

บทที่ 2 ทฤษฎีและรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลาสติกย่อยสลายได้

2.1.1 ความหมายและคำจำกัดความ

พลาสติกย่อยสลายได้ (degradation plastics) ตามความหมายของ American Society for Testing of Materials (ASTM) และ International Standard Organization (ISO) หมายถึงการที่พลาสติกเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะที่กำหนด โดยการเปลี่ยนแปลงนี้กล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์และเชิงกล อย่างเช่น เกิดรอยแตกร้าว เกิดการกัดกร่อน เปลี่ยนสี หรือการแตกออกเป็นชิ้นส่วน (Shah *et al.*, 2008) และรวมถึง การขาดออกจากกันของพันธะ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างทางเคมี หรือเกิดหมู่ฟังก์ชันใหม่ (Kolybaba *et al.*, 2003) มีปัจจัยต่างๆ คือ แสง ความร้อน ความชื้น สารเคมี หรือกระบวนการทางชีวภาพ ส่งผลให้เกิดการสูญเสียสมบัติบางประการที่สามารถวัดค่าได้ โดยใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐานต่างๆ สามารถแบ่งพลาสติกย่อยสลายได้ออกเป็น 4 ประเภทดังนี้ (ธนาวดี, 2549)

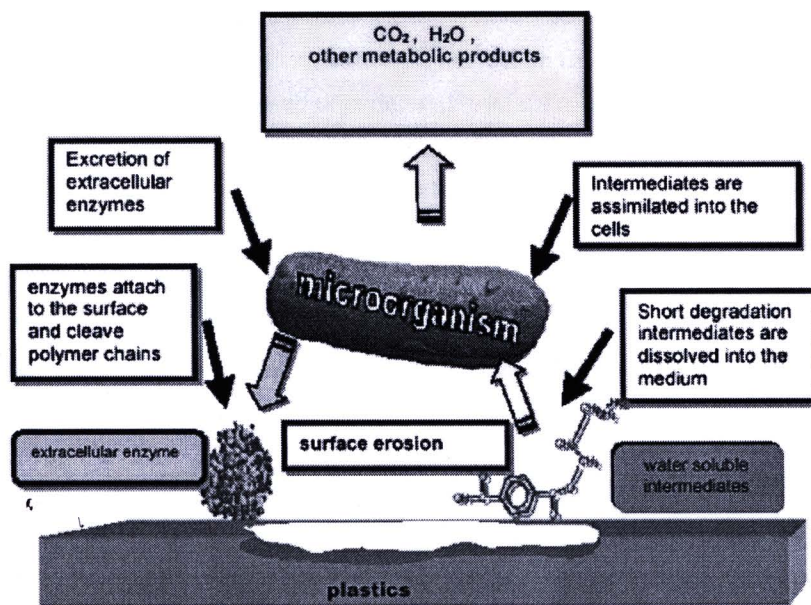
1. พลาสติกที่สลายได้ด้วยแสง (Photodegradable plastics) การย่อยสลายโดยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความไวต่อแสงลงในพลาสติก หรือการสังเคราะห์โพลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรงแตกหักง่ายภายใต้รังสียูวี (UV irradiation) เช่น หมู่คีโตน (ketone group) ให้อยู่ในโครงสร้าง เมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับรังสียูวีจะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (free radical) ซึ่งไม่เสถียร จึงสามารถเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่โพลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ แต่การย่อยสลายนี้จะไม่เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบขยะ หรือสภาวะอื่นที่มืด หรือแม้กระทั่งขึ้นพลาสติกที่มีการพิมพ์ด้วยหมึกที่หนาบบนพื้นผิว เนื่องจากพลาสติกจะไม่ได้สัมผัสกับรังสียูวีโดยตรง

2. พลาสติกที่สลายได้โดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidatively degraded plastics) การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติก เป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของโพลิเมอร์ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เอง ในธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจนและความร้อน แสงยูวี หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxide, ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (stabilizing additive) แสงและความร้อนจะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ ($RO\cdot$ และ $\cdot OH$) ที่ไม่เสถียร และเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่โพลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว

3. พลาสติกที่สลายได้โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytically degradation plastics) การย่อยสลายของโพลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิแอมไทรไคด พอลิคาร์บอเนต พอลิเอไมด์ และพอลิยูรีเทน ผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยมีความชื้นจากสิ่งแวดล้อมและสารเคมีหรือเอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาก่อให้เกิดการแตกหักของสายโซ่โพลิเมอร์

4. พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastics) การย่อยสลายของโพลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์ (microorganisms) โดยทั่วไปมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน เนื่องจากขนาดของสายโซ่โพลิเมอร์มีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำ ในขั้นตอนแรกของการย่อยสลายจึงเกิดขึ้นภายนอกเซลล์ โดยการปลดปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ซึ่งเกิดได้ทั้งแบบใช้ endo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะภายในสายโซ่อย่างไม่ระเหย และแบบ exo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะที่ละหนวดยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่โพลิเมอร์ เมื่อโพลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอที่จะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์ และเกิดการย่อยสลายต่อในขั้นตอนที่ 2 ได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย (ultimate biodegradation) คือ พลังงาน และสารประกอบขนาดเล็ก

ที่เสถียรในธรรมชาติ (mineralization) เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน น้ำ เกลือ แร่ธาตุต่างๆ และมวลชีวภาพ (biomass) ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กลไกการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพโดยการใช้จุลินทรีย์ (Shah et al., 2008)

2.1.2 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (ธนาดี, 2549)

สำหรับพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมีความหมาย หรือคำจำกัดความตามมาตรฐานต่างๆ เช่น ASTM D6400 ระบุว่าพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ พลาสติกที่ย่อยสลายได้นั้นเนื่องมาจากการทำงานของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ อย่างเช่น แบคทีเรีย รา และสาหร่าย DIN 103.2 กล่าวว่าวัสดุพลาสติกจะได้ชื่อว่าเป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพก็ต่อเมื่อสารประกอบอินทรีย์ทั้งหมดถูกย่อยสลายอย่างสมบูรณ์ โดยจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในสภาพแวดล้อม และมีอัตราการย่อยสลายอยู่ภายใต้ข้อกำหนดในการทดสอบตามมาตรฐาน ส่วน ISO 472 ให้คำนิยามว่าพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ พลาสติกที่ถูกออกแบบมาให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดไว้โดยเฉพาะ เป็นสาเหตุทำให้สมบัติต่างๆ ของพลาสติกลดลงในช่วงเวลาหนึ่งซึ่งสามารถวัดได้โดยใช้วิธีการทดสอบมาตรฐานที่เหมาะสมกับชนิดของพลาสติกและการใช้งาน ผลการทดสอบสามารถนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการจำแนกประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีดังกล่าวต้องเกิดจากการทำงานของจุลินทรีย์ในธรรมชาติเท่านั้น BPS Japan อธิบายว่าพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ วัสดุพอลิเมอร์ที่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำลงได้ โดยมีอย่างน้อยหนึ่งขั้นตอนในกระบวนการย่อยสลายนี้เกิดผ่านกระบวนการเมตาบอลิซึมของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ และ CEN กล่าวว่าวัสดุย่อยสลายเป็นผลมาจากการทำงานของจุลินทรีย์ ทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นน้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และ/หรือก๊าซมีเทน และมวลชีวภาพใหม่เป็นผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย

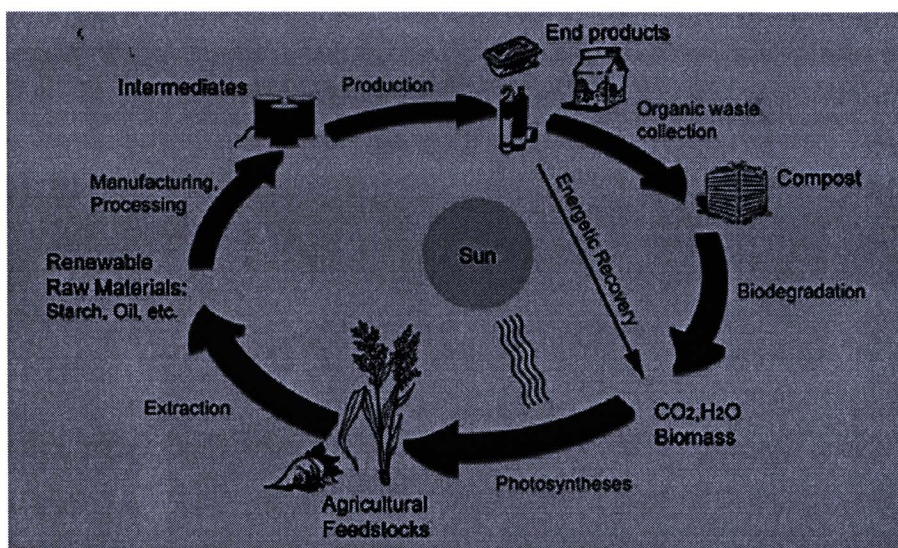
ดังนั้นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ พลาสติกที่มีกระบวนการนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีอันเนื่องมาจากจุลินทรีย์ พลาสติกจะได้ชื่อว่าเป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ต่อเมื่อสารประกอบอินทรีย์ทั้งหมดถูกย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์ ภายใต้สภาพแวดล้อม และอัตราการย่อยสลายที่ถูกกำหนดขึ้นตามมาตรฐานขององค์กรต่างๆ พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมีกลไกการย่อยสลายแบ่งเป็น 4 ประเภท ดังนี้

1. การย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradation) เป็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี จากกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ ที่สำคัญคือ พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเกิดการย่อยสลายที่สมบูรณ์ สะอาด ไม่เป็นพิษ และในสภาวะแวดล้อมที่กำหนด ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นสารประกอบขนาดเล็ก และพบได้ทั่วไปในธรรมชาติอย่างเช่น น้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซมีเทน

2. การคอมโพสท์ (composting) เป็นกระบวนการหมักเพื่อให้เกิดการสลายทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนภายใต้สภาวะที่มีการควบคุม พลาสติกจะย่อยสลายและเปลี่ยนเป็นสารที่มีลักษณะคล้ายฮิวมัส (humus) หรือดินดำ และยังได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และแร่ธาตุต่างๆ เป็นผลิตภัณฑ์ร่วม ไม่เหลือเศษวัสดุขนาดใหญ่ตกค้าง และไม่เป็นพิษ สามารถนำไปใช้ปรับปรุงคุณภาพของดินให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช ตัวอย่างกลไกการย่อยสลายแบบคอมโพสท์ที่ใช้ผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติในการผลิตเป็นพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพแสดงในรูปที่ 2.2

3. การย่อยสลายโดยใช้น้ำ (hydro-biodegradation) จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสก่อนแล้วเกิดการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

4. การย่อยสลายโดยใช้แสง (photo-biodegradation) จะเกิดปฏิกิริยาด้วยแสงก่อนแล้วเกิดการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ



รูปที่ 2.2 กลไกการย่อยสลายแบบคอมโพสท์ที่ใช้ผลิตภัณฑ์ธรรมชาติในการผลิตเป็นพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Siracusa et al., 2008)

การแบ่งพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพสามารถแบ่งได้ตามแหล่งกำเนิดได้ 2 ชนิด ดังนี้

(<http://library.dip.go.th>)

1. แหล่งกำเนิดจากธรรมชาติ

i) กลุ่มที่เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่ผลิตจากพืช พวกพอลิแซคคาไรด์ เช่น แป้ง (starch) และเซลลูโลส (cellulose) เป็นต้น และโปรตีน เช่น เจลาติน และขนสัตว์ เป็นต้น

ii) กลุ่มที่เป็นพอลิเมอร์ที่ผลิตได้โดยการเพาะเลี้ยงเซลล์ของจุลินทรีย์ เช่น พอลิเบตาไฮดรอกซีบิวทิเรต (polybetahydroxybutyrate, PHBV) และพอลิแลกติกแอซิด (polylactic acid, PLA) เป็นต้น

iii) กลุ่มที่ได้จากการดัดแปรพอลิเมอร์ธรรมชาติ โดยส่วนใหญ่เป็นพลาสติกที่ผลิตจากแป้ง (starch based polymer) อย่างเช่น แป้งเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic starch, TPS) โดยการนำแป้งผสมพลาสติไซเซอร์ เช่น กลีเซอรอล (glycerol) ซอร์บิทอล (sorbital) เอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol) หรือ โพรพิลีนไกลคอล (propylene

glycol) เป็นต้น ในอัตราส่วนต่างๆ (Ro'z *et al.*, 2006) ภายใต้อุณหภูมิประมาณตั้งแต่ 80°C ไปจนถึง 190°C เพราะเมื่อแบ่งได้รับแรงเฉือนอย่างเพียงพอทำให้แบ่งสามารถหลอมและไหลได้ และสามารถนำมาขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการต่างๆ เช่นการอัดรีด (extrusion) การฉีด (injection molding) และการอัดเบ้า (compression molding) เพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆ เช่น เพิ่มความต้านทานต่อความชื้น ความยืดหยุ่น ความแข็งแรง และลดอุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน เป็นต้น (Van Soest and De Wit, 1996; Averous *et al.*, 2000; Ro'z *et al.*, 2006; Carvalho *et al.*, 2002)

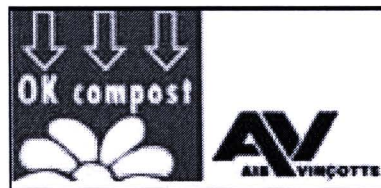
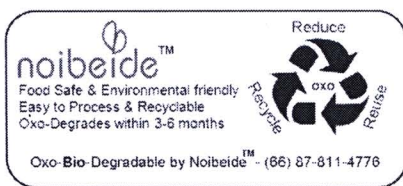
2. แหล่งกำเนิดจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี

- i) อะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ เช่น พอลิคาร์โปแลคโตน (polycaprolactone, PCL) พอลิไกลโคลิกแอซิด (polyglycolic acid, PGA) เป็นต้น
- ii) อะโรมาติกพอลิเอสเทอร์ เช่น พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (polybutylene succinate, PBS) และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตอะดิเปต (polybutylene succinate adipate, PBSA) เป็นต้น
- iii) อะลิฟาติก-อะโรมาติกโคพอลิเอสเทอร์ เช่น Ecoflex™ และ Easter Bio™ เป็นต้น
- iv) พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (polyvinyl alcohol, PVOH)
- v) พอลิโอฟีนที่ผ่านการเติมแต่งทางเคมี เช่น การเติมสารที่ไวต่อแสงเพื่อเร่งอัตราการย่อยสลายโดยแสง

2.1.3 สัญลักษณ์ที่บ่งบอกถึงพลาสติกย่อยสลายได้ (ปาเจรา, 2549)

การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ โดยทั่วไปมักใช้เวลาในการทดสอบประมาณ 6 เดือน เช่น มาตรฐาน ASTM D 5338 กำหนดไว้ว่าพลาสติกที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์เพียง 1 ชนิด จะต้องเกิดการย่อยสลายอย่างน้อย 60% โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นสารประกอบโมเลกุลเล็ก เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ สารประกอบ อนินทรีย์ และสารชีวมวล ภายใต้สภาวะการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนภายในเวลา 6 เดือน และสำหรับพอลิเมอร์ผสม ต้องเกิดการย่อยสลาย 90% และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมักสามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นสารปรับปรุงสภาพดินได้ และต้องไม่มีความเป็นพิษต่อพืชและสัตว์ จึงจะได้ชื่อว่าเป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และสามารถกำจัดได้โดยกระบวนการหมักขยะอินทรีย์ เมื่อตัวอย่างได้ผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน และมีสมบัติเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด จะได้รับอนุญาตให้ติดสัญลักษณ์ที่แสดงว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ส่วนใหญ่เป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพได้โดยกลไกการคอมโพสท์ (ธนาวัต, 2549) ตราสัญลักษณ์ที่ได้รับความเชื่อถือ และนิยมใช้ในประเทศต่างๆ เช่น OK compost ของประเทศเบลเยียม Compostable DIN CERTCO ของประเทศเยอรมนี Compostable ของประเทศสหรัฐอเมริกา และ PBS GreenPla ของประเทศญี่ปุ่น เป็นต้น รูปที่ 2.3 เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงว่าผลิตภัณฑ์สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และรูปที่ 2.4 แสดงตัวอย่างของพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ





รูปที่ 2.3 สัญลักษณ์ที่แสดงว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (ปาเจรา, 2549; <http://clgc.rdi.ku.ac.th>)



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (<http://cornbloat.wordpress.com>)

2.1.4 มาตรฐานในการตรวจสอบการย่อยสลาย (กล้านรงค์ และเกื้อกุล, 2546)

องค์กรต่างๆ ได้พัฒนามาตรฐานเพื่อการคำนวณความสามารถในการย่อยสลายภายใต้สภาวะแวดล้อมต่างๆ กัน เช่น ดิน น้ำทะเล ระบบบำบัดน้ำเสีย การย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนหรือการหมักทำปุ๋ยหมัก

วิธีการวิเคราะห์ โดยการวัดเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงคาร์บอนในพลาสติกที่ต้องการทดสอบไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะที่มีออกซิเจน และมีก๊าซมีเทนในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน โดยพลาสติกที่ต้องการทดสอบจะต้องเป็นแหล่งคาร์บอนแหล่งเดียวสำหรับจุลินทรีย์ การวิเคราะห์ลักษณะนี้มีทั้งหมด 2 วิธี ได้แก่

1. วิเคราะห์การย่อยสลายพลาสติกโดยกระบวนการทางชีวภาพในสภาวะที่มีออกซิเจนในขณะที่มีกากตะกอนของน้ำทิ้ง (municipal sewer sludge) (ASTM D5209-91)
2. วิเคราะห์การย่อยสลายพลาสติกโดยกระบวนการทางชีวภาพในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ในขณะที่มีกากตะกอนของน้ำทิ้ง (municipal sewer sludge) (ASTM D5210-91)

มีอีก 3 วิธีในการวิเคราะห์ที่ ASTM ได้กำหนดเพิ่มให้เป็นมาตรฐาน คือ

1. วิเคราะห์การย่อยสลายพลาสติกโดยกระบวนการทางชีวภาพในสภาวะที่มีออกซิเจนในระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอคทีเวเต็ดสลัดจ์ (activated sludge) (ASTM D5271-92)
2. วิเคราะห์การย่อยสลายพลาสติกโดยกระบวนการชีวภาพในสภาวะที่มีออกซิเจนในระบบที่มีการควบคุมสภาวะการหมัก (ASTM D5338-93)
3. วิเคราะห์การย่อยสลายพลาสติกโดยกระบวนการทางชีวภาพในสภาวะที่มีออกซิเจนโดยจุลินทรีย์ที่ได้คัดเลือกมา (ASTM D5247-92)

สองวิธีแรกจะจำลองสภาพแวดล้อมของระบบบำบัดน้ำเสียคือสภาวะการหมักและระบบบำบัดน้ำเสีย จะทำให้สามารถทราบพลาสติกที่ต้องการย่อยสลายควรจะใช้ระบบแบบใด ในขณะที่ตรวจสอบในสภาวะจำลองควรจะมีการทดสอบในระบบนิเวศวิทยาจริงเพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์ที่ได้

2.1.5 วิธีมาตรฐานการทดสอบความสามารถในการย่อยสลาย (Shah *et al.*, 2008)

1. การสังเกตลักษณะที่ปรากฏ (visual observation)

ลักษณะของพอลิเมอร์ที่สามารถสังเกตได้ หลังผ่านการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพคือ มีความขรุขระ และรูพรุน หรือมีลักษณะเป็นฟิล์ม (bio-film) เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของชิ้นทดสอบ และบางส่วนมีการแตกหัก แยกชิ้นส่วน สีเปลี่ยนไป กระบวนการที่เกิดขึ้นดังกล่าวไม่สามารถบอกได้ว่าเป็นกระบวนการเมตาบอลิซึมของจุลินทรีย์หรือไม่ แต่สามารถตรวจสอบและติดตามกระบวนการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวของชิ้นทดสอบได้ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) เพื่อศึกษาการเกิดขึ้นของกลุ่มจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นอย่างหนาแน่นบนพื้นผิวของพอลิเมอร์ในขณะเกิดการย่อยสลาย (ธนาดี, 2549) และกล้องจุลทรรศน์วัดแรงระหว่างอะตอม (atomic force microscope, AFM) พบว่าหลังจากเริ่มมีการย่อยสลายจะเกิดสเฟียรูไลต์ (crystalline spherulites) ที่ผิวหน้าของชิ้นทดสอบ (Ikada, 1999) สามารถบอกได้ว่าพอลิเมอร์ในส่วนอนิสฐานได้ถูกย่อยสลายไปก่อนและส่วนที่เป็นผลึกจะย่อยสลายได้ช้ากว่า

2. การวัดน้ำหนักที่หายไป (weight loss measurement)

การวัดหาค่าน้ำหนักที่หายไปเป็นวิธีการที่ง่ายและรวดเร็ว แต่ไม่ค่อยถูกต้องมากนัก โดยเฉพาะเมื่อพอลิเมอร์ถูกเก็บไว้ในแหล่งจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นเวลานาน หรือในกรณีที่มีกลุ่มจุลินทรีย์เกิดขึ้น และสะสมอยู่ภายในเนื้อของพอลิเมอร์เป็นสาเหตุทำให้น้ำหนักของพอลิเมอร์ที่วัดได้สูงเกินจริง วิธีการทดสอบนี้ไม่เหมาะสมสำหรับพอลิเมอร์ที่สามารถดูดน้ำได้โดยเฉพาะกลุ่มที่มีแปงเป็นองค์ประกอบ สิ่งที่ต้องให้ความสำคัญคือ การย่อยสลายได้โดยกระบวนการทางชีวภาพโดยทั่วไปจะเกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของพอลิเมอร์ น้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์มักเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวดังนั้นการทดสอบพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันชิ้นที่บางกว่าอาจทำให้ผลการทดสอบแตกต่างไปจากชิ้นที่หนากว่าได้ เพื่อความถูกต้องในการทดลอง ควรรายงานผลของอัตราส่วนของน้ำหนักพอลิเมอร์ที่หายไปต่อพื้นที่ผิวของพอลิเมอร์ที่ทดสอบมากกว่าหาค่าน้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์เท่านั้น

3. การเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงกล (change in mechanical properties)

การเปลี่ยนแปลงลักษณะของพอลิเมอร์ ไม่สามารถสังเกตจากลักษณะทางกายภาพเพียงอย่างเดียว แต่สามารถวัดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพได้ด้วยเทคนิคต่างๆ เช่น เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรด (infrared spectroscopy, IR) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลพอลิเมอร์ เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (x-ray diffraction, XRD) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของผลึก และศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคัลลอริเมตรี (differential scanning calorimetry, DSC) เทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (thermogravimetric analysis, TGA) และเทคนิคทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์ (dynamic mechanical thermal analysis, DMTA)

การวัดการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงกล เช่น ค่าความทนต่อแรงดึง (tensile strength) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (percent elongation) เป็นวิธีการศึกษาการย่อยสลายทางอ้อม ในบางกรณีผลที่ได้ไม่สอดคล้องกับผลที่ทดสอบด้วยวิธีการอื่นๆ เพราะว่าการย่อยสลายทางชีวภาพมักเกิดขึ้นกับที่ผิวหน้าของพอลิเมอร์เท่านั้น จึงไม่ทำให้ชิ้นทดสอบเกิดการเปลี่ยนแปลงมากนัก เป็นเหตุผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์โดยรวมไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง จึงไม่สามารถนำผลนี้มาประเมินการย่อยสลายได้ทางชีวภาพโดยตรง นิยมใช้ควบคู่ไปกับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีอื่น

4. การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโมเลกุล (change in molar mass)

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ ให้ผลเช่นเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลซึ่งอาจไม่ถูกต้องมากนัก เนื่องจากการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของพอลิเมอร์อาจเกิดจากเอนไซม์ของจุลินทรีย์ชนิด endo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะภายในสายโซ่อย่างไม่เป็นระเบียบ ทำให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ลดลงอย่างรวดเร็ว เป็นเหตุให้สมบัติทางกายภาพลดลงอย่างรวดเร็ว exo-enzyme คือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะที่ละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุด ที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้น้ำหนักโมเลกุล

ของพอลิเมอร์ลดลงอย่างช้าๆ ผลของการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโมเลกุลจึงไม่สามารถนำมาประเมินอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพได้

5. การวัดปริมาณการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์/วัดปริมาณการใช้ก๊าซออกซิเจน (CO_2 evolution/ O_2 consumption)

การวัดปริมาณการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และการใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นวิธีการวัดอัตราการย่อยสลายของพอลิเมอร์โดยตรง เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซที่ได้จากกระบวนการเมแทบอลิซึมของจุลินทรีย์ แต่ในทางปฏิบัติคาร์บอนในพอลิเมอร์ไม่ได้ถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ทั้งหมด 100% มีก๊าซบางส่วนกลายเป็นคาร์บอนในมวลชีวภาพ (biomass) และสารระหว่างกลาง (intermediate) จึงไม่ควรทำการทดลองที่ใช้ระยะเวลาในการทดสอบนานเกินไป เพราะมวลชีวภาพและสารระหว่างกลางจะย่อยสลายไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และการวัดปริมาณการใช้ก๊าซออกซิเจนอาจจะมีปัญหาในการวัดคือ ต้องรู้ขั้นตอนและกลไกของการย่อยสลาย เนื่องจากผลการทดลองที่ได้อาจจะไม่ใช้ผล เนื่องมาจากปริมาณก๊าซออกซิเจนที่จุลินทรีย์ใช้ในกระบวนการเมแทบอลิซึม เพื่อการย่อยสลายสารอินทรีย์เพียงอย่างเดียว เพราะก๊าซออกซิเจนอาจถูกใช้ในกระบวนการอื่นๆ

6. การวัดสมดุลคาร์บอน (Carbon balance)

เป็นวิธีการคำนวณเฉพาะทาง สำหรับการทดสอบการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งจะคำนวณปริมาณคาร์บอนในพอลิเมอร์เทียบกับผลิตภัณฑ์ทั้งหมดที่เกิดขึ้น เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอนในมวลชีวภาพ การทดสอบจะใช้พอลิเมอร์ที่ติดธาตุไอโซโทปกัมมันตรังสี (radiolabeling polymer) ที่มี ^{14}C เป็นวัสดุสำหรับการทดสอบ ทำให้วิธีการนี้เป็นวิธีการที่มีค่าใช้จ่ายสูง

7. การทดสอบเคลียร์โซน (Clear-zone test)

การทดสอบเคลียร์โซนเป็นวิธีการที่ง่าย สำหรับการวิเคราะห์เชิงกึ่งปริมาณ (semi-quantitative) โดยการนำพอลิเมอร์ที่มีอนุภาคละเอียดที่ต้องการทดสอบใส่ในจานที่มีอาหารเลี้ยงเชื้อ (agar plate) หลังจากฉีดเชื้อจุลินทรีย์เข้าไปหากเกิดเป็นรูโสรอบๆ โคลนี (colony) สามารถบอกได้ว่าเป็นขั้นตอนแรกของการย่อยสลายทางชีวภาพเพราะมีปริมาณจุลินทรีย์ที่น้อยที่สุดทำให้พอลิเมอร์เกิดการขาดออกจากกัน (depolymerization) เป็นกระบวนการซึ่งนำไปสู่การย่อยสลายทางชีวภาพ การวัดเคลียร์โซนสามารถนำไปใช้คัดเลือกจุลินทรีย์เพื่อให้ทราบพอลิเมอร์ชนิดนั้นๆ สามารถย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์ชนิดใด

2.2 พอลิเมอร์ผสม (Encyclopedia of polymer science and technology, 2005)

พอลิเมอร์ผสม (polymer blend) คือ การนำพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปมาผสมเข้าด้วยกัน โดยที่พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดสามารถเข้ากันได้เป็นพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งและมีสมบัติแตกต่างจาก พอลิเมอร์ตัวเดิม สามารถแบ่งพอลิเมอร์ผสมตามความเข้ากันได้ (miscibility) ในระดับโมเลกุลออกเป็น 3 ระดับ คือ

1. พอลิเมอร์ผสมที่สามารถเข้าได้เป็นเนื้อเดียวกัน (miscible blend) พอลิเมอร์ผสมชนิดนี้มีเฟสเดียว (single phase) เกิดจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างหมู่ฟังก์ชันที่ต่างกันของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด โดยทั่วไปพอลิเมอร์ชนิดนี้ให้สมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น

2. พอลิเมอร์ผสมที่ไม่สามารถเข้าได้เป็นเนื้อเดียวกัน (immiscible blend) พอลิเมอร์ผสมชนิดนี้มีการแยกเฟสกันระหว่างพอลิเมอร์สองชนิด (phase separate) จะแบ่งได้ออกเป็นสองเฟสคือ เฟสที่มีปริมาณมากจะเป็นเฟสต่อเนื่อง (continuous phase) และเฟสที่น้อยจะเป็นเฟสกระจาย (disperse phase)

3. พอลิเมอร์ผสมที่เข้ากันได้เป็นบางส่วน (partially miscible blend) พอลิเมอร์ผสมประเภทนี้อาจเข้ากันเป็นเนื้อเดียว ถ้ามีปริมาณของพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งชนิดใดในสัดส่วนน้อยๆ ทำให้พอลิเมอร์ชนิดนั้นแทรกเข้าไปอยู่ในพอลิ-

เมอร์อีกชนิดหนึ่งเกิดแรงยึดเหนี่ยวมากขึ้น จึงส่งผลให้สมบัติดีขึ้น แต่ถ้าปริมาณของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดมีสัดส่วนเท่ากันอาจทำให้มีการแยกเฟสเกิดขึ้น

การทำพอลิเมอร์ผสมเป็นวิธีการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ โดยการนำพอลิเมอร์ตั้งแต่ 2 ชนิด หรือมากกว่าผสมกลายเป็นพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง ซึ่งนำเอาสมบัติที่เด่นของพอลิเมอร์แต่ละตัวมารวมกัน แต่การผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์ต่างชนิดกันโดยธรรมชาติแล้วเกิดขึ้นได้ยาก ดังนั้นจึงต้องพิจารณาถึงสภาพความเข้ากันได้ (compatibility) ในด้านสมบัติของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน ซึ่งบางชนิดสามารถเข้ากันได้แล้วทำให้สมบัติดีขึ้น (compatible blend) และบางชนิดผสมเข้ากันได้แล้วทำให้สมบัติที่ได้ไม่ดี (incompatible blend) ซึ่งขั้นตอนการเตรียมมีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ได้ โดยพอลิเมอร์ผสมสามารถเตรียมได้หลายวิธีดังจะกล่าวต่อไปนี้

1. การผสมแบบหลอมเหลว (melt mixing) ทำการผสมกันในขณะที่พอลิเมอร์มีการหลอมเหลวในเครื่องอัดรีดหรือเครื่องผสมชนิดแบทช์ (batch mixer) ข้อดีของการผสมแบบหลอมเหลวคือ ผสมได้ง่าย และสามารถใช้ได้กับพอลิเมอร์ส่วนใหญ่ แต่มีข้อเสียคือต้องใช้พลังงานสูง

2. การผสมแบบสารละลาย (solution blending) วิธีนี้ส่วนใหญ่ใช้ในกระบวนการปฏิบัติกร ทำให้พอลิเมอร์เกิดการละลายในตัวทำละลาย จากนั้นจึงนำมาผสมกัน วิธีนี้มีข้อเสียคือ การเลือกใช้ตัวทำละลายให้เหมาะสมกับพอลิเมอร์ และการกำจัดตัวทำละลายออกไปจากพอลิเมอร์

3. การผสมในรูปของลาเทกซ์ (latex mixing) วิธีนี้ใช้กับการผสมพอลิเมอร์ที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า $10\ \mu\text{m}$ ไม่มีการใช้ตัวทำละลายและพลังงาน สามารถนำพอลิเมอร์ที่ได้ไปใช้ในรูปของลาเทกซ์ แต่มีข้อจำกัดคือพอลิเมอร์ต้องอยู่ในรูปของลาเทกซ์และไม่สามารถใช้ได้ในระบบอุตสาหกรรม

4. บล็อกโคพอลิเมอร์ไรเซชัน หรือ กราฟท์โคพอลิเมอร์ไรเซชัน (block copolymerization or graft copolymerization) โดยการทำให้เกิดปฏิกิริยากราฟท์โคพอลิเมอร์ไรเซชัน หรือบล็อกโคพอลิเมอร์ไรเซชัน ซึ่งในกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันจะได้โฮโมพอลิเมอร์ (homopolymer) เป็นผลิตภัณฑ์ตัวแรก และจากนั้นเกิดเป็นกราฟท์หรือบล็อกโคพอลิเมอร์ขึ้น แต่เมื่อนำไปใช้งานจำนวนของโคพอลิเมอร์ ที่เกิดขึ้นจะต้องเพียงพอต่อการทำให้พอลิเมอร์ยึดเกาะกันได้ดีของเฟสที่เข้ากันไม่ได้ (immiscible phase) พอลิเมอร์ผสมที่ได้จากวิธีนี้จะมีสมบัติดีกว่าการผสมแบบหลอมเหลว แต่มีข้อเสียคือ เป็นวิธีที่ค่อนข้างซับซ้อน และค่อนข้างแพงเมื่อเทียบกับวิธีการผสมแบบอื่นๆ

5. การเตรียมพอลิเมอร์ที่มีโครงร่างตาข่าย (preparation of interpenetrating polymer networks) โดยพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งถูกทำให้บวมด้วยมอนอเมอร์ หรือพรีพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง หลังจากนั้นมอนอเมอร์ หรือพรีพอลิเมอร์จะเกิดการเชื่อมขวาง (crosslink) กัน จะใช้กับเทอร์โมพลาสติก และอีลาสโตเมอร์ที่ไม่มีการเชื่อมโยง

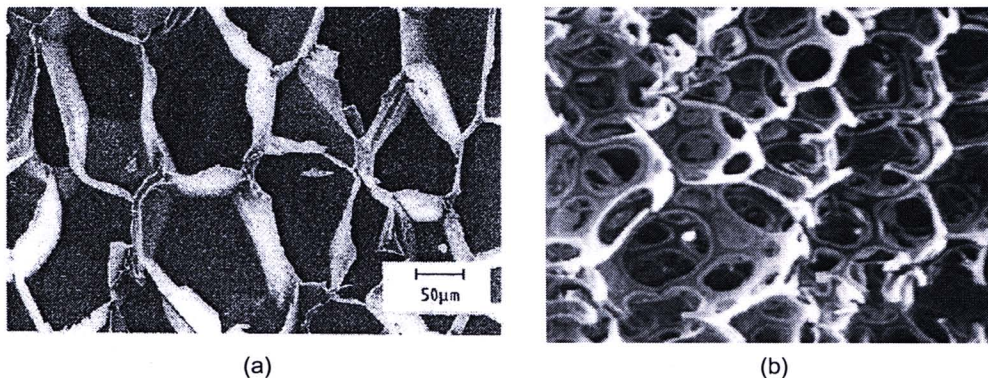
2.3 โฟมพลาสติก

โฟม หรือ โฟมพลาสติก (plastic foams) คือ วัสดุที่มีโพรงอากาศ (cellular materials) เล็กๆ มากมายกระจายในเนื้อพลาสติก โดยเกิดจากสารฟู (blowing agent) ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดฟองของพลาสติก (จิราวรรณ, 2550) ในรูปที่ 2.5 สามารถแบ่งโฟมตามรูปร่างเซลล์ได้ 2 ชนิด ดังนี้

1. เซลล์ปิด (closed-cell foam) เกิดจากการขยายตัวของวัสดุเป็นโพรงอากาศพร้อมกันหลายๆ เซลล์ และถูกยึดด้วยความดันทำให้ผนังเซลล์มาชนต่อกันเป็นโพรงอากาศระหว่างเซลล์ โฟมที่มีเซลล์ปิดนี้มีระดับความแข็ง (hardness) ที่หลากหลายขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของเซลล์หรือโพรงอากาศภายในตัวโฟม จึงทำให้โฟมชนิดนี้แข็งแรงหรือแข็ง เพราะว่าโพรงอากาศภายในแข็งแรงมากพอที่จะรับแรง หรือความดันสูงๆ ได้ นิยมใช้เป็นบรรจุภัณฑ์บรรจุสินค้าเพื่อการขนส่ง อย่างเช่น โฟมพอลิสไตรีน เป็นต้น

2. เซลล์เปิด (open cell) โฟมที่มีผนังเซลล์เปิด หรือผิวหน้าของโพรงอากาศถูกทำให้แตกออก อากาศเข้าไปแทนที่พื้นที่ผิวในตัวของวัสดุ ทำให้โฟมมีลักษณะนิ่ม มีความหนาแน่นต่ำ มีความยืดหยุ่นสูง อากาศสามารถออกได้เมื่อ

ได้รับการกด และคืนรูปได้เร็วเมื่อไม่มีแรงกดทับ นิยมทำเป็นเบาะรองนั่ง อย่างเช่นโฟมพอลิยูรีเทน เป็นต้น (สมศักดิ์, 2546; พรพรรณ, 2528)



รูปที่ 2.5 ลักษณะเซลล์ของโฟมพลาสติก (a) เซลล์ปิดของโฟมพอลิสไตรีน และ (b) เซลล์เปิดของโฟมพอลิยูรีเทน (จิราวรรณ, 2550)

เมื่อพิจารณาตามประเภทของพลาสติกสามารถจำแนกโฟมออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้ (จิราวรรณ, 2550)

1. โฟมเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic foam) เป็นโฟมที่สามารถนำมารีไซเคิลได้ เช่น โฟมพอลิสไตรีน (polystyrene foam, PS foam) และโฟมพอลิเอทิลีน (polyethylene foam, PE foam) เป็นต้น
2. โฟมเทอร์โมเซต (thermoset foam) เป็นโฟมที่ไม่สามารถนำมารีไซเคิลได้ เช่น โฟมพอลิยูรีเทน (polyurethane foam, PU foam) เป็นต้น

โฟมสามารถจำแนกออกได้ตามความแข็ง (stiffness) หรือค่าความทนต่อแรงกดอัด (compressive strength at 10% deformation) ทำการทดสอบตามมาตรฐาน DIN 53421 หรือ ISO 844 ออกเป็น 3 ชนิด ดังนี้ (ศูนย์ปฏิบัติการวิศวกรรมพลังงานและสิ่งแวดล้อม, 2549)

1. โฟมชนิดแข็ง (rigid foam) มีค่ามอดุลัสสูงกว่า 7,000 kg/cm³ หรือ 100,000 psi หรือมีค่าความทนต่อแรงกดอัดมากกว่า 0.08 MPa เช่น โฟมฉนวนหลังคา โฟมทำผนังตู้เย็น โฟมทำกระติกใส่น้ำแข็ง
2. โฟมชนิดนิ่ม (flexible foam) มีค่ามอดุลัสต่ำกว่า 10,000 psi หรือมีค่าความทนต่อแรงกดอัดน้อยกว่า 0.08 MPa เช่น ฟองน้ำ เบาะรถยนต์ เบาะเก้าอี้
3. โฟมชนิดยึดหยุ่น (integral skin foam) มีค่ามอดุลัสระหว่าง 10,000-100,000 psi หรือมีค่าความทนต่อแรงกดอัดระหว่าง 0.015-0.08 MPa เช่น พวงมาลัยรถยนต์ คอนโซลหน้ารถ เบาะรองแขน

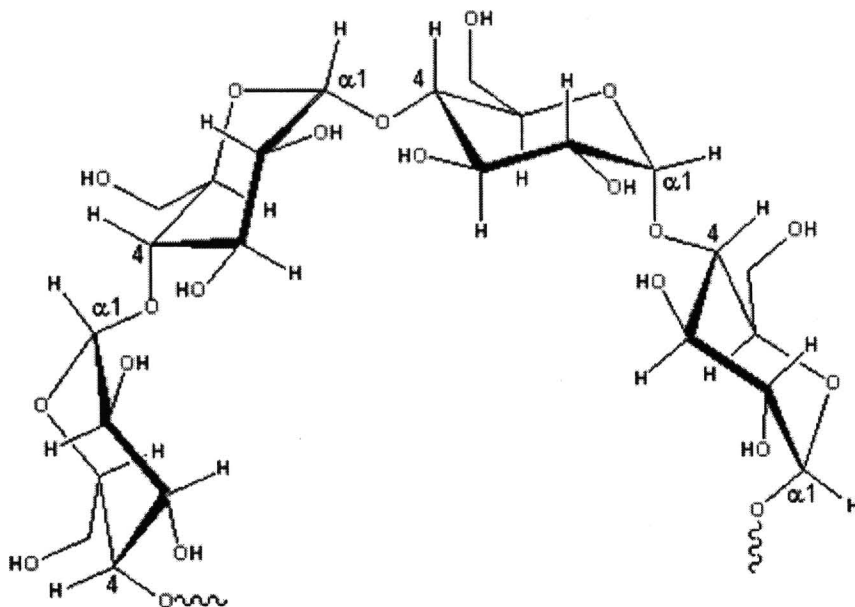
2.4 ความรู้เบื้องต้นและความสำคัญของแป้ง (กล้าณรงค์ และ เกื้อกุล, 2546)

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่สะสมอยู่ในพืชชั้นสูง พบในใบและในส่วนที่พืชใช้เป็นแหล่งเก็บอาหาร เช่น เมล็ดและหัว แป้งในกระบวนการผลิตหมายถึง คาร์โบไฮเดรตที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่ มีสิ่งเจือปนอื่นๆ เช่น โปรตีน ไขมัน เกลือแร่ น้อยมาก ส่วนแป้งจากการผลิตโดยทั่วไปที่ยังมีส่วนประกอบอื่นอยู่มากจะเรียกว่า ฟลาวร์ (flour) แต่เมื่อสิ่งเจือปนที่หมายถึงโปรตีน ไขมันเกลือแร่ และอื่นๆ ถูกสกัดออกไป แป้งที่เหลือจึงเป็นแป้งที่มีความบริสุทธิ์สูงเรียกว่าสตาร์ช (starch) เนื่องจากแป้งสตาร์ชมีความบริสุทธิ์สูง แป้งสตาร์ชที่ยังไม่ถูกแปรรูป หรือดัดแปรเรียกว่าแป้งดิบ (native starch) ตรงข้ามกับแป้งที่มีการดัดแปรแล้วเรียกว่าโมดิไฟด์สตาร์ช (modified starch) หรือแป้งดัดแปร

2.4.1 องค์ประกอบภายในแป้ง

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6:10:5 มีสูตรโดยทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ประกอบด้วยหน่วยซ้ำของน้ำตาลกลูโคสมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก แป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์เชิงเส้นหรืออะไมโลส (amylose) และพอลิเมอร์เชิงกิ่งหรืออะไมโลเพกติน (amylopectin) ที่วางตัวในแนวรัศมี องค์ประกอบที่สำคัญภายในเม็ดแป้งได้แก่

1. อะไมโลส (amylose) เป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิดแอลฟา -1,4 (α -1,4 glucocidic) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 แป้งจากธัญพืช เช่น แป้งข้าวโพด แป้งข้าวสาลี แป้งข้าวฟ่าง มีอะไมโลสสูงประมาณ 28% แป้งจากรากและหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง แป้งสาเก มีอะไมโลส ประมาณ 20% แป้งข้าวเหนียว (waxy starch) ไม่มีอะไมโลส และแป้งข้าวโพดอะไมโลเมส (amylomaize) มีอะไมโลสสูงถึง 80% แป้งที่มีโมเลกุลของอะไมโลสยาวมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรดเดชัน (retrogradation) ลดลง หรือการที่แป้งได้รับความร้อนจนทำให้เม็ดแป้งแตกออก โดยโมเลกุลของอะไมโลสขนาดเล็กจะกระจายตัวออกมาทำให้แป้งมีความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัวโมเลกุลอะไมโลสจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแหสามมิติ ซึ่งสามารถอุ้มน้ำและไม่ดูดซับความชื้นเพิ่มอีก มีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเจลเหนียว คล้ายฟิล์มหรือผลึก ซึ่งการเกิดรีโทรเกรดเดชันทำให้เจลขาวขุ่นและความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของอะไมโลส (<http://www.lsbu.ac.uk>)

2. อะไมโลเพกติน (amylopectin) เป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิดแอลฟา -1, 4 และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้น มีขนาดโมเลกุลในช่วง 10-60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิดแอลฟา -1, 6 (α -1,6 glucocidic) ดังแสดงในรูปที่ 2.7

อะไมโลเพกตินถือว่ามีความสำคัญมากกว่าอะไมโลส ทั้งทางด้านโครงสร้าง หน้าที่ และการนำไปใช้ ดังนั้นเมื่อมีอะไมโลเพกตินเพียงอย่างเดียวสามารถรวมตัวเพื่อสร้างเม็ดแป้งได้ ปริมาณของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินในแป้งที่แตกต่างกันทำให้สมบัติของแป้งแตกต่างกัน อย่างเช่นแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวมีปริมาณอะไมโลส 0-1% ทำให้

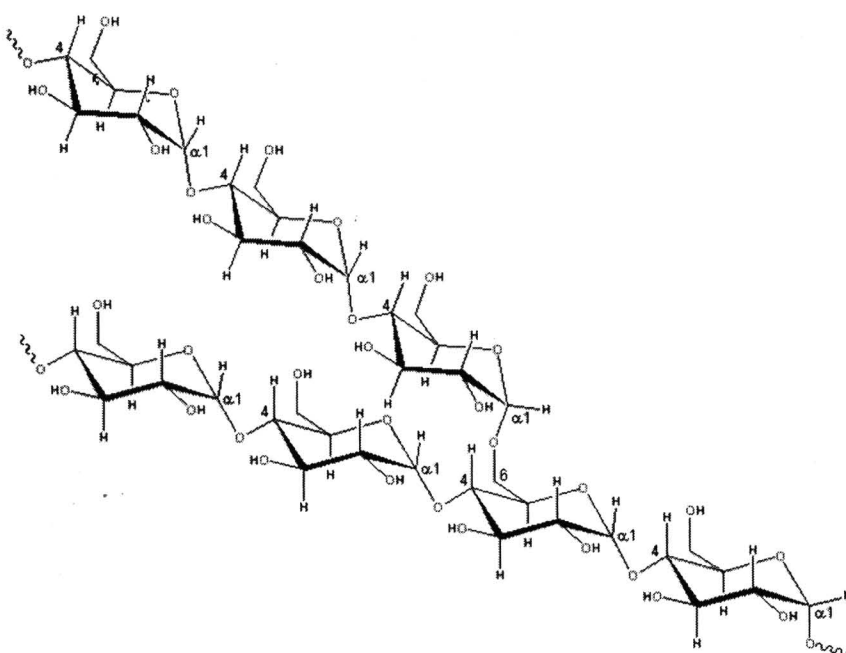
แป้งเปียกใส ไม่เกิดเจล และเจลมีการสูญเสียเล็กน้อย ส่วนแป้งข้าวโพดอะไมโลเมสที่มีอะไมโลส 50-70% พบว่าเม็ดแป้งพองตัวได้ยาก เจลแข็ง แป้งเปียกขุ่น อุณหภูมิการเกิดแป้งเปียกสูง เป็นต้น

3. สารตัวกลาง (intermediate material) มีเพียงส่วนน้อยในแป้งบางชนิด สารตัวกลางมีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่าอะไมโลเพกตินแต่ใหญ่กว่าอะไมโลส

ส่วนประกอบอื่นๆ ภายในเม็ดแป้งแบ่งออกเป็น

- 1) ส่วนที่ไม่ใช่แป้งที่แยกได้จากแป้ง ได้แก่ โปรตีนที่ไม่ละลายน้ำและผนังเซลล์
- 2) ส่วนที่ติดกับพื้นผิวของเม็ดแป้ง สามารถสกัดออกมาได้โดยไม่ต้องทำลายเม็ดแป้ง เช่น เยื่อหุ้มอะไมโลพลาสต์
- 3) ส่วนที่ติดอยู่ภายในเม็ดแป้งสามารถแยกออกได้โดยการทำลายเม็ดแป้ง เช่น ไขมันและสารประกอบไนโตรเจนในเม็ดแป้ง

ส่วนประกอบอื่นที่มีผลต่อลักษณะและสมบัติของเม็ดแป้งที่สำคัญ ได้แก่ ไขมัน โปรตีน เถ้า และฟอสฟอรัส ซึ่งมีปริมาณแตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิด



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของอะไมโลเพกติน (<http://www.lsbu.ac.uk>)

2.4.2 โครงสร้างและการรวมตัวของเม็ดแป้ง

แป้งที่พบในธรรมชาติจะพบอยู่ในรูปเม็ดแป้งขนาดเล็ก (granule) เมื่อตรวจสอบพบว่าเม็ดแป้งจะมีขนาด รูปร่าง และลักษณะที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับแหล่งของแป้งนั้นๆ เม็ดแป้งมีโครงสร้างเป็นแบบกึ่งผลึก (semi-crystalline) โมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินจัดเรียงตัวในเม็ดแป้งเป็นโครงสร้างทั้งส่วนที่เป็นผลึกและส่วนที่เป็นอสัณฐาน ส่วนสายโซ่สั้นของอะไมโลเพกตินจะจัดเรียงตัวในลักษณะเกลียวม้วนคู่ (double helices) ซึ่งบางส่วนจะเกิดเป็นโครงสร้างผลึก ส่วนอสัณฐานของเม็ดแป้งจะประกอบด้วยโมเลกุลของอะไมโลสและสายโซ่ยาวของอะไมโลเพกติน

เม็ดแป้งจะมีสมบัติทำให้เกิดการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ หรือเรียกว่าไบรีฟริงเจนซ์ (birefringence) แป้งที่มาจากหัวหรือรากจะมีโครงสร้างที่เป็นผลึกอยู่ 25-50% แป้งจากธัญพืชในส่วนอะไมโลเพกตินจะมีโครงสร้างบางส่วนที่เป็นผลึก และในส่วนอะไมโลสจะอยู่ในส่วนของอสัณฐาน ส่วนอะไมโลเพกตินจะรวมกันเป็นผลึก ส่วนอะไมโลสจะรวม

ตัวกันเป็นไขมัน เป็นสารประกอบเชิงซ้อนของอะไมโลสและไขมัน เกิดเป็นโครงสร้างผลึกอย่างอ่อนที่ไปเสริมความแข็งแรงให้แก่เม็ดแป้ง ทำให้เม็ดแป้งจากธัญพืชพองตัวได้ช้า

2.4.3 สมบัติของแป้ง

1. การดูดซับน้ำ การพองตัว และการละลาย เมื่อเติมน้ำลงไปแป้งและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิห้อง จนเกิดสมดุลระหว่างความชื้นภายในเม็ดแป้งกับน้ำที่เติมและความชื้นในบรรยากาศ แป้งดิบจะไม่ละลายในน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนซ์ (gelatinized temperature) กระบวนการเกิดเจลาติไนซ์ในเซชันของแป้งเกิดจากการให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง ขึ้นอยู่กับชนิดของแป้งดังแสดงในตารางที่ 2.1 จะทำให้การจับยึดกันระหว่างโมเลกุลของแป้งในส่วนที่เป็นผลึกลดลง ทำให้แป้งรับน้ำเข้าไปในโมเลกุล จากนั้นเม็ดแป้งเกิดการพองตัวชนิดที่ไม่สามารถผันกลับได้ และทำให้สารละลายแป้งมีความหนืดและความใสเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งที่อยู่ใกล้ๆ กันเชื่อมต่อกันอยู่ เมื่ออุณหภูมิของน้ำที่ผสมสูงกว่าช่วงอุณหภูมิเจลาติไนซ์ พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ เม็ดแป้งเกิดการพองตัวทำให้เกิดการละลาย ความหนืดและความใสเพิ่มขึ้น ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวและความสามารถในการละลายของแป้ง ได้แก่ ชนิดของแป้ง ความแข็งแรง และลักษณะของร่างแหภายในเม็ดแป้ง

2. ความหนืด ปัจจัยในการเกิดความหนืดขึ้นอยู่กับชนิดของแป้งและการดัดแปรทางกายภาพ เช่น แป้งฟรี-เจลาติไนซ์ หรือ อัลฟาสตาร์ช ดัดแปรโดยให้ความร้อนแก่แป้งทำให้แป้งสุกหรือเกิดเจลาติไนซ์แล้วทำให้แห้งโดยเครื่องทำแห้ง แป้งที่ได้กระจายตัวได้ในน้ำเย็นให้ความหนืดทันทีและไม่เกิดเจล

3. สมบัติของแป้งเปียก ขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง ปริมาณของแป้ง กระบวนการให้ความร้อน อุณหภูมิ ความเป็นกรด-ด่าง (pH) เวลาในการให้ความร้อน การกวน และเครื่องมือที่ใช้ สมบัติที่สำคัญของแป้งเปียก ได้แก่ ความหนืด เนื้อสัมผัส ความโปร่งใสของแป้งเปียกและความคงทนต่อแรงเฉือน ความใสของแป้งเปียกแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดและที่มาของแป้งชนิดนั้นๆ

4. สมบัติของแป้งฟิล์ม ฟิล์มแป้งจะมีสมบัติเฉพาะ ได้แก่ ความเป็นพลาสติก ความแข็งแรง การละลายน้ำ การทนต่อความชื้น ความโปร่งใสของฟิล์มและความมันเงา แป้งฟิล์มที่ได้จากแหล่งที่ต่างกันจะมีความสามารถในการละลายได้ต่างกัน แป้งฟิล์มจะมีสมบัติในการรักษาความสามารถในการละลายน้ำและความเป็นกาวได้ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง

ตารางที่ 2.1 อุณหภูมิการเกิดเจลาติไนซ์ของแป้งชนิดต่าง (Leach, 1965)

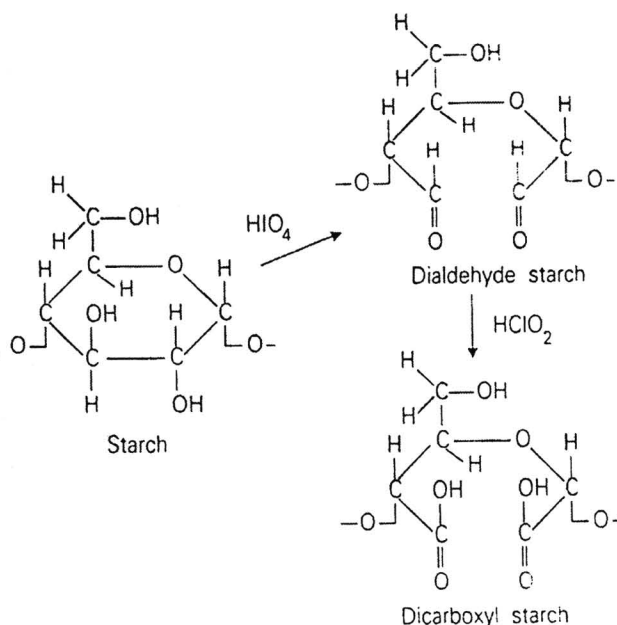
Type of starch	Gelatinization at 95°C		
	Temperature range (°C)	Swelling power ¹	Solubility (%)
Potato	56-66	1,000	82
Tapioca	58.5-70	71	48
Corn	62-72	24	25
Sorghum	68.5-75	22	22
Wheat	52-63	21	41
Rice	61-77.5	19	18
Waxy maize	63-72	64	23
Waxy sorghum	67.5-74	49	19

¹ Swelling power มีค่าเท่ากับน้ำหนักของเม็ดแป้งที่พองตัวที่ตกตะกอนออกมาต่อกรัมของแป้ง

2.4.4 ชนิดของแป้งดัดแปร

1. แป้งออกซิไดซ์ (oxidized starch)

การดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชันเป็นการนำเอาแป้งทำปฏิกิริยากับสารออกซิไดซ์ เช่น โซเดียมไฮโปคลอไรท์ แคลเซียมไฮโปคลอไรท์ แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ในการทำปฏิกิริยาจะทำให้โครงสร้างสมบัติทางเคมี และขนาดของโมเลกุลของเม็ดแป้งเปลี่ยนแปลงไป ได้แก่ แป้งดัดแปรที่เรียกว่าแป้งออกซิไดซ์ หรือ แป้งคลอรีเนตเตด (chlorinated starch) หรือ ออกซิสตาร์ช (oxystarch) ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนหมู่ไฮดรอกซิลให้เป็นหมู่แอลดีไฮด์ ทำให้แป้งมีความขาวเพิ่มขึ้น แป้งออกซิไดซ์ในอุตสาหกรรมอาหารจะต้องทำปฏิกิริยากับคลอรีนในรูปของโซเดียมไฮโปคลอไรท์ไม่เกิน 5.5% และมีกลุ่ม คาร์บอกซิลไม่เกิน 1.1% โดยโครงสร้างอะไมโลเพกตินของแป้งจะหมู่ไฮดรอกซิลของคาร์บอนตำแหน่งที่ 6 เกิดปฏิกิริยาเนื่องจากมีพันธะแบบ 1,6 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันส่วนมากจะเกิดที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 และ 3 ในการผลิตทางการค้าจะควบคุมให้มี pH เท่ากับ 7-8 หมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนที่ 2 และ/หรือที่ 3 จะเปลี่ยนเป็นหมู่คาร์บอกซิล และเมื่อให้เกิดปฏิกิริยาต่อพันธะระหว่างคาร์บอนตำแหน่งที่ 2 และ 3 จะแตกออกได้แป้งไดอัลดีไฮด์ (aldehyde starch) จากนั้นให้ทำปฏิกิริยากับไฮโปคลอไรท์ที่เป็นด่างจะทำให้พันธะระหว่างหมู่กลูโคสไพราโนสแตกออก ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วกับแป้งได้เป็นแป้งไดคาร์บอกซิล (dicarboxyl starch) รูปที่ 2.8 แสดงปฏิกิริยาการเกิดแป้งไดอัลดีไฮด์และแป้งไดคาร์บอกซิล



รูปที่ 2.8 ปฏิกิริยาการเกิดไดอัลดีไฮด์สตาร์ชและไดคาร์บอกซิลสตาร์ช (กล้านรงค์และเกื้อกูล, 2546)

แป้งออกซิไดซ์เป็นแป้งที่มีประจุลบ เนื่องจากมีหมู่คาร์บอกซิลเข้าไปอยู่ในโมเลกุลของอะไมโลส ทำให้อัตราการคั่งตัวของแป้งเปียกตกลง แป้งเปียกที่ร้อนจะมีความหนืดต่ำลง สามารถทำให้ใช้แป้งเปียกที่ความเข้มข้นสูงที่น้ำร้อนได้ แป้งเปียก สารละลาย และฟิล์มมีความใสมากขึ้น เจลที่ได้มีความคงตัวสูง เม็ดแป้งขาวขึ้น กลิ่นดีขึ้น และมีปริมาณจุลินทรีย์ลดลง เนื่องจากการฟอกสีของไฮโปคลอไรท์จะไปละลายส่วนที่ไม่บริสุทธิ์และล้างออกจากแป้ง เม็ดของแป้งออกซิไดซ์มีลักษณะเหมือนเม็ดของแป้งดิบ มีสมบัติการพองน้ำและทนต่อการย่อยสลายได้ดี เม็ดแป้งมีรอยแตกตามแนวรัศมีจากการทำปฏิกิริยาของออกซิเดชัน เมื่อนำไปให้ความร้อนภายในน้ำ เม็ดแป้งจะแตกออกตามรอยแตกมากกว่าที่พองตัวเหมือนกับเม็ดแป้งดิบ เม็ดแป้งออกซิไดซ์มีความไวต่อเมทิลลีนบลู เมื่อล้างส่วนที่ไม่ถูกดูด

ชั้นออกจะสามารถจำแนกเม็ดแป้งออกซิไดซ์ออกจากเม็ดแป้งดิบได้ วิธีนี้เป็นการวัดปริมาณของประจุลบของหมู่คาร์บอกซิลในเม็ดแป้ง จึงไม่เจาะจงเฉพาะแป้งออกซิไดซ์เท่านั้น อนุพันธ์ที่มีประจุลบก็สามารถทำปฏิกิริยานี้ได้เช่นกัน แป้งเปียกของแป้งออกซิไดซ์มีสมบัติเหมาะในการทำมาฝรั่ง และลูกอม มีอายุการเก็บที่นานกว่าผลิตภัณฑ์จากแป้งที่ย่อยด้วยกรด เนื่องจากความเสถียรในสภาวะที่มีน้ำตาลและความต้านทานต่อการหดตัวของแป้งออกซิไดซ์ แป้งออกซิไดซ์ขึ้นรูปเป็นฟิล์มที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน แข็งและใสมากขึ้น มีแนวโน้มในการหดตัวหรือแตกตัวน้อยกว่าฟิล์มแป้งดิบหรือแป้งย่อยด้วยกรด มีความสามารถในการละลายน้ำได้มากกว่า เนื่องจากสมบัติการชอบน้ำของหมู่คาร์บอนิลที่เกิดระหว่างการออกซิเดชัน นำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ลูกอม ลูกกวาด ซุปกึ่งสำเร็จรูป หรืออาหารที่ต้องการความเข้มข้น เช่น น้ำสลัด มายองเนส ใช้เป็นสารยึดเกาะสำหรับกระดาษเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กระดาษ เคลือบผิวหน้ากระดาษให้เรียบ และแทรกซึมเข้าไปในช่องว่างของเยื่อกระดาษสำหรับกันหมึกซึม เคลือบเส้นใยในอุตสาหกรรมสิ่งทอให้เส้นด้ายมีความลื่นและยืดหยุ่น เป็นส่วนประกอบในอุปกรณ์ก่อสร้าง เช่น ฝ้าผนัง ฉนวน กระเบื้อง เป็นต้น

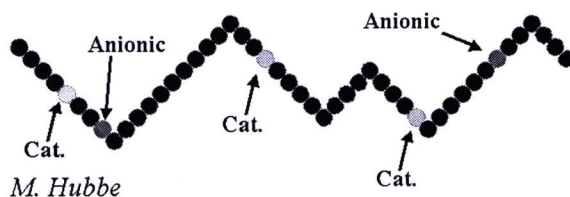
2. แป้งแอมโฟเทอริก (amphoteric starch)

แป้งแอมโฟเทอริกเมื่อละลายในน้ำแล้วมีทั้งไอออนบวกและไอออนลบ กลุ่มที่เป็นแคทไอออนิกเป็นอนุพันธ์ของแป้งอีเทอร์โดยทั่วไปมักจะใช้สารเทอร์ติเอรีอะมิโน (tertiary ammo) หรือ ควอเตอร์นารีแอมโมเนียม (quaternary ammonium) และส่วนที่เป็นแอนไอออนิกจะใช้สารประเภทฟอสเฟต ฟอสโฟเนต ซัลเฟต ซัลโฟเนต หรือ กลุ่มคาร์บอกซิลเพื่อให้กลายเป็นแป้งแคทไอออนิก แป้งแอมโฟเทอริกที่ใช้กันส่วนใหญ่มาจากแป้งที่มีราคาค่าต่ำสุด

โดยส่วนใหญ่แป้งแอมโฟเทอริกใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษอย่างเช่นเพิ่มความแข็งแรงให้แก่กระดาษในกระบวนการขึ้นรูป (wet-end additives) ตัวเชื่อมประสานในด้านการเคลือบ (coating binder) สารรักษาสภาพ (retention aids) และสารช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้แก่กระดาษที่แห้งแล้ว (dry-strength agent) รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างทางเคมีของแป้งแอมโฟเทอริก

Amphoteric Starch

- Amine groups (blue), % N 0.2 to 0.33
- Phosphate groups (red), usually at lower level than the amine groups.

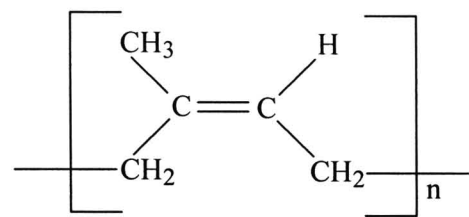


รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของแป้งแอมโฟเทอริก (<http://www4.ncsu.edu>)

2.5 น้ำยางธรรมชาติ (บุญธรรม, 2532)

น้ำยางธรรมชาติ (natural rubber latex) มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวหรือสีครีม ในทางเคมีจัดเป็นสารแขวนลอย มีความหนาแน่น 0.975-0.980 g/cm³ มีความเป็นกรด-ด่าง ประมาณ 6.5-7.0 ความหนืดแปรปรวนอยู่ในช่วง

12-15 centipoises มีโครงสร้างเป็น cis-1,4-polyisoprene ดังแสดงในรูปที่ 2.10 และมีส่วนประกอบดังแสดงในตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.10 โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติ (บุญธรรม, 2532)

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (wt%)
สารที่เป็นของแข็งทั้งหมด (total solid content, TSC)	36
เนื้อยางแห้ง (dry rubber content, DRC)	33
สารพวกโปรตีน	1-1.5
สารพวกเรซิน	1-2.5
ซีเถ้า	น้อยกว่า 1
คาร์โบไฮเดรต	1
น้ำ (ในปริมาณที่รวมกับสารอื่นๆ แล้ว)	100

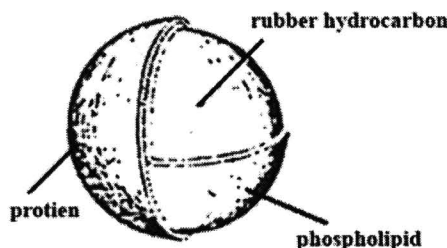
สารต่างๆ เหล่านี้จะกระจายอยู่ใน 2 ส่วนใหญ่ๆ ของน้ำยางธรรมชาติคือ

- 1. ส่วนของอนุภาคยาง มีประมาณ 35 wt%
- 2. ส่วนที่ไม่ใช่อนุภาคยางมีประมาณ 65 wt% แบ่งเป็น
 - 2.1 ส่วนของน้ำมีประมาณ 55 wt%
 - 2.2 ส่วนของอนุภาคลูทอยด์มีประมาณ 10 wt%

โปรตีนที่มีในน้ำยางธรรมชาติส่วนหนึ่งจะเกาะอยู่บนอนุภาคของเม็ดยาง ที่เหลือจะอยู่ในชั้นน้ำประมาณ 25% ของโปรตีนทั้งหมด น้ำยางธรรมชาติเป็นคอลลอยด์ ประกอบด้วยอนุภาคของเม็ดยางที่แขวนลอยอยู่ในน้ำยางธรรมชาติ ขนาดของอนุภาคเม็ดยางอยู่ที่ประมาณตั้งแต่ 200 Å จนถึง 20000 Å และ 85 wt% ของอนุภาคยางจะมีขนาดเกิน 4000 Å อนุภาคที่มีขนาดใหญ่เหล่านี้สามารถแยกออกจากชั้นน้ำในการทำน้ำยางข้นได้ ส่วนอนุภาคที่มีขนาดเล็กเกินไปจะแยกออกจากน้ำยางสดในการทำน้ำยางข้นได้ยาก ทำให้อนุภาคขนาดเล็กเหล่านี้กลายเป็นทางน้ำยาง (skim latex) ในขณะการทำน้ำยางข้น ในน้ำยางจะมีเนื้อยางไฮโดรคาร์บอน 86% น้ำที่เจือติดเข้าไปในอนุภาค 10% สารโปรตีน 1% สารพวกไลปิดไขมัน 3% พวกโลหะ เช่น แมกนีเซียม โพแทสเซียม และทองแดง จะปนไปกับอนุภาคเม็ดยางด้วย แต่ก็มีปริมาณน้อยไม่เกิน 0.05%

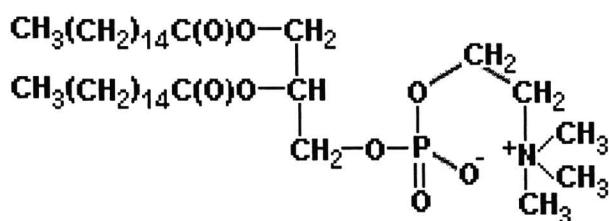
ปริมาณเนื้อยางแห้งของน้ำยางธรรมชาติ (วรารณ, 2549) ในสภาพน้ำยางสดไม่แน่นอน คือตั้งแต่ 20 wt% ขึ้นไป ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย บางสายพันธุ์ที่มีการพัฒนาแล้วอาจสูงถึง 45 wt% ความแตกต่างระหว่างปริมาณสารที่เป็นของแข็งทั้งหมดกับปริมาณเนื้อยางแห้งในน้ำยางสดประมาณ 3 wt% แต่ถ้าปั่นน้ำยางสดเป็นน้ำยางแห้งแล้ว ความแตกต่างนี้จะลดเหลือประมาณ 1.5 wt%

ยาง (rubber) คือเนื้อยางไฮโดรคาร์บอนเป็นอนุมูลของไอโซพรีนต่อกันมีขนาดโมเลกุลสูงประมาณ 1 ล้าน โมเลกุล เนื้อยางมีความหนาแน่นเท่ากับ 0.92 g/cm^3 ดังนั้น เนื้อยางจึงเบากว่าน้ำ อนุภาคของเม็ดยางที่มีขนาดใหญ่พอ ก็จะลอยขึ้นสูผิวน้ำเมื่อตั้งทิ้งไว้นาน โปรตีนและสารไลปิด ที่อยู่กับอนุภาคของเม็ดยาง คาดว่าจะอยู่ห่อหุ้มอนุภาคของยางเอาไว้ ดังแสดงในรูปที่ 2.11



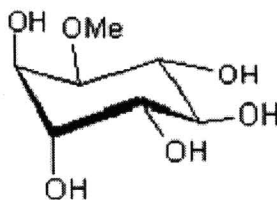
รูปที่ 2.11 ลักษณะของอนุภาคเม็ดยาง (บุญธรรม, 2532)

ไลปิดที่อยู่กับอนุภาคของเม็ดยางเป็นพวกฟอสโฟไลปิด (phospholipid) ประมาณ 2% อีโคซิลแอลกอฮอล์ (ieococyl alcohol) ประมาณ 0.6% และพวกสเตอรอล (sterol) และเอสเทอร์ของสเตอรอลประมาณ 0.4% เชื่อว่าฟอสโฟไลปิดอยู่ในระหว่างชั้นของโปรตีนกับเม็ดยางทำหน้าที่ยึดโปรตีนให้เกาะบนอนุภาคของเม็ดยาง ฟอสโฟไลปิดที่สำคัญของน้ำยางเป็นชนิดแลกซิทิน (lecithin) ซึ่งมีสูตรโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.12 สูตรโครงสร้างของแลกซิทิน (<http://www.scientificpsychic.com>)

น้ำตาล (carbohydrates) ที่มีอยู่ในน้ำยางธรรมชาติจะละลายอยู่ในชั้นน้ำ ส่วนใหญ่ของน้ำตาลที่มีอยู่เป็นควิบราซิโตล (quebrachitol) มีสูตรโครงสร้างทางเคมีดังแสดงในรูปที่ 2.13 ในน้ำยางธรรมชาติมีปริมาณของน้ำตาลชนิดนี้ 1% น้ำตาลอื่นๆ เช่น กลูโคส ซูโครส ฟรุคโตสก็เหมือนกันแต่ในปริมาณน้อย น้ำตาลเหล่านี้ไม่ค่อยมีอิทธิพลต่อสมบัติของน้ำยางธรรมชาติเท่าใดนัก แต่ในน้ำยางสดที่ไม่มีการเก็บรักษาที่ดี น้ำตาลในน้ำยางธรรมชาตินี้จะถูกสารแบคทีเรียออกซิไดซ์ให้สลายตัวไปเป็นกรดที่มีโมเลกุลขนาดเล็กๆ เช่น กรดฟอร์มิก กรดอะซิติก และกรดไพรูวอิก เป็นต้น กรดที่มีโมเลกุลเล็กนี้จะระเหยได้ง่าย จึงเรียกรวมกันว่ากรดไขมันระเหย (volatile fatty acid, VFA)



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของน้ำตาลควิบราซิโตล (<http://dc2.uni-bielefeld.de>)

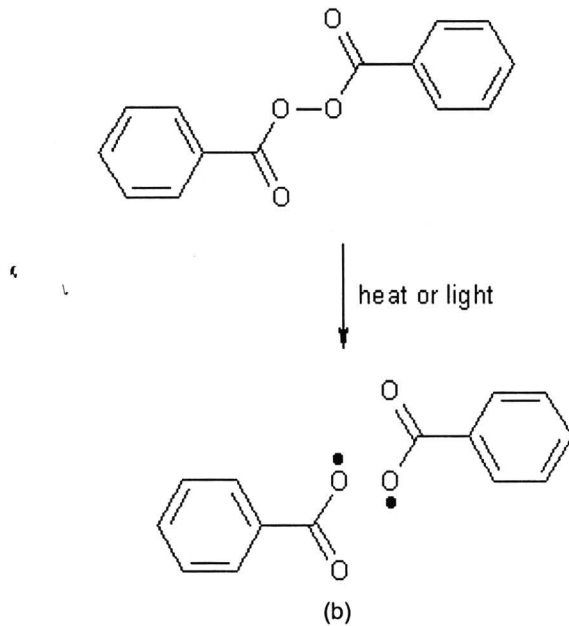
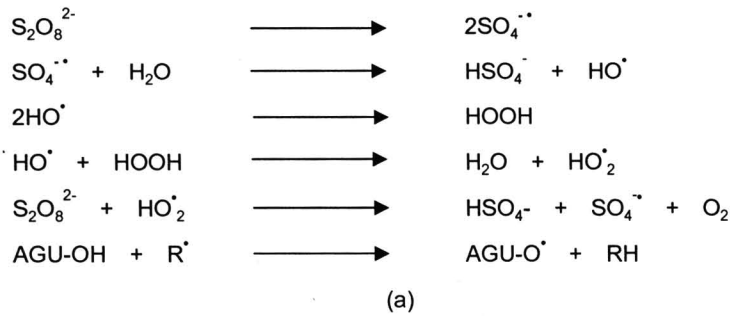
2.6 ปฏิกริยากราฟท์โคพอลิเมอร์ไรเซชัน

การสังเคราะห์กราฟท์โคพอลิเมอร์ (graft copolymer) เป็นการปรับปรุงพอลิเมอร์ให้มีลักษณะตรงตามความต้องการมากขึ้น เป็นวิธีการทำให้มอนอเมอร์เกิดพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) บนสายโซ่พอลิเมอร์ (Bhattacharya and Misra, 2004) โดยส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับการเกิดอนุมูลอิสระ (free radical grafting) ของพอลิเมอร์ และในปัจจุบันการสังเคราะห์กราฟท์โคพอลิเมอร์แบบไอออนิก (ionic grafting) กำลังได้รับความสนใจ กราฟท์โคพอลิเมอร์สามารถทำได้ทั้งในระบบสารที่เป็นเนื้อเดียวกัน (homogenous) และสารที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogenous)

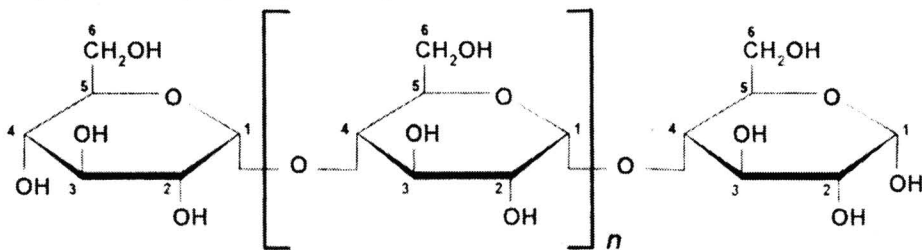
การเกิดเป็นอนุมูลอิสระโดยสารริเริ่มปฏิกริยาทำได้หลายวิธี เช่น การแตกตัวด้วยความร้อน ระบบรีดอกซ์ การฉายรังสี และการใช้แสง ในการเลือกใช้วิธีการใดขึ้นอยู่กับชนิดของมอนอเมอร์และสภาวะในการทดลอง (Kirititanavit, 2001)

1. สารริเริ่มปฏิกริยาที่แตกตัวด้วยความร้อน (thermal initiator) การแตกตัวด้วยความร้อนของสารริเริ่มปฏิกริยาเป็นแบบโฮโมไลติก (homolytic) หรือ การแตกของพันธะอย่างสมมาตร โดยแต่ละอะตอมจะมีอิเล็กตรอนเพียงหนึ่งอิเล็กตรอนในการสร้างอนุมูลอิสระ เนื่องจากสารริเริ่มปฏิกริยาเหล่านี้มีพันธะของ O-O, S-S และ N-O ที่สามารถแตกตัวได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน ตัวอย่างของสารริเริ่มปฏิกริยาในระบบนี้ เช่น เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (benzoyl peroxide, BPO) ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (dicumyl peroxide, DCP) และโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (potassium persulphate, PPS) เป็นต้น รูปที่ 2.14a แสดงกลไกการแตกตัวและเกิดเป็นอนุมูลอิสระของ PPS บนหน่วยกลูโคส โดยที่ PPS สามารถแตกตัวให้อนุมูลอิสระได้ที่ 130°C ที่เวลา 1 min และรูปที่ 4.14b แสดงกลไกการแตกตัวให้อนุมูลอิสระของ BPO ซึ่งแตกตัวให้อนุมูลอิสระได้ที่ 137°C เป็นเวลา 2 min (Graaf and Janssen, 2000) รูปที่ 4.15 แสดงโครงสร้างหน่วยของกลูโคส (anhydroglucose units, AUG) รูปที่ 2.16 แสดงกลไกการนำไปสู่การเกิดอนุมูลอิสระบนโมเลกุลของยางธรรมชาติ และรูปที่ 2.17 แสดงปฏิกริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างแป้งมันสำปะหลังและยางธรรมชาติ

2. สารริเริ่มปฏิกริยาในระบบรีดอกซ์ (redox initiator) (Yagci and Yildiz, 2005) กระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันในระบบรีดอกซ์มีข้อดี คือ ใช้เวลาในการเหนี่ยวนำให้เกิดอนุมูลอิสระน้อย และใช้พลังงานกระตุ้นต่ำ ($40\text{--}85\text{ kJ/mol}$) แต่ทำให้พอลิเมอร์ที่ได้มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และง่ายต่อการควบคุมปฏิกริยาพอลิเมอร์ไรเซชันที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากการเกิดปฏิกริยาข้างเคียงมีน้อย และสามารถทดสอบสารตัวกลางของอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นระหว่างเกิดปฏิกริยาได้โดยตรง ในระบบรีดอกซ์สารประกอบเชิงซ้อนที่ใช้ในการริเริ่มเกิดขึ้นได้ง่าย จากปฏิกริยาของโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์ โดยการแตกตัวของโมเลกุลเพื่อเกิดเป็นอนุมูลอิสระที่ใช้ใน การริเริ่มปฏิกริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน คู่ของรีดอกซ์จำนวนมากที่ประกอบไปด้วยสารประกอบอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ ที่ถูกนำมาใช้เป็นสารริเริ่มปฏิกริยาในกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันโดยทั่วไปมักใช้เปอร์ออกไซด์ (peroxide) เปอร์ซัลเฟต (persulphate) เปอร์แมงกาเนต (permanganess) เปอร์โรออกโซโมโนซัลเฟต (peroxomonosulfate) เปอร์โรออกโซไดฟอสเฟต (peroxidiphosphate) ไอออนของโลหะ เช่น แมงกานีส (III) และ (VI) (Manganese (III) and (VI)) และเกลือของโลหะทรานซิชัน ที่รวมตัวกับรีดิวซิงเอเจนต์ (reducing agent) เช่น แอลกอฮอล์ แอลดีไฮด์ เอมีน เอไมด์ คีโตน และกรด เป็นต้น (Sarac, 1999) จะเป็นสารริเริ่มปฏิกริยาในระบบรีดอกซ์เพื่อใช้ในการเกิดปฏิกริยาพอลิเมอร์ไรเซชันในน้ำ สำหรับไวตามินมอนอเมอร์ไอออนของซีเรียม (IV) (Cerium (IV)) จะถูกใช้สำหรับปฏิกริยาออกซิเดชันของสารประกอบอินทรีย์หลายชนิดในรูปของซีเรียม (IV) แอมโมเนียมไนเตรด (Cerium (IV) ammonium nitrate) ซีเรียม (IV) แอมโมเนียมซัลเฟต (Cerium (IV) ammonium sulfate) ซีเรียม (IV) ซัลเฟต (Cerium (IV) sulfate) และซีริกเปอร์คลอเรต (ceric perchlorate) ปฏิกริยาออกซิเดชันของแอลกอฮอล์โดยใช้ซีเรียม (IV) ซึ่งเกิดผ่านกระบวนการแตกตัวออกของสายโซ่ของสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดเป็นโคออร์ดิเนชันกัน เนื่องจากกลไกของสารประกอบเชิงซ้อนแตกตัวออกเป็นอนุมูลอิสระของสารประกอบเชิงซ้อนเกิดเป็นซีรีสไอออน โปรตอน และอนุมูลอิสระบนแอลกอฮอล์



รูปที่ 2.14 กลไกการแตกตัวให้อนุมูลอิสระของ (a) PPS (Qudsieh *et al.*, 2004) และ (b) BPO (<http://discovery.kcpc.usyd.edu.au>)



รูปที่ 2.15 โครงสร้างของหน่วยกลูโคส (<http://www.jic.ac.uk>)

3. การฉายรังสี (radiation) (Bhattacharya and Misra, 2004) สารริเริ่มปฏิกิริยาไม่มีความจำเป็นสำหรับวิธีการนี้ แต่สิ่งที่สำคัญคือตัวกลาง เช่น ถ้าทำการฉายรังสีในสภาวะอากาศปกติ เปอรออกไซด์อาจจะเกิดขึ้นบนพอลิเมอร์และเวลาชีวิต (lifetime) ของอนุมูลอิสระขึ้นอยู่กับธรรมชาติของสายโซ่พอลิเมอร์ อาจจะทำให้เกิดปฏิกิริยากากราฟต์โคพอลิเมอร์ไรเซชันได้ไม่สมบูรณ์ การกราฟต์โคพอลิเมอร์บนพอลิเมอร์ทำได้โดยการฉายรังสีในของผสมระหว่าง พอลิเมอร์กับมอนอเมอร์ ส่วนมากในการฉายรังสีมักทำในระบบเนื้อผสม พอลิเมอร์จะถูกทำให้บวมตัว

The diagram illustrates the grafting of polyisobutylene onto a polymer backbone. The process begins with a polyisobutylene chain (represented by a repeating unit in brackets with subscript n) and an iodine radical ($I\cdot$). The iodine radical can either abstract a hydrogen atom from the chain (labeled "abstraction") or add to it (labeled "addition"). The abstraction step leads to the formation of a polyisobutylene radical (also in brackets with subscript n), which then undergoes propagation (labeled "propagation") with a polymer backbone (represented by a wavy line) to form a grafted copolymer.

The reaction scheme illustrates the synthesis of a polyglycoside. The reactants are a glucose derivative (a six-membered ring with CH_2OH at C5, OH at C2 and C3, and a wavy line at C4) and a polyisobutylene chain (a repeating unit in brackets with subscript n , containing a radical center $\text{HC}\cdot$ and a double bond). The product is a polyglycoside where the glucose units are linked to the polyisobutylene chain via ether linkages at the C1 and C4 positions.

28

4. การใช้แสง (photochemical grafting) (Bhattacharya and Misra, 2004) กราฟท์โคพอลิเมอร์สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อโครโมฟอร์ (chromophore) บนสายโซ่พอลิเมอร์มีการดูดกลืนแสงเข้ามาในโมเลกุลแล้วทำให้เข้าสู่สภาวะกระตุ้นเกิดเป็นอนุมูลอิสระ และเมื่อมีอนุมูลอิสระเกิดขึ้นปฏิกิริยากราฟท์โคพอลิเมอร์ไรเซชันจึงเกิดตามมา

2.7 การตรวจสอบเอกสาร

2.7.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับโฟมแข็งและโฟมแข็งผสมพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ

Lourdin และคณะ (1995) ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของปริมาณอะไมโลสที่มีอยู่ในแผ่นฟิล์มและแผ่นโฟม เติร์ยมฟิล์มและโฟมที่มีแป้ง น้ำ และกลีเซอรอลเป็นส่วนประกอบ พบว่าฟิล์มที่ไม่มีการเติมพลาสติกไซเซอร มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดหยุ่น (flexibility) เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณอะไมโลสเพิ่มขึ้น ส่วนฟิล์มที่มีพลาสติกไซเซอรไม่มีการเปลี่ยนแปลง และยังคงมีค่าเท่าเดิมเมื่อปริมาณอะไมโลสมากกว่า 40% โฟมที่ได้จากการอัดรีดแข็งและเปราะ ศึกษาสมบัติของผนังเซลล์ไปประยุกต์ใช้ เพื่อเป็นการปรับปรุงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมจากการอัดรีด และแบบจำลองของโฟมแข็ง (cellular solid) การเติมพลาสติกไซเซอรลงไปในโฟมและฟิล์ม พบว่าพลาสติกไซเซอรให้ความสามารถในการยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น และอะไมโลเพกตินไวต่อพลาสติกไซเซอรมากกว่าอะไมโลส

Tatarka และคณะ (1996) เปรียบเทียบระหว่างสมบัติของแข็งและโฟมพอลิสไตรีน (expanded polystyrene, EPS) ที่นำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ที่ใช้แล้วทิ้งประเภท loose fill foam ด้วยกระบวนการอบ พบว่าโฟมจากแข็งมีความหนาแน่นสูงกว่าโฟมพอลิสไตรีน ส่วนความแข็งแรงต่อแรงกดอัดของโฟมแข็งและโฟมพอลิสไตรีนไม่แตกต่างกัน โครงสร้างของ โฟมพอลิสไตรีนเป็นเซลล์ปิด ขณะที่โฟมจากแข็งเป็นเซลล์เปิด การกระด้างตัวของโฟมแข็งน้อยกว่าโฟมพอลิสไตรีนประมาณ 10% โฟมแข็งเมื่อแตกจะมีลักษณะที่ละเอียด ส่วนโฟมพอลิสไตรีนเมื่อแตกจะเป็นชิ้นใหญ่กว่า โฟมแข็งไวต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิมากกว่าโฟมพอลิสไตรีน

Shogren และคณะ (1998a) ศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างและฐานวิทยาศาสตร์ของโฟมแข็งข้าวโพดชนิดต่าง ๆ แป้งมันฝรั่ง และส่วนผสมอื่นๆ ขึ้นรูปด้วยการอบในแม่แบบที่ร้อนอุณหภูมิ 175-235°C พบว่าผิวด้านบนของโฟมที่ได้จากแข็งชนิดต่างๆ มีเนื้อแน่นมากกว่าส่วนแกนกลาง มีลักษณะเป็นเซลล์เปิด ความหนาแน่นและความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของแป้งและปริมาณอะไมโลสเพิ่มขึ้น และความสามารถในการยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นลดลง โฟมแข็งมันฝรั่งมีความหนาแน่นและความสามารถในการยืดหยุ่นน้อยกว่าโฟมแข็งข้าวโพด โฟมแข็งที่ได้ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ทางด้านอาหารและสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ แต่ยังคงต้องปรับปรุงเรื่องความต้านทานต่อความชื้น

Shogren และคณะ (1998b) ทำการเตรียมโฟมแข็งผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (polyvinyl alcohol, PVOH) ขึ้นรูปด้วยการอบ เลือกใช้แป้งมันฝรั่ง แป้งข้าวโพด และ PVOH ชนิดต่างๆ อบในแม่แบบที่ร้อนที่ 200°C เป็นเวลา 80-140 sec พบว่าการเติม PVOH เท่ากับ 10-30% ทำให้โฟมมีความแข็งแรง ความยืดหยุ่น และความต้านทานต่อความชื้นเพิ่มขึ้น ความสามารถในการยืดหยุ่นของโฟมเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ PVOH ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และรูปจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) พบว่าเมื่อเม็ดแป้งพองตัวจะเข้าไปแทรกตัวในเนื้อ PVOH และการเติมเกลือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (calcium hydroxide) และเซอร์โคเนียม (zirconium) ทำให้เกิดการเชื่อมโยงของแป้งและ PVOH ขึ้นจึงทำให้ความต้านทานต่อความชื้นเพิ่มขึ้น โฟมที่ได้มีสมบัติเชิงกลเทียบเท่ากับโฟมพอลิสไตรีน และเมื่อทดสอบการฝังดินพบว่าโฟมที่มี PVOH ผสมอยู่ด้วยย่อยสลายได้ทางชีวภาพน้อยกว่าโฟมที่ไม่เติม PVOH

Lawton และคณะ (1999) ศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณของแข็งและชนิดของแข็งต่อโครงสร้างของโฟมแข็ง โดยเลือกใช้แป้งข้าวโพดชนิดต่างๆ แป้งมันฝรั่ง แป้งข้าวสาลี และแป้งมันสำปะหลัง ขึ้นรูปโดยการอบในแม่แบบที่ร้อน ปริมาณของแข็ง (batter solid) ในส่วนผสมตั้งแต่ 25-45% พบว่าความหนาแน่นและน้ำหนักของโฟมขึ้นกับปริมาณ

ส่วนผสมที่เติมลงไปในแม่แบบ ชนิดของแป้ง และปริมาณของของแข็ง โฟมแป้งที่มีปริมาณอะไมโลเพกตินสูงมีน้ำหนักเบาที่สุด โฟมแป้งจากธัญพืชมีน้ำหนักมากที่สุด ส่วนเวลาที่ใช้ในการอบขึ้นอยู่กับปริมาณของของแข็ง และชนิดของแป้งในส่วนผสม ความแข็งแรงและความยืดหยุ่นมีความสัมพันธ์กับน้ำหนักและความหนาแน่นของโฟม โฟมที่มีความหนาแน่นสูงกว่าจะมีความแข็งแรงสูงกว่าและมีความยืดหยุ่นต่ำกว่าโฟมที่มีความหนาแน่นต่ำกว่า

Cha และคณะ (2001) ศึกษาสมบัติเชิงฟิสิกส์ของโฟมแป้งที่ได้จากการอัดรีดที่อุณหภูมิและความชื้นต่างๆ กัน เพื่อพัฒนาสมบัติทางฟิสิกส์และเชิงกลของโฟมแป้ง โดยการผสมระหว่างแป้งข้าวสาลี พอลิเมอร์สังเคราะห์ชนิดต่างๆ น้ำ สารฟู และสารก่อนิเวเคลียส แล้วทำการอัดรีดด้วยเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยวที่อุณหภูมิตั้งแต่ 100-160°C ด้วยความเร็ว 100 rpm มีการเก็บตัวอย่างภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ที่แตกต่างกันตั้งแต่ 10-90% ความหนาแน่นของโฟมเพิ่มเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งที่อุณหภูมิเท่ากับ 140°C แป้งข้าวสาลีเกิดการขยายตัวมากที่สุด และความชื้นสัมพัทธ์มีผลต่อสมบัติของโฟมแป้งที่ได้

Glenn และคณะ (2001a) ทำการเตรียมแผ่นโฟมเป็นแผ่นลามิเนต (laminated) เพื่อใช้เป็นบรรจุภัณฑ์เกี่ยวกับอาหาร โดยใช้แป้งข้าวสาลี และเยื่อกระดาษจากเนื้อไม้อ่อน (softwood fiber pulp) แล้วนำไปอบที่ 160°C เป็นเวลา 5 min พบว่าโฟมที่ได้เปราะและไวต่อความชื้นจำเป็นต้องเคลือบด้วยพลาสติกหลังการอบ โฟมมีความหนาแน่น ความเค้น ณ จุดขาด ระยะยืด ณ จุดขาด และความทนต่อแรงดัดโค้งสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่เป็นแผ่นลามิเนต สมบัติเชิงกลของโฟมลามิเนตใกล้เคียงกับโฟมพอลิสไตรีนและเปเปอร์บอร์ด (paperboard) โฟมลามิเนตเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ที่อุณหภูมิห้องโฟมลามิเนตมีสมบัติเชิงกลบางอย่างใกล้เคียงกับโฟมพอลิสไตรีน

Glenn และคณะ (2001b) ศึกษาเกี่ยวกับโฟมแป้งผสมเส้นใยและแคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate) เพื่อศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของโฟม โดยเลือกใช้แป้งข้าวสาลี แป้งข้าวโพด แป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันฝรั่ง ขึ้นรูปด้วยการอบในแม่แบบที่ร้อนที่อุณหภูมิ 180°C เป็นเวลา 3 min พบว่าโฟมผสมที่มีความชื้นเท่ากับ 11% มีสมบัติทางฟิสิกส์และเชิงกลดีกว่าที่ความชื้นอื่นๆ โฟมผสมที่ได้มีสมบัติอยู่ในช่วงเดียวกับโฟมพอลิสไตรีนและเปเปอร์บอร์ด โฟมที่ได้มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดต่ำกว่าโฟมพอลิสไตรีนและเปเปอร์บอร์ด แต่โฟมผสมที่ได้มีความยืดหยุ่นสูงกว่าและสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และหากนำไปเคลือบสามารถนำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ได้

Kiatkamjornwong และคณะ (2001) ทำการศึกษาถึงโฟมแป้งผสมน้ำยางธรรมชาติที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดบ่า โดยเลือกใช้แป้งมันสำปะหลังขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิเท่ากับ 150°C เป็นเวลา 2 min ด้วยความดัน 10.8 MPa แปรปริมาณน้ำที่ใช้ขึ้นรูปโฟม ปริมาณน้ำยางธรรมชาติ ปริมาณเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (benzoyl peroxide) สารรักษาสภาพของน้ำยางธรรมชาติชนิดไม่มีประจุ (non-ionic surfactant) และแคลเซียมคาร์บอเนต จากการทดลองพบว่าปริมาณน้ำมีความสำคัญต่อการขึ้นรูปโฟมแป้ง สารรักษาสภาพน้ำยางช่วยทำให้น้ำยางธรรมชาติกระจายตัวในแป้งเจลได้ดีขึ้น และปริมาณน้ำยางธรรมชาติสูงสุดที่เติมลงไปในโฟมแป้งได้เท่ากับ 50 wt% เพราะถ้ามากเกินไปจะไม่สามารถขึ้นรูปเป็นโฟมได้ ค่ามอดูลัสสะสมเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำยางเพิ่มขึ้น เพราะความเป็นอิลาสติกในตัวยางธรรมชาติเอง การเติมเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ทำให้ค่ามอดูลัสสะสมเพิ่มขึ้น และแคลเซียมคาร์บอเนตช่วยทำให้โฟมผสมที่ได้มีสมบัติบางประการดีขึ้น

Shogren และคณะ (2002) ศึกษาเกี่ยวกับโฟมแป้งดัดแปรและสารเติมแต่ง เพื่อปรับปรุงโครงสร้างและสมบัติของโฟมเพื่อใช้แทนที่ EPS โดยใช้แป้งมันฝรั่ง แป้งข้าวโพดชนิดข้าวเหนียว (waxy cornstarch) และแป้งข้าวโพดดัดแปรผสมกับ PVOH เส้นใยชนิด aspen fibers และสารเติมแต่งอื่นๆ อบที่อุณหภูมิ 200-205°C เป็นเวลา 80-140 sec พบว่าโฟมแป้งที่ได้มีความเปราะ และไวต่อน้ำและความชื้น การใช้แป้งดัดแปรและสารเติมแต่งทำให้โฟมมีความแข็งแรงและความต้านทานต่อน้ำดีขึ้น โฟมจากแป้งดัดแปรใช้เวลาในการอบสั้นกว่า น้ำหนักเบากว่า และระยะยืด ณ จุดขาดสูงกว่าแป้งดิบ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำโฟมแป้งดัดแปรผสม PVOH มีค่าระยะยืด ณ จุดขาดสูงกว่าแป้งดิบผสม PVOH ส่วนเส้นใยทำให้โฟมมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นทั้งที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงและต่ำ และโมโนสเตียริลซิเตรท (monostearyl citrate) ช่วยปรับปรุงความต้านทานต่อน้ำของโฟมแป้งได้ดีกว่าสารเติมแต่งชนิดอื่นๆ

Lawton และคณะ (2004) ทำการศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของโฟมแข็งข้าวโพด โดยการเติมเส้นใยธรรมชาติชนิด aspen fiber เพื่อเป็นโฟมใช้แล้วทิ้ง ประเภท loose-fill foam และเป็นโฟมสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ เพื่อแทนที่โฟมพอลิสไตรีน ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ขึ้นรูปด้วยการอบในแม่แบบที่ร้อนที่อุณหภูมิ 200°C แปรปริมาณเส้นใย และทำการเก็บภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์แตกต่างกัน พบว่าเส้นใยทำให้ใช้เวลาในการอบนานขึ้น และใช้ส่วนผสมเพิ่มมากขึ้นด้วย โฟมแข็งที่ได้จากการทดลองมีความไวต่อความชื้น และสมบัติเชิงกลเปลี่ยนไปเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เปลี่ยนแปลงไป การเติมเส้นใยธรรมชาติลงไปทำให้สมบัติเชิงกลของโฟมดีขึ้น ความแข็งแรงของโฟมที่ได้เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเท่ากับ 15 wt% และลดลงเมื่อมีเส้นใยมากกว่า 30 wt% เป็นเพราะการจัดเรียงตัวของเส้นใยไม่เป็นระเบียบเพิ่มขึ้น ส่วนปริมาณเส้นใยมีผลต่อความยืดหยุ่นของโฟมน้อย เส้นใยที่เติมลงไปเท่ากับ 15 wt% เป็นปริมาณที่เหมาะสมเพราะทำให้ความแข็งแรงที่ได้สูงไม่แพ้ที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงหรือต่ำ

Preechawong และคณะ (2004) ทำการเตรียมและศึกษาสมบัติของโฟมแข็งผสมพอลิแลคโตน (poly ϵ -caprolactone, PCL) เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของระยะเวลาในการเก็บ ความชื้นสัมพัทธ์ ปริมาณ PCL ชนิดและปริมาณของพลาสติกไซเซอร์ต่อการดูดซับความชื้นและน้ำหนักของโฟม สมบัติเชิงกล และการย่อยสลายของโฟมแข็งด้วยเอนไซม์ ขึ้นรูปโดยการอบแข็งในแม่แบบที่ร้อนที่ 220°C เป็นเวลา 2 min พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงของโฟมสูงสุดภายใต้ 42 %RH (ระยะเวลาในการเก็บ 7 days) และที่ระยะเวลาในการเก็บ 2 days (ภายใต้ 42 %RH) PCL ทำให้ความต้านทานต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดได้รับการปรับปรุง และสมบัติความต้านทานต่อน้ำดื่กว่าของโฟมแข็ง โฟมสามารถย่อยสลายได้ด้วยเอนไซม์ชนิดแอลฟาอะไมเลส (α -amylase) ซึ่ง PCL ทำให้โฟมทนต่อเอนไซม์และการย่อยสลายได้มากกว่าโฟมแข็งอย่างเดียว

Soykeabkaew และคณะ (2004) ทำการเตรียมและศึกษาสมบัติของโฟม คอมโพสิทระหว่างแป้งมันสำปะหลังและเส้นใยธรรมชาติ โดยการนำแป้งมันสำปะหลัง เส้นใยปอและป่าน และส่วนผสมอื่นๆ อบในแม่แบบที่ร้อนที่อุณหภูมิ 220°C เป็นเวลา 150 sec พบว่าเมื่อเส้นใยเพิ่มขึ้นต้องใช้ส่วนผสมปริมาณมากขึ้นในการอบ แผ่นโฟมที่ได้เมื่อมีปริมาณเส้นใยเท่ากับ 5-10 wt% มีความต้านทานต่อแรงดัดโค้ง และค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งดีขึ้น ความชื้นในตัวโฟมที่ทำให้มีค่าสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้ง และค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งสูงสุดอยู่ระหว่าง 8-10% ขึ้นกับสูตรการทดลอง และเส้นใยปอทำให้ความต้านทานต่อแรงดัดโค้งสูงกว่าเส้นใยป่าน

Cinelli และคณะ (2005) ศึกษาเกี่ยวกับโฟมผสมระหว่างแป้งและ PVOH เพื่อใช้แทนที่โฟมพอลิสไตรีน ที่ย่อยสลายได้ยากและต้องใช้เวลานานในการย่อยสลาย โดยเลือกใช้แป้งมันฝรั่ง เส้นใยข้าวโพด ขึ้นรูปด้วยการอบในแม่แบบร้อนที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 120-180 sec โฟมที่ได้จากการเติมเส้นใยข้าวโพดลงไปทำให้ต้องใช้เวลาในการอบนานขึ้น และต้องใช้ปริมาณของส่วนผสมเพิ่มขึ้นเพื่อทำให้สามารถขึ้นรูปออกมาเป็นโฟมตามแม่แบบได้ การผสมเส้นใยข้าวโพดลงไปทำให้ความหนืดของส่วนผสมเพิ่มขึ้น และทำให้สมบัติเชิงกลบางอย่างของโฟมแข็งลดลง การเติม PVOH ในรูปของเหลวทำให้ความแข็งแรง ความยืดหยุ่น และความต้านทานต่อน้ำของโฟมดีขึ้น แต่การเติม PVOH ในรูปของแข็งทำให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดัดลดลง โฟมแข็งที่เติมเส้นใยข้าวโพดและ PVOH มีสมบัติความต้านทานต่อแรงดัดเหมือนกับโฟมแข็งอย่างเดียวแต่มีค่าความต้านทานน้ำเพิ่มขึ้น

Preechawong และคณะ (2005) ทำการเตรียมและศึกษาสมบัติของโฟมแข็งผสมพอลิแลคติกแอซิด (polylactic acid, PLA) เพื่อศึกษาถึงผลของระยะเวลาในการเก็บ ความชื้นสัมพัทธ์ ปริมาณ PLA และชนิดของพลาสติกไซเซอร์ต่อสมบัติเชิงกล และการย่อยสลายของโฟมแข็ง ขึ้นรูปโดยการอบแข็งในแม่แบบที่ร้อนที่ 220°C เป็นเวลา 2 min พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงของโฟมสูงสุดภายใต้ 42 %RH (ระยะเวลาในการเก็บ 7 days) และที่ระยะเวลาในการเก็บ 2 days (ภายใต้ 42 %RH) PLA ทำให้ความต้านทานต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดได้รับการปรับปรุง โฟมที่ได้สามารถย่อยสลายได้ด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส (α -amylase) และโฟมแข็งผสม PLA ย่อยสลายได้น้อยกว่าโฟมแข็งอย่างเดียว

Carr และคณะ (2006) ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของเส้นใยมันสำปะหลัง และเส้นใยข้าวสาลีต่อสมบัติเชิงกลของโฟมแข็งมันสำปะหลัง ขึ้นรูปด้วยการอบที่อุณหภูมิ 220°C ในแม่แบบที่ร้อนเป็นเวลา 10 sec พบว่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น ที่ปริมาณเส้นใยต่ำช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับโฟมแข็งได้ แต่เมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มมากขึ้นทำให้สมบัติเชิงกลและความแข็งแรงของโฟมลดลง จากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าเมื่อเส้นใยเพิ่มขึ้นทำให้การจัดเรียงตัวของเส้นใยมีความไม่เป็นระเบียบเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้ความแข็งแรงลดลง

Katepetch และคณะ (2006) ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเตรียมและการศึกษาอิทธิพลของปริมาณน้ำยางธรรมชาติที่มีต่อสมบัติเชิงกลของโฟมแข็งมันสำปะหลัง อบในแม่แบบที่ร้อนที่อุณหภูมิ 220°C เป็นเวลา 150-210 sec พบว่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น ที่ปริมาณน้ำยางธรรมชาติเท่ากับ 26.67 wt% ของเนื้อยางแห้งสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของโฟมผสม

Nabar และคณะ (2006) ศึกษาถึงการอัดรีดผลิตภัณฑ์จากแป้งด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ เพื่อใช้เป็นโฟมกันกระแทกและฉนวนไฟฟ้า เลือกใช้แป้งชนิดต่างๆ พลาสติไซเซอร์ สารเติมแต่ง และน้ำ พบว่าสมบัติของโฟมแข็งขึ้นอยู่กับปริมาณอะไมโลส และสภาวะการอัดรีด ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา และลักษณะของสกรู

Shey และคณะ (2006) เตรียมและศึกษาเกี่ยวกับสมบัติของโฟมแข็งผสมน้ำยางธรรมชาติ ต้องการหาวัสดุที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพมาแทนที่โฟมโพลิสไตรีน เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการยืดหยุ่น และปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อน้ำให้แก่โฟมแข็ง เลือกใช้แป้งข้าวสาลี แป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวโพด ทำการขึ้นรูปด้วยการอบที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 1 min พบว่าเมื่อปริมาณของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น และน้ำยางช่วยปรับปรุงความยืดหยุ่นของโฟมที่ได้ สารรักษาสภาพของน้ำยางทำให้ยางจับตัวกันน้อยลงและโฟมออกมามีผิวเรียบมากขึ้น สมบัติของโฟมแข็งผสมน้ำยางธรรมชาติเทียบเท่าได้กับโฟมโพลิสไตรีน โดยการปรับเปลี่ยนชนิดของแป้งและปริมาณของยางธรรมชาติ น้ำยางธรรมชาติทำให้โฟมดูดซับความชื้นได้น้อยลง และยังช่วยลดผลของความชื้นสัมพัทธ์ที่จะเกิดขึ้นกับโฟมที่ได้ด้วย

Zhou และคณะ (2006) ทำการศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างและสมบัติต่างๆ ของโฟมแข็ง ผสมแป้งและส่วนประกอบต่างๆ ด้วยกระบวนการอัดรีดแล้วจึงทำให้เป็นโฟมด้วยการใช้ความร้อนจากไมโครเวฟ เปรียบเทียบกันระหว่างแป้งข้าวสาลี 2 ชนิด และสารเคมีต่างๆ เพื่อศึกษาถึงความหนาแน่น ลักษณะของโฟม การดูดซับน้ำ และสมบัติเชิงกล การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ด้วยการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟขึ้นอยู่กับวัตถุดิบและสารเติมแต่ง หลังจากการเติมเกลือชนิดต่างๆ ลงไปประมาณ 5.5-10.5 wt% ทำให้ความหนาแน่นของโฟมลดลงและผนังเซลล์บางลง การเติมสารก่อนิวเคลียส (nucleating agent) ทำให้โฟมมีเนื้อแน่นมากกว่าโฟมแป้งที่ไม่เติมสารเติมแต่ง แต่สารฟูไม่มีผลต่อความหนาแน่นของโฟม เกลือทำให้การดูดซับน้ำของโฟมเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ที่เติมลงไปทำให้สมบัติเชิงกลของโฟมแป้งได้รับการปรับปรุง และยังสามารถควบคุมโครงสร้างของเซลล์ (cell structure) ได้ด้วย

Salgado และคณะ (2008) ศึกษาเกี่ยวกับโฟมแข็งมันสำปะหลังผสมโปรตีนจากดอกทานตะวัน และเส้นใยเซลลูโลส เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของชนิดและปริมาณของส่วนผสม ขึ้นรูปด้วยการอบที่ $150-155^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 3 min ด้วยความดัน 0.36 MPa พบว่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.46-0.59 g/cm^3 เส้นใยไม่ได้ทำให้ความหนาแน่นที่ได้เปลี่ยนไป การเติมโปรตีนและเส้นใยทำให้การดูดซับน้ำและความชื้นของโฟมลดลง แต่ไม่ทำให้สมบัติด้านอื่นเปลี่ยนไป โฟมที่มีการเติมเส้นใย 20 wt% และ โปรตีน 10 wt% มีสมบัติต่างๆ ดีที่สุดรวมทั้งความต้านทานและการดูดซับความชื้น โฟมที่ได้เป็นบรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

2.7.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับกราฟท์โคพอลิเมอร์ของแป้งและพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ

Choi และคณะ (1998) ทำการสังเคราะห์และศึกษาการย่อยสลายด้วยแสงของกราฟท์โคพอลิเมอร์ระหว่าง แป้งและเมทิลไวโนลคีโตน (methyl vinyl ketone, MVK) (St-g-PMVK) และระหว่างแป้งและฟีนิลไวโนลคีโตน (phenyl vinyl ketone, PVK) (St-g-PPVK) โดยใช้ซีริกแอมโมเนียมไนเตรด (ceric ammonium nitrate) เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา นำไปวิเคราะห์การเกิดกราฟท์โคพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค FTIR ความเสถียรทางความร้อนสามารถหาได้ด้วยเทคนิค เทอร์โมกราวิเมตริก (thermogravimetric analysis) ตรวจสอบการย่อยสลายด้วยแสงของกราฟท์โคพอลิเมอร์ที่ได้จาก เทคนิค Fade-o-Meter และการย่อยสลายได้ทางชีวภาพด้วย จุลินทรีย์ที่ชื่อ *Aspergillus niger* สามารถวิเคราะห์ น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยได้ด้วยเทคนิคยูวี (UV irradiation) พบว่ากราฟท์โคพอลิเมอร์ที่ได้มีสมบัติทางการย่อยสลายได้ ด้วยแสงสูงเพราะว่ากราฟท์โคพอลิเมอร์มีหมู่คาร์บอนิลอยู่ด้วย

Cho และคณะ (2002) ศึกษาการเตรียมกราฟท์โคพอลิเมอร์ระหว่างแป้งข้าวโพดและพอลิสไตรีน (polystyrene, PS) (PS-g-St) ด้วยเทคนิคอิมัลชันพอลิเมอร์ไรเซชัน (emulsion polymerization) ใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (potassium persulphate) เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา โซเดียมโดเดซิลเบนซีนซัลโฟเนต (sodium dodecylbenzenesulfonate, SDBS) เป็นสารลดแรงผิว เตตระเอทิลไทอูรัมไดซัลไฟด์ (tetraethylthiuram disulfide, TETDS) เป็นตัวยาสลายโซ่ ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 1-8 hr พบว่าเมื่อเวลาในการ สังเคราะห์และปริมาณของ SDBS เพิ่มขึ้นทำให้เปอร์เซ็นต์การกราฟท์ (grafting percentage, %GP) เพิ่มขึ้น แต่ หลังจาก 5 hr จะมี %GP คงที่ เพราะว่ากราฟท์โคพอลิเมอร์เกิดขึ้นเฉพาะที่บริเวณผิวหน้าของเม็ดแป้ง แต่เมื่อเพิ่ม TETDS ทำให้ %GP ลดลง น้ำหนักโมเลกุลของพอลิสไตรีนที่ได้จากกราฟท์โคพอลิเมอร์สัมพันธ์กับการแปรปรวนของ ค่า %GP และขนาดอนุภาคของแป้งกราฟท์โคพอลิเมอร์ลดลงเมื่อทำ pre-heating หรือ post-heating

Chen และคณะ (2006) ศึกษากราฟท์โคพอลิเมอร์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (poly(L-lactide), PLLA) และ แป้งข้าวโพด (PLLA-g-St) เพื่อใช้เป็นสารช่วยเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ (compatibilizer) ของพอลิเมอร์ผสม ระหว่างแป้งข้าวโพดและ PLLA พบว่าสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และลักษณะฐานฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม ที่มีการเติม PLLA-g-St ดีกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติม PLLA-g-St ทำให้การยึดเกาะระหว่างผิวหน้าของ PLLA ที่เป็น เมทริกซ์กับแป้งดีขึ้น และแป้งกระจายตัวใน PLLA ดีขึ้น

Lanthong และคณะ (2006) ศึกษาเกี่ยวกับกราฟท์โคพอลิเมอร์และการย่อยสลายของกราฟท์โคพอลิเมอร์ที่ ได้ ทำการสังเคราะห์กราฟท์โคพอลิเมอร์ระหว่างแป้งมันสำปะหลังและอะครีลาไมด์ (acrylamide, AM) ร่วมกับไอทา- ออกนิกแอซิด (itaconic acid, IA) (St-g-P(AM-co-IA)) ในระบบรีดอกซ์โดยใช้แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (ammonium persulphate) และเตตระเมทิลเอทิลีนไดอะมีน (N,N,N',N'-tetramethylethylenediamine) เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา เมทิล- ลินไบอะครีลาไมด์ (N,N'-methylenebisacrylamide) เป็นสารเชื่อมโยง โซเดียมไบคาร์บอเนต (sodium bicarbonate) เป็นสารฟู และพอลิออกซีเอทิลีน/พอลิออกซีโพรพิลีน/พอลิออกซีเอทิลีนไตรบล็อกโคพอลิเมอร์ (polyoxyethylene- /polyoxypropylene/polyoxyethylene) ทำหน้าที่เป็นสารที่ทำให้โฟมมีความเสถียร ศึกษาถึงสัดส่วนของ AM ต่อ IA สัดส่วนของแป้งต่อมอนอเมอร์ ความเข้มข้นของสารเชื่อมโยง และปริมาณสารริเริ่มปฏิกิริยา พบว่าตัวแปรต่างๆ มีผล ต่อการดูดซับน้ำของกราฟท์โคพอลิเมอร์พอลิเมอร์ที่ได้

Gong และคณะ (2006) ศึกษาการกราฟท์โคพอลิเมอร์ของแป้งข้าวโพด และพอลิแลคติกแอซิด (PLA) (St-g- PLA) ที่มีน้ำเป็นตัวกลาง และสแตนเนียส 2-เอทิลเฮกซะโนเอต (stannous 2-ethyl hexanoate) เป็นสารตัวเร่งในระบบ โดยเป็นการเกิดปฏิกิริยาแบบเปิดวงแหวน (ring-opening polymerization) บนผิวหน้าของแป้งด้วยกรดแลคติก หลังจากกลายเป็นกราฟท์โคพอลิเมอร์พบว่าตัว PLLA เป็นตัวแกนหลักให้แก่แป้ง แล้วจึงนำตัวอย่างมาตรวจสอบด้วย เทคนิค FTIR พบว่ามีพีคเกิดขึ้นที่ 1740 cm⁻¹ เป็นหมู่คาร์บอนิลของกราฟท์โคพอลิเมอร์ ขั้นตอนในการเกิดปฏิกิริยา



การกราฟท์โคพอลิเมอร์ สามารถอธิบายได้ด้วยเทคนิคไฮเปอร์ฟอร์แมนซ์ลิกวิดโครมาโทกราฟี (high-performance liquid chromatography) วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของกราฟท์โคพอลิเมอร์ที่ได้ด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ และ $^{13}\text{C-NMR}$ Song และคณะ (2007) ศึกษาการกราฟท์โคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากแป้งข้าวโพดและอะครีลาไมด์ (acrylamide, AM) ร่วมกับ 2-อะครีลาไมโด-2-เมทิลโพรเพนซัลโฟแอซิด (2-acrylamido-2-methylpropanesulfonic acid, AMPS) (St-g-P(AM-co-AMPS)) เลือกใช้สารริเริ่มปฏิกิริยาร่วมกันระหว่างซีเรียมซัลเฟต (cerium sulfate) และ แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (APS) พบว่ามีกราฟท์โคพอลิเมอร์เกิดขึ้นจากการตรวจสอบด้วยเทคนิค FTIR และ NMR การเปลี่ยนแปลงวิธีการเติมมอนอเมอร์ และการควบคุมอัตราส่วนของมอนอเมอร์ทั้งสองชนิดทำให้ระดับการเกิด กราฟท์โคพอลิเมอร์ ความหนืด และความเป็นประจุเพิ่มสูงขึ้น และการใช้สารริเริ่มปฏิกิริยาสองชนิดร่วมกันทำให้มี ความเป็นประจุลบ (anionic) มากกว่าการใช้สารริเริ่มปฏิกิริยาเพียงชนิดเดียว

Kaewtatip และ Tanrattanakul (2008) ศึกษาการกราฟท์โคพอลิเมอร์ของแป้งมันสำปะหลังและพอลิสไตรีน (PS-g-St) โดยเทคนิคซัสเพนชันพอลิเมอร์ไรเซชัน (suspension polymerization) ใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (PPS) เป็น สารริเริ่มปฏิกิริยาและน้ำเป็นตัวกลาง โดยทำการแปรปริมาณของสัดส่วนแป้งต่อสไตรีน เวลาและอุณหภูมิในการ สังเคราะห์ และปริมาณ PPS พบว่า %GP เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของแป้งเพิ่มขึ้น และ %GP สูงสุดที่ได้เท่ากับ 31.4% ที่ สัดส่วนแป้งต่อสไตรีนเท่ากับ 1:3 ที่อุณหภูมิ 50°C และเป็นเวลา 2 hr ซึ่งสามารถยืนยันการเกิดกราฟท์โคพอลิเมอร์ได้ ด้วยเทคนิคต่างๆ เช่น FTIR, TGA และ DSC จากลักษณะสัณฐานวิทยาพบว่าพอลิสไตรีนไปเกาะอยู่บนผิวหน้าของ เม็ดแป้ง และเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD) บอกได้ว่ากราฟท์พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นไม่ได้ทำ ให้สัณฐานวิทยาของแป้งเปลี่ยนไป

2.7.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกราฟท์โคพอลิเมอร์ของน้ำยางธรรมชาติและพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ

Lehrle และคณะ (1997) ศึกษาการกราฟท์โคพอลิเมอร์ระหว่างเมทิลเมทาอะครีเลท (MMA) และน้ำยางธรรมชาติ (NR-g-PMMA) เพื่อศึกษาผลของไวนิลอะซิเตต (vinyl acetate, VAc) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเกิดกราฟท์โคพอลิ-เมอร์ โดยใช้อะโซบิสไอโซบิวทีโรไนไตรล์ (azo-bis-isobutyronitrile) เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา พบว่า VAc เป็นตัวช่วยให้ มอนอเมอร์เกิดการแตกตัวและเกิดการกราฟท์กับน้ำยางธรรมชาติ จากนั้นจึงนำ NR-g-PMMA ตรวจสอบวิเคราะห์ด้วย เทคนิคต่างๆ เช่น $^1\text{H-NMR}$ และ $^{13}\text{C-NMR}$ เพื่อพิสูจน์ว่ามีกราฟท์โคพอลิเมอร์เกิดขึ้น และใช้เทคนิคเจลเพอร์มิเอชัน-โครมาโทกราฟี (gel permeation chromatography) เพื่อหาน้ำหนักโมเลกุลของกราฟท์โคพอลิเมอร์ที่ได้ แต่พบว่า VAc มีผลต่อการเกิดกราฟท์โคพอลิเมอร์ค่อนข้างน้อย และกราฟท์โคพอลิเมอร์ที่ได้มีความสามารถในการละลายในตัว ทำละลายลดลง

George และคณะ (2003) ศึกษาการกราฟท์โคพอลิเมอร์ระหว่างน้ำยางธรรมชาติและเมทิลเมทาอะครีเลท (MMA) (NR-g-PMMA) โดยการใช้รังสีแกมมา จากนั้นจึงขึ้นรูปเป็นฟิล์ม เพื่อปรับปรุงสมบัติของฟิล์ม

Kawahara และคณะ (2003) ทำการเตรียมและวิเคราะห์การกระจายตัวของยางธรรมชาติบนเมทริกซ์ที่มี อนุภาคนาโนเมตริกซ์ (nano-matrix) โดยทำการเตรียมกราฟท์โคพอลิเมอร์ระหว่างน้ำยางดีโปรตีนไนซ์ (deproteinized natural rubber latex, DPNR) และสไตรีน (DPNR-g-PS) ใช้เทอร์ทบิวทิลไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (*t*-butyl hydroperoxide, *t*-BHP) และเตตระเอทิลีนเพนตามีน (tetra ethylene pentamine, TEPA) เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยาใน ระบบรีดอกซ์ ตรวจสอบวิเคราะห์เพื่อพิสูจน์กราฟท์โคพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ และไซส์เอกсклюชันโครมาโต-กราฟี (size exclusion chromatography) ในการหาน้ำหนักโมเลกุลของกราฟท์โคพอลิเมอร์ที่ได้ หลังการทำให้ เกิดปฏิกิริยาโอโซไลซิส (ozolysis) พบว่ามีประสิทธิภาพการกราฟท์สูงถึง 90% จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องผ่าน (transmission electron microscopy, TEM) พบว่าอนุภาคยางที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ $0.5\ \mu\text{m}$ สามารถกระจายตัวในเมทริกซ์พอลิสไตรีนที่มีขนาดประมาณ 15 nm ได้ดี

Sittipong (2004) ศึกษากราฟท์โคพอลิเมอร์ระหว่างพอลิสไตรีนและน้ำยางธรรมชาติ (NR-g-PS) ด้วยเทคนิคอิมัลชันพอลิเมอร์ไรเซชัน ใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (PPS) เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยาแบบแตกตัวด้วยความร้อน และเทอร์ทบิวทิลไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (*t*-BHP) ร่วมกับเตตระเอทิลีนเพนตามีน (TEPA) เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยาในระบบรีดอกซ์ จากเทคนิค FTIR บอกว่ามีกราฟท์โคพอลิเมอร์เกิดขึ้น อุณหภูมิการสลายตัวของกราฟท์โคพอลิเมอร์ที่ได้สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ สำหรับระบบ PPS พบว่าเมื่อปริมาณพอลิสไตรีนเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพของการกราฟท์จะเพิ่มขึ้นและเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ประมาณ 70% และในระบบของ *t*-BHP และ TEPA มีประสิทธิภาพของการกราฟท์สูงสุดประมาณ 85% และพบว่า %GP จะลดต่ำลงถ้าสไตรีนเพิ่มขึ้น การศึกษาผลของปริมาณสารริเริ่มปฏิกิริยาพบว่า %GP มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อปริมาณสารริเริ่มปฏิกิริยามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับการเพิ่มขึ้นสไตรีน และยังพบว่าระบบ *t*-BHP และ TEPA ให้ค่า %GP สูงสุดประมาณ 70% ต่ำกว่า ระบบ PPS ที่ให้ค่าสูงสุดประมาณ 60%

Kangwansupamonkon และคณะ (2004) ศึกษากราฟท์โคพอลิเมอร์ระหว่าง น้ำยางพอลิไอโซพรีน (polyisoprene latex) และไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาอะครีเลต (dimethylaminoethylmethacrylate, DMAEMA) (NR-g-PDMAEMA) ในระบบรีดอกซ์ที่มีควินไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (CHP) และเตตระเอทิลีนเพนตามีน (TEPA) เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา พบว่าเกิดเป็น hairy layer ของสายโซ่กราฟท์โคพอลิเมอร์ที่ผิวหน้าของ PDMAEMA น้ำยางที่มีการดัดแปรแล้วมีความเสถียรของคอลลอยด์เพิ่มขึ้นเมื่อค่า pH ลดลง และจากเทคนิคการกระเจิงแสง (dynamic light scattering) พบว่าขนาดอนุภาคของกราฟท์โคพอลิเมอร์ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า pH

Paveena (2005) ศึกษากราฟท์โคพอลิเมอร์ระหว่าง 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาอะครีเลต (2-hydroxyethyl methacrylate, 2-HEMA) และน้ำยางธรรมชาติ (NR-g-P(2-HEMA)) ใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (PPS) เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา ด้วยเทคนิคอิมัลชันพอลิเมอร์ไรเซชัน เพื่อศึกษาปริมาณของโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต และ 2-HEMA ต่อระดับการเกิดกราฟท์โคพอลิเมอร์ จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนโมลระหว่าง 2-HEMA ต่อน้ำยางธรรมชาติที่ทำให้กราฟท์โคพอลิเมอร์มีระดับการกราฟท์สูงสุด คือ 95:5 และปริมาณของสารริเริ่มปฏิกิริยาเป็น 0.05 mol% สมบัติทางความร้อนของกราฟท์โคพอลิเมอร์ที่ได้ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ P(2-HEMA) ที่ไม่ทำการกราฟท์ และการละลายของกราฟท์โคพอลิเมอร์ที่ได้แตกต่างจาก P(2-HEMA) และยางธรรมชาติ

Oliveira และคณะ (2005) ศึกษากราฟท์โคพอลิเมอร์ระหว่างไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาอะครีเลต (DMAEMA) และน้ำยางธรรมชาติ (NR-g-PDMAEMA) และระหว่างเมทิลเมทาอะครีเลต (MMA) และน้ำยางธรรมชาติ (NR-g-PMMA) ด้วยเทคนิคอิมัลชันพอลิเมอร์ไรเซชัน ที่มีสารริเริ่มปฏิกิริยาในระบบรีดอกซ์โดยเลือกใช้ควินไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (CHP) และเตตระเอทิลีนเพนตามีน (TEPA) โดยใช้อุณหภูมิ 2°C สำหรับ NR-g-PDMAEMA และ 50°C สำหรับ NR-g-PMMA ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของมอนอเมอร์ในการสังเคราะห์กราฟท์โคพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค ¹H-NMR จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค TEM พบว่าเมื่อมอนอเมอร์มีความเข้มข้นสูง จะทำให้กราฟท์โคพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดมีลักษณะฐานวิทยาศาสตร์แบบ core-shell ส่วนที่มอนอเมอร์มีความเข้มข้นต่ำลักษณะฐานวิทยาศาสตร์ของกราฟท์โคพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดไม่มีลักษณะดังกล่าวและไม่มีความแตกต่างกัน

Hinchiranan และคณะ (2007) ศึกษาการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของแผ่นอะคริลิกที่เตรียมด้วยเทคนิคบัลก์พอลิเมอร์ไรเซชัน (bulk polymerization) จากการผสมระหว่างเมทิลเมทาอะครีเลต (MMA) และสไตรีน (Sty) ใช้เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา ทำการปรับปรุงสมบัติของแผ่นอะคริลิกโดยการเติมกราฟท์โคพอลิเมอร์ระหว่าง MMA ร่วมกับ สไตรีน (Sty) และน้ำยางธรรมชาติ (NR-g-P(MMA-co-Sty)) ด้วยเทคนิคอิมัลชันพอลิเมอร์ไรเซชัน ใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา และเรียกกราฟท์โคพอลิเมอร์ดังกล่าวว่ากราฟท์โคพอลิเมอร์ของน้ำยางธรรมชาติ (graft natural rubber, GNR) พบว่าแผ่นอะคริลิกที่เติม GNR เท่ากับ 22.5 wt% มีความต้านทานต่อแรงกระแทก ความต้านทานต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาด เพิ่มขึ้น และเมื่อเติม GNR เพิ่มขึ้นทำให้แผ่นอะคริลิกเปลี่ยนจากแข็งเปราะ (brittle) ไปเป็นเหนียว (ductile)

2.7.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแป้งเทอร์โมพลาสติกที่มียางเป็นส่วนผสม

Arvaniyoyannis และคณะ (1997) เตรียมและศึกษาเกี่ยวกับพอลิเมอร์ผสมที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากการผสมกันระหว่างแป้งและน้ำยางกัตตาเปอร์ชา (1,4 -trans polyisoprene, gutta percha) เพื่อใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ทางด้านอาหารและการประยุกต์ใช้งานทางด้านการแพทย์ โดยทำการผสมแป้งมันฝรั่งและยางกัตตาเปอร์ชาด้วยการอัดรีด จากนั้นขึ้นรูปด้วยการอัดเบ้าที่ 110°C เป็นเวลา 15 min และความดัน 3.5 MPa เปรียบเทียบระหว่างการเติมและไม่เติมพลาสติกไซเซอร์ ศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์ (DMTA) และความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซและน้ำ พบว่าพลาสติกไซเซอร์ทำให้เปอร์เซ็นต์การยึดตัวเพิ่มขึ้น แต่ทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึง อุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน (glass transition temperature, T_g) และจุดหลอมเหลวลดลง (melting temperature, T_m) และการเติมพลาสติกไซเซอร์ในปริมาณน้อยทำให้สมบัติเชิงกลบางอย่างของพอลิเมอร์ผสมได้รับการปรับปรุง

Carvalho และคณะ (2003) ทำการเตรียมและทำการศึกษเกี่ยวกับพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งและน้ำยางธรรมชาติ ของแป้งข้าวโพดที่อยู่ในรูปของแป้งเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic starch, TPS) ที่มีการแปรปริมาณพลาสติกไซเซอร์ตั้งแต่ 20-50% และน้ำยางธรรมชาติตั้งแต่ 2.5-20 wt% เตรียมพอลิเมอร์ผสมที่อุณหภูมิ 150°C ด้วยเครื่องผสมแบบปิด พบว่าของผสมกลายเป็นเนื้อเดียวกันภายในเครื่องผสม อนุภาคของยางธรรมชาติในพอลิเมอร์ผสมมีขนาด 2-8 μm ค่ามอดูลัส และความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมต่ำกว่าค่าของ TPS ซึ่งยางธรรมชาติทำให้ความเปราะของแป้งลดลง การแยกเฟสของพอลิเมอร์ผสมขึ้นอยู่กับปริมาณของกลีเซอรอล แต่กลีเซอรอลในบางสัดส่วนยังช่วยปรับปรุงผิวหน้าระหว่างแป้งและยางธรรมชาติให้เรียบขึ้นด้วย และจาก SEM แสดงให้เห็นว่ายางธรรมชาติมีการกระจายตัวที่ดีและเป็นเฟสที่ต่อเนื่องในเนื้อแป้ง

Mondragón และคณะ (2009) ทำการเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างแป้งเทอร์โมพลาสติก น้ำยางธรรมชาติ และดินเหนียวชนิดมอนทอร์มิลอนท์ (montmorillonite) ทำการดัดแปรน้ำยางธรรมชาติ ด้วยการทำการกราฟท์โคพอลิเมอร์กับไดเมทิลอะซิโตนเอทิลเมทาอะครีเลต (DMAEMA) (NR-g-PDMAEMA) ใช้ควิมินไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (CHP) และเตตระเอทิลลิทเพนตามีน (TEPA) เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา จากนั้นเตรียมพอลิเมอร์ผสมของแป้งและดินเหนียวในเครื่องผสมแบบปิด เตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ และขึ้นรูปด้วยการฉีดเป็นชิ้นทดสอบเพื่อทดสอบสมบัติต่างๆ จาก SEM พบว่าผิวหน้าของพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งเทอร์โมพลาสติกและยางธรรมชาติที่ไม่ดัดแปรมีการยึดกันดี และค่ามอดูลัส และความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น และเมื่อทำการเติมดินเหนียวลงไป พบว่าดินเหนียวมีการกระจายตัวในพอลิเมอร์ผสมแบบอินเตอร์คาเลชันและเอกโฟลิเอชัน (intercalation and exfoliation) จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านบอกได้ว่า ดินเหนียวกระจายตัวแบบอินเตอร์คาเลชันในส่วนของยางธรรมชาติมากกว่าส่วนของแป้งเทอร์โมพลาสติก ส่วนน้ำยางดัดแปรไม่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่ได้ แต่ทำให้ดินเหนียวกระจายตัวแบบเอกโฟลิเอชันได้มากขึ้น

2.7.5 งานวิจัยเกี่ยวกับพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ที่ได้รับการจดสิทธิบัตร

Jane และคณะ (1992) ผลิตพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้จากแป้งและพอลิเอทิลีนดัดแปร การเติมพลาสติกลงในแป้งทำให้ความต้านทานต่อแรงดึงดีขึ้น กลายเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ประกอบด้วยแป้งชนิดต่างๆ 50% พอลิเอทิลีนบริสุทธิ์ และพอลิเอทิลีนที่ใช้แล้ว ผสมกันด้วยเครื่องอัดรีดที่อุณหภูมิ $110-200^{\circ}\text{C}$

Boehmer และคณะ (1993) ทำการศึกษาผลของโพรเมกที่มีมีการเติมกราฟท์โคพอลิเมอร์ของเมทิลอะครีเลต (methyl acrylate, MA) และแป้ง (St-g-PMA) ลงไปเพิ่มเป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้

Tokiwa และคณะ (1993) ศึกษาเกี่ยวกับพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และวิธีการขึ้นรูปจากแป้งชนิดต่างๆ ผสมกับอะซิติกพอลิเมอร์ และสารเคมีอื่นๆ ด้วยกระบวนการอัดรีดเพื่อใช้ในงานด้านบรรจุภัณฑ์

Mayer (1994) ศึกษาเกี่ยวกับพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งส่วนผสมของพลาสติกย่อยสลายได้ประกอบด้วย เซลลูโลส แป้งดิบและแป้งดัดแปร พลาสติกไซเซออร์ชนิดต่างๆ และสารตัวเติมทางการเกษตร ผสมส่วนผสมดังกล่าวในเครื่องอัดรีด จากนั้นนำไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความต้านทานต่อความชื้น ความแข็งแรง และสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ สามารถนำไปใช้งานทางด้านบรรจุภัณฑ์ได้

Akamaku และ Tomori (1994) ศึกษาการผลิตผลิตภัณฑ์โฟมผสมเรซิน เพื่อผลิตเป็นโฟมย่อยสลายได้ โดยทำการผสมแป้ง PVOH สารตัวเติมอินทรีย์และอนินทรีย์ และสารเพิ่มความหนืด ขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีดและฉีดในแม่แบบ ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 130-200°C โฟมที่ได้จะมีความหนาแน่นน้อยและเป็นเซลล์ปิด เพื่อนำไปใช้เป็นวัสดุกันกระแทกทางอุตสาหกรรม

Kakinoki และ Sato (1998) ศึกษาและผลิตโฟมที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และนำไปใช้ในงานกันกระแทกที่ไม่เป็นมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม ขึ้นรูปด้วยการอัดรีด มีส่วนผสมคือ แป้ง น้ำ และน้ำยางธรรมชาติ

Fisk (1998) ทำการเตรียมผลิตภัณฑ์โฟมที่ย่อยสลายได้จากแป้งที่กราฟท์โคพอลิเมอร์ ที่มีเปอร์เซ็นต์การกราฟท์เท่ากับ 5-60%

Biby และคณะ (2001) ศึกษาวิธีการขึ้นรูปของโฟมย่อยสลายได้ที่มีความต้านทานต่อความชื้น โดยการผสมแป้งและสารเคมีต่างๆ ขึ้นรูปด้วยการอัดรีด พบว่าโฟมที่ได้มีความต้านทานต่อความชื้นและสามารถนำไปทำเป็นบรรจุภัณฑ์ได้ และยังได้ทำการอัดรีดเป็นแผ่นชีท (sheet) และเทอร์โมฟอร์ม (thermoform)

Minoru (2003) ประดิษฐ์โฟมกันการกระแทกที่ประกอบไปด้วยแป้งชนิดต่างๆ เทอร์โมพลาสติก เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ และสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ผสมและขึ้นรูปด้วยการอัดรีดที่อุณหภูมิและความดันสูง

Bastioli และคณะ (2003) ศึกษาเทอร์โมพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีส่วนผสมต่างๆ เช่น เซลลูโลสเฮสเทอร์ หรือเซลลูโลสอะซิเตต พลาสติกไซเซออร์ และสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิดกราฟท์โคพอลิเมอร์ขึ้นรูปด้วยการอัดรีด

Franke และคณะ (2004) ศึกษาบรรจุภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายได้ ด้วยกระบวนการอัดรีด และขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ด้วยการอัดเข้าแบบมีการดึงยืด (stretching) ซึ่งการอัดเข้าด้วยวิธีการดังกล่าวทำให้ผลิตภัณฑ์โฟมที่ได้มีความยืดหยุ่น ความคงตัว ความอ่อนตัว การกระแตงตัว ความต้านทานต่อการสึกกร่อนและสมบัติอื่นๆ ที่จำเป็นต่อบรรจุภัณฑ์มีความน่าสนใจมากขึ้น

Ho (2006) ศึกษาการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ที่ประกอบด้วย แป้ง พอลิเมอร์ที่มีหมู่คาร์บอกซิลิก พอลิเอเลฟิน น้ำ น้ำมัน สารตัวเติม และส่วนผสมอื่นๆ เพื่อนำไปใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้

Poovarodom และคณะ (2006) ทำการศึกษาเกี่ยวกับการผลิตบรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้จากแป้งชนิดต่างๆ โดยนำเอาแป้งดิบ แป้งดัดแปร พลาสติกไซเซออร์ สารเสริมแรง ตัวเชื่อมประสาน แอลคาไลน์หรือเกลือ และน้ำ ผสมกันแล้วนำไปขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดเข้าหรือฉีด ที่อุณหภูมิ 150-300°C ได้เป็นโฟมที่สามารถนำไปใช้งานทางด้านบรรจุภัณฑ์

Hideko (2008) ศึกษาพลาสติกย่อยสลายได้และมีสมบัติเชิงกลสูง เตรียมจากแป้ง อีลาสโตเมอร์ และเทอร์โมพลาสติก ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดรีด สามารถใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ที่มีความแข็งแรงสูงได้