใช้ในอัตราสูงขึ้นเมื่อเทียบกับบรรจุภัณฑ์ที่ทำจากวัสดุชนิดอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากพลาสติกมีความทนทาน แข็งแรง กันน้ำ น้ำหนักเบา และมีให้เลือกมากมายหลายชนิด ทำให้สามารถนำไปพัฒนาเพื่อใช้งานได้หลากหลายตามสมบัติของพลาสติกแต่ละชนิด ถึงแม้ว่าการใช้บรรจุภัณฑ์พลาสติกจะเป็นไปอย่างแพร่หลาย และมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอีกในอนาคต แต่ปริมาณขยะที่เกิดจากบรรจุภัณฑ์พลาสติกที่ใช้แล้วได้สะสมมากขึ้นจนก่อให้เกิดปัญหาทางสภาวะแวดล้อม เนื่องจากขยะพลาสติกเหล่านี้ใช้เวลาในการย่อยสลายตามธรรมชาติค่อนข้างนาน หรืออาจไม่สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางธรรมชาติ

จากการศึกษาพบว่า พลาสติกแต่ละชนิดมีความทนทานต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์แตกต่างกันดังตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่า พลาสติกส่วนมากมีความทนทานต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์สูง ส่งผลให้พลาสติกเหล่านี้ยากต่อการย่อยสลายด้วยกระบวนการทางชีวภาพ จึงทำให้เกิดแนวคิดที่จะลดปริมาณขยะพลาสติกเหล่านี้ขึ้นหลายวิธี แต่ที่มักใช้กันมากมีด้วยกัน 2 วิธีคือ

1. การนำขยะพลาสติกกลับมาใช้ใหม่ (recycling) แต่วิธีการนี้มีข้อจำกัด คือ พลาสติกที่ใช้แล้วมักมีสิ่งสกปรกเจือปนอยู่ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่สามารถนำกลับมาใช้กับงานที่สัมผัสกับอาหารและเครื่องดื่มได้ นอกจากนี้ พลาสติกดังกล่าวยังผ่านความร้อนมาแล้วหลายครั้งจากกระบวนการผลิตครั้งก่อนๆ ดังนั้น ในการผลิตครั้งต่อไปพลาสติกอาจใหม่ได้ง่าย และสมบัติเชิงกลของพลาสติกนั้นจะลดลง ซึ่งทำให้มีอายุการใช้งานสั้นลง
2. การใช้สารเติมแต่งในพลาสติกเพื่อให้ผลิตภัณฑ์พลาสติกสามารถสลายตัวได้แบ่งออกเป็น
 - 2.1 สารเคมีประเภทสลายตัวด้วยแสง แสงจะเป็นตัวกระตุ้นสารที่เติมลงไป ให้สามารถไปทำลายโครงสร้างโมเลกุลของพลาสติก แต่วิธีการนี้มีจุดอ่อนคือ หากพลาสติกไม่ถูกแสง เช่น ถูกฝังอยู่ใต้ดิน พลาสติกก็จะไม่เกิดการสลายตัว
 - 2.2 สารย่อยสลายทางชีวภาพ เพื่อให้มีการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ ซึ่งสารประเภทนี้มักเป็นสารจำพวกพอลิเมอร์ธรรมชาติ (natural polymer) ได้แก่ โปรตีน เซลลูโลส แป้ง ลิกนิน เป็นต้น สารเติมแต่งที่นิยมใช้มากที่สุดคือ แป้ง โดยที่แป้งจะแทรกตัวอยู่ในเนื้อของพลาสติกและมีกลไกการสลายของพลาสติก คือ ชั้นแรกจุลินทรีย์จะปล่อยเอนไซม์อะไมเลส (amylase) เข้าย่อยสลายแป้งในพลาสติกผ่านตัวกลางที่เป็นน้ำ

ทำให้แบงมีโมเลกุลเล็กลงจนสามารถเข้าสู่เซลล์ของจุลินทรีย์ได้ ซึ่งเม็ดแบงจะหายไปจากเนื้อของพลาสติก ทำให้พลาสติกอ่อนลงและมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น ในชั้นที่สอง โលหะและน้ำที่อยู่ในดินจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้สารเปอร์ออกไซด์ (peroxide) ซึ่งสารเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะไปทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์สั้นลง (น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ลดลง) ทำให้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายพลาสติกเกิดเป็นน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ ทั้งนี้อัตราการย่อยสลายขึ้นอยู่กับภาวะแวดล้อม เช่น ความชื้น อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจน ความเป็นกรด-เบส ชนิดของจุลินทรีย์ที่อยู่ในดิน และความหนาของพลาสติกนั้นด้วย

ตารางที่ 2.1 ความทนทานต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ของพลาสติกชนิดต่างๆ [2]

พอลิเมอร์	การใช้งาน	ความทนทานต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์*
Polyethylene	Packaging films, insulation containers	VH
Polypropylene	Packaging films	VH
Poly(vinyl chloride)	Packaging films foam	VH
Poly(vinylidene chloride)	Packaging films of high chemical stability	H
Poly(vinyl acetate)	Packaging films, varnish, fabrics	M
Poly(vinyl alcohol)	Packaging films	H
Polystyrene	Films, foam	H
Poly(methyl methacrylate)	Plexiglas	H
Polytetrafluoroethylene	Insulation	H
Polytrifluorochloroethylene	Insulation	H
Cellulose acetate	Acetate rayon	H
Polyamides	Fabrics	L
Poly(ethylene terephthalate)	Fabrics	F
Silicone	Coating	H
Phenol formaldehyde	Bakelite	H
Urea formaldehyde	-	H

*VH= very high, H= high, M= moderate, L= low, F= fair

จะเห็นได้ว่า วิธีการนี้น่าจะมีประสิทธิภาพมากกว่าการแก้ไขปัญหาด้วยวิธีอื่นๆ อย่างไรก็ตาม กระบวนการดังกล่าวยังคงใช้เวลานานในการย่อยสลายพลาสติก จึงได้เกิดแนวคิดในการเตรียมพลาสติกจากพอลิเมอร์ธรรมชาติโดยตรง เพื่อให้พลาสติกที่เตรียมได้นั้นสามารถถูกย่อยสลายได้ทั้งหมดในเวลาอันสั้น พอลิเมอร์ธรรมชาติที่นำมาใช้ในการศึกษามากคือ แป้ง ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

การย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์ธรรมชาติ เป็นปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมีที่สิ่งมีชีวิตทำการย่อยสลายเพื่อใช้เป็นอาหาร โดยทั่วไป ผลิตภัณฑ์และพลังงานที่ได้จากการย่อยสลายมักถูกนำไปใช้ประโยชน์โดยสิ่งมีชีวิตชนิดอื่น หรือใช้ในการสังเคราะห์สารประกอบขึ้นใหม่ได้ ซึ่งปฏิกิริยาต่างๆไปของการย่อยสลายพอลิเมอร์ให้เป็นโมเลกุลเล็กๆนั้น เกิดจากการผลิตเอนไซม์ของจุลินทรีย์ การย่อยสลายนี้จะจำเพาะในแง่ของทั้งเอนไซม์ และตำแหน่งของพอลิเมอร์ที่เข้าไปทำการย่อยสลาย การย่อยสลายทางชีวภาพจะเกิดขึ้นได้ดีหรือไม่ ขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร ดังนี้

1. ขึ้นกับสภาพแวดล้อม เช่น ความชื้น อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจน ความเป็นกรดเบส
2. ชนิดของจุลินทรีย์
3. น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ คือ ถ้าพอลิเมอร์มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ความสามารถในการย่อยสลายจะสูงขึ้น

2.2 แป้ง (Starch) [5,6]

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อนที่เกิดจากกลูโคสแต่ละหน่วยมาต่อกันเป็นสายยาว ในโครงสร้างพื้นฐานประกอบด้วยมอลโทส (maltose) ของ 4- α -D-กลูโคไพราโนซิล-D-กลูโคไพราโนส เมื่อเติมกรดหรือเอนไซม์ที่สามารถย่อยแป้งได้ จะทำให้แป้งถูกย่อยสลายกลายเป็นกลูโคส

หน่วยย่อยที่สุดของแป้งประกอบไปด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนในอัตราส่วน 6:10:5 สามารถเขียนสูตรเอมพิริกัลได้เป็น $C_6H_{10}O_5$ แป้งจัดเป็นพอลิเมอร์แบบควบแน่นของกลูโคส หน่วยของกลูโคสที่อยู่ในแป้งจัดเป็นหน่วยของกลูโคสที่ปราศน้ำ (anhydroglucose unit) น้ำในโมเลกุลของกลูโคสนั้นหายไปขณะที่มีการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมโรเซชันแบบขั้น (step polymerization) พันธะที่เชื่อมต่อกันระหว่างกลูโคสแต่ละหน่วยในโมเลกุลของแป้ง เรียกว่า พันธะไกลโคซิดิก (glycosidic bond) ซึ่งพันธะนี้สามารถถูกไฮโดรไลซ์ได้ด้วยกรด

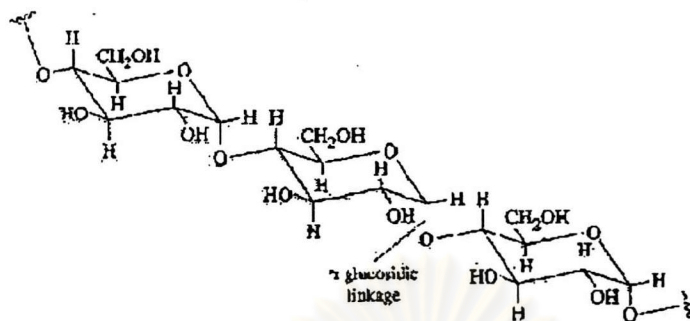
แป้งมีความหนาแน่นประมาณ 1.5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เม็ดแป้งส่วนใหญ่มีรูปร่างกลมหรือเป็นแท่ง มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1–1,000 ไมโครเมตร สำหรับแป้งมันสำปะหลังส่วนใหญ่มีขนาดตั้งแต่ 4–20 ไมโครเมตร

2.2.1 องค์ประกอบและสมบัติของแป้งธรรมชาติ

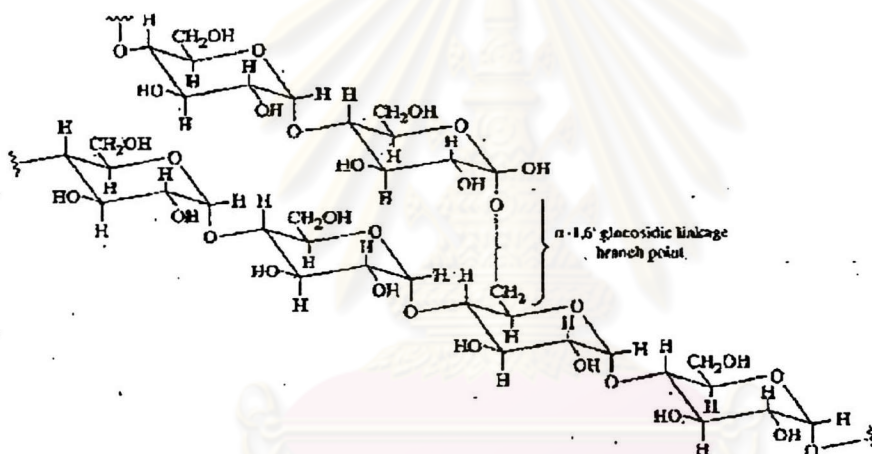
ในโครงสร้างของแป้งประกอบด้วยโมเลกุลหลัก 2 ชนิด คือ อะไมโลส (amylose) และอะไมโลเพกติน (amylopectin) ปกติแป้งมีอะไมโลสประมาณร้อยละ 20–30 และมีอะไมโลเพกตินประมาณร้อยละ 70–80 สำหรับโครงสร้างของแป้งมันสำปะหลังประกอบด้วยอะไมโลสร้อยละ 18 และอะไมโลเพกตินร้อยละ 82

โมเลกุลหลักของแป้ง 2 ชนิด มีลักษณะที่สำคัญดังนี้

1. อะไมโลส (amylose) คือ ส่วนของกลูโคสที่มาต่อกันเป็นสายยาวไม่มีกิ่งก้านสาขา มีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 2,000 ถึง 500,000 ในโครงสร้างของอะไมโลสประกอบด้วยหน่วยของกลูโคสมาต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกแบบ α -1,4 (α -1,4 glycosidic) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 อะไมโลสเป็นองค์ประกอบที่มีความสำคัญ ซึ่งทำให้แป้งเกิดเป็นเจลจากการพองตัวเมื่อไม่มีการกวน ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล ทำให้โมเลกุลหดตัวลงและมีความหนาแน่นมากขึ้น
2. อะไมโลเพกติน (amylopectin) เป็นส่วนของกลูโคสที่ต่อกันเป็นสายซึ่งมีกิ่งก้านสาขาแตกแขนงออกไป โครงสร้างที่เป็นสายประกอบไปด้วยหน่วยของกลูโคสที่มาต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกแบบ α -1,4 ส่วนบริเวณรอยต่อระหว่างโซ่หลักกับกิ่งก้านจะต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกแบบ α -1,6 (α -1,6 glycosidic) ประมาณร้อยละ 4–5 โดยทั่วไปอะไมโลเพกตินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 8,000,000



อะไมโลส



อะไมโลเพกติน

รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน [6]

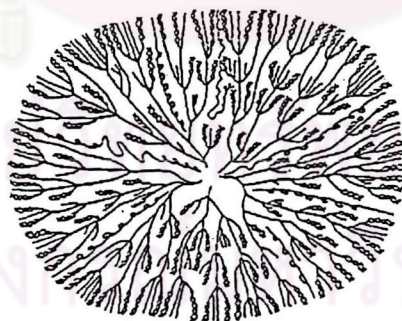
แป้งแต่ละชนิดมีปริมาณของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินไม่เท่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 2.2 โดยโครงสร้างของอะไมโลสเป็นส่วนที่ทำให้เกิดความแข็งแรง เนื่องจากมีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลที่แน่นกว่า เป็นระเบียบมากกว่า หรือเป็นส่วนผลึก อะไมโลเพกตินมีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าอะไมโลส ประมาณ 1,000 เท่า กิ่งก้านสาขาของอะไมโลเพกตินจะขัดขวางการสร้างพันธะระหว่างโมเลกุลในการเกิดเจล อะไมโลเพกตินไม่สามารถละลายน้ำได้ แต่ดูดน้ำและเกิดการพองตัวขึ้น อะไมโลสทำปฏิกิริยากับไอโอดีนให้สีน้ำเงิน ในขณะที่อะไมโลเพกตินให้สีม่วงถึงม่วงแดง ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของแป้ง

ตารางที่ 2.2 ปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพกตินของแป้งชนิดต่างๆ [6]

ชนิดแป้ง	%อะไมโลส	%อะไมโลเพกติน
ข้าวโพด	28	72
มันฝรั่ง	21	79
ข้าวสาลี	28	72
มันสำปะหลัง	17	83
ข้าวเหนียว	0	100
ข้าวฟ่าง	28	72
ข้าว	17	83
ลาคุ	27	73
ท้าวยายม่อม	20	80
ข้าวโพด (amylo maize)	50-80	20-50

ยังไม่เป็นที่แน่ชัดว่าโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน มีการจัดเรียงตัวซึ่งกันและกันอย่างไร แต่โมเลกุลทั้งสองชนิดจะปรากฏกระจายอย่างสม่ำเสมอ มีการเสนอว่าโมเลกุลของอะไมโลเพกตินมีรูปร่างโมเลกุลแบบกิ่งไม้ เป็นรัศมีทรงกลม ส่วนอะไมโลสจับอยู่ปลายส่วนที่เป็นเส้นตรงของอะไมโลเพกติน ทำให้เกิดเป็นสองส่วน คือ

1. ส่วนที่เป็นอสัณฐาน (amorphous area)
2. ส่วนที่เป็นผลึก (crystalline area)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างโมเลกุลของแป้งที่มีอะไมโลสและอะไมโลเพกติน [6]

ส่วนที่เป็นอสัณฐานโมเลกุลจับตัวกันแบบหลวมๆ ประกอบด้วยส่วนที่เป็นกิ่งก้านมีพันธะ α -1,6-ไกลโคซิดิกเป็นส่วนใหญ่ ทำให้การเข้ามาเรียงตัวกันและเกิดพันธะไฮโดรเจนอย่างหนาแน่น จึง

เป็นไปได้ยาก ดังนั้น บริเวณนี้จึงว่องไวต่อความร้อน กรด และเอนไซม์ เพราะฉะนั้น พันธะที่ไม่หนาแน่นจะอยู่ระหว่างส่วนที่เป็นผลึก

สำหรับส่วนที่เป็นผลึกจะจับกันแน่นหนาด้วยพันธะไฮโดรเจน ทั้งนี้เพราะหน่วยของกลูโคสต่อกันด้วยพันธะ α -1,4-ไกลโคซิดิกเป็นส่วนใหญ่ ทำให้โมเลกุลเข้ามาเรียงตัวกัน เกิดพันธะไฮโดรเจนได้ง่าย นอกจากนี้ โมเลกุลที่เป็นเส้นตรงที่อยู่ใกล้เคียงกันและกึ่งก้านส่วนที่เป็นเส้นตรงด้านนอกของโครงสร้างที่เป็นกึ่ง ก็สามารถรวมตัวกันแบบขนานด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้เกิดการรวมตัวกันในแนวรัศมี (radially oriented micelles) ดังรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่า โมเลกุลที่เป็นเส้นตรงสายยาวอาจผ่านหลายๆ ไมเซลล์ หรือรอบนอกของโมเลกุลที่เป็นกึ่งรวมตัวกันเป็นไมเซลล์ ซึ่งลักษณะเหล่านี้อธิบายโดย X-ray spectra หรือ polarization crosses



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของไมเซลล์และกลไกการรวมตัวของเม็ดแป้ง

(T.J. Schoch Products Co., Inc, Argo, Illinois)

สมบัติทั่วไปของแป้งธรรมชาติ คือ ไม่ละลายในน้ำเย็น แต่ดูดน้ำไว้ประมาณร้อยละ 25-30 เนื่องจากการจัดเรียงตัวของโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพกตินในแป้ง มีทั้งส่วนที่จัดเรียงตัวกันอย่างมีระเบียบ และส่วนที่จัดเรียงตัวกันอย่างไม่มีระเบียบ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น การจัดเรียงตัวของโมเลกุลในส่วนที่เป็นระเบียบคลายความหนาแน่นลง เป็นผลให้โมเลกุลของแป้งสามารถรับน้ำได้มากขึ้น แป้งจะพองตัวมากขึ้นเรื่อยๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เมื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้น จนกระทั่งสูงกว่าจุดพองตัวของแป้ง แป้งจะแตกตัวทำให้ละลายน้ำได้

สมบัติที่สำคัญมากที่สุดของแป้ง คือ การเกิดความหนืดเมื่อรวมตัวกับน้ำ ซึ่งเป็นผลจากการเกิด "เจลาติไนเซชัน" (gelatinization) ในแป้ง กล่าวคือ น้ำสามารถเข้าไปในโมเลกุลของแป้งในส่วนที่มีการจัดเรียงตัวกันอย่างไม่มีระเบียบได้ ถ้าให้ความร้อนกับแป้งที่อุณหภูมิ 60-70 องศาเซลเซียส แป้งจะเกิดการพองตัว อุณหภูมิในช่วงนี้เรียกว่า "อุณหภูมิเจลาติไนเซชัน" (gelatinization

temperature) ณ อุณหภูมินี้ โมเลกุลของแป้งในส่วนที่เป็นระเบียบจะคลายตัวลง เกิดการดูดน้ำได้ เป็นสารละลายแป้งที่มีความหนืดและใสขึ้น นอกจากนี้ ความหนืดของแป้งยังเป็นผลมาจากการมี หมู่ไฮดรอกซิลอิสระ ซึ่งทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของแป้ง ทำให้สารละลายแป้ง มีความหนืด

2.2.2 แป้งมันสำปะหลัง (Tapioca or Cassava or Manihot Flour Starch) [7]

แป้งมันสำปะหลังเป็นแป้งที่ได้จากหัวมันสำปะหลัง มานิสอต ยูทิลิสซิมา (*Manihot utilissima*) ลักษณะของแป้งเมื่อดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ (optical microscope) ประกอบด้วยเม็ดแป้ง ตั้งแต่ 2-8 เม็ดมารวมกัน แต่ละเม็ดยาวตั้งแต่ 5-35 ไมโครเมตร (0.005 – 0.035 มิลลิเมตร) เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 15 ไมโครเมตร เม็ดแป้งส่วนมากมีลักษณะเป็นรูปไข่ ซึ่งปลายข้างหนึ่งถูกตัดออก และผิวตรงส่วนที่ตัดออกมีลักษณะเว้าเข้าข้างใน บางเม็ดอาจมีริมด้านหนึ่งโค้ง อีกด้านหนึ่งแบน ไม่สม่ำเสมอ เม็ดแป้งเหล่านี้จะแสดงให้เห็นรอยบุ๋ม (eccentric hilum) อย่างชัดเจน และในบางครั้งอาจเห็นชั้นของแป้งด้วย

มันสำปะหลังเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย โดยนำรายได้เข้าสู่ประเทศเป็นอันดับสามรองจากข้าวและยางพารา นอกจากนี้ แป้งมันสำปะหลังยังเป็นผลิตภัณฑ์หนึ่งที่ใช้มากในอุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมกระดาษ และอุตสาหกรรมสิ่งทอ

อย่างไรก็ดี การใช้ประโยชน์จากแป้งธรรมชาติในการทำผลิตภัณฑ์พลาสติกยังมีข้อจำกัดจากโครงสร้างของแป้งดังที่ได้กล่าวไปแล้ว จะเห็นได้ว่า แป้งมีโครงสร้างที่สม่ำเสมอและมีพันธะไฮโดรเจนเป็นแรงยึดเหนี่ยวโมเลกุลของแป้งไว้ด้วยกัน จึงทำให้สามารถเรียงตัวกันอย่างใกล้ชิดและยึดเหนี่ยวกันอย่างแข็งแรง ส่งผลให้แป้งไม่อ่อนตัวหรือหลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อน ซึ่งเป็นปัญหาในการขึ้นรูปประกอบกับผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติทางกายภาพไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน เช่น เพราะนอกจากนี้ แป้งยังมีความหนืดขณะร้อนสูง ทำให้รวมตัวกับพลาสติกได้ยากในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปซึ่งปกติต้องทำที่อุณหภูมิสูง จึงนับเป็นอุปสรรคสำคัญในการขึ้นรูปแป้งร่วมกับพลาสติก จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงสมบัติของแป้งให้มีความหนืดขณะร้อนลดลง นอกจากนี้ โครงสร้างของแป้งเอง จะไม่ทนต่อสภาพกรด อุณหภูมิสูงและแรงเฉือนจากเครื่องมือ จึงต้องมีการดัดแปรแป้งให้มีสมบัติที่เหมาะสมต่อการใช้งาน ด้วยการทำให้พันธะไฮโดรเจนลดลง หรือทำให้ความสม่ำเสมอของโครงสร้างลดลง

2.2.3 แป้งดัดแปร (Modified Starch) [17,18]

เนื่องจากการนำแป้งที่ได้จากธรรมชาติมาใช้โดยตรงในอุตสาหกรรมอาหารและไม่ใช่อาหารยังมีข้อจำกัดต่อภาวะในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ ซึ่งในบางครั้งเกี่ยวข้องกับค่าความเป็นกรดต่าง อุณหภูมิและแรงเฉือน นอกจากนี้ แป้งธรรมชาติยังไม่ละลายน้ำที่อุณหภูมิห้อง และผลิตภัณฑ์ที่ได้มักมีสมบัติไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้น จึงมีการปรับปรุงสมบัติบางประการของแป้งด้วยการดัดแปร (modification) ให้เป็นแป้งดัดแปร (modified starch) ที่มีสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานมากขึ้น เช่น ทำให้มีลักษณะของผิวสัมผัสที่ดีขึ้น คงทนต่อภาวะในการผลิตได้ดี การเกิดเจลลาติไนซ์และการคืนตัวลดลง มีความคงตัวในการละลายจากการแช่แข็งเพิ่มขึ้น ลักษณะของเนื้อเจลดีขึ้น เป็นต้น ซึ่งวิธีการดัดแปรที่ใช้กันอยู่ทั่วไปมี 3 วิธี ได้แก่

2.2.3.1 วิธีการดัดแปรทางกายภาพ

เป็นวิธีการดัดแปรแป้งโดยใช้ความร้อน ความดัน แรงเฉือน และความชื้น ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงใน 2 ลักษณะ คือ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพของแป้ง เช่น เกิดความไม่ระเบียบ (disorganization) ของเม็ดแป้ง และการทำลายโมเลกุลของแป้ง เช่น การลดขนาดโมเลกุลของแป้ง ตัวอย่างของแป้งที่ผ่านการดัดแปรทางกายภาพ เช่น

แป้งพรีเจลาติไนซ์ (pregelatinized starch)

เป็นการนำเอาแป้งซึ่งอาจมาจากแป้งธรรมชาติหรือผ่านการดัดแปรมาแล้วมาต้มกับน้ำสุก หลังจากนั้น นำไปทำให้แห้งใหม่ ข้อดีของแป้งพรีเจลาติไนซ์ คือ การกระจายตัวได้ดีในน้ำเย็น เหมาะที่จะนำไปผสมกับอาหารปรุงสำเร็จประเภทที่ละลายได้ทันที

การดัดแปรแป้งโดยวิธีทางกายภาพนี้ ภาวะที่เหมาะสมคือ ใช้อุณหภูมิประมาณ 95–110 องศาเซลเซียส ความชื้น 18–27 เปอร์เซ็นต์ และใช้เวลา 12–16 ชั่วโมง ผลของความร้อนและความชื้นจะทำให้โครงสร้างทางกายภาพของเม็ดแป้งเปลี่ยนไป รวมทั้งสมบัติของเม็ดแป้งที่เปลี่ยนไป เช่น พฤติกรรมเกิดเจลของแป้ง

แป้งที่ละลายในน้ำเย็น

แป้งที่ละลายในน้ำเย็นผลิตได้จากการปรับสภาพแป้งด้วยแอลกอฮอล์และด่าง มีลักษณะเนื้อสัมผัสที่เรียบ มีความยืดหยุ่น ความมันเงา และความแข็งแรงสูงกว่าแป้งพรีเจล เนื่องจากเมื่อให้ความร้อน แป้งพรีเจลจะเกิดการเสียรูปร่างของเม็ดแป้งไป และความแข็งแรงลดลงเมื่อนำไปอบ ส่วนแป้งที่ละลายในน้ำเย็นยังคงสภาพของเม็ดแป้งอยู่

กระบวนการผลิตแป้งที่ละลายในน้ำเย็น ทำโดยปรับสภาพเม็ดแป้งด้วยเอทานอล 40 เปอร์เซ็นต์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ผสมให้เข้ากัน ตกตะกอน ล้าง ปรับสภาพให้เป็นกลางด้วยกรด ไฮโดรคลอริก แล้วล้างด้วยเอทานอลอีกครั้ง ทำให้แห้ง

2.2.3.2 วิธีการดัดแปรทางเคมี

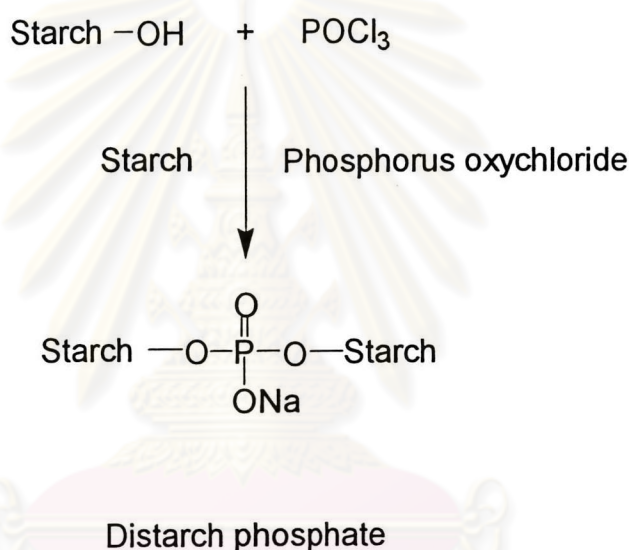
การดัดแปรแป้งด้วยวิธีนี้ จะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลของแป้งเพียงบางส่วนเท่านั้น ตัวอย่างเช่น การใช้กรด หรือสารออกซิไดซ์ มาเปลี่ยนแปลงโครงสร้างธรรมชาติของแป้ง เพื่อลดความหนืดของสารละลายแป้งเมื่อได้รับความร้อน ปฏิบัติการที่เกิดขึ้นมีหลายแบบ เช่น อีเทอร์ฟิเคชัน (etherification) เอสเทอร์ฟิเคชัน (esterification) เป็นต้น สำหรับแป้งที่ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาข้างต้น โดยใช้สารดัดแปรที่มีหมู่ฟังก์ชันเดียว เช่น โพรพิลีนออกไซด์ เอทิลีนออกไซด์ และอะซิติกแอนไฮไดรด์ เป็นต้น จะทำให้เกิดการลดการปฏิสัมพันธ์ของโมเลกุล ทำให้แป้งที่ได้คงตัว เรียกว่า สเตบิไลซ์สตาร์ช (stabilized starch) ถ้าหากทำปฏิกิริยากับสารดัดแปรที่มีหมู่ฟังก์ชันสองหมู่ เช่น ฟอสฟอรัส ออกซีคลอไรด์ และอีพิกลอโรไฮดริน เป็นต้น จะทำให้เกิดการเชื่อมขวางของโมเลกุลของแป้งได้ ตัวอย่างกระบวนการดัดแปรแป้งโดยวิธีการทางเคมี มีดังนี้

การผลิตไดสตาร์ชอะดิเปต (distarch adipate)

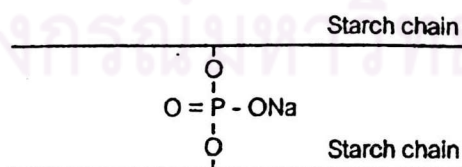
การผลิตไดสตาร์ชอะดิเปต จะใช้อะซิติกแอนไฮไดรด์ผสมกับกรดอะดิปิก เป็นปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันกับสารแขวนลอยของเม็ดแป้งในภาวะเบสอ่อน อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเป็นไปอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดพันธะเชื่อมขวางภายในโมเลกุลแป้ง ได้แป้งที่ทนต่อกรด แต่ถูกย่อยสลายได้ง่ายในภาวะที่เป็นด่างอ่อน

การผลิตไดสตาร์ชฟอสเฟต (distarch phosphate)

การผลิตไดสตาร์ชฟอสเฟต ทำได้โดยการดัดแปรแป้งแขวนลอยด้วยฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์ หรือโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตในภาวะที่เป็นเบส ดังรูปที่ 2.4 อัตราการเกิดปฏิกิริยาของฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์จะดำเนินไปอย่างรวดเร็ว ส่วนอัตราการเกิดปฏิกิริยาของโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตจะเป็นไปอย่างช้าๆ สามารถเร่งปฏิกิริยาให้เร็วขึ้นได้ โดยทำปฏิกิริยาในภาวะที่อุณหภูมิสูง ไดสตาร์ชฟอสเฟตจะมีพันธะเชื่อมขวางที่ดีกว่าไดสตาร์ชอะดิเปต ดังรูปที่ 2.5 จึงทำให้มีความสามารถในการต้านความเป็นกรดอ่อนและด่างอ่อนได้ แต่สามารถถูกย่อยสลายในภาวะที่เป็นด่างปานกลางได้



รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์แป้งไดสตาร์ชฟอสเฟต

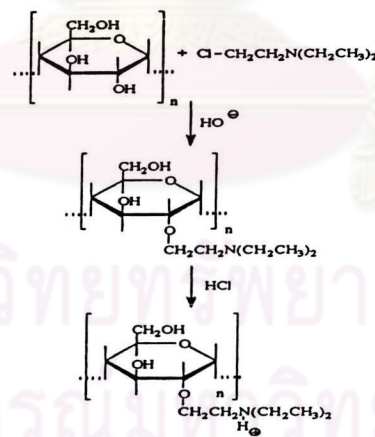


รูปที่ 2.5 โครงสร้างแป้งครอสลิงก์

แป้งดัดแปรที่ได้ทั้ง 2 ชนิดนี้ จัดเป็นการเชื่อมขวางของแป้ง ผลของการเชื่อมขวางทำให้โครงสร้างของเม็ดแป้งมีความแข็งแรงมากขึ้น เป็นการช่วยลดการพองตัวของเม็ดแป้ง ทำให้เพิ่มความแข็งแรงให้แก่เม็ดแป้งโดยเพิ่มความต้านทานต่อภาวะที่กรดหรือภาวะที่มีแรงเฉือน เป็นต้น ซึ่งพันธะเชื่อมขวางในแป้ง เมื่อเทียบกับน้ำหนักของแป้งและปริมาณหน่วยกลูโคสทั้งหมด จะมีปริมาณน้อยมากที่อยู่ในเม็ดแป้ง โดยส่วนใหญ่แป้งครอสลิงก์จะมีการเชื่อมขวาง 1 ตำแหน่งต่อกลูโคส 100-3,000 หน่วย

การผลิตแป้งอีเทอร์

การนำแป้งมาทำปฏิกิริยาอีเทอร์ฟิเคชัน เป็นวิธีการที่ค่อนข้างไม่แพง เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการดัดแปรด้วยวิธีการอื่น ชนิดที่ผลิตมากที่สุด คือ แป้งไฮดรอกซีอัลคิล (hydroxyalkyl starches) เช่น แป้งไฮดรอกซีเอทิล (hydroxyethylstarch) ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างแป้งข้าวโพดหรือแป้งมันฝรั่ง กับเอทิลีนออกไซด์ ที่อุณหภูมิไม่เกิน 50 องศาเซลเซียส มีระดับของการแทนที่ (degree of substitution) ประมาณ 0.05-0.10 ซึ่งเมื่อนำไปทำเป็นฟิล์มแล้วจะได้ฟิล์มที่โปร่งแสง มีความยืดหยุ่นและละลายน้ำได้ สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ เป็นต้น

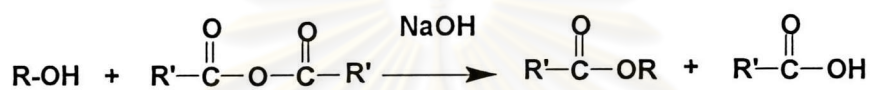
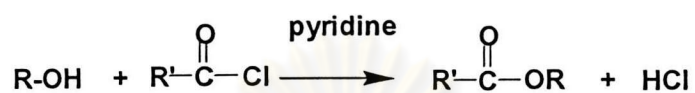


รูปที่ 2.6 โครงสร้างแป้งอีเทอร์ [19]

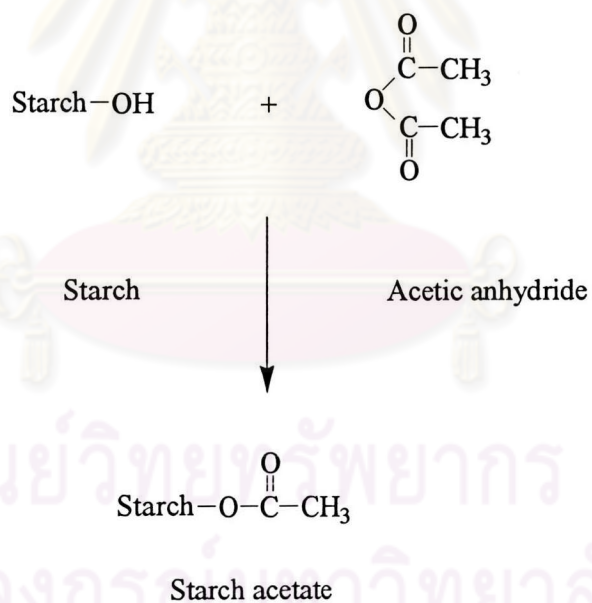
นอกจากนี้ ยังมีการสังเคราะห์ cationic starches ซึ่งเป็นการเติมหมู่ที่เป็นไอออนบวกให้กับแป้ง เช่น ซัลโฟเนียม (sulfonium) ฟอสโฟเนียม (phosphonium) เทอร์เชียรีอะมิโน (tertiary amino) และควอเทอร์นารีแอมโมเนียม (quaternary ammonium) ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.6

การผลิตแป้งเอสเทอร์

มีมากมายหลายประเภท โดยทั่วไปได้จากปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับแอซิดคลอไรด์ (acid chloride) หรือ แอซิดแอนไฮไดรด์ (acid anhydride) และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม ดังนี้



ตัวอย่างเช่น การสังเคราะห์แป้งอะซิเตต โดยใช้อะซิติกแอนไฮไดรด์เป็นสารตั้งต้น



รูปที่ 2.7 การสังเคราะห์แป้งอะซิเตต

การดัดแปรแป้งด้วยปฏิกิริยาอีเทอร์ฟิเคชันและเอสเทอร์ฟิเคชัน ระดับของการดัดแปร มักสูงกว่าวิธีการเชื่อมขวาง โดยทั่วไปหมู่ฟังก์ชันต่างๆจะเข้าแทนที่ ณ หมู่ไฮดรอกซิลของคาร์บอน ตำแหน่งที่ 2 3 หรือ 6 การแทนที่ขึ้นอยู่กับสารเคมีที่เลือกใช้ การแทนที่ของหมู่ฟังก์ชันภายในโมเลกุลของแป้งอีเทอร์และแป้งเอสเทอร์ ทำให้โครงสร้างทางเคมีของแป้งเปลี่ยนไป ทำให้มีผลเกิดการยับยั้ง การคืบตัวของเม็ดแป้งและทำให้แป้งมีความหนืดคงตัว แสดงลักษณะสเตรปีไลด์สตาร์ช มีอุณหภูมิ เจลาติไนเซชันต่ำกว่า แต่มีการพองตัว การละลาย และความชื้นมากกว่าแป้งที่ไม่ได้ดัดแปร ในกรณี ของความหนืดจะมากกว่าหรือน้อยกว่าแป้งที่ไม่ได้ดัดแปร ขึ้นกับปริมาณการเข้าแทนที่ของสารเคมี และขนาดโมเลกุล แต่ทั้งนี้จะไม่แปรผันในทางเดียวกัน และมีสมบัติการคงทนต่อการคืบตัว ณ อุณหภูมิต่ำ

การดัดแปรแป้งด้วยกรด

การนำเอากรดเติมลงไปแป้งที่ละลายในสารละลายกรดเจือจาง ซึ่งให้ความร้อนต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนเซชัน แป้งส่วนใหญ่ยังคงอยู่ในรูปเม็ดแป้ง สามารถนำมาทำให้แห้งได้ แป้งที่เตรียมได้จากวิธีนี้เรียกว่า แอซิด ทินด์ (acid thinned) หรือ ทิน บอยลิ่ง สตาร์ช (thin boiling starch)

การดัดแปรแป้งด้วยปฏิกิริยาแอซิดไฮโดรลิซิส (acid hydrolysis) จะใช้สารละลาย แป้งที่มีความเข้มข้นประมาณ 36–40 เปอร์เซ็นต์ จากนั้น ให้ความร้อนประมาณ 40–60 องศาเซลเซียส เติมกรดไฮโดรคลอริก แล้วกวนให้ทำปฏิกิริยาสักพัก เมื่อได้ความหนืดตามที่ต้องการแล้ว หยุดปฏิกิริยาโดยการทำให้เป็นกลาง แล้วนำไปตกตะกอนหรือกรอง ล้าง แล้วทำให้แห้งต่อไป

การดัดแปรด้วยกรดนี้ กรดจะตัดพันธะไกลโคซิดิกบริเวณผิวของเม็ดแป้ง โดยเฉพาะบริเวณอสัณฐาน ทำให้เกิดอะไมโลสสายสั้นๆเพิ่มขึ้น ง่ายต่อการคืบตัวเมื่อทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ ต่ำ สมบัติของแป้งดัดแปรที่ได้มีดังนี้ ความหนืดน้อยลงที่อุณหภูมิสูง ไม่ละลายในน้ำเย็น สารละลาย แป้งใสมากขึ้น และมีความแข็งแรงเจลาติขึ้น

การดัดแปรแป้งด้วยสารออกซิไดซ์

นำแป้งไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยใช้สารออกซิไดซ์ เช่น โซเดียมไฮโปคลอไรต์ (sodium hypochlorite) แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (ammonium persulfate) และไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์ (hydrogen peroxide) โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันสามารถเกิดได้ 4 ลักษณะ คือ

1. ออกซิเดชันของหมู่อัลดีไฮด์บนอะไมโลสและอะไมโลเพกติน ทำให้กลายเป็นหมู่คาร์บอกซิล
2. ออกซิเดชันของหมู่ไกลคอลลกลายเป็นหมู่อัลดีไฮด์ แล้วกลายเป็นหมู่คาร์บอกซิล
3. ออกซิเดชันของหมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่งคาร์บอนตัวที่ 6 กลายเป็นกรดยูโรนิก (uronic acid)
4. ออกซิเดชันของหมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่งคาร์บอนตัวที่ 2 3 และ 4 กลายเป็นหมู่คีโตน

การตัดแปรรูปวิธีนี้ที่นิยมใช้มาก คือ การใช้โซเดียมหรือแคลเซียมไฮโปคลอไรต์เป็นสารออกซิไดซ์แบ่งที่กระจายอยู่ในน้ำ ปริมาณของไฮโปคลอไรต์จะขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยของคลอรีนต่อน้ำหนักแป้ง ซึ่งแปรผันกับความต้องการในขอบเขตของการตัดแปรรูป ถ้าแป้งมีเปอร์เซ็นต์ของคลอรีนสูง การตัดแปรรูปก็จะเกิดมาก โดยทั่วไปจะใช้คลอรีนไม่เกิน 5-6 เปอร์เซ็นต์ จากนั้น ทำให้แป้งเป็นกลาง สำหรับไฮโปคลอไรต์ที่ยังเหลืออยู่สามารถกำจัดออกได้ โดยการเติมสารรีดิวซ์

แป้งที่ผ่านการตัดแปรรูปแล้วจะมีสมบัติดังนี้

1. ความหนืดขณะร้อนลดลง เพราะเกิดออกซิไดซ์คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 และ 3 ให้เป็นหมู่คาร์บอกซิล แล้วยังไปสลายพันธะไกลโคซิดิก ทำให้โมเลกุลสั้นลง
2. ละลายน้ำได้ง่ายขึ้นเนื่องจากมีหมู่คาร์บอกซิล
3. อุณหภูมิการเกิดเจลลดลง
4. การเกิดรีโทรเกรดชัน (retrogradation) ขณะเย็นน้อยกว่าแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรรูป เนื่องจากหมู่คาร์บอกซิลในอะไมโลสจะไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่อะไมโลส ทำให้สายโซ่อะไมโลสบิดไป การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่จึงเกิดน้อยลง

2.2.3.3 วิธีการตัดแปรรูปทางเทคโนโลยีชีวภาพ

การตัดแปรรูปทางเทคโนโลยีชีวภาพ เกี่ยวข้องกับองค์ประกอบพื้นฐานสำคัญของแป้ง คือ อะไมโลสและอะไมโลเพกติน โดยทั่วไป แป้งมีอะไมโลสประมาณ 20-30 เปอร์เซ็นต์ สำหรับแป้งบางชนิดอาจมีปริมาณอะไมโลสที่สูงกว่าปกติหรือไม่มีเลย จึงทำให้แป้งดังกล่าวมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานแตกต่างกันไป ปัจจุบันได้มีการปรับปรุงพันธุ์พืชที่นำมาผลิตแป้ง 2 ชนิด ดังนี้

แป้งอะไมโลสสูง

แป้งอะไมโลสสูง เป็นแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูง ซึ่งพบในพืชบางชนิด เช่น อะไมโลเมซ (amylo maize) ซึ่งเป็นข้าวโพดที่มีปริมาณอะไมโลสประมาณ 50–80 เปอร์เซ็นต์ อันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม ทำให้ข้าวโพดสายพันธุ์นี้ต่างจากข้าวโพดสายพันธุ์เดิมนั้น จึงทำให้สมบัติต่างๆของแป้งที่ได้จากอะไมโลเมซแตกต่างจากแป้งข้าวโพดสายพันธุ์เดิม โดยรูปร่างของเม็ดแป้งส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นวงรี ขนาดเล็ก พองตัวได้ยาก และมีอุณหภูมิเจลาติไนเซชันสูงกว่าแป้งข้าวโพดพันธุ์เดิม เนื่องจากปริมาณอะไมโลสในส่วนโครงสร้างผลึกสูงกว่า และผลึกมีความคงทนต่อการถูกทำลายในน้ำร้อนมากกว่าแป้งข้าวโพดพันธุ์เดิม สามารถผลิตแผ่นฟิล์มที่มีความแข็งแรงและยืดหยุ่นได้ดี นอกจากนี้ ความยาวสายเฉลี่ยของอะโลเพกตินจะยาวกว่าและน้ำหนักโมเลกุลจะน้อยกว่าในแป้งข้าวโพดพันธุ์เดิม

แวกซีสตาร์ช

แวกซีสตาร์ช เป็นแป้งที่ประกอบด้วยอะไมโลเพกตินเพียงอย่างเดียว พบในธัญพืช เช่น ข้าวเจ้า ข้าวโพด และข้าวฟ่าง เป็นต้น ซึ่งเกิดจากการกลายพันธุ์ เป็นผลให้ธัญพืชดังกล่าวสามารถสังเคราะห์แป้งได้เฉพาะส่วนที่เป็นอะไมโลเพกตินเท่านั้น สมบัติโดยทั่วไปของแป้งชนิดนี้คือ ไม่เกิดการคืบตัวหรือเกิดการคืบตัวเพียงเล็กน้อย มีความมันเงาสูง สามารถชุ่มน้ำได้อย่างรวดเร็ว เป็นต้น

2.2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำแป้งและแป้งดัดแปรมาใช้ในการเตรียมพลาสติกที่ย่อยสลายทางชีวภาพ

การพัฒนาได้เริ่มขึ้น ในปี 1970 โดย Griffin [20-22] ได้นำแป้งข้าวโพดมาใช้เป็นสารตัวเติมในฟิล์มพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) พบว่า สามารถเติมแป้งลงในพลาสติกได้ไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทั้งนี้ต้องควบคุมความชื้นของเม็ดแป้งให้น้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ ถ้ามากกว่านี้จะทำให้สมบัติเชิงกลของพลาสติกเสียไป หรือในกรณีของ Ismail และคณะ [23,24] ได้นำแป้งสาคูมาผสมกับพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลและความสามารถในการย่อยสลายของพอลิเมอร์ผสมดังกล่าว พบว่า ความทนแรงดึง ณ

จุดขาดลดลง เมื่อปริมาณแป้งเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่มอดุลัสเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ เมื่อนำไปย่อยสลายด้วยเอนไซม์ ยังพบว่า สมบัติเชิงกลต่างๆลดลง สำหรับกรณีของสุดา เกียรติกำจรวงศ์ และคณะ [25] ได้ทดลองเติมไฮยาออยล์และเพอร์ริกสเตียเรตลงในพลาสติกพอลิเอทิลีนที่มีแป้งมันสำปะหลังผสมอยู่ ซึ่งพบว่า สารทั้งสองชนิดช่วยทำให้การย่อยสลายทางชีวภาพของพลาสติกดังกล่าวเป็นไปได้ดีขึ้น

ต่อมามีความพยายามทำให้แป้งสามารถเข้ากันได้กับพลาสติกมากขึ้น ด้วยการดัดแปรโครงสร้างทางเคมีของแป้ง เช่น การนำแป้งมันฝรั่งมาทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันกับฟทาสิกแอนไฮไดรด์ได้เป็นฟทาเลต แล้วนำมาผสมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ [9] พบว่า เมื่อผสมแป้งดัดแปรดังกล่าวที่ปริมาณมากกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ความแข็งแรงและความทนแรงดึงเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ค่ามอดุลัสลดลง เมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำซึ่งผสมด้วยแป้งที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปร หรือการนำแป้งมันฝรั่งมาทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันกับกรดไขมัน ได้เป็นเอสเทอร์ของกรดไขมัน แล้วนำไปผสมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเช่นกัน [26] พบว่า แป้งดัดแปรชนิดนี้แสดงพฤติกรรมกรรมกรเป็นพลาสติกไฮเซอร์ภายใน (internal plasticizer) ผลคือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความทนแรงดึงและความสามารถในการยืดดึงเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ของแป้งที่ไม่ผ่านการดัดแปร และยังสามารถเข้ากันได้กับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ นอกจากนี้ ยังมีการใส่สารช่วยผสม (compatibilizer) เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ของพลาสติกกับแป้ง เช่น การเติมโคพอลิเมอร์ของเอทิลีนกับกรดอะคริลิกในของผสมแป้งกับพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ซึ่งช่วยทำให้แป้งกับพลาสติกสามารถเข้ากันได้มากขึ้น [27]

อีกวิธีหนึ่งที่สามารถเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างแป้งกับพลาสติก คือ การสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างแป้งกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของสุดา เกียรติกำจรวงศ์ และคณะ [28] ซึ่งได้สังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับสไตรีนโดยใช้การฉายแสง แล้วนำกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ได้ไปผสมกับแป้งมันสำปะหลังและพอลิสไตรีน เพื่อเตรียมเป็นแผ่นซีทพอลิสไตรีนโดยใช้เครื่องบดแบบสองลูกกลิ้ง จากนั้น นำแผ่นพลาสติกที่ได้มาทดสอบความสามารถในการย่อยสลายในสภาพต่างๆ ได้แก่ out-door exposure การฝังดิน การฉายแสง UV และ bacterial exposure พบว่า แผ่นพอลิสไตรีนนี้มีความสามารถในการย่อยสลายในส่วนของแป้งในทุกสภาพแวดล้อมต่างๆ แต่ส่วนที่เป็นพลาสติกใช้เวลานานกว่า

จากงานวิจัยข้างต้น จะเห็นได้ว่า เม็ดแป้งมีแนวโน้มที่จะแยกตัวออกจากพอลิเมอร์สังเคราะห์และมารวมตัวกันมากกว่าที่จะกระจายตัวอยู่ในพอลิเมอร์สังเคราะห์ ทั้งนี้เป็นเพราะแป้งมีความเป็นไฮโดรฟิลิก ในขณะที่พอลิเมอร์สังเคราะห์ที่นิยมใช้นั้นมักเป็นไฮโดรโฟบิก จึงต้องแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยการเติมสารช่วยผสม หรือการดัดแปรโครงสร้างของแป้งด้วยวิธีต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาพบว่า พลาสติกที่ได้มีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพเพียงบางส่วน (partially biodegradable) จึงได้เกิดแนวคิดซึ่งนำไปสู่การพัฒนาพลาสติกซึ่งใช้เพียงแต่แป้งอย่างเดียวเป็นองค์ประกอบหลัก เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติในการย่อยสลายทางชีวภาพได้ทั้งหมด (fully biodegradable) [29] อาทิเช่น

Glenn และ Hsu [30] ได้ศึกษาโฟมแป้งสาลีจากกระบวนการอัด พบว่า โฟมแป้งที่ได้มีค่าความแข็งแรงสูง และลดลงเมื่อนำมาเก็บภายใต้อุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ เมื่อนำไปอบ โดยมีการสัมผัสอาหารที่มีความมัน ความชื้นต่ำและความชื้นสูง พบว่า ความแข็งแรงและความยืดหยุ่นจะสูญเสียไป และยังเกิดปมขรุขระที่ผิวของโฟมแป้ง ซึ่งปมที่เกิดขึ้น อาจเนื่องมาจากความชื้นที่มีอยู่ในแป้ง จึงมีการเติมมอลโทสลงไป ผลคือสามารถลดการดูดความชื้นของโฟมแป้งที่ได้ แต่ไม่สามารถแก้ปัญหามันที่เกิดขึ้นได้

Pimpan, Ratanarat และ Pongchawanakul [1] ได้ดัดแปรแป้งมันสำปะหลังด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและน้ำเป็นตัวทำละลาย เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นกลางด้วยการเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เมื่อนำแป้งดัดแปรที่เตรียมได้มาขึ้นรูปเป็นแผ่นพลาสติกด้วยวิธีการหล่อ พร้อมทั้งศึกษาลักษณะและสมบัติบางประการของแผ่นพลาสติกดังกล่าวในเบื้องต้นโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์หลายเทคนิค พบว่า ปริมาณของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ทำให้โครงสร้างทางเคมีของแป้งและลักษณะของแผ่นพลาสติกที่เตรียมได้มีความแตกต่างกัน แผ่นพลาสติกดังกล่าวนี้สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ทั้งหมด ไม่สามารถละลายในตัวทำละลายต่างๆไป เช่น คลอโรฟอร์ม หรือสารละลายกรดทั้งที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูง แต่ละลายในสารละลายด่างที่ร้อน นอกจากนี้ ยังพบว่าแผ่นพลาสติกซึ่งเตรียมจากแป้งดัดแปรที่มีสมบัติแตกต่างจากพลาสติกที่เตรียมจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปรกล่าวคือ มีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันและจุดหลอมเหลวที่ต่ำกว่า มีการดูดซึมน้ำที่ดีกว่า และมีความแข็งแรงที่สูงกว่า

Pimpan, Sirisook และคณะ [31] ได้ดัดแปรแป้งข้าวเหนียวด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและน้ำเป็นตัวทำละลาย อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา คือ 50 องศาเซลเซียส ภาวะที่ใช้ในการดัดแปรคือ เมื่อปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็น 5 15 25 35 50 65 75 และ 85 เปอร์เซ็นต์ และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเป็น 30 60 90 และ 120 นาที เมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุด ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นกลางด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก พร้อมทั้งตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของแป้งดัดแปรด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี จากนั้น นำแป้งดัดแปรมาขึ้นรูปเป็นแผ่นพลาสติกด้วยวิธีการหล่อ พร้อมทั้งจับเวลาการแห้งตัว แล้วนำแผ่นพลาสติกที่เตรียมได้มาทดสอบสมบัติความทนแรงดึง การดูดความชื้น และความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ

พบว่า ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่างมีผลต่อสมบัติของแผ่นพลาสติกที่เตรียมได้ ซึ่งโดยรวมแล้วแผ่นพลาสติกที่เตรียมจากแป้งข้าวเหนียวที่ดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 35 เปอร์เซ็นต์ และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที จะให้สมบัติที่ดีที่สุด

Zhiqiang และคณะ [32] ได้เตรียมแป้งเทอร์โมพลาสติกจากแป้งสาลิสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ [แป้งเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic starch) หมายถึง แป้งหลอมเหลวหรือเปลี่ยนแปลงรูปร่างภายใต้อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการสลายตัว และได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายอยู่ในรูปที่มีพอลิแซ็กคาไรด์เป็นพอลิเมอร์เฟส] พบว่า ที่ปริมาณพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 15 เปอร์เซ็นต์ และมีน้ำเป็นพลาสติกไซเซอร์ มีความแข็งแรงสูงกว่าการใช้เอทิลีนไกลคอล โพรพิลีนไกลคอล และกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ตามลำดับ นอกจากนี้ ยังพบว่าสมบัติเชิงกลไม่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ตามที่คาดไว้ ซึ่งอาจเนื่องมาจากรอยเชื่อมประสานระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับแป้งยังไม่ดีพอ

Stading และคณะ [33] ได้ศึกษาผลของความชื้นต่อการทำให้โครงสร้างของฟิล์มอะไมโลสและฟิล์มอะไมเพกตินเปลี่ยนไป พร้อมทั้งเปรียบเทียบสมบัติของฟิล์มที่มีการเติมและไม่มีการเติมกลีเซอรอล พบว่า ฟิล์มอะไมโลสที่มีการเติมกลีเซอรอล มีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นและโครงสร้างของส่วนที่เป็นอสัณฐานให้มีความพรุนมากขึ้น เมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น

งานวิจัยของ Sagar และ Merrill [10] ได้สังเคราะห์แป้งเอสเทอร์ โดยอาศัยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ซึ่งมีเอซิลคลอไรด์เป็นสารดัดแปร โดเมทิลซัลฟอกไซด์เป็นตัวทำละลายและไพรีดีนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และศึกษาสมบัติของแป้งเอสเทอร์ที่ได้ในด้านสมบัติการไหล สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกลและความสามารถในการย่อยสลายได้เอง พบว่า การเพิ่มปริมาณของหมู่เอสเทอร์ ทำให้แป้งเอสเทอร์นี้สามารถขึ้นรูปได้ง่ายขึ้นและมีความอ่อนตัวมากขึ้น แป้งเอสเทอร์ที่มีปริมาณการแทนที่สูงๆ มีการย่อยสลายช้าลง

Thiebaud และคณะ [9] ได้ดัดแปรโครงสร้างทางเคมีของแป้ง โดยใช้คลอไรด์ของกรดไขมัน (fatty acid chloride) ซึ่งชนิดที่เลือกใช้ คือ ออกทานอิลคลอไรด์ และโดเดคาอิลคลอไรด์ และศึกษาผลของความยาวของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนของกรดไขมันที่ใช้ และระดับการแทนที่ (degree of substitution) ด้วยเทคนิคเอพทีไออาร์สเปกโทรสโกปี พบว่า เมื่อความยาวของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนของกรดไขมันเพิ่มขึ้น ความเข้มของพีกที่แสดงถึงหมู่เมทิลและหมู่เมทิลีนเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณการแทนที่สูงขึ้น ความเข้มของพีกที่แสดงถึงหมู่คาร์บอนิลของเอสเทอร์และหมู่เมทิลีนก็เพิ่มขึ้นด้วย เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งที่ไม่ได้ถูกดัดแปร ความเข้มของพีกที่แสดงถึงหมู่ไฮดรอกซิลจะลดลง นอกจากนี้

ยังพบว่าสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนในโครงสร้างของแบง์เอสเทอร์ ยังทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ภายใน ทำให้แบง์เอสเทอร์ที่ได้มีสมบัติเหมือนเทอร์โมพลาสติก

Ramani และคณะ [34] ได้วิจัยโดยใช้ฟทาสิกแอนไฮไดรด์ มาเลิกแอนไฮไดรด์ และแอสิติกคลอไรด์หลายประเภทในการดัดแปรแบง์ข้าวโพด โดยใช้ไดเมทิลซัลฟอกไซด์เป็นตัวทำละลายและไพรีดีนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า สามารถดัดแปรโครงสร้างทางเคมีของแบง์ข้าวโพด ได้รวมทั้งได้ทดลองนำแบง์ดัดแปรไปขึ้นรูปเป็นพลาสติก แล้วนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ พบว่า พลาสติกที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดี อีกทั้งสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ทั้งหมด

Yilmaz และคณะ [35] ได้ศึกษาพื้นฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบของแบง์และน้ำมันดอกทานตะวัน โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ พบว่า ความแตกต่างของเฟสน้ำมันขึ้นอยู่กับ interfacial tension ระหว่างน้ำมันกับแบง์ กลีเซอรอลแสดงพฤติกรรมเป็นโคอิมัลซิไฟเออร์และช่วยลด interfacial tension ระหว่างน้ำมันกับแบง์ ดังนั้น จึงสรุปว่า กลีเซอรอลเป็นสารควบคุมพื้นฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบของแบง์กับน้ำมัน

Zhai และคณะ [36] ได้ศึกษาการเตรียมแผ่นพลาสติกผสมระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับแบง์ โดยใช้รังสี แล้วมีการใช้พลาสติกไซเซอร์ ได้แก่ กลีเซอรอล เอทิลีนไกลคอล และพอลิเอทิลีนไกลคอล พบว่า หลังจากฉายรังสีแล้ว ทำให้ความโค้งงอและความทนแรงดึงเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาภายใน ส่วนชนิดของพลาสติกไซเซอร์ที่ดีที่สุด คือ กลีเซอรอล

Krogars และคณะ [37] ได้ศึกษาลักษณะฟิล์มแบง์มันแกวที่ผสมกลีเซอรอล พบว่า ฟิล์มมีลักษณะพื้นผิวเรียบ ส่วนความดูดความชื้นเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณกลีเซอรอล อุณหภูมิกลาสทรานสิชันของฟิล์มเมื่อใส่กลีเซอรอลจะต่ำกว่าฟิล์มที่ไม่มีกลีเซอรอล และการซึมผ่านของไอน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อเติมกลีเซอรอล

วุฒิ ลีลายุทธเลิศ [11] ได้ทดลองเติมกลีเซอรอลลงไป 20 ส่วนในร้อยละของแบง์ที่ดัดแปรด้วยมาเลิกแอนไฮไดรด์ พบว่า พลาสติกไซเซอร์ช่วยให้การขึ้นรูปฟิล์มจากแบง์ดัดแปรทำได้ง่ายขึ้น และฟิล์มที่ได้มีความสามารถในการยืดตัวเพิ่มขึ้นอย่างมาก แต่ก็ทำให้ความทนแรงดึงของฟิล์มลดลง

ข้อสังเกตจากงานวิจัยเหล่านี้ คือ พลาสติกไซเซอร์ นับได้ว่าเป็นสารเติมแต่งที่สำคัญในการเตรียมผลิตภัณฑ์จากแบง์ดัดแปร หรือแบง์ที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปร โดยพลาสติกไซเซอร์ที่ใช้อาจเป็นในลักษณะของพลาสติกไซเซอร์ภายใน (internal plasticizer) [38] หรือพลาสติกไซเซอร์ภายนอก (external plasticizer) [38] ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของความเป็นไปได้ในการปรับปรุงสมบัติของฟิล์มที่เตรียมจากแบง์ดัดแปร โดยการเลือกใช้ชนิดและปริมาณของพลาสติกไซเซอร์ให้เหมาะสม

2.3 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizer) [39]

พลาสติไซเซอร์เป็นสารเติมแต่งที่ใส่เข้าไปในพลาสติกเรซิน หรืออิลาสโตเมอร์ เพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติด้านการขึ้นรูป (processability) ความอ่อนตัว (flexibility) และการยืดตัว (stretchability) โดยพลาสติไซเซอร์สามารถลดความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลว อุณหภูมิ กลาสทรานสิชัน หรืออิลาสติกมอดุลัสของผลิตภัณฑ์โดยไม่เปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นฐานทางเคมีของวัสดุ

พลาสติไซเซอร์จะละลายในพอลิเมอร์โดยไม่เกิดพันธะทางเคมีต่อกันเพียงแต่เข้าไปแทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ ทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์อยู่ห่างกัน มีการนำพลาสติไซเซอร์มาใช้ในพอลิเมอร์หลายชนิด ซึ่งประมาณ 80–90 เปอร์เซ็นต์ของพลาสติไซเซอร์จะใช้กับพอลิไวนิลคลอไรด์ หรือพีวีซี โดยปกติพอลิไวนิลคลอไรด์จะแข็ง เปราะ และแตกง่าย ยากต่อการขึ้นรูป ซึ่งต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่า 160 องศาเซลเซียส การใส่พลาสติไซเซอร์เพียงเล็กน้อย ทำให้สามารถขึ้นรูปได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 160 องศาเซลเซียส และสามารถทำพีวีซียืดหยุ่น (flexible PVC) ที่ใช้ทำฉนวนหุ้มสายไฟ ทำหนังเทียมหุ้มเบาะเก้าอี้ ทำกระเป๋า กระเบื้องยางปูพื้น ฟิล์ม กระดาษปิดผนังและสายยาง เป็นต้น พลาสติไซเซอร์ในทางการค้าที่นิยมใช้กับพีวีซี ได้แก่ ไดออกทิลฟทาเลต (dioctyl phthalate, DOP)

พลาสติไซเซอร์ปฐมภูมิ (primary plasticizer) สามารถเกิดเป็นเจลกับพอลิเมอร์ได้ในช่วงอุณหภูมิของการขึ้นรูปอย่างรวดเร็วเป็นที่น่าพอใจ และสามารถใช้ประเภทเดียวโดยไม่หลุดออกจากพอลิเมอร์ที่ถูกพลาสติไซซ์ ส่วนพลาสติไซเซอร์ทุติยภูมิ (secondary plasticizer) มีความสามารถในการเกิดเป็นเจลต่ำกว่า และสามารถเข้าเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์ได้จำกัด ดังนั้น จึงจำเป็นต้องใช้ร่วมกับพลาสติไซเซอร์ปฐมภูมิ ส่วนเอ็กซ์เทนเดอร์ (extender) เกิดเป็นเจลกับพีวีซีได้ไม่ดี โดยมักหลุดออกจากพอลิเมอร์ได้ง่ายถ้าใช้เดี่ยวๆ จึงมีการใช้งานในปริมาณจำกัด และมักใช้เป็นตัวทำละลายร่วมสำหรับพลาสติไซเซอร์ปฐมภูมิ

Sanford, Segel และ Barton [40] พบว่า พลาสติไซเซอร์ซึ่งใช้ในเรซินที่มีฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบ จะต้องมีส่วนประกอบที่สำคัญอย่างน้อยที่สุด คือ ไดเอสเทอร์ของกรดเทเรพทาติกหรือไตรเอสเทอร์ของกรดไตรเมลิติก จึงจะทำให้มีประสิทธิภาพในการพลาสติไซซ์ที่ดี มีการระเหยต่ำ มีสมบัติที่อุณหภูมิต่ำดี และมีความต้านทานต่อการสกัดด้วยเฮกเซน

2.3.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับพลาสติกไซเซออร์

2.3.1.1 ทฤษฎีการหล่อลื่น (Lubrication Theory)

โดยทั่วไป พลาสติกไซเซออร์ทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น โดยโมเลกุลของพลาสติกไซเซออร์จะแทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์โดยไม่เกิดพันธะปฐมภูมิกับพอลิเมอร์ ทำให้แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ลดลง มีผลทำให้อุณหภูมิกลาสทรานสิชันของพอลิเมอร์ต่ำลง ดังนั้นพอลิเมอร์ที่แข็งเกร็งคล้ายแก้วจะเปลี่ยนสภาพเป็นยืดหยุ่นและอ่อนนุ่ม ถ้าอุณหภูมิกลาสทรานสิชันของพอลิเมอร์นั้นถูกทำให้ลดต่ำกว่าอุณหภูมิของการใช้งาน นอกจากนี้ ยังช่วยในกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ โดยจะไปลดความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลว

2.3.1.2 ทฤษฎีการละลาย (Solvation Theory)

โดยทั่วไป พลาสติกไซเซออร์เป็นของเหลวที่มีจุดเดือดสูง สามารถเข้าร่วมตัวเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์ได้ดี และติดแน่นอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์โดยไม่สูญหายไปได้ง่าย นอกจากนี้ พลาสติกไซเซออร์ไม่ควรมีแรงดึงดูดกับพอลิเมอร์มากเกินไป เพราะจะทำให้โมเลกุลพลาสติกไซเซออร์ติดแน่นกับโมเลกุลของพอลิเมอร์ และกลับทำให้สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น ผลเช่นนี้ เรียกว่า “แอนติ-พลาสติกไซเซชัน” (anti-plasticization) ดังนั้น โมเลกุลของพลาสติกไซเซออร์ควรเคลื่อนที่ได้ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ แต่ไม่ควรเคลื่อนมารวมกันที่ผิวหน้าของพอลิเมอร์

พลาสติกไซเซออร์ที่ใช้ในทางการค้ามักเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีความเป็นขั้วต่ำและมีอุณหภูมิกลาสทรานสิชัน ตั้งแต่ -50 ถึง -150 องศาเซลเซียส และมีจุดเดือดมากกว่า 300 องศาเซลเซียส การมีจุดเดือดสูงเพื่อป้องกันการระเหยของพลาสติกไซเซออร์ในระหว่างการใช้งาน เอสเทอร์ที่มีความเป็นขั้วต่ำจะเป็นพลาสติกไซเซออร์ที่ดี เพราะสามารถเข้าร่วมตัวกับพอลิเมอร์ ทั้งชนิดที่มีขั้วและที่ไม่มีขั้ว ซึ่งเอสเทอร์ที่ใช้ส่วนใหญ่มาจากกรดเทรเพทาลิก

พลาสติกไซเซออร์ทุกชนิดที่ใช้กับพีวีซี มีพารามิเตอร์การละลาย (solubility parameter) ใกล้เคียงกับพีวีซี แต่จะมีพฤติกรรมในการพลาสติกไซซ์แตกต่างกัน ทั้งนี้เพราะมีแรงดึงดูดระหว่างพอลิเมอร์กับพลาสติกไซเซออร์ที่แตกต่าง เช่น สารประกอบฟอสเฟตจะมีแรงดึงดูดกับพอลิเมอร์สูง จึงเกิดเป็นเจลกับพีวีซีอย่างรวดเร็วและยากที่สกัดออกด้วยตัวทำละลายต่างๆ

ส่วนสารประกอบอะดิเพตมีแรงดึงดูดกับพีวีซีต่ำสุด จึงให้ผลในทางตรงกันข้าม ในขณะที่สารประกอบฟทาเลตมีแรงดึงดูดปานกลางจะใช้ได้ดีที่สุด สมบัติต่างๆของพอลิเมอร์จะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดและปริมาณของพลาสติกไซเซออร์ที่ใช้

2.3.1.3 ทฤษฎีความมีขั้ว (Polarity Theory)

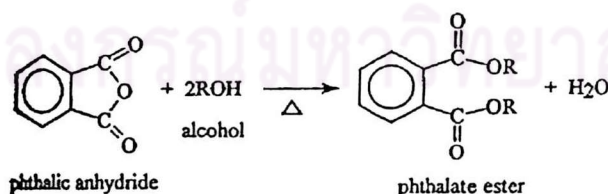
จากทฤษฎีความมีขั้ว แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพลาสติกไซเซออร์ ระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ และระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์กับพลาสติกไซเซออร์จะต้องสมดุลกันเป็นอย่างดี เพื่อให้ทำให้เจลที่ได้มีเสถียรภาพสูง ดังนั้น พลาสติกไซเซออร์จึงต้องประกอบด้วยหมู่มีและไม่มีขั้วที่สอดคล้องกับความมีขั้วของพอลิเมอร์ โดยสภาพมีขั้วหรือความเป็นโพลาร์ของพลาสติกไซเซออร์จะขึ้นกับหมู่ที่ประกอบด้วยออกซิเจน ฟอสฟอรัส และซัลเฟอร์

2.3.2 ชนิดของพลาสติกไซเซออร์

พลาสติกไซเซออร์ที่ใช้งานกันโดยทั่วไป สามารถแบ่งออกได้เป็นกลุ่มใหญ่ๆ ดังนี้ [19]

2.3.2.1 ฟทาเลตเอสเทอร์

เป็นพลาสติกไซเซออร์ที่นิยมใช้ในพีวีซีกันมากที่สุด ฟทาเลตเอสเทอร์ได้จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของฟทาลิกแอนไฮไดรด์ ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของฟทาลิกแอนไฮไดรด์ [19]

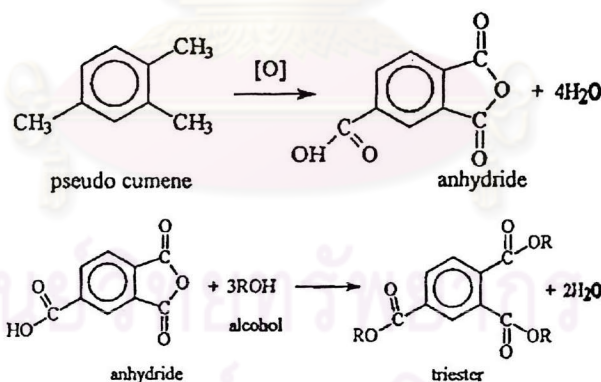
สัญลักษณ์ R เป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนทั้งแบบเส้นตรงและแบบโซ่กิ่ง มีจำนวนคาร์บอนอะตอมตั้งแต่ 4 ถึง 13 เช่น บิวทิลเบนซิลฟทาเลต (BBP) และได-2-เอทิลเฮกซิลฟทาเลต (DOP) เป็นต้น ฟทาเลตเอสเทอร์ที่ดีจะต้องมีอุณหภูมิการใช้งานต่ำและอุณหภูมิการเปราะต้องต่ำ นั่นคือ BBP และ DOP แต่มีข้อเสียคือราคาค่อนข้างแพง

2.3.2.2 เอสเทอร์ของอะดิฟตริกไดแอไซด์

ตัวอย่างคือ อะดิเพตเอสเทอร์ มีขั้นตอนการสังเคราะห์เหมือนฟอสเฟตเอสเทอร์ ชนิดที่ได้รับความนิยมมากที่สุด คือ ได-2-เอทิลเฮกซิลอะดิเพต (DOA) ซึ่งสมบัติของ DOA คือมีการสูญเสียของพลาสติกไซเซออร์สูงและความแข็งแรงเมื่อยืดตัวไม่ดี ดังนั้น เพื่อที่จะได้สมบัติที่สมดุลต้องใช้พลาสติกไซเซออร์ชนิดนี้ร่วมกับพลาสติกไซเซออร์ชนิดอื่น

2.3.2.3 ไตรแอไซด์เอสเทอร์

ประกอบด้วยหมู่เอสเทอร์ 3 หมู่ ขั้นตอนการสังเคราะห์เป็นดังรูปที่ 2.9

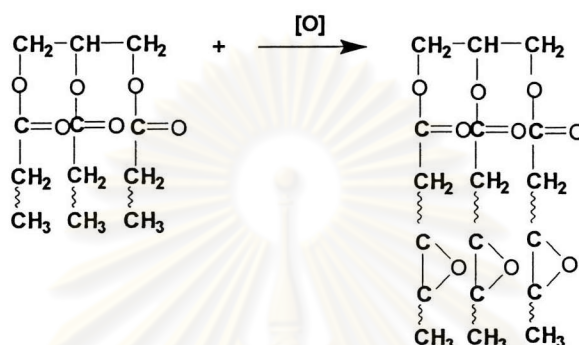


รูปที่ 2.9 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ไตรแอไซด์เอสเทอร์ [19]

สิ่งสำคัญ คือ สมบัติทางกายภาพของไตรออกซิลไตรเมลิเตต (TOTM) และไตรไอโซโนนิลไตรเมทาเลต มีการระเหยต่ำของไตรเมทาเลตและอัตราการสูญเสียซึ่งเป็นข้อดี ข้อเสียคือเป็นพลาสติกไซเซออร์ที่ความเหนียวสูง ทำให้การกระจายตัวและการผสมทำได้ยากกว่าพวกฟทาเลตที่ความเหนียวต่ำ

2.3.2.4 อีพอกซี พลาสติไซเซอร์

เป็นอีพอกซีไดซ์ของน้ำมันธรรมชาติ ทำหน้าที่ทั้งเป็นพลาสติไซเซอร์และสารเพิ่มความเสถียรต่อความร้อนของพีวีซี การสังเคราะห์น้ำมันอีพอกซีไดซ์ทำได้โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมัน ดังรูปที่ 2.10



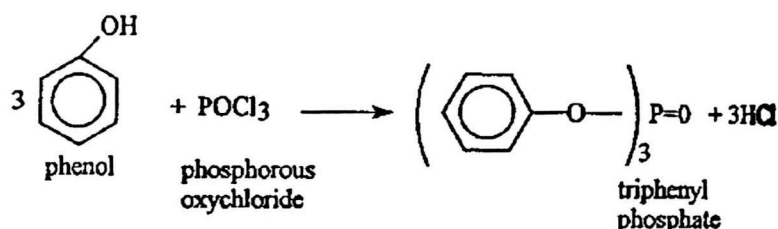
รูปที่ 2.10 ปฏิกิริยาการเตรียมน้ำมันอีพอกซีไดซ์

2.3.2.5 พอลิเอสเทอร์ พลาสติไซเซอร์

ผลจากขั้นตอนหนึ่งของปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของไดแอลลิตกับไดออล ไดออลที่นิยมใช้ส่วนที่สุด คือ เอทิลีนไกลคอล และ 1,4-บิวเทนไดออล ซึ่งเหมาะกับการนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ที่สัมผัสอาหาร ข้อดีของพอลิเอสเทอร์ คือ เป็นพลาสติไซเซอร์ที่มีอายุการใช้งานนาน ใช้ทำรองเท้า ยาง รองเท้าบูต และใช้ผสมในยางที่หุ้มสายเคเบิล เป็นต้น สามารถใช้อย่างเดียวหรือใช้ร่วมกับพลาสติไซเซอร์ชนิดอื่นก็ได้ แต่ไม่เหมาะกับการใช้งานในสภาวะที่มีความชื้นสูง

2.3.2.6 ฟอสเฟตเอสเทอร์

ฟอสเฟตเอสเทอร์เป็นส่วนสำคัญในการผลิตสารต้านทานการติดไฟ เกิดจากปฏิกิริยาฟอสฟอริเซชันของฟีนอลหรือปฏิกิริยาระหว่างฟีนอลกับฟอสฟอรัสออกซิคลอไรด์ ดังรูปที่ 2.11

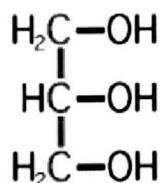


รูปที่ 2.11 ปฏิกิริยาการเตรียมฟอสเฟตเอสเทอร์ [19]

จากงานวิจัยที่ผ่านมา จะเห็นได้ว่า ในกรณีของแป้งและแป้งดัดแปร เมื่อใส่สารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์แล้ว พบว่า ฟิล์มแป้งที่ได้ไม่เปราะ และมีความยืดหยุ่นอีกด้วย สำหรับพลาสติกไซเซอร์ที่นำมาใช้จะต้องมีความเข้ากันได้กับโมเลกุลของแป้ง ที่นิยมใช้มักเป็นพลาสติกไซเซอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันคล้ายคลึงกันกับแป้ง เช่น กลีเซอรอล และซอร์บิทอล เป็นต้น ด้วยเหตุที่งานวิจัยนี้เน้นการเตรียมผลิตภัณฑ์ที่มาจากพอลิเมอร์ธรรมชาติ ซึ่งสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพทั้งหมด ดังนั้น การเลือกใช้พลาสติกไซเซอร์สำหรับงานวิจัยนี้ จึงเน้นไปที่พลาสติกไซเซอร์ที่มาจากสารธรรมชาติ ได้แก่ ซอร์บิทอล (sorbitol) [12] ซึ่งเป็นอนุพันธ์แอลกอฮอล์ของกลูโคส กลีเซอรอล (glycerol) [11] และกรดสเตียริก (stearic acid) [13] ซึ่งเป็นองค์ประกอบของไขมันและน้ำมันชนิดต่างๆ รวมทั้งยังมีการทดลองใช้น้ำมันปาล์ม (palm oil) [14] ซึ่งเป็นน้ำมันที่มีการผลิตมากที่สุดในประเทศไทย เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำน้ำมันธรรมชาติมาทดลองใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์สำหรับแป้งดัดแปร โดยแต่ละชนิดมีคุณลักษณะและสมบัติสำคัญดังนี้

ก. กลีเซอรอล (glycerol)

กลีเซอรอล เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของกรดไขมันหรือผลิตทางการค้าจากปฏิกิริยาการแตกสายโซ่โพรพิลีนที่มีสูตรโครงสร้างแบบย่อ คือ $\text{CH}_2\text{OHCHOHCH}_2\text{OH}$ ไม่มีสี รสหวานและเหลวขุ่น มีจุดเดือดที่ 290 องศาเซลเซียส

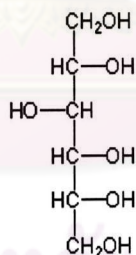


รูปที่ 2.12 สูตรโครงสร้างของกลีเซอรอล

กลีเซอรอลมักใช้ทำเป็นสารละลาย สารให้ความหวาน เครื่องสำอาง หมึก อิมัลซิไฟเออร์และส่วนประกอบยา

ข. ซอร์บิทอล (sorbitol)

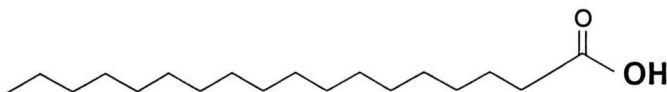
มีโครงสร้างแบบย่อ คือ $\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}_6$ มีฤทธิ์เป็นกลาง เกิดจากปฏิกิริยารีดักชันของกลูโคสในสารละลายน้ำ เป็นสารเพิ่มความนุ่มในสิ่งทอ กระดาษ และหนัง ซอร์บิทอลมีราคาถูกกว่ากลีเซอรอล และใช้เป็นพลาสติกไซเซอรอลที่มีอายุการใช้งานยาวเพราะอัตราการระเหยต่ำ



รูปที่ 2.13 สูตรโครงสร้างของซอร์บิทอล

ค. กรดสเตียริก (stearic acid)

กรดสเตียริก เป็นกรดไขมันอิ่มตัวที่มีสูตรโครงสร้างแบบย่อ คือ $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$



รูปที่ 2.14 สูตรโครงสร้างของกรดสเตียริก

กรดสเตียริกที่อยู่ในอุตสาหกรรมมีอยู่ 2 ชนิด คือ เกรดบริสุทธิ์ (pure grade) เป็นกรดทางเคมีมีชื่อว่า กรดออกทาเดคาโนอิก (*n*-Octadecanoic acid) น้ำหนักโมเลกุล 284.4 เป็นกรดไขมันอิ่มตัว มีจุดหลอมเหลว 69.6 องศาเซลเซียส จุดเดือด 376 องศาเซลเซียส ละลายได้ในอีเทอร์และแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิสูง ไม่ละลายน้ำ มีอยู่ทั่วไปในไขสัตว์และน้ำมันพืช ในรูปของกลีเซอไรด์ อีกชนิดหนึ่งเป็นกรดทางการค้า เป็นสารผสมมีสเตียริกเกรดเคมีอยู่ประมาณ 45 เปอร์เซ็นต์ กรดปาล์มมิติก (palmitic acid) ประมาณ 55 เปอร์เซ็นต์ และกรดไขมันไม่อิ่มตัวอีกเล็กน้อย โดยคุณสมบัติของกรดสเตียริกเกรดทางการค้าจะขึ้นอยู่กับชนิดของไขมันสัตว์ที่ใช้และกรรมวิธีการทำให้บริสุทธิ์ มีจุดหลอมเหลวอยู่ระหว่าง 52–55 องศาเซลเซียส

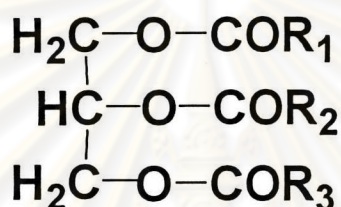
ง. น้ำมันปาล์ม (palm oil)

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชในตระกูล *Palmae* มีชื่อทางพฤกษศาสตร์ว่า *Elaeis Guineensis Jacq.* มีอยู่ตามธรรมชาติในแอฟริกาซึ่งใช้บริเวณมาตั้งแต่สมัยโบราณ [41] ชอบอากาศเขตร้อนที่มีฝนตกชุก การเพาะปลูกปาล์มน้ำมันของโลกจึงจำกัดอยู่ในเขตที่ราบต่ำของภูมิภาคแถบศูนย์สูตรที่มีความชื้นสูง อยู่ในวงเส้นละติจูด 20 องศาเหนือ-ใต้ [42] เป็นที่ราบใกล้ฝั่งทะเล เนื้อดินสมบูรณ์และน้ำไม่ขัง เช่น ดินเหนียวปนทราย ดินจะต้องมีความสามารถในการดูดซึมน้ำได้ดี มีการถ่ายเทอากาศดี

ผลปาล์มน้ำมันประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนที่ให้น้ำมัน คือ ส่วนที่เป็นเนื้อของผล (pericarp) ซึ่งให้น้ำมันปาล์ม และส่วนที่เป็นเมล็ดซึ่งมีเนื้ออยู่ข้างในเมล็ด (palm kernel) ส่วนนี้ให้น้ำมันเมล็ดปาล์ม (palm kernel oil) โดยปริมาณน้ำมันในเนื้อขึ้นอยู่กับพันธุ์ สภาพดินฟ้าอากาศ การบำรุงรักษา และกรรมวิธีในการสกัด แต่โดยเฉลี่ยตามมาตรฐานสากลแล้ว ปริมาณเนื้อผลของปาล์มจะมีน้ำมันอยู่ร้อยละ 20 ส่วนเมล็ดปาล์มมีน้ำมันอยู่ร้อยละ 45–50 โดยในขณะนี้ทั่วโลกมีการใช้เนื้อของผลปาล์มสกัดน้ำมันปาล์มอยู่ร้อยละ 60–80 และมีการใช้เมล็ดปาล์มน้ำมันผลิตน้ำมันปาล์มอยู่ร้อยละ 20–40 นั้น วิธีการสกัดน้ำมันปาล์มออกจากผลปาล์มทำได้โดยการอัดแบบไฮดรอลิกหรือใช้การเหวี่ยงภายหลังจากการอบผลปาล์มในถังที่มีชั้นไอน้ำร้อนอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส น้ำมัน

ปาล์มดิบจะมีสีแดงเข้มอมส้มซึ่งเป็นสีของแคโรทีนอยด์ ซึ่งมีอยู่ในน้ำมันปาล์มดิบ ประมาณ 0.03-0.15 เปอร์เซ็นต์ สีของน้ำมันปาล์มจะถูกทำให้จางลงในขั้นตอนของการฟอกสี และกระบวนการอัดก๊าซไฮโดรเจน

น้ำมันปาล์มใช้ในการปรุงอาหารมากกว่า 5,000 ปีแล้ว [43] ในปัจจุบันส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร มาร์การีน เนยเหลว ครีม สบู่ นอกจากนี้ ยังเป็นส่วนผสมของน้ำมันหล่อลื่น น้ำมันเครื่อง ส่วนผสมของน้ำยาขัดรองเท้า ใช้ในการผลิตกรดไขมัน ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตดินสอสี และเทียน ฯลฯ และน้ำมันปาล์มยังมีส่วนช่วยในการทำเครื่องสำอาง เพราะสามารถแทรกซึมเข้าไปในผิวหนังได้ดีกว่าน้ำมันชนิดอื่น



รูปที่ 2.15 สูตรโครงสร้างของน้ำมันปาล์ม

เมื่อ R_1 , R_2 , R_3 คือ สายโซ่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนของกรดไขมัน ได้แก่ กรดปาล์มมิติก กรดไมลิสติก กรดสเตียริก กรดโอเลอิก และกรดลิโนเลอิก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย