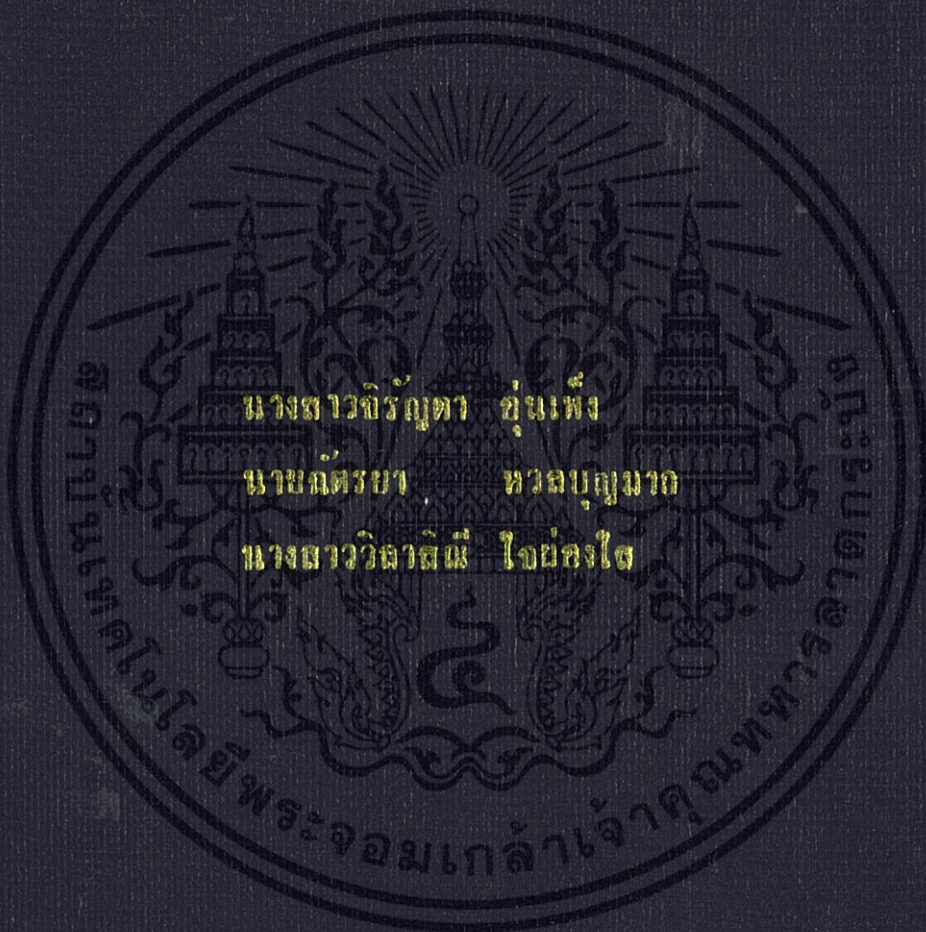


การเตรียม การศึกษาคุณลักษณะเฉพาะ และสมบัติโฟโตคะตะลิสต์ของ
แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราไฟต์

PREPARATION, CHARACTERIZATION, AND PHOTOCATALYST
PROPERTIES OF TiO₂ - GRAPHITE COMPOSITE
RUBBER SHEETS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

การเตรียม การศึกษาคุณลักษณะเฉพาะ และสมบัติโฟโตคะตะลิสต์ของ
แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟไฟต์

PREPARATION, CHARACTERIZATION, AND PHOTOCATALYST
PROPERTIES OF TiO_2 – GRAPHITE COMPOSITE
RUBBER SHEETS



นางสาวจรรญดา
นายฉัตรยา
นางสาววิลาสิณี

อุ๋นเพ็ง
หวลบุญมาก
ใจพ่องใส

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาเคมีอุตสาหกรรม
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**PREPARATION, CHARACTERIZATION, AND PHOTOCATALYST
PROPERTIES OF TiO₂ – GRAPHITE COMPOSITE
RUBBER SHEETS**



**MISS JIRANDA AUNPENG
MR. CHATAYA HUNBOONMAK
MISS WILASINEE JAIPHONGSAI**

**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 2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การเตรียม การศึกษาคุณลักษณะเฉพาะ และสมบัติโฟโตคะตะลิสต์ของ แผ่นยางผสมไทเทเนียม ไดออกไซด์-กราไฟต์
Preparation, Characterization, and Photocatalyst Properties of TiO₂- Graphite Composite Rubber Sheets

ชื่อนักศึกษา นางสาวจิรัชดา อุ่นเพ็ญ รหัสนักศึกษา 53050192
นายฉัตรยา หวลบุญมาก รหัสนักศึกษา 53050199
นางสาววิลาสินี ใจห้องใส รหัสนักศึกษา 53050347

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา 2556
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมี
อุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.ปานไพณีน สีหาราช	
ดร.กิตติศักดิ์ ชูจันทร์	
ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การเตรียม การศึกษาคุณลักษณะเฉพาะ และสมบัติโฟโตคะตะลิสต์ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟต์		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวจิรัชฎา อุ่นเพ็ง	รหัสนักศึกษา	53050192
	นายฉัตรยา หวลบุญมาก	รหัสนักศึกษา	53050199
	นางสาววิลาสณี ใจพ่องใส	รหัสนักศึกษา	53050347
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต		
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม		
ปีการศึกษา	2556		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. ชวาลย์	ศรียงษ์	

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษากการเตรียม ศึกษาคุณลักษณะเฉพาะและสมบัติโฟโตคะตะลิสต์ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟต์ รวมไปถึงการศึกษาสมบัติเชิงกลและประสิทธิภาพการใช้งานซ้ำ ในส่วนของการเตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟต์สามารถเตรียมด้วยวิธีง่ายๆ โดยการผสมสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์กับน้ำยางเข้มข้น (60% HA) และเติมสารแขวนลอยกราฟต์ในปริมาณต่างๆ เข้าด้วยกัน หลังจากนั้นนำสารผสมที่เตรียมได้ไปเทลงในแบบพิมพ์และทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง สุดท้ายจะได้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์- กราฟต์ สำหรับการศึกษาลักษณะทางโครงสร้างผลึกและฐานฐานวิทยาของแผ่นยางผสมนี้จะใช้เทคนิค FT-IR XRD SEM และ EDS ผลจากการศึกษาพบว่าลักษณะโครงสร้างผลึกและหมู่ฟังก์ชันของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟต์มีความสอดคล้องตรงกับผงไทเทเนียมไดออกไซด์(Degussa P25)และยางธรรมชาติเริ่มต้น ในขณะที่ฟิสิกส์เอกลักษณ์เฉพาะของกราฟต์ไม่สามารถตรวจพบได้ ผลจาก SEM และ EDS พบว่าลักษณะพื้นผิวของแผ่นยางผสมจะถูกปกคลุมด้วยอนุภาคของกราฟต์มากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณกราฟต์ ผลจากการทดสอบแรงดึงพบว่าสมบัติเชิงกล เช่น ค่า Young' modulus และ ค่า Stiffness จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณการเติมกราฟต์ลงไป ในส่วนของการทดสอบสมบัติโฟโตคะตะลิสต์ พบว่าแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟต์ที่เตรียมขึ้นสามารถกำจัดทั้งสีย้อมเมทิลีนบลูและสีย้อมอินดิโกคาร์มีนภายใต้การฉายแสงยูวีได้ นอกจากนี้ยังได้ทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานซ้ำของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟต์ จากผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าแผ่นยางผสม

ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟไฟต์สามารถนำมาใช้งานซ้ำในการกำจัดสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้
อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าแผ่นยางผสมจะมีประสิทธิภาพลดลงเมื่อผ่านการใช้งานซ้ำจำนวนหลายครั้ง
แต่แผ่นยางผสมนี้ก็ยังมีข้อดีบางประการคือ สามารถนำมาใช้งานได้ง่าย สามารถเก็บกลับคืน
หลังจากใช้งานเสร็จแล้วและยังสามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้อีกด้วย



คำสำคัญ: ไทเทเนียมไดออกไซด์ กราฟไฟต์ โฟโตคะตาไลติก เมทิลีนบลู อินดิโกคาร์มีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Project Title	Preparation, Characterization, and Photocatalyst Properties of TiO ₂ – Graphite Composite Rubber Sheets
Students	Miss Jiranda Aunpeng Mr. Chataya Hunboonmak Miss Wilasinee Jaithongsai
Degree	Bachelor of Science
Major Program	Industrial Chemistry
Academic Year	2013
Advisor	Dr. Chaval Sriwong

ABSTRACT

In this special project, the preparation, characterization, and photocatalytic properties of TiO₂-graphite composite rubber sheets were investigated, including the mechanical properties and recyclability of these sheets were also studied. In the preparation section, TiO₂- graphite composite rubber sheets were easily prepared by directly mixing of TiO₂ suspension and concentrated rubber latex (60% HA) with varying different amounts of graphite suspension. After that the prepared mixture were poured into mold, left at room temperature to dried and finally, the TiO₂- graphite composite rubber sheets were obtained. The morphologies and crystalline phase features of these sheets were characterized by using FT-IR, XRD, SEM, and EDS techniques. The results showed that the crystalline phases and functional groups of TiO₂- graphite composite rubber sheets are corresponding to pristine TiO₂(Degussa P25) powder and natural rubber sheet, whereas all of the graphite characteristic peaks are not observed. From the SEM and EDS results, the morphologies of the sheet surface were increased covering with graphite particles when the increasing added amount of graphite. From the tensile test found that the mechanical properties like young' modulus and stiffness values of the sheets were increased with the increasing amount of graphite. In the photocatalytic properties test showed that the prepared TiO₂-graphite composite rubber sheets could be degrade both methylene blue (MB) and indigo carmine (IC) dyes under UV light irradiation. Especially, the former dye degraded faster than the later dye. In addition, the efficiencies of TiO₂-graphite composite rubber sheet on the repeatedly used were also studied. The results indicated that TiO₂-graphite composite rubber sheet could be repeatedly used on the photodegradation of MB dye solution under UV light irradiation. However, despite

this composite rubber sheet showed that the decreased efficiencies on the repeatedly used when increasing the number of uses but the sheet has some advantages that it is easy to use, recoverable after use, and it can be reused as well.



Keywords: Titanium dioxide, Graphite, Photocatalytic activity, Methylene blue, Indigo carmine

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณา ต้องขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ เป็นอย่างยิ่งที่คอยดูแลเอาใจใส่ให้คำปรึกษา แนะนำช่วยเหลือ ค่อยสนับสนุน ตรวจสอบ และติดตามผลโครงการพิเศษนี้โดยตลอด จนทำให้โครงการพิเศษสำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอบพระคุณคณะกรรมการสอบทั้ง ดร.ปานไพลิน สีหาราช และ ดร.กิตติศักดิ์ ชูจันทร์ ที่ได้ให้ความรู้เพิ่มเติม คำแนะนำและข้อเสนอแนะในการปรับปรุงโครงการพิเศษฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอบคุณ คุณปราณี บุญวัฒน์ นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการ ที่คอยให้คำแนะนำและความรู้เกี่ยวกับการใช้เครื่องวัด UV-visible Spectrophotometer รวมทั้งขอบคุณนักวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่ภาคเคมีทุก ๆ ท่านที่ให้ความรู้และคอยอำนวยความสะดวกในการใช้สารเคมีและอุปกรณ์ในการทดลองต่าง ๆ

ขอบคุณเพื่อน ๆ ทุกคนที่คอยให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้านจนทำให้โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จไปได้ด้วยดีและขอบพระคุณบิดา มารดา รวมทั้งญาติพี่น้อง ที่คอยเป็นกำลังใจสำคัญในการทำโครงการพิเศษครั้งนี้ให้สำเร็จไปได้ด้วยดี

จิรัชดา อุ่นเพ็ญ

ฉัตรยา หวลบุญมาก

วิลาสิณี ใจพ่องใส

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	III
กิตติกรรมประกาศ	V
สารบัญ	VI
สารบัญตาราง	X
สารบัญรูป	XII
รายการสัญลักษณ์และคำย่อ	XVI
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์โครงการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะรับของโครงการวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ปฏิกริยาโฟโตแคตาไลซิส	5
2.1.1 หลักการของปฏิกริยาโฟโตแคตาไลซิส (Fundamental of Photocatalysis Reaction)	5
2.1.2 พลังงานแสง	6
2.2 ชนิดของโฟโตแคตาไลซิส	6
2.3 กระบวนการโฟโตแคตาไลซิส	7
2.3.1 กระบวนการดูดติดผิว (Adsorption Process)	7
2.3.2 กระบวนการฉายแสง (irradiation)	7

สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)	
2.4 ชนิดของตัวแคตาลิสต์	7
2.5 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส	9
2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการออกซิเดชันของปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส	11
2.6.1 ชนิดของสารมลพิษ (Type of Pollutants)	11
2.6.2 ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา (Type of Catalyst)	11
2.7 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide)	12
2.8 ประโยชน์ของไทเทเนียมไดออกไซด์	14
2.8.1 ความสามารถในการต้านแบคทีเรียและฆ่าเชื้อโรค	14
2.8.2 ความสามารถด้านการกำจัดกลิ่น	14
2.8.3 ความสามารถในการฟอกอากาศ	15
2.8.4 ความสามารถด้านการทำความสะอาดตัวอย่าง	15
2.8.5 ความสามารถในการทำน้ำสะอาด	15
2.8.6 ความสามารถด้านพลังงานโซลาร์เซลล์	15
2.9 มาตรฐานชาติ	16
2.9.1 โครงสร้างทางเคมี	16
2.9.2 น้ำยารับ	17
2.9.3 การผลิตน้ำยารับด้วยวิธีการปั่น	17
2.10 กราไฟต์ (Graphite)	19
2.10.1 ประเภทของกราไฟต์	19
2.10.2 ลักษณะของกราไฟต์	19
2.10.3 การใช้ประโยชน์จากกราไฟต์	20
2.11 สีสังเคราะห์	21
2.12 อินดิโกคาร์มีน (Indigo Carmine, IC)	24
2.13 เมทิลีนบลู (Methylene Blue, MB)	27
2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	29

สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 สารเคมี	32
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	33
3.3 วิธีการทดลอง	34
3.3.1 การปรับสภาพกราฟไฟต์	34
3.3.2 การเตรียมสารแขวนลอยกราฟไฟต์ในน้ำโดยและการหาความเข้มข้น	36
3.3.3 การเตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟไฟต์	38
3.3.4 การทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อม	40
3.3.5 การทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานซ้ำ	40
3.4 การวิเคราะห์พีทูจันเอกลักษณ์	41
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	
4.1 การวิเคราะห์พีทูจันเอกลักษณ์	43
4.1.1 X-ray Diffraction (XRD)	43
4.1.2 Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR)	46
4.1.3 Scanning Electron Microscope (SEM)	48
4.1.4 Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX)	52
4.2 การทดสอบแรงดึงของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟไฟต์	56
4.3 การศึกษาการดูดซับและกำจัดสีข้อมเมทิลีนบลูและอินดิโกคาร์มีน	57
4.3.1 การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับและการกำจัดสีข้อมเมทิลีนบลู	57
4.1.2 การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับและการกำจัดสีข้อมอินดิโกคาร์มีน	61
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง	63
5.2 ข้อเสนอแนะ	64

สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ (ต่อ)	
เอกสารอ้างอิง	65
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก	67
ภาคผนวก ข	69
ภาคผนวก ค	96
ภาคผนวก ง	98

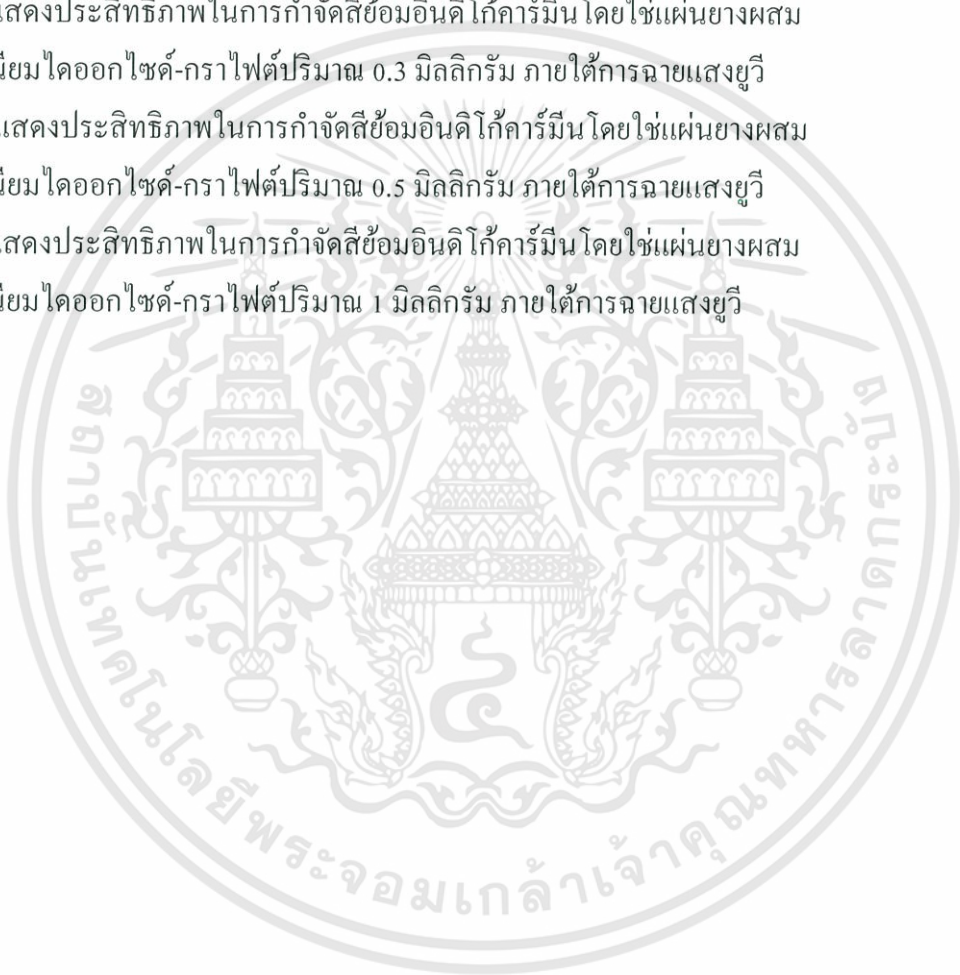


สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 แสดงค่าการทดสอบแรงดึงแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่เติมกราไฟต์ในปริมาณต่างๆ	56
4.2 แสดงค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมเมทิลินบลูของแผ่นยางผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราไฟต์ในปริมาณต่างๆ	57
4.3 แสดงค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมอินดิโก้คาร์มีนของแผ่นยางผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราไฟต์ในปริมาณต่างๆ	61
ข-1-1 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมเมทิลินบลูโดยใช้แผ่นยางผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์ ภายใต้การฉายแสงยูวีเมื่อเวลาเปลี่ยนไป (ไม่ได้เติมกราไฟต์)	80
ข-1-2 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมเมทิลินบลูโดยใช้แผ่นยางผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราไฟต์ปริมาณ 0.1 มิลลิกรัม ภายใต้การฉายแสงยูวี	81
ข-1-3 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมเมทิลินบลูโดยใช้แผ่นยางผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราไฟต์ปริมาณ 0.3 มิลลิกรัม ภายใต้การฉายแสงยูวี	82
ข.1.4 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมเมทิลินบลูโดยใช้แผ่นยางผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราไฟต์ปริมาณ 0.5 มิลลิกรัม ภายใต้การฉายแสงยูวี	83
ข.1.5 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมเมทิลินบลูโดยใช้แผ่นยางผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราไฟต์ปริมาณ 1 มิลลิกรัม ภายใต้การฉายแสงยูวี	84
ข.1.6 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมเมทิลินบลูโดยใช้แผ่นยางผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราไฟต์ปริมาณ 2 มิลลิกรัม ภายใต้การฉายแสงยูวี	85
ข.1.7 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมเมทิลินบลูโดยใช้แผ่นยางผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราไฟต์ปริมาณ 0.3 มิลลิกรัม ภายใต้การฉายแสงยูวี	86
ข.1.8 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมเมทิลินบลูโดยใช้แผ่นยางผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราไฟต์ปริมาณ 0.3 มิลลิกรัม ทำการทดสอบซ้ำครั้งที่ 1	87
ข.1.9 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมเมทิลินบลูโดยใช้แผ่นยางผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราไฟต์ปริมาณ 0.3 มิลลิกรัม ทำการทดสอบซ้ำครั้งที่ 2	88
ข.1.10 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมเมทิลินบลูโดยใช้แผ่นยางผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราไฟต์ปริมาณ 0.3 มิลลิกรัม ทำการทดสอบซ้ำครั้งที่ 3	89
ข.1.11 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมเมทิลินบลูโดยใช้แผ่นยางผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราไฟต์ปริมาณ 0.3 มิลลิกรัม ทำการทดสอบซ้ำครั้งที่ 4	90

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.2.1 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมอินดิโก้คาร์มีน โดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ภายใต้การฉายแสงยูวีเมื่อเวลาเปลี่ยนไป (ไม่ได้เติบการไฟต์)	91
ข.2.3 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมอินดิโก้คาร์มีน โดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราไฟต์ปริมาณ 0.1 มิลลิกรัม ภายใต้การฉายแสงยูวี	92
ข.2.4 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมอินดิโก้คาร์มีน โดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราไฟต์ปริมาณ 0.3 มิลลิกรัม ภายใต้การฉายแสงยูวี	93
ข.2.5 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมอินดิโก้คาร์มีน โดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราไฟต์ปริมาณ 0.5 มิลลิกรัม ภายใต้การฉายแสงยูวี	94
ข.2.6 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมอินดิโก้คาร์มีน โดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราไฟต์ปริมาณ 1 มิลลิกรัม ภายใต้การฉายแสงยูวี	95



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 พลังงานการเกิดออกซิเดชันของสารอินทรีย์	5
2.2 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสบนสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์	9
2.3 โครงสร้างแบบผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่แตกต่างกันทั้งสามรูปแบบ	12
2.4 โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ	16
2.5 พังการผลิตน้ำยางเข้มข้นด้วยวิธีการปั่น และการผลิตยางสกินจากยางน้ำยาง	18
2.6 โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลและโรมโบฮีดรอลของแกรไฟต์	20
2.7 สูตรโครงสร้างของอินทิกัลคาร์มิน	24
2.8 โครงสร้างของอินดิโกคาร์มิน	25
2.9 กลไกการสลายตัวของอินทิกัลคาร์มิน	26
2.10 โครงสร้างของเมทิลีนบลู	27
2.11 กลไกการสลายตัวของเมทิลีนบลู	28
3.1 ผงกราไฟต์	34
3.2 สารแขวนลอยกราไฟต์	36
3.3 สารแขวนลอยกราไฟต์	36
3.4 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราไฟต์	38
4.1 ตัวอย่างแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราไฟต์	43
4.2 XRD Pattern ของผงกราไฟต์ (Graphite)	44
4.3 XRD pattern ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราไฟต์ในปริมาณต่างๆ	45
4.4 FT-IR Spectra ของผงกราไฟต์	46
4.5 FT-IR spectra ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่เติมกราไฟต์ในปริมาณต่างๆ	47
4.6 แสดงลักษณะสัญญาณของ Degussa P25 Titanium Dioxide Powder	48
4.7 แสดงลักษณะสัญญาณของผงกราไฟต์ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ	49
4.8 แสดงลักษณะสัญญาณของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่กำลังขยาย	50
4.9 แสดงลักษณะสัญญาณของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราไฟต์	51
4.10 แสดง EDX Spectrum ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์	52

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 แสดง EDX Spectrum ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่เติมกราไฟต์ 0.1 มิลลิกรัม	53
4.12 แสดง EDX Spectrum ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่เติมกราไฟต์ 0.3 มิลลิกรัม	54
4.13 แสดง EDX Spectrum ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่เติมกราไฟต์ 0.5 มิลลิกรัม	55
4.14 กราฟแสดงค่า Young's Modulus โดยการทดสอบแรงดึงของแผ่นยางผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราไฟต์ในปริมาณต่างๆ	57
4.15 กราฟเส้นแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมเมทิลีนบลู	58
4.16 กราฟแท่งแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมเมทิลีนบลู	59
4.17 กราฟแสดงประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นยางผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่เติมกราไฟต์ปริมาณ 0.3 มิลลิกรัม โดยทำการทดสอบ 5 ครั้ง	59
4.18 ตัวอย่างแผ่นยางผสมที่เติมกราไฟต์ 0.3 มิลลิกรัม	60
4.19 ตัวอย่างสีข้อมเมทิลีนบลูจากแผ่นยางผสมที่เติมกราไฟต์ 0.3 มิลลิกรัม	60
4.20 กราฟเส้นแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดอินดิโกคาร์มิน	61
4.21 กราฟแท่งแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดอินดิโกคาร์มิน	62
ข-1 XRD Pattern ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - กราไฟต์ 0.1 มิลลิกรัม	70
ข-2 XRD Pattern ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - กราไฟต์ 0.3 มิลลิกรัม	72
ข-3 XRD Pattern ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - กราไฟต์ 0.5 มิลลิกรัม	71
ข-4 XRD Pattern ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - กราไฟต์ 1 มิลลิกรัม	71
ข-5 XRD Pattern ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - กราไฟต์ 2 มิลลิกรัม	72
ข-6 XRD Pattern ของกราไฟต์ (Graphite) และกราไฟต์ที่ผ่านการปรับสภาพ	72
ข-7 FT-IR Spectra ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราไฟต์ 0.1 มิลลิกรัม	73

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข-8 FT-IR Spectra ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราไฟต์ 0.3 มิลลิกรัม	74
ข-9 FT-IR Spectra ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราไฟต์ 0.5 มิลลิกรัม	75
ข-10 FT-IR Spectra ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราไฟต์ 1 มิลลิกรัม	76
ข-11 FT-IR Spectra ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราไฟต์ 2 มิลลิกรัม	77
ข-12 FT-IR Spectra ของแผ่นผงกราไฟต์ (Graphite)	78
ข-13 FT-IR Spectra ของแผ่นผงกราไฟต์ที่ผ่านการปรับสภาพ	79
ข-14 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงยูวีวิสซิบิลิตีสเปกตรัมของสีย้อมเมทิลีนบลู โดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ภายใต้การฉายแสงยูวีเมื่อเวลาเปลี่ยนไป	80
ข-15 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงยูวีวิสซิบิลิตีสเปกตรัมของสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราไฟต์ 0.1 mg ภายใต้การฉายแสงยูวี	81
ข-16 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงยูวีวิสซิบิลิตีสเปกตรัมของสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราไฟต์ 0.3 mg ภายใต้การฉายแสงยูวี	82
ข-17 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงยูวีวิสซิบิลิตีสเปกตรัมของสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราไฟต์ 0.5 mg ภายใต้การฉายแสงยูวี	83
ข-18 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงยูวีวิสซิบิลิตีสเปกตรัมของสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราไฟต์ 1 mg ภายใต้การฉายแสงยูวี	84
ข-19 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงยูวีวิสซิบิลิตีสเปกตรัมของสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราไฟต์ 2 mg ภายใต้การฉายแสงยูวี	85
ข-20 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงยูวีวิสซิบิลิตีสเปกตรัมของสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ -กราไฟต์ปริมาณ 0.3 mg ภายใต้การฉายแสงยูวี	86
ข-21 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงยูวีวิสซิบิลิตีสเปกตรัมของสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ -กราไฟต์ปริมาณ 0.3 mg ทดสอบซ้ำครั้งที่ 1	87
ข-22 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงยูวีวิสซิบิลิตีสเปกตรัมของสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ -กราไฟต์ปริมาณ 0.3 mg ทดสอบซ้ำครั้งที่ 2	88

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข-23 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงยูวีวิเศษซิมิลิสเปกตร้าของสีข้อมเมทิลินบลูโดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ -กราไฟต์ปริมาณ 0.3 mg ทดสอบซ้ำครั้งที่ 3	89
ข-24 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงยูวีวิเศษซิมิลิสเปกตร้าของสีข้อมเมทิลินบลูโดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ -กราไฟต์ปริมาณ 0.3 mg ทดสอบซ้ำครั้งที่ 4	90
ข-25 แสดงกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงยูวีวิเศษซิมิลิสเปกตร้าของสีข้อมอินดิโกคาร์มินโดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมได ภายใต้การฉายแสงยูวี	91
ข-26 แสดงกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงยูวีวิเศษซิมิลิสเปกตร้าของสีข้อมอินดิโกคาร์มินโดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราไฟต์ 0.1 mg ภายใต้การฉายแสงยูวี	92
ข-27 แสดงกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงยูวีวิเศษซิมิลิสเปกตร้าของสีข้อมอินดิโกคาร์มินโดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราไฟต์ 0.3 mg ภายใต้การฉายแสงยูวี	93
ข-28 แสดงกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงยูวีวิเศษซิมิลิสเปกตร้าของสีข้อมอินดิโกคาร์มินโดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราไฟต์ 0.5 mg ภายใต้การฉายแสงยูวี	94
ข-29 แสดงกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงยูวีวิเศษซิมิลิสเปกตร้าของสีข้อมอินดิโกคาร์มินโดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราไฟต์ 1 mg ภายใต้การฉายแสงยูวี	95
ค-1 ตู้ฉายแสงยูวี	97
ง-1 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์	99
ง-2 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ – กราไฟต์	99
ง-3 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ – กราไฟต์ ที่ผ่านการฉายแสงยูวี	100
ง-4 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - กราไฟต์ 0.3 มิลลิกรัม ที่ผ่านการฉายแสงยูวีซ้ำเป็นจำนวน 4 ครั้ง	100

คำย่อและสัญลักษณ์

E	คือ	พลังงานควอนตัม (Quantum Energy), จูล
h	คือ	ค่าคงที่พลังค์ (Planck's Constant) 6.626×10^{-34} จูล-วินาที (Js)
ν	คือ	ความถี่ของแสง, เฮิรตซ์ (Hz) หรือวินาที ⁻¹ (S ⁻¹)
λ	คือ	ความยาวคลื่นแสง, นาโนเมตร (nm)
c	คือ	ความเร็วของคลื่นแสง 3×10^8 เมตร/วินาที (m/s)
h^+	คือ	โฮลที่วาเลนซ์แบนด์ (Valence Band Hole)
e^-	คือ	อิเล็กตรอน (Electron)
OH^\cdot	คือ	ไฮดรอกซิลไอออน (Hydroxyl Ion)
OH°	คือ	ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl Radical)
H^+	คือ	ไฮโดรเจนไอออน (Hydrogen Ion)
O_2	คือ	โมเลกุลของออกซิเจนในอากาศ
$O_2^{\bullet -}$	คือ	ซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล (Superoxide Ion Radical)
OH_2^\bullet	คือ	เปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Perhydroxyl Radical)
H_2O_2	คือ	ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogenperoxide)
H^\bullet	คือ	ไฮโดรเจนเรดิคัล (Hydrogen Radical)
$^\circ C$	คือ	องศาเซลเซียส
UV	คือ	ความยาวคลื่นของแสงอุลตราไวโอเล็ต
mL	คือ	หน่วยวัดปริมาตร มิลลิลิตร
mg	คือ	หน่วยวัดความเข้มข้น มิลลิกรัม
ppm	คือ	มิลลิกรัม/กิโลกรัม (1/1,000,000 หรือ หนึ่งส่วนในล้านส่วน)
A_0	คือ	ค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้น
A_t	คือ	ค่าการดูดกลืนแสงที่เวลาต่างๆ

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการวิจัย

ในช่วงเวลาหลายปีที่ผ่านมาประเทศไทยได้มีการขยายตัวของโรงงานอุตสาหกรรมเพิ่มมากขึ้นรวมไปถึงอีกหนึ่งอุตสาหกรรมคือการฟอกย้อมสิ่งทอซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่จำเป็นต้องใช้สารประกอบอินทรีย์ โลหะหนัก สีย้อมและสารเคมีชนิดต่างๆ ในกระบวนการผลิตและตกแต่งผลิตภัณฑ์เป็นจำนวนมาก จึงมีปริมาณสารปนเปื้อนและสีย้อมสูง ส่งผลให้เกิดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมตามมา หากไม่มีการกำจัดสิ่งปนเปื้อนต่างๆเสียก่อนจะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะก็ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางระบบนิเวศและเกิดสภาพไม่น่าดู อุตสาหกรรมการฟอกย้อมสิ่งทอในปัจจุบันได้มีการนำวิธีการบำบัดน้ำเสียที่ทั้งจากกระบวนการย้อม หลากหลายวิธีการบำบัดทางกายภาพ ทางเคมี ทางชีวภาพ การแลกเปลี่ยนไอออน ออกซิไดซ์และการดูดซับ เป็นต้น การกำจัดสีในน้ำทิ้งเป็นการกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำทิ้ง เนื่องจากการย้อมผ้าในโรงงาน ฟอกสีส่วนใหญ่จะเป็นสีย้อมและสารเคมีซึ่งเป็นส่วนที่ตกค้างในน้ำใช้ในกระบวนการผลิตและจะถูกปล่อยลงแหล่งน้ำทิ้งดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีกระบวนการหรือวิธีที่มีประสิทธิภาพมากำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งก่อนปล่อยไปยังสิ่งแวดล้อม

กระบวนการโฟโตแคตตาลิติก (Photocatalytic Oxidation) เป็นกระบวนการทำลายสารโดยใช้แสง UV ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหลักการทำงานของกระบวนการ Photocatalytic Oxidation คือการใช้พลังงานแสง UV เข้าไปในระบบเพื่อเอาชนะค่าแถบพลังงาน (Energy band gap) ซึ่งเป็นค่าของความแตกต่างระหว่างพลังงานของแถบนำไฟฟ้า (conduction Band) กับแถบพลังงานที่เติมแล้ว (Valence Band) ซึ่งเมื่อพลังงานแสงที่ให้แก่ระบบมากกว่าค่าแถบพลังงาน แล้วมีการสร้าง Electron Hole Pairs กับ Adsorbant Species (Reactant) ที่ผิวของ Semi conductor สารเคมีที่สามารถเกิดปรากฏการณ์นี้ได้แก่ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นสารกึ่งตัวนำ (Semi conductor) ประเภท N-type ที่มีสมบัติฆ่าเชื้อโรคในรูปอนุภาคนาโนโดยกระบวนการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต (แสงยูวี) ฉายลงไปยังไทเทเนียมไดออกไซด์จะเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก (Photocatalytic) ที่สามารถกำจัด

สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำหรืออากาศที่สัมผัสกับพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาคด้วยแสง (Photocatalyst) ได้และโดยส่วนใหญ่มักนำผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ในกระบวนการเฮเทอโรจีเนียสโฟโตคะตะลิสต์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ลักษณะผง (powder) บ่อยครั้งจะเห็นว่า การนำไปใช้งานจะค่อนข้างจะยุ่งยากอีกทั้งก่อให้เกิดปัญหาตามมา และยังมีข้อเสียอื่น ๆ เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบผงไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้ซ้ำอีก ปล่อยให้ในอากาศได้ง่ายเวลาลมพัด ส่งผลให้เกิดอันตรายต่อระบบหายใจ อาจเป็นสารแขวนลอย (Suspension) แล้วไหลไปกับน้ำ จึงส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศและเกิดเป็นมลพิษทางน้ำขึ้นได้ อีกทั้งถ้าเกิดเป็นสารแขวนลอยในน้ำหากไม่แยกเอาผงของไทเทเนียมออกไซด์จากระบบ ก็จะส่งผลกระทบต่อระบบบำบัดและสิ่งแวดล้อมอีกทั้งยังส่งผลให้เกิดการสิ้นเปลืองเวลาและค่าใช้จ่ายในการแยกไทเทเนียมไดออกไซด์ออกจากระบบ จึงเป็นเหตุผลที่จะหลีกเลี่ยงการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบผงและกระบวนการที่สนใจเป็นวิธีการขึ้นรูปแบบแผ่นฟิล์ม การเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ลงบนวัสดุต่าง ๆ เช่น กระจก แก้ว อะลูมิเนียม สแตนเลส ไม้ พลาสติก และพอลิเมอร์ เป็นต้น ในงานวิจัยครั้งนี้เป็นการเตรียมไปขึ้นรูปเพื่อสะดวกในการนำไปประยุกต์ใช้งานเน้นทางด้านคะตะไลซิสจากงานวิจัยที่ผ่านมาเป็นการนำไทเทเนียมไดออกไซด์มาขึ้นรูปโดยนำผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ไปฝังในแผ่นยาง ซึ่งทำได้ง่ายคือนำผง ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) มาผสมกับน้ำยางโดยตรง ทิ้งไว้ให้แห้งจะได้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2 -Rubber Sheets) แล้วนำไปใช้สลายสีย้อมซึ่งพบว่า แผ่นยางผสมที่เตรียมขึ้นสามารถสลายสีย้อมได้และสามารถใช้งานซ้ำได้ แต่อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยข้างต้นพบว่ายังมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีค่อนข้างซ้ำอีกทั้งเมื่อใช้ไปนาน ๆ แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์นั้นเกิดการเสื่อมสภาพไป ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและเสถียรภาพของแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์ จึงจำเป็นต้องมีการเติมแต่ง (Filler) ที่ช่วยแก้ปัญหาและประสิทธิภาพไทเทเนียมไดออกไซด์

กราไฟต์เป็นการจัดเรียงตัวรูปแบบหนึ่งของคาร์บอนมีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าหรือกึ่งตัวนำไฟฟ้าจัดเรียงตัวแบบเสถียรที่สภาวะมาตรฐาน มีความเป็นรูพรุนสูง มีพื้นที่ผิวสูงและประสิทธิภาพในการดูดซับได้ดีไม่ว่าจะเป็น กลิ่น สี โลหะหนัก สีย้อมและสารเคมีต่าง ๆ ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้จึงสนใจที่จะเติมลงไปในยางเพื่อกำจัดสีย้อมได้เพิ่มมากขึ้นกราไฟต์ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของแผ่นยางให้มีความแข็งแรงยืดหยุ่นได้ดีทนต่อแรงดึงยืดขยายตัวน้อยมากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูง และที่สำคัญกราไฟต์ราคาไม่แพงลดความสิ้นเปลืองของค่าใช้จ่ายในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการวิจัยนี้จึงทำการทดลองศึกษาการดูดซับสารละลายสีช้อมเมทิลีนบลู (Methylene blue) และสีช้อมอินดิโกคาร์มีน (Indigo camine) โดยใช้กระบวนการเฮเทอโรจีเนียสโฟโตคะตะลิสต์ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราไฟต์ โดยเตรียมได้จากการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ น้ำยางข้น และกราไฟต์ เป็นวัสดุตั้งต้น หลังจากนั้นจึงนำแผ่นยางผสมที่เตรียมได้ไปใช้ในกระบวนการเฮเทอโรจีเนียสโฟโตคะตะลิสต์ในการกำจัดสีช้อม

1.2 วัตถุประสงค์โครงการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาวิธีการและหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราไฟต์
- 1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราไฟต์ ด้วยเทคนิคต่าง ๆ เช่น SEM XRD EDX และ FT-IR เป็นต้น
- 1.2.3 เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราไฟต์ โดยการทดสอบแรงดึงด้วยเครื่อง Universal Testing Machine
- 1.2.4 เพื่อศึกษาสมบัติและประสิทธิภาพการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราไฟต์ในการกำจัดสีช้อมเมทิลีนบลู และ สีช้อมอินดิโกคาร์มีน
- 1.2.5 ศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานซ้ำของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราไฟต์ในการกำจัดสีช้อม

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1.3.1 วิธีการและการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราไฟต์
- 1.3.2 เตรียมแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์-กราไฟต์ด้วยวิธีการที่ง่าย ๆ คือ ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์โดยตรงกับน้ำยางข้น และสารแขวนลอยกราไฟต์แล้วทำการขึ้นรูปให้ได้เป็นแผ่น โดยจะศึกษาผลของปริมาณกราไฟต์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วย
- 1.3.3 ศึกษาและการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราไฟต์ที่เตรียมได้โดยการใช้เทคนิคต่าง ๆ เช่น XRD SEM EDX และ FT-IR เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.3.4 ศึกษาสมบัติเชิงกลของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟต์ ที่เตรียมได้โดยการทดสอบเชิงกลด้วยเครื่อง Universal Testing Machine
- 1.3.5 ศึกษาการใช้งานซ้ำของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟต์ จำนวน 5 ครั้ง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะรับของโครงการวิจัย

- 1.4.1 สามารถนำแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟต์ ไปใช้ในกระบวนการเซเทอโรจีเนียสโฟโตคะตะลิสต์ในการสลายสีย้อมเมทิลินบลูและอินดิโก้คาร์มีน
- 1.4.2 ได้รับองค์ความรู้และความเข้าใจมากขึ้นในเรื่องของปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์เกี่ยวกับการสลายสีย้อมในน้ำ
- 1.4.3 ได้รับองค์ความรู้และมีความเข้าใจมากขึ้นในการใช้เครื่องมือต่างๆ เช่น SEM XRD EDX และ FT-IR เป็นต้น
- 1.4.4 เรียนรู้การทำงานเป็นกลุ่ม การวางแผน การควบคุมการทำงาน และการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นขณะดำเนิน โครงการงาน

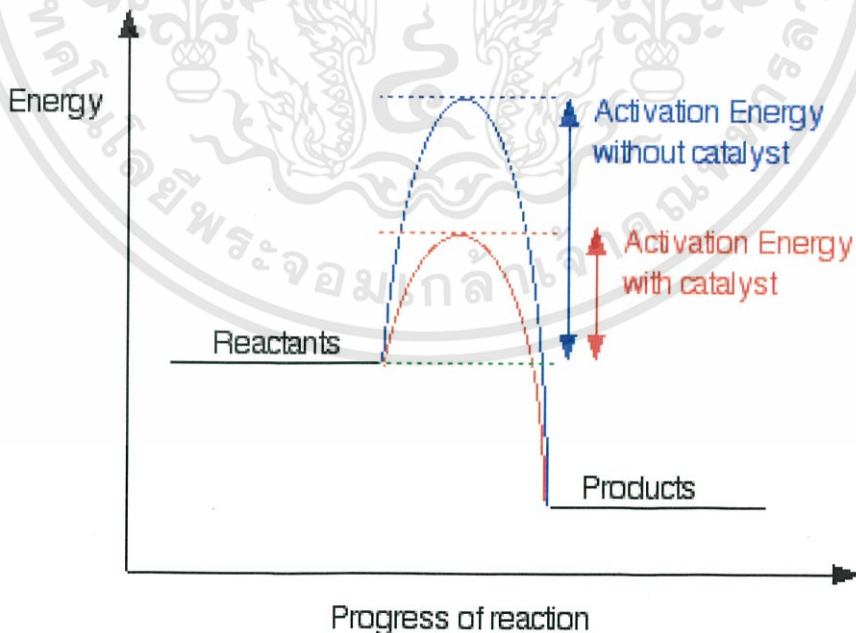
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปฏิริยาโฟโตแคตาไลซิส

2.1.1 หลักการของปฏิริยาโฟโตแคตาไลซิส (Fundamental of Photocatalysis Reaction)

กระบวนการโฟโตแคตาไลติก (Photocatalytic Process) เป็นตัวเร่งปฏิริยาโดยใช้ตัวแคตาไลสต์ ซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิริยาได้ โดยการกระตุ้นด้วยแสง ตัวเร่งปฏิริยานี้จะทำหน้าที่ลดพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิริยา ภาพที่ 2.1 แสดงการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation) ของสารอินทรีย์ที่มีและไม่มีตัวเร่งปฏิริยา แสดงพลังงานกระตุ้น (Activation Energy, E) ของปฏิริยาที่ไม่มีตัวเร่งปฏิริยา ซึ่งมีค่ามาก และพลังงานของผลิตภัณฑ์จะต่ำกว่าพลังงานของสารอินทรีย์พลังงานกระตุ้นนี้จะลดลงในปฏิริยาที่มีตัวเร่งปฏิริยา ถึงแม้ว่าพลังงานของสารอินทรีย์ และผลิตภัณฑ์ยังคงเท่าเดิม ตัวเร่งปฏิริยานี้จะเพิ่มอัตราเร็วของปฏิริยา โดยการลดพลังงานกระตุ้นอีกทั้งตัวมันเองยังตอบสนองต่อแสงดังกล่าวคือ จะเกิดการกระตุ้นได้โดยการถ่ายทอดพลังงานที่มีมากกว่าพลังงานแบนด์แก๊ป (Band Gap)



รูปที่ 2.1 พลังงานการเกิดออกซิเดชันของสารอินทรีย์ (ฉลาด และชูสิทธิ์, 2548)

ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสต้องมียังประกอบ คือ

- 1) ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)
- 2) พลังงานแสง ซึ่งมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับพลังงาน โฟตอนของตัวแคตาลิสต์
- 3) น้ำ
- 4) ออกซิเจน หรือ ตัวออกซิแดนซ์ (Oxidant) อื่นๆ

2.1.2 พลังงานแสง

การฉายแสงในกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสเป็นการให้พลังงานกับระบบในรูปของพลังงานโฟตอน (Photon Energy) มากพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาขึ้นได้ ซึ่งพลังงานดังกล่าวนี้เรียกว่า พลังงานกระตุ้น (Activation Energy) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

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

เมื่อ

E	คือ พลังงานควอนตัม (Quantum Energy), จูล (J)
h	คือ ค่าคงที่พลังค์ (Planck's Constant) = 6.625×10^{-34} , จูล-วินาที (J-s)
ν	คือ ความถี่ของแสง, เฮิรตซ์ (Hz) หรือวินาที ⁻¹ (s ⁻¹)
λ	คือ ความยาวคลื่นแสง, นาโนเมตร (nm)
c	คือ ความเร็วของคลื่นแสง = 2.99×10^8 , เมตรต่อวินาที (m/s)

2.2 ชนิดของโฟโตแคตาไลซิส

โฟโตแคตาไลซิส สามารถแยกได้ 2 ประเภท พิจารณาจากสถานะของตัวแคตาลิสต์ได้ดังนี้

1) โฟโตแคตาไลซิสแบบสถานะเดียว (Homogeneous Photocatalysis) เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสถานะเดียวกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด โดยทั่วไปแล้วจะเป็นของเหลว เช่น การย่อยสลาย 2,4 Dinitrofluorene โดยใช้ UV/H₂O₂

2) โฟโตแคตาไลซิสแบบสถานะต่าง (Heterogeneous Photocatalysis) เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่มีสถานะต่างกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด เช่น ย่อยสลาย 2 - Chlorophenol โดยใช้ UV/Titanium Dioxide

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 กระบวนการโฟโตคะตาไลซิส

ประกอบด้วยขั้นตอน 2 ขั้นตอนคือ

1. การดูดติดผิว (Adsorption)
2. การฉายแสง (Irradiation)

2.3.1 กระบวนการดูดติดผิว (Adsorption Process)

กระบวนการดูดติดผิวเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพและเคมี เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสารหรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวหรือระหว่างผิว (Interface) กระบวนการดูดติดผิวสามารถเกิดขึ้นที่ระหว่างผิวหน้าของ 2 สภาวะใด ๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง การดูดติดผิวเกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิว (Interface) โดยการแยกองค์ประกอบที่ต้องการออกจากสารละลายของเหลวหรือก๊าซจากสถานะที่เป็นของเหลวหรือก๊าซไปยังสถานะที่เป็นของแข็ง โดยโมเลกุลที่ถูกดูดติดผิวเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นตัวเกาะจับสารดูดติดผิว เรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent)

2.3.1 กระบวนการฉายแสง (Irradiation)

เมื่อมีการฉายแสงด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) ในระดับที่มากกว่าหรือเท่ากับค่า Band Gap ตกกระทบลงบนอนุภาคของสารกึ่งตัวนำแล้วจะมีอิเล็กตรอนเลื่อนหลุดออกมาและกระโดดข้ามฝั่งของวาเลนซ์แบนด์ไปยังฝั่งของคอนดักชันแบนด์พร้อม ๆ กันนั้น ทางฝั่งของวาเลนซ์แบนด์ก็จะเกิดช่องว่างขึ้น เรียกว่า โฮล (h^+) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยช่วงความยาวแสงที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาโฟโตคะตาไลซิสของไททาเนียมไดออกไซด์ควรมีความยาวคลื่นไม่เกิน 400 นาโนเมตร โดยช่วงความยาวแสงที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ประมาณ 380 นาโนเมตร

2.4 ชนิดของตัวแคตาไลสต์

สารที่ใช้เป็นตัวแคตาไลสต์ในปฏิกิริยาโฟโตคะตาไลซิส ได้แก่

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

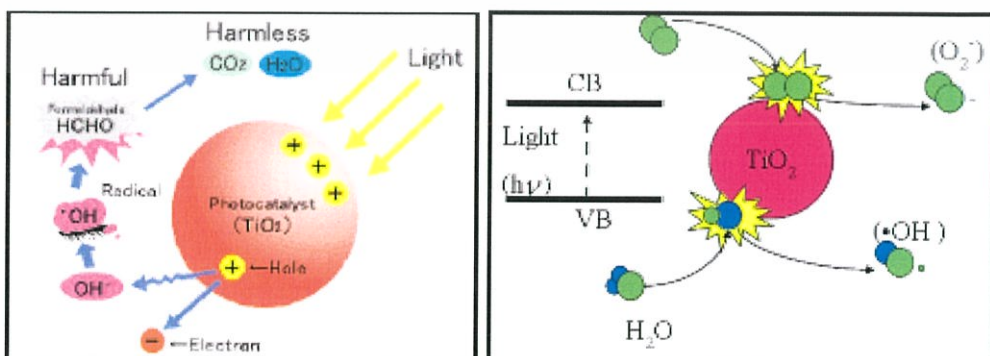
องค์ประกอบของโลหะตัวนำและสารกึ่งตัวนำ ประกอบด้วยวาเลนซ์แบนด์ (Valence Band) และคอนดักชันแบนด์ (Conduction Band) ในโลหะตัวนำจะมีวาเลนซ์แบนด์และคอนดักชันแบนด์ติดกัน แต่ในสารกึ่งตัวนำวาเลนซ์แบนด์และคอนดักชันแบนด์จะไม่ติดกัน โดยเกิดเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นช่องว่าง ซึ่งเรียกว่าแบนด์แก๊ป (Band Gap) เมื่ออิเล็กตรอน (Electron, e^-) ที่อยู่ในวาเลนซ์แบนด์ได้รับพลังงานโฟตอนจากแสง ($h\nu$) อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังคอนดักชันแบนด์ ในขณะที่บริเวณวาเลนซ์แบนด์จะเกิดโฮล (Hole, h^+) ซึ่งเป็นประจุบวก สามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระในวาเลนซ์แบนด์ ส่วนคอนดักชันแบนด์ อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่มาจากวาเลนซ์แบนด์เคลื่อนที่อย่างเป็นอิสระทั่วคอนดักชันแบนด์เช่นกัน ปฏิกิริยาเหล่านี้ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล (Electron – Hole Pairs, e^-/h^+) สามารถเคลื่อนที่ไปมาระหว่างวาเลนซ์แบนด์ และคอนดักชันแบนด์ได้ง่ายและรวดเร็ว เพราะว่าไม่มีแบนด์แก๊ป เหตุนี้จึงเป็นสาเหตุให้ e^-/h^+ รวมตัวกันใหม่ได้ง่าย สำหรับโลหะตัวนำ ในทางตรงกันข้ามนั้นการรวมตัวกันใหม่ของ e^-/h^+ ใน สารกึ่งตัวนำเกิดได้ยาก เพราะว่ามีแบนด์แก๊ปคั่นอยู่ ทำให้คู่ e^-/h^+ แยกจากกันได้นาน ข้อแตกต่างของพลังงานแบนด์แก๊ปของโลหะตัวนำสารกึ่งตัวนำและฉนวนแยกได้ยาก ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายปัจจัย ได้แก่ ระดับพลังงานแบนด์แก๊ป ระดับพลังงานคอนดักชันแบนด์และระดับพลังงานวาเลนซ์แบนด์

ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสในน้ำประกอบด้วยแสงที่ส่องผ่านน้ำไปยังตัวแคตาไลสต์ซึ่งมีพลังงาน โฟตอน ($h\nu$) ที่สูงกว่าพลังงานแบนด์แก๊ปของตัวแคตาไลสต์ ซึ่งอิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นจากวาเลนซ์แบนด์ให้เคลื่อนที่ไปยังคอนดักชันแบนด์ ผลคือทำให้เกิด e^-/h^+ ซึ่งจะวิ่งกระจายออกผิวของสารกึ่งตัวนำ

ปฏิกิริยาที่เกิดบนผิวคอนดักชันแบนด์และปฏิกิริยาที่เกิดในสารละลายเกิดขึ้นดังนี้ อิเล็กตรอน จะเคลื่อนที่จากคอนดักชันแบนด์ไปยังตัวรับอิเล็กตรอน ในสารละลายจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ส่วนอีกด้านหนึ่ง คือ วาเลนซ์แบนด์ซึ่งมีโฮล จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) โดยตัวสารละลายทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน (Electron Donor) ในสภาวะปกติความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของอิเล็กตรอนที่คอนดักชันแบนด์ไม่มีศักยภาพพอที่จะบำบัดสารอินทรีย์ได้ แต่เนื่องจากในระบบบำบัด มีออกซิเจนละลายน้ำอยู่ (O_2) ออกซิเจนนี้ จะเป็นตัวรับ e^- เกิดปฏิกิริยารีดักชัน ได้เป็นซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล (Superoxide Radical, O_2^+) ซึ่งเป็นตัว ออกซิไดซ์ที่แรงมาก สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ ได้แต่ในทางตรงกันข้าม โฮลที่ วาเลนซ์แบนด์เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมากเช่นกัน ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสบนสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า (ฉลาด และสุทธิธรรม, 2548)
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิส

ปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิสในการบำบัดสารอินทรีย์ แสดงดังสมการที่ (2.2) และสมการที่ (2.3) ซึ่งมีกลไกดังนี้ ส่วนที่ผิวของสารกึ่งตัวนำที่มีโฮลจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับ ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) และน้ำเกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxy Radical, OH^\bullet) ตัวอื่นดังแสดงในสมการที่ (2.5) และสมการที่ (2.6) ส่วนที่ผิวสารกึ่งตัวนำที่มีอิเล็กตรอน จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับออกซิเจนที่ดูดซับบนผิวสารกึ่งตัวนำ เกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล เปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Perhydroxy Radical, OH_2^\bullet) ดังสมการที่ (2.7) และสมการที่ (2.8) และไฮโดรเจนเปอร็อกไซด์ (H_2O_2) แสดงในสมการที่ (2.9) และสมการที่ (2.10) ในขณะที่สภาวะในการทดลองมีออกซิเจนไม่เพียงพอโฟตอนซึ่งเกิดจากการแตกตัวของน้ำ จะเข้ามามีบทบาทเข้ารับอิเล็กตรอนแทน เกิดเป็นไฮโดรเจนเรดิคัล (Hydrogen Radical, H^\bullet) ดังสมการที่ (2.11) ไฮดรอกซิลเรดิคัลเป็นสารออกซิไดซ์หลักในปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิส เพราะไฮดรอกซิลเรดิคัลเป็นสารที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาซึ่งรองจากฟลูออไรด์ไอออน (Fluoride, F^-) แต่สูงกว่าคลอไรด์ไอออน (Chloride, Cl^-) และทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์ได้ทุกชนิดการเกิดเรดิคัลต่างๆ แสดงไว้ ดังต่อไปนี้

การบำบัดสารอินทรีย์



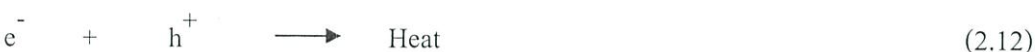
การกระตุ้น



การเกิดเรดิคัลจาก e^-/h^+



การรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮล (Electron-Hole Recombination)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

h^+	คือ โฮลที่วาเลนซ์แบนด์ (Valence Band Hole)
e^-	คือ อิเล็กตรอน (Electron)
OH^-	คือ ไฮดรอกซิลไอออน (Hydroxyl Ion)
OH^\bullet	คือ ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl Radical)
H^+	คือ ไฮโดรเจนไอออน (Hydrogen Ion)
O_2	คือ โมเลกุลของออกซิเจนในอากาศ
$O_2^{\bullet -}$	คือ ซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล (Superoxide Ion Radical)
OH_2^\bullet	คือ เปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Perhydroxyl Radical)
H_2O_2	คือ ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydrogenperoxide)
H^\bullet	คือ ไฮโดรเจนเรดิคัล (Hydrogen Radical)

เนื่องจากไฮดรอกซิลเรดิคัลและโฮลที่ผิวของตัวแคตาลิสต์มีสมบัติเป็นประจุบวกการออกซิไดซ์ของโฮลกับไฮดรอกไซด์ไอออน ได้ไฮดรอกซิลเรดิคัล และขณะเดียวกันโฮลเกิดจากการออกซิไดซ์กับสารอินทรีย์ด้วย ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโฟโตแคตาลิสต์จึงเกิดขึ้น ได้ทั้ง 2 ทาง คือ

1) การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโฮลกับไฮดรอกซิลไอออนหรือน้ำ

การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโฮลกับไฮดรอกซิลไอออนหรือน้ำ ได้ไฮดรอกซิลเรดิคัล และปฏิกิริยาของอิเล็กตรอนกับออกซิเจนหรือไฮโดรเจนไอออนได้ซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล เปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล หรือไฮโดรเจนเรดิคัล

2) การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตรงของสารอินทรีย์ที่ดูดซับบนตัวเร่งปฏิกิริยากับโฮล

การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตรงของสารอินทรีย์ที่ดูดซับบนตัวเร่งปฏิกิริยากับโฮลซึ่งความสามารถของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์มีมากกว่า ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนไทเทเนียมไดออกไซด์หรือตัวเร่งปฏิกิริยาอื่น

2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการออกซิเดชันของปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส

2.6.1 ชนิดของสารมลพิษ (Type of Pollutants)

สารพิษแต่ละชนิดมีศักยภาพในการทำให้สลายตัวแตกต่างกัน ดังนั้นในช่วงเวลาที่ผ่านมามีการศึกษากระบวนการออกซิเดชันโดยวิธีการกระตุ้นด้วยแสงที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดสารมลพิษต่าง ๆ ในน้ำเสีย จากการศึกษาของ

2.6.2 ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา (Type of Catalyst)

สารกึ่งตัวนำที่นำมาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสมีหลายชนิด ได้แก่ ไทเทเนียมไดออกไซด์, ซิงค์ออกไซด์, แคดเมียมซัลไฟด์, โมลิบดีนัมออกไซด์และทังสเตนออกไซด์ โดยแต่ละตัวมีลักษณะที่แตกต่างกัน ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่นิยมนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตแคตาไลซิส เพราะว่ามีคุณสมบัติที่ดี คือ มีความสามารถละลายน้ำต่ำ (Low Solubility) มีราคาถูก ไม่เป็นพิษ ทนต่อการกัดกร่อน มีพื้นที่ผิวมาก มีแบนด์แก๊ปกว้างและเหมาะสม จึงป้องกันการรวมใหม่ของอิเล็กตรอน และ โฮล เมื่อเปรียบเทียบกับสารกึ่งตัวนำอื่น นอกจากนั้นยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้หลายครั้ง

การนำสารกึ่งตัวนำมาใช้ในเทคนิคโฟโตแคตาไลซิสแบบต่างสถานะ สามารถพิจารณาได้ 2 แบบ ดังนี้

1. แบบแขวนลอย (Slurry) เป็นการนำสารกึ่งตัวนำมาผสมกับสารละลายอินทรีย์ โดยสารกึ่งตัวนำจะแขวนลอยอยู่ในสารละลายแบบนี้จะประสบปัญหาในการแยกสารกึ่งตัวนำออกจากน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว ซึ่งปัจจุบันยังไม่มียูทิลิตี้ที่จะแยกสารกึ่งตัวนำแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพเท่าที่ควร

2. แบบเคลือบผิว (Immobilize) เป็นกระบวนการนำสารกึ่งตัวนำเคลือบลงบนตัวกลางหรือที่ผิวของปฏิกิริยา แบบเคลือบผิวจะสะดวกกว่าการทำแบบแขวนลอย เนื่องจากไม่ต้องแยกสารกึ่งตัวนำออกจากน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดแล้ว แต่การศึกษาที่ผ่านมา พบว่า การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดแอนาเทสแบบเคลือบผิวให้ประสิทธิภาพต่ำกว่าแบบแขวนลอยภายใต้สภาวะเดียวกัน

2.7 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide)

ไทเทเนียม (Ti) เป็นโลหะสีเทา มีมวลอะตอมเท่ากับ 47.9 ทนต่อการกัดกร่อนสูง ไม่เป็นสารไวไฟ มีเลขออกซิเดชัน +4, +3, +2 แต่สภาพที่พบทั่วไปเป็น +4 ไทเทเนียมไดออกไซด์จะเป็นผงสีขาว มวลโมเลกุล 79.9 เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง ซึ่งมีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ คือ บรูคไคท์ (Brookite) อนาเทส (Anatase) และรูไทล์ (Rutile) โดยที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างผลึก ที่นิยมนำมาใช้สำหรับกระบวนการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำ โดยวิธีกระตุ้นด้วยแสง คือ โครงสร้างผลึกแบบ อนุนาทและรูไทล์ ซึ่งมีการจัดเรียงตัวของอะตอมไทเทเนียมเป็นแบบ Orthorhombic และที่อะตอมออกซิเจน เข้าไปเติมเต็มในช่องว่างแบบ Octahedron โดยที่มุมระหว่างแกนของ Octahedron ในรูไทล์มีค่าเท่ากับ 90 และ 81.21 องศา ในขณะที่อนุนาทมีค่ามุมระหว่างแกนเท่ากับ 78.12 และ 92.43 องศา โดยรูไทล์และอนุนาทนั้นมีความแตกต่างกัน ด้านการหักเหของแสง ความหนาแน่น และการทำปฏิกิริยาของแสง ซึ่งไทเทเนียมไดออกไซด์และประจุบวกของออกซิเจนอยู่ในโครงตาข่ายที่มีมากมายหลายแบบ ซึ่งแบบรูไทล์มีรูปผลึกที่แน่นอนสามารถดูดกลืนรังสีเหนือม่วง (Ultra Violet) ได้น้อยกว่าอนุนาท และ แบบรูไทล์มีลักษณะของสีค่อนข้างเหลือง



รูปที่ 2.3 โครงสร้างแบบผลึกของไทเทเนียม ไดออกไซด์ที่แตกต่างกันทั้งสามรูปแบบ

โครงสร้างแบบรูไทล์มีค่ารีแฟรคทีฟอินเดกซ์ (Refractive Index) สูงกว่าโครงสร้างแบบอนุนาท และมีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง จึงเหมาะที่จะใช้เป็นตัวเติมเพื่อสะท้อนแสง โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างผลึกแบบอนุนาทและรูไทล์เป็นที่นิยมนำมาศึกษา สำหรับการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก โดยโครงสร้างผลึกอนุนาทให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกรูไทล์ เนื่องมาจาก การกลับมารวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนกับโฮลเกิดได้ยากกว่าโครงสร้างแบบรูไทล์ แต่อย่างไรก็ตาม ในบางปฏิกิริยาโครงสร้างผลึกรูไทล์หรือโครงสร้างผลึกผสมระหว่างแบบอนุนาทและแบบรูไทล์ (เช่น อนุนาท 70-75% และ รูไทล์ 30-25%) ถูกรายงานว่าให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกอนุนาทบริสุทธิ์ โดยทั้งนี้ทั้งนั้นมีตัวแปรหลายอย่างที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาของแต่ละโครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์ ได้แก่ พื้นที่ผิว, การกระจายตัวของรูพรุน, ขนาดของอนุภาคผลึก, และที่สำคัญมากคือ วิธีการที่ใช้ในการสังเคราะห์ผลึกไททาเนียมไดออกไซด์ ส่วนโครงสร้างแบบบรูคไคท์ ยังไม่มีการศึกษากันมากนัก

โดยทั่วไปแล้วการนำไทเทเนียมไดออกไซด์มาใช้ในกระบวนการเฮเทอโรจีเนียสโฟโตคะตะลิสต์ส่วนใหญ่มักมาใช้ในลักษณะเป็นผง (Powder) ซึ่งการนำไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบผงมาใช้งานนั้น ซึ่งบ่อยครั้งจะพบว่าการนำมาใช้งานค่อนข้างยุ่งยากอีกทั้งยังก่อให้เกิดปัญหาตามมา ทั้งนี้เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบผงเป็นรูปแบบที่ไม่เหมาะสมกับการใช้งาน เช่น อาจปลิวไปในอากาศได้ง่ายเมื่อโดยลมพัด ส่งผลให้อันตรายต่อระบบหายใจ หรืออาจปนเอนอยู่ในน้ำในรูปแบบของสารแขวนลอย (Suspension) แล้วไหลไปกับน้ำทำให้เกิดความยุ่งยากต่อการกำจัดและแยกเอาผงของไทเทเนียมไดออกไซด์ออกไปจากระบบ จึงส่งผลเสียต่อระบบนิเวศ และสุดท้ายก็ทำให้เกิดมลพิษต่อ สิ่งแวดล้อมขึ้น (Yu, et., 2005) อีกทั้งในขั้นตอนการแยกเอาผงไทเทเนียมไดออกไซด์ออกไปจากระบบยังสิ้นเปลืองเวลาและค่าใช้จ่าย ดังนั้นนักวิจัยจึงได้พยายามคิดค้นหาวิธีใหม่ๆ เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้งานไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบผง และเพื่อให้ได้ไทเทเนียมไดออกไซด์อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้กว้างขวางมากขึ้น กระบวนการหนึ่งที่มีความสนใจเป็นพิเศษก็คือ กระบวนการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ลงบนซับสเตรท(Substrates) ต่างๆ เช่น กระฉก แก้ว อะลูมิเนียม (Aluminum) สแตนเลส (Stainless) พลาสติก และพอลิเมอร์ เป็นต้น ให้อยู่ในลักษณะของแผ่นฟิล์มเคลือบติดอยู่บนซับสเตรท (Yang, et al., 2006) ดังนั้นเพื่อให้ได้แผ่นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สาทาลนำไปใช้งานได้จึงต้องลงทุนสูง นอกจากนี้ยังพบว่าซับสเตรทบางชนิดมีราคาแพงและนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างจำกัดจึงไม่คุ้มกับการลงทุนที่เสียไป

คุณสมบัติที่แตกต่างกันดังกล่าว จึงทำให้ผลึกของโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส มีค่าเท่ากับ 3.23 โวลต์ ในขณะที่รูไทล์มีค่าเท่ากับ 3.02 โวลต์ จึงทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ และ โครงสร้างผลึกแบบบรูคไคท์ การทำให้บริสุทธิ์นั้นทำได้ยาก ส่วนโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์จะเกิดการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮลได้ง่าย ทั้งยังมีความสามารถในการดูดซับผิวต่ำกว่าโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส ในปัจจุบันจึงเป็นที่นิยมใช้โครงสร้างผลึกแบบอนาเทสมากกว่าแบบอื่น

2.8 ประโยชน์ของไทเทเนียมไดออกไซด์

2.8.1 ความสามารถในการต้านแบคทีเรียและฆ่าเชื้อโรค

ไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่เพียงแต่ฆ่าเชื้อแบคทีเรียเท่านั้น แต่ยังช่วยในการย่อยสลายซากของแบคทีเรียด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงนั้น มีประสิทธิภาพสูงกว่าสารต้านแบคทีเรียชนิดอื่นๆ เนื่องจากปฏิกิริยาจะทำงานเมื่อมีเซลล์แบคทีเรียสัมผัสกับพื้นผิวหรือเมื่อแบคทีเรียแพร่กระจายบนพื้นผิว นอกจากนี้สารพิษที่เกิดจากการตายเซลล์ก็จะถูกทำลายจากการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วย และที่สำคัญไทเทเนียมไดออกไซด์จะไม่เกิดการเสื่อมประสิทธิภาพหลังจากที่ทำลายเชื้อแบคทีเรีย ทำให้มีประสิทธิภาพการใช้งานที่ยาวนาน โดยทั่วไปเมื่อก้าวถึงประสิทธิภาพด้านยับยั้งหรือต่อต้านการติดเชื้อ ไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีความสามารถมากกว่า คลอรีน (Cl_2) 3 เท่า และมากกว่า โอโซน (O_3)

2.8.2 ความสามารถด้านการกำจัดกลิ่น

ด้านการกำจัดกลิ่น อนุภาคไฮดรอกซิลไอออนที่เกิดจากไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถกำจัดโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ระเหยอยู่ในอากาศ (Volatile Organic Compound หรือ VOCs) อันเป็นสาเหตุของกลิ่นไม่พึงประสงค์ได้ โดยการทำลายพันธะระหว่างโมเลกุลของสารเหล่านี้ ด้วยวิธีการนี้จะทำให้สารอินทรีย์ที่ระเหยอยู่ในอากาศแตกตัวออกเป็นโมเลกุลเดี่ยวจึงไม่สามารถทำอันตราย หรือส่งผลกระทบต่อร่างกายของมนุษย์ได้ นอกจากนี้ยังมีประสิทธิภาพในการฟอกอากาศให้สะอาด โดยการกำจัดโมเลกุลของสารที่ทำให้เกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์ ตัวอย่างเช่น กลิ่นบูหรี กลิ่นยาสูบ สารประกอบฟอรัมาลดีไฮด์ ไนโตรเจนไดออกไซด์ ยูเรีย กลิ่นอุจจาระ น้ำมันเชื้อเพลิง และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอีกหลายชนิดในอากาศ ไทเทเนียมไดออกไซด์ สามารถทำให้อากาศสะอาดจาก ควีน เกสรดอกไม้ แบคทีเรีย และไวรัส รวมถึงแก๊สอันตราย ด้วยคุณสมบัติของการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

2.8.3 ความสามารถในการฟอกอากาศ

ไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ถูกเร่งด้วยปฏิกิริยาด้วยแสงจะสามารถกำจัดสารที่ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศได้ เช่น สารประกอบไนโตรเจน ควีนบูหรี รวมถึงสารระเหยต่างๆ ที่ออกมาจากอาคาร รวมทั้ง โครงสร้างของตึกได้ นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันเขม่า และคราบดำต่างๆ ที่จะเกาะผนังบ้าน รวมถึงช่วยกำจัดสารประเภทที่ทำลายชั้นบรรยากาศ เช่น ก๊าซคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFC) และก๊าซเรือนกระจกประเภทอื่น รวมถึงก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทั้งทางตรง และทางอ้อมเมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแสง ในบริเวณที่มีมลภาวะสูง ไทเทเนียมไดออกไซด์จะช่วยลดสารก่อมลภาวะเหล่านี้ได้

2.8.4 ความสามารถด้านการทำความสะอาดตัวเอง (Self – Cleaning)

ผนังด้านนอกของอาคารที่ถูกปกคลุมด้วยคราบเขม่าจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ ที่มีส่วนประกอบเป็นน้ำมัน เมื่อผนังตึกถูกทาด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งมีสมบัติการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง จะทำให้ผนังมีคุณสมบัติในการทำความสะอาดตัวเอง โดยเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง ไทเทเนียมไดออกไซด์จะทำลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอน รวมทั้งฝุ่นผงต่างๆ ที่เกาะติดอยู่กับผนัง และจะถูกชะล้างออกจากผนังอย่างง่ายได้เมื่อฝนตกลง ทำให้ผนังตึกสะอาดและใหม่อยู่เสมอ

2.8.5 ความสามารถในการทำน้ำสะอาด

สารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (ไทเทเนียมไดออกไซด์) ร่วมกับรังสีอัลตราไวโอเล็ต สามารถกำจัดสารอินทรีย์ที่ก่อมลภาวะให้กลายเป็นสารที่ไม่อันตรายได้ เช่น ทำให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ รวมถึงมีคุณสมบัติในการต้านแบคทีเรีย เทคโนโลยีนี้มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารอินทรีย์อันตราย และช่วยฆ่าแบคทีเรียหลายชนิด รวมถึงไวรัส

2.8.6 ความสามารถด้านพลังงานโซลาร์เซลล์

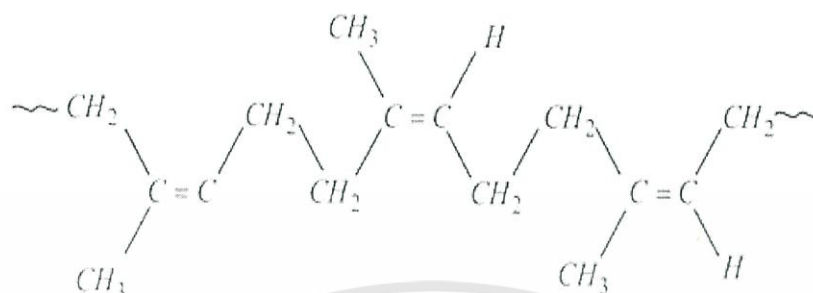
ไทเทเนียมไดออกไซด์จัดเป็นสารที่อยู่ในกลุ่มของเซมิคอนดักเตอร์ มีการนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในโซลาร์เซลล์มากขึ้น เช่น นำไปเคลือบบนอิเล็กทรอนิกส์เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น ราคาของโซลาร์เซลล์ค่อนข้างแพง เพราะกระบวนการผลิตต้องใช้ต้นทุนสูง และให้ประสิทธิภาพต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ทำให้มีขีดจำกัดในการใช้งาน ดังนั้นมีการวิจัยและพัฒนาการทำงานของโซลาร์เซลล์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่นการนำเจอร์เมเนียม (Ge) ผสมลงไปไนไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อทำเป็น Quantum Dot โซลาร์เซลล์ การนำซิลิคอนและไทเทเนียมไดออกไซด์ เคลือบบน Si โซลาร์เซลล์ เพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆ ให้ดีขึ้น นอกจากนี้การเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์ให้อยู่ในรูปของท่อนาโนที่ผลิตด้วย Rf Sputtering สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของโซลาร์เซลล์ได้เช่นกัน โดยเพิ่ม Electron Lifetime และประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้อย่างต่อเนื่อง

2.9 ยางธรรมชาติ

2.9.1 โครงสร้างทางเคมี

ยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ที่มีไฮโดรคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักร้อยละ 94 โดยน้ำหนัก ส่วนประกอบที่เหลือเป็นโปรตีน ไขมัน และเกลืออนินทรีย์อื่น ๆ เช่น ซัลเฟอร์ และอนุมูลอละของโลหะเป็นต้น มีหน่วยที่ซ้ำๆกันเป็นไอโซพรีน (C_5H_8) มาต่อกันเป็นโมเลกุลยาวเรียก พอลิไอโซพรีน (C_5H_8)_n โดย n มีค่าตั้งแต่ 5,000-15,000 ยางธรรมชาติประกอบด้วยโมเลกุลที่มีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 50,000-3,000,000 และประมาณร้อยละ 60 ของโมเลกุลเหล่านี้มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กว่า 1,300,000 โครงสร้างของโมเลกุลยางธรรมชาติมีลักษณะเป็นไอโซเมอร์ชนิด *cis*-Isomer ดังนั้นจึงมักเรียกยางธรรมชาติว่า *cis*-1,4-polyisoprene ซึ่งมีโครงสร้าง ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้าง โมเลกุลของยางธรรมชาติ (<http://www.electron.rmutphysics.com>)

โครงสร้างหลักที่มีผลกระทบต่อสมบัติยางธรรมชาติคือ

1. การมีองค์ประกอบเป็นคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นส่วนใหญ่ ทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติไม่ทนน้ำมัน แต่เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี
2. มีพันธะคู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันได้ดี แต่ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ง่ายกับออกซิเจนและโอโซน จึงเป็นสาเหตุการเสื่อมของยางธรรมชาติ
3. มีโซโมเลกุลที่เคลื่อนไหวหักงอไปมาและยืดหยุ่นได้ง่าย ทำให้ยางธรรมชาติคงสภาพความยืดหยุ่น (Elasticity) ได้ดี และสามารถใช้งานที่อุณหภูมิต่ำได้
4. โครงสร้างโมเลกุลที่สม่ำเสมอทำให้ยางธรรมชาติสามารถเกิดผลึกได้เมื่อยืด จึงมีความต้านทานต่อแรงดึงสูง และความเหนียวตติ
5. มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ทำให้ยางแข็งเกินไปที่จะนำไปแปรรูปโดยตรง จะต้องนำยางไปบดเพื่อให้โมเลกุลเล็กกลงก่อนนำไปใช้งาน

2.9.2 น้ำยางข้น

น้ำยางสดจากต้นยางพารา มีองค์ประกอบหลักๆ 2 ส่วน คือ ปริมาณเนื้อยางแห้งซึ่งมีประมาณ 25% - 45% และ ส่วนที่เป็นสารของแข็งที่ไม่ใช่ยางประมาณ 5% ส่วนที่เหลือส่วนใหญ่เป็นน้ำเมื่อมีการนำน้ำยางสดไปใช้งานในการทำผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในโรงงานซึ่งค่อนข้างอยู่ไกลจากสวนยางพารา ทำให้เกิดความไม่สะดวกและไม่เป็นการประหยัดในการขนส่งน้ำยางสดไปยังโรงงานนอกจากนี้สารบางอย่างที่มีอยู่ในน้ำยางอาจมีผลให้คุณภาพผลิตภัณฑ์ไม่ดี ดังนั้นจึงมีการผลิตน้ำยางสดเป็นน้ำยางข้นที่มีปริมาณเนื้อ ยางแห้ง 60% ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมกับการนำไปผลิตผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

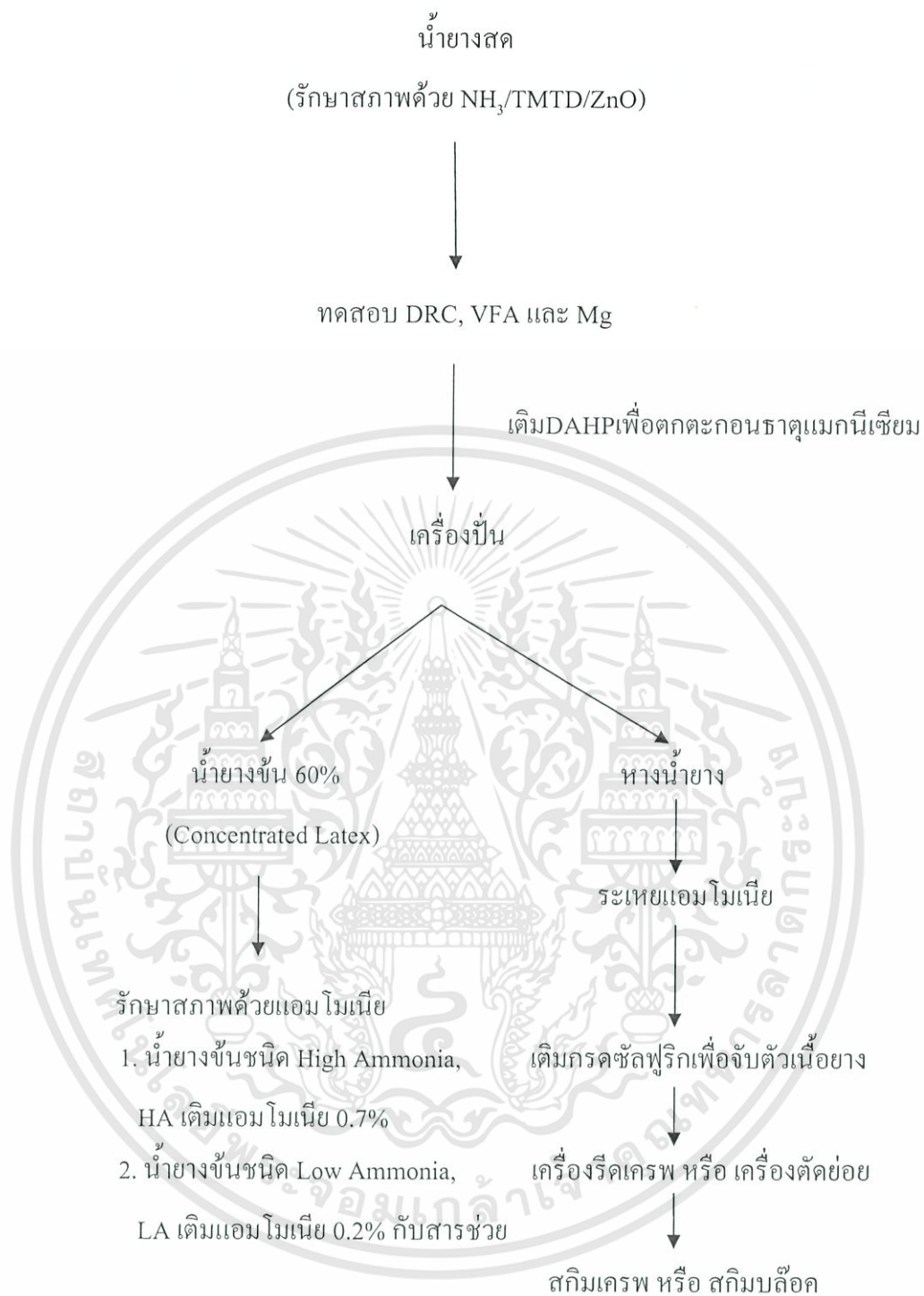
2.9.3 การผลิตน้ำยางข้นด้วยวิธีการปั่น

การผลิตน้ำยางข้นด้วยวิธีการปั่น ดังรูป 2.5 มีขั้นตอนการผลิตดังนี้

1. การรวบรวมน้ำยางสด
2. การตรวจสอบน้ำยางสด

เก็บตัวอย่างน้ำยางสดในถังรวมมาตรวจสอบปริมาณเนื้อยางแห้ง ปริมาณกรดไขมันระเหย และปริมาณธาตุแมกนีเซียม เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับปรับสมบัติน้ำยางสดให้เหมาะสมโดยปกติน้ำยางสดที่จะนำไปปั่นเป็นยางข้นควรมีปริมาณธาตุแมกนีเซียม 50 ส่วนต่อปริมาณของแข็งทั้งหมดของน้ำยาง 1 ถ้ำน (50 ppm) เพราะธาตุแมกนีเซียมจะทำให้น้ำยางสูญเสียความคงตัวต่อเครื่องกล ดังนั้นถ้าน้ำยางสดมีปริมาณธาตุแมกนีเซียมเกิน 50 ppm ในทางปฏิบัติโรงงานจะมีการเติมสารเคมีไดแอมโมเนียม ไฮโดรเจน ฟอสเฟต (Diammonium hydrogen phosphate, DAHP) เพื่อให้ DAHP จับธาตุแมกนีเซียมและตกตะกอนในลักษณะของตะกอน (Sludge) ซึ่งใช้เวลาอย่างน้อย 1 วัน





รูปที่ 2.5 ผังการผลิตน้ำยางเข้มข้นด้วยวิธีการปั่น และการผลิตยางสกิมจากหางน้ำยาง (วิภาวี, 2554)

2.10 กราไฟต์ (Graphite)

กราไฟต์คือคาร์บอนที่มีการจัดเรียงตัวในอีกรูปแบบหนึ่ง มีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าหรือกึ่งตัวนำไฟฟ้า แกรไฟต์มีการจัดเรียงตัวแบบเสถียรที่สภาวะมาตรฐาน แต่บางครั้งกราไฟต์เกิดจากถ่านหินเมื่อมีความร้อน ความดันสูงขึ้นระดับหนึ่งซึ่งพบอยู่บนแอนทราไซต์ (Anthracite) และเมตา-แอนทราไซต์ (Meta-anthracite) ซึ่งโดยปกติแล้ว มักไม่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเพราะติดไฟยาก

2.10.1 ประเภทของกราไฟต์

กราไฟต์ที่เกิดในแหล่งสะสม มี 3 ประเภท ได้แก่

1. กราไฟต์ที่มีลักษณะเป็นแผ่นบาง สั้น ๆ หน้าแผ่นเป็นรูป 6 เหลี่ยม เมื่อแตกจะเป็นมุมที่ขอบ หรือมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ

2. กราไฟต์ที่มีลักษณะอสัณฐาน (Amorphous) มีลักษณะเม็ดละเอียด เกิดในกระบวนการแปรสภาพของหินแปรของถ่าน โดยความร้อนสูง เป็นขั้นสุดท้ายของการเกิดถ่านหิน บางครั้งเรียกว่าแอนทราไซต์ (Meta-anthracite)

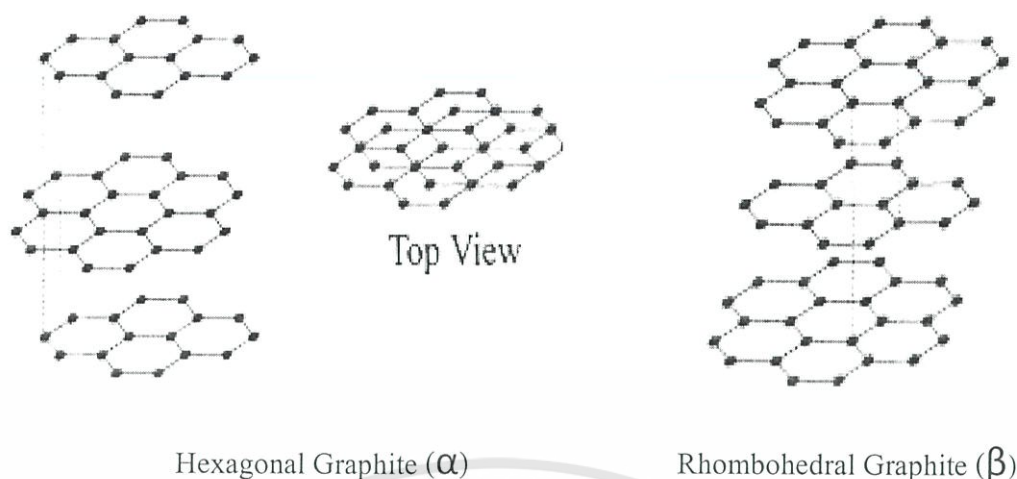
3. กราไฟต์ที่มีลักษณะเป็นก้อน ๆ บางครั้งอาจเรียกว่า สายแร่กราไฟต์ เกิดขึ้นในช่อง หรือรอยแตกของสายแร่เป็นเนื้อเดียวกัน มีลักษณะกลุ่มผลึกเส้นใยหรือรูเลี่ยนยาว มักเกิดในสายแร่ที่มีน้ำร้อน

กราไฟต์ที่คุณภาพสูงคือ เส้นใยแกรไฟต์ อาจหมายถึง เส้นใยคาร์บอน หรือเส้นใยคาร์บอนที่เสริมความแข็งแรง

2.10.2 ลักษณะของกราไฟต์

กราไฟต์ประกอบกันเรียงตัวเป็นชั้น ๆ คาร์บอน มีการจัดเรียงตัวแบบเฮกซะ หรือเป็นรูปผลึกเฮกซะโกนอล (Hexagonal) และจัดเรียงตัวแบบเบตา หรือรูปผลึกโรมโบฮีดรอล (Rhombohedral) โดยมีลักษณะทางกายภาพเหมือนกัน แผ่นแร่รูปผลึกเฮกซะโกนอล (Hexagonal) มีลักษณะบางและไม่แข็ง ผลึกแบบเฮกซะโกนอลสามารถเปลี่ยนกลับไปเป็นเบตาได้เมื่อแรงกดดัน และผลึกแบบเบตาสามารถเปลี่ยนกลับเป็นผลึกแบบเฮกซะโกนอลเมื่อได้รับความร้อนมากกว่า 1300 องศาเซลเซียส แผ่นแร่แต่ละแผ่นมีความหนาแน่นน้อย

กราไฟต์มีการนำไฟฟ้าเพราะการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนแต่ละระนาบ โดยอิเล็กตรอนวงนอกสุดสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ จึงสามารถนำไฟฟ้าได้ แต่อย่างไรก็ตามแร่แกรไฟต์นำไฟฟ้าได้ระนาบเดียวเท่านั้น



รูปที่ 2.6 โครงสร้างผลึกแบบหกเหลี่ยมและโรมโบฮีดรอลของแกรไฟต์

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0584854700002767>)

2.10.3 การใช้ประโยชน์จากกราไฟต์

กราไฟต์ในธรรมชาติมีการใช้ประโยชน์ในเรื่อง การผลิตเหล็กกล้า อุตสาหกรรมเครื่องเขียน การผลิตอุปกรณ์ที่ช่วยลดการสูญเสียความร้อน การผลิตอุปกรณ์เบรกรถยนต์ อุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่ และทำสารหล่อ (ไม่) ลื่นกราฟีน (Graphene) ซึ่งเป็นกราไฟต์ที่พบตามธรรมชาติมีลักษณะเด่น คือ มีความแข็งแรงมาก จึงใช้คุณสมบัตินี้แยกแกรไฟต์ออกจากแร่แกรไฟต์ทั่วไปเพื่อนำไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม

กราไฟต์สังเคราะห์ใช้ประโยชน์ใน การทำเป็นขั้วไฟฟ้า การทำเป็นผงเพื่อใช้ในงานอุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่ และอุตสาหกรรมผลิตอุปกรณ์เบรกรถยนต์ โดยทำจากเชื้อเพลิงถ่านหินที่เผาจนหมดควัน (Petroleum Coke) เส้นใยแกรไฟต์หรือเส้นใยคาร์บอนเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรงทนทานสูง ใช้ในการผลิตอุปกรณ์ตกปลา อุปกรณ์กีฬา กอล์ฟ อุตสาหกรรมรถจักรยาน นอกจากนี้ กราไฟต์สังเคราะห์ยังใช้สารลดความเร็วของนิวตรอนในปฏิกรณ์นิวเคลียร์ โดยกราไฟต์จะเป็นตัวดูดกลืนนิวตรอนอิสระในแร่บางชนิด เช่น โบรอน และใช้ในการผลิตอุปกรณ์ดูดซับเรดาร์

2.11 สีสังเคราะห์

สีสังเคราะห์ (Dyestuffs) คือ สีชนิดหนึ่งที่ใช้ในการย้อมเส้นใยของผ้า อาจจะเป็น สารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ก็ได้ มีลักษณะเป็นผลึกหรือผงละเอียด สีสังเคราะห์บางชนิดละลาย น้ำได้ บางชนิดไม่สามารถละลายน้ำแต่จะละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ได้ เมื่อนำสีสังเคราะห์ไป ใช้ในกระบวนการย้อมจะทำให้โมเลกุลของ สีสังเคราะห์ซึมผ่านเข้าไปในโมเลกุลของเส้นใย โดย จะทำลายโครงสร้างผลึกของวัตถุนั้นชั่วคราว ซึ่งอาจเกิดพันธะไฮโดรเจนหรือพันธะโควาเลนต์กับ วัตถุที่ต้องการย้อมโดยตรงสีที่เห็นจากสีสังเคราะห์นั้นเกิดจากอิเล็กตรอนในพันธะคู่ซึ่งอยู่ใน โมเลกุลของสีสังเคราะห์นั้นมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานในช่วงสเปกตรัมต่างกัน พลังงานที่สายตามองเห็นจะมีความยาวคลื่นช่วง 400-700 นาโนเมตร สีสังเคราะห์ที่มีโครงสร้าง โมเลกุลต่างกันจะมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงความยาวคลื่นต่างๆกันไป ซึ่ง สายตาสามารถรับภาพได้ จึงทำให้โมเลกุลสีสังเคราะห์ต่าง โครงสร้างกันแสดงสีให้เราเห็นด้วยสายตา ออกมาต่างกันไป

สีสังเคราะห์ที่ใช้ย้อมเส้น ใยมีหลายชนิด การย้อมที่จะให้ผลดีนั้นขึ้นอยู่กับอำนาจการ รวมตัวของสีสังเคราะห์กับเส้นใยจะต้องมีมากกว่าอำนาจการรวมตัวของสีย้อมกับน้ำ สีสังเคราะห์ ส่วนใหญ่เป็นสารเคมีที่เป็นผลิตภัณฑ์มาจากน้ำมันปิโตรเลียม ซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนพวก Aliphatic และ Aromatic การจำแนกสีสังเคราะห์สามารถแบ่งประเภทสีสังเคราะห์ออกได้หลายวิธี แต่ที่นิยมใช้กันมากจะจำแนกตามลักษณะการนำไปใช้งาน เพราะสีสังเคราะห์ที่ใช้จะต้องมีความ คงทนต่อการซัก มีความคงทนต่อแสงแดดและยังต้องมีความคงทนต่อความร้อน ซึ่งในกลุ่ม โรงงาน อุตสาหกรรมได้จำแนกสีสังเคราะห์ตามวิธีใช้งานออกเป็น 11 ประเภท ดังนี้

- 1) สีเอซิด (Acid Dye) สีชนิดนี้เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ มีประจุลบ ละลายน้ำได้ดี ส่วน ใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถันกลไกในการติดสีเกิดเป็นพันธะไฮโดรเจน ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนใน น้ำสังเคราะห์ที่มีสภาพเป็นกรดเจือจาง สีเอซิดบางตัวสามารถนำกลับไปย้อมเส้นใยเซลลูโลส บริสุทธิ์ได้ เช่น ป่าน ไนลอน โยขนแกะ ไหม และอะครีลิกได้ดี วิธีการใช้นำสีสังเคราะห์ที่ เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ไปละลายน้ำย้อมที่เป็นกรดหรือเป็นกลาง สีเอซิดไม่ทนต่อการซัก ไม่ ทนเหงื่อ

- 2) สีไดเรกต์ (Direct Dye) หรืออาจเรียกว่า สีย้อมผ้า สีสังเคราะห์ชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็น สารประกอบเฮโซที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิคที่ทำให้ตัวสีสามารถละลายน้ำได้ มี ประจุลบ นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส สีจะติดเส้นใยได้โดยโมเลกุลของสีจะจัดเรียงตัวแทรกอยู่ใน ระหว่างโมเลกุลเส้นใย และยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน สีไม่ทนต่อการซักน้ำ ตกง่าย ทนแสง

3) สีเบสิก (Basic or Cationic Dye) สีสังเคราะห์ชนิดนี้เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ (Organic Base) ให้ประจุบวกละลายน้ำได้ นิยมใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนได้ดีแต่เกาะติดเส้นใยเซลลูโลสได้เล็กน้อยหรือไม่ติดเลย มีคุณสมบัติเด่นพิเศษคือมีความสดใสและความเข้มของสีดีมากแต่ไม่ทนแสง ใช้ย้อมเส้นใยอะคริลิกโดยเฉพาะ

4) สีดิสเพอร์ส (Disperse Dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำแต่มีสมบัติกระจายได้ดี สามารถย้อมเส้นใยอะซิเตท เส้นใยโพลีเอสเตอร์ ไนลอน และอะคริลิกได้ดี การย้อมจะใช้สารพา (Carrier) เพื่อช่วยเร่งอัตราการดูดซึมของสีเข้าไปในเส้นใย หรือย้อมโดยใช้อุณหภูมิและความดันสูง สีดิสเพอร์สเป็นสีที่ทนแสงและการซักฟอกค่อนข้างดี แต่สีจะซีดถ้าถูกควันหรือแก๊สบางชนิด เช่น แก๊สไนตรัสออกไซด์ สีดิสเพอร์สแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม โดยพิจารณาจากกลุ่มเคมีในสีย้อม ได้แก่ สีย้อมเอโซ (Azo Dyes) และสีย้อมเอมิโน แอนทราควิโนน (Amino Anthraquinone) ซึ่งทั้งสองกลุ่มประกอบด้วยอนุพันธ์ของเอทราโนลามีน (Ethanalamine; $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2$) หรืออนุพันธ์ที่คล้ายคลึงกัน

5) สีรีแอกทีฟ (Reactive Dye) เป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบ เมื่ออยู่ในน้ำจะมีสมบัติเป็นด่าง สีย้อมสังเคราะห์ชนิดนี้เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด โมเลกุลของสีจะยึดจับกับหมู่ไฮดรอกไซด์ (OH^-) ของเซลลูโลสและเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ในสภาวะที่เป็นด่าง กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส สีรีแอกทีฟมี 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง 70-75 องศาเซลเซียส และกลุ่มที่ติดย้อมที่อุณหภูมิต่ำ สีรีแอกทีฟให้สีที่สดใส ทุกสีติดทนในทุกสภาวะ

6) สีอะโซอิก (Azoic Dye) สีสังเคราะห์ชนิดนี้ไม่สามารถละลายน้ำได้ การที่จะก่อรูปเป็นเส้นใยได้ต้องย้อมด้วยสารประกอบฟีนอลซึ่งละลายน้ำได้ก่อน ซึ่งเป็นกระบวนการทำให้รวมตัวเป็นสี (Coupling) แล้วย้อมทับด้วยสารไดอะโซคอมโพเนนต์ที่จะเกิดเป็นสีได้ สีอะโซอิกใช้ย้อมเส้นใยได้ทั้งเซลลูโลส ไนลอน หรืออะซิเตทสีอะโซอิกเป็นมีที่ทนต่อการซัก แต่ไม่ทนต่อการขัดถู

7) สีแว็ต (Vat Dye) เป็นสีที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ เมื่อทำการย้อมต้องเตรียมน้ำย้อมให้สีแว็ตละลายน้ำโดยให้ทำปฏิกิริยากับสารรีดิวซ์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ สีแว็ตจะถูกรีดิวซ์ให้กลายเป็นเกลือ จึงซึมเข้าไปในเส้นใยได้ เมื่อนำผ้าไปผึ่งในอากาศสีในเส้นใยจะถูกออกซิไดส์เป็นสีแว็ต สีสังเคราะห์ชนิดนี้มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญอยู่ 2 ชนิด คือ สีอินดิโกคาร์มิน (Indigoid carmine) และสีแอนทราควิโนอิด (Anthraquinoid)

8) สีมอร์แดนท์ หรือ โครม (Mordant or Chrome Dye) สีสังเคราะห์ชนิดนี้ต้องใช้สารช่วยติดเข้าไปช่วย เพื่อให้เกิดการติดสีบนเส้นใย สารที่ช่วยติดที่ใช้ คือ สารประกอบออกไซด์ของโลหะ เช่น โครเมียม ดีบุก เหล็ก อะลูมิเนียม เป็นต้น สีมอร์แดนท์เป็นสีที่มีโมเลกุลใหญ่ซึ่งเกิดจากสีมอร์แดนท์หลายโมเลกุลจับกับโลหะแล้วละลายน้ำได้จึงทำให้ย้อมได้ง่าย ซึ่งใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนและเส้นใยพอลิเอไมด์ได้ดี

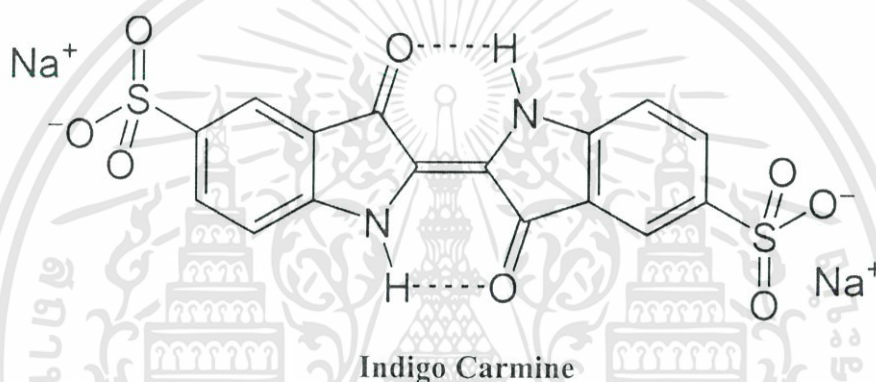
9) สีอินแกรน เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำโดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากปฏิกิริยากับน้ำ สีสังเคราะห์ชนิดนี้ใช้สำหรับย้อมฝ้าย

10) สีออกซิเดชัน (Oxidation Dye) เป็นสีที่ละลายน้ำโดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยาในน้ำโดยสีจะติดแน่นอาศัยปฏิกิริยาการตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย ใช้สำหรับย้อมฝ้ายและขนสัตว์

11) สีซัลเฟอร์ (Sulfur Dye) เป็นสีที่ไม่สามารถละลายน้ำ เมื่อทำการย้อมต้องรีดิวซ์สีเพื่อให้โมเลกุลอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้ แต่สีซัลเฟอร์บางชนิดที่ผลิตออกมาจำหน่ายในรูปที่ถูกรีดิวซ์จะละลายน้ำได้นิยมนำสีซัลเฟอร์มาย้อมฝ้ายสีจะติดทนและเป็นสีที่มีราคาถูกแต่สีที่อ่อนจะไม่ทนต่อการซัก

2.12 อินดิโกคาร์มีน (Indigo Carmine, IC)

อินดิโกคาร์มีน (Indigo carmine, IC) หรือ 5,5-Indigodisulfonic Acid Sodium Salt เป็นอินดิเคเตอร์ ชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถสกัดได้จากพืชในธรรมชาติ ที่มีสูตรเคมีเป็น $C_{16}H_8N_2Na_2O_8S_2$ ซึ่งโดยทั่วไปจะนำไปใช้เป็นฟิออซอินดิเคเตอร์ จะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินเมื่อฟิออซ เท่ากับ 11.4 และเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเมื่อ pH เท่ากับ 13.0 และยังใช้เป็นอินดิเคเตอร์สำหรับปฏิกิริยารีดอกซ์ได้อีกด้วย โดยจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเมื่อเกิดปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังนิยมใช้เป็นสีย้อมเรียกว่า Indigo Dye ซึ่งมีสีน้ำเงินเป็นหลักนำไปย้อมสีของกางเกงยีน เป็นต้น

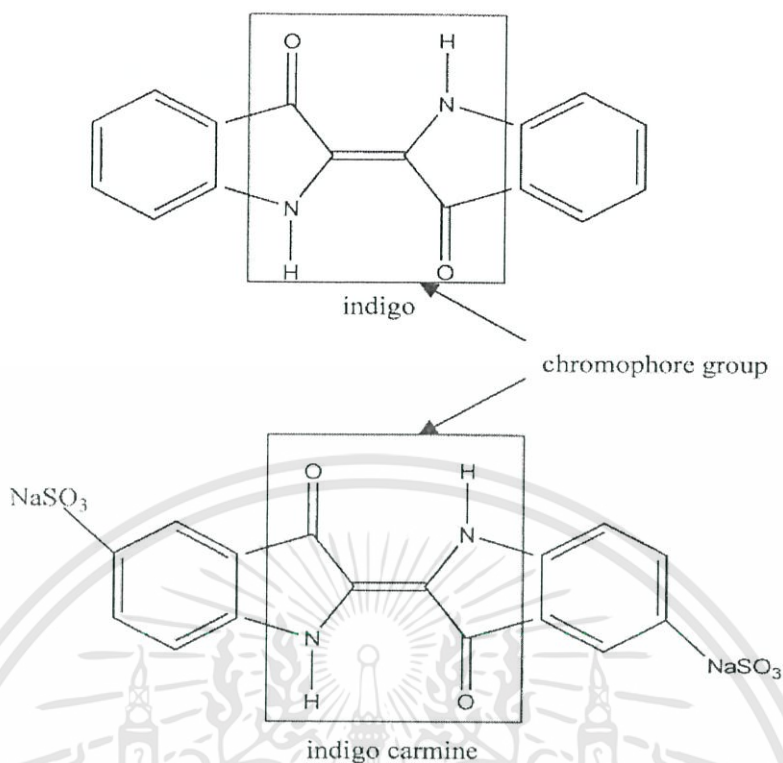


รูปที่ 2.7 สูตรโครงสร้างของอินดิโกคาร์มีน (Indigo Carmine)

<http://www.jagson.com/food-color/indigocarmine.php>

อินดิโกคาร์มีนนั้นมีจุดหลอมเหลวที่สูงประมาณ 390 – 392 °C และมีความสามารถในการละลายน้อยมากเนื่องจาก โครงสร้างของอินดิโกคาร์มีน มีพันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมต่อระหว่างโมเลกุลอย่างแข็งแรง นอกจากนี้อินดิโกคาร์มีน ในสถานะของแข็งจะเกิดการรวมตัวเป็นพอลิเมอร์ โดยแต่ละโมเลกุลจะถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของอินดิโกคาร์มีน อีก 4 โมเลกุล ส่วนในสารละลายที่ไม่มีขี้ อินดิโกคาร์มีนจะเกิดเป็นมอนอเมอร์

เชื่อมต่อกันระหว่างโมเลกุล และสีของสารละลายจะเป็นสีน้ำเงิน โดยสีที่เกิดขึ้นเกิดจาก โครงสร้างที่เป็น H-chromophore ประกอบด้วย C=C ที่ถูกแทนที่ด้วย NH ที่เป็น Donor Group และ คาร์บอนนิออกไซด์ (CO) เป็น Acceptor Group ดังรูปที่ 2.8

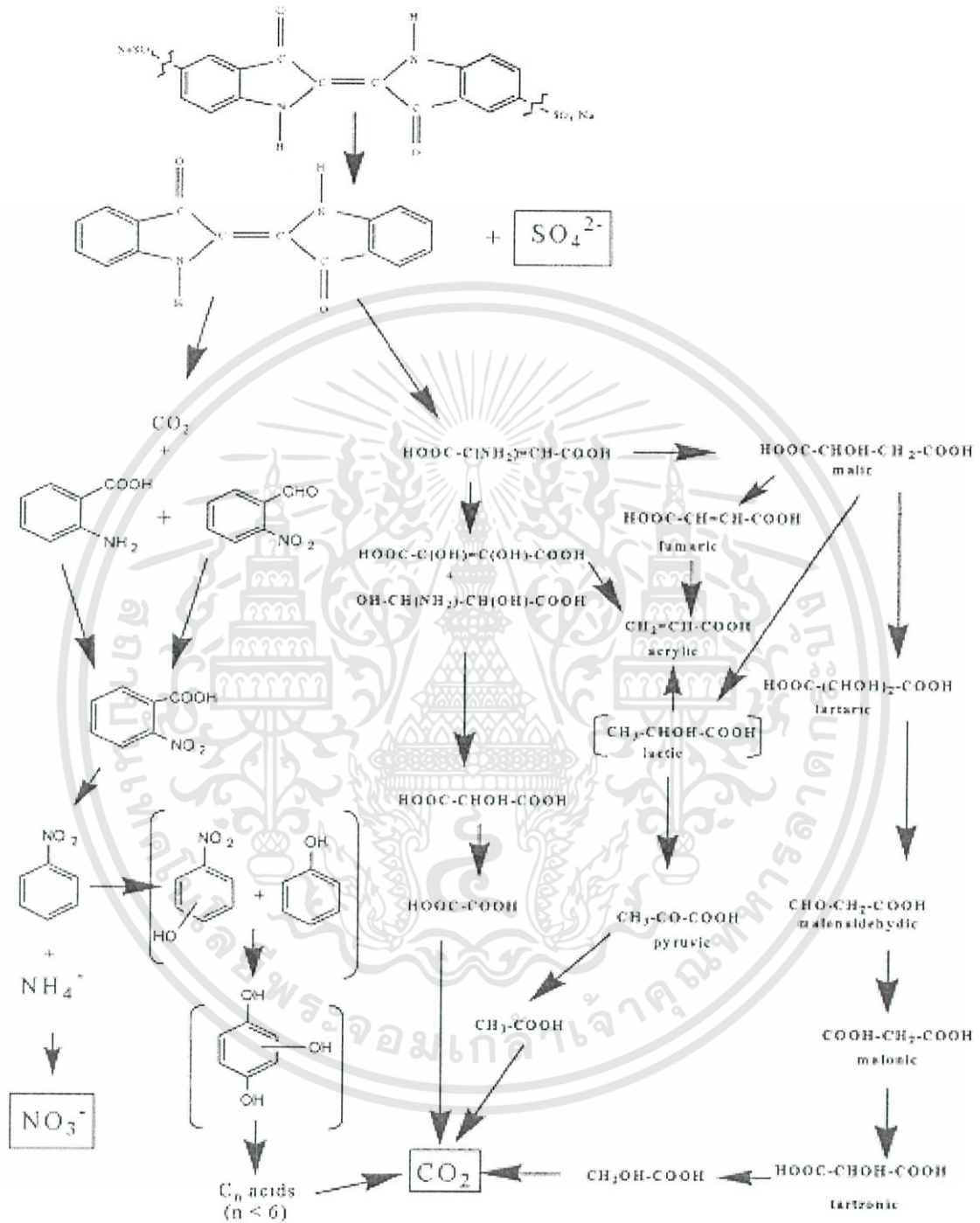


รูปที่ 2.8 โครงสร้างของอินดิโกคาร์มีน (Indigo Carmine)

เนื่องจากในปัจจุบันได้มีการใช้อินดิโกคาร์มีน สีส้มในอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ซึ่งการที่ปล่อยสีสังเคราะห์จากอุตสาหกรรมลงสู่แหล่งน้ำนั้นจะทำให้เกิดผลกระทบมากมายต่อสภาพแวดล้อม โดยเฉพาะทางน้ำจะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศทำให้สัตว์น้ำและพืชได้รับผลเสียเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้อินดิโกคาร์มีน จะถูกนำไปทำเป็นสีย้อมแล้วยังนำไปใช้เป็นสารเติมแต่งในแคปซูลยาและลูกกวาดที่ใส่สี โดยสามารถใช้สีของอินดิโกคาร์มีนในการวินิจฉัยบริเวณที่เซลล์เกิดความผิดปกติได้อีกด้วย ถึงแม้อินดิโกคาร์มีนจะถูกเผาผลาญในร่างกายได้ยากแต่ก็สามารถถูกกรองได้ด้วยไตของมนุษย์อินดิโกคาร์มีน ถือเป็นสีย้อมที่เป็นพิษชนิดหนึ่งอาจทำให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนังหรือดวงตาโดยเฉพาะเยื่อลูกตาหรือกระจกตาและร้ายแรงถึงเป็นขั้นทำให้เกิดเนื้องอกและเป็นสารก่อมะเร็งได้ จึงได้มีการทดสอบการกำจัดอินดิโกคาร์มีน ในสัตว์ เช่น หนู, หมู และค้นคว้าวิธีการกำจัดในทางต่างๆ เพื่อที่จะได้ไม่ให้เกิดผลเสียต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมต่อไป

ในปัจจุบันจึงได้มีการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับการกำจัดอินดิโกคาร์มีน ในน้ำด้วยวิธีต่างๆ มากมาย โดยเฉพาะการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมเข้าไปในวัสดุต่างๆ ทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสแล้วไปกำจัดอินดิโกคาร์มีนในของเหลวหรือของแข็ง ซึ่งการวิจัยพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสกับแสง UV สามารถกำจัดสีสังเคราะห์ที่ถูกปล่อยจาก

โรงงานอุตสาหกรรมได้ โดยเราจะใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25 Titanium Dioxide) ในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสแล้วทำให้อินดิโกคาร์มีนเกิดการสลายตัวได้



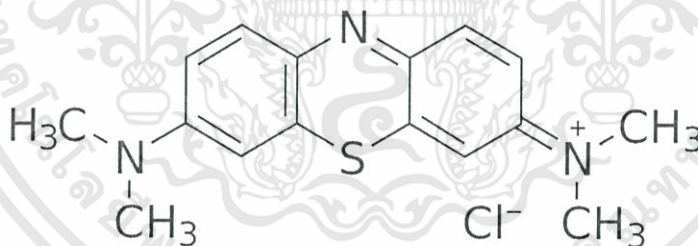
รูปที่ 2.9 กลไกการสลายตัวของอินดิโกคาร์มีน (Indigo Carmine)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

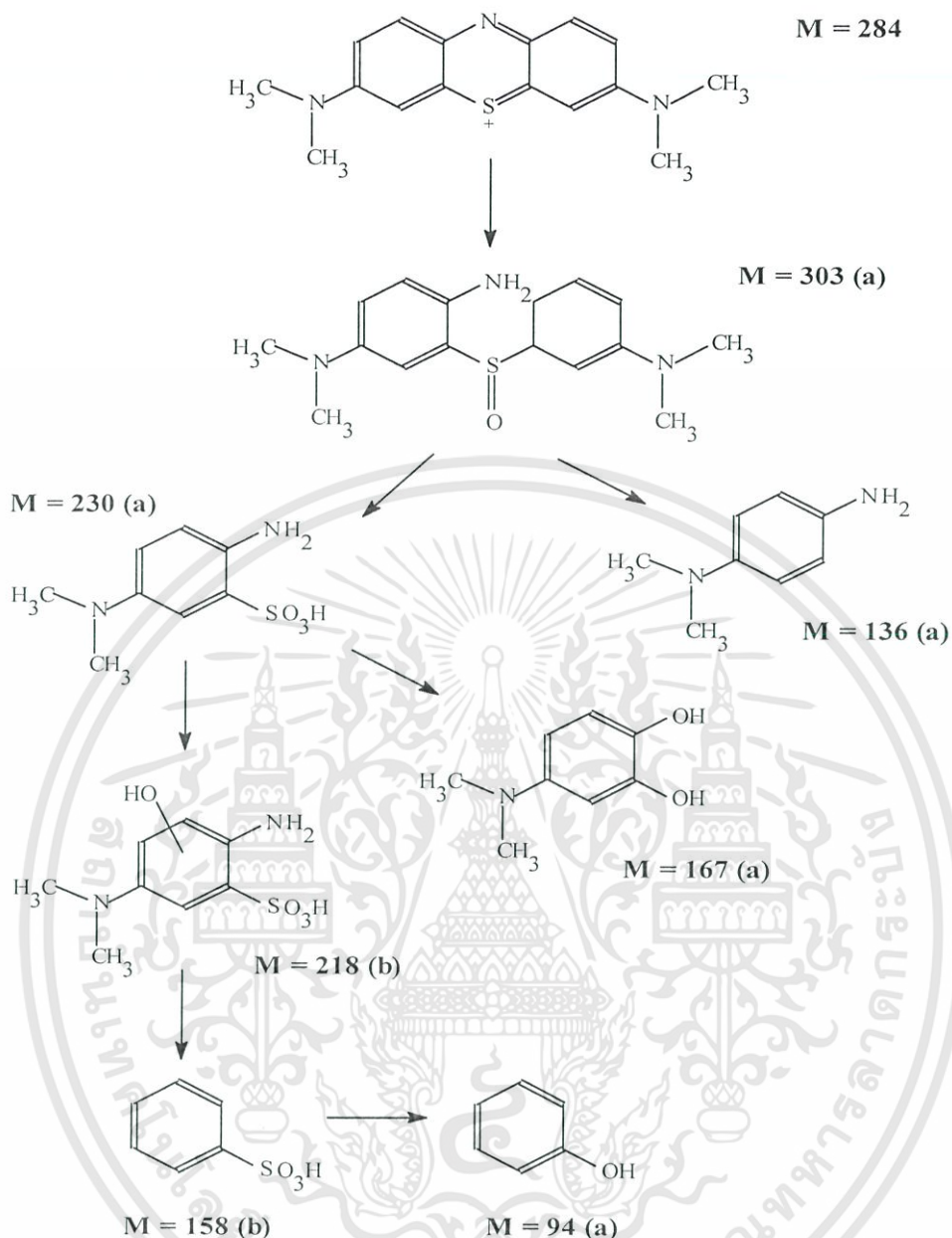
ซึ่งไฮดรอกซิลนี้จะไปทำลายพันธะ C-N และ C-C ใน Chromophore Group วงอะโรมาติกพวก anthranilic acid, nitrobenzaldehyde, nitrobenzoic acid และ nitrobenzene ก็ถูกชนด้วยไฮดรอกซิล ทำให้เกิดปฏิกิริยา Hydroxylation เกิดเป็น hydroxyl-hydroquinone ซึ่งเป็นอะโรมาติกโมเลกุลสุดท้ายก่อนที่จะเกิดการเปิดวงอะโรมาติก กระบวนการสลายตัวทั้งหมดจะเปลี่ยนสาร Organic Carbon ไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ส่วน Nitrogen และ Sulfate Heteroatoms จะเปลี่ยนเป็น Inorganic ion เช่น Nitrate, Ammonium และ Sulfate ion ตามลำดับ

2.13 เมทิลีนบลู (Methylene blue, MB)

เมทิลีนบลู มีโครงสร้างเป็นแคทไอออนในส่วนประกอบที่ให้สี หรือเรียกว่า สีแคทไอออนิก (Cationic Dyes) เมื่อมีการปนเปื้อนในน้ำเสียจะก่อให้เกิดความน่ารังเกียจ ดังนั้นจึงควรมีการกำจัดสีในน้ำเสียก่อนทิ้ง โครงสร้างของเมทิลีนบลู (C₁₆H₁₈N₃SCl) ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเมทิลีนบลู โดยการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงซึ่งอาศัยไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่ง พบว่าการกำจัดสารละลายเมทิลีนบลูทำได้ ภายใต้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง เกิดการเปลี่ยนแปลงวงเบนซีนในโครงสร้างของเมทิลีนบลูอยู่ในรูปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ซัลเฟตไอออน (SO₄²⁻) แอมโมเนียมไอออน (NH₄⁺) และไนเตรตไอออน (NO₃⁻) ส่งผลให้สีของเมทิลีนบลูจางลง



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของเมทิลีนบลู (Methylene Blue, MB)



(a) detected by GC/MS (extraction of ions)

(b) detected by LC/MS

รูปที่ 2.11 กลไกการสลายตัวของเมทิลีนบลู (Methylene blue, MB)

(Photocatalytic degradation pathway of methylene blue, Houas, et al., 2001)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มานพ (2550) จากการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานแป้งลำปะหลังด้วยกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้ค่า COD เป็นตัวบ่งบอกประสิทธิภาพการบำบัด และเนื่องจากน้ำเสียดังกล่าวมีคาร์โบไฮเดรต เชิงซ้อนอยู่ในรูปของแป้งและกลูโคส ซึ่งยากต่อการบำบัดสิ่งที่เจือปนอยู่ จากการศึกษาหาปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมตลอดจนสภาวะกำลังวัตต์ของแสงยูวี และระยะเวลาที่จะทำให้เกิดประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด พบว่า เมื่อใช้ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ต่างกัน คือ 0 1 2 3 4 และ 5 กรัมต่อลิตร โดยใช้กำลังวัตต์ของยูวีต่างกัน คือ 30 45 และ 60 วัตต์ ในแต่ละชุดกำลังวัตต์ใช้เวลาในการทดลอง 5 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่า ไทเทเนียมไดออกไซด์ 5 กรัมต่อลิตร กำลังวัตต์หลอดยูวี 60 วัตต์ และระยะเวลาที่ 5 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพได้สูงสุด 33% และจากการศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อการบำบัดโดยไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยได้ทดลองปรับค่าพีเอชเป็น 3 7 และ 10 จากนั้นนำมาทดลองฉายแสงที่กำลังวัตต์ 60 วัตต์ ระยะเวลา 5 ชั่วโมง ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ 5 กรัมต่อลิตร พบว่า ที่สภาวะเป็นกลางเท่ากับ 7 ส่งผลต่อการบำบัดสูงสุดที่ 47% และจากการศึกษาผลจากการเติมออกซิเจน ที่มีผลต่อการบำบัดโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ นำมาทดลองฉายแสงที่กำลังวัตต์ 60 วัตต์ ระยะเวลา 5 ชั่วโมง ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ 5 กรัมต่อลิตร พบว่า ระบบที่มีการเติมออกซิเจนมีประสิทธิภาพการบำบัด 39% ซึ่งสูงกว่าระบบที่ไม่เติมออกซิเจนที่มีประสิทธิภาพการบำบัด 33%

ธีรยุทธ นุชนิยม(2552) และ ทิพวัลย์ ตุ่มทอง การบำบัดน้ำเชื่อมด้วยกระบวนการผสมผสานระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์ โดยใช้เทคนิคโฟโตแคตาไลติกและกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์มีวัตถุประสงค์หลักในการลดความเข้มข้นของน้ำสีไครเร็กซ์ ซีรีแอคทีฟ ซีดีเอส เฟอร์ส และ ซีเบสิก ที่เหลือจากกระบวนการเชื่อมซึ่งจะทำการศึกษาตัวแปรหลัก 4 ตัว ในการบำบัดสีเชื่อมแบบผสมผสานระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์ โดยทำการศึกษาจากปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ตั้งแต่ 0 5 10 และ 15 กรัมต่อลิตร เวลาที่ใช้เป็น 5 ,10 และ 15 กรัมต่อลิตร และเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยถ่านกัมมันต์ตั้งแต่ 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมงตามลำดับ ผลการศึกษาที่ได้นำมาเปรียบเทียบความเข้มข้นสี ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำสีคือปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 10 กรัมต่อลิตร ใช้ระยะเวลาในการบำบัด 6 ชั่วโมง และปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ 5 กรัมต่อลิตร ใช้ระยะเวลา 2 ชั่วโมง น้ำสีเชื่อมหลังการบำบัดจะมีความเข้มสีลดลงจากความเข้มสีก่อนการบำบัด

กาญจนา และนงนุช (2553) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมด้วยเทคนิคโฟแคตาไลติกร่วมกับกระบวนการดูดซับมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการบำบัดน้ำสีจากกระบวนการฟอกย้อม โดยศึกษาผลของกระบวนการบำบัดแบบผสมผสานระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์ และ

ถ่านกัมมันต์ น้ำย้อมที่ใช้ในการบำบัดได้แก่ น้ำย้อมสีไครเร็กซ์ สีรีแอคทีฟ สีแอซิด สีดิสเพิร์ส และ สีเบสิก ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำย้อมคือ 1% owf น้ำสีที่ใช้ในการบำบัดเป็นน้ำสีที่ผ่าน กระบวนการข้อมบนวาสคูลิ่งทอตามกระบวนการที่สมบูรณ์สีย้อมที่ใช้ทั้งหมดมีโครงสร้างอะโซ (Azo) จากการศึกษาพบว่าสีไครเร็กซ์และสีรีแอคทีฟให้ผลการบำบัดในกระบวนการต่อเนื่องจาก เทคนิคโฟโตแคตาไลติกร่วมกับกระบวนการดูดซับได้ดี ส่วนสีดิสเพิร์สควรใช้กระบวนการดูดซับ เพียงอย่างเดียว สำหรับสีแอซิดและสีเบสิกมีความเข้มข้นของ น้ำเสียที่เหลือจากกระบวนการน้อยจึง ไม่นำมาทดสอบสถานะที่เหมาะสมในการบำบัดสีไครเร็กซ์ คือใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 10 กรัมต่อลิตร เวลา 6 ชั่วโมง และถ่านกัมมันต์ 5 กรัมต่อลิตร เวลา 2 ชั่วโมง สีรีแอคทีฟใช้ ไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 10 กรัมต่อลิตร เวลา 6 ชั่วโมง และถ่านกัมมันต์ 10 กรัมต่อลิตร เวลา 2 ชั่วโมง ส่วนสีดิสเพิร์สใช้ถ่านกัมมันต์ 15 กรัมต่อลิตร เวลา 4 ชั่วโมง ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า เทคนิคโฟโตแคตาไลติกร่วมกับกระบวนการดูดซับสามารถใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการ ฟอกย้อมได้ ผลการบำบัดจะขึ้นอยู่กับประเภทสีเป็นหลัก

ปิยฉัตร, วัชร และชนิษฐา (2554) การย่อยสลายสีย้อมผาสังเคราะห์ ชนิดไครเร็กซ์ (สีแดง) ด้วยกระบวนการการใช้แสงร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เพื่อศึกษา ประสิทธิภาพของการลดสีและผลของความเป็นกรดต่างต่อการย่อยสลายสีย้อม ที่ภาวะต่างๆ คือ ความเข้มข้นของสีย้อม 25 -150 mg/L ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 -5 g/L เวลา 180 นาที และพลังงานแสงยูวีกำลัง 48 วัตต์ ทำการวัดปริมาณของสีด้วยเครื่องยูวีว-วิสตีเบลสเปกโตสโคป พบว่า สามารถย่อยสลายสีย้อมได้ 100% ที่ภาวะ pH เท่ากับ 3 ความเข้มข้นของไทเทเนียมได ออกไซด์ 3 กรัมต่อลิตร โดยสารละลายสีย้อมจะเปลี่ยนจากสีแดงเป็นไม่มีสี และเมื่อเปรียบเทียบ โดยการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีโซลเจล พบว่า การสลายสีย้อม ประสิทธิภาพต่ำกว่า ไทเทเนียม เกรดการค้า (Degussa P25) เนื่องจากไทเทเนียม ไดออกไซด์ที่เตรียมด้วย โซลเจลให้พื้นที่ ผิวน้อยกว่าเกรดการค้า

ชลลดา(2554)จากการศึกษาปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสง โดยไทเทเนียมไดออกไซด์ในการ กำจัดสารมลพิษอินทรีย์ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารมลพิษอินทรีย์เมื่อใช้อนุภาคนาโน ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น โครงสร้างผลึก ลักษณะ ความเป็นรูพรุน ตำแหน่งที่ว่างไว และขนาดอนุภาค เป็นต้น ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีผลึก แยกต่างกันซึ่งเกิดจาก การจัดเรียงตัวของออกตะซีดรอลต่างกัน จะส่งผลให้แต่ละรูปผลึกมีสมบัติ บางประการที่แตกต่างกัน เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ และอนาเทสจะ มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายด้วยแสงดีกว่าแบบบรูคไรท์ เพราะมีการรวมตัวกันระหว่าง อิเล็กตรอนช่องว่างอิเล็กตรอนน้อยและยังพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์มีโครงสร้างผลึกแบบอนา เทส จะมีประสิทธิภาพในการย่อยสารมลพิษอินทรีย์ได้มากกว่าโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ เพราะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาดว่าโครงสร้างผลึกแบบรูโพลีมีการสูญเสียพื้นที่ผิวที่ว่างไว้ต่อการเกิดปฏิกิริยาเนื่องจากใช้ อุณหภูมิขณะสังเคราะห์สูงกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบอนาเทส ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดอนุภาคเล็กจะมี พื้นที่ผิวสูงทำให้สามารถดูดซับสารอินทรีย์ได้มากกว่า เพราะตัวเร่งปฏิกิริยาสัมผัสกับสารมลพิษอินทรีย์ได้มาก ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีพื้นที่ผิวสูงจะมี ตำแหน่งที่ว่างไว้ต่อการเกิดปฏิกิริยามาก เพราะมีหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งเป็นตัวออกซิไดส์สารมลพิษ อินทรีย์มาก ทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดใหญ่กว่า ลักษณะรูพรุนเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารมลพิษอินทรีย์ เพราะตัวเร่ง ปฏิกิริยาที่มีรูพรุนสูงจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพิ่มขึ้น

YIN Bo, WANG Ji-tong (2556) ในงานงานวิจัยนี้ทำการศึกษาประสิทธิภาพโฟโตคะตะไลติก โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับคาร์บอนที่มีรูพรุนขนาดเมโส ซึ่งมีกรเตรียม โดยใช้แม่แบบซิลิกา เป็นในรูคอลลอยด์ด้วยเทคนิค โชล-เจล ใช้เพื่อเป็นตัวรองรับไทเทเนียม ไดออกไซด์ ส่วนปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ และ โครงสร้างผลึกของวัสดุประกอบระหว่าง ไทเทเนียมไดออกไซด์กับคาร์บอนที่มีรูพรุนขนาดเมโสขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสารตั้งต้นและ อุณหภูมิในการเผา ตามลำดับ คาร์บอนที่มีรูพรุนขนาดเมโสและวัสดุประกอบระหว่างรูพรุน และ ทำการทดสอบด้วยเครื่องมือ nitrogen absorption เครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์, กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด, กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน เป็นต้น ซึ่งจากการ วิเคราะห์พบว่าเมื่อเตรียมวัสดุประกอบจะช่วยเพิ่มความสามารถทางโฟโตคะตะไลติก สังเกตจาก อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างอนาเทสมีการกระจายตัวสูงบนพื้นผิวนคาร์บอนผล จากการทำงานร่วมกันระหว่างการดูดซับและการสลายตัวโดยการเร่งด้วยแสง พบว่าหลังจากการ ฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลา 75 นาที เมทิลออเรนจ์จะถูกกำจัดถึง 89% ซึ่งเมทิลออเรนจ์ จะ ละลายได้ดีในช่วงแรกและมีอัตราการที่ 0.015 นาที^{-1} ในช่วงที่กว้าง

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. ไทเทเนียมไดออกไซด์ เกรดการค้า (Titanium Dioxide Degussa P25)
2. สารละลายกรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid, H_2SO_4), เข้มข้น 96 %, Carlo ERBA
3. กรดไนตริก (Nitric acid AR, HNO_3), MW 63.01, LOBA Chemie
4. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide, NH_4OH) หมายเลข. 9721-03, บริษัท J.T.Baker, ประเทศ สหรัฐอเมริกา
5. อะซีโตน (Acetone, CH_3COCH_3)
6. น้ำยางข้น (Natural Rubber Latex), 60 % HA, บริษัท Chana Latex Co.Ltd จังหวัด สงขลา ประเทศไทย
7. น้ำมันพืช (Plam Oil)
8. ผงกราไฟต์ (Graphite Powder), ขนาด <20 micon, Sigmaaldrich ประเทศ สหรัฐอเมริกา
9. สีย้อมเมทิลีนบลู (Methylene Blue $C_{16}H_{18}N_3S$), ประเทศเยอรมัน
10. สีย้อมอินดิโกคาร์มีน (Indigo Carmine $C_{16}H_8N_2Na_2O_8S_2$), หมายเลข. 57000, Fluka ประเทศสหรัฐอเมริกา

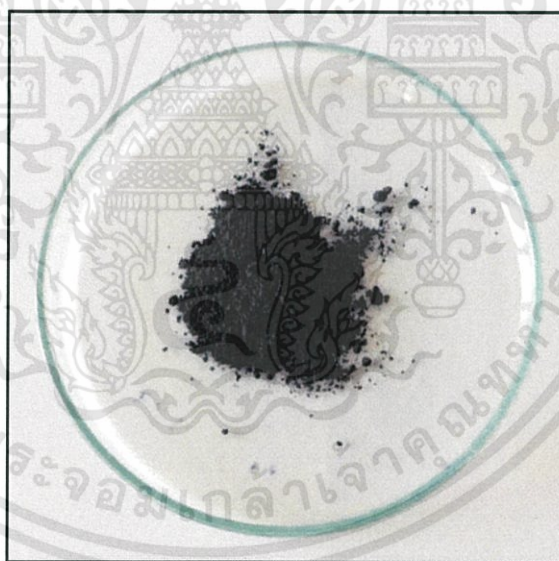
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. อุปกรณ์เครื่องแก้วต่างๆ
2. ตู้ฉายแสงยูวี
3. เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-visible Spectrophotometer)
4. เครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)
5. เครื่องวัดธาตุเชิงพลังงาน (Energy-dispersive X-ray Spectroscopy, EDX)
6. เครื่องวัดวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectrometry, FT-IR)
7. เครื่องวัดวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)
8. เครื่องวัดทดสอบแรงดึง (Universal testing machine, UTM)
9. เครื่องกวนสารละลาย (Magnetic Stirrer)
10. เครื่องกรองลดความดัน
11. กระดาษกรอง
12. เทอร์โมมิเตอร์
13. ตู้ดูดควัน (Hood)
14. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
15. จานเพาะเชื้อ (Petri Dish) ขนาด 4 นิ้ว
16. ไมโครปิเปต (Micropipette) ขนาด 10 - 100 ไมโครลิตร และ 100 - 1000 ไมโครลิตร

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การปรับสภาพกราไฟต์

1. ชั่งกราไฟต์ 1.0 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 100 มิลลิลิตร เทสารละลายกรด $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3$ ในอัตราส่วน 3:1 จำนวน 24 มิลลิลิตร
2. ทำการปั่นกวนพร้อมให้ความร้อนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที ที่อุณหภูมิ ประมาณ 120 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปเจือจางด้วยน้ำกลั่นประมาณ 1000 มิลลิลิตร ในบีกเกอร์ขนาด 2000 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง
3. นำไปกรองด้วยเครื่องกรองแบบลดความดันล้างด้วยน้ำกลั่นต่อไปเรื่อย ๆ แล้วทดสอบว่าเป็นกลางหรือไม่ด้วยกระดาษลิตมัส หากไม่เป็นกลางให้ทำการล้างด้วยน้ำกลั่นต่อไปจนเป็นกลาง
4. นำสารที่กรองได้ไปอบที่อุณหภูมิ $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปบดให้ละเอียด



รูปที่ 3.1 ผงกราไฟต์ (Graphite)

3.3.1 การปรับสภาพกราฟไฟต์

ชั่งผงกราฟไฟต์จำนวน 1.0 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 100 มิลลิลิตร



เทสารละลายกรด H_2SO_4/HSO_4 ในอัตราส่วน 3:1 จำนวน 24 มิลลิลิตร
ทำการปั่นกวนพร้อมให้ความร้อนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที



นำไปเจือจางด้วย น้ำกลั่นประมาณ 1000 มิลลิลิตร ใน
บีกเกอร์ 2000 มิลลิลิตร ทิ้งให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง



นำไปกรองด้วยเครื่องกรองแบบลดความดันแล้วทดสอบว่าเป็นกลาง
หรือไม่ด้วยกระดาษลิตมัส หากไม่เป็นกลางให้ทำการล้างต่อไป



นำสารที่กรองไปอบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

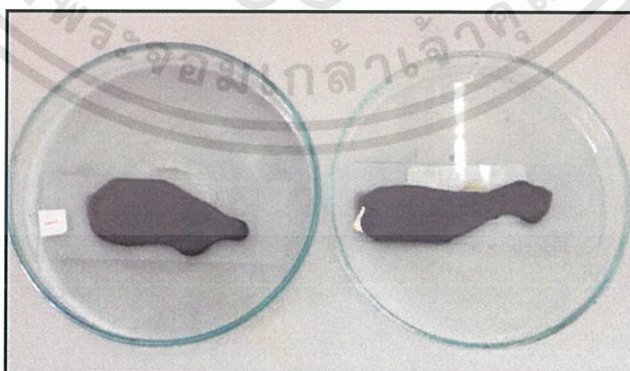
3.3.2 การเตรียมสารแขวนลอยกราฟไตในน้ำโดยและการหาความเข้มข้น

1. ทำการชั่งผงกราฟไตที่ผ่านการปรับสภาพมา 600 มิลลิกรัม เติลงในน้ำก้น 30 มิลลิลิตร (20 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) นำไปปั่นกวนด้วยความเร็วรอบสูงเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้กราฟไตกระจายตัวในน้ำ
2. นำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกเอาของแข็งกราฟไตออกจากสารแขวนลอยกราฟไต ทำการรินสารแขวนลอยกราฟไตออกมาเก็บไว้



รูปที่ 3.2 สารแขวนลอยกราฟไต

3. ทำการหาความเข้มข้นสารแขวนลอยกราฟไตโดยเริ่มจากล้างและอบกระดาษสไลด์แล้วนำไปชั่งด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง บันทึกน้ำหนักค่าที่เตรียมได้
4. คูดสารแขวนลอยกราฟไตมา 1 มิลลิลิตร หยดลงบนกระดาษสไลด์ จากนั้นนำไปอบให้แห้งแล้วนำไปชั่ง เพื่อความีปริมาณกราฟไตอยู่ในสารแขวนลอยเท่าไร



รูปที่ 3.3 สารแขวนลอยกราฟไต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การเตรียมสารแขวนลอยกราฟไฟต์ในน้ำและการหาความเข้มข้น

ชั่งผงกราฟไฟต์ที่ผ่านการปรับสภาพมา 600 มิลลิกรัม เติลงในน้ำกลั่น 30 มิลลิลิตร นำไปปั่นกวนด้วยความเร็วรอบสูง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



จากนั้นนำเข้าเครื่อง Centrifuge เพื่อแยกของแข็งออกจากสาร



ทำการล้างกระจกสไลด์แล้วนำไปชั่งด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
ดูดสารแขวนลอยมา 1 มิลลิลิตร หยดลงบนกระจกสไลด์



จากนั้นนำไปอบให้แห้ง แล้วนำไปชั่ง เพื่อความีปริมาณ
กราฟไฟต์อยู่เท่าไร (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)

3.3.3 การเตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟไฟต์

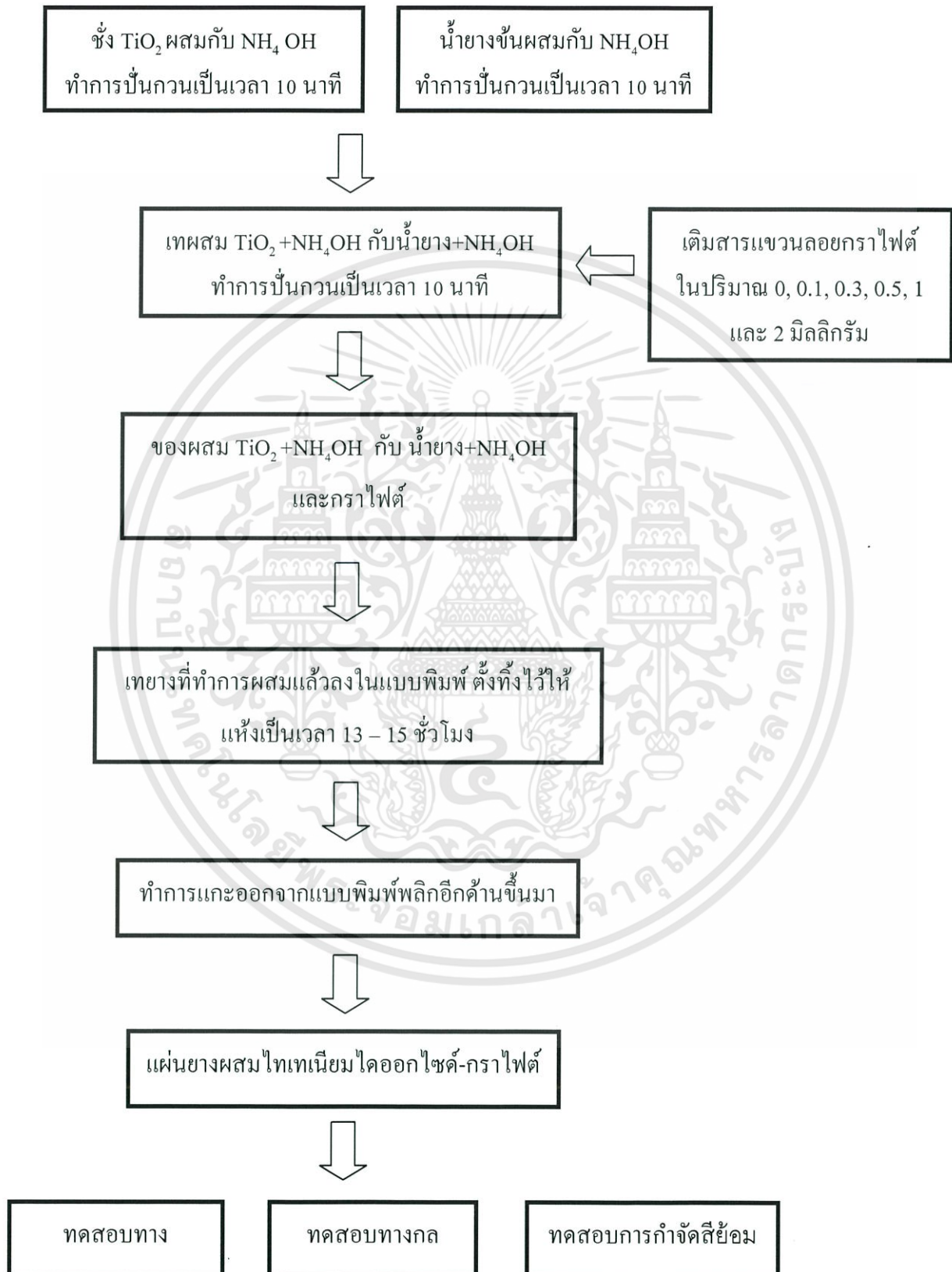
หลังจากที่คำนวณหาค่าความเข้มข้นของสารแขวนลอยกราฟไฟต์ พบว่าสารแขวนลอยกราฟไฟต์มีความเข้มข้นนั้นเท่ากับ 10.55 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ทำการเตรียมแผ่นยางขึ้นตوندังต่อไปนี้

1. ชั่ง TiO_2 มา 0.03 กรัม ผสมกับสารละลาย NH_4OH 5 มิลลิลิตร ทำการปั่นกวนเป็นเวลา 10 นาที
2. เติมน้ำยางข้นปริมาณ 5 มิลลิลิตร ลงไป ทำการปั่นกวนต่ออีกเป็นเวลา 10 นาที
3. ทำการเติมสารแขวนลอยกราฟไฟต์ในปริมาณ 0, 0.1, 0.3, 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัมตามลำดับ ทำการปั่นกวนต่อเป็นเวลา 10 นาที
4. นำไปเทขึ้นรูปในแบบที่เตรียมไว้ ตั้งทิ้งให้แห้งเป็นเวลา 13- 15 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง
5. เมื่อแห้งแกะออกจากแบบพิมพ์แล้วพลิกด้านที่สัมผัสกับงานเพาะเชื้อขึ้นก็จะได้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ – กราฟไฟต์ตัวอย่าง



รูปที่ 3.4 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟไฟต์

3.3.3 การเตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟต์



3.3.4 การทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม

1. ทำการเตรียมสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู (Methylene blue) และสีย้อมอินดิโกคาร์มีน (Indigo carmine) ความเข้มข้น 2.5×10^{-5} M
2. เทสารละลายสีย้อมมา 60 มิลลิลิตร ใส่ลงในจานเพาะเชื้อ (Petri Dish) จากนั้นนำแผ่นยางผสม โทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟไฟต์ที่เตรียมไว้มาวางลงไป
3. แล้วนำจานเพาะเชื้อ (Petri Dish) ไปวางในตู้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ ใส่แท่งแม่เหล็กปั่นกวนพร้อมกับฉายแสงยูวี
4. ทำการเก็บสารละลายสีย้อมจำนวน 3 มิลลิลิตร ทุกๆ 30 นาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
5. นำตัวอย่างสีย้อมที่เก็บมาไปวัดด้วยเครื่อง UV-visible Spectrophotometer
6. ทำการคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม

สูตร

$$\% \text{การกำจัดสีย้อม} = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100 \%$$

A_0 = ค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้น

A_t = ค่าการดูดกลืนแสงที่เวลาต่างๆ

λ_{\max} ของเมทิลีนบลู = 665 นาโนเมตร

λ_{\max} ของอินดิโกคาร์มีน = 611 นาโนเมตร

3.3.5 การทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานซ้ำ

1. ทำการเลือกอัตราส่วนของกราฟไฟต์ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดได้ดีที่สุด
2. นำมาทำการทดลองซ้ำในหัวข้อ 3.3.4 เป็นจำนวน 5 ครั้ง
3. จากนั้นนำแผ่นยางที่ผ่านการใช้งาน นำไปทดสอบทางกายภาพและทางกล

3.4 การวิเคราะห์พิกัดเอกลักษณะ

3.4.1 X-ray Diffraction (XRD)

เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจพิกัดเอกลักษณะที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง (Non-destructive method) โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มุมต่าง ๆ กัน ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบ และระบุวัฏภาคองค์ประกอบต่างๆ ของสารตัวอย่าง

ในงานวิจัยนี้ ต้องการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก และระบุวัฏภาคองค์ประกอบต่าง ๆ ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟไฟต์

3.4.2 Scanning Electron Microscope (SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร การเตรียมตัวอย่างเพื่อที่จะดูด้วยเครื่อง SEM นี้ไม่จำเป็นต้องที่ตัวอย่างจะต้องมีขนาดบางก็ได้ (เพราะไม่ได้ตรวจวัดจากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง) การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของ ตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานวิทยาและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้ ต้องการศึกษาสัณฐานวิทยาและดูรายละเอียดพื้นผิวของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟไฟต์

3.4.3 Energy-dispersive X-ray Spectroscopy (EDS, EDX or XEDS)

อุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวชิ้นงานตัวอย่าง การใช้กล้องจุลทรรศน์ SEM ร่วมกับเทคนิค EDS หรือ EDX ทำให้การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานมีความละเอียด และได้ข้อมูลที่สมบูรณ์มากขึ้น

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยต้องการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวชิ้นงานของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - กราฟไฟต์

3.4.4 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)

เป็นเครื่องวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน โครงสร้างของสาร โดยใช้หลักการการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด เมื่อรังสีอินฟราเรดถูกดูดกลืนพลังงานนั้นจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานการหมุนและการสั่นของโมเลกุล โดยโมเลกุลของสารแต่ละชนิดจะให้สเปกตรัมที่เป็นเอกลักษณ์ของพันธะในโมเลกุลนั้น ๆ ซึ่งเป็นการพิสูจน์หาโครงสร้างของสารประกอบ

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยต้องการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน โครงสร้างของสารประกอบกราไฟต์ไทเทเนียมไดออกไซด์และโมเลกุลของยางของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราไฟต์

3.4.5 UV-VIS Spectrophotometer

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่าความเข้มของแสงในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ใน ตัวอย่างซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนและ สารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยต้องการตรวจวัดปริมาณแสงและค่าความเข้มของแสงในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราไฟต์

3.4.6 Universal Testing Machine

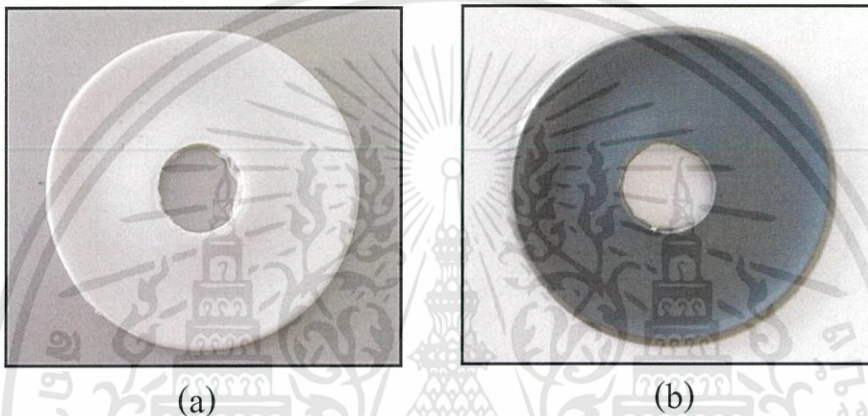
เป็นเครื่องมือที่ใช้ทำการทดสอบการดึงยึดด้วย เพื่อศึกษาค่าความแข็งแรงและความยืดหยุ่น โดยจะดูที่ค่าโมดูลัสยัง (E) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความแข็งแรงของวัสดุที่ต้องการทดสอบด้วยการใช้วิธีดึงจนขาด ด้วยอัตราเร็วคงที่ ซึ่งการทดสอบแรงดึงเป็นการวัดที่ใช้ทดสอบผลิตภัณฑ์กันกว้าง อาทิ เช่น กาว, พลาสติก, ฟิล์ม, สายเคเบิล, ท่อ และอื่น ๆ อีกมากมาย

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยต้องการแสดงค่าการทดสอบการดึงแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราไฟต์ในปริมาณต่างๆ เพื่อศึกษาค่าความแข็งแรงและความยืดหยุ่น

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

ในการทดลองนี้ได้ทำการเตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟไฟต์ โดยใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ น้ำยางข้น และกราฟไฟต์เป็นวัสดุตั้งต้นซึ่งเป็นการเตรียมแผ่นยางผสมด้วยวิธีการที่ง่าย ๆ หลังจากที่ได้เตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟไฟต์ในปริมาณ 0, 0.1, 0.3, 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัม แล้วลักษณะของแผ่นยางผสมที่เตรียมได้มีลักษณะดังรูปที่ 4.1

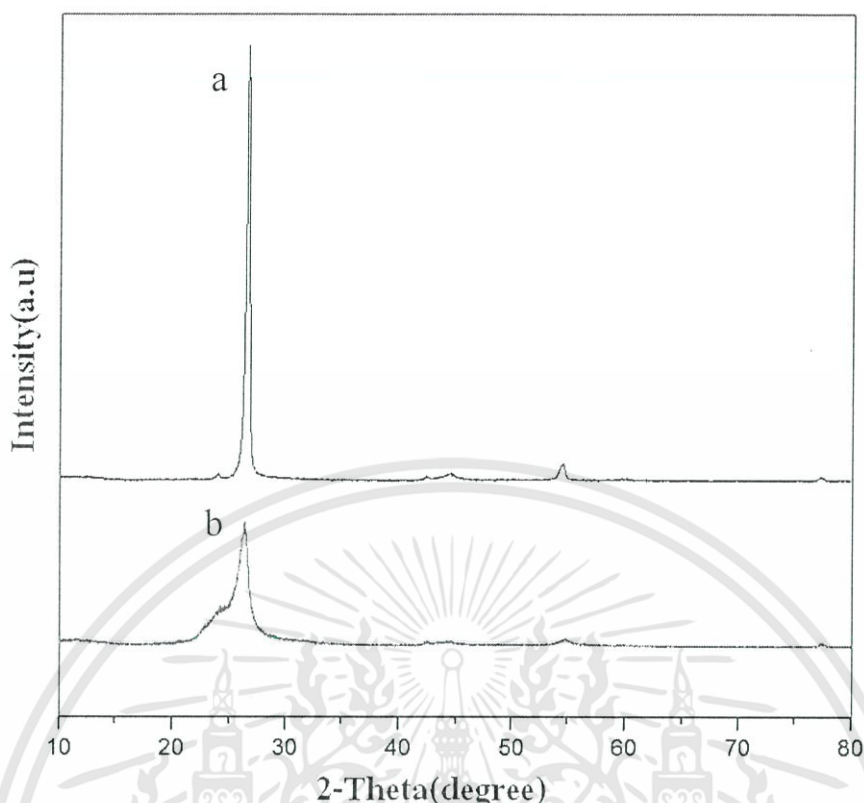


รูปที่ 4.1 ตัวอย่างแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟไฟต์ (a) ไม่เติมกราฟไฟต์ (b) เติมกราฟไฟต์

4.1 การวิเคราะห์พิสูจน์เอกลักษณ์

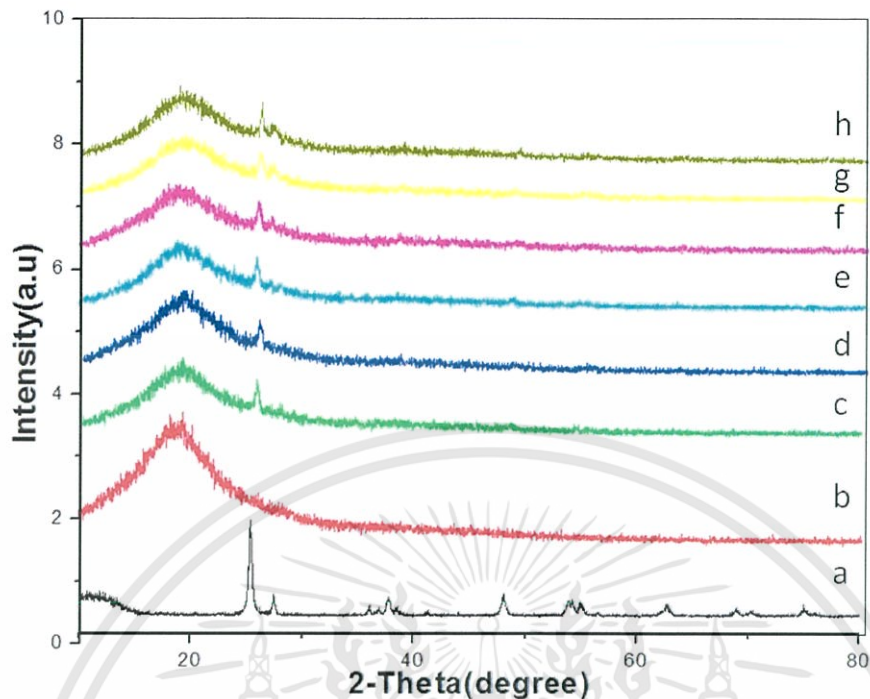
4.1.1 X-ray Diffraction (XRD)

เทคนิค XRD อาศัยหลักการของการยิงรังสีเอ็กซ์ ที่ทราบความยาวคลื่นไปกระทบหน้าผลึกของตัวอย่าง ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่างๆกัน โดยมีหัววัดเป็นตัวรับข้อมูล องศาในการเลี้ยวเบนของรังสี X จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและ โครงสร้างของสารที่มีอยู่ในตัวอย่างแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ข้อมูลที่ได้รับจึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในตัวอย่างและสามารถนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับ โครงสร้างของผลึกได้ นอกจากนี้ข้อมูลที่ยังสามารถนำมาหาปริมาณของสารประกอบแต่ละชนิด และเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง (Non-Destructive Method) ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน เพื่อระบุวิฤภาคองค์ประกอบของสารตัวอย่าง ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟไฟต์ปริมาณต่างๆ



รูปที่ 4.2 XRD Pattern ของผงกราไฟต์ (Graphite) (a) ผงกราไฟต์ (b) ผงกราไฟต์ผ่านการปรับ

จากรูปที่ 4.2 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างของกราไฟต์ (Graphite) ด้วยเทคนิค X-ray Diffraction พบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มุมการเลี้ยวเบน $2\theta = 26.54^\circ$ ซึ่งเป็นมุมการเลี้ยวเบนของกราไฟต์ (Materials Letters 62 (2008) 703–706) กราไฟต์เกิดจากอะตอมเรียงกันเป็นชั้นๆ แต่ละชั้นเกิดจากอะตอมคาร์บอนเรียงตัวกันเป็นรูปหกเหลี่ยมคล้ายรังผึ้ง เมื่อหลายๆ แผ่นมาเรียงซ้อนกัน และเชื่อมด้วยพันธะโคเวเลนต์ มีความเป็นผลึกสูงมาก พิกจึงมีความเข้มสูงตามรูปที่ 4.2 (a) และไม่สามารถละลายน้ำได้ แต่เมื่อนำผงกราไฟต์ไปทำการปรับสภาพด้วยกรดเข้มข้น คือ กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) และกรดไนตริก (HNO_3) ในอัตราส่วน 3 ต่อ 1 ทำให้หลังการปรับสภาพสามารถกระจายตัวในน้ำได้ดี เนื่องจากถูกกรดเข้าไปทำลายความเป็นระเบียบของชั้นผลึกกราไฟต์ โดยหมู่คาร์บอกซิล ($-\text{COOH}$) และหมู่ไฮดรอกซิล ($-\text{OH}$) ที่ได้จากกรดที่นำมาปรับสภาพนั้น จะแทรกเข้าไปแทนที่ระหว่างชั้นของผลึกกราไฟต์ ซึ่งทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นผลึกมากขึ้นและอาจทำให้ผลึกมีการฉีกหลุดออกไป จึงส่งผลให้ความเป็นผลึกนั้นลดลงดังรูปที่ 4.2 (b) และทำให้กราไฟต์สามารถละลายน้ำได้

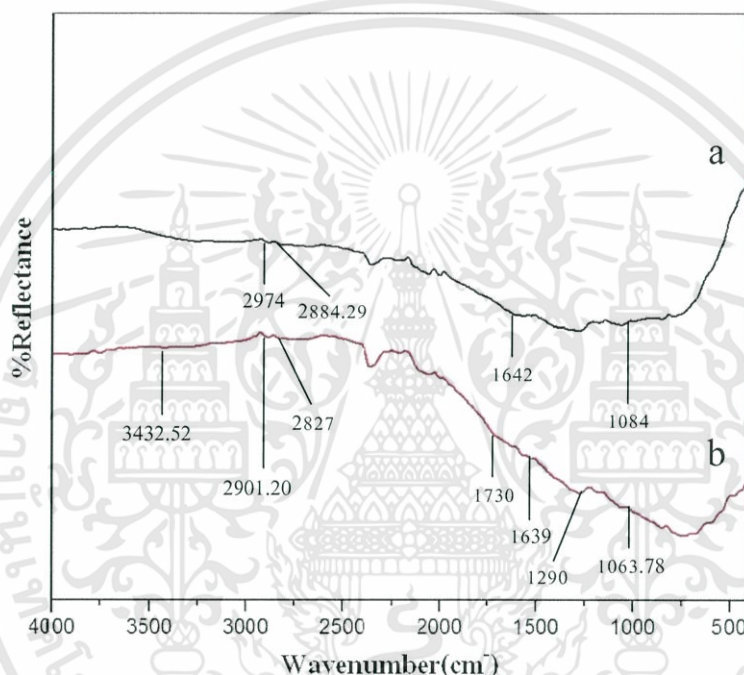


รูปที่ 4.3 XRD pattern ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟไฟต์ในปริมาณต่างๆ (a) Degussa P25 TiO_2 powder (b) แผ่นยางเปล่า (c) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (d) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟไฟต์ 0.1 มิลลิกรัม (e) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟไฟต์ 0.3 มิลลิกรัม (f) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟไฟต์ 0.5 มิลลิกรัม (g) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟไฟต์ 1 มิลลิกรัม (h) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟไฟต์ 2 มิลลิกรัม

จากรูปที่ 4.3 ผลจากการศึกษาองค์ประกอบของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟไฟต์ในปริมาณต่างๆ ด้วยเทคนิค X-ray Diffraction จะพบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มุมการเลี้ยวเบน ที่บริเวณ $2\theta = 25.50^\circ$ ซึ่งเป็นเฟสอนาเทส (Anatase) และที่บริเวณ $2\theta = 27.50^\circ$ คือ เฟสรูไทน์ (Rutile) ของ Degussa P25 Titanium Dioxide Powder และพบการเลี้ยวเบนที่ใกล้เคียงบริเวณ $2\theta = 19^\circ$ ซึ่งเป็นมุมการเลี้ยวเบนของยาง (Chemical Engineering Journal 191 (2012) 210–217) เมื่อเติมกราฟไฟต์ในปริมาณมากขึ้นจะเห็นพีคของไทเทเนียมไดออกไซด์และยางลดลง เนื่องจากค่าการเลี้ยวเบนรังสีของเอ็กซ์ของกราฟไฟต์ และ ค่าการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ Degussa P25 Titanium Dioxide Powder มีค่าที่ใกล้เคียงกัน จึงทำให้พีคของกราฟไฟต์ และ P25 Titanium Dioxide Powder เกิดการซ้อนทับกัน

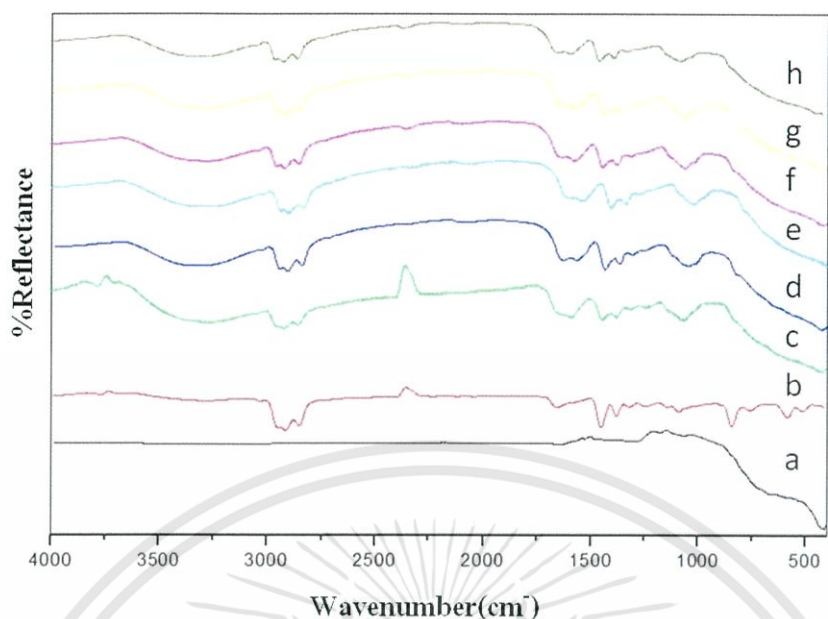
4.1.2 Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR)

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) เป็นหนึ่งในเทคนิคทางด้าน Infrared Spectroscopic ที่มีประสิทธิภาพในการจำแนกประเภทต่าง ๆ ของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และ พันธะเคมีใน โมเลกุล ใช้เพื่อศึกษาวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของ ผงกราฟไฟต์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดและผงกราฟไฟต์ไม่ผ่านการปรับสภาพใดๆ และเพื่อศึกษา วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน โครงสร้างของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟไฟต์ในปริมาณ 0, 0.1, 0.3, 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัม



รูปที่ 4.4 FT-IR Spectra ของผงกราฟไฟต์ (a) ผงกราฟไฟต์, (b) ผงกราฟไฟต์ที่ผ่านการปรับสภาพ

จากการวิเคราะห์ผลด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer ของผงกราฟไฟต์ จะพบแถบการสั่นของที่เลขคลื่นที่ 1642 cm^{-1} ซึ่งเป็นแถบการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน C=C Stretching ซึ่งหมู่ฟังก์ชัน C=C Stretching จะพบทั้งในกราฟไฟต์ทั้งก่อนและหลังปรับสภาพเพราะอะตอมของคาร์บอนเรียงตัวกันเป็นรูปหกเหลี่ยมคล้ายรังผึ้ง และเชื่อมด้วยพันธะโคเวเลนต์ หลังผ่านการปรับสภาพกราฟไฟต์ด้วยวิธี Acid treatment พบรูปแบบการสั่นที่เลขคลื่น $1,730\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นแถบการสั่นของพันธะ C=O Stretching ของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิล แถบการสั่นที่เลขคลื่น $3,432.52\text{ cm}^{-1}$ ของพันธะ O-H หมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล นอกจากนี้ยังพบแถบการสั่นของที่เลขคลื่น $1,063.78\text{ cm}^{-1}$ และ $1,290\text{ cm}^{-1}$ ของพันธะ C-O ซึ่งหมู่ฟังก์ชันที่พบเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.4 (b) นั้นมาจากกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) และกรดไนตริก (HNO_3) ที่นำมาใช้ปรับสภาพ

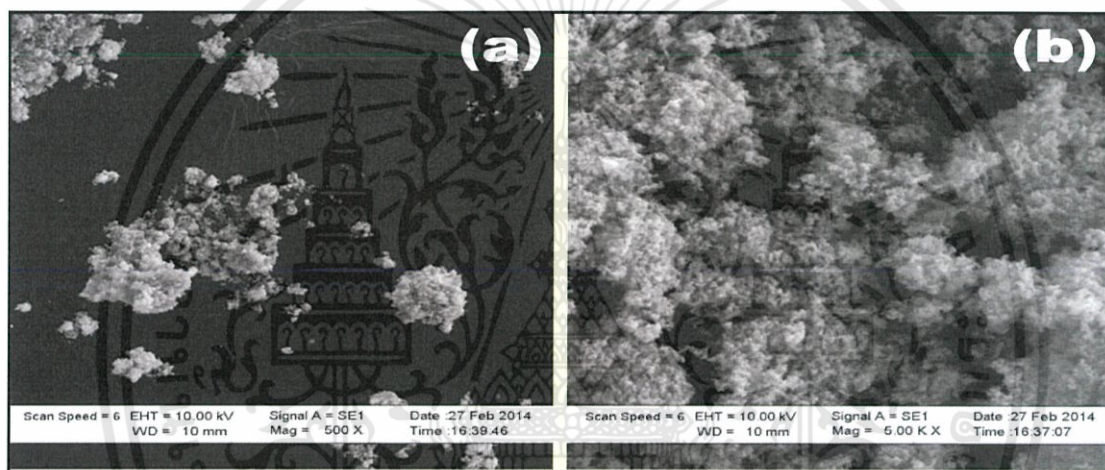


รูปที่ 4.5 FT-IR spectra ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟต์ในปริมาณต่างๆ (a) P25 TiO_2 powder (b) แผ่นยางเปล่า (c) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (d) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟต์ 0.1 มิลลิกรัม (e) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟต์ 0.3 มิลลิกรัม (f) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟต์ 0.5 มิลลิกรัม (g) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟต์ 1 มิลลิกรัม (h) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟต์ 2 มิลลิกรัม

จากการวิเคราะห์ผลด้วยเครื่อง FT-IR Spectrometer (Fourier Transform Infrared Spectrometer) พบแถบการสั่นของเลขคลื่นที่ประมาณ 2950 cm^{-1} ซึ่งเป็นของ CH_3 stretching และ 2920 cm^{-1} ที่มีลักษณะการสั่นแบบ CH_2 asymmetry stretching การสั่นของคลื่นที่ 2805 cm^{-1} มีลักษณะการสั่นแบบ Symmetry Stretching พบแถบการสั่นของเลขคลื่นที่ 1667 cm^{-1} มีลักษณะการสั่นแบบ $\text{C}=\text{O}$ Stretching และพบคลื่น $1,475 \text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ CH_2 Bending (Spectrochimica Acta Part A 82 (2011) 140-145) ซึ่งแถบการสั่นที่กล่าวมาข้างต้นนั้นเป็นของยาง และยังพบแถบการสั่นของเลขคลื่นในช่วง 500 cm^{-1} ถึง 800 cm^{-1} จะเป็นช่วงแถบการสั่นของไทเทเนียมไดออกไซด์

4.1.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

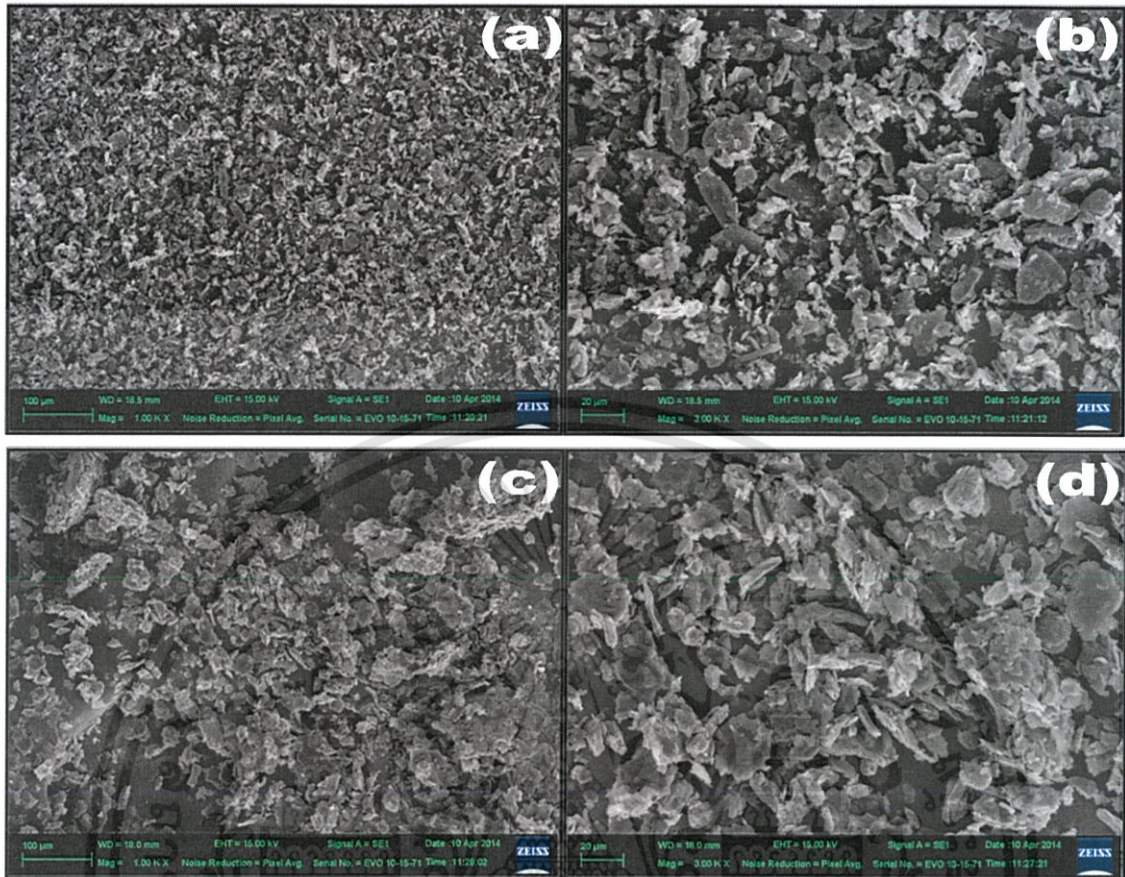
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) การศึกษาสัณฐานวิทยา และรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างสามารถแสดงให้เห็น ลักษณะพื้นผิวของวัสดุ ขนาด และรูปร่างของอนุภาคผง หรือตำแหน่งที่สนใจบนชิ้นงาน และแสดงให้เห็นลักษณะและการกระจายของเฟสในโครงสร้างจุลภาค โดยตัวอย่างที่นำมาทำการทดสอบ คือ แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟต์ในปริมาณต่างๆ ผงกราฟต์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรด และผงกราฟต์ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพใดๆ



รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะสัณฐานของ Degussa P25 Titanium Dioxide Powder ที่กำลังขยาย (a) x 500 เท่า และ (b) x 50,000 เท่า

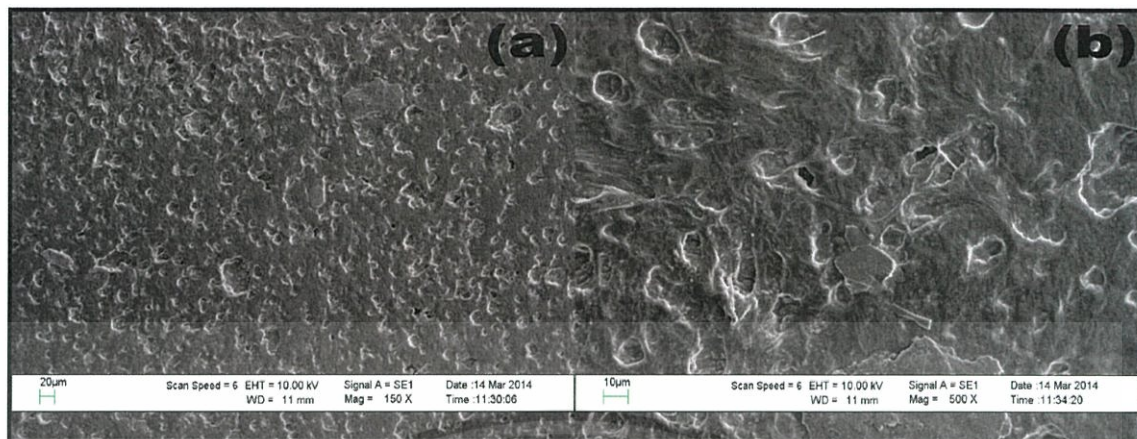
Degussa P25 Titanium Dioxide Powder เป็นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีเฟสอยู่ 2 เฟส คือ เฟสอนาเทส (Anatase) และ เฟสรูไทน์ (Rutile) ซึ่งการที่มีเฟสทั้ง 2 เฟสนี้ จะทำให้มีความสามารถเป็นตัวกระตุ้นในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสได้ดี

จากรูปที่ 4.6 การศึกษาลักษณะสัณฐานของ Degussa P25 Titanium Dioxide Powder จะเห็นว่าไทเทเนียมไดออกไซด์มีลักษณะเป็นผลึกขนาดเล็กๆ ละเอียดที่มีการจับตัวกันอยู่เป็นกลุ่มก้อนอย่างหนาแน่น



รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะสัณฐานของผงกราไฟต์ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (a) ที่กำลังขยาย x 1000 เท่า และ (b) x 3000 เท่า แสดงลักษณะสัณฐานของผงกราไฟต์ที่ผ่านการปรับสภาพ (c) ที่กำลังขยาย x 1000 เท่า และ (d) x 3000 เท่า

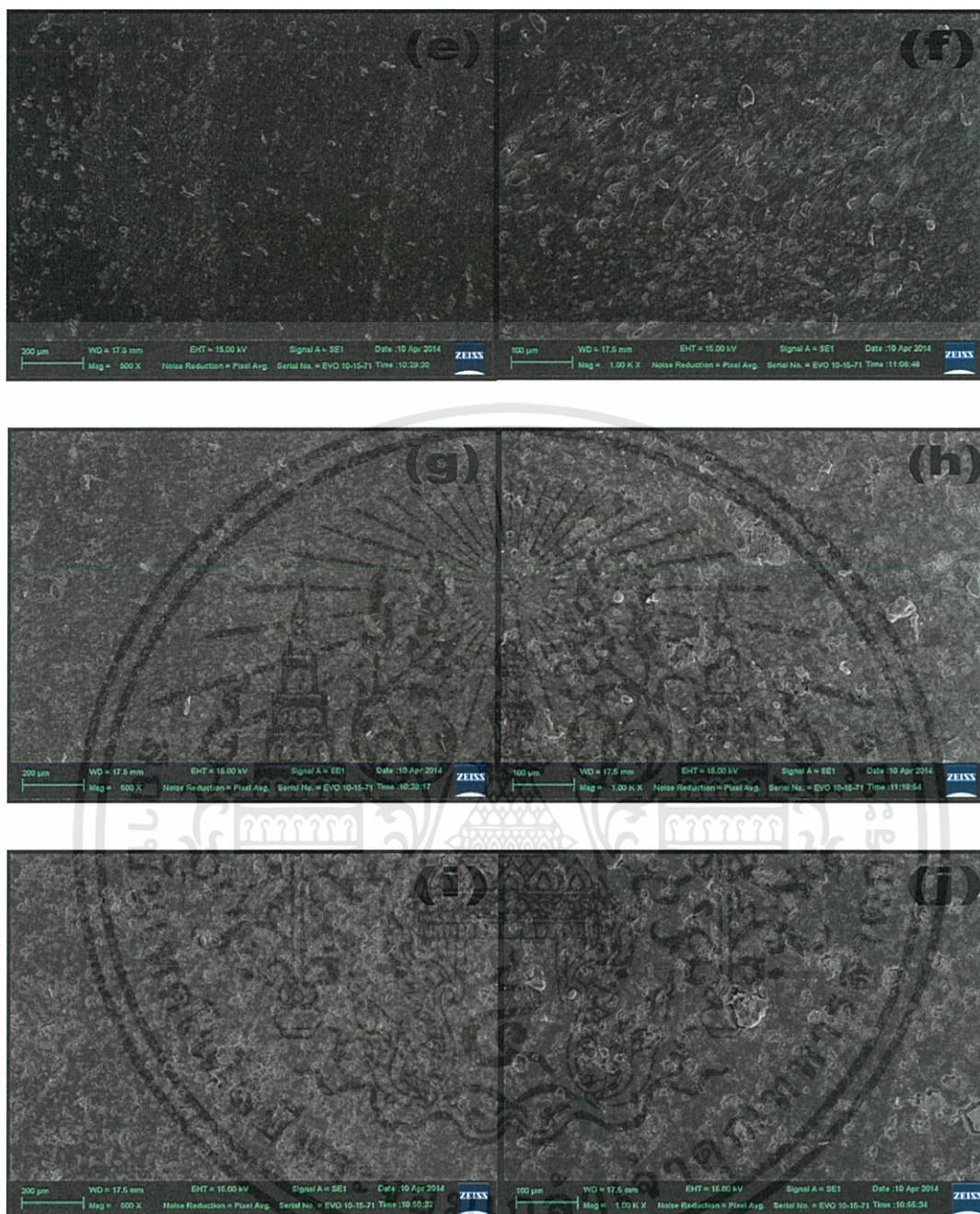
เมื่อศึกษาลักษณะสัณฐานของผงกราไฟต์ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับสภาพด้วยกรดเข้มข้น จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า ผงกราไฟต์ก่อนการปรับสภาพมีลักษณะเป็นแผ่นหลายๆ แผ่นมาเรียงซ้อนกัน ซึ่งแต่ละแผ่นเกิดจากคาร์บอนอะตอมที่เชื่อมต่อกันเป็นวงหกเหลี่ยมด้วยพันธะโควาเลนต์ และมีความเป็นผลึกสูงมากตามรูปที่ 4.7 (a) และ (b) แต่เมื่อกราไฟต์ถูกปรับสภาพด้วยกรด หมู่ฟังก์ชันบางหมู่จากกรดจะเข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างชั้นผลึกที่ซ้อนกันทำให้ชั้นผลึกเกิดการขยายออกและทำลายความเป็นระเบียบของชั้นผลึกกราไฟต์ ทำให้บางชั้นของผลึกกราไฟต์ฉีกหลุดออกไป ซึ่งจะทำให้ความเป็นผลึกลดลง



รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะสัณฐานของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่กำลังขยาย (a) x 150 เท่า และ (b) x 500 เท่า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

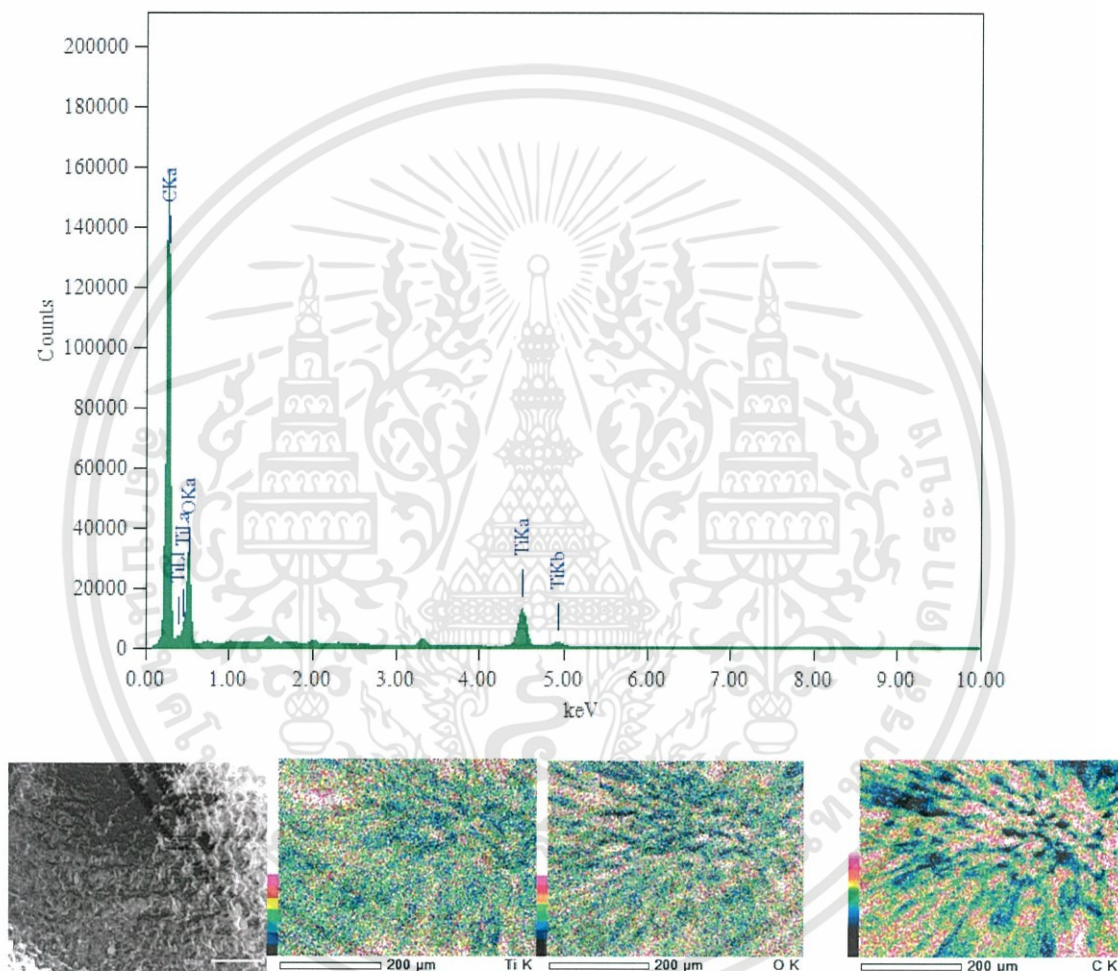


รูปที่ 4.9 แสดงลักษณะสัณฐานของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟไฟต์ (a) เดิม กราฟไฟต์ 0.1 มิลลิกรัม ที่กำลังขยาย x 500 และ (b) x 1000 เท่า, (c) เดิมกราฟไฟต์ 0.3 มิลลิกรัม ที่ กำลังขยาย x 500 และ (d) x 1000 เท่า, (e) เดิมกราฟไฟต์ 0.5 มิลลิกรัม ที่กำลังขยาย x 500 และ (f) x 1000 เท่า, (g) เดิมกราฟไฟต์ 1 มิลลิกรัม ที่กำลังขยาย x 500 และ (h) x 1000 เท่า, (i) เดิม กราฟไฟต์ 2 มิลลิกรัม ที่กำลังขยาย x 500 และ (j) x 1000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

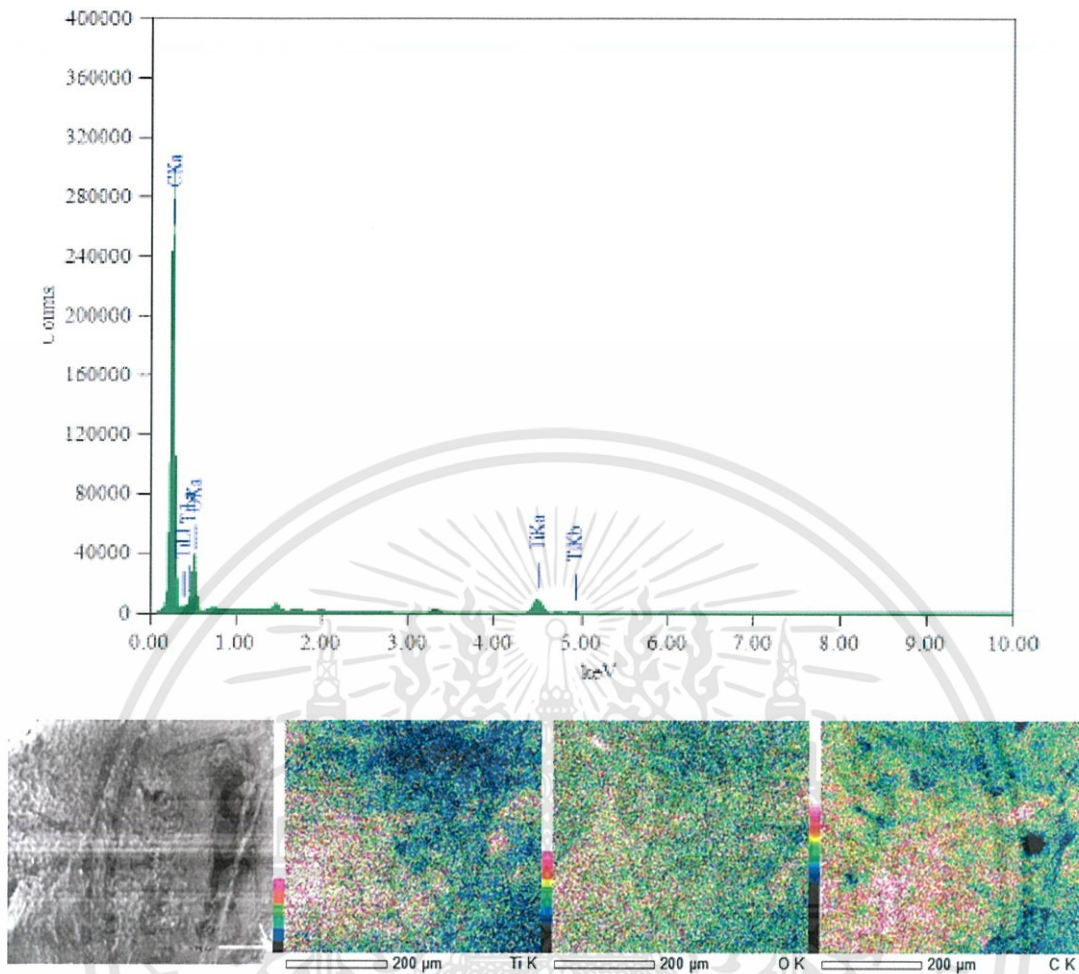
4.1.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบภายในตัวอย่าง (Energy-dispersive X-ray spectroscopy, EDX)

การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวของตัวอย่างแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟไฟต์ในปริมาณต่างๆ โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์ SEM ร่วมกับเทคนิค EDS, EDX ทำให้การวิเคราะห์ลักษณะบนพื้นผิวมีความละเอียดและได้ข้อมูลที่สมบูรณ์มากขึ้น



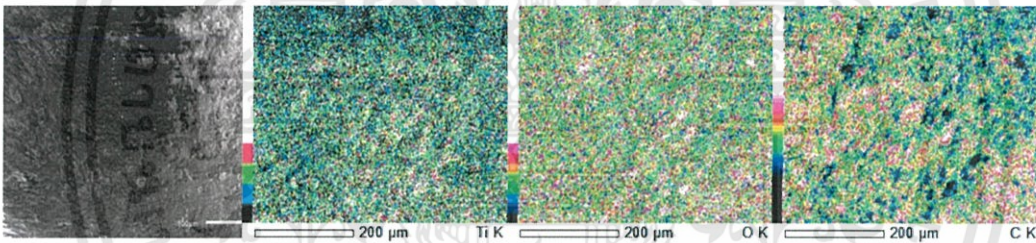
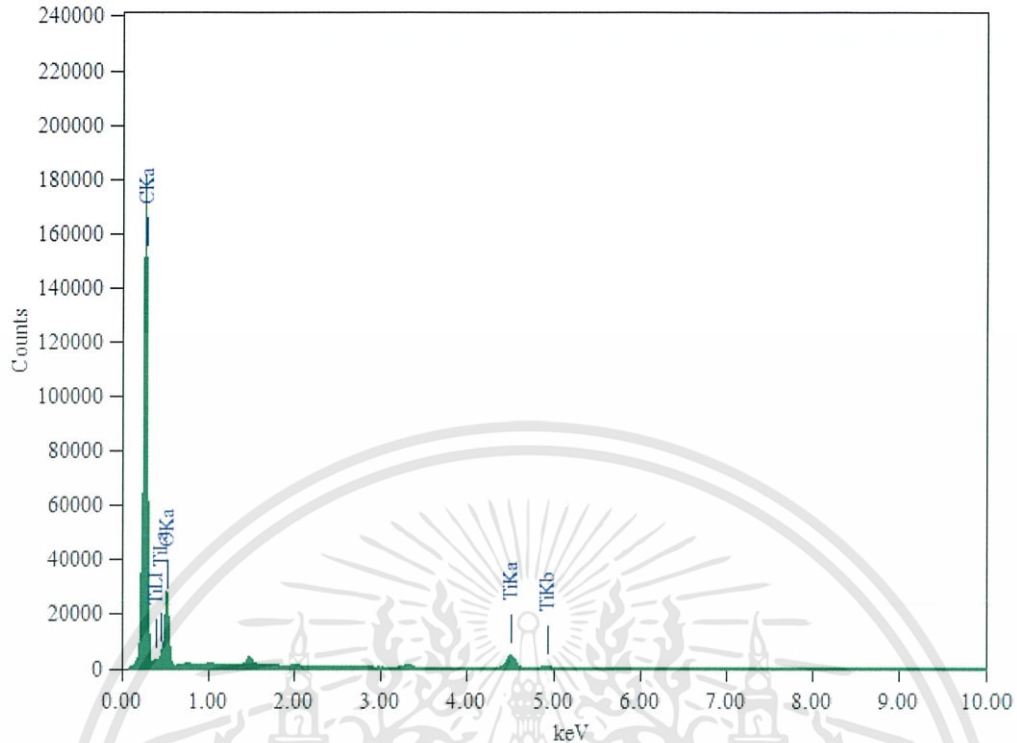
รูปที่ 4.10 แสดง EDX Spectrum ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์

จาก EDX Spectrum ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ตรวจสอบวิเคราะห์พบธาตุบนพื้นผิวของตัวอย่าง 3 ตัว คือ ไทเทเนียม ออกซิเจน และคาร์บอน ธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวตัวอย่างทั้งสามตัวที่ตรวจพบได้ในตัวอย่างนี้มีการกระจายตัวที่ดี กระจายตัวอยู่ทั่วพื้นผิวของตัวอย่างแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์

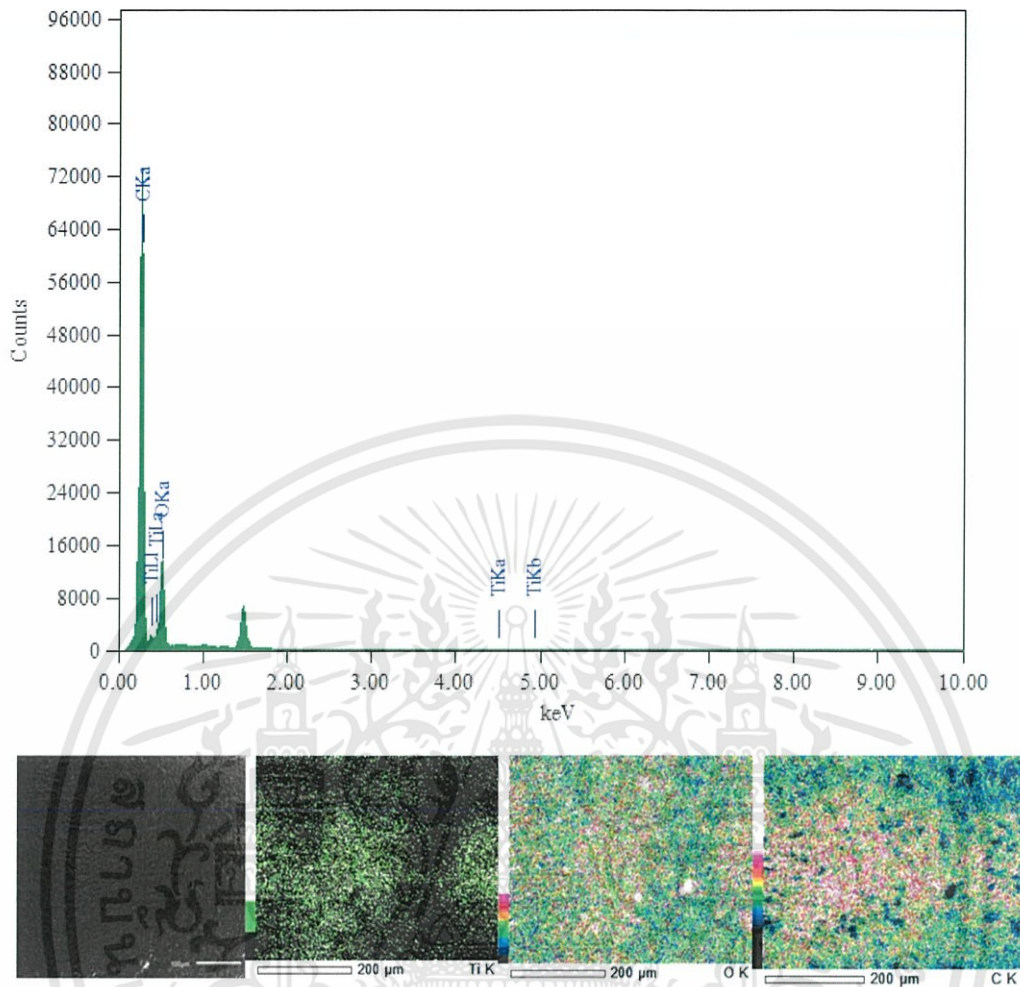


รูปที่ 4.11 แสดง EDX Spectrum ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราไฟต์ 0.1 มิลลิกรัม

จาก EDX Spectrum ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราไฟต์ 0.1 มิลลิกรัม ตรวจวิเคราะห์พบธาตุบนผิวของตัวอย่าง 3 ตัว คือ ไทเทเนียม (Ti) ออกซิเจน (O) และคาร์บอน (C) ธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวดังตัวอย่างที่ตรวจพบได้ในตัวอย่างนี้จะมีการกระจายตัวที่ไม่ค่อยดี ไทเทเนียมที่อยู่บนพื้นผิวของตัวอย่างจะอยู่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนในบางพื้นที่เท่านั้น ไม่มีการกระจายตัวทั่วทั้งผิวของแผ่นยาง ในส่วนของออกซิเจน มีการกระจายตัวไม่ดีอีกเช่นกัน ซึ่งออกซิเจนอาจมีการฝังตัวลงไปในตัวอยู่แล้ว สำหรับคาร์บอนนั้นจะเห็นจากภาพรูปที่ 4.11 ได้ชัดเจนว่า มีการกระจายตัวอย่างไม่ทั่วพื้นผิวของตัวอย่าง แต่รวมตัวกันหนาแน่นอยู่ที่บริเวณเดียวซึ่งถือว่ากระจายตัวไม่ดี



รูปที่ 4.12 แสดง EDX Spectrum ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟต์ 0.3 มิลลิกรัม จาก EDX Spectrum ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟต์ 0.3 มิลลิกรัม ตรวจวิเคราะห์พบธาตุบนผิวของตัวอย่าง 3 ตัว คือ ไทเทเนียม (Ti) ออกซิเจน (O) และคาร์บอน (C) ในส่วนของออกซิเจน (O) และคาร์บอน (C) จะมีการกระจายตัวค่อนข้างดี แต่ไทเทเนียม (Ti) นั้นจะเห็นว่า พีกของไทเทเนียมในระดับพลัง Ka นั้นลดลง เนื่องจากไทเทเนียมได้มีการฝังตัวลงไปในตัวอย่างแล้ว และการเติมปริมาณกราฟต์มากยิ่งขึ้น กราฟต์จะไปปกคลุมไทเทเนียม



รูปที่ 4.13 แสดง EDX Spectrum ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟต์ 0.5 มิลลิกรัม

จาก EDX Spectrum ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟต์ 0.5 มิลลิกรัม ตรวจสอบวิเคราะห์พบธาตุบนผิวของตัวอย่าง 3 ตัว คือ ไทเทเนียม (Ti) ออกซิเจน (O) และ คาร์บอน (C) สำหรับออกซิเจนและคาร์บอนจะมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนบางพื้นที่บนพื้นผิวของตัวอย่าง แต่ไทเทเนียม (Ti) นั้นตรวจพบไม่เห็นบนพื้นผิวของแผ่นยางผสม เพราะไทเทเนียม (Ti) ได้มีการฝังตัวลงไปในตัวอย่างแล้ว และการเติมปริมาณกราฟต์มากยิ่งขึ้น กราฟต์จะไปปกคลุมไทเทเนียมทำให้ตรวจวัดไม่พบ ทำให้ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก (Photocatalytic) และการกำจัดสีย้อมไม่ดี

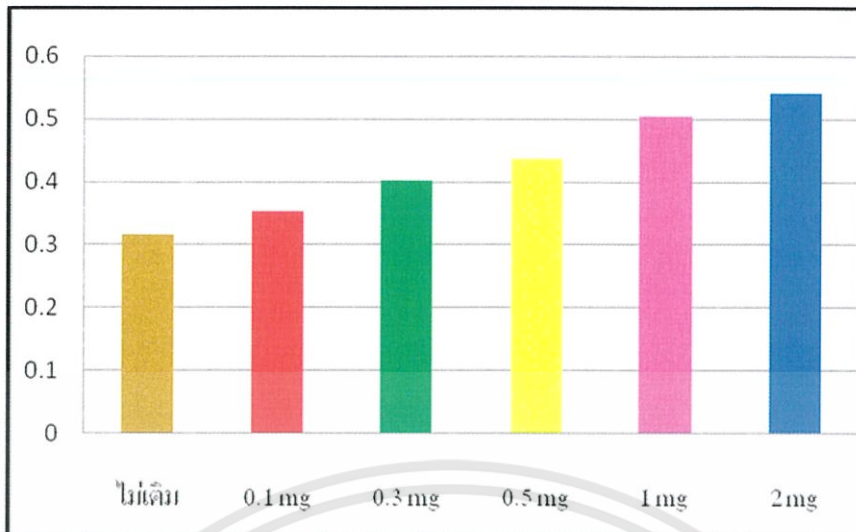
4.2 การทดสอบแรงดึงของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราไฟต์ (Tensile Test)

เป็นการศึกษาความแข็งแรงและความยืดหยุ่นของตัวอย่างเป็นแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราไฟต์ในปริมาณต่างๆ โดยจะนำตัวอย่างไปทำการทดสอบแรงดึงด้วยเครื่อง Universal Testing Maching เพื่อศึกษาค่าความแข็งแรงและความยืดหยุ่นของตัวอย่างแผ่นยางผสม

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าการทดสอบการดึงแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราไฟต์ในปริมาณต่างๆ

ปริมาณที่เติมกราไฟต์	Stiffness	Young's Modulus	Load at Break	Stress at Break
0 มิลลิกรัม	29.062	0.31676 MPa	3.0253 N	1.2224 MPa
0.1 มิลลิกรัม	29.617	0.35227 MPa	3.6688 N	1.3080 MPa
0.3 มิลลิกรัม	33.970	0.40281 MPa	3.8816 N	1.4156 MPa
0.5 มิลลิกรัม	37.577	0.43609 MPa	4.0594 N	1.6172 MPa
1 มิลลิกรัม	40.774	0.50546 MPa	4.5306 N	1.8721 MPa
2 มิลลิกรัม	42.606	0.54045 MPa	4.5123 N	1.9080 MPa

จากตารางที่ 4.1 ค่าผลการทดสอบการดึงแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราไฟต์ในปริมาณต่างๆ เมื่อพิจารณาค่ายังโมดูลัส (Young's modulus) และค่าความแข็งแรง (Stiffness) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุที่ต้องการทดสอบ สำหรับในงานวิจัยนี้สิ่งที่ต้องการทดสอบเป็นแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราไฟต์ในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ 0, 0.1, 0.3, 0.5, 1 และ 2 mg ซึ่งมีค่าโมดูลัสยัง (E) เท่ากับ 0.31676, 0.35227, 0.40281, 0.43609, 0.50546 และ 0.54045 MPa ตามลำดับ และมีค่า Stiffness เป็น 29.062, 29.617, 33.970, 37.577, 40.774 และ 42.606 N/m จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเติมกราไฟต์ในปริมาณที่มากขึ้น แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีกราไฟต์จะมีค่าความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณกราไฟต์ที่เติมเข้าไป ซึ่งการเติมกราไฟต์ลงไปจะช่วยทำให้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราไฟต์มีความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากยิ่งขึ้น แข็งแรงมากขึ้น และสามารถใช้งานได้หลายครั้งมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่า Young's Modulus โดยการทดสอบแรงดึงของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราไฟต์ในปริมาณต่างๆ

4.3 การศึกษาการดูดซับและกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูและอินดิโกคาร์มีน

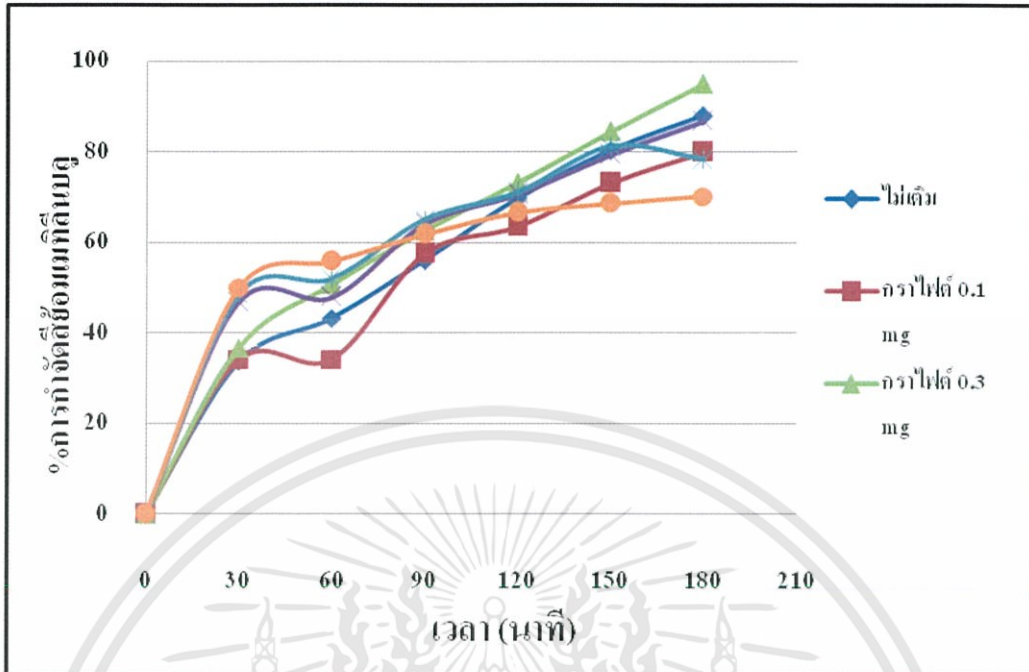
หลังจากทำการเตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราไฟต์ในปริมาณต่างๆ แล้ว นำไปทำการฉายแสงยูวี เพื่อทดสอบความสามารถในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู (Methylene blue) และอินดิโกคาร์มีน (Indigo carmine) โดยทำการเก็บตัวอย่างสีย้อมทุก 30 นาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

4.3.1 การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับและการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราไฟต์ในปริมาณต่างๆ

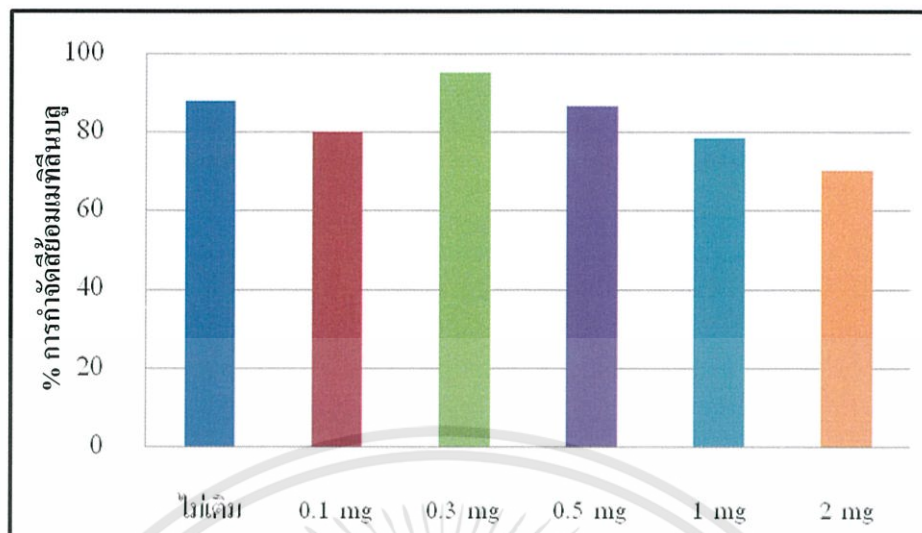
ปริมาณกราไฟต์	% การกำจัดสีย้อม						
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที	150 นาที	180 นาที
ไม่เติม	0	33.68	43.21	56.01	69.86	80.40	88.06
0.1 มิลลิกรัม	0	34.18	34.18	57.62	63.53	73.21	80.05
0.3 มิลลิกรัม	0	36.78	50.82	62.52	73.16	84.59	95.11
0.5 มิลลิกรัม	0	46.99	47.89	64.16	70.70	79.46	86.85
1 มิลลิกรัม	0	48.63	52.00	65.18	71.28	81.34	78.44
2 มิลลิกรัม	0	50.13	55.82	61.87	66.63	68.63	70.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



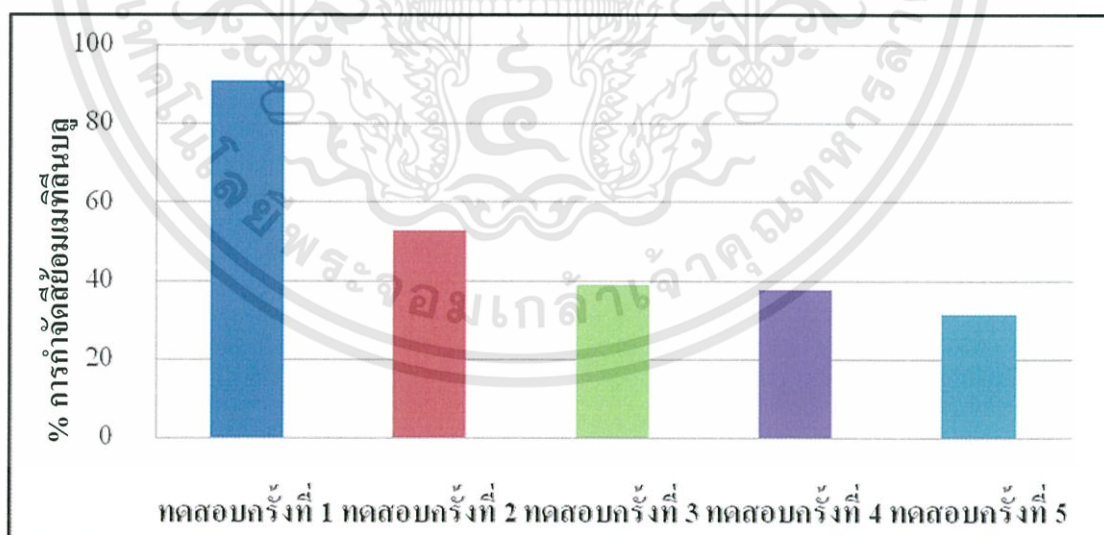
รูปที่ 4.15 กราฟเส้นแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดคลอโรฟิลล์ในหลอด

จากรูปที่ 4.15 แสดงค่าประสิทธิภาพในการดูดซับและการกำจัดคลอโรฟิลล์ในหลอดของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราไฟต์ในปริมาณ 0, 0.1, 0.3, 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัม ภายใต้แสงยูวีเมื่อเวลาเปลี่ยนไป จะได้ว่าค่า % การกำจัดคลอโรฟิลล์เป็น 88.06%, 80.05%, 95.11%, 86.85%, 78.44% และ 70.27% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดคลอโรฟิลล์ในหลอดนั้นเป็นไปในทางที่ดี เนื่องจากเมทิลีนบลูมีประจุบวก ซึ่งทำให้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราไฟต์เกิดกระบวนการ 2 อย่าง คือ การดูดซับและการโฟโตคะตะไลซิส จากเริ่มต้นที่ไม่เติมกราไฟต์ ประสิทธิภาพในการกำจัดคลอโรฟิลล์ดี และเมื่อเติมกราไฟต์ลงไป 0.3 มิลลิกรัม จะเห็นได้ว่าค่า % การกำจัดคลอโรฟิลล์เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากปริมาณกราไฟต์ที่เพิ่มขึ้นจะไปช่วยในการดูดซับคลอโรฟิลล์เข้ามาไว้ในแผ่นยาง และจะเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสต่อไป แต่เมื่อเติมกราไฟต์เพิ่มมากขึ้นเป็น 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัม ความสามารถในการกำจัดคลอโรฟิลล์จะลดลง เพราะถึงแม้ว่ากราไฟต์ที่เพิ่มมากขึ้นจะช่วยดูดซับคลอโรฟิลล์ แต่ปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นนั้นจะทำให้การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อสลายคลอโรฟิลล์ได้ยากมากขึ้น เนื่องจากถูกกราไฟต์บดบัง จึงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดคลอโรฟิลล์ลดลง



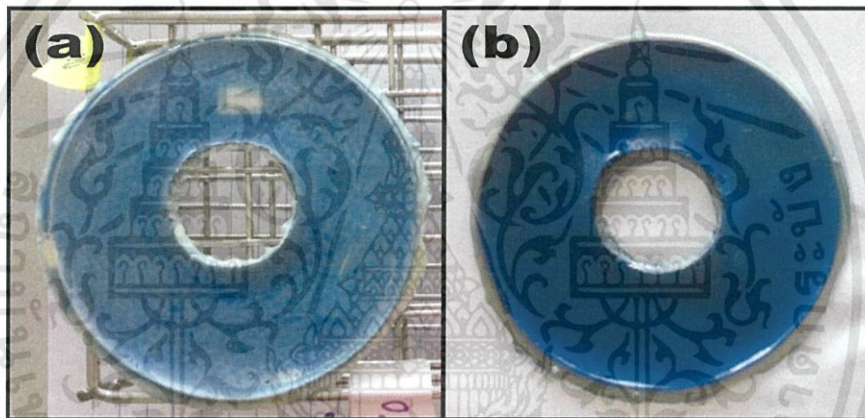
รูปที่ 4.16 กราฟแท่งแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีของเมทิลีนบลู

จากการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีของเมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟต์ในปริมาณต่างๆ ผลที่ได้คือ แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟต์ปริมาณ 0.3 มิลลิกรัม มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีของเมทิลีนบลูที่ดีที่สุด จึงทำการเลือกแผ่นยางผสมดังกล่าวมาทำการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสภายใต้การฉายแสงยูวีเมื่อเวลาเปลี่ยนไปเป็นจำนวน 5 ครั้ง เพื่อดูประสิทธิภาพในการกำจัดสีของเมทิลีนบลูว่าจะยังคงมีประสิทธิภาพดีเท่าเดิมหรือไม่หากผ่านการใช้งานหลายครั้ง

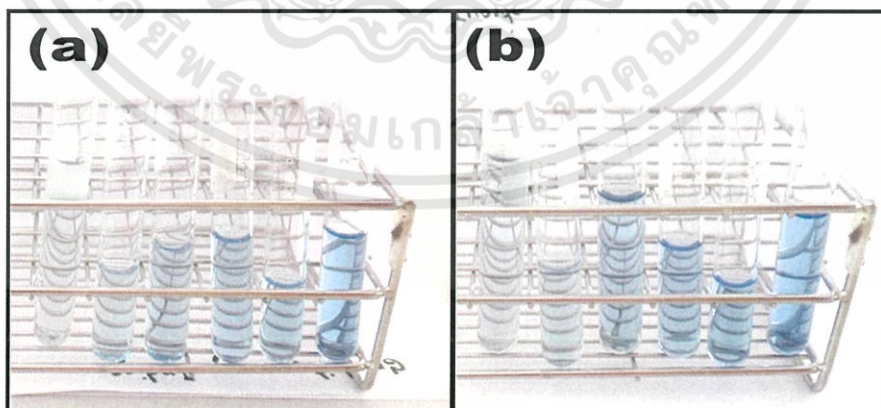


รูปที่ 4.17 กราฟแสดงประสิทธิภาพการกำจัดสีของเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่เติมกราฟต์ปริมาณ 0.3 มิลลิกรัม โดยทำการทดสอบ 5 ครั้ง ภายใต้การฉายแสงยูวีเมื่อเวลาเปลี่ยนไป

จากการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟต์ 0.3 มิลลิกรัม เริ่มต้นนำไปฉายแสงยูวีได้ค่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเป็น 91.13% เมื่อนำไปทดสอบครั้งที่ 2 ภายใต้การฉายแสงยูวีเมื่อเวลาเปลี่ยนไป ค่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูลดลงเหลือ 52.92% นำไปทดสอบต่อเป็นครั้งที่ 3 จะได้ค่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูลดลงอีกเป็น 39.03% และนำไปทดสอบต่อครั้งที่ 4 และ 5 จะได้ค่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูลดลงเหลือเพียง 37.59% และ 31.53% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อผ่านการนำไปฉายยูวีเป็นจำนวนหลายครั้ง ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟต์ 0.3 มิลลิกรัม นี้จะลดลงอย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 4.18 ตัวอย่างแผ่นยางผสมที่เติมกราฟต์ 0.3 มิลลิกรัม (a) ทดสอบครั้งที่ 1 (b) ทดสอบครั้งที่ 5



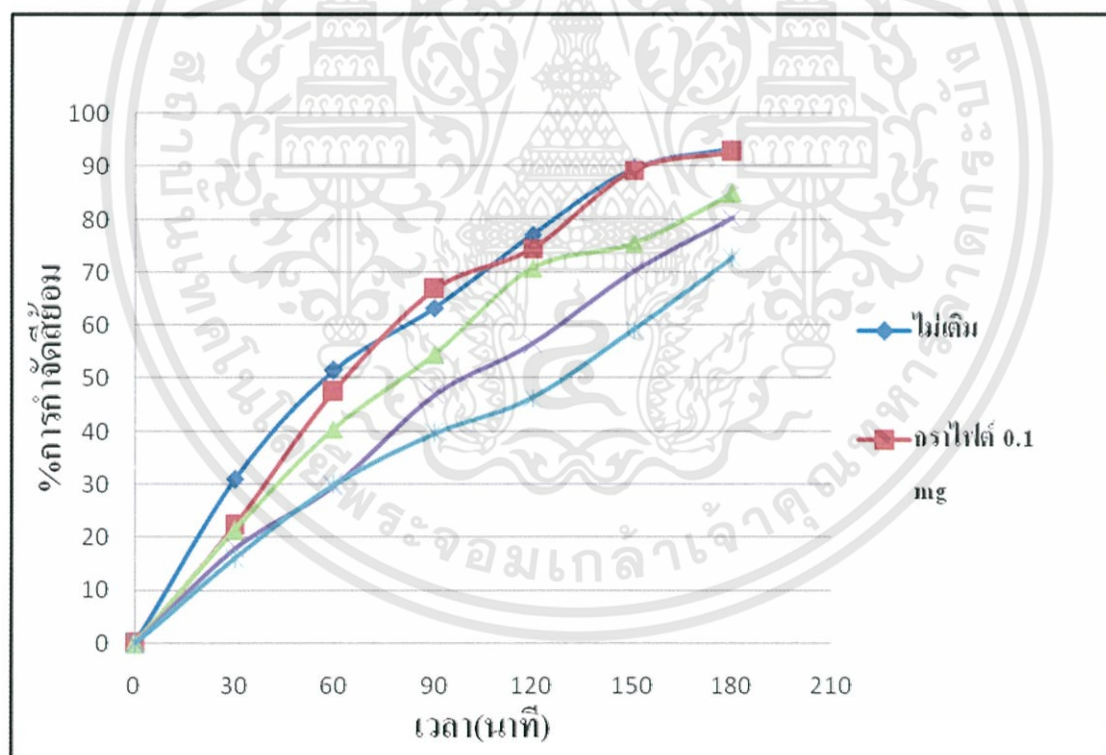
รูปที่ 4.19 ตัวอย่างสีย้อมเมทิลีนบลูจากแผ่นยางผสมที่เติมกราฟต์ 0.3 มิลลิกรัม
(a) ทดสอบครั้งที่ 1 (b) ทดสอบครั้งที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับและการกำจัดสีย้อมอินดิโก้คาร์มีน

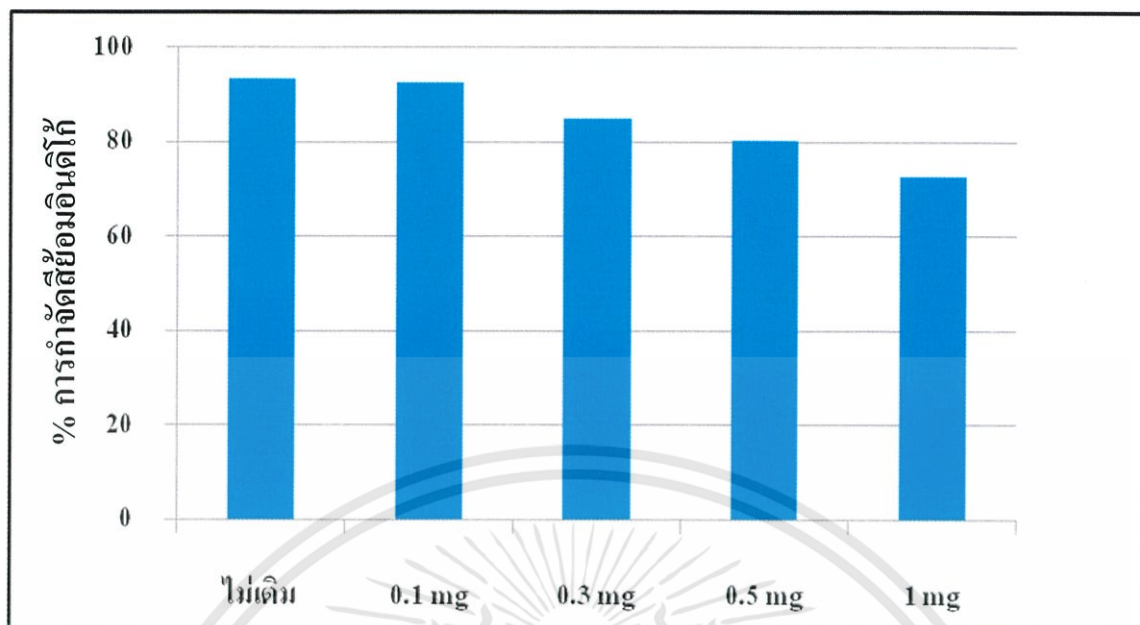
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมอินดิโก้คาร์มีนของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราไฟต์ในปริมาณต่างๆ

ปริมาณกราไฟต์	% การกำจัดสีย้อม						
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที	150 นาที	180 นาที
ไม่เติม	0	30.96	51.54	63.37	77.15	89.63	93.35
กราไฟต์ 0.1 mg	0	22.19	47.52	66.89	74.5	89.24	92.72
กราไฟต์ 0.3 mg	0	21.44	40.6	54.66	70.83	75.57	85.06
กราไฟต์ 0.5 mg	0	17.85	29.59	46.94	56.53	70.25	80.33
กราไฟต์ 1 mg	0	16.04	29.95	39.75	46.35	59.18	72.72



รูปที่ 4.20 กราฟเส้นแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดอินดิโก้คาร์มีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 กราฟแท่งแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์บอน

จากผลตามตารางแสดงค่าประสิทธิภาพในการดูดซับและการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์บอนของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟต์ในปริมาณ 0, 0.1, 0.3, 0.5 และ 1 มิลลิกรัม ภายใต้แสงยูวีเมื่อเวลาเปลี่ยนไป จะได้ค่า % การกำจัดสีย้อมเป็น 93.35% 92.72% 85.06% 80.33% และ 72.72% ตามลำดับ การใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - กราฟต์ จะเกิดการกำจัดสีย้อมโดยกระบวนการโฟโตแคตาไลซิส แต่กราฟต์จะไม่ดูดซับสีย้อมเข้ามาไว้ในแผ่นยางผสมเพราะเนื่องจากสีย้อมอินดิโกคาร์บอน เป็นสีย้อมที่มีประจุเป็นลบ จะเห็นได้ว่าเมื่อยิ่งทำการเพิ่มปริมาณกราฟต์ลงไปแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์นั้น จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์บอนลดลง เพราะนอกจากจะไม่ดูดซับสีย้อมแล้วการเติมกราฟต์มากขึ้นจะยิ่งทำให้กระบวนการโฟโตแคตาไลซิสเกิดได้ยากมากขึ้นไปอีก จึงทำให้การเติมกราฟต์ลงไปแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์บอนนั้นไม่ส่งผลในทางที่ดีต่อการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์บอนแต่อย่างใด

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

โครงการพิเศษนี้จากการทดลองทำให้สามารถยืนยันถึงความเป็นไปได้ของการใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมปริมาณกราฟต์ในปริมาณต่าง ๆ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมได้จริง สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ทดสอบการดึงแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟต์ในปริมาณต่าง ๆ โดยจะดูที่ค่ามอดูลัส (E) และค่า Stiffness ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและค่าความยืดหยุ่นของวัสดุที่ต้องการทดสอบ จากผลในตารางที่ 4.1 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟต์ในปริมาณ 0, 0.1, 0.3, 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัม เมื่อทำการเติมกราฟต์ในปริมาณที่มากขึ้นผ่านยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟต์จะมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณกราฟต์ที่เติมเข้าไป
2. การศึกษาทดลองพบว่าเมื่อใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมปริมาณกราฟต์ในปริมาณต่าง ๆ สามารถกำจัดสีข้อมเมทิลินบลู ($C_{16}H_{18}N_3SCl$) ได้ดีขึ้นด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลซิส ส่วนสีข้อมอินดิโกคาร์มิน ($Cl_{16}H_8Na_2O_8S_2$) เมื่อเติมปริมาณกราฟต์ลงไปแล้วความสามารถในการกำจัดสีลดลง
3. ศึกษาทดลองหาค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมพบว่า ปริมาณการเติมกราฟต์ที่ทำให้ได้ค่า % ประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมได้ดีที่สุดคือ 0.3 มิลลิกรัม จึงนำแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟต์ไปทำการฉายแสงยูวีเพื่อทำปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิสซ้ำเป็นจำนวน 4 ครั้ง พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมลดลง

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ผลการวิจัยครั้งนี้ยังไม่สามารถนำมาใช้ในการกำจัดสีข้อมในปริมาณที่มากได้ เนื่องจากแผ่นยางผสมไทเทเนียมมีขนาดเล็ก
2. ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมจากน้ำทิ้งในโรงงานอุตสาหกรรมโดยตรง โดยใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลติก
3. ศึกษาลักษณะเฉพาะทางกายภาพของแผ่นยางแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้งที่เติมและไม่เติมกราฟไฟต์
4. ในการเตรียมแผ่นยางผสม อาจทำให้ผงไททาเนียมและกราฟไฟต์ กระจายตัวไม่ทั่วถึง เนื่องจากแท่งแม่เหล็กปั่นเหียงควรใช้เครื่องปั่นกวนและแท่งแม่เหล็กที่ใช้งานได้ดี
5. สารที่ใช้ในการทดลองเป็นผงขนาดเล็ก สารละลาย มีกลิ่นรุนแรง และมีฤทธิ์กัดกร่อน ควรสวมถุงมือและผ้าปิดจมูกทุกครั้ง เพื่อป้องกันอันตราย
6. ศึกษาแนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการบำบัดสีข้อมกับด้วยการผสมกับสารกลุ่ม คาร์บอนร่วมด้วย
7. ศึกษาและพิสูจน์คุณสมบัติและลักษณะทางกายภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการทดลองบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสีย เช่นสารแขวนลอยโปรตีน

เอกสารอ้างอิง

- [1] Chaval Sriwong, Sumpun Wongnawa, Orasa Patarapaiboolchai. “**Photocatalytic activity of Rubber sheet impregnated with TiO₂ particles and its recyclability.**” *Catalysis communications* 9 (2008) 213-218
- [2] Eder Jose Guidelli, Ana Paula Ramos, Maria Elisabete D. Zaniquelli, Oswaldo Baffa. “**Green synthesis of colloidal silver nanoparticles using natural rubber latex extracted from Hevea brasiliensis.**” *Spectrochemical Acta A82* (2011) 140 – 145.
- [3] Jong Hak Lee, Dong Wook Shin, Victor G. Makotchenko, Albert S. Nazarov, Vladimir E. Fedorov, Jin Hyoung Yoo, Seong Man Yu, Jae-Young Choi, Jong Min Kim, and Ji-Beom Yoo*. “**The Superior Dispersion of Easily Soluble Graphite**.**” *small* 2010, 6, No. 1, 58–62
- [4] กาญจนา ลือพงษ์ และ นงนุช ศศิธร. “การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมด้วยเทคนิคโฟโตคะตะไลติกร่วมกับกระบวนการดูดซับ.” 2553. [Online]. Available http://repository.rmutp.ac.th/bitstream/handle/123456789/953/itfd_54_05.pdf?sequence=1
- [5] เกศแก้ว ปานสมุทร และ อ.ดร.อังกริยา สุริยวงค์. “การบำบัดสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วยกระบวนการทางเคมีและฟิสิกส์.” *สิ่งแวดลอม*, 15(3), 35-39
- [6] ฉลาด บรรเทา และ ชูสิทธิ์ ศรีสุทธิกรม. “กระบวนการ Photocatalytic.” 2548, 5-6. [Online]. Available <http://sichon.wu.ac.th/file/envi-shh-20090110-112240-pwrqR.pdf>
- [7] ทศนีย์ ชำนาญชัย ป.ปภัตรา พรหมอักษร และ ศันสนีย์ โพธิ์น่มแดง. “การศึกษาความเป็นไปได้ในการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียด้วยไททานเนียมไดออกไซด์.” *วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*. 2555.
- [8] บุญธรรม นิธิอุทัย และคณะ “กระบวนการเตรียมน้ำยาล้างจากน้ำยางสด.” 2540
- [9] พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์ และ วีระวัฒน์ คลอวุฒิมินทร์. (2553) “การดูดซับสีย้อมด้วยตัวดูดซับจากธรรมชาติ”. *วิศวกรรมลาดกระบัง*, 27(4), 61-66.
- [10] วนิดา ชูอักษร. (2551). “เทคโนโลยีการกำจัดสีในน้ำเสียอุตสาหกรรม.” *วิทยาศาสตร์บูรพา*, 17 (1), 181-191.
- [11] เสรีย์ ผู้ประกาย. “กระบวนการพื้นฐานโฟโตคะตะไลติก.”, 1-11. [Online]. Available <http://www.eng.ru.ac.th/envi/aj/EVE410/photocatalytic.pdf>

[12] เสาวลักษณ์ บุญยอด. “ปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกและพฤติกรรมการมาเชื่อมที่เรียของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนพอลิเมอร์.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2554.

[13] อธิพิศ แจ่มชัด. “เอกสารประกอบการสอน วิชาเทคโนโลยีการยาง.” กรุงเทพฯ: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2556.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเตรียมสารละลายย้อมสีสังเคราะห์และการคำนวณค่าร้อยละการกำจัดสีย้อม

1. การเตรียมสีย้อมเมททาลินบลู (Methylene Blue, MB) สูตรโครงสร้าง คือ $C_{16}H_{18}N_3SCl$

เตรียมสีย้อมเมทาลินบลูที่ความเข้มข้น 2.5×10^{-5} M

วิธีทำ

- ชั่งผงเมททาลินบลูที่ 0.0093 กรัม ในขวดวัดปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร
- ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

2. การเตรียมสีย้อมอินดิโกคาร์มีน (Indigo Carmine, IC) สูตรโครงสร้าง คือ



เตรียมสีย้อมอินดิโกคาร์มีนที่ความเข้มข้น 2.5×10^{-5} M

วิธีทำ

- ชั่งผงอินดิโกคาร์มีน 0.0080 กรัม ในขวดวัดปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร
- ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

การคำนวณค่าร้อยละการกำจัดสีย้อม

1. การคำนวณค่าร้อยละการกำจัดสีย้อม

$$\text{จากสูตร } \% \text{ การกำจัดสีย้อม} = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100 \%$$

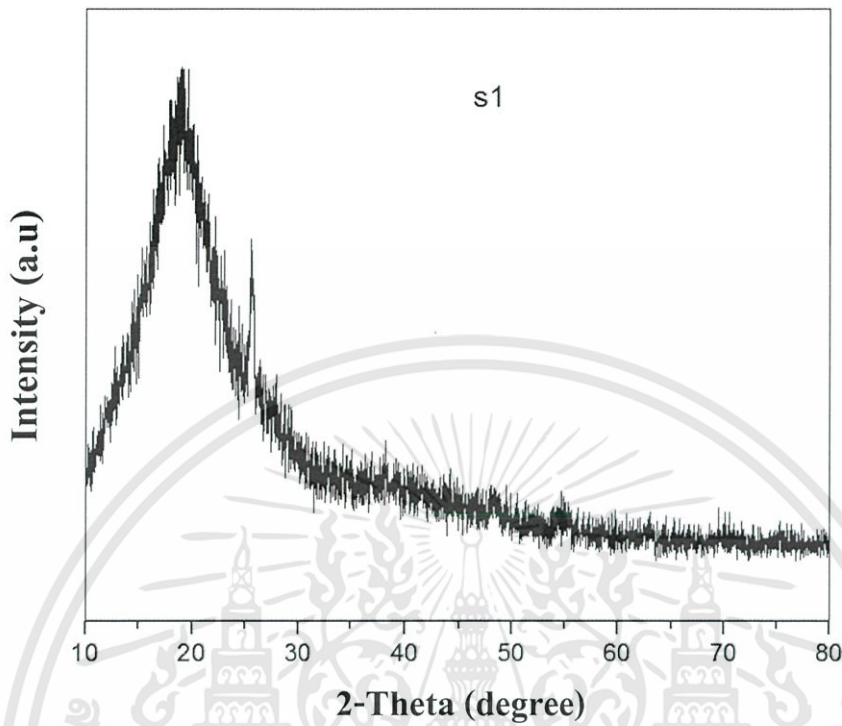
A_0 : ค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้น

A_t : ค่าการดูดกลืนแสงที่เวลาใดๆ

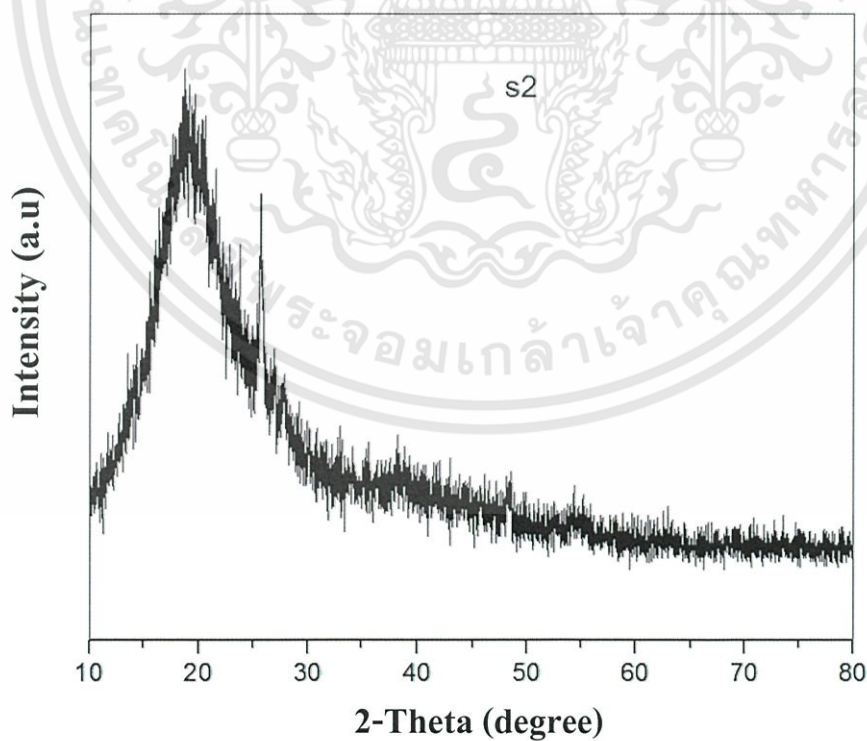


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. X-ray Diffraction (XRD)

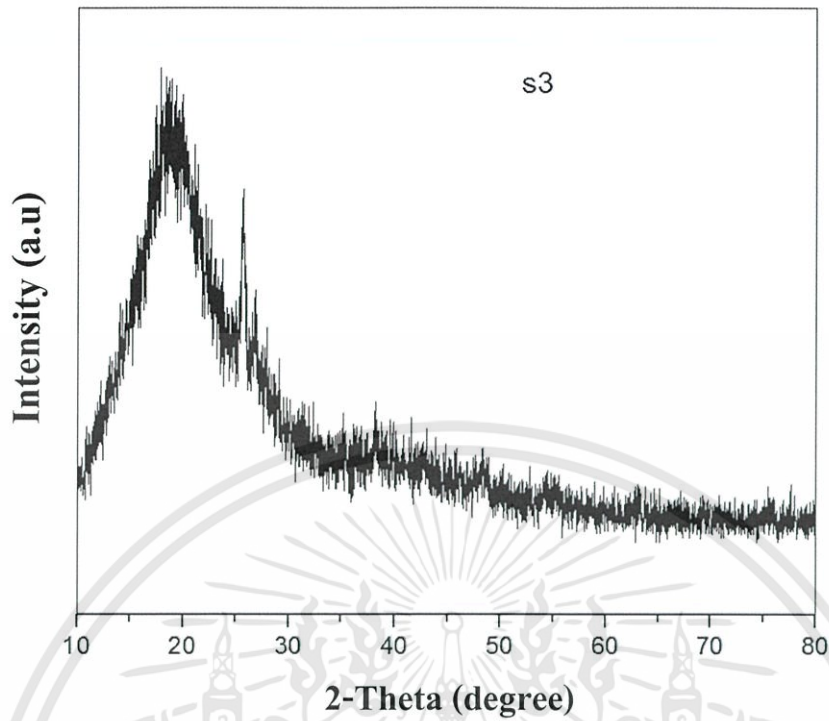


รูปที่ ข-1 XRD Pattern ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - กราฟไฟต์ 0.1 มิลลิกรัม

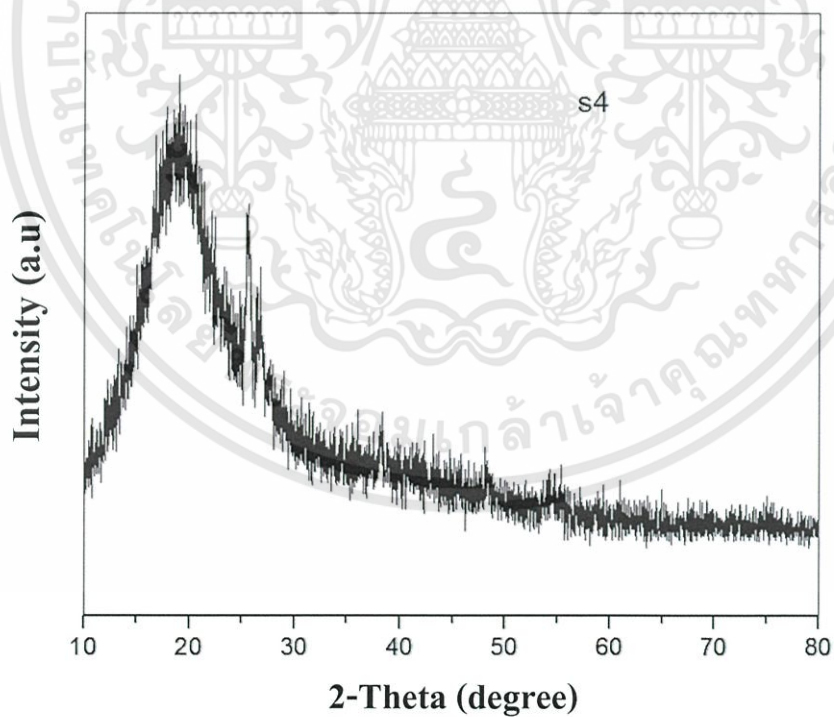


รูปที่ ข-2 XRD Pattern ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - กราฟไฟต์ 0.3 มิลลิกรัม

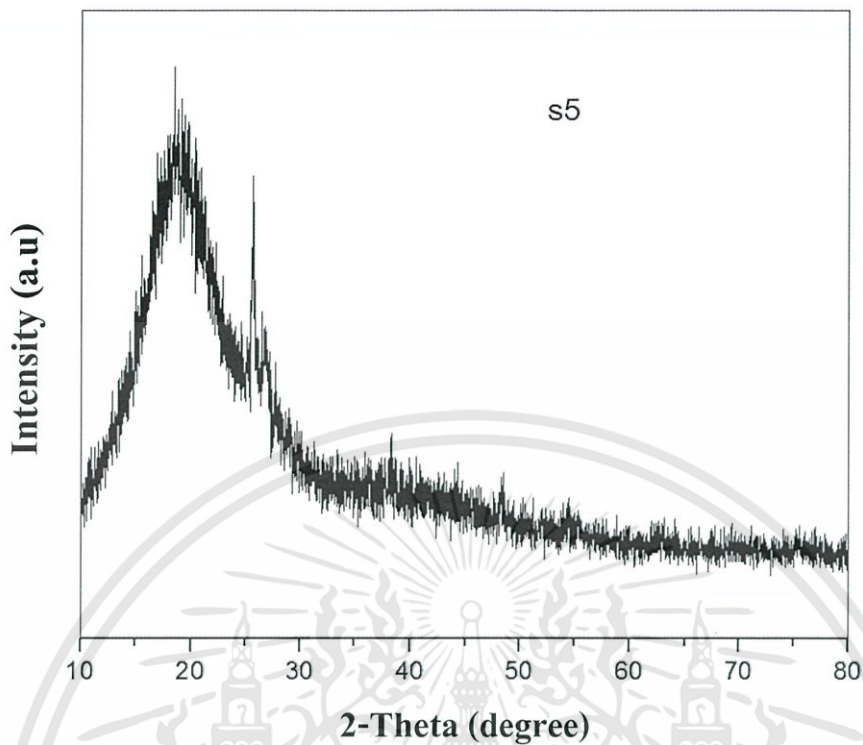
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



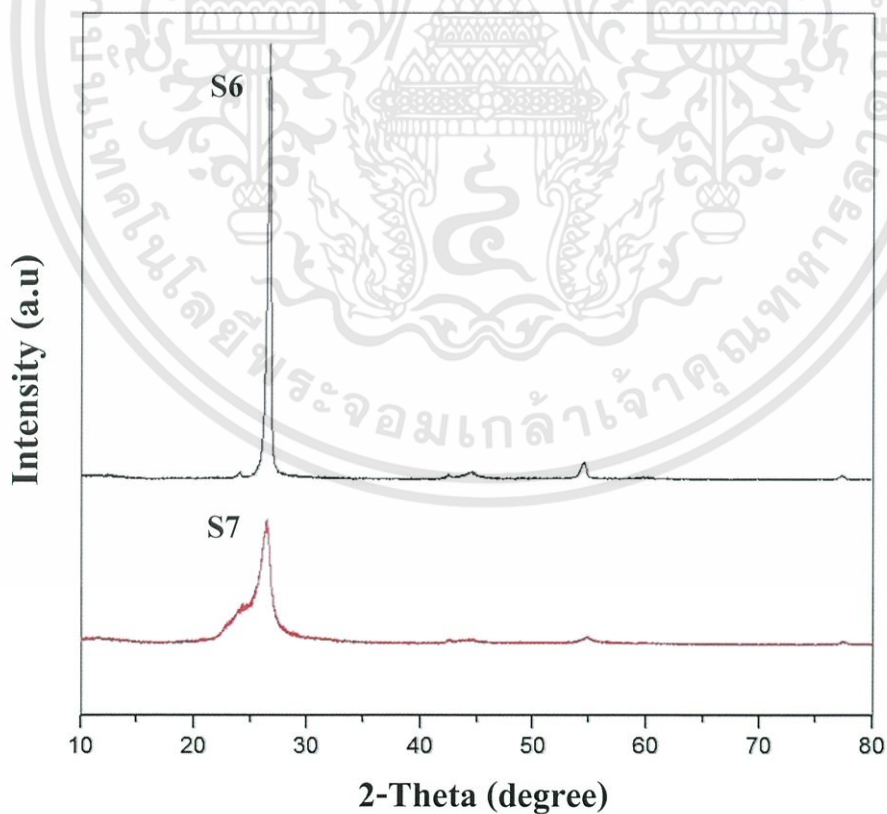
รูปที่ ข-3 XRD Pattern ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - กราไฟต์ 0.5 มิลลิกรัม



รูปที่ ข-4 XRD Pattern ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - กราไฟต์ 1 มิลลิกรัม

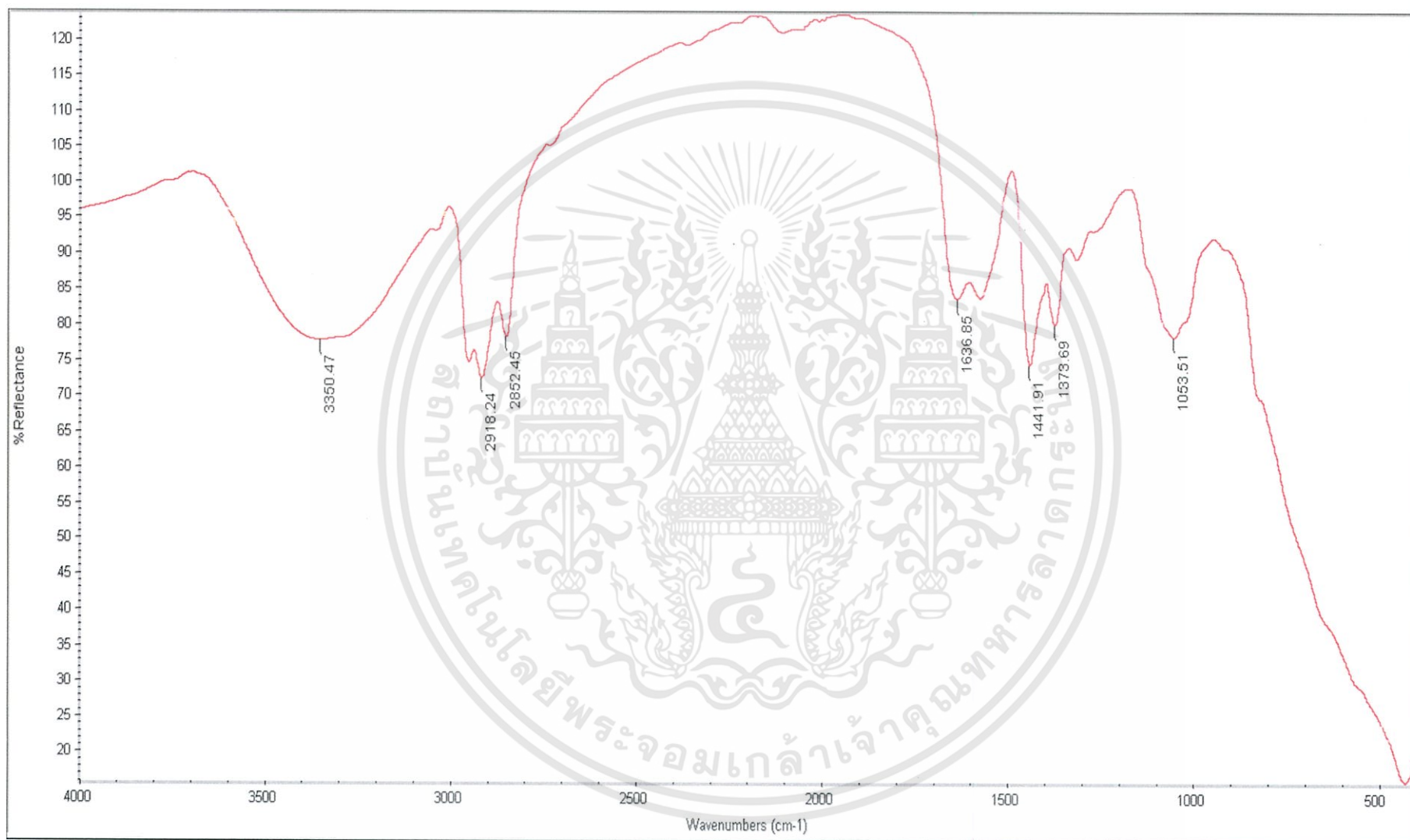


รูปที่ ข-5 XRD Pattern ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - กราไฟต์ 2 มิลลิกรัม

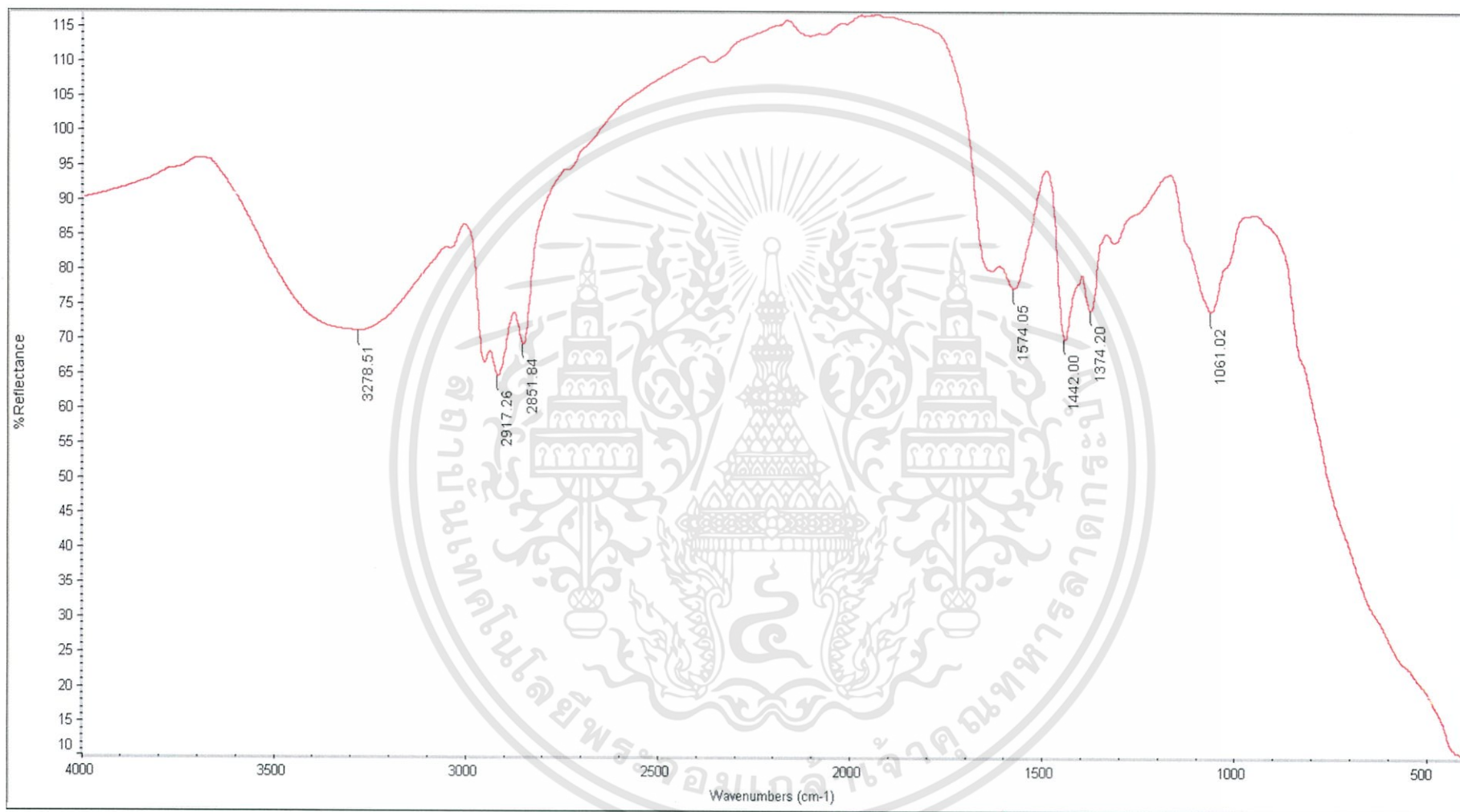


รูปที่ ข-6 XRD Pattern ของกราไฟต์ (Graphite) และกราไฟต์ที่ผ่านการปรับสภาพ

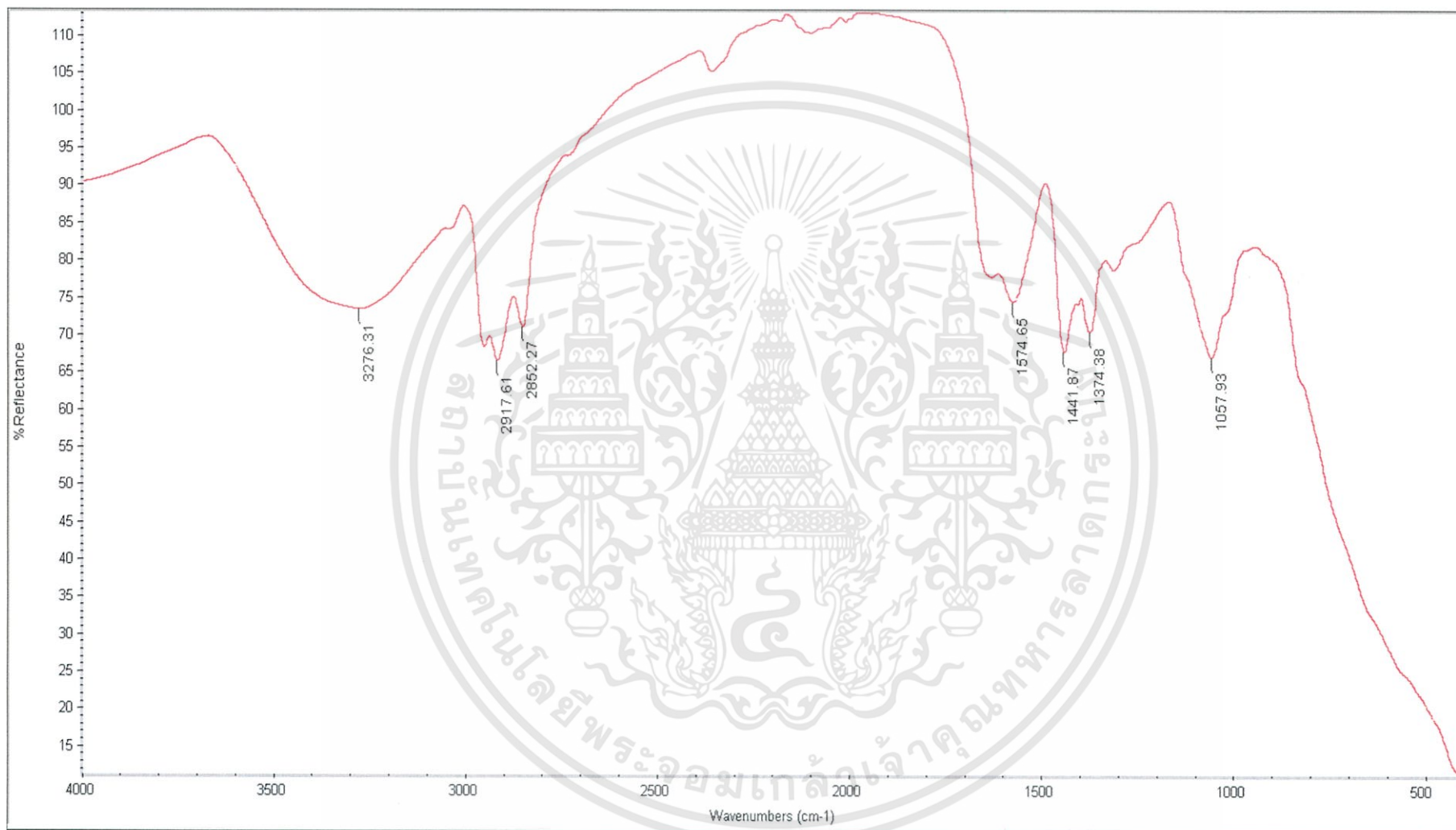
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



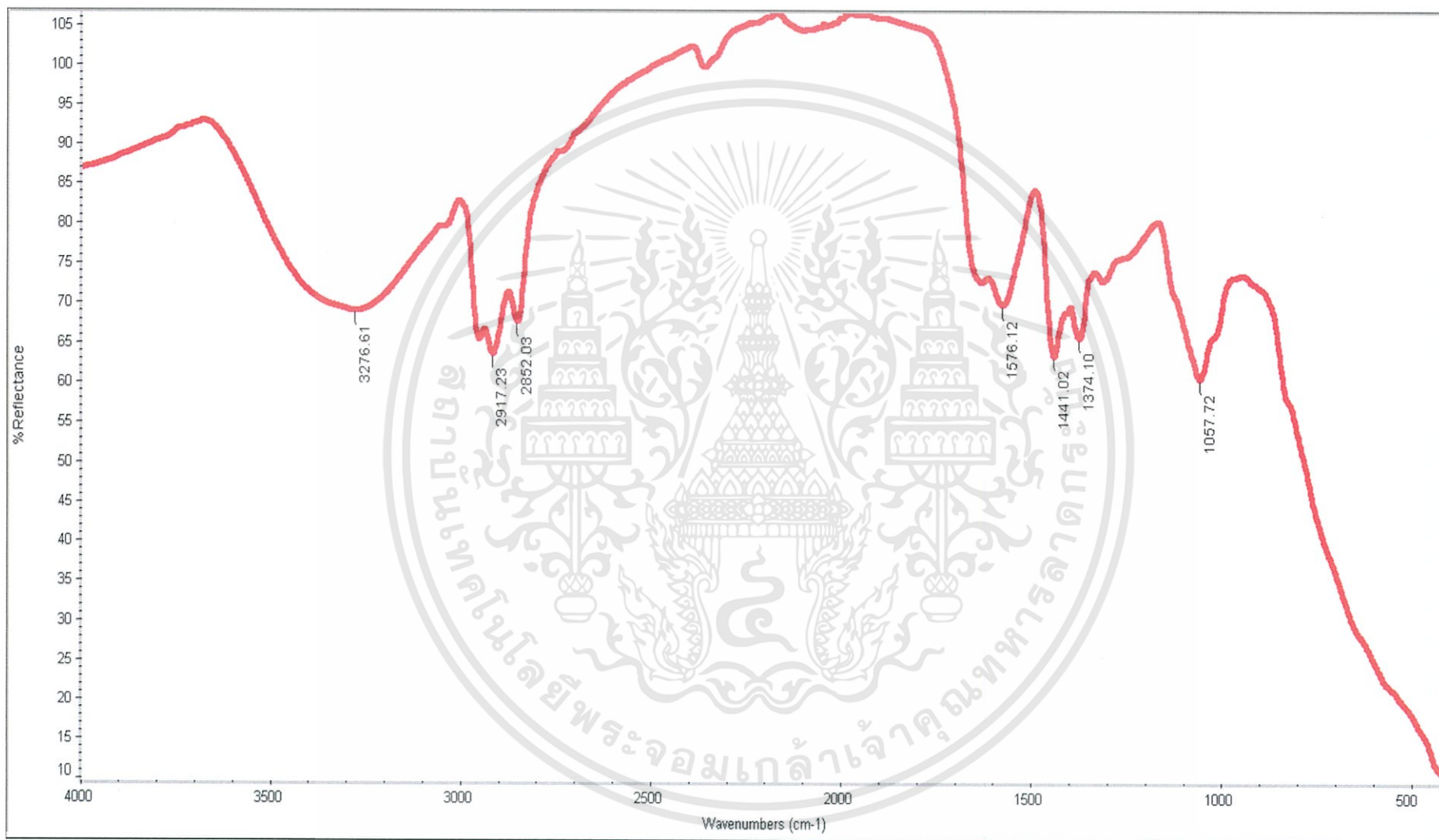
รูปที่ ข-7 FT-IR Spectra ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟต์ 0.1 มิลลิกรัม



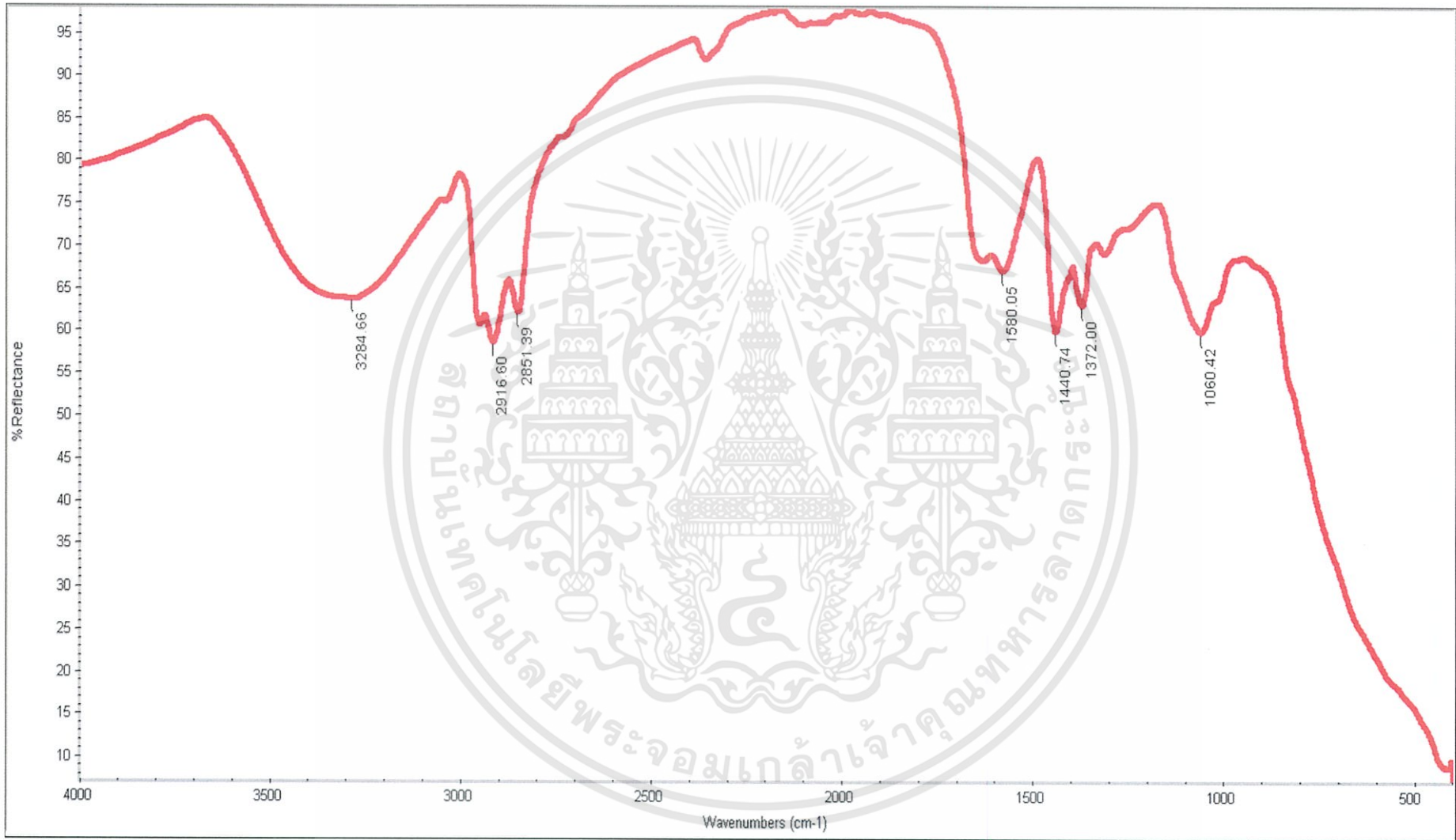
รูปที่ ข-8 FT-IR Spectra ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟต์ 0.3 มิลลิกรัม



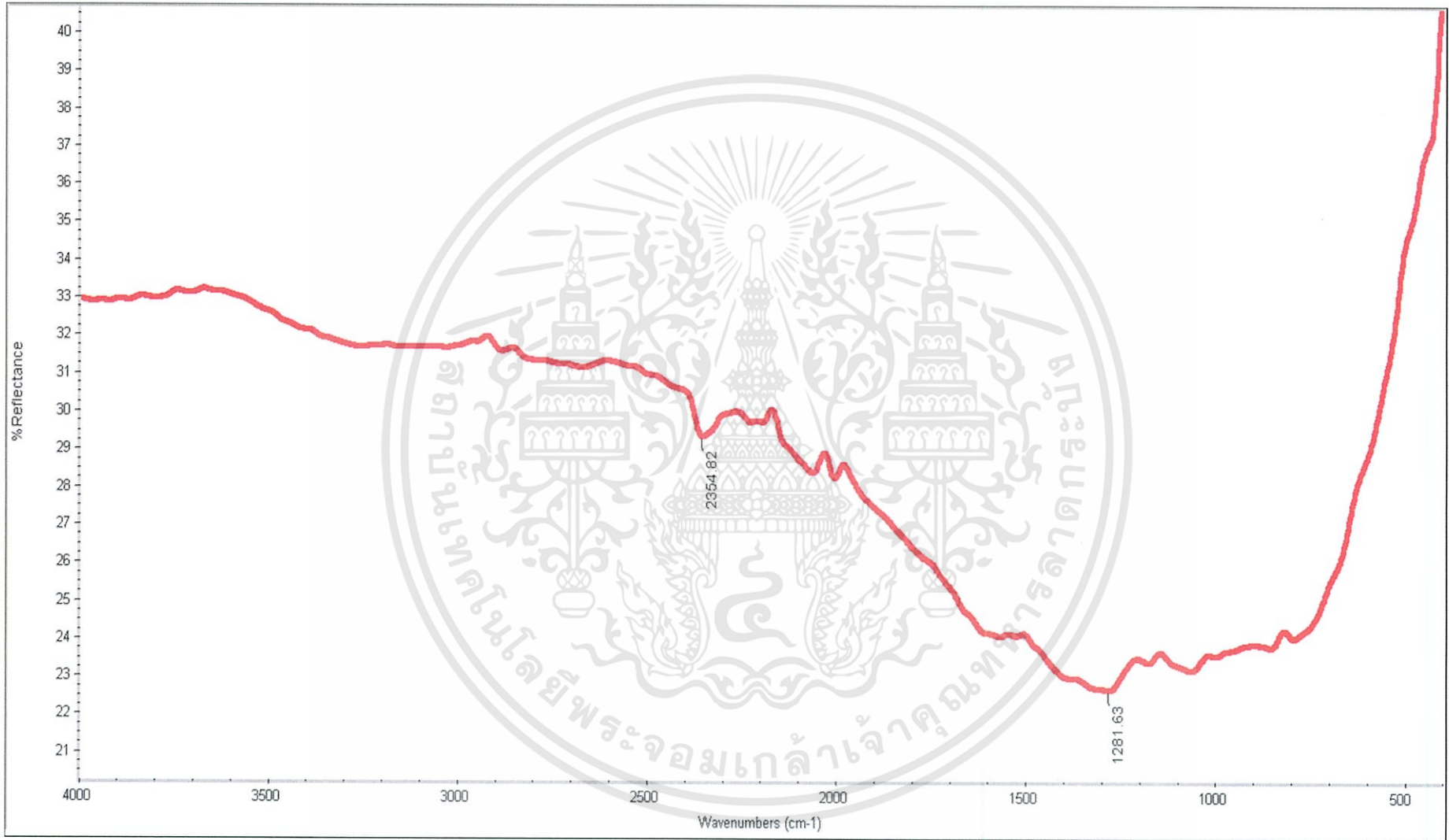
รูปที่ ข-9 FT-IR Spectra ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟต์ 0.5 มิลลิกรัม



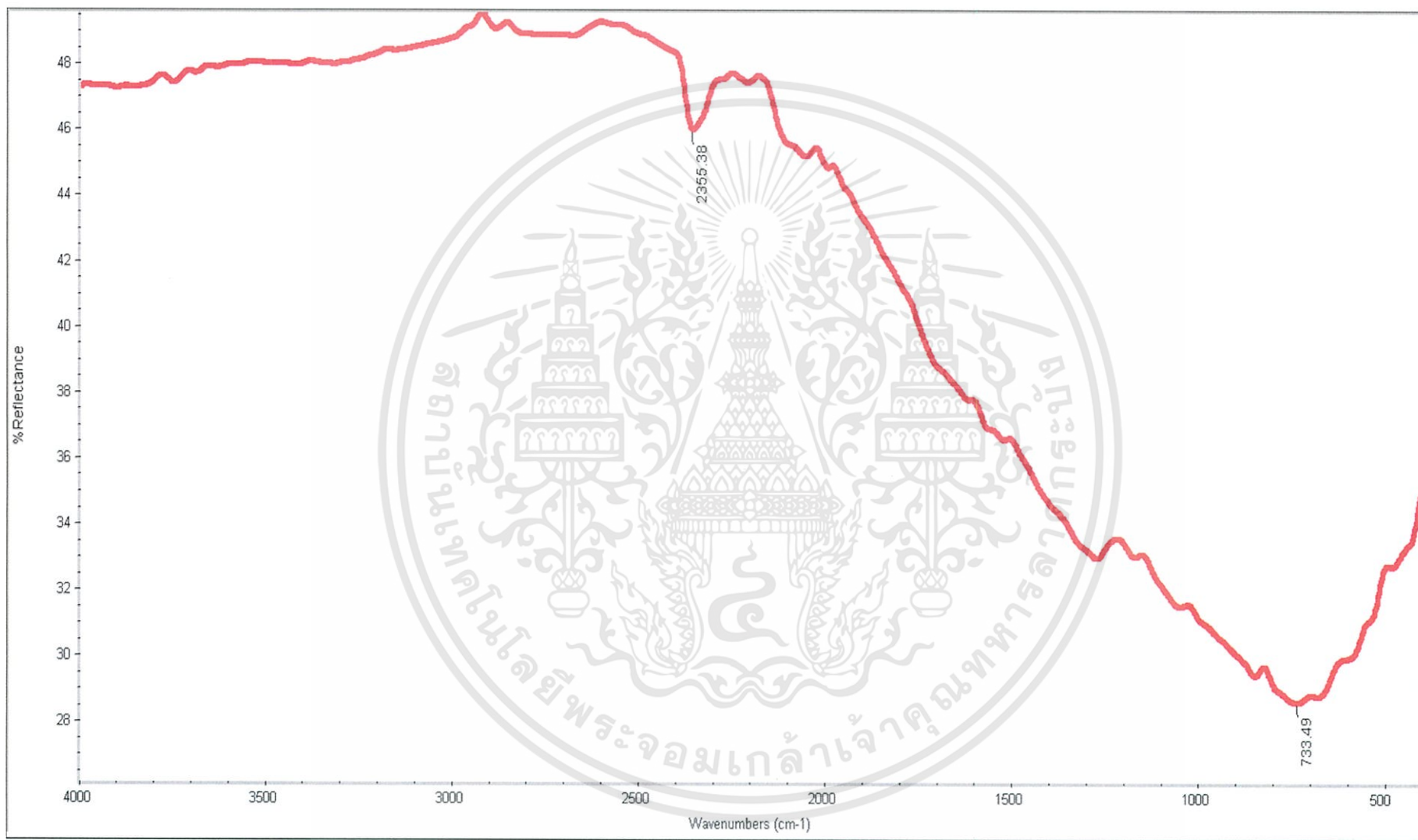
รูปที่ ข-10 FT-IR Spectra ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟิต์ 1 มิลลิกรัม



รูปที่ ข-11 FT-IR Spectra ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟต์ 2 มิลลิกรัม



รูปที่ ข-12 FT-IR Spectra ของแผ่นผงกราไฟต์ (Graphite)



รูปที่ ข-13 FT-IR Spectra ของแผ่นผงกราฟิต์ที่ผ่านการปรับสภาพ

ผลการวัดค่าการดูดกลืนแสงหลังผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-visible Spectrophotometer)

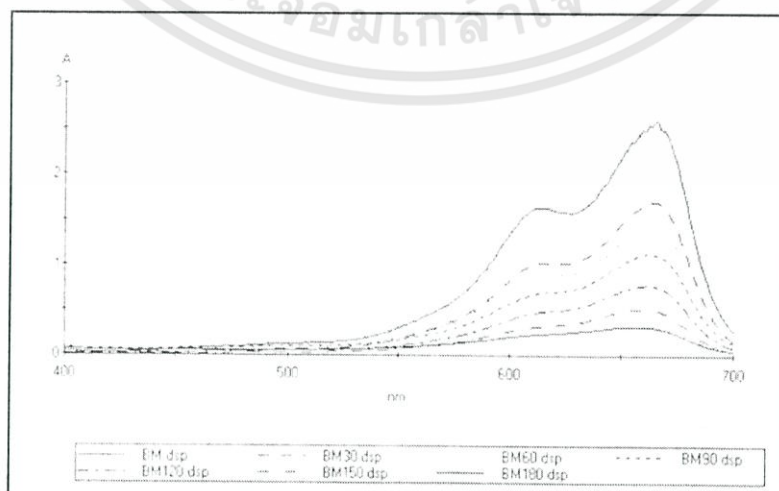
1. การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับและการกำจัดสีของเมทิลีนบลู

ตารางที่ ข-1 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีของเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ภายใต้การฉายแสงยูวีเมื่อเวลาเปลี่ยนไป (ไม่ได้เติมกราฟไฟต์)

เวลา (นาที)	ค่าการดูดซับสีของ (A)	% การกำจัดสีของ
0	2.571	0
30	1.705	33.68
60	1.46	43.21
90	1.131	56.01
120	0.775	69.86
150	0.504	80.4
180	0.307	88.06

จากสูตร

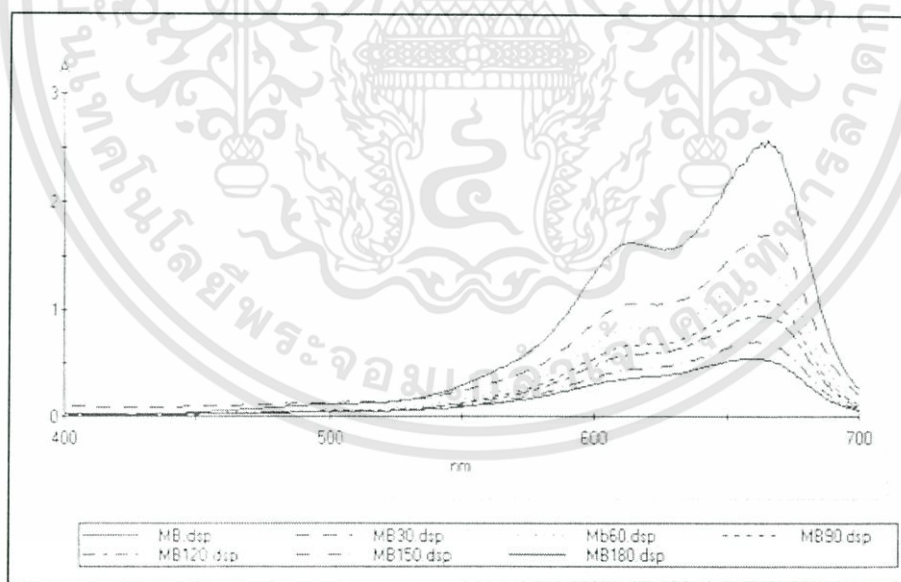
$$\frac{A_0 - A}{A} \times 100 = \% = \frac{2.571 - 0.307}{2.571} \times 100 = 88.06\%$$



รูปที่ ข-14 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงยูวีวิสเชเบิลสเปกตรัมของสีของเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ภายใต้การฉายแสงยูวีเมื่อเวลาเปลี่ยนไป

ตารางที่ ข-2 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟไฟต์ปริมาณ 0.1 มิลลิกรัม ภายใต้การฉายแสงยูวีเมื่อเวลาเปลี่ยนไป

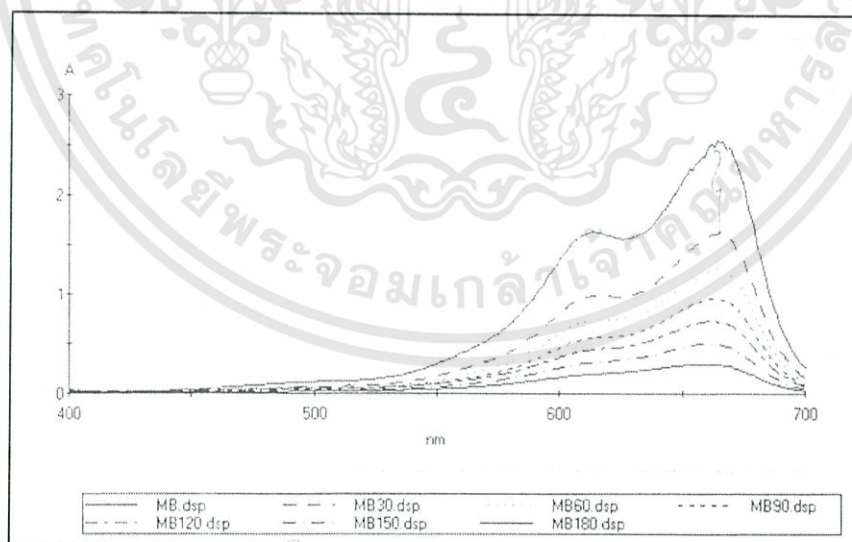
เวลา (นาที)	ค่าการดูดซับสีข้อม (A)	% การกำจัดสีข้อม
0	2.572	0
30	1.693	34.18
60	1.363	34.18
90	1.09	57.62
120	0.938	63.53
150	0.689	73.21
180	0.513	80.05



รูปที่ ข-15 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงยูวีวิสิเบิลสเปกตร้าของสีข้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟไฟต์ 0.1 มิลลิกรัม ภายใต้การฉายแสงยูวีเมื่อเวลาเปลี่ยนไป

ตารางที่ ข-3 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟไฟต์ปริมาณ 0.3 มิลลิกรัม ภายใต้การฉายแสงยูวีเมื่อเวลาเปลี่ยนไป

เวลา (นาที)	ค่าการดูดซับสีข้อม (A)	% การกำจัดสีข้อม
0	2.556	0
30	1.616	36.78
60	1.257	50.82
90	0.958	62.52
120	0.686	73.16
150	0.394	84.59
180	0.125	95.11

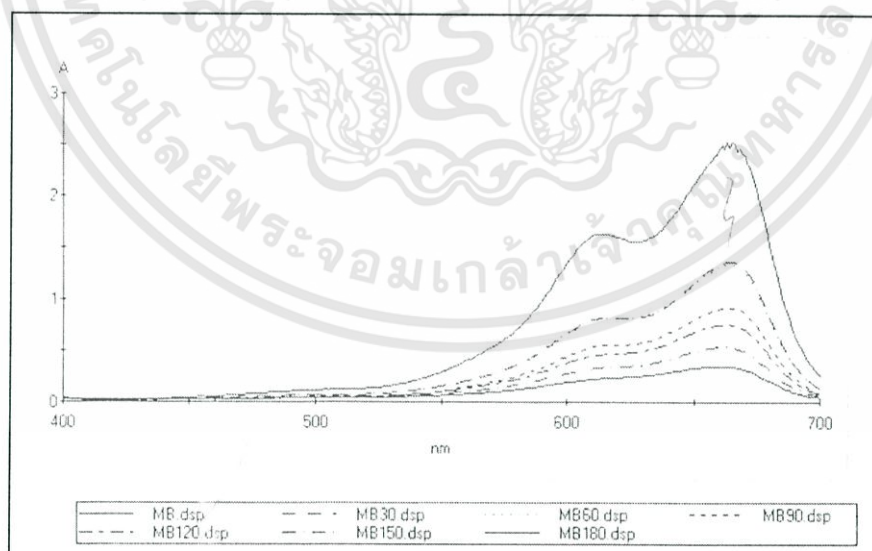


รูปที่ ข-16 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงยูวีวิสเชิบลสเปกตร้าของสีข้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟไฟต์ 0.3 มิลลิกรัม ภายใต้การฉายแสงยูวีเมื่อเวลาเปลี่ยนไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-4 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟไฟต์ปริมาณ 0.5 มิลลิกรัม ภายใต้การฉายแสงยูวีเมื่อเวลาเปลี่ยนไป

เวลา (นาที)	ค่าการดูดซับสีข้อม (A)	% การกำจัดสีข้อม
0	2.526	0
30	1.355	46.99
60	1.332	47.89
90	0.916	64.16
120	0.749	70.70
150	0.525	79.46
180	0.336	86.85

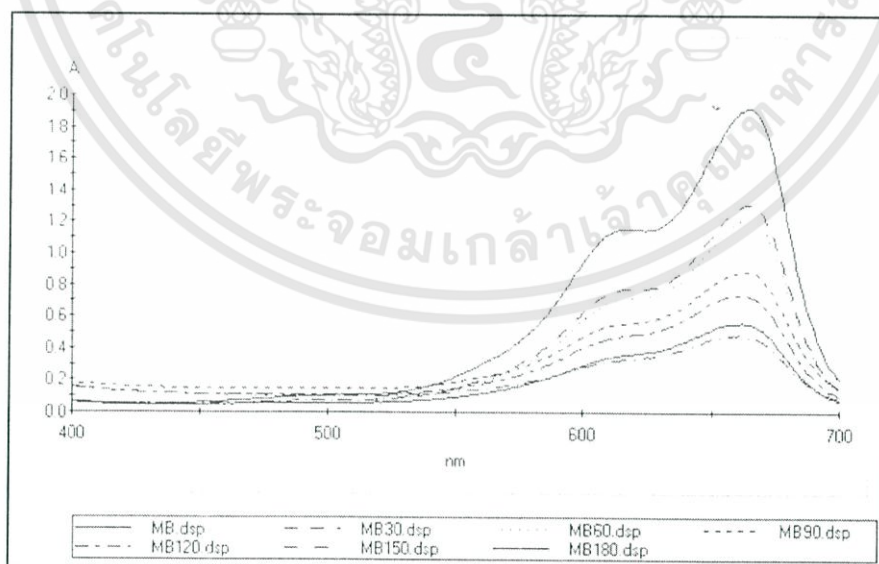


รูปที่ ข-17 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงยูวีวิสิเบิลสเปกตร้าของสีข้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟไฟต์ 0.5 มิลลิกรัม ภายใต้การฉายแสงยูวีเมื่อเวลาเปลี่ยนไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-5 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีของเมทิลินบลูโดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟไฟต์ปริมาณ 1 มิลลิกรัม ภายใต้การฉายแสงยูวีเมื่อเวลาเปลี่ยนไป

เวลา (นาที)	ค่าการดูดซับสีของ (A)	% การกำจัดสีของ
0	1.922	0
30	1.313	48.63
60	1.227	52.00
90	0.89	65.18
120	0.734	71.28
150	0.477	81.34
180	0.551	78.44

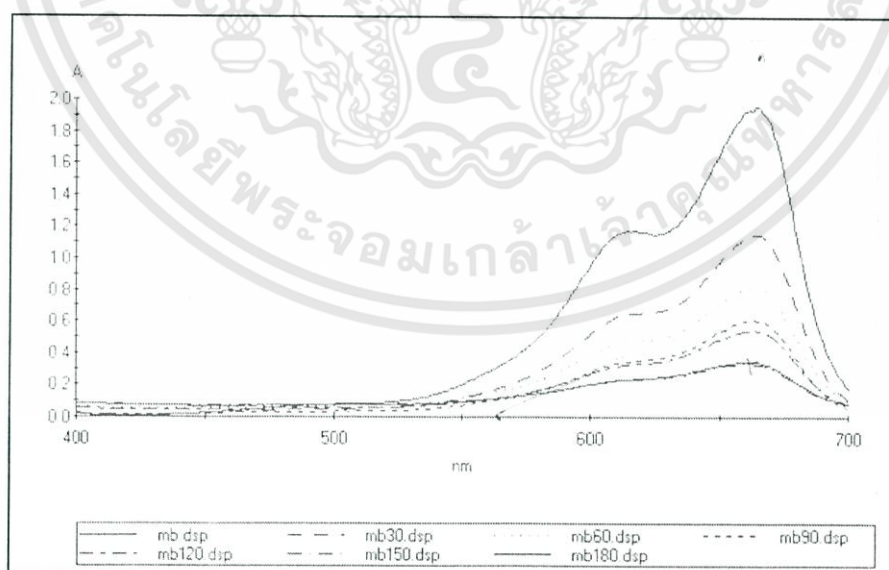


รูปที่ ข-18 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงยูวีวิสซิบิลิตีของสีของเมทิลินบลูโดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟไฟต์ 1 มิลลิกรัม ภายใต้การฉายแสงยูวีเมื่อเวลาเปลี่ยนไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-6 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟไฟต์ปริมาณ 2 มิลลิกรัม ภายใต้การฉายแสงยูวีเมื่อเวลาเปลี่ยนไป

เวลา (นาท)	ค่าการดูดซับสีข้อม (A)	% การกำจัดสีข้อม
0	1.951	0
30	0.973	50.13
60	0.862	55.82
90	0.744	61.87
120	0.651	66.63
150	0.612	68.63
180	0.580	70.27

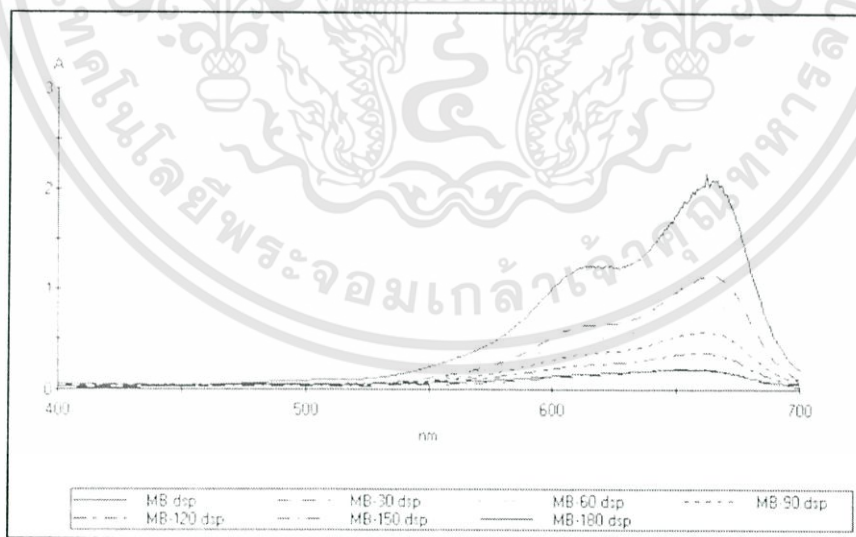


รูปที่ ข-19 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงยูวีวิสิเบิลสเปกตร้าของสีข้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟไฟต์ 2 มิลลิกรัม ภายใต้การฉายแสงยูวีเมื่อเวลาเปลี่ยนไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-7 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีของเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - กราไฟต์ปริมาณ 0.3 มิลลิกรัม ภายใต้การฉายแสงยูวีเมื่อเวลาเปลี่ยนไป

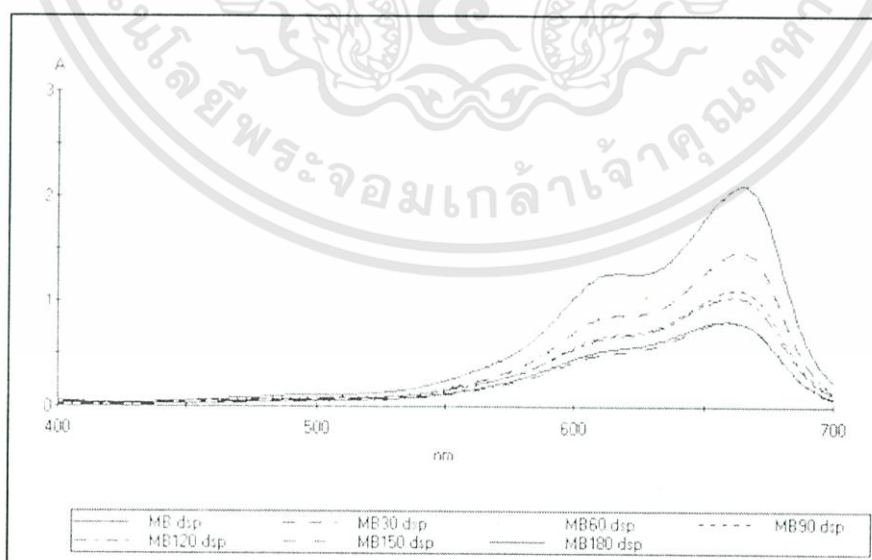
เวลา (นาที)	ค่าการดูดซับสีของ (A)	% การกำจัดสีของ
0	2.165	0
30	1.135	47.58
60	0.855	60.5
90	0.571	73.63
120	0.361	83.33
150	0.204	90.58
180	0.192	91.13



รูปที่ ข-20 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงยูวีวิสเบิลสเปกตร้าของสีของเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - กราไฟต์ปริมาณ 0.3 มิลลิกรัมภายใต้การฉายแสงยูวีเมื่อเวลาเปลี่ยนไป

ตารางที่ ข-8 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมเมทิลินบลูโดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - กราไฟต์ปริมาณ 0.3 มิลลิกรัม ภายใต้การฉายแสงยูวีเมื่อเวลาเปลี่ยนไป ทำการทดสอบซ้ำครั้งที่ 1

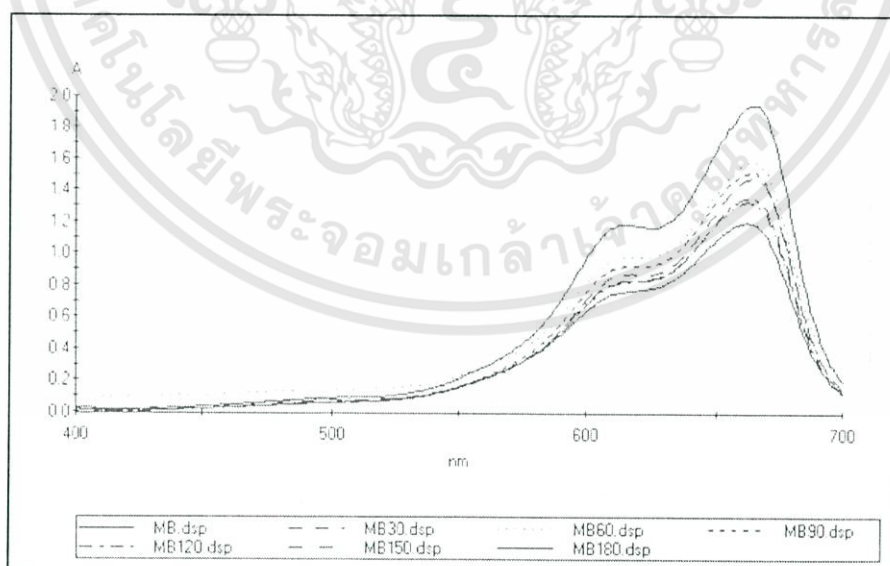
เวลา (นาที)	ค่าการดูดซับสีข้อม (A)	% การกำจัดสีข้อม
0	2.107	0
30	1.483	29.61
60	1.433	31.99
90	1.112	47.22
120	1.039	50.69
150	0.796	62.22
180	0.992	52.92



รูปที่ ข-21 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงยูวีวิสิเบิลสเปกตร้าของสีข้อมเมทิลินบลูโดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - กราไฟต์ปริมาณ 0.3 มิลลิกรัม ทดสอบซ้ำครั้งที่ 1 ภายใต้การฉายแสงเอกซยูวีเมื่อเวลาเปลี่ยนไปนี้ไปนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-9 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟไฟต์ปริมาณ 0.3 มิลลิกรัม ภายใต้การฉายแสงยูวีเมื่อเวลาเปลี่ยนไป ทำการทดสอบซ้ำครั้งที่ 2

เวลา (นาที)	ค่าการดูดซับสีข้อม (A)	% การกำจัดสีข้อม
0	1.947	0
30	1.484	23.78
60	1.591	18.28
90	1.519	21.98
120	1.357	30.3
150	1.324	31.99
180	1.187	39.03

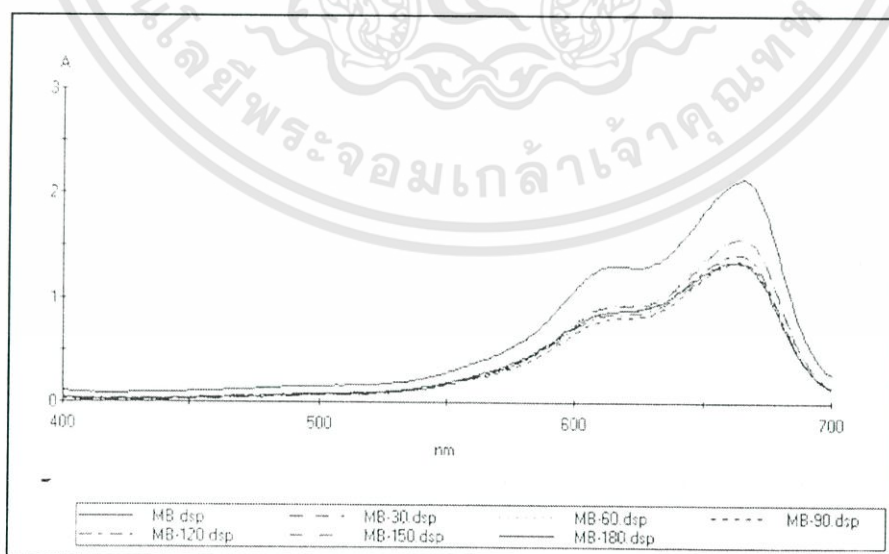


รูปที่ ข-22 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงยูวีวิสิเบิลสเปกตรัมของสีข้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - กราไฟต์ปริมาณ 0.3 มิลลิกรัม ทดสอบซ้ำครั้งที่ 2 ภายใต้การฉายแสงยูวีเมื่อเวลาเปลี่ยนไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-10 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - กราไฟต์ปริมาณ 0.3 มิลลิกรัม ภายใต้การฉายแสงยูวีเมื่อเวลาเปลี่ยนไป ทำการทดสอบซ้ำครั้งที่ 3

เวลา (นาที)	ค่าการดูดซับสีข้อม (A)	% การกำจัดสีข้อม
0	2.136	0
30	1.568	26.59
60	1.568	26.59
90	1.354	36.61
120	1.411	33.94
150	1.335	37.5
180	1.333	37.59

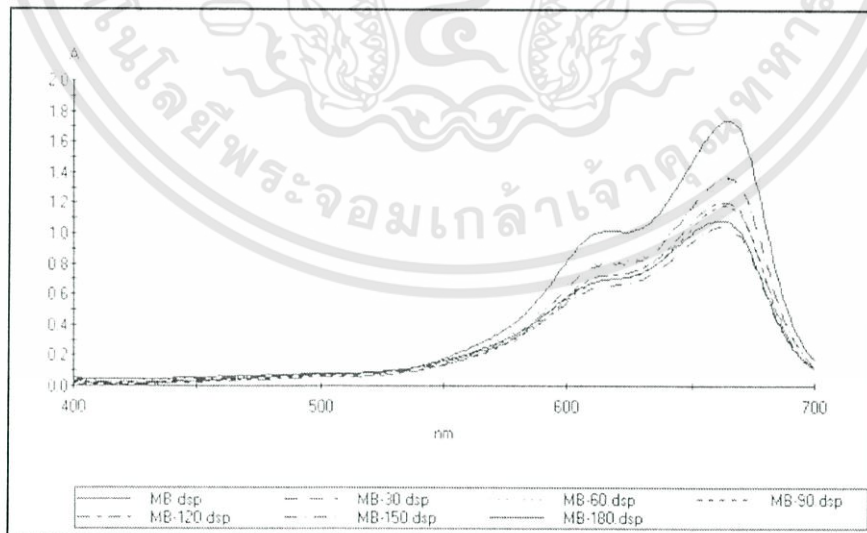


รูปที่ ข-23 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงยูวีวิสซิบิลสเปกตร้าของสีข้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - กราไฟต์ปริมาณ 0.3 มิลลิกรัม ทดสอบซ้ำครั้งที่ 3 ภายใต้การฉายแสงยูวีเมื่อเวลาเปลี่ยนไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-11 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟไฟต์ปริมาณ 0.3 มิลลิกรัม ภายใต้การฉายแสงยูวีเมื่อเวลาเปลี่ยนไป ทำการทดสอบซ้ำครั้งที่ 4

เวลา (นาที)	ค่าการดูดซับสีย้อม (A)	% การกำจัดสีย้อม
0	1.741	0
30	1.377	20.91
60	1.367	21.48
90	1.184	31.99
120	1.208	30.61
150	1.043	40.09
180	1.192	31.53



รูปที่ ข-24 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงยูวีวิสิเบิลสเปกตรัมของสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - กราฟไฟต์ปริมาณ 0.3 มิลลิกรัม ทดสอบซ้ำครั้งที่ 4 ภายใต้การฉายแสงยูวีเมื่อเวลาเปลี่ยนไป

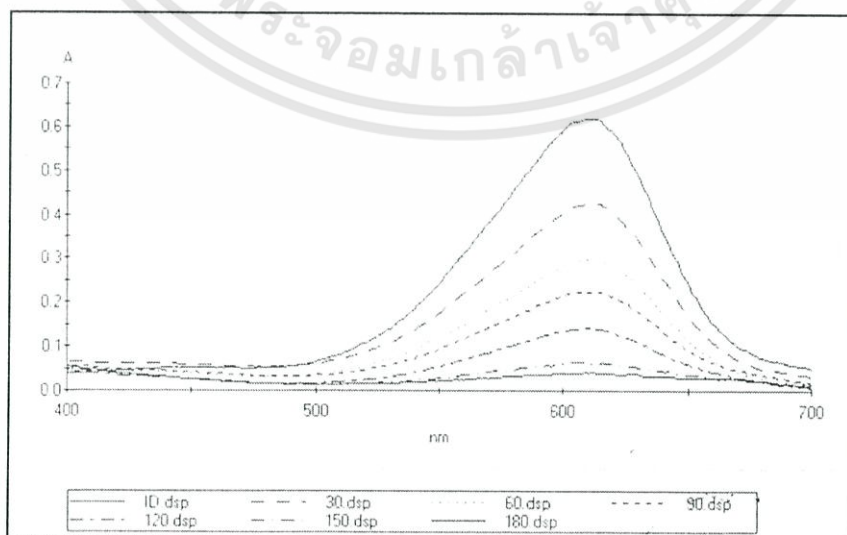
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับและการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มีน

ตารางที่ ข-12 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มีน โดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ภายใต้การฉายแสงยูวีเมื่อเวลาเปลี่ยนไป (ไม่ได้เติบการไฟต์)

เวลา (นาที)	ค่าการดูดซับสีย้อม (A)	% การกำจัดสีย้อม
0	0.617	0
30	0.426	30.96
60	0.299	51.54
90	0.226	63.37
120	0.141	77.15
150	0.064	89.63
180	0.041	93.35

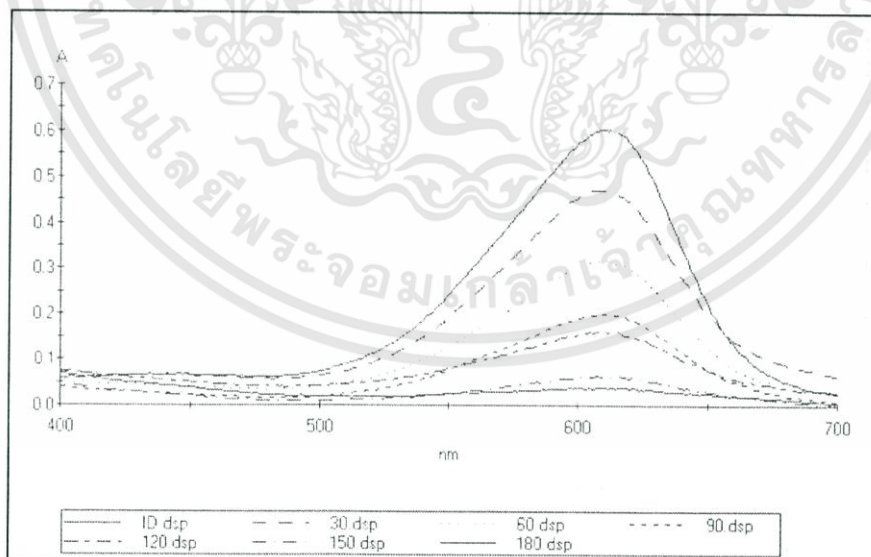
$$\frac{A_0 - A}{A} \times 100 = \% = \frac{0.617 - 0.041}{0.617} \times 100 = 93.35\%$$



เอกสารที่ ข-25 แสดงกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงยูวีวิสเปกตรัมของสีย้อมอินดิโกคาร์มีน โดยเป็นการค้า ไม่ว่าจะใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมได้ ภายใต้การฉายแสงยูวีเมื่อเวลาเปลี่ยนไป เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-13 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีของอินดิโกคาร์มิน โดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - กราไฟต์ปริมาณ 0.1 มิลลิกรัม ภายใต้การฉายแสงยูวีเมื่อเวลาเปลี่ยนไป

เวลา (นาที)	ค่าการดูดซับสีข้อม (A)	% การกำจัดสีข้อม
0	0.604	0
30	0.470	22.19
60	0.317	47.52
90	0.200	66.89
120	0.154	74.50
150	0.065	89.24
180	0.044	92.72

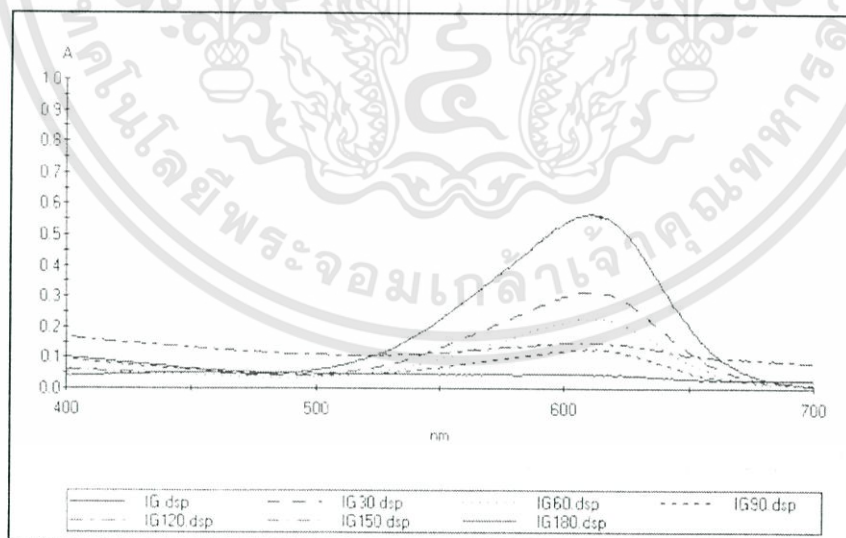


รูปที่ ข-26 แสดงกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงยูวีวิสิเบิลสเปกตรัมของสีข้อมอินดิโกคาร์มิน โดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - กราไฟต์ 0.1 มิลลิกรัม ภายใต้การฉายแสงยูวีเมื่อเวลาเปลี่ยนไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-14 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมอินดิโกคาร์มีน โดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียม ไดออกไซด์ - กราไฟต์ปริมาณ 0.3 มิลลิกรัม ภายใต้การฉายแสงยูวีเมื่อเวลาเปลี่ยนไป

เวลา (นาที)	ค่าการดูดซับสีข้อม (A)	% การกำจัดสีข้อม
0	0.569	0
30	0.317	44.29
60	0.228	59.93
90	0.128	77.5
120	0.15	73.64
150	0.049	91.39
180	0.045	92.09

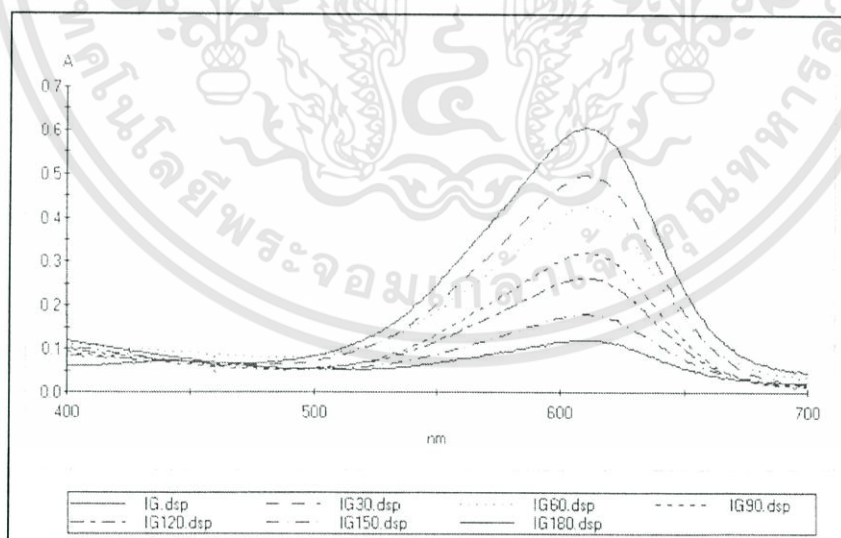


รูปที่ ข-27 แสดงกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงยูวีวิสิเบิลสเปกตร้าของสีข้อมอินดิโกคาร์มีน โดยใช้ แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - กราไฟต์ 0.3 มิลลิกรัม ภายใต้การฉายแสงยูวีเมื่อเวลาเปลี่ยนไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-15 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีของอินดิโกคาร์มิน โดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - กราไฟต์ปริมาณ 0.5 มิลลิกรัม ภายใต้การฉายแสงยูวีเมื่อเวลาเปลี่ยนไป

เวลา (นาที)	ค่าการดูดซับสีของอินดิโกคาร์มิน (A)	% การกำจัดสีของอินดิโกคาร์มิน
0	0.605	0
30	0.497	17.85
60	0.426	29.59
90	0.321	46.94
120	0.263	56.53
150	0.18	70.25
180	0.119	80.33

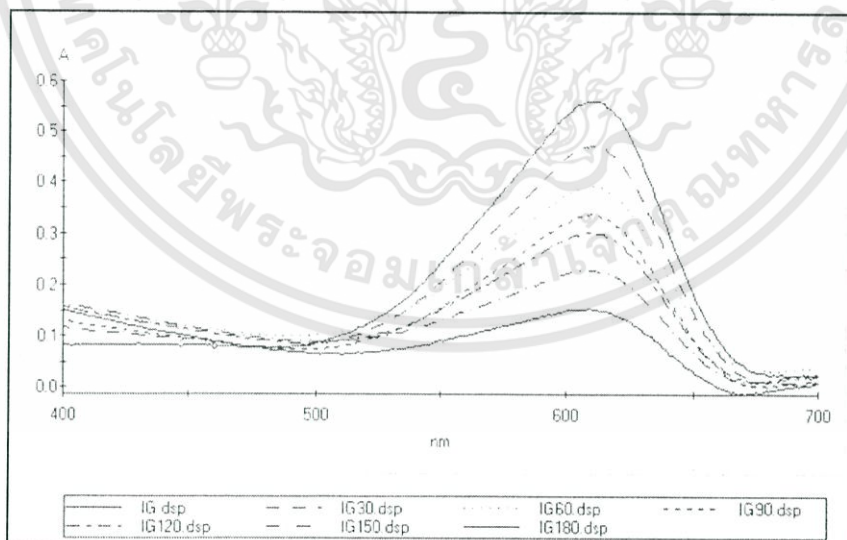


รูปที่ ข-28 แสดงกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงยูวีวิสิเบิลสเปกตรัมของอินดิโกคาร์มิน โดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - กราไฟต์ 0.5 มิลลิกรัม ภายใต้การฉายแสงยูวีเมื่อเวลาเปลี่ยนไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-16 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีของอินดิโกคาร์มิน โดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - กราไฟต์ปริมาณ 1 มิลลิกรัม ภายใต้การฉายแสงยูวีเมื่อเวลาเปลี่ยนไป

เวลา (นาที)	ค่าการดูดซับสี (A)	% การกำจัดสี
0	0.561	0
30	0.471	16.04
60	0.393	29.95
90	0.338	39.75
120	0.301	46.35
150	0.229	59.18
180	0.153	72.72



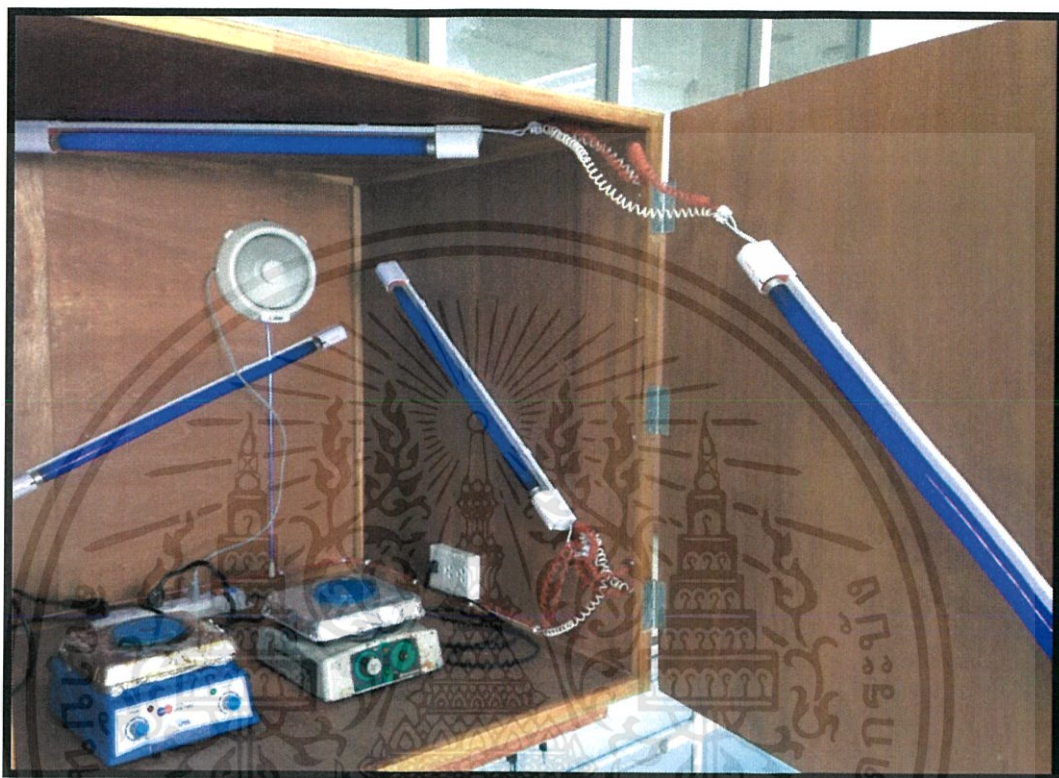
รูปที่ ข-29 แสดงกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงยูวีวิสิเบิลสเปกตรัมของอินดิโกคาร์มิน โดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - กราไฟต์ 1 มิลลิกรัม ภายใต้การฉายแสงยูวีเมื่อเวลาเปลี่ยนไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. Photocatalytic apparatus



รูปที่ ค-1 ตู้ฉายแสงยูวี

The wooden compartment 0.9 m x 0.9 m x 0.9 m

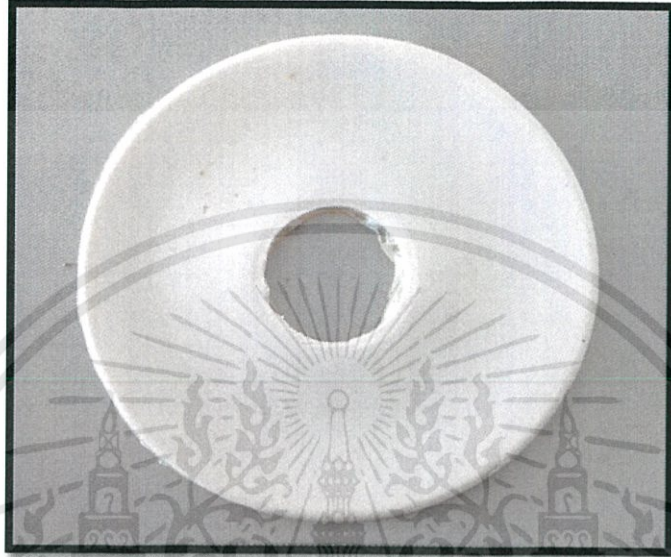
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ลักษณะของแผ่นยาง

(B) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ – กราไฟต์

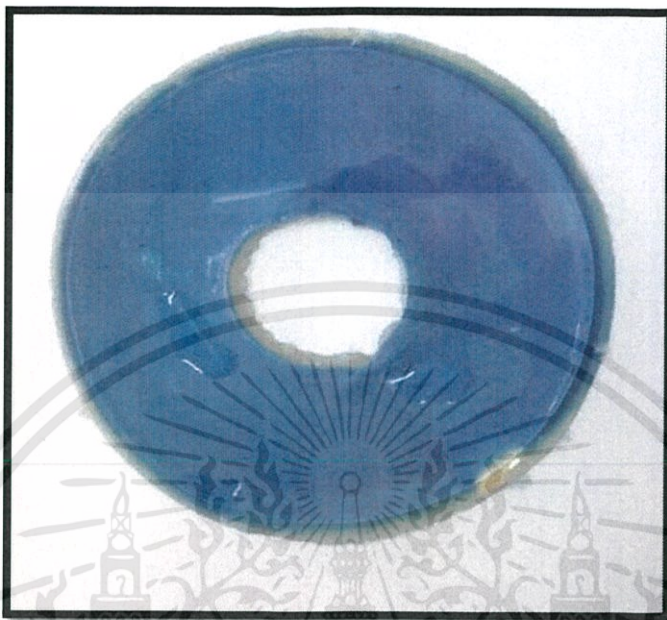


รูปที่ ง-1 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์



รูปที่ ง-2 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - กราไฟต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง-3 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟต์ ที่ผ่านการฉายแสงยูวี



รูปที่ ง-4 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - กราฟต์ 0.3 มิลลิกรัมที่ผ่านการฉายแสงยูวีซ้ำ
เป็นจำนวน 4 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้