

ฟิล์มย่อยสลายได้ด้วยแสงจาก HIPS/TiO₂

PHOTODEGRADABLE FILM PREPARED FROM HIPS/TiO₂



นางสาวนันทพร ว่องไวพานิชย์

นางสาวนารีรัตน์ ทองบุญส่ง

นางสาวนิพาดา ต๊ะต้อม

โครงการพิเศษงานวิจัยและงานบริการทางวิชาการตามหลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา ๒๕๕๕

ฟิล์มย่อยสลายได้ด้วยแสงจาก HIPS/TiO₂

PHOTODEGRADABLE FILM PREPARED FROM HIPS/TiO₂



นางสาวนันทพร

ว่องไวพานิชย์

นางสาวนารีรัตน์

ทองบุญส่ง

นางสาวนิพาดา

ตะต้อม

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PHOTODEGRADABLE FILM PREPARED FROM HIPS/TiO₂

MISS NANTHAPON WONGWAIPANICH

MISS NAREERAT THONGBUNSONG

MISS NIPATA TATOM

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE

IN INDUSTRIAL CHEMISTRY

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ ฟิล์มย่อยสลายได้ด้วยแสงจาก HIPS/TiO₂
 PHOTODEGRADABLE FILM PREPARED FROM HIPS/TiO₂

ชื่อนักศึกษา นางสาวนันท์พร ว่องไวพานิชย์ 52050178
 นางสาวนารีรัตน์ ทองบุญส่ง 52050181
 นางสาวนิพาดา ต๊ะต่อม 52050183

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม

ปีการศึกษา 2555

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุพห์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รศ.ดร.ตะวัน สุขน้อย
 ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
 โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี
 อุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2555

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร. อธิพิพล แจ่มชัด	
ผศ.ดร. ภัทรารุช มนต์วิเศษ	
ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุพห์	
รศ.ดร.ตะวัน สุขน้อย	
ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	ฟิล์มย่อยสลายได้ด้วยแสงจาก HIPS/TiO ₂
ชื่อนักศึกษา	นางสาวนันท์พร ว่องไวพาณิชย์ นางสาวนริรัตน์ ทองบุญส่ง นางสาวนิพาดา ต๊ะต่อม
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา	2555
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. ชลลดา ฤตวิรุพห์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รศ.ดร. ตะวัน สุขน้อย ผศ.ดร. สุภารัตน์ รักชลธิ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการย่อยสลายด้วยแสงของฟิล์มพอลิस्टไทรเร็นชนิดทนแรงกระแทกสูง (HIPS) ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายฟิล์ม HIPS ได้แก่ อุณหภูมิในการเผา TiO₂ (300-500°C) การเจือ TiO₂ ด้วยสังกะสีไนเตรต (Zn(NO₃)₂) และปริมาณ TiO₂ (0.5-2 phr) ทำการขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีการหล่อแบบด้วยสารละลาย (Solution Casting) ได้ฟิล์มที่มีความหนา 50-70 μm แล้วนำมาศึกษาการย่อยสลายของฟิล์ม ภายใต้รังสียูวีเป็นเวลา 100, 150 และ 200 ชั่วโมง โดยวิเคราะห์จากค่าดัชนีไฮดรอกซิล (Hydroxyl Index) และค่าดัชนีคาร์บอนิล (Carbonyl Index) การเปลี่ยนสีของฟิล์ม และทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า TiO₂ ที่ทำการเผาที่อุณหภูมิ 400 และ 500 °C ทำให้มีค่าความเข้มของวงภาคอะนาเทส (I_A) มากกว่าที่ทำการเผาที่อุณหภูมิ 300 °C ส่งผลให้ฟิล์ม HIPS/TiO₂ (400-500 °C) มีการย่อยสลายที่ดีกว่า HIPS/TiO₂ (300 °C) โดยเมื่อทำการเจือ TiO₂ ด้วย Zn(NO₃)₂ พบว่าการย่อยสลายของฟิล์มไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จากนั้นศึกษาผลของปริมาณ TiO₂ พบว่าการเพิ่มปริมาณ TiO₂ หรือเวลาในการฉายรังสียูวีเอนานขึ้น ทำให้ฟิล์มมีค่าดัชนีไฮดรอกซิล ค่าดัชนีคาร์บอนิล การเปลี่ยนสีมากขึ้น เนื่องจาก TiO₂ ช่วยเร่งการเกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ทำให้เกิดการตัดขาดของสายโซ่พอลิเมอร์ ฟิล์มที่ผ่านการฉายรังสียูวีเอมีความแข็งแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดลดลง แต่มีค่ามอดูลัสของยังเพิ่มขึ้น เมื่อทำการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยเทคนิค AFM พบว่าการเพิ่มเวลาในการฉายแสงหรือการมีปริมาณ TiO₂ มากขึ้น ส่งผลให้พื้นผิวมีความขรุขระมากขึ้น

คำสำคัญ: การย่อยสลายด้วยแสงของฟิล์ม, พอลิस्टไทรเร็นชนิดทนแรงกระแทกสูง (HIPS),

ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO₂)

Special Project Title	Photodegradable film prepared from high impact polystyrene/TiO ₂
Students	Miss Nanthaporn Wongwaipanich Miss Nareerat Thongbunsong Miss Nipata Tatom
Degree	Bachelor of Science
Major Program	Industrial chemistry
Academic Year	2012
Advisor	Assist.Prof.Dr. Chonlada Ritvirulh Assoc.Prof.Dr. Tawan Sooknoi Assist.Prof.Dr. Suparat Rukchonlatee

ABSTRACT

This research studied on photo-degradability of high impact polystyrene (HIPS) films incorporated with photocatalyst namely titanium dioxide (TiO₂). The factors affecting photodegradable of the HIPS film were investigated such as calcination temperature of TiO₂ (300-500°C), incorporation of zinc nitrate into TiO₂ and amount of catalyst loading (0.5-2 phr). The films were fabricated using solvent casting to obtain a film thickness of 50-70 μm. The photocatalytic degradation of the films under UVA radiation (100, 150 and 200 hours) was preliminarily determined by hydroxyl index (H.I.) and carbonyl index (C.I.). Discoloration of the film and mechanical testing were also measured. It was found that TiO₂ calcined at 400-500 °C showed higher intensity of anatase phase (I_λ) as compared to TiO₂ calcined at 300 °C. Therefore, a better degradation of HIPS/TiO₂ (400-500 °C) films was obtained. However, TiO₂ doped with zinc nitrate did not significantly affect to photodegradability of the HIPS films. In addition, it was found that hydroxyl index, carbonyl index and color changes of those films were enhanced when TiO₂ and exposure time were increased. This is because TiO₂ under UV could promote a formation of active hydroxyl radical on the surface that initiates chain scission of the polymer matrix. Tensile strength and % elongation at break of the films were decreased whereas Young's modulus was greater. Furthermore topography from AFM revealed an increment in surface roughness of the films when amount of TiO₂ and irradiating time were increased.

Keywords: Photocatalytic degradation film, High impact polystyrene (HIPS), Titanium dioxide (TiO₂)

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ดังนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ รศ.ดร.ตะวัน สุขน้อย และ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธี ที่กรุณาารับเป็นที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ให้ความอนุเคราะห์ในการออกแบบวิธีการทดลอง คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำตลอดการทำโครงการพิเศษและตรวจทานรูปเล่ม

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด และ ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ ที่คอยให้คำปรึกษา และคำแนะนำต่างๆ รวมทั้งตรวจแก้ไข โครงการพิเศษให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิประสาทวิชาความรู้ ให้คำแนะนำงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และคุณสุจิต สอนสะอาด เจ้าหน้าที่ประจำอาคารฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์เทคโนโลยี ที่คอยอำนวยความสะดวกตลอดการทำโครงการ

ขอขอบพระคุณ พี่นักศึกษาปริญญาโทสาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ และปริญญาเอกสาขาปิโตรเคมีและไฮโดรคาร์บอน ที่คอยให้คำปรึกษาและคำแนะนำตลอดการทำโครงการพิเศษ

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีทุกท่าน ที่คอยอำนวยความสะดวกตลอดการทำโครงการพิเศษ

นอกจากนี้ยังมีบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลืออีกมาก ซึ่งมีได้กล่าวถึง ทางคณะผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

นางสาวนนทพร ว่องไวพานิชย์

นางสาวนารีรัตน์ ทองบุญส่ง

นางสาวนิพาตา ติ๊ะต่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 กระบวนการโฟโตแคตตาไลติก Photocatalytic	4
2.1.1 หลักการของปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิส (Fundamental of photocatalysis reaction)	4
2.1.2 พลังงานแสง	5
2.1.3 ชนิดของโฟโตแคตตาไลซิส	7
2.1.4 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	8
2.1.5 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตแคตตาไลซิส	9
2.1.6 คลื่นแสงที่พบในแสงอาทิตย์	12
2.1.7 ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO ₂)	13
2.1.8 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO)	17
2.2 พลาสติกย่อยสลายได้ด้วยแสง (Photodegradable Plastic)	19
2.3 กระบวนการกายภาพทางแสงของพอลิเมอร์	24
2.4 กระบวนการเคมีทางแสงของพอลิเมอร์	26

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5 พอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูง (High Impact Polystyrene, HIPS)	27
2.6 วิธีการฝังตัวหรืออิมเพรกเนชัน (Impregnation method)	28
2.7 กระบวนการขึ้นรูปฟิล์มแบบหล่อด้วยสารละลาย (Solvent Casting)	30
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	31
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	34
3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	34
3.2 อุปกรณ์	35
3.3 การเจือไทเทเนียมด้วยซิงค์ในเทรตด้วยกระบวนการอิมเพรกเนชัน (Impregnation Method)	36
3.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์ตัวเร่งปฏิกิริยาของ ZnO-dope TiO ₂	36
3.4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของ ZnO-dope TiO ₂	36
3.4.2 การวิเคราะห์หาปริมาณของ ZnO ที่เจือใน TiO ₂	37
3.5 การขึ้นรูปฟิล์มโดยวิธีหล่อแบบด้วยสารละลาย (Solvent casting)	38
3.6 การทดลองโดยการฉายแสงภายใต้รังสี UVA	39
3.7 การวิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม	40
3.7.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน ZnO-dope TiO ₂	40
3.7.2 วัดค่าดัชนีคาร์บอนิล (Carbonyl index) และ ค่าดัชนีไฮดรอกซิล (Hydroxyl Index)	42
3.7.3 การทดสอบความแข็งแรงดึงยืด (Tensile test)	41
3.7.4 อุณหภูมิการสลายตัว (Decomposition Temperature)	42
3.7.5 สัณฐานวิทยา (Morphology)	43
3.7.6 การวิเคราะห์โครงสร้าง	44
3.7.7 การเปลี่ยนแปลงสี	44
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	46
4.1 สมบัติทางความร้อน (Thermal properties)	47
4.2 การศึกษาผลของอุณหภูมิในการเผา TiO ₂ และการใช้ ZnO-doped TiO ₂ ที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์ม HIPS	48

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2.1 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของไททาเนียมไดออกไซด์ด้วย XRD	48
4.2.2 การวิเคราะห์หาปริมาณของ ZnO ที่เจือใน TiO ₂	51
4.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิในการเผา TiO ₂ และผลของการเจือ TiO ₂ ด้วย Zn(NO ₃) ₂ ด้วยวิธี Impregnation	52
4.3.1 การกระจายตัวของอนุภาค TiO ₂ ในฟิล์ม โดยใช้เทคนิค SEM	52
4.3.2 การวิเคราะห์ค่าดัชนีการหักเหและค่าดัชนีไฮดรอกซิล ของฟิล์มตัวอย่าง	53
4.3.3 การเปลี่ยนแปลงสี	59
4.4 การศึกษาผลของปริมาณ TiO ₂ ที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์ม HIPS	62
4.4.1 การกระจายตัวของอนุภาค TiO ₂ ในฟิล์ม โดยใช้เทคนิค SEM	62
4.4.2 การวิเคราะห์ค่าดัชนีการหักเหและค่าดัชนีไฮดรอกซิลของฟิล์ม	63
4.4.3 การเปลี่ยนแปลงสี	64
4.4.4 การหาโครงสร้างของฟิล์ม HIPS ก่อนและหลังผ่านการย่อยสลาย ด้วยแสงยูวีเอ	65
4.4.5 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวฟิล์มก่อนและ หลังการฉายแสงยูวีเอ	66
4.4.6 สมบัติเชิงกล	66
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	69
เอกสารอ้างอิง	71
ภาคผนวก ก	75
ภาคผนวก ข	82
ภาคผนวก ค	86
ภาคผนวก ง	92

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมบัติของซิงค์ออกไซด์	18
ตารางที่ 2.2 สมบัติของพอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูง (HIPS)	28
ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ HIPS	34
ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของ TiO_2	35
ตารางที่ 3.3 องค์ประกอบของฟิล์ม	38
ตารางที่ 4.1 ตารางองค์ประกอบสูตรฟิล์ม	46
ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิการสลายตัวของฟิล์ม HIPS	47
ตารางที่ 4.3 สัดส่วนความเข้มระหว่างวงภาคผลึกแบบอะนาเทสต่อ ผลึกแบบรูไทล์ (I_A/I_R)	50
ตารางที่ 4.4 ขนาดของวงภาคผลึกไททาเนียม	51
ตารางที่ 4.5 ปริมาณของ ZnO ที่เจือใน TiO_2	51

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 พลังงานของการเกิดออกซิเดชันของสารอินทรีย์	4
รูปที่ 2.2 สเปกตรัมของรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	6
รูปที่ 2.3 องค์ประกอบหลักของรังสียูวี	6
รูปที่ 2.4 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสบนสารกึ่งตัวนำไททาเนียมไดออกไซด์	9
รูปที่ 2.5 โครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์: (a) อะนาเทส, (b) รูไทล์ และ (c) บรูคไคท์	14
รูปที่ 2.6 กระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อสารกึ่งตัวนำไททาเนียมไดออกไซด์ ถูกกระตุ้นด้วยแสง	16
รูปที่ 2.7 โครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ (Zinc-blend Structure)	18
รูปที่ 2.8 โครงสร้างแบบวัตต์ไซด์ (Wurtzite Structure)	18
รูปที่ 3.1 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ (X-ray diffractometer, XRD)	37
รูปที่ 3.3 เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี (Atomic Absorption Spectroscopy, AAS)	38
รูปที่ 3.4 ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR)	40
รูปที่ 3.3 ลักษณะการวางชิ้นงานและระยะห่างของชิ้นงานกับหลอด UV	40
รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine, UTM)	42
รูปที่ 3.6 เครื่อง Thermogravimetric Analyser (TGA)	43
รูปที่ 3.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ,SEM)	43
รูปที่ 3.8 เครื่องวิเคราะห์นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (Nuclear magnetic resonance, NMR)	44
รูปที่ 3.9 เครื่องวัดสี (Colorimeter Spectrophotometer)	45
รูปที่ 3.10 การเปรียบเทียบสี	45
รูปที่ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ TiO ₂	49
รูปที่ 4.2 ภาพตัดขวางของฟิล์ม HIPS/TiO ₂ ก่อนและหลังเจือด้วย Zn(NO ₃) ₂ ที่ค่าลึงขยาย 10000 เท่า	53
รูปที่ 4.3 สเปกตรัมของฟิล์มตัวอย่าง HIPSTi1 ก่อน-หลังฉายแสงยูวีเอ 100 ชั่วโมง	54
รูปที่ 4.4 สมการการสลายตัวของ HIPS	55

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Hydroxyl Index กับเวลาในการฉายแสงยูวีเอของฟิล์มตัวอย่าง	56
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Carbonyl Index กับเวลาในการฉายแสงยูวีเอของฟิล์มตัวอย่าง	57
รูปที่ 4.7 ค่าการเปลี่ยนแปลงสี	61
รูปที่ 4.8 ภาพตัดขวางของฟิล์มที่กำลังขยาย 10000 เท่า	62
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Hydroxyl Index กับเวลาในการฉายแสงยูวีเอของฟิล์มตัวอย่าง	63
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Carbonyl Index กับเวลาในการฉายแสงยูวีเอของฟิล์มตัวอย่าง	63
รูปที่ 4.11 ค่าการเปลี่ยนแปลงสี	64
รูปที่ 4.12 NMR สเปกตรัมของ HIPS ก่อนฉายแสงยูวีเอ	65
รูปที่ 4.13 NMR สเปกตรัมของ HIPSTi2 หลังการฉายแสงยูวีเอ 200 ชั่วโมง	65
รูปที่ 4.14 พื้นผิวของฟิล์มก่อนและหลังฉายแสงยูวีเอ 200 ชั่วโมง	67
รูปที่ 4.15 สมบัติเชิงกลของฟิล์มที่มีปริมาณ TiO_2 0.5-2.0 phr ก่อนและหลังฉายแสงยูวีเอ 150 ชั่วโมง	68

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

เนื่องจากจำนวนประชากรที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้มีกิจกรรมต่างๆ ที่ต้องอาศัยทรัพยากรธรรมชาติมากขึ้น เป็นผลให้ทรัพยากรธรรมชาติลดลงอย่างรวดเร็ว จึงได้มีการคิดค้นและพัฒนาสิ่งที่สามารถทดแทนทรัพยากรธรรมชาติได้ ซึ่งคือ พลาสติก ปัจจุบันมีโรงงานอุตสาหกรรมทั้งขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่ ได้ผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่มีพลาสติกเป็นส่วนประกอบเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก เพื่อที่จะปรับปรุงปริมาณและคุณภาพให้เป็นสินค้าชนิดต่างๆ เช่น ถุงพลาสติก โตะ แก้ว ฝ้ายน้ำ และขวดน้ำพลาสติก เป็นต้น จึงก่อให้เกิดผลกระทบที่ตามมาหลากหลายด้านด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็นปริมาณของเสียทั้งหลาย ที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการจัดการที่ผิดในด้านต่างๆ เช่น การจัดการด้านการผลิต การจัดการด้านสิ่งแวดล้อมหรือของเสียที่เกิดขึ้น[1] จากการที่พลาสติกย่อยสลายได้ยากเพราะพลาสติกส่วนใหญ่เป็นพลาสติกสังเคราะห์ที่จะย่อยสลายได้ใช้เวลา 300-400 ปี อีกทั้งพลาสติกส่วนใหญ่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ย่อยสลายได้ยากและพลาสติกบางชนิดยังเกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี ทำให้มีอายุอยู่ได้หลายร้อยปี จึงเป็นปัญหาที่อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การเผาทำลาย และการย่อยสลายพลาสติกเหล่านั้นอาจทำได้ยากเพราะก่อให้เกิดมลพิษแก่สิ่งแวดล้อมได้

โดยการทำให้พลาสติกสามารถย่อยสลายสามารถทำได้หลายวิธี เช่น [2]

- 1) พลาสติกย่อยสลายทางกล (Mechanical Degradation) เป็นวิธีทั่วไป โดยการให้แรงกระทำแก่ชิ้นพลาสติก ทำให้ชิ้นส่วนพลาสติกแตกออกเป็นชิ้น
- 2) พลาสติกย่อยสลายโดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส
- 3) พลาสติกย่อยสลายโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน
- 4) พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable Plastic)
- 5) พลาสติกย่อยสลายได้ด้วยแสง (Photodegradable Plastic)

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาพลาสติกย่อยสลายได้ด้วยแสง (Photodegradable Plastic) เนื่องจากเป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมอยู่ในปัจจุบัน และแสงยังเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่ไม่มีวันหมดไปอีกทั้งยังมีการสร้างมลพิษน้อย ซึ่งการย่อยสลายด้วยแสงเกิดจากกระบวนการโฟโตแคตาไลติกที่มีแสงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายของพลาสติกด้วยแสง เนื่องจากไททาเนียมไดออกไซด์ให้ประสิทธิภาพในการเป็นโฟโตแคตาไลสต์ในระดับสูง มีราคาถูก มีความเป็นพิษต่ำและสามารถนำกลับมาใช้ได้ใหม่ [3] โดยจะแสดงประสิทธิภาพการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในช่วงแสงยูวีเอ 300-400 นาโนเมตร) เพราะผลึกอะนาเทสสามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 384 นาโนเมตร และได้ทำการปรับปรุงพื้นผิวของไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยซิงค์ออกไซด์ผ่านกระบวนการอิมเพรคเนชัน (Impregnation Method) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการย่อยสลายของพลาสติก เนื่องจากซิงค์ออกไซด์เป็นโฟโตแคตาไลติกที่ดีอีกตัวและมีช่วงการดูดกลืนแสงที่ใกล้เคียงกับไททาเนียมไดออกไซด์ [Degradation products formed during UV exposure of polyethylene ZnO nano-compo sites]

ในบรรดาพอลิเมอร์ที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง พอลิสไตรีนนับว่าเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่นิยมใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ เพราะมีความแข็งและใส แต่มีความเปราะรับแรงกระแทกไม่ดี จึงมีการพัฒนาพอลิสไตรีนให้อยู่ในรูปของพอลิสไตรีนชนิดทนต่อแรงกระแทกสูง (High Impact Polystyrene, HIPS) ซึ่งเป็นการนำยางสังเคราะห์ที่บิวทอะไดอินมาทำปฏิกิริยากับพอลิสไตรีนให้เกิดเป็นโคพอลิเมอร์ ทำให้มีสมบัติทนแรงกระแทกสูงขึ้นและมีความยืดหยุ่นได้ดีขึ้น แต่มีความขุ่นเกิดขึ้น [4] ตัวอย่างการใช้งานที่เห็นทั่วไป เช่น ขวดนมเปรี้ยว เช่นเดียวกับพลาสติกสังเคราะห์ส่วนใหญ่ HIPS ใช้คุณสมบัติในการย่อยสลายค่อนข้างสูงและเวลาในการย่อยสลายนาน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการย่อยสลายด้วยแสงของพอลิสไตรีนชนิดทนต่อแรงกระแทกสูง โดยใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการย่อยสลายด้วยแสง (Photodegradation) ในฟิล์มพอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูง (High Impact Polystyrene, HIPS) โดยใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบวิธีการทดลองและวางแผนการทดลอง
3. ดำเนินงานวิจัย

ตอนที่ 1 การเจือไททาเนียมด้วยซิงค์ในเทรตด้วยวิธีการอิมเพรเกนชัน (Impregnation Method) แล้วทำการพินิจเอกลักษณะของ ZnO-doped TiO₂

ตอนที่ 2 การขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีการหล่อแบบด้วยสารละลาย (Solution Casting) แล้วนำฟิล์มที่ได้ไปฉายแสง UVA

ตอนที่ 3 การวิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม

- วัดค่าดัชนีคาร์บอนิล (Carbonyl Index)
- วัดค่าดัชนีไฮดรอกซิล (Hydroxyl Index)
- การทดสอบความแข็งแรงดึงยืด (Tensile Test)
- สมบัติทางความร้อน
- สัณฐานวิทยา (Morphology)
- การเปลี่ยนแปลงสี

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจถึงกลไกการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายทางแสงและปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายของฟิล์มพอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูงด้วยไททาเนียมไดออกไซด์
2. สามารถเตรียมฟิล์มที่ย่อยสลายได้ดีขึ้น และสามารถนำความรู้ที่ได้เป็นแนวทางในการปรับปรุงพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ เพื่อให้ช่วยลดปัญหาภาวะโลกร้อนในอนาคต ที่เกิดจากการย่อยสลายได้ยากของพอลิเมอร์ที่มีการใช้งานในปัจจุบัน

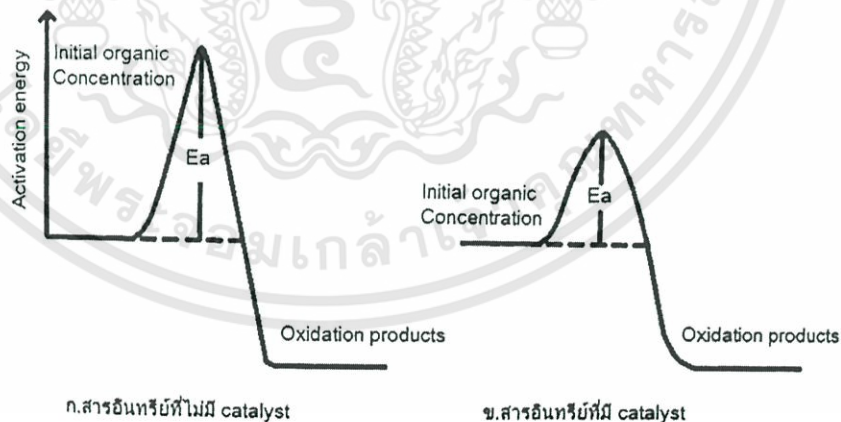
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 กระบวนการโฟโตแคตาไลติก [5]

2.1.1 หลักการของปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส (Fundamental of Photocatalysis Reaction)

กระบวนการโฟโตแคตาไลติก (Photocatalytic Process) เป็นการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ตัวแคตาไลสต์ (Catalyst) ซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ โดยการกระตุ้นด้วยแสง ตัว Catalyst นี้จะทำหน้าที่ลดพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยา รูปที่ 2.1 แสดงการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation) ของสารอินทรีย์ที่มีและไม่มีตัว Catalyst รูปที่ 2.1 (ก) แสดงพลังงานกระตุ้น (Activation Energy, E_a) ของปฏิกิริยาที่ไม่มี Catalyst ซึ่งมีค่ามาก และพลังงานของผลิตภัณฑ์จะต่ำกว่าพลังงานของสารอินทรีย์ พลังงานกระตุ้นนี้จะลดลงในปฏิกิริยาที่มีตัว Catalyst ถึงแม้ว่าพลังงานของสารอินทรีย์ และผลิตภัณฑ์ยังคงเท่าเดิม ดังรูปที่ 2.1 (ข) ตัว Catalyst นี้จะเพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยา โดยการลดพลังงานกระตุ้น อีกทั้งตัวมันเองยังตอบสนองต่อแสงดังกล่าว คือ จะเกิดการกระตุ้นได้โดยการถ่ายทอดพลังงานที่มีมากกว่าพลังงานแบนด์แกป (Band Gap)



รูปที่ 2.1 พลังงานของการเกิดออกซิเดชันของสารอินทรีย์ [5]

ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสต้องมีองค์ประกอบ คือ

- 1) แคตาลิสต์ เช่น สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)
- 2) พลังงานแสง ซึ่งมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับพลังงานโฟตอนของตัวแคตาลิสต์
- 3) น้ำ
- 4) ออกซิเจน หรือ ตัวออกซิเดนต์ (Oxidants) อื่นๆ

2.1.2 พลังงานแสง

การฉายแสงในกระบวนการ Photocatalytic นั้น เป็นการให้พลังงานกับระบบในรูปของพลังงานโฟตอน (Photon Energy) มากพอที่จะทำปฏิกิริยาขึ้นได้ ซึ่งพลังงานดังกล่าวนี้ เรียกว่าพลังงานกระตุ้น (Activation Energy) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$E = h\nu = hc/\lambda$$

เมื่อ E คือ พลังงานควอนตัม (Quantum energy), จูล

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant) (6.625×10^{-34} จูล-วินาที)

ν คือ ความถี่ของคลื่นแสง, เฮิรตซ์ หรือ วินาที⁻¹

λ คือ ความยาวคลื่นแสง, นาโนเมตร

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

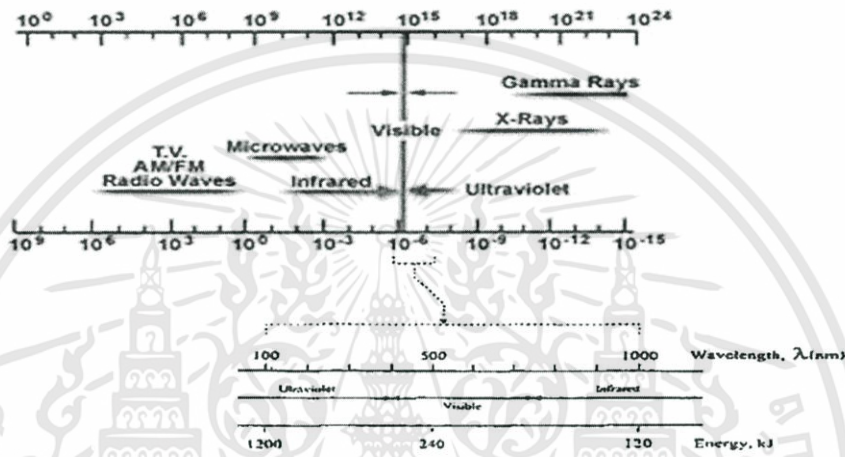
รูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของความยาวคลื่นและพลังงาน โดยพลังงานของแสงเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวคลื่นลดลง รูปที่ 2.3 แสดงสเปกตรัมของรังสียูวี ซึ่งเป็นที่สนใจในกระบวนการโฟโตแคตาไลติก ความยาวคลื่นของแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) อยู่ในช่วง 100 – 400 นาโนเมตร สำหรับความยาวคลื่นแสงที่คนมองเห็น (Visible light หรือ แสงขาว) อยู่ในช่วง 380 – 750 นาโนเมตร รังสียูวีนี้ แบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง คือ

- 1) คลื่นยาว (Long Wave UV, UV-A) อยู่ในช่วง 320-400 นาโนเมตร

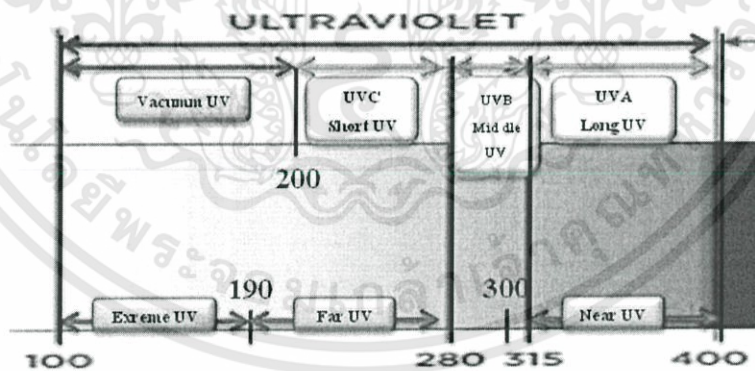
2) คลื่นกลาง (Middle Wave UV, UV-B) อยู่ในช่วง 280-320 นาโนเมตร

3) คลื่นสั้น (Short Wave UV, UV-C) อยู่ในช่วง 200-280 นาโนเมตร

ความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า 200 นาโนเมตร มีความสำคัญน้อยมาก เพราะรังสีอยู่ในช่วง Vacuum UV ซึ่งจะถูกดูดกลืนในอากาศจนหมดในช่วงระยะทางสั้นๆ ที่แสงเดินทาง



รูปที่ 2.2 สเปกตรัมของรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [5]



รูปที่ 2.3 องค์ประกอบหลักของรังสียูวี

แสงอาทิตย์มีช่วงความยาวคลื่นที่กว้างมาก ความเข้มของแสงยูวีและแสงขาวที่ส่องลงมายังพื้นผิวโลก จะถูกทำให้ลดลงอย่างมากในชั้นบรรยากาศจากการดูดกลืนและการกระเจิงของแสงที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 320 นาโนเมตร ความเข้มของแสงจะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถูกดูดกลืนโดยโอโซนในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ (สูงจากพื้นผิวโลกในช่วงประมาณ 10 – 35 ไมล์) และที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 288 นาโนเมตร มีรังสีที่แผ่มาถึงพื้นโลกน้อย ดังนั้นแสง UV ที่ส่องมายังพื้นโลกจึงมีขีดจำกัด

ในกระบวนการโฟโตแคตาไลติกที่ใช้สารไททาเนียมไดออกไซด์ เป็นตัวแคตาลิสต์นั้น เนื่องจากไททาเนียมไดออกไซด์มีพลังงานแบนด์แกปประมาณ 3.2 โวลต์ ดังนั้นการให้พลังงานกับระบบจึงต้องให้พลังงานมากกว่าหรือเท่ากับพลังงานแบนด์แกป ปฏิริยาโฟโตแคตาไลซิสจึงจะเกิดขึ้นได้ ซึ่งช่วงของแสง UV ที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 400 นาโนเมตร จะให้ค่าพลังงานที่มากกว่าหรือเท่ากับพลังงานแบนด์แกปของไททาเนียมไดออกไซด์ แต่เนื่องจากแสงอาทิตย์ที่ส่งมายังพื้นผิวโลกมีช่วงแสงที่เป็น UV ในปริมาณน้อยมาก คือ เฉพาะช่วง 350 – 400 นาโนเมตร เท่านั้น ปัจจุบันจึงมีงานวิจัยที่มุ่งเน้นการปรับปรุงไททาเนียมไดออกไซด์ให้มีความสามารถที่จะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงแสงอาทิตย์ [3]

2.1.3 ชนิดของกระบวนการโฟโตแคตาไลซิส

โฟโตแคตาไลซิส สามารถแยกได้ 2 ประเภท เมื่อพิจารณาจากสถานะของตัวแคตาลิสต์ ดังนี้

- 1) โฟโตแคตาไลซิสแบบสถานะเดียว (Homogeneous Photocatalysis) เป็นกระบวนการที่ใช้ Catalyst ซึ่งมีสถานะเดียวกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด (โดยทั่วไปแล้วจะเป็นของเหลว) เช่น การย่อยสลาย 2,4 Dinitrofluorene โดยใช้ UV/H₂O₂
- 2) โฟโตแคตาไลซิสแบบสถานะต่าง (Heterogeneous Photocatalysis) เป็นกระบวนการที่ใช้ตัว Catalyst ซึ่งมีสถานะต่างกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด เช่น ย่อยสลาย 2-Chlorophenol โดยใช้ UV/TiO₂

สารกึ่งตัวนำมีมากมายหลายชนิด หนึ่งในจำนวนสารกึ่งตัวนำหลายๆ ชนิดที่นิยมใช้กันในปฏิริยาโฟโตแคตาไลซิส คือ ไททาเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากไททาเนียมไดออกไซด์ มีราคาไม่แพง ไม่เป็นพิษ ความสามารถในการละลายต่ำ ความเสถียรสูง นอกจากนั้นได้มีการศึกษาเปรียบเทียบสารกึ่งตัวนำหลายๆ ชนิดที่นำมาใช้ในปฏิริยาโฟโตแคตาไลซิส พบว่าการใช้ไททาเนียมไดออกไซด์แบบแขวนลอย สามารถเกิดปฏิริยาได้อย่างรวดเร็ว แต่เนื่องจากไททาเนียมได

ออกไซด์มีแบนด์แกปประมาณ 3.2 โวลต์ ซึ่งมากกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ โดยส่วนใหญ่ ทำให้ต้องใช้พลังงานแสงในช่วงของแสงยูวี ($\lambda \leq 400$ นาโนเมตร) แต่เนื่องจากในแสงอาทิตย์ที่ส่องมาถึงพื้นโลกมีแสงยูวีน้อยกว่า 1% ทำให้ไม่สามารถใช้แสงธรรมชาติในการทำการทดลองได้ เนื่องจากเวลาให้การทดลองที่จำกัด จึงจำเป็นต้องใช้แสงจากหลอดรังสียูวีเป็นแหล่งกำเนิดแสง (พลังงาน) เพื่อย่นระยะเวลาในการทำการทดลอง

2.1.4 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา

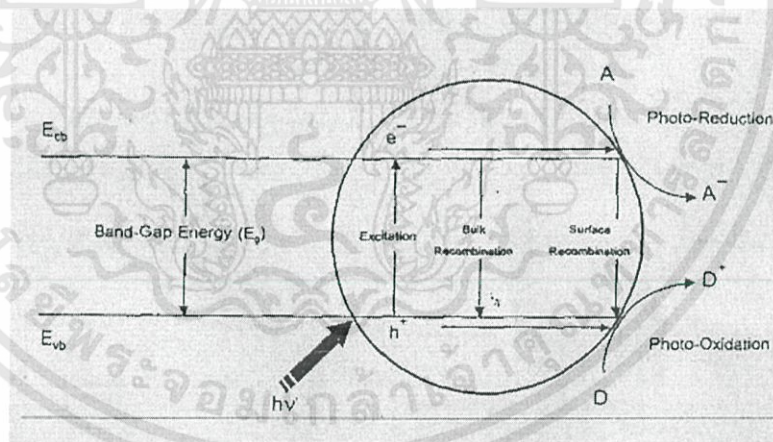
สารที่ใช้เป็น Catalyst ในปฏิกิริยา Photocatalysis ได้แก่

- 1) โลหะตัวนำ (Transition Metal) เช่น ทองแดง โคโรเมียม นิกเกิล เป็นต้น
- 2) สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่น ไททาเนียมไดออกไซด์ แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) สังกะสีออกไซด์ (ZnO) เป็นต้น

องค์ประกอบของโลหะตัวนำและสารกึ่งตัวนำ ประกอบด้วยวาเลนซ์แบนด์ (Valence Band) และคอนดักชันแบนด์ (Conduction Band) ในโลหะตัวนำจะมีวาเลนซ์แบนด์และคอนดักชันแบนด์ติดกัน แต่ในสารกึ่งตัวนำวาเลนซ์แบนด์ และคอนดักชันแบนด์จะไม่ติดกัน โดยเกิดเป็นช่องว่างซึ่งเรียกว่าแบนด์แกป (Band Gap) เมื่ออิเล็กตรอน (Electron, e^-) ที่อยู่ในวาเลนซ์แบนด์ได้รับพลังงานโฟตอนจากแสง ($h\nu$) อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังคอนดักชันแบนด์ ในขณะเดียวกันที่บริเวณวาเลนซ์แบนด์จะเกิดโฮล (Hole, h^+) ซึ่งเป็นประจุบวกสามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระในวาเลนซ์แบนด์ ส่วนคอนดักชันแบนด์อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่มาจากวาเลนซ์แบนด์เคลื่อนที่อย่างเป็นอิสระทั่วคอนดักชันแบนด์เช่นกัน ปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน – โฮล (Electron – Hole Pairs, e^-/h^+) สามารถเคลื่อนที่ไปมาระหว่างวาเลนซ์แบนด์และคอนดักชันแบนด์ได้ง่ายและรวดเร็ว เพราะไม่มีแบนด์แกป เหตุนี้จึงเป็นสาเหตุให้ e^-/h^+ รวมตัวกันใหม่ได้ง่าย สำหรับโลหะตัวนำ ในทางตรงกันข้ามนั้นการรวมตัวกันใหม่ของ e^-/h^+ ในสารกึ่งตัวนำเกิดได้ยาก เพราะว่ามีแบนด์แกปคั่นอยู่ ทำให้คู่ e^-/h^+ แยกจากกันได้นาน ข้อแตกต่างของพลังงานแบนด์แกปของโลหะตัวนำ สารกึ่งตัวนำ และฉนวนแยกได้ยาก ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายปัจจัย ได้แก่ ระดับพลังงานแบนด์แกป ระดับพลังงานคอนดักชันแบนด์ และระดับพลังงานวาเลนซ์แบนด์

ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสในน้ำประกอบด้วยแสงที่ส่องผ่านน้ำไปยังตัวแคตาไลสต์ ซึ่งมีพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ที่สูงกว่าพลังงานแบนด์แกปของตัวแคตาไลสต์ ซึ่งอิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นจากวาเลนซ์แบนด์ ให้เคลื่อนที่ไปยังคอนดักชันแบนด์ ผลคือทำให้เกิด e^-/h^+ ซึ่งจะวิ่งกระจายอยู่ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำรูปที่ 2.4

ปฏิกิริยาจะเกิดบนผิวคอนดักชันแบนด์ และเกิดขึ้นในสารละลาย ดังนี้ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนจากคอนดักชันแบนด์ไปยังตัวรับอิเล็กตรอน (Electron Acceptor) ในสารละลาย เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ส่วนอีกด้านหนึ่ง คือ วาเลนซ์แบนด์ซึ่งมี h^+ จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) โดยตัวสารละลายทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน (Electron Donor) ในสภาวะปกติความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของอิเล็กตรอนที่คอนดักชันแบนด์ไม่มีศักยภาพพอที่จะบำบัดสารอินทรีย์ได้ แต่เนื่องจากในระบบบำบัดมีออกซิเจนละลายน้ำอยู่ (O_2) ออกซิเจนนี้จะเป็นตัวรับ e^- เกิดปฏิกิริยารีดักชัน ได้เป็น Superoxide Redical ($O_2^{\cdot-}$) ซึ่งเป็นตัวออกซิเดนต์ที่แรงมาก สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ ได้ แต่ในทางตรงกันข้าม h^+ ที่วาเลนซ์แบนด์เป็นตัวออกซิเดนต์ที่แรงมากเช่นกัน



รูปที่ 2.4 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสบนสารกึ่งตัวนำไททาเนียมไดออกไซด์ [5]

2.1.5 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตแคตาไลซิส [3]

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตแคตาไลซิส ได้แก่ ค่าพีเอช (pH) ความเข้มข้นของอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนละลาย (Dissolved Oxygen) และความเข้มของแสง (Light Intensity)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.ค่าพีเอช (pH) ประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสขึ้นอยู่กับค่าพีเอชในสารละลายซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากค่าพีเอชมีผลต่อความสามารถในการดูดเกาะของสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากประจุไฟฟ้าที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจะเปลี่ยนไปเมื่อค่าพีเอชสูงหรือต่ำ โดยจะเป็นบวกที่ค่าพีเอชต่ำและมีค่าเป็นลบที่เมื่อค่าพีเอชสูงขึ้น สำหรับไททาเนียมไดออกไซด์ ค่าพีเอชที่ทำให้ประจุเป็นกลาง (Isoelectric Point) คือ 6-6.3 และไฮดรอกซิลเรดิคัลมีความสำคัญในการทำปฏิกิริยาที่ค่าน้อยกว่า 3 และค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงไปยังทำให้ช่องว่างของสารกึ่งตัวนำประเภทโลหะออกไซด์ (Metal Oxide) เปลี่ยนแปลงได้ 0.059 mV/pH unit

2.ความเข้มข้นของอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO₂ Dosage) อนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ในสารละลายทำหน้าที่ให้ไฮดรอกซิลเรดิคัลทำปฏิกิริยา และเร่งให้เกิดปฏิกิริยาการกำจัดสารปนเปื้อน และทำหน้าที่เป็นตัวกลางให้สารอินทรีย์ในสารละลายยึดเกาะ โดยการยึดเกาะของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ขึ้นอยู่กับปริมาณและขนาดของอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ ดังนั้นพื้นที่ผิวจึงเป็นปัจจัยหนึ่งในปัจจัยควบคุมการเกิดปฏิกิริยา แต่ปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ที่มากเกินไปในสารละลายจะทำให้ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสลดลง เนื่องจากอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์จะไปขัดขวางแสงที่ส่องไปยังสารละลาย ทำให้ปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ที่ถูกกระตุ้นด้วยอนุภาคแสงและปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลลดลง ปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในการศึกษาเรื่องโฟโตออกซิเดชัน ส่วนใหญ่มีความเข้มข้น 1-5 กรัมต่อลิตร

3.อุณหภูมิจากข้อมูลทางจลนศาสตร์อุณหภูมินับว่าเป็นปัจจัยสำคัญต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาจากสมการของอาร์เรเนียส ได้ดังนี้

$$K = Ae^{-E_a/RT}$$

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

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

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

R = ค่าคงที่ (8.314 จูล/โมล เคลวิน)

$T =$ อุณหภูมิสัมบูรณ์, เคลวิน (Absolution temperature, K)

โดยสามารถหาพลังงานกระตุ้น (E_a) ได้จากความชันของกราฟลอการิทึมที่เขียนกราฟระหว่างค่าคงที่อัตราการทำปฏิกิริยา (K) กับค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ $1/T$

$$\ln K = \frac{-E_a}{RT} + \ln A$$

ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการทำปฏิกิริยาของ e_{cb}^- และ h_{vb}^+ กับสารปนเปื้อนในสารละลายมีค่ามากกว่าอัตราการกลับมารวมตัวกันใหม่ของ e_{cb}^- และ h_{vb}^+ และอาจเนื่องมาจากความถี่ในการชนกันของโมเลกุลมีมากกว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และอาจเนื่องมาจากการลดลงของพลังงานกระตุ้นในการทำปฏิกิริยา

4. ปริมาณออกซิเจนละลาย (Dissolved Oxygen) อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายเพิ่มขึ้น ออกซิเจนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส เพราะออกซิเจนจะยึดเกาะบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา ทำหน้าที่ยึดจับ e_{cb}^- ที่คอนดักชันแบนด์ ทำให้เกิดซูเปอร์ออกไซด์ไอออน และจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออน (H^+) ต่อไปได้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ด้วยเหตุนี้ออกซิเจนจึงทำหน้าที่เป็นตัวยึดเวลาการกลับมารวมตัวกันใหม่ของ e_{cb}^- และ h_{vb}^+ นอกจากนี้ออกซิเจนยังทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลอีกด้วย

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

$$\text{จำนวนโฟตอนที่ตกกระทบบน} = \frac{\text{พลังงานของแสงทั้งหมดที่ตกกระทบบน}}{\text{พลังงานของแสง 1 โฟตอน}}$$

$$= E_t / h\nu$$

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

ซึ่งมีสมมุติฐานว่า 1 โฟตอน จะทำให้เกิด 1 โฟโตอิเล็กตรอน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า
จำนวนโฟโตอิเล็กตรอน \sim จำนวนโฟตอน \sim ความเข้มแสง

การที่จะกระตุ้นไททาเนียมไดออกไซด์ให้เกิด e_{cb}^- และ h_{vb}^+ ต้องใช้ความยาวคลื่นประมาณ 390 นาโนเมตร หรือต้องใช้พลังงานอย่างน้อย 3.2 อิเล็กตรอน โวลต์ ซึ่งความเข้มแสงมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ ที่ระดับความเข้มแสงต่ำ อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสงที่ระดับความเข้มแสงปานกลาง อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะแปรผันตามรากที่สองของความเข้มแสง และที่ระดับความเข้มแสงสูง อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะไม่ขึ้นกับความเข้มแสง และอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่คงที่ เมื่อถึงจุดจำกัดของการเคลื่อนย้ายมวล (Quantum efficiency of degradation = สัดส่วนของการสลายตัวต่อจำนวนโฟตอนที่ใช้) จะมีค่าคงที่ที่ระดับความเข้มต่ำ และจะแปรผกผันกับรากที่สองของความเข้มแสงที่ระดับความเข้มแสงปานกลาง และจะแปรผกผันกับความเข้มแสงที่ระดับความเข้มแสงสูง

2.1.6 คลื่นแสงที่พบในแสงอาทิตย์ [6]

แสงแดดประกอบด้วยแสงในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ดังนี้

1. กลุ่มคลื่นแสงที่ตามองเห็น (Visible Light) ซึ่งมีความยาวคลื่น 400-800 นาโนเมตร เป็นกลุ่มคลื่นแสงสีต่างๆ ตั้งแต่คลื่นแสงสีม่วง สีคราม สีน้ำเงิน สีเขียว สีเหลือง สีแสด และสีแดง เรียงตามลำดับความยาวคลื่นจากน้อยไปหามาก คลื่นแสงกลุ่มนี้เป็นคลื่นแสงที่ประสาทตามนุษย์สามารถรับรู้ได้ ทำให้เราสามารถมองเห็นสิ่งต่างๆ ได้ และเป็นคลื่นแสงที่พืชใช้สังเคราะห์แสงสร้างชีวมวล (Biomass; มวลรวมของสสารที่เกิดขึ้นจากกระบวนการในการดำรงชีวิตและเติบโตของสิ่งมีชีวิต ซึ่งรวมถึงพืช สัตว์ และจุลินทรีย์)

2. กลุ่มคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นยาวกว่าความยาวคลื่นช่วงที่ตามองเห็นได้ เป็นคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 800 นาโนเมตรขึ้นไป ได้แก่ คลื่นรังสีความร้อน คลื่นรังสีอินฟราเรด ที่ประสาทสัมผัสของเราสามารถรับรู้ได้ในรูปของความร้อน แสงแดดจึงเป็นแหล่งพลังงานความร้อนจากธรรมชาติที่สิ่งมีชีวิตบนพื้นโลกได้ใช้ประโยชน์

3. กลุ่มคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่าความยาวคลื่นช่วงที่ตามองเห็นได้ เป็นคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่า 400 นาโนเมตรลงไป ได้แก่ รังสีหรือคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet)

2.1.7 ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO_2) [7-9]

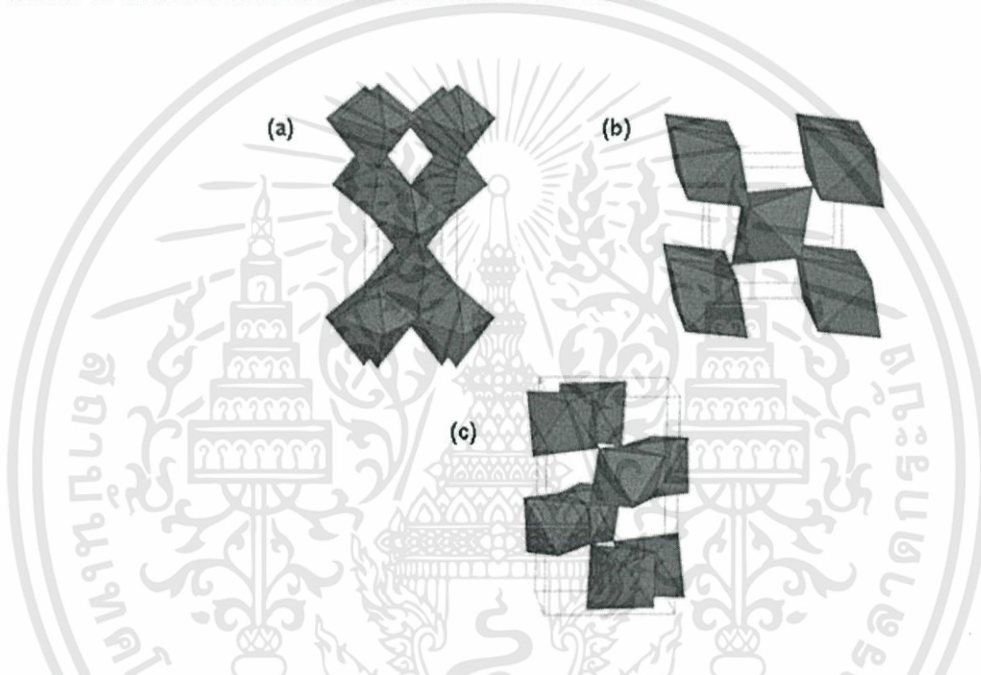
ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นสารเร่งปฏิกิริยาดำรงด้วยแสงกึ่งตัวนำซึ่งมีแถบช่องว่างพลังงาน 3.2 eV โดยแถบช่องว่างนี้จะขยายกว้างมากขึ้นเมื่อมีอนุภาคแสง (Photons) ตกกระทบ ซึ่งจะส่งผลให้อิเล็กตรอนย้ายตำแหน่งจากวาเลนซ์แบนด์ไปยังคอนดักชันแบนด์ เมื่อรังสียูวีจากแสงอาทิตย์ตกกระทบไปยังไททาเนียมไดออกไซด์จะส่งผลให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิลและซูเปอร์ออกไซด์ประจุลบ ซึ่งมีอำนาจในการเปลี่ยนสารประกอบอินทรีย์ (VOCs) ที่มาเกาะติดอยู่บนผิวหน้าของสารเร่งปฏิกิริยาดำรงด้วยแสง (Photocatalyst) ให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ อีกทั้งยังช่วยกำจัดเชื้อแบคทีเรีย ไวรัส เชื้อรา และเชื้อโรคชนิดอื่นๆ ได้อีกเช่นกัน เทคโนโลยี PCO (Photocatalytic Oxidation) จะช่วยประหยัดพลังงาน ยืดอายุการใช้งาน และลดการซ่อมบำรุงรักษาเครื่องฟอกอากาศของคุณ

TiO_2 ได้ถูกพบมานานหลายทศวรรษ เป็นสารที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายและมีประโยชน์หลากหลาย เช่น ใช้ในยาสีฟันและสีทาอาคาร TiO_2 เป็นสารที่ปลอดภัยและถูกใช้ในเครื่องสำอางค์ ลิปสติก ครีมกันแดด แป้ง สบู่ หรือใช้ในผลิตภัณฑ์บรรจุอาหาร และผสมในยาสูบ TiO_2 เป็นสารที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย ในการบำบัดน้ำ อากาศ และก๊าซพิษ เพราะ TiO_2 เป็นสาร Photocatalyst ที่มีประสิทธิภาพที่สามารถสลายสารประกอบอินทรีย์เกือบทุกชนิดเมื่ออยู่ภายใต้แสงอาทิตย์ มีผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมและสุขภาพมากมายที่ผลิตขึ้น โดยอาศัยคุณประโยชน์เหล่านี้ของ TiO_2 เช่น เสื้อผ้าที่ทำความสะอาดตัวเองได้ กระเบื้องปราศจากเชื้อโรค และการใช้ TiO_2 เพื่อสลายไนโตรเจนไดออกไซด์จากอากาศให้สามารถถูกชะล้างไปได้ง่าย อีกตัวอย่างหนึ่งของประโยชน์ของ TiO_2 คือใช้สลายฮอร์โมนที่เร่งการสุกของพืชผัก และเก็บรักษาดอกไม้ที่ถูกตัดเก็บไว้ หรือใช้สลายก๊าซพิษต่างๆ เช่น Trichloroethylene จากน้ำ หรือสลายสารพิษจากสาหร่ายสีน้ำตาล

ไททาเนียมไดออกไซด์ที่พบตามธรรมชาตินั้นมีโครงสร้างผลึก 4 ชนิดหลักคือ

- อะนาเทส (Anatase) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเทตระโกนอล (Tetragonal)
- บรูคไคต์ (Brookite) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic)
- รูไทล์ (Rutile) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเทตระโกนอล (Tetragonal)
- ไททาเนียมบี ($\text{TiO}_2(\text{B})$) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิก (Monoclinic)

โครงสร้างผลึกอะนาเทส, รูไทล์, และบรูคไท์ สามารถแสดงได้ในรูปของ TiO_2 ที่เป็นปิระมิดฐานสี่เหลี่ยมสองอันประกบกันหรือออกทะฮีดรอล (Octahedral) โดยโครงสร้างผลึกทั้ง 3 ชนิดนี้มีความแตกต่างกันเนื่องมาจากการบิดตัวของแต่ละออกทะฮีดรอลที่เรียงต่อกันและจากรูปแบบการเรียงตัวของออกทะฮีดรอล โดยโครงสร้างผลึกอะนาเทสเกิดมาจากการเรียงตัวต่อกันโดยใช้ส่วนยอดของแต่ละออกทะฮีดรอล ในขณะที่โครงสร้างผลึกรูไทล์เกิดมาจากการเรียงตัวต่อกันโดยใช้ส่วนขอบของแต่ละออกทะฮีดรอล และโครงสร้างผลึกบรูคไท์เกิดมาจากการเรียงตัวต่อกันโดยใช้ทั้งส่วนยอดและส่วนขอบของแต่ละออกทะฮีดรอล

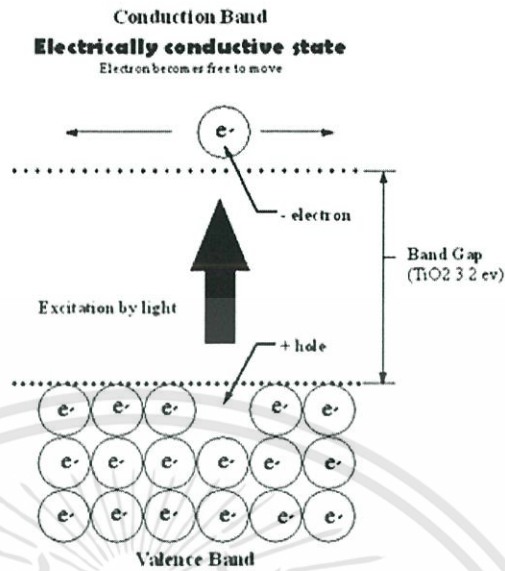


รูปที่ 2.5 โครงสร้างผลึกของไททานเนียมไดออกไซด์: (a) อะนาเทส, (b) รูไทล์ และ (c) บรูคไท์ [7]

ถึงแม้ว่าโครงสร้างผลึกของไททานเนียมไดออกไซด์มีอยู่หลายชนิดตามที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่อะนาเทสและรูไทล์เป็นโครงสร้างผลึกที่พบเป็นส่วนใหญ่ โดยปกติแล้วโครงสร้างผลึกอะนาเทสสามารถเปลี่ยนโครงสร้างเป็นโครงสร้างผลึกรูไทล์ได้ที่อุณหภูมิมากกว่า $600^{\circ}C$ นับจนถึงปัจจุบันได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกจากอะนาเทสเป็นรูไทล์เป็นอย่างมาก เนื่องจากโครงสร้างผลึกของไททานเนียมไดออกไซด์เป็นตัวแปรที่สำคัญมากตัวแปรหนึ่งที่จะกำหนดประสิทธิภาพในการประยุกต์ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบปกติ (ไม่ใช่แสงร่วม) หรือเซรามิกส์ที่ใช้ทำเยื่อแผ่นบาง (Membrane) โดยนอกจากอุณหภูมิแล้วยังมีอีกหลายปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนโครงสร้างผลึกดังกล่าวได้แก่ ความดัน ปริมาณของผลึก ความไม่สมบูรณ์ของผลึก และขนาดของผลึก

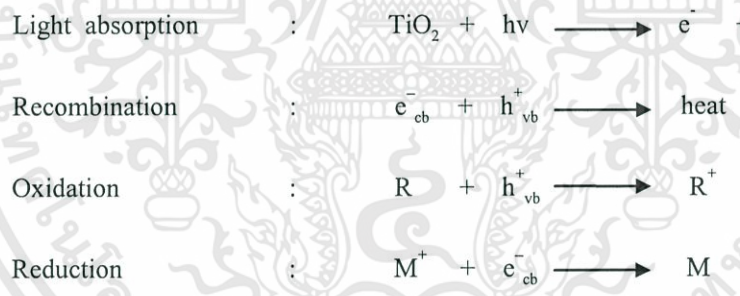
ในการประยุกต์ใช้ไททาเนียม ไดออกไซด์ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม โครงสร้างผลึกทั้งอะนาเทสและรูไทล์เป็นที่นิยมนำมาศึกษากัน โดยทั่วไป สำหรับปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม โดยปกตินั้น โครงสร้างผลึกอะนาเทสให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกรูไทล์ อย่างไรก็ตามในบางปฏิกิริยา โครงสร้างผลึกรูไทล์หรือโครงสร้างผลึกผสมระหว่างอะนาเทสและรูไทล์ เช่น อะนาเทส 70-75% และรูไทล์ 30-25% ถูกรายงานว่าให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกอะนาเทส โดยทั้งนี้ทั้งนั้นมีตัวแปรหลายอย่างที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการเร่ง ปฏิกิริยาของแต่ละโครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์ ได้แก่ พื้นที่ผิว การกระจายตัวของรูพรุน ขนาดของอนุภาคผลึก และที่สำคัญมากคือ วิธีการที่ใช้ในการสังเคราะห์ผลึกไททาเนียม

เนื่องจากไททาเนียม ไดออกไซด์มีตำแหน่งที่ว่างของออกซิเจนในโครงสร้างผลึก ไททาเนียมไดออกไซด์จึงจัดได้ว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type semiconductor) ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วมที่เป็นสารกึ่งตัวนำนั้นจะมีความสามารถในการดูดซับสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยา 2 ชนิดไปพร้อมๆ กัน ซึ่งสามารถก่อให้เกิดทั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน โดยการกระตุ้นด้วยการดูดกลืนโฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าค่าพลังงานแบนด์แกป ความสามารถของสารกึ่งตัวนำที่จะถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปยังสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาที่ถูกดูดซับไว้นั้นขึ้นอยู่กับตำแหน่งของพลังงานแบนด์แกปของสารกึ่งตัวนำและตำแหน่งของศักย์พลังงานในการเกิดรีดอกซ์ (Redox) ของสารที่ถูกดูดซับ โดยปกติแล้วระดับของพลังงานที่ต่ำที่สุดของคอนดักชันแบนด์จะเป็นระดับของศักย์พลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันด้วยอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น ในทางกลับกันระดับของพลังงานที่สูงที่สุดของวาเลนซ์แบนด์จะเป็นระดับศักย์พลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยโฮลที่เหลืออยู่หลังจากที่อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นไปแล้ว



รูปที่ 2.6 กระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อสารกึ่งตัวนำไททาเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยแสง [7]

กระบวนการโฟโตแคตาไลซิสโดยมีไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแสดงได้ดังสมการ



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

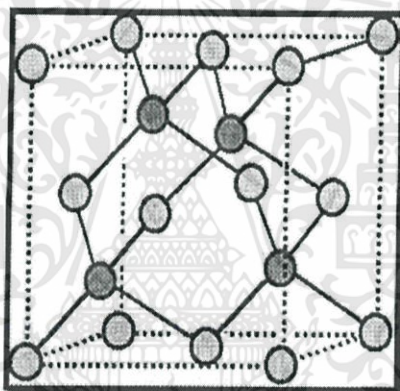
2.1.8 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) [10-11]

ซิงค์ออกไซด์เป็นสารประกอบอนินทรีย์ มีสูตรโมเลกุลคือ ZnO ซึ่งมีลักษณะเป็นผงขาว มีจุดหลอมเหลวเท่ากับ 1975°C และมีจุดเดือดเท่ากับ 2360°C ZnO มีโครงสร้าง 2 แบบ คือ โครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ (Zinc-blend Structure) อะตอมมีการจัดเรียงตัวกันในรูปแบบสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ (Cubic) แสดงดังรูปที่ 2.7 และโครงสร้างแบบวัตต์ไซด์ (Wurtzite Structure) อะตอมมีการจัดเรียงตัวแบบหกเหลี่ยม (Hexagonal) แสดงดังรูปที่ 2.8 ซึ่ง ZnO ที่มีโครงสร้างแบบวัตต์ไซด์มีจำนวนมากกว่า ZnO ที่มีโครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ เนื่องจากโครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์พบได้ที่อุณหภูมิสูงเท่านั้น

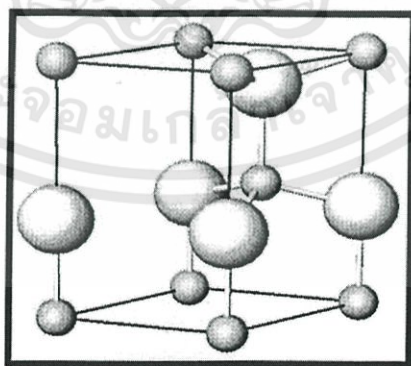
ZnO มีช่องว่างแถบพลังงาน มีค่าเท่ากับ 3.37 eV ซึ่งมีความกว้างมาก และมีค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding Energy) สูงเท่ากับ 60 มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์ (meV) และเมื่อนำซิงค์ออกไซด์ไปศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์เอฟเฟกต์ (Hall Effect) พบว่าพาหะข้างมากเป็นอิเล็กตรอน ดังนั้น ZnO จึงมีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จากสมบัติดังกล่าวจึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับงานหลากหลาย เช่น เซรามิกส์ วาริสเตอร์ (Varistor) เพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ (Piezoelectric Transducers) เซนเซอร์ทางเคมี (Chemical Sensor) สารป้องกันรังสียูวี (UV Protector) โฟโตแคตาไลสต์และตัวดูดคลื่นรังสีไมโครเวฟ (Microwave Absorbers) เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันนี้การประยุกต์ใช้ซิงค์ออกไซด์ในงานด้านโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric) ได้รับความสนใจเป็นจำนวนมาก เช่น การฉายแสงยูวี ทรานซิปาร์นต์อิเล็กทรอนิกส์ (Transparent Electronics) พลังงานสูง วัสดุที่ใช้เป็นกระจกสำหรับหน้าจอสอลาร์เซลล์ (Solar Cells) เป็นต้น ZnO เป็นวัสดุในกลุ่มโลหะออกไซด์ ซึ่งมีสมบัติดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติของซิงค์ออกไซด์

สูตรทางเคมี	ZnO
มวลโมเลกุล	81.408 กรัมต่อโมล
ขนาดอนุภาค	0.0240 – 0.0710 ไมโครเมตร
กลิ่น	ไม่มีกลิ่น
ความหนาแน่น	5.606 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร
จุดหลอมเหลว	1975 °C
จุดเดือด	2360 °C
ความสามารถในการละลายน้ำ	0.16 มิลลิกรัมต่อ 100 มิลลิกรัม



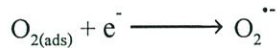
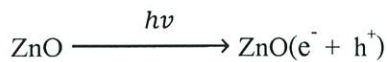
รูปที่ 2.7 โครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ (Zinc-blend Structure) [11]



รูปที่ 2.8 โครงสร้างแบบวัตต์ไซด์ (Wurtzite Structure) [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินไป โดยมี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแสดงได้ดังสมการ



กลไกปฏิกิริยาโดยใช้แสงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิเอทิลีน โดยมี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังที่เห็นตามสมการด้านบน แสดงให้เห็นว่าเมื่ออนุภาค ZnO ดูดซับแสง UV ที่ความยาวคลื่นน้อยกว่า 378 nm ทำให้เกิดการสร้างอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่และ Hole ขึ้น จากนั้น O_2 จะนำไปสู่การสร้างสปีชีส์ของออกซิเจนที่มีความว่องไว (Active Oxygen Species) เช่น อนุมูลไฮดรอกซิล (HO^{\cdot}), แอนไอออนิกออกซิเจน ($\text{O}_2^{\cdot -}$) และเปอร์ออกไซด์ (HO_2^{\cdot}) เป็นต้น โดยที่ HO^{\cdot} เป็นตัวออกซิเดนต์ที่สำคัญในปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยใช้แสงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์และเกิดการสลายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์

2.2 พลาสติกย่อยสลายได้ด้วยแสง (Photodegradable Plastic) [1-2]

ด้วยจำนวนประชากรของโลกที่เพิ่มมากขึ้น และกิจกรรมต่างๆ ที่มนุษย์ทำต้องอาศัยทรัพยากรธรรมชาติมากขึ้นกว่าเมื่อครั้งอดีตทรัพยากรธรรมชาติจึงลดลงอย่างรวดเร็ว มนุษย์จึงต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คิดค้นและพัฒนาหาสิ่งที่จะนำมาทดแทนทรัพยากรธรรมชาติ ซึ่งสิ่งที่ได้ออกมาคือ “พลาสติก” แต่ด้วยสมบัติที่ทนทาน มีอายุการใช้งานนานเป็นร้อยปีของพลาสติกกลับสร้างปัญหาใหญ่ นั่นคือขยะพลาสติกที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมขึ้นมาแทน เพราะการเผาทำลายย่อยสลายพลาสติกเหล่านั้นก่อให้เกิดมลพิษแก่สิ่งแวดล้อม นักวิทยาศาสตร์จึงต้องหาทางแก้ไขปัญหานั้น ซึ่งพลาสติกย่อยสลายได้ (Degradable Plastics) เป็นแนวทางหนึ่งในการพัฒนาวัสดุสำหรับการใช้งานเพื่ออนุรักษ์สิ่งแวดล้อม ทั้งในด้านวัตถุดิบ กระบวนการผลิต และกระบวนการกำจัด

การค้นพบพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้นี้ ทำให้มนุษย์สามารถหาวัสดุทดแทนการใช้พลาสติกจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีแบบดั้งเดิม (Commodity Plastics) ได้ เพราะมีสมบัติในการใช้งานได้เทียบเคียงกัน



หลักการง่ายๆ ของการย่อยสลายพลาสติกคือ การทำให้พันธะเคมีของพลาสติกอ่อนแอลง ซึ่งมีอยู่หลากหลายวิธีด้วยกัน นั่นคือ การย่อยสลายทางกล (Mechanical Degradation) พลาสติกย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางเคมีโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidatively Degradable Plastic) พลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytically Degradable Plastic) พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable Plastic) และพลาสติกย่อยสลายได้ด้วยแสง (Photodegradable Plastic)

1. การย่อยสลายทางกล (Mechanical Degradation)

การย่อยสลายทางกลเป็นการให้แรงกระทำแก่ชิ้นพลาสติก ทำให้ชิ้นส่วนพลาสติกแตกออกเป็นชิ้น ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้โดยทั่วไปในการทำให้พลาสติกแตกเป็นชิ้นเล็กๆ เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการย่อยสลายต่อไป

2. พลาสติกย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางเคมีโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidatively Degradable Plastic)

การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติก เป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจน และความชื้น แสงยูวี หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (Stabilizing Additive) แสงและความชื้นจะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ RO และ OH) ที่ไม่เสถียรและเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว แต่ด้วยเทคโนโลยีการผลิตที่ได้รับการวิจัยและพัฒนาขึ้นในปัจจุบันทำให้พอลิโอเลฟินเกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนได้เร็วขึ้นภายในช่วงเวลาที่กำหนด โดยการเติมสารเติมแต่งที่เป็นเกลือของโลหะทรานสิชัน ซึ่งทำหน้าที่แคตตาลิสต์เร่งการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์เป็นอนุมูลอิสระ (Free Radical) ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลรวดเร็วยิ่งขึ้น

3. พลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytically Degradable Plastic)

การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิเอโนไซครายด์ พอลิคาร์บอเนต และพอลิยูรีเทน ผ่านปฏิกิริยาก่อให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้แคตตาลิสต์ (Catalytic Hydrolysis) และไม่ใช้แคตตาลิสต์ (Non-Catalytic Hydrolysis) ซึ่งประเภทแรกยังแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ แบบที่ใช้แคตตาลิสต์จากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (External Catalytic Degradation) และแบบที่ใช้แคตตาลิสต์จากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์เองในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (Internal Catalytic Degradation) โดยแคตตาลิสต์จากภายนอกมี 2 ชนิด คือ แคตตาลิสต์ที่เป็นเอนไซม์ต่างๆ (Enzyme) เช่น Depolymerase lipase esterase และ Glycohydrolase ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ และแคตตาลิสต์ที่ไม่ใช่เอนไซม์ (Non-enzyme) เช่น โลหะแอลคาไลด์ (Alkaline Metal) เบส (Base) และกรด (Acid) ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติ ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบที่

ใช้แคตาลิสต์จากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นใช้หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl Group) ของหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

4. พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable Plastic)

การย่อยสลายของพอลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์ โดยทั่วไปมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน เนื่องจากขนาดของสายพอลิเมอร์ยังมีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำ ในขั้นตอนแรกของการย่อยสลายจึงเกิดขึ้นภายนอกเซลล์โดยการปลดปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ซึ่งเกิดได้ทั้งแบบใช้ Endo-Enzyme หรือ เอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ และแบบ Exo-Enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะที่ละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอจะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์ และเกิดการย่อยสลายต่อในขั้นตอนที่ 2 ได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนนี้สุดท้าย (Ultimate Biodegradation) คือ พลังงาน และสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ (Mineralization) เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน น้ำเกลือ แร่ธาตุต่างๆ และมวลชีวภาพ (Biomass)

5. พลาสติกย่อยสลายได้ด้วยแสง (Photodegradable Plastic)

การย่อยสลายโดยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความว่องไวต่อแสงลงในพลาสติก หรือสังเคราะห์โพลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง แตกหักง่ายภายใต้รังสี UV เช่น หมู่คีโตน (Ketone Group) อยู่ในโครงสร้าง เมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับรังสียูวี จะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระซึ่งไม่เสถียร จึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ แต่การย่อยสลายนี้จะไม่เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบขยะ กองคอมโพสท์ หรือสภาวะแวดล้อมอื่นที่มืด หรือแม้กระทั่งขึ้นพลาสติกที่มีการพิมพ์ด้วยหมึกที่หนาмаกบนพื้นผิว เนื่องจากพลาสติกจะไม่ได้สัมผัสกับรังสียูวีโดยตรง

พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ด้วยแสง เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ประเภทเทอร์โมพลาสติก การย่อยสลายนี้ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ฤดูกาล ลักษณะทางภูมิศาสตร์ ความสกปรก เมื่อพลาสติกได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งเป็นพลังงานรูปหนึ่ง โมเลกุลของพลาสติกดูดกลืนพลังงานแสงทำให้

เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Photooxidation) ส่งผลให้สมบัติเชิงกลและกายภาพของพลาสติกเสื่อมลง และยังเป็น การช่วยให้จุลินทรีย์ย่อยสลายพลาสติกได้ง่ายขึ้นด้วย ทำให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ลดลง และมีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิลเกิดขึ้น

ปัจจุบันวิธีที่ช่วยให้พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ด้วยแสงมี 2 วิธี

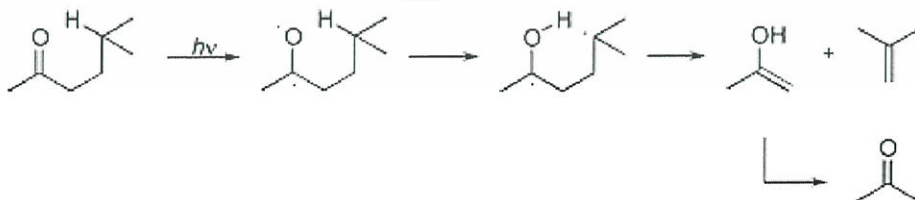
1. การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของพอลิเมอร์ให้มีหมู่ดูดกลืนแสง เช่น การเติมหมู่คาร์บอนิลเข้าไปในโครงสร้าง ซึ่งเป็นวิธีที่มีต้นทุนสูง ตัวอย่างเช่น Ecolyte เป็นพอลิเมอร์ร่วมที่มีหมู่คาร์บอนิลอยู่ จึงดูดกลืนแสงช่วงอัลตราไวโอเล็ตทำให้เกิดออกซิเดชันง่ายขึ้น หลังจากออกซิเดชันแล้ว พลาสติกย่อยสลายได้ง่ายขึ้น E/CO Copolymer (เอทิลีน-คาร์บอนมอนอกไซด์โคพอลิเมอร์) ผลิตจากหลายบริษัทรวมทั้ง E.I. Dupont ซึ่งผลิตจำหน่ายในปี ค.ศ. 1970 ปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์ในพอลิเมอร์ร่วมเป็นตัวกำหนดสมบัติของพลาสติกและความว่องไวต่อแสง การมีหมู่ C=O เล็กน้อยทำให้ความหนาแน่นของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น หาก C=O เพิ่มขึ้น 16% พอลิเมอร์จมน้ำ เสถียรภาพทางความร้อนขึ้นกับปริมาณ C=O เช่นกัน หากมีอยู่ 5% ค่อนข้างเสถียรเมื่ออุณหภูมิค่อยๆ เพิ่มขึ้น แต่ถ้ามี 13% ความเสถียรของ E/CO Copolymer ลดลงขณะทำการขึ้นรูป

หมู่คาร์บอนิลดูดกลืนแสงแล้วทำให้เกิดปฏิกิริยา Norrish type I สลายตัวให้คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ซึ่งมีอนุภาคอิสระสองอนุภาคหรือเกิด Norrish type II เกิดการจัดโมเลกุลใหม่ส่งผลให้โซ่หลักขาด เกิดเมทิลคีโตนและปลายสายโซ่ที่มีพันธะคู่ ดังสมการ

Norrish type I



Norrish type II



การเสื่อมสภาพของฟิล์ม E/CO เมื่อได้รับแสงภายนอกไม่ขึ้นกับความหนาของฟิล์ม แต่หากได้รับแสงภายในบ้านจากฟลูออเรสเซนต์ การเสื่อมสภาพขึ้นกับความหนาของฟิล์ม

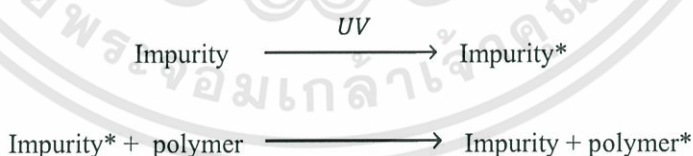
2.การเติมสารเคมีไวแสง (Photo-Initiator หรือ UV Absorber) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ซึ่งสามารถเร่งการย่อยสลายโดยแสง ตัวอย่างสารเหล่านี้ได้แก่ สารประกอบโลหะทรานซิชัน สารประกอบไฮโดรคาร์บอน เอมีน ฟีนอล และเม็คดี เป็นต้น เมื่อเติมลงในพลาสติกทำให้พลาสติกมีอายุการใช้งานระยะเวลาหนึ่งก่อนเกิดการย่อยสลาย

2.3 กระบวนการกายภาพทางแสงของพอลิเมอร์ [12]

กระบวนการทางกายภาพทางแสงของพอลิเมอร์คือการเปลี่ยนแปลงหลังถูกกระตุ้นด้วยแสงของพอลิเมอร์ซึ่งสามารถสังเกตได้ เช่น สี โดยเมื่ออิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงกลับมายังสถานะพื้นจะเกิดการปล่อยพลังงานขึ้น ซึ่งเกิดได้ 3 แบบ ได้แก่ การถ่ายโอนพลังงาน (Energy Transfer) การแผ่รังสี (Radiation) และการแผ่ความร้อน (Heat)

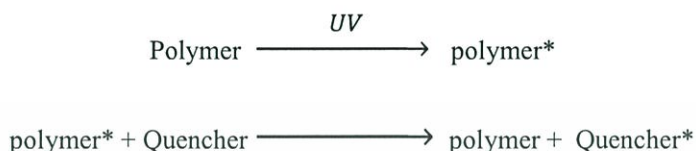
การถ่ายโอนพลังงาน พลังงานของการกระตุ้นอาจถูกถ่ายโอนไปยังอีกที่หนึ่งภายในโมเลกุล (Intra-Molecular) หรือระหว่างโมเลกุล (Inter-Molecular) ที่อยู่ในพื้นที่เดียวกันได้ พลังงานคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ตอาจถูกดูดกลืนโดยหมู่โครโมฟอร์ (Chromophoric Group) ที่อยู่ในโมเลกุลของพอลิเมอร์

โดยปกติโมเลกุลโครโมฟอร์ที่ดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตในระยะเริ่มต้น และถูกกระตุ้นโดยทันทีจะถูกถ่ายโอนพลังงานอย่างรวดเร็วไปยังอีกโมเลกุลหนึ่ง ในบางกรณีสิ่งเจือปนหรือสารเติมแต่งที่ดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตเริ่มแรกจะเกิดการถ่ายโอนพลังงานไปยังพอลิเมอร์ซึ่งไม่สามารถดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตได้เอง แต่สามารถถูกกระตุ้นได้ทางอ้อม ดังสมการ



สิ่งเจือปนหรือสารเติมแต่งจะเร่งการย่อยสลายของพอลิเมอร์โดยแสงอัลตราไวโอเล็ต เช่น เมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในบรรยากาศอย่างเฉื่อย หรือการเกิดเป็นสารเชิงซ้อนกับพอลิเมอร์ เป็นต้น

พอลิเมอร์ที่ดูดกลืนคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ตมากเกินไป จะทำให้เกิดความไม่เสถียรที่ใช้งานภายนอกได้ จึงอาจทำให้เกิดความเสถียรได้โดยการเติมสารระงับพลังงาน (Quencher) ลงไป เพื่อถ่ายโอนพลังงานที่มากเกินไปดังกล่าว



เทคนิคนี้มีประโยชน์ทำให้พอลิโอฟลูออโรฟอร์สามารถนำไปใช้งานภายนอกได้โดยมีสารเสถียรภาพช่วยระงับพลังงานจากแสงอัลตราไวโอเล็ต

โดยทั่วไปกระบวนการคายภาพทางแสงสูงสุดลงเมื่อปล่อยพลังงานในสถานะกระตุ้นที่มีความยาวคลื่นสูงกลับไปยังพลังงานที่มีความยาวคลื่นต่ำโดยระดับพลังงานในสถานะเดี่ยว (Singlet State) ที่ถูกกระตุ้น (S_1) จะปล่อยพลังงานออกมาอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาเพียง $10^{-9} - 10^{-6}$ วินาที เรียกว่าช่วงคลื่นแสงฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence) ส่วนในสถานะสาม (Triplet) ถูกกระตุ้น (T^1) อาจจะปล่อยพลังงานกลับมาช้ากว่าซึ่งอยู่ในช่วงเวลา 10^3 ถึง 20 วินาที เรียกว่าการสั่นสะเทือนแบบรามาน (Raman-Vibrations) ของอิลีคตรอน อะตอม หรือ โมเลกุล

พลังงานที่ปล่อยออกมาจากสถานะกระตุ้นจะกระจายผ่านชั้นของระดับพลังงาน จนทำให้เกิดการสั่นสะเทือนจนกลายเป็นความร้อน ซึ่งพลังงานกระตุ้นที่ปล่อยออกมา มีผลทำให้เกิดการจัดเรียงตัวภายใน โครงสร้างของโมเลกุลสารขึ้นใหม่เป็นแบบทาวโทเมอร์ริค (Tautomeric) ซึ่งจะสามารถผันกลับเป็นโครงสร้างรูปแบบเดิมก่อนการกระตุ้นได้ชั่วคราว แล้วกลายเป็นความร้อนเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา ซึ่งการปล่อยพลังงานที่ถูกกระตุ้นในรูปของพลังงานสั่นสะเทือนและความร้อน ในบางครั้งอาจมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาสถานะพื้นร้อน (Hot Ground-State Reaction) ซึ่งจัดเป็นการเสียคุณภาพโดยความร้อนที่เกิดจากการกระตุ้น โดยคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งปฏิกิริยาสถานะพื้นร้อนเป็นปฏิกิริยาที่บ่งบอกความแตกต่างระหว่างกระบวนการทางกายภาพของแสงแลกระบวนการเคมีทางแสงได้

2.4 กระบวนการเคมีทางแสงของพอลิเมอร์ [12]

กระบวนการเคมีทางแสงเกิดขึ้นเมื่อสารอินทรีย์ได้รับพลังงานกระตุ้นทางแสง อัลตราไวโอเลต ทำให้สารอินทรีย์มีระดับพลังงานสูงขึ้น ซึ่งพลังงานกระตุ้นที่ได้รับมีไม่เพียงพอที่ทำให้เกิดการคายพลังงานเพื่อกลับมาสู่สถานะพื้นได้ จึงทำให้สารเคมีมีพลังงานส่วนเกินที่ส่งผลให้เกิดการแตกของพันธะโคเวเลนต์ มีผลทำให้สารเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีอย่างถาวรจึงทำให้เกิดการย่อยสลาย โดยทั่วไปพันธะโคเวเลนต์ในโมเลกุลของพอลิเมอร์เป็นพันธะที่แข็งแรงที่สามารถต้านพลังงานกระตุ้นที่เกิดจากพลังงานแสงอัลตราไวโอเลตได้ แต่เมื่อพันธะโคเวเลนต์ได้รับพลังงานกระตุ้นทำให้ความแข็งแรงของพันธะโคเวเลนต์มีค่าน้อยลง ซึ่งมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีกับอะตอมข้างเคียงที่ต่อกับพันธะโคเวเลนต์ได้ ตัวอย่างเช่น พันธะ C-H ที่ถูกกระตุ้นในสายโซ่พอลิเมอร์จะมีพลังงานน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการกระตุ้นจากตำแหน่งอัลฟาของกลุ่มไม่อิ่มตัวในสายโซ่พอลิเมอร์ เช่น C=C และ C=O เป็นต้น ด้วยเหตุนี้พลังงานคลื่นแสงอัลตราไวโอเลตที่ถูกดูดกลืนโดยระบบพอลิเมอร์อาจเพียงพอที่ทำให้พันธะโคเวเลนต์ในโมเลกุลของพอลิเมอร์แตกพันธะ เกิดการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยจะส่งผลต่อต่อกระบวนการเคมีทางแสงที่จะนำไปสู่การย่อยสลายในที่สุด ซึ่งกระบวนการเคมีทางแสงมีผลทำให้โมเลกุลเกิดการเปลี่ยนแปลงได้หลายแบบ ได้แก่ การแตกพันธะ (Cleavage) การกำจัดโมเลกุลเล็กๆ (Elimination of Small Molecule) การเกิดพันธะไม่อิ่มตัวของโมเลกุล (Unsaturation) การจัดเรียงตัวและการเกิดเป็นวง (Rearrangement and Cyclization) การเชื่อมโยงของโครงร่างตาข่าย (Cross-linking) การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) และโฟโตไฮโดรไลซิส (Photohydrolysis) เป็นต้น การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเริ่มจากพันธะโคเวเลนต์ได้รับพลังงานกระตุ้นจากคลื่นแสงอัลตราไวโอเลต ทำให้เกิดการแตกพันธะแบบโฮโมไลติก (Homolytic Cleavage)



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

2.5 พอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูง (High Impact Polystyrene, HIPS) [13-15]

พอลิสไตรีน (Polystyrene, PS) เป็นพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติก พอลิสไตรีนบริสุทธิ์มีลักษณะใสคล้ายกระจก ปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์ได้พัฒนาเทคโนโลยีการผลิตพอลิสไตรีนให้มีคุณภาพดีขึ้นทั้งความใส แข็ง และขึ้นรูปได้ง่าย พอลิสไตรีนเป็นพอลิเมอร์ที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวเป็นช่วงกว้าง ทำให้ง่ายต่อการหล่อขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ สามารถเลือกตั้งอุณหภูมิและความดันของเครื่องจักรได้ง่าย

สมบัติทั่วไปของพอลิสไตรีน

- มีความแข็ง แต่เปราะแตกร้าวง่าย น้ำหนักเบา ราคาถูก
- ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น มีความใส ผิวเรียบ ใสสีเติมแต่งได้ง่าย และคงความโปร่งใสเช่นเดิม
- ทนทานต่อสารเคมีทั่วไป แต่ไม่ทนต่อสารไฮโดรคาร์บอนและตัวทำละลายอินทรีย์
- เป็นฉนวนไฟฟ้า
- ไม่ดูดความชื้น เกิดไฟฟ้าสถิตได้ง่าย

โดยพอลิสไตรีนสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. พอลิสไตรีนชนิดธรรมดา (General Purpose Polystyrene, GPPS)

2. พอลิสไตรีนชนิดพิเศษ คือพอลิสไตรีนที่มีการเติมสารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการให้ดีขึ้น เช่น พอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูง (High Impact Polystyrene, HIPS) เนื่องจากแม้ว่าพอลิสไตรีนจะมีสมบัติเด่นหลายอย่าง เช่น แข็งและใส แต่มีสมบัติด้อยคือไม่ยืดหยุ่นจึงแตกและเปราะง่าย จึงมีการปรับปรุงสมบัติการทนแรงกระแทกของพอลิสไตรีน โดยการเติมยางสังเคราะห์ คือ บิวทอะไดอินเข้าไป ในการเกิดปฏิกิริยาโคพอลิเมอร์เช้นกับพอลิสไตรีนกลายเป็นพอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูง ซึ่งจะมีความยืดหยุ่นมากขึ้น ทนแรงกระแทกได้มากขึ้น แต่จะสูญเสียสมบัติด้านความใส และอุณหภูมิใช้งานจะต่ำลง ตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติทั่วไปของพอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูง (HIPS)

ตารางที่ 2.2 สมบัติของพอลิโพรพิลีนชนิดทนแรงกระแทกสูง (HIPS)

สมบัติทั่วไป	โครงสร้าง : ออสัญฐาน (Amorphous) ความหนาแน่น : 1.04 อัตราการดูดซึมน้ำ (%) : 0.1
สมบัติทางด้านอุณหภูมิ	อุณหภูมิที่เสีรูป (°C) - ที่ 66 psi: 90.56 - ที่ 264 psi: 128.89 อุณหภูมิการใช้งาน (°C) : -5.56 - 60 จุดหลอมเหลว (°C) : 85 สัมประสิทธิ์การขยายตัว : 0.000042
สมบัติเชิงกล	การยืดตัว (%) : 55 การทนแรงดึง (psi) : 4000 การทนแรงอัด (psi) : 7500 การทนแรงกระแทก (IZOD ft. lbs/in) : 2 ความแข็งที่ผิว : R65
สมบัติทางด้านไฟฟ้าและอื่นๆ	Dielectric Strength (kV/mm): 18 ความโปร่งแสง : ใส การทนทานต่อยูวี : ไม่ดี การทนต่อสารเคมี - กรด : ดี - ด่าง : ดีเยี่ยม - ตัวทำละลาย : ไม่ดี

2.6 วิธีการฝังตัวหรืออิมเพรเกชัน (Impregnation Method) [16-17]

การทำให้โลหะกระจายตัวอยู่บนตัวรองรับในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยทั่วไปมีอยู่ 2 วิธี คือ การตกตะกอน (Precipitation Method) และการฝังตัว (Impregnation Method) ซึ่งวิธีการฝังตัวเป็นวิธีการเตรียมที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา และเป็นวิธีที่ถูกเลือกใช้ใน งานวิจัยนี้

1. หลักการของวิธีฝังตัว

ทำโดยการเติมตัวรองรับในสารละลายของเกลือ โลหะ เช่น เกลือไนเตรด เกลือโลหะจะแพร่กระจายสู่ตัวรองรับ จากนั้นทำให้เกลือโลหะร้อนเพื่อให้เกลือโลหะติดที่อยู่บนตัวรองรับ สลายตัวให้โลหะออกไซด์เกาะบนตัวรองรับ

2. การแบ่งวิธีการฝังตัว

สำหรับกระบวนการแบบฝังตัวนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ การฝังตัวแบบแห้ง และการฝังตัวแบบเปียก

ก. การฝังตัวแบบแห้ง (Dry Impregnation หรือ Impregnation to Incipient Wetness)

วิธีนี้ใช้ทั่วไปในทางอุตสาหกรรม ตัวรองรับจะถูกทำให้กระจายตัวและพ่นด้วยสารละลายที่มีความเข้มข้นที่เหมาะสม โดยปริมาณของสารละลายที่ใช้ต้องเท่ากับปริมาณของรูพรุนทั้งหมดของตัวรองรับหรือน้อยกว่าเล็กน้อย ซึ่งเป็นการควบคุมปริมาณขององค์ประกอบที่ว่างไว้ที่เกาะบนตัวรองรับได้อย่างถูกต้อง แต่ปริมาณสูงสุดของการเกาะแต่ละครั้งถูกจำกัดด้วยความสามารถในการละลายของสาร หลังจากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จะถูกทำให้แห้งและนำไปเผาที่อุณหภูมิสูง

ข. การฝังตัวแบบเปียก (Wet Impregnation)

วิธีนี้ทำการเติมตัวรองรับลงในสารละลายของเกลือ โลหะที่มีปริมาณมากเกินไป ดังนั้นปริมาณของเกลือโลหะที่เกาะบนตัวรองรับจะรู้เมื่อรู้ปริมาณเกลือโลหะก่อนและหลังเตรียม ผลต่างของปริมาณเกลือโลหะก่อนและหลังเตรียมจะเป็นปริมาณของเกลือโลหะที่เกาะบนตัวรองรับ การทำให้แห้งจะทำให้เกิดการตกผลึกของเกลือบนผิวหน้าของรูพรุน ขั้นตอนนี้ถ้าไม่ระวังอาจจะทำให้การกระจายตัวของสารในรูพรุนไม่สม่ำเสมอ ถ้าการทำให้แห้งช้าเกินไปจะทำให้สารละลายเคลื่อนลงไปอยู่ตอนล่างของรูพรุนก่อนการเกิดตะกอน ทำให้ผลึกที่ได้อยู่แต่ตอนล่างของรูพรุน ในทางตรงกันข้าม ถ้าทำให้แห้งเร็วเกินไปสารละลายจะติดอยู่เฉพาะตอนบนของรูพรุนทำให้ผลึกเกิดขึ้นเฉพาะช่วงบนของรูพรุน การทำให้แห้งในอัตราเร็วที่พอเหมาะจะทำให้ได้ขนาดของผลึกที่เท่าๆ กัน แต่เนื่องจากความหลากหลายของขนาดและรูปร่างรูพรุน จึงเป็นการยากที่จะหาสภาพที่เหมาะสมที่สุดของรูพรุนแต่ละแบบ ต้องทำการทดลองเพื่อหาอัตราที่เหมาะสมที่สุด การคัลไซน์เป็นขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญ เพราะถ้าตัวเร่งปฏิกิริยาเจอกับความชื้นในอากาศผลึกในรูพรุนอาจจะละลายในน้ำที่เกิดจากการควบแน่นได้ การคัลไซน์เป็นการเปลี่ยนเกลือโลหะให้อยู่ในรูปของโลหะหรือออกไซด์ และจะหยุดการกระจายของสารละลายได้

2.7 กระบวนการขึ้นรูปฟิล์มแบบหล่อด้วยสารละลาย

การขึ้นรูปแผ่นฟิล์มสามารถทำได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้ การขึ้นรูปที่รวดเร็วเป็นที่ต้องการในแง่ของอุตสาหกรรม แต่จะต้องควบคุมอุณหภูมิในเหมาะสม เพื่อให้ฟิล์มขึ้นรูปไม่เร็วเกินไปมิฉะนั้นฟิล์มจะไม่สม่ำเสมอ ผิวหน้าขรุขระ ซึ่งมีหลากหลายวิธี แต่ที่สนใจคือ วิธีการเทสารละลายลงบนวัสดุต่างๆ หรือเรียกว่าการหล่อด้วยสารละลาย (Solvent Casting)

ในปี 1966 Mart และคณะ [18] เตรียมฟิล์มจากสตาร์ชที่มีปริมาณอะมิโลสสูง (Amylomaize Starch) โดยการเทลงบนแผ่นกระจกเคลือบซิลิโคน แล้วนำไปทำให้แห้งด้วยลมร้อน ฟิล์มที่ได้มีลักษณะโปร่งแสง ละลายน้ำได้ ต่อมา มีการเตรียมฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าและวุ้นขึ้นรูปโดยการเทส่วนผสมลงในถาดโลหะปลอดสนิมเขย่าถาดเบาๆจนส่วนผสมกระจายเต็มถาด ทิ้งไว้ให้แห้งในอุณหภูมิห้อง ฟิล์มที่ได้มีสีขาวขุ่น เป็นเนื้อเดียวกัน มีความหนา 113 μm ต่อมาในปี 2534 มณฑาทิพย์ [19] เตรียมฟิล์มแบบออบเลตจากสตาร์ชมันเทศและวุ้น สตาร์ชมันเทศอะมิโลสและวุ้น ด้วยวิธีการที่คล้ายกันคือ เทส่วนผสมลงในถาดโลหะปลอดสนิมซึ่งทำด้วยน้ำมันพืช และให้ความร้อนพอประมาณเอียงและเขย่าถาดเบาๆ ทิ้งไว้ให้แผ่นฟิล์มเป็ยกทรงรูป ทำให้แห้งด้วยไอน้ำเดือดที่อุณหภูมิประมาณ 40-50 $^{\circ}\text{C}$ ฟิล์มที่ได้มีความหนา 23-63 μm .

Kester และ Fennema [20] ขึ้นรูปฟิล์มจากเซลลูโลสอีเทอร์และไขมันบนแผ่นกระจกด้วยวิธีโครมาโทกราฟีแบบแผ่นบาง (Thin-layer Chromatography) แล้วนำไปทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 $^{\circ}\text{C}$ ฟิล์มที่ได้มีความหนาเฉลี่ย 0.01 mm ต่อมาในปี พ.ศ. 2537 ปันดดา [21] ดัดแปลงวิธีนี้โดยขึ้นรูปแผ่นฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังและแป้งถั่วเขียวบนแผ่นฟิล์มพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ซึ่งแข็งบนก้นถาดเหล็กปลอดสนิมจนเรียบตึงแล้วนำไปทำให้แห้งในตู้อบแบบถาด (Tray Driver) ที่อุณหภูมิ 50 $^{\circ}\text{C}$ ฟิล์มที่ได้โปร่งแสง พื้นผิวด้านที่สัมผัสกับพลาสติกเรียบมันส่วนด้านที่สัมผัสอากาศด้าน

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กิจสิมา คมขำ และ ชะไมพร อ้วน โคตร [11] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการย่อยสลายโดยแสงของพอลิเมอร์พอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ที่ผสมนาโนซิงค์ออกไซด์ โดยศึกษาสมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงกลของการย่อยสลายภายใต้รังสียูวี พบว่าการเติม ZnO ไม่ทำให้เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ LDPE ผลการทดสอบสมบัติความแข็งแรงดึงของฟิล์ม และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดลดลง เมื่อเติม ZnO และหลังจากนำไปผ่านการฉายแสงพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ ZnO และจำนวนวันในการฉายแสง ฟิล์มมีสมบัติเชิงกลลดลงซึ่งเป็นผลมาจากการย่อยสลายของฟิล์ม

ชลดา ชีรการณวงศ์ [8] ศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสงโดยไททาเนียมไดออกไซด์ พบว่าประสิทธิภาพการเป็นตัวเร่งของไททาเนียมไดออกไซด์ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น โครงสร้างผลึก ลักษณะความเป็นรูพรุน ตำแหน่งที่ว่างไว หรือขนาดอนุภาค เป็นต้น โดยไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์และอะนาเทสจะมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายด้วยแสงสูงกว่าแบบบรูคไคต์ ในด้านของขนาดอนุภาคตัวเร่งที่มีอนุภาคเล็กจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากส่งผลให้มีตำแหน่งที่ว่างไวต่อการเกิดปฏิกิริยามากกว่า ทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสูงกว่าตัวเร่งที่มีอนุภาคใหญ่ซึ่งมีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อย เช่นเดียวกับปัจจัยเรื่องรูพรุน ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีลักษณะความเป็นรูพรุนสูงจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพิ่มขึ้น เพราะมีตำแหน่งในการเกิดอันตรกิริยาได้เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการย่อยสลายจึงดีกว่า

Parres และคณะ [22] ศึกษาเรื่องการย่อยสลายทางแสงของพอลิเมอร์พอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูงโดยใช้ไฟโรไลซิสแก๊สโครมาโตกราฟีแมสสเปกโตรเมตรี โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในและการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวภายนอก พบว่าเมื่อนำไปศึกษาด้วยเครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) และ เครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TGA) ไม่สามารถระบุการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจน แต่เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเทคนิควิเคราะห์ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด (ATR-FTIR) ปรากฏพีดของหมู่คาร์บอนิลเกิดขึ้นเมื่อเวลาในการฉายแสงอาทิตย์เพิ่มมากขึ้น และเมื่อนำไปวิเคราะห์สัณฐานวิทยาพบว่า เมื่อเพิ่มเวลาในการฉายแสงพื้นผิวภายนอกของพอลิเมอร์มีลักษณะที่ขรุขระขึ้น ซึ่งทำให้พอลิเมอร์สูญเสียสมบัติเชิงกล

Zhao และคณะ [23] ศึกษาการย่อยสลายของพลาสติกพอลิเอทิลีนผสมไททาเนียมไดออกไซด์ โดยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงภายใต้แสงยูวีและแสงอาทิตย์โดยการผสมไททาเนียมไดออกไซด์แล้วนำไปขึ้นรูปฟิล์ม จากนั้นนำมาวิเคราะห์การเกิดอนุมูลฟังกซ์ชันด้วยเทคนิคการกระตุ้นสารด้วยพลังงานแสงช่วงแสงอินฟราเรด (FTIR) พบว่าปริมาณของไททาเนียมในฟิล์มพอลิเอทิลีนที่เพิ่มขึ้นและเวลาในการฉายแสงที่นานขึ้น ทำให้ฟิล์มเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นอนุมูลฟังกซ์ชันจำพวกคาร์บอนิล จากนั้นศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่ามีพื้นผิวมีความขรุขระเพิ่มมากขึ้น ซึ่งทำให้เกิดการย่อยสลายได้เร็วขึ้น

บาบารา และคณะ [24] ศึกษาสเปกตรัมมวลจากการย่อยสลายทางความร้อนของ $Zn(NO_3)_2 \cdot nH_2O$ ($n=4$ และ 6) โดยการทำให้ $Zn(NO_3)_2 \cdot nH_2O$ ให้แห้ง โดยใช้กรดซัลฟิวริก วัดในก๊าซฮีเลียมและอากาศแห้ง ทำให้เกิดปฏิกิริยาผ่านกระบวนการหลายขั้นตอน เมื่อนำไปวัดค่าการย่อยสลายโดยเทคนิค TG, DTA พบว่า $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ ในอากาศแห้ง มีอัตราการย่อยสลายเท่ากับ 0.1 mg/min จะมีการย่อยสลายในตรงจากความร้อน $50-80\%$ มีการระเหยของน้ำออกจากระบบ แต่ยังมี Zn อยู่ โดยหลังจากที่ผ่านกระบวนการย่อยสลายและเกิดการระเหยของสารแล้ว พบว่าทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ ที่นำมาใช้เป็นสารตั้งต้นคือ $Zn(NO_3)_2 \cdot 2Zn(OH)_2$

จิราภรณ์ จันทร์ดำ [25] ศึกษาการพัฒนาสารเคลือบผิว $TiO_2/SnO_2/X$ ระดับนาโนโดยการศึกษาอุณหภูมิการเผา พบว่าอุณหภูมิการเผาที่สูงขึ้นส่งผลให้ผลึกไททาเนียมไดออกไซด์มีขนาดใหญ่ขึ้น และที่อุณหภูมิการเผา 400 และ $500 \text{ }^\circ\text{C}$ แสดงประสิทธิภาพโฟโตคะตะไลติกดีกว่าอุณหภูมิ $300 \text{ }^\circ\text{C}$ ส่วนอิทธิพลของสารเจือ SiO_2 หรือ SnO_2 ได้ผลคือขนาดผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์มีขนาดเล็กลงและการเจือมีส่วนในการยังยั้งการเกิดผลึกของไททาเนียม

จากข้อมูลข้างต้น HIPS หรือ High Impact Polystyrene เป็นโคพอลิเมอร์ระหว่างพอลิสไตรีนกับบิวทอะไดอิน เกิดจากการปรับปรุงสมบัติของพอลิสไตรีนที่มีความแข็งแรงแต่เปราะให้มีความสมบัติที่สามารถรับแรงได้มากและมีความยืดหยุ่นมากขึ้น ทำให้เป็นพลาสติกอีกชนิดที่นิยมใช้ในปัจจุบัน และจากปัญหาโดยทั่วไปของพลาสติกคือย่อยสลายได้ยาก ต้องใช้เวลานาน ดังนั้นในงานวิจัยจึงทำการศึกษการย่อยสลายด้วยแสงของ HIPS ที่ทำการขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางเพื่อให้เห็นการย่อยสลายได้เร็วขึ้น และใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเป็นตัวเร่งที่นิยมใช้เนื่องจากไททาเนียมไดออกไซด์ให้ประสิทธิภาพในการเป็นโฟโตคะตะไลสต์ในระดับสูง มีราคาถูก

มีความเป็นพิษต่ำ และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวด้วยแสงอีกชนิดที่นิยมใช้คือ ซิงออกไซด์ ซึ่งให้ประสิทธิภาพใกล้เคียงกับไททาเนียมไดออกไซด์ ในงานวิจัยนี้จึงทำการปรับปรุงพื้นผิวของไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยซิงออกไซด์ โดยใช้วิธีอิมเพกชันเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการเป็นโฟโตแคตาไลสต์ของไททาเนียมไดออกไซด์หลังทำการปรับปรุงพื้นผิว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. พอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทก (High Impact Polystyrene, HIPS) เกรดจีดีซีรุ่น 486M จากบริษัท ดาว เคมิคอล แปซิฟิก จำกัด
2. ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO₂), เกรด Degussa P25 บริษัท Skybright-Chemicals จำกัด
3. สังกะสีไนเตรด Zn(NO₃)₂, เกรด 1271 บริษัท Ajax Finechem จำกัด
4. ตัวทำละลายโทลูอีน เกรดการค้า
5. สารละลายมาตรฐานสังกะสีเข้มข้น 1000 ppm เกรดวิเคราะห์
6. กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) เกรดวิเคราะห์
7. ไนโตรเจนเหลว (Liquid N₂)

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ HIPS

สมบัติ	Styron™ 486M	หน่วย	วิธีการทดสอบ
ความหนาแน่น (Density)	1.04	g/cm ³	ASTM D792
ครรชนีการไหล (Melt Flow Rate; MFR,(200 °C/5.0kg))	3.00	g/10 min	ASTM D1238
ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (Tensile Strength at break)	25.5	MPa	ASTM D638
การดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break)	40.0	%	ASTM D638
อุณหภูมิการอ่อนตัว (Softening Temperature)	102	°C	ASTM D1525
ความทนแรงโค้งงอ (Flexural Strength)	50.3	MPa	ASTM D790
ความทนแรงกระแทก (Notched Izod Impact Strength)	110	J/m	ASTM D256

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัท ดาว เคมิคอล แปซิฟิก จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของ TiO₂

สมบัติ	TiO ₂ Degussa P25
ลักษณะทางกายภาพ	ผง
ขนาดอนุภาค	21 nm
สี	ขาว
กลิ่น	ไม่มี
ความบริสุทธิ์	99.5 %
พื้นที่ผิวจำเพาะ	35-45 m ² /g
ความสามารถในการละลาย	กรด (HF)

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัท Skybright-Chemicals จำกัด

3.2 อุปกรณ์

1. บริภัณฑ์เครื่องแก้วและพลาสติก
2. แม่แบบหล่อกระจกขนาด 16 x 24 cm²
3. เครื่องซังสารแบบดิจิตอล ทศนิยม 4 ตำแหน่ง รุ่น ED2248 ; บริษัท Scientific promotion จำกัด
4. เครื่องกวนสาร (Magnetic Stirrer)
5. เครื่องอัลตราโซนิค (Ultrasonic cleaner)
6. ตู้อบสาร
7. ตู้อบแสงอัลตราไวโอเลต
8. เตาเผา (Furnace) รุ่น F6010 บริษัท Kerper boukvard จำกัด
9. ตู้อบความร้อน (Hot air oven)
10. ไมโครมิเตอร์
11. เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS) รุ่น Solar M5 dual AA Spectrophotometer; บริษัท Thermo elemental จำกัด
12. เครื่องวัดสี (Colorimeter Spectrophotometer) รุ่น Miniscan XE plus; บริษัท Hunter lab จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR); Perkin Elmer รุ่น FTIR Spectrum Gx
14. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ,SEM) รุ่น 1455 VP; LEO
15. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine, UTM) รุ่น LR 5K; บริษัท Lloyd Instrument จำกัด
16. เครื่อง Thermogravimetric Analyser (TGA) รุ่น TGA 7 serial no.519 N7031104 ; บริษัท Perkin Elmer จำกัด
17. เครื่อง Nuclear Magnetic Resonance (NMR) รุ่น INOVA; บริษัท Varian จำกัด
18. กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope, AFM) รุ่น AR MFP-3D
19. เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ (X-ray Diffractometer, XRD) รุ่น D8-Discover; บริษัท Bruker จำกัด

3.3 การเจือไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยซิงค์ในเทรตด้วยวิธีการอิมเพรคเนชัน (Impregnation method) [16-17]

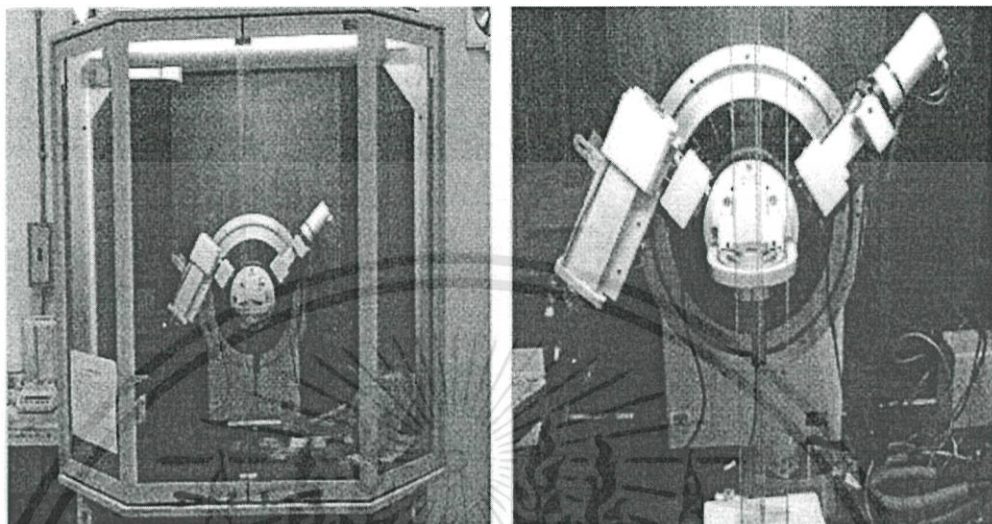
การเจือไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยซิงค์ในเทรตด้วยวิธีการอิมเพรคเนชันในงานวิจัยนี้ทำที่ความเข้มข้นของ $Zn(NO_3)_2$ 4 % โดยโมลของ TiO_2 โดยทำการชั่ง $Zn(NO_3)_2$ 0.2817 กรัม ละลายในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร จากนั้นหยดลงบน TiO_2 10 กรัม (ขณะหยดให้คนไปด้วย) จนกระทั่งผง TiO_2 เริ่มขึ้น แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ $100^\circ C$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นหยดสารละลาย $Zn(NO_3)_2$ ต่อและเอาไปอบทำซ้ำๆ จนสารละลายหมด สุดท้ายจึงแบ่งเป็น 2 ส่วนเท่าๆ กัน แล้วนำไปใส่ในครุชเบิต เพื่อเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ $300^\circ C$ และ $500^\circ C$ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

3.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของ ZnO-doped TiO_2

3.4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของ ZnO-doped TiO_2 [25]

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของ ZnO-doped TiO_2 ด้วยเครื่อง XRD (รูปที่ 3.2) วิเคราะห์โดยการชั่งตัวเร่งปฏิกิริยา ZnO-doped TiO_2 ประมาณ 3 กรัม ใส่ลงใน Sample Holder ทำการปาดผิวหน้า

ให้เรียบและกดอัดให้แน่น จากนั้นนำไปติดตั้งที่ Analysis Station โดยใช้ $\text{Cu, K}\alpha$ เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์ ทำการวิเคราะห์ช่วงค่า 2θ จาก 0-90 degree



รูปที่ 3.1 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ (X-ray diffractometer, XRD)

3.4.2 การวิเคราะห์หาปริมาณของ ZnO ที่เจือใน TiO_2

การวิเคราะห์หาปริมาณของ ZnO ที่เจือใน TiO_2 โดยใช้เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี (Atomic Absorption Spectroscopy, AAS) นำตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ที่เจือ $\text{Zn(NO}_3)_2$ ที่เตรียมในสภาวะต่างๆ มาหาปริมาณสารเจือด้วยเครื่อง AAS โดยใช้หลอดฮาโลเจนคอดัมน์ (HC lamp) ดังรูปที่ 3.2 โดยใช้สภาวะทดสอบที่

กระแสไฟของหลอด HC lamp 4 mA

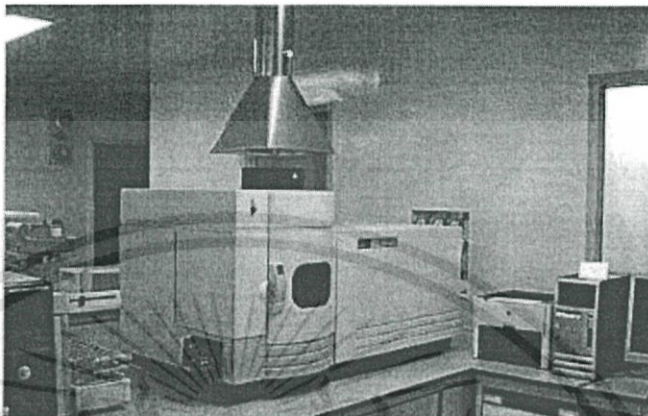
ความยาวสลิต 0.5 nm

โหมด Emission

เปลวไฟ Air-acetylene

ทำการวิเคราะห์โดยนำสารละลายมาตรฐานสังกะสีเข้มข้น 1000 ppm เจือจางด้วยน้ำกลั่นปรับความเข้มข้นเป็น 0.50, 1.00, 1.25 และ 1.50 ppm วัดค่าการดูดกลืนแสงและสร้างกราฟมาตรฐาน (Calibration Curve) ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) กับความเข้มข้นสารละลายที่เตรียมได้ จากนั้นเตรียมสารละลายตัวอย่างโดยใช้กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ประมาณ

50-100 ml เป็นตัวทำละลาย แล้วปรับความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0.50-1.50 ppm จากนั้นนำสารละลาย ตัวอย่างที่เตรียมวัดค่าการดูดกลืนแสง นำค่าที่ได้เทียบกับกราฟมาตรฐานเพื่อหาความเข้มข้นของ สารละลายตัวอย่าง



รูปที่ 3.3 เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี (Atomic Absorption Spectroscopy, AAS)

3.5 การขึ้นรูปฟิล์มโดยวิธีหล่อแบบด้วยสารละลาย (Solution casting)

ตารางที่ 3.3 องค์ประกอบของฟิล์ม

สูตร	HIPS (g)	Toluene (g)	TiO ₂		ZnO (phr)	หมายเหตุ
			(phr)	(g)		
HIPS	2.1	67.9	0	0	0	
HIPSTi0.5	2.1	67.9	0.5	0.0105	0	
HIPSTi1	2.1	67.9	1	0.021	0	
HIPSTi2	2.1	67.9	2	0.042	0	
HIPSTi1(300)	2.1	67.9	1	0.021	0	Calcined 300°C
HIPSTi1(400)	2.1	67.9	1	0.021	0	Calcined 400°C
HIPSTi1(500)	2.1	67.9	1	0.021	0	Calcined 500°C
HIPSTi1Zn(300)*	2.1	67.9	0.97	0.0204	0.03	Calcined 300°C
HIPSTi1Zn(400) *	2.1	67.9	0.97	0.0204	0.03	Calcined 400°C
HIPSTi1Zn(500) *	2.1	67.9	0.97	0.0204	0.03	Calcined 500°C

หมายเหตุ สูตรที่มี * เป็นการใส่ ZnO-doped TiO₂

1. การเตรียมสารละลายพอลิเมอร์

ชั่งเม็ด HIPS ตามตาราง แฉในตัวทำละลายโทลูอีน 30 กรัม เป็นเวลา 20 ชั่วโมง จากนั้นทำการปั่นกวนสารละลายด้วยเครื่องกวนสารเคมีที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 15 นาที

หมายเหตุ สูตร HIPSTiO₂ZnO ใช้โทลูอีน 67.9 กรัม

2. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาในโทลูอีน

ชั่งผง TiO₂ ลงในตัวทำละลายโทลูอีน 37.9 กรัม ปิดภาชนะ ก่อนนำสารที่ได้ไปทำการกระจายตัวด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที

3. การผสมสารละลายพอลิเมอร์กับตัวเร่งปฏิกิริยา

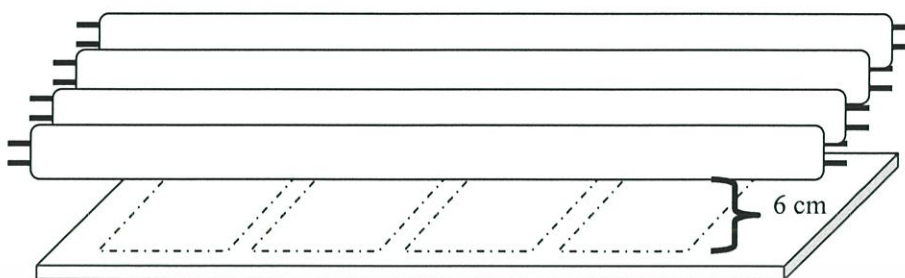
นำสารได้จากข้อที่ 1 เทลงในบีกเกอร์ที่มีสารข้อที่ 2 อยู่ โดยเทอย่างช้าๆ จนหมด แล้วปิดภาชนะก่อนนำไปปั่นกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำสารละลายที่ได้ไปเข้าเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 5 นาที ก่อนนำไปทำการหล่อแบบ

4. การหล่อแบบฟิล์ม

ก่อนใช้สารละลายหรือสารผสมมาทำการทดลอง หากมีฟองอากาศด้านบนให้กำจัดออกก่อน เทสารผสมลงในแม่แบบหล่อรูปสี่เหลี่ยมที่ทำจากกระจกแล้วปล่อยให้โทลูอีนระเหยอย่างช้าๆ ในตู้ดูดควันเป็นเวลา 24 ชั่วโมงจะได้แม่แบบหล่อที่มีฟิล์มแล้วนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วทำการแกะแผ่นฟิล์มออกจากแม่แบบ

3.6 การทดลองโดยการฉายแสงภายใต้รังสี UVA

ตัดแผ่นฟิล์มตัวอย่างให้มีขนาด 15x12 cm² ใสลงในกล่อง UVA (ที่ทำขึ้นเอง) โดยกล่องมีขนาด กว้างxยาวxสูงเป็น 34x72x30 cm³ ภายในมีหลอดรังสี UVA 40 Watt ยาว 60 เซนติเมตร วางเรียงกัน 4 หลอด ดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยทำการฉายแสงเป็นเวลา 100, 150 และ 200 ชั่วโมง ซึ่งแผ่นฟิล์ม 1 แผ่นจะได้รับแสงจากหลอด UVA จำนวน 4 หลอด โดยมีระยะห่างระหว่างแผ่นฟิล์มกับหลอด UV 6 cm



รูปที่ 3.3 ลักษณะการวางชั้นงานและระยะห่างของชั้นงานกับหลอด UV

3.7 การวิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม

3.7.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน ZnO-dope TiO₂

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน ZnO-dope TiO₂ โดยเทคนิคฟูเรียร์ทรานเฟอร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR (รูปที่ 3.4) นำฟิล์มที่เตรียมได้มาวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสาร โดยหมู่ฟังก์ชันของสังกะสีออกไซด์จะขึ้นพีคที่ 450 cm⁻¹ ซึ่งเป็นพีคของ Zn-O Stretching [26] และไททานเนียมไดออกไซด์จะขึ้นพีคที่ 1097, 1031 cm⁻¹ ซึ่งเป็นพีคของ O-Ti- Stretching และที่เลขคลื่น 469 และ 538 cm⁻¹ ซึ่งเกิดเนื่องจากการสั่นของพันธะ O-Ti-O Bending [26]



รูปที่ 3.4 ฟูเรียร์ทรานเฟอร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

(Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.2 การวัดค่าดัชนีคาร์บอนิล (Carbonyl index) และ ค่าดัชนีไฮดรอกซิล (Hydroxyl Index)

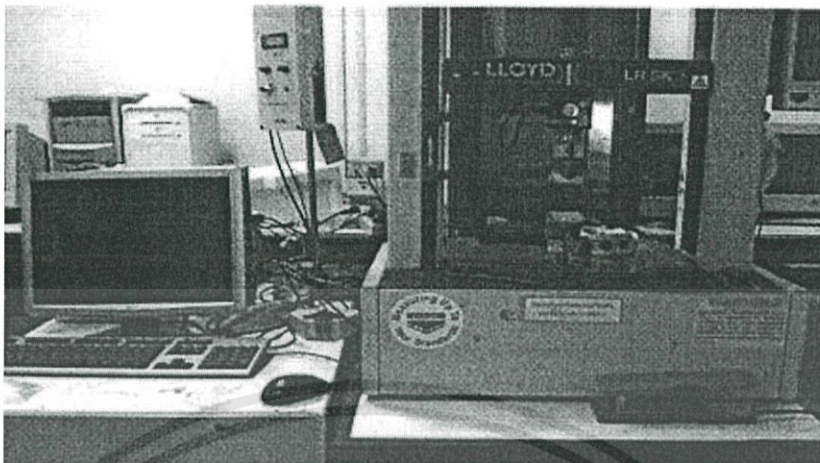
นำฟิล์มที่ได้มาควรวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของคาร์บอนิล ทั้งก่อนฉายแสงและเมื่อฉายแสง UVA ไปแล้ว 100, 150 และ 200 ชั่วโมง โดยทำการวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง FT-IR เป็นเทคนิคการสะท้อนของลำแสง IR ช่วงเลขคลื่น $500-400\text{ cm}^{-1}$ จากสเปกตรัมการดูดกลืน (Absorbance) โดยเลือกพีคที่ 1715 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคการยืดของหมู่คาร์บอนิล และพีคที่ 1452 cm^{-1} เป็นพีคล้อยกของค่า C-H และพีคที่ 3445 cm^{-1} เป็นพีคของการยืดของหมู่ไฮดรอกซิล สามารถหาค่าดัชนีคาร์บอนิล (C.I.) และค่าดัชนีไฮดรอกซิล (H.I.) ดังนี้

$$C. I. = \frac{\text{absorbance at } 1715\text{ cm}^{-1}}{\text{absorbance at } 1452\text{ cm}^{-1}} \quad H. I. = \frac{\text{absorbance at } 3445\text{ cm}^{-1}}{\text{absorbance at } 1452\text{ cm}^{-1}}$$

3.7.3 การทดสอบการรับแรงดึงยืด [26]

นำฟิล์มที่เตรียมได้ทั้งก่อนและหลังฉายแสงไปทดสอบแรงดึง (Tensile test) ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine, UTM) ตามมาตรฐาน ASTM D882 (รูปที่ 3.5) โดยเตรียมชิ้นงานและกำหนดสภาวะเครื่องทดสอบดังนี้

ขนาดชิ้นงาน	15x80 mm ²
ความเร็วในการดึง	5 mm/min
ความยาวเกจ (Gauge length)	25 mm
ค่าแรงสูงสุดที่เครื่องรับได้	100 N
จำนวนชิ้นงานที่ทดสอบ	10 ชิ้น

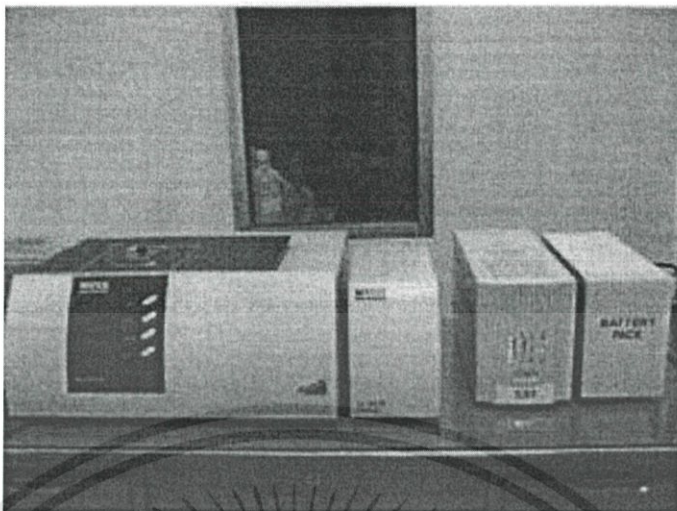


รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine, UTM)

3.7.4 อุณหภูมิเริ่มสลายตัว (Decomposition Temperature) [26]

ฟิล์มที่เตรียมได้ถูกนำไปวิเคราะห์หาอุณหภูมิเริ่มสลายตัว โดยเครื่อง Thermogravimetric Analyser (TGA) (รูปที่ 3.6) ซึ่งจะทำการวัดน้ำหนักที่สูญเสียไปเมื่อได้รับความร้อนและจะแสดงผลในรูปของน้ำหนักที่สูญเสียกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น โดยทำการวิเคราะห์ที่สภาวะดังนี้

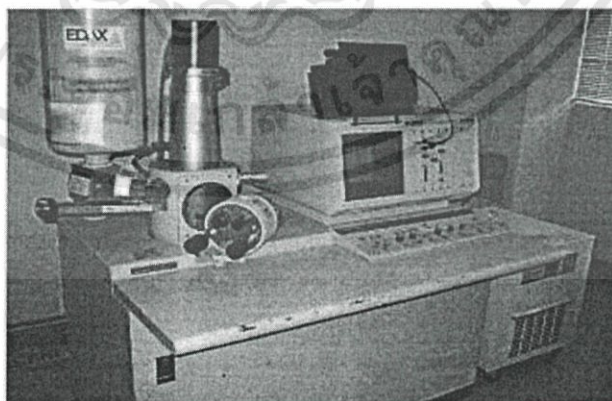
น้ำหนักฟิล์ม	7-10 mg
อุณหภูมิ	25-700 °C
อัตราการให้ความร้อน	20 °C/min
อัตราการเย็นตัว	20 °C/min
แก๊สที่ใช้	N ₂



รูปที่ 3.6 เครื่อง Thermogravimetric Analyser (TGA)

3.7.5 สันฐานวิทยา (Morphology) [26]

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ SEM ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคเพื่อดูการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการนำแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้ในแต่ละสูตรมาตัดให้ได้ขนาด $1 \times 3 \text{ cm}^2$ แช่ในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 5 นาทีจนแข็ง จากนั้นทำการหักชิ้นงานภายใต้ไนโตรเจนเหลว นำชิ้นงานไปทำการเคลือบทอง (Gold Sputter) แล้วนำชิ้นงานที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM (รูปที่ 3.7) ด้วยใช้กำลังขยาย 10,000 เท่า โดยดูภาคตัดขวางของชิ้นงานเพื่อดูการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้ AFM ดูพื้นผิวของฟิล์มที่เกิดจากการสลายตัวด้วยแสง โดยตัดชิ้นงานขนาด $2 \times 2 \text{ cm}^2$ แล้วนำชิ้นงานไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AFM (รูปที่ 3.8)

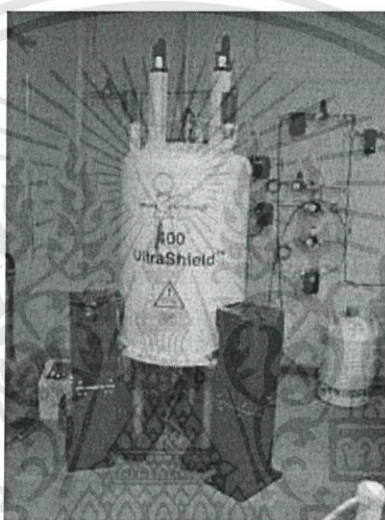


รูปที่ 3.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ,SEM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.6 การวิเคราะห์โครงสร้าง [27]

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่อง Nuclear Magnetic Resonance (NMR) ศึกษาชนิดของสารที่เกิดจากการย่อยสลายด้วยแสงโดยทำการสกัดสารจากฟิล์มที่ผ่านการฉายแสงแล้วเป็นเวลา 200 ชั่วโมง ด้วยคลอโรฟอร์มใช้เวลาในการสกัดเพียงเล็กน้อย (2-3 วินาที) จำนวน 2 ครั้ง จากนั้นทำการย่อยฟิล์มที่เหลือแล้วทำการระเหยตัวทำละลายและนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมงแล้วนำไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง NMR



รูปที่ 3.8 เครื่องวิเคราะห์นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์

(Nuclear magnetic resonance, NMR)

3.7.7 การเปลี่ยนแปลงสี [28]

นำฟิล์มที่เตรียมได้ทั้งก่อนและหลังฉายแสง UVA มาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์มด้วยเครื่องวัดสี (Colorimeter Spectrophotometer) ดังแสดงในรูปที่ 3.10 โดยสภาวะ $C/2^\circ$, L^* , a^* , b^* วิเคราะห์โดยทำการวัดสีตามมาตรฐานและสีขาวมาตรฐานจากกระเบื้อง เพื่อสร้างค่ามาตรฐาน (Standardization) จากนั้นทำการวัดสีแผ่นฟิล์ม ณ บริเวณเดียวกันทั้งก่อนและหลังฉายแสง UVA จากนั้นคำนวณหาค่าความแตกต่างของสีโดยรวม (Total Color Difference, ΔE) จากสูตร $\Delta E = (\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2)^{1/2}$ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของสีหรือเทียบจากค่าของ L^* , a^* , b^* ซึ่งดูได้จากรูปที่ 3.11 โดย

$L = 0$ จะมองเห็นเป็นสีดำ

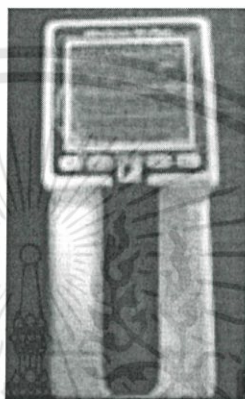
$L = 100$ จะมองเห็นเป็นสีขาว

a^* มีค่า + สีจะไปในทิศทางของสีแดง

a^* มีค่า - สีจะไปในทิศทางของสีเขียว

b^* มีค่า + สีจะไปในทิศทางของสีเหลือง

b^* มีค่า - สีจะไปในทิศทางของสีน้ำเงิน



รูปที่ 3.9 เครื่องวัดสี (Colorimeter Spectrophotometer)



รูปที่ 3.10 การเปรียบเทียบสี [28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมฟิล์ม HIPS ที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยแสงผ่านกระบวนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงด้วยไททานเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) โดยมีการใช้ TiO_2 ในปริมาณต่างๆ กัน (0.5-2.0 phr) การใช้ TiO_2 ที่ถูกเผาที่อุณหภูมิต่างๆ กัน (300-500 °C) และการใช้ TiO_2 ที่ถูกเจือด้วย $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ (ZnO -doped TiO_2) ด้วยวิธีการฝังตัวแบบแห้ง (Dry Impregnation) โดยเตรียมฟิล์มผ่านเทคนิคการหล่อแบบด้วยสารละลาย (Solution Casting) ได้ฟิล์มหนาประมาณ 60-62 μm ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตารางองค์ประกอบสูตรฟิล์ม

สูตร	TiO_2	ปริมาณ TiO_2 (phr)	ความหนา (μm)
HIPS	-	-	62 ± 0.71
HIPSTi0.5	-	0.5	60 ± 0.79
HIPSTi1	Non-Calcined	1.0	61 ± 0.61
HIPSTi2	-	2.0	60 ± 0.72
HIPSTi1(300)	-	1.0	62 ± 0.53
HIPSTi1(400)	Calcined	1.0	62 ± 0.45
HIPSTi1(500)	-	1.0	62 ± 0.25
HIPSTi1Zn(300)	-	1.0	61 ± 0.64
HIPSTi1Zn(400)	ZnO-doped TiO_2	1.0	61 ± 0.36
HIPSTi1Zn(500)	-	1.0	61 ± 0.33

4.1 สมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

การศึกษาอุณหภูมิการสลายตัว (T_d) ของฟิล์มที่ใส่และไม่ใส่ TiO_2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้เครื่อง Thermal gravimetric analyzer (TGA) ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิการสลายตัวของฟิล์ม HIPS

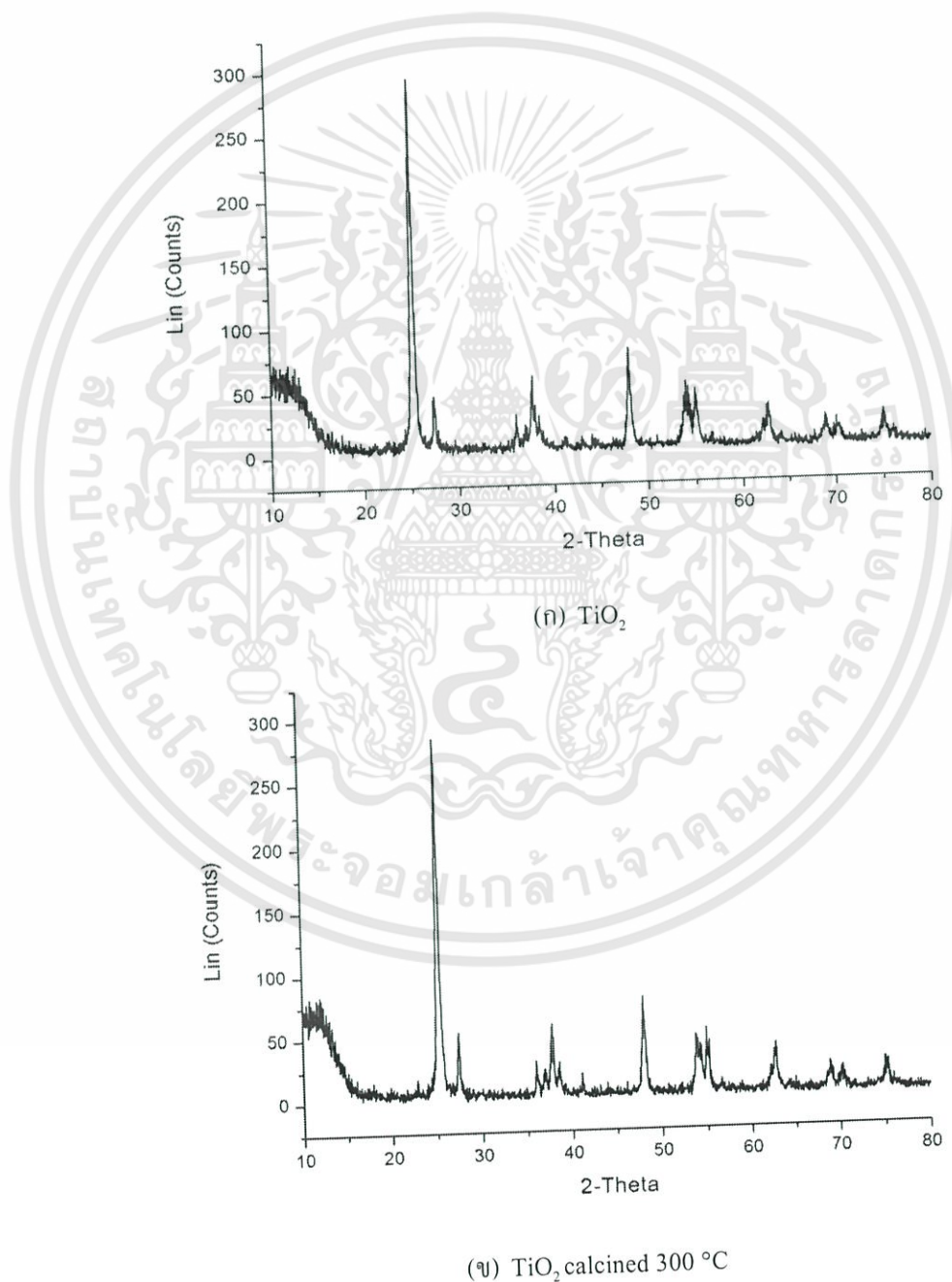
Sample	T_d (°C)	
	onset	peak
HIPS	375	407
HIPSTi0.5	382	408
HIPSTi1	393	412
HIPSTi2	393	414
HIPSTi1(300)	385	409
HIPSTi1(400)	390	409
HIPSTi1(500)	389	408

จากตารางที่ 4.2 พบว่าฟิล์ม HIPS ที่มีการเติม TiO_2 มีอุณหภูมิเริ่มสลายตัว (onset T_d) มากกว่าฟิล์มที่ไม่มีการเติม TiO_2 คาดว่าเกิดจากอนุภาค TiO_2 ดูดซับพลังงานความร้อนไว้ที่ตัวเอง ส่วนหนึ่งทำให้เกิดการหน่วงเวลาและอุณหภูมิในการเริ่มเสถียรภาพให้ช้าลง อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณ TiO_2 ในช่วง 0.5-2.0 phr ไม่ส่งผลต่อค่าอุณหภูมิเริ่มสลายตัว โดยในภาพรวมฟิล์ม HIPS ที่มีการเติมและไม่มีการเติม TiO_2 มีอุณหภูมิที่มีอัตราการสลายตัวสูงสุดที่ใกล้เคียงกัน อยู่ในช่วง 407-414 °C

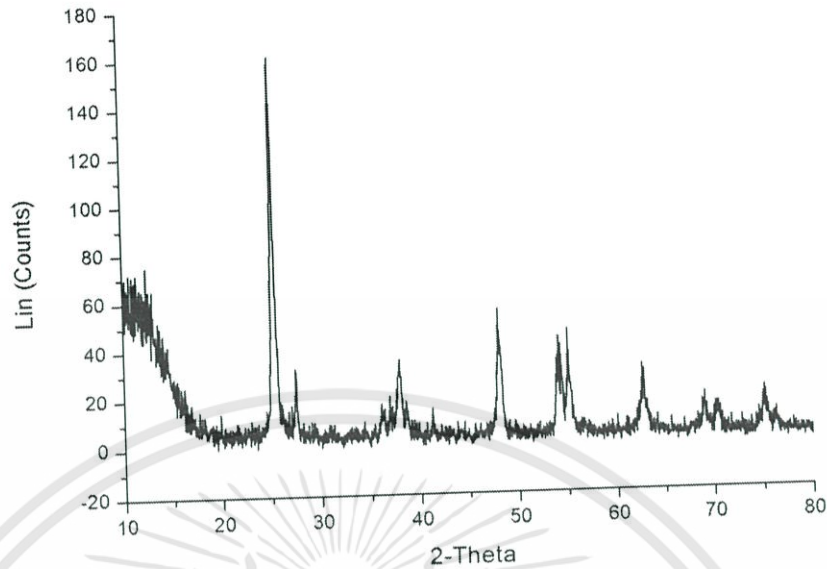
4.2 การศึกษาผลของอุณหภูมิในการเผา TiO_2 และการใช้ $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ -doped TiO_2 ที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์ม HIPS

4.2.1 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของไททานเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิค XRD

จากการเตรียม TiO_2 และ $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ -doped TiO_2 ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 300, 400 และ 500°C นำมาตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD ได้ผลดังรูปที่ 4.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ -doped TiO_2 calcined 300°C

รูปที่ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ TiO_2

รูปที่ 4.1 (ก) รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ TiO_2 พบว่า TiO_2 ที่ไม่ผ่านการเผา มีพีคที่สำคัญอยู่ที่ 25.3° ซึ่งเป็นพีคหลักของ TiO_2 แสดงวิฤภาคผลึกแบบอะนาเทส และพีคที่ 27.4° ซึ่งเป็นพีคหลักของ TiO_2 แสดงวิฤภาคผลึกแบบรูไทล์ รูปที่ 4.1 (ข) รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ TiO_2 calcined 300°C พบว่าพีคหลักของ TiO_2 ทั้งวิฤภาคผลึกแบบอะนาเทสและวิฤภาคผลึกแบบรูไทล์ยังคงขึ้นที่ตำแหน่งเดิมแต่แตกต่างกันที่ความเข้มของพีค ซึ่งโดยปกติเมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มขึ้นความเข้มของพีควิฤภาคแบบอะนาเทสจะเพิ่มขึ้น [24] แสดงว่าวิฤภาคอสัณฐานของ TiO_2 กลายเป็นวิฤภาคผลึกแบบอะนาเทสมากขึ้น อย่างไรก็ตามเวลาในการเผาเป็นอีกปัจจัยที่สำคัญในการเปลี่ยนแปลงวิฤภาคของ TiO_2 ในงานวิจัยนี้ใช้เวลาในการเผา 5 ชั่วโมงซึ่งคาดว่าอาจจะมากเกินไป ทำให้วิฤภาคผลึกแบบอะนาเทสส่วนหนึ่งเปลี่ยนไปเป็นวิฤภาคผลึกแบบรูไทล์ ส่งผลให้ความเข้มของพีควิฤภาคผลึกแบบรูไทล์สูงขึ้น รูปที่ 4.1 (ค) รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ TiO_2 ที่เจือด้วย $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ ที่เผาที่ 300°C (HIPSTiZn(300)) พบว่าพีคหลักของ TiO_2 ทั้งวิฤภาคผลึกแบบอะนาเทสและวิฤภาคผลึกแบบรูไทล์ ยังคงขึ้นตำแหน่งเดิมเช่นเดียวกับ TiO_2 ที่ไม่ผ่านการเผา และพบว่าความเข้มพีคลดลงด้วย โดยไม่พบสัญญาณพีคของ ZnO ซึ่งมีพีคหลักที่ 36.2° [11] คาดว่าเป็นเพราะซิงค์ไอออนแทรกเข้าไปอยู่ในโครงสร้างผลึกของ TiO_2 เกิดเป็นสารประกอบของ

Zn/TiO₂ หรือเกิดจากการเจือ Zn(NO₃)₂ ในปริมาณน้อยทำให้มีการกระจายตัวดีจึงไม่พบสัญญาณพีคของ ZnO จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD

จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ TiO₂ สามารถหาสัดส่วนความเข้มระหว่างวัฏภาคผลึกแบบอะนาเทสและวัฏภาคผลึกแบบรูไทล์ (I_A/I_R) ได้ดังตารางที่ 4.2 และยังสามารถคำนวณหาขนาดผลึกของวัฏภาคได้จากสมการเชอเรอร์ (Scherrer Formula) ผลการคำนวณดังตารางที่ 4.3

สมการเชอเรอร์ (Scherrer Formula)

$$t = \frac{0.94\lambda}{\beta_{1/2} \cos \theta}$$

t คือ ขนาดผลึก (นาโนเมตร)

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ (CuK α = 1.5406 นาโนเมตร)

$\beta_{1/2}$ คือ Full width at half maximum height (เรเดียน)

θ คือ มุมสะท้อน (องศา)

ตารางที่ 4.3 สัดส่วนความเข้มระหว่างวัฏภาคผลึกแบบอะนาเทสต่อผลึกแบบรูไทล์ (I_A/I_R)

Calcined Temperature	I _A		I _R		I _A /I _R	
	Un-doped	Doped-Zn	Un-doped	Doped-Zn	Un-doped	Doped-Zn
Room Temp.	294	-	46	-	6.39	-
300	285	161	54	32	5.28	5.03
400	291	164	49	36	5.94	4.56
500	295	175	65	47	4.54	3.72

ตารางที่ 4.4 ขนาดของวัฏภาคผลึกไททาเนียม

Temp.	ขนาดผลึก (nm)			
	อะนาเทส		รูไทล์	
	Un-doped	Doped-Zn	Un-doped	Doped-Zn
Room Temp.	39.7	-	52.3	-
300	37.1	39.4	62.1	53.3
400	41.6	37.4	64.8	59.2
500	41.2	37.7	92.0	87.7

จากตารางที่ 4.3 และ 4.4 พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการเผาสูงขึ้นทั้งวัฏภาคผลึกแบบอะนาเทส และวัฏภาคผลึกแบบรูไทล์มีค่าความเข้มพีคเพิ่มขึ้น และผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้นอยู่ในช่วง 37-42 nm ซึ่งโดยปกติเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาก็จะมีเพียงวัฏภาคผลึกแบบอะนาเทสที่เพิ่มขึ้น คาดว่าอาจเกิดจากการใช้เวลาในการเผาที่นานเกินไป (5 ชั่วโมง) ทำให้มีวัฏภาคผลึกแบบอะนาเทสบางส่วนเปลี่ยนไปเป็นวัฏภาคผลึกแบบรูไทล์ และเมื่อเจือ TiO_2 ด้วย $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ พบว่าความเข้มพีคของวัฏภาคผลึกแบบอะนาเทสและวัฏภาคผลึกแบบรูไทล์มีค่าลดลงและผลึกมีขนาดเล็กลง คาดว่าอาจเกิดจากซิงค์ไอออนเข้าไปทำลายความเป็นผลึกและขัดขวางการเติบโตของผลึก TiO_2 ทำให้มีความเป็นผลึกและความสมบูรณ์ของผลึกลดลง

4.2.2 การวิเคราะห์หาปริมาณของ ZnO ที่เจือใน TiO_2

จากรูปที่ 4.1(ค) พบว่าไม่ปรากฏการณ์พีคของ ZnO จึงนำมาวิเคราะห์หาปริมาณ ZnO ด้วยเทคนิค AAS ได้ผลดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ปริมาณของ ZnO ที่เจือใน TiO_2

สาร	ความเข้มข้น ZnO	%โมล ZnO
$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ -doped TiO_2 calcined 300	0.055	4.09 ± 0.06
$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ -doped TiO_2 calcined 400	0.052	3.88 ± 0.03
$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ -doped TiO_2 calcined 500	0.050	3.74 ± 0.07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.5 ทำให้ทราบว่า $Zn(NO_3)_2$ อยู่ใน TiO_2 จริง ได้ค่าเฉลี่ย % โมล $Zn(NO_3)_2$ อยู่ในช่วง 3.74-4.09 ซึ่งแสดงว่าการทำการเจือด้วยวิธีการฝังตัวแบบแห้ง สามารถทำการเจือ $Zn(NO_3)_2$ ได้ใกล้เคียงกับปริมาณที่กำหนด

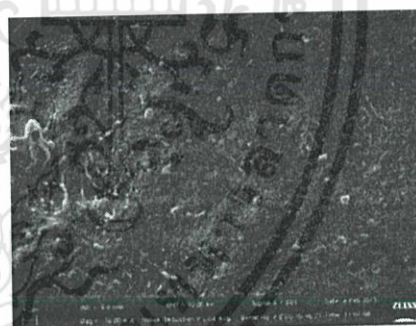
4.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิในการเผา TiO_2 และผลของการเจือ TiO_2 ด้วย $Zn(NO_3)_2$ ด้วยวิธี Impregnation

4.3.1 การกระจายตัวของอนุภาค TiO_2 ในฟิล์ม โดยใช้เทคนิค SEM

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของ HIPS ที่ผสม TiO_2 โดยใช้เทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่าฟิล์มที่มีการผสม TiO_2 ทั้งก่อนและหลังเจือด้วย $Zn(NO_3)_2$ มีการกระจายตัวของอนุภาค TiO_2 อยู่ภายในเนื้อฟิล์ม แต่เนื่องจาก TiO_2 เป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็ก มีความเป็นขั้ว และสภาพขั้วที่ต่างกันระหว่าง TiO_2 กับพอลิเมอร์ HIPS ซึ่งไม่มีขั้ว ทำให้อนุภาคของ TiO_2 มีโอกาสเกาะกลุ่มกันบ้าง รวมทั้งซิงค์ไอออนที่เข้าไปในโครงสร้าง TiO_2 ยังเพิ่มความมีขั้วให้มากขึ้น จึงทำให้เกิดการเกาะกลุ่มมากขึ้นด้วย



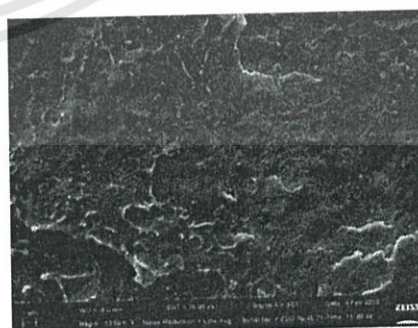
HIPSTi1(300)



HIPSTi1ZnO(300)

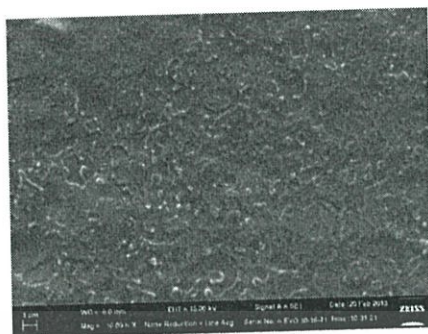


HIPSTi1(400)

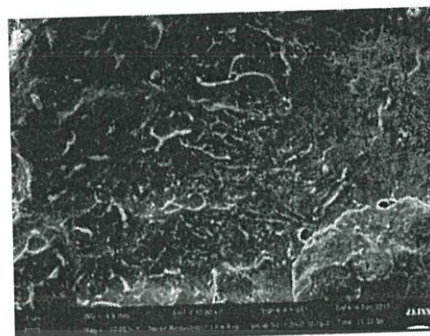


HIPSTi1ZnO(400)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



HIPSTi1(500)



HIPSTi1.0ZnO(500)

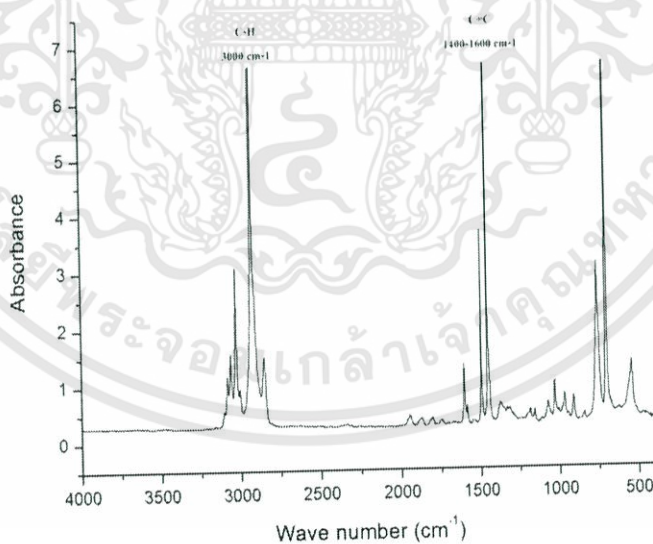
รูปที่ 4.2 ภาพตัดขวางของฟิล์ม HIPS/TiO₂ ก่อนและหลังเจือด้วย Zn(NO₃)₂

ที่กำลังขยาย 10000 เท่า

4.3.2 การวิเคราะห์ค่าดัชนีการหักเหและค่าดัชนีไฮดรอกซิลของฟิล์มตัวอย่าง

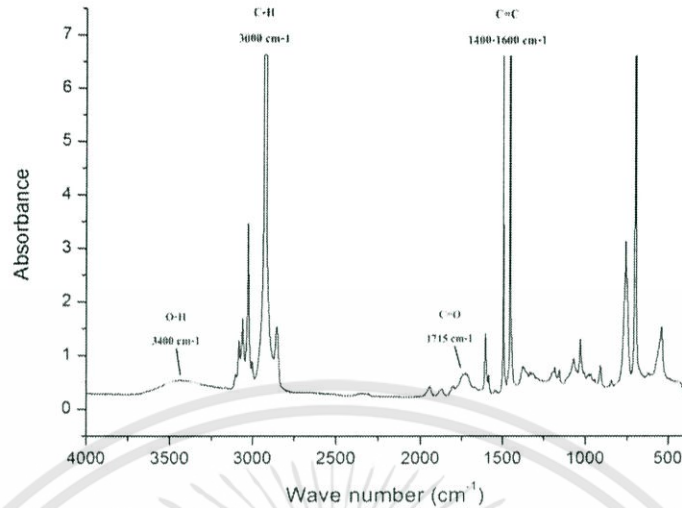
การศึกษาการสลายตัวของฟิล์มที่ใส่ TiO₂ โดยพิจารณาจากค่าดัชนีการหักเหและค่าดัชนีไฮดรอกซิล โดยนำฟิล์มที่ฉายแสงตามเวลาไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR ได้สเปกตรัม ดังรูปที่

4.3



(ก) สเปกตรัมของฟิล์มตัวอย่าง HIPSTi1 ก่อนฉายแสงยูวีเอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

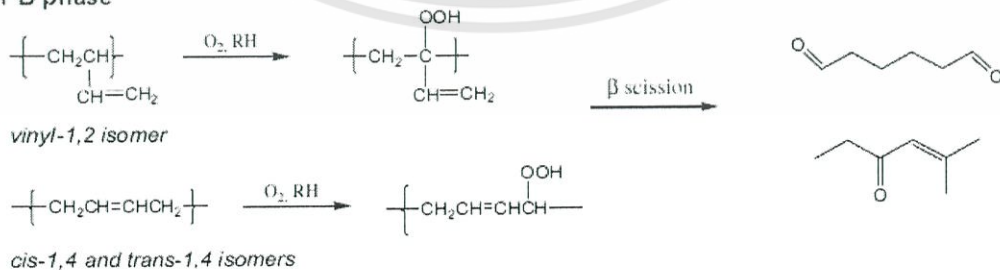


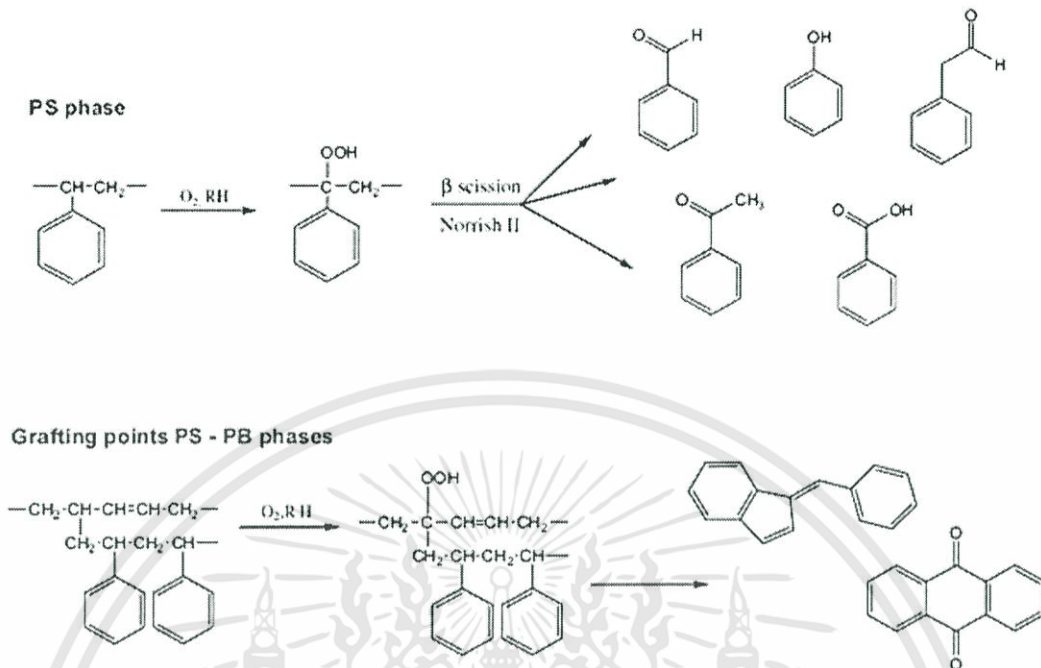
(ข) สเปกตรัมของฟิล์มตัวอย่าง HIPSTi1 หลังฉายแสงยูวีเอ 100 ชั่วโมง

รูปที่ 4.3 สเปกตรัมของฟิล์มตัวอย่าง HIPSTi1 ก่อน-หลังฉายแสงยูวีเอ 100 ชั่วโมง

จากสเปกตรัมของ HIPS ก่อนฉายแสงจะเห็นว่ามียอดที่สำคัญคือ ยอดที่ $1400-1600\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นยอดของ C=C ของวงเบนซีน ยอดที่ 3100 cm^{-1} เป็นยอดของ C-H stretching ของวงเบนซีนและ ยอดที่ 2900 cm^{-1} เป็นยอดของ C-H stretching ของพันธะเดี่ยว โดยหลังจากการฉายแสงพบว่ามียอด 1715 cm^{-1} เป็นยอดของ C=O stretching และยอดที่ 3400 cm^{-1} เป็นยอดของ O-H stretching เพิ่มขึ้น แสดงว่ามีการสลายตัวทางแสงของ HIPS อธิบายได้เป็นสมการการสลายตัวของ HIPS แสดงดังรูปที่ 4.4 โดยวิทยากรพอลิस्टาไทรน วิทยากรพอลิบิวทาไดอินและวิทยากรเชื่อมโยงของพอลิस्टาไทรนกับพอลิบิวทาไดอินเกิดการสร้างพันธะกับไฮโดรเปอร์ออกไซด์และการแตกตัวไปเป็นอนุมูลอิสระแมกโครแอลคอกซี (Macro alkoxy) จากนั้นจะเกิดการตัดขาดของสายโซ่ที่ตำแหน่งเบตาทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน [29]

PB phase



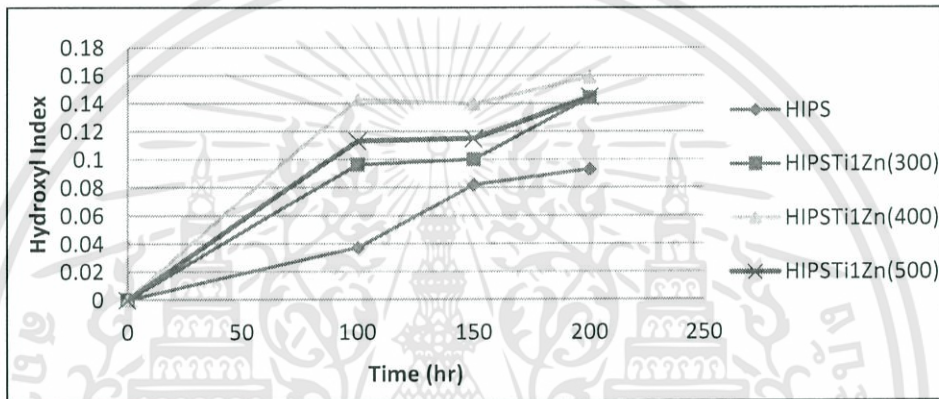
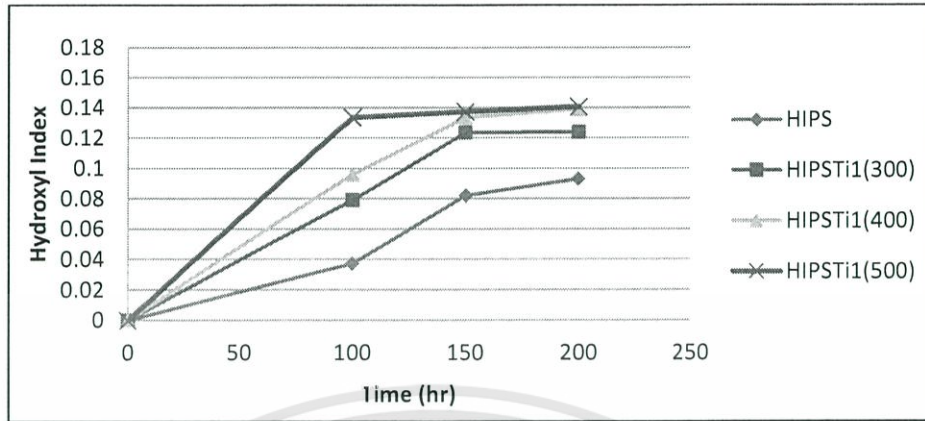


รูปที่ 4.4 สมการการสลายตัวของ HIPS [29]

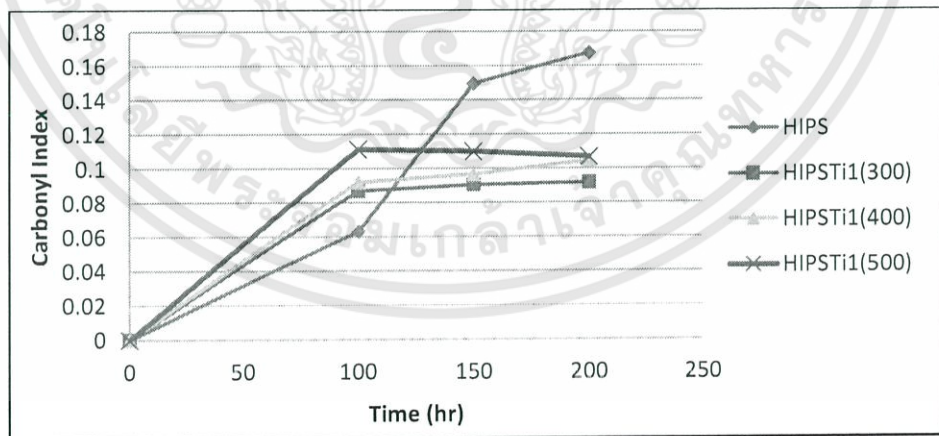
การนำเสนอการสลายตัวของ HIPS ในเชิงปริมาณใช้ค่าดัชนีคาร์บอนิล (Carbonyl Index, CI) โดยคำนวณจากอัตราส่วนค่าการดูดกลืนของพีคที่ 1715 cm^{-1} (พีคของ C=O stretching) ต่อค่าการดูดกลืนของพีคที่ 1452 cm^{-1} (พีคของ C=C ของวงเบนซีน) และคำนวณค่าดัชนีไฮดรอกซิล (Hydroxyl Index, HI) จากอัตราส่วนค่าการดูดกลืนของพีคที่ 3445 cm^{-1} (พีคของ O-H stretching) ต่อค่าการดูดกลืนของพีคที่ 1452 cm^{-1} (พีคของ C=C ของวงเบนซีน) ดังสมการด้านล่าง

$$C. I. = \frac{\text{absorbance at } 1715\text{ cm}^{-1}}{\text{absorbance at } 1452\text{ cm}^{-1}} \quad H. I. = \frac{\text{absorbance at } 3445\text{ cm}^{-1}}{\text{absorbance at } 1452\text{ cm}^{-1}}$$

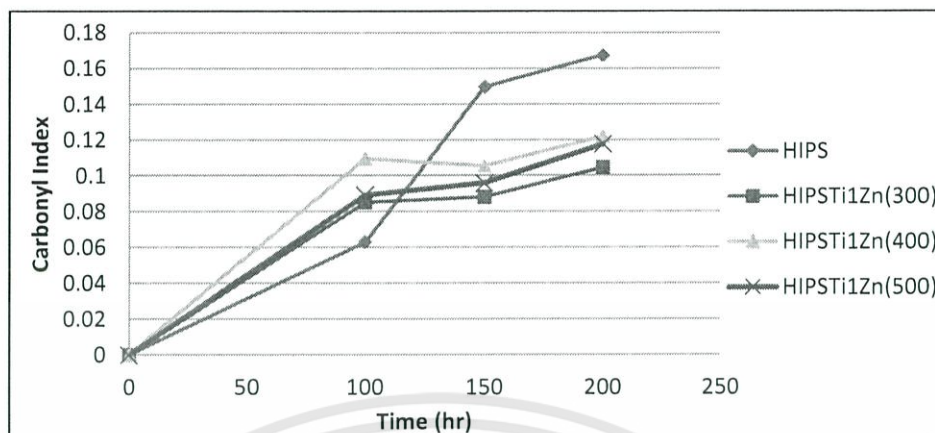
นำค่าดัชนีไฮดรอกซิลและดัชนีคาร์บอนิลที่คำนวณได้มาสร้างกราฟ ดังรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Hydroxyl Index กับเวลาในการฉายแสงยูวีของฟิล์มตัวอย่าง



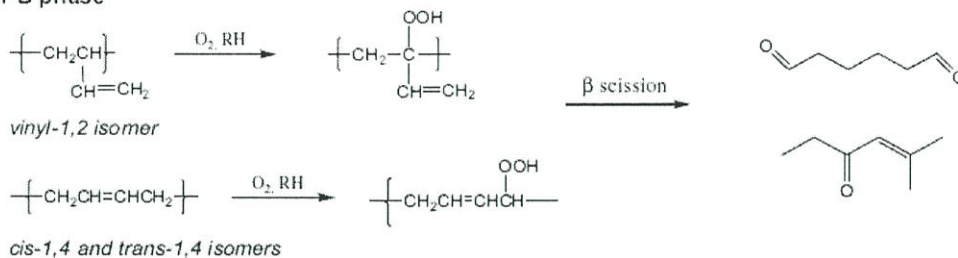
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



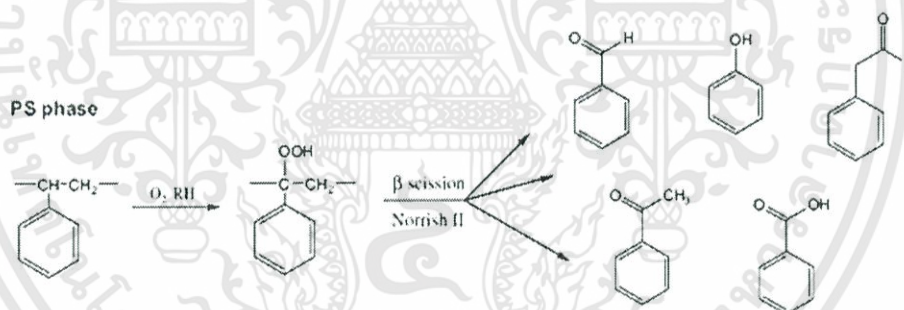
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Carbonyl Index กับเวลาในการฉายแสงยูวีเอของฟิล์มตัวอย่าง

จากรูปที่ 4.5 และ 4.6 พบว่าเมื่อเวลาในการฉายแสงเพิ่มขึ้นค่าดัชนีไฮดรอกซิลและค่าดัชนีคาร์บอนิลของฟิล์มสูตรเดียวกันมีค่าเพิ่มขึ้น อธิบายได้ว่าเนื่องจากระยะเวลาในการฉายแสงนานขึ้นทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มขึ้น จากนั้นอิเล็กตรอนอิสระจะเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนนำไปสู่การสร้างสปีชีส์ของออกซิเจนที่ว่องไว (อนุมูลอิสระไฮดรอกซิล $\cdot\text{OH}$ และอนุมูลอิสระซูเปอร์ออกไซด์ $\cdot\text{O}_2$) แล้วเกิดปฏิกิริยากับไฮโดรคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการตัดขาดของสายโซ่พอลิเมอร์ได้ผลิตภัณฑ์ที่บ่งบอกถึงการสลายตัวของ HIPS ซึ่งอยู่ในรูปของหมู่ฟังก์ชันได้ทั้งไฮดรอกซิลและคาร์บอนิลดังผลการวิเคราะห์ FTIR และเมื่อเปรียบเทียบฟิล์มที่มีการผสม TiO_2 ซึ่งเผาที่อุณหภูมิต่างกัน พบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิการเผา TiO_2 ที่ 400 และ 500 °C ให้ค่าดัชนีไฮดรอกซิลและคาร์บอนิลสูงกว่าที่ 300 °C เนื่องจากการเผาที่อุณหภูมินี้ทำให้ค่า I_{OH} สูงขึ้นแสดงว่าเกิดวัฏภาคผลึกแบบอะนาเทสเพิ่มมากขึ้น ซึ่งวัฏภาคผลึกแบบอะนาเทสมีความว่องไวในการเกิดอิเล็กตรอนอิสระทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระได้มากขึ้น ส่งผลให้การย่อยสลายดีขึ้น และเมื่อดูผลของการเจือ $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ พบว่าผลการย่อยสลายมีค่าไม่ต่างกับฟิล์มที่ไม่ถูกเจือซึ่งดูได้จากค่าดัชนีคาร์บอนิลและค่าดัชนีไฮดรอกซิลของฟิล์มทั้งสูตรที่เจือและไม่ถูกเจือ $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ ดังนั้นผลการเจือจึงไม่ส่งผลต่อการย่อยสลายของฟิล์มอย่างมีนัยสำคัญอาจเป็นเพราะการใช้เวลาในการเผาที่นานเกินไปตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น และเมื่อเปรียบฟิล์มที่ใส่ TiO_2 กับฟิล์ม HIPS ที่ไม่ใส่ TiO_2 พบว่าค่าดัชนีไฮดรอกซิลของฟิล์มที่ใส่ TiO_2 มีค่าสูงกว่าฟิล์ม HIPS ที่ไม่ใส่ TiO_2 แต่ค่าดัชนีคาร์บอนิลของฟิล์มที่ใส่ TiO_2 มีค่าต่ำกว่าฟิล์ม HIPS ที่ไม่ใส่ TiO_2 เนื่องจากการตัดขาดสายโซ่ใน HIPS ในช่วงแรกจะได้ผลิตภัณฑ์อยู่ในรูปของหมู่ฟังก์ชันของคาร์บอนิลซึ่งเกิดจากการย่อยสลายในวัฏภาคพอลิวิตาไดอินด้วย ดังสมการ

PB phase

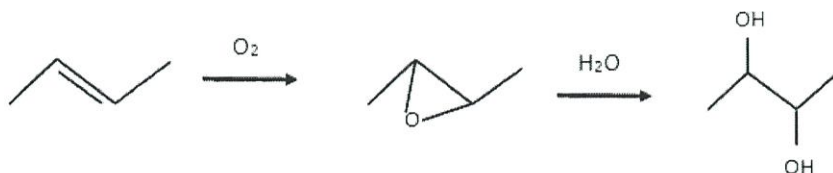


และเมื่อเติม TiO₂ ลงในฟิล์มจะทำให้เกิดการย่อยสลายในส่วนของวัฏภาคพอลิซิสไตรีนมากขึ้น ด้วยเหตุผลที่ว่า ตำแหน่งของคาร์บอนที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็น tertiary carbon ซึ่งมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา เมื่อถูกออกซิไดซ์ได้เป็นสารประกอบเปอร์ออกไซด์จะเกิดการแตกตัวโดยผ่านปฏิกิริยาการสลายพันธะของสายโซ่พอลิเมอร์ (chain scission) ได้เป็นสารที่มีหมู่คาร์บอนิลเป็นองค์ประกอบ เช่น แอลดีไฮด์ คีโตน ดังนั้นในช่วงแรกจึงเห็นการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีคาร์บอนิลที่เพิ่มขึ้น จากนั้นสามารถเกิดการออกซิไดซ์ต่อเป็นอนุพันธ์ของคาร์บอกซิลิกที่มีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นองค์ประกอบ ทำให้เมื่อเวลาผ่านไปจะเห็นว่าค่าดัชนีคาร์บอนิลเริ่มลงที่ แต่ค่าดัชนีไฮดรอกซิลเพิ่มขึ้น ดังสมการ



ยิ่งไปกว่านั้นในวัฏภาคของพอลิวิทาไดอินยังสามารถเกิดการออกซิไดซ์ทำให้เกิดเป็นวงอีพอกไซด์ และเกิดการเปิดวงได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของไดออล ดังสมการ จึงส่งผลให้ค่าดัชนีไฮดรอกซิลเพิ่มขึ้นและเห็นความแตกต่างชัดเจน

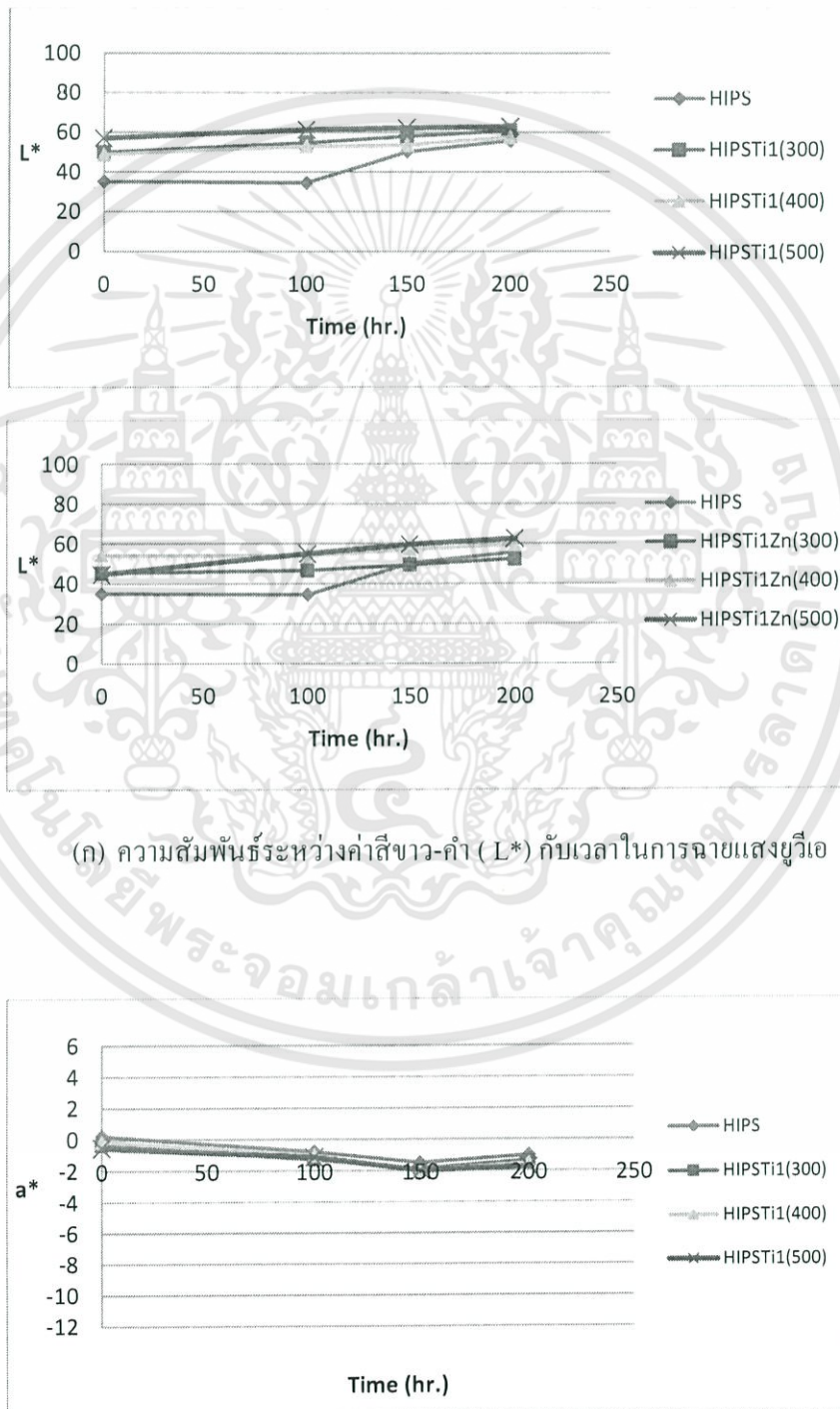
PB phase



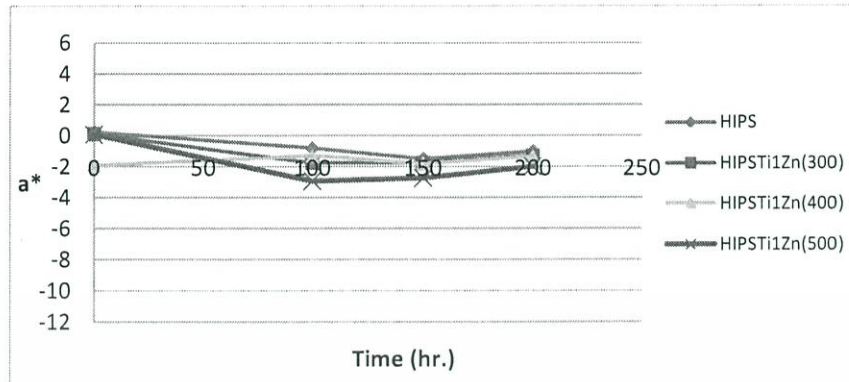
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 การเปลี่ยนแปลงสี

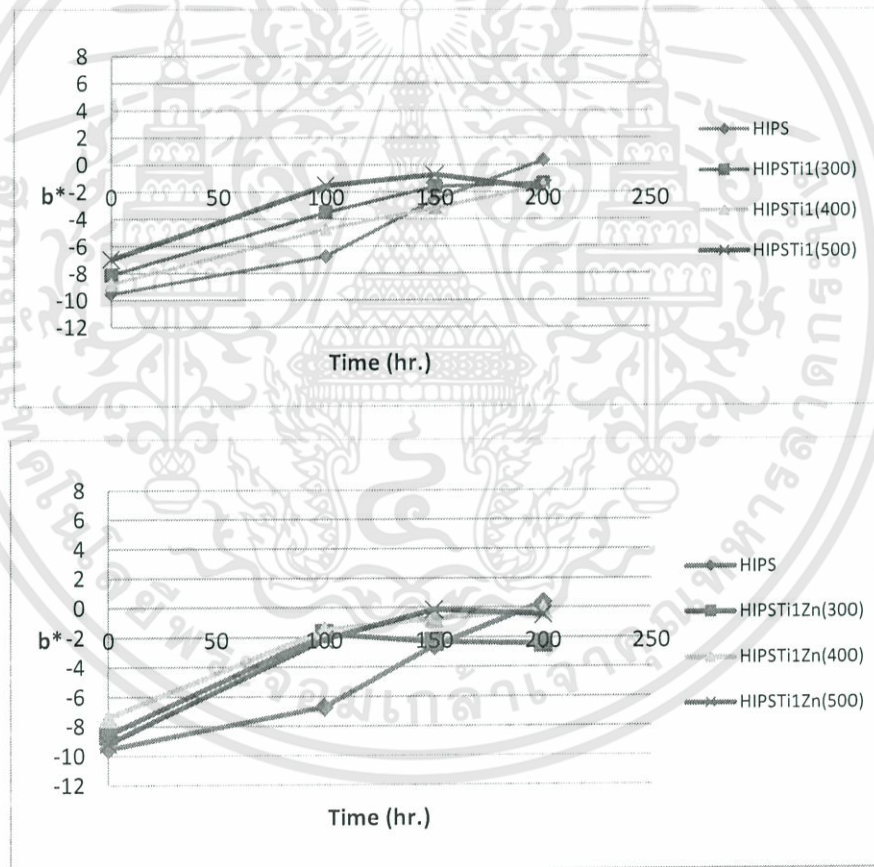
นอกจากการหาค่าดัชนีไฮดรอกซิลและค่าดัชนีคาร์บอนิลแล้วยังสามารถใช้ค่าการเปลี่ยนแปลงสีเพื่อช่วยยืนยันการสลายตัวของฟิล์มได้เช่นกัน ดังนั้นจึงนำฟิล์มที่เตรียมได้ไปวัดค่าการเปลี่ยนแปลงสีก่อนและหลังการฉายแสง แสดงผลดังรูปที่ 4.7



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

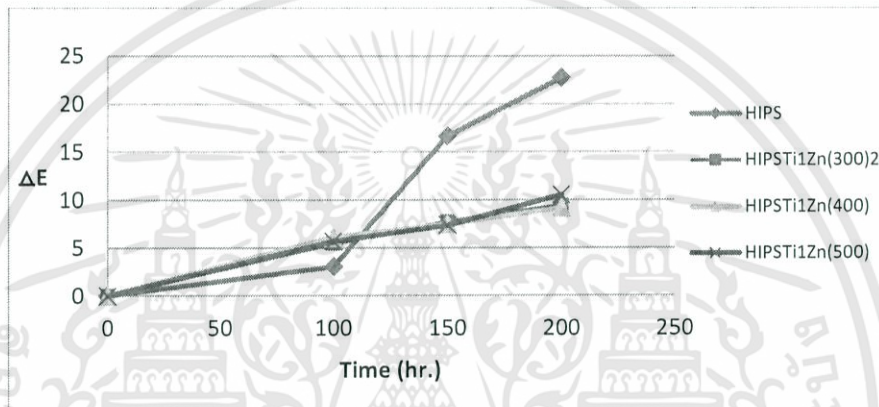
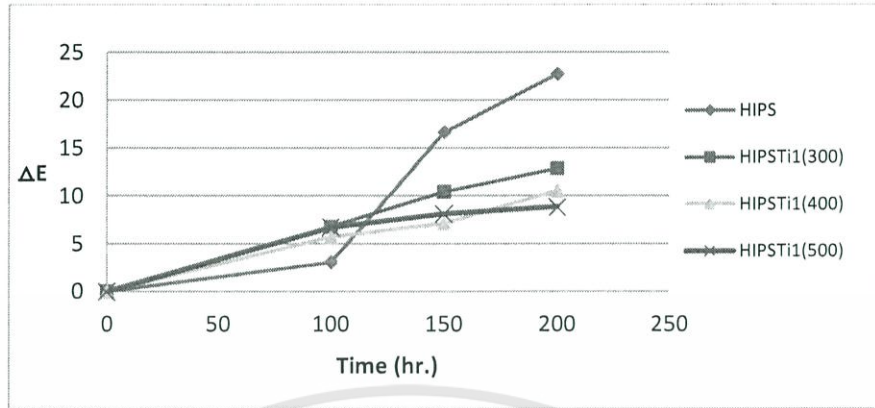


(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีแดง-เขียว (a^*) กับเวลาในการฉายแสงยูวีเอ



(ค) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีเหลือง-น้ำเงิน (b^*) กับเวลาในการฉายแสงยูวีเอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

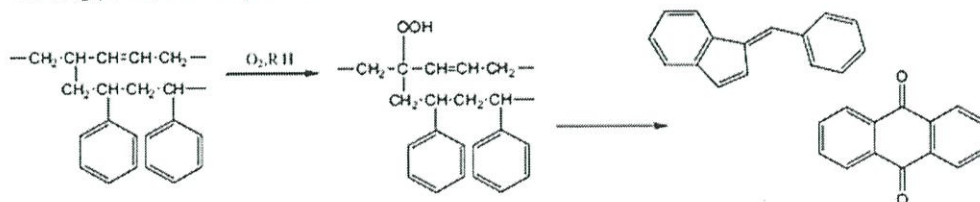


(ง) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเปลี่ยนแปลงสี (ΔE) กับเวลาในการฉายแสงยูวีเอ

รูปที่ 4.7 ค่าการเปลี่ยนแปลงสี

จากผลการทดลอง พบว่าการเพิ่มเวลาในการฉายแสงจะทำให้ฟิล์มมีสีเหลืองมากขึ้น สังเกตได้จากค่า b^* ซึ่งเป็นค่าการเปลี่ยนสีในเฉดสีเหลือง-น้ำเงิน (รูปที่ 4.7 (ค)) ทั้งนี้เป็นผลมาจากฟิล์มเกิดการย่อยสลาย โครงสร้างของฟิล์มถูกทำลายแล้วเกิดโครงสร้างในรูปของโครโมฟอร์ (Chromophore) ดังสมการ ทำให้ฟิล์มมีการดูดกลืนแสงแล้วสะท้อนช่วงแสงสีเหลือง แต่ค่า L^* และค่า a^* มีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมากเนื่องจากเนื้อฟิล์มพอลิเมอร์ HIPS มีสีขาว

Grafting points PS - PB phases



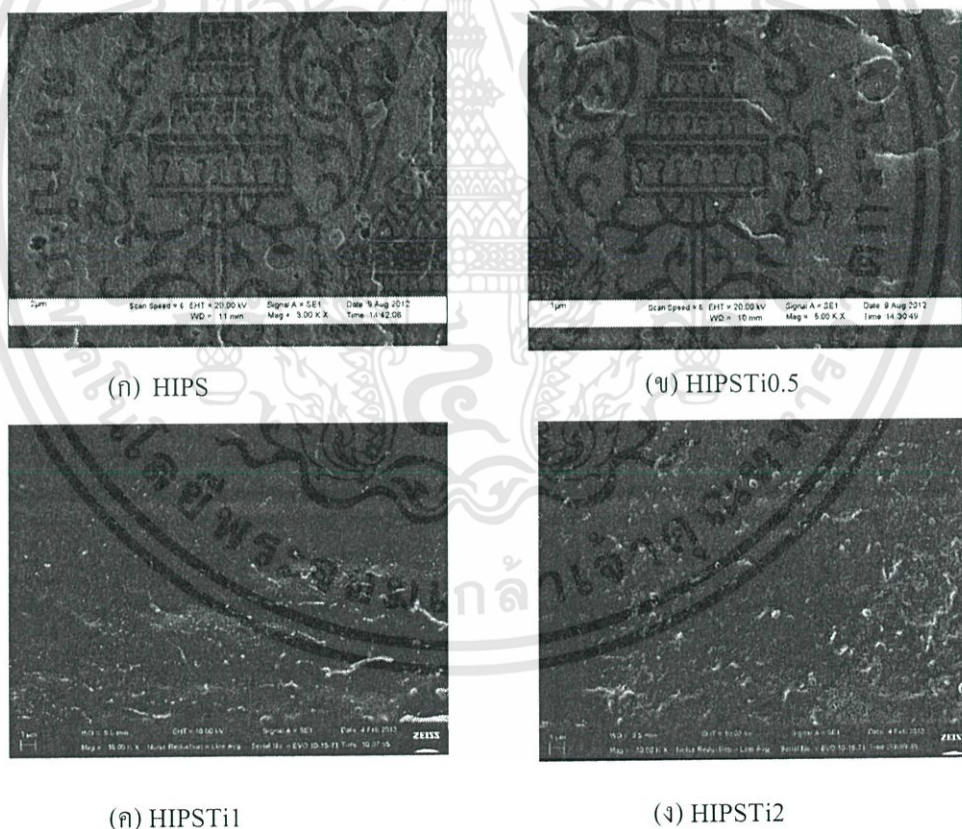
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การศึกษาผลของปริมาณ TiO_2 ที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์ม HIPS

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิในการเผาและผลของการเจือ $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ พบว่าให้ค่าการย่อยสลายที่ไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงทำการศึกษาการเติม TiO_2 ในปริมาณ 0.5-2.0 phr ว่าจะมีผลต่อการย่อยสลายอย่างไร

4.4.1 การกระจายตัวของอนุภาค TiO_2 ในฟิล์ม โดยใช้เทคนิค SEM ก่อนฉายแสง

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของ HIPS ที่ผสม TiO_2 โดยใช้เทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่าฟิล์มที่มีการผสม TiO_2 มีการกระจายตัวของอนุภาค TiO_2 อยู่ในเนื้อฟิล์ม แต่เนื่องจาก TiO_2 เป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็ก และสภาพผิวที่ต่างกับพอลิเมอร์ HIPS ทำให้อนุภาคของ TiO_2 มีโอกาสเกาะกลุ่มกัน เกิดการกระจายตัวของ TiO_2 ในฟิล์มได้ยาก โดยเฉพาะเมื่อปริมาณ TiO_2 เพิ่มขึ้น

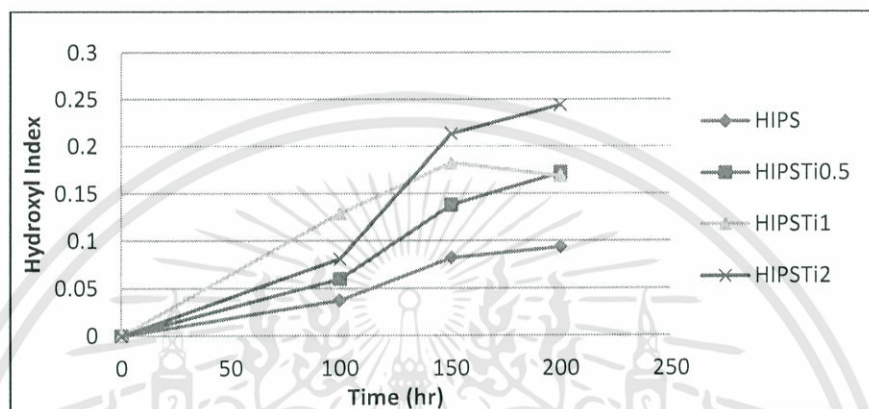


รูปที่ 4.8 ภาพตัดขวางของฟิล์มที่กำลังขยาย 10000 เท่า

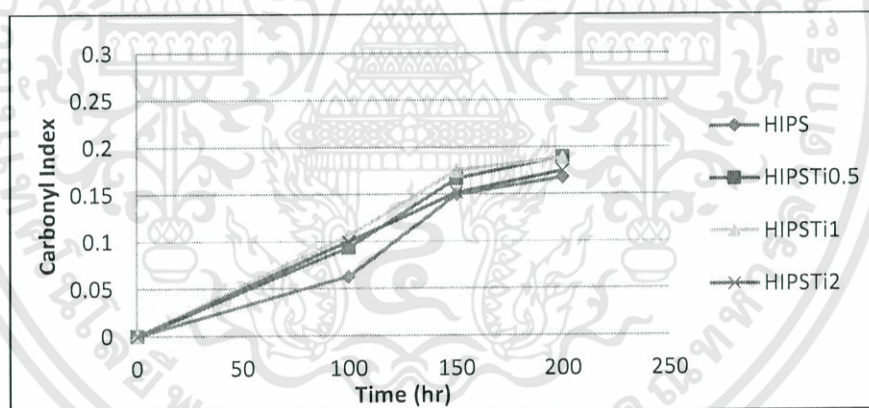
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 การวิเคราะห์ค่าดัชนีคาร์บอนิลและค่าดัชนีไฮดรอกซิลของฟิล์มตัวอย่าง

การศึกษาการสลายตัวของฟิล์มที่ใส่ TiO_2 ที่ปริมาณ 0.5-2.0 phr โดยพิจารณาจากค่าดัชนีไฮดรอกซิลและค่าดัชนีคาร์บอนิล นำค่าที่คำนวณได้มาสร้างกราฟ ดังรูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.10 ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Hydroxyl Index กับเวลาในการฉายแสงยูวีเอของฟิล์มตัวอย่าง

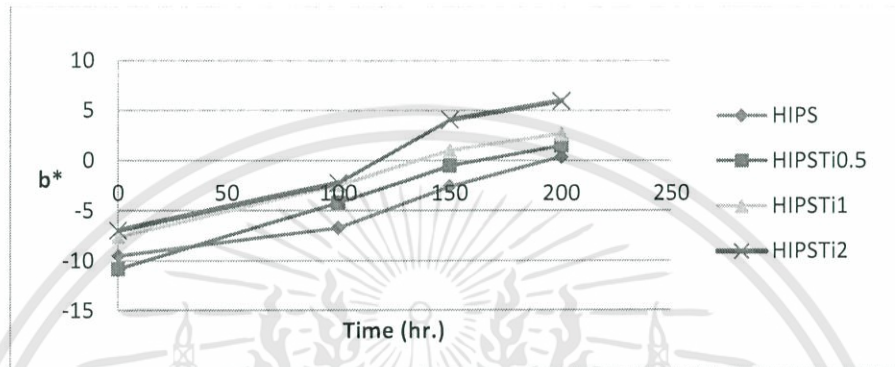


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Carbonyl Index กับเวลาในการฉายแสงยูวีเอของฟิล์มตัวอย่าง

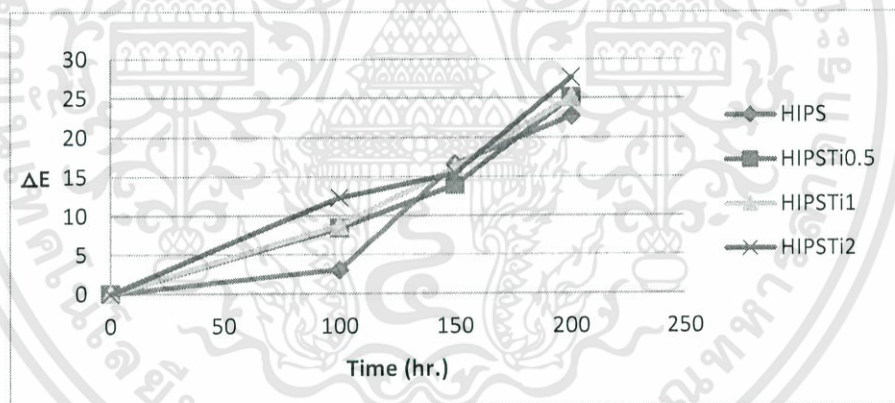
จากผลการทดลองรูปที่ 4.9 และ 4.10 ทั้งค่าดัชนีคาร์บอนิลและค่าดัชนีไฮดรอกซิลของฟิล์มสูตรเดียวกันมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เวลานานขึ้น เกิดจากการย่อยสลายของ HIPS ดังได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งเห็นได้ว่าค่าดัชนีคาร์บอนิลและค่าดัชนีไฮดรอกซิลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ TiO_2 เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้เห็นได้ว่าค่าดัชนีไฮดรอกซิลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน

4.4.3 การเปลี่ยนแปลงสี

นอกจากนี้ยังสามารถใช้ค่าการเปลี่ยนแปลงสีเพื่อช่วยยืนยันการสลายตัวของฟิล์มได้เช่นกัน โดยนำฟิล์มที่เตรียมได้ไปวัดค่าการเปลี่ยนแปลงสีก่อนและหลังการฉายแสง แสดงผลดังรูปที่ 4.11



(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีเหลือง-น้ำเงิน (b^*) กับเวลาในการฉายแสงยูวี



(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเปลี่ยนแปลงสี (ΔE) กับเวลาในการฉายแสงยูวี

รูปที่ 4.11 ค่าการเปลี่ยนแปลงสี

จากรูปที่ 4.11 พบว่าฟิล์ม HIPS มีสีเหลืองขึ้นเมื่อเวลาในการฉายแสงเพิ่มขึ้นหรือมีปริมาณ TiO_2 เพิ่มขึ้น ดูได้จากค่า b^* (รูปที่ 4.11 (ก)) สูงขึ้น เนื่องจากเกิดการย่อยสลายแล้วเกิดโครงสร้างในรูปโครโมฟอร์มากขึ้น จึงมีการเปลี่ยนแปลงสีมากขึ้นดูจากค่า ΔE (รูปที่ 4.11 (ข))

4.4.4 การหาโครงสร้างของฟิล์ม HIPS ก่อนและหลังผ่านการย่อยสลายด้วยแสงยูวีเอ

จากผลของค่าดัชนีไฮดรอกซิลและค่าดัชนีคาร์บอนิลพบว่าหลังการฉายแสงยูวีเอมีการย่อยสลายเกิดขึ้น ดังนั้นจึงทำการศึกษาโครงสร้างของฟิล์ม HIPS ก่อนและหลังการย่อยสลาย โดยทำการสกัดฟิล์มด้วยคลอโรฟอร์มแล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค NMR แสดงผลสเปกตราดังรูปที่ 4.12 และ 4.13



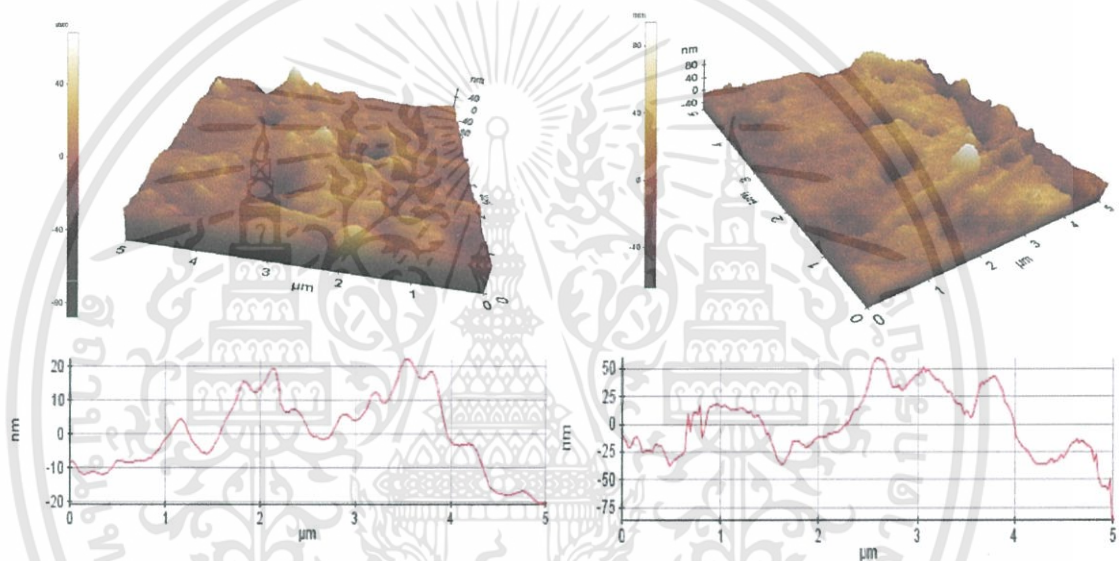
รูปที่ 4.13 NMR สเปกตรัมของ HIPSTi2 หลังการฉายแสงยูวีเอ 200 ชั่วโมง

รูปที่ 4.12 เป็น NMR สเปกตรัมของ HIPS ก่อนการฉายแสง พบว่ามีพีคที่ประมาณ 7.0 ppm ซึ่งเป็นพีคของไฮโดรเจนที่วงอะโรมาติกของพอลิสไตรีน พีคที่ประมาณ 5.5 ppm เป็นพีคไฮโดรเจนที่ต่อกับคาร์บอนที่เกิดพันธะคู่ในสายโซ่ของพอลิบิวทาไดอีน พีคที่ประมาณ 1.0 ppm เป็นพีคไฮโดรเจนของ CH ที่อยู่ในสายโซ่ และพีคที่ประมาณ 1.5 ppm เป็นพีคไฮโดรเจนของ CH₂

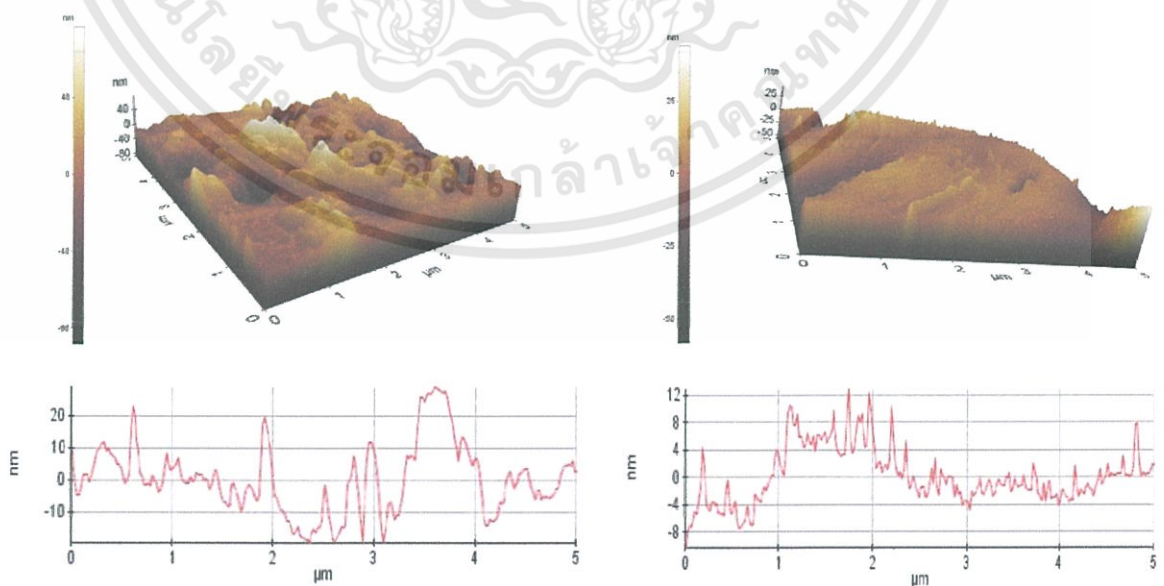
ที่อยู่ในสายโซ่ โดยเมื่อนำฟิล์มไปผ่านการฉายแสงยูวีเอ 200 ชั่วโมง มาวัดด้วยเทคนิค NMR ดังรูปที่ 4.13 พบว่าไม่พบพีคที่ประมาณ 5.5 ppm ของไฮโดรเจนที่ต่อกับคาร์บอนที่ตำแหน่งพันธะคู่ในพอลิวิทาไดอิน แสดงว่าอิเล็กตรอนอิสระเข้าทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งพันธะคู่ในพอลิวิทาไดอินทำให้เกิดการตัดขาดของสายโซ่พอลิเมอร์ ส่งผลให้ฟิล์มเกิดการย่อยสลายในที่สุด

4.4.5 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวฟิล์มก่อนและหลังการฉายแสงยูวีเอ

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของฟิล์ม โดยใช้เทคนิค AFM แบบ non-Contact การเคลื่อนที่หัวตรวจวัดแบบ tapping mode โดยทำการสแกนชิ้นงาน $5 \times 5 \mu\text{m}$. แสดงผลดังรูปที่ 4.14

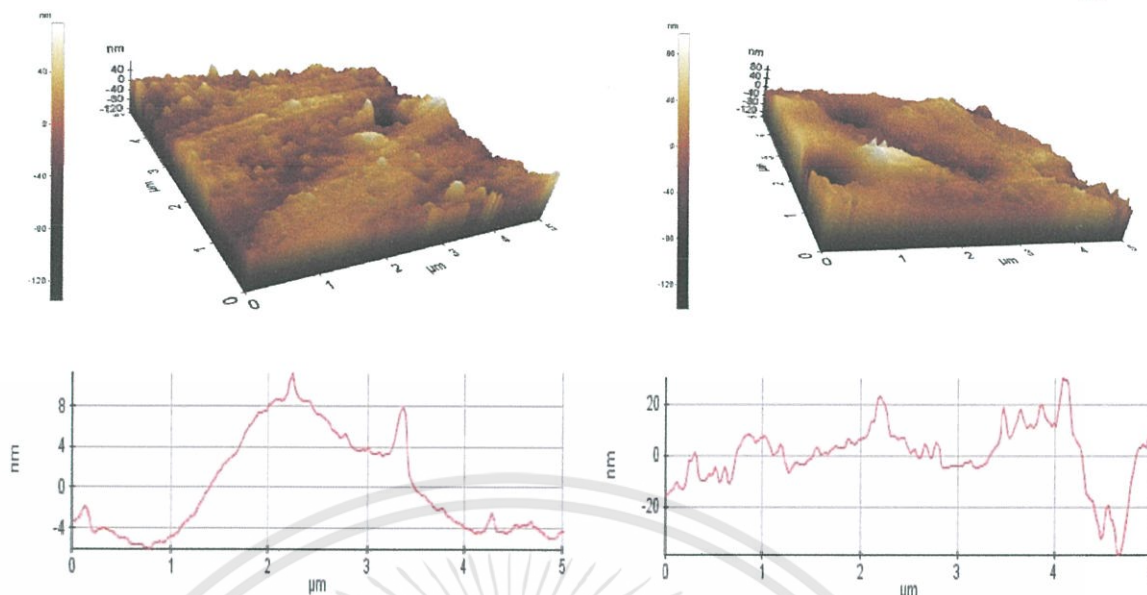


(ก) พื้นผิวของฟิล์ม HIPS ก่อนและหลังฉายแสงยูวีเอ 200 ชั่วโมง



(ข) พื้นผิวของฟิล์ม HIPSTi1 ก่อนและหลังฉายแสงยูวีเอ 200 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



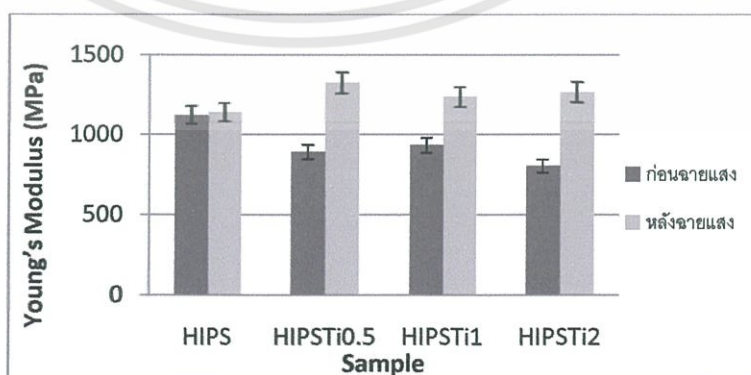
(ค) พื้นผิวของฟิล์ม HIPSTi2 ก่อนและหลังฉายแสงยูวีเอ 200 ชั่วโมง

รูปที่ 4.14 พื้นผิวของฟิล์มก่อนและหลังฉายแสงยูวีเอ 200 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.14 พบว่าพื้นผิวของฟิล์มก่อนฉายแสงมีความขรุขระน้อยกว่าฟิล์มที่ผ่านการฉายแสง โดยฟิล์มที่ผ่านการฉายแสงจะเกิดการสลายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ในบริเวณที่มี TiO_2 กระจายตัวอยู่ และจะเริ่มเกิดการสลายตัวจากบริเวณพื้นผิวของฟิล์มก่อน ทำให้พื้นผิวของฟิล์มมีความขรุขระมากขึ้น ซึ่งความขรุขระจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณและการกระจายตัว TiO_2 ในเนื้อฟิล์ม

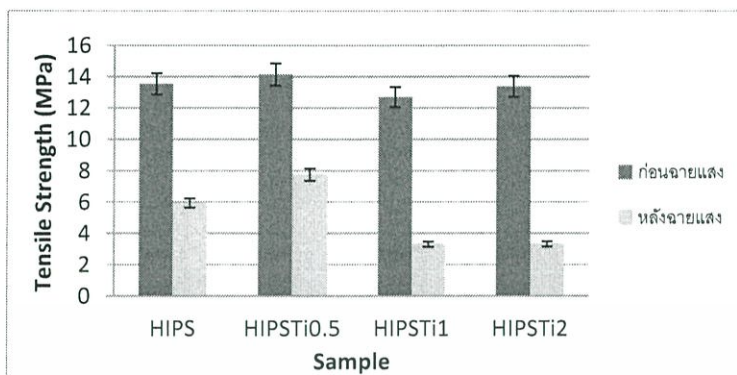
4.4.6 สมบัติเชิงกล

จากผลการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของฟิล์มหลังการฉายแสงพบว่าพื้นผิวฟิล์มมีความขรุขระมากขึ้น ซึ่งส่งผลต่อสมบัติเชิงกล จึงทำการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม HIPS ที่ผสม TiO_2 ในปริมาณที่ต่างกันก่อนและหลังฉายแสงยูวีเอ 150 ชั่วโมง แสดงผลดังรูปที่ 4.15

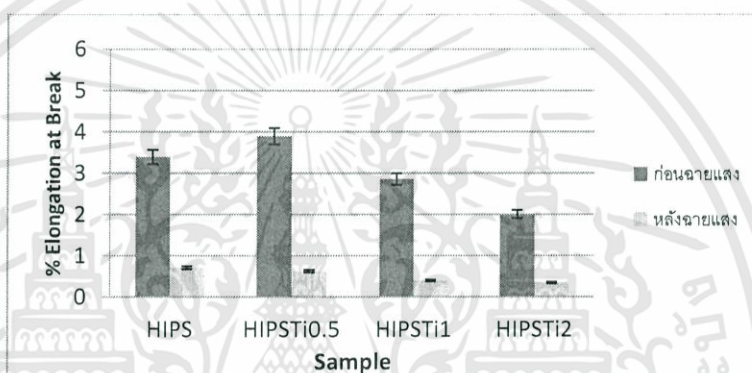


(ก) Young's Modulus

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) Tensile Strength



(ค) % Elongation at Break

รูปที่ 4.15 สมบัติเชิงกลของฟิล์มที่มีปริมาณ TiO_2 0.5-2.0 phr

ก่อนและหลังฉายแสงยูวีเอ 150 ชั่วโมง

จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม HIPS ก่อนฉายแสง เมื่อเติมและไม่เติม TiO_2 พบว่าฟิล์ม HIPS ที่เติม TiO_2 มีค่ามอดูลัสของยัง ความแข็งแรงดึง และร้อยละการยืด ณ จุดขาดมีค่าใกล้เคียงกับฟิล์ม HIPS อาจเป็นเพราะการเติม TiO_2 ในปริมาณที่น้อย เมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลก่อนและหลังฉายแสงยูวีเอ พบว่าค่าความแข็งแรงดึง และร้อยละการยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อผ่านการฉายแสงทำให้เกิดการตัดขาดของสายโซ่ ส่งผลให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นและความสามารถในการรับแรงดึงลดลง สำหรับค่า Young's Modulus ที่เพิ่มขึ้นอาจเกิดจากการเชื่อมโยงของสายโซ่พอลิเมอร์ [30] ส่งผลให้ฟิล์มมีลักษณะแข็งขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการย่อยสลายด้วยแสงของฟิล์ม HIPS โดยใช้ TiO_2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง ทำการศึกษาเกี่ยวกับอุณหภูมิในการเผา TiO_2 ที่ 300, 400 และ 500 การเจือด้วย $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ และการใช้ปริมาณ TiO_2 ที่ 0.5-2.0 phr

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิในการเผา TiO_2 ที่อุณหภูมิ 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส และการเจือด้วย $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ พบว่าเมื่ออุณหภูมิการเผาสูงขึ้นจะทำให้วัฏภาคอสัณฐานเปลี่ยนไปเป็นวัฏภาคผลึกแบบอะนาเทสมากขึ้น แต่เนื่องจากในการทดลองนี้ใช้เวลาในการเผานานเกินไป ทำให้วัฏภาคผลึกแบบอะนาเทสส่วนหนึ่งเปลี่ยนไปเป็นวัฏภาคผลึกแบบรูไทล์ ดังนั้นเมื่อทำการตรวจวัดด้วยเทคนิค XRD จึงพบว่าความเข้มพีคของวัฏภาคผลึกแบบอะนาเทสและวัฏภาคผลึกแบบรูไทล์มีค่าเพิ่มขึ้นทั้งคู่ โดยผลของการย่อยสลายพบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิการเผา TiO_2 ที่ 400 และ 500 °C ให้ค่าดัชนีคาร์บอนิลและค่าดัชนีไฮดรอกซิลสูงกว่าที่อุณหภูมิการเผา 300°C เนื่องจากการเผาที่อุณหภูมินี้ทำให้ค่า I_{α} สูงขึ้นแสดงว่าเกิดวัฏภาคผลึกแบบอะนาเทสเพิ่มมากขึ้น ซึ่งวัฏภาคผลึกแบบอะนาเทสมีความว่องไวในการเกิดอิเล็กตรอนอิสระทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระได้มากขึ้น ส่งผลให้การย่อยสลายดีขึ้น และเมื่อดูผลของการเจือ $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ พบว่าผลการย่อยสลายมีค่าไม่ต่างกับฟิล์มที่ไม่ถูกเจือ ดังนั้นการเจือจึงไม่ส่งผลต่อการย่อยสลายของฟิล์มอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการเผาที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานเกินไป

จากการศึกษาผลของปริมาณ TiO_2 ที่ 0.5-2.0 phr พบว่าการย่อยสลายของฟิล์มในสูตรเดียวกันจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเวลาการฉายแสงเพิ่มขึ้น และเมื่อปริมาณ TiO_2 สูงขึ้นก็จะมีค่าการย่อยสลายสูงขึ้นเช่นเดียวกัน เนื่องจากปริมาณ TiO_2 ที่เพิ่มขึ้นและเวลาในการฉายแสงที่นานขึ้นทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มขึ้น จากนั้นอิเล็กตรอนอิสระจะเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนนำไปสู่การสร้างสปีชีส์ของออกซิเจนที่ว่องไว (อนุมูลอิสระไฮดรอกซิล $\cdot\text{OH}$ และอนุมูลอิสระซูเปอร์ออกไซด์ $\cdot\text{O}_2$) และเข้าทำปฏิกิริยากับไฮโดรคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการตัดขาดของสายโซ่

พอลิเมอร์ และเกิดการย่อยสลายในที่สุด โดยจากผลของ NMR สเปกตรัม พบว่าฟิล์มหลังการฉายเอกซเรย์เป็นเอกซเรย์ที่ส่งผ่านไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำมาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสงไม่พบพิกที่ประมาณ 5.5 ppm ซึ่งเป็นพิกของไฮโดรเจนที่ต่อกับคาร์บอนที่ตำแหน่งพันธะคู่ในพอลิবিทาลไดอิน แสดงว่าอิเล็กตรอนอิสระเข้าทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งพันธะคู่ในพอลิবিทาลไดอินทำให้เกิดการตัดขาดของสายโซ่พอลิเมอร์

นอกจากนี้การย่อยสลายของฟิล์มสามารถสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงสี ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มและสมบัติเชิงกล โดยเมื่อฟิล์มเกิดการย่อยสลายฟิล์มจะมีสีเหลืองมากขึ้น เนื่องจากเมื่อเกิดการย่อยสลายโครงสร้างของฟิล์มถูกทำลายแล้วเกิดโครงสร้างในรูปของโครโมฟอร์ ทำให้มีการดูดกลืนแสงช่วงแสงสีเหลืองมากขึ้นดูได้จากค่า b^* ที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มก่อนและหลังฉายแสงด้วยเทคนิค AFM พบว่าพื้นผิวของฟิล์มที่ผ่านการฉายแสงมีความขรุขระเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการสลายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งความขรุขระจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณและการกระจายตัว TiO_2 ในเนื้อฟิล์ม และเมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลของฟิล์ม HIPS ก่อนและหลังฉายแสง พบว่าค่าความแข็งแรงดึง และร้อยละการยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อผ่านการฉายแสงทำให้เกิดการตัดขาดของสายโซ่ ส่งผลให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นและความสามารถในการรับแรงดึงลดลง สำหรับค่า Young's Modulus ที่เพิ่มขึ้นอาจเกิดจากการเชื่อมโยงของสายโซ่พอลิเมอร์ ส่งผลให้ฟิล์มมีลักษณะแข็งขึ้น

ข้อเสนอแนะ

1. ควรใช้เวลาที่เหมาะสมในการเผา TiO_2 เพื่อให้ได้วัฏภาคผลึกแบบอะนาเทสเพิ่มขึ้นและไม่เปลี่ยนไปเป็นวัฏภาคผลึกแบบรูไทท์
2. หาวิธีการขึ้นรูปฟิล์มที่เหมาะสมกับพอลิเมอร์เพื่อให้สามารถควบคุมความหนาได้สม่ำเสมอ
3. หาวิธีการเพื่อทำให้ TiO_2 มีการกระจายตัวในเนื้อพอลิเมอร์อย่างสม่ำเสมอ

เอกสารอ้างอิง

- [1] ฝ่ายชุมชนและผู้ด้อยโอกาส สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. “พลาสติกย่อยสลายได้ นวัตกรรมเพื่อโลก.” 2553. [online]. Available:<http://nstda.or.th/rural/public/100%20articles-stkc/39.pdf>
- [2] National Metal and Materials Technology Center. “พลาสติกย่อยสลายได้.” 2550. [online]. Available:http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/type_de_plas.html
- [3] ชวิศร์ กรณชัยเมธากุล. “การปรับแต่งผิวหน้าของไททาเนียมไดออกไซด์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง.” วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 2549.
- [4] รัฐนนท์ สันติวิเศษ. “การพัฒนาพอลิไซด์รีนชนิดทนแรงกระแทก.” รายงานโครงการงานวิทยาศาสตร์ โรงเรียนสามเสนวิทยาลัย. 2543.
- [5] คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์. “กระบวนการ Photocatalytic.” 2555. [online]. Available:<http://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:HnEaBULiDuIJ:www.gits.kmutnb.ac.th/ethesis/d ata/4>
- [6] แสง เกิดประทุม. “แสงแดด.” 2552. [online]. Available:<http://www.tistr.or.th/ed/images/stories/engineer/article/sunshine.pdf>
- [7] ธรรมบุญ ศรีทวงศ์. “ไททาเนีย ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม.” 2550. [online]. Available:<http://www.vcharkarn.com/varticle/27809>
- [8] ชลดา ชีรการณวงศ์. “ปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสงโดยไทเทเนียมไดออกไซด์.” วารสารมหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา. 2554.
- [9] “ไทเทเนียมไดออกไซด์.” [online]. Available:<http://www.air.in.th/TiO2.htm>
- [10] Wikipedia. “Zinc oxide.” 2555. [online]. Available:http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Zinc_oxide&action=edit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[11] กิจสิมา คมขำ และชะไมพร อ้วน โคตร. “ฟิล์มย่อยสลายโดยแสงจาก LDPE/ZnO.” ปรินิพนธ์ สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2554.

[12] สำนักพิมพ์แม็ค. “การถ่ายโอนพลังงานความร้อน.” 2555. [online].
Available: <http://www.maceducation.com/e-knowledge/2412212100/18.htm>

[13] สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน. “พลาสติกในชีวิตประจำวัน.” [online].
Available: <http://kanchanapisek.or.th/kp6/New/sub/book/book.php?book=28&chap=8&page=t28-8-infodetail06.html>

[14] Plasticsintl. “HIPS (High Impact Polystyrene).” [online].
Available: <http://www.plasticsintl.com/datasheets/Polystyrene.pdf>

[15] “HIPSHigh Impact Polystyrene.” [online].
Available: <http://www.nppointasia.com/siamrecycle/hips.htm>

[16] Yu Zhiyong., M. Bensimon., V. Sarria., I. Stolitchnov., W. Jardimf., D. Laub., E. Mielczarski., J. Mielczarski., L. Kiwi-Minsker., J. Kiwi. “ZnSO –TiO doped catalyst with higher activity in photocatalytic processes.” Applied Catalysis B: Environmental 76. 2007. pp. 185–195.

[17] Yao-Hsuan Tseng., Chien-Hung Kuo. “Photocatalytic degradation of dye and NOx using visible-light-responsive carbon-containing TiO2.” Catalysis Today. Vol. 174. 2011. pp. 114–120.

[18] Mark, A.M., W.B. Roth, C.L. Methltretter and C.E. Rist. “Oxygen permeability of amylo maize starch films.” Food Technology. Vol. 50. 1996. pp. 75-77.

[19] มณฑาทิพย์ ชุ่นฉลาด. “การเตรียมฟิล์มอะมิโลสจากสตาร์ชมันเทศที่แยกส่วนแล้ว.” วิทยานิพนธ์ ปรินิพนธ์โท มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2534.

[20] Kester, J.J. and O.R. Fennema. “Edible films and coating: review.” Food Technology. Vol. 40. 1986. pp. 47-59.

[21] ปนัดดา พวงเกษม. “การเตรียมฟิล์มบริโกลได้จากแป้งชนิดต่างๆ.” ปัญหาพิเศษปรินิพนธ์โท มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2537.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [22] F. Parres., L.Sanchez., R. Balart., J. Lopez. **“HIPS using pyrolysis–gas chromatography–mass spectrometry Determination of the photo-degradation level of high impact polystyrene.”**Journal of Analytical and Applied Pyrolysis.Vol. 78. 2007. pp. 250-256.
- [23] Xu Zhao., Zongwei Li., Yi Chen., Liyi Shi., Yongfa Zhu. **“Solid-phase photocatalytic degradation of polyethylene plastic under UV and solar light irradiation.”** Journal of Molecular Catalysis A: Chemical 268. 2007. pp. 101-106.
- [24] Barbara Malecka., RyszardGajetski., AndrzejMalecki., MalgozataWierzbicka., PiotrOlszewski. **“Mass spectral studies on the mechanism of thermal decomposition of $Zn(NO_3)_2 \cdot nH_2O$.”**ThermochimicaActa.Vol. 404. 2003. pp. 125–132.
- [25] จิรภรณ์ คำจันทร์. **“การพัฒนาสารเคลือบผิว $TiO_2/SnO_2/X$ ระดับนาโน.”** วิทยานิพนธ์ สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2551.
- [26] Francisco Vilaplana. **“Modelling the degradation processes in high impact polystyrene during the first use and subsequent recycling.”**School of Chemical Science and Engineering.Fibre and Polymer Technology Royal Institute of Technology. 2007.
- [27] Francisco Vilaplana., SigbrittKarlsson., AmparoRibes-Greus., Christian Schade., Nikolaus Nestle.**“NMR relaxation reveals modifications in rubber phase dynamics during long-term degradation of high-impact polystyrene (HIPS).”**Polymer.Vol. 52. 2011. pp. 1410-1416.
- [28] ทัศนัย ทองทิพย์พร. **“การมองเห็นและการวัดสี.”**2550. [online].
Available:http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/pep_7_2550_Color_Measurement.pdf
- [29] Francisco Vilaplana., AmparoRibes-Greus., SigbrittKarlsson. **“Chromatographic pattern in recycled high-impact polystyrene (HIPS) - Occurrence of low molecular weight compounds during the life cycle”**Polymer Degradation and Stability. Vol.95. 2010.pp.172-186.
- [30] Francisco Vilaplana. **“Analytical strategies for the quality assessment of recycled high-impact polystyrene (HIPS).”**Department of Thermal Engines and MachinesUniversidad Politécnicade Valencia. 2008.



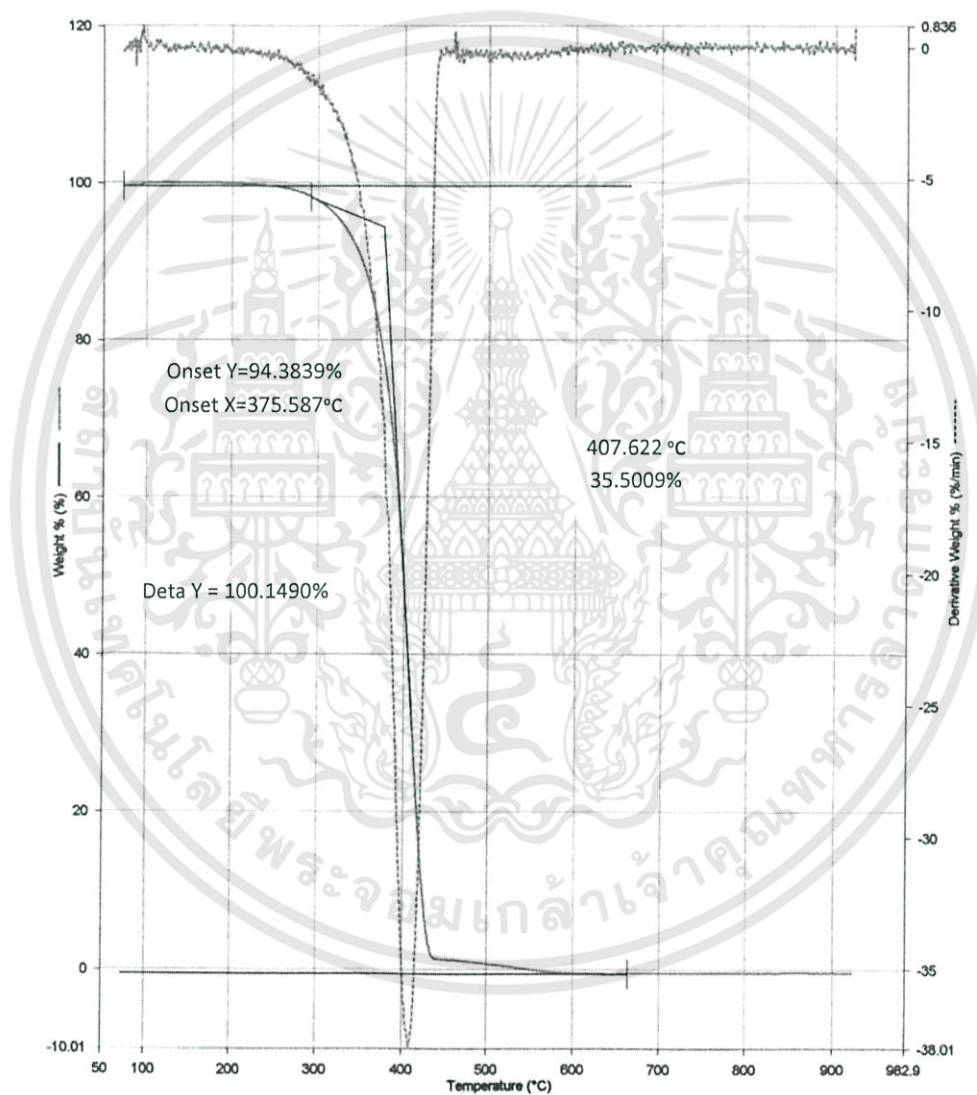
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

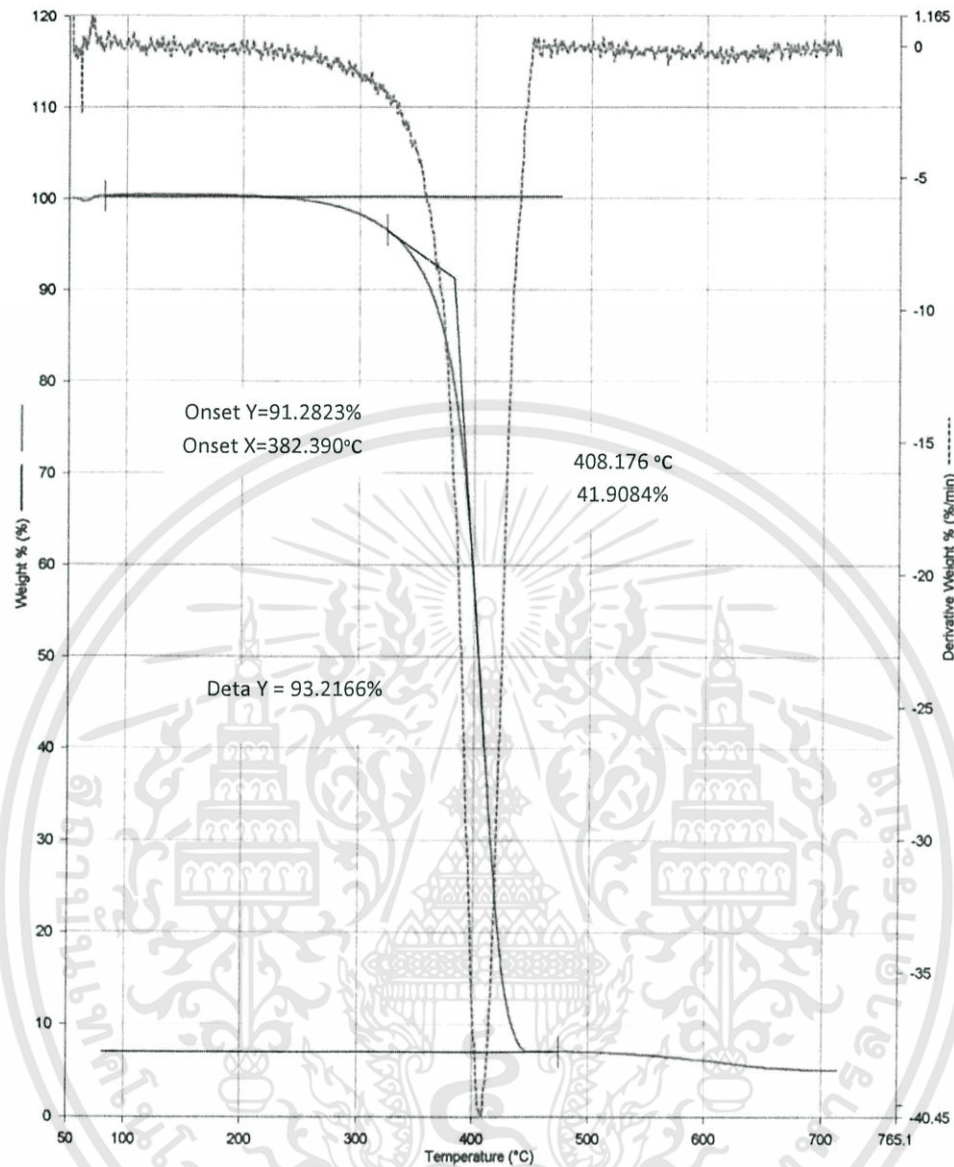
ทดสอบสมบัติทางความร้อน

ก-1 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง Thermal gravimetric analyzer (TGA)

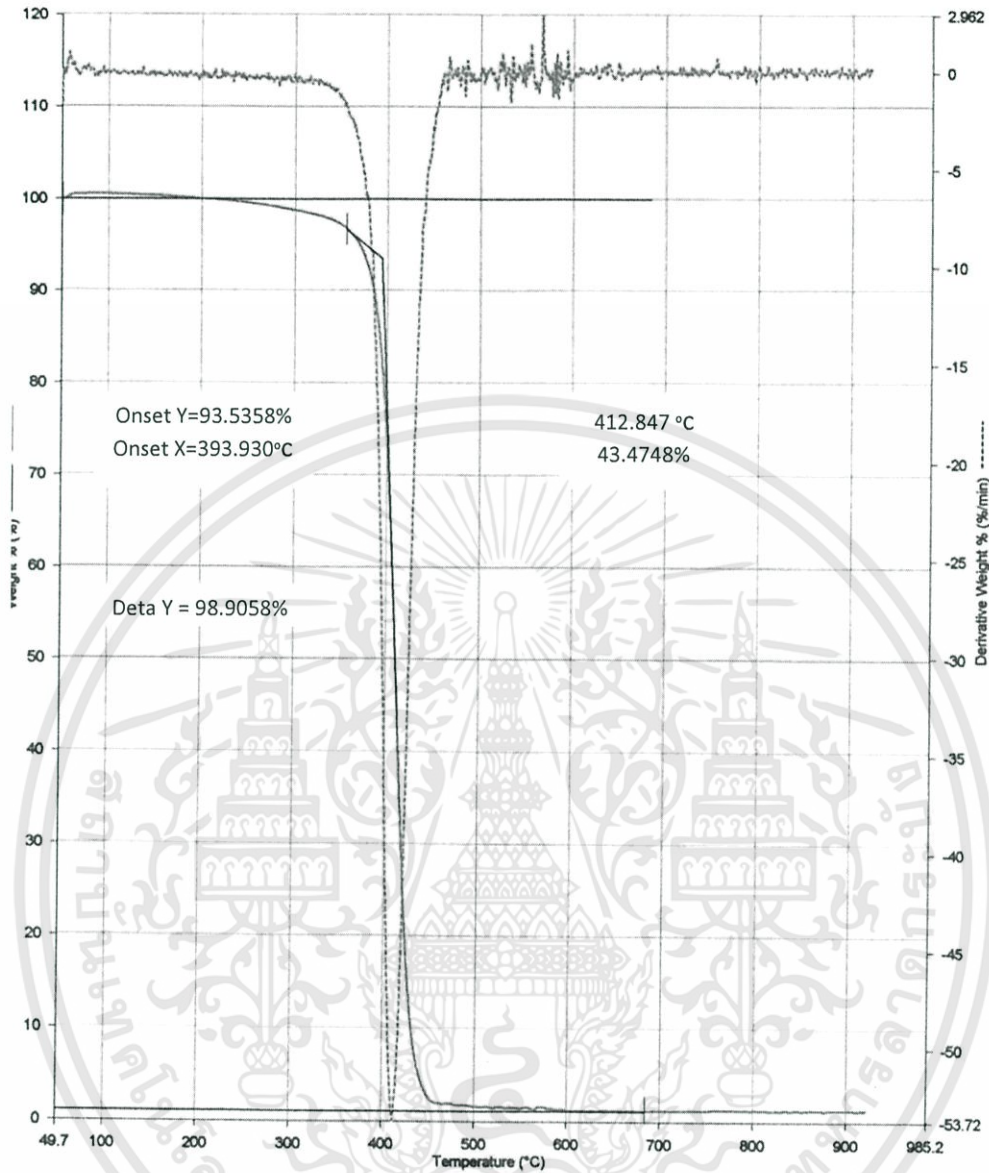


รูปที่ ก-1 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง TGA ของ HIPS

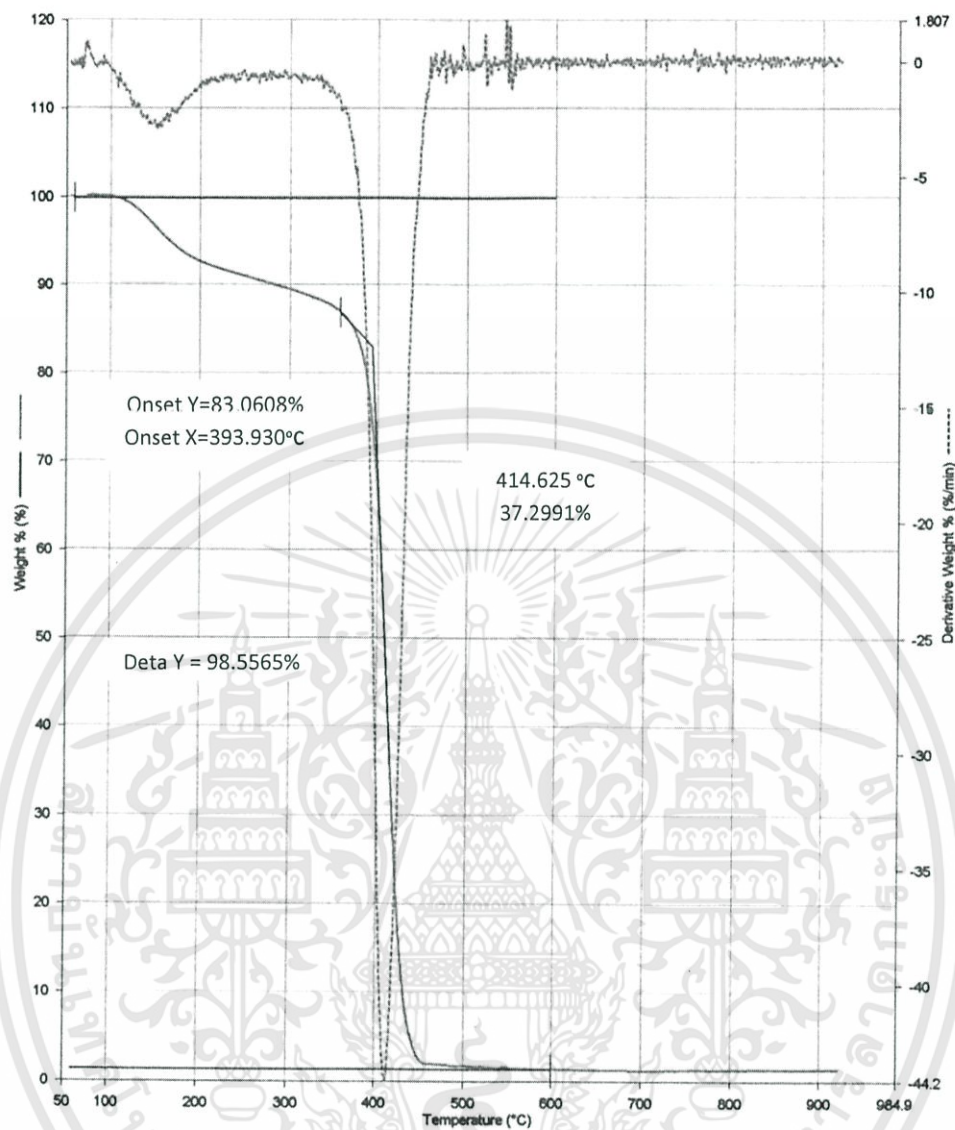
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-2 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง TGA ของ HIPSTi0.5

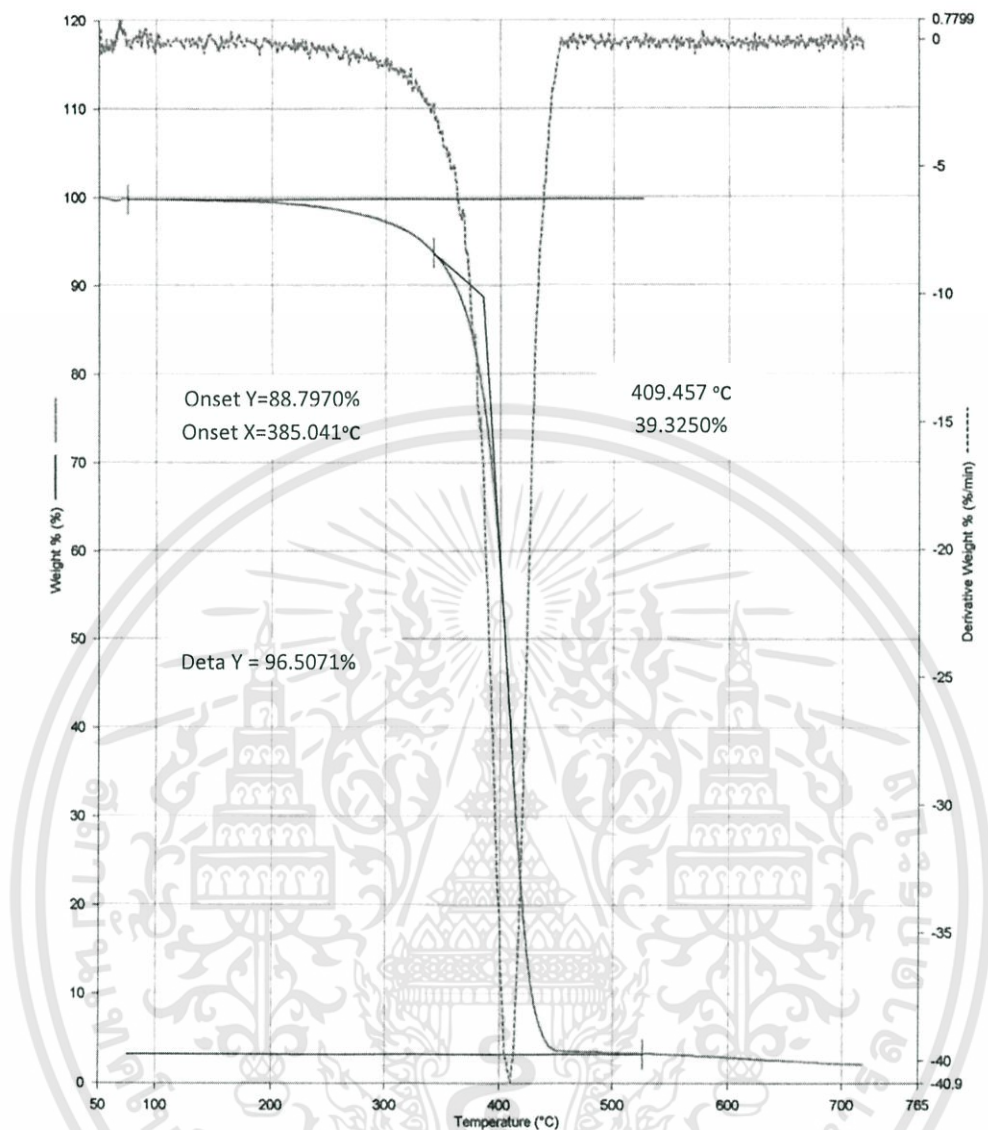


รูปที่ ก-3 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง TGA ของ HIPSTi1



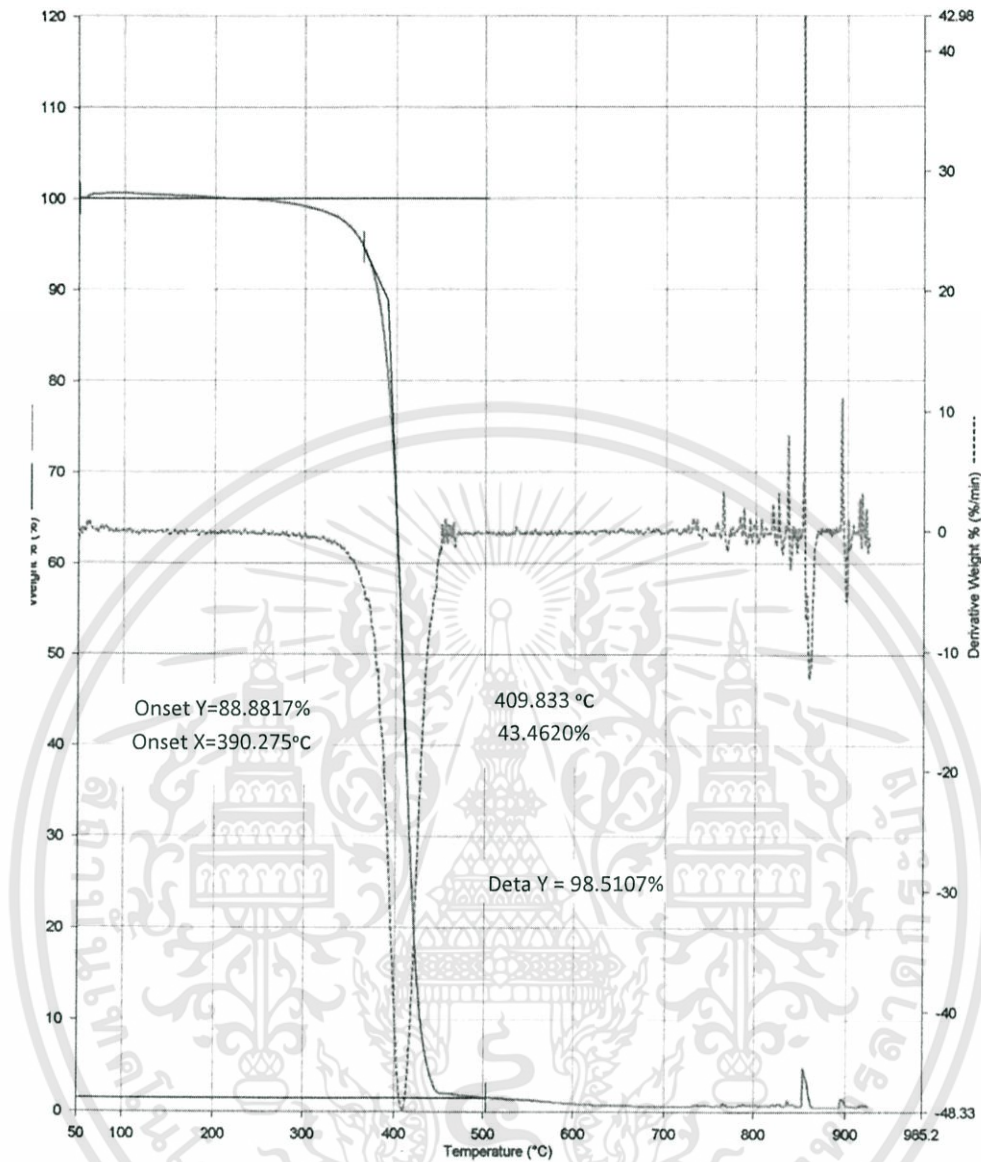
รูปที่ ก-4 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง TGA ของ HIPSTi2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

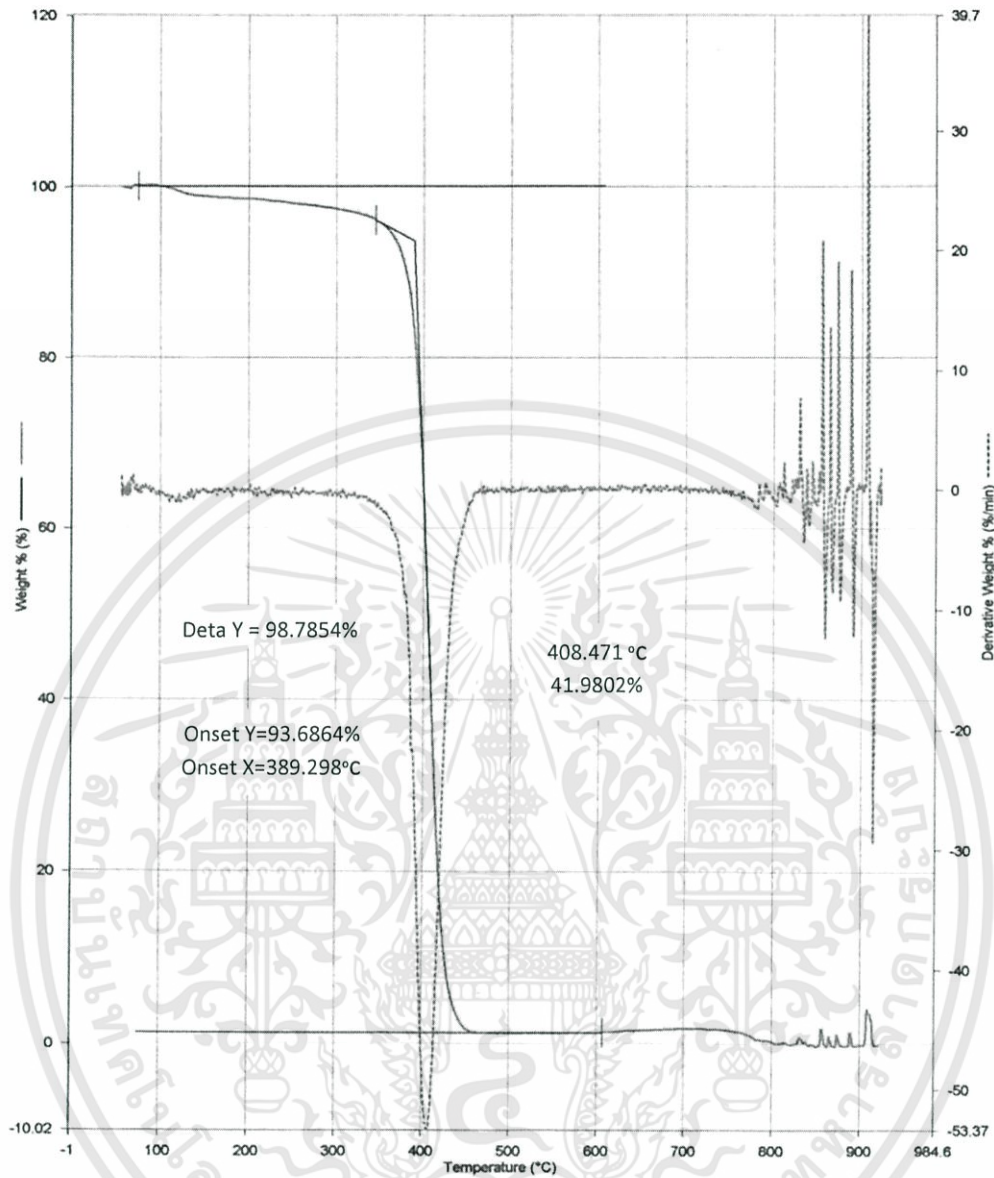


รูปที่ ก-5 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง TGA ของ HIPSTi1 (300)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



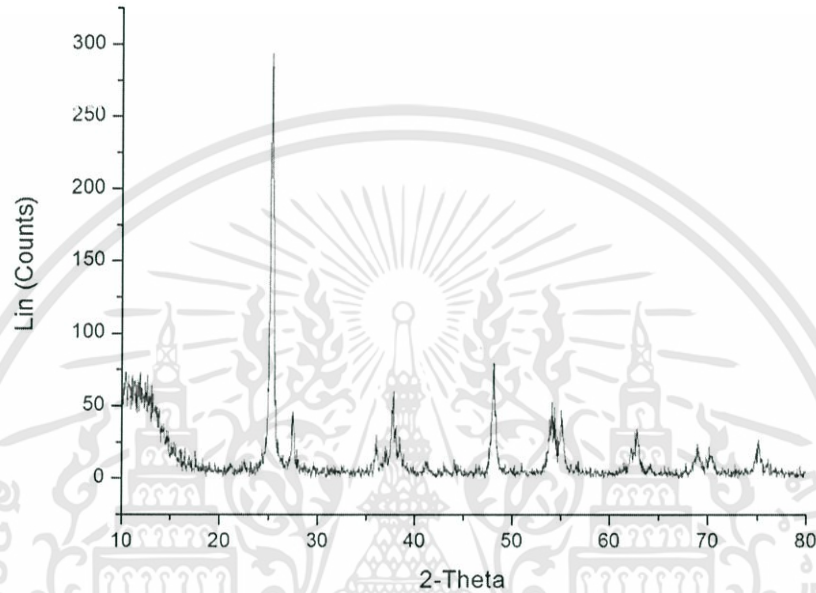
รูปที่ ก-6 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง TGA ของ HIPSTi1 (400)



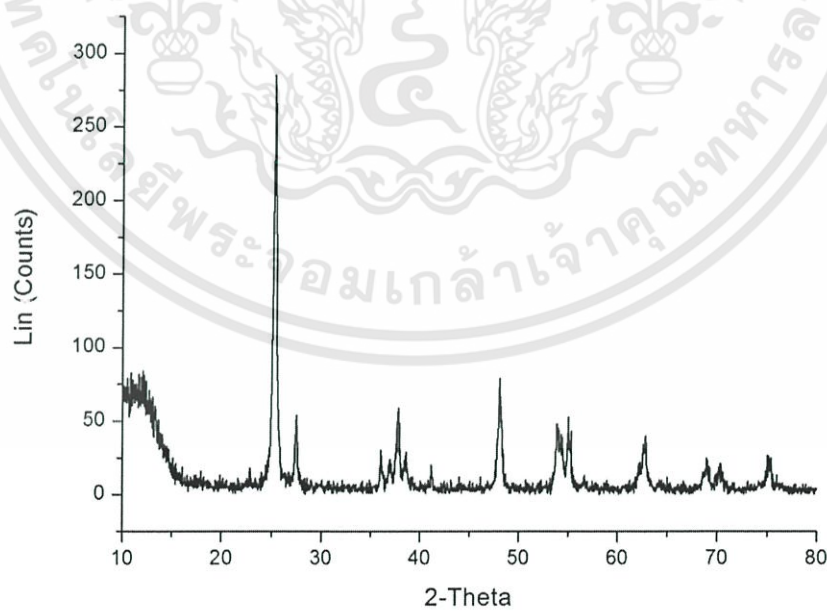
รูปที่ ก-7 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง TGA ของ HIPSTi1 (500)

ภาคผนวก ข

การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD)

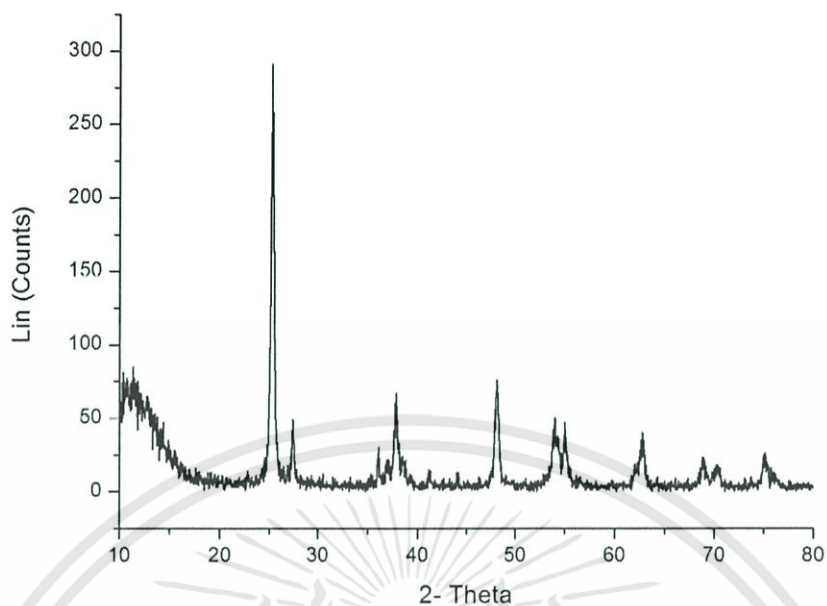


รูปที่ ข-1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ TiO_2

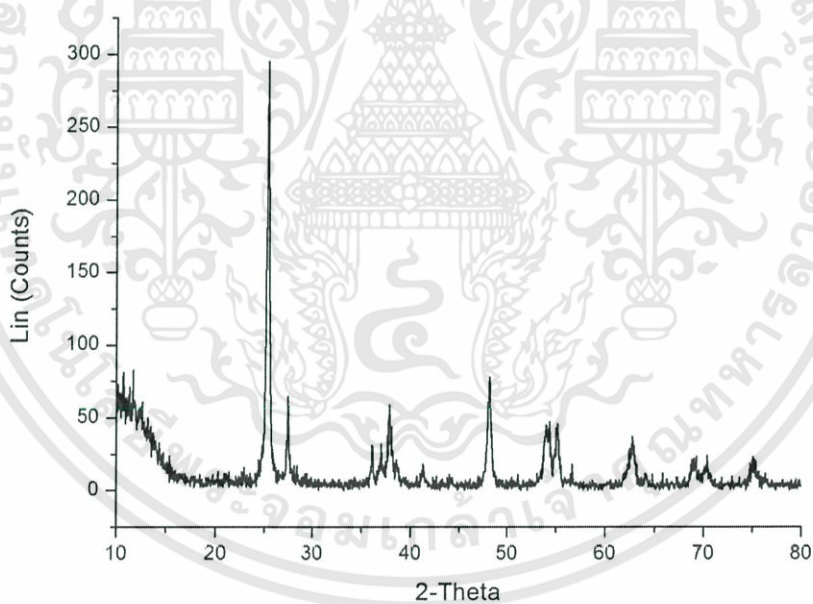


รูปที่ ข-2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ TiO_2 calcined 300 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

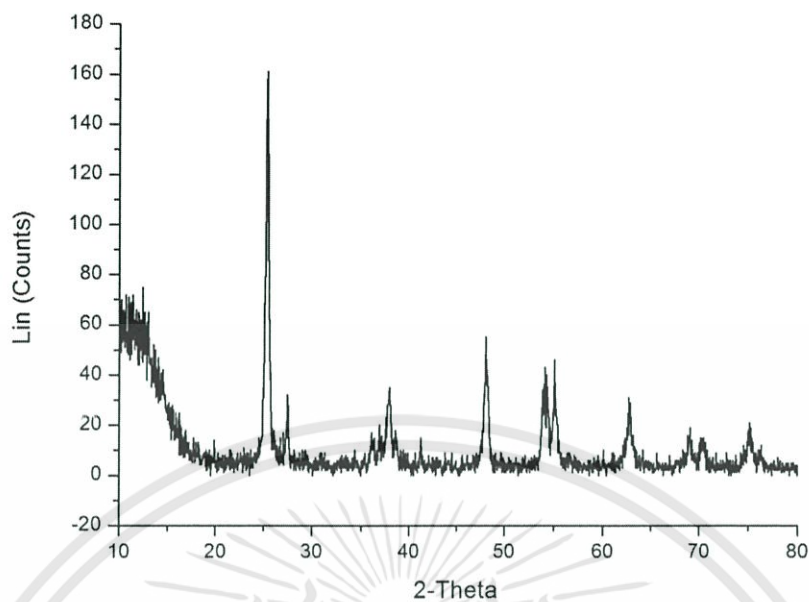


รูปที่ ข-3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ TiO_2 calcined $400\text{ }^\circ\text{C}$

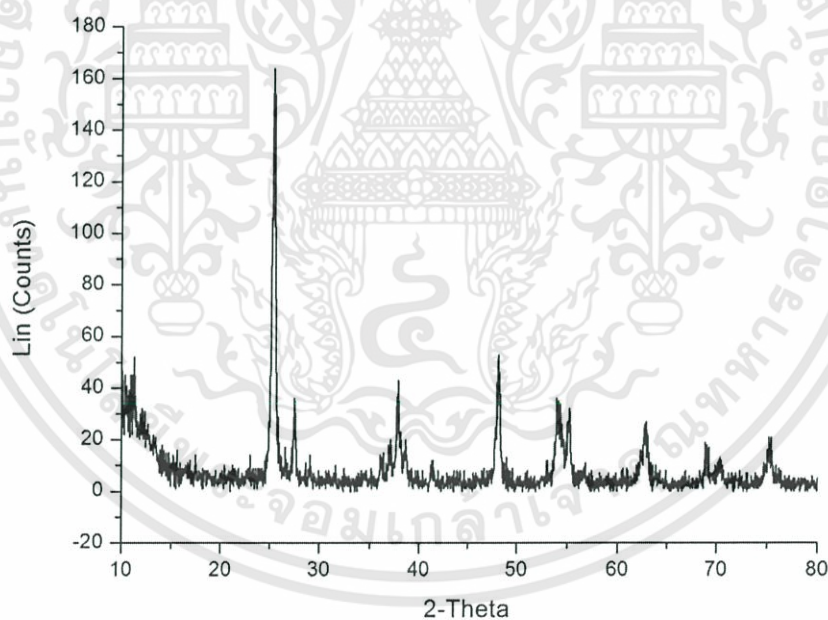


รูปที่ ข-4 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ TiO_2 calcined $500\text{ }^\circ\text{C}$

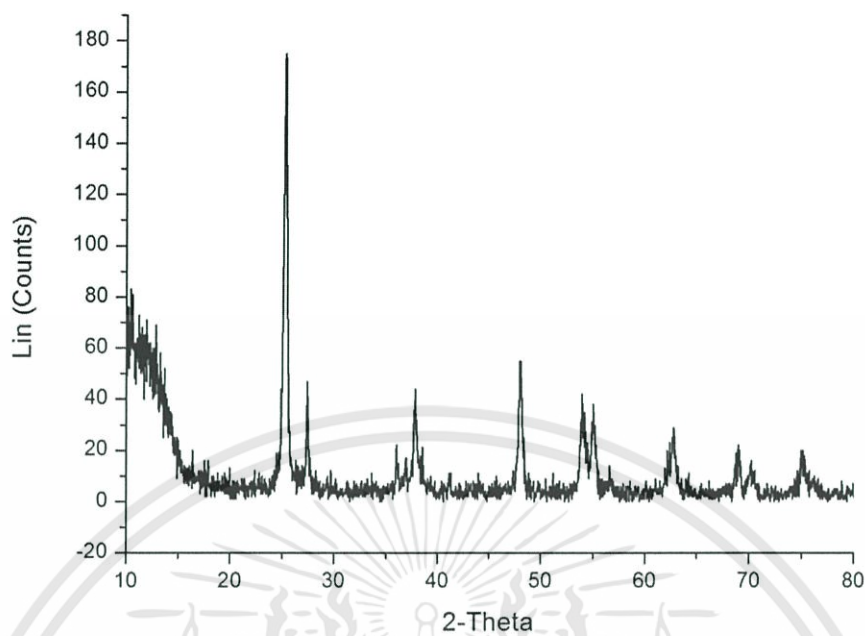
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-5 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ ZnO-doped TiO₂ calcined 300 °C



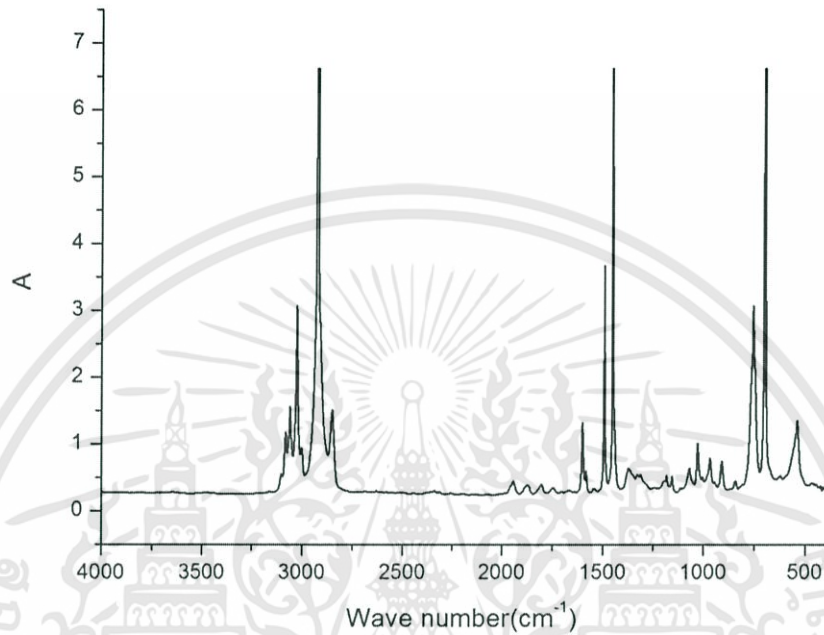
รูปที่ ข-6 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ ZnO-doped TiO₂ calcined 400 °C



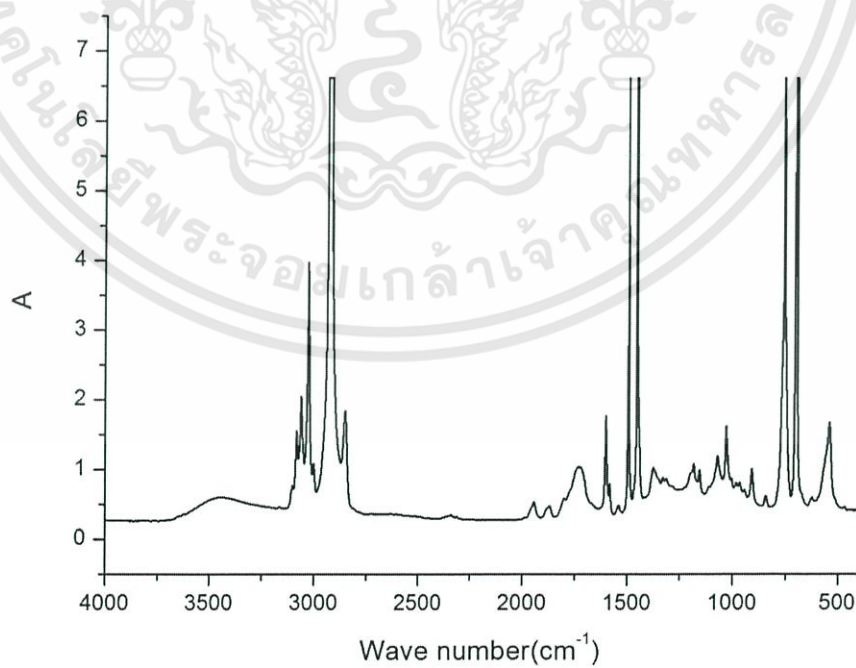
รูปที่ ข-7 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ ZnO-doped TiO₂ calcined 500 °C

ภาคผนวก ค

อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มจากเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR

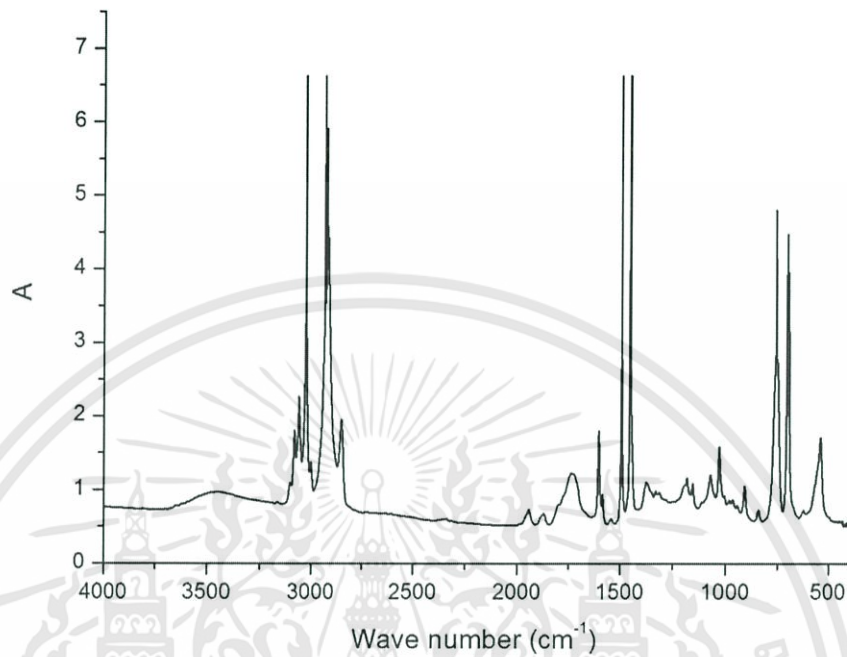


รูปที่ ค-1 รูปสเปกตรัมของฟิล์ม HIPS ก่อนฉายแสง

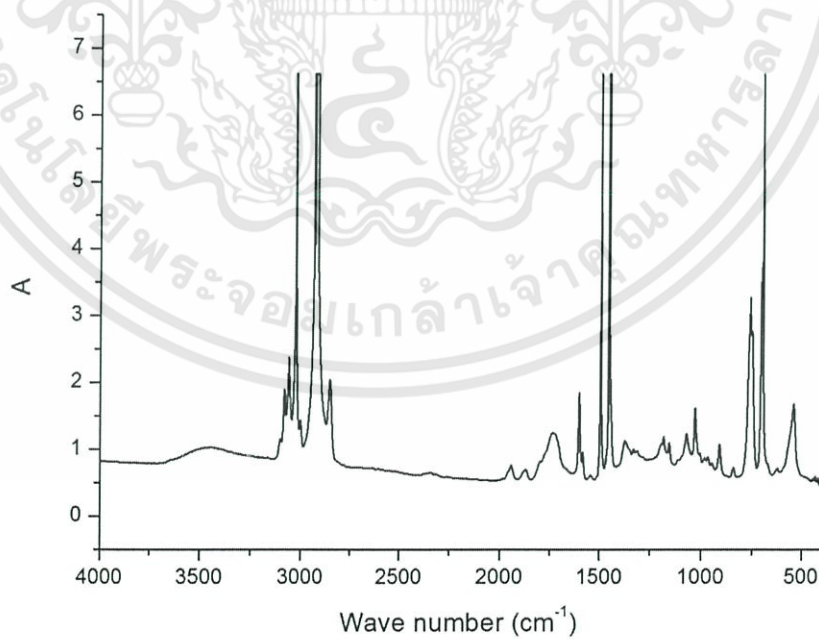


รูปที่ ค-2 รูปสเปกตรัมของฟิล์ม HIPS หลังฉายแสง 200 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

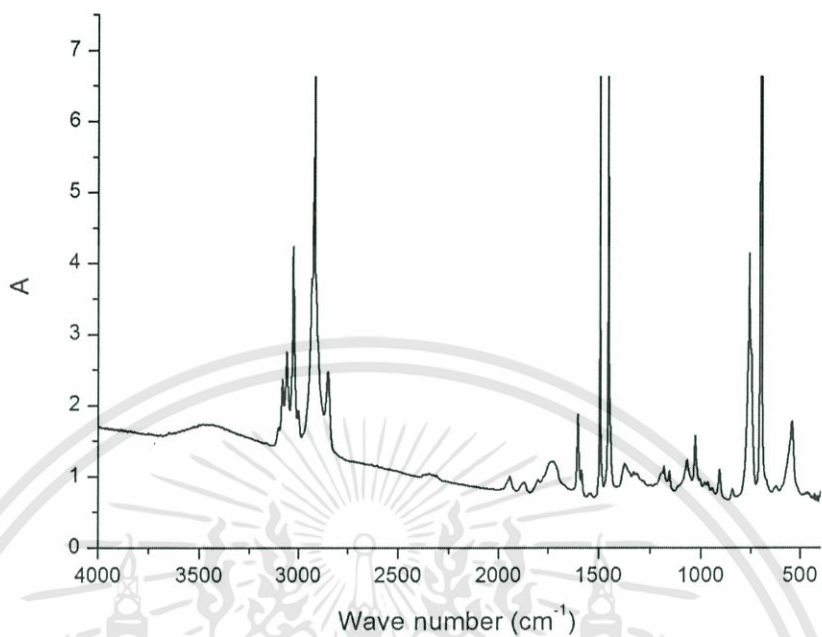


รูปที่ ก-3 รูปสเปกตรากของฟิล์ม HIPSTi0.5 หลังฉายแสง 200 ชั่วโมง

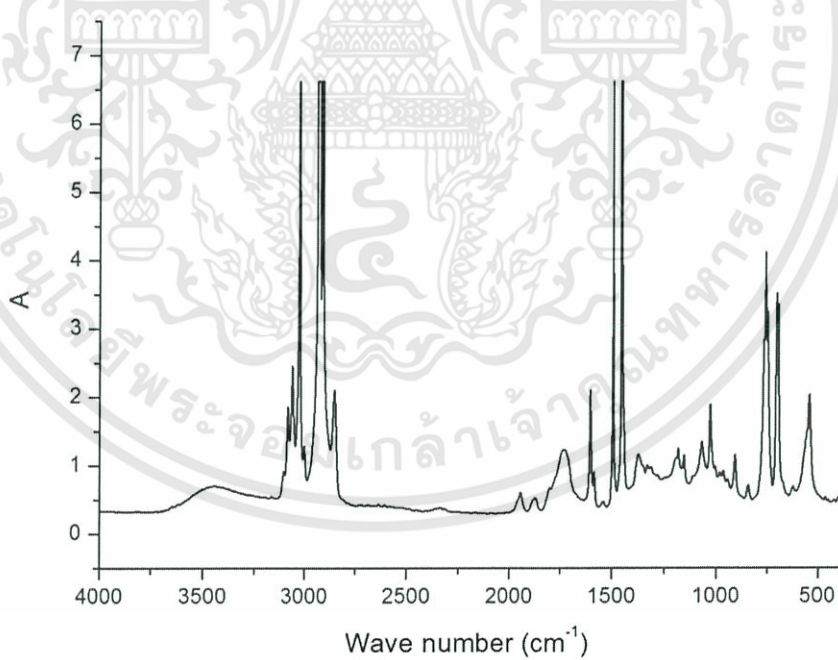


รูปที่ ก-4 รูปสเปกตรากของฟิล์ม HIPSTi1 หลังฉายแสง 200 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

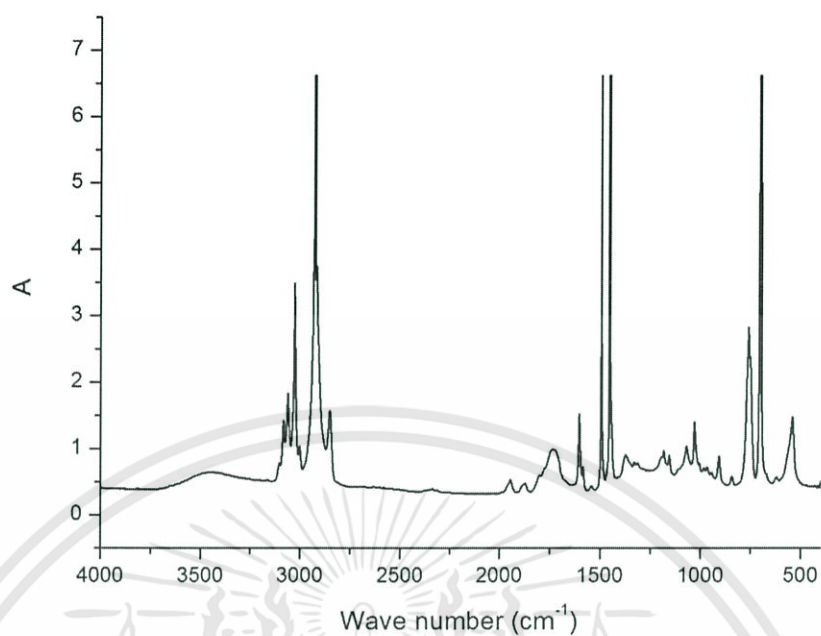


รูปที่ ก-5 รูปสเปกตรากของฟิล์ม HIPSTi2 หลังฉายแสง 200 ชั่วโมง

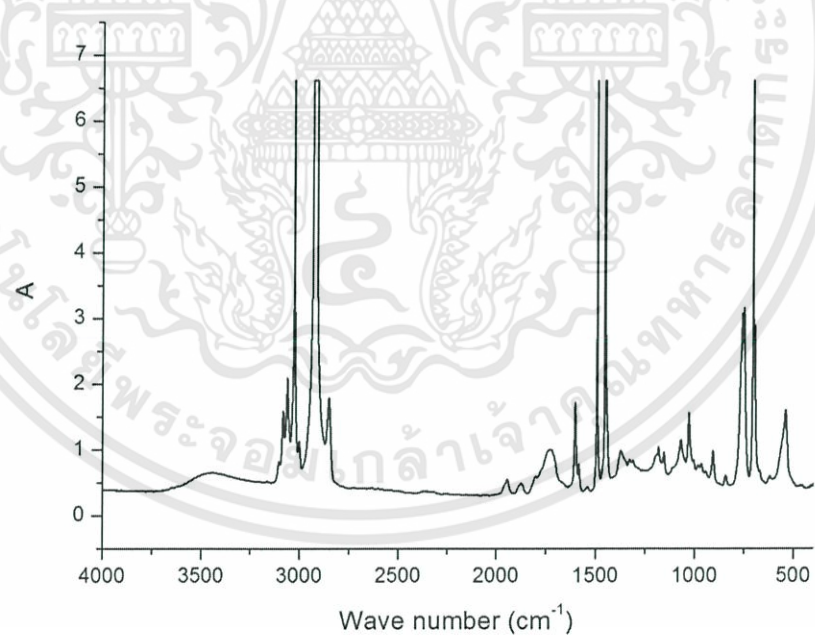


รูปที่ ก-6 รูปสเปกตรากของฟิล์ม HIPSTi1(300) หลังฉายแสง 200 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

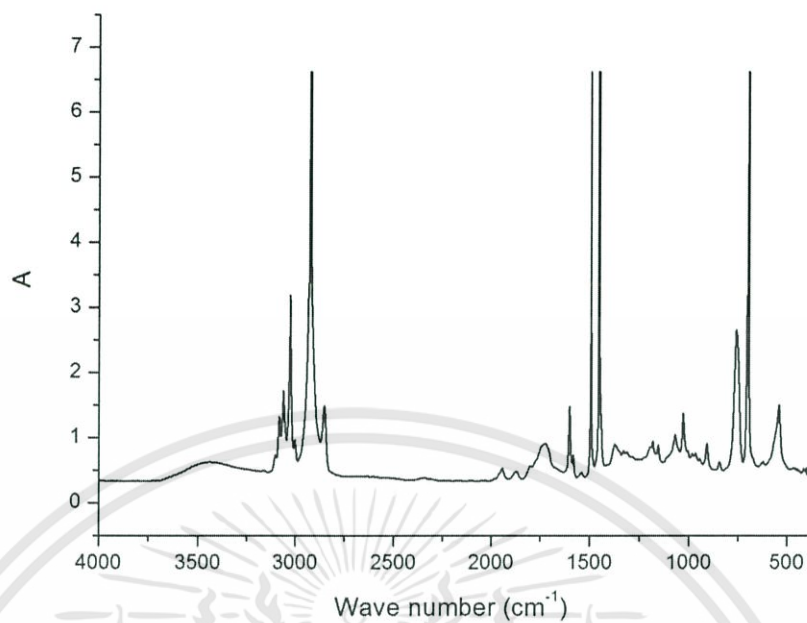


รูปที่ ก-7 รูปสเปกตรากของฟิล์ม HIPSTi1(400) หลังฉายแสง 200 ชั่วโมง

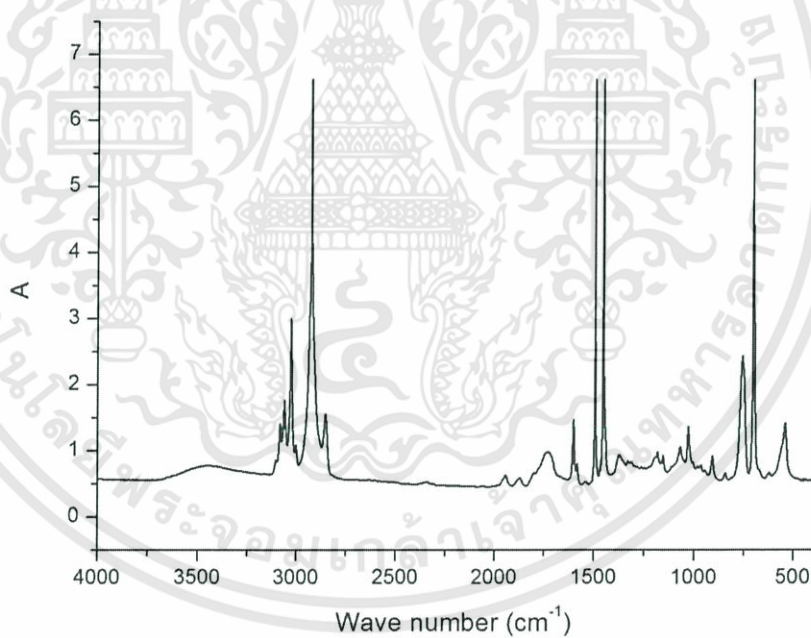


รูปที่ ก-8 รูปสเปกตรากของฟิล์ม HIPSTi1(500) หลังฉายแสง 200 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

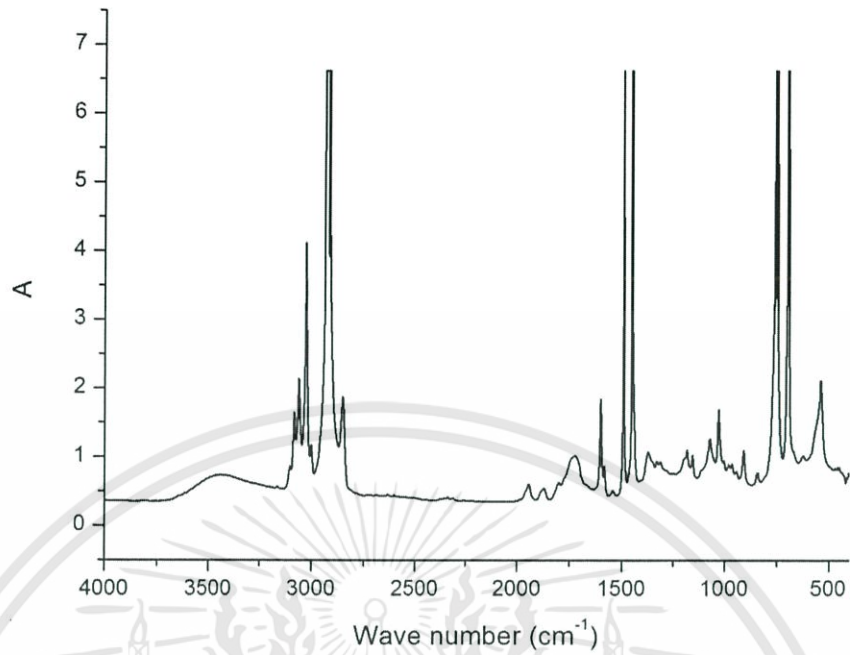


รูปที่ ค-9 รูปสเปกตรากของฟิล์ม HIPSTi1Zn(300) หลังฉายแสง 200 ชั่วโมง



รูปที่ ค-10 รูปสเปกตรากของฟิล์ม HIPSTi1Zn(400) หลังฉายแสง 200 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-11 รูปสเปกตร้าของฟิล์ม HIPSTi1Zn(500) หลังฉายแสง 200 ชั่วโมง

ภาคผนวก ง

ค่าการเปลี่ยนแปลงสี

Sample	เวลาฉายแสง (ชม.)											
	100				150				200			
	L*	a*	b*	ΔE	L*	a*	b*	ΔE	L*	a*	b*	ΔE
HIPS	44.78	-0.73	-4.28	3.11	46.20	-0.73	3.91	11.11	46.73	-1.00	-3.72	10.97
HIPSTi0.5	68.17	-1.16	-0.24	12.67	69.98	-1.29	0.5	14.25	71.29	-1.32	0.62	14.87
HIPSTi1	65.72	-1.17	-1.21	16.32	70.21	-1.26	0.2	19.28	72.18	-1.47	0.81	21.29
HIPSTi2	43.17	-1.54	-5.83	14.93	43.85	-1.73	-4.94	14.67	45.52	-1.38	-5.42	12.93
HIPSTi1(300)	54.87	-1.26	-3.48	6.8	57.98	-1.87	-1.58	10.45	60.83	-1.34	-1.24	12.89
HIPSTi1(400)	53.04	-1.00	-4.72	5.70	53.61	-1.99	-3.15	7.17	57.47	-1.51	-2.55	10.55
HIPSTi1(500)	61.34	-1.27	-1.77	6.71	62.2	-1.98	-0.72	8.16	62.86	-1.74	-0.27	8.87
HIPSTi1Zn(300)	46.79	-1.74	-3.64	5.45	49.55	-1.73	-2.29	7.76	52.44	-1.29	-2.4	9.48
HIPSTi1Zn(400)	54.06	-0.29	-7.4	6.13	57.21	-1.78	-0.72	7.5	59.63	-1.33	-0.16	9.48
HIPSTi1Zn(500)	55.15	-2.93	-2.13	5.69	59.73	-2.71	-0.13	17.68	62.67	-1.98	-0.46	19.99