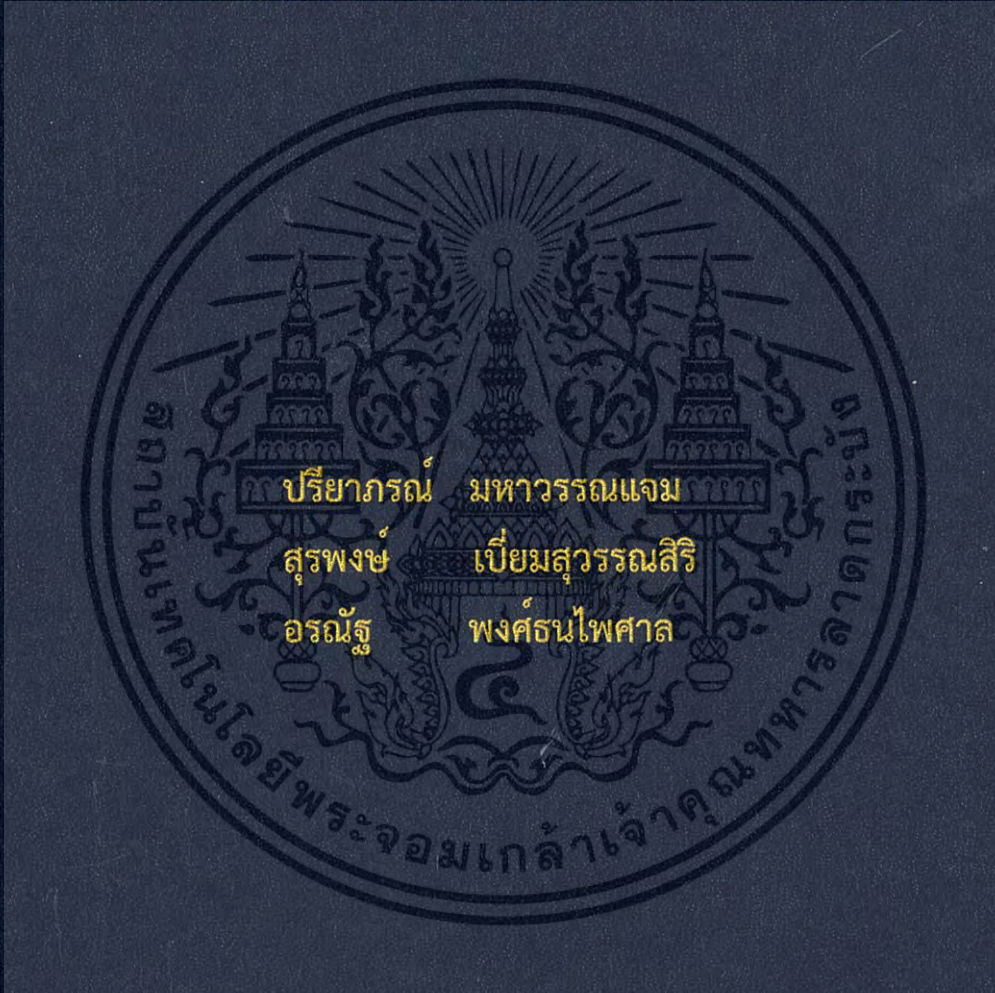


ฟิล์มย่อยสลายด้วยแสงที่เตรียมจาก

LDPE/TiO₂ และ LDPE/Hydrophobic TiO₂

PHOTODEGRADABLE FILM PREPARED FROM

LDPE/TiO₂ AND LDPE/HYDROPHOBIC TiO₂



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

ฟิล์มย่อยสลายด้วยแสงที่เตรียมจาก
LDPE/TiO₂ และ LDPE/Hydrophobic TiO₂
PHOTODEGRADABLE FILM PREPARED FROM
LDPE/TiO₂ AND LDPE/HYDROPHOBIC TiO₂



T149221

ปรียาภรณ์ มหาวรรณแจ่ม
สุรพงษ์ เปี่ยมสุวรรณศิริ
อรณัฐ พงศ์ธนไพศาล

ส.พ.
๑/474-๗
2558

เลขหมู่.....149221
เลขทะเบียน.....
ในเดือนปี 12.9.2561

b. 12880614
i.

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PHOTODEGRADABLE FILM PREPARED FROM
LDPE/TiO₂ AND LDPE/HYDROPHOBIC TiO₂



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN
PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ ฟิล์มย่อยสลายด้วยแสงที่เตรียมจาก LDPE/TiO₂ และ
 LDPE/Hydrophobic TiO₂
 Photodegradable film prepared from LDPE/TiO₂ and
 LDPE/Hydrophobic TiO₂

ชื่อนักศึกษา นางสาวปรียาภรณ์ มหาวิทยาลัยมหาวรรณแจ่ม รหัสนักศึกษา 55050725
 นายสุรพงษ์ เปี่ยมสุวรรณสิริ รหัสนักศึกษา 55050846
 นางสาวอรณัฐ พงศ์ธนไพศาล รหัสนักศึกษา 55050868

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา เคมี


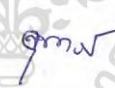

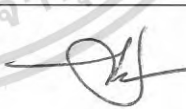

ปีการศึกษา 2558

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รศ.ดร.ตะวัน สุขน้อย

 ผศ.ดร.สุภารัตน์ รัชชลธี

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
 โครงการพิเศษนี้เป็นหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
 ประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ ประธานกรรมการ	
รศ.ดร.จุฑารัตน์ ประชญาวารการ กรรมการ	
ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	
รศ.ดร.ตะวัน สุขน้อย กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	
ผศ.ดร.สุภารัตน์ รัชชลธี กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	ฟิล์มย่อยสลายด้วยแสงที่เตรียมจาก LDPE/TiO ₂ และ LDPE/Hydrophobic TiO ₂		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวปรียาภรณ์	มหาวรรณแจ่ม	รหัสนักศึกษา 55050725
	นายสุรพงษ์	เปี่ยมสุวรรณศิริ	รหัสนักศึกษา 55050846
	นางสาวอรณัฐ	พงศ์ธน์ไพศาล	รหัสนักศึกษา 55050868
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)		
ภาควิชา	เคมี		
คณะ	วิทยาศาสตร์		
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)		
ปีการศึกษา	2558		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ชลลดา	ฤตวิรุฬห์	
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รศ.ดร.ตะวัน	สุชน้อย	
	ผศ.ดร.สุภารัตน์	รักชลธิ์	

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาความสามารถในการย่อยสลายด้วยแสงของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) และไททาเนียมไดออกไซด์ที่ดัดแปรพื้นผิวด้วยออกทาทาเดคซิลไตรคลอโรไซเลน (OTS-modified TiO₂) ในปริมาณ 0.25, 0.5 และ 1 phr โดยทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ของ TiO₂ และ OTS-modified TiO₂ ด้วยเทคนิค DRIFT-IR และเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA) ทดสอบการย่อยสลายด้วยแสงด้วยสารละลายเมทิลแอลกอฮอล์ เตรียมตัวอย่างฟิล์มโดยการผสม LDPE กับตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่องผสมแบบปิดที่อุณหภูมิ 170°C ความเร็วรอบ 100 rpm และขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการกดอัด ได้ฟิล์มที่มีความหนา 103-129 μm จากนั้นนำมาศึกษาการย่อยสลายของฟิล์มภายใต้รังสี UVA เป็นเวลา 50, 100, 150 และ 200 ชั่วโมง แล้วนำฟิล์มไปวิเคราะห์ค่าดัชนีคาร์บอนิล (C.I.) ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (ATR-FTIR) และวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์มด้วยเครื่องวัดสี (Colorimeter spectrophotometer) ตามลำดับ ศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine) พบว่าการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและเวลาในการฉายแสง UVA ส่งผลให้ฟิล์มมีค่า C.I. และค่าการเปลี่ยนแปลงสีเพิ่มขึ้น (ΔE) ซึ่งสอดคล้องกับน้ำหนักของฟิล์มที่หายไป โดยพบว่าฟิล์มที่ผสมกับ OTS-modified TiO₂ มีการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีกว่าฟิล์มที่ผสมกับ TiO₂ ทำให้มีการย่อยสลายทางแสงของฟิล์ม LDPE มากขึ้น นอกจากนี้พบว่าฟิล์มหลังการฉายแสง UVA 200 ชั่วโมง มีค่าความแข็งแรงดึงและมอดูลัสของยังมากขึ้น ขณะที่เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง คาดว่าฟิล์ม LDPE มีแนวโน้มเสถียรภาพแบบเกิดการเชื่อมโยง (Crosslink)

คำสำคัญ : การย่อยสลายด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง ไททาเนียมไดออกไซด์ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ไฮโดรโฟบิกไททาเนียมไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Photodegradable film prepared from LDPE/TiO ₂ and LDPE/Hydrophobic TiO ₂		
Students	Miss.Preeyaporn Mahawanjam	Student ID	55050725
	Mr.Surapong Piamsuwansiri	Student ID	55050847
	Miss.Oranat Pongtanapaisan	Student ID	55050868
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)		
Department	Chemistry		
Faculty	Science		
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
Academic Year	2015		
Advisor	Asst.Prof.Dr. Chonlada Ritvirulh		
Co-advisors	Assoc.Prof.Dr. Tawan Sooknoi		
	Asst.Prof.Dr. Suparat Rukchonlatee		

Abstract

This research studied on photodegradation of Low Density Polyethylene (LDPE) films filled with titanium dioxide (TiO₂) catalyst and octadecyltrichlorosilane (OTS) modified TiO₂ with various catalyst (0.25, 0.5 and 1 phr) loadings. OTS-modified TiO₂ and TiO₂ catalysts were characterized by diffuse reflectance fourier transform infrared spectroscopy (DRIFT-IR) and thermogravimetric analysis (TGA). Photocatalytic activity of the catalysts was determined by degradation of methyl orange (MO). Films were prepared by mixing LDPE with catalyst using an internal mixer at temperature 170°C with a rotor speed of 100 rpm and shaped by a compression molding process to obtain a film thickness of 103-129 μm. Thereafter, films were irradiated under UVA for 50, 100, 150 and 200 hours, then the films were examined for carbonyl index (C.I.) and color change using ATR-FTIR and colorimetric spectrophotometer, respectively. Morphological and mechanical properties were investigated using scanning electron microscope (SEM) and universal testing machine. It was found that C.I., color change and % weight loss were increased with loading of catalyst and irradiation time. OTS-modified TiO₂ provided a better, as compare to TiO₂, dispersing that improved photodegradation of the LDPE film. In addition, After exposure the films under UV light for 200 hr, tensile strength and Young's modulus were increased while %elongation at break was decreased. The results suggested that the degradation of the film was due to crosslinking in LDPE chain.

Keywords : Photocatalytic degradation, Titanium Dioxide, Low Density Polyethylene (LDPE), Hydrophobic Titanium Dioxide



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ รศ.ดร.ตะวัน สุขน้อย และ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ และแนวทางแก้ปัญหาต่างๆ เป็นอย่างดี ทำงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ และ รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารการ อาจารย์ คณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษ ที่กรุณาให้คำแนะนำต่างๆ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากกับ งานวิจัย และช่วยตรวจทานแก้ไขโครงการพิเศษนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณนักวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความกรุณาอำนวยความสะดวกในด้านต่างๆ ในเรื่องการติดต่อขอขยืมอุปกรณ์ การเบิกสารเคมีในการทดลอง รวมถึงให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือตลอดการดำเนินงานวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และบุคคลในครอบครัวที่คอยไถ่ถามและให้กำลังใจ ตลอดมา ขอขอบพระคุณพี่ๆ ปริญญาเอกสาขาเคมีประยุกต์และปริญญาโทสาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ ที่คอยให้คำปรึกษา ช่วยเหลือให้คำแนะนำและคอยดูแลเวลาที่มีปัญหาในการทำงานวิจัย ขอขอบคุณ เพื่อนๆ ในสาขาเคมีอุตสาหกรรมรุ่นที่ 31 ที่คอยเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา ทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จ ลุล่วงไปได้ด้วยดี

นอกจากนี้ยังมีบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลืออีกมากมายที่ยังมิได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ ซึ่งผู้จัดทำ ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้ด้วย

ปรียาภรณ์ มหาวรรณแจ่ม
สุรพงษ์ เปี่ยมสุวรรณสิริ
อรณัฐ พงศ์ธนไพศาล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 กระบวนการโฟโตแคตตาไลติก	4
2.1.1 หลักการของโฟโตแคตตาไลซิส	4
2.1.2 พลังงานแสง	5
2.1.3 คลื่นแสงที่พบในแสงอาทิตย์	6
2.1.4 ชนิดของโฟโตแคตตาไลซิส	7
2.1.5 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	7
2.1.6 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก	8
2.2 พลาสติกที่ย่อยสลายได้	10
2.3 พลาสติกย่อยสลายได้ทางแสง (Photodegradable plastic)	11
2.4 กระบวนการเคมีทางแสงของพอลิเมอร์	12
2.5 ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO ₂)	13
2.6 สารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent)	15
2.7 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE)	16
2.7.1 การสังเคราะห์	16
2.7.2 สมบัติทั่วไปของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ	17
2.7.3 การนำไปใช้งาน	17
2.8 เครื่องผสมแบบปิด	17
2.9 เครื่องกดอัด	18
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	23
3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	23
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	24
3.3 การเตรียม TiO ₂ และ OTS-modified TiO ₂	25
3.3.1 การเตรียม TiO ₂	25
3.3.2 การเตรียม OTS-modified TiO ₂	25
3.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของ TiO ₂ และ OTS-modified TiO ₂	25
3.4.1 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน โดยเทคนิค Diffuse reflectance infrared fourier transform spectroscopy (DRIFT-IR)	25
3.4.2 การทดสอบการสลายตัวทางแสงด้วยเมทิลออเรนจ์	25
3.4.3 การหาปริมาณออกทาทาเดกซิลไตรโคลอโรไซเลน (OTS) ในตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำการดัดแปรพื้นผิวด้วยเทคนิค TGA	26
3.5 การขึ้นรูปฟิล์ม	26
3.5.1 การคอมบาวด์ด้วยเครื่องผสมแบบปิด	26
3.5.2 การขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่างด้วยกระบวนการกดอัด	26
3.6 การตรวจสอบปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในฟิล์ม LDPE	27
3.7 การทดลองโดยการฉายแสงภายใต้รังสี UVA	27
3.8 การวิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม	27
3.8.1 การวัดค่าดัชนีคาร์บอนิล (Carbonyl index)	27
3.8.2 การเปลี่ยนแปลงสี	28
3.8.3 สันฐานวิทยา	29
3.8.4 การทดสอบการรับแรงดึงยืด	29
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	30
4.1 การศึกษาลักษณะของ TiO ₂ และ OTS-modified TiO ₂	30
4.1.1 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันโดยเทคนิค Diffuse reflectance-infrared fourier transform spectroscopy (DRIFT-IR)	30
4.1.2 การวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง โดยการทดสอบด้วยสารละลายเมทิลออเรนจ์	31
4.1.3 การหาปริมาณออกทาทาเดกซิลไตรโคลอโรไซเลน (OTS) ในตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำการดัดแปรพื้นผิวด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA)	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 การตรวจสอบปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา TiO ₂ ในฟิล์ม LDPE	32
4.3 การศึกษาสมบัติของฟิล์ม LDPE ที่ผสม TiO ₂ และ OTS-modified TiO ₂	33
4.3.1 การวิเคราะห์ค่าดัชนีคาร์บอนิลของฟิล์มตัวอย่าง	33
4.3.2 การเปลี่ยนแปลงสี	36
4.3.3 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก	37
4.3.4 สัณฐานวิทยา	37
4.3.5 สมบัติเชิงกล	42
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	48
5.1 สรุปผลการวิจัย	48
5.2 ข้อเสนอแนะ	49
เอกสารอ้างอิง	50
ภาคผนวก	54
ภาคผนวก ก ค่า Methyl orange degradation	55
ภาคผนวก ข ค่า Carbonyl index (C.I.)	56
ภาคผนวก ค ค่าการเปลี่ยนแปลงสี (ΔE)	57
ภาคผนวก ง ค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของฟิล์ม	59
ภาคผนวก จ ค่าการทดสอบสมบัติเชิงกล	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบสมบัติของ TiO ₂ ในโครงสร้างผลึกวิฎภาคอะนาเทส วิฎภาครูไทล์ และวิฎภาคบรูคไคต์	15
2.2 สมบัติบางประการของ LDPE	17
3.1 สมบัติทั่วไปของ LDPE เกรด LD2426K	23
3.2 อัตราส่วนของเม็ดพลาสติกกับ TiO ₂	26
4.1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา TiO ₂ ในแต่ละอัตราส่วนผสม	33
ก-1 ผลการสลายตัวของสารละลายเมทิลออเรนจ์ที่ผสมกับ TiO ₂ และ OTS-modified TiO ₂ ที่เวลาต่างๆ (0-60 นาที)	55
ข-1 ผลการทดสอบค่า Carbonyl index ของฟิล์ม LDPE และฟิล์ม LDPE ผสม TiO ₂ และ OTS-modified TiO ₂	56
ค-1 ผลการทดสอบค่าการเปลี่ยนแปลงสี (ΔE) ของฟิล์ม	57
ง-1 ผลการทดสอบค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของฟิล์ม	59
จ-1 ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์มก่อนและหลังการฉายแสง UVA	61
จ-2 ผลการทดสอบค่า %Elongation at break ของฟิล์มก่อนและ หลังฉายแสง UVA	61
จ-3 ผลการทดสอบค่า Young's modulus ของฟิล์มก่อนและหลังการฉายแสง UVA	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	4
2.2	5
2.3	6
2.4	8
2.5	14
2.6	16
2.7	16
2.8	17
2.9	18
2.10	19
3.1	27
3.2	28
3.3	29
4.1	30
4.2	31
4.3	31
4.4	32
4.5	34
4.6	34
4.7	35
4.8	36
4.9	37
4.10	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
4.11 ภาพ SEM ภาคตัดขวางของฟิล์ม LDPE ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยา TiO ₂ ในปริมาณ 0.25, 0.5 และ 1 phr ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า	39
4.12 ภาพ SEM ภาคตัดขวางของฟิล์ม LDPE ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยา OTS-modified TiO ₂ ในปริมาณ 0.25, 0.5 และ 1 phr ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า	40
4.13 Tensile Strength ของฟิล์ม LDPE ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ ก่อนการฉายแสง UVA	42
4.14 %Elongation at break ของฟิล์ม LDPE ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ ก่อนการฉายแสง UVA	43
4.15 Young's modulus ของฟิล์ม LDPE ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ ก่อนการฉายแสง UVA	43
4.16 Tensile Strength ของฟิล์ม LDPE และ LDPE ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยา (a) TiO ₂ และ (b) OTS-modified TiO ₂ ในปริมาณ 0.25, 0.5 และ 1 phr ก่อนและหลังการฉายแสง UVA	44
4.17 % Elongation at break ของฟิล์ม LDPE และ LDPE ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยา (a) TiO ₂ และ (b) OTS-modified TiO ₂ ในปริมาณ 0.25, 0.5 และ 1 phr ก่อนและหลังการฉายแสง UVA	45
4.18 Young's modulus ของฟิล์ม LDPE และ LDPE ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยา (a) TiO ₂ และ (b) OTS-modified TiO ₂ ในปริมาณ 0.25, 0.5 และ 1 phr ก่อนและหลังการฉายแสง UVA	46

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้น ทำให้มีกิจกรรมต่างๆ ที่ต้องอาศัยทรัพยากรทางธรรมชาติมากขึ้น เป็นผลให้ทรัพยากรลดลงอย่างรวดเร็ว จึงได้มีการคิดค้นและพัฒนาสิ่งที่สามารถทดแทนวัสดุทางธรรมชาติได้ คือพลาสติกซึ่งเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง คงทน ไม่เป็นสนิม มีน้ำหนักเบา สามารถเติมแต่งสีสันทันได้ สามารถดัดแปรสมบัติได้ง่าย ทำให้ในปัจจุบันพลาสติกเป็นวัสดุที่เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของเราเป็นอย่างมาก มีโรงงานอุตสาหกรรมพลาสติกทั้งขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่ ด้วยสมบัติที่โดดเด่นหลายด้านทำให้พลาสติกมีปริมาณการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยสามารถนำมาใช้งานทางการแพทย์ อุตสาหกรรมอาหาร เกษตรกรรม ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ หรือชิ้นส่วนยานยนต์ เป็นต้น หนึ่งในพลาสติกที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมคือพอลิเอทิลีน (PE) เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ ราคาถูก หาได้ง่าย ปลอดภัยต่ออาหารและยา [1] แต่วัสดุดังกล่าวไม่สามารถย่อยสลายเองได้ตามธรรมชาติภายในระยะเวลาอันสั้น เนื่องจากพลาสติกเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ย่อยสลายได้ยาก และมีความเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี ส่งผลให้เกิดขยะพลาสติกในปริมาณที่มากขึ้น การนำขยะพลาสติกเหล่านี้ไปกำจัดโดยการเผาต้องใช้พลังงานสูง และอาจเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ดังนั้นเพื่อลดปัญหาดังกล่าวจึงมีการผลิตพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ โดยการย่อยสลายพลาสติกมีหลายวิธี ได้แก่ 1. การย่อยสลายทางกล (Mechanical degradation) เป็นวิธีทั่วไปโดยการให้แรงกระทำแก่พลาสติก ทำให้ชิ้นส่วนพลาสติกแตกออกเป็นชิ้นเล็กๆ 2. การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation) เป็นการย่อยสลายพลาสติกจากการทำงานของจุลินทรีย์ โดยการฝังกลบ ใช้ระยะเวลาในการย่อยสลาย 3. การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative degradation) โดยพลาสติกต้องมีหมู่ฟังก์ชันภายในโครงสร้างทางเคมี เช่น หมู่ไฮดรอกซิล (-OH), หมู่คาร์บอนิล 4. การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytic degradation) โดยพลาสติกต้องมีหมู่ฟังก์ชัน เช่น หมู่อะมิโน (-NH₂) และใช้น้ำเพื่อช่วยในการเกิดปฏิกิริยา 5. การย่อยสลายทางแสง (Photodegradation) ซึ่งใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงร่วมกับแสงเพื่อให้เกิดการย่อยสลายของพลาสติกได้ดีขึ้น [2]

ทั้งนี้จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้ทำการศึกษาพลาสติกย่อยสลายได้ด้วยแสง (Photodegradable plastic) เนื่องจากเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน และแสงยังเป็นทรัพยากรทางธรรมชาติที่ไม่มีวันหมด มีการสร้างมลพิษน้อย โดยเลือกใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายพลาสติก เนื่องจาก TiO₂ มีพลังงานแบนด์แกป (Band gap energy) ที่ต่ำ ทำให้ประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงที่ดี เป็นพิษต่ำ ราคาถูก และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยแสดงประสิทธิภาพการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงภายในช่วงแสง UVA 300-400 nm เพราะผลึกอะนาเทสภายในโครงสร้าง TiO₂ สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 384 nm [3] โดยงานวิจัยดังกล่าวทำการศึกษาอุณหภูมิในการเผา TiO₂ ที่อุณหภูมิ 300-500°C พบว่าการเผา TiO₂ ที่อุณหภูมิ 400°C ทำให้มีค่าความเข้มของวัฏภาคอะนาเทส (I_a) มากกว่าที่ทำการเผาที่อุณหภูมิ 300°C และ 500°C และเมื่อนำไปผสมกับพอลิเอทิลีน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ทำให้ฟิล์มที่ได้มีการย่อยสลายดีที่สุด [4] นอกจากนี้ได้ทำการเจือ TiO_2 ด้วยซิงค์ออกไซด์ (Zn-doped TiO_2) โดยผ่านกระบวนการฝังตัว (Impregnation method) เนื่องจากซิงค์ออกไซด์ (ZnO) มีความเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงที่ดีอีกตัวหนึ่ง อีกทั้งยังมีช่วงการดูดกลืนแสงใกล้เคียงกับ TiO_2 จากผลงานวิจัยดังกล่าวพบว่าฟิล์มที่เติม Zn-doped TiO_2 ส่งผลให้มีการชะลอการย่อยสลายของ LDPE ในช่วงต้น และนอกจากนี้ยังพบว่ามีการกระจายตัวที่ไม่ดีของ TiO_2 และ Zn-doped TiO_2 ใน LDPE เนื่องจากความแตกต่างของความมีขั้วระหว่างพอลิเมอร์และ TiO_2 [5]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการดัดแปรพื้นผิวของ TiO_2 ด้วยออกทาเดซิลไตรคลอโรโรไฮเลน (OTS-modified TiO_2) [6] โดยออกทาเดซิลไตรคลอโรไฮเลนทำให้ TiO_2 มีความชอบน้ำลดลง (Hydrophobic TiO_2) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกระจายตัวของ TiO_2 ในพอลิเมอร์ให้ดีขึ้น ส่งผลให้พอลิเมอร์มีการย่อยสลายที่ดีขึ้น ศึกษาการย่อยสลายด้วยแสงของฟิล์ม LDPE โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงคือ TiO_2 และ OTS-modified TiO_2 โดยมีปัจจัยศึกษา คือปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง (0.25, 0.5 และ 1 phr) เพื่อดูประสิทธิภาพในการย่อยสลายฟิล์มด้วยแสง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ทำให้ทราบผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและการดัดแปรพื้นผิวของไททาเนียมไดออกไซด์ ด้วยออกทาเดซิลไตรคลอโรไฮเลนที่มีต่อการย่อยสลายด้วยแสง (Photodegradation) ของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบวิธีการทดลอง และวางแผนการทดลอง
3. ดำเนินงานวิจัย

ตอนที่ 1 ดัดแปรพื้นผิวของไททาเนียมไดออกไซด์ (OTS-modified TiO_2) แล้วทำการพิสูจน์เอกลักษณ์

- วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของ TiO_2 และ OTS-modified TiO_2 โดยการทดสอบด้วยเทคนิค Diffuse reflectance infrared fourier transform spectroscopy (DRIFT-IR)
- หาปริมาณออกทาเดซิลไตรคลอโรไฮเลน (OTS) ในตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำการดัดแปรพื้นผิวด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA)
- หาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงโดยการทดสอบ Photocatalytic activity ด้วยสารละลายเมทิลออเรนจ์ (Methyl orange) ในเมทานอล จากนั้นนำไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสง UV ของตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 2 นำ OTS-modified TiO_2 0.25, 0.5, และ 1 phr ผสม LDPE ด้วยเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer)

ตอนที่ 3 ขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการกดอัด (Compression molding process) จากนั้นนำฟิล์มที่ได้ไปทำการฉายแสง UVA เป็นเวลา 50, 100, 150 และ 200 ชั่วโมง

ตอนที่ 4 วิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม

- วัดค่าดัชนีคาร์บอนิล (Carbonyl index)
- การเปลี่ยนแปลงสี
- สัณฐานวิทยา (Morphology)
- ทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile test)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจถึงผลของการตัดแปรพื้นผิวของ TiO_2 ด้วย OTS ที่ส่งผลต่อการกระจายตัวใน LDPE
2. เข้าใจถึงการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายทางแสงของฟิล์ม LDPE ด้วย TiO_2 และ OTS-modified TiO_2 ในปริมาณที่แตกต่างกัน

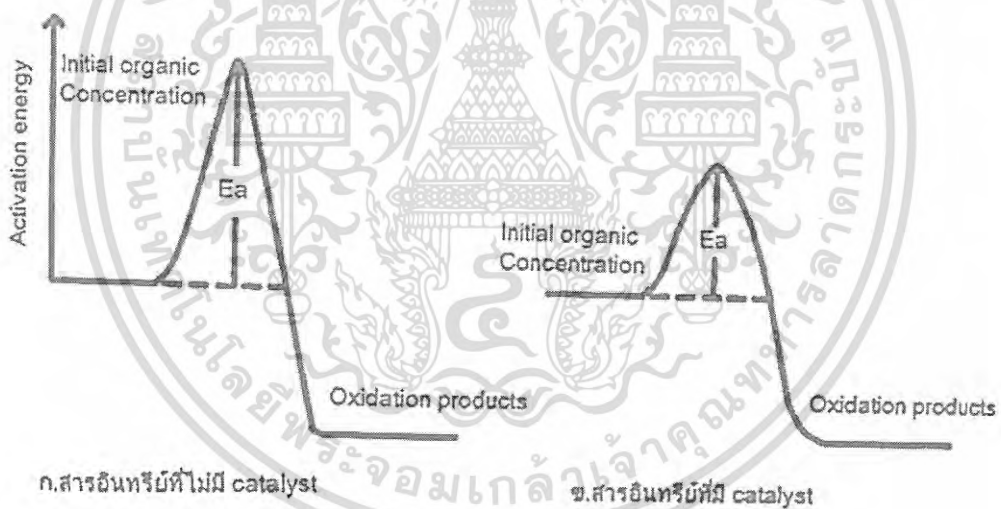
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการโฟโตแคตตาไลติก [7]

2.1.1 หลักการของโฟโตแคตตาไลซิส

กระบวนการโฟโตแคตตาไลติก (Photocatalytic process) เป็นการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้โดยการกระตุ้นด้วยแสง แคตตาลิสต์นี้ทำหน้าที่ลดพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยา รูปที่ 2.1 แสดงการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation) ของสารอินทรีย์ที่มีและไม่มีแคตตาลิสต์ รูปที่ 2.1 (ก) แสดงพลังงานกระตุ้น (Activation energy, E_a) ของปฏิกิริยาที่ไม่มีแคตตาลิสต์ซึ่งมีค่ามาก และพลังงานของผลิตภัณฑ์ต่ำกว่าพลังงานของสารอินทรีย์ พลังงานกระตุ้นนี้ลดลงในปฏิกิริยาที่มีแคตตาลิสต์ ถึงแม้ว่าพลังงานของสารอินทรีย์และผลิตภัณฑ์ยังคงเท่าเดิม ดังรูปที่ 2.1 (ข) แคตตาลิสต์นี้เพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยาโดยการลดพลังงานกระตุ้น อีกทั้งยังตอบสนองต่อแสงดังกล่าว คือเกิดการกระตุ้นได้โดยการถ่ายทอดพลังงานที่มีมากกว่าพลังงานแบนด์แกป (Band gap energy)



รูปที่ 2.1 พลังงานของการเกิดออกซิเดชันของสารอินทรีย์ [7]

ปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิสต้องมียุทธปัจจัยประกอบ คือ

- 1) แคตตาลิสต์ เช่น สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)
- 2) พลังงานแสง ซึ่งมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับพลังงานโฟตอนของแคตตาลิสต์
- 3) น้ำ
- 4) ออกซิเจน หรือตัวออกซิแดนท์ (Oxidants) อื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 พลังงานแสง

การฉายแสงในกระบวนการโฟโตแคตาไลติกนั้นเป็นการให้พลังงานกับระบบในรูปของพลังงานโฟตอน (Photon energy) มากพอที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาขึ้นได้ ซึ่งพลังงานดังกล่าวนี้เรียกว่าพลังงานกระตุ้น (Activation energy) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

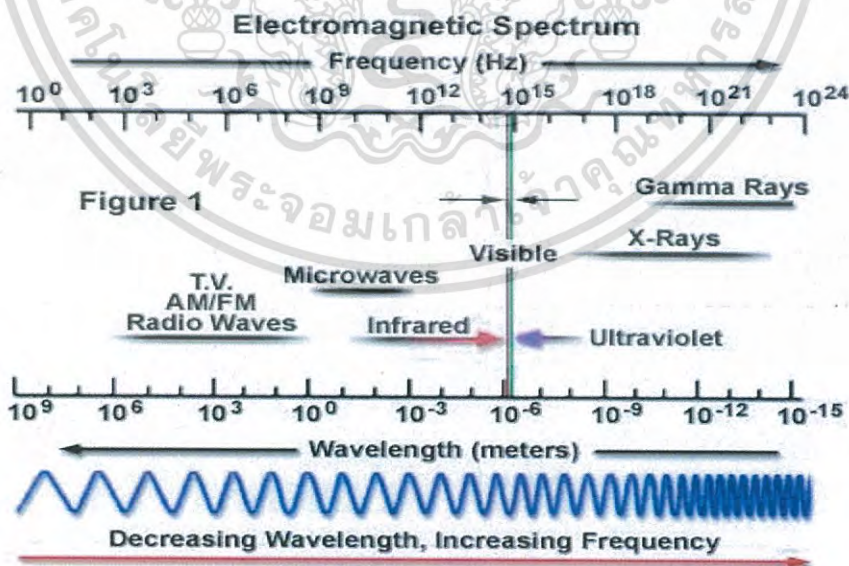
$$E = hv = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.1)$$

เมื่อ E คือ พลังงานควอนตัม (Quantum Energy), จูล
 h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's Constant) (6.625×10^{-34} , จูลวินาที)
 v คือ ความถี่ของคลื่นแสง, เฮิร์ตซ์ หรือ วินาที⁻¹
 λ คือ ความยาวคลื่นแสง (nm)
 c คือ ความเร็วของคลื่นแสง (2.997×10^8 เมตร/วินาที)

รูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของความยาวคลื่นและพลังงาน โดยพลังงานของแสงเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวคลื่นลดลง รูปที่ 2.3 แสดงสเปกตรัมของรังสียูวี ซึ่งเป็นที่สนใจในกระบวนการโฟโตแคตาไลติก ความยาวคลื่นของแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) อยู่ในช่วง 100–400 nm ซึ่งรังสี UV นี้แบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง คือ

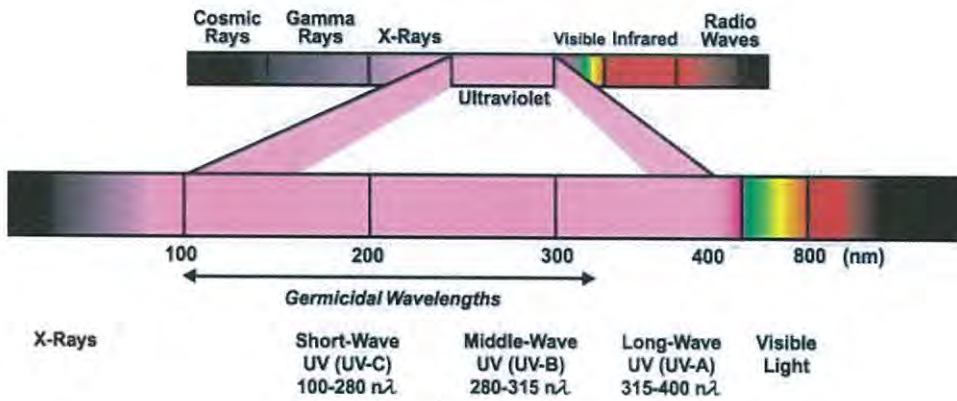
- 1) คลื่นยาว (Long wave UV, UV-A) อยู่ในช่วง 315–400 nm
- 2) คลื่นกลาง (Middle wave UV, UV-B) อยู่ในช่วง 280–315 nm
- 3) คลื่นสั้น (Short wave UV, UV-C) อยู่ในช่วง 100–280 nm

ความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า 200 นาโนเมตร มีความสำคัญน้อยมาก เพราะรังสีอยู่ในช่วง Vacuum UV ซึ่งถูกดูดกลืนในอากาศจนหมดในช่วงระยะทางสั้นๆ ที่แสงเดินทาง



รูปที่ 2.2 สเปกตรัมของรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 สเปกตรัมของรังสียูวี [8]

แสงอาทิตย์มีช่วงความยาวคลื่นที่กว้างมาก ความเข้มของแสง UV และแสงขาวที่ส่องลงมายังพื้นผิวโลกถูกทำให้ลดลงอย่างมากในชั้นบรรยากาศจากการดูดกลืนและการกระเจิงของแสงที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 320 nm ความเข้มของแสงลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการดูดกลืนโดยโอโซนในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ (สูงจากพื้นผิวโลกในช่วงประมาณ 10–35 ไมล์) และที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 288 nm มีรังสีที่แผ่มาถึงพื้นโลกน้อย ดังนั้นแสง UV ที่ส่องมายังพื้นโลกจึงมีขีดจำกัด

ในกระบวนการโฟโตแคตาไลติกมีการใช้ TiO_2 เป็นแคตาไลสต์ เนื่องจาก TiO_2 มีพลังงานแบนด์แก๊ปประมาณ 3.2 eV ดังนั้นการให้พลังงานกับระบบจึงต้องให้พลังงานมากกว่าหรือเท่ากับพลังงานแบนด์แก๊ป ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสจึงเกิดขึ้นได้ ซึ่งช่วงของแสง UV ที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 400 nm ให้ค่าพลังงานที่มากกว่าหรือเท่ากับพลังงานแบนด์แก๊ปของ TiO_2 แต่เนื่องจากแสงอาทิตย์ที่ส่องมายังพื้นผิวโลกมีช่วงแสงที่เป็น UV ในปริมาณน้อยมาก คือ เฉพาะช่วง 350-400 nm เท่านั้น ปัจจุบันจึงมีงานวิจัยที่มุ่งเน้นการปรับปรุง TiO_2 ให้มีความสามารถที่ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงแสงอาทิตย์ เพื่อลดการใช้หลอดไฟ UV ในกระบวนการโฟโตแคตาไลติก [3]

2.1.3 คลื่นแสงที่พบในแสงอาทิตย์ [9]

แสงแดดประกอบด้วยแสงในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ดังนี้

1. กลุ่มคลื่นแสงที่ตามองเห็น (Visible light) ซึ่งมีความยาวคลื่น 400-800 nm เป็นกลุ่มคลื่นแสงสีต่างๆ ตั้งแต่คลื่นแสงสีม่วง สีคราม สีน้ำเงิน สีเขียว สีเหลือง สีแสด และสีแดง เรียงตามลำดับความยาวคลื่นจากน้อยไปหามาก คลื่นแสงกลุ่มนี้เป็นคลื่นแสงที่ประสาทตามนุษย์รับรู้ได้ ทำให้เราสามารถมองเห็นสิ่งต่างๆ ได้ และเป็นคลื่นแสงที่พืชใช้สังเคราะห์แสงสร้างชีวมวล (Biomass; มวลรวมของสารที่เกิดขึ้นจากกระบวนการในการดำรงชีวิต และเติบโตของสิ่งมีชีวิต ซึ่งรวมถึงสัตว์และจุลินทรีย์)

2. กลุ่มคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นยาวกว่าความยาวคลื่นช่วงที่ตามองเห็นได้เป็นคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 800 nm ได้แก่ คลื่นรังสีความร้อน คลื่นรังสีอินฟราเรดที่ประสาทสัมผัสของเราสามารถรับรู้ได้ในรูปของความร้อน แสงแดดจึงเป็นแหล่งพลังงานความร้อนจากธรรมชาติที่สิ่งมีชีวิตบนพื้นโลกได้ใช้ประโยชน์

3. กลุ่มคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่าความยาวคลื่นช่วงที่ตามองเห็นได้ เป็นคลื่นแสงที่มีช่วงความยาวคลื่นน้อยกว่า 400 nm ได้แก่ รังสีหรือคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 ชนิดของโฟโตแคตตาไลซิส

โฟโตแคตตาไลซิส สามารถแยกได้ 2 ประเภท เมื่อพิจารณาจากเฟสของแคตตาลิสต์ ดังนี้

1) โฟโตแคตตาไลซิสแบบเฟสเดียว (Homogeneous photocatalysis)

โฟโตแคตตาไลซิสแบบเฟสเดียว เป็นกระบวนการที่ใช้แคตตาลิสต์ซึ่งมีเฟสเดียวกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด โดยทั่วไปแล้วเป็นของเหลว เช่น การย่อยสลาย 2,4 Dinitrotoluene โดยใช้ UV/H_2O_2

2) โฟโตแคตตาไลซิสแบบเฟสต่าง (Heterogeneous photocatalysis)

โฟโตแคตตาไลซิสแบบเฟสต่าง เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวแคตตาลิสต์ซึ่งมีเฟสต่างกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด เช่น ย่อยสลาย 2-Chlorophenol โดยใช้ UV/TiO_2 สารกึ่งตัวนำมีมากมายหลายชนิด หนึ่งในจำนวนสารกึ่งตัวนำหลายๆ ชนิดที่นิยมใช้กันในปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิส คือ TiO_2 เนื่องจากมีราคาไม่แพง ไม่เป็นพิษ ความสามารถในการละลายต่ำ ความเสถียรสูง นอกจากนั้นได้มีการศึกษาเปรียบเทียบสารกึ่งตัวนำหลายๆ ชนิดที่นำมาใช้ในปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิส พบว่าการใช้ TiO_2 แบบแขวนลอย สามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว แต่เนื่องจาก TiO_2 มีแบนด์แก๊ปประมาณ 3.2 eV ซึ่งมากกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ โดยส่วนใหญ่ ทำให้ต้องใช้พลังงานแสงในช่วงของแสง UV (400 nm) ในแสงอาทิตย์ที่ส่องมาถึงพื้นโลกมีแสง UV น้อยกว่า 1% ทำให้ไม่สามารถใช้แสงธรรมชาติได้ จำเป็นต้องใช้แสงจากหลอดรังสี UV เป็นแหล่งกำเนิดแสง (พลังงาน)

2.1.5 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา

สารที่ใช้เป็นแคตตาลิสต์ในปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิส ได้แก่

1) โลหะตัวนำ (Transition metal) เช่น ทองแดง โคโรเมียม นิกเกิล เป็นต้น

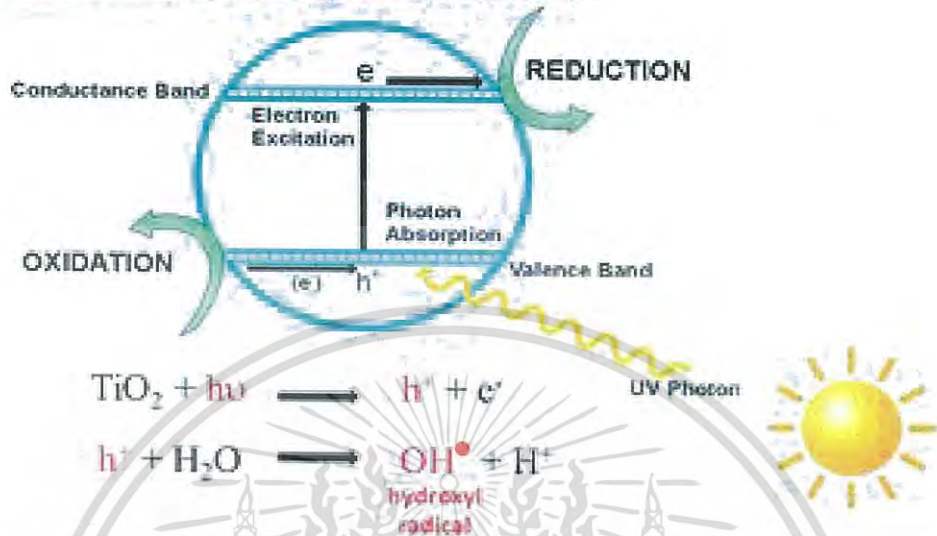
2) สารกึ่งตัวนำ (Semi-conductor) เช่น ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นต้น

องค์ประกอบของโลหะตัวนำ และสารกึ่งตัวนำ ประกอบด้วยวาเลนซ์แบนด์ (Valence band) และคอนดักชันแบนด์ (Conduction band) ในโลหะตัวนำมีวาเลนซ์แบนด์และคอนดักชันแบนด์ติดกัน แต่ในสารกึ่งตัวนำวาเลนซ์แบนด์และคอนดักชันแบนด์ไม่ติดกัน โดยเกิดเป็นช่องว่าง ซึ่งเรียกว่า พลังงานแบนด์แก๊ป (Band gap energy) เมื่ออิเล็กตรอน (Electron, e^-) ที่อยู่ในวาเลนซ์แบนด์ได้รับพลังงานโฟตอนจากแสง ($h\nu$) อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังคอนดักชันแบนด์ ในขณะที่เดียวกันที่บริเวณวาเลนซ์แบนด์เกิดโฮล (Hole, h^+) ซึ่งเป็นประจุบวก สามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระในวาเลนซ์แบนด์ ส่วนคอนดักชันแบนด์ อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่มาจากวาเลนซ์แบนด์เคลื่อนที่อย่างเป็นอิสระทั่วคอนดักชันแบนด์เช่นกัน ปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนโฮล (Electron-Hole pairs, e^-/h^+) สามารถเคลื่อนที่ไปมาระหว่างวาเลนซ์แบนด์และคอนดักชันแบนด์ได้ง่ายและรวดเร็ว เพราะไม่มีพลังงานแบนด์แก๊ป เหตุนี้จึงเป็นสาเหตุให้ e^-/h^+ รวมตัวกันใหม่ได้ง่ายสำหรับโลหะตัวนำ ในทางตรงกันข้ามการรวมตัวกันใหม่ของ e^-/h^+ ในสารกึ่งตัวนำเกิดได้ยาก เพราะว่ามีพลังงานแบนด์แก๊ปคั่นอยู่ทำให้คู่อิเล็กตรอนโฮล แยกจากกันได้นาน ข้อแตกต่างของพลังงานแบนด์แก๊ปของโลหะตัวนำ สารกึ่งตัวนำ และฉนวนแยกได้ยาก ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายปัจจัย ได้แก่ ระดับพลังงานแบนด์แก๊ป ระดับพลังงานคอนดักชันแบนด์ และระดับพลังงานวาเลนซ์แบนด์ ปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิสในน้ำ ประกอบด้วยแสงที่ส่องผ่านน้ำไปยังตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งมีพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ที่สูงกว่าพลังงานแบนด์แก๊ปของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งอิเล็กตรอนถูกกระตุ้นจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วาเลนซ์แบนด์ ให้เคลื่อนที่ไปยังคอนดักชันแบนด์ ทำให้เกิด e^-/h^+ ซึ่งเคลื่อนที่อยู่ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ ดังรูปที่ 2.4

Mechanism of TiO₂ Photocatalysis



รูปที่ 2.4 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสบนสารกึ่งตัวนำ TiO₂ [10]

2.1.6 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตแคตาไลติก [3]

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตแคตาไลซิส ได้แก่ ค่าพีเอช (pH), ความเข้มข้นของอนุภาค TiO₂, อุณหภูมิ, ปริมาณออกซิเจนละลาย (Dissolved oxygen) และความเข้มของแสง (Light intensity)

1. ค่าพีเอช (pH) ประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสขึ้นอยู่กับค่าพีเอชในสารละลายซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากค่าพีเอชมีผลต่อความสามารถในการดูดซับของสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากประจุไฟฟ้าที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเมื่อค่าพีเอชสูงหรือต่ำ สำหรับ TiO₂ ค่าพีเอชที่ทำให้ประจุเป็นกลาง (Isoelectric point) คือ 6-6.3 และไฮดรอกซิลเรดิคัลมีความสำคัญในการทำปฏิกิริยาที่ค่าพีเอชน้อยกว่า 3 ในขณะที่ไฮดรอกซิลเรดิคัลมีความสำคัญในการทำปฏิกิริยาที่ค่าพีเอชมากกว่า 3 และค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงไปทำให้ช่องว่างของสารกึ่งตัวนำประเภทโลหะออกไซด์ (Metal oxide) เปลี่ยนแปลงได้ 0.059 mV/pH unit

2. ความเข้มข้นของอนุภาค TiO₂ (TiO₂ dosage) อนุภาค TiO₂ ในสารละลายทำหน้าที่ให้ไฮดรอกซิลเรดิคัลทำปฏิกิริยา และเร่งให้เกิดปฏิกิริยาการกำจัดสารปนเปื้อน และทำหน้าที่เป็นตัวกลางให้สารอินทรีย์ในสารละลายยึดเกาะ โดยการยึดเกาะของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ขึ้นอยู่กับปริมาณและขนาดของอนุภาค TiO₂ ดังนั้นพื้นที่ผิวจึงเป็นปัจจัยหนึ่งในปัจจัยควบคุมการเกิดปฏิกิริยา แต่ปริมาณ TiO₂ ที่มากเกินไปในสารละลายทำให้ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสลดลงเนื่องจากอนุภาค TiO₂ ไปขัดขวางแสงที่ส่องไปยังสารละลาย ทำให้ปริมาณ TiO₂ ที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงและปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลลดลง ปริมาณ TiO₂ ที่ใช้ในการศึกษาเรื่องโฟโตออกซิเดชัน ส่วนใหญ่มีความเข้มข้น 1-5 กรัมต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. อุณหภูมิ จากข้อมูลทางจลนศาสตร์อุณหภูมินับว่าเป็นปัจจัยสำคัญต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยหาค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาจากสมการของอาร์เรเนียสได้ดังนี้

$$K = Ae^{-E_a/RT} \quad (2.2)$$

เมื่อ K = ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา, นาที⁻¹ (Reaction rate constant, min⁻¹)

A = แฟกเตอร์ความถี่, นาที⁻¹ (Frequency factor, min⁻¹)

E_a = พลังงานกระตุ้น, จูล/โมล (Activation energy, J mole⁻¹)

R = ค่าคงที่ (8.314 จูล/โมล เคลวิน)

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์, เคลวิน (Absolution temperature, K)

โดยสามารถหาพลังงานกระตุ้น (E_a) ได้จากความชันของกราฟลอการิทึมที่เขียนกราฟระหว่างค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (K) กับค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ $1/T$ ดังสมการ 2.3

$$\ln K = \frac{-E_a}{RT} + \ln A \quad (2.3)$$

ปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิสเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาของ e^-_{cb} และ h^+_{vb} กับสารปนเปื้อนในสารละลายมีค่ามากกว่าอัตราการกลับมารวมตัวกันใหม่ของ e^-_{cb} และ h^+_{vb} และอาจเนื่องมาจากการลดลงของพลังงานกระตุ้นในการทำปฏิกิริยา

4. ปริมาณออกซิเจนละลาย (Dissolved oxygen) อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายเพิ่มขึ้น ออกซิเจนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิส เพราะออกซิเจนบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา ทำหน้าที่จับ e^-_{cb} ที่คอนดักชันแบนด์ทำให้เกิดซูเปอร์ออกไซด์ไอออน และทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออน (H^+) ต่อไปได้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ด้วยเหตุนี้ออกซิเจนจึงทำหน้าที่เป็นตัวยึดเวลาการกลับมารวมตัวกันใหม่ของ e^-_{cb} และ h^+_{vb} และนอกจากนี้ออกซิเจนยังทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลอีกด้วย

5. ความเข้มของแสง (Light intensity) คือ พลังงานต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลา หรืออนุภาคแสง 1 โฟตอน ที่มีความถี่ ν มีพลังงาน $E = h\nu$ คิดเป็น 1 ควอนตัม มีค่าขึ้นอยู่กับพลังงานของแสงโดยตรง ถ้าให้พลังงานของแสงทั้งหมดที่ตกกระทบหนึ่งหน่วยพื้นที่ของผิวหน้าโลหะเป็น E_r ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{จำนวนโฟตอนที่ตกกระทบ} &= \frac{\text{พลังงานแสงทั้งหมดที่ตกกระทบ}}{\text{พลังงานของแสง 1 โฟตอน}} \\ &= E_r/h\nu \end{aligned}$$

$$\text{จำนวนโฟตอนที่ตกกระทบต่อ 1 วินาที} = \frac{\text{ความเข้มแสง}}{h\nu}$$

ซึ่งมีสมมุติฐานว่า 1 โฟตอน ทำให้เกิด 1 โฟโตอิเล็กตรอน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าจำนวนโฟโตอิเล็กตรอน \sim จำนวนโฟตอน \sim ความเข้มแสง

การที่กระตุ้น TiO_2 ให้เกิด e^-_{cb} และ h^+_{vb} ต้องใช้ความยาวคลื่นประมาณ 390 nm หรือต้องใช้พลังงานอย่างน้อย 3.2 eV ซึ่งความเข้มแสงมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาคือที่ระดับความเข้มแสงต่ำ อัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสง ที่ระดับความเข้มแสงปานกลาง อัตรา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดปฏิกิริยาแปรผันตามรากที่สองของความเข้มแสง และที่ระดับความเข้มแสงสูง อัตราการเกิดปฏิกิริยาไม่ขึ้นกับความเข้มแสง และอัตราการเกิดปฏิกิริยาคงที่เมื่อถึงจุดจำกัดของการเคลื่อนย้ายมวล (Quantum efficiency of degradation = สัดส่วนของการสลายตัวต่อจำนวนโฟตอนที่ใช้)

2.2 พลาสติกที่ย่อยสลายได้ [2,11]

พลาสติกย่อยสลายได้ (Degradable plastic) หมายถึง พลาสติกที่ถูกออกแบบมาเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะแวดล้อมต่างๆ เช่น การได้รับแรงเชิงกล สภาพภูมิอากาศ เป็นต้น ก่อให้เกิดการสูญเสียสมบัติบางประการ โดยทั่วไปสามารถแบ่งกลไกการย่อยสลายของพลาสติกได้เป็น 5 ประเภท คือ

1) การย่อยสลายทางกล (Mechanical degradation)

การย่อยสลายทางกล คือ การให้แรงกระทำแก่ชิ้นพลาสติก ทำให้ชิ้นพลาสติกแตกออกเป็นชิ้นเล็กๆ ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้โดยทั่วไปในกระบวนการรีไซเคิล

2) การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation degradation)

การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติก เป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลพอลิเมอร์ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจน ความร้อน แสง UV หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (Stabilizing additive) แสงและความร้อนทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ $RO\cdot$ และ $OH\cdot$ ที่ไม่เสถียร และเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกหัก และสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว แต่ด้วยเทคโนโลยีการผลิตที่ได้รับการวิจัยและพัฒนาขึ้นในปัจจุบัน ทำให้พอลิโอเลฟินถูกย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนได้เร็วขึ้นภายในช่วงเวลาที่กำหนด โดยการเติมสารเติมแต่งที่เป็นเกลือของโลหะทรานสิชัน ซึ่งทำหน้าที่เป็นแคตตาลิสต์เร่งการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) เป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกพันธะ และสูญเสียสมบัติเชิงกลรวดเร็วยิ่งขึ้น

3) การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytic degradation)

การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิแอนไฮดริด พอลิคาร์บอเนต และพอลิยูรีเทน ผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ก่อให้เกิดการแตกหักของพันธะในสายโซ่พอลิเมอร์ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้แคตตาลิสต์ (Catalytic hydrolysis) และไม่ใช่แคตตาลิสต์ (Non-catalytic hydrolysis) ซึ่งประเภทแรกสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แบบที่ใช้แคตตาลิสต์จากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (External catalytic degradation) และแบบที่ใช้แคตตาลิสต์จากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์เองในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (Internal catalytic degradation) โดยแคตตาลิสต์จากภายนอกมี 2 ชนิด คือ แคตตาลิสต์ที่เป็นเอนไซม์ต่างๆ (Enzyme) เช่น Depolymerase Lipase Esterase และ Glycohydrolase ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ และแคตตาลิสต์ที่ไม่ใช่เอนไซม์ (Non-enzyme) เช่น โลหะแอลคาไลด์ (Alkaline metal) เบส (Base) และกรด (Acid) ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติ ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบที่ใช้แคตตาลิสต์จากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นใช้หมู่คาร์บอกซิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Carboxyl group) ของหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

4) การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation)

การย่อยสลายของพอลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์โดยทั่วไปมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน เนื่องจากสายโซ่พอลิเมอร์มีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำ ในขั้นตอนแรกของการย่อยสลายจึงเกิดขึ้นภายนอกเซลล์โดยการปลดปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ ซึ่งเกิดได้ทั้งแบบใช้ Endo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ และแบบ Exo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะที่ละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์และเกิดการย่อยสลายต่อในขั้นที่ 2 ได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย (Ultimate biodegradation) คือ พลังงานและสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ (Mineralization) เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน น้ำ เกลือแร่ธาตุต่างๆ และมวลชีวภาพ (Biomass)

5) การย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradation)

การย่อยสลายโดยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความไวต่อแสงลงในพลาสติกหรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง ทำให้เกิดการแตกพันธะได้ง่ายภายใต้รังสี (UV) เช่น หมู่คีโตน (Ketone group) อยู่ในโครงสร้าง เมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับรังสี UV เกิดการแตกหักของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งไม่เสถียรจึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ แต่การย่อยสลายนี้ไม่เกิดภายในบ่อฝังกลบขยะ กองคอมโพสท์ หรือสภาวะแวดล้อมอื่นที่มืด หรือแม้กระทั่งชั้นพลาสติกที่มีการเคลือบด้วยหมึกที่หนาмаกบนพื้นผิว เนื่องจากพลาสติกไม่ได้สัมผัสกับรังสี UV โดยตรง

2.3 พลาสติกย่อยสลายได้ทางแสง (Photodegradable plastic) [12]

พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ด้วยแสงเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ประเภทเทอร์โมพลาสติก การย่อยสลายนี้นับกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ฤดูกาล ลักษณะทางภูมิศาสตร์ ความสกปรก เมื่อพลาสติกได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งเป็นพลังงานรูปหนึ่ง โมเลกุลของพลาสติกดูดกลืนพลังงานแสงทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Photo-oxidation) ส่งผลให้สมบัติเชิงกล และกายภาพของพลาสติกเสื่อมลงและยังเป็นการช่วยให้จุลินทรีย์ย่อยสลายพลาสติกได้ง่ายขึ้นด้วย ทำให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ลดลง และมีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิลเกิดขึ้น

ปัจจุบันวิธีที่ช่วยให้พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ด้วยแสงมี 2 วิธี

1) การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของพอลิเมอร์ให้มีหมู่ดูดกลืนแสง เช่น การเติมหมู่คาร์บอนิลเข้าไปในโครงสร้างซึ่งเป็นวิธีที่มีต้นทุนสูง ตัวอย่างเช่น Ecolyte เป็นพอลิเมอร์ร่วมที่มีหมู่คาร์บอนิลอยู่จึงดูดกลืนแสงช่วง UV ทำให้เกิดออกซิเดชันง่ายขึ้น หลังจากออกซิเดชันแล้วพลาสติกย่อยสลายได้ง่ายขึ้น E/CO copolymer (เอทิลีน-คาร์บอนมอนอกไซด์โคพอลิเมอร์) ผลิตจากหลายบริษัทรวมทั้ง E.I. Dupont ซึ่งผลิตจำหน่ายในปี ค.ศ.1970 ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในพอลิเมอร์ร่วมเป็นตัวกำหนดสมบัติของพลาสติก และความไวต่อแสง การมีหมู่ C=O เล็กน้อยทำให้ความหนาแน่นของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น หาก C=O เพิ่มขึ้น 16% พอลิเมอร์จมน้ำ เสถียรภาพทางความร้อนขึ้นกับ

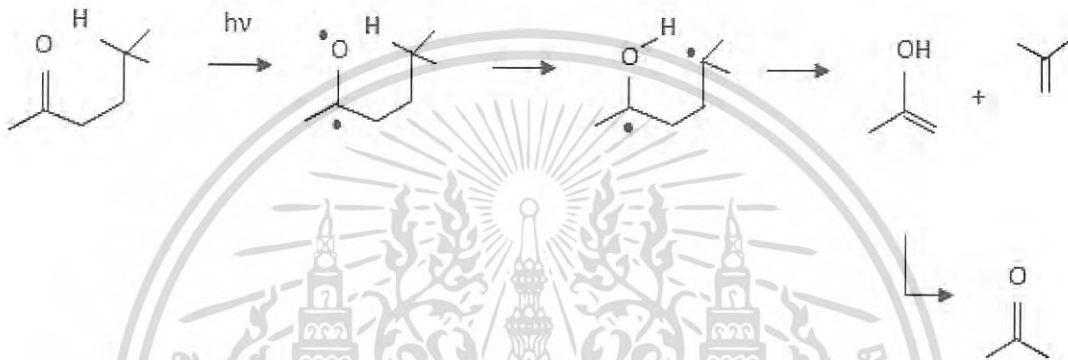
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณ C=O เช่นกัน หากมีอยู่ 5% ค่อนข้างเสถียรเมื่ออุณหภูมิค่อยๆ เพิ่มขึ้น แต่ถ้ามี 13% ความเสถียรของ E/CO copolymer ลดลง ขณะทำการขึ้นรูปหม้อคาร์บอนิลดูดกลืนแสงแล้วทำให้เกิดปฏิกิริยา Norrish type I สลายตัวให้คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ซึ่งมีอนุภาคอิสระสองอนุภาคหรือเกิด Norrish type II เกิดการจัดโมเลกุลใหม่ ส่งผลให้โซ่หลักขาด เกิดเมทิลคีโตนและปลายสายโซ่ที่มีพันธะคู่ ดังสมการ

Norrish type I



Norrish type II



การเสื่อมสภาพของฟิล์ม E/CO เมื่อได้รับแสงภายนอก ไม่ขึ้นกับความหนาของฟิล์มแต่หากได้รับแสงภายในบ้านจากฟลูออเรสเซนต์ การเสื่อมสภาพขึ้นกับความหนาของฟิล์ม

2) การเติมสารเคมีไวแสง (Photo-initiator หรือ UV absorber) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำซึ่งสามารถเร่งการย่อยสลายโดยแสง ตัวอย่างสารเหล่านี้ ได้แก่ สารประกอบโลหะทรานซิลิคอน สารประกอบไฮโดรคาร์บอน เอมีน ฟีนอล และเมตลี เป็นต้น เมื่อเติมลงในพลาสติกทำให้พลาสติกมีอายุการใช้งานระยะเวลาหนึ่งก่อนเกิดการย่อยสลาย

2.4 กระบวนการเคมีทางแสงของพอลิเมอร์ [13]

กระบวนการเคมีทางแสงเกิดขึ้นเมื่อสารอินทรีย์ได้รับพลังงานกระตุ้นทางแสงอัลตราไวโอเล็ต ทำให้สารอินทรีย์มีระดับพลังงานสูงขึ้นซึ่งพลังงานกระตุ้นที่ได้รับมีไม่เพียงพอที่ทำให้เกิดการคายพลังงานเพื่อกลับมาสู่สถานะพื้นได้ จึงทำให้สารเคมีมีพลังงานส่วนเกินที่ส่งผลให้เกิดการแตกของพันธะโคเวเลนต์มีผลทำให้สารเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีอย่างถาวร จึงทำให้เกิดการย่อยสลายโดยทั่วไป พันธะโคเวเลนต์ในโมเลกุลของพอลิเมอร์เป็นพันธะที่แข็งแรงที่สามารถต้านพลังงานกระตุ้นที่เกิดจากพลังงานแสง UV ได้ แต่เมื่อพันธะโคเวเลนต์ได้รับพลังงานกระตุ้นทำให้ความแข็งแรงของพันธะโคเวเลนต์มีค่าน้อยลงซึ่งมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีกับอะตอมข้างเคียงที่ต่อกับพันธะโคเวเลนต์ได้ ตัวอย่างเช่น พันธะ C-H ที่ถูกกระตุ้นในสายโซ่พอลิเมอร์มีพลังงานน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการกระตุ้นจากตำแหน่งอัลฟาของกลุ่มไม่อิ่มตัวในสายโซ่พอลิเมอร์ เช่น C=C และ C=O เป็นต้น ด้วยเหตุนี้พลังงานคลื่นแสง UV ที่ถูกดูดกลืนโดยระบบพอลิเมอร์อาจเพียงพอที่ทำให้พันธะโคเวเลนต์ในโมเลกุลของพอลิเมอร์แตกพันธะเกิดการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยส่งผลต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการเคมีทางแสงที่นำไปสู่การย่อยสลายในที่สุด ซึ่งกระบวนการเคมีทางแสงมีผลทำให้โมเลกุลเกิดการเปลี่ยนแปลงได้หลายแบบ ได้แก่ การแตกพันธะ (Cleavage) การกำจัดโมเลกุลเล็กๆ (Elimination of small molecule) การเกิดพันธะไม่อิ่มตัวของโมเลกุล (Unsaturation) การจัดเรียงตัวและการเกิดเป็นวง (Rearrangement and Cyclization) การเชื่อมโยงของโครงร่างตาข่าย (Crosslinking) การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) และโฟโตไฮโดรไลซิส (Photohydrolysis) เป็นต้น การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเริ่มจากพันธะโคเวเลนต์ได้รับพลังงานกระตุ้นจากคลื่นแสง UV ทำให้เกิดการแตกพันธะแบบโฮโมไลติก (Homolytic cleavage)



การแตกพันธะแบบโฮโมไลติก (Homolytic) ทำให้อนุมูลอิสระทั้งสองเคลื่อนที่แยกออกจากกันและกันอย่างถาวร ไม่เกิดการรวมตัวกันใหม่ ด้วยเหตุนี้อนุมูลอิสระและการแพร่จึงเป็นปัจจัยที่สำคัญ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาดำเนินต่อไป ซึ่งปฏิกิริยาสองชนิดที่มีความสำคัญได้แก่ นอร์ริชแบบที่ 1 (Norrish type I) และนอร์ริชแบบที่ 2 (Norrish type II)

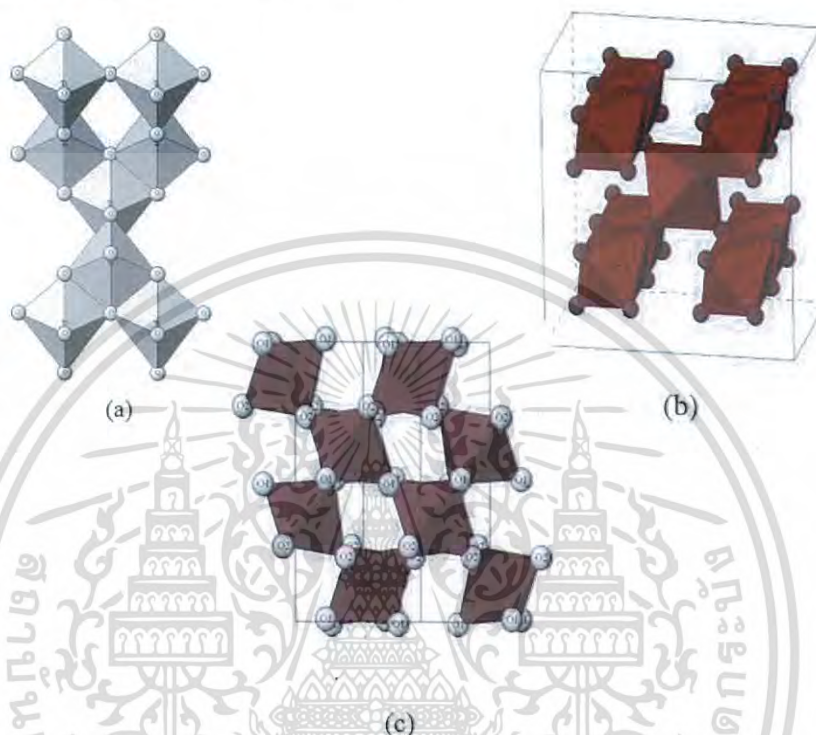
2.5 ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) [14-16]

TiO₂ เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไททาเนียม ซึ่งอยู่ในกลุ่มโลหะทรานสิชัน TiO₂ ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในการนำมาประยุกต์สำหรับการใช้งานด้านต่างๆ เนื่องจากมีความเสถียรต่อสารเคมี ไม่มีความเป็นพิษ ราคาไม่แพงมาก และสมบัติพิเศษที่เป็นประโยชน์ที่ดีอีกหลายอย่าง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง TiO₂ ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในด้านการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานรูปแบบอื่น เช่น เปลี่ยนเป็นพลังงานเคมีในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสง (Photocatalysis) เป็นต้น เนื่องจาก TiO₂ เป็นสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงกึ่งตัวนำ ซึ่งมีพลังงานแบนด์แก๊ป 3.2 eV เมื่อมีอนุภาคแสง (Photons) ตกกระทบ ซึ่งส่งผลให้อิเล็กตรอนย้ายตำแหน่งจากวาเลนซ์แบนด์ไปยังคอนดักชันแบนด์ ลักษณะทางด้านสารกึ่งตัวนำของ TiO₂ สำหรับปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วมเนื่องจากไททาเนียมมีตำแหน่งที่ว่างของออกซิเจนในโครงสร้างผลึก TiO₂ จึงจัดได้ว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type semiconductor) ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วมที่เป็นสารกึ่งตัวนำนั้นมีความสามารถในการดูดซับสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยา 2 ชนิดไปพร้อมๆ กัน ซึ่งสามารถก่อให้เกิดทั้งปฏิกิริยาออกซิเดชัน และรีดักชัน โดยกระตุ้นด้วยการดูดกลืนโฟตอนที่ มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าค่าพลังงานแบนด์แก๊ป ความสามารถของสารกึ่งตัวนำที่ถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปยังสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาที่ถูกดูดซับไว้นั้นขึ้นอยู่กับตำแหน่งพลังงานแบนด์แก๊ปของสารกึ่งตัวนำและตำแหน่งของพลังงานในการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox) ของสารที่ถูกดูดซับ โดยปกติแล้วระดับของพลังงานที่ต่ำที่สุดของคอนดักชันแบนด์ เป็นระดับของพลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันด้วยอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น (Excited electron) ในทางกลับกันระดับของพลังงานที่สูงที่สุดของวาเลนซ์แบนด์ เป็นระดับพลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยโฮลประจุบวก (Hole) ที่เหลืออยู่หลังจากที่อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นไปแล้ว

TiO₂ มีโครงสร้าง 3 แบบ แสดงดังรูปที่ 2.5 คือ รูไทล์ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเทตระโกนอล อะนาเทสิมีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล และบรูคไคต์มีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อะนาเทสมีพลังงานแบนด์แก๊ปเท่ากับ 3.22 eV ซึ่งมากกว่ารูไทล์ (3.02 eV) อะนาเทสจึงมีสมบัติเป็นโฟโตแคตตาลิสต์ที่สูงกว่ารูไทล์ อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นของผลึกรูไทล์กลับมารวมตัวกับโฮลประจุบวกเร็วมาก และเร็วกว่ากรณีของอะนาเทส จึงทำให้ปฏิกิริยาโฟโตแคตตาลิติกเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ และมีประสิทธิภาพต่ำ นอกจากนี้ TiO_2 ที่อยู่ในวัฏภาคอะนาเทสมีความเป็นผลึกสูงและพื้นที่ผิวมากที่สุดเมื่อเทียบกับวัฏภาคอื่นๆ



รูปที่ 2.5 โครงสร้างผลึกของ TiO_2 ; (a) อะนาเทส, (b) รูไทล์, และ (c) บรูคโคต์ [17]

โดยปกติโครงสร้างผลึกอะนาเทสสามารถเปลี่ยนเป็นรูไทล์ได้ที่อุณหภูมิสูง โครงสร้างผลึกทั้งอะนาเทส และรูไทล์ เป็นที่นิยมนำมาศึกษาสำหรับปฏิกิริยาแบบใช้แสง ซึ่งโครงสร้างผลึกอะนาเทสให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่ารูไทล์ เนื่องจากผลึกอะนาเทสเกิดการรวมตัวกันใหม่ของคู่อิเล็กตรอน e^- และ h^+ ในอัตราที่ต่ำกว่า เพราะมีพลังงานแบนด์แก๊ปที่มากกว่ารูไทล์ ยิ่งไปกว่านั้นผลึกอะนาเทสสามารถเตรียมที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้พื้นที่ผิวมี OH^* มากกว่าซึ่งสามารถผลิต OH^* ได้มาก ซึ่ง OH^* เป็นตัวออกซิแดนซ์หลักที่ทำให้การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเกิดได้ดี โดยโครงสร้างผลึกอะนาเทสสามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 384 nm ในขณะที่โครงสร้างผลึกรูไทล์สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 410 nm ส่งผลกระทบโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง อีกทั้งโครงสร้างผลึกอะนาเทสยังมีความสามารถในการดูดซับที่พื้นผิวสูงกว่าโครงสร้างผลึกรูไทล์

อย่างไรก็ตามในบางปฏิกิริยาโครงสร้างผลึกอะนาเทส และรูไทล์ให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกอะนาเทสอย่างเดียว เพราะในระหว่างกระบวนการกระตุ้นด้วยแสง อิเล็กตรอนถูกส่งผ่านจากวัฏภาครูไทล์ไปยังวัฏภาคอะนาเทส เป็นการลดการรวมตัวกันใหม่ของคู่อิเล็กตรอน e^- และ h^+ จากการสร้างประจุพลังงานแสง เนื่องจากแถบวาเลนซ์แบนด์ของวัฏภาคอะนาเทส อยู่ในตำแหน่งที่มีพลังงานสูงกว่าแถบวาเลนซ์แบนด์ของวัฏภาครูไทล์ประมาณ 0.20 eV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบสมบัติของ TiO₂ ในโครงสร้างผลึก anatase, rutile และ brookite [18]

สมบัติ	อะนาเทส	รูไทล์	บรูคไคต์
น้ำหนักโมเลกุล	79.89	79.89	79.89
ความหนาแน่น (g/cm ³)	3.90	4.27	4.12
ความถ่วงจำเพาะ	3.90-4.10	3.90-4.10	3.90-4.10
จุดหลอมเหลว (°C)	1,835	1,800-1,900	1,800-1,900
จุดเดือด (°C)	2,500-3,000	2,500-3,000	2,500-3,000
โครงสร้างผลึก	เฮกซะโกนอล	เททระโกนอล	ออร์โธโรมบิก

ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยน anatase ของ TiO₂

จากที่กล่าวไว้ข้างต้นว่า anatase เป็น anatase ที่ให้ประสิทธิภาพสูงในการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาร่วมกับแสง UV ดังนั้นในการใช้งาน TiO₂ ในการสลายสารมลพิษให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด จึงมีกระบวนการในการเปลี่ยน anatase ของ TiO₂ ให้ได้ anatase มากที่สุด ซึ่งสถานะในการทำให้เกิด anatase สูงสุดเกี่ยวข้องกับหลายปัจจัย ดังนี้

1. อุณหภูมิการเผา TiO₂

อุณหภูมิการเผา TiO₂ ที่อุณหภูมิ 400°C หรือต่ำกว่า ทำให้เกิด anatase สูงสุดมากกว่าร้อยละ 99 แต่เมื่อเทียบอุณหภูมิสูงกว่านี้ anatase เริ่มเปลี่ยนไปเป็น rutile โดยอุณหภูมิที่เปลี่ยน anatase เป็น rutile อาจแตกต่างกันไปตามสถานะการศึกษา เช่น 500°C [11], 600°C [19], 650°C [20] และ 900°C [21]

2. เวลาในการเผา

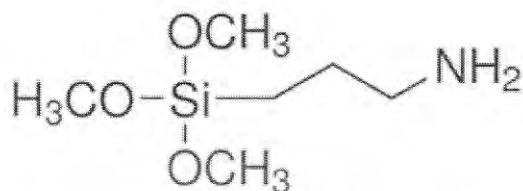
เวลาในการเผา ยิ่งใช้เวลาในการเผานาน โอกาสที่ TiO₂ anatase เปลี่ยนรูปไปเป็น rutile ยังมีมาก และอาจทำให้ขนาดอนุภาคของ TiO₂ มีขนาดใหญ่ขึ้นด้วย [14] แต่หากเผา TiO₂ ที่อุณหภูมิสูงอย่างรวดเร็ว anatase ยังไม่เปลี่ยนเป็น rutile แม้เผาที่อุณหภูมิสูงถึง 900°C [22]

2.6 สารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) [23]

สารคู่ควบไซเลน เป็นสารที่มีซิลิกอนเป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีปลายข้างหนึ่งเป็นเอทอกซี (CH₃CH₂O-) หรือเมทอกซี (CH₃O-) ซึ่งทำปฏิกิริยากับหมู่ไซลันอลบนผิวซิลิกา อีกปลายเป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีความเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ดังรูปที่ 2.6 ตัวอย่างของสารคู่ควบไซเลน เช่น 3-อะมิโน-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน (3-aminopropyltrimethoxysilane, APTMS), 3-ไอโซไซยานาโท-โพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน (3-Isocyanatopropyltrimethoxysilane, IPTMS) โดยในงานวิจัยนี้ เลือกใช้ออกทาคิลไตรคลอโรไซเลน (Octadecyltrichlorosilane, OTS) ในการดัดแปรพื้นผิวทำให้มีการกระจายตัวในพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น ซึ่งเรียกตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำการดัดแปรพื้นผิวแล้วว่า OTS-modified TiO_2



รูปที่ 2.6 โครงสร้าง 3-aminopropyltrimethoxysilane (APTMS) [24]

Octadecyltrichlorosilane (OTS) เป็นสารเคมีที่มีพันธะเคมีระหว่างอะตอมของคาร์บอนและโลหะ โมเลกุลมีทั้งส่วนที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ คือ สายโซ่ยาวของหมู่อัลคิล ($-\text{C}_{18}\text{H}_{37}$) เป็นส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) และส่วนที่มีขั้ว ($-\text{SiCl}_3$) เป็นส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) มีสูตรโมเลกุลคือ $\text{C}_{18}\text{H}_{37}\text{Cl}_3\text{Si}$ ดังรูปที่ 2.7 มีลักษณะเป็นของเหลว มีจุดหลอมเหลวเท่ากับ 22°C และมีจุดเดือดเท่ากับ 223°C สามารถใช้ในอุตสาหกรรมของสารกึ่งตัวนำในรูปแบบชั้นฟิล์มบางบนพื้นผิวซิลิคอนไดออกไซด์ มีความไวไฟ ทำปฏิกิริยากับน้ำและอากาศได้ว่องไว และมีฤทธิ์กัดกร่อนอย่างรุนแรง

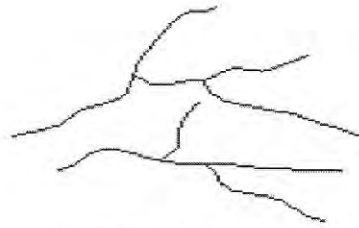


รูปที่ 2.7 สูตรโครงสร้างของ Octadecyltrichlorosilane (OTS) [25]

2.7 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE) [26]

2.7.1 การสังเคราะห์

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE) ในทางการค้าผลิตด้วยกระบวนการความดันสูง (High pressure process) ประมาณ $150\text{--}350\text{ MPa}$ และอุณหภูมิ $80\text{--}300^\circ\text{C}$ ใช้ตัวริเริ่มชนิดอนุมูลอิสระ หรือถ้าใช้ออกซิเจน (ประมาณ $0.03\text{--}1\%$) ใช้ความดันประมาณ $1,500$ บรรยากาศ อุณหภูมิ 200°C เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันโดยการป้อนมอนอเมอร์และตัวริเริ่มเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งปฏิกิริยาการเกิด LDPE มีการคายความร้อนออกมาสูงมาก การใช้มอนอเมอร์ความเข้มข้นมากและความดันสูง ทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีโซ่กิ่ง ดังรูปที่ 2.8



LDPE

รูปที่ 2.8 โครงสร้างของ LDPE มีสายโซ่โมเลกุลแบบโซ่กิ่ง [25]

2.7.2 สมบัติทั่วไปของ LDPE

จากโครงสร้างของ LDPE มีโซ่กิ่งจำนวนมาก ทำให้พอลิเมอร์ชนิดนี้มีความเป็นผลึกน้อยจึงมีลักษณะใส ความหนาแน่นต่ำ T_m ต่ำประมาณ $80-110^{\circ}\text{C}$ และมีช่วงกว้าง มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง $6,000-40,000$ กรัม/โมล สมบัติบางประการของ LDPE แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 สมบัติบางประการของ LDPE

สมบัติ	ค่า
เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (%Crystallinity)	40-55
อุณหภูมิหลอมผลึก (Melting temperature, $^{\circ}\text{C}$)	80-110
ความแข็งแรงดึง (Tensile strength, MPa)	8-10
อีลาสติคโมดูลัส (Elastic modulus, MPa)	200-400
ความแข็งแรงกระแทก (Impact strength, Notched izod, Jm^{-2})	No break
อุณหภูมิอ่อนตัว (Heat-deflection temperature, $^{\circ}\text{C}$)	80-90

2.7.3 การนำไปใช้งาน

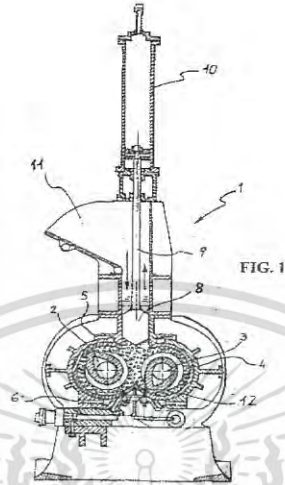
LDPE ประมาณ 65% ใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์โดยนำไปแปรรูปเป็นฟิล์ม เช่น ใช้ทำถุงเย็น ถุงสินค้าทั่วไป ฟิล์มหดรูป (Shrink film) และฟิล์มยืด (Stretch film) เป็นต้น ประมาณ 13% ใช้งานผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยการฉีด ได้แก่ ขวด ถ้วย ถาดบรรจุอาหารและยา ของเล่นเด็ก และของใช้ภายในบ้าน เป็นต้น ประมาณ 22% ใช้ทำฉนวนหุ้มสายไฟ สายเคเบิล และวัสดุเคลือบผิว

2.8 เครื่องผสมแบบปิด [27]

วิธีหนึ่งที่ใช้ในการปรับปรุงการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม ได้แก่ การอาศัยแรงเชิงกล (Mechanical force) โดยเฉพาะแรงเฉือน (Shear force) ซึ่งแรงเชิงกลดังกล่าวทำให้ขนาดของวัฏภาคที่กระจายตัว (Dispersed phase size) เล็กลง ซึ่งหมายถึงการเข้ากันได้ที่ดีขึ้นของระบบพอลิเมอร์ผสม โดยเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) นับว่าเป็นเครื่องมือที่สำคัญอย่างหนึ่งในการใช้ผสมพอลิเมอร์ผสม (Polymer blends) เครื่องผสมแบบปิดมีองค์ประกอบที่สำคัญ 4 ส่วน ได้แก่ ห้องผสม (Chamber) ตัวบดผสม (Rotor) แท่งกด (Ram) และระบบหล่อเย็น (Cooling system) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 อย่างไรก็ตามการกระจายตัวที่ดีและการลดขนาดของวัฏภาคที่กระจายตัวสามารถเกิดขึ้นได้ดีในระบบการผสมที่ประกอบด้วยกระแสไหลแบบเฉือน (Shear flow) ร่วมกับการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลง แก้ไข และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบดึงยืด (Extension flow) นอกจากการไหลแล้วยังมีตัวแปรอีกหลายชนิดที่มีผลต่อคุณภาพการผสม เช่น อุณหภูมิที่ใช้ในการผสม (Mixing temperature) ความเร็วรอบการผสม (Mixing speed) สัดส่วนปริมาตรของวัสดุต่อความจุของห้องผสม (Fill factor) และลำดับการเติมสารเคมี (Charging sequence) เป็นต้น



รูปที่ 2.9 เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) [27]

ข้อดีของเครื่องผสมแบบปิด

- ผลิตได้ครั้งละมากๆ
- ใช้เวลาในการผลิตน้อย
- ประหยัดแรงงาน
- สารที่ใส่ไม่เกิดการรั่วไหลหรือฟุ้งกระจาย

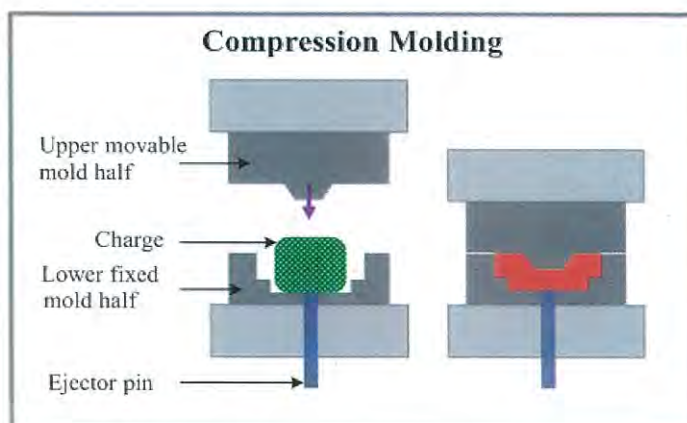
ข้อเสียของเครื่องผสมแบบปิด

- มีความร้อนสะสมในเครื่องมาก อุณหภูมิในการผสมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว
- ผสมสารได้ที่ละแบทช์ (Batch)

2.9 เครื่องกดอัด [28]

กระบวนการกดอัด (Compression molding) เป็นเทคนิคการแปรรูปพลาสติกที่ไม่ซับซ้อน โดยหลักการทำงานของกระบวนการอัด คือ การนำเม็ดหรือผงพลาสติกมาอัดในแม่แบบ (Mold) ภายใต้ความดันและอุณหภูมิที่เหมาะสม เพื่อให้พลาสติกหลอมและไหลเข้าสู่ช่องว่างภายในแม่แบบ (Cavity) ส่วนประกอบหลักของเครื่อง คือ แผ่นเหล็กอัด (Platens) จำนวนสองชุด ซึ่งแผ่นหนึ่งสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงได้ (Movable platen) ส่วนอีกแผ่นหนึ่งถูกยึดติดกับที่ (Fixed platen) แม่แบบสำหรับการแปรรูปพลาสติกทั้งตัวผู้และตัวเมียถูกยึดติดกับแผ่นเหล็กอัดทั้งสองแผ่นนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 เครื่องกดอัด (Compression molding machine) [29]

ระบบให้ความร้อนและหล่อเย็น ระยะเวลาการทำงานต่อวัฏจักรของการอัดนั้นขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตที่เป็นตัวนำความร้อนที่ไม่ดี และในการอัดต้องให้อุณหภูมิถึงจุดที่เกิดการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลได้ ซึ่งหากเติมเม็ดหรือผงพลาสติกลงในแม่แบบโดยตรงทำให้ระยะเวลาในการอัดนานมาก ดังนั้นจึงควรมีการให้ความร้อนแก่พลาสติกก่อนนำเข้าแม่แบบ เพื่อให้พลาสติกสามารถไหลได้ดีขึ้น ลดระยะเวลาในการทำงานต่อวัฏจักรให้สั้นลง และยังสามารถลดความดันที่ใช้ในการอัดด้วย

ปัจจุบันเทคนิคนี้ใช้ในการแปรรูปพลาสติกอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแปรรูปยางและพลาสติกประเภทเทอร์โมเซต เช่น ฟีนอลิก (Phenolic resin) อีพอกซีเรซิน (Epoxy) เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ (Melamine formaldehyde) และยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ (Urea formaldehyde) เป็นต้น

ข้อดีของกระบวนการกดอัด เมื่อเทียบกับการขึ้นรูปแบบต่างๆ

- แม่แบบมีราคาถูก และผลิตได้ง่าย
- มีการสูญเสียวัสดุุน้อยมาก คือ มีครีบหรือ Flash เกิดขึ้นน้อยมากประมาณ 2-5%

เท่านั้น

- โมเลกุลของพลาสติกเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ (Reorientation) น้อยมากเนื่องจากในระหว่างการอัดเกิดการไหลของพลาสติกเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

- เครื่องกดอัดมีราคาถูกกว่าเครื่องแปรรูปพลาสติกชนิดอื่นๆ
- ไม่เกิดเส้นรอยเชื่อม (Weld line) บนชิ้นงาน ซึ่งเส้นรอยเชื่อมนี้เป็นจุดบกพร่องที่ทำให้ชิ้นงานแตกหักได้ง่าย

- แม่แบบสำหรับกระบวนการกดอัดไม่มีส่วนของท่อวิ่ง (Runners) ท่อนำ (Sprue) และประตูเข้า (Gate) ทำให้ไม่มีรอยตำหนิบนชิ้นงาน

ข้อเสียของกระบวนการกดอัด เมื่อเทียบกับการขึ้นรูปแบบต่างๆ

- ไม่สามารถผลิตชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้
- เวลาของวัฏจักรการผลิต (Cycle time) ค่อนข้างยาว ทำให้กำลังการผลิต

(Productivity) ต่ำ

- การผลิตชิ้นงานที่หน้าต้องใช้เวลานาน
- จำเป็นต้องมีการตัดครีบทิ้งเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สมยศ รัตนไพฑูริย์กิจ [4] ศึกษาฟิล์ม LDPE ที่ย่อยสลายได้ด้วยแสง ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 เตรียมจากสารตั้งต้นสังกะสี (ZnO/TiO_2) โดยตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD, FT-IR, SEM, การเปลี่ยนแปลงสี (ΔE) และสมบัติการรับแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ พบว่าการเผา TiO_2 ที่ $T=400^\circ\text{C}$ และ Zn/TiO_2 ที่เตรียมจาก $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ ที่ $T=300^\circ\text{C}$ ให้ค่าอัตราส่วน $I_{\text{A}}/I_{\text{R}}$ มากที่สุด ทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะและค่าความยาวคลื่น (λ) ที่ดูดกลืนแสงมากที่สุด จากนั้นศึกษาการกระจายตัวของ TiO_2 ในฟิล์ม LDPE พบว่าอยู่ในลักษณะอนุภาคเดี่ยวและเป็นกลุ่มก้อน และมีการกระจายของอนุภาค TiO_2 ในฟิล์ม LDPE ลดลงเมื่อปริมาณ TiO_2 เพิ่มขึ้น เนื่องจากความเป็นขั้วที่แตกต่างกันของ TiO_2 และ LDPE จึงทำให้อนุภาคของ TiO_2 มีโอกาสเกาะตัวรวมกันเป็นกลุ่มก้อนในฟิล์ม LDPE จากนั้นทดสอบการย่อยสลายของฟิล์ม LDPE พบว่าฟิล์ม LDPE ที่ผสม TiO_2 ในปริมาณ 1 phr เผาที่ $T=400^\circ\text{C}$ ให้ค่าดัชนีคาร์บอนิลและค่าการเปลี่ยนสีของฟิล์ม (ΔE) เพิ่มสูงขึ้น เมื่อเวลาในการฉายแสง UV นานขึ้น จากนั้นศึกษาผลของปริมาณ TiO_2 ที่ 1-3 phr ที่ผสมกับ LDPE พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ TiO_2 ผสมกับ LDPE ส่งผลให้ค่าดัชนีคาร์บอนิลและค่าการเปลี่ยนแปลงสี (ΔE) เพิ่มสูงขึ้น แสดงว่าเกิดการตัดขาดของสายโซ่ได้มากขึ้น ขณะที่ค่า Stress at yield และ Stress at break ของฟิล์มมีค่าลดลง จากนั้นศึกษาฟิล์ม LDPE ที่ผสมกับ Zn/TiO_2 ในปริมาณ 1 phr เผาที่ $T=300^\circ\text{C}$ พบว่ามีค่าดัชนีคาร์บอนิลและการเปลี่ยนสีของฟิล์มช้าในช่วงต้น เมื่อเวลาการฉายแสง UV นานขึ้นฟิล์ม LDPE มีการเกิดหมู่คาร์บอนิลและการเปลี่ยนสีของฟิล์มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แสดงว่าฟิล์มมีการชะลอการย่อยสลายในช่วงต้น เพื่อป้องกันการย่อยสลายในระยะเวลากำหนดการใช้งาน

กุลวดี จรัสศรีสุนทร และคณะ [5] ศึกษาความสามารถในการย่อยสลายของฟิล์ม LDPE ที่ย่อยสลายภายใต้แสง UV เป็นเวลา 50, 100, 150 และ 200 ชั่วโมง โดยผสม LDPE กับ TiO_2 หรือ Zn-doped TiO_2 1 phr แล้วนำไปขึ้นรูปฟิล์ม จากนั้นศึกษาผลการสลายตัวของ MO เป็นเวลา 10-90 นาที พบว่าเมื่อฉายแสง UVA เพิ่มขึ้น TiO_2 ที่เผาที่ $T=300^\circ\text{C}$ และ Zn-doped TiO_2 ที่ $T=350^\circ\text{C}$ มีอัตราการสลายตัวของ methyl orange (MO) สูงที่สุด เนื่องจากมีอัตราส่วน $I_{\text{A}}/I_{\text{R}}$ มากที่สุด จากนั้นนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าในการเผา TiO_2 ที่ $T=300^\circ\text{C}$ และ Zn-doped TiO_2 ที่ $T=350^\circ\text{C}$ ให้อัตราส่วน $I_{\text{A}}/I_{\text{R}}$ มากที่สุด มีค่าพลังงานแบนด์แก๊ปลดลง ทำให้มีค่าการดูดกลืนแสงมากที่สุด จากนั้นวิเคราะห์ค่าดัชนีคาร์บอนิลด้วยเทคนิค FT-IR พบว่าฟิล์มที่ถูกฉายแสง UVA เกิดหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิลเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาการฉายแสงเพิ่มขึ้น จากนั้นศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์ม (ΔE) ด้วยเครื่องวัดสี พบว่าเมื่อเวลาฉายแสง UVA นานขึ้น ค่าการเปลี่ยนแปลงสี (ΔE) มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผสมลงไปสามารถช่วยเร่งปฏิกิริยาการดูดซับพลังงานได้ จากนั้นศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าสูตรที่มีการผสม TiO_2 เพียงอย่างเดียวมีการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อน แต่สูตรที่มีการใส่กรดสเตียริก มีการกระจายตัวดีขึ้น เนื่องจากกรดสเตียริกที่เป็นสารช่วยกระจายตัวไปเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา และช่วยปรับสภาพขั้ว TiO_2 ส่งผลให้มีการกระจายตัวของ TiO_2 ได้ดีทำให้มีความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์และ TiO_2 มากขึ้น ฟิล์มมีพื้นที่ผิวขรุขระมากขึ้นเมื่อเวลาฉายแสง UVA มากขึ้น เนื่องจากเกิดการย่อยสลายของฟิล์ม ศึกษาสมบัติการรับแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ พบว่าฟิล์มที่ผ่านการฉายแสง 200 ชั่วโมง มีค่า %Elongation at break ลดลงเป็นอย่างมาก ส่วนค่า Young's modulus และค่า Stress at break มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการย่อยสลายโดยเกิดการเชื่อมโยงของสายโซ่ (Crosslink)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Zapata, P.A. และคณะ [6] ศึกษาผลของซีโอไลต์ HY ที่มีการดัดแปรพื้นผิวด้วยออกทาเดคซิลไตรคลอโรไซเลน (Octadecyltrichlorosilane) ทำให้ซีโอไลต์ HY มีสมบัติไม่ชอบน้ำ เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวอิมัลซิไฟเออร์ของน้ำกับน้ำมันในเชื้อเพลิงชีวภาพ จากนั้นนำมาตรวจวิเคราะห์ด้วย Detailed XRD, SEM, HRTEM และ BET พบว่าซีโอไลต์ HY มีความสามารถรักษาโครงสร้างผลึก พื้นที่ผิว ความมีรูพรุน และค่าความเป็นกรดที่ดีขึ้นกว่าก่อนการดัดแปรพื้นผิว

จิราภรณ์ คำจันทร์ [30] ศึกษาการพัฒนาสารเคลือบผิว $TiO_2/SnO_2/X$ ระดับนาโน โดยการศึกษาอุณหภูมิในการเผา TiO_2 ที่อุณหภูมิ 300-700°C จากนั้นวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD และ DTA พบว่าอุณหภูมิการเผาที่สูงขึ้นส่งผลให้ผลึก TiO_2 มีขนาดใหญ่ขึ้น และที่อุณหภูมิการเผา 400°C และ 500°C แสดงประสิทธิภาพโฟโตแคตาไลติกดีกว่าอุณหภูมิ 300°C ส่วนอิทธิพลของสารเจือ SiO_2 หรือ SnO_2 วิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าเมื่อเจือ SiO_2 หรือ SnO_2 ลงไปทำให้วิฤภาคอะนาเทสเสถียรที่อุณหภูมิสูงขึ้น แต่ในขณะเดียวกันเมื่อปริมาณ SiO_2 หรือ SnO_2 เพิ่มขึ้นขนาดผลึกของ TiO_2 มีขนาดเล็กลง

Zhao, X. และคณะ [31] ศึกษาการย่อยสลายของพอลิเอทิลีนผสม TiO_2 โดยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงภายใต้ UV และแสงอาทิตย์ โดยการผสม TiO_2 ในปริมาณ 0.02, 0.1 และ 1.0 wt% แล้วนำไปขึ้นรูปฟิล์ม จากนั้นนำมาวิเคราะห์การเกิดหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR พบว่าปริมาณของ TiO_2 ในฟิล์มพอลิเอทิลีนที่เพิ่มขึ้นและระยะเวลาในการฉายแสงเพิ่มมากขึ้น ทำให้ฟิล์มเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิล จากนั้นศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าพื้นผิวขรุขระมากขึ้น แสดงว่าเกิดการย่อยสลายได้มากขึ้น

ชลลดา อธิการุณ [32] ศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสงโดย TiO_2 พบว่าประสิทธิภาพการเป็นตัวเร่งของ TiO_2 ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น โครงสร้างผลึก พื้นที่ผิว หรือขนาดอนุภาค เป็นต้น โดยอนุภาคที่มีขนาดเล็กส่งผลให้มีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น TiO_2 ในรูปผลึกอะนาเทสมีประสิทธิภาพมากกว่ารูปผลึกรูไทล์ เนื่องจากผลึกรูไทล์นั้นมีการสูญเสียพื้นที่ผิวที่ว่างไว้ต่อการเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์สูงกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ TiO_2 รูปผลึกอะนาเทสกลไกการย่อยสลายของสารประกอบอินทรีย์ขึ้นอยู่กับอัตราการดูดซับบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้เทคนิค Zeta potential ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงประจุระหว่างการทำปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสง พบว่าถ้า TiO_2 มีพื้นที่ผิวมากทำให้อัตราการดูดซับสารประกอบอินทรีย์เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้อัตราการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์สูงขึ้น การนำ TiO_2 ในรูปผลึกอะนาเทสมาทดสอบประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวของสารประกอบ methyllic orange ภายใต้แสง UV พบว่าสารประกอบดังกล่าวถูกย่อยสลายได้มากกว่า 90% ภายใน 1 ชั่วโมง เนื่องจากผลึกอะนาเทสใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่ำกว่าการสังเคราะห์รูไทล์ทำให้พื้นที่ผิวมี OH^- มากกว่าซึ่งสามารถผลิต OH^\bullet ได้มาก ซึ่ง OH^\bullet เป็นตัวออกซิแดนท์หลักที่ทำให้การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเกิดได้ดี

Zhao, J. และคณะ [33] ศึกษาเกี่ยวกับการดัดแปรพื้นผิว TiO_2 อนุภาคนาโนด้วยสารคู่ควบไซเลน คือ 3-aminopropyltrimethoxysilane (APTMS) และ Isocyanatopropyltrimethoxysilane (IPTMS) ด้วยกระบวนการโซล-เจล จากนั้นนำมาวิเคราะห์ด้วย TGA โดยใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 100°C ถึง 800°C พบว่าน้ำหนัก TiO_2 ที่กราฟต์ด้วย IPTMS หายไปเป็น 2 เท่า ของที่กราฟต์ด้วย APTMS และจากการทดสอบด้วย FT-IR พบว่าการกราฟต์ด้วย IPTMS ปรากฏพีก C-H stretching ที่ 2870, 2928 cm^{-1} พีก Si-O-Si ที่ 1040 cm^{-1} พีก Ti-O-Si ที่ 940-910 cm^{-1} และพีก HN-CO ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1550 cm^{-1} การกราฟต์ด้วย APTMS ปรากฏพีค C-H stretching ที่ 2870, 2928 cm^{-1} พีค Si-O-Si ที่ 1040 cm^{-1} Ti-O-Si ที่ 940-910 cm^{-1} พีค N-H bending ที่ 1605-1560 cm^{-1} โดยการกราฟต์ด้วย IPTMS ปรากฏพีค Si-O-Si, Ti-O-Si, C-H stretching มีความเข้มสูงกว่าการกราฟต์ด้วย APTMS

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการย่อยสลายของฟิล์ม LDPE โดยการผสมตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงภายใต้แสงยูวี พบว่าฟิล์ม LDPE ที่ผสมกับ TiO_2 ปริมาณที่มากขึ้น และเวลาในการฉายแสงที่นานขึ้น ส่งผลให้เกิดการย่อยสลายได้สูงขึ้น แต่สภาพผิวที่แตกต่างกันของ TiO_2 และ LDPE ซึ่ง TiO_2 มีความเป็นขี้ ในขณะที LDPE ไม่มีขี้ จึงทำให้อุณหภูมิของ TiO_2 กระจายตัวไม่ดีและมีโอกาสเกิดการเกาะตัวรวมกันเป็นกลุ่มก้อนในฟิล์ม LDPE ส่งผลให้เกิดการย่อยสลายได้น้อยลง งานวิจัยนี้จึงศึกษาการดัดแปรพื้นผิวของ TiO_2 ด้วยสารคู่คววไซเลน คือ ออกทาคิลไตรคลอโรไซเลน (OTS) ทำให้ TiO_2 มีการกระจายตัวที่ดี และเข้ากันได้ดีกับ LDPE ส่งผลให้ฟิล์มเกิดการย่อยสลายได้ดีขึ้น และศึกษาการผสมตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 และ OTS-modified TiO_2 ใน LDPE ในปริมาณ 0.25, 0.5, 1 phr จากนั้นทำการขึ้นรูปฟิล์ม เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการย่อยสลายฟิล์ม LDPE ด้วยแสง UV โดยเทคนิค FT-IR และการเปลี่ยนสีของฟิล์ม โดยเครื่องวัดสี ทดสอบสมบัติเชิงกล และศึกษาสัณฐานวิทยาด้วย SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE) เกรดเป่าฟิล์ม LD2426K บริษัท InnoPlus (ตารางที่ 3.1)
2. ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo erba reagents จำกัด
3. ออกทาดecilไตรคลอโรไซเลน (Octadecyltrichlorosilane, OTS) บริษัท Sigma-Aldrich จำกัด
4. โทลูอีน (Toluene) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo erba reagents จำกัด
5. เมทานอล (Methanol) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo erba reagents จำกัด
6. เอทานอล (Ethanol) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo erba reagents จำกัด
7. ก๊าซไนโตรเจน (Nitrogen gas) บริษัท Praxair จำกัด
8. ไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen)
9. เมทิลออเรนจ์ (Methyl orange) บริษัท Labchem จำกัด
10. ซิลิกาเจล บริษัท Tian-Nam Chemical Industrial Trade จำกัด

ตารางที่ 3.1 สมบัติทั่วไปของ LDPE เกรด LD2426K

สมบัติ	LD2426K	Test Method
Melt flow rate	4.0 g / 10 min	ISO 1133
Density	0.924 g / cm ³	ISO 1183
Melting temperature	110°C	ISO 11357
Vicat softening point	93°C	ASTW D1525
Tensile strength at yield	11 N / mm ²	ISO 527
Tensile modulus	260 N / mm ²	ISO 527

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ปริมาณเครื่องแก้วและพลาสติก
2. เครื่องผสมสารแบบปิด (Internal mixer) รุ่น W 50 EHT บริษัท MELCHERS จำกัด
3. เครื่องกดอัด (Compression molding machine) รุ่น LP 20 บริษัท Lab Tech Engineering จำกัด
4. เครื่องชั่งสารแบบดิจิตอลทศนิยม 4 ตำแหน่ง รุ่น ED224S บริษัท Sartorius จำกัด
5. เครื่องบดพลาสติก (Plastic grinder) รุ่น Bosco A600 บริษัท Bosco Engineering จำกัด
6. เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal testing machine, UTM) รุ่น LR 5K บริษัท LLOYD Instrument จำกัด
7. เครื่องฟูเรียรทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer, FT-IR) รุ่น FTIR spectrum Gx บริษัท Perkin elmer จำกัด และรุ่น NICOLET 6700 บริษัท Thermo scientific จำกัด
8. เครื่องกวนสาร (Magnetic stirrer)
9. เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) รุ่น Universal 320 บริษัท Hettich zentrifugen จำกัด
10. ตู้อบสาร (Oven) บริษัท Memmert จำกัด
11. ตู้อบแสง UVA
12. หลอดแสง UVA กำลัง 40 Watt 4 หลอด บริษัท Philips จำกัด
13. เตาเผา (Furnace) รุ่น L9/12P บริษัท Chavachote จำกัด
14. ไมโครมิเตอร์
15. ครูซิเบิล
16. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) รุ่น EVO MA 10 บริษัท Carl Zeiss จำกัด
17. เครื่องวัดสี (Colorimeter spectrophotometer) รุ่น Miniscan XE plus บริษัท HunterLab จำกัด
18. เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-visible spectrophotometer) รุ่น Evolution 201 บริษัท Thermo scientific จำกัด
19. เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonicator)
20. เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก อะนาลิเซอร์ (Thermogravimetric analyzer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การเตรียม TiO₂ และ OTS-Modified TiO₂

3.3.1 การเตรียม TiO₂

ชั่ง TiO₂ จำนวน 10 กรัม นำไปใส่ในชามระเหย เผาที่อุณหภูมิ 400°C โดยใช้ Heating rate 10°C/นาที่ และคงสภาวะอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง [4] ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง นำใส่ถุงพลาสติกแบบมีซิปลิด เก็บไว้ในเดซิคเคเตอร์

3.3.2 การเตรียม OTS-Modified TiO₂ [6]

เตรียมขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร 2 ใบ ชั่ง TiO₂ จำนวน 2 กรัม (จากหัวข้อที่ 3.3.1) และเติมโทลูอีน 40 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดใบที่ 1 จากนั้นนำเข้าเครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เติบโตลูอีน 100 มิลลิลิตร และเติม OTS 0.4 มิลลิลิตร ลงในขวดใบที่ 2 เทสารจากขวดใบที่ 2 ลงในขวดใบที่ 1 (ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจน) นำจุกยางห่อด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์มาปิด นำไปปั่นจนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำสารที่เตรียมได้แบ่งออกเป็น 4 ส่วนๆ ละ 40 มิลลิลิตร เทลงในหลอดเซนติฟิวปริมาณ 50 มิลลิลิตร จำนวน 4 หลอด นำไปหมุนเหวี่ยง โดยใช้ความเร็ว 3500 rpm เป็นเวลา 10 นาที สารละลายที่ได้มีตะกอนของ OTS-modified TiO₂ อยู่บริเวณก้นหลอด ด้านบนเป็นสารละลายใส ซึ่งมีฤทธิ์เป็นกรด เทสารละลายใสทิ้ง แล้วล้างตะกอนด้วยเอทานอลหลายๆ ครั้งจนกว่าสารละลายมีฤทธิ์เป็นกลาง ซึ่งสามารถทดสอบได้โดยการใช้กระดาษลิตมัสสีน้ำเงิน จนกว่ากระดาษลิตมัสไม่เปลี่ยนสี จากนั้นนำสารละลายมากรองด้วยวิธีการกรองแบบลดความดัน โดยใช้กระดาษกรองไนลอน นำตะกอนที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้เก็บไว้ในถุงพลาสติกแบบมีซิปลิด และนำถุงดำมาคลุมทับอีกชั้นแล้วเก็บไว้ในเดซิคเคเตอร์

3.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของ TiO₂ และ OTS-Modified TiO₂

3.4.1 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน โดยเทคนิค Diffuse reflectance infrared fourier transform spectroscopy (DRIFT-IR) [6, 14-15]

นำตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ และ OTS-Modified TiO₂ ที่เตรียมได้ ไปวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน โดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี โดยวิเคราะห์ในช่วง 600–4000 cm⁻¹ เพื่อหาหมู่ฟังก์ชันของ TiO₂ โดยดูจากพีคของ O-Ti-O Stretching กับ O-Ti-O Bending และหมู่ฟังก์ชันของ OTS-Modified TiO₂ ดูจากพีคของ -CH₂- Stretching กับ -CH₃ Stretching และพีคของ Ti-O-Si Stretching

3.4.2 การทดสอบการสลายตัวทางแสงด้วยเมทิลออเรนจ์ [16]

การทดสอบการสลายตัวทางแสงของเมทิลออเรนจ์ (Methyl orange, MO) ทำได้โดยการเติมสารตัวอย่าง 20 มิลลิกรัม ลงไปในสารละลายเมทิลออเรนจ์เข้มข้น 40 ppm นำของผสมไปใส่ในเครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำของผสมเข้าสู่ตู้ทดสอบที่มีหลอด UVA ขณะทดลองทำการปั่นของผสมตลอดเวลา โดยปั่นก่อนการฉายแสง 30 นาที หลังจากนั้นฉายแสงของผสมเป็นเวลา 0, 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที นำของผสมใส่หลอดเซนติฟิว นำไปเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยง โดยใช้ความเร็ว 9000 rpm เป็นเวลา 10 นาที 2 ครั้ง เทสารละลายชั้นบนใส่ปิเปต (ระวังไม่ให้ตะกอนติดมา) จากนั้นนำไปทำการวัดความเข้มข้นด้วยเครื่อง UV-visible ที่ความยาวคลื่น 464 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 การหาปริมาณออกเทาเดกซิลไตรคลอโรไซเลน (OTS) ในตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำการตัดแปรพื้นผิวด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis

นำตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 10-15 มิลลิกรัม ไปวิเคราะห์ในเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก อะนัลไลเซอร์ โดยให้ความร้อนในบรรยากาศของ N_2 จนถึงอุณหภูมิ $550^{\circ}C$ จากนั้นเปลี่ยนเป็นบรรยากาศของ Air-zero จนถึงอุณหภูมิ $700^{\circ}C$ เพื่อให้ OTS เกิดการสลายตัวอย่างสมบูรณ์ โดยใช้อัตราในการให้ความร้อน $20^{\circ}C$ ต่อนาที จากนั้นนำมาวิเคราะห์หาน้ำหนักที่หายไป

3.5 การขึ้นรูปฟิล์ม [5]

3.5.1 การคอมปาวด์ด้วยเครื่องผสมแบบปิด

นำเม็ดพลาสติกมาผสมกับ TiO_2 และ OTS-modified TiO_2 ให้ได้อัตราส่วนต่างๆ ดังตารางที่ 3.2 ในเครื่อง Internal mixer ขนาด 50 กรัม โดยมีสภาวะดังนี้

- อุณหภูมิ $170^{\circ}C$
- ความเร็วรอบ 100 rpm
- เวลา 20 นาที

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนของเม็ดพลาสติกกับ TiO_2

สูตร	พอลิเมอร์ที่ใช้ (g)	TiO_2 (phr)	OTS-Modified
	LDPE		TiO_2 (phr)
LD	100	-	-
LDT(0.25)	100	0.25	-
LDT(0.5)	100	0.5	-
LDT(1)	100	1	-
LDMOT(0.25)	100	-	0.25
LDMOT(0.5)	100	-	0.5
LDMOT(1)	100	-	1

นำพลาสติกที่ได้จากเครื่องผสมแบบปิดไปเข้าเครื่องบด

3.5.2 การขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่างด้วยกระบวนการกดอัด

ทำการขึ้นรูปชิ้นงานเป็นฟิล์มบางด้วยกระบวนการอัดโดยใช้สภาวะเครื่องกดอัด ดังนี้

- ขนาดแม่พิมพ์แผ่นเรียบ $20 \times 20 \times 1 \text{ cm}^3$
- ความดันในการกดอัด 1800 psi
- อุณหภูมิในการกดอัด $190^{\circ}C$
- เวลาในการอุ่นแม่พิมพ์ 5 นาที
- เวลาในการอุ่นพอลิเมอร์ผสม 9 นาที
- เวลาในการกดอัดความร้อน 10 นาที
- อุณหภูมิในการกดอัดเย็น $12^{\circ}C$
- เวลาในการกดอัดเย็น 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การตรวจสอบปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในฟิล์ม LDPE

1. นำครุชชีเบลมาทำการเผาในตู้เผา ทำการเผาที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องแล้วนำไปใส่ไว้ในเดซิเคเตอร์
2. นำครุชชีเบลมาชั่งน้ำหนัก และใส่พอลิเมอร์คอมปาวด์ปริมาณ 2 ใน 3 ของความสูงและชั่งน้ำหนักกำหนดเป็นน้ำหนักก่อนการเผา
3. นำมาเผาด้วยตะเกียงเบนเสนจนไม่เห็นเปลวไฟของพอลิเมอร์คอมปาวด์
4. นำครุชชีเบลไปทำการเผาอีกครั้ง ที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องแล้วนำไปใส่ไว้ในเดซิเคเตอร์
5. ชั่งน้ำหนักครุชชีเบลอีกครั้งกำหนดเป็นน้ำหนักหลังการเผา แล้วนำมาคำนวณตามสมการดังนี้

$$\text{น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา} = \text{น้ำหนักครุชชีเบลหลังการเผา} - \text{น้ำหนักครุชชีเบลที่ไม่มีตัวอย่าง}$$

3.7 การทดลองโดยการฉายแสงภายใต้รังสี UVA

ทำการประกอบกล่อง UVA โดยกล่องมีขนาด กว้าง x ยาว x สูง เป็น 34 x 72 x 30 cm³ ภายในมีหลอดรังสี UVA 40 Watt ยาว 60 cm วางเรียงกัน 4 หลอด ดังแสดงในรูปที่ 3.1 จากนั้นทำการทดสอบหาบริเวณที่สามารถฉายแสงได้ด้วยการนำกระดาษ 100 ปอนด์มาตัดให้ได้ขนาดตามกล่อง ตีตารางขนาด 1 x 1 นิ้ว จากนั้นหยดเมทิลีนบลู 1 หยด ฉายแสงเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดูบริเวณที่สีจางลงไปเสมอกัน เพื่อเลือกใช้เป็นบริเวณสำหรับวางฟิล์มเพื่อทดสอบ (เส้นทึบ) จากนั้นตัดแผ่นฟิล์มตัวอย่างให้มีขนาด 1 x 8 cm² วางลงในบริเวณดังกล่าว โดยทำการฉายแสงเป็นเวลา 50, 100, 150 และ 200 ชั่วโมง โดยมีระยะห่างระหว่างแผ่นฟิล์มกับหลอด UVA 6 cm



รูปที่ 3.1 ลักษณะการวางชิ้นงานและระยะห่างของชิ้นงานกับหลอด UVA

3.8 การวิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม

3.8.1 การวัดค่าดัชนีคาร์บอนิล (Carbonyl index)

นำฟิล์มทั้งก่อนฉายแสง และหลังฉายแสง UVA เป็นเวลา 50, 100, 150 และ 200 ชั่วโมง มาทำการวิเคราะห์หาค่าดัชนีคาร์บอนิลด้วยเครื่อง FT-IR เป็นเทคนิคการสะท้อนของลำแสง IR ช่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลขคลื่น $500\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ จากอัตราส่วนพื้นที่ใต้พีคการดูดกลืน (Absorbance) ที่ 1720 cm^{-1} และ 729 cm^{-1} เพื่อวิเคราะห์หาค่าดัชนีคาร์บอนิล (C.I.)

3.8.2 การเปลี่ยนแปลงสี

นำฟิล์มที่เตรียมได้ทั้งก่อนและหลังฉายแสง UVA เป็นเวลา 50, 100, 150 และ 200 ชั่วโมง มาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์มด้วยเครื่องวัดสี (Colorimeter spectrophotometer) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยสภาวะ $D65/10^\circ$, L^* , a^* และ b^* วิเคราะห์โดยการทำวัดสีตามมาตรฐาน และสีขาวมาตรฐานจากแผ่นกระเบื้อง เพื่อสร้างค่ามาตรฐาน (Standardization) จากนั้นทำการวัดสีแผ่นฟิล์ม ณ บริเวณเดียวกันทั้งก่อนและหลังฉายแสง UVA จากนั้นคำนวณหาค่าความแตกต่างของสีโดยรวม (Total color difference, ΔE) จากสูตร $\Delta E = (\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2}$ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของสีหรือเทียบจากค่าของ L^* , a^* และ b^* ซึ่งดูได้จากรูปที่ 3.2 โดย

$L^* = 0$ มองเห็นเป็นสีดำ

$L^* = 100$ มองเห็นเป็นสีขาว

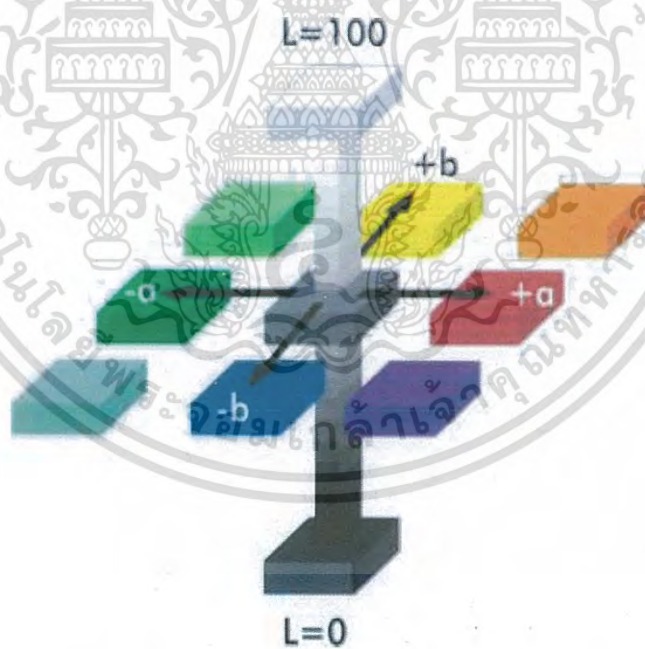
a^* มีค่า + สีไปในทิศทางของสีแดง

a^* มีค่า - สีไปในทิศทางของสีเขียว

b^* มีค่า + สีไปในทิศทางของสีเหลือง

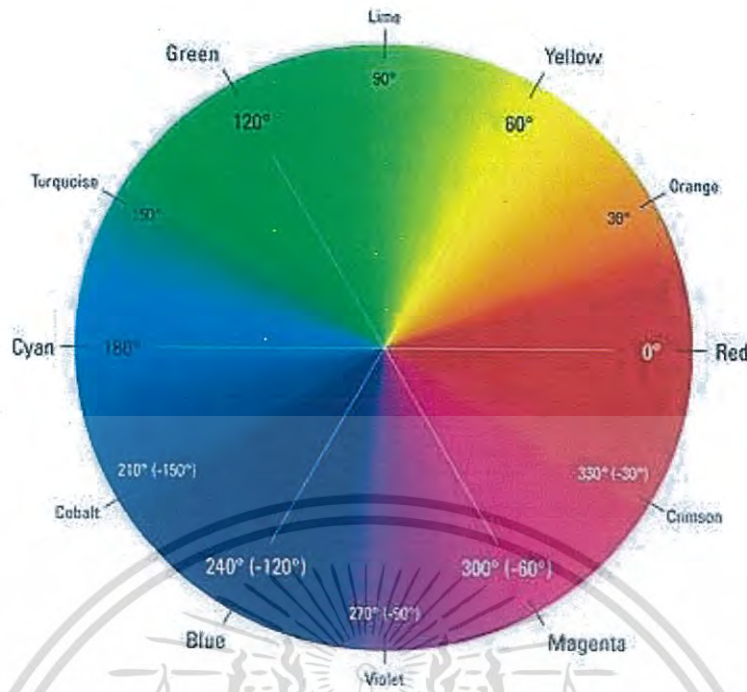
b^* มีค่า - สีไปในทิศทางของสีน้ำเงิน

นอกจากนี้คำนวณหาค่า Hue angle จากสูตร $\text{Hue angle} = \tan^{-1}(b^*/a^*)$ จากนั้นนำค่าที่คำนวณได้มาดูเฉดสีดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 Colorimetric spectrophotometer [34]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 Hue angle [35]

3.8.3 สันฐานวิทยา

ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคเพื่อดูการกระจายตัวแรงปฏิกิริยา โดยการนำแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้ในแต่ละสูตรมาตัดให้ได้ขนาด $1 \times 3 \text{ cm}^2$ แช่ในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 20 นาทีจนแข็ง จากนั้นทำการหักชิ้นงานภายใต้ไนโตรเจนเหลว นำชิ้นงานไปทำการเคลือบทอง (Gold sputter) เพื่อวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ดูภาคตัดขวางของชิ้นงานเพื่อดูการกระจายตัวของตัวแรงปฏิกิริยา โดยใช้กำลังขยาย 5,000 เท่า

3.8.4 การทดสอบการรับแรงดึงยืด

นำฟิล์มที่เตรียมได้ทั้งก่อนและหลังฉายแสงไปทดสอบแรงดึง (Tensile test) ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM) ตามมาตรฐาน ASTM D882 โดยเตรียมชิ้นงานและกำหนดสภาวะเครื่องทดสอบดังนี้

- ขนาดชิ้นงาน	10x80 mm ²
- ความหนาชิ้นงาน	103-129 micron
- ความเร็วในการดึงชิ้นงาน	100 mm/min
- ความยาวเกจ (Gauge length)	25 mm
- ค่าแรงสูงสุดที่เครื่องรับได้	100 N
- จำนวนชิ้นงานที่ทดสอบ	10 ชิ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

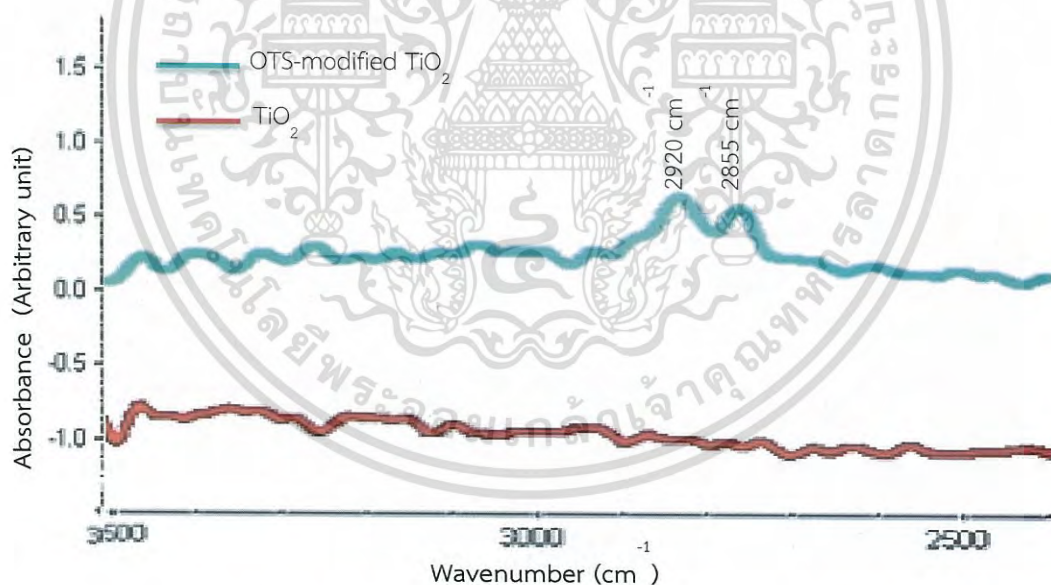
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความสามารถในการย่อยสลายของฟิล์ม LDPE ที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยแสง โดยผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 และ OTS-modified TiO_2 ทำการผสม LDPE กับตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) เตรียมฟิล์มผ่านเทคนิคการขึ้นรูปแบบกดอัด (Compression molding) ได้ฟิล์มหนา 103-129 μm ทั้งนี้เพื่อศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วน คือ การศึกษาลักษณะของ TiO_2 และ OTS-modified TiO_2 เพื่อศึกษาผลของการดัดแปรพื้นผิวด้วยออกทาเดคซิลไตรคลอโรไซเลน (OTS) เพื่อช่วยในการกระจายตัวที่ดีของ TiO_2 ในฟิล์ม LDPE และการศึกษาผลของการใช้ TiO_2 และ OTS-modified TiO_2 ในปริมาณ 0.25, 0.5 และ 1 phr ที่มีต่อการย่อยสลายและสมบัติของฟิล์ม LDPE

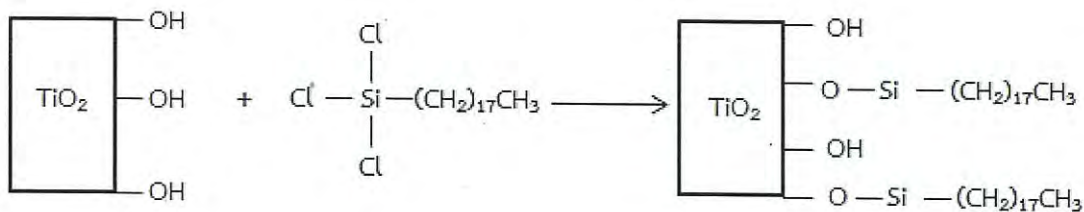
4.1 การศึกษาลักษณะของ TiO_2 และ OTS-modified TiO_2

4.1.1 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันโดยเทคนิค Diffuse reflectance infrared fourier transform spectroscopy (DRIFT-IR)



รูปที่ 4.1 DRIFT-IR สเปกตรัมของ TiO_2 และ OTS-modified TiO_2

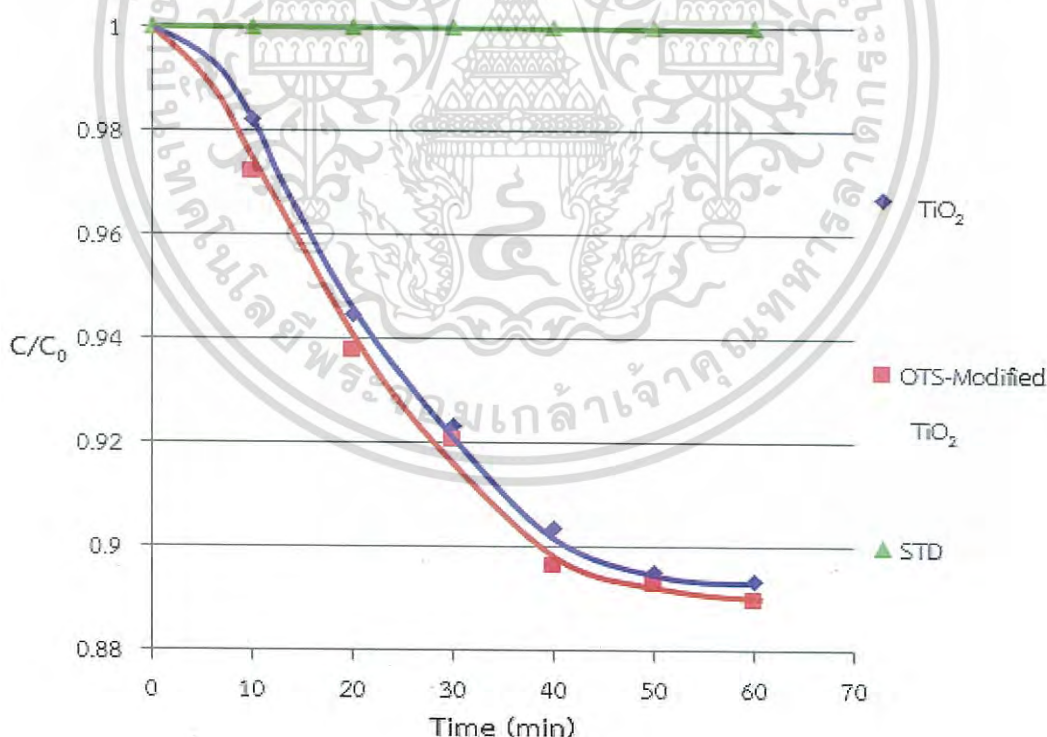
จากการวิเคราะห์ TiO_2 และ OTS-modified TiO_2 ด้วยเทคนิค DRIFT-IR ได้สเปกตรัมดังรูปที่ 4.1 พบว่ามีพีคเพิ่มขึ้นที่เลขคลื่น 2920 และ 2855 cm^{-1} เป็นพีคของ $-\text{CH}_2-$ Stretching และ $-\text{CH}_3$ Stretching ซึ่งไม่ปรากฏพีคทั้งสองใน TiO_2 จึงแสดงให้เห็นว่ามีการดัดแปรเกิดขึ้นบนพื้นผิวของ TiO_2 [6] ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แผนภาพแสดงการเกิดปฏิกิริยาของ OTS บนพื้นผิวของ TiO₂

4.1.2 การวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงโดยการทดสอบด้วยสารละลายเมทิลออเรนจ์

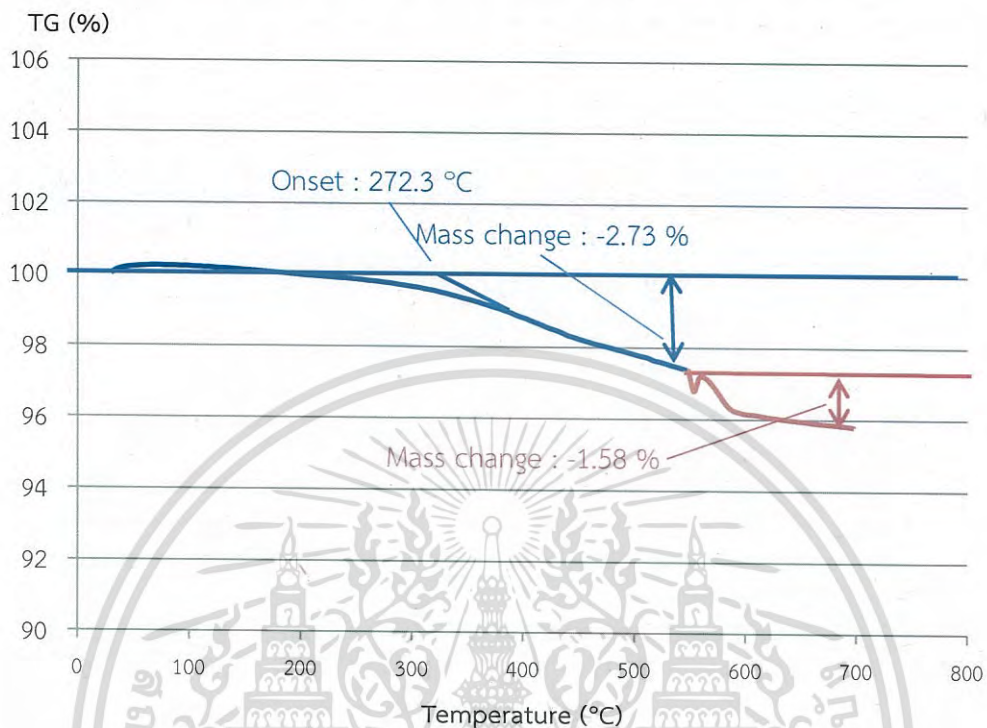
จากรูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์เมื่อนำสารละลาย MO ที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและมีตัวเร่งปฏิกิริยา (TiO₂ และ OTS-modified TiO₂) ไปฉายแสง UVA เป็นเวลา 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที พบว่าเมื่อเวลาในการฉายแสงมากขึ้นสารละลาย MO ที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาไม่เกิดการย่อยสลายด้วยแสง (เส้น STD) นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาลงในสารละลาย MO ตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดการย่อยสลาย MO ด้วยแสงเพิ่มขึ้นเมื่อมีการฉายแสงเป็นเวลานานขึ้น เนื่องจากแสง UVA เป็นตัวกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดการย่อยสลายขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า OTS-modified TiO₂ (เส้น OTS-modified TiO₂) มีประสิทธิภาพเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงใกล้เคียงกับ TiO₂ ทำให้มีการสลายตัวของ MO ที่ไม่มีความแตกต่างเมื่อเทียบกับ TiO₂



รูปที่ 4.3 ค่าความเข้มข้นของสารละลาย MO ที่มี TiO₂ และ OTS-modified TiO₂ ก่อนและหลังผ่านการฉายแสง UVA เป็นเวลา 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 การหาปริมาณออกทาทเดกซิลไตรคลอโรไซเลน (OTS) ในตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ทำการดัดแปรพื้นผิวด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA)



รูปที่ 4.4 TGA Thermogramme ของ OTS-modified TiO₂

จากรูปที่ 4.4 ในการศึกษาการสลายตัวของ OTS-modified TiO₂ ภายใต้บรรยากาศของ N₂ พบว่า OTS เริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิ 272.3°C [36] เนื่องจากเกิดการสลายตัวทางความร้อนของ OTS บนพื้นผิวของ TiO₂ เมื่อถึงอุณหภูมิที่ 550°C จากกราฟ TG พบว่า OTS มีการสลายตัวไป 2.73 wt% หลังจากนั้นเปลี่ยนเป็นการเผาภายใต้บรรยากาศของ Air-zero เพื่อทำให้เกิดการสลายตัวที่สมบูรณ์ของ OTS จนถึงอุณหภูมิที่ 700°C ทำให้เกิดการสลายตัวเพิ่มอีก 1.58 wt% ดังนั้นน้ำหนักรวมที่หายไปหลังจากการสลายตัวทั้ง 2 ส่วน มีค่าเท่ากับ 4.3 wt% ซึ่งเป็นปริมาณของ OTS ที่ดัดแปรพื้นผิวของ TiO₂

4.2 การตรวจสอบปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ ในฟิล์ม LDPE

การตรวจสอบตัวเร่งปฏิกิริยาในฟิล์ม LDPE เพื่อคำนวณหาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอยู่จริงในฟิล์ม LDPE แต่ละอัตราส่วนผสม ซึ่งแสดงผลดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ในแต่ละอัตราส่วนผสม

สูตรฟิล์ม	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต้องการ (phr)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่พบจริง (phr)
LDT(0.25)	0.25	0.44
LDT(0.5)	0.50	0.60
LDT(1)	1.00	1.04
LDOMT(0.25)	0.25	0.47
LDOMT(0.5)	0.50	0.60
LDOMT(1)	1.00	1.03

จากผลการตรวจหาตัวเร่งปฏิกิริยาในฟิล์ม LDPE ด้วยวิธีการเผา แสดงปริมาณตัวเร่งที่ตรวจพบดังตารางที่ 4.1 พบว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่พบจริงมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต้องการในสูตรที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 และ 1 phr ส่วนสูตร 0.25 phr พบว่าปริมาณที่ตรวจพบมากกว่าปริมาณที่ต้องการ เนื่องมาจากการตรวจปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการเผานั้นใช้เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ในการหาปริมาณที่เหลือของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมีความละเอียดไม่สูงพอสำหรับการชั่งน้ำหนักสารที่มีปริมาณน้อย เนื่องมาจากปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เติมลงไปและปริมาณของพอลิเมอร์ผสมที่นำไปทดสอบมีปริมาณน้อย จึงทำให้เครื่องชั่งไม่สามารถตรวจวัดได้ เมื่อนำมาคำนวณหาปริมาณตัวเร่งที่พบจริงจึงมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น

4.3 การศึกษาสมบัติของฟิล์ม LDPE ที่ผสม TiO_2 และ OTS-modified TiO_2

ทำการผสม LDPE กับตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 และ OTS-modified TiO_2 ตามอัตราส่วนต่างๆ จากตารางที่ 3.2 จากนั้นนำไปขึ้นรูปเป็นฟิล์มแล้วทำการศึกษาผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา

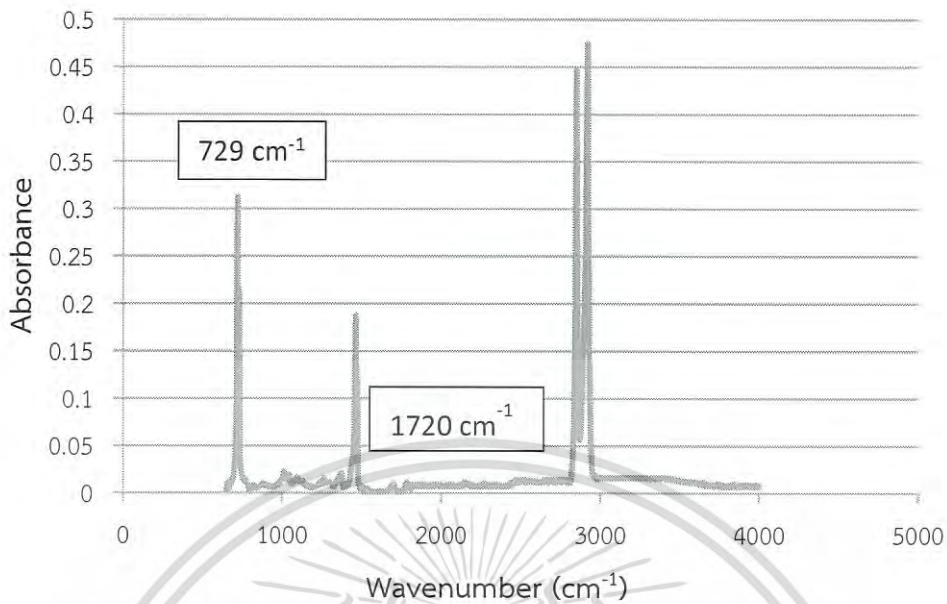
4.3.1 การวิเคราะห์ค่าดัชนีคาร์บอนิลของฟิล์มตัวอย่าง

นำฟิล์มทั้งก่อนฉายแสง และหลังฉายแสง UVA เป็นเวลา 50, 100, 150 และ 200 ชั่วโมง มาทำการวิเคราะห์หาค่าดัชนีคาร์บอนิลด้วยเครื่อง FT-IR เป็นเทคนิคการสะท้อนของลำแสง IR ช่วงเลขคลื่น $500\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ จากอัตราส่วนพื้นที่การดูดกลืนใต้พีค (Absorbance) โดยเลือกพีคที่ 1720 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคการยึดของหมู่คาร์บอนิล และพีคที่ 729 cm^{-1} เป็นพีคล็อกกิงของ C-H และสามารถคำนวณหาค่าดัชนีคาร์บอนิล (C.I.) ดังนี้

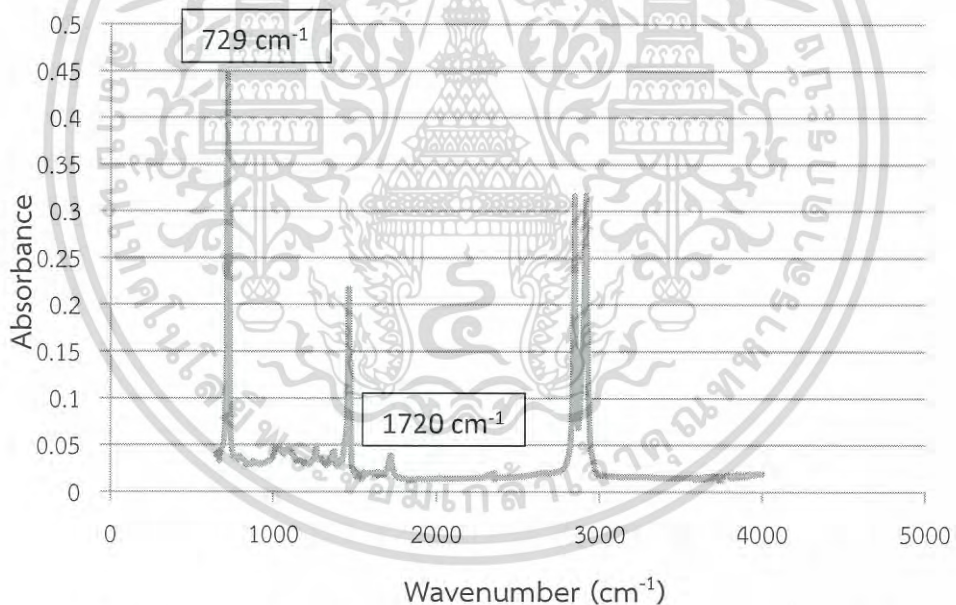
$$\text{C.I.} = \frac{\text{พ.ท.ใต้พีคการดูดกลืนที่ } 1720\text{ cm}^{-1} (n\text{ hr}) - \text{พ.ท.ใต้พีคการดูดกลืนที่ } 1720\text{ cm}^{-1} (0\text{ hr})}{\text{พ.ท.ใต้พีคการดูดกลืนที่ } 729\text{ cm}^{-1} (n\text{ hr}) - \text{พ.ท.ใต้พีคการดูดกลืนที่ } 729\text{ cm}^{-1} (0\text{ hr})} \quad (4.1)$$

n = เวลาในการฉายแสง 0, 50, 100, 150 และ 200 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ATR-FTIR สเปกตรัมของฟิล์ม LDPE ก่อนฉายแสง UVA

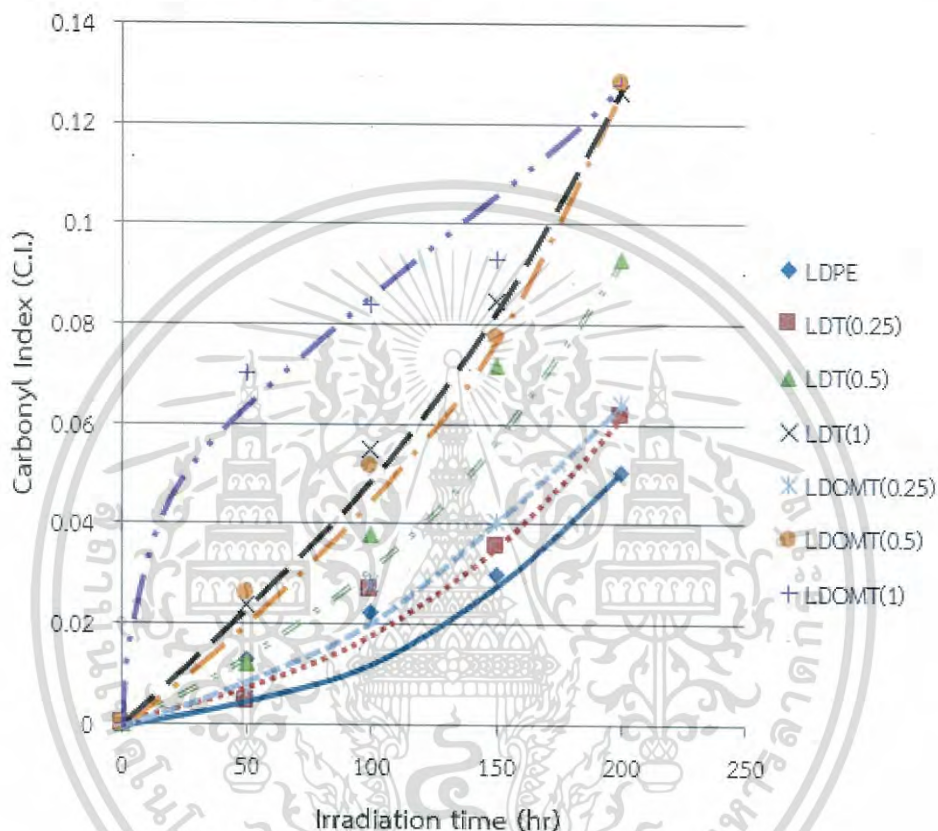


รูปที่ 4.6 ATR-FTIR สเปกตรัมของฟิล์ม LDPE หลังฉายแสง UVA 200 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.5 ฟิล์ม LDPE ก่อนการฉายแสงมีพีคขึ้นที่ 729 cm^{-1} เป็นพีคของ C-H rocking และ 1720 cm^{-1} เป็นพีคของหมู่คาร์บอนิลเกิดขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากในขั้นตอนของการขึ้นรูปฟิล์มมีการใช้แผ่นใสซึ่งทำมาจาก Polyethylene terephthalate (PET) อาจทำให้สารเติมแต่ง (Additive) จากแผ่นใสละลายตัวติดอยู่บนพื้นผิวของฟิล์มเล็กน้อย ($\sim 1\%$) ซึ่งถือว่าไม่ส่งผลต่อฟิล์ม LDPE เมื่อฟิล์มฉายแสง UVA เป็นเวลา 200 ชั่วโมง พบว่าพีคที่ 1720 cm^{-1} มีค่าการดูดกลืนเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.6 เนื่องจากฟิล์มถูกฉายแสง UVA ทำให้ TiO_2 ที่ผสมอยู่ในฟิล์มนั้นดูดกลืนพลังงานจากแสง UVA เกิดเป็นอิเล็กตรอนอิสระ (e^-) และโฮล (h^+) ขึ้น จากนั้น e^- อิสระที่ถูกปล่อยออกมาทำปฏิกิริยากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวรับ e^- คือ ออกซิเจน (O_2) เกิดการสร้างสปีชีส์ได้ ซูเปอร์ออกซิเจนแอนไอออนเรดิคัล ($\cdot O_2^-$) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำและเกิดปฏิกิริยาต่อไปเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\cdot OH$) ที่มีความว่องไวและสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไฮโดรคาร์บอนในสายโซ่ของฟิล์ม LDPE ทำให้เกิดการตัดขาดของสายโซ่ของฟิล์ม LDPE อีกทั้งการแตกของพันธะไฮโดรคาร์บอนแล้วกลายเป็นอนุมูลอิสระ $-(\cdot CH_2CH_2)-$ โดยงานวิจัยนี้ได้ติดตามหมู่คาร์บอนิลที่เกิดขึ้นซึ่งรายงานผลเป็นค่าดัชนีคาร์บอนิล (Carbonyl index) ดังแสดงในรูปที่ 4.7



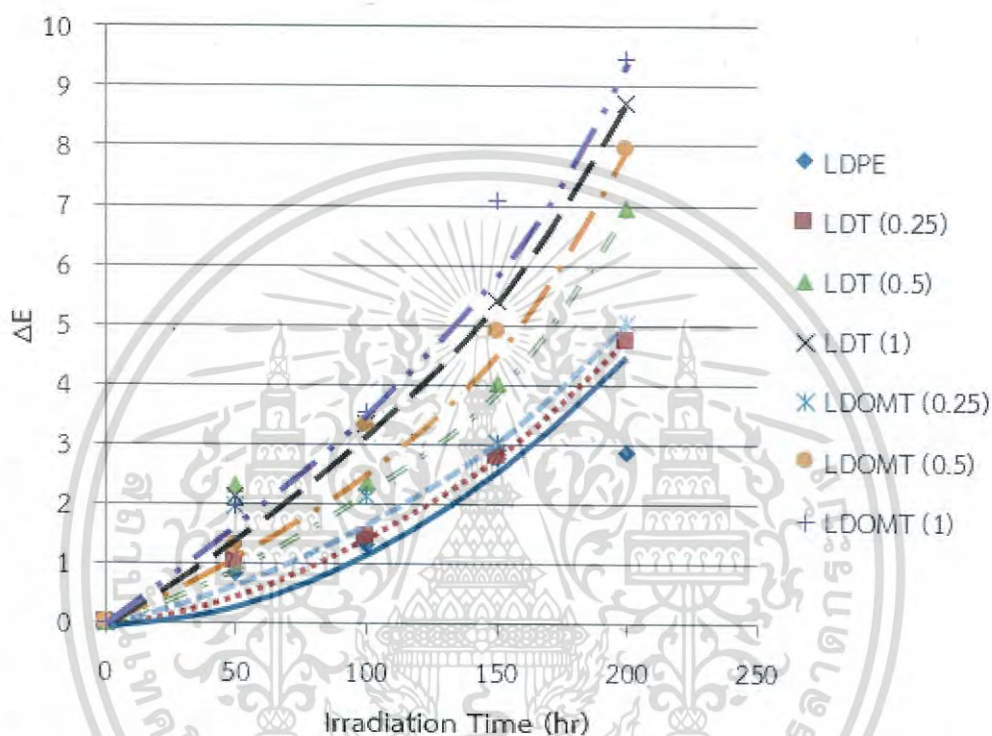
รูปที่ 4.7 ดัชนีคาร์บอนิลของ LDPE และ LDPE ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 และ OTS-modified TiO_2 ในปริมาณ 0.25, 0.5 และ 1 phr ก่อนและหลังฉายแสงเป็นเวลา 50, 100, 150 และ 200 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่อเวลาในการฉายแสงเพิ่มขึ้น ค่าดัชนีคาร์บอนิลของ LDPE ที่ไม่มีการผสมตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าน้อยเมื่อเทียบกับ LDPE ที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องมาจากการที่ตัวเร่งปฏิกิริยาไปช่วยกระตุ้นให้เกิดการย่อยสลายด้วยแสงเร็วขึ้นจึงทำให้ LDPE ที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าดัชนีคาร์บอนิลสูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบค่าดัชนีคาร์บอนิลระหว่าง LDPE ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 และ OTS-modified TiO_2 พบว่า LDPE ที่ผสม OTS-modified TiO_2 มีค่าดัชนีคาร์บอนิลมากกว่า เนื่องจาก OTS-modified TiO_2 มีสภาพขั้วลดลงจึงสามารถเข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์ ทำให้การกระจายตัวดีขึ้นส่งผลให้เกิดการย่อยสลายดีขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.25, 0.5 และ 1 phr พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและเวลาในการฉายแสงทำให้มีค่าดัชนี

คาร์บอนิลเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ความชันของกราฟเพิ่มขึ้น แสดงว่ามีอัตราของการสลายตัวของ LDPE เพิ่มขึ้น

4.3.2 การเปลี่ยนแปลงสี

นำฟิล์มที่เตรียมได้ทั้งก่อนและหลังฉายแสง UVA เป็นเวลา 50, 100, 150 และ 200 ชั่วโมง มาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์มด้วยเครื่องวัดสี (Colorimeter spectrophotometer) ดังแสดงในรูปที่ 4.8



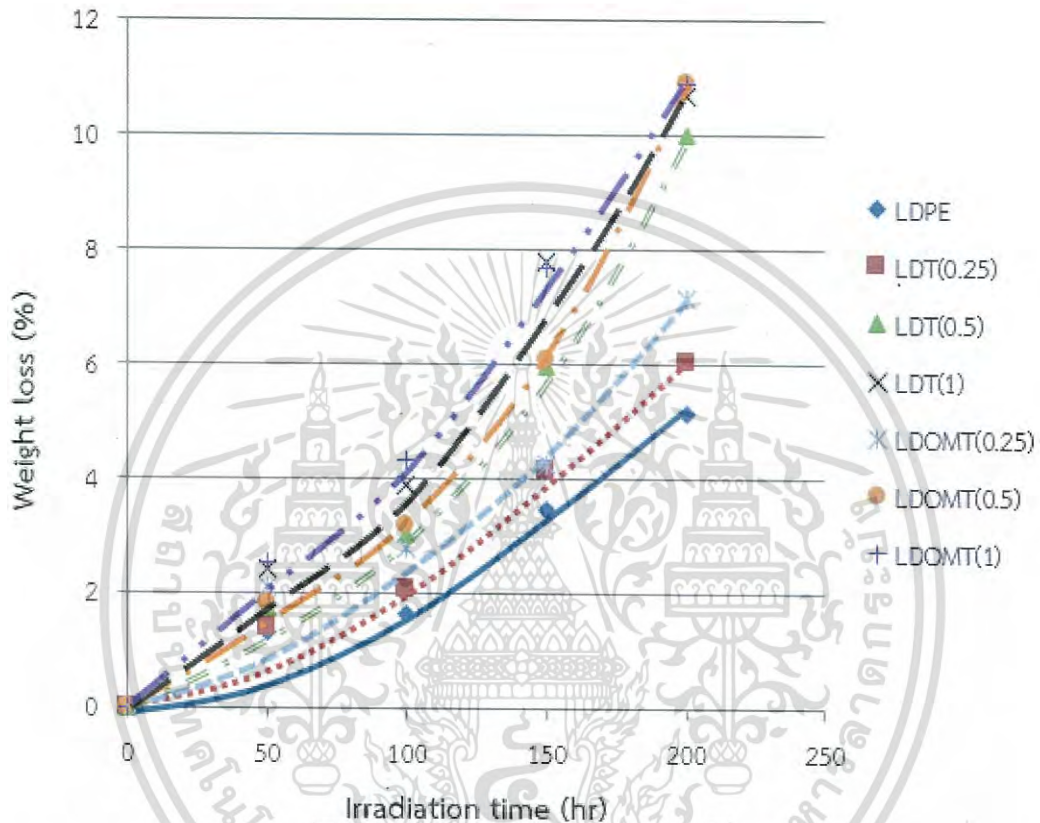
รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงสี (ΔE) ของฟิล์ม LDPE ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ ในปริมาณ 0.25, 0.5 และ 1 phr ก่อนและหลังฉายแสงเป็นเวลา 50, 100, 150 และ 200 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์พบว่าเมื่อเวลาในการฉายแสง UVA นานขึ้น ค่าการเปลี่ยนแปลงสี (ΔE) ที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความสว่าง (ΔL) มีค่าเพิ่มขึ้น และ Hue angle (ภาคผนวก ค) มีค่าอยู่ในเขตสีเหลือง เนื่องจกตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผสมลงไปทำหน้าที่เป็นตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาสามารถเกิดการดูดซับพลังงาน และเมื่อได้รับพลังงานจากแสง UVA มากขึ้น ทำให้เกิดการย่อยสลายดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น นำไปสู่การเกิดหมู่คาร์บอนิลและพันธะไม่อิ่มตัวในสายโซ่ LDPE ซึ่งเป็นหมู่โครโมฟอร์ที่สามารถดูดกลืนแสงได้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสี โดยเมื่อเปรียบเทียบสูตรที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาและสูตรที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าสูตรที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยามีค่า ΔE สูงกว่า เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยให้เกิดการย่อยสลายได้ดี โดยเมื่อเปรียบเทียบสูตรที่เติม TiO_2 และ OTS-modified TiO_2 พบว่าสูตรที่เติม OTS-modified TiO_2 มีค่า ΔE สูงกว่า เนื่องจาก TiO_2 มีสภาพขั้วลดลงทำให้เข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์ช่วยให้เกิดการกระจายตัวที่ดีกว่าจึงทำให้เกิดการย่อยสลายดีขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.25, 0.5 และ 1 phr พบว่าเมื่อใส่ตัวเร่ง

ปฏิกิริยาปริมาณมากทำให้ฟิล์มเกิดการย่อยสลายมากขึ้น จึงมีการเปลี่ยนแปลงสี (ΔE) มากกว่าการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณน้อย

4.3.3 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก

นำฟิล์มที่เตรียมได้ทั้งก่อนและหลังฉายแสง UVA เป็นเวลา 50, 100, 150 และ 200 ชั่วโมง มาวิเคราะห์โดยการชั่งหาเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของฟิล์ม LDPE ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ ในปริมาณ 0.25, 0.5 และ 1 phr ก่อนและหลังฉายแสงเป็นเวลา 50, 100, 150 และ 200 ชั่วโมง

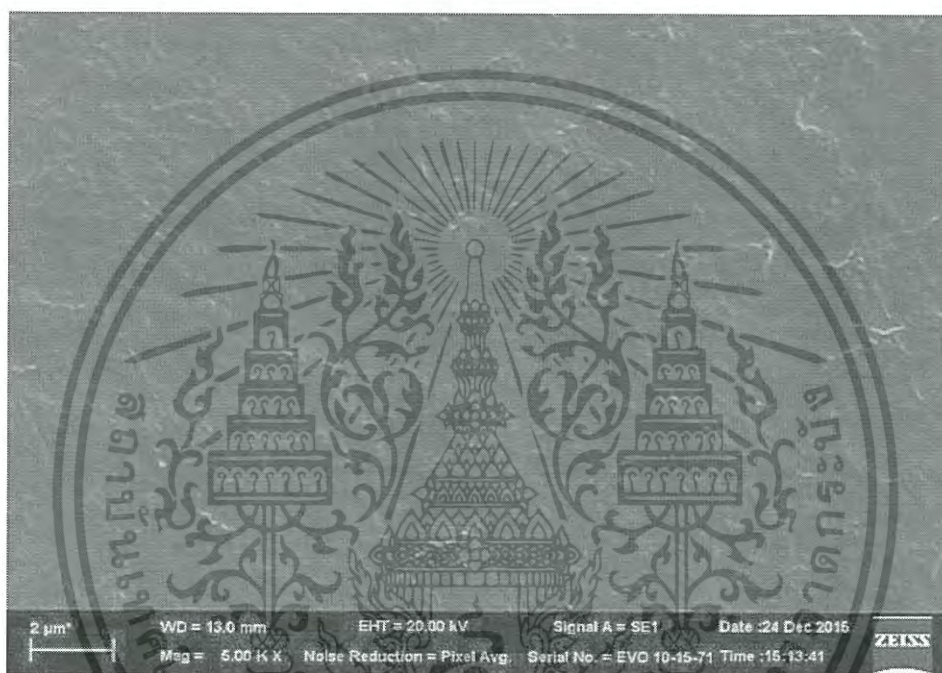
จากรูปที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์พบว่าเมื่อใช้เวลาในการฉายแสง UVA นานขึ้น ฟิล์มมีน้ำหนักลดลง เนื่องจากเกิดการย่อยสลายด้วยแสงจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใส่ลงไปโดยแสงที่ส่องไปในพอลิเมอร์ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นในหัวข้อ 4.3.1 ทำให้น้ำหนักของฟิล์มที่ผ่านการฉายแสงลดลงเมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น และพบว่าฟิล์มที่ผสม OTS-modified TiO_2 มีน้ำหนักลดลงมากกว่าฟิล์มที่ผสม TiO_2 เล็กน้อย

4.3.4 สัณฐานวิทยา

การศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology) ของฟิล์ม LDPE ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 และ OTS-modified TiO_2 ในปริมาณ 0.25, 0.5 และ 1 phr โดยใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า เพื่อดูการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาในฟิล์ม LDPE โดยการวิเคราะห์จากภาคตัดขวางของฟิล์ม LDPE ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.11-4.13 พบว่าฟิล์มที่มีการผสม TiO_2 มีการกระจายตัวของอนุภาค TiO_2 อยู่ภายในเนื้อฟิล์ม LDPE แต่เนื่องจากขนาด

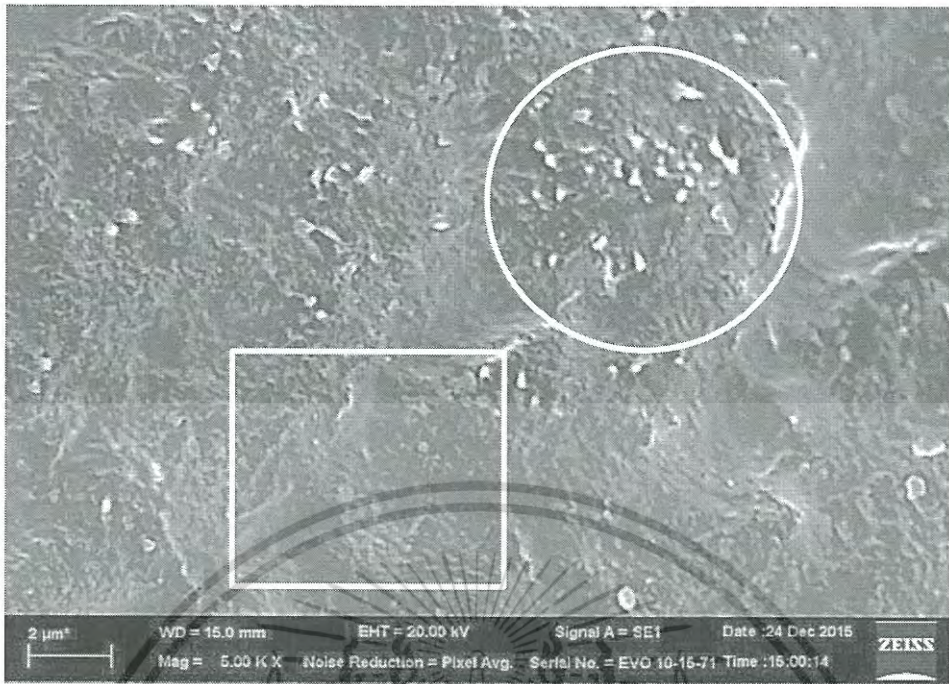
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุภาคของ TiO_2 มีขนาดเล็ก (25-30 nm) และสภาพผิวที่ต่างกับ LDPE ทำให้อนุภาคของ TiO_2 ซึ่งจากรูปที่ 4.12 สังเกตเห็นได้ชัดเจนว่าอนุภาคของ TiO_2 มีการกระจายตัวที่ไม่ดี โดยพบว่าบางบริเวณมีการกระจายตัวของอนุภาค TiO_2 เป็นกลุ่มก้อน (ในวงกลม) ส่วนบางบริเวณไม่พบการกระจายตัวของอนุภาค TiO_2 (ในกรอบสี่เหลี่ยม) แต่เมื่อทำการดัดแปรพื้นผิวของ TiO_2 ด้วยออกทาเดกซิลไตรคลอโรไซเลน (OTS) พบว่า OTS-modified TiO_2 (รูปที่ 4.13) มีการกระจายตัวในพอลิเมอร์ได้ดีกว่าสูตรที่เติม TiO_2 ที่ไม่ได้ทำการดัดแปรพื้นผิว เนื่องจากออกทาเดกซิลไตรคลอโรไซเลนมีปลายข้างหนึ่งเป็นสายโซ่ยาวของหมู่อัลคิล ($-\text{C}_{18}\text{H}_{37}$) ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่ไม่มีขั้วสามารถเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ทำให้พบอนุภาค OTS-modified TiO_2 มีการกระจายตัวได้สม่ำเสมอทั่วทั้งฟิล์ม LDPE



รูปที่ 4.10 ภาพ SEM ภาคตัดขวางของฟิล์ม LDPE ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



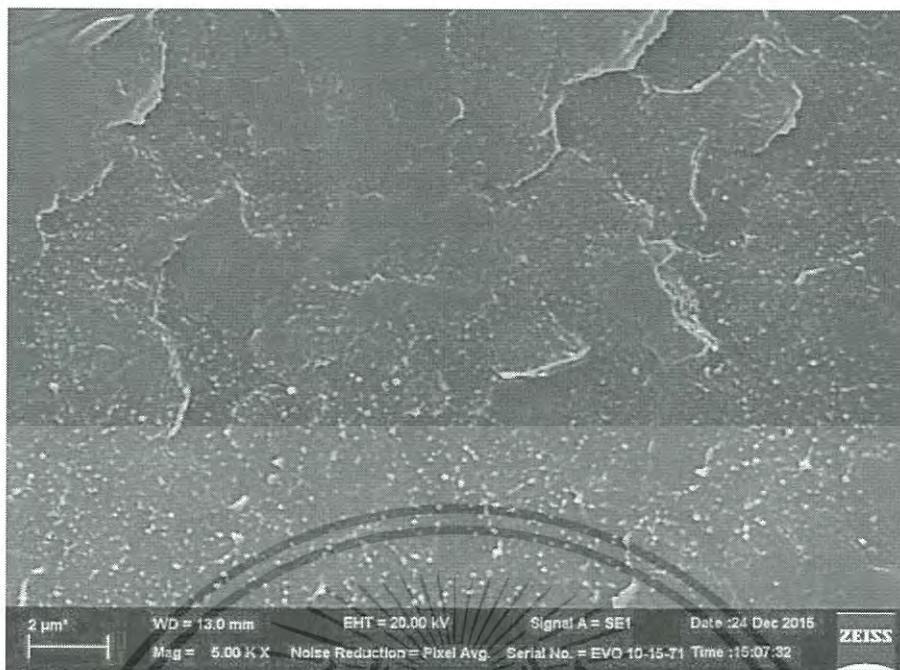
(a) LDT(0.25)



(b) LDT(0.5)

รูปที่ 4.11 ภาพ SEM ภาคตัดขวางของฟิล์ม LDPE ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ในปริมาณ 0.25, 0.5 และ 1 phr ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c) LDT(1)

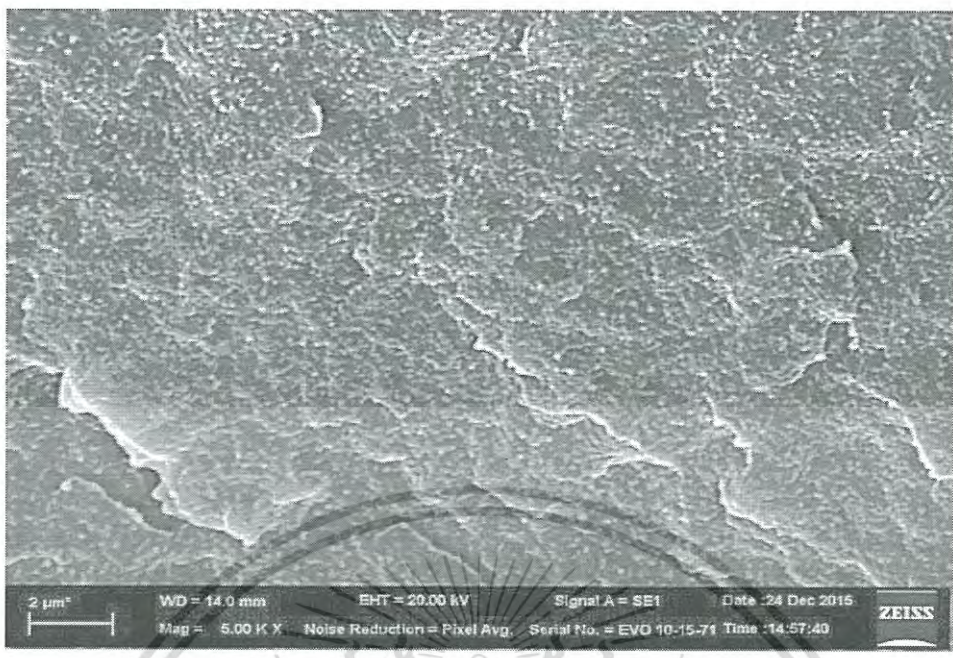
รูปที่ 4.11 (ต่อ) ภาพ SEM ภาคตัดขวางของฟิล์ม LDPE ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ในปริมาณ 0.25, 0.5 และ 1 phr ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า



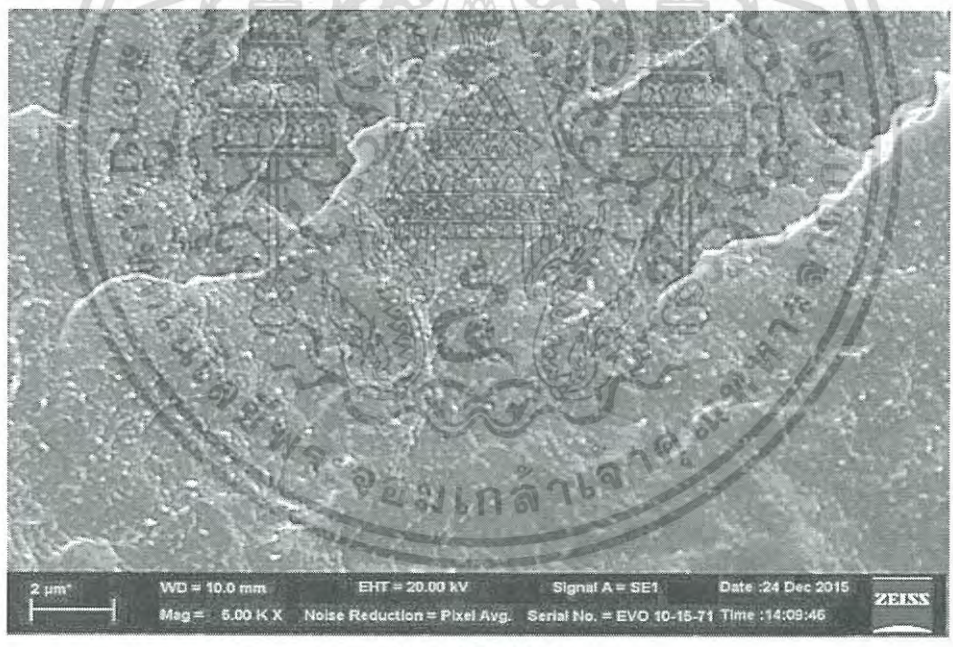
(a) LDOMT(0.25)

รูปที่ 4.12 ภาพ SEM ภาคตัดขวางของฟิล์ม LDPE ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยา OTS-modified TiO_2 ในปริมาณ 0.25, 0.5 และ 1 phr ที่ กำลังขยาย 5,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b) LDOMT(0.5)



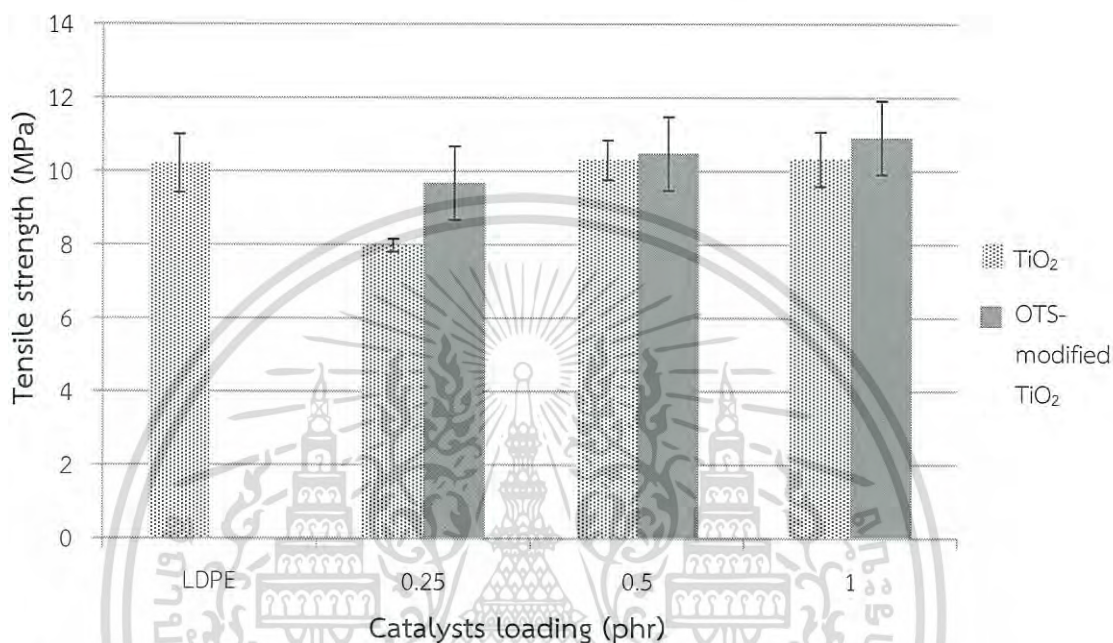
(c) LDOMT(1)

รูปที่ 4.12 (ต่อ) ภาพ SEM ภาคตัดขวางของฟิล์ม LDPE ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยา OTS-modified TiO₂ ในปริมาณ 0.25, 0.5 และ 1 phr ที่ กำลังขยาย 5,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.5 สมบัติเชิงกล

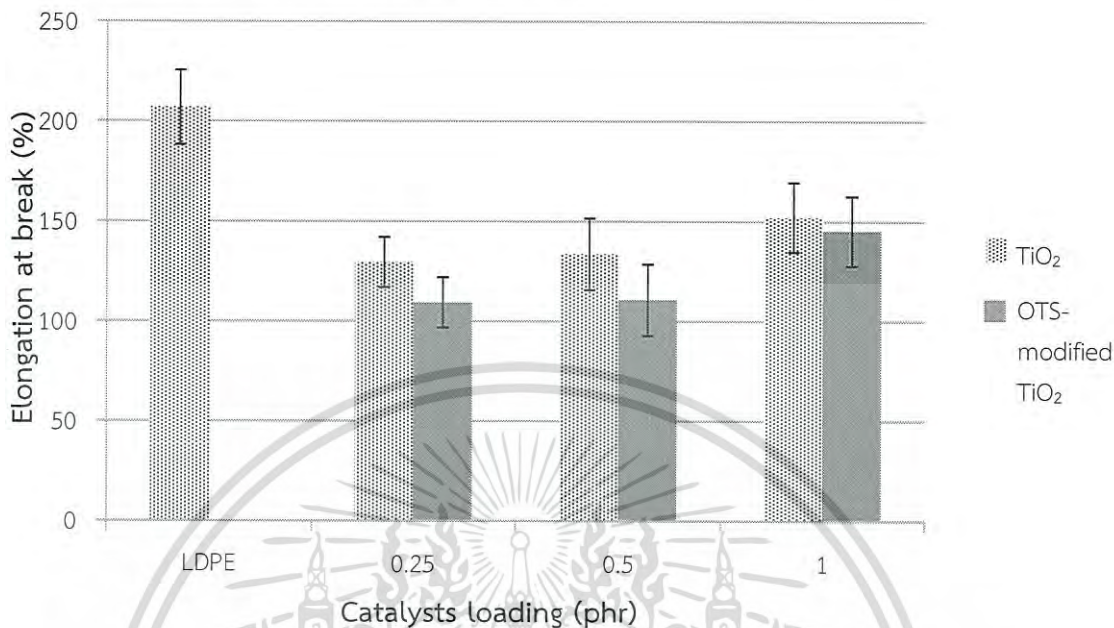
การศึกษาสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) ของฟิล์ม LDPE ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ ในปริมาณ 0.25, 0.5 และ 1 phr โดยนำฟิล์มที่เตรียมได้ทั้งก่อน และหลังฉายแสง UVA เป็นเวลา 200 ชั่วโมง ไปทดสอบแรงดึง (Tensile test) ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM) ตามมาตรฐาน ASTM D882 แสดงดังรูปที่ 4.13-4.18



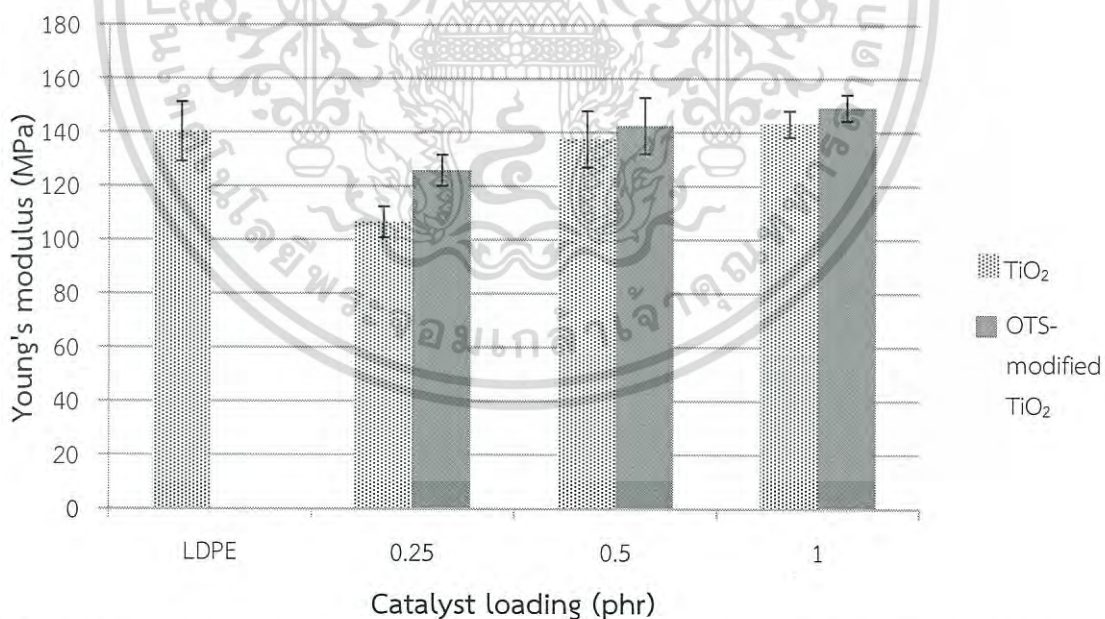
รูปที่ 4.13 Tensile Strength ของฟิล์ม LDPE ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ ก่อนการฉายแสง UVA

การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม LDPE ผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ และ OTS-modified TiO₂ ก่อนการฉายแสง UVA จากทฤษฎีทำให้ทราบว่า การนำอนุภาคของแข็งผสมกับพอลิเมอร์แล้วนั้น หากทั้งสองวัสดุมีความเข้ากันได้ดี ส่งผลทำให้ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (Tensile strength at break) และค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) เพิ่มสูงขึ้น แต่จากผลการทดลองพบว่าค่าความแข็งแรงดึง และค่า Young's modulus ของฟิล์ม LDPE ที่ผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาทุกชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่าใกล้เคียงกันกับฟิล์ม LDPE ทั้งนี้เนื่องมาจากการกระจายตัวที่ไม่ดีของอนุภาค TiO₂ ซึ่งสอดคล้องกับภาพ SEM รูปที่ 4.11 สันฐานวิทยาศาสตร์ตัดขวาง เห็นได้ชัดเจนว่า TiO₂ มีการเกาะกลุ่มเป็นก้อน แต่ในสูตรฟิล์มที่ผสม OTS-modified TiO₂ พบว่ามีการกระจายตัวของอนุภาค TiO₂ ที่ดีขึ้น เนื่องจากออกทาทาเดคซิลไตรคลอโรไฮโดรเจนที่นำมาดัดแปรพื้นผิวของ TiO₂ ทำให้พื้นผิวของ TiO₂ มีสภาพขั้วลดลง จึงมีความเข้ากันได้ดีมากขึ้นกับ LDPE แต่การที่ค่าความแข็งแรงดึง และ Young's modulus ยังมีค่าที่ใกล้เคียงกันกับ LDPE อาจเนื่องมาจากการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณน้อย (0.25, 0.5 และ 1 phr) และนอกจากนี้พบว่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) ลดลง เมื่อมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากการใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีลักษณะเป็นอนุภาคของแข็งลงไป ในพอลิเมอร์ โดยที่อนุภาคนั้นไม่มีแรงกระทำที่ดีกับวัสดุพอลิ-

เมอร์ ทำให้เกิดเป็นจุดบกพร่องขึ้น เมื่อได้รับแรงกระทำจึงเกิดการแยกของวัฏภาคพอลิเมอร์และอนุภาคของแข็งส่งผลให้ความสามารถในการยึดตัวต่ำลง

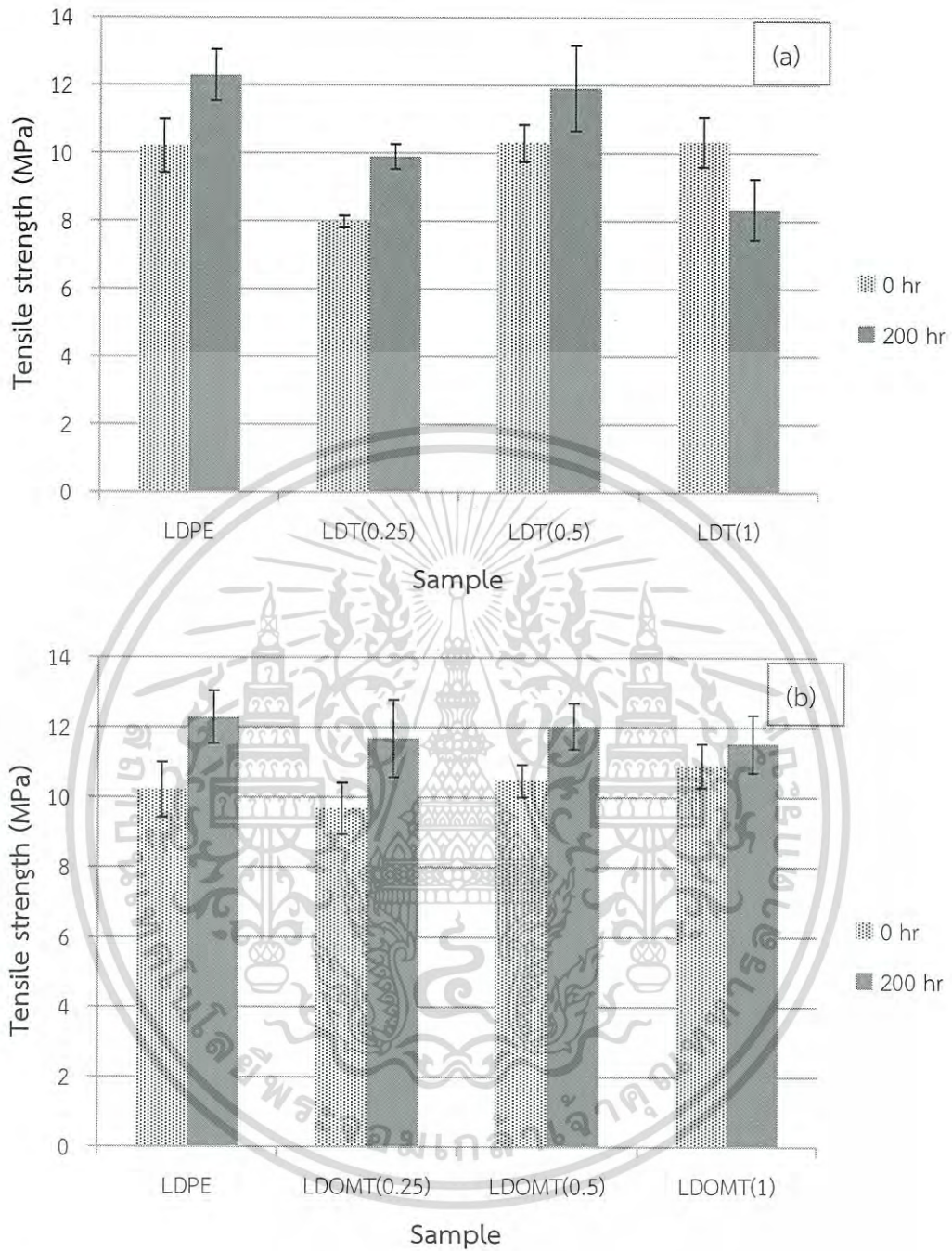


รูปที่ 4.14 % Elongation at break ของฟิล์ม LDPE ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ ก่อนการฉายแสง UVA



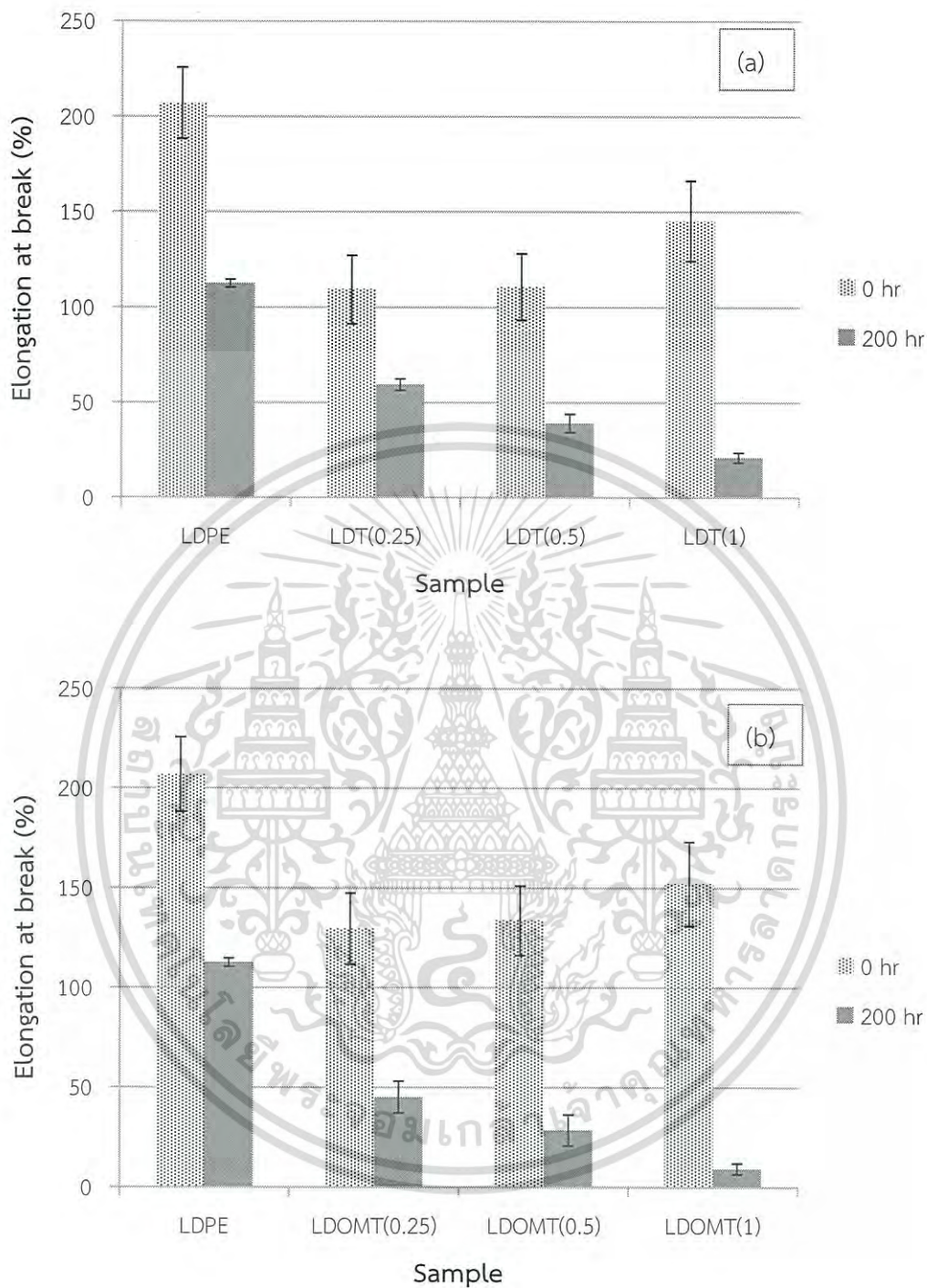
รูปที่ 4.15 Young's modulus ของฟิล์ม LDPE ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ ก่อนการฉายแสง UVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



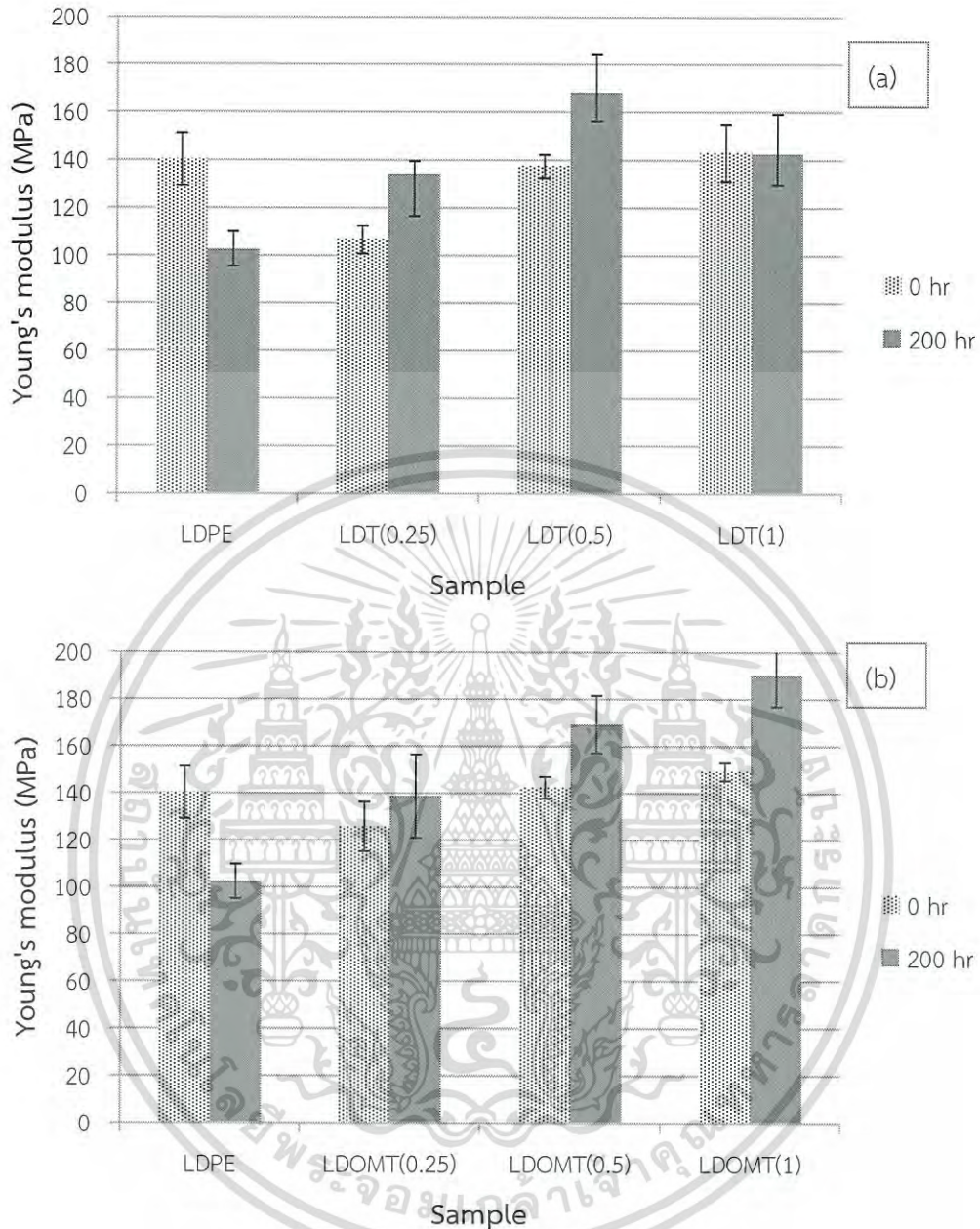
รูปที่ 4.16 Tensile Strength ของฟิล์ม LDPE และ LDPE ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยา (a) TiO_2 และ (b) OTS-modified TiO_2 ในปริมาณ 0.25, 0.5 และ 1 phr ก่อนและหลังการฉายแสง UVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 % Elongation at break ของฟิล์ม LDPE และ LDPE ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยา (a) TiO₂ และ (b) OTS-modified TiO₂ ในปริมาณ 0.25, 0.5 และ 1 phr ก่อนและหลังการฉายแสง UVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 Young's modulus ของฟิล์ม LDPE และ LDPE ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยา (a) TiO_2 และ (b) OTS-modified TiO_2 ในปริมาณ 0.25, 0.5 และ 1 phr ก่อนและหลังการฉายแสง UVA

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม LDPE และ LDPE ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 และ OTS-modified TiO_2 ในปริมาณ 0.25, 0.5 และ 1 phr ที่ผ่านการฉายแสง UVA เป็นเวลา 200 ชั่วโมง พบว่าความแข็งแรงดึง และ Young's modulus มีค่าเพิ่มขึ้น แสดงว่าฟิล์มมีความสามารถในการรับแรงกระทำได้มากขึ้นก่อนเสียหาย ส่วนค่า % Elongation at break มีค่าลดลงมากอย่างเห็นได้ชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากฟิล์ม LDPE ที่ผสมกับ TiO_2 และ OTS-modified TiO_2 ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง เมื่อได้รับพลังงานจากแสง UVA เกิดอิเล็กตรอนอิสระ (e^-) และโฮล (h^+) ขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดการแตกหักของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งไม่เสถียร จึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ส่งผลทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ (Chain scission) ส่งผลให้ความแข็งแรงดึง Young's modulus และ % Elongation at break มีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกันกับแนวโน้มค่าดัชนีคาร์บอนิลและค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่เพิ่มขึ้น รวมทั้งค่าน้ำหนักของฟิล์มที่หายไปอย่างต่อเนื่อง แสดงให้เห็นว่าฟิล์มเกิดการย่อยสลายขึ้น หรือในขณะเดียวกันอาจส่งผลให้ความแข็งแรงดึง และ Young's modulus มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากมีโอกาสเกิดการเสียสภาพโดยเกิดการเชื่อมโยงของสายโซ่ (Crosslink) ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าฟิล์มมีความแข็งแรงของวัสดุเพิ่มขึ้นภายหลังการฉายแสง UVA และพบว่าฟิล์มมีลักษณะแข็งเปราะมากขึ้น ดังนั้นจึงคาดว่าฟิล์มเกิดการเสียสภาพโดยเกิดการเชื่อมโยงของสายโซ่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของการย่อยสลายได้ด้วยแสงของฟิล์ม LDPE โดยใช้ TiO_2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง โดยทำการศึกษาเกี่ยวกับผลการดัดแปรพื้นผิวของ TiO_2 ด้วยออกทาดิคลอโรไฮโดรเจน (OTS) และผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 0.25, 0.5 และ 1 phr

จากการศึกษาผลการดัดแปรพื้นผิวของ TiO_2 ด้วย OTS จากผลการตรวจวัดด้วยเทคนิค DRIFT-IR พบว่า OTS-modified TiO_2 แสดงสัญญาณพีคของ $-\text{CH}_2-$ Stretching และ $-\text{CH}_3$ Stretching ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการดัดแปรพื้นผิวเกิดขึ้นบนพื้นผิวของ TiO_2 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการหาปริมาณ OTS ในตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำการดัดแปรพื้นผิวด้วยเทคนิค TGA ที่แสดงให้เห็นว่า OTS-modified TiO_2 มีเสถียรภาพทางความร้อนถึงอุณหภูมิ 273.3°C และมีปริมาณของ OTS 4.3 % โดยน้ำหนัก จากผลการทดสอบการสลายตัวสารละลายเมทิลออเรนจ์ (MO) หลังฉายแสง UVA พบว่าสารละลาย MO ที่ผสมกับ OTS-modified TiO_2 มีประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงไม่แตกต่างจาก TiO_2 ผลจากภาพ SEM ของฟิล์ม LDPE ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 และ OTS-modified TiO_2 พบว่าฟิล์มที่มีการผสม TiO_2 มีการกระจายตัวของอนุภาค TiO_2 อยู่ภายในเนื้อฟิล์ม LDPE บางบริเวณเป็นกลุ่มก้อน บางบริเวณไม่พบการกระจายตัวของอนุภาค TiO_2 เนื่องจากสภาพผิวที่แตกต่างกันของ LDPE กับ TiO_2 ในทางกลับกันพบว่า OTS-modified TiO_2 ซึ่งมีความไม่ชอบน้ำมากขึ้น ทำให้มีการกระจายตัวได้สม่ำเสมอทั่วทั้งฟิล์ม LDPE ทำให้ค่าดัชนีการบอริสมีค่าสูงขึ้น เกิดการย่อยสลายที่ดีขึ้น

จากการศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 0.25, 0.5 และ 1 phr พบว่าการย่อยสลายของฟิล์มมีค่าสูงขึ้นเมื่อเวลาในการฉายแสง UVA และเมื่อมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากการเกิดอิเล็กตรอนอิสระและโฮล ทำให้เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ ซึ่งนำไปสู่การสร้างอนุมูลอิสระซูเปอร์ออกไซด์และอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล เข้าทำปฏิกิริยากับไฮโดรคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการย่อยสลายได้ในที่สุด

นอกจากนี้การย่อยสลายของฟิล์มสามารถสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงสี (ΔE) น้ำหนักของฟิล์มที่หายไป (%Weight loss) และสมบัติเชิงกล เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผสมลงไป สามารถเกิดการดูดซับพลังงาน นำไปสู่การเกิดหมู่คาร์บอนิลและพันธะไม่อิ่มตัวในสายโซ่ LDPE ซึ่งเป็นหมู่โครโมฟอร์ที่สามารถดูดกลืนแสงได้ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสี ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าค่า ΔE และค่าการเปลี่ยนแปลงความสว่าง (ΔL) เพิ่มขึ้น และมีความสอดคล้องกันกับค่าน้ำหนักของฟิล์มที่หายไปอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งเมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลของฟิล์ม LDPE ก่อนและหลังการฉายแสง พบว่าเมื่อทำการฉายแสง UVA 200 ชั่วโมง ค่าความแข็งแรงดึง และ Young's modulus เพิ่มขึ้น ส่วนค่า % Elongation at break ลดลง นั้นแสดงให้เห็นว่าฟิล์มเกิดการเสียหายโดยเกิดการเชื่อมโยงของสายโซ่ LDPE

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรเปลี่ยนแปลงลักษณะของ TiO_2 ให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้น เช่น TiO_2 นาโนทิว เพื่อเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายให้ดียิ่งขึ้น
2. เนื่องจากหลังการฉายแสงไป 50 ชั่วโมง (Inductive period 0-50 ชั่วโมง) फिल्मเกิดการย่อยสลายมาก ดังนั้นควรเพิ่มความถี่ในการเก็บตัวอย่างทดสอบ เพื่อให้เห็นพฤติกรรมการสลายตัวทางแสงของฟิล์มที่ชัดเจนขึ้น
3. จากการศึกษาสัณฐานวิทยา (SEM) พบว่า OTS-modified TiO_2 มีการกระจายตัวที่ดีกว่า จึงควรนำ OTS-modified TiO_2 ไปผสมในพอลิเมอร์ไม่มีขั้วชนิดอื่นๆ เพื่อศึกษาการย่อยสลายของพลาสติกชนิดนั้นๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] มาลินี ชัยศุกกิจสินธ์. 2552. **เคมีพอลิเมอร์**. กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [2] National Metal and Materials Technology Center. 2550. **พลาสติกย่อยสลายได้**. [Online]. Available : http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/type_de_plas.html.
- [3] ชวิทร์ กัญญ์เมธากุล. 2549. “การปรับแต่งผิวหน้าของไททานเนียมไดออกไซด์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [4] สมยศ รัตนไพบูลย์กิจ. 2557. “ฟิล์มย่อยสลายด้วยแสงที่เตรียมจาก LDPE ผสม ZnO/TiO₂.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [5] กุลวดี จรรย์ศรีสุนทร, พงษ์พัฒน์ สีมั่นตะ และวสวัตต์ สีลูกหว้า 2556. “ฟิล์มย่อยสลายด้วยแสงที่เตรียมจาก LDPE/TiO₂ และ LDP/Zn-doped TiO₂.” โครงการงานพิเศษ สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [6] Zapata, P.A. Faria, J. Ruiz, M. Jentoft, P. R. E. and Reasasco, D. E. 2012. “Hydrophobic Zeolites for Biofuel Upgrading Reactions at the Liquid-Liquid Interface in Water/Oil Emulsions.” *Journal of The American Chemical Society*. 134(20) : 8570-8578.
- [7] คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์. 2555. **กระบวนการโฟโตแคตาไลติก**. [Online]. Available : <http://doc.google.com/viewer?a=v&q=cache:HnEaBULiDuU:www.gits.kmutnb.ac.th/teethes/data/4>.
- [8] Atlantic Ultraviolet Corporation. 2014. **Ultraviolet**. [Online]. Available ; http://ultraviolet.com/wp-content/uploads/2014/04/ultraviolet_spectrum.gif
- [9] แสง เกิดประทุม. 2554. **แสงแดด**. [Online]. Available : <http://www.tistr.or.th/ed/images/storie/engineer/articke/sunshine.pdf>.
- [10] ศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ. 2555. **การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา**. [Online]. Available : <http://www.petromat.org/home/page/4/?portfolio-category=high-performance-and-smart-materials-hpsm>.
- [11] ฝ่ายชุมชนและผู้ด้อยโอกาส สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. 2553. **พลาสติกย่อยสลายได้ นวัตกรรมเพื่อโลก**. [Online]. Available : <http://nstda.or.th/rural/public/100%20articlesstkc/39.pdf>.
- [12] ธนาวดี ลีจากภัย. 2549. **พลาสติกย่อยสลายได้เพื่อสิ่งแวดล้อม**. กรุงเทพฯ :

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.

- [13] ฉลาด บรรเทา และชูสิทธิ์ ศรีสุทธิกรม. 2548. กระบวนการปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก. [Online]. Available : <http://sichon.wu.ac.th/file/envi-shh-20090110-112240-pwrqrR.pdf>.
- [14] วินรัชชา เครือฟู และภูสิต ปุกมณี. 2552. “การสังเคราะห์หาลักษณะเฉพาะของ TiO_2 ขนาดนาโนสำหรับการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ในแหล่งน้ำธรรมชาติ.” รายงานผลการวิจัย คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- [15] Yang, J. Li, D. Wang, X. Yang, X. and Lu, X. 2002. “Rapid Synthesis of Nanocrystalline TiO_2/SnO_2 Binary Oxides and Their Photo Induced Decomposition of Methyl.” *Journal of Solid State Chemistry*. 165 : 193-198.
- [16] Zhang, M. and Low, G.K.C. 1992. “Degradable of Hazardous Organic in Water by TiO_2 Mediated Photocatalytic Oxidation.” *Process Emerging Techologies for Hazardous Waste Management*. 2 : 507-510.
- [17] ธรรมบุญ ศรีทวงศ์. 2550. ไททานเนียม ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม. [Online]. Available : <http://www.vcharkarn.com/varticle/27809>.
- [18] Merck. 2550. สมบัติของไททานเนียมไดออกไซด์. [Online]. Available : <http://www.merck.co.th/th/chemicals/reagents.asp>.
- [19] Li, X.Z. and Li, F.B. 2002. “The Enhancement of Photodegradation Efficiency using Pt- TiO_2 Catalyst.” *Chemosphere*. 48 : 1103-1111.
- [20] Yang, H. Shi, R. Li, X. Dong, X. and Yu, Y. 2006. “Sol-gel Synthesis of TiO_2 Suspension.” *Journal of Alloys and Compound*. 413 : 302-306.
- [21] Kim, S.Y. Chang, T.S. Lee, D.K. and Shin, C.H. 2004. “Photocatalytic Decomposition of Methylblue Over Nanosized Titania Particle.” *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2 : 194-201.
- [22] Tong, T. Zhang, J. Tian, B. Chen, F. and He, D. 2008. “Preparation of Fe^{3+} -doped TiO_2 Catalysts by Controlled Hydrolysis of Titanium Alkoxide and Study on Their Photocatalytic Activity for Methyl Orange Degradation.” *Journal of Hazardous material*. 155 : 527-579.
- [23] อธิพิล แจ้งชัด. 2557. สารคู่ควบไซเลน. [สไลด์]. กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [24] Kang,B.U. 2011. “Interfacial Fracture Behavior of Epoxy Adhesives for Electronic Components.” *한국산학기술학회논문지*. 3(12) : 1479-1487.
- [25] Wikimedia commons. 2016. Octadecyltrichlorosilane. [Online]. Available : <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Octadecyltrichlorosilane.svg>.
- [26] บรรเลง ตรนิล. 2546. เทคโนโลยีพลาสติก. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [27] สถาบันพลาสติก. 2556. เทคโนโลยีการผลิตยาง. [Online]. Available : <http://www.rubber.oie.go.th/Article.aspx?aid=3403>.
- [28] ดร.ชนันท์ พัทธวรการ. 2556. เอกสารประกอบการสอน กระบวนการวิชา 26248 เทคโนโลยีกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ (Polymer processing technology). เชียงใหม่ : ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [29] Alex. 2007. Molding Process. [Online]. Available : http://alexpb.com/notes/wpcontent/uploads/2007/12/compression_molding.png
- [30] จิราภรณ์ คำจันทร์. 2551. “การพัฒนาสารเคลือบผิว TiO₂/SnO₂/X ระดับนาโน.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [31] Zhao, X. Li, Z. Chen, Y. Shi, L. and Zhu, Y. 2007. “Solid-phase Photocatalytic Degradation of polyethylene plastic under UV and solar light irradiation.” *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*. 268 : 101-106.
- [32] ชลลดา อีรการณวงศ์. 2554. “ปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสงโดยไททาเนียมไดออกไซด์.” *วารสารมหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา*. (6) : 62-73.
- [33] Zhao, J. Milanova, M. Warmoeskerken, M. and Dutschk, V. 2012. “Surface modification of TiO₂ nanoparticles with silane coupling agents.” *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 413 : 273-279.
- [34] ภัคนัย ทองทีอัมพร. 2550. การมองเห็นการวัดสี. [Online]. Available : <https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/originals/f5/01/95/f50195b27aaa0cEcFdf7091a510e8435.jpg>
- [35] McClelland, D. and Fuller, R. 2015. Hue shifting and coloring. [Online]. Available : <http://flylib.com/books/en/2.816.1.70/1>.
- [36] Link, O.D. 2007. Selective deposition of metal-oxides on silicon using self-assembled monolayer resists. [Online]. Available : https://books.google.co.th/books?id=GmVvBh0WWiC&pg=PP4&lpg=PP4&dq=Selective+deposition+of+metal-oxides+on+silicon+using+self-assembled+monolayer+resists&source=bl&ots=7bHlxoTBUR&sig=ILYSdqMOxOJ5Kz76PEFKXW_jzmO&hl=th&sa=X&ved=0ahUKEwicgo7y9J3MAhWHnJOKHafNDpgQ6AEIHzAA#v=onepage&q=Selective%20deposition%20of%20metal-oxides%20on%20silicon%20using%20self-%20assembled%20monolayer%20resists&f=false

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ค่า Methyl orange degradation

ตารางที่ ก-1 ผลการสลายตัวของสารละลายเมทิลออเรนจ์ที่ผสมกับ TiO_2 และ OTS-modified TiO_2 ที่เวลาต่างๆ (0-60 นาที)

Irradiation time (min)	Sample	TiO_2	OTS-modified TiO_2
0		1.006	1.001
10		0.980	0.960
20		0.925	0.910
30		0.894	0.885
40		0.865	0.850
50		0.853	0.845
60		0.850	0.840

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ค่า Carbonyl index (C.I.)

ตาราง ข-1 ผลการทดสอบค่า Carbonyl index ของฟิล์ม LDPE และฟิล์ม LDPE ผสม TiO₂ และ OTS-modified TiO₂

Irradiation time (hr)	Carbonyl index (C.I.)						
	LDPE	LDT (0.25)	LDT (0.5)	LDT (1)	LDMOT (0.25)	LDMOT (0.5)	LDMOT (1)
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
50	0.0127	0.0044	0.0121	0.0238	0.0072	0.0261	0.0700
100	0.0225	0.0270	0.0379	0.0548	0.0279	0.0515	0.0837
150	0.0298	0.0356	0.0718	0.0845	0.0407	0.0773	0.0931
200	0.0506	0.0619	0.0930	0.1263	0.0642	0.1283	0.1278

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์ม (ΔE)

ผลการทดสอบค่าการเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์ม LDPE และฟิล์ม LDPE ผสมตัวเร่งปฏิกิริยา ชนิดต่างๆในปริมาณ 0.25, 0.5 และ 1 phr

ตารางที่ ค-1 ผลการทดสอบค่าการเปลี่ยนแปลงสี (ΔE) ของฟิล์ม

Sample	Irradiation time (hr)	L*	a*	b*	ΔL^*	ΔE	Hue angle
LDPE	0	27.99	-1.29	-4.77	-	-	74.87
	50	28.12	-1.02	-3.97	0.13	0.85	75.59
	100	28.60	-0.97	-3.81	0.61	1.32	75.72
	150	28.87	-0.91	-3.83	0.88	2.22	76.63
	200	30.21	-0.81	-3.52	2.22	2.87	77.04
LDT(0.25)	0	51.36	-1.93	-7.29	-	-	75.17
	50	52.34	-1.91	-7.61	0.98	1.03	75.49
	100	52.52	-1.75	-7.49	1.16	1.46	76.85
	150	54.01	-1.76	-7.59	2.65	2.81	76.94
	200	55.67	-1.73	-7.51	4.31	4.72	77.03
LDT(0.5)	0	62.44	-1.94	-5.96	-	-	71.97
	50	64.03	-1.86	-6.18	1.59	2.31	73.25
	100	64.66	-1.59	-5.50	2.22	2.36	73.88
	150	66.31	-1.02	-5.32	3.87	4.03	79.15
	200	69.13	-0.73	-4.52	6.69	6.95	80.83
LDT(1)	0	67.67	-1.72	-4.79	-	-	70.25
	50	69.80	-1.74	-4.94	2.13	2.14	70.60
	100	70.93	-1.73	-4.98	3.26	2.34	70.84
	150	72.63	-0.83	-2.75	4.96	5.42	73.21
	200	76.01	-0.23	-2.71	8.34	8.71	85.15
LDOMT(0.25)	0	53.30	-2.05	-7.53	-	-	74.77
	50	54.99	-2.03	-7.63	1.69	1.95	75.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-1 (ต่อ) ผลการทดสอบค่าการเปลี่ยนแปลงสี (ΔE) ของฟิล์ม

Sample	Irradiation time (hr)	L*	a*	b*	ΔL^*	ΔE	Hue angle
LDOMT (0.25)	100	55.36	-2.83	-7.35	2.06	2.11	76.02
	150	56.21	-1.72	-6.98	2.91	3.01	76.16
	200	58.34	-1.82	-7.56	5.04	5.06	76.46
LDOMT(0.5)	0	60.64	-2.63	-6.00	-	-	66.33
	50	61.12	-2.21	-6.86	0.48	1.30	72.14
	100	63.86	-1.92	-6.11	3.22	3.30	72.56
	150	65.33	-1.40	-5.44	4.69	4.88	75.57
	200	68.04	-1.36	-6.21	7.40	7.95	77.65
LDOMT(1)	0	69.62	-1.88	-2.89	-	-	56.96
	50	70.98	-2.25	-4.24	1.36	1.95	62.05
	100	72.86	-2.22	-4.29	3.24	3.55	62.64
	150	76.45	-1.10	-4.58	6.83	7.08	76.49
	200	79.02	-1.03	-4.86	9.40	9.47	78.03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของฟิล์ม

ผลการทดสอบค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของฟิล์ม LDPE และฟิล์ม LDPE ผสมตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ และ OTS-modified TiO₂ ในปริมาณ 0.25, 0.5 และ 1 phr

ตารางที่ ง-1 ผลการทดสอบค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของฟิล์ม

Sample	Irradiation time (hr)	Weight loss (%)
LDPE	0	0.00
	50	1.31
	100	1.65
	150	3.45
	200	5.12
LDT(0.25)	0	0.00
	50	1.38
	100	2.07
	150	4.15
	200	6.03
LDT(0.5)	0	0.00
	50	1.74
	100	3.03
	150	5.96
	200	10.01
LDT(1)	0	0.00
	50	2.43
	100	3.89
	150	7.79
	200	10.97
LDOMT(0.25)	0	0.00
	50	2.08
	100	2.79
	150	4.24
	200	7.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-1 (ต่อ) ผลการทดสอบค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของฟิล์ม

Sample	Irradiation time (hr)	Weight loss (%)
LDOMT(0.5)	0	0.00
	50	1.80
	100	3.18
	150	6.07
	200	10.90
LDOMT(1)	0	0.00
	50	2.52
	100	4.30
	150	7.69
	200	10.90



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

ค่าการทดสอบสมบัติเชิงกล

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม LDPE และฟิล์ม LDPE ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ ในปริมาณ 0.25, 0.5 และ 1 phr ทั้งก่อนและหลังการฉายแสง UVA 200 ชั่วโมง

ตารางที่ จ-1 ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์มก่อนและหลังการฉายแสง UVA

Irradiation time (hr)	Sample	
	0	200
LDPE	10.2±0.8	12.3±0.8
LDT(0.25)	7.9±0.2	9.9±0.4
LDT(0.5)	10.3±0.5	11.9±1.3
LDT(1)	10.3±0.7	8.3±0.9
LDOMT(0.25)	9.7±0.7	11.7±1.1
LDOMT(0.5)	10.5±0.5	12.0±0.7
LDOMT(1)	10.9±0.6	11.5±0.8

ตารางที่ จ-2 ผลการทดสอบค่า %Elongation at break ของฟิล์มก่อนและหลังการฉายแสง UVA

Irradiation time (hr)	Sample	
	0	200
LDPE	207±19	113±2
LDT(0.25)	109±13	59±3
LDT(0.5)	111±10	39±5
LDT(1)	145±18	21±3
LDOMT(0.25)	129±18	45±8
LDOMT(0.5)	134±17	28±8
LDOMT(1)	152±21	9±3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ-3 ผลการทดสอบค่า Young's modulus ของฟิล์มก่อนและหลังการฉายแสง UVA

Sample	Irradiation time (hr)	0	200
	LDPE		140±11
LDT(0.25)		107±6	134±5
LDT(0.5)		137±5	168±16
LDT(1)		143±12	143±17
LDOMT(0.25)		126±10	139±18
LDOMT(0.5)		142±5	169±16
LDOMT(1)		149±4	190±13



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้