

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ [6]

พลาสติกที่ย่อยสลายได้ (Degradable plastic) หมายถึง พลาสติกที่ถูกออกแบบมาเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะแวดล้อม ก่อให้เกิดการสูญเสียสมบัติบางประการ ที่สามารถวัดได้ โดยใช้วิธีการทดสอบมาตรฐานที่เหมาะสมสำหรับพลาสติกและการใช้งานในช่วงเวลาหนึ่ง ผลการทดสอบสามารถนำมาใช้ในการระบุชนิดและประเภทของวัสดุย่อยสลายได้ โดยทั่วไปสามารถแบ่งกลไกการย่อยสลายของพลาสติกได้เป็น 5 ประเภท คือ

1. การย่อยสลายทางกล (Mechanical degradation)

การย่อยสลายทางกล คือการให้แรงกระทำแก่ชิ้นพลาสติก ทำให้ชิ้นพลาสติกแตกออกเป็นชิ้นเล็กๆ ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้โดยทั่วไปในกระบวนการรีไซเคิล

2. พลาสติกย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางเคมีโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidatively degradable plastic)

การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติก เป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจน และความชื้นหรือแสงสว่างเป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียรภาพทางแสงและความร้อน (Stabilizing additive) ทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ $RO\cdot$ และ $\cdot OH$ ที่ไม่เสถียร และเข้าทำปฏิกิริยาที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกพันธะและสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว

3. พลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytically degradable plastics)

พลาสติกย่อยสลายได้โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส เกิดขึ้นกับของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิเอโนไฮดราลด์ พอลิคาร์บอเนต และพอลิยูรีเทน ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic hydrolysis) และไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยา (Non-catalytic hydrolysis) ซึ่งประเภทแรกสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ แบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์เองในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (Internal catalytic degradation) และแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (External catalytic degradation) ซึ่งมี 2 ชนิด คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเอนไซม์ชนิดต่างๆ ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ใช่เอนไซม์ (Non enzyme) เช่น โลหะแอลคาไลด์ (Alkaline metal) เบส (Base) และกรด (Acid) ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติ ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี

4. พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastics)

การย่อยสลายของพอลิเมอร์ทางชีวภาพจากการทำงานของจุลินทรีย์ โดยทั่วไปมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน คือ ขั้นแรกเป็นการย่อยสลายให้โมเลกุลแตกพันธะ เรียกว่าขั้นดีพอลิเมไรเซชัน (Depolymerization) ซึ่งเกิดภายนอกสิ่งมีชีวิต เช่น แบคทีเรียหรือรา เนื่องจากขนาดและสมบัติที่ไม่ละลายของ

พอลิเมอร์ จุลินทรีย์ใช้เอนไซม์สลายสายโซ่โพลิเมอร์ทั้งแบบ Endo (ตัดพันธะแบบสุ่ม) และแบบ Exo (ตัดพันธะจากมอนอเมอร์ปลายสุดก่อนอย่างมีลำดับ) จนได้โมเลกุลที่เล็กลง จากนั้นเข้าสู่ขั้นที่สอง คือ มินอไรเซชัน (Mineralization) โดยสารประกอบที่ได้จากการย่อยจากขั้นแรกจะเข้าสู่เซลล์ของจุลินทรีย์ แล้วถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานในรูป ATP กลายเป็นก๊าซต่าง ๆ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซไนโตรเจน (N_2) น้ำ เกลือต่าง ๆ และชีวมวล (Biomass) ประสิทธิภาพของการย่อยสลายขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ ชนิดของจุลินทรีย์และสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ได้แก่ ออกซิเจน ความชื้น และอุณหภูมิ

5. พลาสติกย่อยสลายได้ด้วยแสง (Photodegradable plastic)

การย่อยสลายด้วยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความไวต่อแสงลงในพลาสติกหรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง สามารถเกิดการแตกพันธะได้ภายใต้แสงยูวี (UV) อยู่ในโครงสร้าง เช่น หมู่คีโตน (Ketone group) เมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับแสงยูวีจะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งไม่เสถียร จึงเข้าทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ แต่การย่อยสลายนี้ไม่สามารถเกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบขยะ หรือสภาวะแวดล้อมอื่นที่มีมืด หรือแม้กระทั่งชั้นพลาสติกที่มีการฉาบด้วยหมึกที่หนาмаกบนพื้นผิว เนื่องจากพลาสติกไม่ได้สัมผัสกับแสงยูวีโดยตรง

2.2 พลาสติกที่ย่อยสลายด้วยแสง[1]

พลาสติกย่อยสลายด้วยแสง (Photodegradable plastic) ส่วนใหญ่เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ประเภทเทอร์โมพลาสติก ซึ่งเตรียมจากการเติมสารเคมีที่มีหมู่ไวแสง หรือสังเคราะห์เป็นโคพอลิเมอร์เพื่อช่วยให้พันธะของพอลิเมอร์แตกหักง่ายขึ้นภายใต้แสงยูวี พลาสติกย่อยสลายด้วยแสงถูกออกแบบให้เกิดการแตกหักเมื่อได้รับแสงแดดเป็นเวลานานๆ ตัวสารไวแสงที่เติมลงไปได้แก่ Diketone, Ferrocene derivatives และ Carbonyl-containing species พลาสติกเหล่านี้สลายตัว 2 ชั้น แสงยูวี ทำให้พันธะเคมีแตกออกเหลือสารประกอบที่แข็งแรง มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ซึ่งสามารถแตกสลายต่อไปด้วยความเค้นกายภาพ เช่น ลม ผลัดกันที่ประเภทนี้ส่งผลด้านบวกเมื่อถูกทิ้งบนพื้นดินหรือทิ้งในทะเล

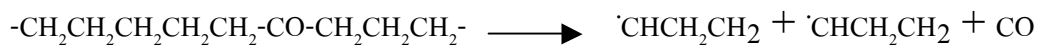
การย่อยสลายนี้ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น อุณหภูมิ ลักษณะทางภูมิศาสตร์ ความสกปรก น้ำและเงา แนวความคิดใหม่ในการสังเคราะห์พลาสติกย่อยสลายด้วยแสงจะเติมเกลือโลหะเพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อพลาสติกได้รับพลังงานแสงแดด ซึ่งเป็นพลังงานรูปหนึ่ง โมเลกุลของพลาสติกจะดูดกลืนพลังงานแสงทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Photo-oxidation) ทำให้สมบัติเชิงกลและกายภาพของพลาสติกเสื่อมลง และยังเป็นการช่วยให้จุลินทรีย์ย่อยสลายพอลิเมอร์ได้ง่ายขึ้นด้วย เพราะปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ลดลง และมีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิลเกิดขึ้น ปัจจุบันมีวิธีที่ทำให้พอลิเมอร์เสื่อมสภาพด้วยแสง 2 วิธี คือ

1. การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของพอลิเมอร์ ให้มีหมู่ดูดกลืนแสง เช่น เพิ่มหมู่คาร์บอนิลในโครงสร้าง ซึ่งเป็นวิธีที่มีต้นทุนสูง มีจำหน่ายในชื่อ Ecolyte เป็นโคพอลิเมอร์ที่มีหมู่คาร์บอนิลอยู่ จึงดูดกลืนช่วงแสงยูวีทำให้เกิดออกซิเดชันง่ายขึ้น หลังจากออกซิเดชันแล้วพลาสติกจะเสื่อมสลายตัวได้ง่ายขึ้น อีกชนิดคือ E/CO Copolymer (เอทิลีน/คาร์บอนมอนอกไซด์โคพอลิเมอร์) ผลิตจากหลายบริษัทรวมทั้ง E.I. Dupont ซึ่งผลิตจำหน่ายในปี ค.ศ.1970 ปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์ในโคพอลิเมอร์เป็นตัว

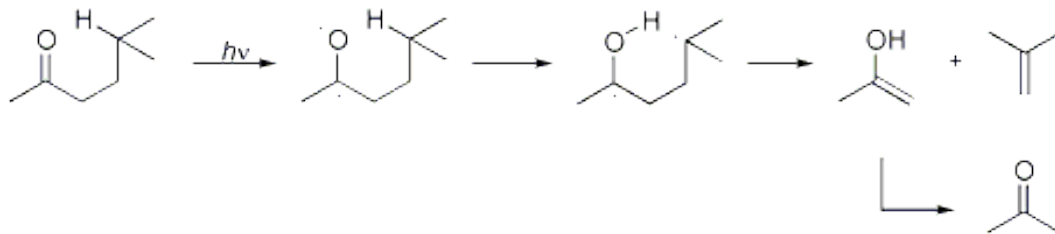
กำหนดสมบัติของพลาสติกและความไวต่อแสง การมีหมู่ $C=O$ เล็กน้อยทำให้ความหนาแน่นของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น และหาก $C=O$ เพิ่มขึ้น 16% พอลิเมอร์จะจมในน้ำ ความเสถียรทางความร้อนขึ้นกับปริมาณ $C=O$ เช่นกัน หากมีอยู่ 5% ก่อนข้างเสถียรเมื่ออุณหภูมิค่อยๆ เพิ่มขึ้น แต่ถ้ามี 13% จะลดความมีเสถียรภาพของ E/CO Copolymer ระหว่างทำการขึ้นรูป

หมู่คาร์บอนิลดูดกลืนแสงแล้วทำให้เกิดปฏิกิริยา Norrish type I สลายให้คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ซึ่งมีอนุมูลอิสระสองอนุมูลหรือเกิด Norrish type II เกิดการจัดโมเลกุลใหม่ส่งผลให้โซ่หลักขาด เกิดเมทิลคีโตนและปลายโซ่ที่มีพันธะคู่ ดังสมการ

Norrish type I



Norrish type II



การเสื่อมสภาพของฟิล์ม E/CO เมื่อได้รับแสงภายนอกไม่ขึ้นกับความหนาของฟิล์ม แต่หากได้รับแสงภายในบ้านจากฟลูออเรสเซนต์ การเสื่อมสภาพจะขึ้นกับความหนาของฟิล์ม การเติมไททาเนียมไดออกไซด์ช่วยเร่งการสลายตัวของฟิล์มเมื่อได้รับแสงภายในบ้านให้ไวยิ่งขึ้น

2. การเติมสารไวแสง (Photo-initiator หรือ UV absorber) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ช่วยเร่งการย่อยสลายโดยแสง ตัวอย่างสารเหล่านี้ได้แก่ สารประกอบโลหะทรานซิชัน (Transition metal) สารประกอบไฮโดรคาร์บอน เอมีน ฟีนอล และเม็คซี เป็นต้น เมื่อเติมลงในพลาสติกทำให้พลาสติกมีอายุการใช้งานระยะเวลานานขึ้นก่อนที่จะเสื่อมสภาพ ตัวอย่างพอลิเมอร์ย่อยสลายโดยแสงที่มีจำหน่ายในท้องตลาดแสดงดังตารางที่ 2.1 [6]

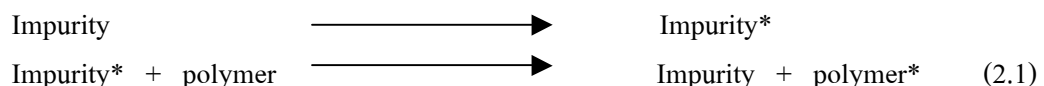
ตารางที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหลอมเหลว และ% การยืด ณ จุดขาด ของ E/CO พลาสติกเมื่อได้รับแสงฟลูออเรสเซนซ์ [7]

Type of resin and film thickness (mils)	Elongation at break (%) at exposure time (months)			Melt index (g/10min) at exposure time (month)		
	0	6	11	0	6	11
E(13% CO)						
1.25	375	9	0	2.2	80	419
5	513	79	37	2.2	55	76
20	500	50	50	2.2	11	25
50	500	50	50			
E(1% CO)						
1.25	420	446	246			
5	550	321	392			
20	550	500	416	2.0	7.5	10
50	600	550	484			

2.3 กระบวนการกายภาพทางแสง [6]

พลังงานของการกระตุ้นอาจถูกถ่ายโอนไปยังอีกที่หนึ่งภายในโมเลกุล (Intra-molecular) หรือระหว่างโมเลกุล (Inter-molecular) ที่อยู่ในพื้นที่เดียวกันได้ พลังงานคลื่นแสงยูวีอาจถูกดูดกลืนโดยหมู่โครโมฟอร์ (Chromophoric group) ที่อยู่ในโมเลกุลของพอลิเมอร์

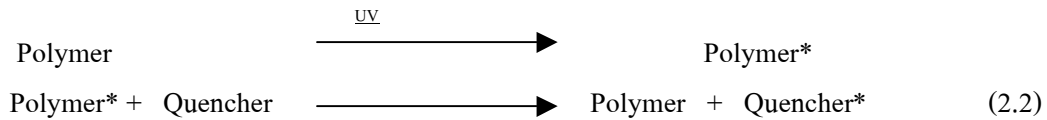
โดยปกติโมเลกุลโครโมฟอร์ที่ดูดกลืนแสงยูวีในระยะเริ่มต้น และถูกกระตุ้นโดยทันที จะถูกถ่ายโอนพลังงานอย่างรวดเร็วไปยังอีกโมเลกุลหนึ่ง เมื่อได้รับปฏิกิริยาสูงสุด (Ultimate reaction) ในบางกรณีสิ่งเจือปน หรือสารปรับแต่งที่ดูดกลืนแสงยูวีเริ่มแรก แล้วเกิดการถ่ายโอนพลังงานไปยังพอลิเมอร์ซึ่งไม่สามารถดูดกลืนแสงยูวีได้เอง แต่สามารถถูกกระตุ้นได้ทางอ้อม ดังสมการที่ 2.1



สิ่งเจือปนหรือสารเติมแต่งจะเร่งการย่อยสลายของพอลิเมอร์โดยแสงยูวี เช่นเมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในบรรยากาศอย่างเฉื่อย หรือการเกิดเป็นสารเชิงซ้อนกับพอลิเมอร์ [6] เป็นต้น

พอลิเมอร์ที่ดูดกลืนคลื่นแสงยูวีมากเกินไป จะทำให้เกิดความไม่เสถียรที่ใช้กับงานภายนอกได้ จึงอาจทำให้เกิดความเสถียรได้โดยการเติมสารระงับพลังงาน (Quencher) ลงไปเพื่อถ่ายโอนพลังงาน

ที่มากขึ้นไปดังสมการที่ 2.2 เทคนิคนี้มีประโยชน์ทำให้พอลิโอลิฟินสามารถนำไปใช้งานภายนอกได้ โดยมีสารเสถียรภาพช่วยระงับพลังงานจากแสงยูวี



โดยทั่วไปกระบวนการกายภาพทางแสงสิ้นสุดลงเมื่อปล่อยพลังงานในสถานะกระตุ้นที่มีความยาวคลื่นสูงกลับไปยังพลังงานที่มีความยาวคลื่นต่ำ และกระบวนการเคมีทางแสงได้

2.4 กระบวนการเคมีทางแสง [8]

กระบวนการเคมีทางแสงเกิดขึ้นเมื่อสารอินทรีย์ได้รับพลังงานกระตุ้นทางแสงยูวีทำให้สารอินทรีย์มีระดับพลังงานสูงขึ้น ซึ่งพลังงานกระตุ้นที่ได้รับมีไม่เพียงพอที่ทำให้เกิดการคายพลังงาน เพื่อกลับมาสู่สถานะพื้นได้ จึงทำให้สารเคมีมีพลังงานส่วนเกินที่ส่งผลให้เกิดการแตกของพันธะโคเวเลนต์ มีผลทำให้สารเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีอย่างถาวรจึงทำให้เกิดการย่อยสลาย โดยทั่วไปพันธะโคเวเลนต์ในโมเลกุลของพอลิเมอร์เป็นพันธะที่แข็งแรงที่สามารถต้านพลังงานกระตุ้นที่เกิดจากพลังงานแสงยูวีได้ แต่เมื่อพันธะโคเวเลนต์ได้รับพลังงานกระตุ้นทำให้ความแข็งแรงของพันธะโคเวเลนต์มีค่าน้อยลงซึ่งมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีกับอะตอมข้างเคียงที่ติดกับพันธะโคเวเลนต์ได้ ตัวอย่างเช่น พันธะ C-H ที่ถูกกระตุ้นในสายโซ่พอลิเมอร์มีพลังงานน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการกระตุ้นจากตำแหน่งอัลฟาของกลุ่มไม่อิ่มตัวในสายโซ่พอลิเมอร์ เช่น C=C และ C=O เป็นต้น ด้วยเหตุนี้พลังงานคลื่นแสงยูวีที่ถูกดูดกลืนโดยระบบพอลิเมอร์อาจเพียงพอที่ทำให้พันธะโคเวเลนต์ในโมเลกุลของพอลิเมอร์แตกพันธะ เกิดการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ปฏิกิริยาเริ่มต้นที่เกิดขึ้นดังสมการที่ 2.3 โดยส่งผลต่อกระบวนการเคมีทางแสง ที่นำไปสู่การย่อยสลายในที่สุด ซึ่งกระบวนการเคมีทางแสงมีผลทำให้โมเลกุลเกิดการเปลี่ยนแปลงได้หลายแบบ ได้แก่ การแตกแยก (Cleavage) การกำจัดโมเลกุลเล็กๆ (Elimination of small molecule) ความไม่อิ่มตัวของโมเลกุล (Unsaturation) การจัดเรียงตัว (Rearrangement) และการเกิดเป็นวง (Cyclization) การเชื่อมโยงของโครงร่างตาข่าย (Cross-linking) การออกซิเดชัน (Oxidation) และโฟโตไฮโดรไลซิส (Photohydrolysis) เป็นต้น การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเริ่มจากพันธะโคเวเลนต์ได้รับพลังงานกระตุ้นจากคลื่นแสงยูวีทำให้เกิดการแตกพันธะของโมเลกุลชนิดเดียวกัน (Homolytic cleavage)



การแตกของพันธะของโมเลกุลชนิดเดียวกัน ทำให้เกิดผลแยกออกจากกัน (Cage effect) คืออนุโมลทั้งสองต้องมีการเคลื่อนที่มากพอที่จะทำให้เกิดการแยกออกจากกันและกันอย่างถาวรไม่เกิดการรวมตัวกันใหม่ ด้วยเหตุนี้อุณหภูมิจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาดำเนินต่อไป

ซึ่งปฏิกิริยาสองชนิดที่มีความสำคัญ ได้แก่ นอร์ริชแบบที่ 1 (Norrish type I) และนอร์ริชแบบที่ 2 (Norrish type II)

2.4.1 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนิน [2]

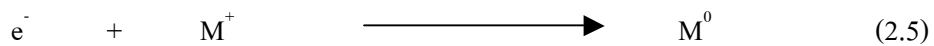
หลักการของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนิน (Photocatalysis) ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ

1. กระบวนการดูดซับ (Adsorption process)

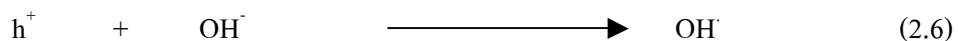
ความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ซึ่งอยู่ในของเหลวหรือก๊าซมาดูดซับบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ปรากฏการณ์นี้เป็นการเคลื่อนย้ายสารจากของเหลวหรือก๊าซมายังผิว ของของแข็งหรือคอลลอยด์เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่ดูดซับเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) การดูดซับของโมเลกุลบนผิวของสารอาจเกิดขึ้นด้วยแรงทางกายภาพหรือด้วยแรงทางเคมีหรือทั้งสองอย่างรวมกัน ส่วนกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนิน การดูดซับเกิดจากแรงทางเคมีเป็นหลัก

2. กระบวนการฉายแสง (Irradiation process)

เมื่อนิวเคลียสของตัวนำที่ถูกอนุภาคของแสง ซึ่งมีพลังงานเท่ากับหรือสูงกว่าช่องว่างพลังงาน (Eg) ตกกระทบผิวหน้าอนุภาคสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดอิเล็กตรอนถูกกระตุ้น เปลี่ยนที่อยู่จากวาเลนซ์แบนด์ไปยังคอนดักชันแบนด์ ทำให้เกิดสภาวะขาดแคลนอิเล็กตรอนที่วาเลนซ์แบนด์ เรียกว่า โฮล (Hole) ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ h^+ ส่วนอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นไปอยู่ในคอนดักชันแบนด์ แทนด้วยสัญลักษณ์ e^- ตัวเร่งปฏิกิริยาถูกฉายแสงยูวี ถูกให้เกิดคู่ของอิเล็กตรอน (e^-) และโฮล (h^+) ซึ่งอิเล็กตรอนและโฮลมีบทบาทในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันรีดักชัน โดยอิเล็กตรอน (e^-) สามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับสารอินทรีย์ทำให้เกิดการลดเลขออกซิเดชัน ได้ดังนี้



ส่วนโฮล (h^+) สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารอินทรีย์หรือไอออนต่างๆ ในน้ำได้เช่น



ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนิน เป็นวัสดุกึ่งตัวนำ ทั้งนี้เพื่อให้เข้าใจการเกิดปฏิกิริยาจึงจำเป็นต้องศึกษาและทำความเข้าใจกับโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำจะมีแถบพลังงานที่น่าสนใจอยู่สองแถบ คือ แถบวาเลนซ์ (Valence band) และแถบการนำไฟฟ้า (Conduction band) แถบพลังงานทั้งสองนี้ถูกแยกจากกันโดยมีแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap) ซึ่งมีความกว้าง E_g กันอยู่

2.4.2 คลื่นแสงที่พบในแสงอาทิตย์ [2]

แสงแดดประกอบด้วยแสงในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ดังนี้

1. UVC มีความยาวคลื่น 100-290 nm แสงในช่วงนี้โดยมากจะถูกดูดซับโดยก๊าซโอโซนในบรรยากาศ ดังนั้นแสงยูวีที่มาถึงโลกจะมีช่วงความยาวคลื่น 290-400 nm

2. UVB มีความยาวคลื่น 290-320 nm แสงในช่วงนี้ทำให้เกิดผิวเกรียมแดดและผิวหนังอักเสบเป็นตัวหลักที่ทำให้ผิวแก่ก่อนวัย และทำให้เกิดมะเร็งผิวหนังได้บ่อยขึ้น

3. UVA มีความยาวคลื่น 320-400 nm แสงในช่วงนี้ทำให้เกิดผิวคล้ำแดดโดยกระตุ้นให้เกิดการสร้างเมลานิน แต่ไม่ทำให้เกิดการอักเสบ

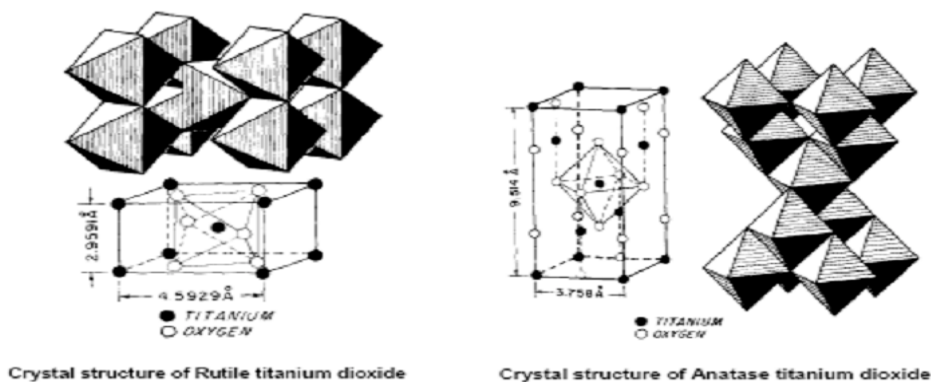
4. แสงวิสิเบิล (Visible light) มีความยาวคลื่น 400-800 nm

5. แสงอินฟราเรด (Infrared light) มีความยาวคลื่น 800-1700 nm

ในงานวิจัยนี้มีความสนใจในช่วงความยาวคลื่นแสง UVA และ UVB เนื่องจากแสงยูวีในช่วงความยาวคลื่นนี้สามารถทะลุผ่านชั้นโอโซนมายังโลกได้ และสามารถช่วยให้ไททาเนียมไดออกไซด์

2.5 ไททาเนียมไดออกไซด์ [2]

สารกึ่งตัวนำที่ใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยา มักอยู่ในรูปของออกไซด์และซัลไฟด์มีหลายชนิด เช่น ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ทังสเตนออกไซด์ (WO_3) แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) ซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS) เป็นต้น ซึ่งรวมไปถึงไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ซึ่งถูกพิสูจน์แล้วว่าเหมาะสมในการประยุกต์ใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยด้วยแสง มีประสิทธิภาพสูง มีความโปร่งแสงจึงทำให้ส่องผ่านได้เป็นอย่างดี มีพื้นที่ผิวหน้าสูงซึ่งมีความสัมพันธ์กับการดูดซับ มีความคงตัวไม่เปลี่ยนรูปเมื่อเกิดปฏิกิริยา และไม่เกิดการกัดกร่อน อีกทั้งไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ไททาเนียมไดออกไซด์ที่นำมาใช้ แบ่งตามลักษณะโครงสร้างแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบ คือ อะนาเทส (Anatase) และรูไทล์ (Rutile) โดยมีโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 2.1 ชื่อทางการค้า ได้แก่ ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide) หรือไททานิกแอนไฮไดรด์ (Titanic anhydride) โดยมีสมบัติบางประการดังแสดงในตารางที่ 2.2 TiO_2 ที่นิยมใช้ผลิตโดยบริษัทในประเทศไทยขณะนี้ คือ Degussa P-25 ซึ่งประกอบด้วยอะนาเทส (Anatase) 80 % และรูไทล์ (Rutile) 20 % และมีค่าระดับศักย์ไฟฟ้าของคอนดักชันแบนด์และวาเลนส์แบนด์เท่ากับ -0.3 และ +2.9 V (พีเอช 0) ตามลำดับ และดูดซับแสงที่ความยาวคลื่นต่ำประมาณ 390 nm



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างผลึกของ TiO_2 แบบ Rutile และ Anatase [2]

กระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการโดยมี TiO_2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.7 ถึง 2.10

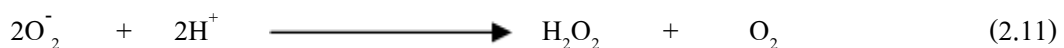


เมื่อ $h\nu$ = อนุภาคของแสง (Photon)
 h^+_{vb} = โฮลที่วาเลนซ์แบนด์
 e^-_{cb} = อิเล็กตรอนที่คอนดักชันแบนด์
 R = โมเลกุลของสารอินทรีย์
 M = โลหะหนัก

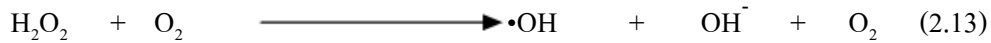
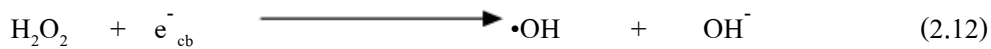
ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบสมบัติของ TiO_2 แบบ Rutile และ Anatase [2]

Property	Rutile	Anatase
Crytalline	Orthorhombic	Orthorhombic
Band gap energy (eV)	3.030	3.200
Hardness (Mohs)	6.0-7.0	5.5-6.0
Density (g/cm^3)	4.250	3.894
Gibbs free energy (Kcal/mole)	-212.6	-211.4
Lattice constants, a (Å)	4.593	3.784
Lattice constants, c (Å)	2.959	9.515
Melting point ($^{\circ}\text{C}$)	1858	Change to rutile at high Temperature at 800°C

e^-_{cb} ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่ดูดซับบนผิว TiO_2 ทำให้โมเลกุลออกซิเจนเปลี่ยนเป็นซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนเรดิคัล ($\text{O}^{\cdot-}_2$) ส่วนโฮลที่วาเลนซ์แบนด์สามารถรับอิเล็กตรอนจากโมเลกุลของสารอินทรีย์ได้โดยตรง หรือไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) ทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\cdot\text{OH}$) และยังทำให้โมเลกุลของน้ำที่ดูดซับบนผิว TiO_2 เปลี่ยนเป็น $\cdot\text{OH}$ ด้วยเช่นกัน ซึ่ง $\cdot\text{OH}$ เป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่มีความไวในการทำปฏิกิริยาสูง และทำหน้าที่สลายโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ดูดซับบนผิวของ TiO_2 ส่วน $\text{O}^{\cdot-}_2$ สามารถที่จะทำปฏิกิริยาต่อไปได้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ดังสมการที่ 2.11



H_2O_2 ที่เกิดขึ้นเป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่ดี และ H_2O_2 สามารถทำปฏิกิริยาต่อไปได้ โดยจะทำปฏิกิริยากับ e^-_{cb} ทำให้เกิดเรดิคัล ดังสมการที่ 2.12 ถึง 2.13



2.6 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ [9]

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE) ผลิตได้จากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันของเอทิลีนแบบอนุมูลอิสระโดยใช้ความดันสูง อุณหภูมิ 150-200°C บางครั้งเรียกว่าพอลิเอทิลีนความดันสูง พอลิเมอร์ที่ได้มีโซ่กิ่งเป็นจำนวนมาก ทำให้พอลิเมอร์ชนิดนี้มีความเป็นผลึกน้อย ความหนาแน่นต่ำ T_m ต่ำประมาณ 80-110°C และมีช่วงกว้าง มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 6,000 – 40,000 กรัม/โมล ในเชิงพาณิชย์นิยมระบุน้ำหนักโมเลกุลด้วยค่าดัชนีการไหล ซึ่งหมายถึงน้ำหนักเป็นกรัมของพอลิเมอร์ที่ไหลออกจากหลอดรูเล็กมาตรฐานที่อุณหภูมิที่กำหนดโดยมีน้ำหนักกดคงที่ค่าหนึ่งตามที่กำหนดในเวลา 10 นาที ถ้าไหลได้มากหรือดัชนีการไหลสูงแปลว่ามีความหนืดน้อย สายโซ่สั้น น้ำหนักโมเลกุลต่ำ แต่ถ้าไหลออกมาได้น้อยหรือดัชนีการไหลต่ำแปลว่า มีความหนืดสูงหรือน้ำหนักโมเลกุลสูงนั่นเอง สมบัติบางประการของ LDPE แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติบางประการของ LDPE [9]

สมบัติ	หน่วย	ASTM	LDPE
ความถ่วงจำเพาะ	-	D792	0.91-0.93
ความเป็นผลึก	%	-	50.0-70.0
อุณหภูมิหลอมเหลว	°C	-	98.0-120.0
ความแข็งแรงดึง	MPa	D638	4.10-16.0
มอดุลัส	GPa	D638	0.10-0.26
การดึงยืด ณ จุดขาด	%	D638	90-800
ความแข็งแรงกระแทก	J/m	D256	No break
อุณหภูมิเบี่ยงเบนทางความร้อน	°C	D648	38.0-49.0

สมบัติโดยทั่วไปของ LDPE มีดังต่อไปนี้ [10]

1. มีความหนาแน่นและจุดหลอมเหลวต่ำ เมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง
2. มีการไหลตัวที่ดี มีค่า Melt flow index อยู่ในช่วง 0.1 – 10.9 g/10 นาที
3. มีค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) ดีพอสมควร
4. फिल्मที่ได้จาก LDPE จะมีความเป็นเงามันดี (High gloss) และมีความเป็นฝ้าต่ำ (Low haze)
5. เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ค่อนข้างดี (Good dielectric property)

LDPE เป็นพลาสติกที่ใช้มากในงานฟิล์มบรรจุภัณฑ์และมีชื่อสามัญเรียกว่า “ถุงเย็น” เนื่องจากยืดตัวได้ดี ทนต่อการทิ่มทะลุและการฉีกขาด สามารถป้องกันความชื้นได้ดีพอสมควร ทนกรดและด่างต่างๆ ไป และปล่อยให้อากาศซึมผ่านได้ง่าย แต่ข้อเสียของ LDPE คือ ปล่อยให้ไขมันซึมผ่านได้ง่าย การใช้งานของ LDPE ในงานฟิล์มส่วนใหญ่จะเป็นในลักษณะ ถุงขนาดต่างๆ ตั้งแต่ ขนาดเล็กที่ใช้บรรจุสินค้าทั่วไป ตลอดจนถึงขนาดใหญ่ที่ต้องการแบกรับน้ำหนักมาก ได้แก่

- ถุงบรรจุอาหาร เช่น ผัก ผลไม้สด ขนมนึ่ง ลูกกวาด อาหารแช่แข็ง อาหารแห้ง
- ถุงสำหรับบรรจุสินค้าหนัก เช่น ผลผลิตเกษตร ข้าวสาร ปุ๋ย ชิ้นส่วนเครื่องจักร เป็นต้น
- ถุงชั้นในของถุงกระดาษหรือกระสอบพลาสติกซึ่งใช้บรรจุอาหารสัตว์ ปุ๋ย ฯลฯ
- ฟิล์มหด (Shrink film) และฟิล์มยืด (Stretch film) ที่ต้องการความเหนียวสูง เช่น ใช้รัดสินค้าที่วางเรียงบนแท่นรองรับสินค้า (Pallet) เพื่อการขนถ่ายเป็นหน่วยใหญ่

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชวิศร์ กรณ์ย์เมธากุล และคณะ [2] ศึกษาการปรับปรุงการดูดกลืนแสงของ TiO_2 ซึ่งโดยปกติดูดกลืนแสงในช่วงยูวีให้มีความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงวิสิเบิล โดยการปรับปรุงพื้นผิวของ TiO_2 โดยเจือ (Doping) ด้วยอะตอมของธาตุซัลเฟอร์จากไทโอยูเรีย โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างไททานเนียมไอโซโพรพอกไซด์กับไทโอยูเรียเป็น 1:4 เผาภายใต้บรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600°C จากนั้นศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของ TiO_2 ด้วยไอออนของโลหะทราน-ซิชัน ได้แก่ Fe^{3+} , Cr^{3+} และ V^{3+} หลังจากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการหาพื้นที่ผิว และขนาดของรูพรุน (BET), เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) และ ยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรสโกปี (UV-Vis) พบว่าอะตอมของธาตุซัลเฟอร์สามารถเลื่อนแถบการดูดกลืนแสงของ TiO_2 ให้เข้ามาอยู่ในช่วงวิสิเบิลได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาที่สูงขึ้นทำให้การดูดกลืนแสงในช่วงวิสิเบิลมีประสิทธิภาพมากขึ้นและตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ถูกนำมาทดสอบประสิทธิภาพในการสลายสารอินทรีย์ โดยใช้เมทิลีนบลูเป็นสารทดสอบ พบว่า S-doped TiO_2 ที่ปรับแต่งผิวด้วย V^{3+} 2.84 % สามารถทำให้เกิดการสลายตัวของสารละลายเมทิลีนบลูได้สูงสุด 95.25 %

P.K. Roy และคณะ [3] ศึกษาผลของโฟโตออกซิเดชันที่มีผลต่อการย่อยสลายฟิล์ม LDPE โดยทำการผสม LDPE กับโคบอลต์สเตียเรต (Cobalt stearate) ปริมาณ 0.5, 1, 2, 3 และ 5%wt อุณหภูมิ 100°C ภายใต้สภาวะบรรยากาศออกซิเจน ผ่านเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่และเป่าขึ้นรูปฟิล์มหนา 70 μm นำมาศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมี, ความแข็งแรงดึง, ความสามารถในการยืด ฒ จุดขาด, ดัชนีคาร์บอนิล (C.I.), สันฐานวิทยา, น้ำหนักโมเลกุล และองศาความเป็นผลึก พบว่าฟิล์ม LDPE ที่มีปริมาณโคบอลต์สเตียเรตเพิ่มขึ้น ทำให้ดัชนีคาร์บอนิลและองศาความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น แต่ความแข็งแรงดึง, ความสามารถในการยืด ฒ จุดขาดและน้ำหนักโมเลกุลนั้นลดลง

G.L. Liu และคณะ [4] ศึกษาการย่อยสลายฟิล์ม LDPE ผสมด้วยสารเกอร์ไทต์ (Goethite) โดยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงภายใต้แสงยูวี โดยการผสมสารเกอร์ไทต์ ลงใน LDPE ปริมาณ 0.4 และ 1 %wt นำไปขึ้นรูปฟิล์ม และฉายแสงยูวีความเข้มแสง 1 mW/cm^2 เป็นเวลา 300 hr ตรวจวิเคราะห์

หาน้ำหนักของฟิล์ม LDPE ที่หายไป, วิเคราะห์การเกิดหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR, ตรวจสอบลักษณะฟิล์มด้วยเทคนิค SEM พบว่าฟิล์ม LDPE ที่มีปริมาณสารเกอร์ไทต์ เพิ่มขึ้นมีผลทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักของฟิล์ม LDPE อย่างต่อเนื่อง, เกิดการย่อยสลายมากขึ้น ในบริเวณที่มีสารเกอร์ไทต์กระจายตัวอยู่ และทำให้ฟิล์ม LDPE เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิลและไฮดรอกซิลมากขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าความเข้มแสงที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้เกิดการย่อยสลายได้มากขึ้น โดยดูได้จากการสูญเสียน้ำหนักของฟิล์ม

Y. Zhiyong และคณะ [5] ศึกษาการสังเคราะห์และการทำงานของสังกะสีซัลเฟต (ZnSO_4) เจือ (Doping) ลงใน TiO_2 (P25) เคลือบบน Raschig ring (RR) โดยการเจือในปริมาณ 1, 2, 4 และ 6 % โดยโมล เปรียบเทียบประสิทธิภาพการสลายที่อุณหภูมิ 500 °C เวลาในการเผา 3, 5 และ 7 hr จากนั้นนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุ (EA), เทคนิคการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer; EDS), กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM), เทคนิคเอกซเรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี (XPS) และเทคนิค XRD พบว่าใช้ TiO_2 ที่เจือ ZnSO_4 เคลือบบน Raschig ring (RR) มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อม azo dye Orange II และสารละลาย 2-propanol แบบโปร่งแสงได้สูงกว่าแบบ TiO_2 (P25) เคลือบบน Raschig ring (RR) นอกจากนี้ยังพบว่าความเข้มข้นและอุณหภูมิในการเผาที่มีประสิทธิภาพสูงสุด คือ 4% โดยโมล และ 500°C อุณหภูมิในการเผาวรรออยู่ในช่วงที่เหมาะสม ถ้าอุณหภูมิสูงจะทำลายโครงสร้างอะนาเทสที่อยู่ที่ TiO_2 แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำไม่มีผลต่อการเปลี่ยนโครงสร้างอะนาเทสของ TiO_2

อภิชาติ ไชยชนตรดี และคณะ [11] ทำการประเมินวัฏจักรชีวิตด้านสิ่งแวดล้อมในช่วงกระบวนการใช้งานของการนำ TiO_2 มาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสังเคราะห์แสงในกระบวนการย่อยสลายก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ในอากาศ กระบวนการย่อยสลายฟีนอล และไนโตรเบนซีนในน้ำเสีย โดยเปรียบเทียบกับกระบวนการย่อยสลายโดยใช้กระบวนการอื่นๆ ที่มีใช้ในปัจจุบัน เพื่อบ่งชี้ถึงกระบวนการที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด พบว่า Degussa P-25 เป็นนาโน TiO_2 ที่มีประสิทธิภาพสูง ในการนำมาใช้กำจัดของเสีย แต่ช่วงการนำไปใช้งานของ TiO_2 ก่อให้เกิดการดูดตันตามท่อระบายน้ำเนื่องจาก TiO_2 เป็นอนุภาคที่ไม่ละลายน้ำ จึงส่งผลกระทบ เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการกำจัดโดยวิธีอื่นๆ ที่มีใช้ในปัจจุบัน ดังนั้นควรหลีกเลี่ยงการนำนาโน TiO_2 มาใช้ในกระบวนการกำจัด หรือถ้าต้องการกระบวนการกำจัดที่มีประสิทธิภาพ ในการกำจัดสูงควรใช้นาโน TiO_2 ร่วมกับสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดของเสียตัวอื่น

ฐนิสตา เลื่อนลอย และคณะ [12] ศึกษาการกำจัดฟีนอล โดยใช้ปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชัน (Photo oxidation) เร่งปฏิกิริยาด้วย TiO_2 เกรดการค้า Degussa P25 ซึ่งนำมาเคลือบบนพอลิเมทิลเมทาคริเลต โดยเทคนิคการจุ่มเคลือบ ศึกษาผลของตัวแปร เช่น อัตราส่วนโดยโมลของเอซีทิลอะซีโตนต่อ TiO_2 จำนวนรอบในการเคลือบผิว และอุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาต่อลักษณะของฟิล์มบาง TiO_2 ที่เคลือบบนผิวของแผ่นเมทิลเมทาคริเลต ทดสอบประสิทธิภาพของฟิล์มบาง TiO_2 ที่เคลือบบนแผ่นเมทิลเมทาคริเลต โดยใช้ในการสลายฟีนอลความเข้มข้นเริ่มต้น 50 ppm ส่วนในเครื่องปฏิกรณ์แก้วที่ถูกล้อมรอบด้วยหลอดยูวีขนาด 9 วัตต์ จำนวน 15 หลอด ที่ $28 \pm 1^\circ\text{C}$ วิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD

และเทคนิคการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ผลการทดลองพบว่าฟิล์มบาง TiO_2 ที่เตรียมได้จากอัตราส่วนโดยโมลของแอซีทิลอะซีโตนต่อ TiO_2 ที่ 2.94 เคลือบบนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลต 3 รอบ และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 hr มีประสิทธิภาพในการสลายฟีนอลมากที่สุดถึง 68%

X. Zhao และคณะ [13] ศึกษาการย่อยสลายของพลาสติก LDPE ด้วย TiO_2 โดยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการภายใต้แสงยูวีและแสงอาทิตย์ โดยการผสม TiO_2 ลงใน LDPE ปริมาณ 0.02, 0.1 และ 1 %wt นำไปขึ้นรูปฟิล์ม จากนั้นนำฟิล์ม LDPE และฟิล์ม LDPE ผสมกับ TiO_2 (1 %wt) ฉายด้วยแสงยูวีเป็นเวลา 20 และ 100 hr นำมาวิเคราะห์การเกิดอนุมูลอิสระด้วยเทคนิคการกระตุ้นสารด้วยพลังงานแสงช่วงแสงอินฟราเรด (FTIR) ตรวจสอบลักษณะฟิล์มด้วยเทคนิค SEM พบว่าปริมาณ TiO_2 ผสมกับ LDPE ที่เพิ่มขึ้นและเวลาในการฉายแสงนานขึ้น ทำให้ฟิล์ม LDPE เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นอนุมูลอิสระคาร์บอนิล ไฮดรอกซิล และพบว่าขนาด, ความลึกของรูรอยขีดเพิ่มมากขึ้นด้วย แสดงว่าเกิดการย่อยสลายได้เร็วขึ้น

ไพพรรณ สันติสุข [14] ศึกษาการสลายตัวด้วยแสงของฟิล์ม LLDPE โดยใช้คอปเปอร์สเตียเรต (Copper stearate) ซึ่งเตรียมได้จากคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) และสบู่ ผสมกับเม็ดพลาสติกชนิด LLDPE ในปริมาณ 0.005, 0.01, 0.02, 0.03 และ 0.04 %wt โดยใช้ไขมันโอเลฟินเป็นตัวช่วยกระจายตัวของคอปเปอร์สเตียเรต แล้วขึ้นรูปเป็นฟิล์มโดยใช้เครื่อง Blown film extruder แล้วนำไปฉายแสงด้วยเครื่องเร่งสภาวะ QUV Accelerated Weathering เป็นเวลา 7, 50 และ 100 hr จากนั้นนำฟิล์มที่ได้มาหา C.I. ด้วยเทคนิค FTIR พบว่าปริมาณคอปเปอร์สเตียเรตและเวลาในการฉายแสงที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้ค่า C.I. เพิ่มมากขึ้น มีผลทำให้การย่อยสลายของฟิล์ม LLDPE เพิ่มมากขึ้นด้วย

C. Chen และคณะ [15] ศึกษาการย่อยสลายเมทิลออเรนจ์ (Methyl orange) ในน้ำโดยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการภายใต้แสง โดยการเจือจางอะซิโตน ($(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn}$) ลงในไททาเนียมเตตระไอโซโพรพอกไซด์ (Titanium tetraisopropoxide) ด้วยวิธีการใช้กรดสเตียริกในสภาวะเจล (Stearic acid gel method) ปริมาณ 0.05, 0.1, 0.3, 0.5 และ 1.0 %โดยโมล เปรียบเทียบการสลายที่อุณหภูมิ 400, 450, 500 และ 600 °C เวลาในการเผา 2 hr จากนั้นนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD, เทคนิค SEM, เทคนิค BET และเทคนิค UV-Vis พบว่าอุณหภูมิในการเผา 450°C และปริมาณสังกะสีเจือใน TiO_2 0.1 %โดยโมล ให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายเมทิลออเรนจ์ได้สูงสุดเนื่องจากมีขนาดของผลึกและปริมาณสัดส่วนอะนาเทสต่อรูไทล์มากที่สุด

ดังนั้นงานวิจัยนี้ศึกษาพลาสติกย่อยสลายด้วยแสง โดยการใช้ TiO_2 ที่ไม่เจือและเจือด้วยสารประกอบสังกะสีและสารประกอบไนเตรดลงใน LDPE เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งที่ไม่เจือและเจือ ในการย่อยสลายด้วยแสงให้กับฟิล์ม LDPE และนำไปวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยเทคนิค XRD, DRUV และนำไปทดสอบสมบัติการย่อยสลายของฟิล์มด้วยเทคนิค FTIR ศึกษาพื้นฐานวิทยาศาสตร์ด้วย SEM และทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่อง Universal testing machine (UTM)