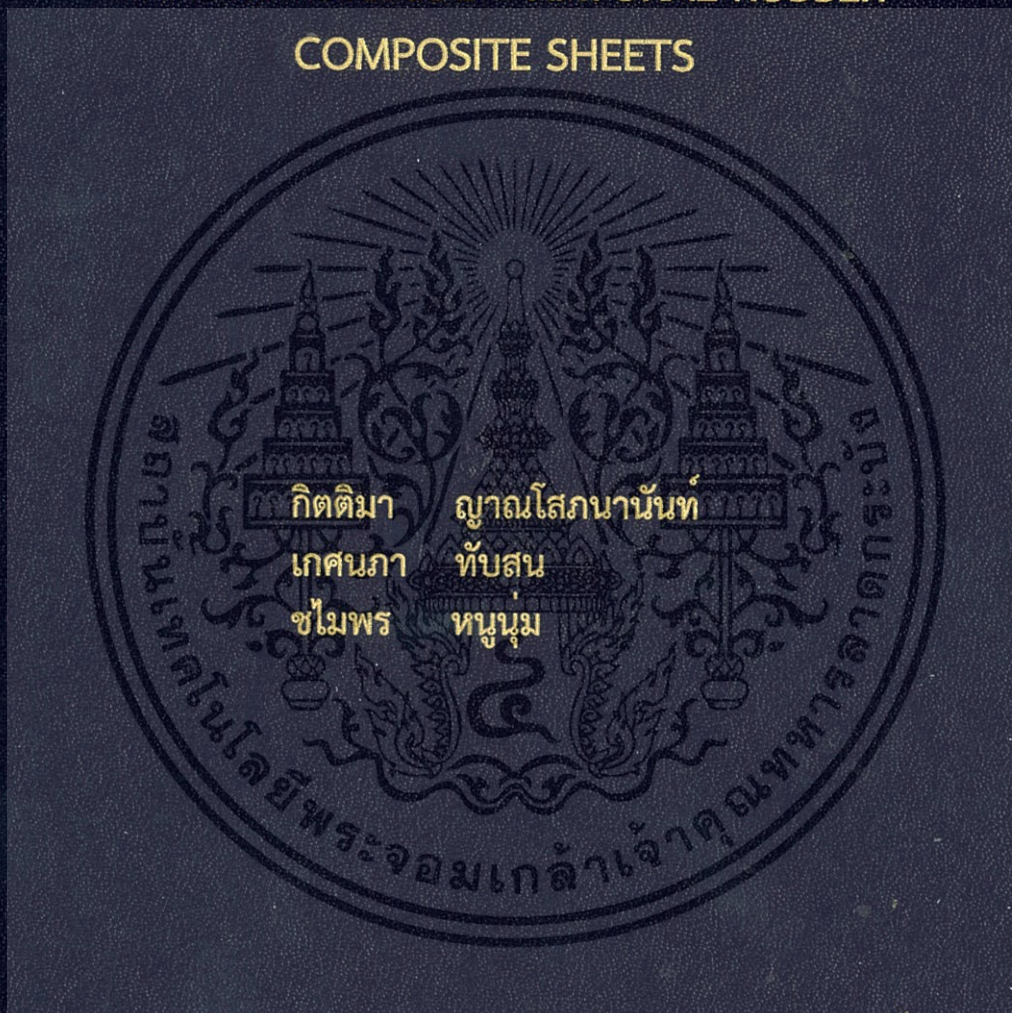


การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์และสมบัติโฟโตคะตะไลติกของ  
แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - กราฟีนออกไซด์

PREPARATION, CHARACTERIZATION AND  
PHOTOCATALYTIC PROPERTIES OF GRAPHENE OXIDE  
TITANIUM DIOXIDE – NATURAL RUBBER  
COMPOSITE SHEETS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2558

การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์และสมบัติโฟโตคะตะไลติกของ  
แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - กราฟีนออกไซด์

PREPARATION, CHARACTERIZATION AND  
PHOTOCATALYTIC PROPERTIES OF GRAPHENE OXIDE  
TITANIUM DIOXIDE - NATURAL RUBBER  
COMPOSITE SHEETS



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน **149311**  
วัน เดือน ปี **12 ก.พ. 2561**

**149311**

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PREPARATION, CHARACTERIZATION AND  
PHOTOCATALYTIC PROPERTIES OF GRAPHENE OXIDE  
TITANIUM DIOXIDE – NATURAL RUBBER  
COMPOSITE SHEETS



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์และสมบัติโฟโตคะตะไลติกของแผ่นยาง  
ธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - กราฟีนออกไซด์  
Preparation, Characterization and Photocatalytic Properties of  
Graphene Oxide - Titanium Dioxide - Natural Rubber Composite  
Sheets

ชื่อนักศึกษา นางสาวกิตติมา ญาณโสภณานันท์ รหัสนักศึกษา 55050576  
นางสาวเกศนภา ทับสน รหัสนักศึกษา 55050581  
นางสาวชไมพร หนูนุ่ม รหัสนักศึกษา 55050616




ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา เคมี

ปีการศึกษา 2558

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมี  
อุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ปานไพลิน สีหาราช ประธานกรรมการ	
ดร.กิตติศักดิ์ ชูจันทร์ กรรมการ	
ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์และสมบัติโฟโตคะตะไลติกของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - กราฟีนออกไซด์		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวกิตติมา	ญาณโสภณานันท์	รหัสนักศึกษา 55050576
	นางสาวเกศนภา	ทับสน	รหัสนักศึกษา 55050581
	นางสาวชไมพร	หนู่ม	รหัสนักศึกษา 55050616
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)		
ภาควิชา	เคมี		
คณะ	วิทยาศาสตร์		
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)		
ปีการศึกษา	2558		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์		

### บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษนี้ก็คือเพื่อศึกษาการเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์และสมบัติโฟโตคะตะไลติกของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ รวมทั้งยังได้มีการศึกษาสมบัติเชิงความร้อนและสมบัติเชิงกล ในส่วนของการเตรียมแผ่นยางผสมเหล่านี้สามารถเตรียมได้ง่าย ๆ ด้วยวิธีการผสมโดยตรงภายใต้การคงที่ปริมาณสารแขวนลอยไทเทเนียม-ไดออกไซด์และน้ำยางธรรมชาติ (60% HA) ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ จากนั้นนำแผ่นยางผสมที่เตรียมได้นำไปพิสูจน์เอกลักษณ์โดยใช้เทคนิค การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) พูเรียทรานฟอร์มอินฟราเรด (FT-IR) รามาน (Raman) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุภายใน (EDS) และการวิเคราะห์เชิงความร้อน (TGA) ผลปรากฏว่ารูปแบบโครงสร้างผลึกและหมู่ฟังก์ชันของแผ่นยางผสมเหล่านี้จะสอดคล้องกับแผ่นยางธรรมชาติและไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ตั้งต้น ในขณะที่ไม่สามารถสังเกตเห็นเอกลักษณ์ของกราฟีนออกไซด์ได้ด้วยเทคนิคเดียวกันนี้ อย่างไรก็ตามพีคเอกลักษณ์ของกราฟีนออกไซด์สามารถสังเกตเห็นและยืนยันด้วยรามานสเปกโตรสโคปี ผลจากการศึกษาด้วย SEM และ EDS พบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาพื้นผิวของแผ่นยางผสมเหล่านี้จะมีความขรุขระเพิ่มขึ้นจากการปกคลุมของอนุภาคกราฟีนออกไซด์ ในขณะที่อนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถกระจายตัวได้เป็นอย่างดีบนพื้นผิวของแผ่นยางผสมเมื่อเพิ่มปริมาณกราฟีนออกไซด์ที่เติมลงไป จากการทดสอบแรงดึงพบว่าสมบัติเชิงกล (ค่ายังโมดูลัส ค่าความแข็ง ค่าแรงดึง ณ จุดขาด) ของแผ่นยางผสมจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของกราฟีนออกไซด์ที่เติมลงไป นอกจากนี้สมบัติโฟโตคะตะไลติกของตัวอย่างแผ่นยางผสมถูกประเมินได้จากการกำจัดสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู (MB) ภายใต้การฉายแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัลตราไวโอเล็ต (UV) และแสงอาทิตย์ จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าความว่องไวของปฏิกิริยาโฟโต-คะตะไลติกของแผ่นยางผสมที่ถูกเตรียมได้จากการเติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณ 0.0118 wt.% จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูสูงที่สุดเมื่อเทียบกับแผ่นยางอื่น ๆ ทั้งภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ตและแสงอาทิตย์ ทั้งนี้อาจจะมีผลมาจากผลเสริมกันที่ดีของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียม-ไดออกไซด์และตัวดูดซับกราฟีนออกไซด์ ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการแยกของคู่อิเล็กตรอน-โฮลและยังช่วยปรับปรุงพื้นผิวของแผ่นยางผสมนี้ นอกจากนี้สิ่งที่เพิ่มเติมเข้ามาในงานวิจัยนี้ยังได้มีการศึกษาประสิทธิภาพการนำแผ่นยางผสมมาใช้งานซ้ำ ผลปรากฏว่าแผ่นยางผสมนี้สามารถใช้งานซ้ำและนำกลับมาใช้งานใหม่ในการกำจัดสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตได้

คำสำคัญ : กราฟีนออกไซด์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ น้ำยารีดอกซ์ แผ่นยางธรรมชาติผสม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Title</b>	Preparation, Characterization and Photocatalytic Properties of Graphene Oxide - Titanium Dioxide - Natural Rubber Composite Sheets		
<b>Students</b>	Miss Kittima	Yansopananan	Student ID 55050576
	Miss Ketnapa	Thubson	Student ID 55050581
	Miss Chamaiporn	Noonum	Student ID 55050616
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)		
<b>Department</b>	Chemistry		
<b>Faculty</b>	Science		
<b>University</b>	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
<b>Academic Year</b>	2015		
<b>Advisor</b>	Dr.Chaval Sriwong		

### Abstract

The objective of this special project is to study the preparation, characterization and photocatalytic properties of graphene oxide-titanium dioxide-natural rubber composite sheets, including the thermal and mechanical properties were also investigated. In the preparation, these rubber composite sheets were easily prepared by directly mixing method based on the use of fixed titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) suspension and natural rubber latex (60% HA) contents with the varying amounts of graphene oxide (GO) suspension. Then, the prepared rubber composite sheets were characterized by using X-ray diffraction (XRD), Fourier-transformed infrared spectroscopy (FT-IR), Raman spectroscopy, scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive X-ray spectrometer (EDS) and thermogravimetric analysis (TGA) techniques. The results showed that the crystalline phases and functional groups of these sheets are corresponding to pristine natural rubber and TiO<sub>2</sub> (Degussa P25), whereas all of the GO characteristic peaks are not observed. Nevertheless, the characteristic peaks of GO in the rubber composite sheets could be seen and confirmed by Raman spectroscopy technique. From the SEM and EDS results, the surface roughness morphologies of these sheets were increased by covering of GO particles, while the TiO<sub>2</sub> particles could be well dispersed on the sheet surface when increasing amount of GO loading. Form the tensile test found that the mechanical

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

properties (young's modulus, stiffness and load at break) of the rubber composite sheets could be increased with the increasing amounts of GO. Moreover, the photocatalytic properties of all composite sheet samples were evaluated by photodegrading of methylene blue (MB) dye solution under ultra-violet (UV) light and sunlight irradiation. The results indicated that the photocatalytic activity of the composite sheet prepared with 1.67 wt% GO loading has the highest efficiency for the photodegradation of MB dye than the other sheets under both UV and sunlight irradiation. This may be due to the fact that it is relatively with the synergistic effect of well-combined TiO<sub>2</sub> catalyst and GO adsorbent, enhancing electron-hole pair separation and improving surface area of this composite sheet. Additional, the efficiency of the rubber composite sheet on the repeatedly used was also studied. The results showed that the rubber composite sheet could be repeatedly used and reused on the photodegradation of MB dye solution under UV irradiation.

**Keywords :** Graphene oxide, Titanium dioxide, Natural rubber latex, Natural rubber composite

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ เป็นอย่างยิ่งที่กรุณาให้คำปรึกษาและข้อแนะนำต่างๆที่เกี่ยวกับงานวิจัยอีกทั้งยังคอยติดตามผลโครงการพิเศษนี้มาโดยตลอด จะสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ปานไพลิน สีหาราช และดร.กิตติศักดิ์ ชูจันทร์ คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษที่กรุณาให้คำแนะนำ และให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์อีกทั้งยังช่วยตรวจทาน และแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คุณปราณี บุญวัฒน์ และ คุณสุพจน์ ศิวาคม รวมทั้งเจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์ภาควิชาเคมีที่คอยให้คำแนะนำความรู้เกี่ยวกับการใช้เครื่องวัดต่างๆ ที่คอยอำนวยความสะดวก และให้ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการใช้สารเคมี อุปกรณ์ และ ห้องปฏิบัติการในการทดลอง

ขอขอบคุณเพื่อนๆทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือ ร่วมแสดงความคิดเห็นและให้ความช่วยเหลือในทุกๆด้านจนสามารถทำโครงการพิเศษนี้สำเร็จมาได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และบุคคลในครอบครัวที่คอยสอบถามและคอยให้กำลังใจจนการทำงานพิเศษครั้งนี้สามารถสำเร็จมาได้ด้วยดี

นอกจากนี้ยังมีบุคคลอีกมากมายที่มีส่วนในการช่วยเหลือแต่อาจจะยังไม่ได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ ซึ่งคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

กิตติมา ญาณโสภณานันท์  
เกศนภา ทับสน  
ชไมพร หนูนุ่ม

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ณ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 ปฏิกริยาโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic Process).....	4
2.1.1 ความหมายของปฏิกริยาโฟโตคะตะไลติก.....	4
2.1.2 หลักการของโฟโตคะตะไลติก.....	4
2.1.3 กระบวนการโฟโตคะตะไลติก.....	5
2.1.4 ชนิดของโฟโตคะตะไลติก.....	6
2.1.5 ชนิดของตัวเร่งปฏิกริยา.....	6
2.1.6 กลไกของปฏิกริยาโฟโตคะตะไลติก.....	7
2.1.7 ปัจจัยที่ส่งผลต่อปฏิกริยาโฟโตคะตะไลติก.....	9
2.1.8 พลังงานแสง.....	10
2.2 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide, TiO <sub>2</sub> ).....	11
2.2.1 สมบัติทางกายภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO <sub>2</sub> ).....	11
2.2.2 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	12
2.2.3 สมบัติทางไฟฟ้าของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	13
2.2.4 ความสามารถในการเกิดปฏิกริยาโฟโตคะตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	14
2.2.5 ประโยชน์ของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	16
2.3 ยางธรรมชาติ.....	17
2.3.1 ข้อมูลเบื้องต้นของยางธรรมชาติ.....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.2 โครงสร้างของยางธรรมชาติ .....	17
2.3.3 สมบัติของยางธรรมชาติ .....	18
2.3.4 ข้อดีของยางธรรมชาติ.....	18
2.3.5 ข้อดีข้อเสียของยางธรรมชาติในเรื่องโฟโตคะตะไลติก.....	19
2.4 กราฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide).....	19
2.4.1 การสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ .....	20
2.5 สีย้อม .....	20
2.6 เมทิลีนบลู .....	22
2.6.1 กลไกการสลายตัวของเมทิลีนบลูในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก.....	22
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....</b>	<b>25</b>
3.1 สารเคมี.....	25
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	25
3.3 วิธีการทดลอง.....	26
3.3.1 การเตรียมสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์.....	26
3.3.2 การเตรียมแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์	27
3.3.3 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ .....	29
3.3.3.1 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู ( $1.50 \times 10^{-5}$ M) ด้วยแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ในที่มืด.....	29
3.3.3.2 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet light).....	29
3.3.3.3 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู ( $2.50 \times 10^{-5}$ M) ด้วยแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ในที่มืด.....	30
3.3.3.4 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ ภายใต้แสงอาทิตย์ .....	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.3.5 การศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานซ้ำของแผ่นยางธรรมชาติ ไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ ภายใต้แสง อัลตราไวโอเล็ต .....	30
3.3.4 การวิเคราะห์สมบัติของสารตั้งต้น และแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียม- ไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ .....	31
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล .....</b>	<b>34</b>
4.1 การศึกษาเอกลักษณ์ของกราฟีนออกไซด์ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโต มิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer).....	34
4.2 การศึกษาเอกลักษณ์ของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และ กราฟีนออกไซด์.....	36
4.2.1 การตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์และสารอินทรีย์ด้วยเทคนิค การดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (FTIR Spectroscopy) .....	37
4.2.2 การตรวจสอบการกระเจิงแสงของโมเลกุลด้วยด้วยเทคนิครามาน (Raman Spectroscopy).....	39
4.2.3 การตรวจสอบเอกลักษณ์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X- Ray Diffraction; XRD) .....	41
4.2.4 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM).....	43
4.2.5 การตรวจสอบหาธาตุองค์ประกอบภายในตัวอย่าง (Energy Dispersive x- ray Spectroscopy; EDS).....	45
4.3 การศึกษาเอกลักษณ์ของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และ กราฟีนออกไซด์ทางด้านเชิงกลและเชิงความร้อน .....	47
4.3.1 การทดสอบแรงดึงของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และ กราฟีนออกไซด์ (Tensile Test) .....	47
4.3.2 การศึกษาการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis;TGA).....	48
4.4 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์.....	50
4.4.1 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู ( $1.50 \times 10^{-5}$ M) ใน ที่มีดของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ .	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอัลตรา- ไวโอเล็ตของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีน- ออกไซด์.....	52
4.4.3 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู ( $2.50 \times 10^{-5}$ M) ใน ที่มีดของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ .	55
4.4.4 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอาทิตย์ของ แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์.....	57
4.4.5 ผลการทดสอบการใช้งานซ้ำของแผ่นยางธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์ และกราฟีนออกไซด์ ภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต .....	60
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b> .....	<b>62</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	62
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	63
เอกสารอ้างอิง.....	64
ภาคผนวก.....	67
ภาคผนวก ก.....	68
ภาคผนวก ข.....	70
ภาคผนวก ค.....	78
ภาคผนวก ง.....	80
ภาคผนวก จ.....	83

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าความยาวคลื่นชนิดต่าง ๆ .....	10
2.2 ข้อมูลโดยทั่วไปของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	12
3.1 แสดงอัตราส่วนระหว่างสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์และน้ำกลั่นที่เติมในแผ่นยาง ธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	27
4.1 แสดงหมู่ฟังก์ชันของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และแผ่นยางธรรมชาติ .....	37
4.2 แสดง % ธาตุองค์ประกอบของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีน- ออกไซด์.....	46
4.3 แสดงค่าการทดสอบการดึงแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีน ออกไซด์ในปริมาณต่าง ๆ.....	47
4.4 แสดงอุณหภูมิที่สลายตัวและน้ำหนักที่สูญเสียไปของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียม- ไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ .....	49
4.5 แสดงค่าการประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู ( $1.50 \times 10^{-5}$ M) ในที่มีดของแผ่น ยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกัน .....	50
4.6 แสดงค่าการประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ตของแผ่น ยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกัน .....	52
4.7 แสดงค่าการประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู ( $2.50 \times 10^{-5}$ M) ในที่มีดของแผ่น ยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนในปริมาณที่ต่างกัน.....	55
4.8 แสดงค่าการประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอาทิตย์ของแผ่นยางผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกัน .....	57
จ-1 ค่าการดูดกลืนแสงยูวีและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ตของแผ่น ยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0118 wt.% .....	84
จ-2 ค่าการดูดกลืนแสงยูวีและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลีนภายใต้แสงอาทิตย์บลูของแผ่นยาง ธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0118 wt.% .....	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 พลังงานของการเกิดปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาของสารอินทรีย์ ...	5
2.2 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกบนสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	7
2.3 ผงไทเทเนียมไดออกไซด์.....	11
2.4 โครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้ง 3 ชนิด .....	13
2.5 แถบพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์เฟส รูไทล์ และ อนาเทส.....	13
2.6 แถบพลังงานที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเจืออะตอมของธาตุหมู่อื่นลงไป .....	14
2.7 กลไกของการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	15
2.8 สูตรโครงสร้างทางธรรมชาติ .....	18
2.9 แสดงสารแขวนลอยและโครงสร้างของกราฟีนออกไซด์.....	19
2.10 ขั้นตอนการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ (1) ทาปฏิกิริยาออกซิเดชันได้แกรไฟต์ออกไซด์ (2) การใช้คลื่นความถี่สูง (Sonication) ในน้ำทำให้ชั้นของแกรไฟต์ออกไซด์หลุดลอก ออกเป็นแผ่นกราฟีนออกไซด์.....	20
2.11 โครงสร้างของเมทิลีนบลู (Methylene blue; MB) .....	22
2.12 กลไกการสลายตัวของเมทิลีนบลู (Methylene Blue) .....	23
3.1 สารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ ความเข้มข้น 1.00 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร.....	26
3.2 แสดงแผนผังการเตรียมแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ ..	28
4.1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของกราฟีนออกไซด์ (GO).....	34
4.2 ระดับพลังงานของการเปลี่ยนแปลงอิเล็กตรอน.....	35
4.3 โครงสร้างกราฟีนออกไซด์.....	35
4.4 แสดงภาพถ่ายของ (a) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (b) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0068 wt.% (c) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0118 wt.% (d) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0174 wt.% .....	36
4.5 FT-IR spectra ของ (a) แผ่นยางธรรมชาติ (b) ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ P25.....	37
4.6 FT-IR spectra ของ (a) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (b) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0022 wt.% (c) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0068 wt.% (d) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0118 wt.% (e) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0174 wt.% .....	38
4.7 รูปแบบรามานของไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 รูปแบบรามานของ (a) แผ่นยางธรรมชาติ (b) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (c) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0068 wt.% (d) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0118 wt.% (e) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0174 wt.%.....	40
4.9 รูปแบบ XRD ของ (a) ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ และ (b) แผ่นยางธรรมชาติ P25.....	41
4.10 รูปแบบ XRD ของ (a) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (b) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0022 wt.% (c) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0068 wt.% (d) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0118 wt.% (e) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0174 wt.%.....	42
4.11 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM ของแผ่นยางธรรมชาติ (a) กำลังขยาย X150 เท่า และ (b) กำลังขยาย X2000 เท่า.....	43
4.12 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM กำลังขยาย X150 เท่า และ X1000 เท่า ของ (a) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (b) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0022 wt.% (c) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0068 wt.% (d) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0118 wt.% (e) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0174 wt.%.....	45
4.13 แสดง EDX Spectrum ของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์.....	45
4.14 แสดง EDX Spectrum ของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีน- ออกไซด์ 0.0174 wt.% .....	46
4.15 แสดงผลการวิเคราะห์จาก TGA ของแผ่นยางธรรมชาติ แผ่นยางธรรมชาติผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์ และแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีน ออกไซด์ปริมาณ 0.0068 0.0118 และ 0.0174 wt.% .....	48
4.16 กราฟเส้นแสดงการเปรียบเทียบค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มีดของแผ่นยาง ธรรมชาติผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกัน .....	51
4.17 กราฟแท่งแสดงการเปรียบเทียบค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มีดของแผ่นยาง ธรรมชาติผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกัน .....	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 กราฟเส้นแสดงการเปรียบเทียบค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ตของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกัน .....	53
4.19 กราฟแท่งแสดงการเปรียบเทียบค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ตของแผ่นยางธรรมชาติผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกัน .....	53
4.20 กราฟแท่งแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) และภายในที่มีด .....	54
4.21 กราฟเส้นแสดงการเปรียบเทียบค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มีดของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกัน.....	56
4.22 กราฟแท่งแสดงการเปรียบเทียบค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มีดของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกัน เมื่อเวลาผ่านไป 75 นาที .....	56
4.23 กราฟเส้นแสดงการเปรียบเทียบค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอาทิตย์ของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกัน	58
4.24 กราฟแท่งแสดงการเปรียบเทียบค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอาทิตย์ของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกัน เมื่อเวลาผ่านไป 75 นาที.....	58
4.25 กราฟแท่งแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอาทิตย์ และภายในที่มีด .....	59
4.26 แสดงค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ตของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติม กราฟีนออกไซด์ 0.0118 wt.% ในการนำมาใช้งานซ้ำ.....	60
4.27 แสดงแบบจำลองการถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปยังแผ่นกราฟีนออกไซด์.....	61
ข-1 แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ด้านหน้า (ด้านที่ใช้งาน).....	70
ข-2 แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ด้านหลัง .....	70
ข-3 แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0022 wt.% ด้านหน้า (ด้านที่ใช้งาน) .....	71
ข-4 แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0022 wt.% ด้านหลัง.....	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข-5 แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0068 wt.% ด้านหน้า (ด้านที่ใช้งาน).....	72
ข-6 แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0068 wt.% ด้านหลัง.....	72
ข-7 แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0118 wt.% ด้านหน้า (ด้านที่ใช้งาน).....	73
ข-8 แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0118 wt.% ด้านหลัง.....	73
ข-9 แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0174 wt.% ด้านหน้า (ด้านที่ใช้งาน).....	74
ข-10 แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0174 wt.% ด้านหลัง.....	74
ข-11 แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	75
ข-12 แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0022 wt.%.....	75
ข-13 แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0068 wt.%.....	76
ข-14 แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0118 wt.%.....	76
ข-15 แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0174 wt.%.....	77
ค-1 แสดง mapping ของธาตุที่พบในแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์.....	78
ค-2 รูป mapping ของธาตุที่พบในแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีน- ออกไซด์ 0.0174 wt.% .....	79
ง-1 รูปแบบ TGA ของ แผ่นยางธรรมชาติ .....	80
ง-2 รูปแบบ TGA ของ แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์.....	80
ง-3 รูปแบบ TGA ของ แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0068 wt.%.....	81
ง-4 รูปแบบ TGA ของ แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0118 wt.%.....	81
ง-5 รูปแบบ TGA ของ แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0174 wt.%.....	82
จ-1 แสดงสีของสีย้อมเมทิลลีนบลูเมื่อผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้แสง อัลตราไวโอเล็ตของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0118 wt.%.....	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาดเห็นาเบเซบระเเยชนด้านกาการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
จ-2 แสดงค่าการดูดกลืนแสงภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ตของแผ่นยางธรรมชาติผสม.....	84
จ-3 แสดงสีของสีย้อมเมทิลีนบลูเมื่อผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้แสงอาทิตย์ของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0118 wt.%.....	85
จ-4 แสดงค่าการดูดกลืนแสงภายใต้แสงอาทิตย์ของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียม-ไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0118 wt.% .....	86



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำย่อ/คำสำคัญ

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
TiO <sub>2</sub>	ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide)
Eg	แถบช่องว่างพลังงาน (Energy Gap)
e <sup>-</sup> <sub>c.b</sub>	อิเล็กตรอนที่ชั้นของคอนดักชันแบนด์ (Electron)
h <sup>+</sup> <sub>v.b</sub>	ช่องว่างที่ชั้นของเวเลนส์แบนด์ (Hole)
O <sub>2</sub>	ออกซิเจนไดออกไซด์ (Oxygen dioxide)
CO <sub>2</sub>	คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide)
H <sub>2</sub> O	น้ำ
GO	กราฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide)
UV	อัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet)
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogenperoxide)
Cu	ทองแดง (Copper)
Cr	โครเมียม (Chromium)
Ni	นิกเกิล (Nickel)
CdS	แคดเมียมซัลไฟด์ (Cadmium Sulfide)
ZnO	สังกะสีออกไซด์ (Zinc Oxide)
e <sup>-</sup>	อิเล็กตรอน (Electron)
E	พลังงานควอนตัม (Quantu Energy)
h	ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's Contant)
v	ความถี่ของคลื่นแสง (Frequency)
OH <sup>-</sup>	ไฮดรอกไซด์ไอออน (Hydroxide Ion)
Cl <sup>-</sup>	คลอไรด์ไอออน (Cloride Ion)
F <sup>-</sup>	ฟลูออไรด์ไอออน (Floride Ion)
OH <sup>•</sup>	ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl Radical)
H <sup>+</sup>	ไฮโดรเจนไอออน (Hydrogen Ion)
O <sup>•</sup>	ออกไซด์เรดิคัล (Oxide Radical)
OH <sub>2</sub> <sup>•</sup>	เปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Perhydroxyl Radical)
O <sub>2</sub> <sup>•-</sup>	ซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล (Superoxide Ion Radical)
TiCl <sub>4</sub>	ไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ (Titanium tetrachloride)
CFC	คลอโรฟลูออโรคาร์บอน (Chlorofluorocarbon)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำย่อ/คำสำคัญ (ต่อ)

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
$C_5H_8$	ไอโซพรีน (Isoprene)
MB	เมทิลีนบลู (Methylene Blue )
conc. $H_2SO_4$	ซัลฟิวริกเข้มข้น (Sulfuric acid)
$\lambda$	ความยาวคลื่น (Wave length)
d	ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก (Distance)
NR	ยางธรรมชาติ (natural Rubber)
NR+TiO <sub>2</sub>	ยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์
NR+TiO <sub>2</sub> +GO	ยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์
mg	มิลลิกรัม (milligram)
mL	มิลลิลิตร (milliliter)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมจำนวนมากมีการนำสีย้อมสังเคราะห์รวมทั้งสารเคมีต่าง ๆ มาใช้งาน เช่น อุตสาหกรรมฟอกย้อม สิ่งทอ กระดาษ และ หมึกพิมพ์ เป็นต้น น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมเหล่านี้จึงมีปริมาณสีย้อมปนเปื้อนสูง ซึ่งหากไม่มีการบำบัดก่อนจะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ จะเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้ระบบนิเวศขาดความสมดุล และเกิดความเสื่อมโทรม อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าทางด้านโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ มีวิธีการกำจัดสารปนเปื้อนหรือกระบวนการกำจัดน้ำทิ้งหลากหลายวิธี เช่น กระบวนการทางกายภาพ กระบวนการทางเคมี และกระบวนการทางชีวภาพ [1] แต่พบว่ากระบวนการเหล่านี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารพิษที่มีโครงสร้างซับซ้อนและมีเสถียรภาพสูงได้ไม่ดี การศึกษากระบวนการอื่นในการกำจัดสีย้อมให้มีประสิทธิภาพได้ดีกว่า จึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจ

กระบวนการโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic process) เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการกำจัด หรือ สลายสารพิษต่าง ๆ ในสิ่งแวดล้อม โดยใช้วัสดุกึ่งตัวนำ (Semiconductor material) มาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) โดยหลักการของกระบวนการนี้ คือ การให้พลังงานแสงที่มากกว่าหรือเท่ากับค่าแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap energy;  $E_g$ ) ของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้เกิดการกระตุ้นอิเล็กตรอนจากแถบอิเล็กตรอนชั้นนอก (Valence band; VB) ไปยังแถบตัวนำ (Conduction band; CB) ทำให้เกิดเป็นคู่  $e_{cb}^- - h_{vb}^+$  ขึ้น ซึ่งเป็นตัวออกซิไดส์และตัวรีดิวซ์ที่แรง เมื่อสารพิษต่าง ๆ น้ำ หรือ ก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ ) ที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาก็จะเกิดปฏิกิริยาเรดอกซ์กับ  $e_{cb}^- - h_{vb}^+$  ทำให้สารพิษสลายตัว และสุดท้ายจะเกิดเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) และน้ำ ( $H_2O$ ) ซึ่งเป็นสารที่ไม่เป็นมลพิษ [2]

ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $TiO_2$ ) ถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารที่มีความเสถียรต่อปฏิกิริยาเคมี ไม่มีความเป็นพิษ มีราคาไม่แพง [3] และที่สำคัญ คือไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำประเภท N-type ที่มีสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดี โดยผ่านกระบวนการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต (แสงยูวี) ฉายลงไปยังไทเทเนียมไดออกไซด์ จะเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกที่สามารถกำจัดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำได้ [4] อย่างไรก็ตามการนำไทเทเนียมไดออกไซด์มาใช้งานนั้นมักอยู่ในรูปแบบผงจึงมีข้อเสียอยู่หลายประการด้วยกัน เช่น อาจจะมีผงฟุ้งในอากาศ ส่งผลให้เกิดอันตรายต่อระบบหายใจ ยากต่อการแยกออกจากระบบบำบัดหลังจากการใช้งานหรืออาจเป็นสารแขวนลอยไหลไปกับน้ำ ส่งผลต่อระบบนิเวศและเกิดเป็นมลพิษทางน้ำ อีกทั้งยังยากที่จะนำไทเทเนียมไดออกไซด์กลับมาใช้ใหม่หรือใช้ซ้ำ [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นการเตรียมให้อยู่ในลักษณะแบบแผ่นหรือแบบฟิล์มบาง จึงเป็นหนึ่งในทางเลือกที่แก้ปัญหาดังกล่าวมาข้างต้น

ยางธรรมชาติ (Natural rubber; NR) มีชื่อทางเคมี คือ *cis*-1,4-polyisoprene เป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นยางจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน เป็นต้น โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (Amorphous) แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยืด มันจึงสามารถเกิดผลึก (Crystallization) ได้ การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (Low temperature crystallization) จะทำให้ยางแข็งมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น ยางก็จะอ่อนลงและกลับสู่สภาพเดิม ในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (Strain induced crystallization) ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดี นั่นคือยางจะมีความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance) และความทนทานต่อการขัดสี (Abrasion resistance) สูง [6]

กราฟีนออกไซด์ (Graphene oxide) เป็นอีกรูปหนึ่งของคาร์บอนซึ่งอะตอมคาร์บอนจะเรียงตัวในรูปแบบหกเหลี่ยมเรียงเป็นแผ่นบาง ๆ ที่มีความหนาเพียงอะตอมเดียวของแกรไฟต์ (หนาเพียง 0.345 nm) แผ่นกราฟีนออกไซด์เป็นวัสดุที่มีค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus) สูง มีความแข็งแรงมาก น้ำหนักเบา นำความร้อนได้ รวมทั้งยังมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง [7] ซึ่งในงานวิจัยนี้มีความสนใจที่จะนำกราฟีนออกไซด์มาใช้เป็นสารเติมแต่ง (Filler agent) เพื่อช่วยเพิ่มสมบัติการดูดซับ และความสามารถในกระบวนการกำจัดสีของไทเทเนียมไดออกไซด์โดยผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติกให้ดียิ่งขึ้น อีกทั้งยังอาจจะช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลในเรื่องความแข็งแรงของแผ่นยางธรรมชาติผสมให้มีความคงทนมากขึ้น และในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาและเตรียมแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ เพื่อนำไปกำจัดสี้อมโดยผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติก นอกจากนั้นยังได้ศึกษาคุณลักษณะเฉพาะ สมบัติเชิงความร้อน และสมบัติเชิงกลของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของการเติมกราฟีนออกไซด์ต่อแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์
2. เพื่อศึกษาและพิสูจน์เอกลักษณ์ของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ ด้วยเทคนิค XRD SEM FT-IR Raman spectroscopy และ EDS
3. เพื่อศึกษาสมบัติเชิงความร้อนและสมบัติเชิงกลของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์
4. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ในการกำจัดสี้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) และแสงอาทิตย์ (Sun light)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการเตรียมแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ และกราฟีนออกไซด์
2. เตรียมแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ โดยศึกษาผลของการเติมสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ (ความเข้มข้น 1 mg/mL) ที่แตกต่างกัน ได้แก่ 0.0000 0.0022 0.0068 0.0118 และ 0.0174 wt. %
3. พิสูจน์เอกลักษณ์ของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ ด้วยเทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ XRD SEM FT-IR Raman spectroscopy และ EDS
4. ศึกษาสมบัติเชิงความร้อน และสมบัติเชิงกลด้วยเทคนิค TGA และ Tensile Test
5. ศึกษาประสิทธิภาพของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ในการกำจัดสีย้อม เมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) และแสงอาทิตย์ (Sun light) ด้วยเทคนิค UV-Visible spectroscopy

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ความรู้เกี่ยวกับการเตรียมแผ่นยางธรรมชาติที่ผสมด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์
2. สามารถนำแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์มาใช้ในการกำจัดสีย้อมที่ปนเปื้อนในน้ำได้
3. สามารถเพิ่มมูลค่าให้กับน้ำยางธรรมชาติกลายเป็นแผ่นยางที่กำจัดสีย้อมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ปฏิริยาโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic Process)

#### 2.1.1 ความหมายของปฏิริยาโฟโตคะตะไลติก

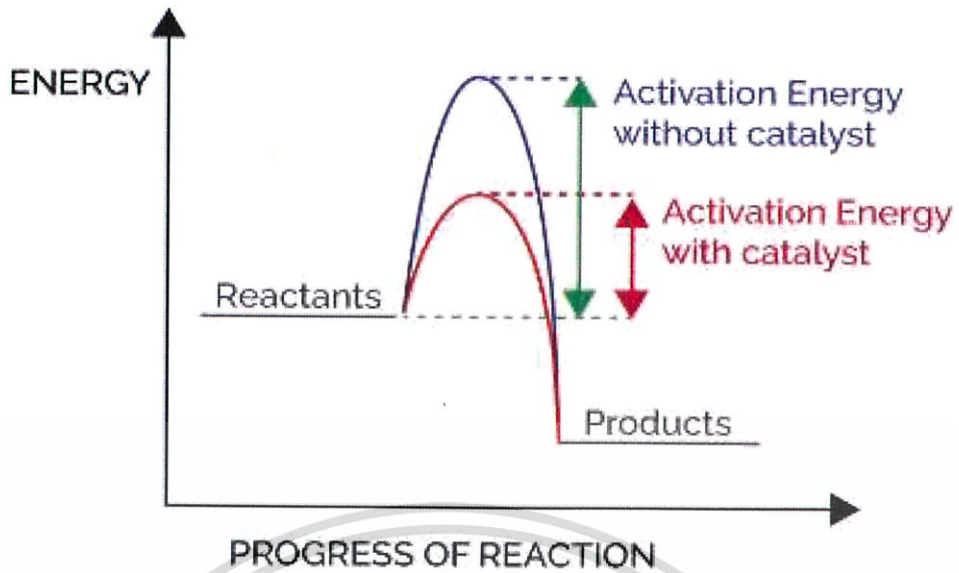
คำว่า โฟโตคะตะไลสต์ (Photocatalyst) เป็นคำที่ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ “โฟโต (Photo)” ให้นำหน้าคำที่แสงมาเกี่ยวข้องด้วย และ “คะตะไลสต์ (Catalyst)” เป็นกระบวนการที่อนุภาคของสารมีส่วนร่วมในการทำให้เกิด อัตราการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยที่ตัวเองไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อสิ้นสุดกระบวนการ และเรียกละการที่เพิ่มอัตราการเกิดปฏิริยาทางเคมีโดยการลดพลังงานกระตุ้น (The Activation energy) ว่าสารเร่งปฏิริยาด้วยแสง (Photocatalyst) ถูกค้นพบโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่น Fujishima ในปี ค.ศ.1967 [8]

#### 2.1.2 หลักการของโฟโตคะตะไลติก

ปฏิริยาโฟโตคะตะไลติกต้องม้องค์ประกอบ คือ

- ก. ตัวเร่งปฏิริยา เช่น สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)
- ข. พลังงานแสงที่มีค่าสอดคล้องกับช่องว่างพลังงาน
- ค. น้ำ
- ง. ออกซิเจน หรือ ตัวออกซิแดนท์ (Oxidants) อื่น ๆ

กระบวนการโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic Process) เป็นการเร่งปฏิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิริยา โดยการกระตุ้นด้วยแสง ตัวเร่งปฏิริยานี้จะทำหน้าที่ลดพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิริยา รูปที่ 2.1 แสดงการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation) ของสารอินทรีย์ที่มีและไม่มีตัวเร่งปฏิริยา โดยกราฟเส้นสีน้ำเงินแสดงพลังงานกระตุ้น (Activation Energy;  $E_a$ ) ของปฏิริยาที่ไม่มีตัวเร่งปฏิริยา ซึ่งมีค่ามากและพลังงานของผลิตภัณฑ์จะต่ำกว่าพลังงานของสารอินทรีย์ พลังงานกระตุ้นนี้จะลดลงในปฏิริยาที่มีตัวเร่งปฏิริยา ถึงแม้ว่าพลังงานของสารอินทรีย์และผลิตภัณฑ์ยังคงเท่าเดิมดังกราฟเส้นสีแดง ตัวเร่งปฏิริยานี้จะเพิ่มอัตราเร็วของปฏิริยา โดยการลดพลังงานกระตุ้น อีกทั้งตัวมันเองยังตอบสนองต่อแสงดังกล่าว คือ จะเกิดการกระตุ้นได้โดยการถ่ายทอดพลังงานที่มีมากกว่าแถบช่องว่างพลังงาน (Band Gap Energy) [2]



รูปที่ 2.1 พลังงานของการเกิดปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาของสารอินทรีย์ [9]

### 2.1.3 กระบวนการโฟโตคะตะไลติก

กระบวนการโฟโตคะตะไลติกประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ

#### 1) การเกาะหรือดูดติดผิว (Adsorption process)

เป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดักจับโมเลกุลหรือสารแขวนลอยซึ่งอยู่ในของเหลวหรือแก๊สให้มาเกาะจับและติดบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ปฏิกิริยาเช่นนี้เป็นการเคลื่อนย้ายสารจากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็งหรือสารแขวนลอยเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) การเกาะจับของโมเลกุลบนผิวของสารอาจเกิดขึ้นด้วยแรงทางกายภาพหรือด้วยแรงทางเคมีหรือทั้งสองอย่างรวมกัน ส่วนกระบวนการโฟโตคะตะไลติกการดูดซับจะเกิดจากแรงทางเคมีเป็นหลัก

#### 2) กระบวนการฉายแสง (Irradiation process)

เมื่ออนุภาคสารกึ่งตัวนำที่ถูกอนุภาคของแสง ซึ่งมีพลังงานเท่ากับหรือสูงกว่าช่องว่างพลังงาน ( $E_g$ ) ตกกระทบผิวหน้าอนุภาคสารกึ่งตัวนำทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้น จากวาเลนซ์แบนด์ไปยังคอนดักชันแบนด์ทำให้เกิดสภาวะขาดแคลนอิเล็กตรอนที่วาเลนซ์แบนด์ เรียกว่า โฮล (Hole) ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์  $h^+$  ส่วนอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นไปอยู่ในคอนดักชันแบนด์ แทนด้วยสัญลักษณ์  $e^-$  ตัวเร่งปฏิกิริยาถูกฉายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน ( $e^-$ ) และโฮล ( $h^+$ ) โดยช่วงความยาวแสงที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์ควรมีความยาวคลื่นไม่เกิน 400 นาโนเมตร โดยช่วงความยาวแสงที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ประมาณ 380 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.1.4 ชนิดของโฟโตคะตะไลติก

โฟโตคะตะไลติก สามารถแยกได้ 2 ประเภท เมื่อพิจารณาจากสถานะของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนี้

1) โฟโตคะตะไลติกแบบสถานะเดียว (Homogeneous Photocatalytic) เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมีสถานะเดียวกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด (โดยทั่วไปแล้วจะเป็นของเหลว) เช่น การย่อยสลาย 2,4 Dinitroluene โดยใช้ UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

2) โฟโตคะตะไลติกแบบสถานะต่าง (Heterogeneous Photocatalytic) เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมีสถานะต่างกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด เช่น ย่อยสลาย 2 - Chlorophenol โดยใช้ UV/TiO<sub>2</sub>

#### 2.1.5 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา

สารที่ใช้เป็นตัวเร่งในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกได้แก่

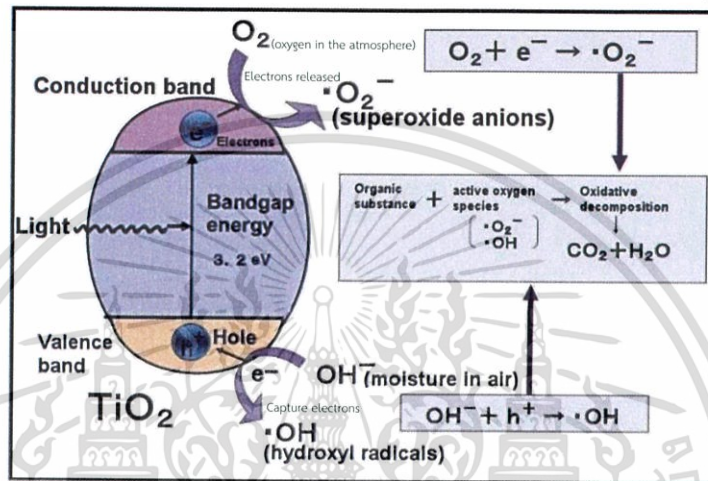
1) โลหะตัวนำ (Transition Metal) เช่น ทองแดง (Cu) โครเมียม (Cr) นิกเกิล (Ni) เป็นต้น

2) สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) สังกะสีออกไซด์ (ZnO) เป็นต้น

องค์ประกอบของโลหะตัวนำและสารกึ่งตัวนำ ประกอบด้วยวาเลนซ์แบนด์ (Valence Band) และคอนดักชันแบนด์ (Conduction Band) ในโลหะตัวนำจะมีวาเลนซ์แบนด์ และคอนดักชันแบนด์ ติดกัน แต่ในสารกึ่งตัวนำวาเลนซ์แบนด์และคอนดักชันแบนด์จะไม่ติดกัน โดยเกิดเป็นช่องว่าง ซึ่งเรียกว่าแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap Energy) เมื่ออิเล็กตรอน (Electron, e<sup>-</sup>) ที่อยู่ในวาเลนซ์แบนด์ได้รับพลังงานโฟตอนจากแสง (hv) อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังคอนดักชันแบนด์ ในขณะเดียวกันที่บริเวณวาเลนซ์แบนด์จะเกิดโฮล (Hole, h<sup>+</sup>) ซึ่งเป็นประจุบวกสามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระในวาเลนซ์แบนด์ ส่วนคอนดักชันแบนด์คืออิเล็กตรอนที่มาจากวาเลนซ์แบนด์เคลื่อนที่อย่างอิสระทั่วคอนดักชันแบนด์เช่นกัน ปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน - โฮล (Electron - Hole Pairs, e<sup>-</sup>/h<sup>+</sup>) สามารถเคลื่อนที่ไปมาระหว่างวาเลนซ์แบนด์ และคอนดักชันแบนด์ได้ง่ายและรวดเร็ว เพราะไม่มีแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap Energy) เหตุนี้จึงเป็นสาเหตุให้ e<sup>-</sup>/h<sup>+</sup> รวมตัวกันใหม่ได้ง่ายสำหรับโลหะตัวนำ ในทางตรงกันข้ามนั้นการรวมตัวกันใหม่ของ e<sup>-</sup>/h<sup>+</sup> ในสารกึ่งตัวนำเกิดได้ยาก เพราะว่ามีแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap Energy) คั่นอยู่ทำให้คู่อิเล็กตรอน/h<sup>+</sup> แยกจากกันได้นาน ข้อแตกต่างของแถบช่องว่างพลังงานของโลหะตัวนำ สารกึ่งตัวนำ และฉนวนแยกได้ยาก ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายปัจจัย ได้แก่ ระดับแถบช่องว่างพลังงาน ระดับพลังงานคอนดักชันแบนด์ และระดับพลังงานวาเลนซ์แบนด์

ปฏิกิริยาที่เกิดบนผิวคอนดักชันแบนด์และปฏิกิริยาที่เกิดในสารละลายเกิดขึ้นดังนี้ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนจากคอนดักชันแบนด์ไปยังตัวรับอิเล็กตรอน (Electron Acceptor) ในสารละลายจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ส่วนอีกด้านหนึ่ง คือ วาเลนซ์แบนด์ซึ่งมี h<sup>+</sup> จะ

เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) โดยตัวสารละลายทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน (Electron Donor) ในสภาวะปกติความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของอิเล็กตรอนที่คอนดักชันแบนด์ไม่มีศักยภาพพอที่จะบำบัดสารอินทรีย์ได้ แต่เนื่องจากในระบบมีออกซิเจนละลายน้ำอยู่ ( $O_2$ ) ออกซิเจนนี้จะเป็นตัวรับ  $e^-$  เกิดปฏิกิริยารีดักชัน ได้เป็น Superoxide Radical ( $O_2^-$ ) ซึ่งเป็นตัวออกซิแดนท์ที่แรงมาก สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆได้ แต่ในทางตรงกันข้าม  $h^+$  ที่วาเลนส์แบนด์เป็นตัวออกซิแดนท์ที่แรงมากเช่นกัน [8]



รูปที่ 2.2 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกบนสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ [9]

### 2.1.6 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก (Mechanism of Photocatalytic Reaction)

ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกในการบำบัดสารอินทรีย์ แสดงดังสมการที่ (1) และสมการที่ (2) ซึ่งมีกลไกดังนี้ ส่วนที่ผิวของสารกึ่งตัวนำที่มี  $h^+$  จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) และน้ำ เกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล และเรดิคัลตัวอื่น ดังแสดงในสมการที่ (4) และสมการที่ (5) ส่วนที่ผิวสารกึ่งตัวนำที่มีอิเล็กตรอนจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับออกซิเจนที่ดูดติดบนผิวสารกึ่งตัวนำ เกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัลเปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล ดังสมการที่ (6) และสมการที่ (7) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) แสดงในสมการที่ (8) และสมการที่ (9) ในขณะที่สภาวะในการทดลองมีออกซิเจนไม่เพียงพอ โฟตอนซึ่งเกิดจากการแตกตัวของน้ำ จะเข้ามามีบทบาทเข้ารับอิเล็กตรอนแทน เกิดเป็นไฮโดรเจนเรดิคัล (Hydrogen Radical:  $H^\bullet$ ) ตามสมการที่ (10) ไฮดรอกซิลเรดิคัล เป็นสารออกซิแดนท์หลักในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก เพราะ ไฮดรอกซิลเรดิคัลเป็นสารที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาซึ่งรองจาก  $F^-$  แต่สูงกว่า  $Cl^-$  และทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์ได้ทุกชนิด การเกิดเรดิคัลต่าง ๆ แสดงไว้ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การบำบัดสารอินทรีย์



การกระตุ้น



การเกิดเรดิคอล จาก  $e^-/h^+$



การรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮล (Electron-Hole Recombination)



$h^+$  คือ โฮลที่วาเลนซ์แบนด์ (Valence Band Hole)

$e^-$  คือ อิเล็กตรอน (Electron)

$\text{OH}^\bullet$  คือ ไฮดรอกซิลเรดิคอล (Hydroxyl Radical)

$\text{O}_2^\bullet$  คือ ซุปเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคอล (Superoxide Ion Radical)

$\text{OH}_2^\bullet$  คือ เพอร์ไฮดรอกซิลเรดิคอล (Perhydroxyl Radical)

$\text{H}^\bullet$  คือ ไฮโดรเจนเรดิคอล (Hydrogen Radical)

เนื่องจาก  $\text{OH}^\bullet$  และ  $h^+$  ที่มีของตัวเร่งปฏิกิริยามีสมบัติเป็นประจุบวกการออกซิไดซ์ของ  $h^+$  กับ  $\text{OH}^-$  ได้  $\text{OH}^\bullet$  และขณะเดียวกัน  $h^+$  เกิดจากการออกซิไดซ์กับสารอินทรีย์ด้วย ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโฟโตคะตะไลติกจึงเกิดขึ้นได้ทั้ง 2 ทาง คือ

1) การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโฮลกับไฮดรอกไซด์ไอออนหรือน้ำได้ไฮดรอกซิลเรดิคอล และปฏิกิริยาของอิเล็กตรอนกับออกซิเจนหรือไฮโดรเจนไอออนได้ซุปเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคอล เพอร์ไฮดรอกซิลเรดิคอล หรือไฮโดรเจนเรดิคอล

2) การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตรงของสารอินทรีย์ที่ดูดติดบนตัวเร่งปฏิกิริยากับโฮล ซึ่งความสามารถของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์มีมากกว่าความสามารถของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนไทเทเนียมไดออกไซด์หรือตัวเร่งปฏิกิริยาอื่น Kwaguchi และ Matthews สรุปว่า การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์นั้นตัวปฏิกิริยาหลักที่เกิด คือ ไฮดรอกซิลเรดิคอลกับสารอินทรีย์ ส่วนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโฮลกับสารอินทรีย์โดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นปฏิกิริยารอง ซึ่งเกิดได้น้อยกว่า ดังนั้นในโพโตคะตะไลติก มีการเกิดปฏิกิริยาของไฮดรอกซิลเรดิคอล และสารอินทรีย์จะเกิดได้ในตำแหน่งต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- ไฮดรอกซิลเรดิคอล อยู่ที่ผิวและสารอินทรีย์อยู่ที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยา
- ไฮดรอกซิลเรดิคอล ไม่อยู่ที่ผิว แต่สารอินทรีย์อยู่ที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยา
- ไฮดรอกซิลเรดิคอล อยู่ที่ผิว แต่สารอินทรีย์ไม่อยู่ที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยา
- ไฮดรอกซิลเรดิคอล ไม่อยู่ที่ผิว และสารอินทรีย์ไม่อยู่ที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยา

### 2.1.7 ปัจจัยที่ส่งผลต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก

1) ตัวเร่งปฏิกิริยา จะต้องมีความสมบัติเป็นโลหะตัวนำ หรือสารกึ่งตัวนำที่สามารถตอบสนองต่อแหล่งกำเนิดแสงเพื่อก่อให้เกิดปฏิกิริยาในการบำบัดมลพิษชนิดนั้น ๆ ได้ โดยจะต้องมีพื้นที่ผิวมากเพียงพอ เนื่องจากต้องทำหน้าที่เป็นสารดูดติดมลพิษไว้บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเป็นหนึ่งในขั้นตอนสำคัญก่อนการเกิดปฏิกิริยาในการบำบัดมลพิษในขั้นตอนต่อไป ดังนั้นในการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้มีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

2) ความเข้มแสง จำเป็นต้องมีพลังงานโฟตอนอย่างมากเพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งการเพิ่มปริมาณความเข้มแสงจะเป็นการเพิ่มจำนวนโฟตอนให้มากยิ่งขึ้น ซึ่งจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยามีโอกาสเพิ่มมากขึ้นด้วย

3) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารมลพิษ หากมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยส่วนใหญ่จะส่งผลให้ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกมักจะลดลง เนื่องจากในขณะที่เกิดปฏิกิริยาเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้นจะก่อให้เกิดสารอินเตอร์มีเดียตเพิ่มขึ้น ซึ่งจะไปยับยั้งปฏิกิริยาการย่อยสลายสารมลพิษ ทำให้เกิดอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้น้อยลง นอกจากนี้พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถดูดติดสารได้ก็เป็นข้อจำกัดที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งที่ทำให้เกิดการย่อยสลายได้น้อยลงด้วย

4) วัสดุปฏิกิริยา เป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างมากในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ซึ่งการเลือกใช้นิเวศของวัสดุที่เหมาะสม จำเป็นต้องคำนึงถึงความสามารถในการทำงานร่วมกับแสงยูวี และมลพิษที่ใช้ในการบำบัด เพื่อป้องกันการเกิดสารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาซึ่งวัสดุที่แนะนำให้นำมาใช้สร้างถึงปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ได้แก่ แก้ว และสแตนเลสสตีล (Stainless Steel) เป็นต้น

5) อุณหภูมิ เนื่องจากแหล่งกำเนิดแสงก่อให้เกิดความร้อนภายในระบบเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาในการบำบัดมลพิษได้น้อย เนื่องจากโดยทั่วไปในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกไม่ต้องการให้เดินระบบที่อุณหภูมิสูงหรือต่ำจนเกินไป ซึ่งค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมโดยทั่วไปจะอยู่ระหว่าง 20-80 องศาเซลเซียส

6) ออกซิเจนและตัวรับอิเล็กตรอนตัวอื่นๆ ซึ่งจะมีหน้าที่จับตัวกับอิเล็กตรอน เพื่อป้องกันการเกิดการกลับมารวมกันอีกครั้งของอิเล็กตรอนกับโฮล หรือปฏิกิริยารีดอกซ์อื่น ๆ ให้เป็นไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ยากขึ้น ออกซิเจนจะรวมตัวอิเล็กตรอนจนเกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคอลลแอนไอออน และสามารถที่จะทำปฏิกิริยาต่อไปได้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่รุนแรงอีกตัวหนึ่ง ซึ่งจะส่งผลให้เกิดอัตราการเกิดปฏิกิริยา เพื่อการย่อยสลายมลพิษได้มากขึ้น [2]

### 2.1.8 พลังงานแสง

รังสีหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแต่ละชนิดมีความยาวคลื่นหรือความถี่คลื่นแตกต่างกัน รังสีที่ประสาทตาสามารถรับรู้ได้ซึ่งเรียกว่า แสง นั้นมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง  $4 \times 10^{-7}$  ถึง  $7 \times 10^{-7}$  เมตร ส่วนรังสีที่มีความยาวคลื่นยาวกว่าหรือสั้นกว่าแสง ประสาทตาจะไม่สามารถรับรู้ได้ เรียกว่า รังสีที่มองไม่เห็น เมื่อจัดเรียงลำดับตามความยาวคลื่น และความถี่ของคลื่นเหล่านี้จะได้สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Spectrum) โดยรังสีที่มีความถี่สูงจะมีพลังงานสูงกว่ารังสีที่มีความถี่ต่ำ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่างๆ ในสเปกตรัม แม้มิแหล่งกำเนิดและการตรวจจับได้ที่แตกต่างกัน แต่ก็มีสมบัติที่สำคัญเหมือนกันคือ เคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วแสง ( $2.99 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที) และมีพลังงานส่งผ่านไปในรูปแบบของคลื่น โดยพลังงานแสงที่เลือกนำมาใช้ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ต และช่วง วิสิเบิล [8]

รังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 100 -400 นาโนเมตร มีคุณสมบัติไม่แตกตัว (Non-Ionizing) รังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นเส้นแบ่งของรังสีชนิดแตกตัวได้ และแตกตัวไม่ได้ สามารถแบ่งได้เป็น ยูวีเอ (UV-A) หรือรังสีอัลตราไวโอเล็ตคลื่นยาว (Long wave UVR หรือ Near UVR หรือ Black Light ) ยูวีบี (UV-B) หรือรังสีอัลตราไวโอเล็ตคลื่นกลาง (Middle UVR หรือ Sunburn Radiation) ยูวีซี (UV-C) หรือรังสีอัลตราไวโอเล็ตคลื่นสั้น (Short Wave UVR หรือ Germicidal-Radiation) ความยาวคลื่นของรังสีในช่วงต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าความยาวคลื่นชนิดต่าง ๆ [7]

สเปกตรัมรังสี	ความยาวคลื่น(นาโนเมตร)
Visible Radiation	400-760
Ultraviolet	100-400
UV-A	315-400
UV-B	280-315
UV-C	100-280

## 2.2 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide; $\text{TiO}_2$ )

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide;  $\text{TiO}_2$ ) เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-Type Semiconductor) เป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงอย่างแพร่หลาย ด้วยเหตุผลหลายประการ คือ สามารถดูดซับแสงในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ตได้ดี เป็นสารดูดซับอินทรีย์ที่ดี โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของไทเทเนียมไดออกไซด์เหมาะที่จะใช้ก่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์ และปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงที่มีความสามารถสูงในปฏิกิริยาหลายประเภท มีความเสถียรทางเคมี ทนต่อการกัดกร่อนของแสงเมื่อสัมผัสอยู่กับน้ำ มีราคาถูก และสามารถเตรียมในรูปผลึกขนาดเล็กได้ง่าย [4]

ปัจจุบันไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย เช่น ในระบบบำบัดน้ำเสีย หรือระบบบำบัดอากาศเสีย เนื่องจากสารแอคทีฟ (Active Species:  $\bullet\text{OH}$ ;  $\bullet\text{O}$ ) ที่เกิดจากปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน (Oxygen reduction) โดยอิเล็กตรอน (Photoexcited Electron) และจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำ (Water Oxidation) โดยโฮล (Photoexcited hole) จะมีความสามารถออกซิไดส์สารอินทรีย์ได้ดี อีกทั้งมีการประยุกต์ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในสีทาบ้าน เนื่องจากความสามารถในการสะท้อนแสงที่ดี ซึ่งการนำไทเทเนียมไดออกไซด์ไปประยุกต์ใช้นั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงสมบัติทางกายภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ เช่น โครงสร้าง (Phase Structure) ขนาดอนุภาค (Particle Size) และพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface Area) และอื่น ๆ ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อกลไกการทำให้เกิดปฏิกิริยานั้นเอง [5]



ภาพที่ 2.3 ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ [11]

### 2.2.1 สมบัติทางกายภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ )

ไทเทเนียมบริสุทธิ์มีเลขอะตอมคือ 22 ซึ่งมีการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอน คือ  $[\text{Ar}] 3d^2 4s^2$  และมีน้ำหนักอะตอม คือ 47.867 ในส่วนของขนาดอะตอมไทเทเนียมมีรัศมีอะตอม 147 พิโกเมตร (pm) มีจุดหลอมเหลวและจุดเดือด คือ  $1667^\circ\text{C}$  และ  $3285^\circ\text{C}$  ตามลำดับ ในขณะที่ความหนาแน่นที่อุณหภูมิห้อง คือ  $4.50 \text{ gcm}^{-3}$  และมีสภาพต้านทานไฟฟ้า (Electrical Resistivity) ที่อุณหภูมิเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

20 °C คือ  $42.0 \mu\Omega^{-cm}$  ลักษณะพิเศษของไทเทเนียม คือ จะทำปฏิกิริยาได้ดีกับพวกสารที่ไม่ใช่โลหะ (Non-Metal) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ออกซิเจน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนที่อุณหภูมิสูง ซึ่งสถานะออกซิเดชัน (Oxidation State) ทางเคมีที่มักเกิดขึ้นมากที่สุด คือ 4+ ซึ่งสารประกอบที่จะมีโอกาสเกิดขึ้นมากที่สุดคือ โมเลกุลจำพวกไดออกไซด์และเตตระคลอไรด์ เพราะมีสถานะออกซิเดชันเป็น 4- ดังนั้นโครงสร้างที่จะเกิดขึ้นจะอยู่ในรูป  $TiO_2$  และ  $TiCl_4$

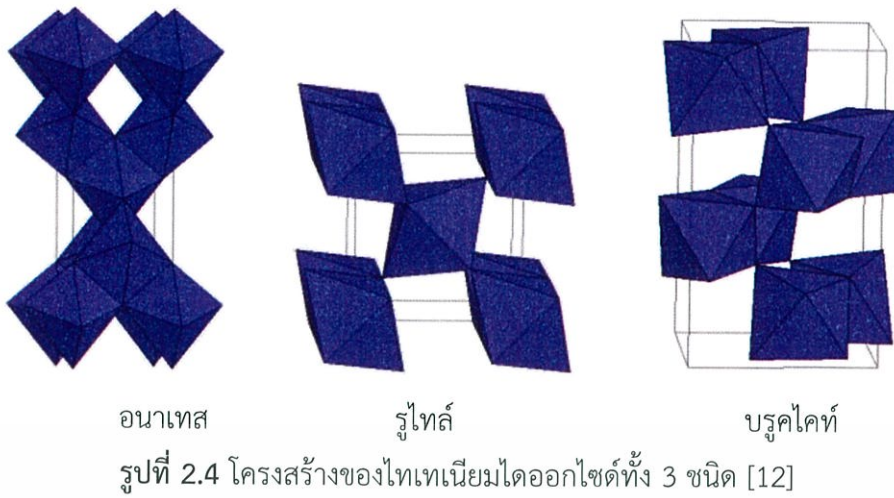
## ตารางที่ 2.2 ข้อมูลโดยทั่วไปของไทเทเนียมไดออกไซด์

ชื่อและสูตรโมเลกุล	Titanium Dioxide	
น้ำหนักโมเลกุล	79.9	
ลักษณะและสี	ผงของแข็งมีสีขาว	
จุดเดือด(°C)	2500	
จุดหลอมเหลว(°C)	1830	
ดัชนีหักเห (Refractive Index)	อนาเทส 2.49	รูไทล์ 1.903
ความหนาแน่น ( $gcm^{-3}$ )	อนาเทส 3.84	รูไทล์ 4.26
แถบช่องว่างพลังงาน (eV)	อนาเทส 3.2	รูไทล์ 3.0

### 2.2.2 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์

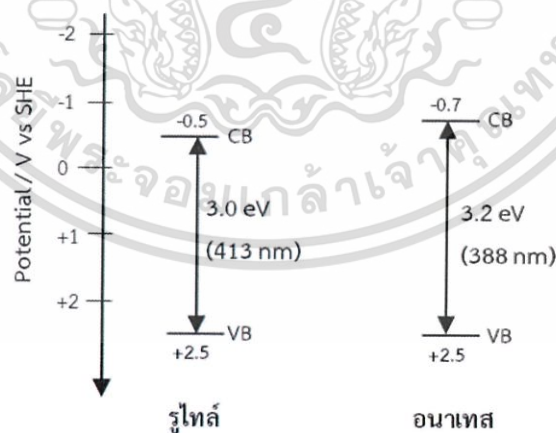
โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์มีอยู่ด้วยกัน 3 แบบ คือ โครงสร้างแบบ อนาเทส (Anatase) แบบรูไทล์ (Rutile) และแบบบรูคไคท์ (Brookite) โดยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบอนาเทสจะมีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกได้ดีกว่าโครงสร้างแบบ รูไทล์ สาเหตุเนื่องมาจากการกลับมารวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนกับโฮลเกิดได้ยากกว่าโครงสร้างแบบรูไทล์ ในขณะที่โครงสร้างแบบรูไทล์มีค่ารีแฟรคทีฟ (Refractive Index) สูงกว่าโครงสร้างแบบอนาเทสและมีความเสถียรที่อุณหภูมิสูงจึงเหมาะที่จะใช้เป็นตัวเติมเพื่อสะท้อนแสงโดยทั่วไปแล้ว โครงสร้างผลึกแบบอนาเทสและรูไทล์เป็นที่นิยมนำมาศึกษาสำหรับการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก โดยโครงสร้างผลึกอนาเทสให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกรูไทล์ แต่อย่างไรก็ตามในบางปฏิกิริยาโครงสร้างผลึกรูไทล์หรือโครงสร้างผลึกผสมระหว่างแบบอนาเทสและแบบรูไทล์ (เช่น อนาเทส 70 - 80% และ รูไทล์ (30 - 20%) ถูกรายงานว่าให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกอนาเทสบริสุทธิ์ ทั้งนี้มีตัวแปรหลายอย่างส่งผลกระทบบต่อประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาของแต่ละโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ ได้แก่ พื้นที่ผิว ขนาดของอนุภาคผลึก การกระจายตัวของรูพรุน และที่สำคัญมากคือวิธีการที่ใช้ในการสังเคราะห์ผลึกไทเทเนียมออกไซด์ ส่วนโครงสร้างแบบบรูคไคท์ยังไม่มีการศึกษาที่มากนัก [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



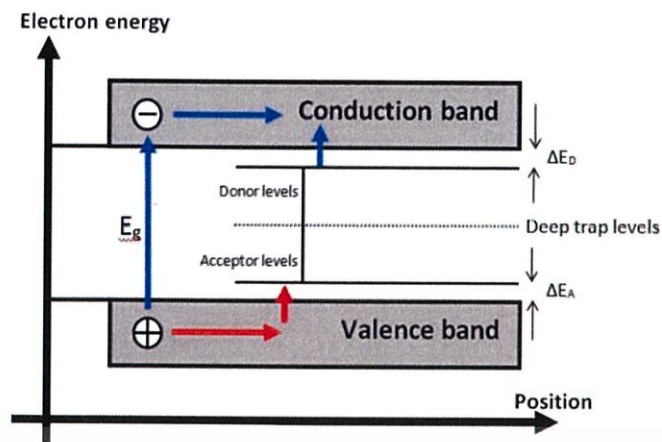
### 2.2.3 สมบัติทางไฟฟ้าของไทเทเนียมไดออกไซด์

เนื่องจากการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนในไทเทเนียมไดออกไซด์มีเพียงบางส่วนในแถบพลังงานที่นำไฟฟ้าได้ (Allowed Energy Band) ดังนั้นไทเทเนียมไดออกไซด์จึงมีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ซึ่งอธิบายระดับพลังงานได้ด้วย รูปที่ 2.5 โดยมีขนาดช่องว่างพลังงาน (Band gap Energy) ประมาณ 3.0 และ 3.2 eV สำหรับเฟสรูไทล์และเฟสอนาเทสตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามขนาดของแถบพลังงานช่วงนี้ก็ยังถูกจัดว่ามีค่าค่อนข้างมากสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานด้านแสง (Photocatalytic Reaction) ซึ่งจะทำให้ได้ประสิทธิภาพค่อนข้างน้อยดังนั้นจึงได้มีการปรับปรุงโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์โดยการเจืออะตอมของธาตุหมู่ 3-5 ลงไปเพื่อเพิ่มระดับพลังงานในช่องว่างพลังงาน [13] ซึ่งจะเกิดลักษณะโครงสร้างดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 แถบพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์เฟส รูไทล์ และ อนาเทส [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 แถบพลังงานที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเจืออะตอมของธาตุหมู่อื่นลงไป [14]

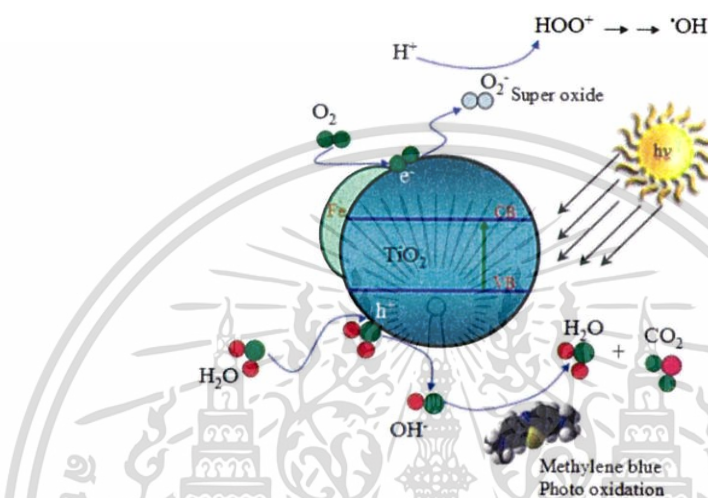
#### 2.2.4 ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์

โครงสร้างผลึกอนาเทสจะให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกรูไทล์ เนื่องจากโครงสร้างผลึกอนาเทส เกิดการรวมตัวกันใหม่ของคู่อิเล็กตรอนและโฮล (electron-hole pair) ในอัตราที่ต่ำกว่าเพราะมีแถบช่องว่างพลังงานมากกว่ารูไทล์ ยิ่งไปกว่านั้นโครงสร้างผลึกอนาเทสสามารถเตรียมได้ในอุณหภูมิต่ำ ทำให้ที่พื้นผิวมีไฮดรอกไซด์ไอออนไฮดรอกไซด์ไอออน (OH<sup>-</sup>) มากกว่า ซึ่งจะสามารถผลิตไฮดรอกซิลไอออนเรดิคัล (hydroxyl radical; OH<sup>•</sup>) ได้มาก ซึ่งไฮดรอกซิลไอออนเรดิคัลเป็นตัวออกซิแดนซ์หลักที่จะทำให้การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเกิดได้ดี สำหรับโครงสร้างอนาเทสและรูไทล์มีแถบช่องว่างพลังงาน 3.2 eV และ 3.0 eV ตามลำดับ โดยโครงสร้างผลึกอนาเทสสามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 384 นาโนเมตร ในขณะที่โครงสร้างผลึกรูไทล์สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 410 นาโนเมตร ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง อีกทั้งโครงสร้างอนาเทสยังมีความสามารถในการดึงดูดผิวสูงกว่าโครงสร้างผลึกรูไทล์

อย่างไรก็ตามในบางปฏิกิริยาโครงสร้างผลึกผสมระหว่างอนาเทสและรูไทล์จะให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกอนาเทสอย่างเดียว เพราะว่าในระหว่างกระบวนการกระตุ้นด้วยแสงอิเล็กตรอนจะถูกส่งผ่านจากรูไทล์ไปยังอนาเทส จะเป็นการลดการรวมตัวกันใหม่ของคู่อิเล็กตรอนกับโฮลจากการสร้างประจุโดยพลังงานจากแสง เนื่องจากชั้นการนำไฟฟ้าของเฟสอนาเทสอยู่ในตำแหน่งที่มีพลังงานสูงกว่าชั้นการนำไฟฟ้าของเฟสรูไทล์ประมาณ 0.20 eV ความสามารถของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่นำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงนั้นเป็นผลมาจากปัจจัยหลายประการ เช่น โครงสร้างและขนาดของผลึก ความหนาแน่นของหมู่ไฮดรอกซิลที่พื้นผิว พื้นที่ผิวจำเพาะ ความพรุน และสมบัติอื่นๆ ปัจจัยเหล่านี้จะมีผลต่อการผลิตคู่อิเล็กตรอน - โฮล การดูดซับบนพื้นผิวและกระบวนการรีดอกซ์

โดยทั่วไปแล้วหลักการและกลไกการย่อยสลายสารที่เป็นมลพิษชนิดต่าง ๆ ในน้ำ มีปัจจัยที่สำคัญที่จะทำให้กระบวนการย่อยสลายเกิดขึ้นได้ดีนั้น ได้แก่ ความยาวคลื่นแสงที่มากกว่า หรือเท่ากับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเจน น้ำและตัวเร่งปฏิกิริยา โดยหลักการของการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการของสารกึ่งตัวนำ คือ ถ้ามีแถบช่องว่างพลังงานที่เหมาะสมกับช่วงความยาวคลื่นที่เข้าไปได้จะสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ การเร่งปฏิกิริยาดำเนินการจะเกิดขึ้นได้เมื่อได้รับพลังงานในรูปแบบแสงโฟตอนมากพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาขึ้นได้ ซึ่งพลังงานนี้เรียกว่า พลังงานกระตุ้น เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยานำโนถูกกระตุ้นด้วยแสงอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ให้เคลื่อนที่ไปยังแถบการนำไฟฟ้า ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮล ซึ่งจะวิ่งกระจายอยู่ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ [15] ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กลไกของการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงของสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ [16]

ปฏิกิริยาที่แถบวาเลนซ์ซึ่งมีโฮลอยู่นั้น อธิบายได้ว่าอิเล็กตรอนจากสารละลายหรือเรียกว่าตัวให้อิเล็กตรอน (Electron Donor) จะเคลื่อนที่ไปยังโฮลในแถบวาเลนซ์จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยที่โฮลจะทำปฏิกิริยากับน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) และไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ ) เกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล (hydroxyl radical;  $\text{OH}\cdot$ ) ซึ่งเป็นตัวออกซิแดนต์ (Oxidant) ที่แรงในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการ สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ได้อีกทางด้านหนึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่แถบการนำไฟฟ้าคือ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากแถบการนำไฟฟ้าไปยังตัวรับอิเล็กตรอน (Electron Acceptor) ในปฏิกิริยารีดักชัน ออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) ที่ถูกดูดซับจะเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ซึ่งทำให้เกิดเป็นไฮดรอกซิลเปอร์ออกไซด์เรดิคัล ( $\text{HO}_2\cdot$ ) ในน้ำ ถ้า  $\text{HO}_2\cdot$  รวมกัน ผลที่ได้คือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถรับอิเล็กตรอนจากแถบการนำหรือจากซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล และกลายเป็นไฮดรอกไซด์เรดิคัลได้ ดังนั้นไฮดรอกซิลเรดิคัลอาจถูกสร้างขึ้นโดยปฏิกิริยารีดักชัน ซึ่งสามารถย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ในน้ำได้เช่นกัน และผลิตภัณฑ์สุดท้ายจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.5 ประโยชน์ของไทเทเนียมไดออกไซด์

ด้วยสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นผงเล็กระดับนาโนจะช่วยฟอกอากาศ กำจัดเชื้อแบคทีเรียและการป้องกันคราบยัดเกาะพื้นผิว อีกทั้งไม่เสื่อมสภาพหลังการใช้งาน ทำความสะอาดง่าย ไม่ทิ้งสารตกค้างที่เป็นอันตรายต่อชีวิตและสิ่งแวดล้อม ทำให้นาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

#### 1) ความสามารถในการต้านแบคทีเรีย

ไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่เพียงแต่ฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้เท่านั้น แต่ยังช่วยในการย่อยสลายซาก จึงไม่เกิดสารพิษจากซากของมันด้วย มีประสิทธิภาพสูงกว่าสารต้านแบคทีเรียชนิดอื่น ๆ ที่จะทำงาน เมื่อมีเซลล์แบคทีเรียสัมผัสกับพื้นผิว และที่สำคัญไทเทเนียมไดออกไซด์จะไม่เกิดการเสื่อมสภาพ หลังจากที่ทำลายเชื้อแบคทีเรีย ทำให้ประสิทธิภาพการใช้งานที่ยาวนาน ไทเทเนียมไดออกไซด์มี ประสิทธิภาพต้านยับยั้งหรือต่อต้านการติดเชื้อมากกว่าคลอรีน 3 เท่า และมากกว่าไอโซน 1.5 เท่า

#### 2) ความสามารถด้านการกำจัดกลิ่น

ด้วยสมบัติของการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยการทำลายพันธะระหว่างโมเลกุลของสารให้แตก ออกเป็นโมเลกุลเดี่ยว สามารถกำจัดโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ระเหยอยู่ในอากาศ (Volatile Organic Compounds หรือ VOCs) อันเป็นสาเหตุของกลิ่นไม่พึงประสงค์ เช่น กลิ่นบุหรี กลิ่นยาสูบ สารประเภทฟอร์มาลดีไฮด์ ยูรีน กลิ่นอุจจาระ น้ำมันเชื้อเพลิง ควีน เกสรดอกไม้ และสารประกอบ ไฮโดรคาร์บอนอีกหลายชนิดในอากาศ ฯลฯ การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ จึงเป็นการแก้ปัญหาที่ ต้นเหตุ

#### 3) ความสามารถในการฟอกอากาศ

ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกเร่งด้วยปฏิกิริยาแสง สามารถกำจัดสารที่ก่อให้เกิดมลภาวะทาง อากาศได้ เช่น สารประกอบไนโตรเจนออกไซด์และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ควีนบุหรี สารระเหยต่าง ๆ ที่ ออกมาจากอาคารรวมถึงช่วยกำจัดสารประเภททำลายชั้นบรรยากาศ เช่น ก๊าซคลอโรฟลูออโร- คาร์บอน (CFC) ก๊าซเรือนกระจกประเภทอื่นทั้งทางตรงและทางอ้อม เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแสง แม้มันบริเวณที่มีมลภาวะสูง ไทเทเนียมไดออกไซด์จึงช่วยลดสารก่อมลภาวะเหล่านี้ได้

#### 4) ความสามารถในการป้องกันการเกิดคราบและคุณสมบัติการทำความสะอาดตัวเอง

ด้วยสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ในการทำความสะอาดตัวเองเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง เมื่อ ผนังด้านนอกของอาคารที่มีกต้อเจอบคราบเขม่าจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่มีส่วนประกอบ เป็นน้ำมันได้รับการปกป้องด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ ไทเทเนียมไดออกไซด์จะทำลายสารประกอบ ไฮโดรคาร์บอน รวมทั้งฝุ่นผงต่าง ๆ ที่เกาะติดอยู่กับผนัง จึงถูกชะล้างออกจากผนังอย่างง่าย เมื่อฝน ตกลงมาทำให้ผนังตึกดูสะอาดและใหม่อยู่เสมอ

#### 5) ความสามารถในการทำน้ำสะอาด

สามารถกำจัดสารอินทรีย์ที่ก่อมลภาวะให้กลายเป็นสารที่ไม่เป็นอันตรายได้ เช่น ทำให้ กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ โดยไทเทเนียมไดออกไซด์จะนำไปใช้ในขั้นตอนที่สองของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การบำบัดน้ำเสีย โครงสร้างต้นแบบในการบำบัดน้ำเสียแสดงให้เห็นว่า กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงนั้นมีประสิทธิภาพสูงในการฆ่าแบคทีเรีย *Escherichia coli* ซึ่งเป็นแบคทีเรียในอุจจาระที่ปนเปื้อนในน้ำได้เป็นอย่างดี [16]

## 2.3 ยางธรรมชาติ

### 2.3.1 ข้อมูลเบื้องต้นของยางธรรมชาติ

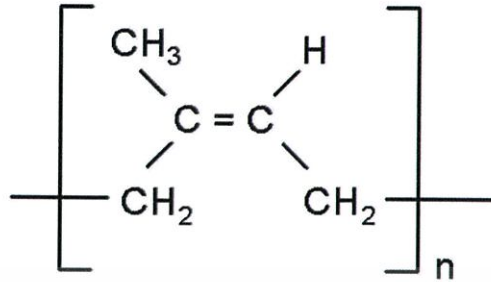
ยางธรรมชาติส่วนมากเป็นยางที่ได้มาจากต้นยาง *Hevea Brazilliensis* ซึ่งมีต้นกำเนิดจากกลุ่มแม่น้ำอะเมซอนในทวีปอเมริกาใต้น้ำยางสดที่กรีดยได้จากต้นยางมีลักษณะสีขาวขุ่นและมีเนื้อเยื่อแห้ง (Dry-Rubber) ประมาณ 30% แขนงลอยอยู่ในน้ำ ถ้านำน้ำยางที่ได้นี้ไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) จนกระทั่งได้น้ำยางที่มีปริมาณเยื่อแห้งเพิ่มขึ้นเป็น 60% เรียกว่า น้ำยางข้น (Concentrated Latex) การเติมแอมโมเนียลงไปจะช่วยรักษาสภาพของน้ำยางข้นให้เก็บไว้ได้นาน น้ำยางข้นส่วนหนึ่งจะถูกส่งออกสู่ตลาดต่างประเทศส่วนที่เหลือจะถูกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมถุงมือยางและถุงยางอนามัย เป็นต้น แต่เมื่อนำน้ำยางสดที่กรีดยได้จากต้นยางมาเติมกรดเพื่อให้อนุภาคน้ำยางจับตัวกันเป็นของแข็งแยกตัวจากน้ำจากนั้นก็รีดยางให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องรีด (Two-Roll Mill) และนำไปตากแดดเพื่อไล่ความชื้นก่อนจะนำไปอบรมควันที่อุณหภูมิประมาณ 60 - 70% เป็นเวลา 3 วัน ก็จะได้ยางแผ่นรมควัน นอกจากแผ่นรมควันแล้วอุตสาหกรรมส่วนใหญ่เริ่มเปลี่ยนมาใช้ยางแท่งหรือยางก้อนเป็นวัตถุดิบ ทั้งนี้เนื่องจากยางแท่งมีคุณภาพที่สม่ำเสมอกว่ายางแผ่นรมควันผ่านการทดสอบและจัดชั้นเพื่อรับรองคุณภาพตามหลักวิชาการวัตถุดิบของการผลิตยางแท่ง ได้แก่ น้ำยางหรือยางแผ่นขึ้นอยู่กับเกรดของยางแท่งที่ต้องการผลิต เช่น ถ้าต้องการผลิตยางแท่งเกรด STR5L ซึ่งมีสีจางมาก จำเป็นต้องใช้น้ำยางเป็นวัตถุดิบ หรือถ้าต้องการผลิตยางแท่งเกรด STR20 ซึ่งเป็นเกรดที่มีสีจืดปนสูงและมีสีเข้ม ก็อาจใช้ยางแผ่นหรือขี้ยางเป็นวัตถุดิบ เป็นต้น ส่วนกระบวนการผลิตยางแท่งค่อนข้างจะยุ่งยากต้องอาศัยเครื่องจักรที่มีราคาแพงและต้องมีการควบคุมคุณภาพอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นราคายางแท่งจึงสูงกว่ายางแผ่นรมควัน

### 2.3.2 โครงสร้างของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมี คือ *cis-1,4-polyisoprene* กล่าวคือ มี isoprene ( $C_5H_8$ ) โดยที่  $n$  มีค่าตั้งแต่ 15,000 -20,000 เนื่องจากส่วนประกอบของยางธรรมชาติเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นยางจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน เป็นต้น โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (amorphous) แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยืด มันจึงสามารถเกิดผลึก (crystallize) ได้ การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (low temperature crystallization) จะทำให้ยางแข็งมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไป ยางก็จะอ่อนลงและกลับสู่สภาพเดิม ในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (strain induced crystallization) ทำให้อย่างมีสมบัติเชิงกลดี นั่นคือยางจะมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ความทนทานต่อการฉีกขาด (tear resistance) และความทนทานต่อการขัดสี (abrasion resistance) สูง [6]



รูปที่ 2.8 สูตรโครงสร้างยางธรรมชาติ [6]

### 2.3.3 สมบัติของยางธรรมชาติ

ในบางสภาวะโมเลกุลของยางจะสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยืด มันจึงสามารถเกิดผลึก (Crystallize) ขึ้นมาได้ โดยการเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Crystallization) จะทำให้ยางแข็งมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น ยางก็จะอ่อนลงและกลับสู่สภาพเดิม ในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (Strain Induced Crystallization) ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดี นั่นคือยางจะมีความทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) ความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear Resistance) และความทนทานต่อการขัดสี (Abrasion Resistance)

ลักษณะเด่นอีกอย่างของยางธรรมชาติคือ ความยืดหยุ่น (Elasticity) ยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำมันหมดไป ยางก็จะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิม (หรือใกล้เคียง) อย่างรวดเร็ว ยางธรรมชาติยังมีสมบัติติดเยื่อมด้านการเหนียวติดกัน (Tack) ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบ (Assemble) ชิ้นส่วนต่างๆเข้าด้วยกัน เช่น ยางรถยนต์ เป็นต้น

### 2.3.4 ข้อดีของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติถูกนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ หรือวัสดุชิ้นส่วนมากมาย เนื่องจากยางธรรมชาติมีสมบัติดีเยี่ยมในด้านการทนต่อแรงดึง (Tensile) แม้ไม่ได้เติมสารเสริมแรงและมีความยืดหยุ่นสูงมากจึงเหมาะที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น ถุงมือยาง ถุงยางอนามัย ยางรัดของ เป็นต้น ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัตที่ดี (Dynamic Properties) มีความยืดหยุ่น (Elasticity) สูง ในขณะที่มีความร้อนภายใน (Heat Build-up) ที่เกิดในขณะใช้งานต่ำและมีสมบัติเหนียวติดกัน (tack) ที่ดี จึงเหมาะสำหรับยางรถบรรทุก ยางล้อเครื่องบิน หรือใช้ผสมกับยางสังเคราะห์ในการผลิตยางรถยนต์ เป็นต้น

ยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อการฉีกขาดสูง (Tear Resistance) ทั้งที่อุณหภูมิต่ำและที่อุณหภูมิสูงจึงเหมาะสำหรับการผลิตถุงกระเปาะน้ำร้อนเพราะว่าในการแกะชิ้นงานออกจากเบ้าในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างการผลิตจะต้องดึงชิ้นงานออกจากเบ้าพิมพ์ในขณะที่ร้อน รางที่ใช้จึงต้องมีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดขณะร้อนสูง [17]

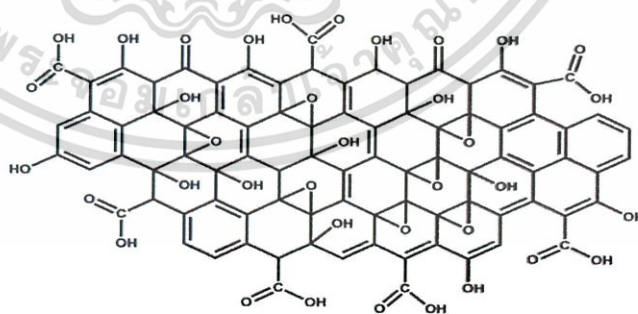
### 2.3.5 ข้อดีข้อเสียของยางธรรมชาติในเรื่องโฟโตคะตะไลติก

**ข้อดี** เมื่อนำน้ำยางไปผสมกับผงไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้จึงง่ายต่อการใช้งาน การจัดเก็บ และสามารถล้างทำความสะอาดแล้วนำไปใช้ในการดูดจับสีย้อม โลหะหนัก หรือมลพิษต่าง ๆ ในน้ำได้ใหม่

**ข้อเสีย** เมื่อขึ้นรูปกลายเป็นแผ่นยางไทเทเนียมไดออกไซด์แล้วทำให้การเกิดโฟโตคะตะไลติกเป็นไปได้ได้น้อยลงเมื่อเทียบกับแบบชนิดผงไทเทเนียม เนื่องด้วยพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยานั้นสามารถเกิดได้เพียงแค่บริเวณพื้นผิวรอบนอก (Surface) เท่านั้น อีกทั้งด้วยความเป็นยางธรรมชาติจึงเสื่อมสภาพเร็วภายใต้แสงแดด ออกซิเจน โอโซน และความชื้น เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่ (Double-Bond) อยู่มาก ยางธรรมชาติจึงไวต่อการทำปฏิกิริยาออกซิเจนและโอโซนโดยมีแสงแดด และความชื้นเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้อาจฉีกขาดได้หลังทำการใช้งาน เพราะฉะนั้นจึงได้มีการปรับปรุง ข้อเสียที่กล่าวไปด้วยการเติมวัสดุเสริมแรงอย่าง ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

## 2.4 กราฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide)

กราฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide) เป็นอีกรูปหนึ่งของคาร์บอนซึ่งอะตอมคาร์บอนจะเรียงตัวในรูปแบบหกเหลี่ยมเรียงเป็น แผ่นบาง ๆ ที่มีความหนาเพียงอะตอมเดียวของแกรไฟต์ (หนาเพียง 0.345 nm) แผ่นกราฟีนออกไซด์เป็นวัสดุที่มีค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus) สูง มีความแข็งแรงมาก น้ำหนักเบา (กราฟีนขนาด 1 ตารางเมตรมีน้ำหนักเพียง 0.77 มิลลิกรัมเท่านั้น) รวมทั้งยังมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง เกือบโปร่งใส และเป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าที่ดี การที่มันมีปฏิสัมพันธ์ที่ดีกับวัสดุอื่น ๆ และกับแสง และการที่โดยธรรมชาติเป็นแบบสองมิติของมัน ทำให้มันมีคุณสมบัติเฉพาะที่ไม่เหมือนใคร [7]



รูปที่ 2.9 แสดงสารแขวนลอยและโครงสร้างของกราฟีนออกไซด์ [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.1 การสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์

กราฟีนถูกสังเคราะห์ขึ้นครั้งแรกด้วยวิธี Micromechanical exfoliation หรือการลอกชั้นบาง ๆ ของ กราฟีนออกจากแกรไฟต์ วิธีนี้จะได้กราฟีนในปริมาณน้อย หลักการในการสังเคราะห์กราฟีนด้วยวิธีทางเคมีจะใช้วิธีการของฮัมเมอร์ เริ่มต้นด้วยการใช้กรดแก่และตัวออกซิแดนท์มาออกซิไดส์แกรไฟต์ได้เป็น แกรไฟต์ลอกไซด์ ซึ่งกลุ่มของออกไซด์ ไฮดรอกซิด คาร์บอกซิลิกและคาร์บอนิลจะเข้าไปแทรกและเกาะเต็มระนาบพื้นผิวในแต่ละชั้นของแกรไฟต์ ทำให้แต่ละชั้นของแกรไฟต์กว้างขึ้นและลดแรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างชั้น หากแกรไฟต์ออกไซด์ถูกระตุ้นด้วยแรงเพียงนิดเดียว เช่น ด้วยการใช้คลื่นความถี่สูง (Sonication) จึงสามารถหลุดลอกออกเป็นแผ่นกราฟีนออกไซด์(Graphene oxide) ดังแสดงโครงสร้างและลักษณะสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งมีสมบัติเป็นไฮโดรฟิลิก ละลายได้ดีในน้ำ เป็นตัวทำละลายชนิดมีขั้ว



รูปที่ 2.10 ขั้นตอนการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ (1) ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันได้แกรไฟต์ออกไซด์ (2) การใช้คลื่นความถี่สูง (Sonication) ในน้ำทำให้ชั้นของแกรไฟต์ออกไซด์หลุดลอกออกเป็นแผ่นกราฟีนออกไซด์ [19]

## 2.5 สีย้อม

ปัจจุบันสีอินทรีย์สังเคราะห์ถูกใช้อย่างแพร่หลายในกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมสารเคมีที่เกี่ยวกับสี รวมทั้งกระบวนการผลิตสีย้อม โดยกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมได้จำแนกสีย้อมตามวิธีใช้ออกเป็น 11 ประเภท ซึ่งสีย้อมแต่ละประเภทจะมีสูตรโครงสร้างทางเคมีสมบัติของสีย้อม ตลอดจนวิธีใช้ต่างกันและจากกระบวนการผลิต พบว่า ประมาณ 10-15% ของสีย้อมจะถูกปล่อยไปสู่สิ่งแวดล้อมในระหว่างกระบวนการย้อมสีสารตั้งต้นต่างๆ เช่น เส้นใยสิ่งทอที่ได้จากธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ พลาสติก หนัง กระจก น้ำมันถ่านหิน ขี้ผึ้ง และที่สำคัญคืออาหาร เครื่องสำอาง สีย้อมบางชนิดพบว่าเป็นสารพิษ หรือสารก่อมะเร็ง เป็นต้นเหตุของโรคมะเร็ง และเมื่อได้รับสะสมไปเป็นเวลานานจะก่อให้เกิดโรคมะเร็ง ซึ่งในกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมได้จำแนกสีสังเคราะห์ตามวิธีใช้งานออกเป็น 11 ประเภท ดังนี้

1) สีเอซิด (Acid Dye) สีชนิดนี้เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ มีประจุลบ ละลายน้ำได้ดี ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน กลไกในการติดสีเกิดเป็นพันธะไอออนิกใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนในน้ำสังเคราะห์ที่มีสภาพเป็นกรดเจือจาง สีเอซิดบางตัวสามารถนำกลับไปย้อมเส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่น ปอ ป่าน ไนลอน โยขนแกะ ไหม และอะคริลิกได้ดี วิธีการใช้จะนำสีสังเคราะห์ที่เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ไปละลายน้ำย้อมที่เป็นกรดหรือเป็นกลาง สีเอซิดไม่ทนต่อการซัก ไม่ทนเหงื่อ

2) สีไดเรกต์ (Direct Dye) หรืออาจเรียกว่า สีย้อมฝ้าย สีสังเคราะห์ชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบเฮโลเจนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิคที่ทำให้ตัวสีสามารถละลายน้ำได้ มีประจุลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส สีจะติดเส้นใยได้โดยโมเลกุลของสีจะจัดเรียงตัวแทรกอยู่ในระหว่างโมเลกุลเส้นใย และยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน สีไม่ทนต่อการซักน้ำ สีตกง่าย ทนแสง

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

4) สีดีสเพอร์ส (Disperse Dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำแต่มีสมบัติกระจายตัวได้ดี สามารถย้อมเส้นใยอะซิเตท เส้นใยโพลีเอสเตอร์ ไนลอน และอะคริลิกได้ดี การย้อมจะใช้สารพา(Carrier) เพื่อช่วยเร่งอัตราการดูดซึมของสีเข้าไปในเส้นใย หรือย้อมโดยใช้อุณหภูมิและความดันสูง สีดีสเพอร์สเป็นสีที่ทนแสงและการซักฟอกค่อนข้างดี แต่สีจะซีดถ้าถูกควันทหรือแก๊สบางชนิด เช่น แก๊สไนตรัสออกไซด์ สีดีสเพอร์สแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม โดยพิจารณาจากเคมีในสีย้อม ได้แก่ สีย้อมเอโซ (Azo Dyes) และสีย้อมแอมิโนแอนทราควิโนน (Amino Anthraquinone) ซึ่งทั้งสองกลุ่มประกอบด้วยอนุพันธ์ของเอทราโนลามีน (Ethanalamine;  $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}$ ) หรืออนุพันธ์ที่คล้ายคลึงกัน

5) สีรีแอกทีฟ (Reactive Dye) เป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบ เมื่ออยู่ในน้ำจะมีคุณสมบัติเป็นด่าง สีย้อมสังเคราะห์ชนิดนี้เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด โมเลกุลของสีจะยึดจับกับหมู่ไฮดรอกไซด์ ( $\text{OH}$ ) ของเซลลูโลสและเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ในสภาวะที่เป็นด่าง กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส สีรีแอกทีฟมี 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง 70-75 องศาเซลเซียส และกลุ่มที่ติดย้อมที่อุณหภูมิต่ำ สีรีแอกทีฟให้สีที่สดใส ทุกสีติดทนในทุกสภาวะ

6) สีอะโซอิก (Azoic Dye) สีสังเคราะห์ชนิดนี้ไม่สามารถละลายน้ำได้ การที่สีจะก่อรูปเป็นเส้นใยได้ต้องย้อมด้วยสารประกอบฟีนอลซึ่งละลายน้ำได้ก่อน ซึ่งเป็นกระบวนการทำให้รวมตัวเป็นสี (Coupling) แล้วย้อมทับด้วยสารไดอะโซคอมโพเนนตจึงจะเกิดเป็นสีได้ สีอะโซอิกใช้ย้อมเส้นใยได้ทั้งเซลลูโลส ไนลอน หรืออะซิเตท สีอะโซอิกเป็นสีที่ทนต่อการซัก แต่ไม่ทนต่อการขัดถู

7) สีแว้ต (Vat Dye) เป็นสีที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ เมื่อทำการย้อมต้องเตรียมน้ำย้อมให้สีแว้ตละลายน้ำโดยให้ทำปฏิกิริยากับสารรีดิวซ์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ สีแว้ตจะถูกรีดิวซ์ให้กลายเป็นเกลือ จึงซึมเข้าไปในเส้นใยได้ เมื่อนำผ้าไปผึ่งในอากาศสีในเส้นใยจะถูกออกซิไดส์เป็นสีแว้ต สีสังเคราะห์ชนิดนี้มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญอยู่ 2 ชนิด คือ สีอินดิโก้คาร์มิน (Indigoid carmine) และสีแอนทราควิโนอิด (Anthraquinoid)

8) สีเมอร์แดนท์ หรือโครม (Mordant or Chrome Dye) สีสังเคราะห์ชนิดนี้ต้องใช้สารช่วยติดเข้าไปช่วย เพื่อให้เกิดการติดสีบนเส้นใย สารที่ช่วยติดที่ใช้ คือ สารประกอบออกไซด์ของโลหะ เช่น โครเมียม ดีบุก เหล็ก อะลูมิเนียม เป็นต้น สีเมอร์แดนท์เป็นสีที่มีโมเลกุลใหญ่ ซึ่งเกิดจากสีเมอร์แดนท์หลายโมเลกุลจับกับโลหะแล้วละลายน้ำได้จึงทำให้ย้อมได้ง่าย ซึ่งใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนและเส้นใยพอลิเอไมด์ได้ดี

9) สีอินแกรน (Ingrain Dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ โดยจะเกิดเป็นสารแขวนลอยหลังจากปฏิกิริยากับน้ำ สีสังเคราะห์ชนิดนี้ใช้สำหรับย้อมผ้า

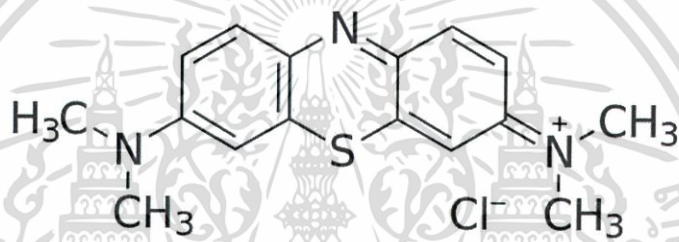
10) สีออกซิเดชัน (Oxidation Dye) เป็นสีที่ละลายน้ำโดยจะเกิดเป็นสารแขวนลอยหลังจากเกิดปฏิกิริยาในน้ำโดยสีจะติดแน่นอาศัยปฏิกิริยาการตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย ใช้สำหรับย้อมผ้าและขนสัตว์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11) สีซัลเฟอร์ (Sulfur Dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ เมื่อทำการย้อมต้องรีดิวซ์สีเพื่อให้โมเลกุลอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้ แต่สีซัลเฟอร์บางชนิดที่ผลิตออกมาจำหน่ายในรูปที่ถูกรีดิวซ์จะละลายน้ำได้นิยมนำสีซัลเฟอร์มาย้อมฝ้าย สีจะติดทนและเป็นสีที่มีราคาถูกแต่สีที่อ่อนจะไม่ทนต่อการซัก [20]

## 2.6 เมทิลีนบลู

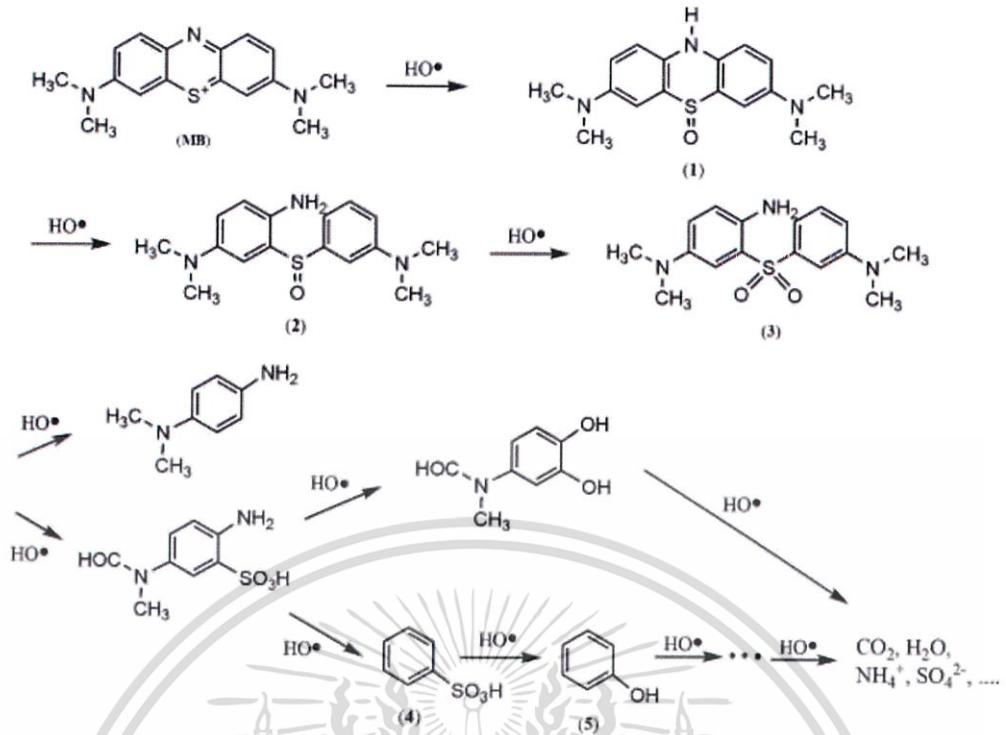
เมทิลีนบลู (Methylene blue; MB) จัดอยู่ในสารประกอบประเภทเฮเทอโรไซคลิก-อะโรมาติก สูตรโมเลกุลคือ  $C_{16}H_{18}N_3S$  ถูกนำมาใช้งานทั้งทางชีววิทยาและทางเคมี ที่อุณหภูมิห้องจะมีสถานะเป็นของแข็ง มีลักษณะเป็นผงสีเขียวเข้ม เมื่อนำมาละลายในน้ำจะเป็นสีฟ้า ในโครงสร้างจะประกอบด้วยผลึกน้ำ 3 โมเลกุลต่อโมล เมทิลีนบลูใช้เป็นส่วนผสมในสีย้อมผ้า ถ้ามนุษย์ได้รับเมทิลีนบลูเข้าสู่ร่างกายมากเกินไปจะมีอาการแสบร้อนในปากหรือท้อง คลื่นไส้ อาเจียน เจ็บหน้าอก แน่นหน้าอก หายใจเร็ว เกิดอาการวิตกกังวลและระคายเคืองต่อระบบทางเดินปัสสาวะ โครงสร้างของสีย้อมเมทิลีนบลูดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของเมทิลีนบลู (Methylene blue; MB)

### 2.6.1 กลไกการสลายตัวของเมทิลีนบลูในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก

เมื่อไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกแล้วจะได้ไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $OH^\cdot$ ) โดยไฮดรอกซิลเรดิคัลจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของเมทิลีนบลูได้เป็นซัลฟอกไซด์ (Sulfoxide) (1) และจะเกิดการเปิดวงที่ตำแหน่ง N heteroatom แล้วได้เป็นอนิลีน (Aniline) (2) จากนั้นไฮดรอกซิลเรดิคัลเข้าไปทำปฏิกิริยาต่อไปเรื่อยๆได้เป็นซัลโฟน (Sulfone) (3) จากการทำปฏิกิริยากันอย่างรุนแรงของไฮดรอกซิลเรดิคัลจะทำให้วงเบนซีนิก (Benzenic ring) แยกออกเป็น 2 วง เกิดเป็นกรดซัลโฟนิก (Sulfonic acid) (4) และสารประกอบฟีนอลิก (Phenolic compound) (5) ในที่สุดสารประกอบเหล่านี้ซึ่งเกิดจากกระบวนการสลายตัวของสารอินทรีย์จะถูกออกซิไดซ์ออกมาเป็นโมเลกุลเล็ก ๆ เช่น น้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ และสารประกอบจำพวกไอออนิกต่าง ๆ เช่น ซัลเฟต ( $SO_4^{2-}$ ) และแอมโมเนีย ( $NH_4^+$ ) ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 กลไกการสลายตัวของเมทิลีนบลู (Methylene Blue) [22]

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Stange และคณะ [23] ได้ทำการศึกษาเทคนิคโฟโตคะตะไลติกกับการบำบัดน้ำเสีย โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) เพื่อเป็นตัวเร่ง (Catalyst) ในงานวิจัยแสดงให้เห็นว่า เมื่อให้แสงช่วงอัลตราไวโอเล็ตใกล้กับไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำที่มีคลอรีนเตตระอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน (Chlorinated aliphatic hydrocarbon) ปนเปื้อนมากับน้ำ จะสามารถลดปริมาณคลอรีนและเปลี่ยนให้เป็นผลิตภัณฑ์อื่นที่ปลอดภัยได้ทั้งหมด นอกจากนั้นในขบวนการนี้สารปนเปื้อนอื่น ๆ รวมทั้งสารประกอบอะโรมาติก (Aromatic compounds) ที่ถูกออกซิไดส์ได้ยากก็สามารถเปลี่ยนให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย ดังนั้นการให้แสงอัลตราไวโอเล็ตใกล้กับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่แขวนลอยอยู่เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสมควรนำมาใช้ประโยชน์ จึงได้มีการนำเทคนิคนี้ไปประยุกต์ใช้กับการบำบัดน้ำที่มีสิ่งเจือปน แต่การใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ วิธีนี้มีข้อจำกัดคือ หลังจากขบวนการบำบัดน้ำเสร็จสิ้นแล้ว จำเป็นต้องแยกผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นอนุภาคเล็ก ๆ นี้ออก เนื่องจากมันสามารถที่จะติดอยู่ที่ผิวของภาชนะหรืออุปกรณ์ เช่น แก้ว ได้อย่างง่ายดาย ซึ่งถ้าปล่อยให้สารแขวนลอยของไทเทเนียมไดออกไซด์นี้แห้งติดอยู่บนเครื่องแก้วจะขจัดออกได้ยาก คราบของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ติดอยู่ในภาชนะ จะมีลักษณะเป็นฟิล์มเมื่อแห้งจะติดอยู่คล้ายขาว ไม่สามารถล้างน้ำออกได้

Chaval และคณะ [24] ได้ทำการศึกษาการเตรียมชั้นรูปไทเทเนียมไดออกไซด์โดยฝังลงบนแผ่นยางธรรมชาติเป็นวิธีที่ใหม่และง่าย จากการศึกษาพบว่าแผ่นยางไทเทเนียมไดออกไซด์ยังคง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติโฟโตคะตะไลติกของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ โดยแสดงให้เห็นว่ามีการสลายตัวของสารละลายเมทิลีนบลูภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต นอกจากนี้แผ่นยางยังมีข้อดีในการทำความสะดวกและง่ายต่อการนำกลับมาใช้ใหม่

กาญจนา และนงนุช [5] จากการศึกษาที่มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อม โดยศึกษาผลของกระบวนการบำบัดแบบผสมผสานระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์ น้ำย้อมที่ใช้ในการบำบัดได้แก่ น้ำย้อมสีไคเร็กซ์ สีรีแอคทีฟ สีแอซิด สีสเฟิร์ส และสีเบสิก ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในการบำบัด คือ 0 5 10 และ 15 กรัมต่อลิตร เวลา คือ 0 2 4 6 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่าสีไคเร็กซ์และสีรีแอคทีฟ มีความเหมาะสมในการบำบัดด้วยเทคนิคโฟโตคะตะไลติกที่ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 10 กรัมต่อลิตร เวลา 6 ชั่วโมง และถ่านกัมมันต์ 5 กรัมต่อลิตรเวลา 2 ชั่วโมง ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าเทคนิคโฟโตคะตะไลติก ร่วมกับกระบวนการดูดซับสามารถใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมได้

Anderson Guimarães de Oliveira และคณะ [25] ได้ทำการสังเคราะห์แผ่นผสมของไทเทเนียม (ซึบสเตรท) ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ ( $Ti/TiO_2/GO$ ) และ ไทเทเนียม (ซึบสเตรท)-ไทเทเนียม (สารละลาย)-ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $Ti/Ti/TiO_2$ ) สำหรับการประยุกต์ใช้งานปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก โดยการเตรียมแผ่นจากการเกาะตัวของกราฟีนออกไซด์และสารละลายไทเทเนียม (IV) ลงบนแผ่นไทเทเนียมโดยสังเคราะห์จากกระบวนการเคมีไฟฟ้า และได้ศึกษาสมบัติโฟโตคะตะไลติกของแผ่น โดยการเปลี่ยนแปลงสีของสีย้อมรีแอคทีฟ สีเหลือง 145 จากการศึกษาพบว่าแผ่นที่มี  $Ti/TiO_2/GO$  มีค่าปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกสูงเป็นสองเท่าของแผ่นผสม  $Ti/Ti/TiO_2$  นอกจากนั้นแผ่นผสม  $Ti/TiO_2/GO$  ยังมีความเสถียรสามารถนำกลับมาใช้ได้ และยังคงรักษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา ( $\approx 70\%$ ) หลังจากการใช้มา 15 ครั้ง

Shivan Ismael Abdullah และคณะ [26] ได้ศึกษาผลของกราฟีนออกไซด์ (GO) บนสารประกอบของ อีพอกซีเรซินที่ถูกเพิ่มเข้าไปในอีพอกซีเรซิน การเตรียมสารประกอบกราฟีนออกไซด์/อีพอกซี โดยเตรียมได้จากความแตกต่างร้อยละโดยปริมาณของกราฟีนออกไซด์ (0 1.5 3 4.5 และ 6 vol.% ) ใช้เพื่อผสมอีพอกซีที่มีอัตราส่วน 70/30 สารประกอบจะถูกผสมเป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส วางตัวอย่างในเตาอบ 40 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 3.5 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้นที่อาจดูดซับบนพื้นผิว เมื่อครบ 48 ชั่วโมง กราฟีนออกไซด์ทำปฏิกิริยากับสารประกอบเสริมผสมบวมและนำไปทดสอบแรงดึง จากผลการทดสอบพบว่า การเติมกราฟีนออกไซด์จะทำให้ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ค่าแรงดึง ณ จุดขาด ( Load at break ) ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus ) และค่าการยืดตัว (Elongation) เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 สารเคมี

1. ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide); Dagussa P25 (Anatase 80% Rutile 20%)
2. น้ำยางเข้มข้น (Concentrated natural rubber latex) 60 wt.%, High ammonia
3. สีย้อมเมทิลีนบลู (Methylene blue,  $C_{16}H_{18}N_3S$ ), MW 319.85 g/mol, บริษัท Sigma aldrich
4. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium solution 30 wt.%)
5. สารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide) เข้มข้น 4.00 mg/mL

#### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. อุปกรณ์เครื่องแก้วต่างๆ
2. ตู้ปฏิบัติการโฟโตคะตะไลติก ขนาด 1m x 1m x 1m
3. หลอดฟลูออเรสเซนต์ 5 หลอด (Black light, 18 วัตต์)
4. UV – VIS Spectrophotometer รุ่น Evolution 201series บริษัท Thermo Scientific
5. X – Ray Diffraction (XRD) D8 Advance Bruker AXS บริษัท Gmbh ประเทศเยอรมัน
6. Scanning Electron Microscopy (SEM) รุ่น EVO MA10 บริษัท ZEISS
7. Energy-dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) รุ่น EVO MA10 บริษัท ZEISS
8. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) รุ่น NICOLET 6700 บริษัท Thermo Scientific
9. Raman Spectrophotometer
10. เครื่องทดสอบแรงดึงอเนกประสงค์ Universal Testing Machine (UTM) LR 5K บริษัท LLOYD
11. Thermogravimetric Analysis (TGA) รุ่น TG 209 F3 บริษัท NETZSCH
12. เครื่องชั่งแบบดิจิทัลความละเอียด 4 ตำแหน่ง รุ่น ML 204/01 ยี่ห้อ Mettler Toledo
13. เครื่องปั่นกวนแบบให้ความร้อน (Hot plate)
14. แท่งแม่เหล็ก (Magnetic Bar)
15. ไมโครปิเปต (Micropipette)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 วิธีการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้รับสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์จากกลุ่มวิจัยของอาจารย์ชาวลัย ศรีวงษ์ ซึ่งสามารถสังเคราะห์โดยดัดแปลงวิธีของฮัมเมอร์ (Modified Hammer's method) วิธีนี้ใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ( $\text{conc. H}_2\text{SO}_4$ ) และโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ( $\text{KMnO}_4$ ) เป็นตัวออกซิไดส์ผงกราฟีนที่มีความบริสุทธิ์สูง ในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน แกรไฟต์ออกไซด์ที่ได้จะมีลักษณะเป็นผงสีน้ำตาลดำ จากนั้นนำไปสั่นด้วยคลื่นความถี่สูง (Sonicate) ในน้ำกลั่น แล้วเซนตริฟิวก็จะได้สารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ที่มีสีน้ำตาลส้มเข้มค่อนข้างดำที่พร้อมนำมาใช้งานต่อไป

#### 3.3.1 การเตรียม (Stock) สารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์

1. เปิดสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 4.00 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ที่ได้จากการเตรียมข้างต้นมา 5.00 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นลงไป 15.00 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน
2. เก็บสารละลายแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ที่ได้ไว้ในขวดแก้วก็จะได้ stock สารแขวนสารละลายกราฟีนออกไซด์เข้มข้น 1.00 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ที่จะนำไปใช้ในการทดลองต่อไป ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 สารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ในน้ำ ความเข้มข้น 1.00 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

### 3.3.2 การเตรียมแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์

ทำการเตรียมโดยใช้น้ำยางธรรมชาติชนิดเข้มข้น ไทเทเนียมไดออกไซด์ และสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ โดยปริมาณของน้ำยางธรรมชาติและไทเทเนียมไดออกไซด์คงที่ แต่จะทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์

1. ชั่งไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.0300 กรัม
2. เติมสารละลายแอมโมเนีย 3.00 มิลลิลิตร แล้วปั่นกวนเป็นเวลา 10 นาที
3. เติมน้ำยางเข้มข้น 6.00 มิลลิลิตร แล้วปั่นกวนเป็นเวลา 10 นาที
4. เติมสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 1.00 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ในปริมาณที่ต่างกัน คือ 0.00 0.10 0.30 0.50 และ 0.70 มิลลิลิตร และเติมน้ำกลั่นในปริมาณต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.1 แล้วปั่นกวนเป็นเวลา 10 นาที
5. เทขึ้นรูปในแบบที่เตรียมไว้ จากนั้นวางให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
6. แกะแผ่นยางผสมออกจากแบบ ก็จะได้แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ และกราฟีนออกไซด์ มีความหนา 0.56 มิลลิเมตร

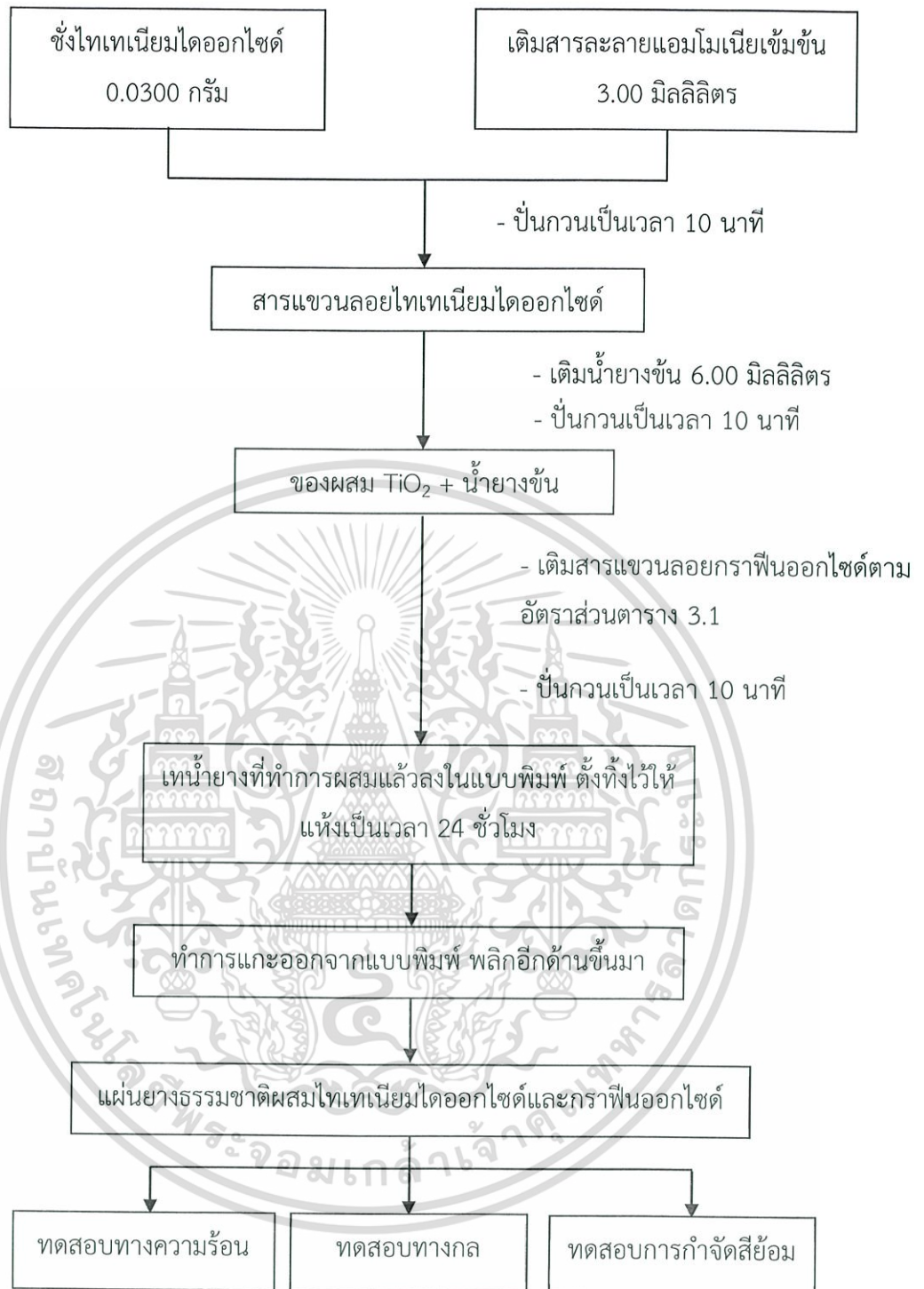
ตารางที่ 3.1 แสดงอัตราส่วนระหว่างสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์และน้ำกลั่นที่เติมในแผ่นยางธรรมชาติผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์

สภาวะการทดลอง	น้ำยางข้น (g)	TiO <sub>2</sub>		GO ( 1.00 mg/mL)		น้ำกลั่น (mL)
		g	wt.%*	mL	wt.%**	
1	3.6925	0.0300	0.6353	0.00	0.0000	1.00
2			0.6488	0.10	0.0022	0.90
3			0.6783	0.30	0.0068	0.70
4			0.7106	0.50	0.0118	0.50
5			0.7463	0.70	0.0174	0.30

หมายเหตุ \*ร้อยละโดยน้ำหนักของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อน้ำหนักรวม (น้ำยางแห้ง+TiO<sub>2</sub>+GO)

\*\*ร้อยละโดยน้ำหนักของกราฟีนออกไซด์ต่อน้ำหนักรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงแผนผังการเตรียมแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.3 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์

#### 3.3.3.1. การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู ( $1.50 \times 10^{-5}$ M) ด้วยแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ในที่มีด

นำแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ที่เตรียมได้ไปวางในจานเพาะเชื้อและเติมสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูเข้มข้น  $1.50 \times 10^{-5}$  โมลาร์ จำนวน 50.00 มิลลิลิตร วางบนเครื่องปั่นกวนในที่มีด จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างสีย้อมทุก 30 นาที เป็นเวลา 180 นาที แล้วจึงนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่อง UV-visible Spectrophotometer เพื่อศึกษาการเข้าสู่สมดุลการดูดซับ

#### 3.3.3.2. การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet light)

1. เตรียมสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูให้มีความเข้มข้น  $1.50 \times 10^{-5}$  โมลาร์
2. นำแผ่นยางธรรมชาติผสมที่เตรียมได้ใส่ในจานเพาะเชื้อ (Petri dish) แล้วนำไปใส่ในตู้ปฏิบัติการโฟโตคะตะไลติก
3. นำสารละลายสีย้อมที่เตรียมได้จำนวน 50.00 มิลลิลิตร เทใส่ในจานเพาะเชื้อและปล่อยให้ดูดซับในที่มีดเป็นเวลา 30 นาที พร้อมปั่นกวน
4. เก็บตัวอย่างก่อนเปิดไฟจำนวน 3.00 มิลลิลิตร แล้วเปิดไฟเพื่อทำการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต และทุก ๆ 30 นาที จะเก็บตัวอย่างสารละลายจำนวน 3.00 มิลลิลิตร เป็นเวลา 180 นาที
5. นำตัวอย่างสารละลายเมทิลีนบลูที่เก็บไว้ไปวัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectroscopy บันทึกค่าดูดกลืนที่  $\lambda_{\max} = 665$  นาโนเมตร
6. คำนวณหาร้อยละการกำจัดสีย้อม

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

$A_0$ : ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อมเริ่มต้น

$A_t$ : ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อมที่เวลาใด ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.3.3. การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู ( $2.50 \times 10^{-5}$ M) ด้วยแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ในที่มืด

นำแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ที่เตรียมได้ไปวางในจานเพาะเชื้อและเติมสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูเข้มข้น  $2.50 \times 10^{-5}$  โมลาร์ จำนวน 50.00 มิลลิลิตร วางบนเครื่องปั่นกวนในตู้มืด จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างสีย้อมทุก 15 นาที เป็นเวลา 75 นาที แล้วจึงนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่องยูวี (UV-visible Spectrophotometer) เพื่อศึกษาการเข้าสู่สมดุลการดูดซับ

### 3.3.3.4. การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ ภายใต้แสงอาทิตย์

1. เตรียมสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูให้มีความเข้มข้น  $2.50 \times 10^{-5}$  โมลาร์
2. นำแผ่นยางธรรมชาติผสมที่เตรียมได้ใส่ในจานเพาะเชื้อ (Petri dish) แล้วนำไปวางที่บริเวณที่มีพลังงานแสงอาทิตย์ที่เข้ม
3. นำสารละลายสีย้อมที่เตรียมได้จำนวน 50.00 มิลลิลิตร เทใส่ในจานเพาะเชื้อ
4. เก็บตัวอย่างสารละลายจำนวน 3.00 มิลลิลิตร ทุก ๆ 15 นาที เป็นเวลา 75 นาที
5. นำตัวอย่างสารละลายเมทิลีนบลูที่เก็บไว้ไปวัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectroscopy บันทึกค่าดูดกลืนที่  $\lambda_{\max} = 665$  นาโนเมตร
6. คำนวณหาร้อยละของการกำจัดสีย้อม

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

$A_0$ : ค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมเริ่มต้น

$A_t$ : ค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมที่เวลาใด ๆ

### 3.3.3.5. การศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานซ้ำของแผ่นยางธรรมชาติไทเทเนียม-ไดออกไซด์และ กราฟีนออกไซด์ ภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต

เลือกแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมที่ดีที่สุด นำมาทดสอบการใช้งานซ้ำ ซึ่งทำการศึกษาดังวิธีเดียวกันกับวิธีที่ 3.3.3.2 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู

### 3.3.4 การวิเคราะห์สมบัติของสารตั้งต้น และแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์

#### 1. วิเคราะห์โครงสร้างผลึกและระบุวัฏภาคองค์ประกอบต่าง ๆ ของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ด้วยเทคนิค X-ray Diffraction (XRD)

เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง (Non-destructive method) โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มุมต่าง ๆ กัน ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบ และระบุวัฏภาคองค์ประกอบต่าง ๆ ของสารตัวอย่าง โดยทั่วไปแล้ววัสดุที่เป็นผลึกจะมีการจัดเรียงตัวของอะตอมเป็นชั้น ๆ ซึ่งลักษณะการจัดเรียงตัวนี้จะมีลักษณะแตกต่างกันไปในผลึกแต่ละชนิด ซึ่งเป็นค่าเฉพาะตัว เมื่อรังสีเอ็กซ์ตกกระทบผลึกจะเกิดการกระเจิง (Scattering) และเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากชุดระนาบเหล่านี้ โดยเป็นไปตามกฎของแบร็ก (Bragg's law) [27] ซึ่งสามารถหาระยะห่างระหว่างระนาบได้ โดยอาศัยสมการที่ 3.1

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (3.1)$$

เมื่อ  $n$  = อันดับการเลี้ยวเบนซึ่งเป็นเลขจำนวนเต็ม

$\lambda$  = ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ โดยทั่วไปจะใช้รังสีเอ็กซ์ของ Cu K $\alpha$  (ความยาวคลื่น 0.154 nm)

$d$  = ระยะห่างระหว่างระนาบในผลึก

$\theta$  = มุมตกกระทบระหว่างรังสีเอ็กซ์และระนาบผลึก

ในงานวิจัยนี้ ต้องการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก และระบุวัฏภาคองค์ประกอบต่างๆของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์

#### 2. การศึกษาหาหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์และสารอินทรีย์ด้วยเครื่องเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR)

เทคนิค Infrared (IR) Spectroscopy เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการตรวจสอบเกี่ยวกับหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลของสารประกอบต่าง ๆ โดยอาศัยหลักการเกี่ยวกับการสั่น (Vibration) ของโมเลกุลแสงอินฟราเรดช่วงกลาง (2.5 – 25  $\mu\text{m}$ ) มีความถี่ตรงกับความถี่ของการสั่นของพันธะโควาเลนต์ในโมเลกุลของสาร เมื่อสารตัวอย่างได้รับพลังงานจากคลื่นรังสีอินฟราเรดที่เหมาะสม จะเกิดการสั่นของโมเลกุลทำให้โมเลกุลเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนต์ขั้วคู่ (Dipole moment) ของโมเลกุลทำให้โมเลกุลเกิดการดูดกลืนแสง แล้ววัดแสงที่ส่งผ่านออกมาแสดงผล เป็นความสัมพันธ์ของความถี่หรือเลขคลื่น กับค่าการส่งผ่านของแสงเรียกว่า IR Spectrum ซึ่งลักษณะสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารแต่ละชนิดจะมีสมบัติเฉพาะโมเลกุลของสารจึงสามารถดูดกลืนแสงอินฟราเรดได้ที่ความถี่ต่างกันขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของพันธะ และน้ำหนักของอะตอมของ Functional Groups ในโมเลกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยต้องการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันโครงสร้างของสารประกอบไทเทเนียม-ไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ และโมเลกุลของยางธรรมชาติของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียม-ไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์

### 3. วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันโครงสร้างของสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ กราฟีน-ออกไซด์ และโมเลกุลของยางธรรมชาติด้วยเทคนิค Raman Spectrophotometer

เป็นเครื่องมือวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันโครงสร้างของสารโดยใช้หลักการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด เมื่อรังสีอินฟราเรดถูกดูดกลืนพลังงานนั้นจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานการหมุนและการสั่นของโมเลกุล โดยโมเลกุลของสารแต่ละชนิดจะให้สเปกตรัมที่เป็นเอกลักษณ์ของพันธะในโมเลกุลนั้นๆ ซึ่งเป็นการพิสูจน์หาโครงสร้างของสารประกอบ

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยต้องการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันโครงสร้างของสารประกอบไทเทเนียม-ไดออกไซด์ กราฟีนออกไซด์ และโมเลกุลของยางธรรมชาติของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียม-ไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์

### 4. ศึกษาสัณฐานวิทยาและดูรายละเอียดพื้นผิวของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียม-ไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร การเตรียมตัวอย่าง เพื่อที่จะดูด้วยเครื่อง SEM นี้ไม่จำเป็นต้องเตรียมตัวอย่างแผ่นบาง (เพราะไม่ได้ตรวจวัดจากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง) การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษา สัณฐานวิทยาและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของ เนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้ ต้องการศึกษาสัณฐานวิทยาและดูรายละเอียดพื้นผิวของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์

### 5. วิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบพื้นผิวชิ้นงานของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียม-ไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ Energy-Dispersive x-ray Spectroscopy (EDS)

อุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบพื้นผิวชิ้นงานตัวอย่าง การใช้กล้องจุลทรรศน์ SEM ร่วมกับเทคนิค EDS หรือ EDX ทำให้การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานมีความละเอียดและได้ข้อมูลที่สมบูรณ์มากขึ้น

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยต้องการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวชิ้นงานของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์

## 6. ทดสอบการดึงแผ่นยางผสมที่เติมสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ในปริมาณต่าง ๆ เพื่อศึกษาค่าความแข็งแรงและความยืดหยุ่นด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ทำการทดสอบการดึงยืด เพื่อศึกษาค่าความแข็งแรงและความยืดหยุ่น โดยจะดูที่ค่าโมดูลัสยั้ง (E) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความแข็งแรงของวัสดุที่ต้องการทดสอบด้วยการใช้วิธีดึงจนขาด ด้วยอัตราเร็วคงที่ ซึ่งการทดสอบแรงดึงเป็นการวัดที่ใช้ทดสอบผลิตภัณฑ์ประเภท กุ้งพลาสติก ฟิล์ม สายเคเบิล ท่อ และ อื่น ๆ อีกมากมาย

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยต้องการแสดงค่าการทดสอบการดึงแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ เพื่อศึกษาค่าความแข็งแรงและความยืดหยุ่น

ขนาดชิ้นงาน	1 cm x 6 cm
ความเร็วของการดึง	100 mm/min
ความยาวเกจ (Guage length)	30 mm
ค่าสูงสุดที่เครื่องรับได้	100 N
จำนวนชิ้นงานที่ทดสอบ	4 ชิ้น/ความเข้มข้นของกราฟีนออกไซด์

## 7. วิเคราะห์ความเสถียรของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์เมื่อได้รับความร้อนโดยการวัดน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA)

เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุโดยเฉพาะพอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อนโดยการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่องซึ่งที่มีความไวสูง เทคนิคนี้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสภาพของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับแก๊สหรือระเหยของน้ำ การตกผลึก (Crystallization) อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนเฟส การแตกตัวของวัสดุ (Decomposition) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน หรือ ปริมาณสารสัมพันธ์ (Stoichiometry) ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง ตัวอย่างจะถูกวางบนจานขนาดเล็ก ซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องชั่งละเอียดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง โดยที่ทั้งหมดจะถูกอยู่ในเตาที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและบรรยากาศได้ บรรยากาศภายในอาจจะเป็นแก๊สเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน หรือแก๊สที่มีความว่องไว เช่น อากาศ หรือ ออกซิเจน โดยน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเฉพาะของสารแต่ละชนิด โดยน้ำหนักที่หายไปนั้นเกิดมาจากการระเหย การย่อยสลาย หรือการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ โดยในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่อง TGA ในการหาเสถียรภาพทางความร้อนของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์

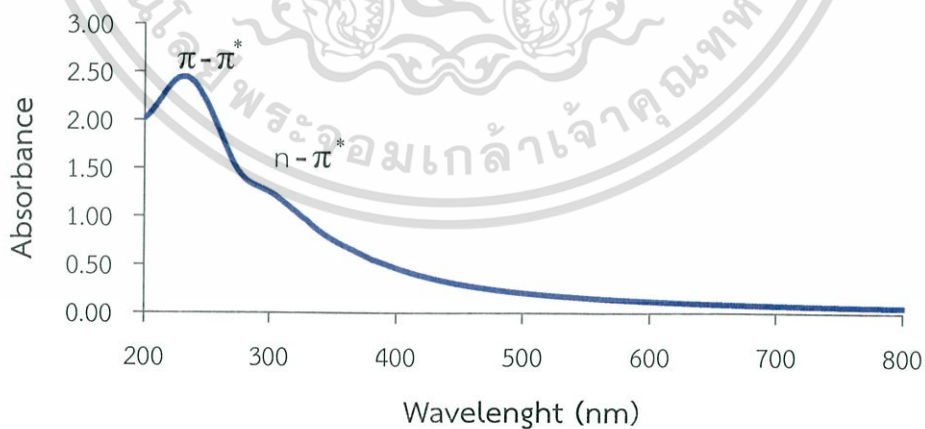
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการอภิปราย

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการทดลองจากการเตรียมแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ และกราฟีนออกไซด์ ซึ่งจะแสดงผลต่าง ๆ ดังนี้ ผลของการศึกษาหาหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์และสารอินทรีย์ด้วยเครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer; FT-IR) ผลของการศึกษาเชิงโมเลกุลและหมู่ฟังก์ชันด้วยการตรวจสอบการกระเจิงด้วยเครื่องรามานสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Raman spectrophotometer) ผลของการศึกษาเอกลักษณ์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X - Ray Diffraction; XRD) ผลของการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) ผลของการศึกษาหาวิเคราะห์ธาตุต่อองค์ประกอบภายในตัวอย่าง (Energy Dispersive x-ray Spectroscopy; EDS) ผลของการศึกษาสมบัติเชิงกลโดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึงอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine; UTM) ผลของการศึกษาการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis; TGA) ผลของการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV - Visible spectrophotometer) ตามลำดับ พร้อมทั้งอภิปรายผลการทดสอบที่ได้

#### 4.1 การศึกษาเอกลักษณ์ของกราฟีนออกไซด์ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV - Visible Spectrophotometer)

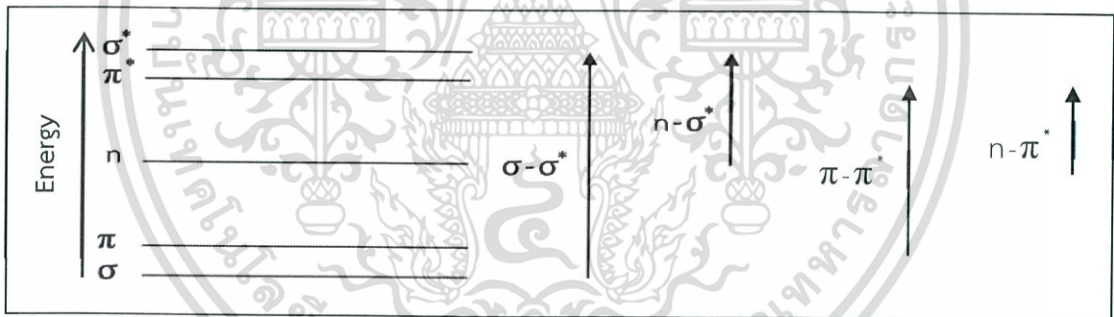
ผลการวิเคราะห์การวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV - visible spectrophotometer ของกราฟีนออกไซด์ มีผลการศึกษาดังรูปที่ 4.1



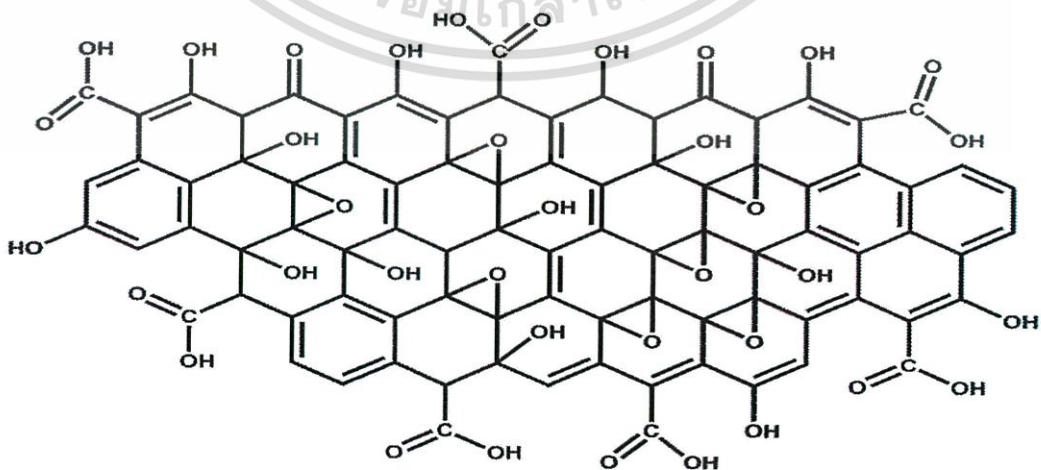
รูปที่ 4.1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของกราฟีนออกไซด์ (GO)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 เมื่อพิจารณาค่าการดูดกลืนแสง พบว่ากราฟีนออกไซด์จะดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 230 นาโนเมตร ซึ่งเป็นการเปลี่ยนสถานะ  $\pi - \pi^*$  และจะพบพีคเล็ก ๆ ที่ความยาวคลื่นประมาณ 300 นาโนเมตร ซึ่งเป็นการเปลี่ยนสถานะ  $n - \pi^*$  เนื่องจากการเปลี่ยนสภาวะของอิเล็กตรอนที่เกิดในสารอินทรีย์ที่สำคัญมี 4 แบบ [28] คือ  $\sigma - \sigma^*$   $n - \sigma^*$   $\pi - \pi^*$  และ  $n - \pi^*$  ซึ่งการเปลี่ยนสถานะนี้ใช้พลังงานต่างกัน ดังรูปที่ 4.2 สำหรับการเปลี่ยนสถานะ  $\sigma - \sigma^*$  ซึ่งเกิดขึ้นกับสารประกอบไม่อิ่มตัวใช้พลังงานมากที่สุด และเกิดที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 200 นาโนเมตร การเปลี่ยนสถานะ  $\pi - \pi^*$  เกิดกับสารประกอบที่มีพันธะคู่ พันธะสาม และอะโรมาติก เนื่องจากระดับพลังงานของ  $\pi - \pi^*$  ออร์บิทัลอยู่ระหว่าง  $\sigma$  และ  $\sigma^*$  ออร์บิทัล ดังนั้นการเกิด  $\pi - \pi^*$  ทรานซิชันจึงต้องการพลังงานมากกว่า  $n - \pi^*$  ทรานซิชัน การที่อิเล็กตรอนหนึ่งตัวใน  $\pi$ -bonding ออร์บิทัลถูกกระตุ้นไปอยู่ใน  $\pi^*$  ซึ่งเป็นออร์บิทัลที่ด้านการสร้างพันธะ มีผลให้พันธะคู่ระหว่างคาร์บอน-คาร์บอนอ่อนลง ซึ่ง  $\pi - \pi^*$  จะเกิดได้ที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 220 นาโนเมตรขึ้นไป ขึ้นอยู่กับว่าโมเลกุลมีพันธะคู่โดด (Isolated double bond) หรือพันธะคู่ต่อเนื่อง (Conjugated double bond) กับโครโมฟอร์อื่น ถ้าโมเลกุลมีพันธะคู่ต่อเนื่อง อิเล็กตรอนใน  $\pi$  ออร์บิทัลหนึ่งสามารถเรโซแนนซ์ไปยัง  $\pi$  ออร์บิทัลอื่นที่มีอยู่ในโมเลกุลนั้นได้ ทำให้พันธะคู่ระหว่างคาร์บอน-คาร์บอนยิ่งอ่อนลง ทำให้พลังงานในการทรานซิชันลดลง และการเปลี่ยนสถานะ  $n - \pi^*$  เกิดกับโมเลกุลที่มีทั้ง  $n$ - และ  $\pi$  ออร์บิทัล ซึ่งได้แก่สารประกอบคาร์บอนิล



รูปที่ 4.2 ระดับพลังงานของการเปลี่ยนแปลงอิเล็กตรอน



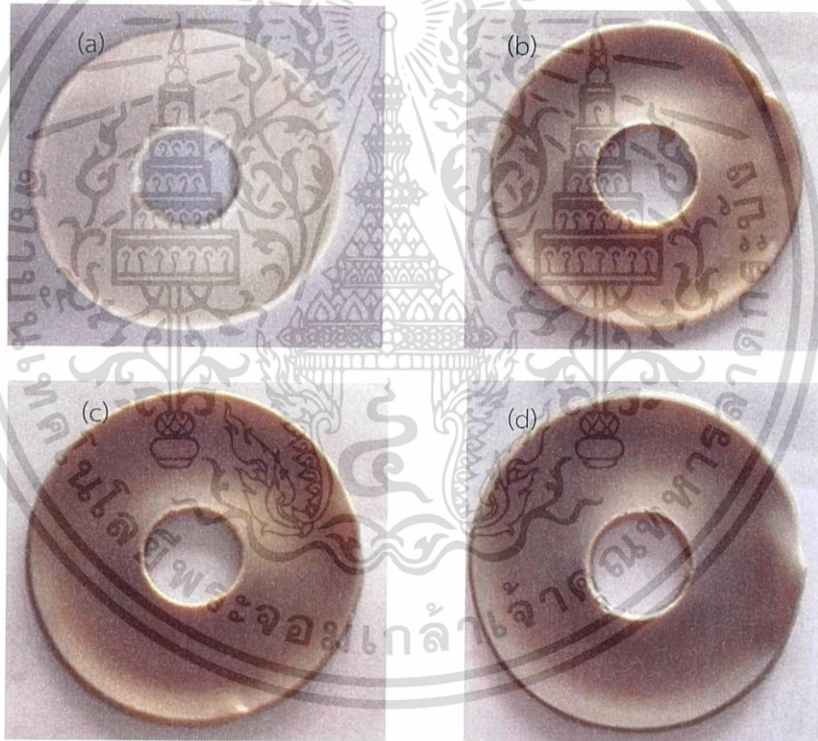
รูปที่ 4.3 โครงสร้างกราฟีนออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การศึกษาเอกลักษณ์ของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีน-ออกไซด์

ในการทดลองนี้ได้ทำการเตรียมแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีน-ออกไซด์ โดยใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ น้ำยางข้น และสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์เป็นวัสดุตั้งต้น ซึ่งเป็นการเตรียมแผ่นยางธรรมชาติผสมด้วยวิธีการอย่างง่าย

หลังจากที่ได้เตรียมแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณ 0.0022 0.0068 0.0118 และ 0.0174 wt.% ลักษณะทางกายภาพของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้มีสีขาวขุ่น ส่วนแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์มีลักษณะสีค่อนข้างดำและเข้มขึ้นตามปริมาณสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ที่เติมลงไป ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงภาพถ่ายของ (a) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์

(b) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0068 wt.%

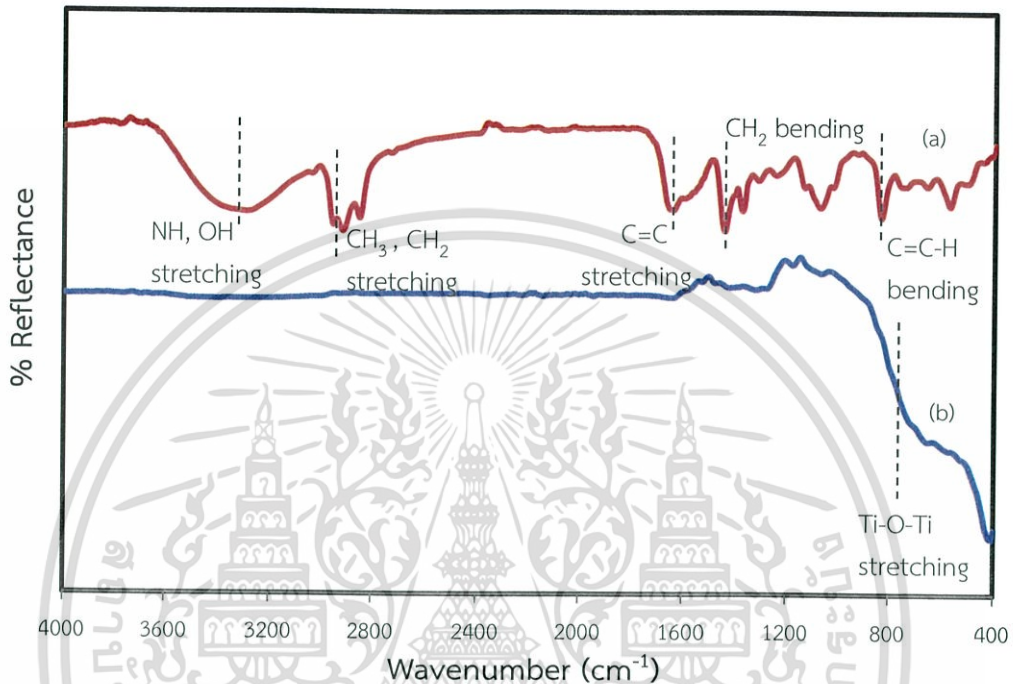
(c) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0118 wt.%

(d) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0174 wt.%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.1 การตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์และสารอินทรีย์ด้วยเทคนิคดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (FT-IR Spectroscopy);

เพื่อศึกษาวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของแผ่นยางธรรมชาติและไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 FT-IR สเปกตรัมของ (a) แผ่นยางธรรมชาติ (b) ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ P25

ผลการตรวจสอบจากรูปที่ 4.5 แสดงสเปกตรัมของแผ่นยางธรรมชาติและผงไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และจะปรากฏพีคเอกลักษณ์ของแผ่นยางธรรมชาติ (a) พบหมู่ฟังก์ชัน N-H และ O-H stretching ที่แถบการสั่นเลขคลื่นในช่วงประมาณ  $3500-3100\text{ cm}^{-1}$  และพบหมู่ฟังก์ชัน  $\text{CH}_3$ ,  $\text{CH}_2$  stretching ที่แถบการสั่นเลขคลื่นที่  $2950$  และ  $2917\text{ cm}^{-1}$  และ C=C stretching  $\text{CH}_2$  bending ที่แถบการสั่นเลขคลื่นที่  $1667$   $1443\text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ ส่วนพีคเอกลักษณ์ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 (b) โดยพบที่แถบการสั่นเลขคลื่นต่ำกว่า  $800\text{ cm}^{-1}$  เป็นการสั่นของ Ti-O-Ti ดังตารางที่ 4.1

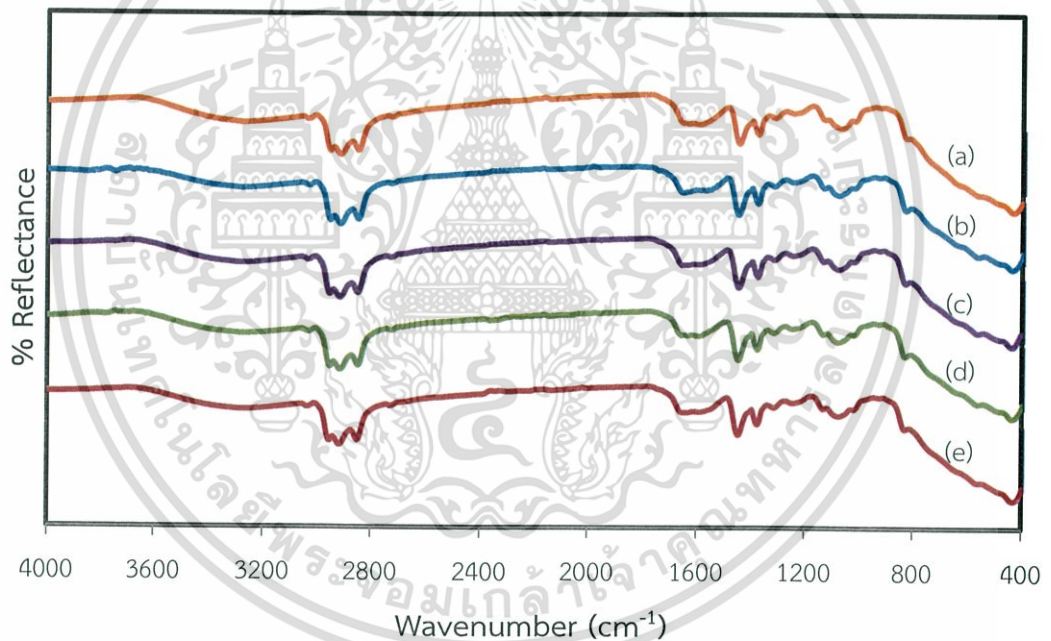
ตารางที่ 4.1 แสดงหมู่ฟังก์ชันของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และแผ่นยางธรรมชาติ

ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 [29]	
เลขคลื่น ( $\text{cm}^{-1}$ )	หมู่ฟังก์ชัน
ต่ำกว่า 800	Ti-O-Ti stretching

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางธรรมชาติ [30]	
เลขคลื่น ( $\text{cm}^{-1}$ )	หมู่ฟังก์ชัน
3500-3100	N-H และ O-H stretching
2950	$\text{CH}_3$ stretching
2917	$\text{CH}_2$ stretching
1667	C=C stretching
1443	$\text{CH}_2$ bending
838	C=C-H bending

ผลจากการวิเคราะห์สเปกตรัมโครงสร้างโมเลกุลด้วยเครื่องฟูเรียรทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทร-  
มิเตอร์ของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 FT-IR spectra ของ (a) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์

(b) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0022 wt. %

(c) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0068 wt. %

(d) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0118 wt. %

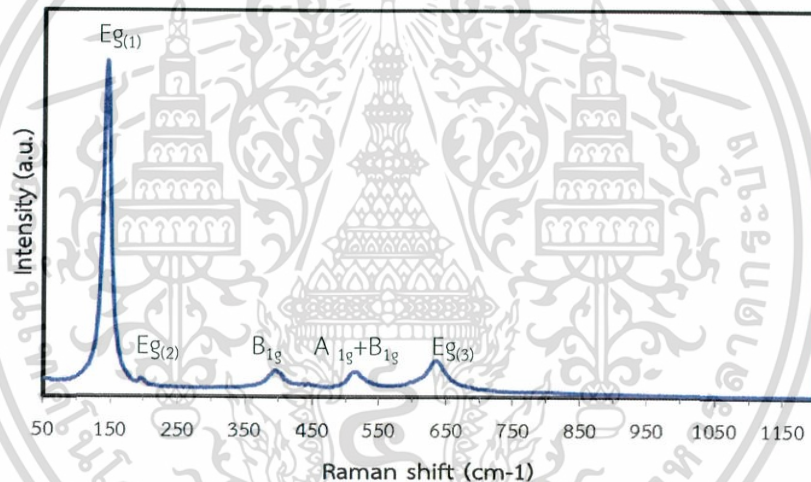
(e) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0174 wt. %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองจากรูปที่ 4.6 แสดงสเปกตรัมของ (a) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ จะปรากฏพีคเอกลักษณ์ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ที่แถบการสั่นเลขคลื่นต่ำกว่า  $800\text{ cm}^{-1}$  และพบพีคเอกลักษณ์ของยางธรรมชาติ และ (b)-(e) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณแตกต่างกัน จะพบพีคเอกลักษณ์ของยางธรรมชาติและผงไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 แต่จะไม่พบพีคเอกลักษณ์ของกราฟีนออกไซด์ เนื่องจากว่ากราฟีนออกไซด์ที่เติมลงไปนั้นมีปริมาณที่น้อย

#### 4.2.2 การตรวจสอบการกระเจิงแสงของโมเลกุลด้วยด้วยเทคนิครามาน (Raman spectroscopy)

เป็นการตรวจวัดเอกลักษณ์เฉพาะของสารตัวอย่างโดยอาศัยหลักการกระเจิงของแสงของแต่ละพันธะในแต่ละโมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในสารตัวอย่าง เพื่อทำการยืนยันเฟสและยืนยันโครงสร้างที่เกิดขึ้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ รูปที่ 4.7

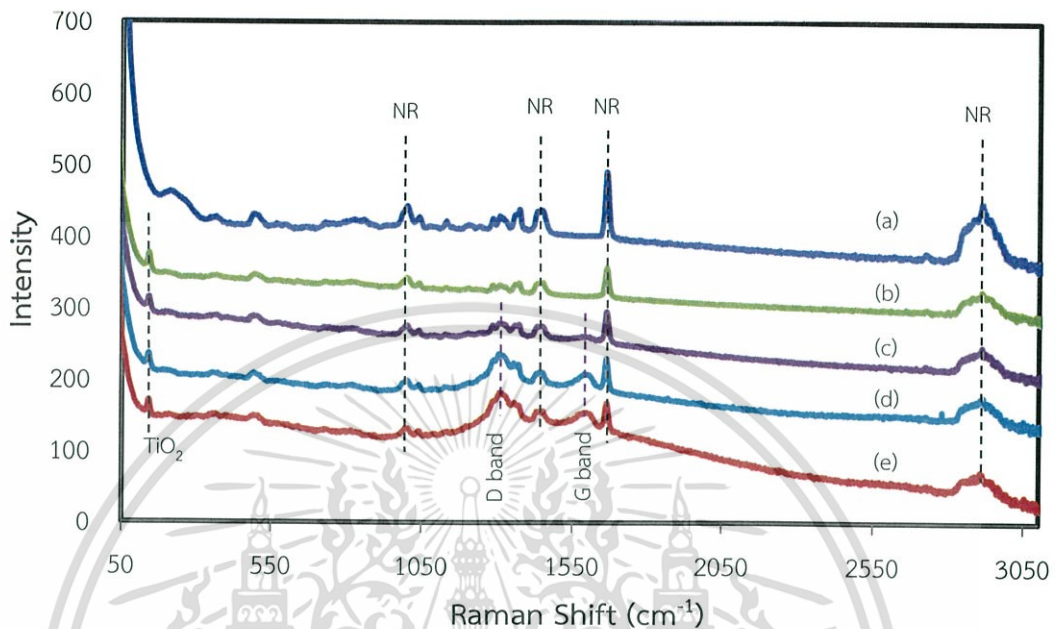


รูปที่ 4.7 รูปแบบรามานของไทเทเนียมไดออกไซด์

จากผลการตรวจสอบรูปที่ 4.7 แสดงรูปแบบรามานของไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยทำการตรวจวัดบริเวณเลขคลื่นรามาน (Raman shift) ที่  $50 - 1200\text{ cm}^{-1}$  พบพีคโหมดการสั่นของโมเลกุลไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งได้แก่  $E_{g(1)}$ ,  $E_{g(2)}$ ,  $B_{1g}$ ,  $A_{1g}+B_{1g}$  และ  $E_{g(3)}$  และมีค่าเลขคลื่นรามาน (Raman shift) ตรงกับ  $144$ ,  $197$ ,  $396$ ,  $512$  และ  $640\text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ [31] ซึ่งมีลักษณะเป็นพีคแหลม (Sharp peak) โหมดการสั่นนี้บ่งบอกถึงเฟสอนาเทส ส่วนเฟสรูไทล์จะพบพีคโหมดการสั่นของโมเลกุลที่มีค่าเลขคลื่นรามานตรงกับ  $236$ ,  $448$  และ  $612\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งไม่สามารถพบลักษณะของพีคที่ชัดเจนได้ เนื่องจากเลขคลื่นใกล้เคียงกับเลขคลื่นของเฟสอนาเทส ซึ่งโหมดการสั่นของเลขคลื่นรามานที่ตำแหน่งดังกล่าวสอดคล้องกับโหมดการสั่นในย่านรามานที่เป็นลักษณะเฉพาะของไทเทเนียมไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการตรวจวัดเอกลักษณ์เฉพาะของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์เพื่อทำการยืนยันเฟสและยืนยันโครงสร้างที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิควิเคราะห์รามาน-สเปกโตรสโกปี ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 รูปแบบรามานของ (a) แผ่นยางธรรมชาติ

(b) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์

(c) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0068 wt.%

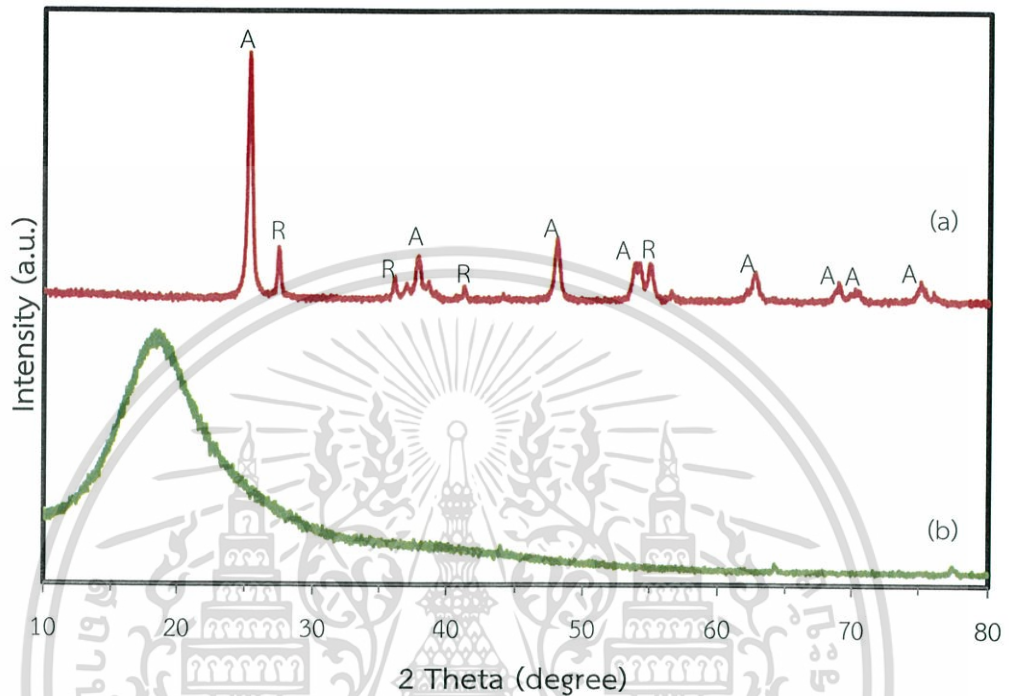
(d) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0118 wt.%

(e) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0174 wt.%

ผลการตรวจสอบจากรูปที่ 4.8 แสดงรูปแบบรามานของ (a) แผ่นยางธรรมชาติ พบโหมดการสั่นที่เลขคลื่นรามาน (Raman shift) ตรงกับ  $990$   $1450$   $1650$   $\text{cm}^{-1}$  และช่วงประมาณ  $2800 - 3000$   $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งพีคที่ตำแหน่งนี้แสดงเอกลักษณ์ของยางไอโซพรีนในโครงสร้างของยางธรรมชาติ และ (b) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ จะพบพีคเอกลักษณ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เลขคลื่นรามานที่  $144$   $\text{cm}^{-1}$  ส่วน (c) - (e) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ จะพบพีค D band ที่ตำแหน่งประมาณ  $1349$   $\text{cm}^{-1}$  และ G band ที่ตำแหน่งประมาณ  $1594$   $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งยืนยันได้ว่าแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้ทำการเตรียมขึ้นมามีกราฟีนออกไซด์เป็นส่วนประกอบอยู่ด้วย ซึ่งพีคจะเด่นชัดขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณกราฟีนออกไซด์

### 4.2.3 การตรวจสอบเอกลักษณ์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X- Ray Diffraction; XRD)

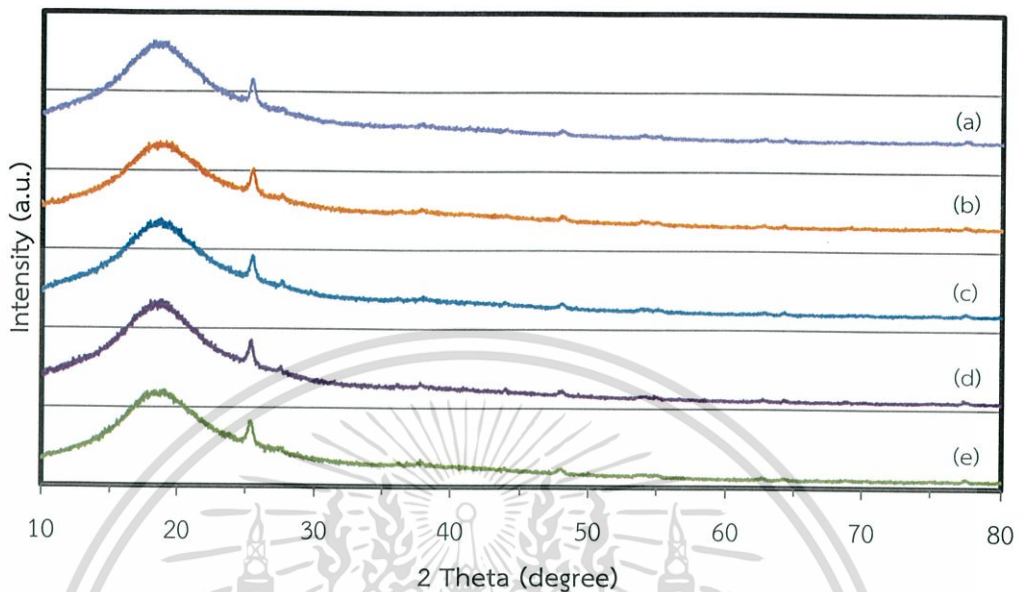
การวิเคราะห์ลักษณะผลึกและอสัณฐานด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของแผ่นยางธรรมชาติและผงไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 รูปแบบ XRD ของ (a) ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และ (b) แผ่นยางธรรมชาติ

ผลการตรวจสอบจากรูปที่ 4.9 (a) ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 จะพบโครงสร้างเฟสอนาเทสและรูไทล์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยเฟสอนาเทสมีมุมการเลี้ยวเบนที่  $2\theta = 25.50^\circ$  ที่ระนาบ 101 และยังมีที่ระนาบ 103 200 105 204 116 220 และ 215 อีกด้วย ส่วนเฟสรูไทล์มีมุมการเลี้ยวเบนที่  $2\theta = 27.50^\circ$  ที่ระนาบ 101 และยังมีที่ระนาบ 211 ซึ่งเป็นรูปแบบเอกลักษณ์ของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด Degussa P25 [29] และ (b) แผ่นยางธรรมชาติ จะพบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มุมการเลี้ยวเบนที่  $2\theta = 19^\circ$  เท่านั้น

การวิเคราะห์ลักษณะผลึกและออสัณฐานด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ ดังรูปที่ 4.10

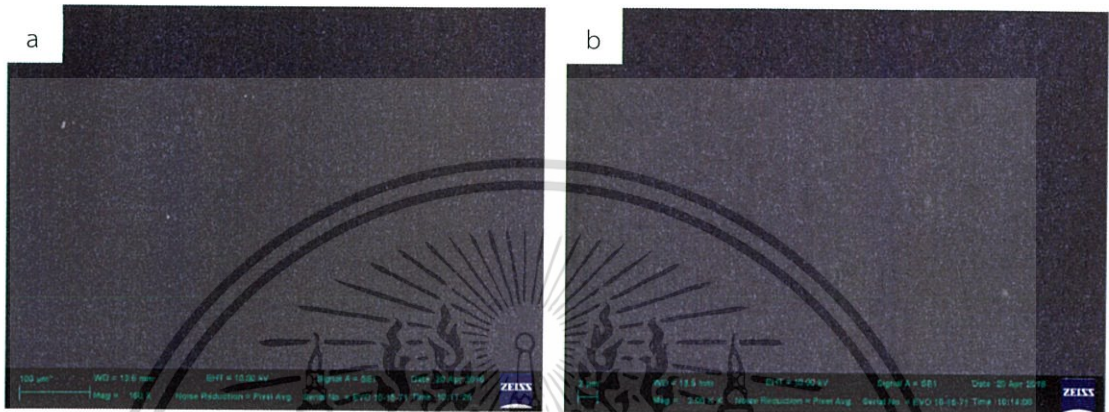


รูปที่ 4.10 รูปแบบ XRD ของ (a) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (b) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0022 wt.% (c) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0068 wt.% (d) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0118 wt.% (e) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0174 wt.%

จากผลการทดลองรูปที่ 4.10 (a) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ จะพบมุมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของทั้งแผ่นยางธรรมชาติและไทเทเนียมไดออกไซด์ และ (b) – (e) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ จะพบโครงสร้างเฟสอนาเทสและรูไทล์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ มีมุมการเลี้ยวเบนที่  $2\theta = 25.50^\circ$  (101, anatase) และ  $2\theta = 27.50^\circ$  (101, rutile) แต่ไม่สามารถสังเกตเห็นพีคเอกลักษณ์ของมุมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของกราฟีนออกไซด์ ( $2\theta = 11.80^\circ$ ) ในตัวอย่างของแผ่นยางธรรมชาติผสมนี้ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่ากราฟีนออกไซด์ที่เติมลงไปมีปริมาณน้อยมากรวมทั้งมีความเป็นผลึกต่ำด้วย

#### 4.2.4 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแผ่นยางธรรมชาติ แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ และแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ในปริมาณต่าง ๆ มีผลดังรูปที่ 4.11



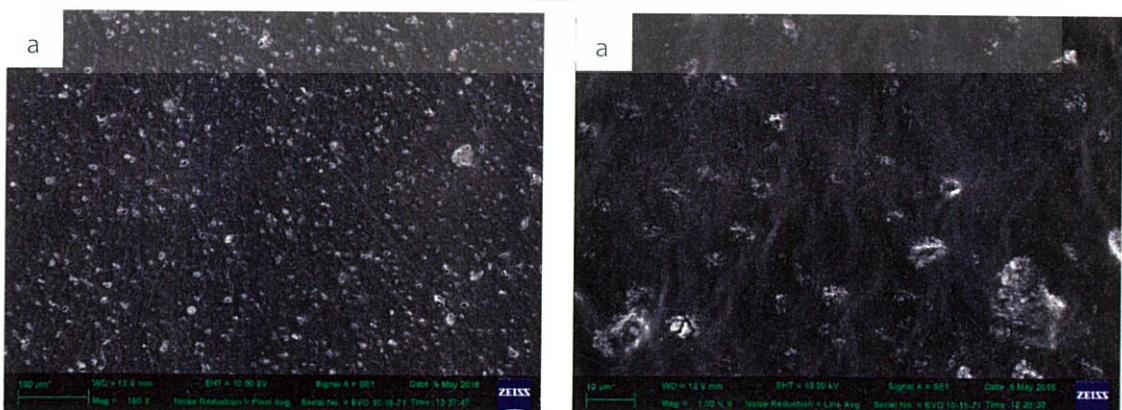
รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM ของแผ่นยางธรรมชาติ (a) กำลังขยาย X150 เท่า และ (b) กำลังขยาย X2000 เท่า

จากรูปที่ 4.11 ศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าแผ่นยางธรรมชาติมีลักษณะค่อนข้างเรียบ

ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ และแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ปริมาณ 0.0022 0.0068 0.0118 และ 0.0174 wt.% มีผลดังรูปที่ 4.12

X150

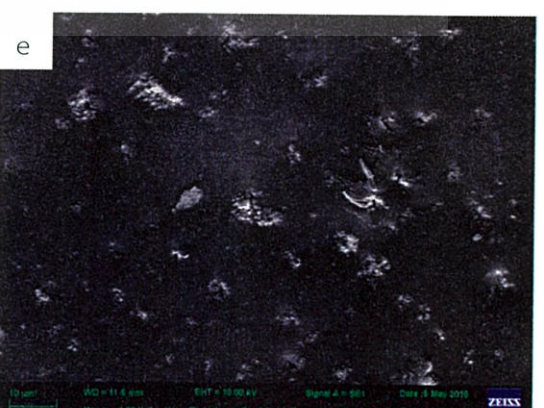
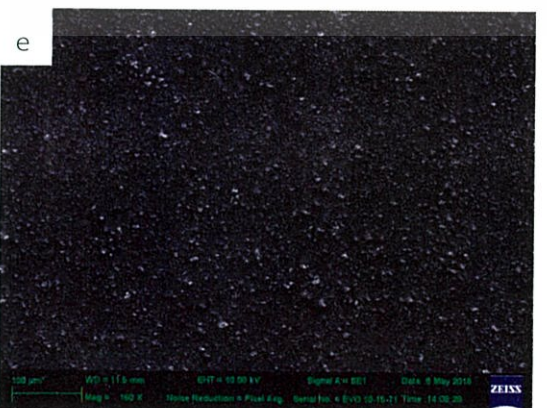
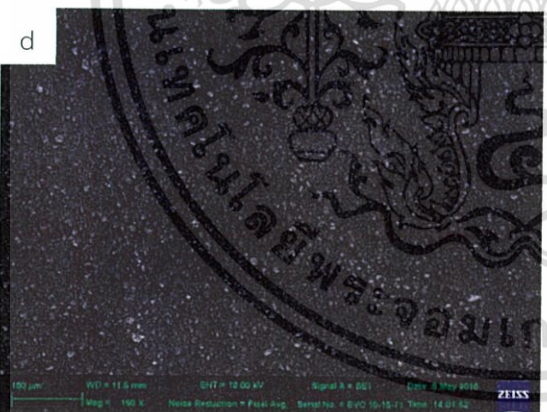
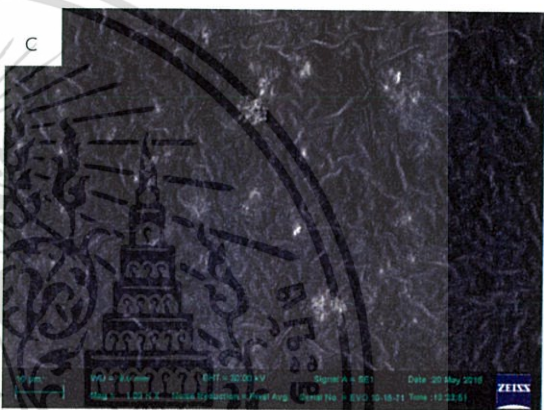
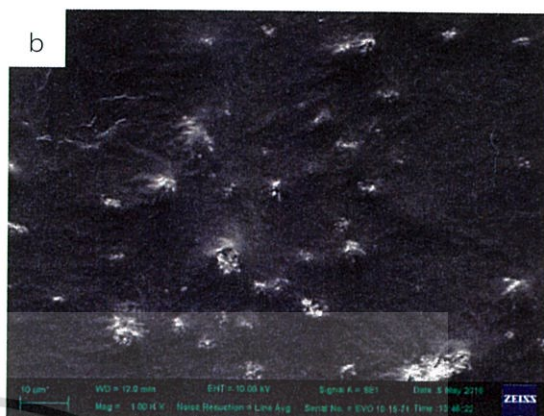
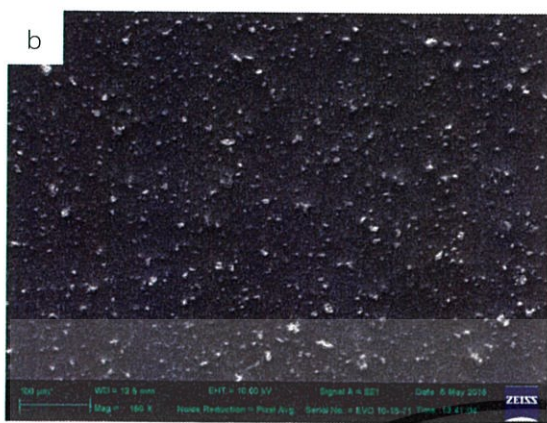
X1000



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

X150

X1000



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

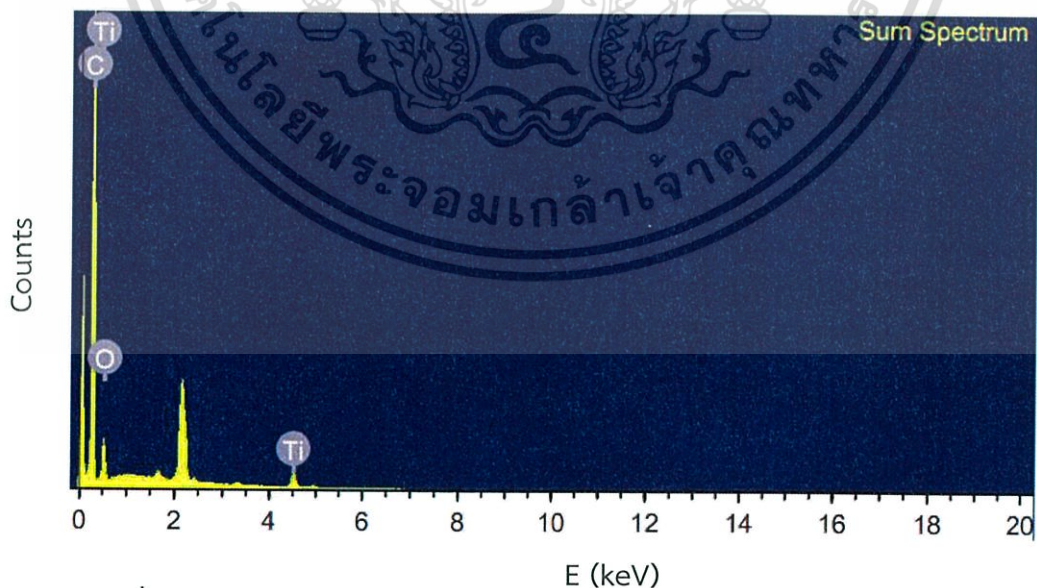
รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM กำลังขยาย X150 เท่า และ X1000 เท่า ของ

- แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์
- แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0022 wt.%
- แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0068 wt.%
- แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0118 wt.%
- แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0174 wt.%

จากรูปที่ 4.12 ศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์มีลักษณะขรุขระ เนื่องจากมีอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ฝังอยู่ และเมื่อเติมกราฟีนออกไซด์ลงไปก็จะมีลักษณะขรุขระมากขึ้นและมีการกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์ดีขึ้นด้วย เนื่องจากกราฟีนออกไซด์ที่เติมลงไปจะไปจับกับอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่เกาะกลุ่มกันเอง เป็นเม็ดขนาดเล็ก และมีการกระจายตัวบนพื้นผิวของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ดีอีกด้วยเมื่อเติมกราฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้นซึ่งอาจนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูได้ดียิ่งขึ้น

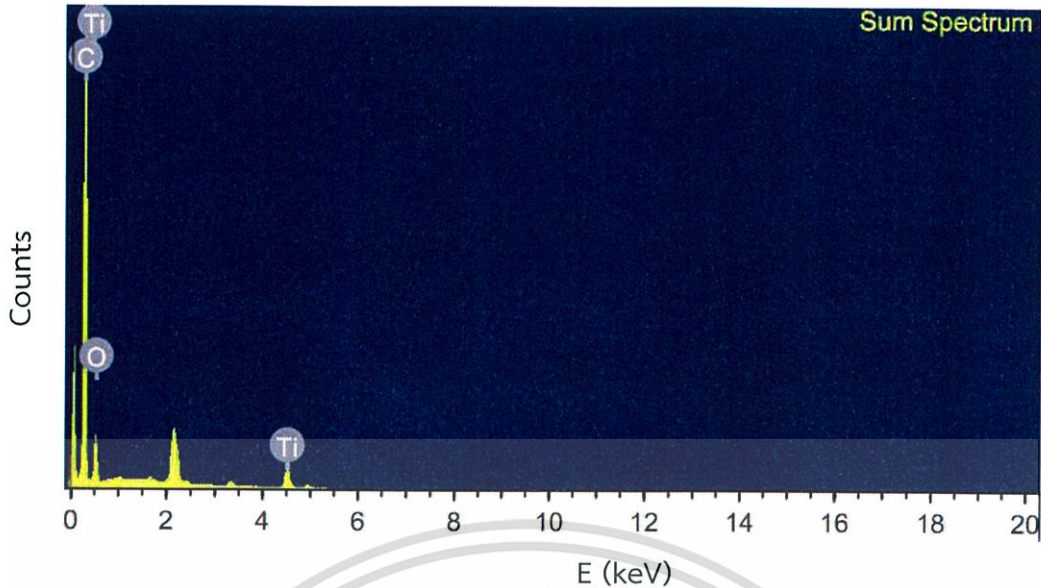
#### 4.2.5 การตรวจสอบธาตุองค์ประกอบภายในตัวอย่าง (Energy Dispersive x-ray Spectroscopy; EDS)

การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวของตัวอย่างแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนในปริมาณต่างๆโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ SEM ร่วมกับเทคนิค EDS ทำให้การวิเคราะห์ลักษณะบนพื้นผิวมีความละเอียดและได้ข้อมูลที่สมบูรณ์มากขึ้น



รูปที่ 4.13 แสดง EDX Spectrum ของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 แสดง EDX Spectrum ของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ 0.0174 wt.%

ตารางที่ 4.2 แสดง % ธาตุองค์ประกอบของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์

แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์		
ธาตุ	%น้ำหนัก	%อะตอม
C	70.54	82.68
O	14.78	13.00
Ti	14.69	4.32
แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0174 wt.%		
ธาตุ	%น้ำหนัก	%อะตอม
C	73.57	84.38
O	13.88	12.04
Ti	12.44	3.58

จากการตรวจสอบพบว่าจากรูปที่ 4.13 EDX Spectrum ของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ พบพีคและการกระจายตัวของคาร์บอนที่อยู่ที 0.3 keV เนื่องจากแผ่นยางธรรมชาติมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ พบพีคออกซิเจนที่ 0.5 keV และพบพีคไทเทเนียมที่ 4.5 keV และเมื่อมีเติมกราฟีนออกไซด์ 0.0174 wt.% ลงไปในรูปที่ 4.14 พบพีคเอกลักษณ์ของคาร์บอนที่เพิ่มมากขึ้น ที่ 0.3 keV ทั้งนี้เนื่องจากการเติมกราฟีนออกไซด์ลงไปใแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์จึงทำให้พีคของคาร์บอนสูงขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 การศึกษาเอกลักษณ์ของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีน-ไดออกไซด์ทางด้านเชิงกลและเชิงความร้อน

#### 4.3.1 การทดสอบแรงดึงของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีน-ไดออกไซด์ (Tensile Test)

เป็นการศึกษาความแข็งแรงและความยืดหยุ่นของตัวอย่างเป็นแผ่นยางผสมไทเทเนียม-ไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนไดออกไซด์ในปริมาณต่าง ๆ โดยจะนำตัวอย่างไปทำการทดสอบแรงดึงด้วยเครื่อง Universal Testing Maching เพื่อศึกษาค่าความแข็งแรงและความยืดหยุ่นของตัวอย่างแผ่นยางธรรมชาติผสม

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าการทดสอบการดึงแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนไดออกไซด์ในปริมาณต่าง ๆ

ตัวอย่าง	Stiffness ( N/m )	Young's Modulus ( MPa )	Load at Break ( N )	Stress at Break ( MPa )	Stress at Maximum Load ( MPa )
1	91.6742±6.8787	0.4608±0.0505	1.0297±0.0465	0.1855±0.0023	0.2092±0.0053
2	93.4538±6.3175	0.5226±0.0830	1.0371±0.0932	0.1878±0.0249	0.1966±0.0187
3	97.9653±7.5361	0.5367±0.0656	1.0634±0.1227	0.1892±0.0051	0.1950±0.0209
4	107.4642±12.7420	0.5788±0.0593	1.0728±0.660	0.1925±0.0088	0.1815±0.0055
5	114.9443±15.1437	0.5993±0.0279	1.1234±0.0826	0.1940±0.0191	0.1730±0.0062
6	118.0313±4.1945	0.6082±0.0309	1.1440±0.0960	0.1982±0.0024	0.1589±0.0122

หมายเหตุ 1 คือ NR

2 คือ NR + TiO<sub>2</sub>

3 คือ NR + TiO<sub>2</sub> + GO 0.0022 wt. %

4 คือ NR + TiO<sub>2</sub> + GO 0.0068 wt. %

5 คือ NR + TiO<sub>2</sub> + GO 0.0118 wt. %

6 คือ NR + TiO<sub>2</sub> + GO 0.0174 wt. %

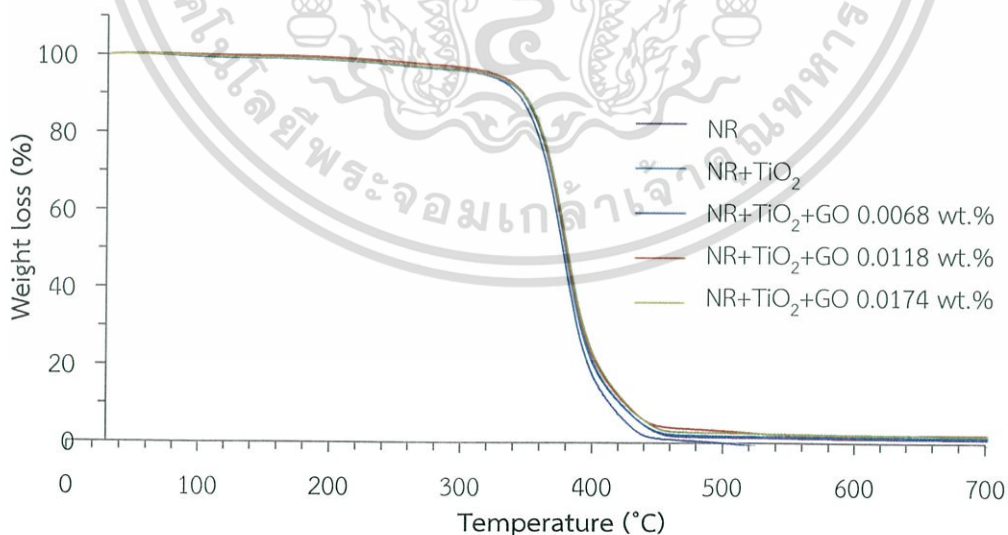
จากตารางที่ 4.3 แสดงค่าการทดสอบการดึงตัวอย่าง เพื่อพิจารณาค่าความแข็งแรง (Stiffness) และค่ายังโมดูลัส (Young's modulus) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุที่ต้องการทดสอบ สำหรับในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบจำนวน 6 ตัวอย่าง คือ แผ่นยางธรรมชาติ แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ และแผ่นยาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกัน 0.0000 0.0022 0.0068 0.0118 และ 0.0174 wt.% ซึ่งมีค่า Stiffness เป็น 91.6742 93.4538 97.9653 107.4642 114.9443 และ 118.0313 N/m ตามลำดับ และมีค่า Young's Modulus (E) เท่ากับ 0.4608 0.5226 0.5367 0.5788 0.5993 และ 0.6082 MPa ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าแผ่นยางธรรมชาติมีความแข็งแรงต่ำสุด ส่วนแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่มากขึ้น จะมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณที่เติมเข้าไป ซึ่งการเติมกราฟีนออกไซด์ลงไปจะช่วยทำให้แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์มีความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากยิ่งขึ้น แข็งแรงมากขึ้น และสามารถใช้งานได้หลายครั้งมากยิ่งขึ้น และยังพบว่าค่าแรงดึง ณ จุดขาด (Load at break) และค่าความเค้น ณ จุดขาด (Stress at break) ก็ยังมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณกราฟีนออกไซด์ อันเป็นผลมาจากกราฟีนออกไซด์เป็นสารเติมแต่งที่สามารถเสริมแรงได้ ส่วนค่าความเค้นที่รับแรงได้สูงสุดในการยืด (Stress at maximum load) มีค่าลดลง เนื่องจากการเติมกราฟีนออกไซด์ลงไปทำให้ยางมีความแข็งขึ้น แต่ในขณะเดียวกันเมื่อยางแข็งขึ้นก็จะทำให้ยางมีการยืดตัวได้น้อยลง

#### 4.3.2 การศึกษาการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis; TGA)

การศึกษาด้วยเทคนิคทางความร้อนของแผ่นยางธรรมชาติ แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ปริมาณ 0.0068 0.0118 และ 0.0174 wt.% ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 แสดงผลการวิเคราะห์จาก TGA ของแผ่นยางธรรมชาติ แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ปริมาณ 0.0068 0.0118 และ 0.0174 wt.%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงอุณหภูมิที่สลายตัวและน้ำหนักที่สูญเสียไปของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์

ชนิดของตัวอย่าง	อุณหภูมิการสลายตัว (°C)	น้ำหนักที่สูญเสียไป
NR	356.6	84.04
NR + TiO <sub>2</sub>	356.0	85.30
NR + TiO <sub>2</sub> + GO 0.0068 wt. %	353.6	87.34
NR + TiO <sub>2</sub> + GO 0.0118 wt. %	355.4	84.74
NR + TiO <sub>2</sub> + GO 0.0174 wt. %	356.5	85.70

จากรูปที่ 4.15 แสดงผลการวิเคราะห์จาก TGA พบว่าตัวอย่างทุกชนิดมีช่วงการสลายตัวที่แตกต่างกัน 2 ช่วง คือช่วงที่เป็นการสลายตัวของความชื้น และช่วงการสลายตัวของยางธรรมชาติ จะเห็นว่าทุกตัวมีการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิใกล้เคียงกัน และมีค่าเปอร์เซ็นต์การสลายตัวที่ใกล้เคียงกัน จากตารางที่ 4.4 พบว่าตัวอย่างนั้นไม่ได้สลายตัว 100% และไม่เห็นความแตกต่างในกราฟของตัวอย่างแต่ละชนิด โดยแผ่นยางธรรมชาติมีการสลายตัวปรากฏอยู่หนึ่งตำแหน่งคืออุณหภูมิ 356.6 องศาเซลเซียส โดยมีร้อยละน้ำหนักเท่ากับ 84.04 แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์มีการสลายตัวปรากฏอยู่หนึ่งตำแหน่งคืออุณหภูมิ 356.0 องศาเซลเซียส โดยมีร้อยละน้ำหนักเท่ากับ 85.30 และแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0174 wt. % ซึ่งมีปริมาณกราฟีนออกไซด์มากที่สุด มีการสลายตัวปรากฏอยู่หนึ่งตำแหน่งคืออุณหภูมิ 356.5 องศาเซลเซียส โดยมีร้อยละน้ำหนักเท่ากับ 85.70 จากการทดลองจะเห็นได้ว่ากราฟีนออกไซด์ที่เติมลงไปนั้นไม่ส่งผลในการทำให้ยางธรรมชาติมีความทนต่อความร้อนมากขึ้น

#### 4.4 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์

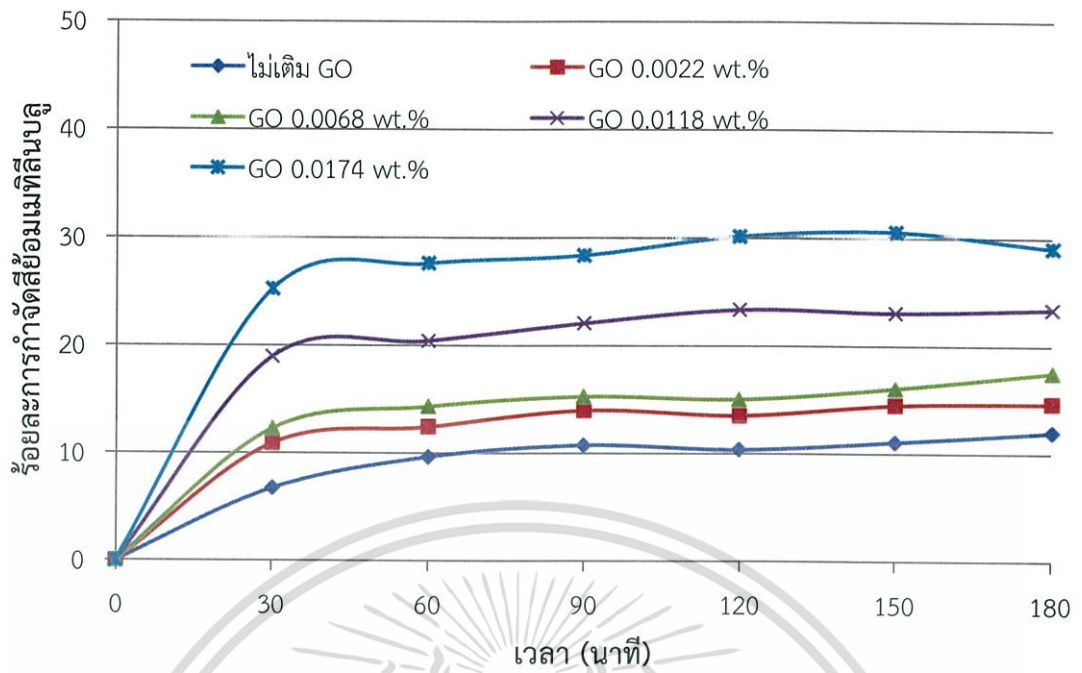
##### 4.4.1 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู ( $1.50 \times 10^{-5}$ M) ในที่มีดของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์

ผลการทดลองการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มีด เพื่อศึกษาการเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสีย้อม โดยการเตรียมแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกัน นำไปวางในจากเพาะเชื้อและเติมสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูเข้มข้น  $1.50 \times 10^{-5}$  โมลาร์ จำนวน 50.00 มิลลิลิตร วางบนเครื่องปั่นกวนในที่มีด จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างสีย้อมทุก 30 นาที เป็นเวลา 180 นาที แล้วจึงนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่องยูวี (UV-visible Spectrophotometer) เพื่อศึกษาการเข้าสู่สมดุลการดูดซับ ผลการทดลองดังตารางที่ 4.5

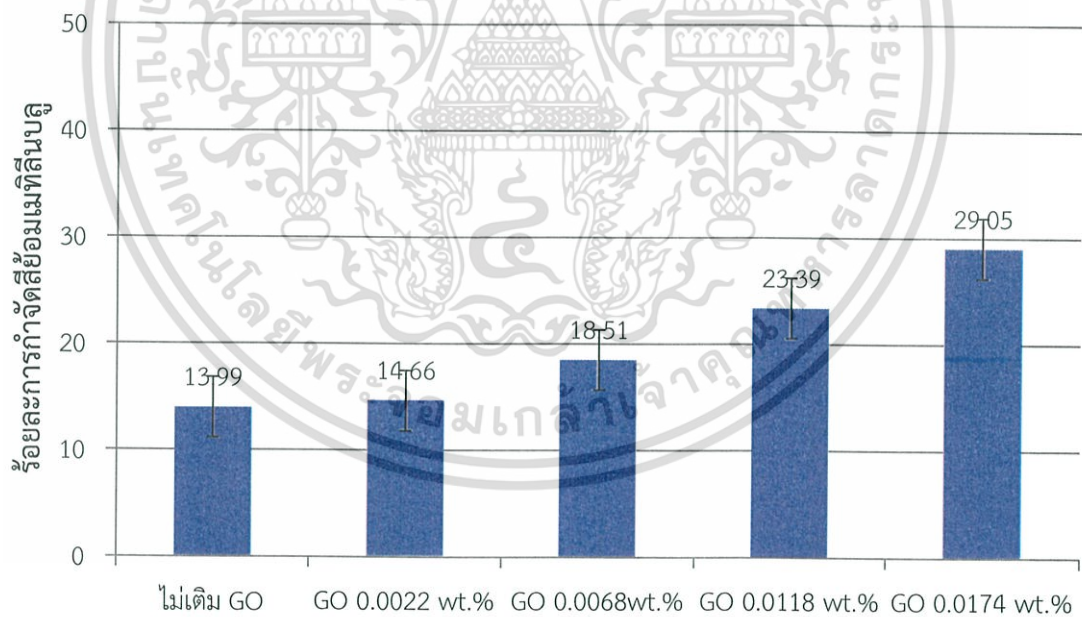
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าการประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มีดของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกัน

ปริมาณกราฟีนออกไซด์	ร้อยละการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู (%)						
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที	150 นาที	180 นาที
ไม่เติม	0.00	6.73	9.60	10.74	10.39	12.07	13.99
0.0022 wt. %	0.00	11.91	12.40	13.98	14.57	14.50	14.66
0.0068 wt. %	0.00	12.27	14.28	15.25	15.07	16.05	18.51
0.0118 wt. %	0.00	18.93	20.36	22.06	23.36	23.06	23.39
0.0174 wt. %	0.00	25.21	26.54	28.34	30.16	30.55	29.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 กราฟเส้นแสดงการเปรียบเทียบค่าร้อยละการกำจัดสีของเมทิลีนบลูในที่มีดของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกัน



รูปที่ 4.17 กราฟแท่งแสดงการค่าร้อยละการกำจัดสีของเมทิลีนบลูในที่มีดของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกัน เมื่อเวลาผ่านไป 180 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

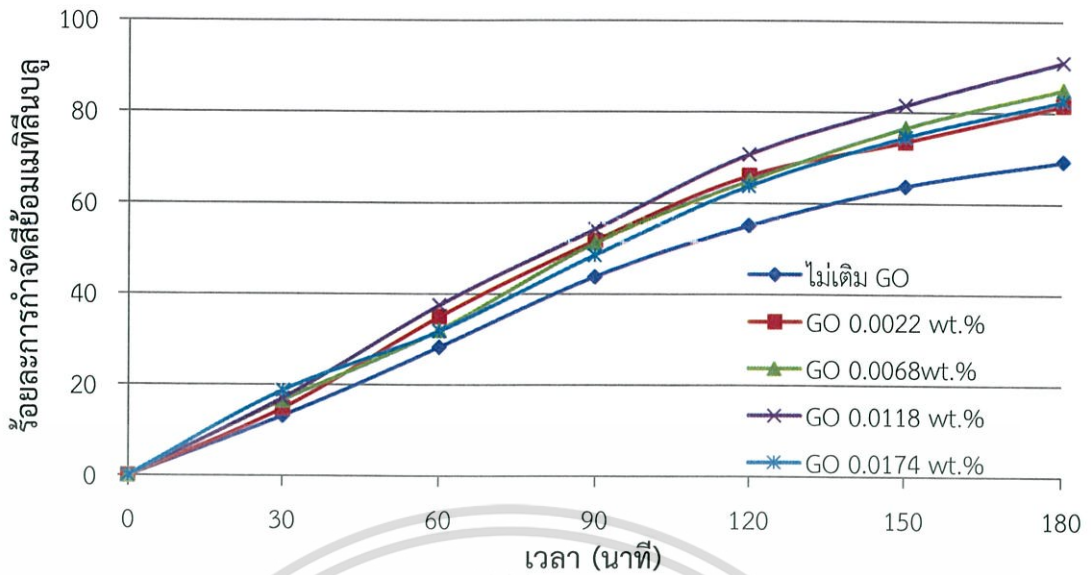
จากตารางที่ 4.5 แสดงค่าประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มีดของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณ 0.0000 0.0022 0.0068 0.0118 และ 0.0174 wt.% เมื่อเวลาผ่านไปจะ 180 นาที ได้ค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมเป็น 13.99 14.66 18.51 23.39 และ 29.05 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มีดที่เกิดจากการดูดซับจะเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที และจากรูปที่ 4.17 เมื่อเติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณเพิ่มขึ้น จะเห็นว่าค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมซึ่งเกิดจากการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากโครงสร้างของสีย้อมเมทิลีนบลูมีประจุเป็นบวก (Cationic dye) ในขณะที่บนโครงสร้างของแผ่นกราฟีนออกไซด์รวมทั้งไทเทเนียมไดออกไซด์มีประจุเป็นลบเมื่ออยู่ในน้ำ ดังนั้นจึงทำให้มีการดูดซับทางกายภาพเกิดขึ้นได้เป็นอย่างดี

#### 4.4.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ตของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์

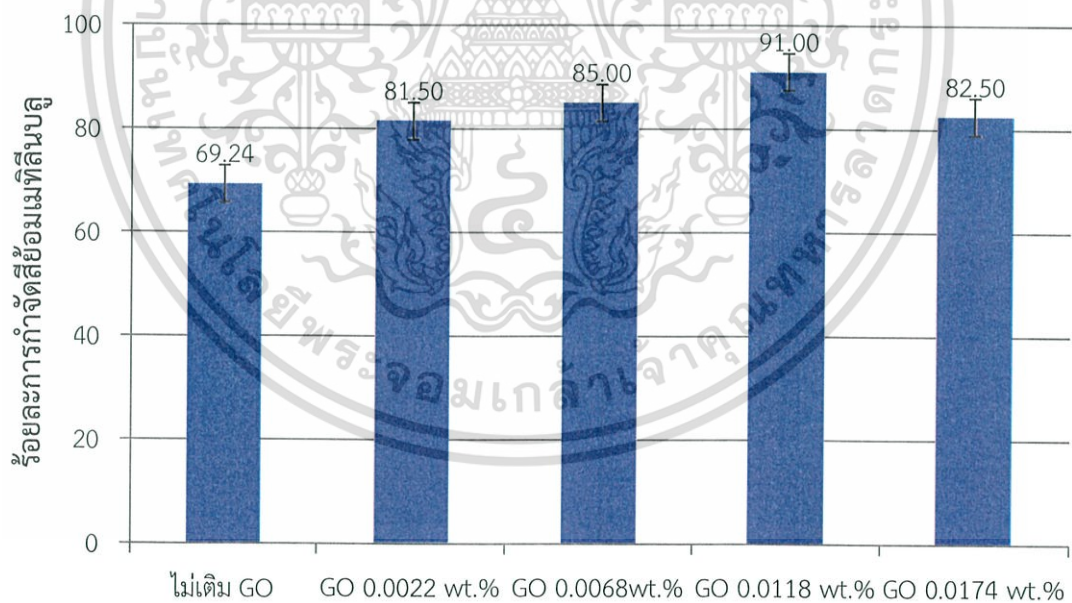
ผลการทดลองการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู (Methylene Blue; MB) ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติก โดยการเตรียมแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกัน นำไปวางในจากเพาะเชื้อและเติมสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูเข้มข้น  $1.50 \times 10^{-5}$  โมลาร์ จำนวน 50.00 มิลลิลิตร วางบนเครื่องปั่นกวนในตัวโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic apparatus) ที่ยังไม่เปิดไฟ จากนั้นเก็บตัวอย่างเมื่อครบ 30 นาที แล้วจึงเปิดไฟโดยใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต และทำการเก็บตัวอย่างสีย้อมทุก 30 นาที เป็นเวลา 180 นาที แล้วจึงนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่องยูวี (UV-visible Spectrophotometer) ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าการประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ตของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกัน

ปริมาณกราฟีนออกไซด์	ร้อยละการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู (%)						
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที	150 นาที	180 นาที
ไม่เติม	0.00	13.16	28.18	43.73	55.10	63.68	69.24
0.0022 wt.%	0.00	14.81	34.86	51.69	66.11	73.49	81.50
0.0068 wt.%	0.00	16.54	31.86	51.09	64.98	76.55	85.00
0.0118 wt.%	0.00	17.06	37.40	54.19	70.76	81.51	91.00
0.0174 wt.%	0.00	18.74	31.70	48.43	63.76	74.52	82.50



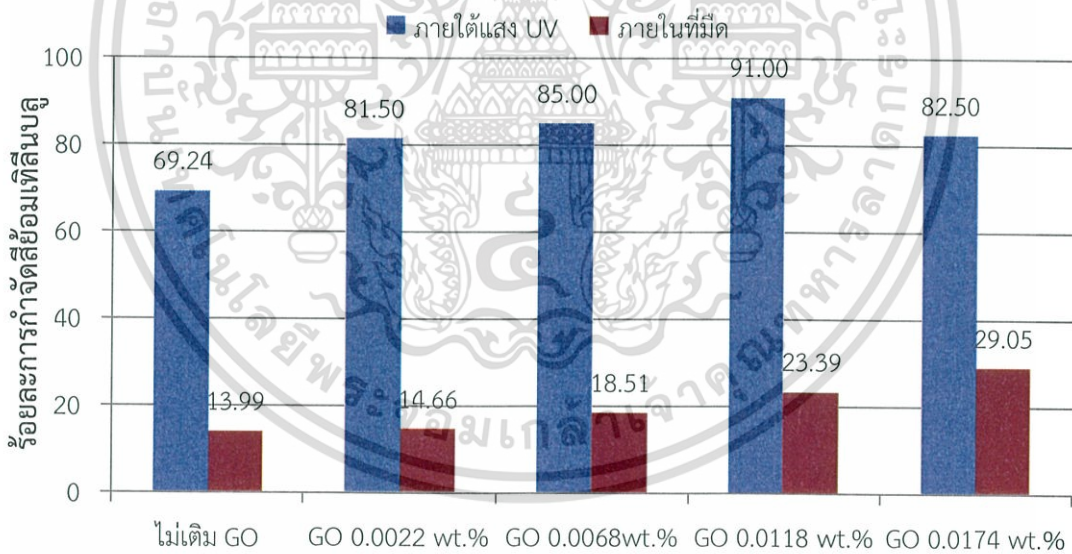
รูปที่ 4.18 กราฟเส้นแสดงการเปรียบเทียบค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ตของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกัน



รูปที่ 4.19 กราฟแท่งแสดงการเปรียบเทียบค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ตของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกัน เมื่อเวลาผ่านไป 180 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.6 แสดงค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณ 0.0000 0.0022 0.0068 0.0118 และ 0.0174 wt.% ภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ตเมื่อเวลาผ่านไปจะ 180 นาที ได้ค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมเป็น 69.24 81.50 85.00 90.00 และ 82.50 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลูนั้นเป็นไปในทางที่ดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัดจากรูปที่ 4.20 ทั้งนี้เนื่องจากการกำจัดสีย้อมด้วยแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์เกิดกระบวนการ 2 อย่าง คือ การดูดซับเนื่องจากเมทิลินบลูมีประจุบวก และกระบวนการโฟโตคะตะไลติกโดยภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตจะเกิดทั้ง 2 กระบวนการ แต่ภายในที่มีดจะเกิดเพียงอย่างเดียวเท่านั้นคือการดูดซับ จะเห็นว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมดีขึ้นเมื่อเติมกราฟีนออกไซด์ลงไปมากขึ้น เนื่องจากกราฟีนออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นจะไปช่วยในการดูดซับสีย้อมเข้ามาไว้บนพื้นผิวแผ่นยางผสมซึ่งจะทำให้การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกได้ง่ายและดียิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเติมกราฟีนออกไซด์ลงไป 0.0174 wt.% จะทำให้ความสามารถในการกำจัดสีย้อมลดลง ซึ่งเป็นเพราะว่าปริมาณที่เติมลงไปมากเกินไปนั้นจะไปบดบังไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกเพื่อสลายสีย้อมเกิดได้ยากมากขึ้น ถึงแม้ว่ากราฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้นจะช่วยดูดซับสีย้อมได้ดีขึ้นก็ตาม ดังนั้นประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมจึงลดลง



รูปที่ 4.20 กราฟแท่งแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลูภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) และภายในที่มีด

จากรูปที่ 4.20 เมื่อนำร้อยละการกำจัดสีย้อมภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตหักลบด้วยร้อยละการกำจัดสีย้อมภายในที่มีดจะได้ร้อยละการกำจัดสีย้อมที่เกิดจากกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่แท้จริง ค่าที่ได้คือ 55.25 66.84 66.49 67.6 และ 53.45 % ตามลำดับปริมาณกราฟีนออกไซด์ที่เติมลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

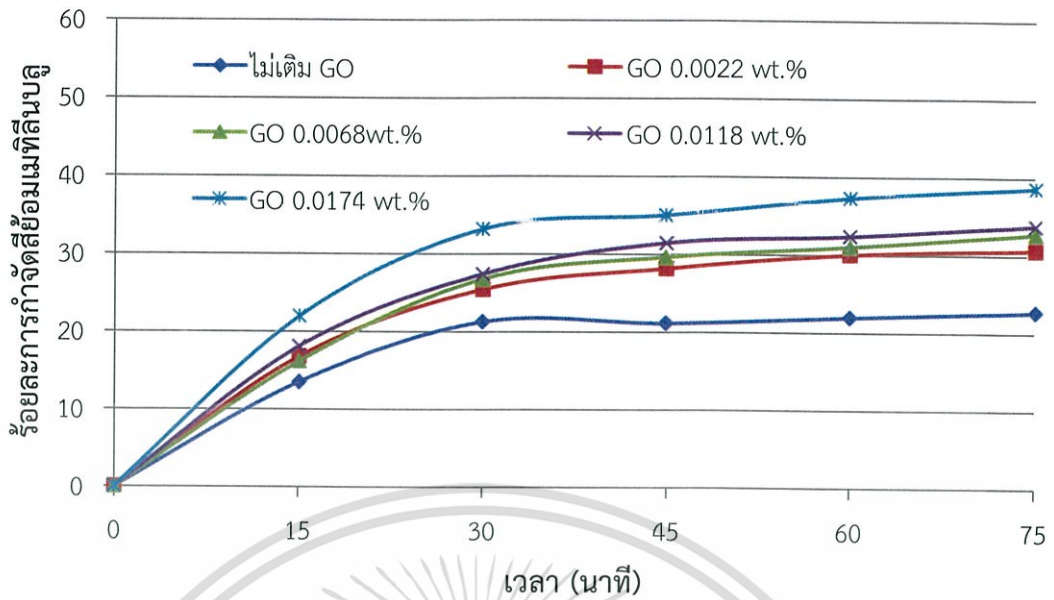
#### 4.4.3 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู ( $2.50 \times 10^{-5}$ M) ในที่มีดของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์

ผลการทดลองการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มีด เพื่อศึกษาการเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสีย้อม โดยการเตรียมแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกัน นำไปวางในจากเพาะเชื้อและเติมสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูเข้มข้น  $2.50 \times 10^{-5}$  โมลาร์ จำนวน 50.00 มิลลิลิตร วางบนเครื่องปั่นกวนในตู้มีด จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างสีย้อมทุก 15 นาที เป็นเวลา 75 นาที แล้วจึงนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่องยูวี (UV-visible Spectrophotometer) เพื่อศึกษาการเข้าสู่สมดุลการดูดซับ ผลการทดลองมีดังตาราง 4.7

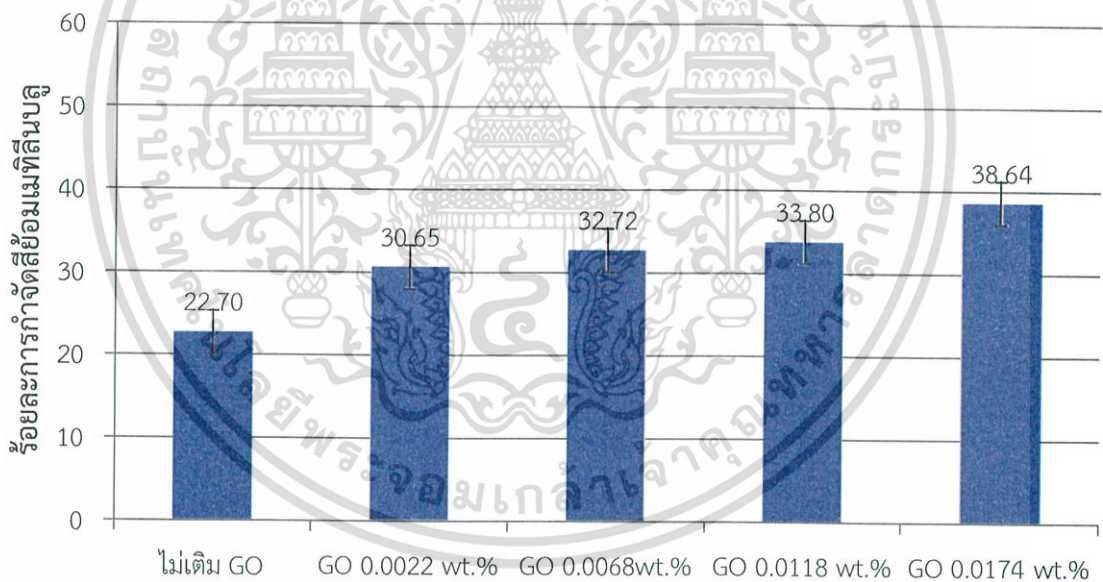
ตารางที่ 4.7 แสดงค่าการประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มีดของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกัน

ปริมาณกราฟีนออกไซด์	ร้อยละการกำจัดสีย้อม					
	0 นาที	15 นาที	30 นาที	45 นาที	60 นาที	75 นาที
ไม่เติม	0.00	13.45	21.24	21.17	21.96	2.70
0.0022 wt.%	0.00	16.75	25.43	28.23	30.05	30.65
0.0068 wt.%	0.00	16.13	26.72	29.65	31.02	32.72
0.0118 wt.%	0.00	18.04	27.39	31.47	32.41	33.80
0.0174 wt.%	0.00	21.90	33.16	35.038	37.30	38.64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 กราฟเส้นแสดงการเปรียบเทียบค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มีดของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกัน



รูปที่ 4.22 กราฟแท่งแสดงการเปรียบเทียบค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มีดของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกัน เมื่อเวลาผ่านไป 75 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

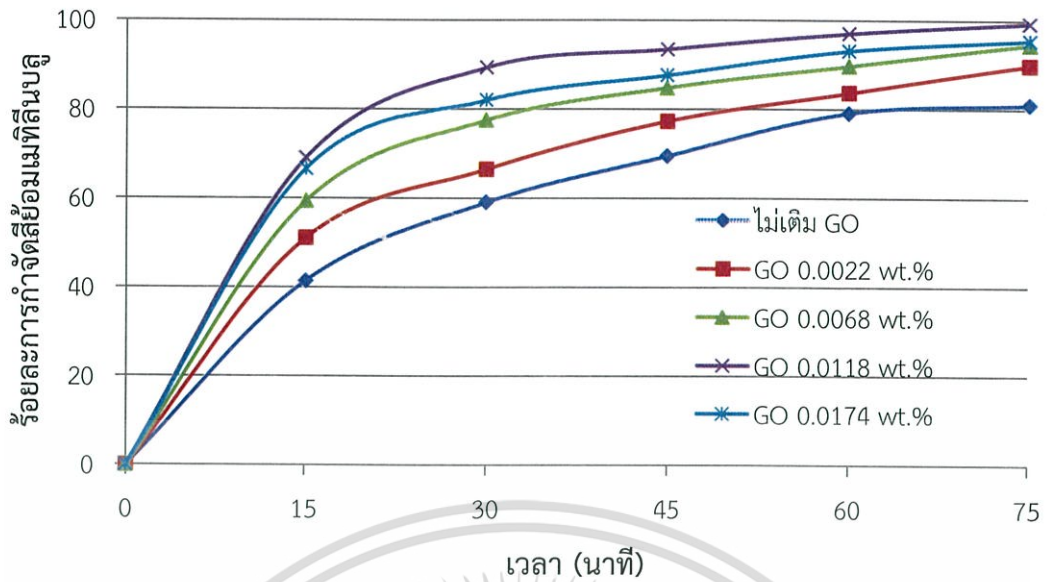
จากตารางที่ 4.7 แสดงค่าประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มีดของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณ 0.0000 0.0022 0.0068 0.0118 และ 0.0174 wt.% เมื่อเวลาผ่านไปจะ 75 นาที ได้ค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมเป็น 24.70 30.65 32.72 33.80 และ 38.64 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มีดที่เกิดจากการดูดซับจะเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที และจากรูปที่ 4.22 เมื่อเติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณเพิ่มขึ้น จะเห็นว่าค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมซึ่งเกิดจากการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย และเห็นได้ชัดเมื่อเติมกราฟีนออกไซด์ 0.0174 wt.%

#### 4.4.4 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอาทิตย์ของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์

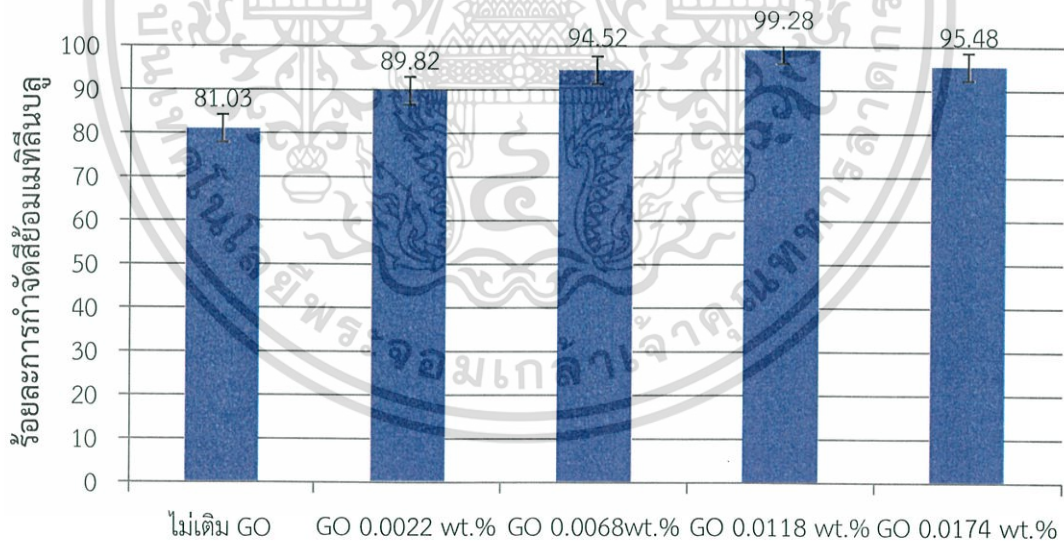
ผลการทดลองการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู (Methylene Blue; MB) ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติก โดยการเตรียมแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณต่าง 0.0022 0.0068 0.0118 และ 0.0174 wt.% นำไปวางในจากเพาะเชื้อและเติมสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูเข้มข้น  $2.50 \times 10^{-5}$  โมลาร์ จำนวน 50.00 มิลลิลิตร วางบนเครื่องปั่นกววน ณ บริเวณที่มีแสงอาทิตย์ จากนั้นเก็บตัวอย่างเมื่อครบ 15 นาที เป็นเวลา 75 นาที แล้วจึงนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่องยูวี (UV-visible Spectrophotometer) ผลการทดลองมีดังตาราง 4.8

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าการประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอาทิตย์ของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกัน

ปริมาณกราฟีนออกไซด์	ร้อยละการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู (%)					
	0 นาที	15 นาที	30 นาที	45 นาที	60 นาที	75 นาที
ไม่เติม	0.00	41.35	59.01	69.49	79.15	81.03
0.0022 wt.%	0.00	51.00	66.43	77.32	83.72	89.82
0.0068 wt.%	0.00	59.30	77.43	84.82	89.72	94.52
0.0118 wt.%	0.00	68.96	89.28	93.45	97.03	99.28
0.0174 wt.%	0.00	66.57	82.00	87.62	93.12	95.48



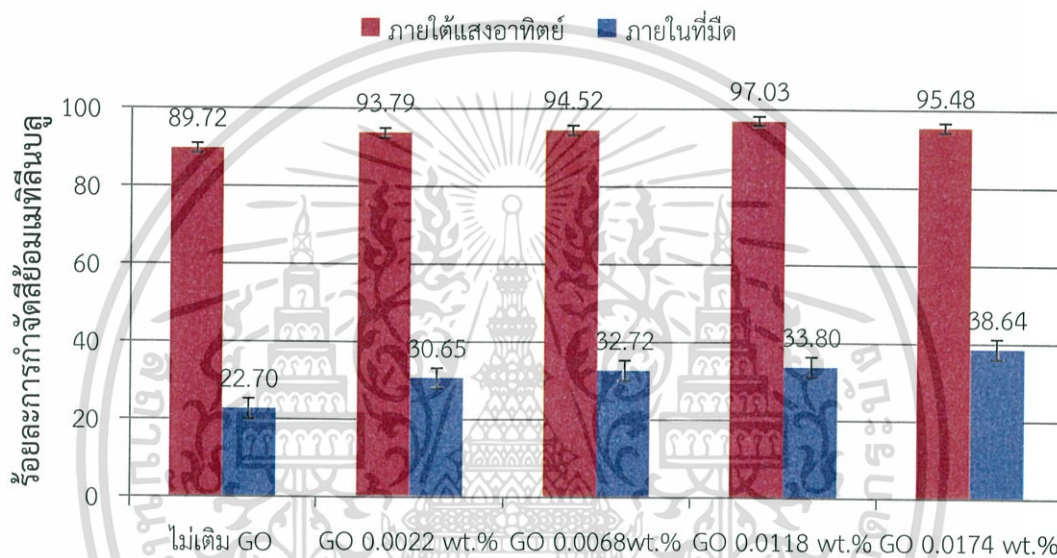
รูปที่ 4.23 กราฟเส้นแสดงการเปรียบเทียบค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอาทิตย์ของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกัน



รูปที่ 4.24 กราฟแท่งแสดงการเปรียบเทียบค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอาทิตย์ของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกันเมื่อเวลาผ่านไป 75 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.8 แสดงค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอาทิตย์ของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณ 0.0000 0.0022 0.0068 0.01118 และ 0.0174 wt.% เมื่อเวลาผ่านไปจะ 75 นาที ได้ค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมเป็น 81.03 89.82 94.52 99.28 และ 95.48 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูนั้นมีความสอดคล้องกับการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต นั่นคือเมื่อเติมกราฟีนออกไซด์ลงไป 0.0118.wt.% จะเห็นได้ว่าค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมเพิ่มขึ้น และเมื่อเติมกราฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้น 0.0174.wt.% ความสามารถในการกำจัดสีย้อมนั้นลดลง

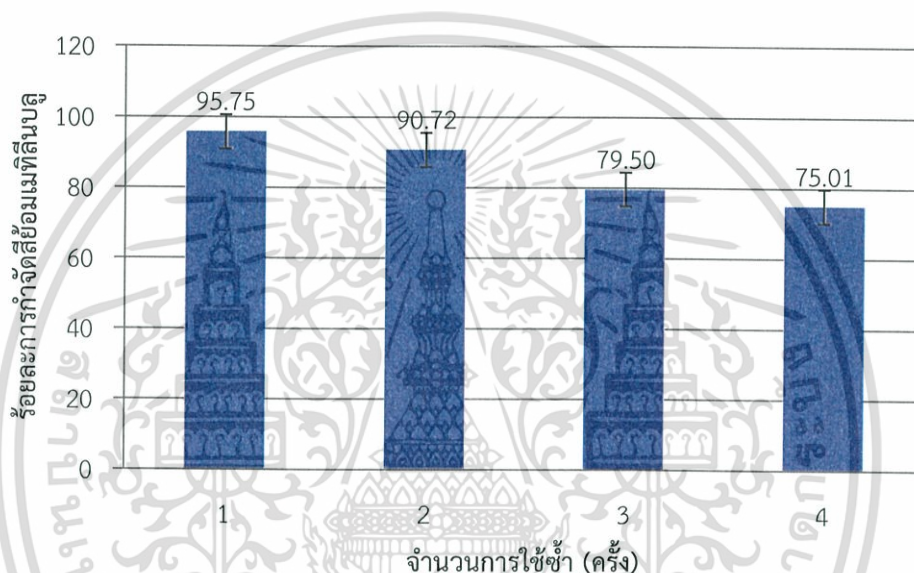


รูปที่ 4.25 กราฟแท่งแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอาทิตย์ และภายในที่มืด

จากรูปที่ 4.25 เมื่อนำร้อยละการกำจัดสีย้อมภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตหักลบด้วยร้อยละการกำจัดสีย้อมภายในที่มืดจะได้ร้อยละการกำจัดสีย้อมที่เกิดจากกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่แท้จริง ค่าที่ได้คือ 67.02 63.4 61.80 63.23 และ 56.84 % ตามลำดับปริมาณกราฟีนออกไซด์ที่เติมลงไป

#### 4.4.5 ผลการทดสอบการใช้งานซ้ำของแผ่นยางธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ ภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต

จากการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู ( $1.5 \times 10^{-5}$  M) ของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกันผลที่ได้คือ แผ่นยางธรรมชาติผสมที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0118 wt.% มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมที่ดีที่สุด จึงการเลือกแผ่นยางธรรมชาติผสมดังกล่าวมาทำการทดสอบการใช้งานซ้ำ โดยผ่านกระบวนการโพโตคะตะไลติกภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต แล้วจึงนำไปทดสอบค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่อง UV-visible Spectrophotometer โดยทำซ้ำจำนวน 4 ครั้ง ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.26

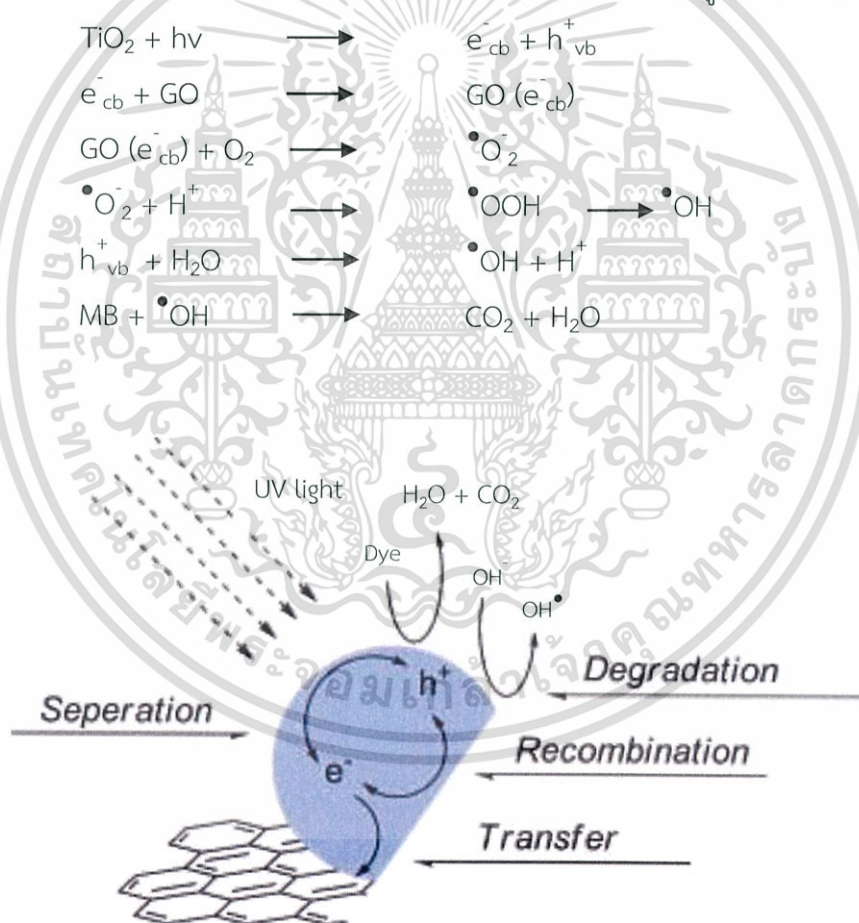


รูปที่ 4.26 แสดงค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียม - ไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0118 wt.% ในการนำมาใช้งานซ้ำ

จากการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมไทเทเนียม-ไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0118 wt.% พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูครั้งที่ 1 มีค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูสูงที่สุดเท่ากับ 95.75 การใช้งานซ้ำครั้งที่ 2 3 และ 4 มีประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดสีย้อมลดลงเท่ากับ 90.72 79.50 และ 75.01 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ยิ่งใช้งานในการกำจัดสีย้อมซ้ำจะทำให้ประสิทธิภาพในการใช้งานซ้ำลดลง เนื่องจากว่าการใช้งานซ้ำไปเรื่อย ๆ สีย้อมเมทิลีนบลูจะมากำการเกาะสะสมบนพื้นผิวของแผ่นยางผสมมากขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์มีความสามารถเกิดปฏิกิริยาได้น้อยลงไปเรื่อย ๆ จึงทำให้ประสิทธิภาพในการใช้งานซ้ำลดต่ำลง

จากการศึกษาในหัวข้อ 4.4 จะเห็นว่าการเติมกราฟีนออกไซด์ลงในแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ช่วยให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูได้ดีกว่าแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียม ไดออกไซด์ที่ไม่ได้เติมกราฟีนออกไซด์ดังนี้

1. กราฟีนออกไซด์มีความเป็นประจุลบบนโครงสร้างจึงสามารถดูดซับเมทิลีนบลูได้ดีเนื่องจากเมทิลีนบลูเป็นสีย้อมที่ประจุบวก
2. กราฟีนออกไซด์มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงจึงสามารถดูดซับเมทิลีนบลูได้ดีซึ่งจะช่วยเพิ่มการเกาะติดบนแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยาได้เป็นอย่างดี
3. กราฟีนออกไซด์สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกได้ดีเนื่องจากช่วยป้องกันการรวมกันระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล ( $e^-_{cb} + h^+_{vb}$  recombination) ของไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้ปฏิกิริยาของไทเทเนียมไดออกไซด์เสถียร ส่งผลให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $\bullet\text{OH}$ ) เพิ่มมากขึ้น ทำให้ผลโฟโตคะตะไลติกดีขึ้นและกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูได้ดีขึ้น ดังสมการ [32]



รูปที่ 4.27 แสดงแบบจำลองการถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปยังแผ่นกราฟีนออกไซด์ [33]

## บทที่ 5

### สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ในการนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู ผลของการศึกษาการพิสูจน์เอกลักษณ์และการทดสอบสมบัติต่างๆจะสรุปได้ดังนี้

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิค FT-IR และ XRD ของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ พบว่าไม่ปรากฏพีคเอกลักษณ์ของกราฟีนออกไซด์ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่ากราฟีนออกไซด์ที่เติมลงไปมีปริมาณน้อยรวมทั้งมีความเป็นผลึกต่ำด้วย

จากการวิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ร่วมกับเทคนิค EDS พบว่าแผ่นยางธรรมชาติมีลักษณะพื้นผิวค่อนข้างเรียบส่วนแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ลงไปพบว่าพื้นผิวมีลักษณะขรุขระและทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์มีการกระจายตัวบนพื้นผิวได้ดีขึ้น

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์จากการทดลองพบว่าเมื่อทำการเติมกราฟีนออกไซด์ลงไปแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ จะทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงและทนทานต่อแรงดึงได้ดีมากขึ้น

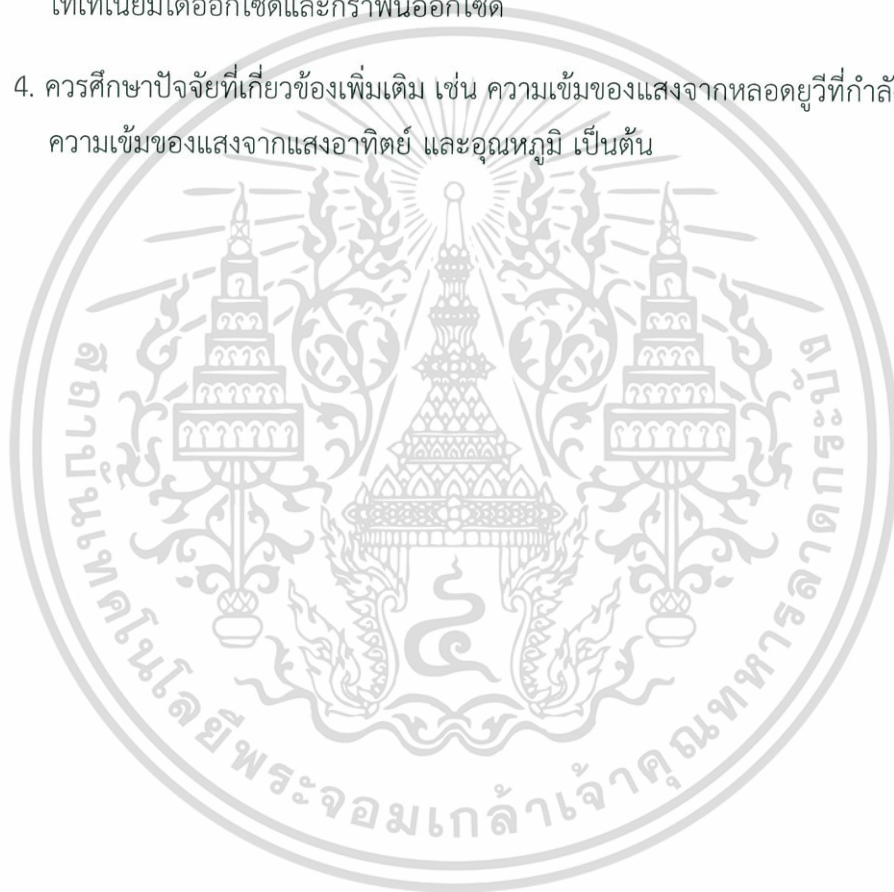
จากการทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ พบว่ามีเสถียรภาพทางความร้อนคงเดิมเท่ากับยางธรรมชาติ เนื่องจากเติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่น้อยมาก จึงไม่ได้ช่วยให้แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ ทนความร้อนได้สูงขึ้น

จากการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ตและภายใต้แสงอาทิตย์ จากการทดลองพบว่าภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ตและภายใต้แสงอาทิตย์การเติมกราฟีนออกไซด์ลงไปปริมาณที่ 0.0118 wt.% ส่งผลให้แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ มีค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมมากที่สุดและค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูลดลงเมื่อเติมปริมาณกราฟีนออกไซด์ที่ 0.0174 wt.% นอกจากนี้เมื่อนำแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ 0.0118 wt.% ไปทดสอบการใช้งานซ้ำ พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมลดลงอย่างเห็นได้ชัดโดยการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูครั้งแรกสามารถกำจัดไปได้ถึง 95.75% แต่ครั้งที่ 4 สามารถกำจัดไปได้แค่ 75.01% เท่านั้น จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมมีแนวโน้มลดลงตามจำนวนครั้งที่ใช้ซ้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ผลการวิจัยครั้งนี้ยังไม่สามารถนำมาใช้ในการกำจัดสีย้อมในปริมาณมากได้ เนื่องจากแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์มีขนาดเล็ก อาจใช้เวลานานในการกำจัด
2. ควรศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งในโรงงานอุตสาหกรรมโดยตรง โดยใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลติก
3. ควรศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานซ้ำภายใต้แสงอาทิตย์ของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์
4. ควรศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องเพิ่มเติม เช่น ความเข้มของแสงจากหลอดยูวีที่กำลังวัตต์ต่าง ๆ ความเข้มของแสงจากแสงอาทิตย์ และอุณหภูมิ เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] การบำบัดน้ำเสีย. [online]. Available : [http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/ecology/chapter3/chapter3\\_water13.htm](http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/ecology/chapter3/chapter3_water13.htm)
- [2] กาญจนา ลือพงษ์ และนางนุช ศศิธร. 2548. การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมด้วยเทคนิคโฟโตคะตะไลติคร่วมกับกระบวนการดูดซับ. กรุงเทพมหานคร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [3] เรื่องน่ารู้ของสารไทเทเนียมไดออกไซด์. [online]. Available : <https://www.rsu.ac.th/engineer/che/news/News%20Data/เรื่องน่ารู้สารไทเทเนียมไดออกไซด์.pdf>
- [4] ชวิศร์ภรณ์ย์ เมธากุล. 2549. การปรับแต่งผิวหน้าของไททาเนียมไดออกไซด์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง. กรุงเทพมหานคร. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- [5] ไทเทเนียมไดออกไซด์ Titanium dioxide  $TiO_2$ . [online]. Available : <http://multicolorzone.blogspot.com/2011/12/titanium-dioxide-tio2.html>
- [6] ยางธรรมชาติ (Natural Rubber). [online]. Available : [http://www.electron.rmutphysics.com/science-news/index.php?option=com\\_content&task=view&id=141&Itemid=4](http://www.electron.rmutphysics.com/science-news/index.php?option=com_content&task=view&id=141&Itemid=4)
- [7] Graphite oxide. [online]. Available : [https://en.wikipedia.org/wiki/Graphite\\_oxide](https://en.wikipedia.org/wiki/Graphite_oxide)
- [8] กระบวนการ Photocatalytic. [online]. Available : <http://sichon.wu.ac.th/file/envi-shh-20090110-112240-pwrqr.pdf>
- [9] ผลงานของการเกิดปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาของสารอินทรีย์. [online]. Available : <http://www.chemguide.co.uk/physical/basicrates/energyprofiles.html>
- [10] กลไกของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกบนสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์. [online]. Available : <http://chenseniorthesis.blogspot.com/2015/02/thesis-progress-46.html>
- [11] Titanium Dioxide ( $TiO_2$ ). [online]. Available : [http://aceto-tech.com.en.tradew.com/pid11787799/Titanium+Dioxide+\(TiO2+\)%2F+Rutile+R1930.htm](http://aceto-tech.com.en.tradew.com/pid11787799/Titanium+Dioxide+(TiO2+)%2F+Rutile+R1930.htm)
- [12] ไทเทเนียมไดออกไซด์/ $TiO_2$ . [online]. Available : <http://www.siamchemi.com/ไทเทเนียมไดออกไซด์/>
- [13] Photocatalytic hydrogenation on Semiconductor Particles. [online]. Available : <http://www.intechopen.com/books/authors/hydrogenation/photocatalytic-hydrogenation-on-semiconductor-particles>
- [14] แถบพลังงานที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเจืออะตอมของธาตุหมู่อื่นลงไป. [online]. Available : <http://informationdisplay.org/IDArchive/2008/April/TransparentConductiveOxidesforDisplayApplicat.aspx>.
- [15] การกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานาโนไทเทเนียมไดออกไซด์. [online]. Available : [www2.science.cmu.ac.th/qa/qa2556/สมศ-7/หลักฐาน/SCE-7-1-11.pdf](http://www2.science.cmu.ac.th/qa/qa2556/สมศ-7/หลักฐาน/SCE-7-1-11.pdf)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [16] อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และการประยุกต์ใช้งาน. [online]. Available : [http://www.nano.kmitl.ac.th/files/nano\\_innovation/2557/training/04-วัสดุนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์.pdf](http://www.nano.kmitl.ac.th/files/nano_innovation/2557/training/04-วัสดุนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์.pdf).
- [17] ดร.อดิศัย รุ่งวิชาวัฒน์. 2554. ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับน้ำยาล้างและองค์ประกอบต่างๆในน้ำยาล้าง. สงขลา. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [18] โครงสร้างของกราฟีนออกไซด์. [online]. Available : [http://pubs.rsc.org/services/images/RSCpubs.ePlatform.Service.FreeContent.ImageService.svc/ImageService/Articleimage/2014/RA/c4ra01019a/c4ra01019a-f1\\_hi-res.gif](http://pubs.rsc.org/services/images/RSCpubs.ePlatform.Service.FreeContent.ImageService.svc/ImageService/Articleimage/2014/RA/c4ra01019a/c4ra01019a-f1_hi-res.gif)
- [19] สั้งเคราะห์แกรฟีนด้วยวิธีการทางเคมี (Chemical Exfoliation). [online]. Available : [http://thep-center.org/src/article\\_edu\\_t.php?article\\_edu\\_id=57](http://thep-center.org/src/article_edu_t.php?article_edu_id=57).
- [20] สารเคมีในผลิตภัณฑ์สีย้อม (Dyes). [online]. Available : <http://comptox.sci.ku.ac.th/dyes.php>
- [21] โครงสร้างของเมทิลีนบลู (Methylene blue, MB). [online]. Available: <http://ir.rmuti.ac.th/xmlui/bitstream/handle/123456789/361/Chapter%202.pdf?sequence=4>
- [22] Ammar Houas, Hinda Lachheb, Mohamed Ksibi, Elimame Elaloui, Chantal Guillard and Jean-Marie Herrmann. 2001. Photocatalytic degradation pathway of methylene blue in water. Applied Catalysis B: Environmental.
- [23] Stange B.M. and Evans L.R. 1993. TiO<sub>2</sub> Photocatalysis for the destruction of organics and the reduction of heavy metals. Amsterdam : Elsevier Science.
- [24] Chaval Sriwong, Sumpun Wongnawa and Orasa Patarapaiboolchai. 2008. Photocatalytic activity of rubber sheet impregnated with TiO<sub>2</sub> particles and its recyclability. Catalysis Communications.
- [25] Anderson Guimarães de Oliveiraa, Jefferson Patrício Nascimento, Honória de Fátima Gorgulhoa, Patrícia Benedini Martellia, Cláscidia Aparecida Furtadob and José Luís Figueiredoc. 2016. Electrochemical synthesis of TiO<sub>2</sub>/Graphene oxide composite films for photocatalytic applications. Journal of Alloys and Compounds Volume 654.
- [26] Shivan Ismael Abdullah and M.N.M. Ansari. 2014. Mechanical properties of grapheme oxide (GO)/epoxy composite. Production and hosting by Elsevier.
- [27] สมการของแบรกก์ (Bragg's equation). [online]. Available : <http://electrons.wikidot.com/x-ray-diffraction-and-bragg-s-law>.
- [28] การเปลี่ยนสภาวะของอิเล็กตรอน (electronic transition). [online]. Available : [http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/color-light/page3\\_2.html](http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/color-light/page3_2.html)
- [29] Li Zhang, Haizhen Li, Yan Liu, Zhang Tian, Bo Yang, Zebin Sun and Shiqiang Yan. 2014. Adsorption-photocatalytic degradation of methyl orange over a facile one-step hydrothermally synthesized TiO<sub>2</sub>/ZnO-NH<sub>2</sub>-RGO nanocomposite. Article in Royal society of chemistry

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [30] ดุษฎี ลิ, ขนาธิป สามารถ และสุวดี ก้องพารากุล. 2558. การเตรียมและสมบัติของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์/มอนต์มอริลโลไนต์คอมพอสิต. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
- [31] F.D. Hardcastle. 2011. Raman Spectroscopy of Titania (TiO<sub>2</sub>) Nanotubular Water-Splitting Catalysts. Journal of the Arkansas Academy of Science. Vol. 65.
- [32] Xinning Luan, M. Teresa Gutierrez Wing and Ying Wang. 2014. Enhanced photocatalytic activity of graphene oxide/titania nanosheets composites for methylene blue degradation. Materials Science in Semiconductor Processing.
- [33] Min Shi, Jianfeng Shen, Hongwei Ma, Zhiqiang Li, Xin Lu, Na Li, Mingxin Ye. 2012. Preparation of graphene-TiO<sub>2</sub> composite by hydrothermal method from peroxotitanium acid and its photocatalytic properties. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### ก-1 การเตรียมกราฟีนออกไซด์ด้วยวิธีการปรับปรุงวิธีของฮัมเมอร์(Hammer's method)

- 1) ชั่งผงกราฟิต 2 กรัม และโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ( $\text{KMnO}_4$ ) 6 กรัม
- 2) เทลงในขวดก้นกลม แล้วนำขวดก้นกลมไปวางไว้บนถังน้ำแข็งพร้อมกับทำการปั่นกวนให้เป็นเนื้อเดียวกัน เป็นเวลา 10 นาที
- 3) ค่อยๆเติมสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ( $\text{conc. H}_2\text{SO}_4$ ) 46 มิลลิลิตรพร้อมกับทำการปั่นกวนเป็นเวลา 10 นาที จะเปลี่ยนสารละลายเป็นสีน้ำตาลดำ
- 4) เติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร พร้อมกับทำการปั่นกวนเป็นเวลา 20 นาที
- 5) นำขวดก้นกลมออกจากถังน้ำแข็ง และทำการปั่นกวนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที พร้อมกับเติมน้ำทิ้งไว้
- 6) นำขวดก้นกลมไปวางไว้ในอ่างน้ำร้อน พร้อมกับทำการปั่นกวนเป็นเวลา 30 นาที
- 7) นำขวดก้นกลมออกจากอ่างน้ำร้อน แล้วนำไปวางไว้บนถังน้ำแข็งอีกครั้ง
- 8) เติมน้ำกลั่น 280 มิลลิลิตรและทำการปั่นกวนต่อเป็นเวลา 20 นาที
- 9) ค่อยๆเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) 20 มิลลิลิตร พร้อมกับทำการปั่นกวนเป็นเวลา 10 นาที
- 10) ทำการล้างตะกอนด้วยวิธีการหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) ที่ความเร็ว 3,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที และเทสารละลายทิ้ง
- 11) ล้างตะกอนด้วยกรดไฮโดรคลอริก 5% โดยปริมาตร ทำการหมุนเหวี่ยงอีกครั้ง
- 12) ทำการกรองตะกอนแบบลดความดัน ล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่น 2-3 ครั้งแล้วจึงล้างด้วยอะซิโตน 5 มิลลิลิตร
- 13) นำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน
- 14) นำตะกอนที่อบแห้งแล้วมาทำการบดละเอียด จากนั้นก็จะได้เป็นผงกราฟิตออกไซด์ออกมา (จะได้ลักษณะเป็นผงสีดำ)

### ก-2 การเตรียมกราฟีนออกไซด์ด้วยวิธีการใช้คลื่นความถี่สูง (Ultrasonication)

- 1) ชั่งผงกราฟิตออกไซด์ 0.4 มิลลิกรัม เทใส่ในหลอดเซนตริฟิวจ์ขนาด 50 มิลลิลิตร
- 2) เติมน้ำกลั่น 40 มิลลิลิตร แล้วนำไปวางไว้ในตู้อัลตราโซนิก ทำการโซนิเคตที่กำลังเครื่อง 40% เป็นเวลา 30 นาทีจำนวน 4 ครั้ง
- 3) นำสารแขวนลอยที่ได้ไปทำการหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) ที่ความเร็ว 4,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาทีจำนวน 2 ครั้ง เพื่อแยกสารละลายออกจากผงกราฟิตออกไซด์ที่ยังเหลืออยู่
- 4) เทสารละลายออกจากหลอดเซนตริฟิวจ์อย่างช้าๆเพื่อไม่ให้ผงกราฟิตออกไซด์ที่ยังเหลืออยู่หลุดออกมาด้วย ดังนั้นก็จะได้สารละลายกราฟีนออกไซด์ที่มีสีน้ำตาลเข้มค่อนข้างดำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การเตรียมสารละลายสีย้อมสังเคราะห์และการคำนวณค่าร้อยละของการกำจัดสีย้อม

1. การเตรียมสีย้อมเมทิลีนบลู (Methylene Blue, MB) โครงสร้างสูตรคือ  $C_{16}H_{18}N_3SCl$  โมลมวล (Molecular Weight) คือ 319.85 g/mol

1.1 เตรียมสีย้อมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น  $1.5 \times 10^{-5}$  M

วิธีทำ - ชั่งผงเมทิลีนบลู 0.0048 กรัม ในขวดวัดปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร

- ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

1.2 เตรียมสีย้อมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น  $2.5 \times 10^{-5}$  M

วิธีทำ - ชั่งผงเมทิลีนบลู 0.0080 กรัม ในขวดวัดปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร

- ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

2. การคำนวณร้อยละการกำจัดสีย้อม

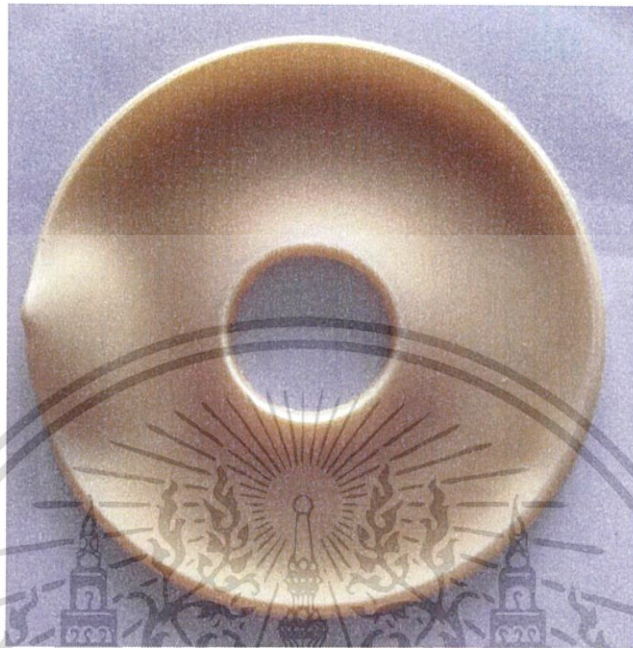
$$\text{จากสูตร \% การกำจัดสีย้อม} = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100$$

$A_0$ : ค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้น

$A_t$ : ค่าการดูดกลืนแสงที่เวลาใด ๆ

## ภาคผนวก ข

ลักษณะของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์

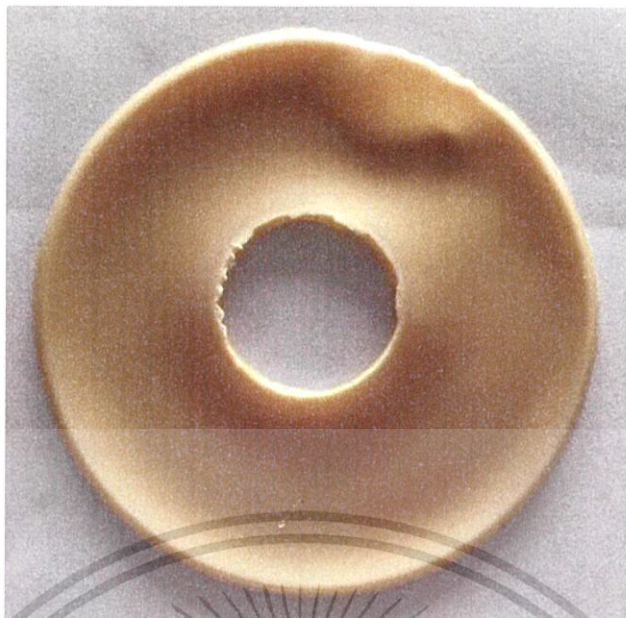


รูปที่ ข-1 แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ด้านหน้า (ด้านที่ใช้งาน)



รูปที่ ข-2 แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ด้านหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

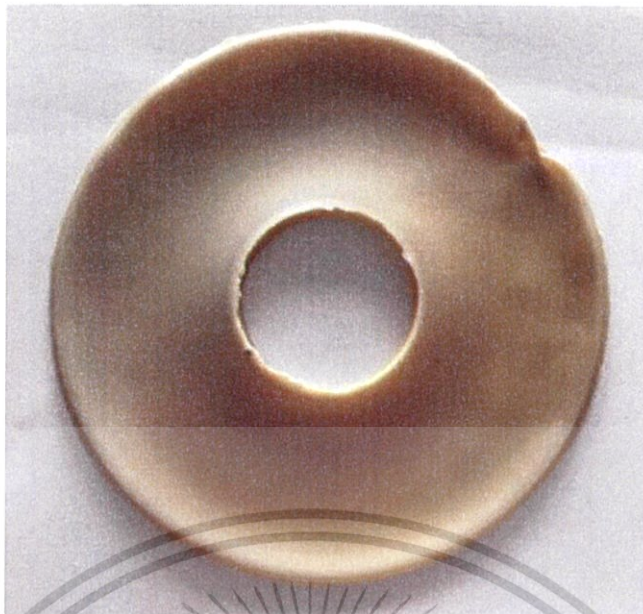


รูปที่ ข-3 แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0022 wt.% ด้านหน้า  
(ด้านที่ใช้งาน)



รูปที่ ข-4 แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0022 wt.% ด้านหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

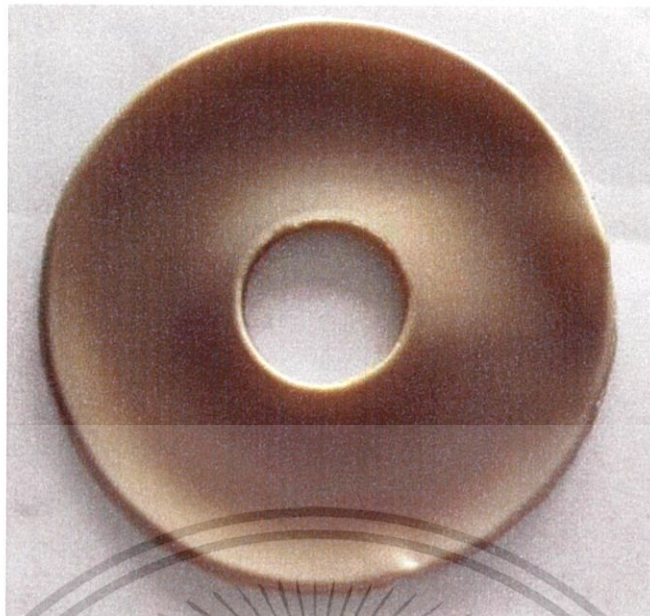


รูปที่ ข-5 แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0068 wt.% ด้านหน้า  
(ด้านที่ใช้งาน)



รูปที่ ข-6 แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0068 wt.% ด้านหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

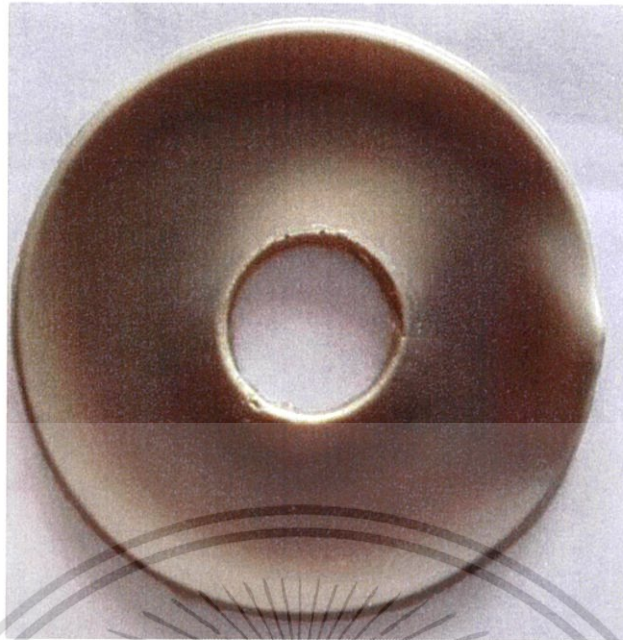


รูปที่ ข-7 แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0118 wt.% ด้านหน้า  
(ด้านที่ใช้งาน)



รูปที่ ข-8 แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0118 wt.% ด้านหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-9 แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0174 wt.% ด้านหน้า  
(ด้านที่ใช้งาน)



รูปที่ ข-10 แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0174 wt.%  
ด้านหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

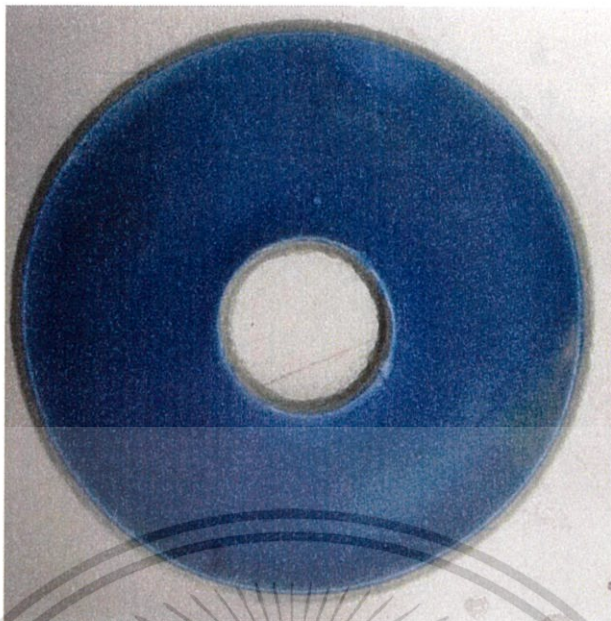
ลักษณะของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์หลังผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต



รูปที่ ข-11 แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์

รูปที่ ข-12 แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0022 wt. %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

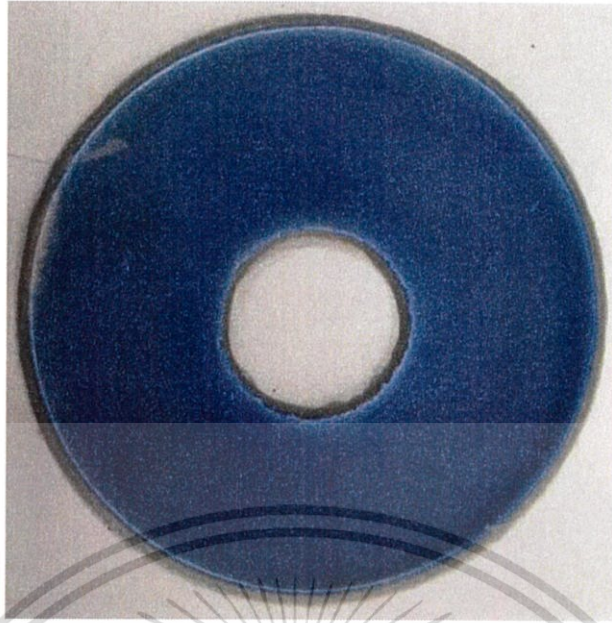


รูปที่ ข-13 แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0068 wt.%



รูปที่ ข-14 แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0118 wt.%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



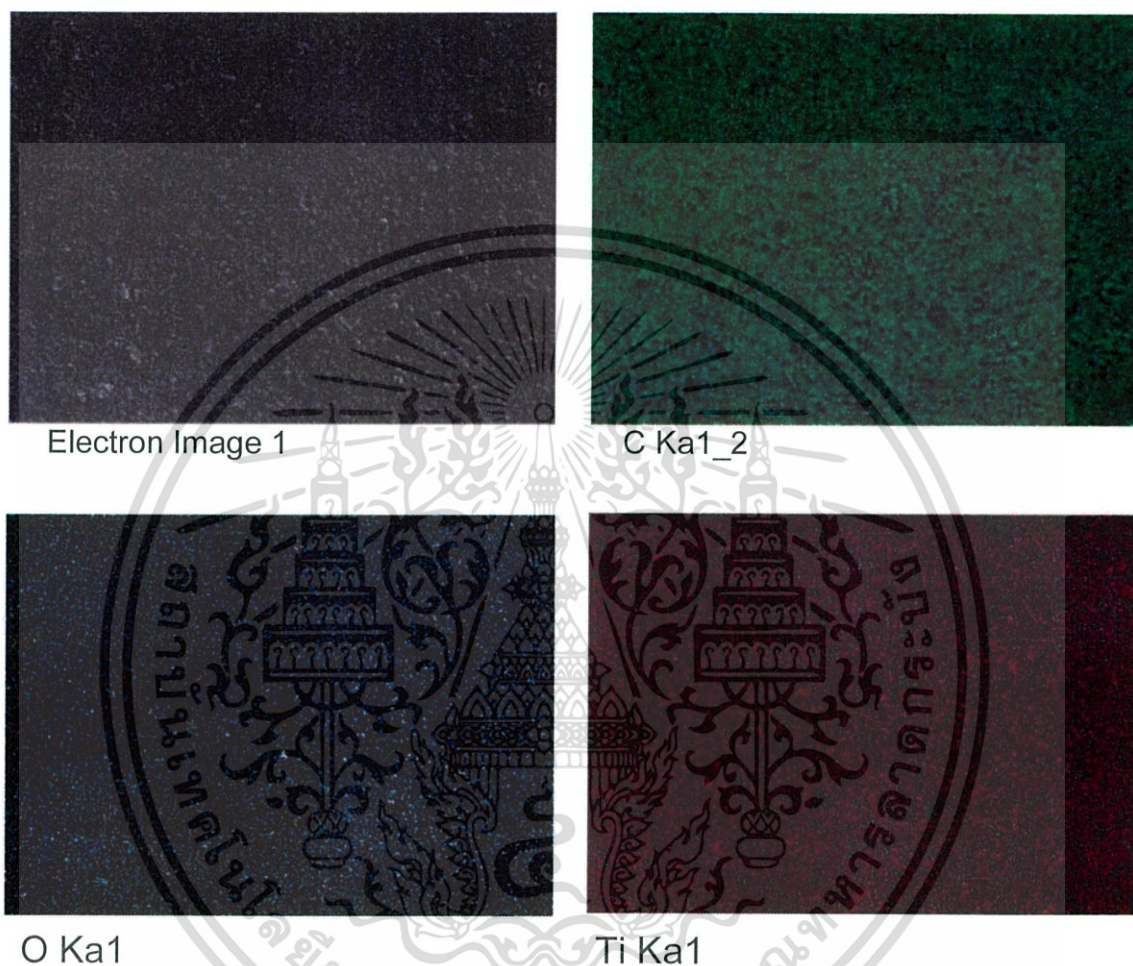
รูปที่ ข-15 แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0174 wt. %



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีน-ออกไซด์ด้วยเทคนิค EDS (Energy Dispersive x-ray Spectroscopy)



รูปที่ ค-1 แสดง mapping ของธาตุที่พบในแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



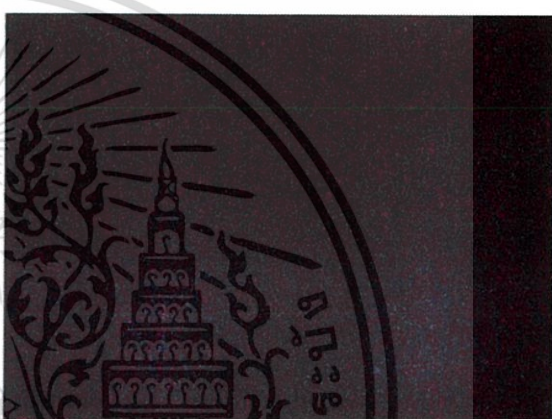
Electron Image 1



C Ka1\_2



O Ka1



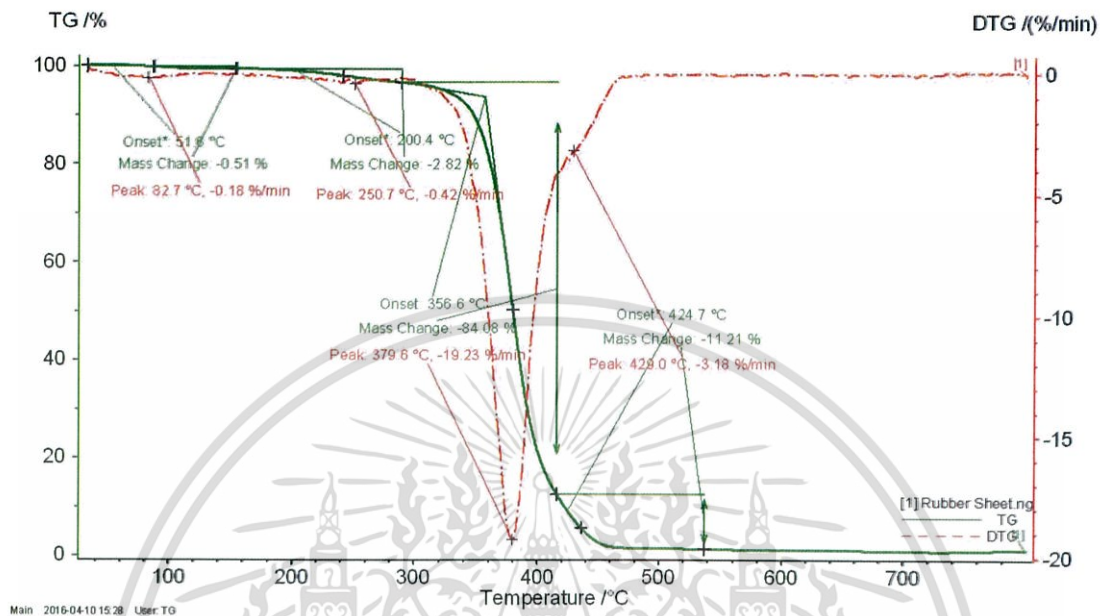
Ti Ka1

รูปที่ ค-2 รูป mapping ของธาตุที่พบในแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ 0.0174 wt.%

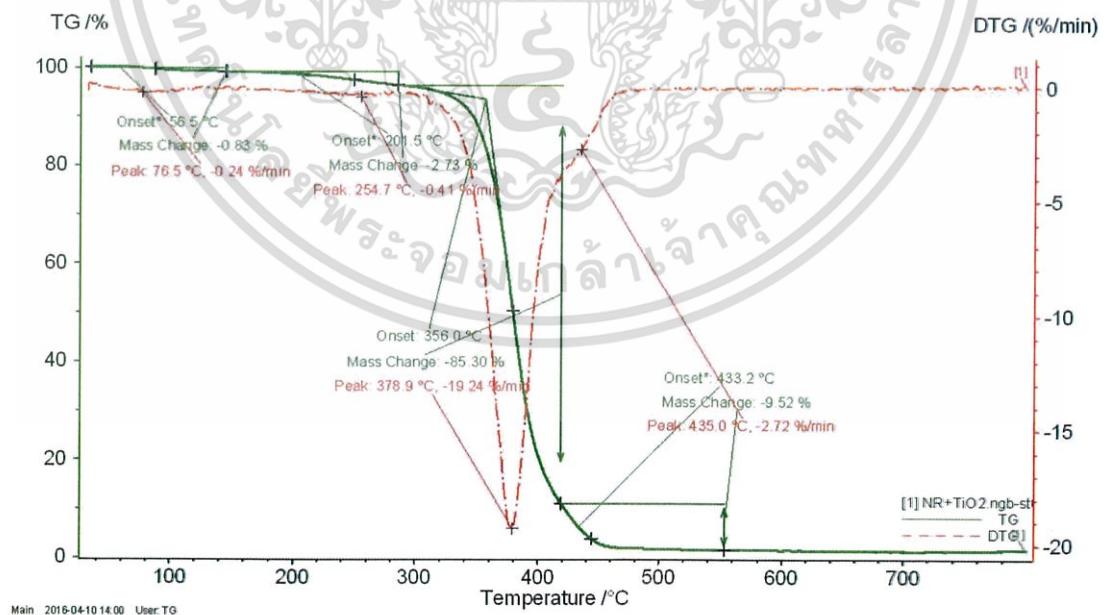
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางความร้อน (Thermogravimetric analysis; TGA)

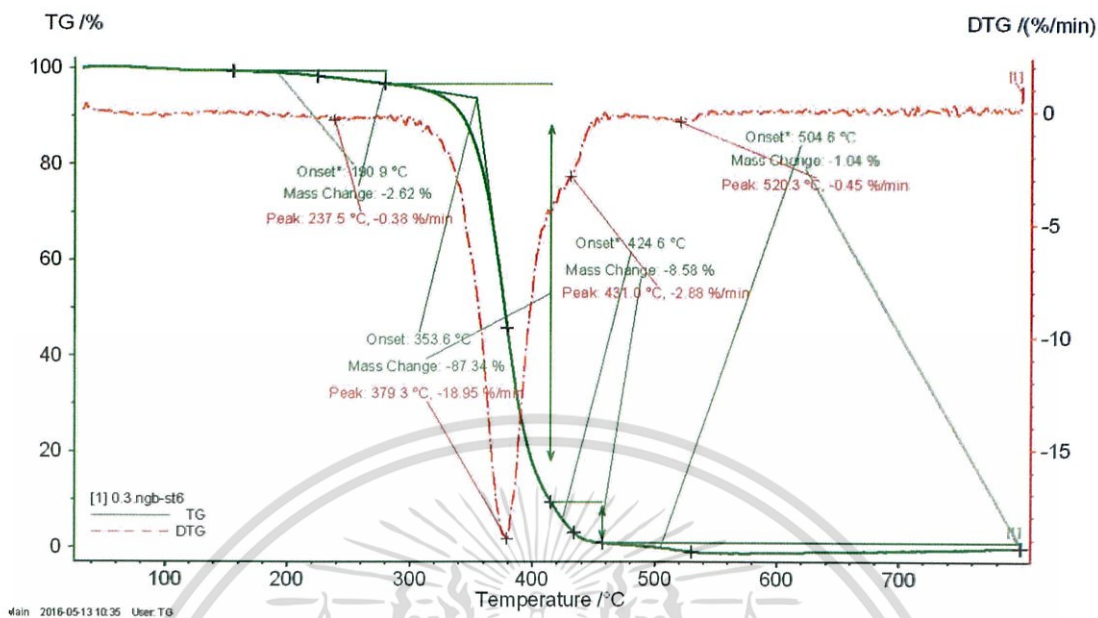


รูปที่ ง-1 รูปแบบ TGA ของ แผ่นยางธรรมชาติ

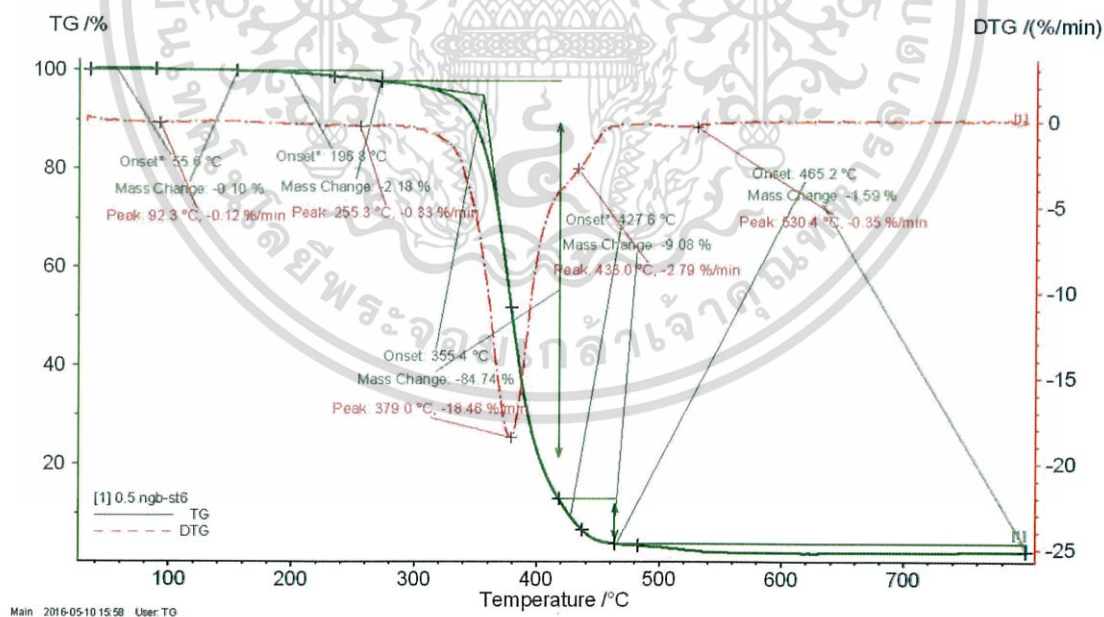


รูปที่ ง-2 รูปแบบ TGA ของ แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

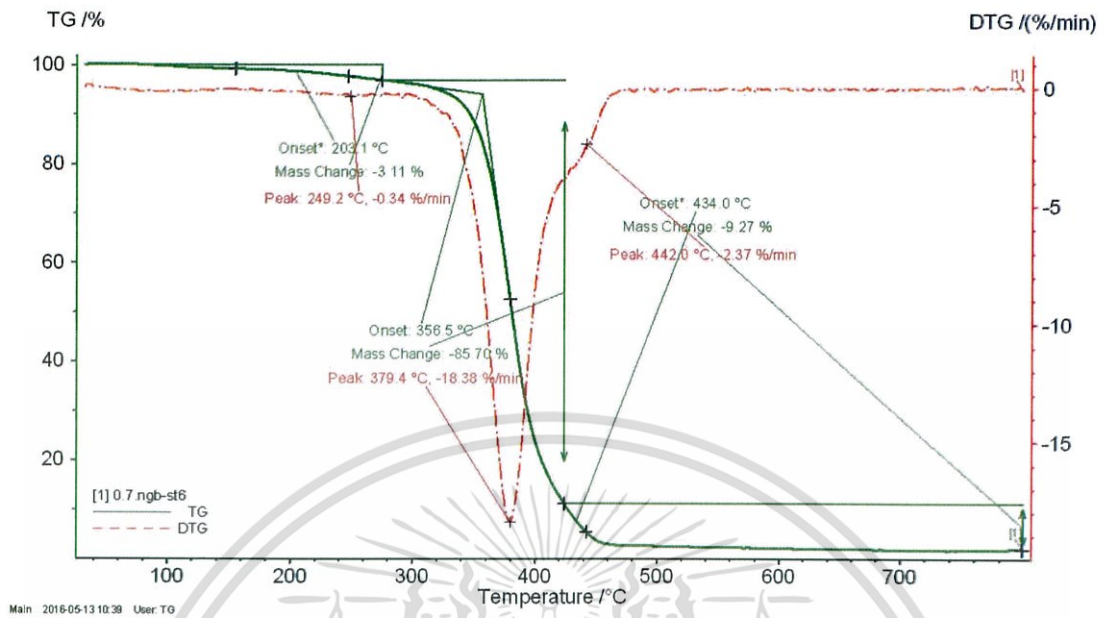


รูปที่ ง-3 รูปแบบ TGA ของ แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0068 wt.%



รูปที่ ง-4 รูปแบบ TGA ของ แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0118 wt.%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

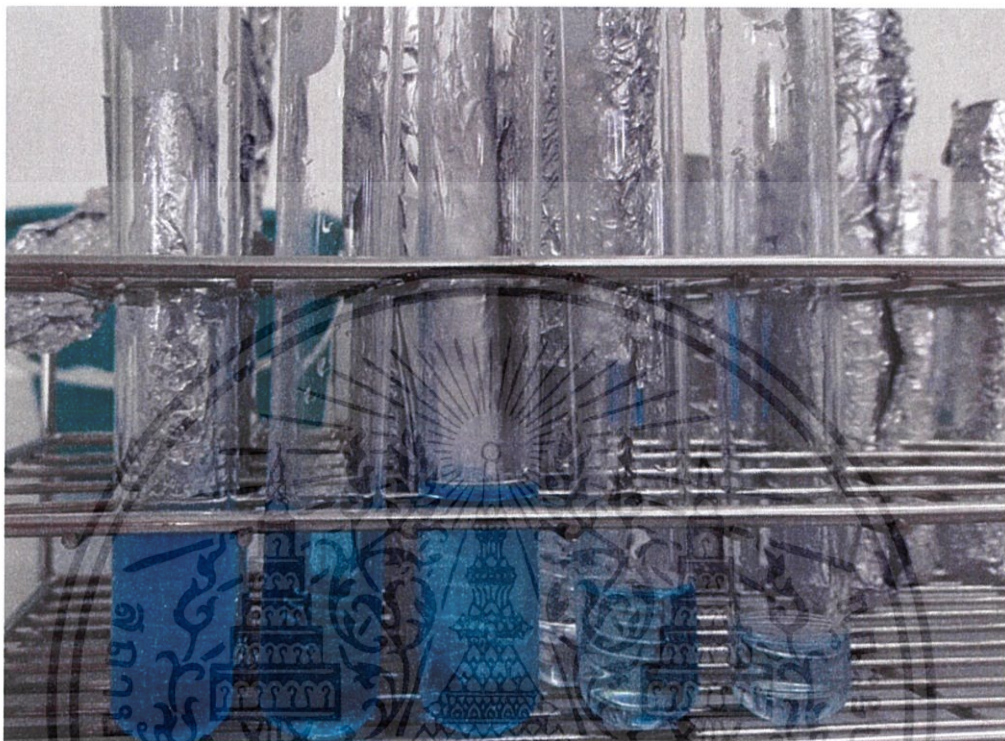


รูปที่ ง-5 รูปแบบ TGA ของ แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0174 wt.%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก จ

ผลการวัดค่าการดูดกลืนแสงหลังผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติกด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-visible Spectrophotometer)

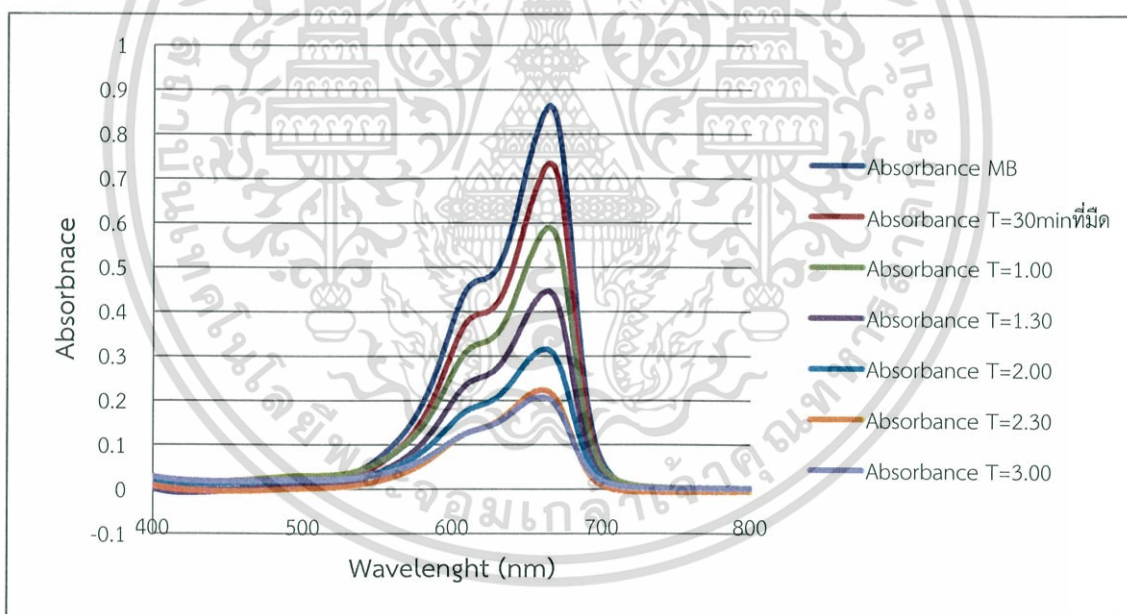


รูปที่ จ-1 แสดงสีของสีข้อมเมทิลลีนบลูเมื่อผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ตของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0118 wt.%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

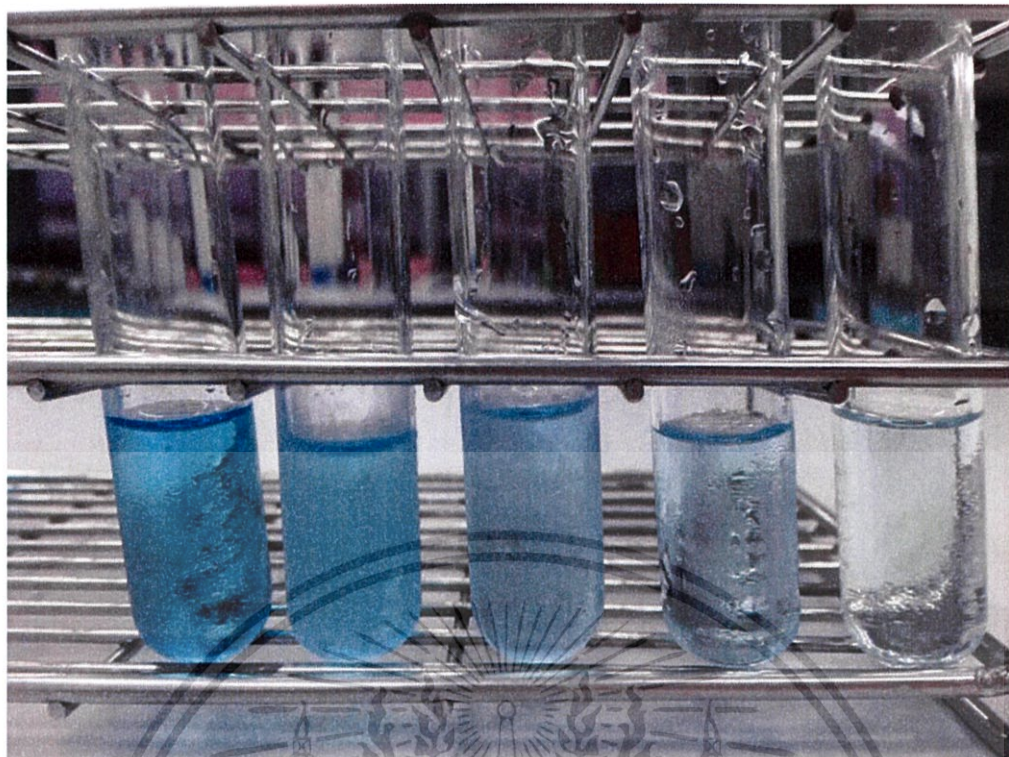
ตารางที่ จ-1 ค่าการดูดกลืนแสงยูวีและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ตของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0118 wt.%

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)			ร้อยละการกำจัด สีย้อม
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	
0	0.872457	0.849627	0.861042	0
30	0.716217	0.750036	0.733127	14.81488895
60	0.546165	0.628781	0.587473	31.69624794
90	0.399654	0.487129	0.443392	48.42883627
120	0.255106	0.367443	0.311275	63.75624132
150	0.161317	0.275938	0.218628	74.51624414
180	0.07852	0.09346	0.08599	90.00000414



รูปที่ จ-2 แสดงค่าการดูดกลืนแสงภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ตของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0118 wt.%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

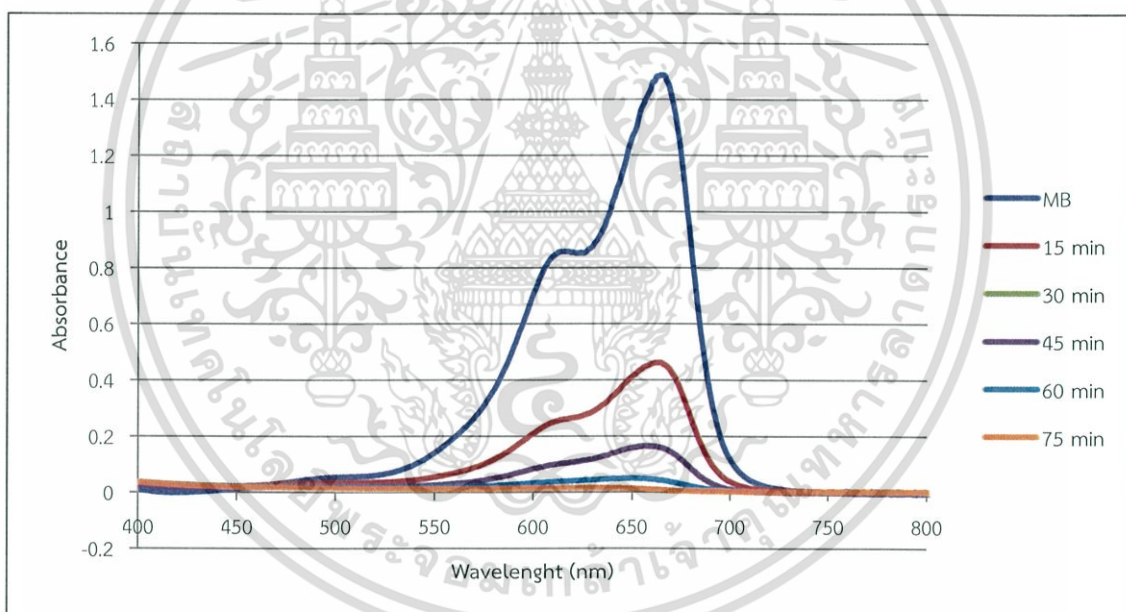


รูปที่ จ-3 แสดงสีของสีย้อมเมทิลลีนบลูเมื่อผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้แสงอาทิตย์ของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0118 wt. %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ-2 ค่าการดูดกลืนแสงยูวีและค่าการกำจัดสีของเมทิลีนภายในใต้แสงอาทิตย์ของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0118 wt.%

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)			ร้อยละการกำจัด สี
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	
0	1.486629	1.486629	1.486629	0
15	0.4788	0.444064	0.461432	68.96119
30	0.1577	0.16095	0.159325	89.2828
45	0.0967	0.098148	0.097424	93.44665
60	0.0432	0.045252	0.044226	97.02508
75	0.0117	0.00976	0.01073	99.27823



รูปที่ จ-4 แสดงค่าการดูดกลืนแสงภายใต้แสงอาทิตย์ของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.0118 wt.%