

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

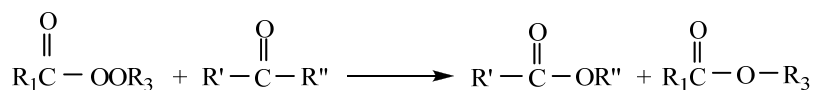
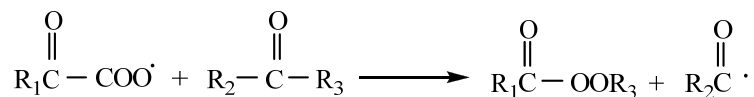
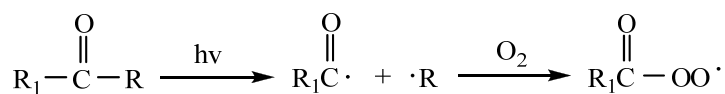
2.1 พลาสติกย่อยสลายได้

2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพลาสติกย่อยสลาย [1]

พลาสติกย่อยสลายได้ (Degradable plastics) คือ พลาสติกที่ถูกออกแบบมาเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดไว้เฉพาะ โดยก่อให้เกิดการสูญเสียสมบัติบางประการที่สามารถวัดได้โดยใช้วิธีการทดสอบมาตรฐานที่เหมาะสมสำหรับพลาสติกและการใช้งานในช่วงเวลาหนึ่ง ผลการทดสอบสามารถนำมาใช้ในการระบุชนิดและประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ และโดยทั่วไปสามารถแบ่งกลไกการย่อยสลายของพลาสติกเป็น 5 ประเภทคือ

1.การย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradation)

การย่อยสลายโดยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความไวต่อแสงลงใน พลาสติก หรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชัน หรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง แตกหักง่ายภายใต้รังสียูวี (UV) เช่น หมู่คีโตน (Ketone group) อยู่ในโครงสร้าง เมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับรังสียูวีจะเกิดการแตกของพันธะ กลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งไม่เสถียร จึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ แต่การย่อยสลายนี้จะไม่เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบขยะ กองคอมโพสท์ หรือสภาวะแวดล้อมอื่นที่มีมืด หรือแม้กระทั่งชั้นพลาสติกที่มีการพิมพ์ด้วยหมึกที่หนาบบนพื้นผิว เนื่องจากพลาสติกจะไม่ได้สัมผัสกับรังสียูวีโดยตรง



รูปที่ 2.1 การแตกตัวของสารเติมแต่งประเภทคีโตนที่ช่วยทำให้พลาสติกเกิดการย่อยสลายโดยแสง[1]

2. การย่อยสลายทางกล (Mechanical Degradation)

การย่อยสลายทางกลโดยการให้แรงกระทำแก่ชิ้นพลาสติกทำให้ชิ้นส่วนพลาสติกแตกออกเป็นชิ้น ซึ่งเป็นวิธีการใช้โดยทั่วไป ในการทำให้พลาสติกแตกเป็นชิ้นเล็กๆ เช่น กระบวนการบดพลาสติกในกระบวนการรีไซเคิล

3. การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative Degradation)

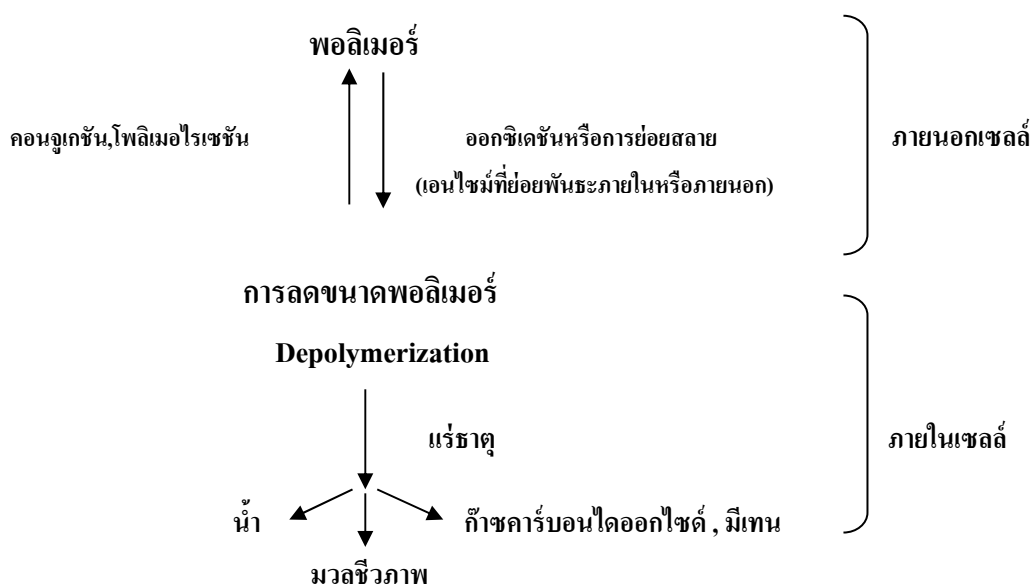
การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติก เป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจน ความร้อน หรือแสงยูวี และแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (Stabilizing Additive) แสงและความร้อนจะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ ($RO\cdot$ และ $OH\cdot$) ที่ไม่เสถียรและเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกหัก และสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว แต่ด้วยเทคโนโลยีการผลิตที่ได้รับการวิจัยและพัฒนาขึ้น ในปัจจุบันทำให้พอลิโอเลฟินเกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนได้เร็วขึ้นภายในช่วงเวลาที่กำหนด โดยการเติมสารเติมแต่งที่เป็นเกลือของโลหะทรานสิชัน ซึ่งทำหน้าที่กระตุ้นเร่งการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) เป็นอนุมูลอิสระ (Free Radical) ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกหัก และสูญเสียสมบัติเชิงกลรวดเร็วยิ่งขึ้น

4. การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytic Degradation)

การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิเอโนไธราด พอลิคาร์บอเนต และพอลิยูรีเทน ผ่านปฏิกิริยาก่อให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้คะตะลิสต์ (Catalytic Hydrolysis) และไม่ใช้คะตะลิสต์ (Non-Catalytic Hydrolysis) ซึ่งประเภทแรกยังแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ แบบที่ใช้คะตะลิสต์จากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (External Catalytic Degradation) และแบบที่ใช้คะตะลิสต์จากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์เองในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (Internal Catalytic Degradation) โดยคะตะลิสต์จากภายนอกมี 2 ชนิด คือ คะตะลิสต์ที่เป็นเอนไซม์ต่างๆ (Enzyme) เช่น Depolymerase Lipase Esterase และ Glycohydrolase ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ และคะตะลิสต์ที่ไม่ใช่เอนไซม์ (Non-Enzyme) เช่น โลหะแอลคาไลน์ (Alkaline Metal) เบส (Base) และ กรด (Acid) ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติ ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบที่ใช้คะตะลิสต์จากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์ นั้นใช้หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl Group) ของหมู่เอสเทอร์หรือเอไมด์บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

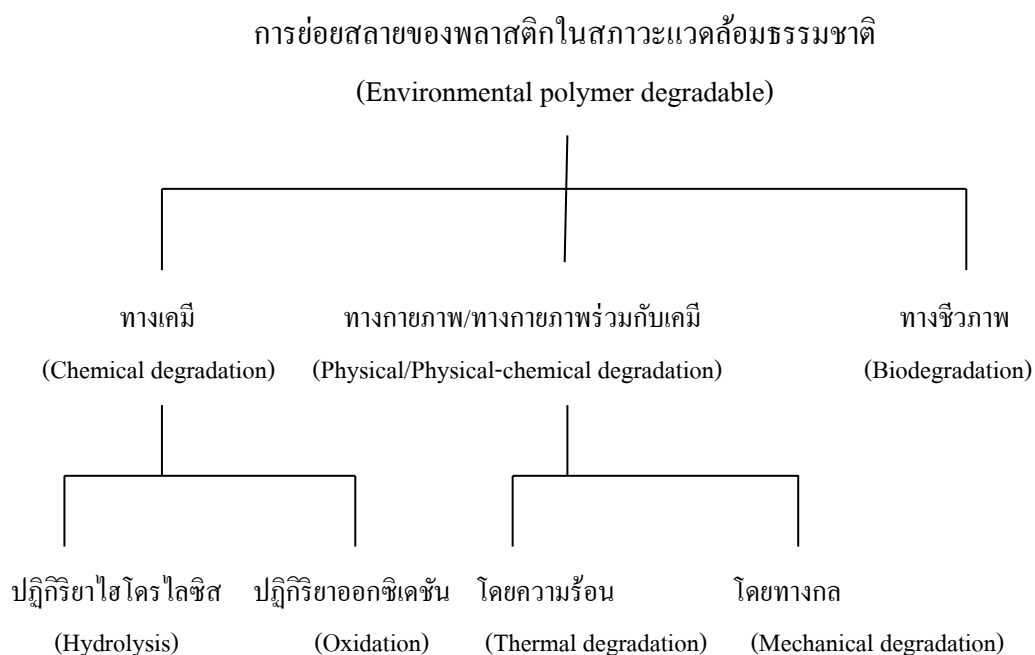
5. การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation)

การย่อยสลายของพอลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์ โดยทั่วไปมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน เนื่องจากขนาดของสายพอลิเมอร์ยังมีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำ ในขั้นตอนแรกของการย่อยสลายนั้นจึงเกิดขึ้นภายนอกเซลล์ โดยการปลดปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ซึ่งเกิดได้ทั้งแบบใช้ Endo-Enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบและแบบ Exo-Enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะที่ละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอจะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์ และเกิดการย่อยสลายต่อในขั้นตอนที่ 2 ได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย(Ultimate Biodegradation)คือ พลังงานและสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ (Mineralization) เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซมีเทน (CH_4) น้ำ (H_2O) เกลือ แร่ธาตุต่างๆ และมวลชีวภาพ



รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงขั้นตอนต่างๆในการย่อยสลายทางชีวภาพ [1]

นอกจากนี้ยังพบว่า มีการใช้คำว่าพลาสติกย่อยสลายได้ในสภาวะแวดล้อมธรรมชาติ (Environmentally Degradable Plastic, EDP) ซึ่งหมายถึง พลาสติกที่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเนื่องจากปัจจัยต่างๆ ในสภาวะแวดล้อม เช่น กรด ด่าง น้ำและออกซิเจนในธรรมชาติ แสงอาทิตย์ แรงเค้นจากการกระทบของเม็ดฝน และแรงลม หรือจากเอนไซม์ของจุลินทรีย์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี กลายเป็นสารที่ถูกดูดซึมและย่อยสลายต่อได้อย่างสมบูรณ์ โดยจุลินทรีย์ ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ สารอนินทรีย์ และมวลชีวภาพเป็นผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย



รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงการย่อยสลายของพลาสติกในสภาวะแวดล้อมตามธรรมชาติ [1]

2.1.2 พลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยแสง [4]

พลาสติกย่อยสลายได้โดยแสงเป็นพลาสติกที่จะเกิดการแตกหักของสายโซ่หลักเมื่อได้รับพลังงานแสงหรือรังสีอัลตราไวโอเลต พลาสติกประเภทนี้ได้จากการสังเคราะห์โดยการเพิ่มหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) ที่มีความว่องไวต่อแสงในสายโซ่พอลิเมอร์ เช่น หมู่คาร์บอนิลในรูปไวนิลคีโตน (Vinyl ketone) หรือคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide) เป็นต้น เข้าไปในโมเลกุล ดังนั้นเมื่อได้รับแสงแดด โมเลกุลของพลาสติกจะดูดกลืนพลังงานทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Photo-oxidation) ส่งผลให้สมบัติกายภาพและสมบัติเชิงกลลดลง นอกจากนี้ยังเป็นการช่วยให้จุลินทรีย์ย่อยสลายพอลิเมอร์ได้ง่ายขึ้นด้วย เพราะปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ลดลงและมีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิลเกิดขึ้น

ปัจจุบันวิธีที่ช่วยให้พอลิเมอร์เสื่อมสภาพด้วยแสงมี 3 วิธี

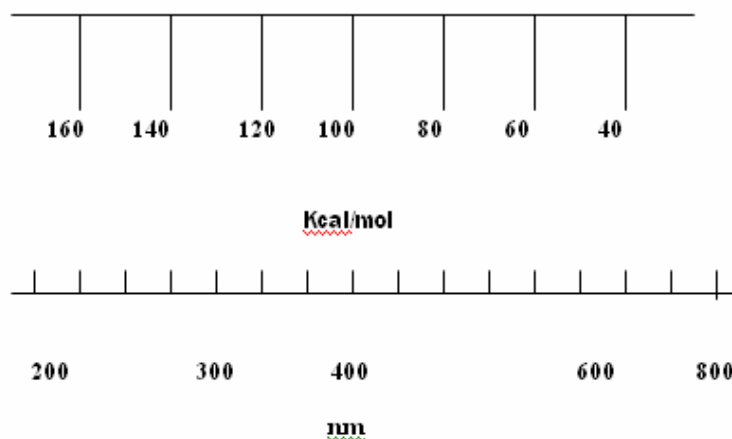
1. เตรียมฟิล์มจาก Poly-1-butene หรือมี Polyisobutylene oxide และ Polybutadiene เป็นองค์ประกอบพื้นฐาน
2. การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของพอลิเมอร์ให้มีหมู่ดูดกลืนแสงโดยเพิ่มหมู่คาร์บอนิลเข้าไปในโครงสร้าง แต่เป็นวิธีที่มีต้นทุนสูง เมื่อหมู่คาร์บอนิลดูดกลืนแสงแล้วทำให้เกิด ปฏิกิริยา Norrish type I สลายให้อนุมูลอิสระ และ Norrish type II จะเกิดการจัดโมเลกุลใหม่ส่งผลให้สายโซ่หลักของพอลิเมอร์ขาด

3. การเติมสารไวแสง (Photo-initiator หรือ UV absorber) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำช่วยเร่งการย่อยสลายโดยแสงลงในพอลิเมอร์ ตัวอย่างสารเหล่านี้ได้แก่ สารประกอบโลหะทรานซิชัน (Transition metal) สารประกอบไฮโดรคาร์บอน เอมีน ฟีนอล และเมดิสี เป็นต้น ปัจจุบันมีการพัฒนาสารไวแสงจาก Dialkyldithiocarbamates ซึ่งเมื่อเติมลงไปพลาสติกจะทำให้พลาสติกมีอายุการใช้งานระยะเวลานานขึ้นก่อนที่จะสลายตัว พลาสติกระบบนี้มีประโยชน์มากโดยเฉพาะใช้ทำฟิล์มทางการเกษตร เช่น เบนโซฟีโนน (Benzophenone) ไทโอแซนโทน (Thioxamton) ไอรอนไดอัลคิลไดไทโอคาร์บาเมต (Iron (III) dialkyldithio carbamate) เป็นต้น

2.1.2.1 เสถียรภาพทางแสงอัลตราไวโอเลตของพอลิเมอร์ (Ultraviolet Stabilization) [4]

โดยทั่วไปสารประกอบอินทรีย์จะมีพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) ที่มีความเสถียร โดยเฉพาะสิ่งมีชีวิตและพอลิเมอร์ ซึ่งการสังเคราะห์สารอินทรีย์ในห้องปฏิบัติการสามารถทำได้จากการเกิดปฏิกิริยาของพันธะโควาเลนต์ของสารอินทรีย์ที่นำมาสังเคราะห์ โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมมีความจำเป็นที่จะศึกษาการเกิดปฏิกิริยาของพันธะโควาเลนต์ เพื่อใช้ปรับปรุงโครงสร้างของพอลิเมอร์ นอกจากนี้ปฏิกิริยาของพันธะโควาเลนต์บางประเภทยังมีผลทำให้พอลิเมอร์เกิดการสลายตัวในระหว่างกระบวนการสังเคราะห์และการนำไปใช้เป็นเวลานานอีกด้วย

สำหรับพันธะโควาเลนต์ที่ได้รับพลังงานจันอิเล็กตรอนหลุดจากสถานะเสถียรไปอยู่ใน สถานะที่ว่องไวต่อปฏิกิริยามีผลทำให้พันธะโควาเลนต์มีระดับพลังงานสูงขึ้น ในสภาวะแวดล้อม โดยทั่วไปพลังงานกระตุ้นได้จากการแผ่รังสีอัลตราไวโอเลตของดวงอาทิตย์ ดังรูปที่ 2.4 ตารางที่ 2.1 และตารางที่ 2.2 ตามลำดับ เมื่อรังสีอัลตราไวโอเลตของดวงอาทิตย์แพร่เข้ามายังบรรยากาศโลก จะถูกกรองผ่านโดยชั้นบรรยากาศโอโซนซึ่งจำกัดความยาวคลื่นแสงที่สั้นกว่า 290 นาโนเมตร (nm) ด้วยเหตุนี้การแผ่รังสีอัลตราไวโอเลตจาก 290 ถึง 400 นาโนเมตร จึงเกิดขึ้นได้แค่ประมาณร้อยละ 5 ของการแผ่รังสีทั้งหมดมายังโลก ดังนั้นความยาวคลื่นแสงที่มากกว่า 400 นาโนเมตร จะเป็นแสงที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่าและความร้อนอินฟราเรด โดยการเสถียรภาพของพลาสติกในสภาพบรรยากาศภายนอกเริ่มต้นพลังงานอัลตราไวโอเลตของดวงอาทิตย์ รวมถึงออกซิเจนที่อยู่ในบรรยากาศและในบางครั้งรวมถึงความชื้นในบรรยากาศและฝุ่นที่เกิดจากลมพัด เป็นต้น



รูปที่ 2.4 ความยาวคลื่นของแสงกับระดับพลังงาน [5]

ตารางที่ 2.1 พลังงานที่เกิดจากการแผ่รังสีที่มีความยาวคลื่นต่างกันและพลังงานพันธะที่พบในพอลิเมอร์[6]

พอลิเมอร์	ช่วงการดูดกลืนคลื่นแสงสูงสุด (nm)	ความยาวคลื่นที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด (nm)
พอลิเอทิลีน (Polyethylene)	<150	300
พอลิพรอพิลีน (Polypropylene)	<200	310
พอลิไวนิลคลอไรด์ (Poly vinyl chloride)	<210	310
พอลิเมทิลเมทาคริเลต (Poly (methyl methacrylate))	<240	290-315
พอลิไวนิลอะซิเตต (Polyvinyl acetate)	<250	<280
พอลิสไตรีน (Polystyrene)	<260	318
พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate)	260	295
พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate)	~290	290-320

ตารางที่ 2.2 ช่วงการดูดกลืนคลื่นแสงสูงสุดของพอลิเมอร์และความยาวคลื่นแสงที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดสำหรับการเสียคุณภาพทางแสงของพอลิเมอร์ [6]

ความยาวคลื่น (nm)	พลังงานที่เกิดจากการแผ่รังสี		ชนิดของพันธะ	พลังงานพันธะ (kJmole ⁻¹)
	kcal	kJ		
290	100	419	C-H	380-420
300	95	398	C-C	340-350
320	90	375	C-O	320-380
350	81	339	C-Cl	300-340
400	71	297	C-N	320-330

การเสียคุณภาพของพลาสติกด้วยแสงอัลตราไวโอเลตเริ่มต้นเมื่อพลาสติกดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเลตจากดวงอาทิตย์ซึ่งในทางทฤษฎีถือว่าเป็นสิ่งสำคัญมาก ตัวอย่างเช่น ไฮโดรคาร์บอนประเภทอะลิฟาติกบริสุทธิ์ดูดกลืนแสงได้ที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 220 นาโนเมตร พอลิเมอร์ไฮโดรคาร์บอนดูดกลืนแสงได้ต่ำกว่า 200 นาโนเมตร เป็นต้น แต่ตามความเป็นจริง พอลิเมอร์บริสุทธิ์ทั้งหมดดูดกลืนแสงได้ต่ำกว่า 300 นาโนเมตรเท่านั้นซึ่งจะไม่อยู่ในช่วงแสงอัลตราไวโอเลตที่มาถึงยังโลก ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องตั้งสมมติฐานว่าเกิดการเบี่ยงเบนของโครงสร้างของพอลิเมอร์เองหรือมีสิ่งเจือปนอยู่ในโครงสร้างของพอลิเมอร์และสิ่งเหล่านี้จะดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเลตในตอนเริ่มแรกและเริ่มเกิดปฏิกิริยาการเสียสภาพ

โครงสร้างแบบวงแหวนอะโรมาติกอาจจะดูดกลืนพลังงานคลื่นแสงได้สูงถึง 350 นาโนเมตร และจะดูดกลืนพลังงานคลื่นแสงได้สูงขึ้นเมื่อสร้างพันธะแบบคอนจูเกตกับหมู่ไม่อิ่มตัวอื่นๆ

ในทางทฤษฎีพบว่าการดูดกลืนคลื่นแสงอัลตราไวโอเลตในระยะเริ่มแรกของพอลิเมอร์นั้นส่วนใหญ่คล้ายกับการดูดกลืนคลื่นแสงอัลตราไวโอเลตของหมู่ไฮดรอกซิลที่เกิดจากการออกซิเดชันซึ่งจะดูดกลืนแสงได้ประมาณ 320 นาโนเมตร และหมู่ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ที่เกิดจากการออกซิเดชันจะดูดกลืนแสงมากกว่า 300 นาโนเมตร โดยจะอธิบายได้ว่าการเสียสภาพขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างในโมเลกุลของพอลิเมอร์ นอกจากนี้ยังพบว่าการดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเลตยังขึ้นอยู่กับสารเติมแต่งและสิ่งเจือปนอื่นๆซึ่งอาจเกิดสารเชิงซ้อนระหว่างพอลิเมอร์และออกซิเจนได้ ดังนั้นจึงสามารถอธิบายการดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเลตในตอนเริ่มต้นได้อีกทางหนึ่ง

เมื่อระบบของพอลิเมอร์ดูดกลืนพลังงานแสงอัลตราไวโอเลตจะทำให้อิเล็กตรอนขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงานและออร์บิทัลที่สูงขึ้นทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ ด้วยเหตุนี้อิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับพลังงานสถานะพื้น (Ground state) จะถูกกระตุ้นไปอยู่ในออร์บิทัลที่มีระดับพลังงานสูงกว่า จึงมีผลทำให้ระดับพลังงานเกิดการสั่นสะเทือนสูงขึ้น และในขณะที่อิเล็กตรอนเกิดการหมุน (Spin electron) จะมีลักษณะเป็นคู่ในสถานะเดี่ยว (Single state) และอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นสามารถเปลี่ยนการหมุนได้ทำให้เกิดระบบการแลกเปลี่ยนข้าม (Inter-system crossing) ไปอยู่ในสถานะสาม (Triplet state) สถานะที่มีพลังงานสูงเหล่านี้ไม่เสถียรอิเล็กตรอนจึงเคลื่อนที่จากระดับพลังงานสูงกลับมายังสถานะพื้นที่มีระดับพลังงานต่ำได้ด้วยเส้นทางการเคลื่อนที่ต่างๆกัน โดยเรียกกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้ว่า กระบวนการกายภาพทางแสง (Photophysical process) และถ้ากระบวนการที่เกิดไม่มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีอย่างถาวรจนเกิดการเสียคุณภาพของพอลิเมอร์จะเรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการเคมีทางแสง (Photochemical process) [6]

2.1.2.2 กระบวนการกายภาพทางแสง [6]

อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นอาจจะกลับมายังสถานะพื้นได้ 3 แบบ ได้แก่ การถ่ายโอนพลังงาน (Energy transfer) การแผ่รังสี (Radiation) และความร้อน (Heat)

การถ่ายโอนพลังงาน

พลังงานของการกระตุ้นอาจถูกถ่ายโอนไปยังอีกที่หนึ่ง (ก.) ภายใน โมเลกุล (Intramolecular) หรือ (ข.) ระหว่างโมเลกุล (Inter-molecular) ที่อยู่ในพื้นที่เดียวกัน

(ก.) ภายในโมเลกุล

พลังงานแสงอัลตราไวโอเลตอาจถูกดูดกลืนโดยหมู่โครโมฟอร์ (Chromophoric group) ที่อยู่ในโมเลกุลของพอลิเมอร์ และเคลื่อนย้ายไปตามโมเลกุลไปยังจุดอื่นๆที่ไม่สามารถดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเลตได้โดยตรง

(ข.) ระหว่างโมเลกุล

โดยปกติโมเลกุลโครโมฟอร์ที่ดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเลตในระยะเริ่มต้น และถูกกระตุ้นโดยทันที จะเกิดการถ่ายโอนพลังงานอย่างรวดเร็วไปยังอีกโมเลกุลหนึ่ง เมื่อได้รับปฏิกิริยาสูงสุด (Ultimate reaction) ในบางกรณีสิ่งเจือปนหรือสารปรับแต่งที่ดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเลต เริ่มแรก จะเกิดการถ่ายโอนพลังงานไปยังพอลิเมอร์ซึ่งไม่สามารถดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเลตได้เองแต่สามารถกระตุ้นได้ทางอ้อม ดังสมการ 2.1 และ 2.2



สิ่งเจือปนหรือสารเติมแต่งจะเร่งการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์โดยแสงอัลตราไวโอเลต เช่น เมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในบรรยากาศอย่างเฉื่อย หรือการเกิดเป็นสารเชิงซ้อนกับพอลิเมอร์ เป็นต้น

พอลิเมอร์ที่ดูดกลืนคลื่นแสงอัลตราไวโอเลตมากจนเกินไปจะทำให้เกิดความไม่เสถียรที่จะใช้กับงานภายนอกได้ จึงอาจทำให้เกิดความเสถียรได้โดยการเติมสารระงับพลังงาน (Quencher) ลงไปเพื่อถ่ายโอนพลังงานที่มากเกินไปดังสมการ 2.3 และ 2.4 เทคนิคนี้มีประโยชน์ทำให้พอลิโอฟิลินสามารถนำไปใช้ในงานภายนอกได้โดยมีสารเสถียรภาพช่วยระงับพลังงานจากแสงอัลตราไวโอเลต

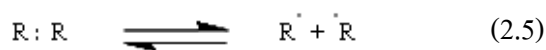


โดยทั่วไปกระบวนการกายภาพทางแสงจะสิ้นสุดลงเมื่อปล่อยพลังงานในสถานะกระตุ้นที่มีความยาวคลื่นสูงกลับไปยังระดับพลังงานที่มีความยาวคลื่นต่ำโดยระดับพลังงานในสถานะเดียวที่ถูกกระตุ้น (S_1) จะปล่อยพลังงานออกมาอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาเพียง 10^{-9} ถึง 10^{-6} วินาที เรียกว่าช่วงคลื่นแสงฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence) ส่วนในสถานะสามที่ถูกกระตุ้น (T_1) อาจจะปล่อยพลังงานกลับมาช้ากว่าซึ่งอยู่ในช่วงเวลา 10^{-3} ถึง 20 วินาที ซึ่งเรียกว่าการสั่นแบบรามาน (Raman vibrations) ของอเล็กตรอน อะตอม หรือโมเลกุล พลังงานที่ปล่อยออกมาจากสถานะกระตุ้นจะกระจายผ่านชั้นของระดับพลังงานซึ่งทำให้เกิดการสั่นสะเทือนจนกลายเป็นความร้อน ในบางกรณีพลังงานกระตุ้นที่ปล่อยออกมามีผลทำให้เกิดการจัดเรียงทางโครงสร้างของโมเลกุลใหม่เป็นแบบ

ทาวโทเมอร์ริก(Tautomeric) ที่สามารถผันกลับเป็นโครงสร้างรูปแบบเดิมก่อนการถูกระตุ้นได้ชั่วคราว แล้วจะกลายเป็นความร้อนเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา ซึ่งการปล่อยพลังงานที่ถูกกระตุ้นในรูปของพลังงานสั้นสะท้อนและความร้อน ในบางครั้งอาจมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาสถานะพื้นร้อน (Hot ground – State reaction) ซึ่งจัดเป็นการเสีย สภาพโดยความร้อนแบบธรรมดาที่เกิดจากการเหนี่ยวนำเริ่มต้นด้วยการดูดกลืนแสงอัลตราไวโอ เลต ปฏิกิริยาแบบนี้ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระบวนการทางกายภาพของแสง และกระบวนการทางเคมีของแสงได้อย่างชัดเจน

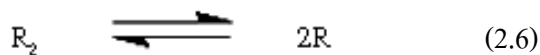
2.1.2.3 กระบวนการทางเคมีของแสง [5]

กระบวนการเคมีทางแสงเกิดขึ้นเมื่อสารอินทรีย์ได้รับพลังงานกระตุ้นจากแสงอัลตราไวโอเลต ทำให้สารอินทรีย์มีระดับพลังงานสูงขึ้น ซึ่งพลังงานกระตุ้นที่ได้รับมีไม่เพียงพอที่ทำให้เกิดการคายพลังงานเพื่อกลับมาสู่สถานะพื้นได้ จึงทำให้สารอินทรีย์มีพลังงานส่วนเกินที่ส่งผลให้เกิดการแตกแยกของพันธะโคเวเลนต์ นำไปสู่กระบวนการเคมีทางแสงมีผลทำให้สารเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีอย่างถาวรจึงทำให้สารอินทรีย์เกิดการเสียคุณภาพ โดยทั่วไปพันธะโคเวเลนต์ในโมเลกุลของพอลิเมอร์เป็นพันธะที่แข็งแรงที่สามารถต้านพลังงานกระตุ้นที่เกิดจากพลังงานแสงอัลตราไวโอเลตได้ แต่เมื่อพันธะโคเวเลนต์ได้รับพลังงานกระตุ้นจะทำให้ความแข็งแรงของพันธะโคเวเลนต์มีค่าน้อยลงซึ่งมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีกับอะตอมข้างเคียงที่ติดกับพันธะโคเวเลนต์ได้ ตัวอย่างเช่น พันธะ C-H ที่ถูกกระตุ้นที่ตำแหน่งที่สามในสายโซ่พอลิเมอร์จะมีพลังงานน้อยกว่าถ้าเทียบกับการกระตุ้นจากตำแหน่งอัลฟาของกลุ่มไม่อิ่มตัวในสายโซ่พอลิเมอร์แทน เช่น พันธะ C=C และ C=O เป็นต้น ด้วยเหตุนี้พลังงานคลื่นแสงอัลตราไวโอเลตที่ถูกดูดกลืนโดยระบบพอลิเมอร์อาจจะเพียงพอที่จะทำให้พันธะโคเวเลนต์ใน โมเลกุลของพอลิเมอร์แตกออกจนเกิดปฏิกิริยาโฟโตลิซิสเริ่มต้นที่เกิดขึ้นดังสมการ 2.5 โดยจะส่งผลต่อกระบวนการทางเคมีของแสงที่จะนำไปสู่การเสียสภาพในที่สุด ซึ่งกระบวนการทางเคมีของแสงมีผลทำให้โมเลกุลเกิดการเปลี่ยนแปลงได้หลายแบบ ได้แก่ การแตกแยก (Cleavage) การกำจัดโมเลกุลเล็กๆ (Elimination of Small molecule) ความไม่อิ่ม ตัว(Unsaturation) การจัดเรียงตัวและการเกิดเป็นวง (Rearrangement and Cyclization) การเชื่อมโยงโครงร่างตาข่าย (Cross-linking) การออกซิเดชัน (Oxidation) และโฟโตไฮโดรไลซิส(Photohydro- lysis) เป็นต้น



การแตกแยก (Cleavage)

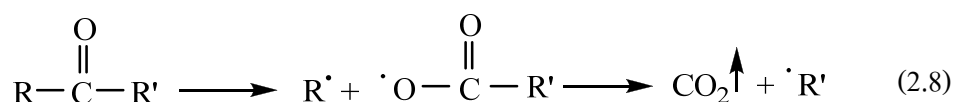
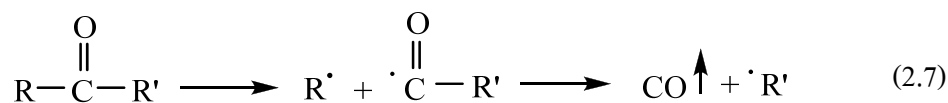
การเกิดปฏิกิริยาโฟโตลิซิสเริ่มจากพันธะโคเวเลนต์ได้รับพลังงานกระตุ้นจากคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ตทำให้เกิดการแตกแยกของโมเลกุลชนิดเดียวกัน (Homolytic cleavage) โดยเริ่มจากโมเลกุลพอลิเมอร์ขนาดใหญ่เปลี่ยนไปเป็นโมเลกุลพอลิเมอร์ขนาดเล็กกว่า 2 โมเลกุลดังสมการ 2.6



การเกิดโมเลกุลชนิดเดียวกัน (Homolytic) ทำให้เกิดผลแบบแยกออกจากกัน (Cage effect) คืออนุภาคทั้งสองจะต้องมีการเคลื่อนที่มากพอที่จะทำให้เกิดการแยกออกจากกันและกันอย่างถาวร ไม่เกิดการรวมตัวกันใหม่ด้วยเหตุนี้อุณหภูมิและการแพร่จึงเป็นปัจจัยที่สำคัญเพื่อให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปซึ่งปฏิกิริยาสองชนิดที่มีความสำคัญ ได้แก่ นอร์ริชแบบที่ 1 และแบบที่ 2 (Norrish type I + II)

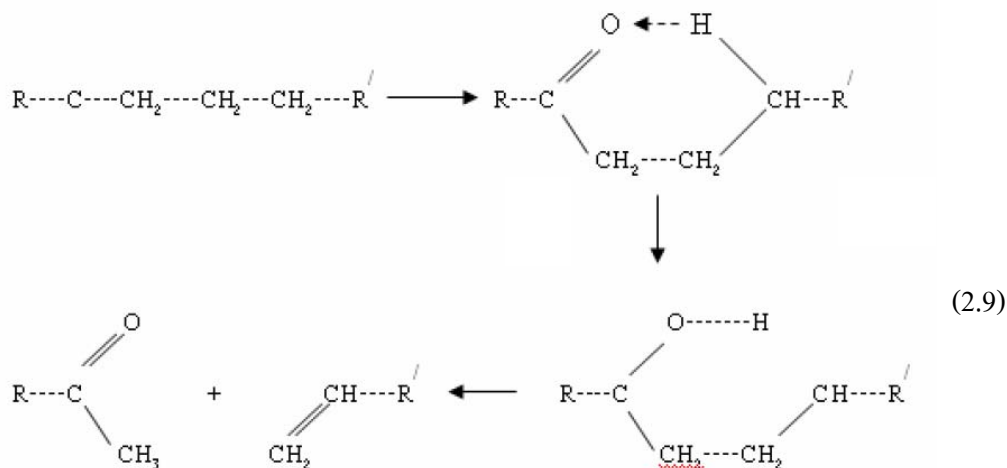
-นอร์ริชแบบที่ 1 (Norrish type I)

สารที่ทำให้เกิดแตกแยกแบบโฟโตไลติกชนิดนี้จะเกิดเมื่ออยู่ใกล้กับหมู่คาร์บอนิลเป็นผลให้เกิดการเสียคุณภาพได้โดยตรงดังสมการ 2.7 และ 2.8 เมื่อได้อนุภาคแยกออกจากกันแล้วอนุภาคนี้อาจเข้าทำปฏิกิริยาอื่นต่อไปเพื่อเกิดการเสียคุณภาพในที่สุด



-นอร์ริชแบบที่ 2 (Norrish type II)

หมู่คาร์บอนิลซึ่งอยู่ในตำแหน่งแกมมา (Gamma) ของพันธะ C-H สามารถกระตุ้นให้เกิดการแตกแยกโดยผ่านกลไกเชิงซ้อนที่มีวงแหวนหกเหลี่ยมอยู่ชั่วคราวและมีรัศมีที่สมมาตรกันดังสมการ 2.9 ปฏิกิริยานอร์ริชแบบที่ 2 เป็นที่นิยมมากกว่านอร์ริชแบบที่ 1 แต่ความแตกต่างที่เกิดขึ้นแต่ละครั้งระหว่างปฏิกิริยานอร์ริชแบบที่ 1 และแบบที่ 2 จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของโมเลกุลเฉพาะทั้งสองและสภาวะเฉพาะในระหว่างการเสื่อมคุณภาพ



การกำจัดโมเลกุลเล็กๆ (Elimination of Small molecule)

ปฏิกิริยาการเสียดุลยภาพทางแสง (Photodegradation) ของพอลิเมอร์เป็นผลทำให้เกิดการกำจัดโมเลกุลเล็กๆออกในรูปของผลิตภัณฑ์ร่วม (By-Products) ได้แก่

- คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide) โดยจะถูกปล่อยออกมาในระหว่างการเสียดุลยภาพโดยปฏิกิริยานอร์ริชแบบที่ 1 ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น
- ปฏิกิริยาดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (Depolymerization) หรือปฏิกิริยาการสลายตัวของสายโซ่ พอลิเมอร์หลังการเกิดปฏิกิริยาซึ่งมีผลทำให้เกิดกระบวนการแตกออก (Unzipping process) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาผันกลับของปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของไวนิล ดังสมการ 2.10



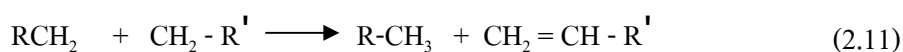
โดยทั่วไปพอลิเมอร์ที่เสถียรมากต้องการพลังงานสลายพันธะในสายโซ่พอลิเมอร์มากกว่าพอลิเมอร์ที่มีความเสถียรน้อยแสดงว่าโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาการสลายพันธะของพอลิเมอร์และพลังงานในรูปแบบอื่นๆ ได้แก่พลังงานความร้อนจะมีผลต่อความเสถียรของพอลิเมอร์ เช่นที่อุณหภูมิต่ำจะมีผลทำให้พอลิเมอร์มีเสถียรภาพดีกว่าที่อุณหภูมิสูง จากการศึกษาพบว่าโมเลกุลพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างที่ขาดอะตอมของเทอเชียรีไฮโดรเจนจะมีอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นซึ่งจะเสถียรมากกว่าโครงสร้างโมเลกุลแบบอื่น ภายหลังการเกิดปฏิกิริยาการสลายพันธะของพอลิเมอร์จะทำให้เกิดโมเลกุลเล็กๆ เช่น มีเทน (Methane) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbondioxide) สารโมเลกุลเล็กๆเหล่านี้อาจใช้ในการวิเคราะห์หากลไกของการเสียดุลยภาพของพอลิเมอร์ได้

บางปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอาจไม่มีการสลายพันธะในโมเลกุลพอลิเมอร์ แต่เกิดปฏิกิริยาร่วมทำให้โครงสร้างภายในโมเลกุลเปลี่ยนเป็นโครงร่างตาข่ายจากปฏิกิริยาออกซิเดชันและเมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างสมบูรณ์จะส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ปฏิกิริยา

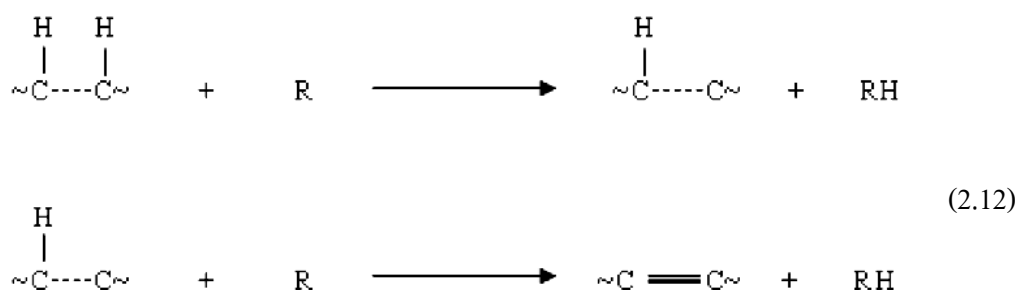
ดังกล่าวได้แก่ปฏิกิริยาการกำจัดไฮโดรเจนคลอไรด์ออกจากพอลิไวนิลคลอไรด์ (Dehydrochlorination) ปฏิกิริยาการกำจัดไฮโดรแฮโลเจน (Dehydrohalogenation) และปฏิกิริยาการกำจัดแฮโลเจน (Dehalogenation) ออกจากพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ อย่างไรก็ตามการเกิดออกซิเดชันโดยแสงจะเกิดซ้ำมากและไม่สมบูรณ์ เว้นเสียแต่จะเกิดการเสียคุณภาพทางชีวภาพกันไป

ความไม่อิ่มตัว (Unsaturation)

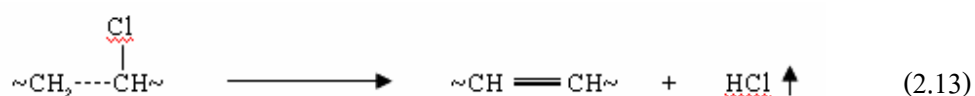
ปฏิกิริยาการเสียคุณภาพทางแสงมากมายเกิดจากการเกิดพันธะคู่ของ C=C ที่ไม่อิ่มตัวปฏิกิริยาที่ควรกล่าวถึงได้แก่ ปฏิกิริยานอร์ริชแบบที่ 2 ทำให้เกิดการแตกแยกโดยดิสพรอพอชันเนชันโดยตรงได้เป็นพันธะคู่ C=C ปฏิกิริยาดิสพรอพอชันเนชันระหว่างอนุมูลที่สลายตัว 2 ชนิดที่ทำให้เกิดการสิ้นสุดและเกิดความเสถียรผ่านทางปฏิกิริยาดิสพรอพอชันเนชันแบบเดียวกันกับที่พบเห็นกันโดยทั่วไปได้แก่ ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรซ์เชนของไวนิล ดังสมการ 2.11



การเข้าทำปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระบนโมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้อะตอมในโมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์เกิดการหดตัวส่งผลให้เกิดการสร้างพันธะคู่ที่ไม่อิ่มตัวในโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้ดังสมการ 2.12



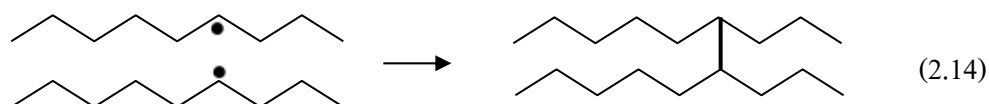
ตัวอย่างการกำจัดโมเลกุลเล็ก ๆ เช่น ปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ออกจากพอลิไวนิลคลอไรด์มีผลทำให้การเปลี่ยนแปลงของสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้เปลี่ยนเป็นโมเลกุลที่มีโครงสร้างไม่อิ่มตัว มีผลทำให้เกิดกระบวนการเสียคุณภาพได้มากที่สุด แสดงดังสมการ 2.13



การจัดเรียงตัวและการเกิดเป็นวง (Rearrangement and Cyclization)

จากปฏิกิริยาข้างต้นที่กล่าวมาจะเกี่ยวข้องกับการแตกแยกของพันธะและการเสียคุณภาพในโมเลกุลของพอลิเมอร์ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลลดลง การจัดเรียงตัวของโมเลกุลเหล่านี้อาจเกิดเป็น

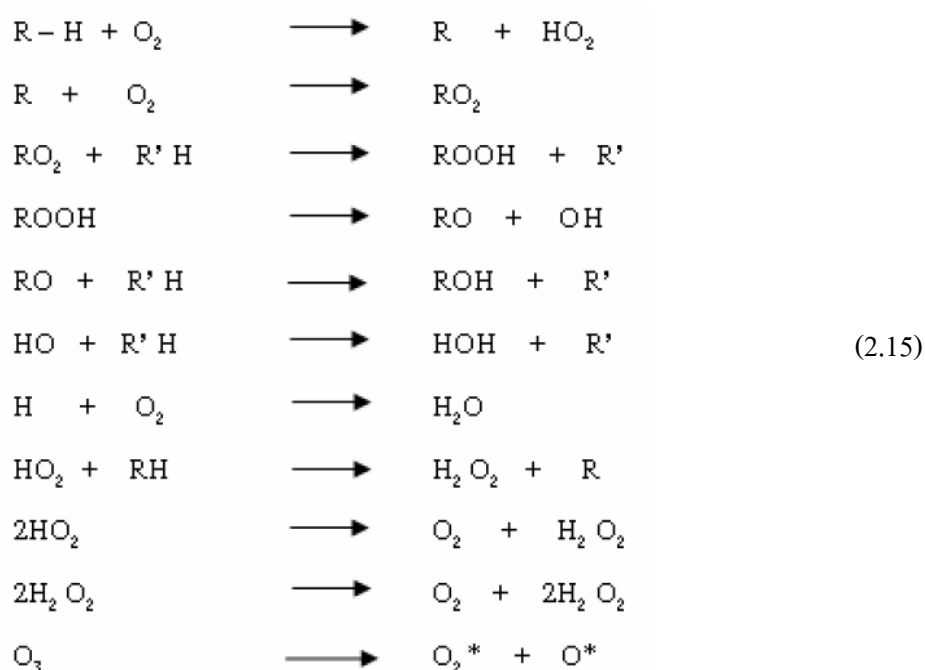
วงหรือเชื่อมโยงโครงร่างตาข่าย เป็นต้น ซึ่งในกระบวนการเสียคุณภาพโดยแสงเกิดจากการทำให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์สูงขึ้นและเกิดเป็นเจลในลักษณะ 3 มิติ ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นมากกว่าปฏิกิริยาการแตกแยกของสายโซ่พอลิเมอร์เป็นโมเลกุลต่างๆ เมื่อไรก็ตามที่อนุมูลอิสระในพอลิเมอร์สองตัวเกิดขึ้นและมีเสถียรภาพเพียงพอ หรือมีช่วงชีวิต (Life time) น้อยที่สุดจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุมูลอิสระภายในสายโซ่ก่อนจะสลายตัวต่อไปซึ่งแนวโน้มที่จะรวมกันเกิดเป็นโครงร่างตาข่ายที่จุดนี้ดังสมการ 2.14



ความสัมพันธ์ระหว่างการแตกแยกเป็นโมเลกุลที่เล็กลงกับการเชื่อมโยงของสายโซ่ตาข่ายเป็นร่างแหใหญ่ 3 มิติ จะถูกกำหนดโดยความมีเสถียรภาพสัมพันธ์ระหว่างอนุมูลของพอลิเมอร์ที่ถูกกระตุ้น (Intermediate polymer) ความง่ายในการเคลื่อนที่ (Migration) และการรวมตัวกันใหม่ (Recombination) เป็นต้น

การออกซิเดชัน (Oxidation)

ปฏิกิริยาข้างต้นที่กล่าวมาทั้งหมดมีความเป็นไปได้ในทางทฤษฎีและทางารทดลองโดยไม่ต้องอาศัยออกซิเจน แต่ในการทดลองสภาวะของอากาศปกติและแสงอัลตราไวโอเลตในห้องปฏิบัติการเกิดขึ้นในบรรยากาศที่มีออกซิเจนซึ่งกระบวนการเสียคุณภาพโดยแสงอัลตราไวโอเลตได้มีการศึกษาแล้วว่าการออกซิเดชันรวมอยู่ด้วย ปฏิกิริยาการเกิดออกซิเดชันเป็นดังสมการ 2.15



กระบวนการเสียคุณภาพอาจเกิดเป็นแบบผสมระหว่างแสงอัลตราไวโอเลตและการออกซิเดชันได้ด้วย ($RH + O_2 + UV$) โดยสามารถเกิดการกระตุ้นการถ่ายโอนของประจุ (Charge Transfer Excitation) และการกระตุ้นที่เกิดการก่อตัวของออกซิเจนได้เป็นแบบเดี่ยว (Singlet) และแบบสาม (Triplet) และสามารถเกิดการออกซิเดชันด้วยแสงได้ด้วย

โฟโตไฮโดรลิซิส (Photohydrolysis)

พอลิเอสเตอร์ พอลิเอไมด์และโครงสร้างพอลิเมอร์อื่นๆ เช่น พอลิยูรีเทน (Polyurethane) เกิดการกระตุ้นด้วยแสง (Photoactivation) และความชื้นในบรรยากาศซึ่งเป็นผลมาจากกลไกของการไฮโดรลิซิส ปฏิกริยาเหล่านี้ทำให้เกิดการแตกแยกได้น้ำหนักโมเลกุลต่ำลงจนได้เป็นพวคมอนอเมอร์และพวกที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

เมื่อศึกษาโดยใช้แถบแสงอัลตราไวโอเลตและการแผ่รังสีทำให้ทราบว่ากลุ่มโครโมฟอร์จะดูดกลืนคลื่นแสงได้สูงสุดที่ความยาวคลื่นของแสงอัลตราไวโอเลตที่เหมาะสมเฉพาะที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเสียคุณภาพของพอลิเมอร์เท่านั้น อย่างไรก็ตามกระบวนการเสียคุณภาพโดยแสงในสภาพอากาศทั่วไป พบว่าในสภาพอากาศปกติจะมีแถบการดูดกลืนคลื่นแสงที่กว้างโดยจะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้หลายแบบและซับซ้อนซึ่งทำให้วิเคราะห์และทำความเข้าใจได้ยากนอกจากการเกิดเสถียรภาพหรือไม่เกิดเสถียรภาพขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

2.1.3 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable Plastics) [1]

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมีคำจำกัดความตามมาตรฐาน (DIN103.2) ว่าการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ของวัสดุพลาสติก (Biodegradation of a Plastic material) คือ กระบวนการที่พลาสติกถูกเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีอันเนื่องมาจากจุลินทรีย์ วัสดุพลาสติกจะได้อ้างว่าเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์นั้น สารประกอบอินทรีย์ทั้งหมดต้องถูกย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์มากกว่าร้อยละ 90 โดยที่สภาพแวดล้อม และอัตราการย่อยสลายจะถูกกำหนดในการทดสอบตามมาตรฐานซึ่งมีหลายวิธี เช่น การใช้เอนไซม์ การใช้จุลินทรีย์ หรือการหมักเพื่อให้เกิดการย่อยสลาย (Composting) เป็นต้น

ปัจจุบันพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมีการศึกษาทั้งหมด 3 กลุ่มใหญ่ๆตามวัตถุดิบที่ใช้ได้แก่

1. กลุ่มพอลิเมอร์ชีวภาพที่ผลิตจากพืช เช่น แป้ง และ เซลลูโลส เป็นต้น
2. กลุ่มพอลิเมอร์ที่ผลิตได้โดยการเพาะเลี้ยงเซลล์ของจุลินทรีย์ เช่น พอลิเบตาไฮดรอกซีบิวทิเรต (Poly-β-Hydroxybutyrate) และพอลิแลกเตท (Polylactate) เป็นต้น
3. กลุ่มพอลิเมอร์จากการดัดแปรพอลิเมอร์ธรรมชาติ โดยส่วนใหญ่เป็นพลาสติกที่ผลิตจากแป้ง (Starch Based Polymer) ที่มีการผสมสารเติมแต่งอื่นๆ เช่นกลีเซอรอล

2.1.3.1 ลักษณะของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเป็นพลาสติกที่สามารถถูกจุลินทรีย์จำพวกแบคทีเรียหรือเชื้อราใช้เอนไซม์ที่มีความจำเพาะเจาะจงเปลี่ยนสภาพของพลาสติกให้เป็นโมเลกุลเล็กๆ ได้แก่ สารประกอบไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) กรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic acid) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ภายหลังการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์พลาสติกจะต้องมีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 500 หน่วย [6] ซึ่งโครงสร้างส่วนใหญ่ที่จุลินทรีย์ย่อยสลายได้เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ตรง เช่น อะลิฟาติกพอลิเอสเตอร์ (Aliphatic polyester) เป็นต้น จากการศึกษาการย่อยสลายของพอลิเมอร์ธรรมชาติโดยจุลินทรีย์ เช่น โพรตีน เซลลูโลส และแป้ง เป็นต้น พบว่าการย่อยสลายเริ่มจากจุลินทรีย์ จะใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ทำให้เกิดออกซิเดชัน (Oxidation) ภายในสายโซ่พอลิเมอร์เกิดอนุมูลอิสระจนทำให้เกิดการย่อยสลายเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา โดยทั่วไปพอลิเอทิลีนเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ไม่ย่อยสลายทางชีวภาพ มีความต้านทานจุลินทรีย์ได้ดี แต่สามารถย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์ เมื่อมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 500 หน่วย [6] ซึ่งสามารถตรวจวัดอัตราการสลายตัวได้ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Infrared spectroscopy) โดยตรวจวัดหาปริมาณหมู่คาร์บอนิลที่มีแนวโน้มสูงขึ้น ซึ่งเมื่อจุลินทรีย์ปล่อยเอนไซม์เข้าทำปฏิกิริยากับพอลิเอทิลีน พบว่า ปริมาณหมู่คาร์บอนิลมีแนวโน้มลดลง แสดงว่าการเข้าทำปฏิกิริยาของจุลินทรีย์จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแล้วจึงเกิดการย่อยสลาย [6] โดยการสลายตัวทางชีวภาพของพลาสติกมีทั้งหมด 3 ลักษณะ ดังนี้

1. พลาสติกที่ไม่ได้สลายตัวเนื่องจากจุลินทรีย์โดยตรง แต่ถูกจุลินทรีย์เข้าไปย่อยสลาย สารเติมแต่งในส่วนอื่นๆ ทำให้เหลือพลาสติกอยู่ในสภาพโครงสร้างรูพรุนและต่อไปก็จะกลายเป็นผงละเอียด

2. การสลายตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากเปอร์ออกไซด์ เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยตัวเอง (Autooxidation) ซึ่งทำให้สายโซ่โมเลกุลของพลาสติกสลายตัวสั้นลง เพื่อให้จุลินทรีย์สลายตัวต่อเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำต่อไป

3. การสลายตัวเนื่องจากการกระทำของจุลินทรีย์โดยตรง นั่นคือจุลินทรีย์จะปล่อยเอนไซม์เพื่อทำการย่อยสลายพลาสติกประเภทนั้นโดยตรง เช่น พอลิคาร์โพรแลคโตน (Polycaprolactone) และพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรทการ์เลท (Poly hydroxybutyrate garleate) เป็นต้น

ผลจากการสลายตัวของพลาสติกย่อยสลายได้โดยชีวภาพส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในเชิงบวกที่สำคัญ คือ ในกระบวนการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้โดยชีวภาพ พบว่ามีปริมาณการใช้พลังงานในการผลิต และมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือก๊าซเรือนกระจก (Green House Gas, GHG) ที่เป็นของเสียจากกระบวนการผลิตค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตพลาสติกที่ผลิตจากปิโตรเคมี [7] นอกจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาในระหว่างกระบวนการผลิตแล้ว จะไม่มีการผลิตคาร์บอนในรูปแบบอื่นๆ ออกสู่บรรยากาศ ซึ่งเห็นชัดเจนในกรณีของ

พลาสติกที่ใช้เป็งเป็นวัตถุดิบ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวของพลาสติกจะถูกใช้ไปในการเจริญเติบโตของพืชที่ปลูกขึ้นมาใหม่ทำให้เกิดการหมุนเวียน และสมดุลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ ปริมาณการใช้พลังงาน และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพชนิดต่างๆ ได้ถูกประมวลไว้ในตารางที่ 2.3 และตารางที่ 2.4 ตามลำดับ การทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของพลาสติกมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี ขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งาน เพื่อให้สอดคล้องกับสภาพแวดล้อม เช่น สภาพของน้ำทะเลภายในดิน ในระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงาน การย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน หรือการหมักทำปุ๋ย เป็นต้น ซึ่งในแต่ละสภาวะจะมีจุลินทรีย์ ที่ช่วยให้เกิดการย่อยสลายที่แตกต่างกัน [8] โดยมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพของพลาสติกมีอยู่หลายองค์กร เช่น ASTM, CEN และ ISO เป็นต้น

ตารางที่ 2.3 พลังงานในการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ[8]

พอลิเมอร์	พลังงาน (MJ/kg)
Low density polyethylene	81
Polyhydroxyalkanoate- fermentation process	81
High density polyethylene	80
Polycaprolactone	77
Poly vinyl alcohol	58
Poly lactic acid	57
Thermoplastic starch + 60% Polycaprolactone	52
Thermoplastic starch + 52.5% Polycaprolactone	48
Thermoplastic starch	25
Thermoplastic starch + 15% Poly vinyl alcohol	25

ตารางที่ 2.4 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [8]

พอลิเมอร์	การปล่อยก๊าซเรือนกระจกx10 [kg CO ₂ eq./kg]
Poly lactic acid	53
Low density polyethylene	50
High density polyethylene	49
Poly vinyl alcohol	42
Thermoplastic starch + 60% Polycaprolactone	36
Thermoplastic starch + 52.5% Polycaprolactone	33
Thermoplastic starch + 15% Poly vinyl alcohol	17
Thermoplastic starch	11
Poly lactic acid	n/a
Polyhydroxyalkanoate- fermentation process	n/a

2.1.3.2 วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย [9]

การวิเคราะห์สมมูลคาร์บอน

ในการย่อยสลายพอลิเมอร์ของจุลินทรีย์จะได้พอลิเมอร์คาร์บอนที่อยู่ในรูปที่ละลายได้ (Soluble) ในรูปจุลินทรีย์และในสถานะก๊าซ ซึ่งสามารถคำนวณพอลิเมอร์ทั้งหมดที่ถูกย่อยสลายได้จากการเพิ่มปริมาณคาร์บอนในสถานะดังกล่าว ปริมาณคาร์บอนสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้ spectrophotometer หรือใช้การคำนวณน้ำหนักแห้ง สมมูลมวลคาร์บอนที่ถูกย่อยสลายได้ดังนี้

$$C_d = C_g + C_s + C_m$$

เมื่อ C_g คือ คาร์บอนในสถานะแก๊ส

C_s คือ คาร์บอนที่ละลายได้

C_m คือ คาร์บอนในรูปจุลินทรีย์

ดังนั้นร้อยละการย่อยสลายพอลิเมอร์(%f) สามารถคำนวณได้จาก

$$\%f = (C_d/C_i) \times 100$$

เมื่อ C_i คือ คาร์บอนเริ่มต้นในพอลิเมอร์ก่อนการย่อยสลาย

การวิเคราะห์น้ำหนักที่หายไป

ในการย่อยสลายพอลิเมอร์จะเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพทำให้เกิดการสูญเสียมวล หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นแร่ธาตุ (Mineralization) ดังนั้นการวิเคราะห์น้ำหนักที่หายไปจะทำให้ทราบถึงระดับการย่อยสลายของพอลิเมอร์ชนิดนั้น

การวิเคราะห์ลักษณะด้วยกล้องจุลทรรศน์

-การใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope)

นำพอลิเมอร์ย่อยสลายที่ฝังดินไว้ขึ้นมาแล้วสังเกตจะพบว่าเส้นใยของเชื่อกาเจอร์นิตโตอยู่บนพอลิเมอร์ จากนั้นนำพอลิเมอร์มาล้างแล้วนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope) จะพบรูเล็กๆ ในพอลิเมอร์ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเป็ที่ที่อยู่ในพอลิเมอร์ถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์

-การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดใช้ตรวจสอบลักษณะพื้นผิวโดยใช้กำลังขยายที่สูงมาก จะพบว่าพอลิเมอร์ย่อยสลายที่ฝังดินไว้มีสีเปลี่ยนไปและมีขนาดเล็กลงเนื่องจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในส่วนของเป็ นอกจากนี้ยังพบว่าเกิดจุดสีดำและเส้นสีขาวบนชั้นพอลิเมอร์ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเป็ที่ถูกย่อยสลายแล้วเหลือส่วนของพอลิเอทิลีน

การวิเคราะห์อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Infrared Spectroscopy)

อินฟราเรดสเปกโตรสโคปีเป็นเครื่องมือที่ใช้วัดลักษณะทางเคมีของวัสดุพอลิเมอร์ ปฏิกิริยาส่วน infrared ของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในพอลิเมอร์จะทำให้เกิดการดูดซับความยาวคลื่นในช่วงดังกล่าวที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของโมเลกุลหรือกลุ่มอะตอมในโมเลกุล ความหนาแน่นของการดูดซับและความยาวคลื่นจะทำให้เกิดสเปกตรัมซึ่งมีลักษณะเฉพาะตัวไม่ขึ้นกับองค์ประกอบทั้งหมดของพอลิเมอร์

อินฟราเรดสเปกโตรสโคปีใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณเป็ที่หายไปในระหว่างการย่อยสลายของพอลิเมอร์ นอกจากนี้ในขณะที่จุลินทรีย์ย่อยสลายเป็จะเกิดรูที่พื้นผิวพอลิเมอร์ซึ่งที่รูนี้จะมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยสามารถตรวจวัดได้จากอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีด้วย

การวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermal Analysis)

การวิเคราะห์ทางความร้อนมีหลายวิธี ได้แก่ Differential Thermal Analysis (DTA) และ Differential scanning calorimetry (DSC) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (Melt Temperature; T_m) ส่วน Thermogravimetric Analysis (TGA) เป็นการวิเคราะห์น้ำหนักที่สูญเสียไป

- การศึกษาโดยใช้ DSC พบว่าในระหว่างการย่อยสลายส่วนที่เป็นอสัณฐาน (amorphous) ของพอลิเมอร์จะลดลง โดยส่วนอสัณฐานของพอลิเอทิลีนจะถูกย่อยสลายได้มากกว่าส่วนที่เป็นผลึก
- การศึกษาโดยใช้ TGA เป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็ว ใช้ศึกษาการย่อยสลายของแป้งในพอลิเมอร์โดยวิเคราะห์ปริมาณแป้งก่อนและหลังการย่อยสลาย

การวิเคราะห์การฝังดิน (Burial Test)

การทดสอบจะต้องตัดวัสดุที่ต้องการทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 30 x 120 มิลลิเมตร หลากๆตัวอย่างฝังในดินลึกประมาณ 15 เซนติเมตร เมื่อครบกำหนดทุกเดือนให้ขุดตัวอย่างขึ้น มาการทดลองใช้เวลาประมาณ 4 เดือน

2.2 แป้ง [9]

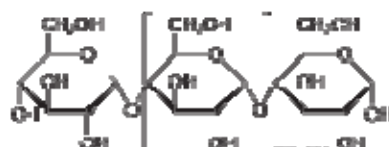
แป้งจัดเป็นสารประกอบพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ ประกอบไปด้วยกลูโคส เป็นสารแขวนลอยที่รวมตัวกับน้ำได้ดี แต่ไม่ละลายในน้ำเย็น สามารถพบแป้งได้ในเซลล์พืชทุกชนิด เช่น ในเมล็ด และรากพืช เป็นต้น โดยมีกระบวนการในการผลิตแป้งหลายวิธีขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ ลักษณะของแป้งจะเป็นเม็ดเล็กๆ มีรูปร่างแตกต่างกันออกไปตามชนิดของพืช แป้งสามารถนำไปใช้เป็นส่วนผสมหรือใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย เนื่องจากประโยชน์ของแป้งเกิดจากสมบัติความชื้นเหนียว การเกิดเป็นเจล การยึดติด และการเกิดฟิล์มคุณภาพสามารถควบคุมได้ง่าย และยังเป็นวัตถุดิบที่หาได้ง่ายและมีราคาถูก

2.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้ง

แป้งเป็นองค์ประกอบที่ประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6 : 10 : 5 มีสูตรเคมีโดยทั่วไป คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ ประกอบไปด้วยหน่วยพื้นฐานเป็นแอนไฮโดรกลูโคส (anhydroglucose unit) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (Glucosidic linkage) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ของหน่วยกลูโคสกับคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 ของหน่วยกลูโคสที่อยู่ถัดไป ด้านปลายของโมเลกุลแป้งจะมี anomeric carbon (C1) ซึ่งว่างอยู่ไม่ได้จับกับโมเลกุลอื่นๆ ทางด้านตอนปลายโมเลกุลของแป้งจะมีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่อัลดีไฮด์ เรียกว่า กลุ่มปลายด้านที่มีสมบัติรีดิวซ์ (Reducing end group) นั่นคือ แป้งหนึ่งโมเลกุลจะมีตำแหน่ง reducing end 1 ตำแหน่ง โมเลกุลแป้งแบ่งออกเป็น 2 ชนิดหลักๆ ตามขนาดโมเลกุลและลักษณะการจัดเรียงตัว คือ อะไมโลส (amylose) ซึ่งมีขนาดเล็กและมีกิ่งก้านสาขาเพียงเล็กน้อย และอะไมโลเพกติน (amylopectin) ซึ่งมีขนาดใหญ่และมีกิ่งก้านสาขามากมาย ที่แตกต่างกันไปตามชนิดของแป้ง

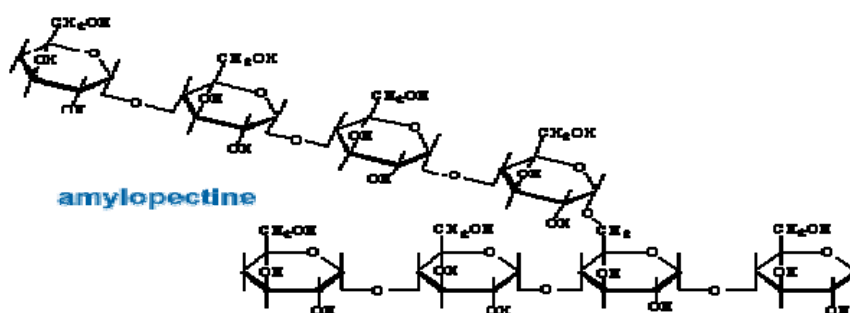
2.2.2 โครงสร้างทางเคมีของแป้ง

- อะไมโลส (amylose) เป็นพอลิเมอร์ที่มีสายโซ่ตรง ประกอบด้วยหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส ประมาณ 200 – 2,000 หน่วย เชื่อมกันด้วยพันธะ α – 1,4 glucosidic linkage โดยแป้งส่วนใหญ่จะมีอะไมโลสเป็นองค์ประกอบประมาณ 15 – 25% มีสูตรโครงสร้าง ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของอะไมโลส [10]

- อะไมโลเพกติน (amylopectin) เป็นพอลิเมอร์ที่มีสายโซ่กิ่ง ประกอบด้วยหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส เชื่อมกันด้วยพันธะ α – 1,4 glucosidic linkage และ α – 1,6 glucosidic linkage แต่ละโซ่กิ่งในโมเลกุลอะไมโลเพกตินมีหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส ประมาณ 20 – 30 หน่วย โดยโครงสร้างที่เป็นอะไมโลเพกตินจะมีประมาณ 75 – 80% ของแป้ง มีสูตรโครงสร้าง ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของอะไมโลเพกติน [11]

2.2.3 แป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch)

แป้งมันสำปะหลังผลิตได้จากหัวของต้นมันสำปะหลัง มีชื่อเรียกทางวิทยาศาสตร์ว่า *Manihot utilissima* และในภาษาอังกฤษจะเรียกแป้งมันสำปะหลังว่า *Tapioca starch*, *Cassava starch* และ *Manioc starch* โดยมีองค์ประกอบ ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังโดยทั่วไป [7]

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)
ความชื้น	12.59
แป้ง	87.00
ไขมัน	0.10
โปรตีน	0.10
เถ้า	0.20
ฟอสฟอรัส	0.01

2.2.3.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง

ลักษณะของแป้งมันสำปะหลังเมื่อดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ ประกอบด้วย เม็ดแป้งตั้งแต่ 2 – 8 เม็ดมารวมกัน แต่ละเม็ดยาวตั้งแต่ 4 – 35 ไมโครเมตร เม็ดแป้งส่วนมากมีลักษณะเป็นรูปไข่ซึ่งปลายข้างหนึ่งถูกตัดออก และผิวตรงส่วนที่ตัดออกจะมีลักษณะเว้าเข้าข้างใน บางเม็ดอาจมีริมหาดหนึ่งโค้ง อีกด้านหนึ่งแบน ไม่สม่ำเสมอ เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงโพลาไรซ์ จะเห็นลักษณะกากบาทสีดำ เรียกว่า Birefringence ภายในเม็ดแป้งประกอบด้วย อะไมโลส และ อะไมโลเพกติน ซึ่งมีการจัดเรียงตัวต่างกัน แบ่งได้เป็น 2 แบบ แบบแรกสายพอลิเมอร์ของอะไมโลสเรียงตัวขนานกันอย่างเป็นระเบียบ มีอะไมโลสบางส่วนเรียงขนานกับส่วนที่เป็นสายตรงส่วนนอกของอะไมโลเพกติน และยึดติดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้โมเลกุลบริเวณนี้จับกันอย่างหนาแน่น และมีแรงยึดเหนี่ยวสูง บริเวณนี้ เรียกว่า Crystalline regions หรือ Micelles เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดลักษณะ Birefringence ของเม็ดแป้ง Crystalline regions นี้มีความสามารถในการดูดน้ำและพองตัวต่ำมาก ส่วนแบบที่สอง โมเลกุลเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ แรงดึงดูดระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ของอะไมโลส และอะไมโลเพกตินต่ำกว่าแบบแรก บริเวณที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบนี้ เรียกว่า Amorphous regions เป็นส่วนที่ดูดน้ำได้ดี และพองตัวได้ง่าย

ตารางที่ 2.6 สมบัติของแป้งข้าวโพดเปรียบเทียบกับแป้งมันสำปะหลัง [9]

สมบัติ	แป้งข้าวโพด	แป้งมันสำปะหลัง
ขนาด (μm)	3 - 26	4 – 35
เฉลี่ย	15	20
ไขมัน (%w/w)	0.60	0.10
โปรตีน (%w/w)	0.35	0.10
อะไมโลส (%)	28	17
Degree of polymerisation		
อะไมโลส	800	3000
อะไมโลเพกติน $\times 10^6$	2	2
Pasting temp ($^{\circ}\text{C}$)	75 – 80	65 – 70
Peak viscosity	600	1000
Swelling power ที่ 95°C	24	71
Paste viscosity	ปานกลาง	สูง
Paste and film clarity	ทึบแสง	ใส
Retrogradation rate	สูง	ต่ำ

2.2.3.2 การย่อยสลายของแป้ง

แป้งสามารถย่อยสลายได้หลายทาง ได้แก่ การย่อยสลายทางชีวภาพโดยใช้เชื้อรา และการย่อยสลายโดยใช้เอนไซม์จากเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

2.2.3.2.1 การย่อยสลายทางชีวภาพโดยใช้เชื้อรา (Biodegradation by Fungi)

เชื้อราสามารถเข้าทำลาย หรือสร้างความเสียหายให้แก่วัสดุได้ 3 วิธี ได้แก่ ทางกายภาพ ทางเคมี และการก่อให้เกิดรอยดำ

1. การทำลายทางกายภาพ (Mechanical damage)

การทำลายนี้เกิดขึ้นเมื่อจุลินทรีย์สามารถทำลายวัสดุในทางกายภาพ เช่น การกัดแทะของเปลือกไม้โดยมด การเจาะผิวของแผ่นพลาสติกบางๆ โดยปลวก เชื้อราสามารถเจาะผิวหนังและผนังเซลล์ได้

2. การทำลายทางเคมี (Chemical damage)

การทำลายทางเคมีเกิดขึ้นได้โดยตัวการทางเคมี ซึ่งเชื้อราเป็นสาเหตุหลัก หรือการที่เชื้อราเองเข้าทำลายวัสดุ โดยการปลดปล่อยสารเคมีเข้าไปยังวัสดุ เช่น ผลิตภัณฑ์ของ mycotoxin

โดยเชื้อราที่เจริญเติบโตบนอาหาร เช่น alfatoxin ที่ผลิตมาจาก *Aspergillus flavus* หรือรอยด่างดำที่เกิดขึ้นบนสิ่งทอ

3. การเกิดรอยดำ (Soiling)

การเกิดรอยด่างดำเป็นผลมาจากเส้นใยของเชื้อราเอง และเชื้อราก่อให้เกิดสปอร์ที่มีสีได้ ตั้งแต่โปร่งแสงจนทึบแสง หรือสีน้ำตาลแก่เกือบดำ รอยด่างดำเช่นนี้มักเกิดในสภาวะที่ไม่มีการแข่งขันจากสิ่งมีชีวิตชนิดอื่นๆ เช่น แบคทีเรีย ดังนั้นการเกิดรอยด่างดำของเครื่องมือทางไฟฟ้าหรือผิวหนังของแก้ว โดยการเจริญของเส้นใยเชื้อรา สืบเนื่องมาจากการที่เชื้อราสามารถผลิตเส้นใยเฉพาะ จากที่ได้รับจากอาหารเลี้ยงเชื้อตามชนิดต่างๆ และโดยความสามารถผลิตเส้นใยที่จะเชื่อมต่อกันในช่องว่างของอากาศ

2.2.3.2.2 การย่อยสลายตามลักษณะการทำงานของเอนไซม์

1. เอนไซม์ย่อยภายนอก (Exo – enzyme)

1.) เบต้า – อะไมเลส (β – amylase ; 1,4 – α – D – glucan maltohydrolase)

พบเอนไซม์นี้ในพืชชั้นสูง เช่น ข้าวบาร์เลย์ ข้าวโอ๊ต ข้าวสาลี และพบได้ในถั่วเหลืองและมันฝรั่ง หวาน จัดเป็น extracellular enzyme ในเชื้อจุลินทรีย์ เช่น *Bacillus cereus* เป็นต้น เบต้าอะไมเลสเป็นเอนไซม์ที่ตัดพันธะจากด้านนอกเข้ามาด้านใน โดยเริ่มจากปลายของอะไมโลส หรืออะไมโลเพกตินจากปลายด้านที่ไม่มีสมบัติรีดิวซ์ เอนไซม์จะตัดพันธะแอลฟา-1,4 ไกลโคซิดิกของโมเลกุลกลูโคสเป็นคู่ๆ ไป ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำตาลมอลโตส การทำงานของเอนไซม์ต้องการแคลเซียมไอออนเข้าร่วมทำงาน

2.) เอนไซม์กลูโคอะไมเลส (Glucoamylase; 1,4- α -D-glucanglucohydrolase)

สามารถผลิตได้จากเชื้อราในสกุล *Aspergillus*, *Penicillium* และ *Rhizopus* ยีสต์และแบคทีเรีย กลูโคอะไมเลสเป็นเอนไซม์ที่ตัดน้ำตาลกลูโคสที่จับกันด้วยพันธะแอลฟา-1,4 ไกลโคซิดิกและพันธะกิ่งแอลฟา-1,6 ไกลโคซิดิก โดยการตัดพันธะกิ่งจะเกิดขึ้นช้ากว่าการตัดพันธะแอลฟา-1,4 ไกลโคซิดิก ถ้าการย่อยเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์จะได้ผลิตภัณฑ์ คือ กลูโคส มีความเสถียรที่ pH 3.5 – 5.0 และที่อุณหภูมิ $\pm 55^{\circ}\text{C}$

2. เอนไซม์ย่อยภายใน (Endo – enzyme)

แอลฟาอะไมเลส (Alpha-amylase ; endo-1,4- α – D – glucan glucohydrolase)

จัดเป็น extracellular enzyme คือ เอนไซม์ที่ผลิตขึ้นภายในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตแล้วถูกขับออกมานอกเซลล์ พบได้ในสัตว์ พืช และจุลินทรีย์หลายชนิด เป็นเอนไซม์ที่ทำงานภายในโมเลกุลแป้ง โดยจะย่อยแป้งแบบสุ่มที่ตำแหน่งพันธะแอลฟา-1,4 ไกลโคซิดิก แต่ไม่สามารถย่อยพันธะแอลฟา-1,6 ไกลโคซิดิก ที่ตำแหน่งกิ่งก้านของแป้งได้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยแป้ง คือ มอลโตส กลูโคส และลิมิตเดกซ์ทริน การทำงานของเอนไซม์ต้องการแคลเซียมไอออนเข้าร่วมทำงาน มีความเสถียรที่ pH 5.5 – 9.0 และที่อุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 150°C ในทางอุตสาหกรรมจะได้เอนไซม์จากเชื้อรา

และแบคทีเรีย เมื่อใช้แอลฟาอะไมเลสในการย่อยแป้ง จะทำให้ความหนืดและความสามารถในการย้อมติดสีไอโอดีนลดลงอย่างรวดเร็ว และทำให้ reducing power เพิ่มขึ้นด้วย

3. เอนไซม์ย่อยพันธะกิ่ง (Debranching enzyme)

1.) ไอโซอะไมเลส (Isoamylase ; glucogen-6-glucanohydrolase) เป็นเอนไซม์ที่ย่อยจุดที่เป็นกิ่งก้านของไกลโคเจน และอะไมโลเพกตินได้ดี ไอโซอะไมเลสไม่ต้องการโคแฟกเตอร์ในการทำงาน มีความเสถียรในช่วง pH 3.0 – 4.0 และที่อุณหภูมิ 45 – 55 °C เอนไซม์ชนิดนี้สามารถแยกได้จากพืช สัตว์ และจุลินทรีย์

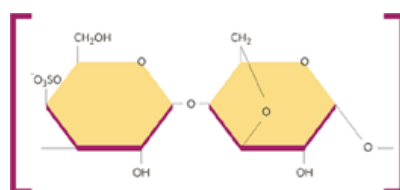
2.) พูลูลานาส (Pullulanase ; Pullulan 6-glucanohydrolase) เป็นเอนไซม์ที่ใช้ตัดพันธะแอลฟา-1,6 ไกลโคซิดิก ของพูลูลาน และอะไมโลเพกติน แต่การทำกิจกรรมไม่สมบูรณ์เท่ากับการย่อยโดยไอโซอะไมเลส และทำกิจกรรมร่วมกับไกลโคเจนได้ จะสามารถย่อยได้สายกลูโคสที่มีความยาว 2 – 3 หน่วย แต่ไม่สามารถย่อยจนได้กลูโคส 1 หน่วย เอนไซม์มีความเสถียรที่ pH 4.5 – 5.5 และที่อุณหภูมิ 50 °C เอนไซม์ชนิดนี้พบได้ในพืช สัตว์ และแบคทีเรีย

ในงานวิจัยนี้ใช้แป้งมันสำปะหลัง เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังเป็นแป้งที่ผลิตมากที่สุดในประเทศไทย และเป็นแป้งสีขาว ไม่มีกลิ่น กาวแป้งเปียกใสและมีความเหนียวสูง

2.3 การจำแนก [3,12]

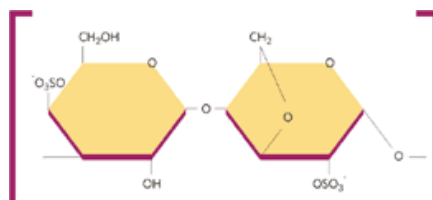
การจำแนก เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ซัลเฟตที่มีความยืดหยุ่นสูงเพราะมีรูปแบบการเกิดสายโซ่เกลียว และสกัดจากสาหร่ายทะเลสีแดง แบ่งเป็น 3 ชนิด คือ แคปปา (kappa, K) ไอโอตา (iota, I) และแลมดา (lambda, λ) การจำแนกทั้ง 3 ชนิด มีองค์ประกอบเป็นน้ำตาลกาแลคโตสที่ถูกเอสเทอริไฟด์ด้วยกรดซัลฟิวริกที่ตำแหน่งและระดับแตกต่างกัน ดังนี้

แคปปาคาราจีแนน สกัดจาก *Eucheuma cottonii* โครงสร้างประกอบไปด้วย 1,3-linked β-D-galactose-4-sulfate และ 1,4-linked 3,6-anhydro-β-D-galactose (ดังรูปที่ 2.6) ซึ่งในโมเลกุลของ 3,6-anhydro-D-galactose คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 จะถูกเอสเทอริไฟด์ด้วยหมู่ซัลเฟตประมาณ 20-30% และบางส่วนของ 1,4 linked อาจเป็น galactose-6-sulfate แทน 3,6-anhydro-D-galactose แคปปาคาราจีแนนมีความไวต่อโปแตสเซียมและสามารถตกตะกอนแยกออกมาจากการจำแนกชนิดอื่นได้โดยใช้โปแตสเซียมคลอไรด์



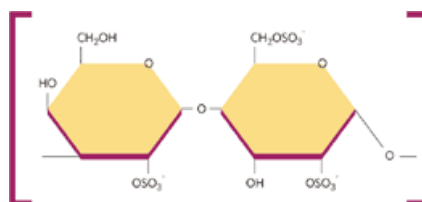
รูปที่ 2.6 โครงสร้างแคปปาคาราจีแนน [13]

ไอโอตาการาจีแนน สกัดจาก *Eucheuma spinosum* โครงสร้างประกอบด้วย 1,3-linked β -D-galactose-4-sulfate และ 1,4-linked 3,6-anhydro- β -D-galactose-2-sulfate (ดังรูปที่ 2.7) ไอโอตาการาจีแนนมีความไวต่อแคลเซียม



รูปที่ 2.7 โครงสร้างไอโอตาการาจีแนน [13]

แลมดาการาจีแนน โครงสร้างประกอบด้วย 1,3-linked β -D-galactose-2-sulfate และ 1,4-linked β -D-galactose-2,6-disulfate (ดังรูป 2.8)



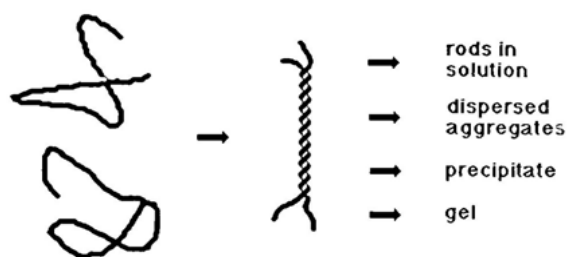
รูปที่ 2.8 โครงสร้างแลมดาการาจีแนน [13]

การาจีแนนมีลักษณะเป็นผงสีเหลืองอ่อนและมีขนาดอนุภาค 200 mesh มีอุณหภูมิจุดหลอมเหลว(melting point) 50-70 °C (ดังรูปที่2.9) สมบัติของการาจีแนนจะขึ้นอยู่กับประจุลบของหมู่ซัลเฟตที่อยู่ในโมเลกุลเป็นสำคัญและยังแตกต่างกันในการาจีแนนแต่ละชนิดอีกด้วย การาจีแนนละลายได้ดีในน้ำร้อนและมีความคงตัวที่ค่าความเป็นกรด-ด่างสูงกว่า 7 ถ้าค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่า 7 ความคงตัวจะลดลง การาจีแนนสามารถทำปฏิกิริยากับโปรตีนได้ สำหรับแคลป้าและไอโอตาการาจีแนนมีสมบัติในการเกิดเจลเมื่อการาจีแนนอยู่ในรูปสารละลายในน้ำจะมีโครงสร้างเป็นสายโซ่ที่ไม่เป็นระเบียบ (random coil) ขณะเย็นตัวลงจะเกิดโครงสร้างเป็นสายโซ่เกลียวคู่ (double helices) (ดังรูปที่ 2.10) เมื่อปล่อยให้เย็นลงจะเกิดเป็นโครงสร้าง 3 มิติ โดยพอลิเมอร์แต่ละสายจะรวมตัวเข้ามาใกล้กัน และเกิดเป็นจุดเชื่อมโยง (junction point) ซึ่งเมื่อเกาะรวมกันมากขึ้นจะทำให้เกิดการแข็งตัวเป็นเจล และเมื่อศึกษากลไกการเกิดเจลของนมกับแคลป้าการาจีแนน พบว่าจะเกิดเจลขณะลดอุณหภูมิ ขั้นตอนแรกเป็นระยะก่อนเกิดเจล ขั้นตอนต่อมาจะเกิดปฏิกิริยาระหว่าง

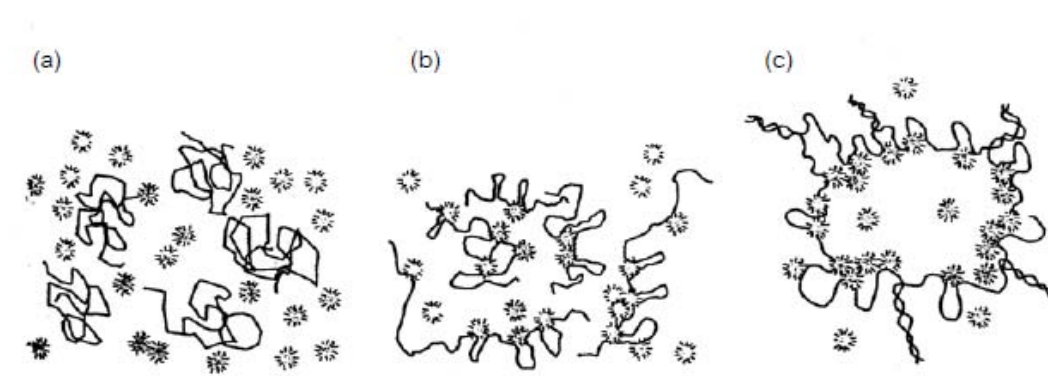
แคลปาคาร์จีแนกับโปรตีน และโปรตีนกับโปรตีน ในขั้นตอนสุดท้ายแคลปาคาร์จีแนจะรวมตัวกันทำให้เกิดโครงสร้าง และความแน่นเนื้อของเจล (ดังรูปที่ 2.11) และการศึกษาผลของอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง casein micelles และไอออนตาคาร์จีแนในนมพบว่าเมื่ออุณหภูมิของสารละลายนมต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิด coil-helix ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างสายของไอออนตาคาร์จีแนใน helical form บางส่วนกับ casein micelles ได้



รูปที่ 2.9 ลักษณะของผงคาร์จีแน [13]



รูปที่ 2.10 การเกิดโครงสร้างเกลียว (helix) ในคาร์จีแน [14]



รูปที่ 2.11 กลไกการเกิดเจลของนมกับแคลปาคาร์จีแน : (a) เคซีนไมเซลและสายโซ่ที่ไม่เป็นระเบียบ (random coil) ของคาร์จีแนในสารละลาย (b) การเกิดปฏิกิริยาของเคซีนไมเซลกับคาร์จีแน (c) เกิดการสร้างเจลจากคาร์จีแน [14]

เจลที่เตรียมจากการาจีแนนมีคุณสมบัติเปลี่ยนกลับไปมาได้ด้วยความร้อน (thermoreversiblegel) และสามารถเกิดปฏิกิริยากับโปรตีนได้ โดยแคลปการาจีแนนให้เจลที่มีลักษณะเปราะ แตกง่าย และเกิดการแยกตัวของน้ำ (syneresis) การแยกตัวของน้ำจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษา เป็นผลมาจากร่างแหพอลิเมอร์ในโครงสร้าง 3 มิติ ของเจลหดตัวเข้าใกล้กันมากขึ้นทำให้น้ำที่อยู่ในร่างแหถูกบีบออกมาด้านนอกของเจล และพบว่าเมื่อผสมโกลด์บีนกัมกับแคลปการาจีแนนจะช่วยลดการแยกตัวของน้ำของเจลลงได้ และการใช้บูกร่วมกับแคลปการาจีแนนจะช่วยให้เจลที่เกิดขึ้นมีความแข็งแรงและความยืดหยุ่นมากกว่าการใช้แคลปการาจีแนนเพียงอย่างเดียว และสำหรับไอออตาการาจีแนนให้เจลที่มีความยืดหยุ่นและไม่เกิดการแยกตัวของน้ำ สำหรับแลมดการาจีแนนไม่มีสมบัติในการเกิดเจล การเติมโลหะไอออนจะมีผลต่อการเกิดเจล เช่น แคลปการาจีแนน เมื่อเติมโปแตสเซียมไอออน (K^+) จะเกิดเจลที่มีความยืดหยุ่น แต่ถ้าเติมแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) จะเกิดเจลที่มีเนื้อแข็งทำให้เกิดรูปทรงได้ง่าย ซึ่งตรงกันข้ามกับไอออตาการาจีแนน เมื่อเติมแคลเซียมไอออนจะเกิดเจลที่มีความยืดหยุ่น เป็นต้น คุณสมบัติที่สำคัญของการาจีแนน แสดงดังตารางที่ 2.7 [14]

ตารางที่ 2.7 เปรียบเทียบคุณสมบัติของการาจีแนนแต่ละชนิด [12]

คุณสมบัติ	แคลป์	ไอโอด้า	แลมด้า
<u>การละลาย</u>			
น้ำอุณหภูมิ 80°C	ละลาย	ละลาย	ละลาย
น้ำอุณหภูมิ 20°C	ละลายในสารละลาย	ละลายในสารละลาย	ละลาย
	เกลือโซเดียม	เกลือโซเดียม	
นมอุณหภูมิ 80°C	ละลาย	ละลาย	ละลาย
นมอุณหภูมิ 80°C	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย	ให้ลักษณะขุ่น
สารละลายน้ำตาล 50%	ละลายขณะร้อน	ไม่ละลาย	ละลาย
สารละลายเกลือ 10%	ไม่ละลาย	ละลายขณะร้อน	ละลายขณะร้อน
<u>การเกิดเจล</u>			
เกิดเจล	กับโพแทสเซียมไอออน	กับแคลเซียมไอออน	ไม่เกิดเจล
ลักษณะของเจล	เปราะ แตกง่าย	ยืดหยุ่น	ไม่เกิดเจล
การแยกตัวของน้ำ	เกิดการแยกตัวของน้ำ	ไม่เกิดการแยกตัวของน้ำ	ไม่เกิดการแยกตัวของน้ำ

2.4 พอลิเมอร์ผสม (Polymer Blend) [15]

ในอดีตมีการสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่เพื่อตอบสนองการนำไปใช้ประโยชน์เฉพาะทาง แต่ในปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์ได้เริ่มมีการนำพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ที่มีอยู่มาทำการผสมแทนการสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่ และเป็นที่รู้จักกันในชื่อของ *พอลิเมอร์ผสม* ซึ่งหมายถึงการนำพอลิเมอร์ตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาผสมกันทั้งนี้มีประโยชน์หลายประการด้วยกันคือ

- หลีกเลี่ยงปัญหาของความยุ่งยากจากการสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่
- ไม่ต้องลงทุนผลิตพอลิเมอร์ใหม่เพื่อนำไปใช้ประโยชน์เฉพาะทาง
- สามารถนำพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเด่นแต่ละชนิดมาผสมกัน เช่น การทำพอลิเมอร์ผสม

ของเทอร์โมพลาสติกซึ่งมีความเปราะและมีความทนทานแรงกระแทกได้สูง กับอีลาสโตเมอร์ซึ่งไม่เปราะแต่มีความแข็งต่ำ (Stiffness) เพื่อให้ได้พอลิเมอร์ใหม่ที่มีสมบัติรวมของพอลิเมอร์ที่นำมาผสม ซึ่งจะแตกต่างจากสมบัติของพอลิเมอร์หลักที่นำมาผสมกัน โดยขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น สภาวะในการผสม สมบัติการไหล สัณฐานวิทยา ซึ่งมีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ได้และการนำไปใช้งานของพอลิเมอร์ผสมตามต้องการ

2.4.1 การแบ่งชนิดของพอลิเมอร์ผสม

พอลิเมอร์ผสมสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

2.4.1.1 พอลิเมอร์ผสมรวมเป็นเนื้อเดียว (Miscible blend) หมายถึงพอลิเมอร์ที่นำมาผสมมีค่าบ่งชี้ความสามารถในการละลาย (Solubility parameter, δ) ใกล้เคียงกันเป็นผลให้พอลิเมอร์ผสมรวมเป็นเนื้อเดียว

2.4.1.2 พอลิเมอร์ผสมไม่รวมเป็นเนื้อเดียว (Immiscible blend) สามารถอธิบายได้จากสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์

$$\Delta G_{\text{mix}} = \Delta H_{\text{mix}} - T\Delta S_{\text{mix}}$$

เมื่อ ΔG คือ พลังงานอิสระกิบส์

ΔH คือ การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในการผสม

ΔS คือ การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีในการผสม

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

เนื่องจากพอลิเมอร์ส่วนมากเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ (Macromolecule) มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเป็นสาเหตุทำให้มีค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีในการผสมต่ำ ส่วนค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในการผสมมักมีค่าเป็นบวก ดังนั้นทำให้ค่าพลังงานอิสระกิบส์ของพอลิเมอร์ผสมมีค่ามากกว่าศูนย์เป็นผลให้พอลิเมอร์ผสมไม่รวมเป็นเนื้อเดียว หรือกล่าวได้ว่าพอลิเมอร์ที่นำมาผสมนั้นมีค่าบ่งชี้ความสามารถในการละลาย (Solubility parameter, δ) ต่างกันมาก เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียว สามารถแบ่งได้เป็น 2 ภูมิภาค คือพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบหลักของพอลิเมอร์ผสมเรียกว่า *วัฏภาคหลัก* (Matrix phase) ส่วนพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบส่วน

น้อยเรียกว่า *วัฏภาคกระจาย* (Dispersed phase) ซึ่งสามารถตรวจวิเคราะห์พื้นฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)

2.4.2 ความสามารถในการเข้ากันได้

จากการศึกษาพบว่าพอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่เป็นแบบพอลิเมอร์ผสมที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียว จึงเป็นผลให้พอลิเมอร์ผสมมีข้อบกพร่องดังนี้

- มีสมบัติการยึดติดที่พื้นผิวระหว่างวัฏภาคที่ไม่ดี
- มีค่าความตึงผิวที่พื้นผิวระหว่างสองวัฏภาค (Interfacial tension) สูง
- มีพื้นฐานวิทยา (Morphology) ที่ไม่เสถียรขณะผ่านกระบวนการแปรรูป

จากข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นนั้นทำให้นักวิทยาศาสตร์มีความสนใจในการแก้ไขข้อบกพร่องเหล่านั้น โดยมีการนำสารช่วยผสม (Compatibiliser) มาใช้เพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ (Compatibility) และให้ผลในการช่วยลดความตึงผิวที่พื้นผิวระหว่างสองวัฏภาค ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีพื้นฐานวิทยาที่เสถียรขณะผ่านกระบวนการแปรรูป มีวัฏภาคกระจาย (Dispersed phase) ที่มีขนาดเล็ก และทำให้มีสมบัติการยึดติดที่พื้นผิวระหว่างวัฏภาคดีขึ้น ซึ่งวิธีการที่สามารถทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้ดีขึ้น แบ่งออกเป็น 2 วิธีคือ

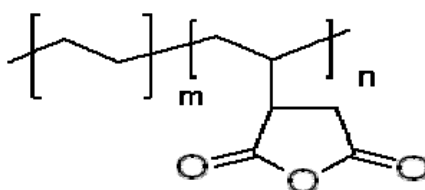
2.4.2.1 *Non-reactive Blending* คือการเติมสารช่วยผสมลงในพอลิเมอร์ผสมแบบไม่เกิดปฏิกิริยา ทั้งนี้สารช่วยผสมที่ใช้ควรมีสูตรโครงสร้างที่เหมือนกับพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน เพื่อให้เกิดการเกี่ยวพัน (Entanglement) กับวัฏภาคทั้งสองของพอลิเมอร์ผสม ดังนั้นสารช่วยผสมที่นิยมใช้คือ พอลิเมอร์ร่วม ซึ่งมีหลายชนิดคือพอลิเมอร์ร่วมแบบโคบล็อค แบบไตรบล็อค แบบกราฟท์ หรือแบบสุ่ม

2.4.2.2 *Reactive Blending* เป็นวิธีการที่เติมสารช่วยผสมลงในพอลิเมอร์ผสมแบบเกิดปฏิกิริยาเนื่องจากพอลิเมอร์ที่นำมาผสมนั้นมีหมู่ที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาเคมีขณะทำการผสม หรือทำให้เกิดการกราฟท์พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งให้มีหมู่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาเคมีกับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง

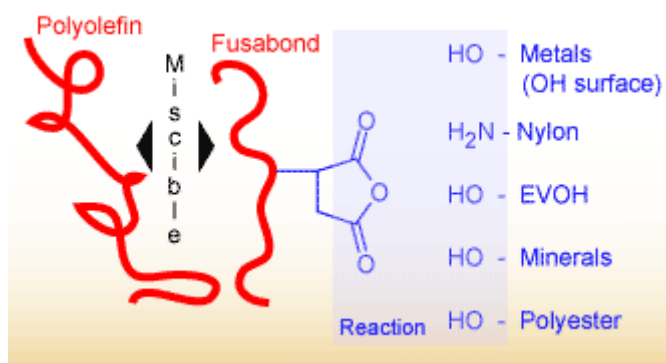
การเติมสารช่วยผสมเป็นการเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม แต่ไม่ใช่การทำให้พอลิเมอร์ผสมรวมเป็นเนื้อเดียว เนื่องจากสารช่วยผสมมีการจัดเรียงตัวระหว่างวัฏภาคของพอลิเมอร์ผสมทำหน้าที่เหมือนเป็นสะพานเชื่อมทั้งสองวัฏภาคให้ดีขึ้น ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีการยึดติดระหว่างวัฏภาค ทำให้วัฏภาคกระจายมีการกระจายตัวที่ดี และมีขนาดของวัฏภาคกระจายที่เล็กลงขณะผ่านกระบวนการแปรรูป

2.5 พอลิเอทิลีนกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรย (Polyethylene grafted maleic anhydride, PE-g-MA) [16]

พอลิเอทิลีนเป็นหนึ่งในพอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้วส่งผลให้เมื่อทำการผสมรวมกับวัสดุอื่นที่มีขั้วมักมีสมบัติด้านแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวไม่ดี แต่สามารถที่จะทำการแก้ไขได้โดยการเติมสารอีกชนิดลงไปเพื่อเพิ่มสมบัติการเข้ากันได้สำหรับในงานวิจัยนี้จะมีการเติมสารฟิวซาบอนด์ เอ็มบี 226ดี (Fusabond MB 226D เป็นสารช่วยผสม ซึ่งสารนี้เป็นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำต่อกิ่งกับมาเลอิกแอนไฮไดรย (PE-g-MA : Polyethylene grafted Maleic anhydride) มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.12 โดยมาเลอิกแอนไฮไดรยกราฟท์พอลิเอทิลีนเป็นการต่อกิ่งพอลิเมอร์ที่เสถียรแล้ว ซึ่งจะทำให้สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ (physicochemical properties) ดีขึ้น โดยการเพิ่มความเข้มข้นของพอลิเอทิลีน และความสามารถในการยึดติด พบว่าแอนไฮไดรยเป็นส่วนที่เกิดการเชื่อมโยงจะเกิดอันตรกิริยากับแป้งและคาร์บอนทำให้ความสามารถในการเข้ากันได้ของสารทั้งสองชนิดมีเพิ่มมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.12 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีนกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรย [17]



รูปที่ 2.13 การทำงานของพอลิเอทิลีนกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรย [18]

2.6 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizer) [19,20]

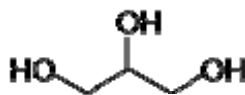
พลาสติไซเซอร์จะช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลแบบพลาสติก (Plastic flow) ซึ่งการไหลแบบพลาสติก หมายถึง การไหลของวัสดุที่ต้องอาศัยความเค้นหรือแรงน้อยที่สุดขนาดหนึ่งมากระทำต่อวัสดุนั้น ซึ่งความเค้นหรือแรงขนาดน้อยที่สุดที่ทำให้วัสดุเกิดการไหลนี้เรียกว่า Yield value

2.6.1 พลาสติไซเซชันและพลาสติไซเซอร์ (Plasticization and Plasticizers)

พลาสติไซเซชัน หมายถึง กรรมวิธีหรือกระบวนการที่ทำให้พอลิเมอร์เกิดการไหลแบบพลาสติก ซึ่งอาจทำได้โดยการให้ความร้อนหรือการใส่พลาสติไซเซอร์ โดยพลาสติไซเซอร์จะไปลดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ทำให้พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้มากขึ้นเป็นผลให้พอลิเมอร์อ่อนตัวและเปลี่ยนรูปร่างได้ง่ายขึ้น ซึ่งกระบวนการผสมพลาสติไซเซอร์เข้าไปในพอลิเมอร์โดยไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นระหว่างพลาสติไซเซอร์และพอลิเมอร์เรียกว่า **พลาสติไซเซชันภายนอก (External plasticization)** และเรียกพลาสติไซเซอร์ที่ผสมลงไปว่า **พลาสติไซเซอร์ภายนอก (External plasticizer)** ซึ่งพลาสติไซเซอร์ชนิดนี้จะช่วยให้พอลิเมอร์เกิดการไหลแบบพลาสติกโดยอำนาจการทำลาย ข้อดีของพลาสติไซเซอร์ภายนอก คือ สามารถทำให้พอลิเมอร์มีความอ่อนตัวน้อยหรือมากตามความต้องการในการใช้งานได้โดยการปรับชนิดและปริมาณของพลาสติไซเซอร์ที่ใส่ลงไป แต่ก็มีจุดด้อย คือ พลาสติไซเซอร์ที่ใช้อาจถูกสกัดออกจากพอลิเมอร์ได้ โดยทั่วไปแล้วพลาสติไซเซอร์ภายนอกเป็นของเหลวที่มีจุดเดือดสูง มีความดันไอต่ำ ระเหยยาก ละลายได้ในพอลิเมอร์ และมีอุณหภูมิ T_g ประมาณหรือใกล้เคียง $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ **พลาสติไซเซอร์แท้จริงหรือพลาสติไซเซอร์ปฐมภูมิ (True plasticizer or primary plasticizer)** และ **พลาสติไซเซอร์เสริมหรือพลาสติไซเซอร์ทุติยภูมิ (Secondary plasticizer)** โดยพลาสติไซเซอร์แท้จริงสามารถเข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิขึ้นรูปได้ดี สามารถใช้เดี่ยวๆ ได้ และไม่แยกออกมาจากพอลิเมอร์ ในขณะที่พลาสติไซเซอร์เสริมมีความสามารถในการเข้าเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์ได้จำกัด จึงไม่สามารถใช้ตามลำพังได้ ต้องใช้ควบคู่กับพลาสติไซเซอร์แท้จริงและช่วยเสริมประสิทธิภาพของพลาสติไซเซอร์แท้จริง นอกจากนี้การใช้พลาสติไซเซอร์เสริมยังช่วยลดต้นทุนการผลิตและปรับปรุงสมบัติอื่น ๆ ของพอลิเมอร์ด้วย

เมื่อพลาสติไซเซอร์ถูกเติมลงไปในโครงสร้างพอลิเมอร์แล้วทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนหรือการจับกลุ่มของโมเลกุล เนื่องจากพลาสติไซเซอร์ไปจับยึดกับพอลิเมอร์ด้วยพันธะโควาเลนต์ทุติยภูมิ (secondary covalent) ทำให้แรงระหว่างโมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์ที่อยู่ใกล้เคียงกันอ่อนลง เกิดโครงสร้างที่อ่อนตัว ส่วนพลาสติไซเซอร์ภายใน (Internal plasticizer) เป็นสารที่เติมลงไปแล้วทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสมในการเกิดพอลิเมอร์ (copolymerization) สมบัติของพลาสติไซเซอร์ที่ดีต้องรวมเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์ที่ใช้ โดยมีแรงระหว่างโมเลกุลของสารทั้งสองคล้ายคลึงกัน

มีจุดเดือดสูง ระเหยยาก ละลายในตัวทำละลายที่ใช้ได้้นอกจากนี้ไม่ควรมีสี กลิ่น รส ไม่เป็นพิษ และไม่ติดไฟ ถ้าใช้พลาสติกไซเซอร์ที่มีสมบัติเหมาะสมจะช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการแยกตัวระหว่างการนำพลาสติกไปใช้ พลาสติกที่ได้จะมีลักษณะทางกายภาพที่ดี สามารถทนความยืดหยุ่นตลอดการใช้งานพลาสติกไซเซอร์ที่นำมาใช้กับพลาสติกจากแป้งมีหลายประเภท ได้แก่ มอนอไดและโอลิโกแซ็กคาไรด์ พอลิออลและลิพิดหรืออนุพันธ์ของลิพิดพอลิออล (Polyols) พอลิไฮดรอกซีแอลกอฮอล์เป็นอนุพันธ์ของน้ำตาลซึ่งหมู่คีโตนหรืออัลดีไฮด์ถูกแทนที่ด้วยหมู่ไฮดรอกซิล พอลิออลบางชนิดพบในน้ำผลไม้ โดยเฉพาะพวกที่มีคาร์บอน 6 อะตอม เช่นซอร์บิทอล หรือสามารถผลิตจากปฏิกิริยาเติมไฮโดรเจนให้กับน้ำตาล (hydrogenation) พอลิออลมีสมบัติคงทนต่อสารเคมีและความร้อนได้ดีจึงไม่สลายตัวง่าย ดูดซับน้ำและเก็บความชื้นได้ดี ละลายน้ำได้ มีรสหวานน้อยกว่าน้ำตาล เนื่องจากถูกดูดซับน้ำได้ช้ามากจึงสามารถใช้กับผู้ที่โรคน้ำหวานได้กลีเซอรอล (Glycerol) หรือกลีเซอริน (Glycerine) เป็นพอลิออลที่มีคาร์บอน 3 อะตอม มีสูตรโครงสร้าง $C_3H_8O_3$ มีน้ำหนักโมเลกุล 92 เป็นผลพลอยได้จากการผลิตสบู่และกรดไขมัน มีสมบัติเป็นของเหลวที่มีความหนืด มีรสหวาน 0.6 เท่าของน้ำตาลสามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำและแอลกอฮอล์ได้ดีมาก เป็นสารที่ละลายน้ำได้ดีพอสมควร ดูดความชื้นจากอากาศได้ปานกลาง โครงสร้างโมเลกุลแสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 โครงสร้างของกลีเซอรอล [21]

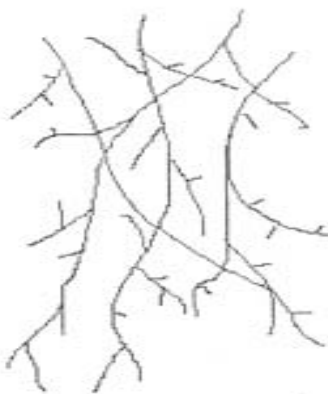
2.7 พอลิเอทิลีน (Polyethylene ,PE) [22,23,24]

2.7.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene)

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เป็นเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดแรกที่ถูกนำมาใช้ในการค้า เริ่มผลิตครั้งแรกในปี ค.ศ. 1930 ที่ประเทศอังกฤษ โดยบริษัท Imperial Chemical Industries (ICI) โดยมีกระบวนการผลิตและลักษณะโดยทั่วไปของ LDPE ดังนี้ คือ

- ความดันที่ใช้ในการผลิตสูงมาก ประมาณ 1,000 – 3,000 บรรยากาศ (15,000 – 45,000 psi)
- เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันผ่านกลไกอนุมูลอิสระโดยมีออกซิเจนหรือเปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่ม ทำให้เกิดโซ่กิ่งจำนวนมาก ซึ่งโซ่กิ่งโดยมากเป็นหมู่อัลคิลสายสั้นๆ เช่น เอทิลหรือบิวทิลซึ่งเกิดจากกลไก Intramolecular backbiting

- อุณหภูมิที่ใช้ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน คือ $200 - 400\text{ }^{\circ}\text{C}$
- มีความหนาแน่นอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.91 ถึง 0.93 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร การกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลกว้าง และมีกิ่งก้านสาขาภายในโมเลกุลมาก
- โมเลกุลของ LDPE มีสายโซ่หลักเป็นคาร์บอนที่มีหมู่ข้างเคียงของคาร์บอนสี่ถึงหกอะตอมติดกับสายโซ่หลักอย่างสุ่มๆ และโครงสร้างของสายโซ่ LDPE แสดงดังรูปที่ 2.15

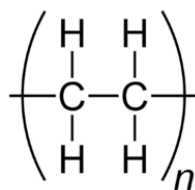


รูปที่ 2.15 โครงสร้างของสายโซ่พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) [24]

สมบัติโดยทั่วไปของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) มีดังต่อไปนี้

- มีความหนาแน่น และจุดหลอมเหลวต่ำ เมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง
- มีความเป็นผลึกต่ำ ประมาณ 50 – 70%
- มีการไหลตัวที่ดี มีค่า Melt Flow Index อยู่ในช่วง 0.1 – 10.9 g/10 นาที
- มีค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) ดีพอสมควร
- มีการซึมผ่านของไอน้ำที่ดี เหมาะสำหรับงานที่ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์
- ฟิล์มที่ได้จาก LDPE จะมีความเป็นเงามันดี (High Gloss) มีความเป็นฝ้าต่ำ (Low Haze) และเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ค่อนข้างดี (Good Dielectric property)

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำมีการใช้อย่างกว้างขวางเพราะว่าราคาไม่แพง ยืดหยุ่นได้ ทนทานมาก และทนต่อสารเคมีกรดและด่าง อีกทั้งยังแปรรูปได้ง่าย เป็นฉนวนได้ดีและไม่มีสารพิษที่เป็นอันตรายต่อร่างกายมนุษย์ มีความสามารถในการรับแรงกระแทก และมีความยืดหยุ่น LDPE ถูกนำมาขึ้นรูปเป็นขวด หีบห่ออาหาร และของเล่นต่างๆ และสูตรโครงสร้างโมเลกุล LDPE แสดงดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ [25]

การใช้งานของ LDPE ในปัจจุบัน

LDPE สามารถนำไปใช้แปรสภาพเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น

-ใช้ในงานบรรจุภัณฑ์ฟิล์มและงานเคลือบ (Laminate) หลายๆ ชั้น เช่น ฟิล์มหดหุ้ม (Shrink Wrap) หรือถุงที่ต้องการความใสมากๆ

-งานฉีดแบบ (Injection Moulding)

-อื่นๆ เช่น ฟิล์มอัดรีดร่วม (Coextrusion) งานรีดท่อ (Pipe Extrusion) งานเคลือบสายไฟ และเคเบิล (Wire and Cable Coating)

2.7.2 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear low density polyethylene ;

LLDPE)

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นผลิตจากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบซีเกลอร์-นัตตา (Ziegler-Natta) หรือแบบฟิลลิปส์ (Phillips) โดยใช้ความดันต่ำ ในกระบวนการผลิตมีการใส่โคมอนอเมอร์จำพวก 1-alkene เช่น 1-butene (นิยมใช้มากกว่าและราคาถูก) 1-hexene 1-octene หรือ 4-methylpentene ลงไปประมาณร้อยละ 10 ทำให้มีสายโซ่คาร์บอนสั้นๆ เกิดขึ้นที่พอลิเมอร์หลัก ดังนั้นพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นจึงเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่มีจำนวนโซ่กิ่งน้อยกว่า และลักษณะของกิ่งจะสั้นกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ นอกจากนี้ยังมีผลทำให้ความสม่ำเสมอของโมเลกุลและความเป็นผลึกลดลง สมบัติโดยทั่วไปคล้ายพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำโดยมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.915–0.925 g/cm³ แต่มีความแข็งแรงมากกว่าจึงนิยมใช้ในการผลิตฟิล์ม และมีโครงสร้างของสายโซ่ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 โครงสร้างของสายโซ่พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) [24]

2.8 สารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติกพีไอล์ (P-life Degradable Plastic) [26,27]

พีไอล์ (P-life) เป็นชื่อทางการค้าของสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติกของบริษัทพีไอล์ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยเป็นเทคโนโลยีที่มีการจดสิทธิบัตรตาม US Pat.No.6,482,872 “Process for Manufacturing a Biodegradable Polymeric Composite” และสารเติมแต่งพีไอล์ (P-life) เป็นสารผสมสูตรเฉพาะที่สามารถเกิดการย่อยสลายได้โดยประกอบด้วยโลหะทรานซิชันที่เป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Pro-oxidant catalysts) และนิยมใช้กับพอลิโอลิฟิน เช่น พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน เนื่องจากพอลิเมอร์กลุ่มนี้ไม่ย่อยสลายหรือเกิดการย่อยสลายได้ช้ามาก ดังนั้นจึงมีการเติมสารพีไอล์ลงไปในพอลิโอลิฟินเพียง 1-3% เพื่อเร่งอัตราการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันได้เร็วขึ้นภายหลังการทิ้งจึงทำให้เกิดการย่อยสลายเร็วขึ้น ซึ่งขั้นตอนการเสถียรภาพของสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก (P-life Degradable Plastic) เป็นดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เกิดการย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยพอลิโอลิฟินที่มีการเติมพีไอล์เมื่อเจอแสงอาทิตย์ ความร้อนและก๊าซออกซิเจน จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้เกิดการตัดขาดของสายโซ่พอลิเมอร์ผลที่ได้คือ น้ำหนักโมเลกุลลดลงและได้ผลิตภัณฑ์ข้างเคียง เช่น กรดคาร์บอกซิลิก

ขั้นตอนที่ 2 เกิดการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ภายในดิน โดยพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันจากขั้นตอนที่ 1 จะถูกย่อยสลายต่อโดยจุลินทรีย์ในธรรมชาติทำให้ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และมวลชีวภาพ

ส่วนประกอบและสมบัติเบื้องต้น

- เกลือโลหะของกรดไขมัน (Metal Salt of Fatty Acid) 50-70%
- โลหะที่หายาก (Rare Earth Compound) 10-20%
- สารหล่อลื่น (Lubricant) 10-20%
- ได้ผ่านการรับรองจาก FDA ซึ่งสามารถใช้เป็นผลิตภัณฑ์ที่สัมผัสกับอาหารได้
- จุดหลอมเหลว (Melting Point) 80-95 °C

2.9 หลักการของเครื่องมือผสมและการขึ้นรูปที่ใช้ในงานวิจัย

2.9.1 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin screw extruder) [28]

เครื่องอัดรีดจัดเป็นเครื่องมือที่มีจุดประสงค์หลากหลายในกระบวนการแปรรูปพอลิเมอร์ กล่าวคือ เม็ดพลาสติกที่ป้อนเข้ามาในระหว่างสกรูของเครื่องอัดรีดและกระบอกใส่สกรู (barrel) จะถูกอัดหลอม ผสม เกิดขึ้นในระหว่างที่มีการไหลผ่านไปตามท่อและออกไปทางหัวคาย ทั้งนี้โดยอาศัยความแตกต่างของความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวของสกรูและกระบอกใส่สกรูทำให้เกิดพลังงานเฉือน (shearing energy) ช่วยในการผสมและหลอมเหลว ในกรณีของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่อาจทำให้การผสมและการเฉือนเพิ่มขึ้น โดยอาศัยอุปกรณ์เสริมไปติดเพิ่มระหว่างส่วนของเฟืองสกรู (screw flights) (รูปที่ 2.18 และ 2.19) ในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ เพื่อเตรียมเม็ดพอลิเมอร์ผสม ซึ่งเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ที่ใช้มีลักษณะเป็นแบบมีเฟืองไม่ตรงกันแต่หมุนไปทางเดียวกัน (Co-rotating Intermeshing Twin screw extruder) จึงทำให้เกิดการผสมที่ดี โดยสกรูมีความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) = 40:1 และมีบริเวณให้ความร้อน (Heating Zone) 10 บริเวณ



รูปที่ 2.18 ส่วนประกอบเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ [29]



รูปที่ 2.19 ลักษณะการเรียงตัวของเม็ดสกรู [29]

2.9.2 กระบวนการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม[30]

การเป่าฟิล์มเป็นกระบวนการแปรรูปพลาสติกแบบต่อเนื่องเช่นเดียวกับกระบวนการอัดรีดอื่นๆ การผลิตเริ่มต้นจากการอัดรีดท่อเทอร์โมพลาสติกหลอม ดายที่ใช้เป็นแบบวงแหวนสองชั้น (Annular die) โดยการอัดรีดในแนวตั้งฉากกับแนวของเครื่องอัดรีดหลังจากนั้นทำการดึงท่อพลาสติกในแนวแกนของการอัดรีด (axial direction) แล้วใช้ลมเป่าท่อในขณะเดียวกันทำให้พลาสติกหลอมพองตัวออกในแนวรัศมี (radial direction) เกิดเป็นลูกโป่ง ที่มีผนังบาง (thin-walled bubble) เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกโป่งจะมีค่ามากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวดายหลายเท่า ลูกโป่งที่ร้อนจะถูกหล่อเย็นด้วยลมเป่าที่ผิวด้านนอกของลูกโป่ง โดยมีหัวเป่าเป็นลักษณะวงแหวนอยู่ด้านนอกของหัวดาย (เรียกว่า air ring) วงแหวนจะเป็นตัวปรับทิศทางของลมเป่าให้กระทบลูกโป่งในแนวตั้งฉาก และทำให้กระแสนลมเป่ามีความสม่ำเสมอไม่พุ่งออกไปตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่ง ทำให้การหล่อเย็นมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ลักษณะของเครื่องและกระบวนการเป่าฟิล์มแสดงดังรูปที่ 2.20 ลูกโป่งจะถูกปรับให้มีขนาดที่เหมาะสมและถูกจำกัดอยู่ในส่วนที่ช่วยพองฟิล์ม (sizing basket or calibration unit) หลังจากนั้น รวบลูกโป่งโดยป้อนให้ลูกโป่งเคลื่อนที่ผ่านแผ่นโลหะหุ้มก้ามมะหยี่ที่ตีบเข้า (collapsing boards) และป้อนเข้าในช่องว่างของลูกกลิ้งสองตัว (nip rolls) ทำให้ลูกโป่งแบนลงเป็นฟิล์มสองชั้น หลังจากนั้นทำการดึงฟิล์ม โดยใช้หน่วยดึง (haul-off unit) และตอนสุดท้ายฟิล์มจะถูกพันเป็นม้วนด้วยตัวม้วนฟิล์ม (winder) แล้วนำไปทำเป็นถุงหรือนำไปทำผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นๆต่อไป

ปัจจัยที่สำคัญต่อการเป่าฟิล์ม เช่น ความเร็วของสกรู อัตราการดึง และขนาดของลูกโป่งที่เหมาะสมกับส่วนพองฟิล์ม การปิดอากาศที่ใช้เป่าเข้าภายในลูกโป่ง มีการใช้เทอมที่สำคัญในการอธิบายกระบวนการแปรรูปพลาสติกโดยการเป่าฟิล์ม เช่น อัตราการพองตัวของลูกโป่ง (Blow-up ratio) และอัตราการดึง (Draw-down ratio)

อัตราการพองตัวของลูกโป่ง (Blow-up ratio) หมายถึงอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกโป่งกับเส้นผ่านศูนย์กลางของดาย โดยทั่วไปอัตราการพองตัวของลูกโป่งจะมีค่าอยู่ระหว่าง 2:1 ถึง 6:1 ซึ่งหมายความว่า ดายตัวหนึ่งสามารถทำถุงได้หลายขนาด

อัตราการดึง (Draw-down ratio) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างความเร็วของฟิล์มที่ดึงโดยลูกกลิ้ง (หรือ โดยหน่วยดึง) กับความเร็วของการอัดรีดซึ่งความเร็วของการอัดรีดคำนวณได้จากน้ำหนักของพลาสติกที่ผลิตได้ต่อหน่วยเวลา แล้วแปรให้เป็นปริมาตรแล้วค่อนำปริมาตรหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของดาย

วัสดุที่ใช้ในการเป่าฟิล์มพลาสติกเป็นเทอร์โมพลาสติก เช่น พลาสติกในกลุ่มพอลิโอเลฟินส์ (LDPE, LLDPE, HDPE และ HMW-HDPE) จะเป็นพลาสติกที่ใช้ในกระบวนการเป่าฟิล์มมากที่สุด ในบรรดาพอลิโอเลฟินส์ มีการใช้ LDPE มากที่สุด นอกจากนี้พลาสติกอื่น ๆ ที่ใช้ในการเป่าฟิล์ม เช่น ไนลอน พอลิคาร์บอเนต พอลิไวนิลคลอไรด์ PET และ PP

เทอร์โมพลาสติกที่ใช้ในการเป่าฟิล์ม ต้องมีค่าความหนืดสูง และมีค่าดัชนีการไหลต่ำกว่าวัสดุที่ใช้ในการผลิตฟิล์มโดยกระบวนการอัดรีดแบบธรรมดา ตัวอย่างกรณี LDPE ที่ใช้ในการเป่าฟิล์ม มีค่าดัชนีการหลอมอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 1.0 กรัม/10 นาที (โดยทำการทดสอบตัวอย่างที่ 190 °C และใช้น้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม) ในขณะที่ LDPE ที่ใช้ในการผลิตฟิล์มโดยกระบวนการอัดรีดแบบธรรมดามีค่าดัชนีการหลอม อยู่ในช่วง 0.5 ถึง 6 กรัม/10 นาที

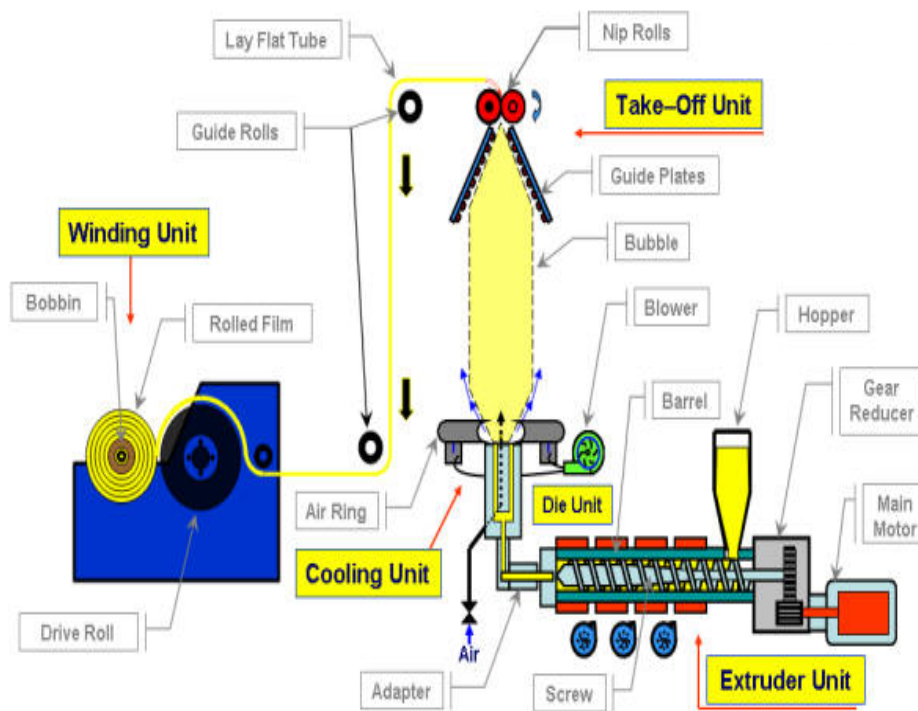
2.9.2.1 หลักการของฟิล์มเป่า [30,31]

ฟิล์มเป่ามีความหนาน้อยกว่า 0.020 นิ้ว (0.05 เซนติเมตร) โดยอุปกรณ์ที่ใช้ทำฟิล์มประกอบด้วยเครื่องอัดรีดต่ออยู่กับดายประเภทวงแหวน (annular die) ซึ่งโดยปกติจะมีทิศอยู่ในแนวตั้ง การผลิตฟิล์มเป่าแบบท่อ (tubular blown film) จะใช้อากาศและการดึงขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยอากาศที่อยู่ภายในจะช่วยทำให้เกิดฟองขนาดใหญ่ และมีส่วนของลูกกลิ้งช่วยรวบฟิล์มอยู่ทางด้านบน ฟิล์มจะขยายออกประมาณ 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเดิมตามแนวนานและขณะเดียวกันจะถูกดึงในทิศทางตั้งฉาก ผลที่ได้ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวในสองทิศทาง (biaxial orientation) เกิดการตกผลึก (crystallization) และแข็งตัว (freeze) อยู่ในทิศทางการจัดเรียงตัวนั้น

ฟิล์มที่เกิดการขยายตัวเนื่องจากการเป่ามีกระบวนการเป็นแบบแรงดึง (Tensile force) มากกว่าที่จะเป็นแรงเฉือน (shear force) เพราะความเค้นเฉือนมีลักษณะการตอบสนองเป็นแบบวิสโคอิลาสติกทำให้ความหนืดเนื่องจากแรงดึงมีค่าสูงถ้าความหนืดเนื่องจากแรงดึงไม่ขึ้นอยู่กับอัตราความเครียด เรียกว่า เทราโตเนียน (Troutonian) ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมความเค้นใน นิวโตเนียน ซึ่งแบ่งออกเป็นทำให้แข็งเนื่องจากการดึง (Tension stiffening) และการทำให้บางเนื่องจากการดึง (tension thinning) เช่น พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำแบบกึ่งมีการตอบสนองแบบอีลาสติกจะเป็นการทำให้แข็งเนื่องจากการดึง พอลิโอเลฟินส์แบบเส้นตรงและพอลิพรอพิลีน เป็นแบบการทำให้บางเนื่องจากการดึง เป็นต้น

เมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลวออกจากดายจะค่อย ๆ บางลง ความเค้นจะมากขึ้นและวัสดุที่ยังไม่แข็งพอจะเกิดความเครียดต่อไปเรื่อย ๆ จนในที่สุดเกิดการแตกของฟิล์ม การทำให้แข็งเนื่องจากการดึงทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นหรือมีการตอบสนองแบบอีลาสติกมากพอที่จะชดเชยการเพิ่มของความเค้น ทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น อัตราการตกผลึกเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อเสถียรภาพ กล่าวคือการผลิตฟิล์มโดยวิธีนี้จะมีลักษณะที่เรียกว่า แนวเส้นการแข็งตัว (Freeze line or frost line) เกิดขึ้นตามทางที่เกิดฟองซึ่งเป็นบริเวณที่พอลิเมอร์ตกผลึกทำให้ความใส (transparent) ลดน้อยลง

อิทธิพลของแนวเส้นแข็งตัวนี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดการดึงและทำให้เกิดการแข็งขึ้นด้วยเหตุนี้อัตราการตกผลึกจึงไม่ควรสูงเกินไปจนทำให้ไม่เกิดการจัดเรียงตัวในสองทิศทาง



รูปที่ 2.20 แสดงกระบวนการเป่าฟิล์ม [32]

2.9.2.2 สมบัติของฟิล์มเป่า [31]

สมบัติของฟิล์มเป่าได้แก่ ความแข็งแรงต่อการฉีกขาด [ทั้งในทิศทางตามเครื่องจักรและทิศทางตามขวาง โดยใช้วิธีทดสอบของ เอลเมนดอร์ฟ (Elmendorf)] ความทนทานต่อแรงกระแทก ความใส (ความขุ่น) ความเงาของผิว ความแข็งแรงดึง (ทั้งในทิศทางตามเครื่องจักรและทิศทางตามขวาง) เปอร์เซ็นต์การยืดออก ความหนา การจัดเรียงตัว และเปอร์เซ็นต์ความเปราะ เป็นต้น ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อสมบัติเหล่านี้ได้แก่ อุณหภูมิการหลอมเหลว ความหนาของฟิล์ม ความสม่ำเสมอของความหนาแผ่นฟิล์ม (วัดโดยใช้เครื่องวัดความหนา) อัตราส่วนการดึงลง อัตราส่วนการเป่า ความสูงของแนวเส้นแข็งตัว (frost line height) และความสม่ำเสมอของความดันซึ่งช่วยลดหรือกำจัดการเกิดเป็นคลื่น (surging)

ความหนาขึ้นอยู่กับช่องว่างของคาน อุณหภูมิของการหลอมเหลว อัตราส่วนการเป่าและอัตรา การดึงลง ส่วนความสูงของแนวเส้นแข็งตัวคือระยะทางเหนือคานที่เกิดความขุ่น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ การเกิดการตกผลึกในขณะที่ของหลอมเหลวเย็นตัวลง จัดเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญมากต่อความหนาของฟิล์ม พบว่าถ้าเพิ่มความสูงของแนวเส้นแข็งตัว เปอร์เซ็นต์ของความขุ่นจะเพิ่มขึ้น ความเงาของ

ผิวจะเพิ่มขึ้น แต่ความใสจะลดลง ความไม่สมบูรณ์ของผิวลดลง และความแข็งแรงต่อแรงกระแทก ลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าความสูงของแนวเส้นแข็งตัวยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการหลอมเหลวและ อัตราของการอัดรีดอีกด้วย โดยตัวแปรทั้งสองเมื่อเพิ่มขึ้น ความสูงของแนวเส้นแข็งตัวจะเพิ่มขึ้น อัตราส่วนการเป่าจะมีผลต่อความแข็งแรงต่อการดึง โดยจะเพิ่มขึ้นในทิศทางตามขวางและลดลงใน ทิศทางตามเครื่อง แต่จะมีผลตรงข้ามต่อความแข็งแรงต่อการฉีกขาด นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราส่วน การเป่าที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความทนทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น ในขณะที่อัตรา ส่วนการดึงลงที่ เพิ่มขึ้นจะให้ผลตรงกันข้าม

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิไลวรรณ โพล้งมี [33] ได้ทำการศึกษาการผลิตฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการคิดไฟได้จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช โดยทำ การผสมอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ร่วมกับแอนติโมนีออกไซด์ เพื่อปรับปรุงสมบัติการหน่วงการคิดไฟ ให้กับฟิล์มย่อยสลายโดยใช้พอลิเอทิลีนกราฟท์มาเลอิกแอนไฮดรายเป็นสารช่วยผสม และ กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ นำมาผสมด้วยเครื่องผสมความเร็วสูงและเครื่องอัดรีดแบบเกลียว หนอนคู่ แล้วทำการขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยเครื่องเป่าขึ้นรูปฟิล์มบาง โดยทำการศึกษาหาปริมาณ พลาสติกไซเซอร์และปริมาณสารช่วยผสมที่เหมาะสม ที่มีต่อการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิ เอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช จากนั้นทำการศึกษาถึงปริมาณของ อะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ และปริมาณของแอนติโมนีออกไซด์ ในฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการ คิดไฟได้ที่มีต่อสมบัติการเผาไหม้ตามมาตรฐาน UL 94V-0 Test สมบัติการย่อยสลายในดิน และ สมบัติอื่นๆ ได้แก่ลักษณะทางสัณฐานวิทยา สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อนและสมบัติ เชิงกล จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณกลีเซอรอล 18% และปริมาณพอลิเอทิลีนกราฟท์มาเลอิก แอนไฮดราย 3% โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เป็นปริมาณที่เหมาะสมต่อการ เตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช โดยทำ ให้ฟิล์มมีสมบัติเชิงกลและค่าร้อยละความเป็นผลึกสูงที่สุด ผลจากการศึกษาลักษณะทางสัณฐาน วิทยา พบว่าแป้งมันสำปะหลังในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีการกระจายตัวที่ดีในพอลิเมอร์ผสม ผล การศึกษาสมบัติการเผาไหม้และสมบัติการย่อยสลายในดินของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการ คิดไฟได้พบว่า ฟิล์มมีอัตราการเผาไหม้ที่ลดลงจนไม่เกิดการลุกติดไฟในขณะที่ทำการทดสอบ และ ฟิล์มมีแนวโน้มที่จะเกิดกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพในดินได้เร็วขึ้น เมื่อมีปริมาณของ อะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ และปริมาณของแอนติโมนีออกไซด์เพิ่มขึ้น ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน พบว่าอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์และแอนติโมนีออกไซด์มีผลให้อุณหภูมิการสลายตัวของ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ มีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากพอลิเมอร์มีความสามารถในการ

ด้านทานความร้อนดีขึ้น ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่าฟิล์มมีสมบัติเชิงกลลดลงเล็กน้อยซึ่งให้ผลสอดคล้องกับลักษณะทางสัณฐานวิทยา

Huang C.Y และคณะ [34] ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของสารช่วยผสมที่มีต่อการย่อยสลายทางชีวภาพและคุณสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้ง ศึกษาผ่าน 2 กระบวนการและทำการสังเคราะห์สารช่วยผสม 2 ชนิด คือ มาลิกแอโนไฮดรอกไซด์คอร์ก กับ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ที่ผ่านการเคลือบด้วย Plasma (Ma-g-PLDPE) และ กรดอะคิลิกคอร์ก กับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ผ่านการด้วย Plasma (AAc-g-PLDPE) ซึ่งค่า Grafting degree ของ Ma-g-PLDPE เท่ากับ 1.90×10^{-4} โมล/กรัม และ AAc-g-PLDPE เท่ากับ 2.5×10^{-4} โมล/กรัม ดังนั้น Ma-g-PLDPE จึงเป็นสารช่วยผสมที่มีประสิทธิภาพมากกว่า AAc-g-PLDPE เพราะ หมู่แอโนไฮดรอกไซด์ทำให้เกิดความเป็นขี้ว และการเชื่อมโยงภายในโมเลกุลเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งผลของการผสมสารช่วยผสม คือ Ma-g-PLDPE กับ กลีเซอรอล ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำแป้ง กับ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมตาม ก่อนการผสมในเครื่องผสมเกลียวหนอนเดี่ยว เมื่อเพิ่มปริมาณสารช่วยผสมจะทำให้ขนาดอนุภาคของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ลดลง หลังการผสม เนื่องจากหมู่แอโนไฮดรอกไซด์ที่แตกตัวเป็นอนุมูลอิสระไม่สามารถทำปฏิกิริยากับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำได้ โดยอนุมูลแอโนไฮดรอกไซด์จะทำให้รูปร่างของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ มีความสม่ำเสมอมากขึ้น และเมื่อทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ เป็นเวลา 2 สัปดาห์ พบว่า น้ำหนักของพอลิเมอร์ ลดลงไป 65 %wt โดยการเติมสารช่วยผสมที่มีหมู่แอโนไฮดรอกไซด์จะทำให้น้ำหนักของพอลิเมอร์ลดลงมากกว่าไม่เติมสารช่วยผสม

Rodriguez-Gonzalez F.J. และคณะ [35] ได้ศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช (Thermoplastic starch) ด้วยกระบวนการที่แตกต่างกัน ซึ่งจะลดกระบวนการผสมให้ได้ผลในขั้นตอนเดียว (one-step process) โดยจะทำการรวมเครื่องผสมแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (single screw extruder) เข้ากับเครื่องผสมแบบเกลียวหนอนคู่ (twin screw extruder) ซึ่งจะทำให้การผสมด้วยระบบหลอมเหลว โดยจะทำการหลอมเหลวพอลิเอทิลีนด้วยเครื่องผสมแบบเกลียวหนอนเดี่ยว จากนั้นจะฉีดพอลิเอทิลีนที่หลอมเหลวดีแล้วเข้าเครื่องผสมแบบเกลียวหนอนคู่ที่มีเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช หลอมเหลวและผสมเข้ากันดีกับกลีเซอรอล ซึ่งทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ พบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชดังกล่าวจะให้สมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การผสมด้วยกระบวนการอื่น โดยเฉพาะสมบัติเชิงกลในแนวเครื่องจักร รวมทั้งสามารถทำการผสมเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ได้ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นถึง 45 %ซึ่งจะเป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากจะช่วยให้เกิดการย่อยสลายตามธรรมชาติได้ง่ายยิ่งขึ้น

Thunwall M. และคณะ [36] ได้ศึกษากระบวนการขึ้นรูปเป็นฟิล์มของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch) โดยทำการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จากแป้งมันสำปะหลัง 2 ชนิด ได้แก่ แป้งมันสำปะหลังทั่วไป และแป้งมันสำปะหลังออกซิไดซ์ ร่วมกับกลีเซอรอล ซึ่งเป็นพลาสติกไซเซอร์ให้กับแป้งมันสำปะหลังดังกล่าว ด้วยเครื่องผสมแบบเกลียวหนอนคู่ (twin screw extruder) ที่ต่อเข้ากับเครื่องเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์ม (Blown film) โดยในขั้นตอนการผสมจะผสมแป้งมันสำปะหลังกับกลีเซอรอล ให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันก่อนที่จะนำไปผสมด้วยเครื่องผสมแบบเกลียวหนอนคู่ พบว่าเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังออกซิไดซ์ จะมีเสถียรภาพในการเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มที่ดีกว่า และฟิล์มที่ขึ้นรูปได้มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า

Tecante A. และคณะ [37] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมกลการไหลและสมบัติความเป็นวิสโคอิลาสติกของของผสมระหว่างแป้งข้าวโพดที่เกิดการเชื่อมโยงแล้วกับแคปลาการาจีแนในสถานะของเหลวหนืดและสถานะเจล พบว่าเมื่อให้แรงพลวัตน์ (Oscillatory test) ที่อุณหภูมิ 60 °C การกระจายตัวของของผสมส่วนใหญ่มีพฤติกรรมคล้ายของแข็ง (Solid-like) และพฤติกรรมคล้ายของแข็งนี้จะเกิดน้อยลงเมื่อความเข้มข้นของแป้งต่ำ และเมื่อทำให้เย็นลงที่อุณหภูมิ 25 °C มีแนวโน้มของพฤติกรรมคล้ายของแข็งที่คล้ายกันกับที่อุณหภูมิ 60 °C แต่มีค่าอิลาสติกมอดุลัสสูงกว่าเล็กน้อย และมีลักษณะความยืดหยุ่นสูง ที่ความเข้มข้นของแป้งสูง

คอร์มีะ สะหัดอีดำ และคณะ [38] ได้ทำการศึกษาสมบัติของเจลผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังดัดแปร (ย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 นอร์มอล ที่ระยะเวลา 0, 0.5, 1, 2 และ 3 ชั่วโมง) กับพอลิแซคคาไรด์ 2 ชนิด คือ คาราจีแนน และวุ้น อัตราส่วนของแป้งต่อพอลิแซคคาไรด์ 100:0, 80:20, 60:40, 40:60, 20:80, 10:90 และ 0:100 และศึกษาผลของน้ำตาลซูโครส (0, 10, 15, 20 และ 25 เปอร์เซ็นต์) ต่อสมบัติของเจลผสม ได้แก่ ความหนืด อุณหภูมิการเกิดเจล อุณหภูมิการหลอมเหลว การแยกชั้น การจับน้ำออกจากเจล และลักษณะเนื้อสัมผัส ผลการศึกษาเจลผสมระหว่างแป้งกับคาราจีแนนพบว่า อัตราส่วนของแป้งมีผลต่อสมบัติของเจลผสมอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่อัตราส่วนของแป้งต่อคาราจีแนน 60 : 40 และ 40 : 60 ความหนืดของสารผสมลดลง การเซตตัวของเจลช้า อุณหภูมิการหลอมเหลวน้อยกว่าเจลคาราจีแนน เกิดการแยกชั้น และลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลด้อยลง แต่จะให้การจับน้ำที่ลดลง ส่วนที่อัตราส่วน 20 : 80 และ 10 : 90 ความหนืดของสารผสมสูงขึ้น การเซตตัวของเจล และอุณหภูมิการหลอมเหลวใกล้เคียงกับเจลคาราจีแนน ไม่เกิดการแยกชั้น บางชุดการทดลองมีลักษณะเนื้อสัมผัสดีกว่าและให้การจับน้ำต่ำกว่าเจลคาราจีแนน ส่วนระยะเวลาในการย่อยแป้งมีผลต่อสมบัติของเจลผสมอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการย่อยแป้งความหนืดของสารผสมจะลดลง อุณหภูมิการหลอมเหลว และการจับน้ำของเจลสูงขึ้น แต่ไม่มีผลในด้านลักษณะเนื้อสัมผัสของเจล โดยเฉพาะแป้งที่ไม่ผ่านการย่อยและผ่านการย่อยเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ส่วนใหญ่มีค่าสูงกว่าชุดการทดลองอื่น ส่วนเจลผสมระหว่างแป้งกับวุ้น ผลของสัดส่วนและระยะเวลาในการย่อยแป้งจะให้ผลในทำนองเดียวกับเจลผสมของแป้งกับคาราจีแนน โดยให้

อุณหภูมิการเกิดเจลอุณหภูมิการหลอมเหลว และการจับน้ำของเจลให้ผลดีกว่าเจลผสมของแป้งกับการาจีแนน และไม่เกิดการแยกชั้น ในขณะที่เนื้อสัมผัสของเจลส่วนใหญ่มีลักษณะด้อยกว่า ซึ่งไม่เหมาะต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ประเภทเยลลี่ และผลการศึกษาผลของน้ำตาลซูโครสต่อสมบัติของเจลผสมระหว่างแป้ง (ไม่ผ่านการย่อยและย่อยเป็นเวลา 2 ชั่วโมง) กับการาจีแนน ที่อัตราส่วน 20 : 80 และ 10 : 90 พบว่าความหนืดของสารผสม อุณหภูมิการเกิดเจล อุณหภูมิการหลอมเหลว และลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสูงขึ้นตามปริมาณของน้ำตาลซูโครสที่เพิ่มขึ้น ส่วนการจับน้ำของเจลลดลง โดยส่วนใหญ่ให้ผลที่ดีกว่าเจลผสมที่ไม่เติมน้ำตาลซูโครส

Fabio L. และคณะ [39] ได้ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพของฟิล์มชนิดรับประทานได้จากแป้งข้าวเจ้าผสมแคลปการาจีแนน พบว่าปริมาณความชื้นของฟิล์มกับปริมาณแคลปการาจีแนนที่ใส่ลงไปในฟิล์มมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกัน คือเมื่อปริมาณการาจีแนนเพิ่มขึ้นจะทำให้ฟิล์มมีปริมาณความชื้นมาก(เนื่องจากการาจีแนนดูดความชื้น) และจากการทดสอบด้วยเทคนิค DSC พบว่า ฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่ผสมแคลปการาจีแนนในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้ค่า Tg ลดลงที่เป็นเช่นนี้เนื่องความชื้น(ไอน้ำ)ที่มากขึ้นจะเข้าไปแทรกตัวระหว่างโมเลกุล ซึ่งทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์มีความยืดหยุ่น ดังนั้นค่า Tg จึงลดลง

Chaudemanche C. และคณะ [40] ได้ศึกษาความเข้ากันได้ สมบัติการไหลและสมบัติวิสโคอีลาสติก (viscoelastic) ของของผสมระหว่างแคลปการาจีแนนกับแป้งข้าวโพดที่ถูกทำให้เกิดเป็นเจลก่อน (Pregelatinised maize starch) เมื่อทำการศึกษาสมบัติการไหลและสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่อุณหภูมิ 60 °C และ 20 °C จากทดลองพบว่าการาจีแนนและแป้งข้าวโพดที่ถูกทำให้เกิดเป็นเจลก่อน มีลักษณะไม่เข้ากันเล็กน้อย (Incompatible) และต่อมาจะทำการศึกษาสมบัติวิสโคอีลาสติกในสถานะสารละลายที่อุณหภูมิ 60 °C โดยค่าความหนืดและมอดุลัสยืดหยุ่น (elastic modulus) ของของผสม จะเป็นฟังก์ชันกับองค์ประกอบของของผสมเมื่อความเข้มข้นทั้งหมดของพอลิเมอร์เท่ากับ 3 % ซึ่งพบว่าค่าความหนืดและมอดุลัสยืดหยุ่นของผสมมีค่าสูงกว่าค่าทางทฤษฎีของการาจีแนน ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปริมาตรกีดกัน (excluded volume effect) ของเม็ดแป้งที่มีอยู่ในสารละลายผสม จากนั้นจะศึกษาสมบัติวิสโคอีลาสติกในสถานะเจลที่อุณหภูมิ 20 °C ซึ่งพบว่ามอดุลัสยืดหยุ่นของของผสมไม่เพิ่มขึ้น จึงคาดว่าเกิดเนื่องมาจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของของผสมในสถานะเจลมีสูงและเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของเม็ดแป้งที่ไม่ละลาย

Ramakrishnan S.และคณะ [41] ได้ศึกษาพฤติกรรมการไหลและการหมุนระนาบแสง(Optical rotation)ของแคลปการาจีแนนในสารละลายกลีเซอรอลและซอพิทอล โดยทำการทดสอบความสามารถของการละลายในตัวทำละลาย (Solvent solubility parameter) พลังงานศักย์ทางเคมีของน้ำ (water chemical potential) ในวัฏภาคก๊าซ และค่าคงที่การนำไฟฟ้าตัวทำละลาย (Solvent

dielectric constant)จากการทดลองพบว่า ก๊าซเซอรอลและซอบิทอลมีผลต่อการเกิดเจล และทำให้การจี้แน่นเปลี่ยนโครงสร้างจากสายโซ่อิสระ (coil) กลายเป็นสายโซ่เกลียว (helix)

อันณพ รักรัตน์ [42] ได้ทำการศึกษาผลของสารเร่งการสลายตัวทางแสงที่มีต่อการสลายตัวของฟิล์ม ระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้สารเบนโซฟีโนนเป็นสารเร่งการสลายตัวทางแสง ในงานวิจัยได้ใช้พอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลือกแอนไฮโดรด์เป็นสารช่วยผสม และก๊าซเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ แล้วนำสารมาผสมในเครื่องผสมความเร็วสูงและเครื่องผสมเกลียวหอนกู่ หลังจากนั้น นำสารผสมไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการเป่าฟิล์ม โดยศึกษาหาประสิทธิภาพของเบนโซฟีโนนที่มีผลต่อการสลายตัวของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลัง และศึกษาสมบัติเชิงกล เชิงความร้อน ปริมาณการออกซิเดชัน สันฐานวิทยา จากนั้นนำฟิล์มไปฉายแสงยูวีและฟ้งดิน แล้วติดตามผลการสลายตัวจากการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกล (ความทนแรงดึง และมอดุลัส) การเกิดหมู่คาร์บอนิล และไฮดรอกซิล อุณหภูมิจุดหลอมเหลวผลึก ความเป็นผลึก และสันฐานวิทยา จากการทดลองพบว่า เบนโซฟีโนนไม่มีผลต่อสมบัติต่างๆของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อผสมแป้งมันสำปะหลังจะทำให้ความทนแรงดึง และมอดุลัสลดลง แสงยูวีมีผลทำให้ ความทนแรงดึงลดลงแต่ทำให้มอดุลัสเพิ่มขึ้น และพบว่าเบนโซฟีโนนช่วยเร่งการสลายตัวภายใต้แสง ยูวีทำให้สมบัติเชิงกลลดลงอย่างมาก จากการศึกษาปริมาณออกซิเดชัน พบว่า แสงยูวีมีผลทำให้เกิด หมู่คาร์บอนิลเพิ่มขึ้น และหมู่คาร์บอนิลจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ใช้ทำการทดลอง โดยฟิล์มที่ผสม เบนโซฟีโนนจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพิ่มขึ้นจากฟิล์มปกติ แต่ฟิล์มที่ฟ้งดินไม่พบหมู่คาร์บอนิล เนื่องจากไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแต่มีหมู่ไฮดรอกซิลลดลง เนื่องจากจุลินทรีย์ทำการย่อยสลาย แป้ง ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน พบว่าแสงยูวีมีผลทำให้ค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกลดลง เล็กน้อยในทุกสูตร เนื่องจากเกิดการขาดของสายโซ่พอลิเมอร์ แต่การฟ้งดินทำให้อุณหภูมิหลอมเหลว เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ ผลการตรวจสอบ โครงผลึก พบว่าแสงยูวีทำให้ ร้อยละความ เป็นผลึกเพิ่มขึ้น แต่ทุกสภาวะการทดลองไม่มีผลต่อโครงผลึก ผลการศึกษาสันฐานวิทยา พบว่าแสงยูวีทำให้พื้นผิวหน้าของฟิล์มพอลิเมอร์เป็นรูพรุน แตกร้าว เปราะ แต่การฟ้งดินพบว่า พื้นหน้าของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ผสมแป้งเกิดรูพรุน แต่ไม่แตกร้าและเปราะเหมือนการฉายแสงยูวี

Abd El-Remhim H.A. และคณะ [43] ได้ศึกษาผลการฟ้งดินและการฉายแสงที่มีต่อ การย่อยสลายของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ผสมแป้ง โดยเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มที่ผ่านการทดสอบการย่อยสลายกับไม่ทดสอบ ใช้สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งที่ไม่ทดสอบการฟ้งดินและฉายแสงเป็นตัวมาตรฐาน นำฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ผสมแป้งมา ทดลองฟ้งดินจากนั้นนำมาฉายแสงยูวี พบว่า ค่าความทนแรงดึง ลดลง 20-66% การฟ้งดินอย่างเดียว ทำให้ค่าความทนแรงดึงลดลง 10-26% และเกิดการเปลี่ยนแปลง สมบัติทางความร้อน โครงสร้าง ภายในโมเลกุล และสันฐานวิทยา ซึ่งวัดจากเทคนิค DSC , FTIR และSEM ตามลำดับ

พบว่าแสงยูวี เหนี่ยวนำให้เกิดอนุมูลอิสระทำให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่ายขึ้นทำให้เกิดการย่อยสลายทางแสง ส่งผล ทำให้อัตราการย่อยสลายทางชีวภาพเพิ่มสูงขึ้น

Star Color Co,Ltd [44] ได้เตรียมมาสเตอร์แบรชช่วยในการย่อยสลายพลาสติก โดยศึกษาการย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยใช้ความร้อนเป็นตัวเร่ง ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ(LDPE) ที่ผสมสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติกด้วยกระบวนการเป่าขึ้นรูป แล้วนำโดยนำขึ้นงานทดสอบไปแช่น้ำหนักก่อนทำการเอจิง และจากนั้นนำฟิล์มไปเอจิง (Ageing) ที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 12 วัน และนำชิ้นงานออกมาจากตู้อบทุกๆ 2 วัน เพื่อทำการชั่งน้ำหนัก และคำนวณน้ำหนักที่ลดลง จากการทดลองพบว่าฟิล์มที่มีการเติมสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก 1% สามารถทำให้ฟิล์มเกิดการย่อยสลายได้ 40% หลังจากทำการเอจิง 12 วัน และเมื่อเติมสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก 2% ฟิล์มทดสอบถูกย่อยได้ถึง 50%

Nazdaneh Y. [45] ได้ทำการศึกษาการย่อยสลายของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่มีการเติมสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก (P-life Degradable Plastic) ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน และมีความร้อนเป็นตัวเร่ง (Thermo-oxidation degradation) โดยทำการทดสอบที่สภาวะอุณหภูมิเท่ากับ 65 °C เป็นเวลา 240 ชั่วโมง (10 วัน) จากการทดลองพบว่าเมื่อทำการเอจิงเป็นเวลา 7 วัน ทำให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ลดลงจาก 131500 เป็น 23000 และหลังจากเอจิงเป็นเวลา 10 วัน น้ำหนักโมเลกุลลดลงเหลือเพียง 8800 ดังนั้นจึงแสดงว่าเกิดการย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน และจากนั้นได้ทำการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยหาปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นโดยทำการทดลองที่ 2 สภาวะคือ สภาวะคอมโพสและในดิน โดยใช้เวลาการทดลองทั้งหมดเป็น 84 วัน จากการทดลองพบว่าภายใต้สภาวะคอมโพส ที่อุณหภูมิ 58 °C ฟิล์มมีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของฟิล์มเป็น 19% และภายในดินที่อุณหภูมิ 23 °C สามารถเกิดการย่อยได้ 4 %