รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

ฟิล์มย่อยสลายด้วยแสงที่เตรียมจาก LDPE/TiO_2 และ LDPE/Zn-doped TiO_2

Photodegradation film prepared from LDPE/TiO_2 and LDPE/Zn-doped TiO_2

นางสาวชลลดา ฤตวิรุฬห์

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

ฟิล์มย่อยสลายด้วยแสงที่เตรียมจาก LDPE/TiO_2 และ LDPE/Zn-doped TiO_2

Photodegradation film prepared from LDPE/TiO_2 and LDPE/Zn-doped TiO_2

นางสาวชลลดา ฤตวิรุฬห์

ลำดับที่.....
เลขทะเบียน 149120
วัน.เดือน.ปี - 4 ส.ค. 2561

b 00266545
i.....

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) ฟิล์มย่อยสลายด้วยแสงที่เตรียมจาก LDPE/TiO_2 และ LDPE/Zn-doped TiO_2
ชื่อโครงการ (ภาษาอังกฤษ) Photodegradation film prepared from LDPE/TiO_2 and LDPE/Zn-doped TiO_2
แหล่งเงิน งบประมาณเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์
ประจำปีงบประมาณ 2560 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 50,000 บาท
ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2559 ถึง 30 กันยายน 2560
ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ นางสาวชลลดา ฤตวิรุฬห์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาความสามารถในการย่อยสลายของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ที่ย่อยสลายได้ด้วยแสง ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2), TiO_2 ที่เตรียมจากสารตั้งต้นสังกะสี (Zn-doped TiO_2) และใช้กรดสเตียริกเป็นสารช่วยกระจายตัว โดยปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ อุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา (300, 350, 400 และ 450°C) และผลการเจือ ZnO ลงในTiO_2 โดยเตรียมจาก $Zn(NO_3)_2.6H_2O$ ปริมาณ 2% mol และทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ของ TiO_2 และ Zn-doped TiO_2 ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ทดสอบการย่อยสลายตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงด้วยสารละลายเมทิล-ออเรนจ์ (MO) และเทคนิคดิฟฟิวซ์รีเฟคทีฟยูวีวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (DR-UV) เตรียมตัวอย่างฟิล์มโดยผสม LDPE กับ TiO_2 หรือ Zn-doped TiO_2 1 phr ด้วยเครื่องผสมระบบปิด และขึ้นรูปด้วยกระบวนการกดอัด ศึกษาการย่อยสลายของฟิล์มภายใต้แสงยูวีเอ (UVA) ด้วยตู้ฉายแสง UVA เป็นเวลา 200 ชั่วโมง นำฟิล์มไปวิเคราะห์ค่าดัชนีคาร์บอนิล (C.I.) ด้วยเทคนิคการตรวจวิเคราะห์การดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (FT-IR) การเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์ม (ΔE) ด้วยเครื่องวัดสี ศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และสมบัติการรับแรงดึง ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ พบว่า TiO_2 เผาที่อุณหภูมิ 300°C (T(300)) และ ZnO-TiO_2 เผาที่อุณหภูมิ 350°C (TZN(350)) มีค่าอัตราส่วนความเข้มพีคของวัฏภาคอะนาเทสต่อวัฏภาครูไทล์ (IA/IR) สูงสุด ส่งผลให้สลายตัวของ MO และความยาวคลื่นที่ดูดกลืนแสง (□) สูงที่สุด หลังการฉายแสง UVA ฟิล์มมีค่าดัชนีคาร์บอนิล (C.I.) และค่าการเปลี่ยนแปลงสี (ΔE) เพิ่มขึ้น ขณะที่เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง ค่าความเค้นดึง ณ จุดขาดของฟิล์มเพิ่มขึ้น แสดงว่าฟิล์มมีแนวโน้มที่จะเกิดการย่อยสลายแบบเกิดพันธะเชื่อมโยง (Crosslink) โดยฟิล์ม LDPE ที่มีการใช้ TiO_2 และกรดเสตียริกเป็นสารช่วยกระจายตัว (LDT(300)SA) มีการย่อยสลายทางแสงมากที่สุด

คำสำคัญ : พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ, ไททาเนียมไดออกไซด์, การย่อยสลายด้วยแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Title: Photodegradation film prepared from LDPE/TiO_2 and LDPE/Zn-doped TiO_2

Researcher: Ms. Chonlada Ritvirulh

Faculty: Science **Department:** Chemistry

ABSTRACT

This research studied on degradation ability of photodegradable low-density polyethylene films prepared from titanium dioxide (TiO_2) catalyst, TiO_2 doped with zinc oxide (Zn-doped TiO_2) and TiO_2 with stearic acid as a dispersing agent. Parameters studied were calcination temperature of catalysts (300, 350, 400 and 450°C) and effect of ZnO doping on TiO_2 with $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ at 2% mol. Calcinated TiO_2 and Zn-doped TiO_2 were characterized using X-ray diffractromter (XRD), photocatalytic activity of methyl orange (MO) and Diffuse reflective UV-Visible spectroscopy (DR-UV). Films were prepared by mixing LDPE with TiO_2 or Zn-doped TiO_2 (1 phr) using an internal mixer then shaping with a compression molding process. Films were put in UVA box for 200 hours to study photodegradation. Then the films were examined for carbonyl index (C.I) using Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR), color change (ΔE) using colorimeter, morphology using scanning electron microscope (SEM), and tensile properties using a universal testing machine. The results indicated that TiO_2 calcinated at 300°C (T(300) and Zn-doped TiO_2 calcinated at 350°C (TZN(350)) showed the highest IA/IR ratio resulting in the greatest MO degradation and light absorption wavelength. After UVA exposure, the films with TiO_2 or Zn-doped TiO_2 had increases in C.I., ΔE, stress at break but decreases in %elongation at break. This reviewed that film degradation was occurred in the crosslink type. Additionally, the LDPE film with TiO_2 and stearic acid (a dispersing agent) (LDT(300)SA) had the greatest photodegradation.

Keywords: low-density polyethylene (LDPE), titanium dioxide(TiO_2), photocatalytic degradation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากงบประมาณเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 ในการทำงานวิจัยนี้ จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และคุณสุดใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานพอลิเมอร์ที่อำนวยความสะดวกตลอดการดำเนินงานวิจัย รวมทั้งเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีทุกท่านที่คอยอำนวยความสะดวกตลอดการทำโครงงานวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ที่ให้การช่วยเหลือ และแนะนำการใช้เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์

นางสาวชลลดา ฤตวิรุฬห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่ **หน้า**

บทคัดย่อภาษาไทย I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II

กิตติกรรมประกาศ III

สารบัญ IV

สารบัญตาราง VII

สารบัญภาพ VIII

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย 1

1.2 วัตถุประสงค์ 2

1.3 ขอบเขตงานวิจัย 2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 กระบวนการโฟโตแคตาไลติก 4

2.1.1 หลักการของปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส (Fundamental of photocatalysis reaction) 4

2.1.2 พลังงานแสง 5

2.1.3 คลื่นแสงที่พบในแสงอาทิตย์ 6

2.1.4 ชนิดของโฟโตแคตาไลซิส 7

2.1.5 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา 7

2.2 พลาสติกที่ย่อยสลายได้ 8

2.3 พลาสติกย่อยสลายได้ทางแสง (Photodegradable plastic) 10

2.4 กระบวนการเคมีทางแสงของพอลิเมอร์ 11

2.5 ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) 11

2.5.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนวัฏภาคของ TiO_2 13

2.6 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide; ZnO) 13

2.7 วิธีการฝังตัว (Impregnation method) 14

2.8 พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) 15

2.9 กรดสเตียริก (Stearic Acid) 17

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
บทที่ 3 การทดลอง	21
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	21
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	21
3.3 การเตรียม TiO_2 และ Zn-doped TiO_2	22
3.3.1 การเตรียม TiO_2	22
3.3.2 การเจือ TiO_2 ด้วย $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ ด้วยวิธีการฝังตัว	22
3.3.3 การปรับปรุงพื้นผิวของ TiO_2 โดยการใช้สารช่วยกระจายตัว	22
3.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของ TiO_2 และ Zn-doped TiO_2	23
3.4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของ TiO_2 และ Zn-doped TiO_2	23
3.4.2 การศึกษาการดูดกลืนแสงยูวีของ TiO_2 และ Zn-doped TiO_2 โดยเทคนิค Diffuse-reflective UV-Visible spectroscopy (DR-UV)	23
3.4.3 การวิเคราะห์หาปริมาณของ ZnO ที่เจือใน TiO_2	23
3.4.4 การทดสอบการสลายตัวทางแสงของเมทิลออเรนจ์	23
3.5 การขึ้นรูปฟิล์ม	24
3.5.1 การคอมปาวด์ด้วยเครื่องผสมแบบปิดขนาด 50 กรัม	24
3.5.2 การขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่างด้วยกระบวนการกดอัด	24
3.6 การตรวจสอบตัวเร่งปฏิกิริยาในฟิล์ม LDPE	25
3.7 การทดลองโดยการฉายแสงภายใต้รังสี UVA	25
3.8 การวิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม	25
3.8.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน Zn-doped TiO_2	25
3.8.2 การวัดค่าดัชนีคาร์บอนิล (Carbonyl index)	25
3.8.3 การเปลี่ยนแปลงสี	26
3.8.4 การทดสอบการรับแรงดึงยืด	26
3.8.5 สัณฐานวิทยา (Morphology)	27
บทที่ 4 ผลการทดลอง	28
4.1 การศึกษาลักษณะของ TiO_2 และ Zn-doped TiO_2	28
4.1.1 การศึกษาผลของอุณหภูมิในการเผา TiO_2 และ Zn-doped TiO_2	28
4.1.2 การวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงโดยการทดสอบด้วยสารละลาย MO	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ **หน้า**

4.1.3 การวิเคราะห์การดูดกลืนแสงของ TiO_2 และ Zn-doped TiO_2 ที่เผาที่อุณหภูมิต่างๆ 28

4.2 การตรวจสอบปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา TiO2 ชนิดต่างๆ ในฟิล์ม LDPE 32

4.3 การศึกษาสมบัติของฟิล์ม LDPE ที่ผสม TiO_2 และ Zn-doped TiO_2 32

4.3.1 การวิเคราะห์ค่าดัชนีคาร์บอนิลของฟิล์มตัวอย่าง 32

4.3.2 การเปลี่ยนแปลงสี 35

4.3.3 สัณฐานวิทยา 36

4.3.4 สมบัติเชิงกล 39

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 42

5.1 สรุปผลการวิจัย 42

5.2 ข้อเสนอแนะ 42

เอกสารอ้างอิง 44

ภาคผนวก 47

ภาคผนวก ก ค่า AAS 48

ภาคผนวก ข ค่า Methyl Orange Degradation 49

ภาคผนวก ค ค่า Carbonyl Index (C.I.) 50

ภาคผนวก ง ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์ม (ΔE) 51

ภาคผนวก จ สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินโครงการวิจัย 53

ประวัตินักวิจัย 54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 เปรียบเทียบสมบัติของ TiO_2 ในโครงสร้างผลึกวัฏภาคอะนาเทส, วัฏภาครูไทล์ และวัฏภาคบรุ๊คไคต์ 13
2.2 สมบัติของ ZnO 17
2.3 สมบัติบางประการของ LDPE 16
3.1 อัตราส่วนของเม็ดพลาสติกกับ TiO_2 24
4.1 อัตราส่วนความเข้มพีคของวัฏภาคอะนาเทสต่อความเข้มพีคของวัฏภาครูไทล์ (I_A/I_R) ของTiO_2 และ Zn-doped TiO_2 เผาที่อุณหภูมิต่างๆ 29
4.2 ความยาวคลื่นที่ดูดกลืนแสงและพลังงานแบนด์แก็พของ TiO_2 ที่เผาในอุณหภูมิต่างๆและ Zn-doped TiO_2 เผาที่อุณหภูมิ 350°C 31
4.3 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ชนิดต่างๆ 32
4.3 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์ม LDT(300)SA 36
ข.1 ผลการสลายตัวของสารละลาย MO ที่ผสมกับ TiO_2 ที่เผาที่อุณหภูมิต่างๆ (300-450°C) 49
ข.2 ผลการสลายตัวของสารละลายเมทิลออเรนจ์ ที่ผสมกับ Zn-doped TiO_2 ที่เผาที่อุณหภูมิต่างๆ (300-450°C) 49
ค.1 ผลการทดสอบค่า Carbonyl Index ของฟิล์ม LDPE และ ฟิล์ม LDPE ผสม TiO_2 และ Zn-doped TiO_2 อัตราการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนของฟิล์มตัวอย่าง 50
ง.1 ผลการทดสอบค่าการเปลี่ยนแปลงสี (ΔE) ของฟิล์ม 51
จ.1 สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินโครงการวิจัย 53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่ **หน้า**

2.1 พลังงานของการเกิดออกซิเดชันของสารอินทรีย์ 4
2.2 สเปกทรัมของรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า 6
2.3 สเปกทรัมของรังสียูวี 6
3.1 ลักษณะการวางชิ้นงานและระยะห่างของชิ้นงานกับหลอด UV 25
3.2 Colorimetric spectrophotometer 26
4.1 XRD patterns ของ TiO_2 ไม่เผาและเผาที่อุณหภูมิต่างๆ; (a) T(300), (b) T(350), (c) T(400), (d) T(450) และ (e) T(NC) 28
4.2 XRD patterns ของ TiO_2 ไม่เผาและ Zn-doped TiO_2 เผาที่อุณหภูมิต่างๆ; (a) TZN(300), (b) TZN(350), (c) TZN(400), (d) TZN (450) และ (e) T(NC) 29
4.3 ค่าความเข้มข้นของสารละลาย MO ของ TiO_2 และ Zn-doped TiO_2 เผาที่อุณหภูมิต่างๆ หลังผ่านการฉายแสง UVA เป็นเวลา 30, 60 และ 90 นาที 30
4.4 Diffuse reflective UV-Visible spectroscopy (DR-UV) ของTiO_2 ที่เผาในอุณหภูมิ 300°C 31
4.5 ATR-IR สเปกทรัมของฟิล์ม LDT(300) ก่อนฉายแสง UVA 33
4.6 ATR-IR สเปกทรัมของฟิล์ม LDT(300) หลังฉายแสง UVA 200 ชั่วโมง 33
4.7 ดัชนีคาร์บอนิล LDPE และ LDPE ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ชนิดต่างๆ ก่อนและหลังฉายแสงเป็นเวลา 200 ชั่วโมง 34
4.8 การเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์ม LDPE ที่มีการเติม TiO_2 1 phr 35
4.9 ภาพ SEM ภาคตัดขวางของฟิล์ม LDPE แสดงการกระจายตัวของ TiO_2 โดยมีปริมาณ TiO_2 1 phr ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า 37
4.10 ภาพ SEM ภาคพื้นผิวของฟิล์ม LDPE ที่ผสม TiO_2 ชนิดต่างๆ แสดงการย่อยสลายบนพื้นผิวของฟิล์ม LDPE ก่อนและหลังการฉายรังสียูวีเอเป็นเวลา 200 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า 39
4.11 ค่า % Elongation at Break ของฟิล์ม LDPE ที่ผสมและไม่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนและหลังการฉายแสง 39
4.12 ค่า Stress at Break ของฟิล์ม LDPE ที่ผสมและไม่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนและหลังการฉายแสง 40
4.13 ค่า Young's Modulus ของฟิล์ม LDPE ที่ผสมและไม่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนและหลังการฉายแสง 40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันพลาสติกเป็นวัสดุที่เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของเราเป็นอย่างมาก โดยสามารถพบเห็นผลิตภัณฑ์พลาสติกได้ ทั่วไปไม่ว่าจะเป็นการใช้พลาสติกเพื่อประโยชน์ในทางการแพทย์ อุตสาหกรรมอาหาร เกษตรกรรม ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิคส์หรือชิ้นส่วนยานยนต์ โดยคิดเป็นมูลค่าการใช้พลาสติกทั่วโลกมากถึง 150 ล้านตันต่อปี [1] เนื่องจากพลาสติกเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง คงทน ไม่เป็นสนิม มีน้ำหนักเบา สามารถแต่งเติมสีสันได้ สามารถดัดแปรสมบัติได้ง่ายโดยการเติมสารเติมแต่ง (Additives) เช่น สารเสริมสภาพพลาสติก (Plasticizer) สารปรับปรุงคุณภาพ (Modifier) สารตัวเติม (Filler) สารคงสภาพ (Stabilizer) สารยับยั้ง ปฏิกิริยา (Inhibitor) สารหล่อลื่น (Lubricant) และผงสี (Pigment) เป็นต้น แต่วัสดุดังกล่าวไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติภายในระยะเวลาอันสั้น เนื่องจากพลาสติกส่วนใหญ่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ย่อยสลายได้ยากในสภาพแวดล้อม และพลาสติกบางประเภทมีความเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีทำให้การกำจัดขยะทำได้ยาก ส่งผลให้เกิดขยะพลาสติกในปริมาณที่สูงมากขึ้น ซึ่งถ้านำขยะพลาสติกเหล่านี้ไปทำลายโดยการเผาจะต้องใช้พลังงานสูง และอาจเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เนื่องจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ เพื่อลดปัญหาดังกล่าวจึงมีการผลิตพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ โดยการย่อยสลายพลาสติกมีหลายวิธีได้แก่ 1.การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation) เป็นการย่อยสลายพอลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์ โดยใช้การฝังกลบและใช้ระยะเวลายาวนานในการย่อยสลาย 2.การย่อยสลายเชิงกล (Mechanical degradation) โดยการให้แรงกระทำแก่ชิ้นพลาสติกซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้โดยทั่วไปในการทำให้พลาสติกแตกเป็นชิ้นเล็กๆ 3.การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative degradation) โดยจะต้องมีหมู่ฟังก์ชันภายในโครงสร้างทางเคมี เช่น หมู่ไฮดรอกซิล (-OH), หมู่คาร์บอนิล (-C=O) 4.การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytic degradation) โดยที่โครงสร้างทางเคมีจะต้องมีหมู่ฟังก์ชัน เช่น หมู่เอไมด์ ($-NH_2$) และใช้น้ำเพื่อช่วยในการเกิดปฏิกิริยา และ 5.การย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradation) ซึ่งจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงร่วมกับแสงเพื่อให้เกิดการย่อยสลายของพลาสติกได้ดีขึ้น [2]

ในงานวิจัยนี้จึงสนใจทำการศึกษาพลาสติกย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradable plastic) เนื่องจากเป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับความนิยมในปัจจุบันเพราะแสงเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่ไม่มีวันหมดไปอีกทั้งยังมีการสร้างมลพิษน้อย ซึ่งการย่อยสลายด้วยแสงเกิดจากกระบวนการโฟโตแคตาไลติกที่มีแสงทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายของพลาสติกด้วยแสง เนื่องจาก TiO_2 ให้ประสิทธิภาพในการเป็นโฟโตแคตาลิสต์สูง มีความเป็นพิษต่ำ มีราคาถูก และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ [3] โดยแสดงประสิทธิภาพการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงภายในช่วงแสง UVA 300-400 nm เพราะผลึกอะนาเทสภายในโครงสร้างของ TiO_2 สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 384 nm และได้ทำการปรับปรุงพื้นผิวของ TiO_2 ด้วยซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ผ่านกระบวนการฝังตัว (Impregnation method) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการย่อยสลายพลาสติก เนื่องจาก ZnO เป็นโฟโตแคตาลิสต์ที่ดีอีกตัวหนึ่ง และมีช่วงการดูดกลืนแสงที่ใกล้เคียงกับ TiO_2 คือ 350-400 nm ภายหลังจากการปรับปรุงพื้นผิวแล้วคาดว่าจะมีผลการย่อยสลายที่ดีขึ้น เพราะ ZnO จะช่วยเพิ่มความเสถียรของการเกิดอิเล็กตรอนโฮลมากกว่า TiO_2 เนื่องจากมีพลังงานแบนด์แก็พ (Band gap energy) สูงกว่า

ในบรรดาพอลิเมอร์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติก คือ พอลิเอทิลีน (PE) เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่มีจุดหลอมตัวและความแข็งต่ำ หาได้ง่าย เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี ปลอดภัยต่ออาหารและยา ราคาถูก ซึ่งชนิดที่นิยมใช้ เช่น พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) มักใช้ผลิตเป็นถุง ฟิล์มหด ฟิล์มยืด ได้ฟิล์มที่มีความทนแรงดึง ทนแรงกระแทกสูง และใช้ 300-400 ปี ในการย่อยสลาย [4]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการย่อยสลายด้วยแสงของฟิล์ม LDPE โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง คือ TiO_2 และไททาเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยซิงค์ออกไซด์ (Zn-doped TiO_2) โดยศึกษาสภาวะการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการย่อยสลายฟิล์มด้วยแสง

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการย่อยสลายด้วยแสง (Photodegradation) ในฟิล์ม LDPE โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง คือ TiO_2 เปรียบเทียบกับ Zn-doped TiO_2
2. เพื่อศึกษาการใช้กรดสเตียริกเป็นสารช่วยการกระจายตัวตัวเร่งปฏิกิริยาในฟิล์ม LDPE

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบวิธีการทดลอง และวางแผนการทดลอง
3. ดำเนินงานวิจัย

ตอนที่ 1 การเจือ TiO_2 ด้วยซิงค์ไนเทรตด้วยวิธีการฝังตัว (Impregnation Method) แล้วทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ของ Zn-doped TiO_2

- หารูปแบบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หาปริมาณ Zn^{2+} ในตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงด้วยเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกตรสโกปี (AAS)
- หาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงโดยการทดสอบ Photocatalytic Activity ด้วย Methyl Orange
- วิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสง UV ของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 และ Zn-doped TiO_2 ด้วยเทคนิคดิฟฟิวซ์รีเฟคทีฟยูวีวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (DR-UV)

ตอนที่ 2 เลือกสภาวะการเตรียมของตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงที่แสดงผลดีที่สุดมาทำการผสมกับเม็ดพลาสติก LDPE ด้วยเครื่องผสมแบบปิด (Internal Mixer)

ตอนที่ 3 การขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการกดอัด (Compression Molding Process) แล้วนำฟิล์มที่ได้ไปฉายแสง UVA

ตอนที่ 4 การวิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม

- วัดค่าดัชนีคาร์บอนิล (Cabonyl index)
- การทดสอบความแข็งแรงดึงยืด (Tensile test)
- สัณฐานวิทยา (Morphology)
- การเปลี่ยนแปลงสี

ตอนที่ 5 เลือกสภาวะการย่อยสลายด้วยแสงของฟิล์มที่แสดงผลดีที่สุด มาทำการศึกษาผลของสารช่วยกระจายตัว ได้แก่ กรดเสตียริก (Stearic acid)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจถึงกลไกลการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายทางแสง และปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายของฟิล์ม LDPE ด้วย TiO_2 และ Zn-doped TiO_2

2. สามารถเตรียมฟิล์มที่ย่อยสลายได้ดีขึ้น และสามารถนำความรู้ที่ได้เป็นแนวทางในการปรับปรุงพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ เพื่อทำให้ช่วยลดปัญหาภาวะโลกร้อนในอนาคต ที่เกิดจากการย่อยสลายได้ยากของพอลิเมอร์ที่มีการใช้งานในปัจจุบัน

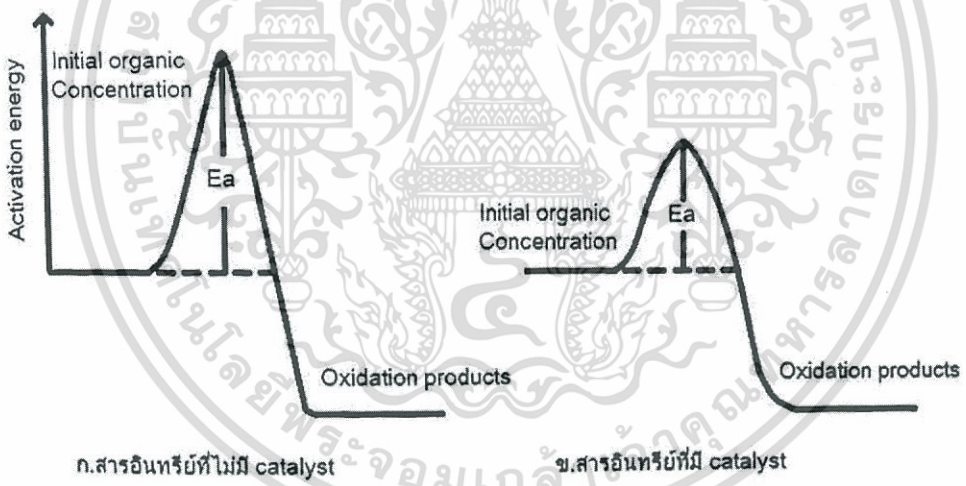
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการโฟโตแคตาไลติก [5]

2.1.1 หลักการของปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส (Fundamental of photocatalysis reaction)

กระบวนการโฟโตแคตาไลติก (Photocatalytic process) เป็นการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ตัวแคตาลิสต์ ซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ โดยการกระตุ้นด้วยแสง ตัวแคตาลิสต์นี้จะทำหน้าที่ลดพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยา ภาพที่ 2.1 แสดงการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation) ของสารอินทรีย์ที่มีและไม่มีตัวแคตาลิสต์ ภาพที่ 2.1 (ก) แสดงพลังงานกระตุ้น (Activation energy, Ea) ของปฏิกิริยาที่ไม่มีตัวแคตาลิสต์ซึ่งมีค่ามาก และพลังงานของผลิตภัณฑ์จะต่ำกว่าพลังงานของสารอินทรีย์ พลังงานกระตุ้นนี้จะลดลงในปฏิกิริยาที่มีตัวแคตาลิสต์ ถึงแม้ว่าพลังงานของสารอินทรีย์ และผลิตภัณฑ์ยังคงเท่าเดิม ดังภาพที่ 2.1 (ข) ตัวแคตาลิสต์นี้จะเพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยาโดยการลดพลังงานกระตุ้น อีกทั้งตัวมันเองยังตอบสนองต่อแสงดังกล่าว คือจะเกิดการกระตุ้นได้โดยการถ่ายทอดพลังงานที่มีมากกว่าพลังงานแบนด์แก็พ (Band gap energy)



ภาพที่ 2.1 พลังงานของการเกิดออกซิเดชันของสารอินทรีย์ [5]
ที่มา: คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์, 2555

ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสต้องมีองค์ประกอบ คือ

1) แคตาลิสต์ เช่น สารกึ่งตัวนำ (Semi-conductor)

2) พลังงานแสง ซึ่งมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับพลังงานโฟตอนของตัวแคตาลิสต์

3) น้ำ

4) ออกซิเจน หรือ ตัวออกซิแดนท์ (Oxidants) อื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 พลังงานแสง

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

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

เมื่อ E คือ พลังงานควอนตัม (Quantum energy), จูล

H คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's Constant) (6.625×10^{-34}จูล•วินาที)

ν คือ ความถี่ของคลื่นแสง, เฮิรตซ์หรือวินาที$^{-1}$

λ คือ ความยาวคลื่นแสง, นาโนเมตร (nm)

c คือ ความเร็วของคลื่นแสง (2.997×10^{8}เมตร/วินาที)

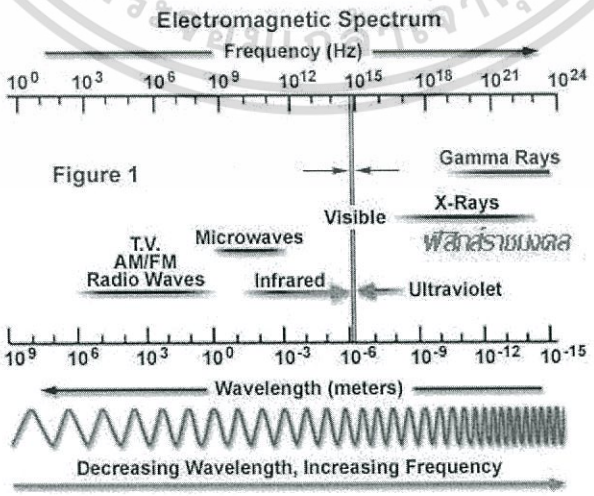
ภาพที่ 2.2 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของความยาวคลื่น และพลังงานโดยพลังงานของแสงเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวคลื่นลดลง ภาพที่ 2.3 แสดงสเปกทรัมของรังสี UV ซึ่งเป็นที่สนใจในกระบวนการโฟโตแคตาไลติก ความยาวคลื่นของแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) อยู่ในช่วง 100-400 nm สำหรับความยาวคลื่นแสงที่คนมองเห็น (Visible light หรือแสงขาว) อยู่ในช่วง 380-750 nm รังสี UV นี้แบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง คือ

1) คลื่นยาว (Long wave UV, UV-A) อยู่ในช่วง 320-400 nm

2) คลื่นกลาง (Middle wave UV, UV-B) อยู่ในช่วง 280-320 nm

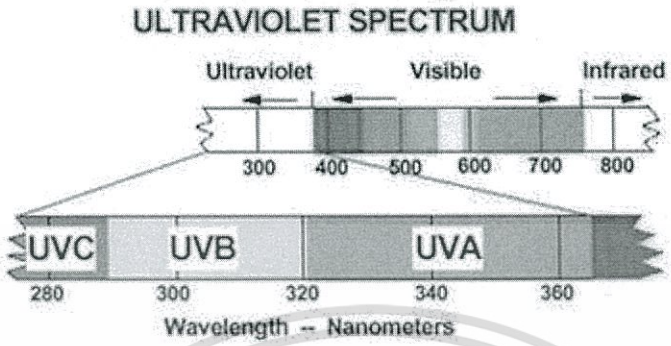
3) คลื่นสั้น (Short wave UV, UV-C) อยู่ในช่วง 200-280 nm

ความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า 200 nm มีความสำคัญน้อยมากเพราะรังสีอยู่ในช่วง Vacuum UV ซึ่งจะถูกดูดกลืนในอากาศจนหมดในช่วงระยะทางสั้นๆ ที่แสงเดินทาง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 2.2 สเปกทรัมของรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [5]
ที่มา: คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์, 2555



ภาพที่ 2.3 สเปกทรัมของรังสียูวี [5]
ที่มา: คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์, 2555

แสงอาทิตย์มีช่วงความยาวคลื่นที่กว้างมาก ความเข้มของแสง UV และแสงขาวที่ส่องลงมายังพื้นผิวโลกจะถูกทำให้ลดลงอย่างมากในชั้นบรรยากาศจากการถูกดูดกลืน และการกระเจิงของแสง ที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 320 nm ความเข้มของแสงจะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการถูกดูดกลืนโดยโอโซนในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ (สูงจากพื้นผิวโลกในช่วงประมาณ 10-35 ไมล์) และที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 288 nm มีรังสีที่แผ่มาถึงพื้นโลกน้อย ดังนั้นแสง UV ที่ส่องมายังพื้นโลกจึงมีขีดจำกัด

ในกระบวนการโฟโตแคตาไลติกที่ใช้สาร TiO_2 เป็นตัวแคตาลิสต์นั้นเนื่องจาก TiO_2 มีพลังงานแบนด์แก็พประมาณ 3.2 eV ดังนั้นการให้พลังงานกับระบบจึงต้องให้พลังงานมากกว่าหรือเท่ากับพลังงานแบนด์แก็พปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสจึงจะเกิดขึ้นได้ ซึ่งช่วงของแสง UV ที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 400 nm จะให้ค่าพลังงานที่มากกว่าหรือเท่ากับพลังงานแบนด์แก็พของ TiO_2 แต่เนื่องจากแสงอาทิตย์ที่ส่งมายังพื้นผิวโลกมีช่วงแสงที่เป็น UV ในปริมาณน้อยมาก คือ เฉพาะช่วง 350-400 nm เท่านั้น ปัจจุบันจึงมีงานวิจัยที่มุ่งเน้นการปรับปรุง TiO_2 ให้มีความสามารถที่จะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ช่วงแสงอาทิตย์เพื่อลดการใช้หลอดไฟ UV ในกระบวนการโฟโตแคตาไลติก [3]

2.1.3 คลื่นแสงที่พบในแสงอาทิตย์ [6]

แสงแดดประกอบด้วยแสงในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ดังนี้

1. กลุ่มคลื่นแสงที่ตามองเห็น (Visible light) ซึ่งมีความยาวคลื่น 400-800 nm เป็นกลุ่มคลื่นแสงสีต่างๆ ตั้งแต่คลื่นแสงสีม่วงสีคราม สีน้ำเงิน สีเขียว สีเหลือง สีแสด และสีแดงเรียงตามลำดับความยาวคลื่นจากน้อยไปหามากคลื่นแสงกลุ่มนี้เป็นคลื่นแสงที่ประสาทตามนุษย์สามารถรับรู้ได้ทำให้เราสามารถมองเห็นสิ่งต่างๆได้ และเป็นคลื่นแสงที่พืชใช้สังเคราะห์แสงสร้างชีวมวล (Biomass; มวลรวมของสสารที่เกิดขึ้นจากกระบวนการในการดำรงชีวิต และเติบโตของสิ่งมีชีวิตซึ่งรวมถึงพืชสัตว์ และจุลินทรีย์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. กลุ่มคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นยาวกว่าความยาวคลื่นช่วงที่ตามองเห็นได้เป็นคลื่นแสงที่ความยาวคลื่นมากกว่า 800 nm ขึ้นไป ได้แก่ คลื่นรังสีความร้อน คลื่นรังสีอินฟาเรด ที่ประสาทสัมผัสของเราสามารถรับรู้ได้ในรูปของความร้อนแสงแดดจึงเป็นแหล่งพลังงานความร้อนจากธรรมชาติที่สิ่งมีชีวิตบนพื้นโลกได้ใช้ประโยชน์

3. กลุ่มคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่าความยาวคลื่นช่วงที่ตามองเห็นได้ เป็นคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่า 400 nm ลงไปได้แก่ รังสีหรือคลื่นแสงอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet)

2.1.4 ชนิดของโฟโตแคตาไลซิส

โฟโตแคตาไลซิสสามารถแยกได้ 2 ประเภทเมื่อพิจารณาจากสถานะของตัวแคตาลิสต์ดังนี้

1) โฟโตแคตาไลซิสแบบสถานะเดียว (Homogeneous photocatalysis) เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวแคตาลิสต์ซึ่งมีสถานะเดียวกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด (โดยทั่วไปแล้วจะเป็นของเหลว) เช่น การย่อยสลาย 2,4-Dinitrolueneโดยใช้ UV/H_2O_2

2) โฟโตแคตาไลซิสแบบสถานะต่าง (Heterogeneous photocatalysis) เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวแคตาลิสต์ซึ่งมีสถานะต่างกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัดเช่น ย่อยสลาย 2-Chlorophenol โดยใช้ UV/TiO_2 สารกึ่งตัวนำมีมากมายหลายชนิด หนึ่งในจำนวนสารกึ่งตัวนำหลายๆ ชนิดที่นิยมใช้กันในปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสคือ TiO_2 เนื่องจากมีราคาไม่แพง ไม่เป็นพิษความสามารถในการละลายต่ำ ความเสถียรสูง นอกจากนั้นได้มีการศึกษาเปรียบเทียบสารกึ่งตัวนำหลายๆ ชนิดที่นำมาใช้ในปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส พบว่าการใช้ TiO_2 แบบแขวนลอยสามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว แต่เนื่องจาก TiO_2 มีพลังงานแบนด์แก็พประมาณ 3.2 eV ซึ่งมากกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ โดยส่วนใหญ่ทำให้ต้องใช้พลังงานแสงในช่วงของแสง UV (400 nm) ในแสงอาทิตย์ที่ส่องมาถึงพื้นโลกมีแสง UV น้อยกว่า 1% ทำให้ไม่สามารถใช้แสงธรรมชาติได้ จำเป็นต้องใช้แสงจากหลอดรังสี UV เป็นแหล่งกำเนิดแสง (พลังงาน)

2.1.5 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา

สารที่ใช้เป็นตัวแคตาลิสต์ในปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส ได้แก่

1) โลหะตัวนำ (Transition metal) เช่น ทองแดง โครเมียม นิเกิล เป็นต้น

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

องค์ประกอบของโลหะตัวนำ และสารกึ่งตัวนำ ประกอบด้วยวาเลนซ์แบนด์ (Valence band) และคอนดักชันแบนด์ (Conduction band) ในโลหะตัวนำจะมีวาเลนซ์แบนด์และคอนดักชันแบนด์ติดกัน แต่ในสารกึ่งตัวนำวาเลนซ์แบนด์ และคอนดักชันแบนด์จะไม่ติดกันโดยเกิดเป็นช่องว่างซึ่งเรียกว่า พลังงานแบนด์แก็พ (Band gap energy) เมื่ออิเล็กตรอน (Electron, e^-) ที่อยู่ในวาเลนซ์แบนด์ได้รับพลังงานโฟตอนจากแสง ($h\nu$) อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังคอนดักชันแบนด์ ในขณะเดียวกันที่บริเวณวาเลนซ์แบนด์จะเกิดโฮล (Hole, h^+) ซึ่งเป็นประจุบวกสามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระในวาเลนซ์ แบนด์ ส่วนคอนดักชันแบนด์อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่มาจากวาเลนซ์แบนด์เคลื่อนที่อย่างเป็นอิสระทั่วคอนดักชันแบนด์เช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนโฮล (Electron-hole pairs, e^-/ h^+) สามารถเคลื่อนที่ไปมาระหว่างวาเลนซ์แบนด์และคอนดักชันแบนด์ได้ง่ายและรวดเร็ว เพราะว่าไม่มีพลังงานแบนด์แก็พ เหตุนี้จึงเป็นสาเหตุให้ e^-/ h^+ รวมตัวกันใหม่ได้ง่าย สำหรับโลหะตัวนำ ในทางตรงกันข้ามนั้น การรวมตัวกันใหม่ของ e^-/ h^+ ในสารกึ่งตัวนำเกิดได้ยาก เพราะว่ามีพลังงานแบนด์แก็พคั่นอยู่ ทำให้คู่ e^-/ h^+ แยกจากกันได้นาน ข้อแตกต่างของพลังงานแบนด์แก็พของโลหะตัวนำ สารกึ่งตัวนำ และฉนวนแยกได้ยาก ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายปัจจัย ได้แก่ ระดับพลังงานแบนด์แก็พ ระดับพลังงานคอนดักชันแบนด์ และระดับพลังงานวาเลนซ์แบนด์ ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสในน้ำประกอบด้วยแสงที่ส่องผ่านน้ำไปยังตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งมีพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ที่สูงกว่าพลังงานแบนด์แก็พของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งอิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นจากวาเลนซ์แบนด์ ให้เคลื่อนที่ไปยังคอนดักชัน-แบนด์ ทำให้เกิด e^-/ h^+ ซึ่งเคลื่อนที่อยู่ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ

ปฏิกิริยาที่เกิดบนผิวคอนดักชันแบนด์ และปฏิกิริยาที่เกิดในสารละลายเกิดขึ้นดังนี้ e^- จะเคลื่อนจากคอนดักชันแบนด์ไปยังตัวรับอิเล็กตรอน (Electron acceptor) ในสารละลายจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ส่วนอีกด้านหนึ่งคือ วาเลนส์แบนด์ซึ่งมี h^+ จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) โดยตัวสารละลายทำหน้าที่เป็นตัวให้ e^- (Electron donor) ในสภาวะปกติความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของอิเล็กตรอนที่คอนดักชันแบนด์ไม่มีศักยภาพพอที่จะบำบัดสารอินทรีย์ได้ แต่เนื่องจากในระบบบำบัด มีออกซิเจนละลายน้ำอยู่ (O_2) ออกซิเจนนี้ จะเป็นตัวรับ e^- เกิดปฏิกิริยารีดักชันได้เป็น Superoxide radical ($\cdot O^{2-}$) ซึ่งเป็นตัวออกซิแดนท์ที่แรงมาก สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ ได้ แต่ในทางตรงกันข้าม h^+ ที่วาเลนซ์แบนด์เป็นตัวออกซิแดนท์ที่แรงมากเช่นกัน

2.2 พลาสติกที่ย่อยสลายได้ [2, 7]

พลาสติกที่ย่อยสลายได้ (Degradable plastic) หมายถึง พลาสติกที่ถูกออกแบบมาเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะแวดล้อม ก่อให้เกิดการสูญเสียสมบัติบางประการที่สามารถตรวจวัดได้ โดยใช้วิธีการทดสอบมาตรฐานที่เหมาะสมสำหรับพลาสติก และการใช้งานในช่วงเวลาหนึ่ง ผลการทดสอบสามารถนำมาใช้ในการระบุชนิดและประเภทของวัสดุย่อยสลายได้โดยทั่วไปสามารถแบ่งกลไกการย่อยสลายของพลาสติกได้เป็น 5 ประเภท คือ

1) การย่อยสลายทางกล (Mechanical degradation)

การย่อยสลายทางกล คือการให้แรงกระทำแก่ชิ้นพลาสติก ทำให้ชิ้นพลาสติกแตกออกเป็นชิ้นเล็กๆ ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้โดยทั่วไปในกระบวนการรีไซเคิล

2) การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative degradation)

การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติก เป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจนความร้อน แสง UV หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (Stabilizing additive) แสงและความร้อนจะทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ RO· และ OH· ที่ไม่เสถียรและเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกหัก และสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว แต่ด้วยเทคโนโลยีการผลิตที่ได้รับการวิจัยและพัฒนาขึ้นในปัจจุบันทำให้พอลิโอเลฟินเกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนได้เร็วขึ้นภายในช่วงเวลาที่กำหนด โดยการเติมสารเติมแต่งที่เป็นเกลือของโลหะทรานสิชัน ซึ่งทำหน้าที่เป็นแคตาลิสต์เร่งการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxpide, ROOH) เป็นอนุมูลอิสระ (Free Radical) ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกหัก และสูญเสียสมบัติเชิงกลรวดเร็วยิ่งขึ้น

3) การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytic degradation)

การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิแอน-ไฮดรายด์ พอลิคาร์บอเนต และพอลิยูริเทน ผ่านปฏิกิริยา ก่อให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้แคตาลิสต์ (Catalytic hydrolysis) และไม่ใช้แคตาลิสต์ (Non-catalytic hydrolysis) ซึ่งประเภทแรกสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ แบบที่ใช้แคตาลิสต์จากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (External catalytic degradation) และแบบที่ใช้แคตาลิสต์จากจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์เองในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (Internal catalytic degradation) โดยแคตาลิสต์จากภายนอกมี 2 ชนิด คือ แคตาลิสต์ที่เป็นเอนไซม์ต่างๆ (Enzyme) เช่น Depolymerase lipase esterase และ Glycohydrolase ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ และแคตาลิสต์ที่ไม่ใช่เอนไซม์ (Non-enzyme) เช่น โลหะแอลคาไลด์ (Alkaline metal) เบส (Base) และกรด (Acid) ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติ ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบที่ใช้แคตาลิสต์จากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นใช้หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group) ของหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

4) การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation)

การย่อยสลายของพอลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์โดยทั่วไปมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน เนื่องจากขนาดของสายพอลิเมอร์ยังมีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำ ในขั้นตอนแรกของของการย่อยสลายจึงเกิดขึ้นภายนอกเซลล์โดยการปลดปล่อยเอ็นไซม์ของจุลินทรีย์ ซึ่งเกิดได้ทั้งแบบใช้ Endo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ และแบบ Exo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะทีละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอจะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์ และเกิดการย่อยสลายต่อในขั้นตอนที่ 2 ได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย (Ultimate biodegradation) คือ พลังงาน และสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ (Mineralization) เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน น้ำ เกลือ แร่ธาตุต่างๆ และมวลชีวภาพ (Biomass)

5) การย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การย่อยสลายโดยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความว่องไวต่อแสงลงในพลาสติกหรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง แตกหักง่ายภายใต้รังสี (UV) เช่น หมู่คีโตน (Ketone group) อยู่ในโครงสร้าง เมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับรังสี UV จะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งไม่เสถียร จึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ แต่การย่อยสลายนี้จะไม่เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบขยะ กองคอมโพสต์ หรือสภาวะแวดล้อมอื่นที่มืด หรือแม้กระทั่งชิ้นพลาสติกที่มีการเคลือบด้วยหมึกที่หนามากบนพื้นผิว เนื่องจากพลาสติกจะไม่ได้สัมผัสกับรังสี UV โดยตรง

2.3 พลาสติกย่อยสลายได้ทางแสง (Photodegradable plastic) [8]

พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ด้วยแสงเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ประเภทเทอร์โมพลาสติกการย่อยสลายนี้ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ฤดูกาล ลักษณะทางภูมิศาสตร์ ความสกปรก เมื่อพลาสติกได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งเป็นพลังงานรูปหนึ่งโมเลกุลของพลาสติกดูดกลืนพลังงานแสงทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Photo-oxidation) ส่งผลให้สมบัติเชิงกล และกายภาพของพลาสติกเสื่อมลงและยังเป็นการช่วยให้จุลินทรีย์ย่อยสลายพลาสติกได้ง่ายขึ้นด้วย ทำให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ลดลง และมีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิลเกิดขึ้น

ปัจจุบันวิธีที่ช่วยให้พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ด้วยแสงมี 2 วิธี

1) การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของพอลิเมอร์ให้มีหมู่ดูดกลืนแสง เช่น การเติมหมู่คาร์บอนิลเข้าไปในโครงสร้างซึ่งเป็นวิธีที่มีต้นทุนสูงตัว อย่างเช่น Ecolyte เป็นพอลิเมอร์ร่วมที่มีหมู่คาร์บอนิลอยู่จึงดูดกลืนแสงช่วง UV ทำให้เกิดออกซิเดชันง่ายขึ้น หลังจากออกซิเดชันแล้วพลาสติกย่อยสลายได้ง่ายขึ้น E/CO Copolymer (เอทิลีน-คาร์บอนมอนอกไซด์โคพอลิเมอร์) ผลิตจากหลายบริษัทรวมทั้ง E.I. Dupont ซึ่งผลิตจำหน่ายในปีค.ศ. 1970 ปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์ในพอลิเมอร์ร่วมเป็นตัวกำหนดสมบัติของพลาสติก และความว่องไวต่อแสงการมีหมู่ C=O เล็กน้อยทำให้ความหนาแน่นของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นหาก C=O เพิ่มขึ้น 16% พอลิเมอร์จะจมน้ำ เสถียรภาพทางความร้อนขึ้นกับปริมาณ C=O เช่นกันหากมีอยู่ 5% ค่อนข้างเสถียรเมื่ออุณหภูมิค่อยๆเพิ่มขึ้นแต่ถ้ามี 13% ความเสถียรของ E/CO Copolymer ลดลงขณะทำการขึ้นรูปหมู่คาร์บอนิลดูดกลืนแสงแล้วทำให้เกิดปฏิกิริยา Norrish type I สลายตัวให้คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ซึ่งมีอนุภาคอิสระสองอนุมูลหรือเกิด Norrish type II เกิดการจัดโมเลกุลใหม่ส่งผลให้โซ่หลักขาดเกิดเมทิลคีโตนและปลายสายโซ่ที่มีพันธะคู่

2) การเติมสารเคมีไวแสง (Photo-initiator หรือ UV absorber) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำซึ่งสามารถเร่งการย่อยสลายโดยแสงตัวอย่า งสารเหล่านี้ได้แก่ สารประกอบโลหะทรานสิชันสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เอมีน ฟีนอล และเม็ดสีเป็นต้น เมื่อเติมลงในพลาสติกทำให้พลาสติกมีอายุการใช้งานระยะเวลาหนึ่งก่อนเกิดการย่อยสลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 กระบวนการเคมีทางแสงของพอลิเมอร์ [9]

กระบวนการเคมีทางแสงเกิดขึ้นเมื่อสารอินทรีย์ได้รับพลังงานกระตุ้นทางแสงอัลตราไวโอเลต ทำให้สารอินทรีย์มีระดับพลังงานสูงขึ้นซึ่งพลังงานกระตุ้นที่ได้รับมีไม่เพียงพอที่ทำให้เกิดการคายพลังงานเพื่อกลับมาสู่สถานะพื้นได้ จึงทำให้สารเคมีมีพลังงานส่วนเกินที่ส่งผลให้เกิดการแตกของพันธะโคเวเลนต์มีผลทำให้สารเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีอย่างถาวร จึงทำให้เกิดการย่อยสลายโดยทั่วไป พันธะโคเวเลนต์ในโมเลกุลของพอลิเมอร์เป็นพันธะที่แข็งแรงที่สามารถต้านพลังงานกระตุ้นที่เกิดจากพลังงานแสง UV ได้ แต่เมื่อพันธะโคเวเลนต์ได้รับพลังงานกระตุ้นทำให้ความแข็งแรงของพันธะโคเวเลนต์มีค่าน้อยลงซึ่งมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีกับอะตอมข้างเคียงที่ต่อกับพันธะโคเวเลนต์ได้ตัวอย่างเช่น พันธะ C-H ที่ถูกกระตุ้นในสายโซ่พอลิเมอร์จะมีพลังงานน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการกระตุ้นจากตำแหน่งอัลฟาของกลุ่มไม่อิ่มตัวในสายโซ่พอลิเมอร์เช่น C=C และ C=O เป็นต้น ด้วยเหตุนี้พลังงานคลื่นแสง UV ที่ถูกดูดกลืนโดยระบบพอลิเมอร์อาจเพียงพอที่ทำให้พันธะโคเวเลนต์ในโมเลกุลของพอลิเมอร์แตกพันธะเกิดการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยจะส่งผลต่อกระบวนการเคมีทางแสงที่จะนำไปสู่การย่อยสลายในที่สุด ซึ่งกระบวนการเคมีทางแสงมีผลทำให้โมเลกุลเกิดการเปลี่ยนแปลงได้หลายแบบ ได้แก่ การแตกพันธะ (Cleavage) การกำจัดโมเลกุลเล็กๆ (Elimination of Small Molecule) การเกิดพันธะไม่อิ่มตัวของโมเลกุล (Unsaturation) การจัดเรียงตัวและการเกิดเป็นวง (Rearrangrment and Cyclization) การเชื่อมโยงของโครงร่างตาข่าย (Cross-linking) การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) และโฟโตไฮโดรไลซิส (Photohydrolysis) เป็นต้นการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเริ่มจากพันธะโคเวเลนต์ได้รับพลังงานกระตุ้นจากคลื่นแสง UV ทำให้เกิดการแตกพันธะแบบโฮโมไลติก (Homolytic cleavage)

$$R : R \leftrightarrow R\cdot + R\cdot$$

$$R_2 \leftrightarrow 2R$$

การแตกพันธะแบบโฮโมไลติก (Homolytic) ทำให้อนุมูลอิสระทั้งสองการเคลื่อนที่แยกออกจากกันและกันอย่างถาวรไม่เกิดการรวมตัวกันใหม่ ด้วยเหตุนี้อุณหภูมิ และการแพร่จึงเป็นปัจจัยที่สำคัญเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาดำเนินต่อไป ซึ่งปฏิกิริยาสองชนิดที่มีความสำคัญ ได้แก่ นอร์ริชแบบที่ 1 (Norrish type I) และนอร์ริชแบบที่ 2 (Norrish type II)

2.5 ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) [10-12]

TiO_2 เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไททาเนียม ซึ่งอยู่ในกลุ่มโลหะทรานสิชัน TiO_2 ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในการนำมาประยุกต์สำหรับการใช้งานด้านต่างๆ เนื่องจากมีความเสถียรต่อสารเคมี ไม่มีความเป็นพิษ ราคาไม่แพงมาก และสมบัติพิเศษที่เป็นประโยชน์ที่ดีอีกหลายอย่าง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง TiO_2 ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในด้านการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานรูปแบบอื่น เช่น เปลี่ยนเป็นพลังงานเคมีในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสง (Photocatalysis) เป็นต้น เนื่องจาก TiO_2 เป็นสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงกึ่งตัวนำ ซึ่งมีพลังงานแบนด์แก็พ 3.2 eV โดยพลังงานแบนด์แก็พนี้จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขยายกว้างมากขึ้นเมื่อมีอนุภาคแสง (Photons) ตกกระทบ ซึ่งจะส่งผลให้อิเล็กตรอนย้ายตำแหน่งจากวาเลนซ์แบนด์ไปยังคอนดักชันแบนด์ ลักษณะทางด้านสารกึ่งตัวนำของ TiO_2 สำหรับปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม เนื่องจากไททาเนียมมีตำแหน่งที่ว่างของออกซิเจนในโครงสร้างผลึก TiO_2 จึงจัดได้ว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type semiconductor) ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วมที่เป็นสารกึ่งตัวนำนั้นจะมีความสามารถในการดูดซับสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยา 2 ชนิดไปพร้อมๆ กัน ซึ่งสามารถก่อให้เกิดทั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน โดยการกระตุ้นด้วยการดูดกลืนโฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าค่าพลังงานแบนด์แก็พ ความสามารถของสารกึ่งตัวนำที่จะถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปยังสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาที่ถูกดูดซับไว้นั้นขึ้นอยู่กับตำแหน่งพลังงานแบนด์แก็พของสารกึ่งตัวนำ และตำแหน่งของพลังงานในการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox) ของสารที่ถูกดูดซับ โดยปกติแล้วระดับของพลังงานที่ต่ำที่สุดของคอนดักชันแบนด์ จะเป็นระดับของพลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันด้วยอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น (Excited electron) ในทางกลับกันระดับของพลังงานที่สูงที่สุดของวาเลนซ์แบนด์ จะเป็นระดับพลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยหลุมประจุบวก (Hole) ที่เหลืออยู่หลังจากที่อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นไปแล้ว

TiO_2 มีโครงสร้าง 3 แบบ คือ รูไทล์ อะนาเทส และบรุ๊คไคต์ โดยปกติโครงสร้างผลึกอะนาเทสสามารถเปลี่ยนเป็นรูไทล์ได้ที่อุณหภูมิสูง โครงสร้างผลึกทั้งอะนาเทสและรูไทล์ เป็นที่นิยมนำมาศึกษาสำหรับปฏิกิริยาแบบใช้แสง ซึ่งโครงสร้างผลึกอะนาเทสให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่ารูไทล์ เนื่องจากผลึกอะนาเทสเกิดการรวมตัวกันใหม่ของคู่ e^- และ h^+ ในอัตราที่ต่ำกว่า เพราะมีพลังงานแบนด์แก็พที่มากกว่ารูไทล์ ยิ่งไปกว่านั้นผลึกอะนาเทสสามารถเตรียมได้ที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้พื้นที่ผิวมี OH^- มากกว่าซึ่งสามารถผลิต OH^- ได้มาก ซึ่ง OH^- เป็นตัวออกซิแดนท์หลักที่จะทำให้การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเกิดได้ดี โดยโครงสร้างผลึกอะนาเทสสามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 384 nm ในขณะที่โครงสร้างผลึกรูไทล์สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 410 nm ส่งผลกระทบโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงอีก ทั้งโครงสร้างผลึกอะนาเทสยังมีความสามารถในการดูดซับที่พื้นผิวสูงกว่าโครงสร้างผลึกรูไทล์

อย่างไรก็ตามในบางปฏิกิริยา โครงสร้างผลึกอะนาเทสและรูไทล์ให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกอะนาเทสอย่างเดียว เพราะในระหว่างกระบวนการกระตุ้นด้วยแสงอิเล็กตรอนจะถูกส่งผ่านจากวัฏภาครูไทล์ไปยังวัฏภาคอะนาเทส จะเป็นการลดการรวมตัวกันใหม่ของคู่ e^- และ h^+ จากการสร้างประจุโดยพลังงานจากแสง เนื่องจากแถบวาเลนซ์แบนด์ของ วัฏภาคอะนาเทสอยู่ในตำแหน่งที่มีพลังงานสูงกว่าแถบวาเลนซ์แบนด์ของวัฏภาครูไทล์ประมาณ 0.20 eV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบสมบัติของ TiO_2 ในโครงสร้างผลึกวัฏภาคอะนาเทส, วัฏภาครูไทล์ และวัฏภาคบรุ๊คไคต์ [13]

สมบัติ	อะนาเทส	รูไทล์	บรุ๊คไคต์
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	ออร์โธรอมบิก

2.5.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนวัฏภาคของ TiO_2

จากที่กล่าวไว้ข้างต้นว่าวัฏภาคอะนาเทสเป็นวัฏภาคที่ให้ประสิทธิภาพสูงในการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาร่วมกับแสง UV ดังนั้นในการใช้งาน TiO_2 ในการสลายสารมลพิษให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด จึงมีกระบวนการในการเปลี่ยนวัฏภาคของ TiO_2 ให้ได้วัฏภาคอะนาเทสมากที่สุด ซึ่งสภาวะในการทำให้เกิด TiO_2 วัฏภาคอะนาเทสสูงสุดเกี่ยวข้องกับหลายปัจจัย ดังนี้

1. อุณหภูมิการเผา TiO_2

อุณหภูมิการเผา TiO_2 ที่อุณหภูมิ 400°C หรือต่ำกว่า ทำให้เกิดวัฏภาคอะนาเทสสูงสุดมากกว่าร้อยละ 99 แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่านี้ วัฏภาคอะนาเทสจะเริ่มเปลี่ยนไปเป็นวัฏภาครูไทล์โดยอุณหภูมิที่เปลี่ยนวัฏภาคอะนาเทสเป็นวัฏภาครูไทล์อาจแตกต่างกันไปตามสภาวะการศึกษา

2. เวลาในการเผา

เวลาในการเผา ยิ่งใช้เวลาในการเผานาน โอกาสที่ TiO_2 วัฏภาคอะนาเทสจะเปลี่ยนรูปไปเป็นวัฏภาครูไทล์ยิ่งมีมาก และอาจทำให้ขนาดอนุภาคของ TiO_2 มีขนาดใหญ่ขึ้นด้วย [12] แต่หากเผา TiO_2 ที่อุณหภูมิสูงอย่างรวดเร็ว วัฏภาคอะนาเทสจะยังไม่เปลี่ยนเป็นวัฏภาครูไทล์ แม้จะเผาที่อุณหภูมิสูงถึง 900°C [20]

2.6 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide; ZnO) [9, 14-16]

ซิงค์ออกไซด์เป็นสารประกอบอนินทรีย์มีสูตรโมเลกุลคือ ZnO ซึ่งมีลักษณะเป็นผงสีขาว มีจุดหลอมเหลวเท่ากับ 1975°C และมีจุดเดือดเท่ากับ 2360°C ZnO มีโครงสร้าง 2 แบบคือ โครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ (Zinc-blend structure) อะตอมมีการจัดเรียงตัวกันในรูปแบบสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ (Cubic) และโครงสร้างแบบวัตต์ไซต์ (Wurtzite structure) อะตอมมีการจัดเรียงตัวแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) ซึ่ง ZnO ที่มีโครงสร้างแบบวัตต์ไซต์มีจำนวนมากกว่า ZnO ที่มีโครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ เนื่องจากโครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์พบได้ที่อุณหภูมิสูงเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ZnO เป็นสารกึ่งตัวนำแถบพลังงานกว้าง คือจะมีค่าพลังงานแบนด์แก็พมากกว่า 3.3 eV ขึ้นไป ซึ่งอุปกรณ์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำช่องว่างแถบพลังงานกว้าง (Wide band gap semi-conductor) นี้จะมีประสิทธิภาพสูงมากในงานที่เกี่ยวกับอุณหภูมิสูงๆ (High temperature) และกำลังสูงๆ (High power) เนื่องจากมีช่องว่างแถบพลังงานที่กว้าง จึงสามารถประยุกต์ใช้ในอุณหภูมิที่สูงๆ ดีกว่าสารกึ่งตัวนำที่ไม่ใช่แถบพลังงานกว้าง ZnO เป็นวัสดุในกลุ่มโลหะออกไซด์ ซึ่งมีสมบัติดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติของ ZnO [17]

สูตรทางเคมี	ZnO
มวลโมเลกุล	81.408 กรัมต่อโมล
ขนาดอนุภาค	0.0240-0.0710 ไมโครเมตร
กลิ่น	ไม่มีกลิ่น
ความหนาแน่น	5.606 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดหลอมเหลว	1975°C
จุดเดือด	2360°C
ความสามารถในการละลายน้ำ	0.16 มิลลิกรัมต่อ 100 มิลลิเมตร
pH	6.95
พลังงานแบนด์แก็พ	3.37 eV

2.7 วิธีการฝังตัว (Impregnation method) [18]

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาทั่วไปมีอยู่ 2 แบบ คือ วิธีการตกตะกอน (Precipitation method) และวิธีการฝังตัว (Impregnation method) ซึ่งเป็นวิธีเตรียมที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนในการเตรียมตัวเร่ง และเป็นวิธีที่ถูกเลือกใช้ในงานวิจัยนี้

1. หลักการของวิธีฝังตัว

วิธีการฝังตัวทำโดยการเติมตัวรองรับในสารละลายของเกลือโลหะ เช่น เกลือไนเตรด เกลือโลหะจะแพร่กระจายสู้ตัวรองรับ จากนั้นทำให้เกลือโลหะร้อนเพื่อให้เกลือโลหะติดที่อยู่บนตัวรองรับ สลายตัวให้โลหะออกไซด์เกาะบนตัวรองรับ

2. ประเภทของการฝังตัว

วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวรองรับที่มีรูพรุนจะสัมผัสกับสารละลายของสารประกอบโลหะ 1 ชนิดหรือมากกว่าที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย

หลังจากนั้นตัวรองรับ (Carrier) ถูกทำให้แห้ง และตัวเร่งปฏิกิริยาถูกทำให้ว่องไว เช่นเดียวกับวิธีการตกตะกอน ขนาด และรูปร่างของตัวเร่งปฏิกิริยาจะเป็นไปตามตัวรองรับ เทคนิคแบบฝังตัวต้องการอุปกรณ์น้อยกว่าเทคนิคตกตะกอน เนื่องจากไม่มีขั้นตอนการกรอง การล้าง และการจัดรูปร่าง การเตรียมโดยวิธีการฝังตัวนี้นิยมใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะมีค่า (Noble metal) กระจายตัวอยู่บนตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รองรับ เพื่อความประหยัดจะต้องกระจายโลหะที่มีลักษณะละเอียดเท่าที่จะเป็นไปได้ การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบฝังตัวสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี

- การฝังตัวแบบเปียก (Wet impregnation)

วิธีนี้ทำได้โดยการเติมตัวรองรับลงในสารละลายของเกลือโลหะที่มีปริมาณมากเกินพอ ดังนั้นปริมาณของเกลือโลหะที่เกาะบนตัวรองรับจะรู้ก็ต่อเมื่อ รู้ปริมาณของเกลือโลหะก่อน และหลังเตรียม ผลต่างของปริมาณเกลือโลหะก่อน และหลังเตรียมจะเป็นปริมาณของเกลือโลหะที่เกาะบนตัวรองรับ

- การฝังตัวชนิดแห้ง (Dry impregnation)

วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้ในทางอุตสาหกรรม เริ่มต้นโดยตัวรองรับจะถูกทำให้กระจายตัว และพ่นด้วยสารละลายที่มีความเข้มข้นที่เหมาะสม โดยปริมาตรของสารละลายที่ใช้ต้องมีปริมาตรเท่ากับปริมาตรของรูพรุนทั้งหมดของตัวรองรับหรือน้อยกว่าเล็กน้อย ซึ่งเป็นการควบคุมปริมาณขององค์ประกอบที่ว่องไวที่เกาะบนตัวรองรับได้อย่างถูกต้อง แต่ปริมาณสูงสุดของการเกาะแต่ละครั้งถูกจำกัดด้วยความสามารถในการละลายของสาร หลังจากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จะถูกทำให้แห้งและถูกนำไปเผาที่อุณหภูมิสูง

ปริมาณและการแจกแจงของเกลือโลหะบนพื้นผิวภายในของตัวรองรับมีผลต่อสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นซึ่งปริมาณ และการแลกเปลี่ยนขึ้นอยู่กับลักษณะการดูดซับของเกลือเข้าไปในรูพรุนของตัวรองรับ หลังจากที่ตัวถูกละลายเข้าไปในรูพรุนการแจกแจงของเกลือโลหะในขั้นแรกจะยังไม่สม่ำเสมอเมื่อทำให้แห้งจะพบโลหะอยู่บริเวณส่วนปลายทางเข้าของรูพรุน แต่เมื่อตัวถูกละลายเข้าไปในรูพรุนของตัวรองรับแล้วปล่อยทิ้งไว้ในภาชนะปิดที่ความชื้นสัมพัทธ์อิ่มตัว หลังจากหนึ่งชั่วโมงผ่านไปการแจกแจงของเกลือโลหะจะเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอนอกจากนี้การแจกแจงของเกลือโลหะยังมีขีดจำกัด เนื่องจากปริมาณของโลหะที่ถูกดูดซับบนตัวรองรับโดยที่การดูดซับเริ่มแรกปริมาณการดูดซับยังขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลาย แต่เมื่อการดูดซับถึงจุดอิ่มตัวแล้วความเข้มข้นของสารละลายจะไม่มีผลต่อการดูดซับอีกต่อไป

หลังจากที่ตัวถูกละลายถูกดูดซับบนผนังของรูพรุนของตัวรองรับ เมื่อการดูดซับอิ่มตัวแล้วขั้นตอนต่อไปเป็นการกำจัดตัวทำละลาย ซึ่งต้องมีการอบให้แห้งในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญเพราะอาจทำให้การคาดคะเนความว่องไวของปฏิกิริยาผิดไปได้ เนื่องจากรูพรุนของตัวรองรับมีขนาดต่างกันเมื่อทำการระเหยสารละลายที่อยู่ในรูพรุนที่ขนาดใหญ่กว่าจะระเหยไป เนื่องจากความดัน แคปิลารีจะดันสารละลายไปอยู่ในรูพรุนที่มีขนาดเล็กกว่า ด้วยเหตุนี้ในการอบแห้งปริมาณความร้อนที่ให้ต้องเป็นไปอย่างช้าๆ โดยให้อุณหภูมิค่อยๆ เพิ่มขึ้นประมาณ 3-5 องศาเซลเซียสต่อนาที การระเหยจะเป็นไปอย่างช้าๆ

2.8 พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) [19-20]

พอลิเอทีลีน (Polyethylene) เป็นพลาสติกที่มีปริมาณการใช้สูงสุดในบรรดาพลาสติกทั้งหมด พอลิเอทีลีนเป็นเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากมอนอเมอร์เอทิลีน โดยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบรวมตัว

พอลิเอทีลีนมีน้ำหนักเบามาก รับแรงดึง และแรงอัดได้น้อย มีความยืดตัวได้สูงถึง 500% ฉีกขาดยาก มีลักษณะคล้ายขี้ผึ้ง ไม่เกาะติดน้ำ เป็นฉนวนทางไฟฟ้าได้ดีมาก ทนความร้อนได้น้อย แต่ทนความเย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ถึงอุณหภูมิ -100°C โดยไม่ทำให้คุณสมบัติทางกายภาพเปลี่ยนแปลง ทนกรดและด่างอ่อน แต่จะเกิดปฏิกิริยาอย่างช้ากับ Oxidizing acids ไม่ทนน้ำมัน และไขมัน โดยเฉพาะน้ำมันก๊าด น้ำมันเบนซิน ในขณะที่มีอุณหภูมิสูง แม้ว่าจะไม่ดูดซึมแต่ยอมให้ก๊าซผ่านได้ จึงเหมาะสำหรับใช้บรรจุอาหารสดได้ดี โดยทั่วไปพอลิเอทิลีนมีลักษณะบางใสเมื่อเป็นแผ่นบาง และมีลักษณะสีขาวขุ่นเมื่อความหนาเพิ่มขึ้น สามารถทำเป็นสีต่างๆได้ตามต้องการ ไม่เหมาะสำหรับใช้ภายนอก ในรูปแผ่นบางสามารถพับงอได้ หากมีความหนามากขึ้นทำให้มีความคงรูป เมื่อได้รับความร้อนมีความอ่อนตัว เมื่ออุณหภูมิลดลงมีความแข็งตัว เมื่อทำเป็นผลิตภัณฑ์แล้วสามารถนำกลับมาหลอมใช้งานใหม่ได้ โดยสมบัติของพลาสติกมีการเปลี่ยนแปลง

พอลิเอทิลีนที่ได้จากการผลิตต่างวิธีกันจะมีสมบัติแตกต่างกัน เช่น การผลิตโดยใช้ความดันสูงได้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาน่นต่ำ (LDPE) มีอุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature, T_m) เท่ากับ 108°C การผลิตโดยใช้ความดันต่ำได้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ซึ่งมีอุณหภูมิหลอมเหลวเท่ากับ 130°C ส่วนพอลิเอทิลีน ส่วนพอลิเอทิลีนที่ได้จากกระบวนการฟิลิปป์ และกระบวนการ Standard oil มีอุณหภูมิหลอมเหลวเท่ากับ 133°C โดยสามารถแบ่งประเภทของพอลิเอทิลีนได้ 3 ประเภท คือ

1. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE)
2. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง (Medium density polyethylene, MDPE)
3. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE)

สำหรับงานวิจัยนี้สนใจพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE)

2.8.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ [32]

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene; LDPE) ผลิตได้จากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันของเอทิลีนแบบอนุมูลอิสระ โดยใช้ความดันสูง อุณหภูมิ 150-200°C บางครั้งเรียกว่า พอลิเอทิลีนความดันสูง พอลิเมอร์ที่ได้มีโซ่กิ่งจำนวนมาก ทำให้พอลิเมอร์ชนิดนี้มีความเป็นผลึกน้อย ความหนาแน่นต่ำ T_m ต่ำประมาณ 80-110°C และมีช่วงกว้าง มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 6,000-40,000 กรัม/โมล สมบัติบางประการของ LDPE แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติบางประการของ LDPE

สมบัติ	ค่า
เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (%Crystallinity)	40-55
อุณหภูมิหลอมผลึก (Melt temperature, °C)	80-110
ความแข็งแรงดึง (Tensile strength, MPa)	8-10
อิลาสติกมอดุลัส (Elastic modulus, MPa)	200-400
ความแข็งแรงกระแทก (Impact strength, Notched Izod, Jm^{-2})	No break
อุณหภูมิอ่อนตัว (Heat-deflection temperature, °C)	80-90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

2.9 กรดสเตียริก (Stearic Acid) [21]

กรดสเตียริก เป็นกรดไขมันชนิดหนึ่ง ประกอบด้วยส่วนที่เป็นสายโซ่ยาวของไฮโดรคาร์บอนและหมู่ฟังก์ชันของกรด กรดสเตียริกสังเคราะห์ได้มาจากกลีเซอร์ไรด์ ซึ่งพบในไขมันสัตว์และพืชหลายชนิด นิยมใช้เป็นสารช่วยการกระจายตัว และเป็นสารเร่งหรือกระตุ้นปฏิกิริยาในยางคอมปาวด์ โดยกรดสเตียริกมีส่วนช่วยในการกระจายตัวของสารเติมเต็มหรือเม็ดสีต่างๆ อีกทั้งยังช่วยพัฒนากระบวนการผลิต เนื่องจากกรดสเตียริกทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลของยาง และช่วยให้การอัดขึ้นรูปเป็นไปได้ง่ายขึ้นด้วย

สมบัติทั่วไป

1. กรดสเตียริกมีสูตรเคมีคือ $C_{17}H_{35}COOH$ เป็นผลึกสีขาว ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ในแอลกอฮอล์และอีเธอร์
2. น้ำหนักโมเลกุล 284.48
3. จุดเดือด 361°C
4. จุดหลอมเหลว 70°C
5. ความถ่วงจำเพาะ 0.847
6. ความสามารถในการละลายน้ำ 0.1 - 1 กรัม/100 มิลลิลิตร ที่ 23°C

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จิราภรณ์ ดำจันทร์ [22] ศึกษาการพัฒนาสารเคลือบผิว $TiO_2/SnO_2/X$ ระดับนาโน โดยการศึกษาอุณหภูมิการเผาพบว่า อุณหภูมิ การเผาที่สูงขึ้นส่งผลให้ผลึก TiO_2 มีขนาดใหญ่ขึ้น และที่อุณหภูมิการเผา 400°C และ 500°C แสดงประสิทธิภาพโฟโตแคตาไลติก ดีกว่าอุณหภูมิ 300°C ส่วนอิทธิพลของสารเจือ SiO_2 หรือ SnO_2 ได้ผลคือ ขนาดผลึกของ TiO_2 มีขนาดเล็กลง และการเจือมีส่วน ในการยับยั้งการเกิดผลึกของ TiO_2

Zhiyong และคณะ [23] ศึกษาการสังเคราะห์ และการทำงานของ $ZnSO_4$-TiO_2 เคลือบบน Rasching Ring (RR) โดยการเจือ (Doping) ซิงค์ซัลเฟต ลงในไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่ความเข้มข้น 1%, 2%, 4%และ 6%โมล แล้วทำการเคลือบบน Rasching Ring (RR) เผาภายใต้บรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 3, 5 และ 7 ชั่วโมง จากนั้นนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค การวิเคราะห์ธาตุ (EA), เทคนิคการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer; EDS), ศึกษาสัณฐาน วิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM), เทคนิคเอ็กซ์เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี (XPS) และเทคนิค การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) พบว่าเมื่อเจือซิงค์ซัลเฟตในไททาเนียมไดออกไซด์ มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อม Azo-dye Orange II และสารละลาย 2-propanol ได้สูงกว่า TiO_2 (P25) ที่ไม่ได้เจือ นอกจากนี้ยังพบว่าความเข้มข้น และอุณหภูมิใน การเผาที่มีประสิทธิภาพสูงสุด คือ 4% โดยโมล และ 500°C ตามลำดับ ซึ่งพบว่าที่ 500°C ทำให้โครงสร้างของไททาเนียมเป็นแบบ อะนาเทส ส่งผลให้เกิดการย่อยสลายตัวได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

149120

Cheng และคณะ [24] ศึกษาผลของการเจือ TiO_2 ด้วย Zinc ferrite ($ZnFe_2O_4$) เตรียมจากวิธี Sol-gel เพื่อเพิ่ม ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก และใช้อุณหภูมิในการเผา 400°C, 500°C และ 600°C ทดสอบการสลายตัวด้วย Methyl Orange (MO) พบว่าการเผาที่ 400°C ทำให้ผง $TiO_2(ZnFe_2O_4)$ จะแสดงปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกได้ดีกว่าการเผาที่อุณหภูมิอื่นๆ เพราะ $TiO_2(ZnFe_2O_4)$ มีขนาดผลึกใหญ่ขึ้น พื้นที่ผิวลดลงเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น โดยที่พื้นที่ผิวที่ลดลงส่งผลต่อการดูดซับ MO บน $TiO_2(ZnFe_2O_4)$ ที่เป็นแคตาลิสต์น้อยลง

กิจสิมา คมขำ และชะไมพร อ้วนโคตร [25] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการย่อยสลายโดยแสงของ LDPE ที่ผสมนาโน ZnO โดยศึกษา สมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงกลของการย่อยสลายภายใต้รังสียูวีพบว่า การเติม ZnO ไม่ทำให้เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ LDPE ผลการทดสอบสมบัติความแข็งแรงดึงของฟิล์ม และเปอร์เซ็นต์การดึงยืดณจุดขาดลดลงเมื่อเติม ZnO และหลังจากนำไปผ่าน การฉายแสง พบว่า เมื่อเพิ่ม ZnO และจำนวนวันในการฉายแสง ฟิล์มมีสมบัติเชิงกลลดลง เป็นผลมาจากการย่อยสลายของฟิล์ม

Xu และคณะ [26] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเจือโลหะที่อยู่ในรูป Zn^{2+} ลงบนพื้นผิวของTiO_2 พบว่า TiO_2 ที่เจือด้วย Zn^{2+} (อยู่ในรูป ZnO) เกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกได้ดีกว่า TiO_2 บริสุทธิ์ ทดสอบโดยดูการสลายตัวของ Methyl Orange ในน้ำภายใต้รังสี UV เป็นเวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง พบว่า TiO_2 ที่เจือ ZnO มี Methyl Orange ที่เหลืออยู่ในอัตราที่น้อยกว่าไททาเนียมบริสุทธิ์ จากนั้น นำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค FT-IR, XRD, AAS และ X-Ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) พบว่าเกิด ZnO บนพื้นผิวของอนุภาคนาโน TiO_2 และพันธะไฮโดรเจนรอบบริเวณนั้น ซึ่ง ZnO บนพื้นผิวจะยับยั้งการกลับมารวม กันใหม่ของอิเล็กตรอน-โฮลเป็นเหมือนส่วนที่มีการแยกประจุ

กมลวรรณ ลิ้มเฮาะสูน และคณะ [27] ศึกษาการย่อยสลายด้วยแสงของฟิล์ม LLDPE ที่ผสม ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง และศึกษาผลของสารช่วยกระจายตัว คือ กรดเสตียริก โดยมีกระบวนการผสม 2 วิธี คือ การผสมแบบแห้ง และการผสมแบบโซนิเค- ชัน ทำโดยเปรียบเทียบผลของปริมาณ ZnO 0.5 phr และ 2 phr พบว่าเมื่อผสม ZnO ในปริมาณที่มากขึ้นทำให้ การกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง จึงมีการปรับปรุงโดยเติมกรดสเตียริกเพื่อช่วยให้การกระจายตัวของ ZnO ดีขึ้น และพบว่าที่ ปริมาณ ZnO 2 phr ที่มีการผสมกรดเสตียริกด้วยวิธีโซนิเคชัน ทำให้เกิดการกระจายตัวของ ZnO ที่ดีขึ้นในฟิล์ม LLDPE และเกิด การย่อยสลายที่ดีกว่าฟิล์ม LLDPE ที่ไม่ได้ผสมกรดเสตียริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การทดลอง

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE) เกรดเป่าฟิล์ม LD1905FA จาก บริษัท ไทยพอลิเอทิลีน จำกัด
2. ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2), เกรด Degussa P25 บริษัท Skybright-Chemicals จำกัด
3. ซิงค์ไนเทรต $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, เกรด 1271 บริษัท Ajax Finecheme จำกัด
4. สารละลายมาตรฐานสังกะสีเข้มข้น 1000 ppm เกรดวิเคราะห์
5. กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) เกรดวิเคราะห์
6. ไนโตรเจนเหลว (Liquid N2)
7. สารละลายเมทิลออเรนจ์ (Methyl Orange)
8. กรดเสตียริก (Stearic Acid) เกรดการค้า
9. โทลูอีน (Toluene) เกรดการค้า

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. บริภัณฑ์เครื่องแก้ว และพลาสติก
2. เครื่องผสมสารแบบปิด (Internal mixer)
3. เครื่องกดอัด (Compression molding machine)
4. เครื่องชั่งสารแบบดิจิตอลทศนิยม 4 ตำแหน่ง รุ่น ED2248; บริษัท Scientfic Promotion จำกัด
5. เครื่องบดพลาสติก (Plastic grinder): Bosco Engineering รุ่น Bosco A600
6. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM) รุ่น LR 5K; บริษัท LLOYD Instrument จำกัด
7. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer, FT-IR) รุ่น FTIR Spectrum Gx; บริษัท Perkin Elmer จำกัด
8. เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโทรมิเตอร์ (X-ray diffractrometer, XRD) รุ่น D8-Discover; บริษัท Bruker จำกัด
9. เครื่องกวนสาร (Magnetic Stirrer)
10. ตู้อบสาร (Oven)
11. ตู้อบแสง UVA
12. หลอดแสง UVA กำลัง 40 Watt 4 หลอด
13. เตาเผา (Furnace) รุ่น F6010; บริษัท Kerperboukvard จำกัด
14. ไมโครมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15. ครูซิเบิล

16. เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโทมิเตอร์ (Atomic absorption spectrophotometer, AAS) รุ่น Solar M5 dual AA Spectrophotometer; บริษัท Thermo elemental จำกัด

17. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) รุ่น 1455 VP; บริษัท LEO จำกัด

18. เครื่องวัดสี (Colorimeter spectrophotometer) รุ่น Miniscan XE plus; บริษัท Hunter lab จำกัด

19. เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโทมิเตอร์ (UV-visible spectrophotometer) รุ่น T60; บริษัท บางกอกไฮแลป จำกัด

3.3 การเตรียมTiO_2 และ Zn-doped TiO_2

3.3.1 การเตรียม TiO_2

ชั่ง TiO_2 จำนวน 20 กรัม นำมาหยดน้ำกลั่น (ขณะหยดให้คนไปด้วย) จนกระทั่งผง TiO_2 เริ่มชื้น แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นแบ่งเป็น 4 ส่วนเท่าๆ กันแล้วนำไปใส่ในครูซิเบิล เพื่อเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 300, 350, 400 และ 450°C โดยใช้ Heating rate 10°C/นาที และคงสภาวะอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.3.2 การเจือ TiO_2 ด้วย $Zn(NO_3)_2{\cdot}6H_2O$ ด้วยวิธีการฝังตัว

การเจือ TiO_2 ด้วย $Zn(NO_3)_2{\cdot}6H_2O$ ด้วยวิธีการฝังตัวในงานวิจัยนี้ทำการทดลองที่ความเข้มข้นของ $Zn(NO_3)_2$ 2% โดยโมลของ TiO_2 โดยทำการชั่ง $Zn(NO_3)_2{\cdot}6H_2O$ 0.9582 กรัม ละลายในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร จากนั้นหยดลงบน TiO_2 10 กรัม (ขณะหยดให้คนไปด้วย) จนกระทั่งผง TiO_2 เริ่มชื้นแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นหยดสารละลาย$Zn(NO_3)_2{\cdot}6H_2O$ ต่อ และเอาไปอบทำซ้ำๆ จนสารละลายหมดสุดท้ายจึงแบ่งเป็น 4 ส่วนเท่าๆ กันแล้วนำไปใส่ในครูซิเบิลเพื่อเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 300, 350, 400 และ 450°C โดยใช้ Heating rate 10°C/นาที และคงสภาวะอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.3.3 การปรับปรุงพื้นผิวของ TiO_2 โดยการใช้สารช่วยกระจายตัว

การปรับปรุงพื้นผิวของ TiO_2 ด้วยกรดสเตียริก โดยการทำโซนิเคชันเริ่มจากนำ TiO_2 1 กรัม ใส่ในบีกเกอร์แรก และใช้โทลูอีนเป็นตัวช่วยให้ TiO_2 กระจายตัวประมาณ 25 มิลลิลิตร นำไปวางในเครื่อง Ultrasonic ทำการโซนิเคชันเป็นเวลา 15 นาทีในตู้ดูดควัน ใส่กรดสเตียริกในบีกเกอร์ที่สองโดยให้มีปริมาณ 2.5 กรัม ค่อยๆ ละลายด้วยโทลูอีนจนหมด จากนั้นนำไปเทผสมลงในบีกเกอร์แรก แล้วทำการโซนิเคชันต่อเป็นเวลา 15 นาที และตั้งทิ้งไว้ให้ตัวทำละลายระเหยในตู้ควัน ก่อนนำไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของ TiO_2 และ Zn-doped TiO_2

3.4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของ TiO_2 และ Zn-doped TiO_2

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของ Zn-doped TiO_2 ด้วยเครื่อง XRD วิเคราะห์โดยการชั่งตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 และ Zn-doped TiO_2 ประมาณ 0.5 กรัม ใส่ลงใน Sample holder ทำการปาดผิวหน้าให้เรียบและกดอัดให้แน่นจากนั้นนำไปติดตั้งที่ Analysis Station โดยใช้ Cu, K_α เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์ ทำการวิเคราะห์ช่วงค่า 2θ จาก 10 - 60 degree

3.4.2 การศึกษาการดูดกลืนแสงยูวีของ TiO_2 และ Zn-doped TiO_2 โดยเทคนิค Diffuse-reflective UV-Visible spectroscopy (DR-UV)

ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 และ Zn-doped TiO_2 ที่เตรียมได้ที่สภาวะต่างๆ นำไปวิเคราะห์หาช่วงการดูดกลืนแสงยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ โดยเทคนิค DR-UV ทำการวิเคราะห์โดยนำ TiO_2 และ Zn-doped TiO_2 ใส่ลงใน Sample ไปติดตั้งที่ Analysis station วิเคราะห์ในช่วงความยาวคลื่นที่ 300-500 nm

3.4.3 การวิเคราะห์หาปริมาณของ ZnO ที่เจือใน TiO_2

การวิเคราะห์หาปริมาณของ ZnO ที่เจือใน TiO_2 โดยใช้เครื่อง AAS นำตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ที่เจือ $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ ที่เตรียมในสภาวะต่างๆ มาหาปริมาณสารเจือด้วยเครื่อง AAS โดยใช้หลอดฮาโลเจนคอลัมน์ (HC lamp) โดยใช้สภาวะทดสอบที่

กระแสไฟของหลอด HC lamp	4 mA
ความยาวสลิต	0.5 nm
โหมด	Emission
เปลวไฟ	Air-acetylene

ทำการวิเคราะห์โดยนำสารละลายมาตรฐานสังกะสีเข้มข้น 1000 ppm เจือจางด้วยน้ำกลั่นปรับความเข้มข้นเป็น 0.25, 0.50, 1.00, 1.25 และ 1.50 ppm วัดค่าการดูดกลืนแสง และสร้างกราฟมาตรฐาน (Calibration curve) ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) กับความเข้มข้นสารละลายที่เตรียมได้ จากนั้นเตรียมสารละลายตัวอย่างโดยใช้กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ปริมาณน้อยที่สุดเป็นตัวทำละลายจนสารตัวอย่างละลายจนหมด แล้วปรับความเข้มข้นด้วยน้ำกลั่นให้อยู่ในช่วง 0.50-1.50 ppm นำสารละลายตัวอย่างที่เตรียมได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสง นำค่าที่ได้เทียบกับกราฟมาตรฐานเพื่อหาความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่าง

3.4.4 การทดสอบการสลายตัวทางแสงของเมทิลออเรนจ์ [4]

การทดสอบการสลายตัวทางแสงของเมทิลออเรนจ์ (Methyl Orange, MO) ทำได้โดยทำการเติมสารตัวอย่างปริมาณ 0.2 กรัม ลงไปในสารละลายเมทิลออเรนจ์ที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วนำเข้าตู้ทดสอบที่มีหลอด UVA ทำการวัดความเข้มข้นของเมทิลออเรนจ์ที่เวลา 0, 30, 60 และ 90 นาที นำเมทิลออเรนจ์ที่ผ่านการฉายแสง UVA ไปทำการวัดความเข้มข้นด้วยเครื่อง UV-Visible ที่ความยาวคลื่น 464 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การขึ้นรูปฟิล์ม [39]

3.5.1 การคอมปาวด์ด้วยเครื่องผสมแบบปิดขนาด 50 กรัม

นำเม็ดพลาสติกมาผสมกับ TiO_2 และ Zn-doped TiO_2 ให้ได้อัตราส่วนต่างๆ ดังตารางที่ 3.1 ในเครื่อง Internal Mixer ขนาด 50 กรัมโดยมีสภาวะดังนี้

อุณหภูมิ	170°C
ความเร็วรอบ	100 rpm
เวลา	30 min

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนของเม็ดพลาสติกกับ TiO_2

สูตร	LDPE	TiO_2 (phr)	Zn-doped TiO_2 (phr)	Stearic acid (phr)
LD	100	-	-	-
LDT(300)	100	1	-	-
LDT(350)	100	1	-	-
LDT(400)	100	1	-	-
LDT(450)	100	1	-	-
LDTZN(350)	100	-	1	-
LDT(300)SA	100	1	-	0.1

นำพลาสติกที่ได้จากเครื่องผสมแบบปิดไปเข้าเครื่องบด

3.5.2 การขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่างด้วยกระบวนการกดอัด

ทำการขึ้นรูปชิ้นงานเป็นฟิล์มบางด้วยกระบวนการกดอัดโดยใช้สภาวะเครื่องกดอัด ดังนี้

ขนาดแม่พิมพ์แผ่นเรียบ	20×20×1 cm^3
ความดันในการกดอัด	1800 psi
อุณหภูมิในการกดอัด	190°C
เวลาในการอุ่นแม่พิมพ์	5 นาที
เวลาในการอุ่นพอลิเมอร์ผสม	7 นาที
เวลาในการกดอัดความร้อน	10 นาที
อุณหภูมิในการกดอัดเย็น	12°C
เวลาในการกดอัดเย็น	12 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การตรวจสอบตัวเร่งปฏิกิริยาในฟิล์ม LDPE

1. นำครูซิเบิลมาทำการเผาในตู้เผา ทำการเผาที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องแล้วนำไปใส่ไว้ในเดซิกเคเตอร์

2. นำครูซิเบิลมาชั่งน้ำหนัก และใส่พอลิเมอร์คอมปาวด์ปริมาณ 2 ใน 3 ของความสูงและชั่งน้ำหนัก กำหนดเป็นน้ำหนักก่อนการเผา

3. นำมาเผาด้วยตะเกียงบุนเสนจนไม่เห็นเปลวไฟของพอลิเมอร์คอมปาวด์

4. นำครูซิเบิลไปทำการเผาอีกครั้ง ที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องแล้วนำไปใส่ไว้ในเดซิกเคเตอร์

5. ชั่งน้ำหนักครูซิเบิลอีกครั้งกำหนดเป็นน้ำหนักหลังการเผา แล้วนำมาคำนวนตามสมการดังนี้ น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา = น้ำหนักครูซิเบิลที่มีตัวอย่างก่อนการเผา – น้ำหนักหลังการเผาน้ำหนักครูซิเบิล

3.7 การทดลองโดยการฉายแสงภายใต้รังสี UVA

ตัดแผ่นฟิล์มตัวอย่างให้มีขนาด 1×8 cm^2 ใส่ลงในกล่อง UVA (ที่สร้างขึ้น) โดยกล่องมีขนาดกว้าง×ยาว×สูงเป็น 34×72×30 cm^3 ภายในมีหลอดรังสี UVA 40 Watt ยาว 60 cm วางเรียงกัน 4 หลอดดังแสดงในภาพที่ 3.1 โดยทำการฉายแสงเป็นเวลา 200 ชั่วโมงซึ่งแผ่นฟิล์ม 1 แผ่นจะได้รับแสงจากหลอด UVA จำนวน 4 หลอดโดยมีระยะห่างระหว่างแผ่นฟิล์มกับหลอด UV 6 cm

ภาพที่ 3.1 ลักษณะการวางชิ้นงานและระยะห่างของชิ้นงานกับหลอด UV

3.8 การวิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม

3.8.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน Zn-doped TiO_2

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน Zn-doped TiO_2 โดยเทคนิค FT-IR นำฟิล์มที่เตรียมได้มาวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสารโดยหมู่ฟังก์ชันของ ZnO จะขึ้นพีคที่ 450 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของ Zn-O Stretching **[28]** และ TiO_2 จะขึ้นพีคที่ 1097, 1031 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของ O-Ti-O Stretching และที่เลขคลื่น 469 และ 538 cm^{-1} ซึ่งเกิดเนื่องจากการสั่นของพันธะ O-Ti-O Bending **[28]**

3.8.2 การวัดค่าดัชนีคาร์บอนิล (Carbonyl index)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำฟิล์มที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าดัชนีคาร์บอนิลทั้งก่อนฉายแสง และเมื่อฉายแสง UVAไปแล้ว 100 ชั่วโมง โดยทำการวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง FT-IR เป็นเทคนิคการสะท้อนของลำแสง IR ช่วงเลขคลื่น 500-400 cm^{-1} จากสเปกทรัมการดูดกลืน (Absorbance) โดยเลือกพีคที่ 1715 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคการยืดของหมู่คาร์บอนิล และพีคที่ 729 cm^{-1} เป็นพีคล็อกกิงของค่า C-H และสามารถหาค่าดัชนีคาร์บอนิล (C.I.) ดังนี้

$$C.I. = \frac{\text{absorbance at } 1715\ cm^{-1}}{\text{absorbance at } 729\ cm^{-1}}$$

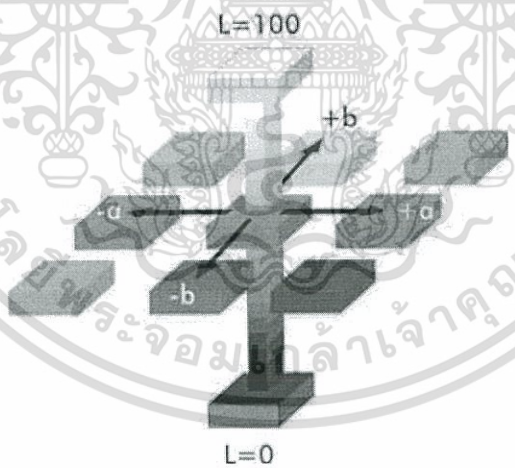
3.8.3 การเปลี่ยนแปลงสี [29]

นำฟิล์มที่เตรียมได้ทั้งก่อนและหลังฉายแสง UVA มาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์มด้วยเครื่องวัดสี (Colorimeter spectrophotometer) โดยสภาวะ D65/10°, L*, a* และ b* วิเคราะห์โดยทำการวัดสีดำมาตรฐาน และสีขาวมาตรฐานจากแผ่นกระเบื้องเพื่อสร้างค่ามาตรฐาน (Standardization) จากนั้นทำการวัดสีแผ่นฟิล์ม ณ บริเวณเดียวกันทั้งก่อนและหลังฉายแสง UVA จากนั้นคำนวนหาค่าความแตกต่างของสีโดยรวม (Total Color Difference, ΔE) จากสูตร $\Delta E = (\Delta L_2 + \Delta a_2 + \Delta b_2)^{1/2}$ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของสีหรือเทียบจากค่าของ L*, a* และ b* ซึ่งดูได้จากภาพที่ 3.2 โดย

L = 0 จะมองเห็นเป็นสีดำ L = 100 จะมองเห็นเป็นสีขาว

a* มีค่า + สีจะไปในทิศทางของสีแดง a* มีค่า - สีจะไปในทิศทางของสีเขียว

b* มีค่า + สีจะไปในทิศทางของสีเหลือง b* มีค่า - สีจะไปในทิศทางของสีน้ำเงิน



ภาพที่ 3.2 Colorimetric spectrophotometer **[29]**

ที่มา: ภัคนัย ทองทิอัมพร, 2550

3.8.4 การทดสอบการรับแรงดึงยืด [41]

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดชิ้นงาน	10×80 mm^2
ความหนาชิ้นงาน	100 micron
ความเร็วในการดึง	100 mm/min
ความยาวเกจ (Gauge length)	25 mm
ค่าแรงสูงสุดที่เครื่องรับได้	100 N
จำนวนชิ้นงานที่ทดสอบ	5 ชิ้น

3.8.5 สัณฐานวิทยา (Morphology) [28]

ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคเพื่อดูการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการนำแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้ในแต่ละสูตรมาตัดให้ได้ขนาด 1×3 cm^2 แช่ในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 20 นาทีจนแข็งจากนั้นทำการหักชิ้นงานภายใต้ไนโตรเจนเหลว นำชิ้นงานไปทำการเคลือบทอง (Gold sputter) เพื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM ด้วยใช้กำลังขยาย 5,000 เท่าโดยดูภาคตัดขวางของชิ้นงานเพื่อดูการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา และ 10,000 เท่า โดยดูพื้นผิวของฟิล์มเพื่อดูการย่อยสลายของฟิล์ม

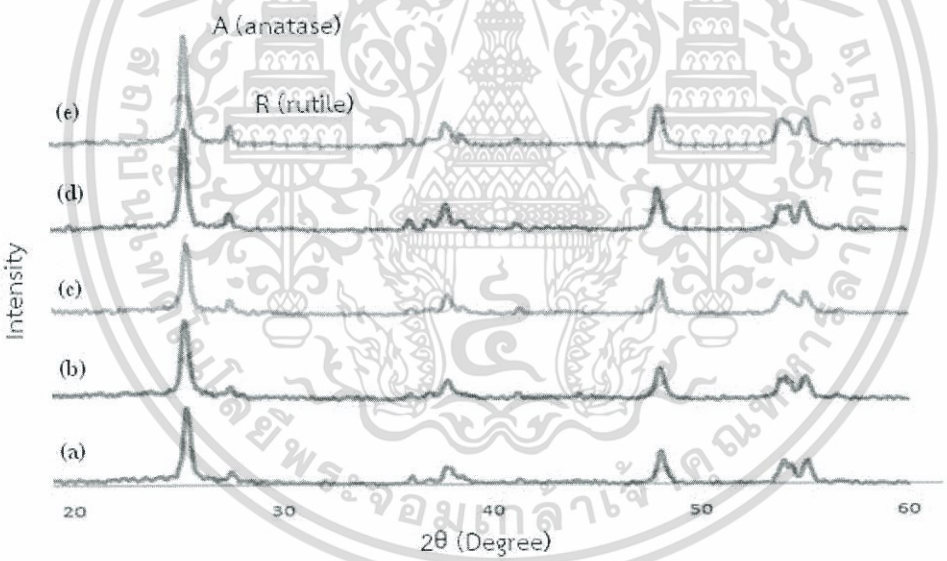
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลอง

4.1 การศึกษาลักษณะของ TiO_2 และ Zn-doped TiO_2

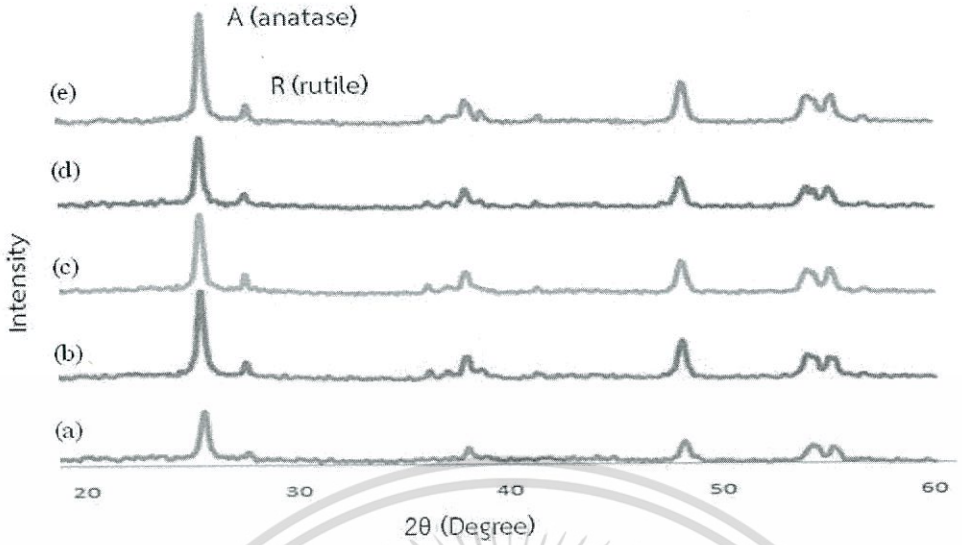
4.1.1 การศึกษาผลของอุณหภูมิในการเผา TiO_2 และ Zn-doped TiO_2

เมื่อนำ TiO_2 ที่ไม่เผา (T(NC), TiO_2 และ Zn-doped TiO_2 ที่เตรียมจาก $Zn(NO_3)_2{\cdot}6H_2O$ ปริมาณ 2% mol มาเผาที่อุณหภูมิ 300, 350, 400 และ 450°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD โดยใช้ Cu, K เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์ ตำแหน่งมุม 2θ จาก 20 - 60 ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4.1 และ 4.2 จะเห็นได้ว่า TiO_2 และ Zn-doped TiO_2 มีรูปแบบโครงสร้างเพียง 2 แบบคือ วัฏภาครูไทล์ (Rutile) และวัฏภาคอะนาเทส (Anatase) โดยปรากฏสัญญาณขึ้นตำแหน่งมุม 2θ เท่ากับ 27.8 และ 36.7 สำหรับวัฏภาครูไทล์ และที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 25 และ 37 สำหรับวัฏภาคอะนาเทส และโดยปกติสัญญาณพีคของ ZnO ปรากฏที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 36.2 แต่เนื่องจากปริมาณของ ZnO ที่เจือลงไปใน TiO_2 มีปริมาณน้อยมากหรือ ZnO เข้าไปแทรกตัวในวัฏภาคอะนาเทสของ TiO_2 **[20]** ส่งผลให้สัญญาณ ZnO ไม่ปรากฏ



ภาพที่ 4.1 XRD patterns ของ TiO_2 ไม่เผาและเผาที่อุณหภูมิต่างๆ; (a) T(300), (b) T(350), (c) T(400), (d) T(450) และ (e) T(NC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.2 XRD patterns ของ TiO_2 ไม่เผาและ Zn-doped TiO_2 เผาที่อุณหภูมิต่างๆ; (a) TZN(300), (b) TZN(350), (c) TZN(400), (d) TZN (450) และ (e) T(NC)

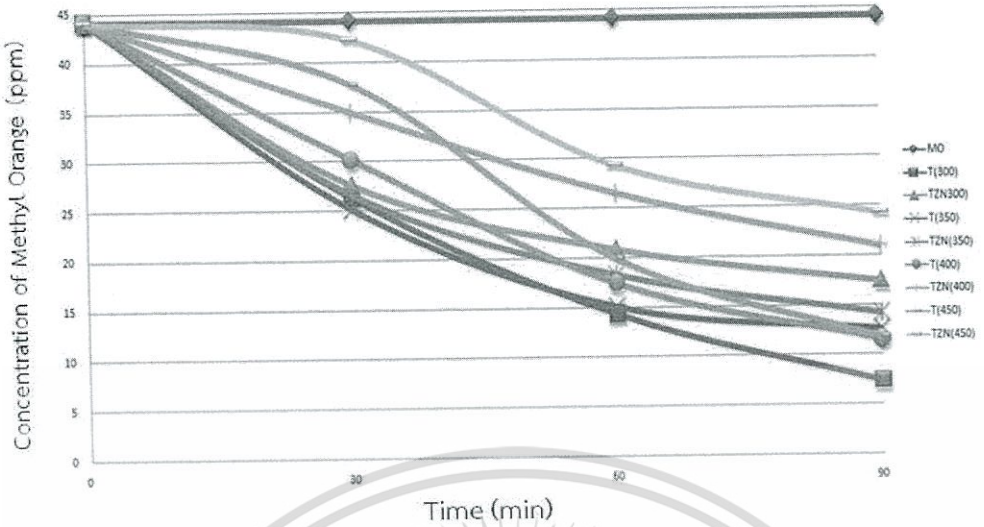
ตารางที่ 4.1 อัตราส่วนความเข้มพีคของวัฏภาคอะนาเทสต่อความเข้มพีคของวัฏภาครูไทล์ (I_A/I_R) ของTiO_2 และ Zn-doped TiO_2 เผาที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิในการเผา (°C)	TiO_2			Zn-doped TiO_2		
	I_A	I_R	I_A/I_R	I_A	I_R	I_A/I_R
-	57.72	9.51	6.06	-	-	-
300	40.59	5.37	7.55	31.29	5.26	5.94
350	40.56	5.40	7.51	43.13	6.38	6.76
400	36.46	4.93	7.40	37.53	6.46	5.80
450	48.70	6.75	7.21	36.36	7.20	5.05

จากตารางที่ 4.1 เมื่อทำการเผา TiO_2 ที่ไม่มีการเจือด้วย ZnO เมื่อเผาที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบกับ TiO_2 ที่เจือ พบว่าอัตราส่วน I_A/I_R ในสูตรที่ทำการเจือมีค่าลดลง เนื่องจาก ZnO ได้เข้าไปในผลึกอะนาเทสของ TiO_2 ซึ่ง ZnO นี้ไปบดบังการสะท้อนของสัญญาณผลึกอะนาเทสทำให้เครื่อง XRD วิเคราะห์ความเข้มพีคอะนาเทสของ TiO_2 ได้ลดลง ส่งผลให้อัตราส่วน I_A/I_R มีค่าต่ำกว่า TiO_2 ที่ไม่มีการเจือ

4.1.2 การวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงโดยการทดสอบ ด้วย สารละลาย MO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.3 ค่าความเข้มข้นของสารละลาย MO ของ TiO_2 และ Zn-doped TiO_2 เผาที่อุณหภูมิต่างๆ หลังผ่านการฉายแสง UVA เป็นเวลา 30, 60 และ 90 นาที

จากภาพที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์พบว่า สารละลาย MO ที่ผสมกับ TiO_2 ที่นำมาเผาที่อุณหภูมิต่างๆ มีอัตราการสลายตัวดีกว่าสารละลาย MO ที่ผสมกับ Zn-doped TiO_2 เนื่องจากมีอัตราส่วน I_A/I_R ที่สูงกว่า และพบว่าสารละลาย MO ที่ผสมกับ TiO_2 ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 300°C (T(300)) มีอัตราการสลายตัวดีที่สุดเนื่องจากมีอัตราส่วน I_A/I_R สูงที่สุด และเมื่อพิจารณา Zn-doped TiO_2 พบว่า TZN(350) มีการสลายตัวของสารละลาย MO สูงที่สุด เพราะมีค่า I_A/I_R สูงที่สุดในกลุ่มที่ทำการเจือ

4.1.3 การวิเคราะห์การดูดกลืนแสงของ TiO_2 และ Zn-doped TiO_2 ที่เผาที่อุณหภูมิต่างๆ

เมื่อนำ TiO_2 ที่เผาที่อุณหภูมิต่างๆ และ Zn-doped TiO_2 ที่เผาที่อุณหภูมิ 350°C (TZN(350)) ซึ่งมีอัตราส่วน I_A/I_R สูงที่สุดในกลุ่มที่เจือ นำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DR-UV เพื่อวัดค่าความยาวคลื่นในการดูดกลืนแสงยูวี (λ) ของตัวเร่งในปฏิกิริยาได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4.4 แล้วคำนวนหาค่าพลังงานแบนด์แก็พของ TiO_2 ดังแสดงในตารางที่ 4.2 จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่า λ ที่เผาแต่ละอุณหภูมิมีความแตกต่างกันซึ่ง TZN(350) มีค่า λ สูงที่สุด เมื่อทำการคำนวนค่าพลังงานแบนด์แก็พตามสมการ Kubella-Munk ทำให้ได้ค่าพลังงานแบนด์แก็พลดลง (แคบลง) ดังจะเห็นได้ในตารางที่ 4.2

วิธีคำนวนช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัม Diffuse Reflectance Spectrum (DRS) จากฟังก์ชัน Kubella-Munk

$$F(R) = \frac{(1-R)^2}{2R}$$

เมื่อ F(R) = ฟังก์ชัน Kubella-Munk ในที่นี้คือการดูดกลืน (absorbance,A)

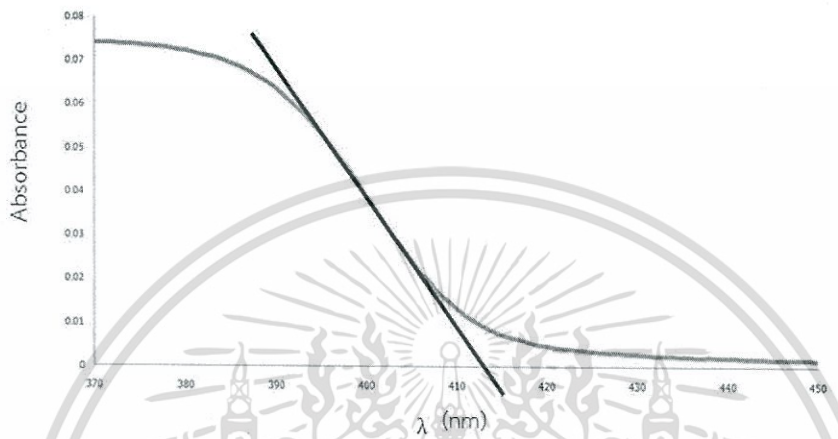
R = การสะท้อน (Reflactance)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่น เมื่อ %R = 94 จะได้ R = 0.94 ที่ λ = 450 จะได้ F(R) คือ

$$F(R) = \frac{(1-0.94)^2}{2 \times 0.94} = A$$
$$= 0.0015$$

จากนั้นพล็อตกราฟระหว่างค่า A กับความยาวคลื่นแสดงได้ดังภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.4 Diffuse reflective UV-Visible spectroscopy (DR-UV) ของTiO_2 ที่เผาในอุณหภูมิ 300°C

จากภาพที่ 4.4 ตรงตามแนวความชันของกราฟให้แกน X จะได้ค่า λ = 412 nm

นำมาคำนวณโดยใช้สมการ $E = \frac{hc}{\lambda}$

จะได้ $= \frac{(4.13566 \times 10^{-34} \times 2.99792 \times 10^{8})}{412 \times 10^{-9}}$

$= 3.00$ eV

ตารางที่ 4.2 ความยาวคลื่นที่ดูดกลืนแสงและพลังงานแบนด์แก็พของ TiO_2 ที่เผาในอุณหภูมิต่างๆและ Zn-doped TiO_2 เผาที่อุณหภูมิ 350°C

ตัวอย่าง	ความยาวคลื่นที่ดูดกลืนแสง (λ) (nm)	พลังงานแบนด์แก็พ (E_g) (eV)
T(300)	412	3.00
T(350)	413	3.00
TZN(350)	416	2.97
T(400)	414	2.99
(T450)	415	2.98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการคำนวณพบว่า Zn-doped TiO_2 เผาที่อุณหภูมิ 350°C (TZN(350)) มีค่าพลังงานแบนด์-แก็พน้อยที่สุด (แคบที่สุด) และเลื่อนแถบการดูดกลืนแสงไปยังช่วงแสงที่มองเห็นได้มากขึ้น

4.2 การตรวจสอบปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ชนิดต่างๆ ในฟิล์ม LDPE

การตรวจสอบปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในฟิล์ม LDPE เพื่อคำนวณหาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอยู่จริง ซึ่งแสดงผลดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.3 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ชนิดต่างๆ

สูตรฟิล์ม	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต้องการ (phr)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่พบจริง (phr)
LDT(300)	1.00	1.19
LDT(350)	1.00	1.21
LDT(400)	1.00	1.30
LDT(450)	1.00	1.20
LDTZN(350)	1.00	1.26
LDT(300)SA	1.00	1.21

จากผลการตรวจหาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในฟิล์มดังตารางที่ 4.4 พบว่าปริมาณตัวเร่งที่พบจริงมีค่าสูงกว่าปริมาณที่กำหนดเล็กน้อย

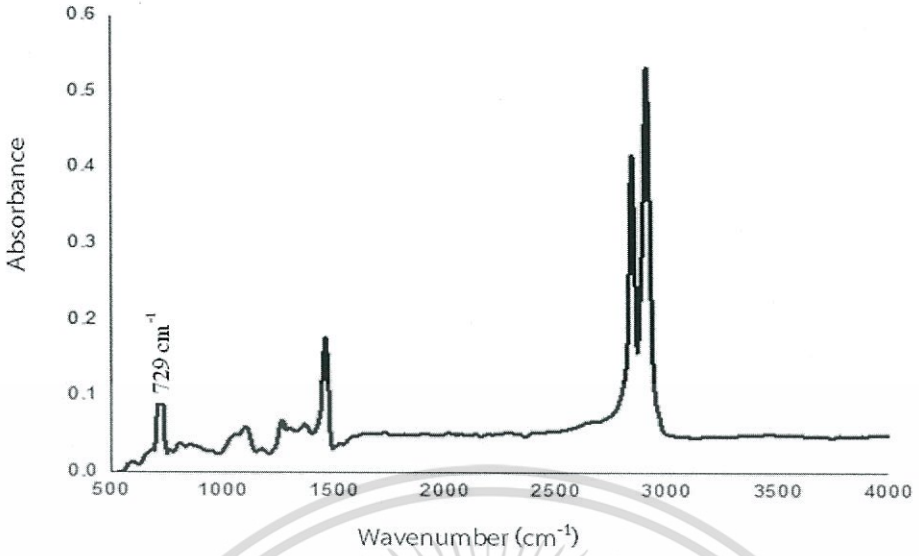
4.3 การศึกษาสมบัติของฟิล์ม LDPE ที่ผสม TiO_2 และ Zn-doped TiO_2

ทำการผสมตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ชนิดต่างๆ ปริมาณ 1 phr กับ LDPE นำไปขึ้นรูปเป็นฟิล์มแล้วศึกษา 1.ผลของการเผา TiO_2 ที่อุณหภูมิต่างๆ 2.ผลของ Zn-doped TiO_2 และ 3.การใช้กรดสเตียริกเป็นสารช่วยกระจายตัว

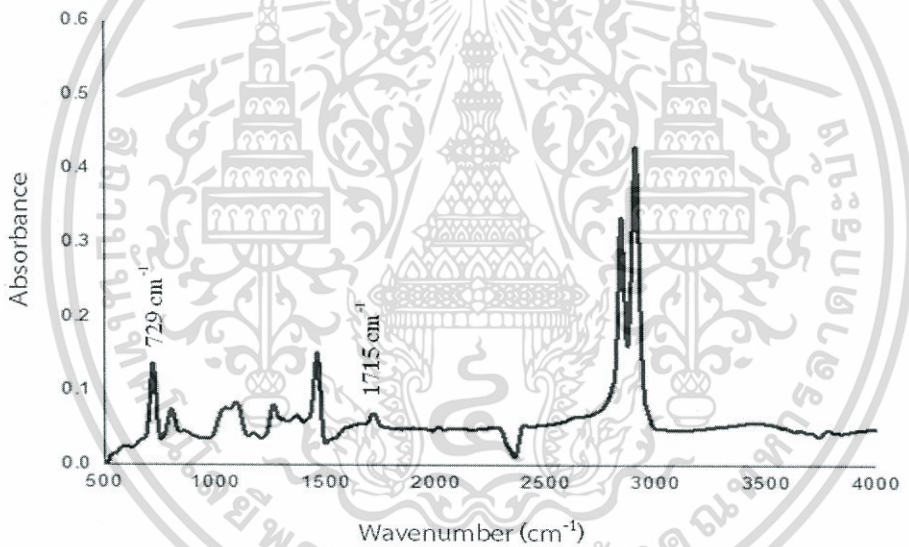
4.3.1 การวิเคราะห์ค่าดัชนีคาร์บอนิลของฟิล์มตัวอย่าง

นำฟิล์มที่เตรียมได้ไปฉายแสง UVA ด้วยตู้ฉายแสง UV เป็นเวลา 200 ชั่วโมง แล้ววิเคราะห์การย่อยสลายของฟิล์ม LDPE โดยใช้เทคนิค FT-IR พบว่าเมื่อเวลาในการฉายแสงยูวียาวนานขึ้น ทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิลขึ้นที่ตำแหน่งพีค 1710 cm^{-1} ในสายโซ่ LDPE ดังแสดงในภาพที่ 4.5 และ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.5 ATR-IR สเปกทรัมของฟิล์ม LDT(300) ก่อนฉายแสง UVA

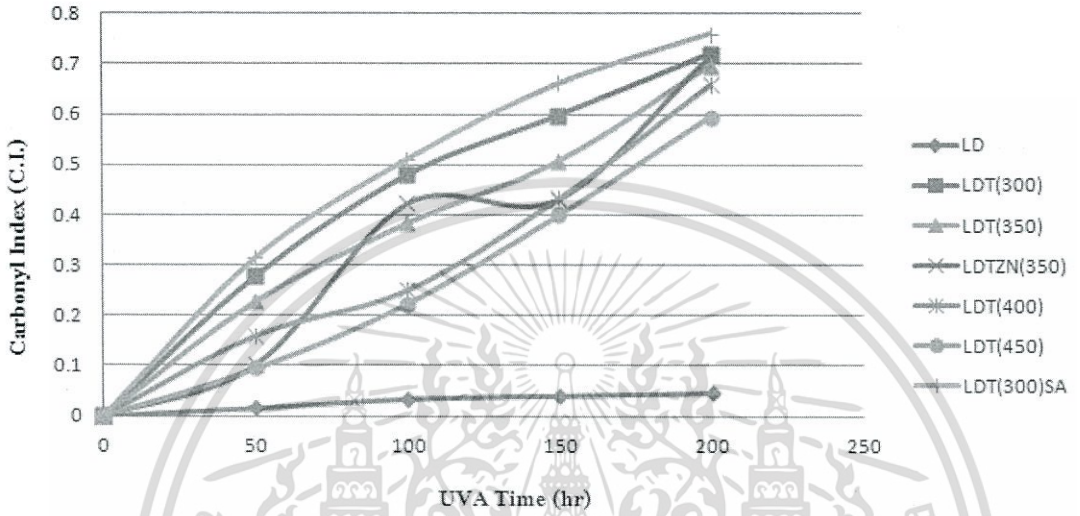


ภาพที่ 4.6 ATR-IR สเปกทรัมของฟิล์ม LDT(300) หลังฉายแสง UVA 200 ชั่วโมง

จากภาพที่ 4.6 เกิดหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิลขึ้น เนื่องจากฟิล์มถูกฉายแสง UVA ทำให้ TiO_2 ที่ผสมอยู่ในฟิล์มนั้นดูดกลืนพลังงานจากแสง UVA เกิดเป็นอิเล็กตรอนอิสระ (e^-) และโฮล (h^+) ขึ้น จากนั้น e^- อิสระที่ถูกปล่อยออกมาจะทำปฏิกิริยากับตัวรับ e^- คือ ออกซิเจน (O_2) เกิดการสร้างสปีชีส์ ได้ซุปเปอร์ออกซิเจนแอนไอออนเรดิคัล ($\cdot O^{2-}$) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วเกิดต่อไปเป็นไฮ- ดรอกซิลเรดิคัล ($\cdot OH$) ที่มีความว่องไวและสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไฮโดรคาร์บอนในสายโซ่ของฟิล์ม LDPE ทำให้เกิดการตัดขาดของสายโซ่ของฟิล์ม LDPE อีกทั้งการแตกของพันธะไฮโดรคาร์บอนแล้วการเป็นอนุมูลอิสระ $-(\cdot CH_2CH_2)-$ นี้มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจนในอากาศ โดยงานวิจัยนี้ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ติดตามหมู่คาร์บอนิลที่เกิดขึ้นซึ่งรายงานผลเป็นค่าดัชนีคาร์บอ-นิล (Carbonyl Index) ดังแสดงในภาพที่ 4.7 ในกรณีในสูตรที่มีการเติมกรดสเตียริก (LDT(300)SA) นั้น มีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิลเกิดขึ้นตั้งแต่การฉายแสง 0 hr ดังนั้นการหาดัชนีคาร์บอนิลทำได้โดยนำ นำพื้นที่ใต้กราฟของพีค 1720 cm^{-1} ที่เวลาการฉายแสงที่ทำการวิเคราะห์ไปลบกับพื้นที่ใต้กราฟของพีค 1720 cm^{-1} ที่ 0 hr ก่อน แล้วจึงนำไปคำนวณตามสมการการหาค่าดัชนีคาร์บอนิล



ภาพที่ 4.7 ดัชนีคาร์บอนิล LDPE และ LDPE ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ชนิดต่างๆ ก่อนและหลังฉายแสงเป็นเวลา 200 ชั่วโมง

จากภาพที่ 4.7 เมื่อเวลาในการฉายแสงเพิ่มขึ้น ค่าดัชนีคาร์บอนิลของ LDPE ที่ไม่มีการผสมตัวเร่งมีค่าเพิ่มขึ้นน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับ LDPE ที่มีการเติมตัวเร่ง และเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง LDPE ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ชนิดต่างๆ พบว่า LDT(300) มีค่าดัชนีคาร์บอนิลสูงที่สุด เนื่องจากมีค่าอัตราส่วน I_A/I_R สูงที่สุด และค่าพลังงานแบนด์แก็พมีค่าน้อยที่สุด เมื่อเผา TiO_2 ที่อุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้อัตราส่วน I_A/I_R มีค่าลดลง และพลังงานแบนด์แก็พสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระ (e^-) และโฮล (h^+) ขึ้นยาก จึงส่งผลให้เกิดการย่อยสลายได้ไม่ดี

เมื่อนำ T(300) ซึ่งมีการย่อยสลายสารละลาย MO ดีที่สุดมาเติมสารช่วยการกระจายตัวกรดสเตียริกก่อนขึ้นรูปฟิล์ม (LDT(300)SA) เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับ LDT(300) พบว่า LDT(300)SA มีค่าดัชนีคาร์บอนิลสูงกว่า LDT(300) เนื่องมาจากกรดสเตียริกเป็นสารที่มีโครงสร้างทั้งมีขั้วและไม่มีขั้ว เมื่อเติมลงไปจะทำให้ TiO_2 ซึ่งเป็นสารที่มีขั้ว ผสมกับ LDPE ซึ่งเป็นสารที่ไม่มีขั้ว ทำให้เกิดการกระจายตัวได้ดีของ TiO_2 จึงเกิดการสลายตัวได้ทั่วฟิล์ม

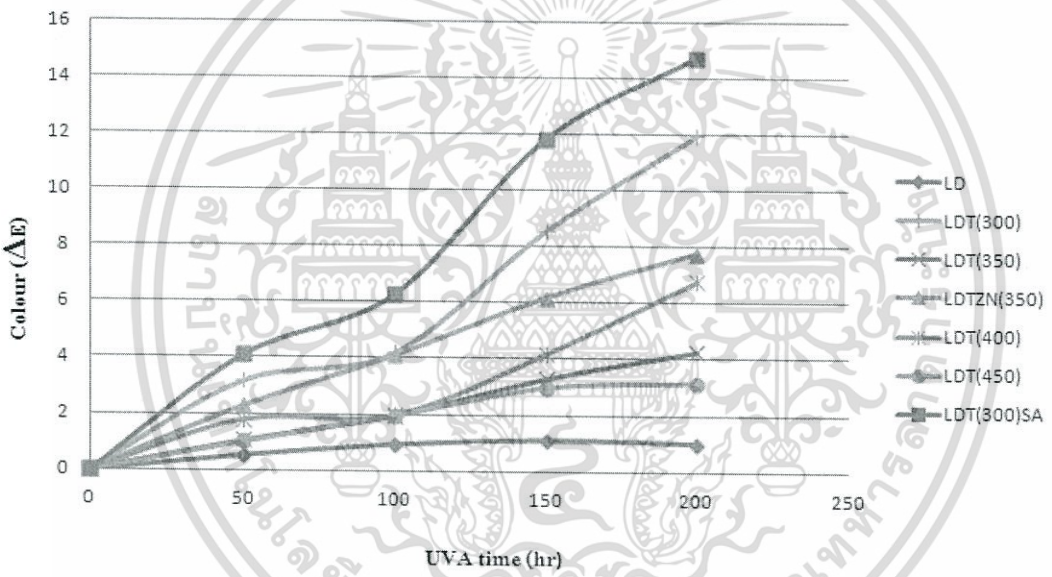
เมื่อพิจารณาฟิล์ม LDTZN(350) พบว่าฟิล์มที่เจือ ZnO ในบางช่วงมีแนวโน้มค่าดัชนีคาร์บอ-นิลน้อยกว่าสูตรที่ไม่มีการเจือ และบางช่วงจะมีค่ามากกว่าทั้งนี้เนื่องมาจากการเจือ ZnO ลงไปใน TiO_2 นั้นมี ZnO บางส่วนติดอยู่บนพื้นผิว TiO_2 โดย ZnO ที่ติดอยู่ผิว TiO_2 เกิดการบดบังการดูดกลืนแสงของผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TiO_2 และยังมีสมบัติเป็นตัวเก็บประจุที่ดี (Varistor) **[31-32]** จึงสามารถจับและกักเก็บ e^- อิสระ ที่เกิดจากกระบวนการโฟโตอิเล็กทริกของ TiO_2 เมื่อได้รับพลังงานแสง เมื่อเวลาผ่านไป e^- อิสระจะถูกกักเก็บส่งผลให้โอกาสในการที่ e^- อิสระทำปฏิกิริยากับความชื้นที่มีอยู่ในอากาศเกิดเป็น ·OH ลดลง ทำให้ชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันส่งผลให้ค่าดัชนีคาร์บอนิลเกิดขึ้นน้อย เมื่อไป e^-อิสระถูกกักเก็บจนเต็มที่ e^- อิสระ จะถูกปลดปล่อยออกมา ในช่วงเวลานี้จะเร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันส่งผลให้ค่าดัชนีคาร์บอนิลเกิดขึ้นมาก ด้วยปัจจัยดังกล่าวทำให้เห็นแนวโน้มของกราฟLDTZN(350) เป็นรูปตัว S

4.3.2 การเปลี่ยนแปลงสี

นอกจากการหาค่าดัชนีคาร์บอนิลเพื่อใช้ในการยืนยันถึงการสลายตัว ภายใต้แสง UVA ของฟิล์มที่เกิดขึ้น สามารถใช้การเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์มเพื่อช่วยบ่งบอกถึงการสลายตัวของฟิล์มได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้นำฟิล์มที่เตรียมได้จาก LDPE ผสมTiO_2 1 phr ทั้งก่อนและและหลังการฉายแสงUVA เป็นเวลา 50, 100, 150 และ 200 ชั่วโมง มาทำการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงสีแสดงดังภาพที่ 4.8



ภาพที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์ม LDPE ที่มีการเติม TiO_2 1 phr

จากภาพที่ 4.8 พบว่าเมื่อเวลาในการฉายแสง UVA นานขึ้น ค่าการเปลี่ยนแปลงสี (ΔE) ที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผสมลงไปทำหน้าที่เป็นตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาสามารถเกิดการดูดซับพลังงาน และเมื่อได้รับพลังงานจากแสง UVA มากขึ้น ทำให้เกิด อิเล็กตรอนอิสระและโฮลเพิ่มมากขึ้น นำไปสู่การเกิดหมู่คาร์บอนิลและพันธะไม่อิ่มตัวในสายโซ่ LDPE ซึ่งเป็นหมู่โครโมฟอร์ที่สามารถดูดกลืนแสงได้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสี ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลค่าดัชนีคาร์บอนิลที่กล่าวมาข้างต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

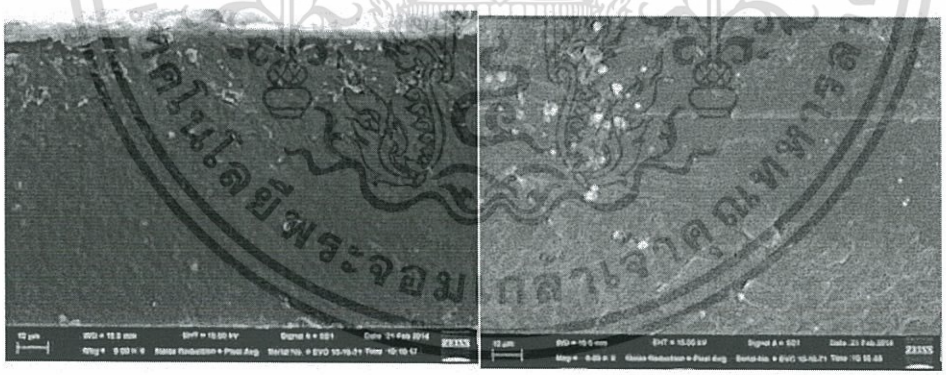
ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์ม LDT(300)SA

เวลาในการฉายแสง UVA (ชั่วโมง)	L*	a*	b*	ΔE
0	0.25	1.17	-4.55	-
200	46.71	-0.88	-4.52	17.72

เมื่อฟิล์ม LDT(300)SA ผ่านการฉาย UVA เป็นเวลา 200 ชั่วโมง พบว่าฟิล์ม LDT(300)SA มีค่าความสว่าง (L*) เพิ่มขึ้นบ่งบอกถึงฟิล์มมีการเปลี่ยนแปลงสีเป็นสีขาว ในขณะที่ค่า a* และค่า b* มีการเปลี่ยนแปลงสีน้อยมาก สีของฟิล์มที่เปลี่ยนไปบ่งบอกถึงการเสียสภาพของฟิล์มซึ่งการเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์ม LDT(300)SA เป็นผลมาจากการเกิดหมู่คาร์บอนิลและพันธะไม่อิ่มตัวขึ้นจากการทำปฏิกิริยาในสายโซ่ LDPE

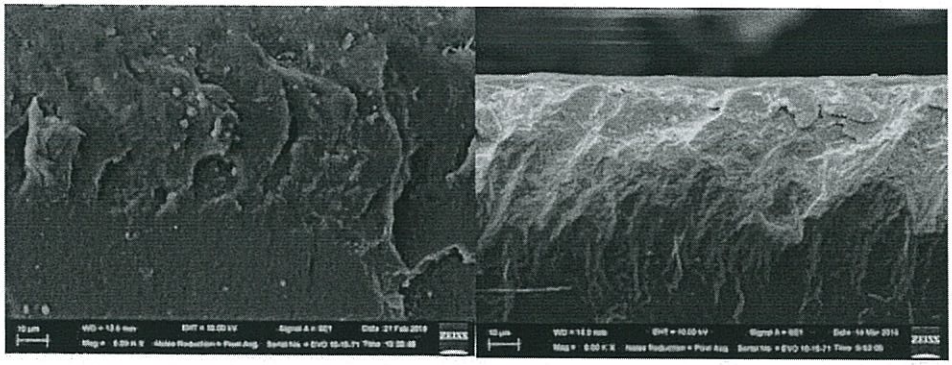
4.3.3 สัณฐานวิทยา

การศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology) ของฟิล์ม LDPE ที่ผสมตัวเร่ง TiO_2 ชนิดต่างๆ โดยใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า เพื่อดูการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาในฟิล์ม LDPE โดยวิเคราะห์จากภาพตัดขวางของฟิล์ม LDPE แสดงดังภาพที่ 4.9 พบว่าฟิล์มที่ผสม TiO_2 เผาที่อุณหภูมิ 300°C ที่มีการเติมสารช่วยกระจายตัว (LDT(300)SA) เกิดการกระจายตัวของ TiO_2 ในพอลิเมอร์ได้ดีกว่าสูตรที่ไม่ได้ทำการเติมสารช่วยกระจายตัว เนื่องจากกรดสเตียริกและพอลิเมอร์เป็นสารอินทรีย์ เมื่อทำเคลือบกรดสเตียริกลงบน TiO_2 กรดสเตรียริกจะทำให้ TiO_2 เกิดการแตกตัวได้ดีขึ้น เมื่อให้แรงเชิงกลในขณะผสมจะทำให้ เกิดการกระจายตัวของ TiO_2 ได้ดีขึ้น



(a) LDPE (b) LDT(300)

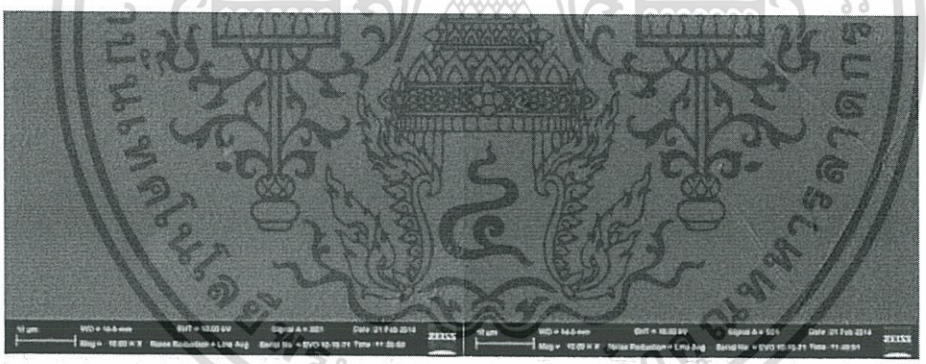
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



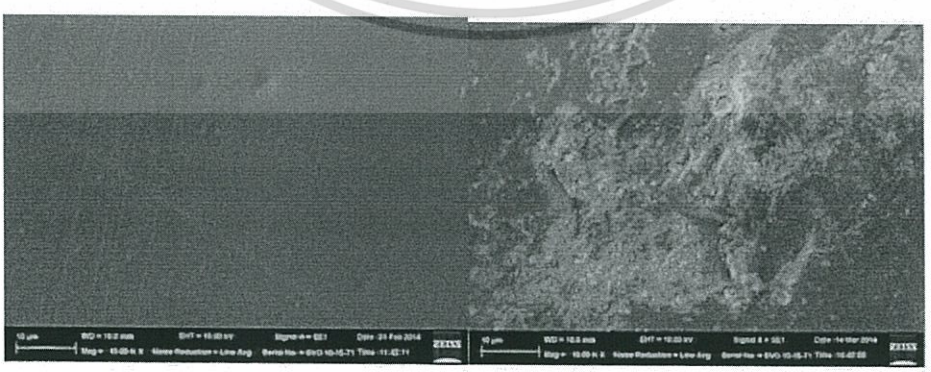
(c) LDTZN(350) (d) LDT(300)SA

ภาพที่ 4.9 ภาพ SEM ภาคตัดขวางของฟิล์ม LDPE แสดงการกระจายตัวของ TiO_2 โดยมีปริมาณ TiO_2 1 phr ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

จากภาพที่ 4.10 พบว่าฟิล์ม LDPE ที่ไม่ได้ผสมตัวเร่งไม่มีความแตกต่างกันมากนักหลังจากทำการฉายแสง UVA เป็นเวลา 200 ชั่วโมง แต่ฟิล์ม LDPE ที่มีการใส่ตัวเร่ง เมื่อทำการฉายผ่านไป 200 ชั่วโมง จะเกิดการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวฟิล์มคือ เกิดรอยขรุขระและรอยแยกขึ้น เนื่องมาจากเกิดการย่อยสลายตัวของฟิล์ม โดยฟิล์ม LDPE สูตร LDT(300) กับ LDT(300)SA แสดงผลการย่อยสลายที่ชัดเจนทั่วบริเวณผิวฟิล์ม

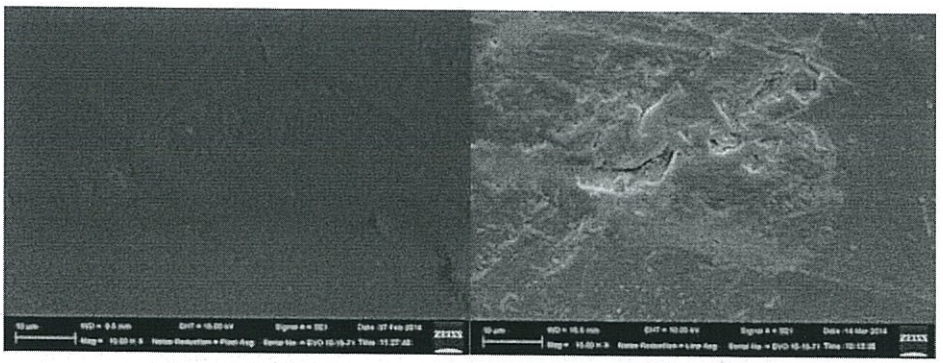


(a1) LDPE 0 hr (a2) LDPE 200 hr

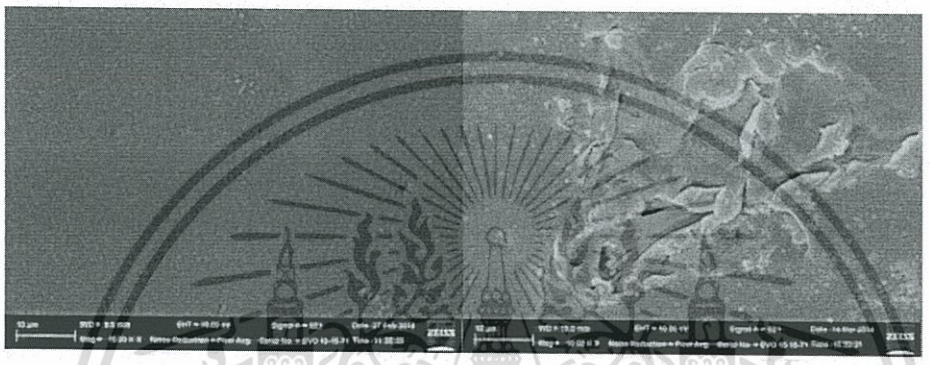


(b1) LDT(300) 0 hr (b2) LDT(300) 200 hr

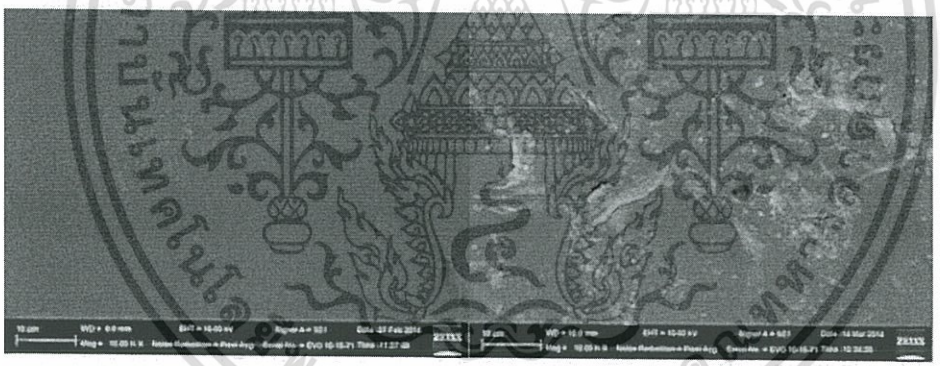
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



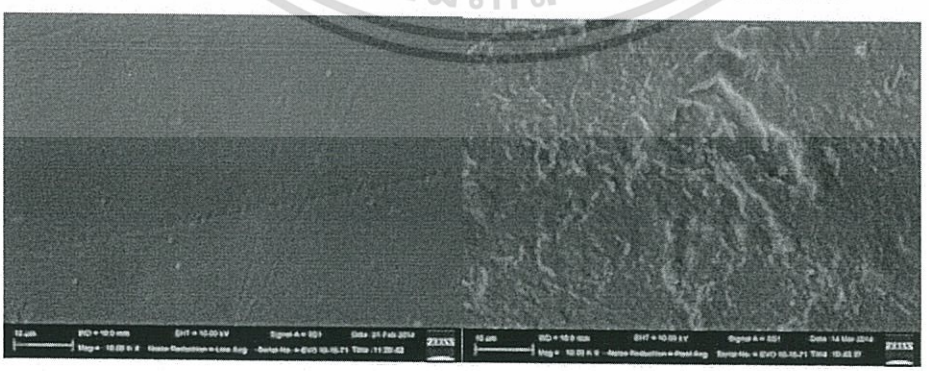
(c1) LDT(350) 0 hr (c2) LDT(350) 200 hr



(d1) LDT(400) 0 hr (d2) LDT(400) 200 hr

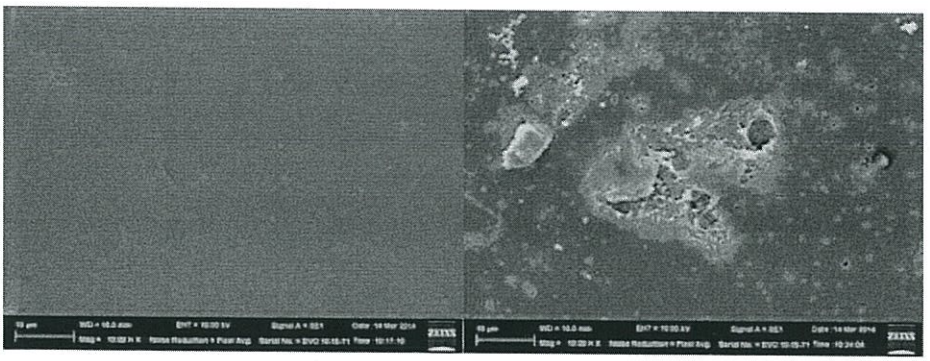


(e1) LDT(450) 0 hr (e2) LDT(450) 200 hr



(f1) LDTZN(350) 0 hr (f2) LDTZN(350) 200 hr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

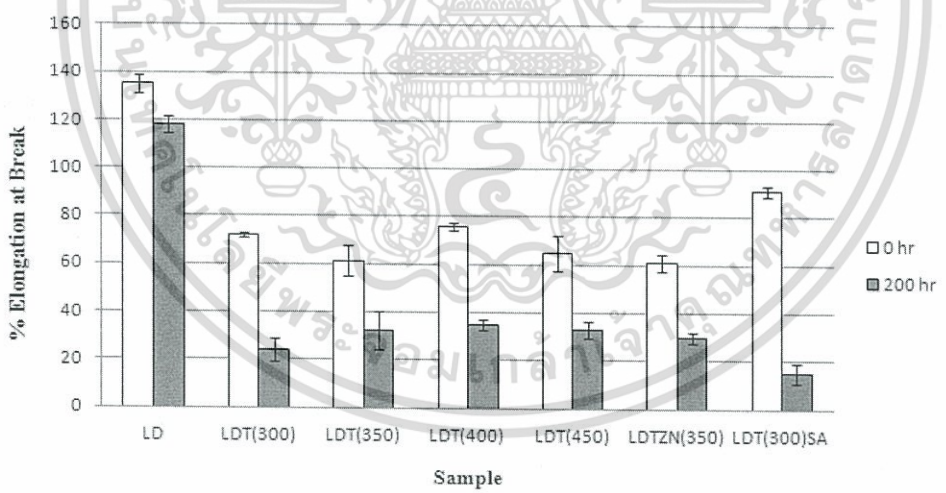


(g1) LDT(300)SA 0 hr (g2) LDT(300)SA 200 hr

ภาพที่ 4.10 ภาพ SEM ภาคพื้นผิวของฟิล์ม LDPE ที่ผสม TiO_2 ชนิดต่างๆ แสดงการย่อยสลายบนพื้นผิวของฟิล์ม LDPE ก่อนและหลังการฉายรังสียูวีเอเป็นเวลา 200 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

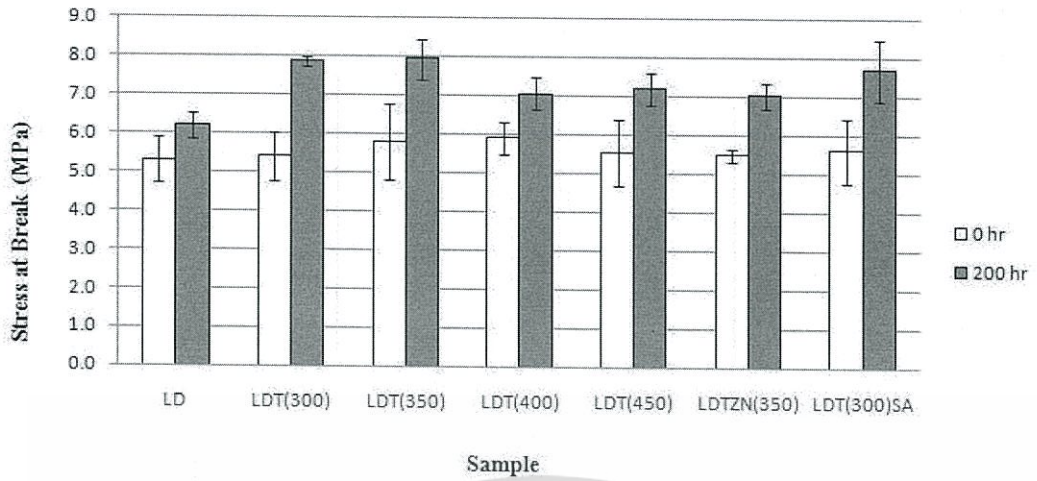
4.3.4 สมบัติเชิงกล

ในงานวิจัยนี้เตรียมฟิล์ม LDPE ที่ผสม TiO_2 เผาที่อุณหภูมิต่างๆ (300-450 °C), Zn-doped TiO_2 เผาที่อุณหภูมิ 350°C ปริมาณ 1.0 phr และทำการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม ก่อนและหลังฉายแสง UVA เป็นเวลา 200 ชั่วโมง แสดงดังภาพที่ 4.11



ภาพที่ 4.11 ค่า % Elongation at Break ของฟิล์ม LDPE ที่ผสมและไม่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนและหลังการฉายแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



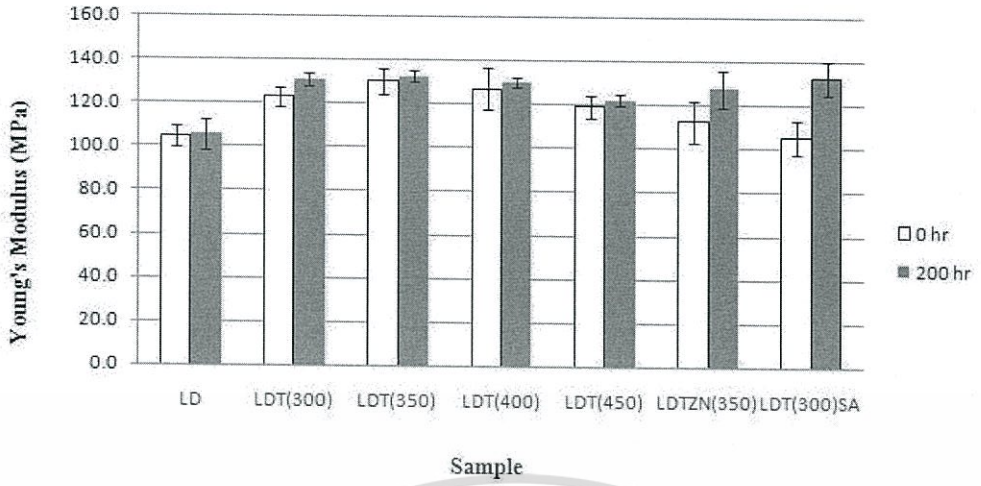
ภาพที่ 4.12 ค่า Stress at Break ของฟิล์ม LDPE ที่ผสมและไม่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนและหลังการฉายแสง

เมื่อทำการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม LDPE ที่ผสมและไม่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนการฉายแสง UVA พบว่าการใส่ TiO_2 ปริมาณ 1 phr ไม่ส่งผลให้ค่า Stress at Break เปลี่ยนแปลงมากนัก แต่มีค่า % Elongation at Break ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน เนื่องจากการใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเป็นอนุภาคของแข็งลงไปในพอลิเมอร์ ซึ่งมีความแตกต่างกันระหว่างขั้วอย่างชัดเจน จึงทำให้ไม่มีแรงกระทำกันระหว่างวัฏภาค ฟิล์มจึงมีจุดบกพร่องเกิดขึ้น เมื่อได้รับแรงกระทำส่งผลให้ความสามารถในการยืดตัวต่ำลง

การที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาลงไปในพอลิเมอร์ จะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างขั้วแล้ว ส่งผลเกิดการแตกกระจายของอนุภาคไม่ดี สังเกตุได้จาก ภาพ SEM ภาคตัดขวาง จะเห็นได้ว่าสูตรที่มีการผสม TiO_2 มีการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อน แต่สูตรที่มีการใส่กรดสเตียริก แตกกระจายเป็นอนุภาคเดี่ยวดีขึ้น เห็นได้ชัดจากค่า % Elongation at Break ในสูตรที่ใส่สเตรียริกสูงกว่าสูตรที่ไม่ได้ใส่ เนื่องจากกรดสเตียริกที่เป็นสารช่วยกระจายตัว จะไปเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา และช่วยปรับสภาพขั้วTiO_2 ส่งผลให้มีการกระจายตัวของ TiO_2 ได้ดีทำให้มีความเข้ากันได้ของฟิล์มและ TiO_2 มากขึ้นและลดโอกาสการเกิดจุดบกพร่องของฟิล์ม ดังภาพที่ 4.11

เมื่อนำฟิล์ม LDPE ที่ผสม และไม่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยา ไปผ่านการฉายแสง UVA เป็นเวลา 200 ชั่วโมง พบว่า ค่า Stress at Break และค่า Young's Modulus มีค่าเพิ่มขึ้นส่วนค่า % Elongation at Break มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่าฟิล์มเกิดการย่อยสลายขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าดัชนีคาร์บอนิล และเนื่องจากฟิล์มมีค่าความแข็งแรงของวัสดุเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงคาดว่าฟิล์มเกิดการย่อยสลายแบบพันธะเชื่อมโยง (Crosslink)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.13 ค่า Young's Modulus ของฟิล์ม LDPE ที่ผสมและไม่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนและหลังการฉายแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมฟิล์มพลาสติกย่อยสลายโดยแสงของฟิล์มพอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) โดยการผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิในการเผา TiO_2 และ Zn-doped TiO_2 ที่เตรียมจาก $Zn(NO_3)_2{\cdot}6H_2O$ ที่อุณหภูมิ 300, 350, 400 และ450°C โดยใช้ปริมาณ $Zn(NO_3)_2{\cdot}6H_2O$ 2% โมลและการใช้ปริมาณ TiO_2 1 phr ผสมกับ LDPE

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิในการเผา TiO_2 และ Zn-doped TiO_2 ที่เตรียมจาก $Zn(NO_3)_2{\cdot}6H_2O$ ที่อุณหภูมิ 300, 350, 400 และ 450°C โดยเมื่อทำการตรวจวัดด้วยเทคนิค XRD พบว่าในการเผา TiO_2 ที่อุณหภูมิ 300°C (T(300)) และ Zn-doped TiO_2 เผาที่อุณหภูมิ 350°C ((TZN350)) ให้อัตราส่วน I_A/I_R มากที่สุด มีค่าพลังงานแบนด์แก็พแคบลดลง ส่งผลให้มีค่าความยาวดูดกลืนแสงมากที่สุด

ผลการสลายตัวของสารละลาย MO เป็นเวลา 0-90 นาที พบว่าเมื่อการฉายแสง UVA เพิ่มขึ้น TiO_2 เผาที่อุณหภูมิ 300°C มีอัตราการสลายตัวของสารละลาย MO มากที่สุด เนื่องจากมีอัตราส่วน I_A/I_R มากที่สุดและในกลุ่ม Zn-doped TiO_2 พบว่าการเผาที่อุณหภูมิ 350°C มีค่าการสลายตัวของ MO สูงที่สุดและมีอัตราส่วน I_A/I_R มากที่สุด

ผลการทดสอบย่อยสลายของฟิล์ม LDPE พบว่า ฟิล์ม LDPE ที่ผสม TiO_2 โดยใช้กรดสเตียริกเป็นสารช่วยกระจายตัว (LDT(300)SA) มีการย่อยสลายได้ดีที่สุด มีค่าดัชนีคาร์บอนิล (C.I.) และค่าการเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่อเวลาในการฉายแสง UVA นานขึ้น

ฟิล์ม LDPE ที่ผสมกับ Zn-doped TiO_2 พบการชะลอการย่อยสลายเป็นช่วงต้น เนื่องจาก ZnO มีสมบัติเป็นตัวเก็บประจุที่ดี ทำให้สามารถเก็บ e^- อิสระที่เกิดขึ้นจาก TiO_2 ส่งผลให้กราฟค่าดัชนี คาร์บอนิลเกิดขึ้นเป็นรูปตัว S แสดงให้เห็นว่ามี ZnO บางส่วนเกาะติดผิว TiO_2

เมื่อฟิล์มที่ผ่านการฉายแสง UVA เป็นเวลา 200 ชั่วโมง พบว่าค่า % Elongation at Break มีค่าลดลงเป็นอย่างมาก เนื่องจาก TiO_2 ได้รับพลังงานแสงจะเกิด e^- และ h^+ ขึ้น ทำให้ได้หมู่ที่ว่องไวไปเกิดปฏิริยากับพอลิเมอร์แสดงให้เห็นว่าฟิล์มมีการย่อยสลาย ส่วนค่า Yonng's Modulus และค่า Stress at Break เพิ่มขึ้น จึงสัณนิษฐานได้ว่าพอลิเมอร์เกิดการย่อยสลายแบบพันธะเชื่อมโยง (Crosslink)

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรเลือกวิธีการเจือที่หลากหลายเพื่อให้ ZnO เข้าไปในโครงผลึก TiO_2 ได้ทั้งหมด แล้วนำไปทดสอบการสลายตัวของสารละลาย MO เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการย่อยสลายทางแสง ก่อนนำไปผสมกับพลาสติกเพื่อขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ควรพัฒนาโดยการเตรียมสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นที่มีค่าพลังงานแบนด์แก็พแคบๆ ลงใน TiO_2เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายของพอลิเมอร์

3. ควรนำ TiO_2 ไปผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่ใช้ในงานบรรจุภัณฑ์ เพื่อช่วยเร่งการย่อยสลายหลังจากการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] ชวนชม อ่วมเนตร. "**การพัฒนาพอลิเมอร์ย่อยสลายได้จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและแป้งดัดแปร เพื่อผลิตวัสดุคลุมโรงเรือนสำหรับเพาะปลูก**" สาขาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร. 2552.

[2] National Metal and Materials Technology Center. "**พลาสติกย่อยสลายได้.**" [online]. Available:http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/type_de_plas.html. 2550.

[3] ชวิศร์ กัญย์เมธากุล. "**การปรับแต่งผิวหน้าของไททาเนียมไดออกไซด์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง.**" วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 2549.

[4] มาลินี ชัยศุภกิจสินธ์ "**เคมีพอลิเมอร์**" ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2552.

[5] คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์. "**กระบวนการโฟโตแคตาไลติก.**" [online]. Available:http//docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:HnEaBULiDulJ:www.gits.kmutnb.ac.th/ethesis/data/4. 2555.

[6] แสวง เกิดประทุม "**แสงแดด.**" [online] Available:http://www.tistr.or.th/ed/images/stories/engineer/articke/sunshine.pdf. 2554.

[7] ฝ่ายชุมชนและผู้ด้อยโอกาส สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. "**พลาสติกย่อยสลายได้ นวัตกรรมเพื่อโลก.**" [online]. Available:http://nstda.or.th/rural/public/100%20articlesstkc/39.pdf. 2553.

[8] ธนาวดี ลี้จากภัย. "**พลาสติกย่อยสลายได้เพื่อสิ่งแวดล้อม.**" พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2549.

[9] ฉลาด บรรเทา และชูสิทธิ์ ศรีสุทธิกลม. "**กระบวนการปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก.**" [online]. Available:http://sichon.wu.ac.th/file/envi-shh-20090110-112240-pwrqR.pdf. 2548.

[10] วินรัธชา เครือฟู และภูสิต ปุกมณี. "**การสังเคราะห์หาลักษณะเฉพาะของ TiO_2 ขนาดนาโนสำหรับการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ในแหล่งน้ำธรรมชาติ.**" คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้. 2552.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[11] Yang, J., Li, D., Wamg, X., Yang and X., Lu,L. " **Rapid synthesis of nanocrystalline TiO_2/SnO_2 binary oxides and their photoinduced decomposition of methyl**" Journal of solid state Chemistry. Vol.165. pp. 193-198. 2002.

[12] Zhang, M., " **Degradable of hazardous organic in water by TiO_2 mediated photocatalytic oxidation.**" Process Emerging Techolodies for Hazardous Wate Management. Georgia : Atlanta. 1992.

[13] Merck. **"สมบัติของไททาเนียมไดออกไซด์."** [online]. Available:http//www.merck.co.th/th/chemicals/reagents.asp. 2550.

[14] Wikipedia. "**Zinc oxide.**" [online]. Available:http://en.wikipedia.org/w/indek.php?title=Zinc_oxide&action=edit. 2012.

[15] สุเมธา สุวรรณบูรณ์. "**สมบัติทางแสงของผงซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแมกนีเซียมในระดับนาโนเมตร.**" คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2550.

[16] Lee, G., Kawazoeb, T. and Ohtsub, M. "**Room temperature near – field photoluminescence of Zinc – blend and wurtzite ZnO structures.**" Applied Surface Science. Vol.239. pp. 394-397. 2005.

[17] MatWeb. "**Material Property Data.**" [online]. Available:http://www.matweb.com. 2012.

[18] ภาสกร ศรีสุวรรณ. "**ผลของการปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนตัวรองรับ ZSM-5 ที่มีต่อการสังเคราะห์แบบ ฟิชเชอร์–โทรปส์.**" วิทยานิพนธ์วิศวกรรม มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2551.

[19] พรรณพิลาศ เบ้าจังหาร พิชญา ตรีเนตร และยุวันดา เอี่ยมเผ่าจีน. "**การปรับปรุงพื้นผิวแผ่นใยพอลิเอทิลีนความแข็งแรงสูงด้วยแคลเซียมซิลิเกตเพื่อเป็นวัสดุทางการแพทย์**" โครงงานพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2551.

[20] Billmeyer, F.W. "**Tectbook of Polymer Science.**" New York : John Wiiey&Sons. 1984.

[21] Riegeland E.R. "**Handbook of Industrial Chemistry**" 9th ed. New York: VNR.C, 1992.

[22] จิราภรณ์ ดำจันทร์. "**การพัฒนาสารเคลือบผิว $TiO_2/SnO_2/X$ ระดับนาโน.**" สาขาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยสงคลานครินทร์. 2551

[23] ฝ่ายชุมชนและผู้ด้อยโอกาส สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. "**พลาสติกย่อยสลายได้ นวัตกรรมเพื่อโลก.**" [online]. Available:http://nstda.or.th/rural/public/100%20articlesstkc/39.pdf. 2553.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[24] Cheng, P., Li, W., Zhou, T., Jin, Y. and Gu, M. "**Phisical and photocatalyticpropertties of zing ferrite doped titania under visible light irradiation.**" Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. Vol.168. pp. 97-101. 2004.

[25] กิจสิมา คมขำ และชะไมพร อ้วนโคตร **"ฟิล์มย่อยสลายโดยแสงจาก LDPE/ZnO"** โครงงานพิเศษ สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2554.

[26] Zhao, X., Zongwei, L., Chen, Y., Shi, L. and Zhu, Y. " **Solid-phase Photocatalytic Degradation of polyethylene plastic under UV and solar light irradiation.**" Journal of Molecular Catalysis A: Chemical. Vol.268. pp. 101-106. 2007.

[27] กมลวรรณ ลิ้มเฮาะสูน พีระพงศ์ บุศดา และอุกฤษฎ์ สุวรรณประภา **"ฟิล์มย่อยสลายโดยแสงจาก LLDPE/ZnO"** โครงงานพิเศษ สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2555.

[28] Vilaplana, F. " **Modelling the degradation process in high impact polystyrene during the first use and subsequent recycling.**" School of Chemical Science and Engineering Fiber and Polymer Technology Royal Institute of Technology. 2007.

[29] ภัคนัย ทองทิอัมพร. **"การมองเห็นการวัดสี."** [online]. Available: http://dssweb/st-articles/files/pep_7_2550_Color_Measurement.pdf. 2550.

[30] Thanh, B.N., Moon, J. and Kwang, S.R. "**Synthesis and High Photocatalytic Activity of Zn-doped TiO_2 Nanoparticles by Sol-gel and Ammonia-Evaporation Method.**" Bull. Korean Chem. Soc. Vol.33. pp. 243-247. 2012.

[31] Chu, S.Y., Yan, T.M. and Chen, S.L. "**Analysis of ZnO varistors prepared by the sol-gel method.**" Ceramics International. Vol.26. pp. 733-737. 2000.

[32] Fortunato, E., Barquinha, P., Pimentel, A., Goncalves, A., Marques, A., Pereira, L. and Martins R. "**Recent advance in ZnO transparent thin film transistor.**" Thin Solid Films. Vol.487. pp. 205-211. 2005.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ค่า AAS

การคำนวณหาปริมาณ ZnO ที่เตรียมลงใน Zn-doped TiO_2 ในปริมาณ 2% mol

ชั่งสารตัวอย่าง (Zn-doped TiO_2) 0.021 g ทำการละลายด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) 30ml จากนั้นเจือจางด้วยน้ำกลั่นปรับปริมาตรเป็น 500 ml ได้ความเข้มข้นของ Zn-doped TiO_2 42 ppm จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาค่าปริมาณของ ZnO ได้ผลดังนี้

ในสารละลาย Zn-doped TiO_2 42 ppm → มี ZnO 0.772 ppm

ดังนั้น Zn-doped TiO_2 0.021 g → มี ZnO 3.86×10^{-4} g

<u>หาปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ในสารตัวอย่าง</u>

ปริมาณ TiO_2 = ปริมาณสารตัวอย่าง – ปริมาณ ZnO

= (0.021g) - (3.86×10^{-4})

= 0.020 g

หาจำนวนโมลของ ZnO และ TiO_2

โมลของ ZnO = ปริมาณ ZnO(g)/มวลโมเลกุล ZnO (g/mol)

= $(3.86 \times 10^{-4}$ g)/(81.41 g/mol)

= 4.7×10^{-6} mol

โมลของ TiO_2 = ปริมาณ TiO_2 (g)/มวลโมเลกุล (g/mol)

= (0.020g)/(79.870g/mol)

= 2.50×10^{-4} mol

หาจำนวนโมลรวมของ ZnO และ TiO_2 (TZN(300))

โมลของ ZnO + โมลของ TiO_2 = 4.7×10^{-6} mol + 2.50×10^{-4} mol

= 2.5047×10^{-4} mol

หาปริมาณ ZnO ที่เตรียมลงใน TiO_2 ในหน่วย % mol

จำนวนโมลรวม TZN(300) = 2.5047×10^{-4}mol → มีZnO = 4.7×10^{-6} mol

จำนวนโมลรวม TZN(300) = 100mol → มีZnO = 1.87 mol

ดังนั้นปริมาณ ZnO ที่เตรียมลงใน Zn-doped TiO_2 มีปริมาณ 1.87 mol

การคำนวณหาปริมาณ ZnO ที่เตรียมลงใน Zn-doped TiO_2 ในปริมาณ 2% mol

ในอุณหภูมิการเผาต่างๆ สามารถคำนวนหาได้ดังวิธีข้างต้นที่กล่าวมานี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ค่า Methyl Orange Degradation

ตารางที่ ข-1 ผลการสลายตัวของสารละลาย MO ที่ผสมกับ TiO_2 ที่เผาที่อุณหภูมิต่างๆ (300-450°C)

สูตร / Time(min)	T(300)	T(350)	T(400)	T(450)
0	44.00	44.00	44.00	44.00
30	26.20	25.03	30.08	37.63
60	14.26	15.00	17.36	19.89
90	7.35	12.56	11.50	11.72

ตารางที่ ข-2 ผลการสลายตัวของสารละลายเมทิลออเรนจ์ ที่ผสมกับ Zn-doped TiO_2 ที่เผาที่อุณหภูมิต่างๆ (300-450°C)

สูตร / Time(min)	TZN(300)	TZN(350)	TZN(400)	TZN(450)
0	44.00	44.00	44.00	44.00
30	27.54	26.56	34.84	42.12
60	20.82	18.22	26.4	29.24
90	17.4	14.17	20.75	24.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ค่า Carbonyl Index (C.I.)

ตารางที่ ค-1 ผลการทดสอบค่า Carbonyl Index ของฟิล์ม LDPE และ ฟิล์ม LDPE ผสม TiO_2 และ Zn-doped TiO_2

Time (hr)	Carbonyl Index (C.I)			
	LD	LDT(300)	LDT(350)	LDTZN(350)
0	0	0	0	0
50	0.01567	0.2791	0.22848	0.10336
100	0.03328	0.4803	0.3836	0.423
150	0.03965	0.5984	0.5078	0.432
200	0.045	0.7208	0.6973	0.715

ตารางที่ ค-1 (ต่อ) ผลการทดสอบค่า Carbonyl Index ของฟิล์ม LDPE และ ฟิล์ม LDPE ผสม TiO_2 และ Zn-doped TiO_2

Time (hr)	Carbonyl Index (C.I)		
	LDT(400)	LDT(450)	LDT(300)SA
0	0	0	0.123
50	0.1607	0.0948	0.439
100	0.2514	0.224	0.642
150	0.4333	0.4	0.785
200	0.659	0.595	0.884

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์ม (ΔE)

ผลการทดสอบค่าการเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์ม LDPE และ ฟิล์ม LDPE และ ฟิล์ม LDPE ที่ผสมกับ TiO_2 และ Zn-doped TiO_2 ที่อุณหภูมิต่างๆกัน

ตารางที่ ง-1 ผลการทดสอบค่าการเปลี่ยนแปลงสี (ΔE) ของฟิล์ม

Sample	Radiation time (hr)	L*	a*	b*	(ΔE)
LD	0	25.57	-0.77	-2.95	-
	50	25.90	-1.09	-2.70	0.52
	100	26.16	-1.28	-2.80	0.92
	150	26.28	-1.01	-2.15	1.09
	200	26.43	-1.21	-3.17	0.99
LDT(300)	0	31.46	-1.17	-8.62	-
	50	34.45	-1.27	-9.70	3.18
	100	35.67	-1.11	-8.12	4.22
	150	39.73	-1.16	-6.34	8.57
	200	43.29	-1.16	-6.68	11.98
LDT(350)	0	29.48	-1.54	-4.18	-
	50	30.46	-1.26	-4.00	1.06
	100	31.45	-1.25	-4.11	1.97
	150	32.66	-1.50	-3.28	3.30
	200	33.40	-1.04	-3.12	4.27
LDTZN350	0	29.01	-1.54	-4.45	-
	50	30.90	-1.26	-4.26	2.29
	100	30.99	-1.25	-4.10	4.11
	150	35.15	-1.50	-3.60	6.19
	200	36.72	-1.04	-3.52	7.78
LDTZN350	0	29.01	-1.54	-4.45	-
	50	30.90	-1.26	-4.26	2.29
	100	30.99	-1.25	-4.10	4.11
	150	35.15	-1.50	-3.60	6.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

Sample	Radiation time (hr)	L*	a*	b*	(ΔE)
	200	36.72	-1.04	-3.52	7.78
LDT(400)	0	28.57	-1.52	-3.87	-
	50	30.28	-1.15	-3.29	1.80
	100	30.44	-1.52	-3.14	2.00
	150	32.66	-1.47	-2.98	4.19
	200	43.87	-1.14	-2.85	6.78
LDT(450)	0	30.29	-1.34	-2.75	-
	50	30.32	-1.35	-3.70	1.02
	100	31.89	-1.44	-3.87	1.97
	150	33.21	-1.47	-3.31	2.97
	200	33.26	-1.12	-5.59	3.15
LDT(300)SA	0	0.25	1.17	-4.55	-
	50	0.25	1.29	-4.48	4.10
	100	0.32	1.64	-4.23	6.30
	150	40.88	-0.89	-4.03	11.84
	200	46.71	-0.88	-4.52	17.72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินโครงการวิจัย

ตารางที่ จ.1 สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินโครงการวิจัย

หมวดค่าใช้จ่าย	งบประมาณรวมทั้งโครงการ	ค่าใช้จ่าย (บาท)	คงเหลือ (หรือเกิน)
งบบุคลากร: ค่าจ้างชั่วคราว			
งบดำเนินงาน			
ค่าตอบแทน	-	-	-
ค่าใช้สอย	30,000.00	27,244.00	2,776.00
ค่าวัสดุ	20,000.00	22,778.48	(-2,778.48)
ค่าสาธารณูปโภค			
งบลงทุน: ค่าครุภัณฑ์			
รวม	50,000.00	50,022.48	-22.48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลประวัติผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล นางสาวชลลดา ฤตวิรุฬห์

ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วท.บ. เคมี	เคมี	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	2535
M.Sc.	Polymer science and Technology	UMIST, U.K	2538
Ph.D.	Polymer science and Technology	UMIST, U.K	2542

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) Packaging films and photo degradable films

ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
2549	ทุนสนับสนุนงานวิจัย	บริษัทเวสเทิร์นดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด
2551	ทุนสนับสนุนงานวิจัย	ศูนย์โลหะและวัสดุแห่งชาติ
2551	ทุนฝึกอบรม	รัฐบาลญี่ปุ่น หลักสูตร Technical Support for SME Promotion (Plastics Technology)
2553	ทุนสนับสนุนงานวิจัย	บริษัทเวสเทิร์นดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด
2554	ทุนสนับสนุนงานวิจัย	บริษัทไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน)
2555	ทุนสนับสนุนงานวิจัย	คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2557	ทุนสนับสนุนงานวิจัย	คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2558	ทุนสนับสนุนงานวิจัย	คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2558	ทุนสนับสนุนงานวิจัย	คณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
2559	ทุนสนับสนุนงานวิจัย	คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2560	ทุนสนับสนุนงานวิจัย	คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2560	ทุนสนับสนุนงานวิจัย	คณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

		สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Patents

1. Tawan Sooknoi, Chonlada Ritvirulh and Asira Fuongfuchat. Masterbatch for preparing plastic films with high ethylene permselectivity and the plastic films produced therefrom. Japanese Patent no. 5914477. April 2016.
2. Asira Fuongfuchat, Doungporn Sirikittikul, Phatchareeya Raksa, Tawan Sooknoi and Chonlada Ritvirulh. Masterbatch for preparing plastic films with high ethylene permselectivity and the plastic films produced therefrom. Austratian Patent no. 2011293914. December 2014.
3. Asira Fuongfuchat, Doungporn Sirikittikul, Phatchareeya Raksa, Tawan Sooknoi and Chonlada Ritvirulh. Masterbatch for preparing plastic films with high ethylene permselectivity and the plastic films produced therefrom. New Zealand Patent no. 606351. September 2014.
4. Tawan Sooknoi, Chonlada Ritvirulh, Asira Fuongfuchat, Doungporn Sirikittikul and Phatchareeya Raksa. Masterbatch for preparing plastic films with high ethylene permselectivity and the plastic films produced therefrom. United States Patent no. 8697777B2. April 2014.
5. Chonlada Ritvirulh. Masterbatch for preparing plastic films with high ethylene permselectivity and the plastic films produced therefrom. European Patent no. 11760880.2-1302. March 2013.
6. Tawan Sooknoi, Chonlada Ritvirulh, Asira Fuongfuchat, Doungporn Sirikittikul and Phatchareeya Raksa. Masterbatch for preparing plastic films with high ethylene permselectivity and the plastic films produced therefrom. PCT Patent no. WO 2012/026893 A1. March 2012.
6. Asira Fuongfuchat, Doungporn Sirikittikul, Phatchareeya Raksa, Tawan Sooknoi and Chonlada Ritvirulh. Masterbatch for plastic film with high ethylene transmission rate and permeation and plastic film prepared from this master batch. Thai patent no. 1001001199. August 2010.
7. Asira Fuongfuchat, Doungporn Sirikittikul, Phatchareeya Raksa, Tawan Sooknoi and Chonlada Ritvirulh. Plastic film with high ethylene transmission rate for prolonging shelf life of fresh produces. Thai patent no. 0801001835. April 2008.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

1. Asira Fuongfuchat,Doungporn Sirikittikul, Warintorn Booncharoen, Phatchareeya Raksa, Chonlada Ritvirulh and Tawan Sooknoi, Hydrophobic Zeolite-Filled Polymeric Films with High Ethylene Permselectivity for Fresh Produce Packaging Applications, *Packag. Technol. Sci.,* Volume 27, Issue 10 (2014) 763-773. (Impact factor 2014: 1.584)
2. P. Monprasit, C. Ritvirulh, T. Sooknoi, S. Rukchonlatee, A. Fuongfuchart and D. Sirikittikul, Selective ethylene permeable zeolite composite double-layered film for novel modified atmosphere packaging, *Polym. Eng. Sci.*, Volume 51, Issue 7 (2011) 1264-1272. (Impact factor 2009: 1.248)
3. ชลลดา ฤตวิรุฬห์ ณัฐวุฒิ กวีวิวิธชัย ณรงค์เดช สุวรรณดาลัด และตะวัน สุขน้อย . 2548. การสลายตัวของพอลิไอโซพรีนโดยใช้ของแข็งเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา. วารสารเทคโนโลยีสุรนารี. 12(1): 69-80.
4. ชลลดา ฤตวิรุฬห์ วิไลรัตน์ เมืองแก้ว สุมาลี ขอมอินทร์ และตะวันสุขน้อย .2547.การศึกษาอัตราเร็วของ ปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนของยางไอโซพรีนด้วยพาราโทลูอีนซัลโฟนิลไฮดราไซด์. วารสารวิทยาศาสตร์ มข. 32(3) : 158-167.
5. ชลลดา ฤตวิรุฬห์. 2543. พอลิเมอร์ผสม. วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง. 10(1) : 14-19.

การเสนอผลงานวิชาการ

1. Kritsana Makphon, Chaisan Na Lampoon, Panida Phanthong, Rattanawadee Tumsa, Chonlada Ritvirulh, Tawan Sooknoi, and Suparat Rukchonlatee, "Effect of Poly (Styrene-Ethylene-Butylene-Styrene) Type on Ethylene Gas Permeation Property of Linear Low Density Polyethylene Film" *The proceeding of The International Polymer Conference of Thailand* (PCT-7), 1-2 June, Bangkok, Thailand, pp. 175-179, 2017.
2. Tawan Sooknoi, Preeyaporn Mahawanjam, Surapong Piamsuwansiri, Oranut Pongtanapaisan, Suparat Rukchonlatee and Chonlada Ritvirulh "Enhanced photodegradability of LDPE filled with OTS-modified TiO_2" The 11^{th} SPSJ International Polymer Conference (IPC 2016), 13-16 December, Fukuoka, Japan, 2016.
3. Chonlada Ritvirulh, Kanokwan Hongthong, Kritsana Makphon, Chanaporn

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Rungroang, Suparat Rukchonlatee and Tawan Sooknoi, "Selective Ethylene Permeability of LLDPE/SEBS/Zeolite ZSM-5 Films" *The 11th SPSJ International Polymer Conference* (IPC 2016), 13-16 December, Fukuoka, Japan, 2016.

4. Chonlada Ritvirulh, Pathavuth Monvisade, Chanvit Limpaiboon, Piyathida Hasitapong, Pusit Chantawut, "Silver loaded alginate-guar gum hydrogel with antibacterial property" *14 thInternational symposium on Biocontrol and Biotechnology, 6-9 November, St. Petersburg-Pushkin, Russia,* 2016.
5. Pratya Kunjit, Tawan Sooknoi Tosapol Maluangnont, Suparat Rukchonlatee and Chonlada Ritvirulh, "Photodegradable film prepared from LDPE/TiO_2 nanotube", *The proceeding of The International Polymer Conference of Thailand* (PCT-6), June 30-July 1, Bangkok, Thailand, pp. 454-458, 2016.
6. Kritsana Makphon, Suparat Rukchonlatee, Tawan Sooknoi, Masayuki Yamaguchi and Chonlada Ritvirulh, "Mechanical and rheological properties of LLDPE/SEBS/modified zeolite ZSM-5 blends", *The proceeding of The International Polymer Conference of Thailand* (PCT-6), June 30-July 1, Bangkok, Thailand, pp. 355-360, 2016.
7. Chonlada Ritvirulh, Hydrophobic zeolite composite film with selective ethylene permeation for packaging application, The 3rd International Symposium for Green-Innovation Polymers (GRIP2016), March 4-7, Nomi, Japan, 2016.
8. Thanaporn Sahassanon, Suparat Rukchonlatee, Tawan Sooknoi and Chonlada Ritvirulh, Improvement of ethylene permeation in LLDPE/SEBS film with zeolite Y, *The proceedings Pure and Applied Chemistry International Conference 2015* (PACCON 2015), January 21-23, Bangkok, Thailand, 432-435, 2015.
9. C. Ritvirulh, S. Rattanapaiboongij, T. Sooknoi and S. Ruckchonlatee, Initial delay in photodegradation of Zn doped TiO_2/LDPE films, ACS 247 th National meeting, March 16-20, Dallas, USA, 2014.
10. R. Wiwattananukul, T. Sooknoi, S. Ruckchonlatee and C. Ritvirulh, Improved the ethylene transmission rate of LLDPE/SEBS blend film, *The proceedings Pure and Applied Chemistry International Conference 2013* (PACCON 2013), January 23-25, Bangsaen, Thailand, 1033, 2013
11. สมยศ รัตนไพบูลย์กิจ, ตะวัน สุขน้อย, ชลลดา ฤตวิรุฬห์ และสุภารัตน์ รักชลธี "ฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ย่อยสลายได้ด้วยแสง" การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์วิจัย ครั้งที่ 4, 12-15 มีนาคม พิษณุโลก, 2555 หน้า 153-158.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. ขวัญใจ พูลสวัสดิ์, อิทธิพล แจ้งชัด, ชลลดา ฤตวิรุฬห์ และปราณี ภิญโญชีพ , อิทธิพลของความหนืดที่มีผลต่อสมบัติของยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากยางธรรมชาติ และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ, เรื่องเต็มการประชุมวิชาการ ครั้งที่ 49 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 1-4 กุมภาพันธ์, กรุงเทพมหานคร, 2554 หน้า 265-272.

13. S. Laowakul, C. Ritvirulh, T. Sooknoi, S. Rukchonlatee, A. Fuongfuchart and D. Sirikittikul, Ethylene transmission rate through zeolite modified double-layered films for Packaging of fresh produce, *The7th International Symposium on Advance Material in Asia-Pacific Rim (ISAMAP)*, September 30- October 1, Kanazawa, Japan, 45, 2010.

14. P. Monprasit, C. Ritvirulh, S. Rukchonlatee, T. Sooknoi and A. Fuongfuchart, Tensile Properties of the Zeolite Composite Double-Layered Film, *The 6th International Symposium on Advance Material in Asia-Pacific Rim (ISAMAP)*, November 21-23, Bangkok, Thailand, 156, 2009.

15. S.Laowakul, T. Sooknoi, C. Ritvirulh, S. Rukchonlatee, and A. Fuongfuchart, Study on Tensile Properties of SEBS/LDPE and SEBS/OPP double-layer films for Packaging Application, *The 6th International Symposium on Advance Material in Asia-Pacific Rim (ISAMAP)*, November 21-23, Bangkok, Thailand, 163, 2009.

16. P. Monprasit, C. Ritvirulh, S. Rukchonlatee, Sooknoi, T. and A. Fuongfuchart, Study on Ethylene Gas Permeability of Double-layer Composite Film, *Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON)*, January 14-16, Naresuan University, Phitsanulok, Thailand, 82, 2009.

17. A. Fuoungfuchat, W. Booncharеon, S. Apisittinet, D. Sirikittikul, C. Ritvirulh, and T. Sooknoi, Highly ethylene permeable film : development and application in packaging, *Proceeding of the 16th IAPRI World Conference of Packaging*, Bangkok, June 8 - 12, 2008.

18. W. Booncharеon, S. Apisittinet, D. Sirikittikul, S. Loykulnant, A. Fuougfuchat, C. Ritvirulh, and T. Sooknoi, "Structure and Gas Selectivity of PE/Zeolite Composite Film", Proceeding of The 2nd International Conference on Advanced in Petrochemicals and Polymers, Bangkok, 25 – 28 June, 2007.

19. S. Apisittinet, T. Sooknoi, C. Ritvirulh, D. Sirrikitikul, S. Loykulnant, A. Fuongfuchat and W. Booncharеon, Ethylene permeation of silicalite I composite film, NSTDA Annaul Conference 2007, Pathumthanee, 28-30 March 2007.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

20. A. Fuongfuchat, C. Ritvirulh, S. Loykulnant, T. Sooknoi, An Investigation of the Effect of Zeolite Structure on Adsorption of Gases in Postharvest Environment, Proceedings of the 3rd Thailand Materials Science and Technology Conference, 444-446, 10-11 August 2004, Bangkok, Thailand.
21. C. Ritvirulh, P. Liawsomboon and S. Woramongkolchai, Compatibilisation effect of SBS on Recycling PS/NR Blends, PPC 8, 2003, Thailand.
22. C. Ritvirulh, A.J. Ryan and A.N. Wilkinson, Copolymers as compatibilisers in LDPE/PS Blends,PPS Symposium, 1999, Thailand.
23. ระพี เจิมสูงเนิน ปุณณมา ศิริพันธ์โนน ชลลดา ฤตวิรุฬห์ และสุภารัตน์ รักชลธี , การเตรียมวัสดุประกอบนาโนระหว่างพอลิ(สไตรีน-บิวทาไดอีน-สไตรีน) กับมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยเทคนิคการหล่อแบบสารละลาย, การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17 (TIChE 17), 29-30 ตุลาคม, เชียงใหม่, 2550.
24. อภิชญา เจียนประเสริฐ ปุณณมา ศิริพันธ์โนน สุภารัตน์ รักชลธี และ ชลลดา ฤตวิรุฬห์ , ผลของสารช่วยผสมต่อสมบัติของวัสดุประกอบนาโน LDPE/MMT, การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมี และเคมีประยุกต์แห่งประเทศ ไทย ครั้งที่ 17 (TIChE 17), 29-30 ตุลาคม, เชียงใหม่, 2550.
25. อมรรัตน์ สวัสดิมงคล ภัทธาวุธ มนต์วิเศษ ปุณณมา ศิริพันธ์โนน และ ชลลดา ฤตวิรุฬห์ , การเตรียมวัสดุ ประกอบนาโนระหว่างพอลิเมอร์ร่วมพอลิเมทิลเมทาคริเลตพอลิอะคริลิกแอซิดกับไคโตซานมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยวิธีพอลิเมอไรซ์ขณะขึ้นรูป, การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่17 (TIChE 17), 29-30 ตุลาคม, เชียงใหม่, 2550.

ผลงานสิทธิบัตร/สิ่งประดิษฐ์/งานสร้างสรรค์ (ศิลปะ หรือ อื่นๆ)

1. Asira Fuongfuchat, Doungporn Sirikittikul, Phatchareeya Raksa, Tawan Sooknoi and Chonlada Ritvirulh. Masterbatch for preparing plastic films with high ethylene permselectivity and the plastic films produced therefrom. Japanese Patent no. 5914477. April 2016.
2. Asira Fuongfuchat, Doungporn Sirikittikul, Phatchareeya Raksa, Tawan Sooknoi and Chonlada Ritvirulh. Masterbatch for preparing plastic films with high ethylene permselectivity and the plastic films produced therefrom. Austratian Patent no. 2011293914. December 2014.
3. Asira Fuongfuchat, Doungporn Sirikittikul, Phatchareeya Raksa, Tawan Sooknoi and Chonlada Ritvirulh. Masterbatch for preparing plastic films with high ethylene permselectivity and the plastic films produced therefrom. New Zealand Patent no. 606351. September 2014.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. Tawan Sooknoi, Chonlada Ritvirulh, Asira Fuongfuchat, Doungporn Sirikittikul and Phatchareeya Raksa. Masterbatch for preparing plastic films with high ethylene permselectivity and the plastic films produced therefrom. United States Patent no. 8697777B2. April 2014.
5. Chonlada Ritvirulh. Masterbatch for preparing plastic films with high ethylene permselectivity and the plastic films produced therefrom. European Patent no. 11760880.2-1302. March 2013.
6. Tawan Sooknoi, Chonlada Ritvirulh, Asira Fuongfuchat, Doungporn Sirikittikul and Phatchareeya Raksa. Masterbatch for preparing plastic films with high ethylene permselectivity and the plastic films produced therefrom. PCT Patent no. WO 2012/026893 A1. March 2012.
7. เลขที่คำขอ 1001001199 มาสเตอร์แบทช์สำหรับเตรียมฟิล์มพลาสติกที่มีค่าอัตราการซึมผ่านและค่าการเลือกผ่านก๊าซเอทิลีนสูงและฟิล์มพลาสติกที่ทำมาจากมาสเตอร์แบทช์ดังกล่าว, 4 สิงหาคม 2553
8. เลขที่คำขอ 0801001835 ฟิล์มพลาสติกที่มีค่าการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนสูงเพื่อชะลอการสุก และการเสื่อมสภาพของผลิตผลสด, 11 เมษายน 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T149120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้