

การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์และการศึกษาประสิทธิภาพ
โฟโตคะตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์
นาโนคอมโพสิต

PREPARATION, CHARACTERIZATION AND
PHOTOCATALYTIC PERFORMANCES OF TiO₂-rGO
NANOCOMPOSITES



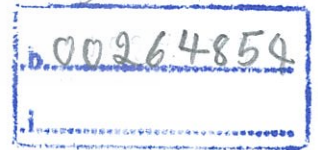
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์และการศึกษาประสิทธิภาพ
โฟโตคะตะไลติกของไทยเหนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์
นาโนคอมโพสิต

PREPARATION, CHARACTERIZATION AND
PHOTOCATALYTIC PERFORMANCES OF TiO₂-rGO
NANOCOMPOSITES



7B00046



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น และอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PREPARATION, CHARACTERIZATION AND PHOTOCATALYTIC
PERFORMANCES OF TiO₂-rGO NANOCOMPOSITES



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN INDUSTRIAL CHEMISTRY
DEPARTMENT OF CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในของคณะศึกษาศาสตร์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ACADEMIC YEAR 2016


ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์และการศึกษาประสิทธิภาพโฟโตคะตะติกของไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิต
Preparation, Characterization and Photocatalytic Performances of TiO₂-rGO Nanocomposites

ชื่อนักศึกษา นางสาวอนุสรณ์ กุลนอก รหัสนักศึกษา 56050648
นายอภิสิทธิ์ กลิ่นแก้ว รหัสนักศึกษา 56050650
นายอุกฤษฏ์ จิรพรเจริญ รหัสนักศึกษา 56050660

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา เคมี
ปีการศึกษา 2559
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2559

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

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์และการศึกษาประสิทธิภาพโฟโตคะตะติกของไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิต		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวอนุสรรา	กุลนอก	รหัสนักศึกษา 56050648
	นายอภิสิทธิ์	กลิ่นแก้ว	รหัสนักศึกษา 56050650
	นายอุกฤษฏ์	จิรพรเจริญ	รหัสนักศึกษา 56050660
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)		
ภาควิชา	เคมี		
คณะ	วิทยาศาสตร์		
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)		
ปีการศึกษา	2559		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์		

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ทำการศึกษาการเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์ และศึกษาประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ($\text{TiO}_2\text{-rGO}$) นาโนคอมโพสิต ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยานี้สามารถเตรียมได้โดยผ่านกระบวนการรีดักชันทางเคมีด้วยการใช้วิตามินซีเป็นสารรีดักแทนท์โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ผสมกับสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ (GO) ที่มีปริมาณแตกต่างกัน (0.10, 0.30, 0.50, 0.75 และ 1.00 wt%) การพิสูจน์เอกลักษณ์ของ $\text{TiO}_2\text{-rGO}$ นาโนคอมโพสิต ที่เตรียมได้ด้วยเทคนิค XRD, DR, FT-IR, TEM, PL, Raman, SEM/EDX, UV-vis และ BET ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างผลึกและหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ของสารตัวอย่างทั้งหมดจะสอดคล้องกับไทเทเนียมไดออกไซด์ (P25) ตั้งต้น ในขณะที่พิกเอกลักษณ์ของรีดิวซ์กราฟีน-ออกไซด์ไม่สามารถสังเกตได้ อย่างไรก็ตามพิกเอกลักษณ์ของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในสารตัวอย่าง $\text{TiO}_2\text{-rGO}$ นาโนคอมโพสิต สามารถตรวจยืนยันโดยเทคนิค Raman ผลจากเทคนิค TEM แสดงให้เห็นว่าอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ฝังและรวมกันได้เป็นอย่างดีกับแผ่นรีดิวซ์-กราฟีนออกไซด์ผลจากเทคนิค DR พบว่าแถบการดูดกลืนแสงของ $\text{TiO}_2\text{-rGO}$ นาโนคอมโพสิตที่สังเคราะห์จะมีการเลื่อนตำแหน่งค่าการดูดกลืนแสงไปยังย่านแสงในช่วงสายตา (Visible light) เพิ่มขึ้นกับการเพิ่มปริมาณของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ นอกจากนี้ในการศึกษาสมบัติโฟโตคะตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ นาโนคอมโพสิต ทั้งหมดทำการศึกษาได้จากความสามารถในการกำจัดสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงยูวีและแสงวิซิเบิลผลปรากฏว่าตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2\text{-rGO}$ ทั้งหมดจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมสูงกว่า TiO_2 (P25) เริ่มต้น โดยความว่องไวของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของ $\text{TiO}_2\text{-rGO}$ ที่ถูกเตรียมด้วย rGO ปริมาณ 0.50 wt% มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูได้สูงที่สุดทั้งภายใต้การฉายแสงยูวีและวิซิเบิลเมื่อเทียบกับสารตัวอื่น ๆ การที่ประสิทธิภาพโฟโตคะตะไลติกสูงชันสามารถอธิบายผลจากตัวเร่งปฏิกิริยานาโนคอมโพสิตนั้นมี rGO เป็นองค์ประกอบ ซึ่งนำไปสู่การลดการตกกลับระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล (Recombination) การเพิ่มอัตราการส่งผ่านอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และการดูดซับโมเลกุลบนพื้นผิวที่เพิ่มขึ้น จึงส่งผลประสิทธิภาพโฟโตคะตะไลติกที่สูงขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงแสดงให้เห็นว่าความว่องไวของปฏิกิริยาทางแสงของของผสมนาโนคอมโพสิตที่มีรีดิวซ์กราฟีน-ออกไซด์ จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าของ TiO_2 เริ่มต้นเพียงอย่างเดียว

คำสำคัญ: กระบวนการโฟโตคะตะไลติก ไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนคอมโพสิต ปฏิกิริยารีดักชันรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ วิตามินซี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Preparation, Characterization and Photocatalytic Performances of TiO ₂ -rGO Nanocomposites		
Students	Miss Anutsara Kulnok	Student ID	56050648
	Mr. Apisit Klunkaew	Student ID	56050650
	Mr. Ukrit Jiraporncharoen	Student ID	56050660
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)		
Department	Chemistry		
Faculty	Science		
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
Academic Year	2016		
Advisor	Dr. Chaval Sriwong		

Abstract

The aim of this special project is to investigate the preparation, characterization and photocatalytic performances of titanium dioxide-reduced graphene oxide (TiO₂-rGO) nano-composite catalysts. These catalysts were prepared through a chemical reduction method using vitamin c as a reductant based on the use of TiO₂ (Degussa P25) with the different amounts of graphene oxide (GO) suspensions (0.10, 0.30, 0.50, 0.75 and 1.00 %wt.). This method is a simple, uncomplicated, green, low cost and effective method for the preparation of TiO₂ catalyst incorporated with rGO. Then, the obtained TiO₂-rGO nanocomposite samples were characterized by X-ray diffraction (XRD), Fourier-transformed infrared spectroscopy (FT-IR), Raman spectroscopy, scanning electron microscope (SEM), transmission electron microscopy (TEM), photoluminescence spectrometer (PL), UV-visible spectrophotometer (UV-vis), Diffuse reflectance spectrometer (DRS) and Brunauer Emmett Teller (BET) surface area techniques. The results showed that the crystalline phases and functional groups of all samples are corresponding to pristine TiO₂ (P25), whereas all of the rGO characteristic peaks are not observed. Nevertheless, the characteristic peaks of rGO in the TiO₂-rGO samples could be seen and well-confirmed by Raman technique. The TEM result showed that the TiO₂ nanoparticles were impregnated and well-combined with the rGO sheets. From the DRS result, the absorption band edges of the obtained TiO₂-rGO catalysts shifted to visible-light region with increasing amount of rGO. Moreover, the photocatalytic properties of all TiO₂-rGO catalysts were evaluated by

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

photodegrading of methylene blue (MB) dye solution under ultra-violet (UV) and visible light irradiation. The results revealed that all TiO₂-rGO catalysts exhibited much higher activity than those of the bare TiO₂. The photocatalytic activity of the TiO₂-rGO prepared with 0.50 %wt. rGO has the highest efficiency for the photodegradation of MB dye than the other catalysts under both UV and visible light irradiation. The improved photocatalytic performance can be attributed to the presence of rGO effect, leading to the reduction of electron (e⁻) - hole (h⁺) recombination of TiO₂, increasing charge transfer rate of electrons and surface-adsorbed amount of chemical molecules which enhances the photocatalytic activity. Thus, this work indicates that the photoactivity of rGO-based nanocomposites is superior to the pristine TiO₂.

Keywords: Photocatalytic process, Titanium dioxide nanocomposite, Chemical reduction method, Reduced graphene oxide, Vitamin C



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ความสำเร็จของโครงการพิเศษนี้จะไม่เกิดขึ้น หากไม่ได้รับความช่วยเหลือ คำแนะนำ การ ตักเตือน และแนวทางการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ จากผู้มีอุปการคุณ ดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่คอยให้ การสนับสนุนสำหรับโครงการพิเศษนี้มาโดยตลอด อีกทั้งยังคอยให้คำแนะนำและแนวทางการแก้ไข ปัญหา รวมถึงให้คำปรึกษาเพื่อให้โครงการพิเศษนี้เป็นไปตามเป้าหมาย

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ปานไพลิน สีหาราช และดร.กิตติศักดิ์ ชูจันทร์ อาจารย์ประจำ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ คำแนะนำและแนวทางการแก้ไขเพื่อให้โครงการพิเศษนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องการตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์ เฉพาะของสารตัวอย่างด้วยเทคนิคต่าง ๆ จนโครงการพิเศษนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ ครอบครัว รุ่นพี่บัณฑิต และเพื่อน ๆ อีกมากมายที่คอยส่งกำลังใจ มาให้อย่างมิได้ขาดสาย อีกทั้งให้คำแนะนำตลอดการทำโครงการพิเศษนี้ เพื่อให้โครงการพิเศษนี้ ครบถ้วนสมบูรณ์และสำเร็จไปได้ด้วยดี

อนุสร
อภิสิทธิ์
อุกฤษฏ์

กุลนอก
กลิ่นแก้ว
จิรพรเจริญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ตม
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ปฏิกริยาโฟโตคะตะไลติก.....	4
2.1.1 ความหมายของปฏิกริยาโฟโตคะตะไลติก.....	4
2.1.2 หลักการของปฏิกริยาโฟโตคะตะไลติก.....	4
2.1.3 องค์ประกอบของปฏิกริยาโฟโตคะตะไลติก.....	6
2.1.4 กลไกการเกิดปฏิกริยาโฟโตคะตะไลติก.....	6
2.1.5 ชนิดของโฟโตคะตะไลติก.....	7
2.1.6 ชนิดของตัวคะตะลิสต์.....	7
2.1.7 ปัจจัยที่ส่งผลต่อปฏิกริยาโฟโตคะตะไลติก.....	9
2.1.8 พลังงานแสง.....	9
2.2 ไทเทเนียมไดออกไซด์.....	10
2.2.1 ข้อมูลเบื้องต้นของไทเทเนียม.....	10
2.2.2 ผลึกและโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	11
2.2.3 ปฏิกริยาการเร่งด้วยแสงโดยไทเทเนียมไดออกไซด์.....	12
2.2.4 ประโยชน์ของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	14
2.2.5 ประสิทธิภาพของปฏิกริยาเร่งด้วยแสง.....	15
2.2.6 ไทเทเนียมไดออกไซด์ผสม.....	15
2.2.7 ไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิต.....	16
2.3 กราไฟต์.....	16
2.3.1 ประเภทของกราไฟต์.....	17
2.3.2 ลักษณะของกราไฟต์.....	18
2.3.3 การใช้ประโยชน์จากแร่กราไฟต์ในธรรมชาติ.....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.3.4 การใช้ประโยชน์จากแร่กราไฟต์สังเคราะห์.....	19
2.4 กราฟีน.....	19
2.4.1 คุณสมบัติของกราฟีนและการนำไปประยุกต์ใช้.....	20
2.5 การสังเคราะห์กราฟีน.....	20
2.5.1 การใช้สารเคมีในการรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์.....	21
2.5.2 การสังเคราะห์แกรฟีนด้วยวิธีรีดักชันจากแกรฟีนออกไซด์.....	21
2.6 วิตามินซีหรือกรดแอสคอร์บิก.....	23
2.6.1 ข้อมูลพื้นฐานวิตามินซีหรือกรดแอสคอร์บิก.....	23
2.6.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของวิตามินซีต่อกราฟีนออกไซด์.....	23
2.7 เมทิลีนบลู.....	24
2.7.1 ข้อมูลทั่วไปของเมทิลีนบลู.....	24
2.7.2 กลไกการสลายสีย้อมของเมทิลีนบลู.....	24
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	27
3.1 สารเคมีที่ใช้.....	27
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	27
3.3 วิธีการทดลอง.....	28
3.3.1 การเตรียมกราฟีนออกไซด์.....	28
3.3.2 การเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิต.....	30
3.3.3 การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับและกำจัดสีย้อม.....	32
3.4 การตรวจสอบและพิสูจน์เอกลักษณ์.....	33
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล.....	36
4.1 การวิเคราะห์พิสูจน์เอกลักษณ์.....	37
4.1.1 การศึกษาการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible Spectroscopy.....	37
4.1.2 การศึกษาการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible Diffuse Reflectance Spectroscopy (DRS).....	38
4.1.3 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR).....	39
4.1.4 การศึกษาเทคนิครามานสเปกโตรสโคปี.....	41
4.1.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	43
4.1.6 การศึกษาการคายพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนส-เซนส์.....	45
4.1.7 การศึกษาการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุนด้วยเครื่องวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว (Surface area and porosity analyzer, BET).....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.1.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM).....	47
4.1.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบภายในตัวอย่าง (Energy-dispersive X-ray spectroscopy, EDX).....	49
4.1.10 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM).....	52
4.1.11 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับในที่มีด.....	53
4.1.12 การศึกษากระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้การฉายแสงยูวี (UV).....	55
4.1.13 การศึกษากระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้การฉายแสงวิซิเบิล (Visible light).....	59
4.1.14 การศึกษาประสิทธิภาพในการใช้งานซ้ำ.....	62
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	63
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	63
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	63
เอกสารอ้างอิง.....	65
ภาคผนวก.....	69
ภาคผนวก ก.....	70
ภาคผนวก ข.....	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความยาวคลื่นในชวงต่าง ฅ.....	10
2.2 สมบัติทางผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	11
2.3 ประสิทธิภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ในการย่อยสลายสารมลพิษอินทรีย์.....	15
3.1 สัตส่วนเติมสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์.....	31
4.1 ผลการดูดกลืนแสง.....	38
4.2 แสดงปริมาณพื้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ นาโนคอมโพสิต.....	47
4.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบในไทเทเนียมไดออกไซด์ เกรดการค้า และไทเทเนียม- ไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์.....	52
4.4 ค่าประสิทธิภาพการดูดซับในที่มืด.....	54
4.5 แสดงค่าประสิทธิภาพการดูดซับและการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงยูวี (UV)....	55
4.6 แสดงค่าประสิทธิภาพการดูดซับและกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงวิซิบิล (Visible).....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี	5
2.2 การเปรียบเทียบปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกกับกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง.....	5
2.3 แผนภาพแสดงองค์ประกอบของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก.....	6
2.4 การเปรียบเทียบค่าช่องว่างของพลังงานของตัวกลางชนิดต่างๆ.....	8
2.5 ยูนิตเซลล์ของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	12
2.6 โครงสร้างผลึก.....	12
2.7 กลไกของการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	13
2.8 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ นาโนคอมโพสิต.....	16
2.9 ลักษณะทางกายภาพของกราฟาไฟต์.....	17
2.10 ผงกราฟาไฟต์.....	17
2.11 อัญรูปของคาร์บอน.....	18
2.12 การม้วนของกราฟีน.....	19
2.13 แผนภาพแสดงวิธีการสังเคราะห์กราฟีน.....	21
2.14 แผนภาพแสดงวิธีการสังเคราะห์แกรฟีนด้วยวิธีโซนิเคชัน (Sonication).....	21
2.15 แสดงโครงสร้างแผ่นคาร์บอนในกระบวนการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของกราฟาไฟต์.....	22
2.16 โครงสร้างเคมีของวิตามินซี.....	23
2.17 กลไกการเกิดปฏิกิริยารีดักชันต่อกราฟีนออกไซด์.....	23
2.18 โครงสร้างเคมีของเมทิลีนบลู.....	24
2.19 ภาพแสดงกลไกการสลายตัวของสีย้อมเมทิลีนบลู.....	24
3.1 ผงกราฟาไฟต์ออกไซด์.....	29
3.2 กระบวนการโซนิเคชัน.....	30
3.3 สารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์.....	30
3.4 ผงไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิต.....	31
4.1 ตัวอย่างผงไทเทเนียมไดออกไซด์.....	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 ผลการดูดกลืนแสงของกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์.....	37
4.3 กราฟ UV-Vis diffuse reflectance (DRS) spectra ของไทเทเนียมไดออกไซด์ (P25) และไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ นาโนคอมโพสิต.....	39
4.4 กราฟแสดง FT-IR spectra ของกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์.....	40
4.5 กราฟ FT-IR ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์.....	41
4.6 การวัดการกระเจิงแสงด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโคปีของกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์.....	42
4.7 การวัดการกระเจิงของแสงด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโคปี.....	43
4.8 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของกราฟไฟต์ กราฟีนออกไซด์ และ รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์.....	44
4.9 XRD pattern ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์.....	45
4.10 กราฟแสดงการคายพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนส์.....	46
4.11 ภาพแสดงกลไกการเกิดการตกกลับของอิเล็กตรอน (Recombination) การส่งผ่านอิเล็กตรอน (Transfer) และกลไกการกำจัดสีย้อม (Degradation) ภายใต้การฉายแสงยูวี.....	46
4.12 ภาพแสดงลักษณะสัณฐานวิทยาจากเทคนิค SEM.....	47
4.13 ผล EDS ของไทเทเนียมไดออกไซด์ (P25).....	49
4.14 ภาพ SEM ของไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้า (Degussa P25) การกระจายตัวของธาตุคาร์บอน การกระจายตัวของธาตุออกซิเจน และการกระจายตัวของธาตุไทเทเนียม.....	49
4.15 ผล EDS ของไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิต ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.50 wt%.....	50
4.16 ภาพ SEM TiO ₂ -rGO-0.50 wt% การกระจายตัวของธาตุคาร์บอน การกระจายตัวของธาตุออกซิเจน และการกระจายตัวของธาตุไทเทเนียม.....	50
4.17 ผล EDS ของไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิตที่เติมกราฟีนออกไซด์ 1.00 wt%.....	51
4.18 ภาพ SEM TiO ₂ -rGO-1.00 wt% การกระจายตัวของธาตุคาร์บอน การกระจายตัวของธาตุออกซิเจน และการกระจายตัวของธาตุไทเทเนียม.....	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 ภาพแสดงลักษณะสัณฐานวิทยาจาก SEM ของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ผงไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ นาโนคอมโพสิต ผงไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ นาโนคอมโพสิตที่มีปริมาณกราฟีนออกไซด์เพิ่มมากขึ้น.....	53
4.20 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับในที่มืดเป็นเวลา 150 นาที.....	54
4.21 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มืด เป็นเวลา 150 นาที.....	55
4.22 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงยูวี ของไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิตที่ เวลา 105 นาที.....	56
4.23 กราฟแสดงอัตราเร็วของการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงยูวี เป็นเวลา 75 นาที.....	57
4.24 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู ภายใต้การฉายแสงยูวีที่ 75 นาที (รวมดูดซับ 30 นาที).....	58
4.25 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู ระหว่างสภาวะในที่มืดและสภาวะภายใต้แสงยูวีเป็นเวลา 90 นาที.....	58
4.26 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู ภายใต้การฉายแสงวิชิเบล.....	59
4.27 กราฟแสดงอัตราเร็วของการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงวิชิเบล เป็นเวลา 150 นาที.....	60
4.28 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้ การฉายแสงวิชิเบลเป็นเวลา 150 นาที.....	61
4.29 กราฟแสดงประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีน ออกไซด์นาโนคอมโพสิต ที่เติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ 0.50 wt% โดยการทำการทดสอบ 5 ครั้ง โดยใช้เวลาครั้งละ 75 นาที ภายใต้การฉายแสงยูวี.....	62
ข-1 DRS Spectra ของไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้า.....	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข-2 DRS Spectra ของไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิต ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	73
ข-3 DRS Spectra ของไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิต ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	74
ข-4 DRS Spectra ของไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิต ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	74
ข-5 DRS Spectra ของไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิต ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	75
ข-6 DRS Spectra ของไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิต ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 1.00 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	75
ข-7 Isotherm ของไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้า.....	76
ข-8 Isotherm ของไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิต ที่มีปริมาณรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ 0.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
TiO ₂	ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide)
E _g	แถบช่องว่างพลังงาน (Energy Gap)
e ⁻	อิเล็กตรอน (Electron)
h ⁺	ช่องว่าง (Hole)
O ₂ ^{·-}	ซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล (Superoxide radical)
OH [·]	ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl radical)
CO ₂	คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide)
H ₂ O	น้ำ
Co	โคบอลต์ (Cobalt)
Cu	ทองแดง (Copper)
Fe	เหล็ก (Iron)
GO	กราฟีนออกไซด์ (Graphene oxide)
rGO	รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (Reduced graphene oxide)
N ₂ H ₄	ไฮดราซีน (Hydrazine)
NaBH ₄	โซเดียมโบโรไฮไดรด์ (Sodium borohydride)
VB	แถบเวเลนซ์ (Valence band)
CB	แถบชั้นตัวนำไฟฟ้า (Conduction band)
ZnO	ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide)
Fe ₂ O ₃	เฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric Oxide)
ZrO ₂	เซอร์โคเนียมออกไซด์ (Zirconium dioxide)
O ₂	ออกซิเจน (Oxygen)
WO ₃	ทังสเตนออกไซด์ (Tungsten trioxide)
NaNO ₃	โซเดียมไนเตรต (Sodium nitrate)
KMnO ₄	โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium permanganate)
H ₂ O ₂	ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการวิจัย

กระบวนการโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic process) เป็นกระบวนการที่มีการศึกษาอย่างกว้างขวาง โดยปฏิกิริยาเกิดจาก 2 องค์ประกอบหลัก ๆ ได้แก่ แสง (Photo) และวัสดุกึ่งตัวนำ (Semiconductors) เมื่อวัสดุกึ่งตัวนำได้รับพลังงานแสงที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap) ทำให้อิเล็กตรอน (Electron, e^-) ถูกกระตุ้นจากแถบวาเลนซ์ (Valence band) ไปยังแถบชั้นตัวนำ (Conduction band) เกิดช่องว่าง (Hole, h^+) จากนั้น e^- กับ h^+ จะเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลของออกซิเจนและน้ำในระบบก่อให้เกิดซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล (Superoxide radical, $O_2^{\cdot-}$) และไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl radical, OH^{\cdot}) ตามลำดับ [1] ซึ่งทั้ง 2 เรดิคัลนี้จะไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) กับโมเลกุลของสีย้อม แล้วเปลี่ยนโมเลกุลของสีย้อมให้กลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และ น้ำ (H_2O) ที่เป็นสารที่ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม [2] ในงานวิจัยนี้จึงเลือกวัสดุกึ่งตัวนำเป็นไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นสารกึ่งตัวนำประเภท N-type ที่มีลักษณะเป็นผงสีขาว มีความเสถียรต่อปฏิกิริยาเคมี มีราคาไม่แพง และมีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกสูง แต่อย่างไรก็ตามไทเทเนียมไดออกไซด์ยังมีข้อจำกัดด้านการดูดซับ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวต่ำและมีการตกกลับของอิเล็กตรอนรวมกับโฮล (Recombination) ได้ง่าย นอกจากนี้ไทเทเนียมไดออกไซด์ยังไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกภายใต้แสงในช่วงสายตามองเห็น (Visible light) เนื่องจากแถบของการดูดกลืนมีค่าพลังงานสูงกว่าพลังงานแสงในช่วงวิสิเบิล [3] ดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ไขจุดบกพร่องดังกล่าวรวมทั้งเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับไทเทเนียมไดออกไซด์ การเติมสารอื่น ๆ ลงไปเพื่อให้ได้ไทเทเนียมนาโนคอมโพสิตจึงได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เช่น โคบอลต์ (Co), ทองแดง (Cu), เหล็ก (Fe) และอนุพันธ์คาร์บอน (Carbon allotropes) เป็นต้น [4]

รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (Reduced graphene oxide; rGO) เป็นอีกรูปหนึ่งของคาร์บอนอะตอมที่มีโครงสร้างเป็นวงหกเหลี่ยมในแนวระนาบ 2 มิติ สังเคราะห์ได้จากกราฟีนออกไซด์ (Graphene oxide; GO) โดยทั่วไปกราฟีนออกไซด์จะมีหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ เกิดพันธะอยู่บนโครงร่าง (Template) เช่น หมู่คาร์บอกซิลิก คาร์บอนิล อีพอกไซด์ และไฮดรอกซิล เป็นต้น ทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าหรือการส่งผ่านอิเล็กตรอนต่ำ [5] ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีการกำจัดหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวออกไป ด้วยกระบวนการรีดักชันทางเคมี โดยมีการใช้ตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) อย่างเช่น ไฮดราซีน (N_2H_4) หรือโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ($NaBH_4$) เพื่อเปลี่ยนกราฟีนออกไซด์ให้เป็น รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์แต่เนื่องจากสารเคมีดังกล่าวเป็นสารที่มีความเป็นพิษสูง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจใช้วิตามินซีหรือกรดแอสคอร์บิกเป็นตัวรีดิวซ์เชิงเอเจนต์ ซึ่งไม่เป็นพิษเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ราคาถูก หาเอกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่นับญาติให้ไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง่าย [6] นอกจากนี้วิตามินซียังช่วยในการปรับผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ให้เป็นบวก ซึ่งช่วยทำให้กราฟีนออกไซด์สามารถยึดเกาะบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ดียิ่งขึ้น

ในปัจจุบันพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ($\text{TiO}_2\text{-rGO}$) นาโนคอมโพสิตเป็นวัสดุประกอบที่มีประสิทธิภาพสูงในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก [7] เนื่องจากเมื่อไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับแสงที่มีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับแถบพลังงานทำให้อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นไปยังแถบชั้นตัวนำจากนั้นจะถูกส่งผ่าน (Charge transfer) ไปยังพันธะคู่ของแผ่นกราฟีนออกไซด์ ซึ่งช่วยลดการเกิดการตกกลับของอิเล็กตรอน [8] นอกจากนี้ยังสามารถช่วยดูดซับสีย้อมและเพิ่มบริเวณเร่ง (Active site) เนื่องจากรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์เป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวสูงจึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมได้ดียิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ผ่าน ๆ มาพบว่าการเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีอยู่หลายวิธีด้วยกัน เช่น ไฮโดรเทอร์มอลโซลโนซัน โซโวเทอร์มอล [9] เป็นต้น ซึ่งวิธีการต่าง ๆ เหล่านี้เป็นวิธีการที่ซับซ้อน มีความยุ่งยาก บางวิธีมีการใช้อุณหภูมิสูงและใช้เวลานานในการเตรียม งานวิจัยนี้จึงสนใจวิธีการเตรียมที่ง่าย ๆ โดยการให้ความร้อนและใช้วิตามินซีเป็นสารรีดิวซ์ (Reductant) [10]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงทำการเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิตโดยทำการรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วยวิตามินซีภายใต้การให้ความร้อนอย่างง่ายให้เป็นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ จากนั้นนำไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิตไปพิสูจน์เอกลักษณ์โดยใช้เทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ XRD, DRS, FT-IR, TEM, PL, Raman, SEM/EDX, TEM, BET และนำไปทดสอบประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงยูวี (UV-light) และแสงวิสิเบิล (Visible light)

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาวิธีการเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิตด้วยวิธีการให้ความร้อนอย่างง่ายโดยใช้วิตามินซีเป็นตัวรีดิวซ์
2. เพื่อศึกษาผลของการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ต่อประสิทธิภาพโฟโตคะตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์
3. เพื่อทำการศึกษาและพิสูจน์เอกลักษณ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิต
4. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพโฟโตคะตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงยูวีและแสงวิสิเบิล

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทำการศึกษาการเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิต ด้วยวิธีการให้ความร้อนอย่างง่ายและใช้วิตามินซีเป็นตัวรีดิวซ์
2. เตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิต โดยศึกษาผลของการเติมกราฟีนออกไซด์ที่แตกต่างกัน ได้แก่ 0.10, 0.30, 0.05, 0.75, และ 1.00 wt%
3. พิสูจน์เอกลักษณ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิต ด้วยเทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ XRD, FT-IR, TEM, Raman, DRS, PL, BET และ SEM/EDX เป็นต้น
4. ศึกษาประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของการกำจัดสีย้อมเมทีลีนบลูภายใต้การฉายแสงยูวีและแสงวิซิเบิล

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รับองค์ความรู้วิธีการเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิต
2. ได้รับองค์ความรู้เกี่ยวกับปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิต
3. สามารถนำไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิตมาใช้ในการกำจัดสีย้อมได้
4. ได้รับความรู้และมีความเข้าใจมากขึ้นในการใช้เครื่องมือและเทคนิคต่าง ๆ เพื่อพิสูจน์เอกลักษณ์ของวัสดุผสมนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

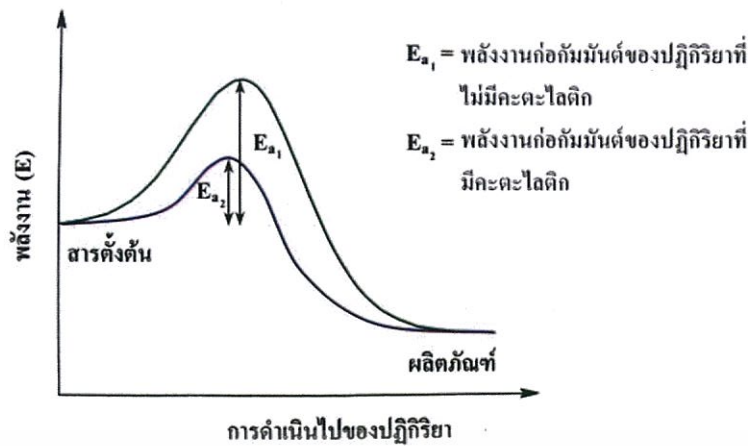
2.1 ปฏิริยาโฟโตคะตะไลติก

2.1.1 ความหมายของปฏิริยาโฟโตคะตะไลติก

โฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic) ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ “โฟโต (Photo)” หมายถึงการเกิดกระบวนการเร่งปฏิริยาด้วยแสงโดยจะใช้แสงมาเกี่ยวข้องในการเกิดปฏิริยา และ “คะตะไลติก (Catalytic)” หมายถึง อนุภาคของวัสดุหรือสารประกอบ ที่พบโดยทั่วไปจะอยู่ในรูปของฟิล์มหรือผง ซึ่งจะสามารถเพิ่มอัตราการเกิดปฏิริยาและทำให้ปฏิริยาเข้าสู่สมดุลเร็วยิ่งขึ้น การศึกษาเรื่องการเร่งปฏิริยาเริ่มต้นมาตั้งแต่ปี พ.ศ.2339 จนถึงปี พ.ศ.2379 เจ เจ เบอเซลเลียส (J.J Berzelius) ได้ให้คำจำกัดความของคำว่า การเร่งปฏิริยา (Catalysis) จากนั้นได้มีการศึกษาและพัฒนาเรื่อย ๆ จนกระทั่ง พ.ศ.2515 Fujishima และ Honda นักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่นได้ทำการศึกษาระบบการแยกน้ำเพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจนด้วยกระบวนการเร่งปฏิริยาด้วยแสง โดยใช้ไอเล็กโตรดที่ผลิตจากไทเทเนียมไดออกไซด์ ต่อมา Frank และ Bard นักวิทยาศาสตร์ชาวสหรัฐอเมริกาได้ศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมสะอาดโดยการกระบวนการเร่งปฏิริยาด้วยแสงในการกำจัดไซยาไนด์ (CN⁻) ในน้ำโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้นักวิทยาศาสตร์ทั่วโลกสนใจศึกษาและพัฒนากระบวนการเร่งปฏิริยาด้วยแสงอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะกับการแก้ไขปัญหามลพิษทางสิ่งแวดล้อมทางน้ำ และจากการศึกษาพบว่าสามารถลดปัญหาดังกล่าวได้ด้วยตัวเร่งปฏิริยาด้วยแสง (Photocatalyst) [11]

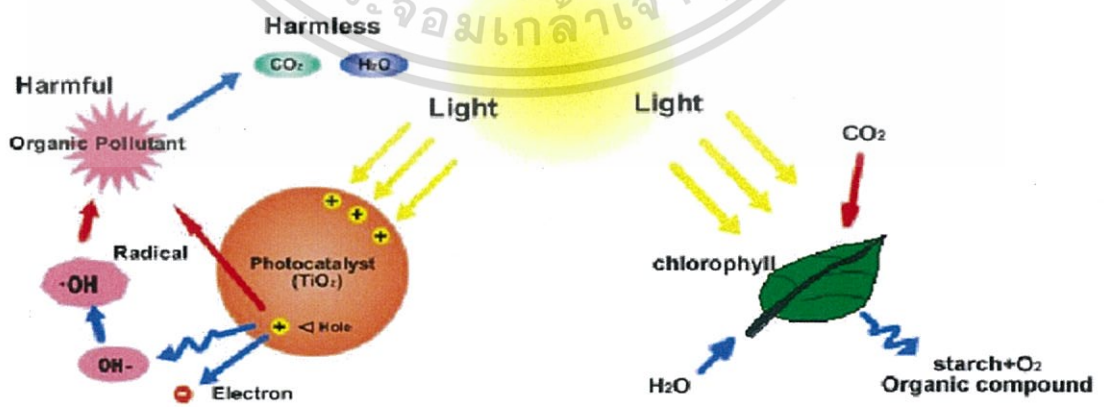
2.1.2 หลักการของปฏิริยาโฟโตคะตะไลติก

กระบวนการโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic process) เป็นกระบวนการเร่งปฏิริยาโดยใช้คะตะลิสต์ ซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิริยาได้ โดยการกระตุ้นด้วยแสงตัวคะตะลิสต์จะทำหน้าที่ลดพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิริยา [12] รูปที่ 2.1 แสดงการถึงผลของตัวเร่งปฏิริยาต่ออัตราการเกิดปฏิริยาเคมี โดย E_{a1} แสดงพลังงานกระตุ้นของปฏิริยาที่ไม่มีคะตะไลติก ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีค่าสูงกว่าพลังงานกระตุ้นของปฏิริยาที่มีคะตะไลติก และยังช่วยให้อัตราเร็วของปฏิริยาเพิ่มขึ้น โดยการลดพลังงานกระตุ้นอีกทั้งตัวคะตะไลติกนี้ยังตอบสนองต่อแสง คือจะเกิดการกระตุ้นได้โดยการถ่ายทอดพลังงานที่มีมากกว่าแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap)



รูปที่ 2.1 แสดงผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี [12]

การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงคือปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการใช้แสงไปกระตุ้นสารที่เปลี่ยนแปลงอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีโดยที่ไม่เกี่ยวข้องกับตัวมันเอง คลอโรฟิลล์ของพืชเป็นสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalytic) ในธรรมชาติแบบหนึ่ง ความแตกต่างระหว่างคลอโรฟิลล์กับนาโนโฟโตคะตะลิสต์ที่มนุษย์ประดิษฐ์ขึ้นซึ่งในที่นี้จะเป็ไทเทเนียมไดออกไซด์ กล่าวคือคลอโรฟิลล์จะจับแสงอาทิตย์ไปเปลี่ยนน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์เป็นออกซิเจนและกลูโคสแต่การฉายแสงอุลตราไวโอเล็ต (แสงยูวี) จากดวงอาทิตย์หรือจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ไปยังไทเทเนียมไดออกไซด์จะทำให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) และประจุลบของซูเปอร์ออกไซด์ (Superoxide anions) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งสารตระกูลออกซิเจนทำให้เกิดปฏิกิริยาเหล่านี้สามารถทำลายโครงสร้างและยับยั้งชีวเคมีของแบคทีเรียและเซลล์ที่ติดเชื้อไวรัสการเกิดอนุมูลไฮดรอกซิลและโมเลกุลของออกซิเจนจะทำให้สารประกอบอินทรีย์ถูกทำเป็นออกไซด์ จนในที่สุดจะกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ รวมทั้งจะเข้าไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชันสลายก๊าซพิษต่าง ๆ และสารก่อมะเร็ง เช่น Acetaldehyde, Benzene เป็นต้น [13]

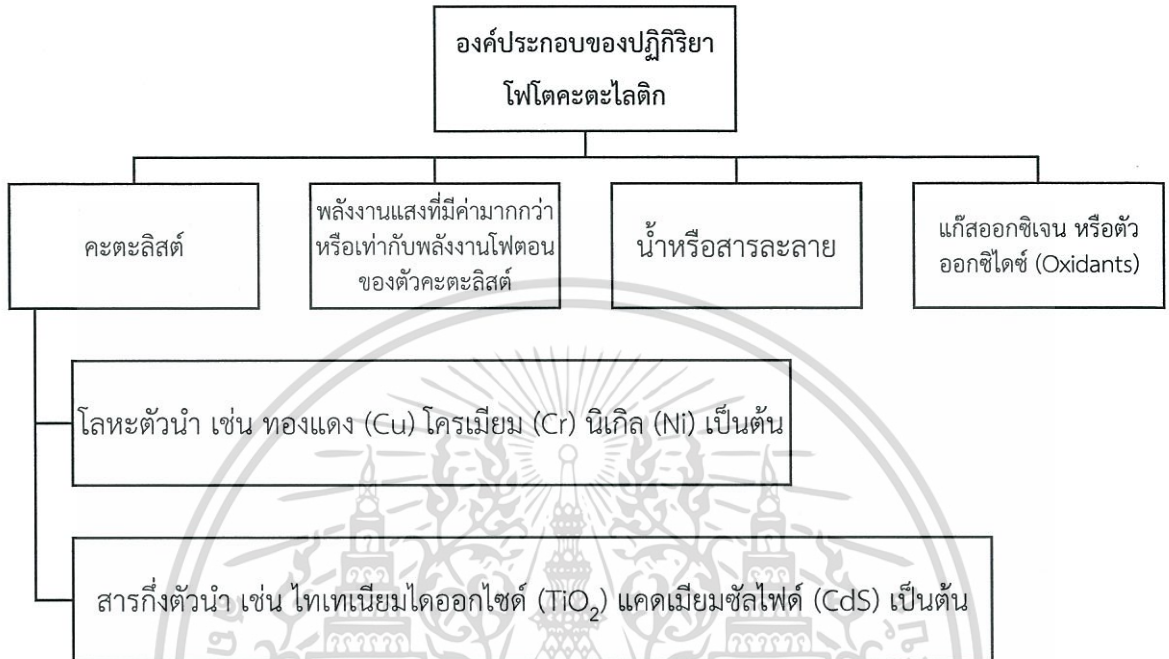


รูปที่ 2.2 การเปรียบเทียบปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกกับกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 องค์ประกอบของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก

ปฏิกิริยาเกิดจาก 2 องค์ประกอบหลัก ๆ ได้แก่ แสง (Photo) และวัสดุกึ่งตัวนำ (Semiconductors) ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงองค์ประกอบของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก [13]

2.1.4 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก

สารตัวนำและกึ่งตัวนำจะมีแถบพลังงานอยู่ 2 แถบ คือ แถบเวเลนซ์ (Valence band; VB) และแถบชั้นตัวนำไฟฟ้า (Conduction band; CB) โดยสารทั้ง 2 ประเภทมีความแตกต่างกันคือ หากเป็นสารตัวนำแถบทั้งสองจะอยู่ติดกัน แต่สารกึ่งตัวนำจะมีแถบช่องว่างพลังงาน คั่นอยู่ระหว่างแถบพลังงานทั้งสอง กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง เริ่มจากเมื่อสารกึ่งตัวนำได้รับพลังงานเท่ากับหรือสูงกว่าช่องว่างพลังงาน อิเล็กตรอนที่สถานะพื้นจะถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่ไปยังแถบกระตุ้นหรือแถบการนำไฟฟ้า และทิ้งช่องว่างอิเล็กตรอนที่แถบเวเลนซ์ไว้ เรียกว่า โฮล (Hole) ซึ่งมีประจุเป็นบวก ส่วนอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ไปยังแถบการนำไฟฟ้านั้นจะสามารถกลับมาอยู่ในสถานะเดิมได้อีก เรียกว่า รีคอมบิเนชัน (Recombination) โดยปกติระดับพลังงานที่ต่ำที่สุดของแถบการนำไฟฟ้าจะเป็นระดับของศักย์พลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันด้วยอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น (Excited electron) ในทางกลับกันระดับพลังงานที่สูงที่สุดของแถบเวเลนซ์จะเป็นระดับศักย์พลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยโฮลที่เหลืออยู่ จากที่กล่าววาระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำต่างจากโลหะเพราะมีช่องว่างของระดับพลังงานคั่นอยู่ทำให้ทั้งอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นและโฮลมีระยะเวลาเพียงพอในการเคลื่อนที่ผ่านไปยังพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและเกิดปฏิกิริยาในที่สุด เมื่อฉายแสงยูวีไปยังตัวเร่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยา เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์ จะทำให้เกิดไฮดรอกซิลแรดิคัล (Hydroxyl radical) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) ประจุลบของซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน (Superoxide anion) ซึ่งสารตระกูลดังกล่าวเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงสามารถทำลายโครงสร้างและยับยั้งชีวเคมีของแบคทีเรียและเซลล์ที่ติดไวรัส หรือจะทำให้สารประกอบอินทรีย์ถูกออกซิไดซ์กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำในที่สุด [14]

เนื่องจากไฮดรอกซิลแรดิคัลและ h^+ ที่ผิวของตัวคะตะลิสต์ที่มีสมบัติเป็นประจุบวกการออกซิไดซ์ของ h^+ กับไฮดรอกไซด์ไอออน ได้ไฮดรอกซิลแรดิคัล (OH^\cdot) และขณะเดียวกัน h^+ เกิดจากการออกซิไดซ์กับสารอินทรีย์ด้วย ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโฟโตคะตะไลติกจึงเกิดขึ้นได้ทั้ง 2 ทาง คือ

1. การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ h^+ กับไฮดรอกไซด์ไอออนหรือน้ำได้ไฮดรอกซิลแรดิคัล (OH^\cdot) และปฏิกิริยาของอิเล็กตรอนกับออกซิเจนหรือไฮโดรเจนไอออนได้ซูเปอร์ออกไซด์ไอออนแรดิคัลเปอร์ไฮดรอกซิลแรดิคัล หรือไฮโดรเจนแรดิคัล (H^\cdot)
2. การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตรงของสารอินทรีย์ที่ดูดติดบนตัวคะตะลิสต์กับ h^+ ซึ่งความสามารถของปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์มีมากกว่า ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนไทเทเนียมไดออกไซด์หรือตัวคะตะลิสต์อื่น

2.1.5 ชนิดของโฟโตคะตะไลติก

ชนิดของโฟโตคะตะไลติก สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท เมื่อพิจารณาจากสถานะของตัวคะตะลิสต์ ดังนี้

1. โฟโตคะตะไลติกแบบเอกพันธ์ (Homogeneous photocatalysis) เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวคะตะลิสต์ซึ่งมีสถานะเดียวกับสารอินทรีย์ที่กำลัง (โดยทั่วไปแล้วจะเป็นของเหลว) เช่น การย่อยสลาย 2,4-Dinitrofluorene โดยใช้ UV/ H_2O_2
2. โฟโตคะตะไลติกแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous photocatalysis) เป็นกระบวนการที่เกี่ยวกับการกำจัดหรือสลายสารพิษต่าง ๆ ในสิ่งแวดล้อม เช่น สารอะโรมาติก แอลกอฮอล์ คลอโรฟอร์ม ยาฆ่าแมลง โลหะหนัก และสีสังเคราะห์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการใช้สารเซมิคอนดักเตอร์ (Semiconductor material) เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) และเซอร์โคเนียออกไซด์ (ZrO_2) หรือโลหะซัลไฟด์มาเป็นตัวคะตะลิสต์

2.1.6 ชนิดของตัวคะตะลิสต์

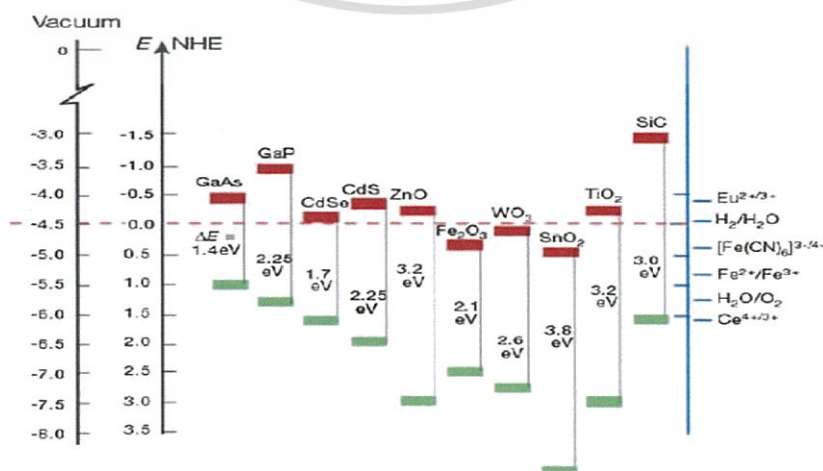
สาร 2 ชนิดที่ใช้เป็นตัวคะตะลิสต์ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก ได้แก่

1. โลหะตัวนำ (Transition metal) เช่น ทองแดง โคเรียม เป็นต้น
2. สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ แคดเมียมซัลไฟด์ และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบของโลหะตัวนำและสารกึ่งตัวนำประกอบด้วยแถบวาเลนซ์ และแถบการนำไฟฟ้าในโลหะตัวนำแถบวาเลนซ์และแถบการนำจะอยู่ติดกันแต่ในสารกึ่งตัวนำแถบทั้งสองจะอยู่ห่างกันโดยถูกคั่นด้วยแถบช่องว่างพลังงาน เมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ได้รับพลังงานจากแสงที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับขนาดช่องว่างพลังงาน จะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังแถบการนำไฟฟ้า และขณะเดียวกันในแถบวาเลนซ์จะเกิด h^+ ซึ่งมีประจุเป็นบวกและสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในแถบวาเลนซ์ ส่วนอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในแถบการนำเช่นกันปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น (Electron-Hole pairs, e^-/h^+) ในโลหะตัวนำนั้นคู่อิเล็กตรอน-โฮลสามารถเคลื่อนที่ไปมาได้อย่างสะดวกในแถบการนำและแถบวาเลนซ์ตามลำดับโดยไม่มีช่องว่างพลังงานมาถ่วง จึงเป็นสาเหตุให้คู่อิเล็กตรอน-โฮลกลับมารวมตัวได้ง่ายในทางตรงกันข้ามการรวมตัวกันใหม่ของคู่อิเล็กตรอน-โฮลในสารกึ่งตัวนำเกิดได้ยากกว่าเพราะมีแถบช่องว่างพลังงานคั่นเอาไว้ทำให้อิเล็กตรอน-โฮลอยู่ได้นานกว่ากรณีของโลหะตัวนำ

ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกในน้ำประกอบด้วยแสงที่ส่องผ่านน้ำไปยังตัวคะตะลิสต์ซึ่งมีพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ที่สูงกว่าแถบช่องว่างพลังงานของตัวคะตะลิสต์ ซึ่งอิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นจากแถบวาเลนซ์แบนด์ ให้เคลื่อนที่ไปยังคอนดักชันแบนด์ ผลคือ ทำให้เกิด e^-/h^+ ซึ่งจะวิ่งกระจายอยู่ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ ปฏิกิริยาที่เกิดบนผิวคอนดักชันแบนด์และปฏิกิริยาที่เกิดในสารละลายเกิดขึ้นดังนี้ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนจากคอนดักชันแบนด์ไปยังตัวรับอิเล็กตรอน (Electron acceptor) ในสารละลายจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ส่วนอีกด้านหนึ่ง คือแถบวาเลนซ์แบนด์ซึ่งมี h^+ จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) โดยตัวสารละลายทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน (Electron donor) ในสภาวะปกติความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของอิเล็กตรอนที่คอนดักชันแบนด์ไม่มีศักยภาพพอที่จะบำบัดสารอินทรีย์ได้ แต่เนื่องจากในระบบบำบัดมีออกซิเจนละลายน้ำอยู่ (O_2) ออกซิเจนนี้จะเป็นตัวรับ e^- เกิดปฏิกิริยารีดักชันได้เป็น Superoxide radical ($O_2^{\cdot-}$) ซึ่งเป็นตัวออกซิเดนต์ที่แรงมาก สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ต่าง ๆ ได้ แต่ในทางตรงข้าม h^+ ที่แถบวาเลนซ์แบนด์เป็นตัวออกซิเดนต์ที่แรงมากเช่นกัน [14]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 2.4 การเปรียบเทียบค่าช่องว่างของพลังงานของตัวกลางชนิดต่างๆ [14] โดยขึ้นด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.7 ปัจจัยที่ส่งผลต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก

1. ตัวเร่งปฏิกิริยา จะต้องมีความสมบัติเป็นโลหะตัวนำ หรือสารกึ่งตัวนำที่สามารถตอบสนองต่อแหล่งกำเนิดแสง เพื่อก่อให้เกิดปฏิกิริยาในการบำบัดมลพิษชนิดนั้น ๆ ได้ โดยจะต้องมีพื้นที่มากเพียงพอ เนื่องจากต้องทำหน้าที่เป็นสารดูดซับพลังงานโฟตอนพื้นผิวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเป็นหนึ่งในขั้นตอนสำคัญก่อนการเกิดปฏิกิริยาในการบำบัดมลพิษในขั้นต่อไป ดังนั้นในการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้มีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

2. ความเข้มแสง จำเป็นต้องมีพลังงานโฟตอนที่มีเพียงพอที่กระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งการเพิ่มปริมาณความเข้มแสงจะเป็นการเพิ่มจำนวนโฟตอนให้มากขึ้น ซึ่งจะให้อัตราการเกิดปฏิกิริยามีโอกาสเพิ่มมากขึ้นด้วย

3. ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารพิษ หากมีค่าเพิ่มมากขึ้นโดยส่วนใหญ่จะส่งผลให้ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกมักจะลดลง เนื่องจากในขณะที่เกิดปฏิกิริยาเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้นจะก่อให้เกิดสารอินดิเคเตอร์มีเดียตเพิ่มขึ้น ซึ่งจะไปยับยั้งปฏิกิริยาการย่อยสลายสารมลพิษทำให้เกิดอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้น้อยลงนอกจากนั้นพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถดูดซับได้ก็เป็นข้อจำกัดที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งที่ทำให้เกิดการย่อยสลายได้น้อยลงด้วย

4. ถังปฏิกิริยา เป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างมากในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ซึ่งการเลือกใช้ชนิดของวัสดุที่เหมาะสม จำเป็นต้องคำนึงถึงความสามารถในการทำงานร่วมกับแสงยูวีและมลพิษที่ใช้ในการบำบัด เพื่อป้องกันการเกิดสารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาซึ่งวัสดุที่แนะนำให้นำมาใช้ เป็นต้น

5. อุณหภูมิ เนื่องจากแหล่งกำเนิดแสงก่อให้เกิดความร้อนภายในระบบเพิ่มมากขึ้นมาก ซึ่งจะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาในการบำบัดมลพิษได้น้อย เนื่องจากโดยทั่วไปในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกไม่ต้องการให้เดินระบบที่อุณหภูมิสูงหรือต่ำจนเกินไป ซึ่งค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมโดยทั่วไปจะอยู่ระหว่าง 20-80 องศาเซลเซียส

6. ออกซิเจนและตัวรับอิเล็กตรอนตัวอื่น ๆ ซึ่งจะมีหน้าที่จับตัวกับอิเล็กตรอน เพื่อป้องกันการกลับมารวมตัวกันอีกครั้งของอิเล็กตรอนกับ h^+ หรือปฏิกิริยารีดอกซ์อื่น ๆ ให้เป็นไปได้ยากขึ้น ออกซิเจนจะรวมตัวอิเล็กตรอนจนเกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่รุนแรงอีกตัวหนึ่ง ซึ่งจะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพื่อการย่อยสลายมลพิษได้มากขึ้นด้วย

2.1.8 พลังงานแสง

รังสีหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแต่ละชนิดมีความยาวคลื่น หรือความถี่คลื่นแตกต่างกัน รังสีที่ประสาทตาสามารถรับรู้ได้ซึ่งเรียกว่า แสง นั้นมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 4×10^{-7} ถึง 7×10^{-7} เมตร ส่วนรังสีที่มีความยาวคลื่นยาวกว่า หรือสั้นกว่าแสง ประสาทตาจะไม่สามารถรับรู้ได้ เรียกว่า รังสีที่มองไม่เห็น เมื่อจัดเรียงลำดับตามความยาวคลื่น และความถี่ของคลื่นเหล่านี้จะได้สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Spectrum) โดยรังสีที่มีความถี่สูงจะมีพลังงานสูงกว่ารังสีที่มีความถี่ต่ำ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ ในสเปกตรัม แม้มีแหล่งกำเนิดและการตรวจจับได้ที่แตกต่างกัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กัน แต่ก็มีสมบัติที่สำคัญเหมือนกันคือ เคลื่อนที่ไปได้ด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วแสง (299×10^6 เมตรต่อวินาที) และมีพลังงานส่งผ่านไปในรูปของคลื่น โดยพลังงานแสงที่เลือกนำมาใช้ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ต และช่วงวิชิเบิล

รังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 100-400 นาโนเมตร มีคุณสมบัติไม่แตกตัว (Non-Ionizing) รังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นเส้นแบ่งของรังสีชนิดแตกตัวได้และแตกตัวไม่ได้สามารถแบ่งได้เป็นยูวีเอ (UV-A) หรือรังสีอัลตราไวโอเล็ตคลื่นยาว (Long wave UVR หรือ Near UVR หรือ Black Light) ยูวีบี (UV-B) หรือรังสีอัลตราไวโอเล็ตคลื่นกลาง (Middle UVR หรือ Sunburn Radiation) และยูวีซี (UV-C) หรือรังสีอัลตราไวโอเล็ตคลื่นสั้น (Short wave UVR หรือ Germicidal Radiation) ความยาวคลื่นของรังสีในช่วงต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความยาวคลื่นในช่วงต่าง ๆ

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

2.2 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide: TiO_2)

2.2.1 ข้อมูลเบื้องต้นของไทเทเนียม

ไทเทเนียมเป็นโลหะในกลุ่มทรานซิชันจัดเป็นธาตุที่มีอยู่มากในโลก และอยู่ในรูปสารประกอบของแร่ จึงต้องสกัดออกมาเพื่อให้ได้ไทเทเนียมบริสุทธิ์ ไทเทเนียมบริสุทธิ์ ไทเทเนียมบริสุทธิ์มีเลขอะตอม 22 มีการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอน (Electron configuration) คือ $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^2 4s^2$ และมีน้ำหนักอะตอม 47.867 รัศมีอะตอมไทเทเนียมเท่ากับ 147 พิโคเมตร (pm) มีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดคือ 1667 องศาเซลเซียส และ 3285 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ในขณะที่ความหนาแน่นที่อุณหภูมิห้องคือ 4.50 กรัมต่อเซนติเมตร (gcm^{-1}) และมีสภาพต้านทานไฟฟ้า (Electrical resistivity) ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส คือ 42.0 ไมโครโอห์มเซนติเมตร ($\mu\Omega\text{-cm}$) ไทเทเนียมทำปฏิกิริยาได้ดีกับพวกสารที่ไม่ใช่โลหะ (Non-metal) โดยเฉพาะอย่างยิ่งออกซิเจนไฮโดรเจนและไนโตรเจนที่อุณหภูมิสูงซึ่งสถานะออกซิเดชัน (Oxidation state) ทางเคมีที่มักจะเกิดขึ้นมากที่สุดคือ 4^+ ซึ่งสารประกอบที่จะมีโอกาสเกิดขึ้นจะอยู่ในรูปไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ ($TiCl_4$) เป็นส่วนใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) หรือ ไทเทเนียม เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียม ซึ่งได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมี (Chemical stability) ไม่มีความเป็นพิษ (Non-toxic nature) และราคาไม่แพง จึงสามารถนำมาประยุกต์สำหรับการใช้งานในด้านต่าง ๆ ดังนี้ การเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานรูปอื่น เช่น การเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) และการเปลี่ยนเป็นพลังงานเคมีในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalysis) นอกจากนี้ไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่าดัชนีการหักเหของแสงสูงจึงถูกนำมาใช้เป็นสารเคลือบป้องกันการสะท้อนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดซิลิกอน (Silicon solar cell) และในอุปกรณ์ทางการมองเห็นชนิดแผ่นบาง (Thin film optical device) ไทเทเนียมไดออกไซด์ยังถูกนำมาใช้เป็นตัวจับก๊าซ (Gas sensor) เนื่องจากมีค่าการนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปตามองค์ประกอบของก๊าซที่สภาวะบรรยากาศ เช่น สามารถใช้ตรวจสอบก๊าซออกซิเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทน นอกจากนี้ไทเทเนียมถูกนำมาใช้เป็นวัสดุชีวภาพ (Biomaterial) เพราะมีคุณสมบัติที่สามารถเข้ากับร่างกายของมนุษย์ได้ เช่น กระดูกเทียม ข้อเข่าเทียม รากฟันเทียม [15]

2.2.2 ผลึกและโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์

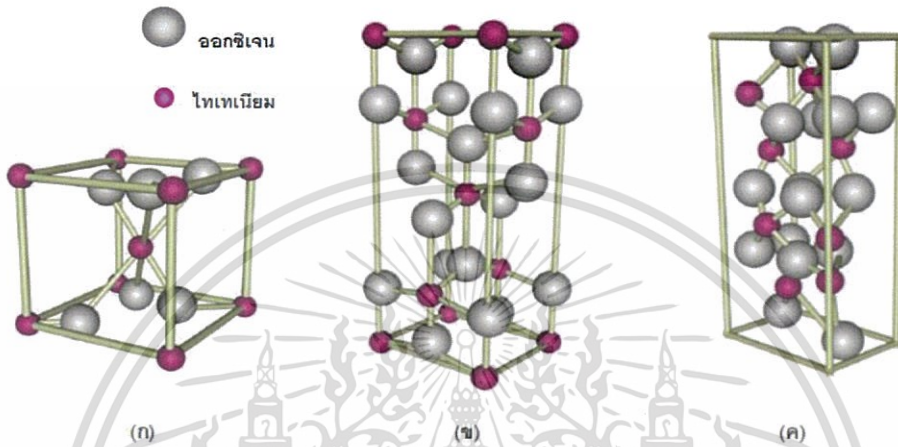
ไทเทเนียมไดออกไซด์มีเฟส (Phase) ที่สำคัญ 3 เฟส คือ บรูคไคท์ (Brookite) อนาเทส (Anatase) และรูไทล์ (Rutile) ซึ่งเฟสบรูคไคท์นั้นมีโอกาสพบได้น้อยมาก โดยแต่ละเฟสจะถูกนำไปใช้งานในด้านที่แตกต่างกัน เนื่องจากแต่ละเฟสจะมีการจัดเรียงตัวของออกตะฮีดรา (TiO_6^{2-}) แตกต่างกัน จึงมีผลให้แต่ละเฟสมีสมบัติบางประการที่แตกต่างกันดังตารางที่ 2.2 และโดยทั่วไปแล้วไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์นั้นจะไม่สามารถเกิดขึ้นได้ในธรรมชาติ

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ [15]

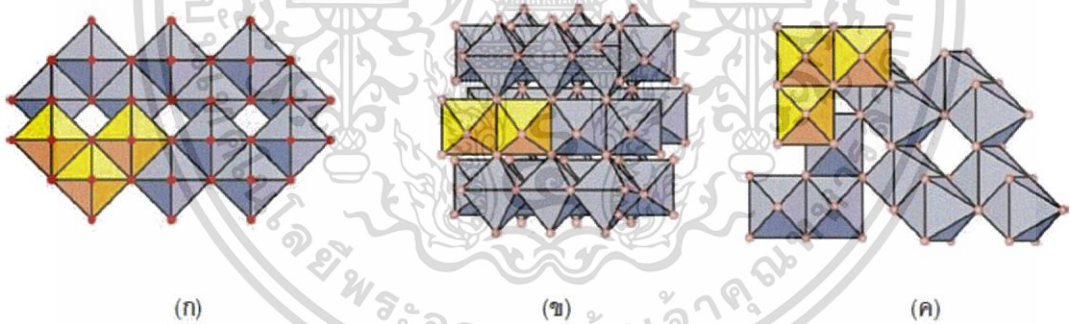
Crystal Structure	Density (kg/m^3)	System	Cell parameter (nm)		
			A	b	c
Rutile	4240	Tetragonal	0.4584		0.2953
Anatase	3830	Tetragonal	0.3758		0.9514
Brookite	4170	Orthorhombic	0.9166	0.5436	0.5135
Atomic radius (nm)	O	0.066 (Covalent)	Ionic radius (nm)	O^{2-}	0.14
	Ti	0.146 (Metallic)		Ti^{4+}	0.064

ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อยู่ในเฟสอนาเทสและรูไทล์จะมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเตตระโกนอล (Tetragonal) ซึ่งประกอบไปด้วยแต่ละหน่วยของออกตะฮีดรา (TiO_6) มาเชื่อมต่อกันแต่ละออกตะฮีดรานั้นจะประกอบด้วย Ti^{4+} อยู่ตรงกลางและถูกล้อมรอบด้วย O^{2-} แต่ละการเชื่อมต่อกันของออกตะฮีดราในทั้งสองเฟสนั้นจะแตกต่างกันออกไป ในกรณีของเฟสรูไทล์นั้นจะเกี่ยวข้องกับการไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้ขอบและมุมของออกตะฮีดร่าในการเชื่อมต่อโดยด้านที่อยู่ตรงข้ามกันของออกตะฮีดร่าจะถูกเชื่อมต่อกันทำให้เป็นเกิดเป็นเส้นตรง (Linear chain) และแต่ละเส้นนั้นจะถูกเชื่อมต่อกันโดยใช้ ออกซิเจนที่อยู่ตรงมุมร่วมกัน ส่วนในกรณีของเฟสอนาเทส นั้น การเชื่อมต่อกันของออกตะฮีดร่าจะ เกี่ยวข้องกับการใช้ขอบร่วมกันเท่านั้น ส่วนบรมคโคท์การเชื่อมต่อกันของออกตะฮีดร่าของขอบและมุม อยู่ในรูปแบบของโครงสร้างออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) ซึ่งแต่ละเฟสนั้นแสดงดังรูปที่ 2.5 และ 2.6



รูปที่ 2.5 ยูนิตเซลล์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ (ก) รูไทล์ (ข) อนาเทส (ค) บรูคโคท์ [15]



รูปที่ 2.6 โครงสร้างผลึกของ (ก) อนาเทส (ข) รูไทล์ (ค) บรูคโคท์ [15]

2.2.3 ปฏิกริยาการเร่งด้วยแสงโดยไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide photocatalysis)

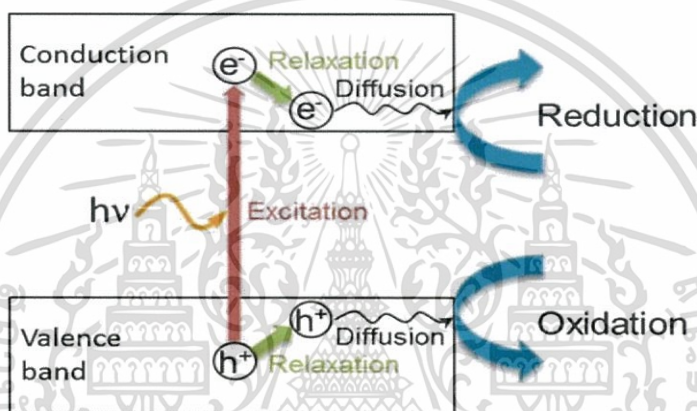
กลไกการเกิดปฏิกริยาการเร่งด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมไดออกไซด์นั้น จะมีแถบช่องว่างพลังงานที่แตกต่างกันในแต่ละเฟส โดย บรูคโคท์ (Band gap ประมาณ 3.14 อิเล็กตรอนโวลต์) อนาเทส (Band gap ประมาณ 3.20 อิเล็กตรอนโวลต์) และรูไทล์ (Band gap ประมาณ 3.00 อิเล็กตรอนโวลต์) [15] ซึ่งมากกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น ๆ เช่น เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ทังสเดนออกไซด์ (WO_3) โดยความสามารถของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่นำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกริยาแบบใช้แสงนั้นเป็นผลมาจากปัจจัยหลายประการ เช่น โครงสร้างและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดของผลึก ความหนาแน่นของหมู่ไฮดรอกซิลที่พื้นผิว พื้นผิวจำเพาะ ความพรุน และสมบัติอื่น ๆ ปัจจัยเหล่านี้จะมีผลต่อการผลิตคู่อิเล็กตรอน-โฮล การดูดซับบนพื้นผิว และกระบวนการรีดอกซ์

โดยทั่วไปแล้วหลักการและกลไกการย่อยสลายสารที่เป็นมลพิษชนิดต่าง ๆ ในน้ำมีปัจจัยที่สำคัญที่จะทำให้กระบวนการย่อยสลายเกิดขึ้นได้ดีนั้น ได้แก่ ความยาวคลื่นแสงที่มากกว่าหรือเท่ากับ แถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยา ออกซิเจน น้ำ และตัวเร่งปฏิกิริยา โดยหลักการของการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของสารกึ่งตัวนำ คือ ถ้ามีแถบช่องว่างพลังงานที่เหมาะสมกับช่วงความยาวคลื่นที่ให้เข้าไปจะสามารถเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ได้ดี การเร่งปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ ซึ่งพลังงานนี้เราเรียกว่า พลังงานกระตุ้น เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาถูกกระตุ้นด้วยแสงอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ให้เคลื่อนที่ไปยัง แถบการนำไฟฟ้าทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮล ซึ่งจะวิ่งกระจายอยู่ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ ดังรูปที่ 2.7

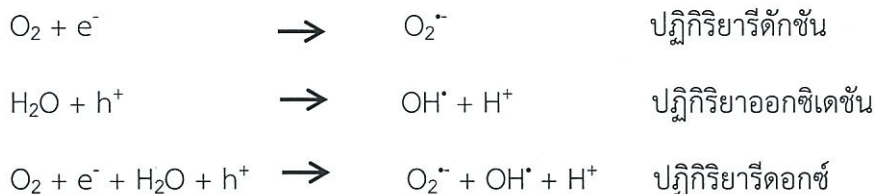


รูปที่ 2.7 กลไกของการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ [15]

ปฏิกิริยาที่แถบวาเลนซ์ (Valence band) ซึ่งมีโฮลอยู่นั้น อธิบายได้ว่าอิเล็กตรอนจากสารละลายหรือเรียกว่า ตัวให้อิเล็กตรอน (Electron donor) จะเคลื่อนไปยังโฮลในแถบวาเลนซ์ จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) โดยที่โฮลจะทำปฏิกิริยากับน้ำ (H_2O) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl radical; OH^\bullet) ซึ่งเป็นตัวออกซิแดนท์ (Oxidant) ที่แรงในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ได้ อีกทางด้านหนึ่งปฏิกิริยาที่แถบการนำไฟฟ้า (Conduction band) คือ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากแถบการนำไฟฟ้าไปยังตัวรับอิเล็กตรอน (Electron acceptor) ในปฏิกิริยารีดักชัน ออกซิเจน (O_2) ที่ถูกดูดซับจะเป็นตัวรับอิเล็กตรอนซึ่งทำให้เกิดเป็นไอออนซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล (Superoxide radicals; $\text{O}_2^{\bullet-}$) และเมื่อซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลทำกับโฮลได้เป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล (HO_2^\bullet) ในน้ำ ถ้า HO_2^\bullet รวมกันผลที่ได้คือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และ ออกซิเจน (O_2) ซึ่งไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถรับอิเล็กตรอนจากแถบการนำ หรือจากซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล และกลายเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลได้ ดังนั้นไฮดรอกซิลเรดิคัลอาจถูกสร้างขึ้นโดยปฏิกิริยารีดักชัน ซึ่งสามารถย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ในน้ำได้ [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสามารถเขียนสมการการเกิดปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงเป็นดังนี้



2.2.4 ประโยชน์ของไททาเนียมไดออกไซด์

ปัจจุบันไททาเนียมไดออกไซด์ที่นิยมนำมาใช้ประโยชน์มาก มักใช้ในรูปของผลึกแบบรูไทล์ (Rutile) ที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมในด้านต่าง ๆ ซึ่งพบมากในธรรมชาติ ส่วนชนิดอนาเทส (Anatase) นิยมใช้ในกระบวนการใช้แสงชั้นสูง การนำมาใช้ประโยชน์เกี่ยวข้องกับด้านต่าง ๆ ได้แก่

1. ใช้สำหรับสารให้สี

อุตสาหกรรมสีที่เกี่ยวข้อง มักใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นส่วนผสมของสีทาบ้าน ด้วยคุณสมบัติให้สารสีขาว สามารถดูดกลืน และหักเหช่วงแสงที่ตามนุษย์มองเห็นได้สูง ขนาดอนุภาคเล็ก มีความยืดหยุ่นสูงทำให้ปกปิดรอยร้าว รอยตำหนิได้ดี และทนต่อสภาพความเป็นกรด-ด่าง ทนต่อแสงและความร้อน รวมถึงใช้เป็นส่วนผสมของสีสำหรับงานพิมพ์ งานศิลปะ เนื่องจากมีคุณสมบัติให้สีขาวสว่าง

2. ใช้เป็นสารเคลือบผลิตภัณฑ์

มักใช้เป็นสารเคลือบในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อาทิ อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมแก้ว กระจก อุตสาหกรรมผลิตกระเบื้อง การผลิตสุญญากาศ การผลิตเซรามิก อุตสาหกรรมโลหะสำหรับการเคลือบผิวโลหะ อุตสาหกรรมกระดาษสำหรับการเคลือบกระดาษเพื่อลดการทะลุผ่านของแสง ด้วยคุณสมบัติที่สามารถยึดเกาะ และเคลือบติดผิวได้ง่าย มีความทนทานต่อการกัดกร่อน รวมถึงคุณสมบัติที่กล่าวในข้างต้น นอกจากนี้ การใช้ไททาเนียมไดออกไซด์สำหรับเคลือบผิวผลิตภัณฑ์สามารถช่วยลดต้นทุนการผลิต และลดน้ำหนักรวมของผลิตภัณฑ์ได้อีกทาง

3. เป็นสารกึ่งตัวนำผลิตกระแสไฟฟ้า

การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์นิยมใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นส่วนประกอบ ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า

4. ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องกับวงจรไฟฟ้ามักใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้า ด้วยคุณสมบัติมีค่าคงที่ทางไฟฟ้า และค่าความต้านทานไฟฟ้าสูง

5. ใช้เป็นส่วนผสมในเครื่องสำอาง

เครื่องสำอางบางยี่ห้อมีการใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นส่วนผสมสำหรับทำหน้าที่ให้ผิกละเอียดสีขาว มีคุณสมบัติทึบแสง สามารถสะท้อน และหักเหแสงได้สูง และสะท้อนรังสียูวีได้ดี ไม่เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อันตรายต่อผิว ผลิตภัณฑ์ที่พบใช้เป็นส่วนผสมมาก ได้แก่ ครีมบำรุงผิว ครีมกันแดด แป้งรองพื้น และ ทาท์บ์ เป็นต้น

6. ใช้ในด้านการบำบัดมลพิษ

6.1 ใช้เป็นสารดูดซับ โดยใช้งานในด้านการบำบัดมลพิษทางอากาศ และมลพิษทางน้ำ ทำหน้าที่เป็นสารตัวดูดซับมลพิษ

6.2 ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสังเคราะห์แสง ไททาเนียมไดออกไซด์เมื่อได้รับแสง และความร้อน จะแตกตัวให้สาร และรังสีที่มีคุณสมบัติหลายประการที่สามารถกำจัดของเสียหรือมลพิษในน้ำ และอากาศ รวมถึงการกำจัด และต้านเชื้อจุลินทรีย์

2.2.5 ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาเร่งด้วยแสง

ข้อมูลการใช้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ นั้น มีการศึกษากันอย่างต่อเนื่องแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ประสิทธิภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในการย่อยสลายสารมลพิษอินทรีย์ [16]

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ประเภทสารอินทรีย์
Anatase TiO_2	Methyl orange
TiO_2 , ZnO	Organic sulfide compounds
TiO_2	Oxalic acid, maleic acid, 1,2,3-THB
TiO_2	Rhodamine B
TiO_2	Methyl orange
TiO_2 (fibre)	Phenol, formic acid
TiO_2/Si on black sand	Cationic and anionic dyes
TiO_2 , CuO/ TiO_2	Nitrogen oxide
TiO_2 -coated pellets	Phenol
TiO_2 /CNT	Acridine dye
TiO_2 /NT	Methylene

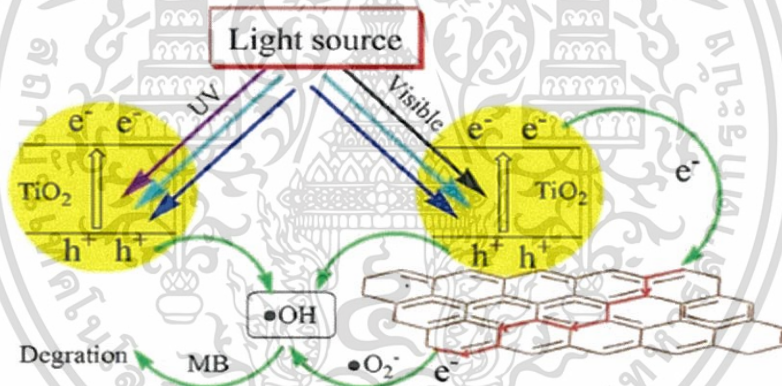
2.2.6 ไทเทเนียมไดออกไซด์ผสม (Titanium dioxide composite)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ประกอบไปด้วย 3 เฟส (Phase) คือ รูไทล์ อนาเทส และบรูคไคท์ ซึ่งเฟสที่เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกได้ดีที่สุด คือ เฟสอานาเทส (Band gap 3.2 eV) แต่ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกยังไม่สูงที่สุด จึงมีการปรับปรุงทำให้เป็นเฟสผสมระหว่างเฟสอานาเทสและเฟสรูไทล์ที่สวมนิวส์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นานมานี้เห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทสและรูโกล์เข้าด้วยกันทำให้อิเล็กตรอนสามารถส่งผ่านไปมาระหว่างกันได้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก ต่อมามีการพัฒนาโดยการผสมโลหะต่าง ๆ หรือสารออกแกรนิค เช่น เหล็ก ซิลเวอร์ และกราฟีน เป็นต้น ลงในไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนจากไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้ลดการตกกลับของอิเล็กตรอนได้ดียิ่งขึ้น

2.2.7 ไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิต

ไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ($\text{TiO}_2\text{-rGO}$) นาโนคอมโพสิตเป็นวัสดุผสมที่มีประสิทธิภาพสูงในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก เนื่องจากเมื่อไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับแสงที่มีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับแถบพลังงานทำให้อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นไปยังแถบชั้นตัวนำจากนั้นจะถูกส่งผ่าน (Charge transfer) ไปยังพันธะคู่ของแผ่นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ซึ่งช่วยลดการเกิดการตกกลับของอิเล็กตรอน นอกจากนี้ยังสามารถช่วยดูดซับสีย้อมและเพิ่มบริเวณเร่ง (Active site) เนื่องจากรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์เป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวสูงจึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการในการกำจัดสีย้อมได้ดียิ่งขึ้น ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิต [17]

2.3 กราไฟต์ (Graphite)

เป็นอีกรูปหนึ่งของธาตุคาร์บอน ชื่อสามัญเรียกว่า พลัมเบโก (Plumbago) หรือแร่ดินสอดำ มีลักษณะเป็นของแข็ง ดังรูปที่ 2.9 มีรูปผลึกเป็นแผ่นบาง ๆ ทึบแสง อ่อนนุ่ม สีเทาเข้มถึงดำ เนื้ออ่อน เป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าได้ดี มักใช้ทำไส้ดินสอดำ เบ้าหลอมโลหะ น้ำมันหล่อลื่นบางชนิด ไส้ถ่านไฟฉาย ไส้ฟoarก ใช้เป็นตัวลดความเร็ว ช่วยควบคุมจำนวนอนุภาคนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ นิวเคลียร์ถูกนำมาใช้เมื่อ 4 พันปีก่อนคริสตกาล ในงานทาสีตกแต่งเครื่องเซรามิกในทางตะวันออกเฉียงใต้ของยุโรป ได้มีการค้นพบแหล่งสะสมตัวของแร่กราฟไฟต์ขนาดใหญ่ที่รัฐคัมเบรีย ประเทศอังกฤษ แร่ที่พบมีลักษณะบริสุทธิ์ ไม่แข็ง แตกหักง่าย และมีรูปแบบการสะสมตัวอัดแน่นกันคุณสมบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางเคมี สูตรเคมี C ถ้าให้ความร้อนจัดเกินจุดเผาไหม้ ก็จะเผาไหม้เช่นกัน ไม่หลอมละลาย ไม่ละลายในกรด



รูปที่ 2.9 ลักษณะทางกายภาพของกราไฟต์ [18]

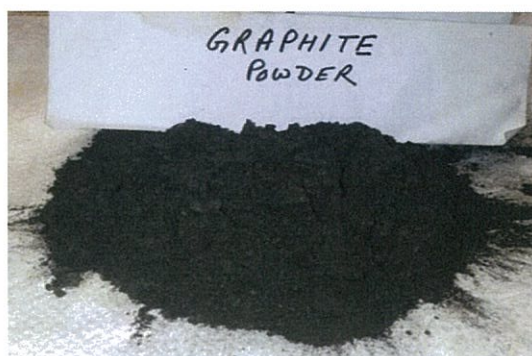
คุณสมบัติทางฟิสิกส์ กราไฟต์เกิดจากอะตอมเรียงกันเป็นชั้น ๆ แต่ละชั้นเกิดจากอะตอมคาร์บอนเรียงตัวกันเป็นรูป 6 เหลี่ยมคล้ายรังผึ้ง

การกำเนิด เกิดในหินแปรพวกหินอ่อน หินชีสต์ หินไนส์ ในสายแร่บางชนิดเป็นสายเปกมาไทท์ สายควอตซ์ และบางครั้งก็พบฝังประหรือกระจุกกระจายอยู่ในหินท้องที่ใกล้รอยสัมผัสกับหินอัคนี

2.3.1 ประเภทของกราไฟต์

แร่กราไฟต์ที่เกิดในแหล่งสะสม มี 3 ประเภท ได้แก่

1. แร่กราไฟต์ที่มีลักษณะเป็นแผ่นบาง สั้น ๆ หน้าแผ่นเป็นรูป 6 เหลี่ยม เมื่อแตกจะเป็นมุมที่ขอบหรือมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ
2. กราไฟต์ที่มีลักษณะอะสัณฐาน มีลักษณะเม็ดละเอียด เกิดในกระบวนการแปรสภาพของหินแปรของถ่านโดยความร้อนสูง เป็นขั้นสุดท้ายของการเกิดถ่านหิน บางครั้งเรียกว่าแอนทราไซท์ (Meta-anthracite)
3. กราไฟต์ที่มีลักษณะเป็นก้อน ๆ บางครั้งอาจเรียกว่า สายแร่กราไฟต์ เกิดขึ้นในช่องหรือรอยแตกของสายแร่เป็นเนื้อเดียวกัน มีลักษณะกลุ่มผลึกเส้นใยหรือรูเสี้ยนยาว มักเกิดในสายแร่ที่มีน้ำร้อน



รูปที่ 2.10 ผงกราไฟต์ [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

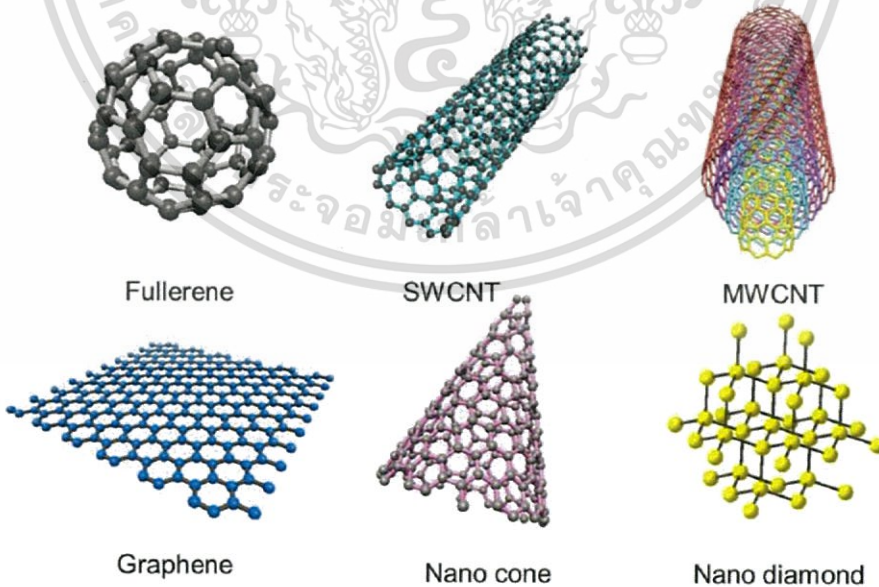
2.3.2 ลักษณะของแกราไฟต์

แกร์กราไฟต์ประกอบด้วยเรียงตัวเป็นชั้น ๆ คาร์บอนมีการจัดเรียงตัวแบบเฮลฟา หรือเป็นรูปผลึก 6 หน้า (Hexagonal) และจัดเรียงตัวแบบเบตาหรือรูปผลึกขนมเปียกปูน (Rhombohedral) โดยมีลักษณะทางกายภาพเหมือนกัน แผ่นแร่รูปผลึก 6 หน้า มีลักษณะบางและไม่แข็ง ผลึกแบบเฮลฟาสามารถเปลี่ยนกลับไปเป็นเบตาได้เมื่อแรงกดดัน และผลึกแบบเบตาสามารถเปลี่ยนกลับเป็นผลึกแบบเฮลฟาเมื่อได้รับความร้อนมากกว่า 1300 องศาเซลเซียส แผ่นแร่แต่ละแผ่นมีความหนาแน่นน้อย

แกร์กราไฟต์มีการนำไฟฟ้าเพราะการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนแต่ละระนาบ โดยอิเล็กตรอนวงนอกสุดสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ จึงสามารถนำไฟฟ้าได้ แต่อย่างไรก็ตามแกร์กราไฟต์นำไฟฟ้าได้ระนาบเดียวเท่านั้น

2.3.3 การใช้ประโยชน์จากแกร์กราไฟต์ในธรรมชาติ

แกร์กราไฟต์ในธรรมชาติมีการใช้ประโยชน์ในเรื่อง การผลิตเหล็กกล้า อุตสาหกรรมเครื่องเขียน การผลิตอุปกรณ์ที่ช่วยลดการสูญเสียความร้อน การผลิตอุปกรณ์เบรกรถยนต์ อุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่ และทำสารหล่อ (ไม่) ลื่น กราฟีน (Graphene) ซึ่งเป็นแกร์กราไฟต์ที่พบตามธรรมชาติมีลักษณะเด่นคือ มีความแข็งแรงมาก จึงใช้คุณสมบัตินี้แยกกราฟีนออกจากแกร์กราไฟต์ทั่วไปเพื่อนำไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม



รูปที่ 2.11 อัญรูปของคาร์บอน [20]

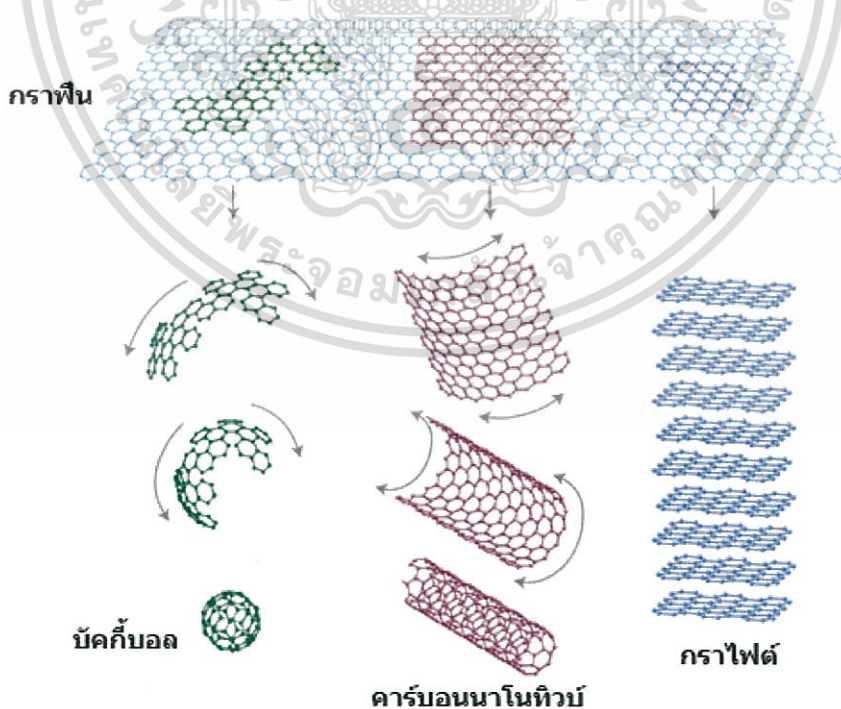
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4 การใช้ประโยชน์จากแร่กราไฟต์สังเคราะห์

แร่กราไฟต์สังเคราะห์ใช้ประโยชน์ใน การทำเป็นขั้วไฟฟ้า การทำเป็นผงเพื่อใช้ในงาน อุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่ และอุตสาหกรรมผลิตอุปกรณ์เบอร์กรถยนต์ โดยทำจากเชื้อเพลิงถ่านหินที่ เผาจนหมดควัน (Petroleum coke) เส้นใยกราไฟต์หรือเส้นใยคาร์บอนเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรง ทนทานสูง ใช้ในการผลิตอุปกรณ์ตกปลา อุปกรณ์กีฬา กอล์ฟ อุตสาหกรรมรถจักรยาน และแท่น กระโดดที่สระน้ำ นอกจากนี้กราไฟต์สังเคราะห์ใช้เป็นสารลดความเร็วของนิวตรอนในปฏิกิริยา นิวเคลียร์ โดยกราไฟต์เป็นตัวดูดกลืนนิวตรอนอิสระในแร่บางชนิด เช่น โบรอน และใช้ในการผลิต อุปกรณ์ดูดจับเรดาร์

2.4 กราฟีน

กราฟีน (Graphene) หรือ แกรฟีน เป็นรูปแบบหนึ่งของผลึกคาร์บอนเคียงข้างกับเพชร กราไฟท์ ท่อนาโนคาร์บอนและฟูลเลอร์ีน โดยที่อะตอมของคาร์บอนจะเรียงตัวในรูปแบบหกเหลี่ยม รังผึ้งทั่วไป กราฟีนสามารถอธิบายได้ว่า เป็นชั้นหนาเพียงอะตอมเดียวของแร่กราไฟต์ที่เป็นชั้น ๆ กราฟีนที่มีคุณภาพสูง มีความแข็งแรงมาก น้ำหนักเบา (กราฟีนขนาด 1 ตารางเมตรมีน้ำหนักเพียง 0.77 มิลลิกรัมเท่านั้น) เกือบโปร่งใส และเป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าที่ดี การที่กราฟีนมีปฏิสัมพันธ์ ที่ดีกับวัสดุอื่นๆ และโดยธรรมชาติเป็นแบบสองมิติ ทำให้กราฟีนมีคุณสมบัติเฉพาะที่ไม่เหมือนใคร [20]



รูปที่ 2.12 การม้วนของกราฟีน [20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

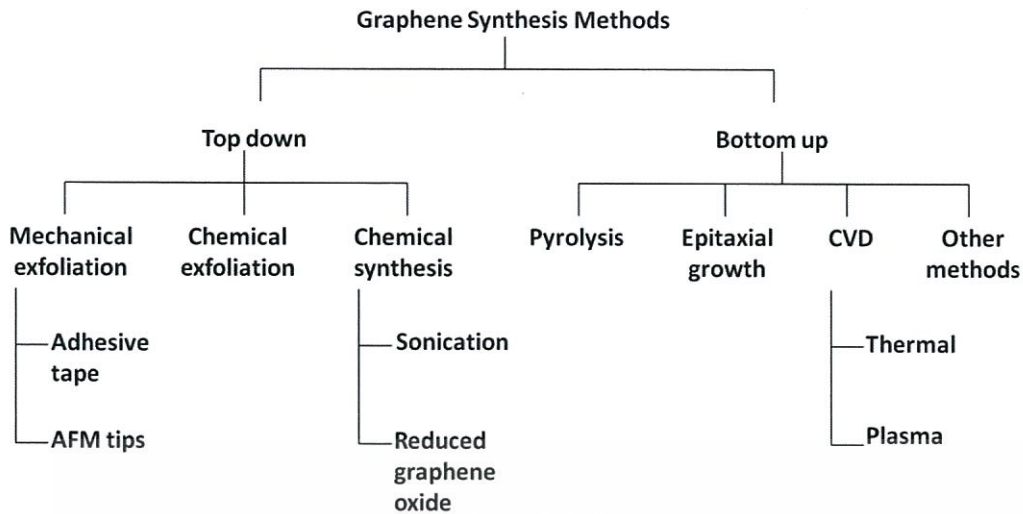
2.4.1 คุณสมบัติของกราฟีน (graphene) และการนำไปประยุกต์ใช้

1. เป็นวัสดุที่บางที่สุดเท่าที่มีการค้นพบ แม้ว่าในทางทฤษฎีจะไม่สามารถวัดความหนาของอะตอมได้แต่สามารถวัดระยะห่างระหว่างอะตอมได้ ทำให้สามารถประเมินคร่าว ๆ ได้ว่าแผ่นกราฟีนหนาประมาณ 0.335 นาโนเมตร
2. กราฟีนชั้นเดียวสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าโดยมีค่าการดูดซับแสงอยู่ที่ 2.3%
3. ความต้านทานไฟฟ้าต่ำมากสามารถเป็นตัวนำที่นำไฟฟ้าได้ดีเกือบเท่า Superconductor (มากกว่าทองแดงหลายล้านเท่า) แต่กราฟีนนำไฟฟ้าได้ดีมากที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งต่างจาก Superconductor ที่ต้องลดอุณหภูมิจนติดลบกว่าร้อยละสองถึงจะแสดงคุณสมบัติการนำไฟฟ้าแบบนั้นได้
4. ในทางควอนตัมวัสดุที่มีขนาดเล็กจะมีคุณสมบัติพิเศษ ต่างจากวัสดุชนิดเดียวกันที่มีขนาดใหญ่ สำหรับกราฟีนที่มีความหนาเพียงอะตอมเดียว ในด้านความหนาจึงแสดงคุณสมบัติในทางควอนตัมออกมาแต่ในทางกว้างและยาวมีคุณสมบัติตามวัสดุปรกติกราฟีนจึงเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเหมือนทั้งวัสดุนำไฟฟ้าและอนุภาคควอนตัมพร้อม ๆ กัน
5. กราฟีนมีค่าระดับความแข็งแรงสูงกว่าเหล็กถึง 5 เท่า (เทียบเท่าหรือมากกว่าเพชร) แต่แม้จะแข็งแต่แผ่นกราฟีนกลับสามารถบิดงอ ม้วน หรือพับ ได้อย่างง่ายดายโดยไม่ทำให้โมเลกุลเสียหาย
6. ความสามารถในการนำความร้อนจำเพาะ (Thermal conductivity) ซึ่งวัดค่าการนำความร้อนจำเพาะของกราฟีนได้สูงกว่าวัสดุประเภทอื่น ๆ และยังสามารถนำความร้อนได้ดีกว่าเพชรด้วยคุณสมบัตินี้จึงสามารถนำกราฟีนไปช่วยในระบบระบายความร้อนใน CPU
7. กราฟีนมีค่าความสามารถในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (Electronic mobility) สูงมาก จะทำให้สามารถสร้างทรานซิสเตอร์ที่ทำงานเร็วมาก ๆ ได้

2.5 การสังเคราะห์กราฟีน

กราฟีนสามารถสังเคราะห์ได้หลายวิธีซึ่งสรุปได้ดังรูปที่ 2.13 แบ่งตามกระบวนการสังเคราะห์วัสดุนาโน คือ กระบวนการสังเคราะห์แบบบนลงล่าง (Top-down) และแบบล่างสู่บน (Bottom-up) ในกระบวนการสังเคราะห์แบบบนลงล่างแบ่งเป็นการลอกแผ่นแกรไฟีนโดยตรง เช่น ใช้สก็อตเทปลอกแผ่นแกรไฟีนจากแกรไฟต์บริสุทธิ์ การใช้เข็ม AFM ลากแผ่นแกรไฟีนออกมา และการสังเคราะห์ทางเคมี เช่น การ Sonication หรือการสั่นด้วยเสียงความถี่สูง และการรีดิวซ์จากแกรไฟีนออกไซด์ ส่วนกระบวนการสังเคราะห์แบบล่างสู่บน ได้แก่ กระบวนการไพโรไลซิส การปลูกฟิล์มบางแกรไฟีนแบบผลึกเดี่ยว การปลูกฟิล์มบางแกรไฟีนด้วยไอระเหยทางเคมี เป็นต้น ซึ่งวิธีกระบวนการสังเคราะห์แบบล่างสู่บนจะเป็นวิธีที่ซับซ้อนยุ่งยาก ต้องใช้เครื่องมือขั้นสูง แต่ให้ปริมาณของแกรไฟีนจำนวนมาก ส่วนใหญ่จะทำในระดับอุตสาหกรรม ส่วนกระบวนการสังเคราะห์แบบบนลงล่างสามารถทำได้ง่ายกว่าสามารถทำในระดับห้องปฏิบัติการและงานวิจัยได้

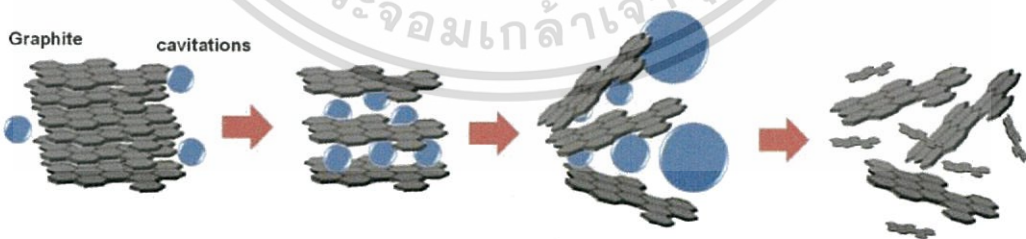
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 แผนภาพแสดงวิธีการสังเคราะห์กราฟีน [14]

2.5.1 การใช้สารเคมีในการรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (Chemical Reduction of Graphene Oxide)

การสังเคราะห์โดยวิธีการใช้สารเคมีในการรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นั้นเป็นวิธีการที่โดดเด่นเนื่องจากเป็นขั้นตอนที่สะดวก ประหยัด และทำให้ได้กราฟีนปริมาณมาก แต่วิธีนี้จะมีข้อเสียในการใช้สารเคมีอันตราย เช่น ไฮดราซีน (Hydrazine) ไฮโดรควิโนน (Hydroquinone) และโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (Sodium Borohydride) ซึ่งมีความเป็นพิษ และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นเพื่อความปลอดภัย จึงจำเป็นต้องหาสารที่ไม่เป็นพิษและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมาใช้ในการรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ จากการศึกษาพบว่าการใช้สารไม่เป็นพิษชนิดต่าง ๆ มาใช้ในการรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ เช่น วิตามินซี ฟลาโวนอยด์ หรือโพลีฟีนอล และน้ำตาล

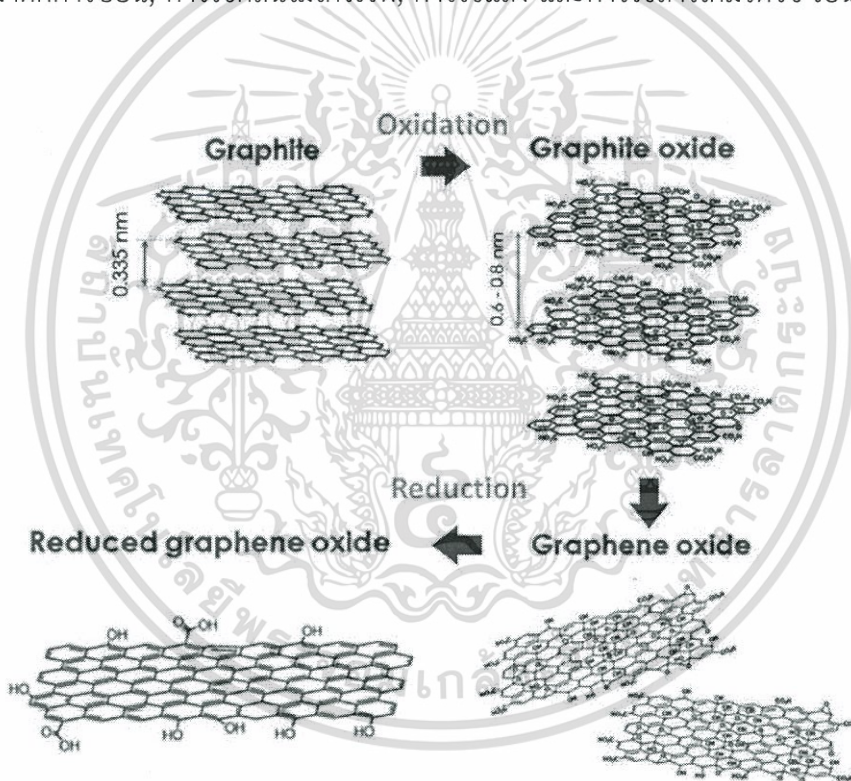


รูปที่ 2.14 แผนภาพแสดงวิธีการสังเคราะห์แกรฟีนด้วยวิธีโซนิเคชัน (Sonication) [14]

2.5.2 การสังเคราะห์แกรฟีนด้วยวิธีรีดักชันจากแกรฟีนออกไซด์

กราฟีนออกไซด์ (Graphene oxide) เป็นแกรฟีนที่มีการดัดแปลงทางเคมี (Chemically modified graphene) เตรียมจากกระบวนการปฏิกิริยาออกซิเดชันของกราฟไฟต์ และลอกเป็นชั้นเดี่ยวของกราฟีน ซึ่งสัดส่วนของปริมาณอะตอมของคาร์บอนต่อออกซิเจน (C/O) น้อยกว่า 3.0 และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้มาใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัดส่วนที่ดีที่สุดมีค่าใกล้เคียง 2.0 รูปที่ 2.15 แสดงโครงสร้างแผ่นคาร์บอนในกระบวนการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันของกราฟาไฟต์ด้วยการทำปฏิกิริยากับกรดแก่จากแบบจำลองของ Lorf – Klinowski แสดงหมู่ออกไซด์แทรกกระหว่างชั้นของกราฟาไฟต์หรือบนผิวของแผ่นกราฟาไฟต์ โดยเฉพาะกลุ่ม 1,2-epoxides และไฮดรอกซิล ส่วนบริเวณขอบจะมีกลุ่มคาร์บอกซิล และไฮดรอกซิลเกาะเป็นส่วนใหญ่ และอาจมี 5-และ 6-membered lactols ทำให้ d-spacing จาก 0.335 nm ขยายถึง 2-3 เท่า เรียกสารที่ได้ว่า กราไฟต์ออกไซด์ (Graphite oxide) จากนั้นสามารถแยกชั้นของกราฟาไฟต์ออกไซด์ในน้ำหรือในตัวทำละลายเป็นชั้นเดี่ยวเรียก กราฟีนออกไซด์ (Graphene oxide) เมื่อทำปฏิกิริยารีดักชันกับไฮดราซีนไฮเดรต (N_2H_4) จะได้รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (Reduced graphene oxide) ซึ่งหมู่ออกไซด์ส่วนใหญ่ที่อยู่บริเวณผิวของแผ่นกราฟีนหลุดออก อาจมีหลงเหลือตามขอบบ้าง อย่างไรก็ตาม การทำรีดักชันสามารถทำได้ด้วยการให้อุณหภูมิสูง เพื่อกำจัดออกซิเจนที่สร้างพันธะกับกลุ่มอะโรมาติกคาร์บอน, การใช้คลื่นไมโครเวฟ, การใช้แสง และการใช้สารเคมีรีดิวซ์ เป็นต้น

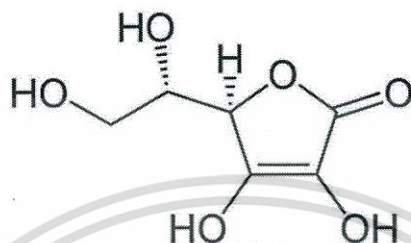


รูปที่ 2.15 แสดงโครงสร้างแผ่นคาร์บอนในกระบวนการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของกราฟาไฟต์มีหมู่ออกไซด์แทรกกระหว่างชั้นของกราฟาไฟต์เรียก กราไฟต์ออกไซด์ จากนั้นลอกชั้นของกราฟาไฟต์ออกไซด์ในน้ำหรือในตัวทำละลาย ชั้นเดี่ยวที่หลุดออกมาเรียก กราฟีนออกไซด์ เมื่อทำปฏิกิริยารีดักชันกับสารเคมี จะได้รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ [14]

2.6 วิตามินซีหรือกรดแอสคอร์บิก (Vitamin C/Ascorbic acid)

2.6.1 ข้อมูลพื้นฐานวิตามินซีหรือกรดแอสคอร์บิก

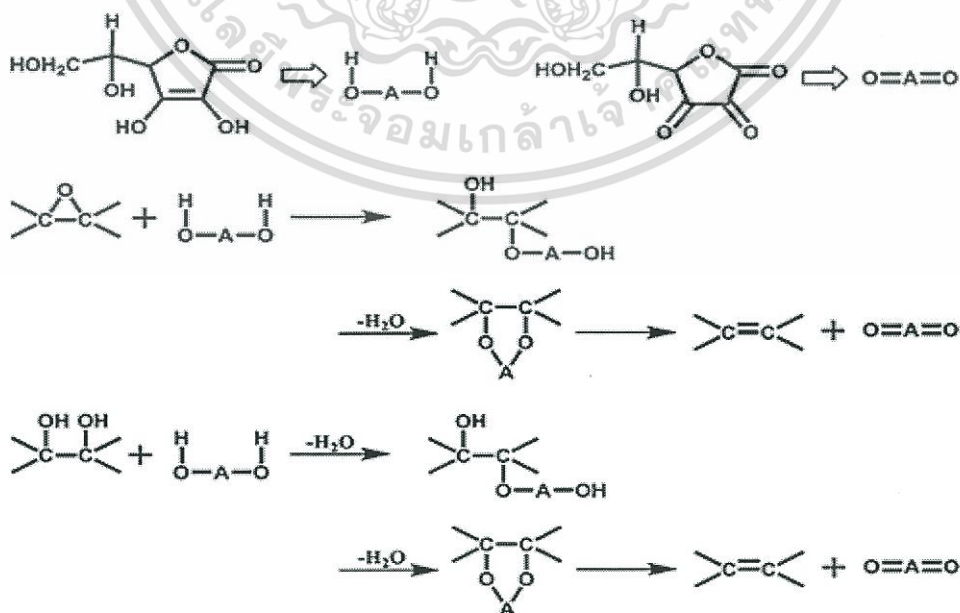
วิตามินซีหรือกรดแอสคอร์บิกเป็นตัวรีดิวซ์ ทำหน้าที่จ่ายอิเล็กตรอนให้ปฏิกิริยาต่าง ๆ รูปออกซิไดซ์หนึ่งและสองอิเล็กตรอนของวิตามินซี คือ กรดเซมิดีไฮโดรแอสคอร์บิกและกรดดีไฮโดร-แอสคอร์บิกตามลำดับ โดยโครงสร้างวิตามินซีเป็นดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 โครงสร้างเคมีของวิตามินซี [21]

2.6.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของวิตามินซีต่อกราฟีนออกไซด์

เมื่อวิตามินซีทำปฏิกิริยากับกราฟีนออกไซด์ ดังรูป 2.17 ในรูปแบบทั่วไปกราฟีนออกไซด์จะมีหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ เกิดพันธะอยู่บนโครงร่าง เช่น หมู่คาร์บอกซิลิก คาร์บอนิล อีพอกไซด์ และไฮดรอกซิล เป็นต้น โดยวิตามินซีจะเข้าไปทำปฏิกิริยาบริเวณอีพอกไซด์หรือไฮดรอกซิลซึ่งหลังจากเกิดปฏิกิริยาจะทำให้แผ่นกราฟีนออกไซด์ถูกกำจัดหมู่ฟังก์ชันออกไปและทำให้เกิดเป็นพันธะคู่ระหว่างคาร์บอน ส่งผลให้แผ่นกราฟีนออกไซด์มีการเกิดคอนจูเกตเพิ่มขึ้น ซึ่งหลังจากทำปฏิกิริยารีดักชันจะเรียกว่ารีดิวซ์กราฟีนออกไซด์



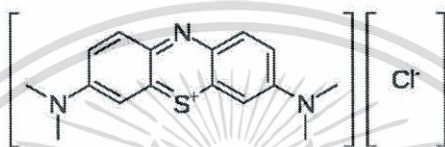
รูปที่ 2.17 กลไกการเกิดปฏิกิริยารีดักชันต่อกราฟีนออกไซด์ [22]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 เมทิลีนบลู (Methylene blue)

2.7.1 ข้อมูลทั่วไปของเมทิลีนบลู

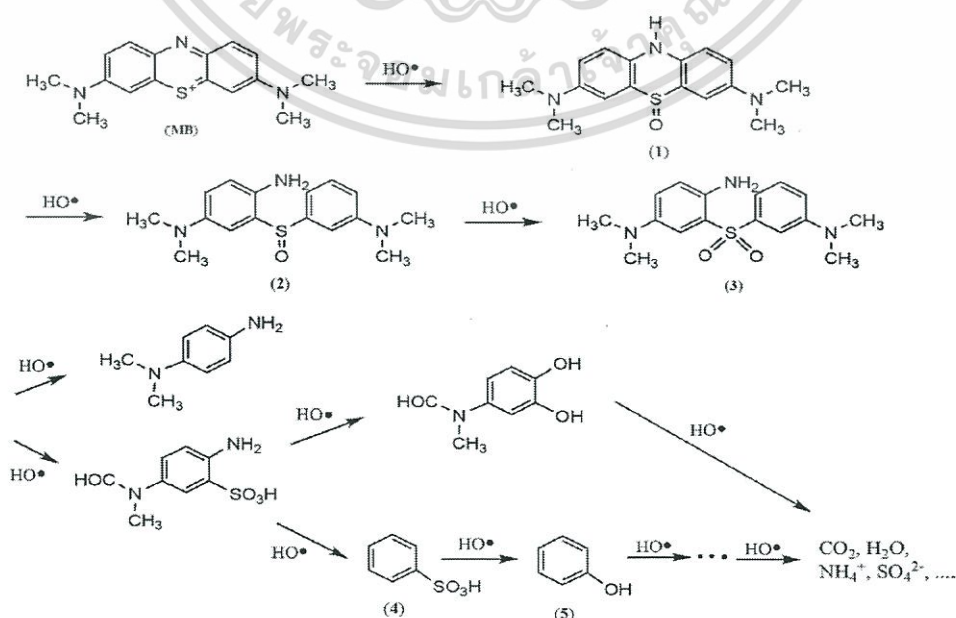
เมทิลีนบลู นิยมใช้เป็นสีย้อมในอุตสาหกรรม เป็นสารเคมีที่ไม่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา (Chemical Inert) มีความเป็นพิษ และเสถียร (Stable) ในสิ่งแวดล้อมเมทิลีนบลูนั้น ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Non-biodegradable) พบมากที่สุดในอุตสาหกรรมน้ำเสีย จึงเป็นเรื่องยากที่จะสามารถแยกเมทิลีนบลูออกจากน้ำเสียเพราะละลายน้ำได้ดี ทำให้เกิดผลเสียต่อระบบนิเวศและมนุษย์โดยตรง ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นหนึ่งในตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสามารถลดหมู่ฟังก์ชันในเมทิลีนบลูได้ ทำให้ความเข้มข้นลดลง โดยครึ่งชีวิต (Half-life) ของเมทิลีนบลู อยู่ที่ประมาณ 5-6.5 ชั่วโมง [14] ซึ่งโครงสร้างทางเคมีของเมทิลีนบลูเป็นดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 โครงสร้างเคมีของเมทิลีนบลู [23]

2.7.2 กลไกการสลายสีย้อมของเมทิลีนบลู

เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกจะเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH^\bullet) ซึ่งไฮดรอกซิลเรดิคัลเป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรงสามารถทำปฏิกิริยากับสีย้อมเมทิลีนบลู ดังรูปที่ 2.19 โดยกลไกการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูเกิดจากการที่โมเลกุลของสีย้อมเมทิลีนบลูดูดซับบนคะตะลิสต์ จากนั้นโครงสร้างของสีย้อมบางส่วนจะถูกทำลายโดยเกิดเป็นสารมัธยันตร์ (Intermediate) และสารมัธยันตร์จะวนกลับมาดูดซับบนคะตะลิสต์และถูกทำลายไปเป็นลำดับ โดยปฏิกิริยาจะเกิดในลักษณะซ้ำ ๆ จนสุดท้ายจะเกิดเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก เช่น แอมโมเนีย (NH_4) ซัลเฟต (SO_4^{2-}) น้ำ (H_2O) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 2.19 ภาพแสดงกลไกการสลายตัวของสีย้อมเมทิลีนบลู [24] ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Fatin และคณะ (2012) ได้ทำการศึกษาเรื่องปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของซิงค์ออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ (P25) เกรดการค้า โดยวัดประสิทธิภาพจากการสลายสีย้อมเมทีลีนบลูเข้มข้น 1.5 ppm ซึ่งเตรียมตัวอย่าง แล้วทำการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต (รังสียูวี) และแสงอาทิตย์ พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมภายใต้การฉายรังสียูวีได้ดีที่สุด ส่วนซิงค์ออกไซด์มีประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมภายใต้แสงอาทิตย์ได้ดีกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้ทราบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์มีการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกได้ดีกว่าซิงค์ออกไซด์ภายใต้แสงยูวี แต่พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์มีข้อจำกัดภายใต้แสงอาทิตย์ซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยรังสีซีบีบี [6]

Kim และคณะ (2012) ได้ทำการสังเคราะห์นาโนไฟเบอร์ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนคาร์บอนด้วยวิธีอิเล็กโตรสปินนิง ซึ่งทำการทดสอบประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกในการกำจัดสีย้อมเมทีลีนบลูภายใต้การฉายรังสีซีบีบี พบว่าการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพดีขึ้นเนื่องจากกราฟีนมีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนจากไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้ลดการเกิดการตกกลับของอิเล็กตรอนไปสู่โฮล [7]

Shi และคณะ (2012) ได้ทำการศึกษาวิจัยเรื่องการเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มอลจากเปอร์รอกไซด์ไทเทเนียม (Peroxytitanium) พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ มีประสิทธิภาพโฟโตคะตะไลติกที่ดีขึ้นเพราะรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ มาช่วยลดการตกกลับของอิเล็กตรอน (Recombination) ได้ทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น [8]

Dan และคณะ (2008) ได้ศึกษาการกระจายตัวของแผ่นกราฟีนในน้ำ หลักการในการสังเคราะห์กราฟีนด้วยวิธีทางเคมี เริ่มต้นด้วยการใช้กรดแก่หรือตัวออกซิแดนท์มาออกซิไดส์กราไฟต์ได้เป็น “กราไฟต์ออกไซด์” ซึ่งกลุ่มของออกไซด์, ไฮดรอกซิล, คาร์บอกซิลิกและคาร์บอนิลจะเข้าไปแทรกและเกาะเต็มระนาบพื้นผิวในแต่ละชั้นของกราไฟต์ ทำให้แต่ละชั้นของกราไฟต์กว้างขึ้นและลดแรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างชั้นหากกราไฟต์ออกไซด์ถูกระตุ้นด้วยแรงเพียงชนิดเดียวเช่นด้วยการใช้คลื่นความถี่สูง (Sonication) ก็สามารถหลุดลอกออกเป็น “กราฟีนออกไซด์” (Graphene oxide) ซึ่งมีสมบัติเป็น hydrophilic ละลายได้ดีในน้ำ แต่ไม่นำไฟฟ้า และสามารถรีดิวซ์ด้วยสารรีดักแตนท์ เช่น ไฮดราซีนไฮเดรต ได้เป็น “รีดิวซ์กราฟีน” (Reduced Graphene oxide) ซึ่งสามารถกรองและกระจายตัวได้ดีบนวัสดุสารรองรับใช้เป็นฟิล์มบางนำไฟฟ้า เช่น กระดาษนำไฟฟ้า (Conducting graphene paper) [9]

Hui และคณะ (2015) ได้ศึกษาการรีดักชันของกราฟีนออกไซด์ที่อุณหภูมิห้องด้วยวิตามินซีสำหรับเป็นโฟโตแอโนดในโซลาร์เซลล์ งานวิจัยนี้เลือกใช้วิตามินซีเพราะไม่มีพิษ ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม ไม่ต้องใช้อุณหภูมิสูงในการรีดิวซ์ มีข้อดีที่เด่นกว่ากระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) และการใช้ไฮดราซีน (Hydrazine) ซึ่งผลของการวิจัยพบว่ารีดิวซ์กราฟีนออกไซด์-ไทเทเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพโฟโตคะตะไลติกสูงขึ้นเช่นกัน [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี มีจุดมุ่งหมายให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Rong และคณะ (2015) ได้ทำการศึกษาวิจัยการเตรียมและปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของวัสดุไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ภายใต้การฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตและรังสีซีบีแอล โดยเตรียมจากการ Modified Hummer method และผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) พบว่าเมื่อมีการเติมกราฟีนออกไซด์ในอัตราส่วนต่าง ๆ ลงไปจะมีอัตราส่วนที่เหมาะสมที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพโฟโตคะตะไลติกสูงขึ้นทำให้สามารถกำจัดสีย้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ [11]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. ไทเทเนียมไดออกไซด์ เกรดการค้า (Titanium dioxide (TiO₂) Degussa P25, Rutile 20 : Anatase 80)
2. ผงกราไฟต์ (Graphite powder, Sigma-Aldrich, Germany)
3. วิตามินซีหรือกรดแอสคอบิก (Vitamin C/Ascorbic acid, C₆H₈O₆, Sigma-Aldrich, Germany)
4. เมทิลีนบลู (Methylene blue, C₁₆H₁₈ClN₃S, MW=319.85 g/mol, Fluka)
5. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide, H₂O₂, Sigma-Aldrich, America)
6. สารละลายกรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid, H₂SO₄, Merck, Germany)
7. โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium permanganate, KMnO₄, Merck, Germany)
8. โซเดียมไนเตรต (Sodium nitrate, NaNO₃)

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-visible Spectrophotometer) รุ่น Evolution 201, Thermo Scientific, USA
2. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) รุ่น X'Pert MPD, Phillips, the Netherlands
3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น JEOL-JSM5800LV, Japan
4. เครื่องวัดธาตุเชิงพลังงาน (Energy-dispersive X-ray Spectroscopy, EDX) รุ่น Oxford ISIS 300, England
5. เครื่องวัดวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR) รุ่น Nicolet iS50, Thermo Fisher Scientific Inc., USA
6. รามานสเปกโตรมิเตอร์ (Raman spectrometer) รุ่น DXR Smart Thermo Scientific, USA
7. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM) JM-2010, JEOL, Japan
8. เครื่องโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence, PL) -LS/55, Perkin-Elmer, USA
9. เครื่องวัดการดูดกลืนแสงของแข็ง (Diffused Reflectance UV-Vis Spectroscopy,

เอกสารนี้เป็นเอกสาร UV/DRS) UV-2401, Shimadzu, Japan เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. อุปกรณ์เครื่องแก้วต่าง ๆ
11. ตู้ปฏิบัติการไฟฟ้า ขนาด 0.4x0.6x0.8 เมตร
12. หลอดไฟยูวี (Black light) 18 วัตต์ 4 หลอด
13. หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ 18 วัตต์ 4 หลอด
14. เครื่องกรองแบบลดความดัน
15. กระดาษกรอง
16. เทอร์โมมิเตอร์
17. ตู้ดูดควัน
18. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
19. ไมโครปิเปต

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมกราฟีนออกไซด์

1.1 การเตรียมกราฟีนออกไซด์ด้วยวิธีการปรับปรุงวิธีของฮัมเมอร์ (Modified Hummer's method)

1.1.1 ชั่งสารเตรียมทำการทดลองดังนี้

ชั่งผงกราฟไฟต์	2	กรัม
โซเดียมไนเตรต (NaNO_3)	1	กรัม
โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4)	6	กรัม

- 1.1.2) เทผงกราฟไฟต์ และโซเดียมไนเตรตลงในปิกรเกอร์คนผสมให้เข้ากันจากนั้นเทลงในขวดก้นกลม แล้วนำขวดก้นกลมวางบนอ่างน้ำแข็ง
- 1.1.3) เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ($\text{Conc. H}_2\text{SO}_4$) 46 มิลลิลิตร พร้อมกับทำการปั่นกวนให้เข้ากัน ค่อย ๆ เติมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4) 6 กรัม พร้อมปั่นกวนจากนั้นปั่นกวนต่ออีก 15 นาที
- 1.1.4) ให้ความร้อนที่ 40 องศาเซลเซียส ในอ่างน้ำร้อน พร้อมปั่นกวน 30 นาที
- 1.1.5) ค่อย ๆ เติมน้ำกลั่น 80 มิลลิลิตร ภายใต้การหล่อเย็น ปั่นกวนต่อที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที ในอ่างน้ำร้อน เติมน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) 6 มิลลิลิตร ปั่นกวนต่ออีก 5 นาที เติม 5 มิลลิลิตรของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (10%v/v)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.1.6) ล้างตะกอนโดยเทของผสมลงในบีกเกอร์ขนาด 2000 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่นจนเกือบเต็มบีกเกอร์ รอให้ตกตะกอนจากนั้นเทน้ำออก ทำซ้ำ 2-3 รอบ
- 1.1.7) นำไปกรองแบบลดความดัน นำไปเข้าตู้อบที่ 80 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง
- 1.1.8) นำตะกอนที่อบแห้งแล้วมาบดจนละเอียด ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ผงกราไฟต์ออกไซด์ (Graphite oxide)

1.2 การเตรียมกราฟีนออกไซด์ด้วยวิธีการใช้คลื่นความถี่สูง (Ultrasonication)

ชั่งผงกราไฟต์ออกไซด์ 0.32 กรัม

เติมน้ำกลั่น 40 มิลลิลิตร แล้วนำไปผ่านกระบวนการโซนิเคชัน เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.2

นำสารแขวนลอยที่ได้ไปทำการหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) ที่ความเร็วรอบ 4000 rpm เป็นเวลา 5 นาที แล้วทำการเทสารด้านบนออกมา ก็จะได้สารแขวนลอยสีน้ำตาลเข้มของกราฟีนออกไซด์ ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 กระบวนการโชนิคेशन

รูปที่ 3.3 สารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์
(Graphene oxide, GO)

1.3 การหาความเข้มข้นของสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์

ชั่งแผ่นกระจกจากนั้นหยดสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ 1 มิลลิลิตร แผ่นกระจก

นำไปอบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

นำออกจากเตาอบ ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำแผ่นกระจกไปชั่ง จะได้ความเข้มข้นของสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ หน่วยเป็น มิลลิกรัม ต่อ มิลลิลิตร (mg/mL)

3.3.2 การเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิต

- 1.1) นำน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร มาเทลงในบีกเกอร์
- 1.2) ปรับพีเอชของน้ำกลั่นด้วยสารละลายวิตามินซีโดยค่อย ๆ หยดลงไป แล้ว ใช้กระดาษยูนิเวอร์ซัลอินดิเคเตอร์ตรวจเช็คให้ พีเอชประมาณ 4
- 1.3) ชั่งไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัม เทใส่ในขวดรูปชมพู่ เติมน้ำกลั่นที่ปรับพีเอชไว้แล้วปั่นจนให้เข้ากัน
- 1.4) เติมสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ตามสัดส่วนที่ศึกษาไว้ดังตารางที่ 3.1 ปั่นจนให้เข้ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนเติมสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์

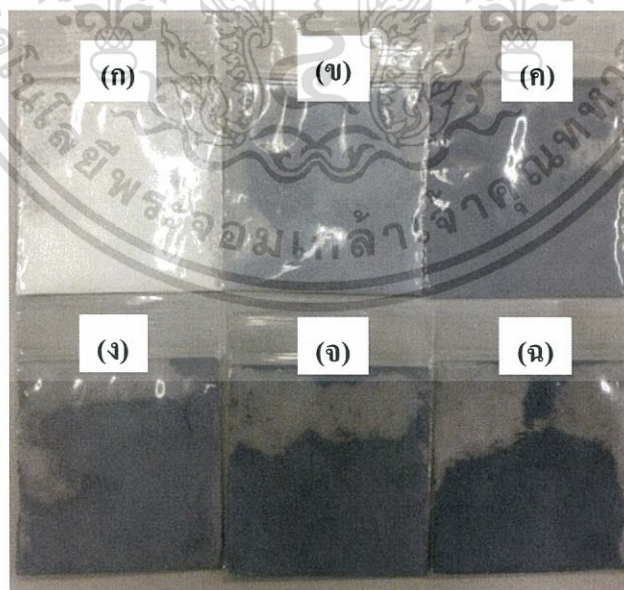
สารตัวอย่าง	ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ (กรัม)	ปริมาณกราฟีนออกไซด์ (wt%)
TiO ₂	2.00	-
TiO ₂ -rGO-0.10 wt%	2.00	0.10
TiO ₂ -rGO-0.30 wt%	2.00	0.30
TiO ₂ -rGO-0.50 wt%	2.00	0.50
TiO ₂ -rGO-0.75 wt%	2.00	0.75
TiO ₂ -rGO-1.00 wt%	2.00	1.00

1.5) นำไปให้ความร้อนในบีกเกอร์น้ำร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส พร้อมปั่น กวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

1.6) นำไปกรองแบบลดความดัน ล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นหลายๆครั้ง

1.7) นำตะกอนที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง

1.8) นำตะกอนที่ได้ไปบดให้ละเอียด ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ผงไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิต (ก) TiO₂ (ข) TiO₂-rGO-0.10 wt% (ค) TiO₂-rGO-0.30 wt% (ง) TiO₂-rGO-0.50wt% (จ) TiO₂-rGO-0.75 wt% (ฉ) TiO₂-rGO-1.00 wt%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การทดสอบประสิทธิภาพการดูดและการกำจัดสีย้อม

1. การทดสอบกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้การฉายแสงยูวี (UV)

- 1) เตรียมสารละลายเมทิลีนบลูเข้มข้น 2.5×10^{-5} M
- 2) ชั่งไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิต 0.0300 กรัม
- 3) เติมสารละลายเมทิลีนบลู 50 มิลลิลิตร
- 4) นำเข้าตู้ยูวีพร้อมปั่นกวนโดยไม่ฉายแสงยูวี 30 นาที แล้วเก็บตัวอย่าง 2 มิลลิลิตร
- 5) ให้แสงยูวีพร้อมปั่นกวนเป็นเวลา 75 นาที โดยทำการเก็บตัวอย่างของสารละลายเมทิลีนบลู 2 มิลลิลิตร ทุก ๆ 15 นาที
- 6) นำสารตัวอย่างที่ได้ไปทำการหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) เพื่อแยกตะกอนออก แล้วนำสารละลายไปทำการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค UV-Visible Spectroscopy
- 7) ทำการคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม

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

(1)

A_0 = ค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้น

A_t = ค่าการดูดกลืนแสงที่เวลาต่าง ๆ

2. การทดสอบกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้การฉายแสงวิซิเบิล (Visible light)

- 1) เตรียมเมทิลีนบลูเข้มข้น 1.25×10^{-5} M
- 2) ชั่งไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิต 0.0300 กรัม
- 3) เติมสารละลายเมทิลีนบลู 50 มิลลิลิตร
- 4) นำเข้าตู้วิซิเบิลพร้อมปั่นกวนโดยไม่ฉายแสง (ในที่มืด) 30 นาที เก็บตัวอย่าง 2 มิลลิลิตร
- 5) ทำการฉายแสงวิซิเบิลพร้อมปั่นกวนเป็นเวลา 150 นาที โดยทำ การเก็บตัวอย่างของสารละลายเมทิลีนบลู 2 มิลลิลิตรทุก 30 นาที
- 6) นำสารตัวอย่างที่ได้ไปทำการหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) เพื่อแยกตะกอนออก แล้วนำสารละลายไปทำการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค UV-Visible Spectroscopy
- 7) ทำการคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม จากสมการ (1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับในที่มีด

- 1) ซังไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิต 0.0300 กรัม เติมเมทิลินบลู เข้มข้น 2.5×10^{-5} M 50 มิลลิลิตร
- 2) ปั่นกวนในตู้ (ที่มีด) เป็นเวลา 30 นาที โดยทำการเก็บตัวอย่างของสารละลายเมทิลินบลู 2 มิลลิลิตร
- 3) ปั่นกวนต่อในที่มีดโดยไม่มีการฉายแสงเป็นเวลา 75 นาที โดยทำการเก็บตัวอย่างของสารละลายเมทิลินบลู 2 มิลลิลิตร ทุก ๆ 15 นาที
- 4) นำสารตัวอย่างที่ได้ไปทำการหมุนเหวี่ยง จากนั้นทำการตรวจวิเคราะห์ ด้วยเทคนิค UV-Vis Spectrophotometer
- 5) ทำการคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม จากสมการ (1)

3.4 การตรวจสอบและพิสูจน์เอกลักษณ์

3.4.1 X-Ray Diffraction (XRD)

เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบพิสูจน์เอกลักษณ์ที่อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบกับผลึกของสารตัวอย่างที่มุมต่างกัน โดยไม่ทำลายสารตัวอย่าง (Non-destructive method) ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบ และระบุองค์ประกอบต่าง ๆ ของสารตัวอย่าง

ในงานวิจัยนี้ ต้องการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกและองค์ประกอบของ ไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิต

3.4.2 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)

เป็นเครื่องมือที่อาศัยหลักการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด เพื่อหาหมู่ฟังก์ชันของสารเมื่อรังสีอินฟราเรดถูกดูดกลืนพลังงานนั้นจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานการหมุนและการสั่นของโมเลกุลของสาร แต่ละชนิดจะให้สเปกตรัมที่เป็นเอกลักษณ์ของพันธะในโมเลกุลนั้น ๆ ซึ่งเป็นการพิสูจน์หาโครงสร้างของสารประกอบ

ในงานนี้ ต้องการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันโครงสร้างของสารประกอบกราฟไฟต์ ไทเทเนียมไดออกไซด์

3.4.3 Diffused Reflectance UV-Vis Spectroscopy (DRS)

เพื่อวิเคราะห์หาค่าแถบพลังงาน (E_g) และการวิเคราะห์หาค่าการดูดกลืนแสงของ ไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิต

3.4.4 Photoluminescence Spectroscopy (PL)

โฟโตลูมิเนสเซนซ์เป็นกระบวนการที่อาศัยหลักการกระตุ้นและตกกลับสู่สถานะพื้น โดยมีโฟตอนเข้าไปเกี่ยวข้อง คือ มีการดูดกลืนโฟตอนและให้โฟตอนออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.5 Raman Spectrometer

รามานสเปกโตรมิเตอร์ (Raman Spectrometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์วัสดุเพื่อหาองค์ประกอบพันธะเคมี โครงสร้างวิภาคการบอกตำแหน่ง (Localization) ขนาดความเครียดเหนี่ยวนำ (Induced stress) และกลไกของปฏิกิริยา (Reaction mechanism) เป็นต้น สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างที่เป็นสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และชีวสาร ทั้งที่เป็นของแข็ง ของเหลว และแก๊สได้

3.4.6 Brunauer Emmett-Teller (BET)

ใช้หลักการของการดูดซับก๊าซบนพื้นผิวของตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ โดยมีสมมติฐานว่าการดูดซับของก๊าซเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอทั่วพื้นผิวไม่จำเพาะบริเวณใดบริเวณหนึ่งและอีกสมมติฐานหนึ่ง คือ ก๊าซที่ใช้มีความสามารถในการดูดซับบนพื้นผิวได้ดีกว่าการ ที่ก๊าซเกิดดึงดูดกันเอง (ซึ่งในการวิเคราะห์นี้ใช้ก๊าซไนโตรเจน, N_2)

3.4.7 Scanning Electron Microscope (SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร ตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ไม่จำเป็นจะต้องมีขนาดบาง การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่จะทำการวิเคราะห์ ซึ่งภาพที่ได้จะเป็นภาพ 3 มิติ จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษา สัณฐานวิทยาและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง

ในงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาสัณฐานวิทยาและดูรายละเอียดพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิต

3.4.8 Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX)

เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวของตัวอย่าง การใช้กล้องจุลทรรศน์ SEM ร่วมกับเทคนิค EDS หรือ EDX ทำให้การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานมีความละเอียดและได้ข้อมูลที่สมบูรณ์มากขึ้น

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยต้องการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิต

3.4.9 Transmission Electron Microscope (TEM)

เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ศึกษาตัวอย่างชนิดบาง ซึ่งเตรียมขึ้นโดยวิธีพิเศษเพื่อให้ลำอนุภาคอิเล็กตรอนผ่านทะลุได้ การสร้างภาพจากกล้องประเภทนี้จะทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่างนั่นเอง เครื่อง TEM เหมาะสำหรับศึกษารายละเอียดขององค์ประกอบภายในของตัวอย่าง เช่น องค์ประกอบภายในเซลล์ ลักษณะของเยื่อหุ้มเซลล์ ผนังเซลล์ เป็นต้น ซึ่งจะให้รายละเอียดสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์ชนิดอื่น ๆ เนื่องจากมีกำลังขยายและประสิทธิภาพในการแจกแจงรายละเอียดสูงมาก (กำลังขยายสูงสุดประมาณ 0.1 นาโนเมตร)

3.4.10 UV-Vis Spectrophotometer

เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดปริมาณแสงและค่าความเข้มของแสงในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่างซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน และสารอินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านั้นได้

ในงานวิจัยนี้ต้องการตรวจวัดปริมาณแสงและค่าความเข้มของแสงในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาว (วิซิเบิล) ที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนของไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิต

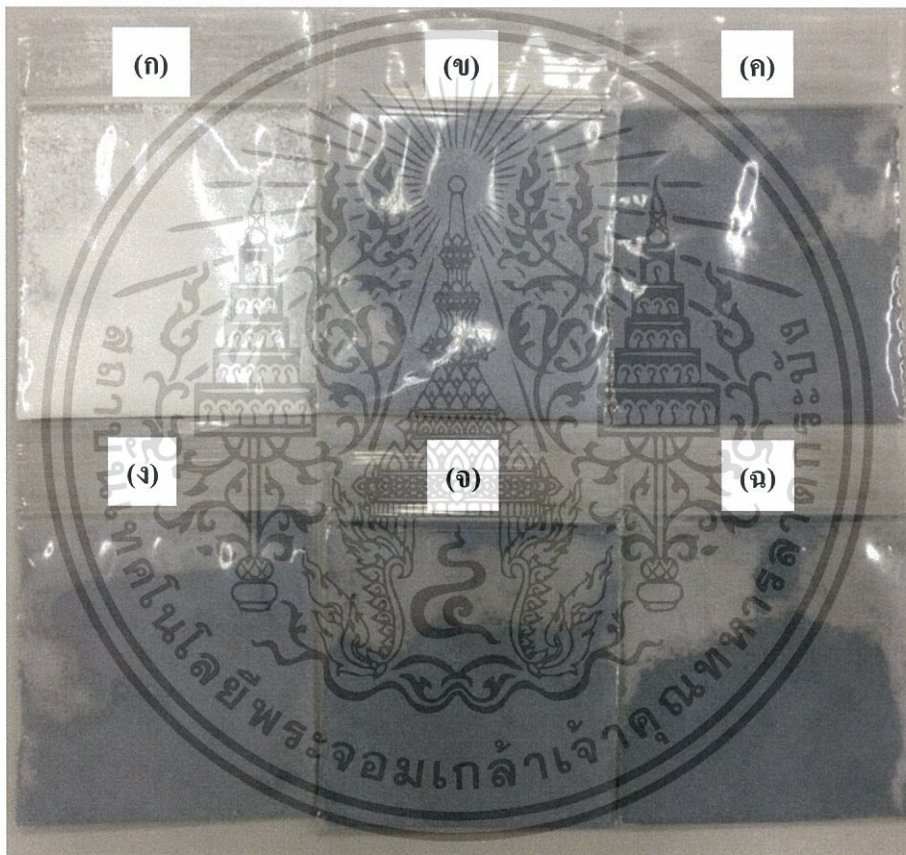


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

ในการทดลองนี้ได้ทำการเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิต โดยใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้า (Degussa P25) และกราฟีนออกไซด์เป็นวัสดุตั้งต้น โดยใช้วิตามินซีเป็นสารรีดักแทนที่เปลี่ยนกราฟีนออกไซด์ให้เป็นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ หลังจากที่ได้เตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ภายใต้เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณต่างกันได้คือ 0.10, 0.30, 0.50, 0.75 และ 1.00 wt% ซึ่งจะมีลักษณะทางกายภาพดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (ก) และผงไทเทเนียมไดออกไซด์ภายใต้เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณต่างกันได้คือ 0.10, 0.30, 0.50, 0.75 และ 1.00 wt% (ข), (ค), (ง), (จ) และ (ฉ) ตามลำดับ

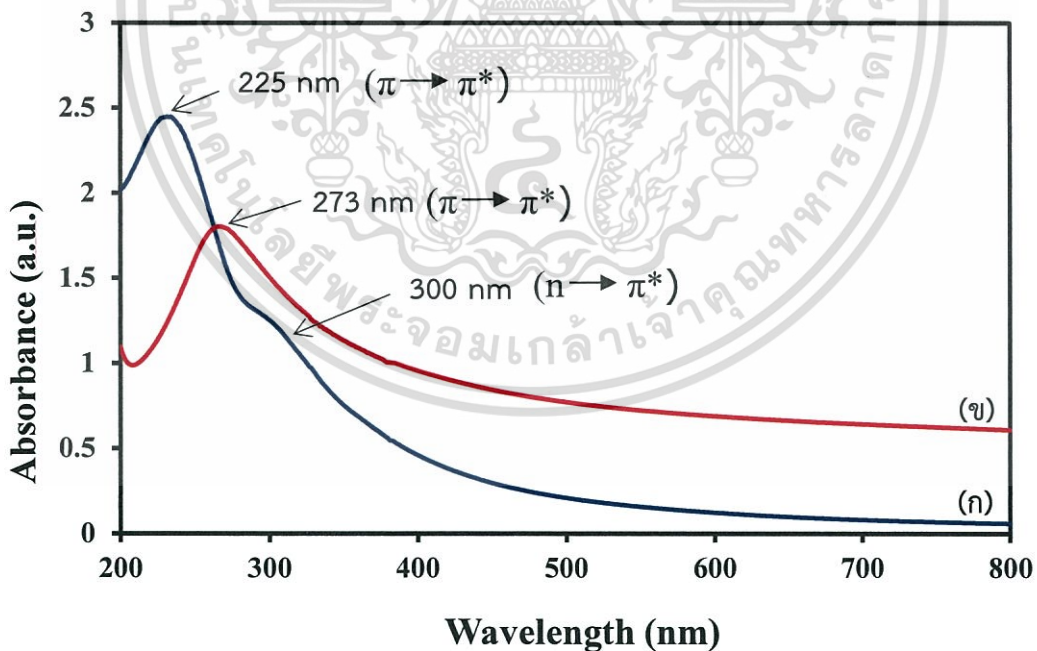
จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าสีของผงไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิต มีสีดำที่เข้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณการเติมกราฟีนออกไซด์มากขึ้น เมื่อเทียบกับผงไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้า สีดำที่เข้มขึ้นอธิบายได้ว่ากราฟีนออกไซด์ถูกรีดิวซ์ด้วยวิตามินซีให้เป็นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 การวิเคราะห์พิกสัจน์เอกลักษณ์

4.1.1 การศึกษาการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible Spectroscopy

ผลการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงของกราฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO) โดยใช้เทคนิค UV-vis เพื่อยืนยันว่ากราฟีนออกไซด์ถูกเปลี่ยนเป็นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์แสดงไว้ดังรูปที่ 4.2 ผลการศึกษาพบว่า สารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์มีการดูดกลืนคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นสูงสุด (λ_{\max}) ประมาณ 225 นาโนเมตร ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากชั้น π ไปยัง π^* ของโครงสร้างแบบวงอะโรมาติก (C=C) ส่วนพีคที่ตำแหน่ง 300 นาโนเมตร เป็นการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากชั้น n ไปยัง π^* ของพันธะ C=O [25] หลังจากรีดิวซ์ด้วยวิตามินซี พบว่าค่าการดูดกลืนแสงของพันธะ C=C จะขยับไปทางช่วงแสงสีแดง (Red shift) โดยความยาวคลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 273 นาโนเมตร เนื่องจากหลังถูกรีดิวซ์เปลี่ยนกราฟีนออกไซด์เป็นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์จะทำออกซิเจนที่ติดพันธะอยู่บริเวณแผ่นกราฟีน เช่น คาร์บอนิล ไฮดรอกซิล และอีพอกไซด์ เป็นต้น ถูกรีดิวซ์และเกิดการคอนจูเกตของ C=C มากขึ้น (Restoration) พันธะคู่ของวงอะโรมาติกในบริเวณแผ่นกราฟีนมากขึ้น ซึ่งวงอะโรมาติกที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลทำให้พลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่จากชั้น π ไปยัง π^* มีค่าลดลง ส่งผลทำให้ค่าความคลื่นสูงสุดเปลี่ยนแปลงไปเป็น 273 นาโนเมตร [25]



รูปที่ 4.2 ผลการดูดกลืนแสงของ (ก) กราฟีนออกไซด์ (GO) (ข) รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO)

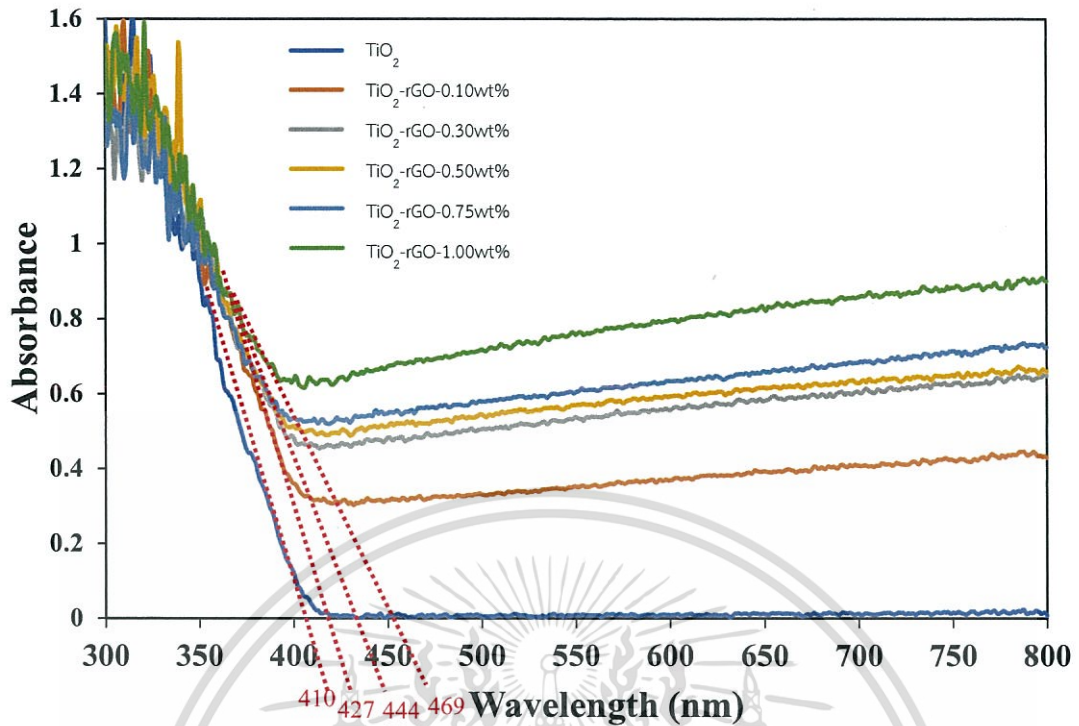
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 การศึกษาการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible Diffuse Reflectance Spectroscopy (DRS)

การศึกษาการดูดกลืนแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิตเพื่อพิสูจน์การดูดกลืนแสงที่เปลี่ยนไปโดยใช้เทคนิค DRS ซึ่งเทคนิคนี้ยังสามารถวิเคราะห์หาค่าแถบพลังงาน (E_g) ที่เปลี่ยนแปลงไปได้ มีผลการทดลองดังรูปที่ 4.3 พบว่ามีการดูดกลืนแสงของ TiO_2 (P25) เริ่มต้นมีความยาวคลื่นเท่ากับ 410 นาโนเมตร ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าแถบพลังงานได้เท่ากับ 3.02 eV (สามารถหาได้จากสูตร $\frac{1240}{\lambda} = \text{eV}$) นอกจากนี้ยังพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เติมปริมาณรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ไป 0.10, 0.30, 0.50, 0.75 และ 1.0wt% มีค่าการดูดกลืนแสงที่เพิ่มขึ้นเป็น 410, 427, 438, 444, 450 และ 469 นาโนเมตร ตามลำดับ ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าแถบพลังงานได้ดังตารางที่ 4.1 โดยปกติไทเทเนียมไดออกไซด์จะสามารถดูดกลืนแสงในช่วงแสงวิซิเบิลได้น้อยมากหรือแทบจะไม่ดูดกลืน แต่เมื่อมีการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณต่าง ๆ จะพบว่าค่าความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงมากขึ้น โดยขยับไปในช่วงสีแดง (Red-shift) ทั้งนี้จะเป็นผลจากการเกิดอันตรกิริยาการส่งผลอิเล็กตรอนระหว่างคาร์บอนของแผ่นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และออกซิเจนของไทเทเนียมไดออกไซด์โดยอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวจากออกซิเจนสามารถการเรโซแนนซ์แล้วส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังคาร์บอนของแผ่นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ [25] ส่งผลทำให้สามารถใช้พลังงานของแสงวิซิเบิลกระตุ้นให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ไปยังแถบตัวนำได้ง่ายขึ้น

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงและแถบช่องว่างพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิต

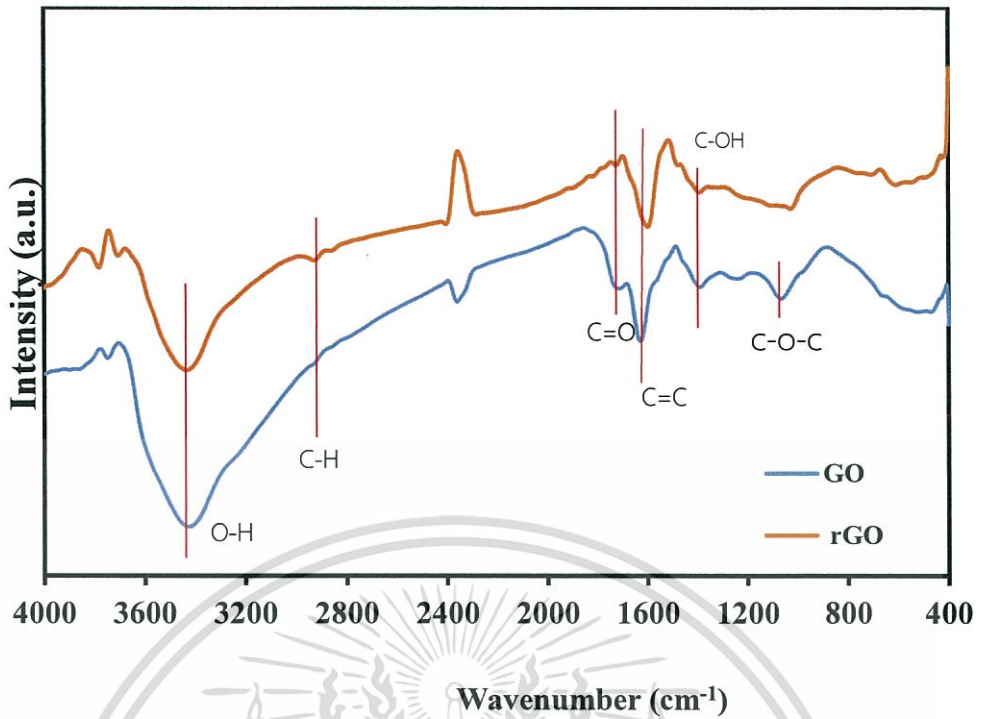
สารตัวอย่าง	Absorption band edge (nm)	Energy gab (eV)
TiO_2	410	3.02
$\text{TiO}_2\text{-GO-0.10wt\%}$	427	2.90
$\text{TiO}_2\text{-GO-0.30wt\%}$	438	2.83
$\text{TiO}_2\text{-GO-0.50wt\%}$	444	2.79
$\text{TiO}_2\text{-GO-0.75wt\%}$	450	2.75
$\text{TiO}_2\text{-GO-1.00wt\%}$	469	2.64



รูปที่ 4.3 กราฟ UV-Vis diffuse reflectance (DRS) spectra ของไทเทเนียมไดออกไซด์ (P25) และไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ นาโนคอมโพสิต

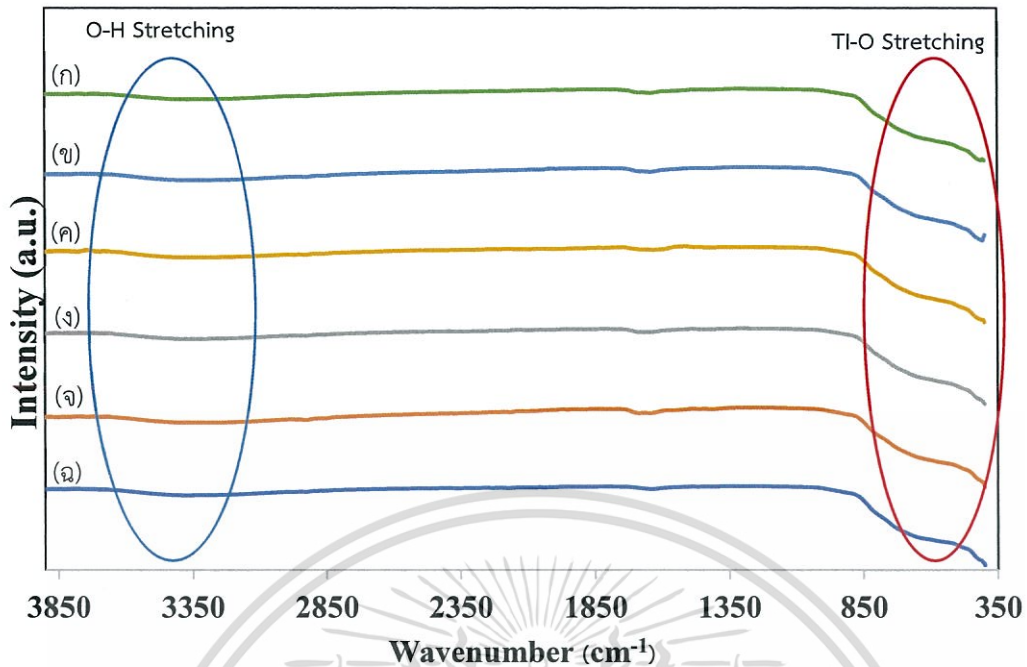
4.1.3 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR)

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างของแผ่นกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์สามารถทำได้ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) ซึ่งผลการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 4.4 จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันพบว่า กราฟีนออกไซด์มีการสั่นที่เลขคลื่นที่ประมาณ 3300, 2900, 1700, 1600, 1250 และ 1200 cm^{-1} ซึ่งแสดงหมู่ฟังก์ชัน O-H stretching, C-H stretching, C=O stretching, C=C stretching, C-OH stretching และ C-O-C stretching ตามลำดับ [25] แต่เมื่อกราฟีนออกไซด์ถูกรีดิวซ์เป็นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์จะพบการสั่นของเลขคลื่นที่ประมาณ 3300, 2900 และ 1600 cm^{-1} คือหมู่ฟังก์ชัน O-H stretching, C-H stretching และ C=C stretching ตามลำดับ โดยจะพบการสั่นของเลขคลื่นที่ 1700 และ 1250 คือหมู่ฟังก์ชัน C=O stretching และ C-OH stretching ที่มีความเข้มของแถบการดูดกลืนลดลง ทั้งนี้เนื่องจาก กราฟีนออกไซด์จะถูกกำจัดหมู่คาร์บอนิล หมู่ไฮดรอกซิล และหมู่อีพอกไซด์ออกไปจากโครงสร้างจึงทำให้พบพีคที่มีค่าความเข้มลดลงหรือไม่พบแถบการดูดกลืนเหล่านี้ [25]



รูปที่ 4.4 กราฟแสดง FT-IR spectra ของกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

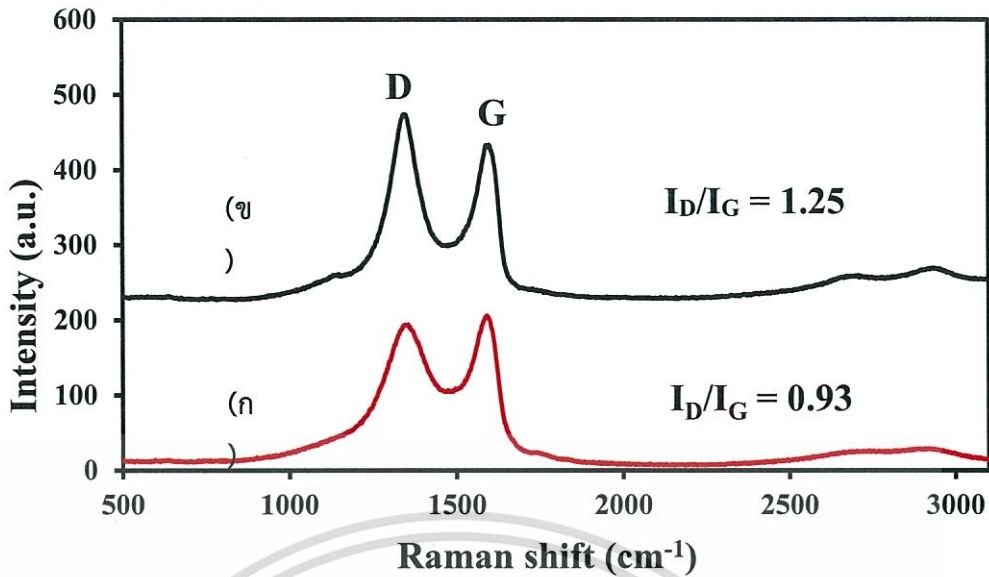
การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (TiO₂-rGO) นาโนคอมโพสิต สามารถตรวจวิเคราะห์ FT-IR จากผลการทดลองจากรูปที่ 4.5 พบว่าสารตัวอย่างทุกตัวอย่างมีการสั่นของเลขคลื่นที่ 3372 (O-H stretching) ใกล้เคียงกันทุกตัวอย่างโดยตัวอย่างถัดมาตัวอย่างสารนาโนคอมโพสิต (ข), (ค), (ง), (จ) และ (ฉ) คือ TiO₂-rGO-0.10 wt%, TiO₂-rGO-0.30 wt%, TiO₂-rGO-0.50 wt%, TiO₂-rGO-0.75 wt% และ TiO₂-rGO-1.00 wt% ตามลำดับพบว่าเมื่อเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณต่าง ๆ จะพบว่าพบพีคเอกลักษณ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์แต่ไม่พบพีคเอกลักษณ์ของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ทั้งนี้เพราะว่ามีการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณน้อยมาก ซึ่งในทุกสารตัวอย่างนาโนคอมโพสิตจะพบพีคมีการสั่นของเลขคลื่นในช่วง 850-400 CM⁻¹ (M-O stretching) ซึ่งก็คือพีคของ Ti-O ซึ่งเป็นธาตุองค์ประกอบหลักของทุกสารตัวอย่าง [25]



รูปที่ 4.5 กราฟ FT-IR ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณต่าง ๆ (ก) TiO_2 , (ข) TiO_2 -rGO-0.10 wt%, (ค) TiO_2 -rGO-0.30 wt%, (ด) TiO_2 -rGO-0.5 wt%, (ง) TiO_2 -rGO-0.75 wt% และ(ฉ) TiO_2 -rGO-1.00 wt%

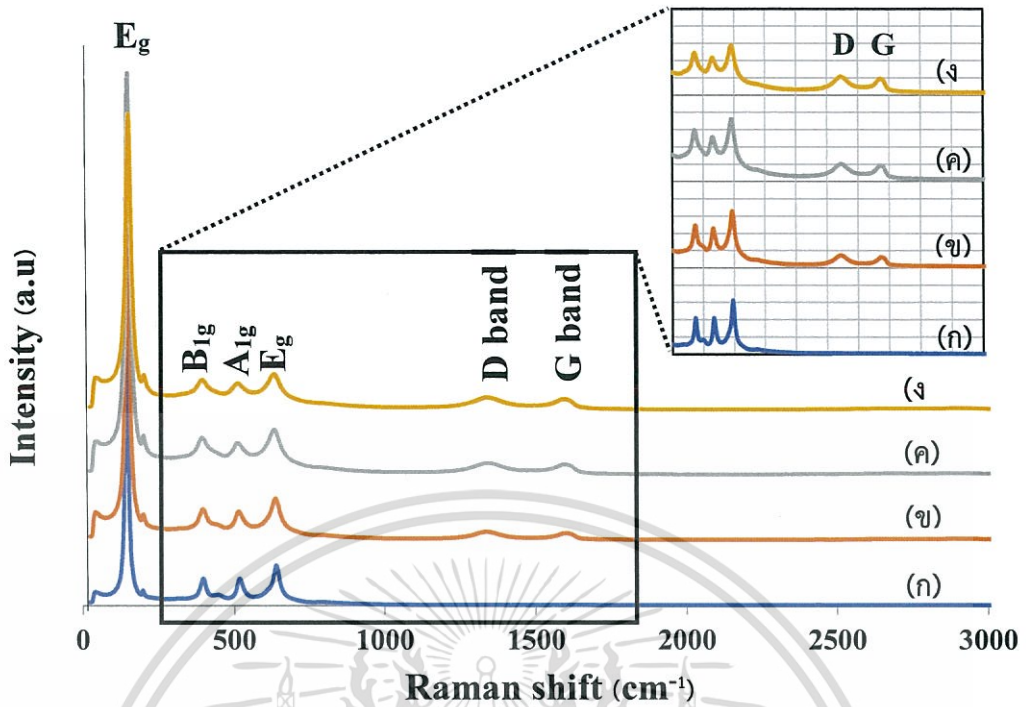
4.1.4 การศึกษาเทคนิครามานสเปกโตรสโกปี (Raman spectroscopy)

จากการศึกษาการวัดการกระเจิงของแสงด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโกปีเพื่อพิสูจน์เอกลักษณ์ของกราฟีนออกไซด์ (GO) รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO) และไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (TiO_2 -rGO) นาโนคอมโพสิต ซึ่งผลการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 4.6 จากการวิเคราะห์พบว่าทั้ง GO และ rGO นั้นปรากฏพีกเอกลักษณ์ที่ตำแหน่ง 1311 cm^{-1} (D band) และ 1570 cm^{-1} (G band) ซึ่ง D band จะแสดงถึงความไม่เป็นระเบียบของแผ่นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ และ G band จะแสดงถึงความเป็นระเบียบของแผ่นกราฟีน (sp^2 carbon domain) [25] นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าความเข้มพีกของ rGO จะมีสัดส่วนความเข้ม (I_D/I_G) สูงกว่า GO เนื่องจากในขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของกราฟีนออกไซด์นั้นคาร์บอน sp^2 hybridization จะฉีกขาดออกเป็นแผ่นขนาดเล็กซึ่งหลังเกิดการจัดเรียงใหม่ของแผ่นก็ทำให้มีลักษณะที่แตกต่างไปจากเดิมส่งผลทำให้ความไม่เป็นระเบียบของแผ่นเพิ่มมากขึ้น โดยจะแสดงพีกของ D band จะมีลักษณะสูงกว่าพีก G band [26]



รูปที่ 4.6 การวัดการกระเจิงแสงด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโคปีของ (ก) GO (ข) rGO

ผลการทดลองจากรูปที่ 4.7 ซึ่งแสดงรามานสเปกตรัมของไทเทเนียมไดออกไซด์ (P25) และไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิตในอัตราส่วนรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ 0.10wt%, 0.50wt% และ 1.00wt% พบว่าผลรามานสเปกตรัมของ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (P25) ซึ่งจะปรากฏพีกเอกลักษณ์ที่ตำแหน่ง 113 cm^{-1} (E_g) 364 cm^{-1} (B_{1g}) 484 cm^{-1} (A_{1g}) และ 605 cm^{-1} (E_g) ตามลำดับของ TiO_2 [26] นอกจากนี้ยังพบพีกเอกลักษณ์ของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในไทเทเนียมได-ออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิตในทุก ๆ อัตราส่วน โดยปรากฏพีกเอกลักษณ์ที่ตำแหน่ง 1311 cm^{-1} (D band) และ 1570 cm^{-1} (G band) ซึ่ง D band และ G band นั้นขึ้นกับความไม่เป็นระเบียบของแผ่นและคาร์บอน sp^2 hybridization ตามลำดับ ซึ่งจะสังเกตได้ว่าความเข้มของพีกเอกลักษณ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีความเข้มต่ำลงอีกด้วยเนื่องจากบริเวณผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกปกคลุมไปด้วยแผ่นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ เมื่อใส่ปริมาณรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ไปในปริมาณมากบริเวณผิวที่ถูกปกคลุมก็มีความหนาเพิ่มมากขึ้นส่งผลทำให้การวัดการกระเจิงของแสงมีความเข้มของสัญญาณที่ต่ำลง [26]

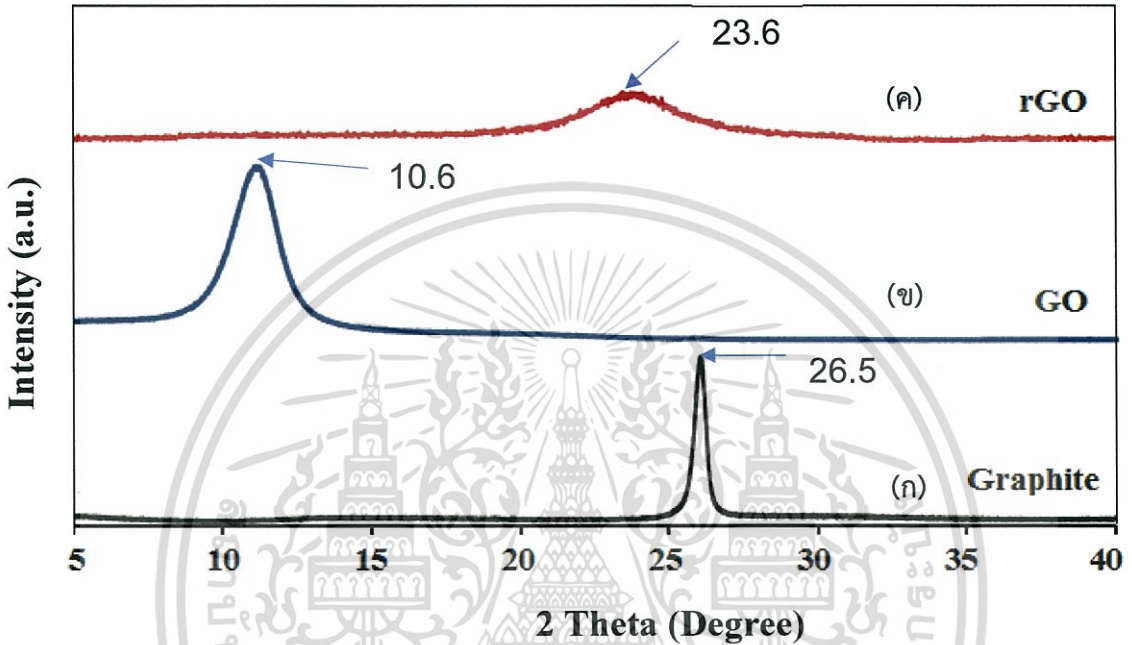


รูปที่ 4.7 การวัดการกระเจิงของแสงด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโคปีของ (ก) TiO_2 (ข) TiO_2 -rGO-0.10 wt% (ค) TiO_2 -rGO-0.50 wt% และ (ง) TiO_2 -rGO-1.00 wt%

4.1.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ X-Ray Diffractometer (XRD)

การศึกษาโครงสร้างผลึกของกราฟไฟต์ กราฟีนออกไซด์ และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ เพื่อพิสูจน์ฟิสิกส์เอกลักษณ์สามารถศึกษาโดยใช้เทคนิค X-Ray Diffraction (XRD) ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองพบว่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มุมการเลี้ยวเบน $2\theta = 26.54^\circ$, 10.60° และ 23.60° เป็นฟิสิกส์เอกลักษณ์ของกราฟไฟต์ กราฟีนออกไซด์ และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ตามลำดับ [27] กราฟไฟต์เกิดจากอะตอมเรียงกันเป็นชั้น ๆ แต่ละชั้นเกิดจากอะตอมคาร์บอนเรียงตัวกันเป็นรูปหกเหลี่ยมคล้ายรังผึ้ง เมื่อหลาย ๆ แผ่นมาเรียงซ้อนกัน มีความเป็นผลึกสูงซึ่งจะแสดงฟิสิกส์เอกลักษณ์มีความเข้มสูง ดังรูปที่ 4.8 ซึ่งสามารถนำค่า 2θ มาคำนวณหาค่าระยะห่างระหว่างแผ่น (d spacing) จากสูตร $2n\lambda = 2d\sin\theta$ ซึ่งจะสามารถคำนวณหาค่าระยะห่างระหว่างแผ่นของกราฟไฟต์ กราฟีนออกไซด์ และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ได้เท่ากับ 0.335 นาโนเมตร, 0.833 นาโนเมตร และ 0.375 นาโนเมตร ตามลำดับ ทั้งนี้กราฟีนออกไซด์มีค่าระยะห่างระหว่างแผ่นเพิ่มขึ้นจากกราฟไฟต์ออกไซด์เนื่องจากหลังจากกราฟไฟต์เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะทำให้มีหมู่ออกไซด์ เช่น หมู่คาร์บอกซิล (-COOH) หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) และหมู่คาร์บอนิล (-C=O) เป็นต้น เข้าไปเกิดพันธะอยู่บริเวณ โครงสร้างส่งผลทำให้ระยะระหว่างแผ่นมีความกว้างเพิ่มมากขึ้นโดยระยะห่างระหว่างแผ่นเท่ากับ 0.833 นาโนเมตร ทำให้ฟิสิกส์เอกลักษณ์ของกราฟีนออกไซด์เลื่อนไปที่ $2\theta = 10.60^\circ$ หลังจากนั้นเมื่อนำกราฟีนออกไซด์ไปทำปฏิกิริยารีดักชันซึ่งจะเป็นการกำจัดหมู่ออกไซด์หลุดออกมาเป็นผลทำให้ระยะห่างระหว่างแผ่นมีค่า

น้อยลงโดยระยะห่างระหว่างแผ่นมีค่าเท่ากับ 0.375 นาโนเมตร โดยพีคเอกลักษณ์ของรีดิวซ์กราฟีน-ออกไซด์เลื่อนไปที่ $2\theta = 23.6^\circ$ นอกจากนี้ยังพบว่าพีคเอกลักษณ์ของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีลักษณะความเป็นผลึกที่น้อยเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยารีดักชันจะทำให้แผ่นคาร์บอน sp^2 hybridization จะฉีกขาดเป็นแผ่นขนาดเล็กซึ่งหลังเกิดการจัดเรียงใหม่ของแผ่นก็ทำให้มีลักษณะที่แตกต่างไปจากเดิมส่งผลทำให้มีความเป็นผลึกที่ต่ำ [27]

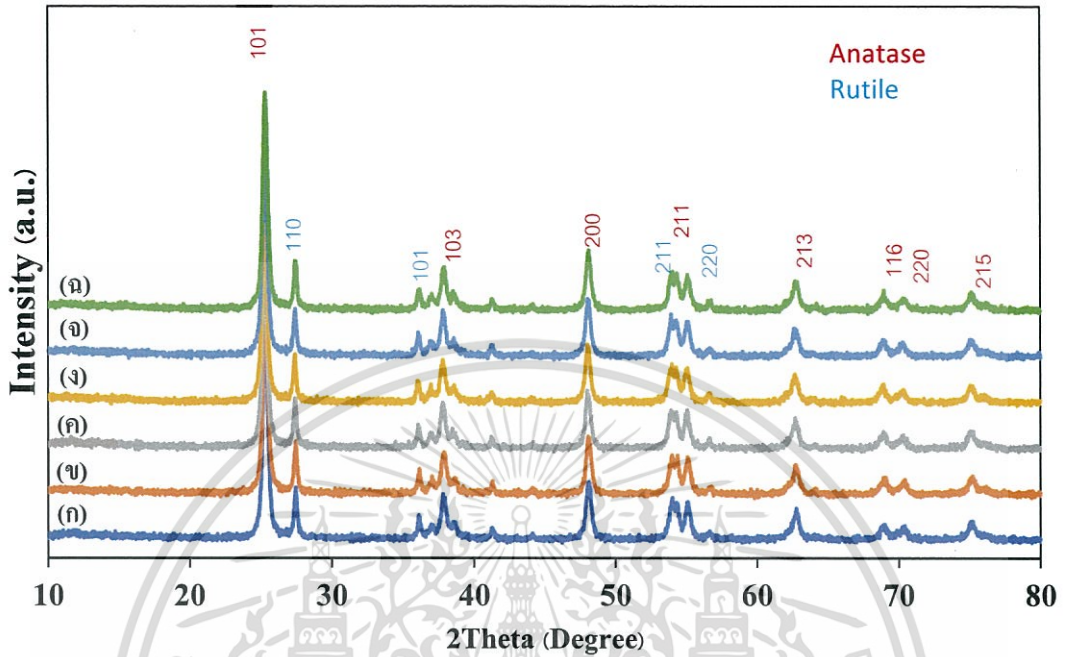


รูปที่ 4.8 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ (ก) กราไฟต์, (ข) กราฟีนออกไซด์ และ (ค) รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

จากการศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณ 0.10, 0.30, 0.50, 0.75 และ 1.00 wt% ด้วยเทคนิค X-ray Diffraction พบว่ามีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ดังรูปที่ 4.9 โดยไทเทเนียมไดออกไซด์พบพีคเอกลักษณ์เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 25.20° , 37.80° , 48.50° , 53.80° และ 62.60° ตรงกับการเลี้ยวเบนของระนาบ (101), (103), (200), (211) และ (213) ตามลำดับ ซึ่งตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนตามข้อมูลมาตรฐานของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีวัฏภาคแบบอนาเทส (TiO_2 , JCPDS 21-1272) และพบพีคเอกลักษณ์เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 27.40° , 37.00° , 53.90° และ 54.00° ซึ่งตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของระนาบ (110), (101), (211) และ (220) ตามลำดับซึ่งตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนตามข้อมูลมาตรฐานของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีวัฏภาครูไทล์ (TiO_2 , JCPDS เลขที่ 89-4921) [28] เมื่อเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ลงในปริมาณ 0.10, 0.30, 0.50, 0.75 และ 1.00 wt% พบว่าพีคเอกลักษณ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ยังคงปรากฏขึ้นที่ตำแหน่ง 2θ เดียวกันกับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เติมด้วยรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และไม่พบการเปลี่ยนแปลง ทั้งนี้เนื่องจากอัตราส่วนระหว่างปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์กับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์แตกต่างกันมาก นอกจากนี้พีค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกลักษณ์ของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ยังมีลักษณะที่มีความเป็นผลึกต่ำจึงทำให้ไม่ปรากฏพีคเอกลักษณ์ของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ [27,28]



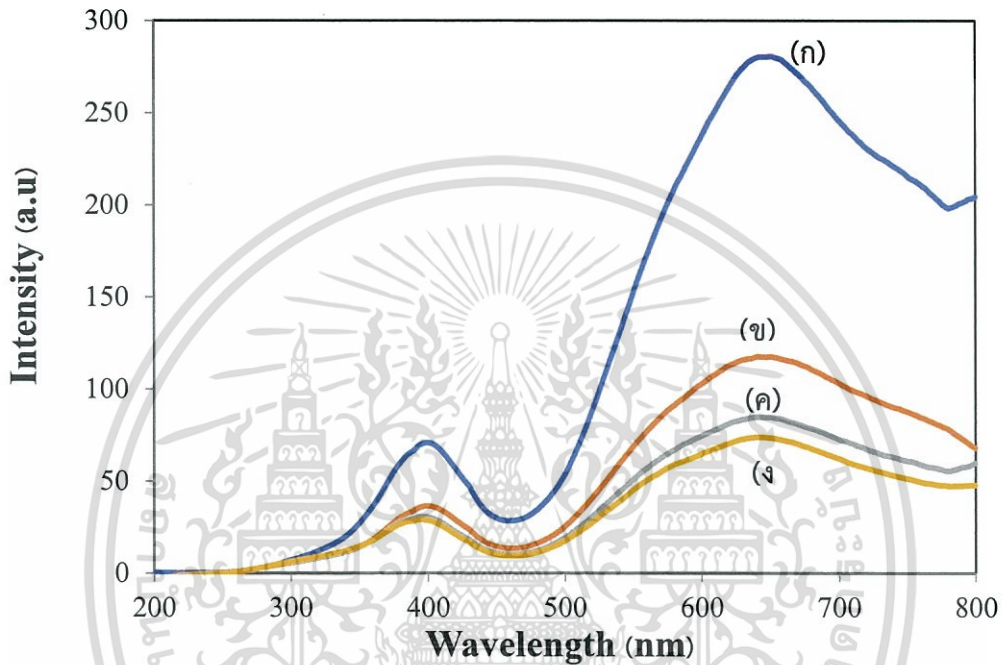
รูปที่ 4.9 XRD pattern ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณต่าง ๆ TiO_2 , TiO_2 -rGO-0.10 wt%, TiO_2 -rGO-0.30 wt%, TiO_2 -rGO-0.50 wt%, TiO_2 -rGO-0.75 wt% และ TiO_2 -rGO-1.00 wt%

4.1.6 การศึกษาการคายพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence, PL)

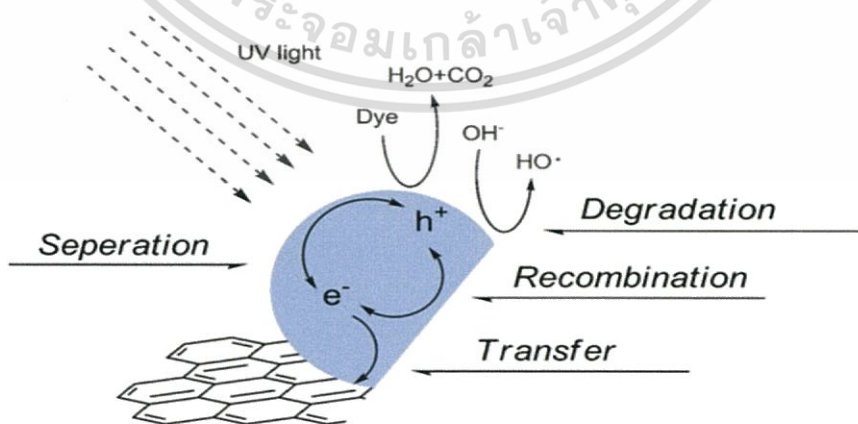
การศึกษาการคายพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์เพื่อพิสูจน์การลดการเกิดการตกกลับของอิเล็กตรอนร่วมกับโฮล (Electrons-hole pair recombination) ซึ่งเทคนิคนี้เป็นการให้พลังงานแสงเพื่อกระตุ้น (Excitation energy) ให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำเคลื่อนที่ไปยังแถบตัวนำ จากนั้นอิเล็กตรอนในแถบตัวนำจะเกิดการคายพลังงานโดยการเปล่งแสงออกมา (Emission energy) โดยตกกลับมารวมกับโฮลในแถบวาเลนซ์จากนั้นเครื่องจะทำการวัดความเข้มแสงที่ปล่อยออกมาหลังจากอิเล็กตรอนตกกลับลงมาผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.10 จากการให้พลังงานกระตุ้นที่มีความยาวคลื่น 345 นาโนเมตร พบว่า สเปกตรัมของไทเทเนียมไดออกไซด์ (P25) มีการคายพลังงานที่มีความยาวคลื่น 400 และ 650 นาโนเมตร ซึ่งแสดงถึงการคายพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์ (P25) [29] เมื่อทำการปรับปรุงไทเทเนียมไดออกไซด์ (P25) โดยการสังเคราะห์เป็นคอมโพสิตร่วมกับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO) เป็นไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิตในอัตราส่วนรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ 0.30, 0.75 และ 1.00 wt% พบว่า สเปกตรัมที่ได้มีการคายแสงในช่วงพลังงานที่ใกล้เคียงกับไทเทเนียมไดออกไซด์ (P25) แต่มีความเข้มแสงที่ปล่อยออกมาลดลงตามเปอร์เซ็นต์รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ใส่ลงไปตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้มีสาเหตุมาจากเมื่อเติมกราฟีนออกไซด์ลงไปจากนั้นทำการรีดิวซ์ด้วยวิตามินซี ส่งผลให้เกิดเปลี่ยนแปลง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ราฟีนออกไซด์เปลี่ยนไปเป็นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ซึ่งรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีความสามารถในการส่งผ่านอิเล็กตรอนได้ดี ดังนั้นเมื่อไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับพลังงานกระตุ้นอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปแถบชั้นตัวนำจากนั้นอิเล็กตรอนจะถูกส่งผ่านไปยังพันธะคู่ของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ส่งผลทำให้เกิดการตกกลับของอิเล็กตรอนมารวมกับโฮล (Electron-hole pair recombination) ลดลง [29] ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ส่งผลทำให้ความเข้มแสงที่เกิดจากการคายพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิตลดลง



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงการคายพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของ (ก) TiO_2 (ข) $\text{TiO}_2\text{-rGO-0.10 wt\%}$ (ค) $\text{TiO}_2\text{-rGO-0.50 wt\%}$ และ (ง) $\text{TiO}_2\text{-rGO-1.00 wt\%}$



รูปที่ 4.11 ภาพแสดงกลไกการเกิดการตกกลับของอิเล็กตรอน (Recombination) การส่งผ่านอิเล็กตรอน (Transfer) และกลไกการกำจัดสีย้อม (Degradation) ภายใต้การฉายแสงยูวี [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.7 การศึกษาการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุนด้วยเครื่องวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว (Surface area and porosity analyzer, BET)

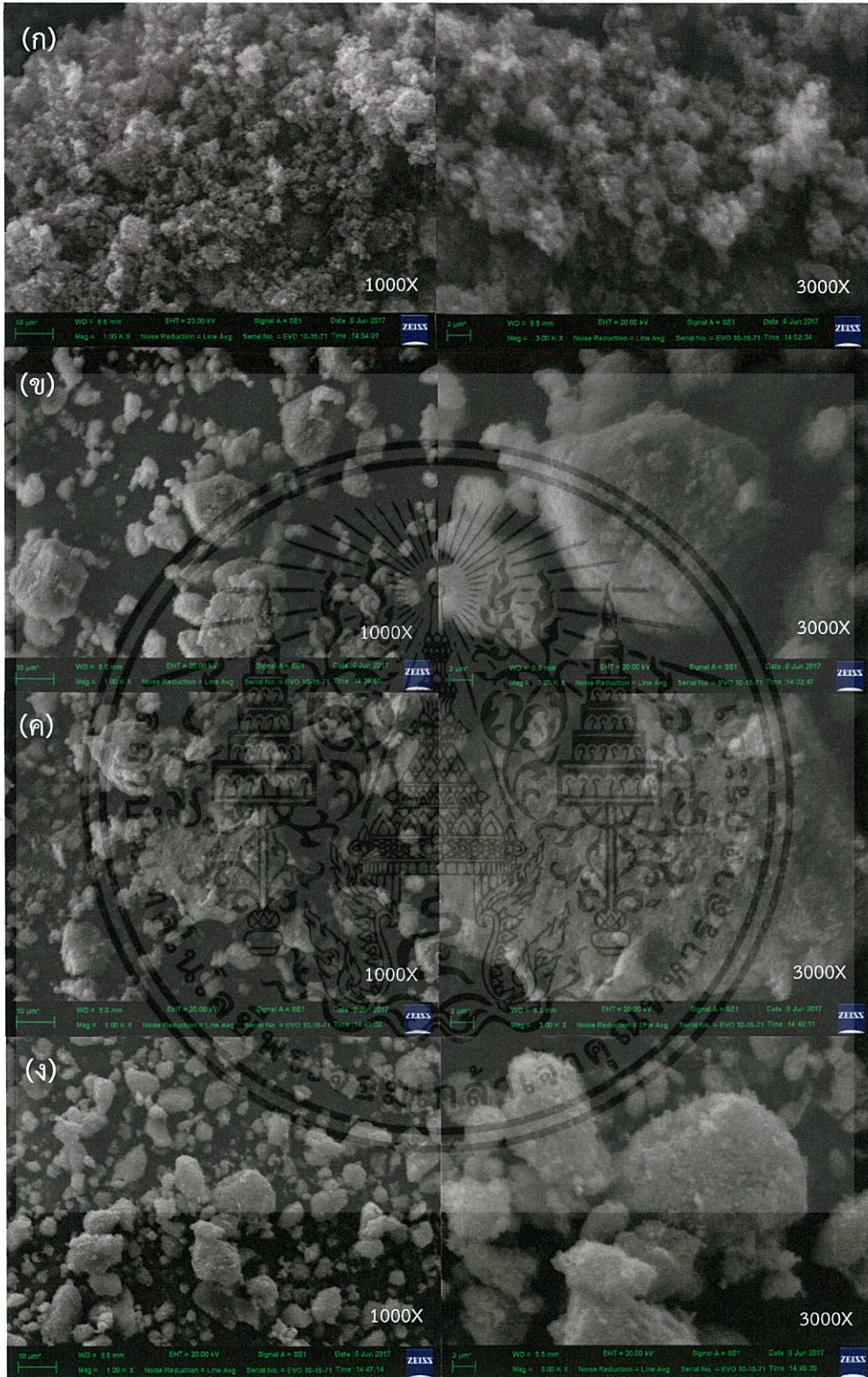
ผลจากการศึกษาพื้นที่ผิวและรูพรุนของไทเทเนียมไดออกไซด์ (P25) และไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ นาโนคอมโพสิต ที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณ 0.10, 0.50 และ 1.00 wt% ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิค BET ได้แสดงผลการทดลองในตารางที่ 4.2 โดยพบว่าอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ (P25) มีปริมาณพื้นที่ผิว 58.19 ตารางเมตร/กรัม จากนั้นเมื่อทำการเติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณ 0.10, 0.50 และ 1.00 wt% มีปริมาณพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นเป็นดังนี้ 62.34, 68.45 และ 76.84 ตารางเมตร/กรัม ตามลำดับ ซึ่งการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีผลทำให้พื้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเนื่องมาจากรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นั้นมีลักษณะเป็นแผ่น 2 มิติ จึงเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง ดังนั้นจึงส่งผลทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิต มีลักษณะพื้นที่ผิวที่สูงขึ้น ซึ่งจะช่วยในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดรูพรุน (Pore Size) ของไทเทเนียมไดออกไซด์ (P25) เป็น 121.60 และเมื่อเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณ 0.10, 0.50 และ 1.00 wt% ขนาดรูพรุนจะเพิ่มขึ้นเป็น 170.80°, 202.40° และ 309.10 Å ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากการเติมปริมาณรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการแทรกของแผ่นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ จึงส่งผลให้รูพรุนมีขนาดเพิ่มขึ้น [30]

ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณพื้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิต

สารตัวอย่าง	BET Surface (m ² /g)	Pore Size (Å°)
TiO ₂	58.19	121.60
TiO ₂ -rGO-0.10 wt%	62.34	170.80
TiO ₂ -rGO-0.50 wt%	68.45	202.40
TiO ₂ -rGO-1.00 wt%	76.84	309.10

4.1.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

ผลการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้า (Degussa P25) และไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ นาโนคอมโพสิต ในปริมาณ 0.10, 0.50 และ 1.00 wt% สามารถศึกษาได้โดยใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ซึ่งผลการทดลองแสดงไว้ดังรูปที่ 4.12 จากรูปพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์มีลักษณะเป็นผงผลึกขนาดเล็ก ในขณะที่ไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ปริมาณ 0.10, 0.50 และ 1.00 wt% พบว่าขนาดอนุภาคมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์มีลักษณะจับกันเป็นก้อนมากขึ้น [31]



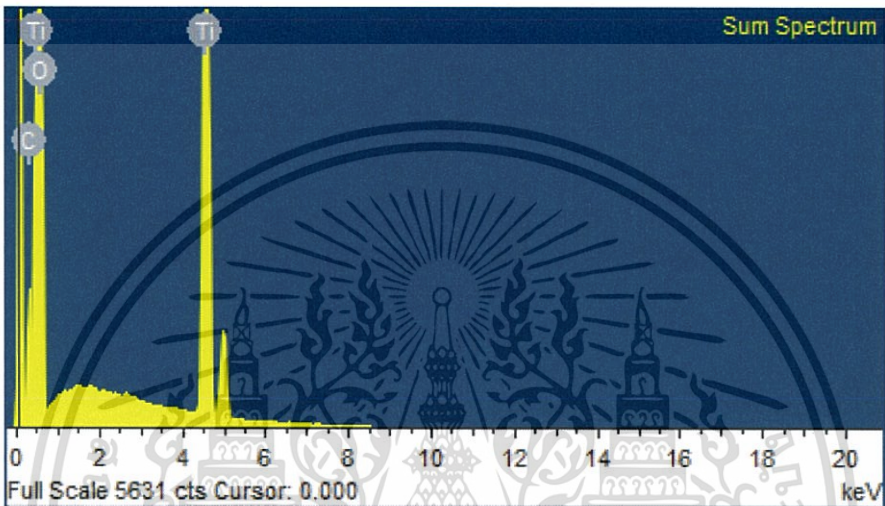
รูปที่ 4.12 ภาพแสดงลักษณะสัณฐานวิทยาจากเทคนิค SEM (ก) TiO₂ (ข) TiO₂-rGO-0.10 wt% (ค) TiO₂-rGO-0.50 wt% และ (ง) TiO₂-rGO-1.00 wt%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

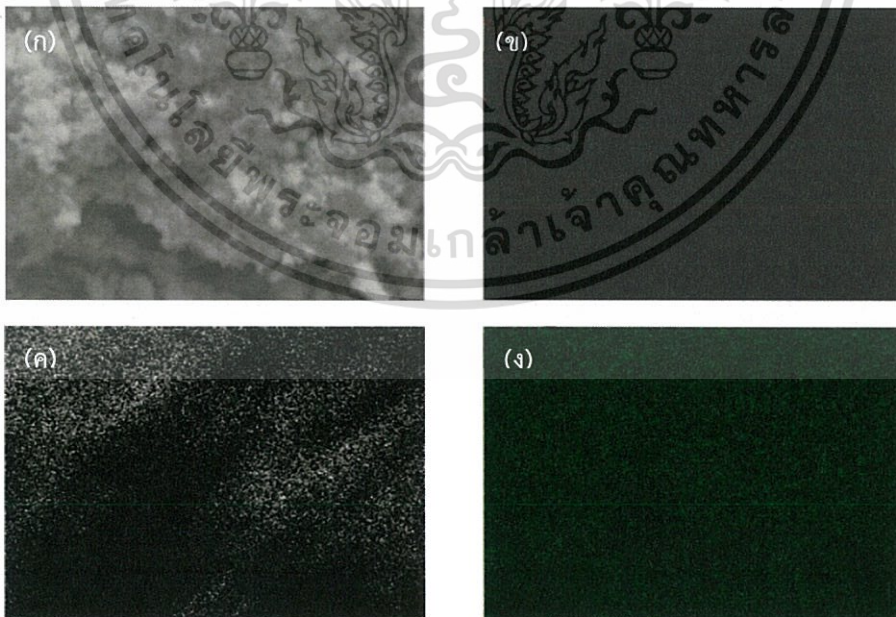
4.1.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบภายในตัวอย่าง (Energy-dispersive X-ray spectroscopy, EDX)

การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกัน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ SEM ร่วมกับ EDX ทำให้การวิเคราะห์ลักษณะบนพื้นผิวมีความละเอียดและได้ข้อมูลที่สมบูรณ์มากขึ้น

1) ไทเทเนียมไดออกไซด์ เกรดการค้า (Degussa P25)



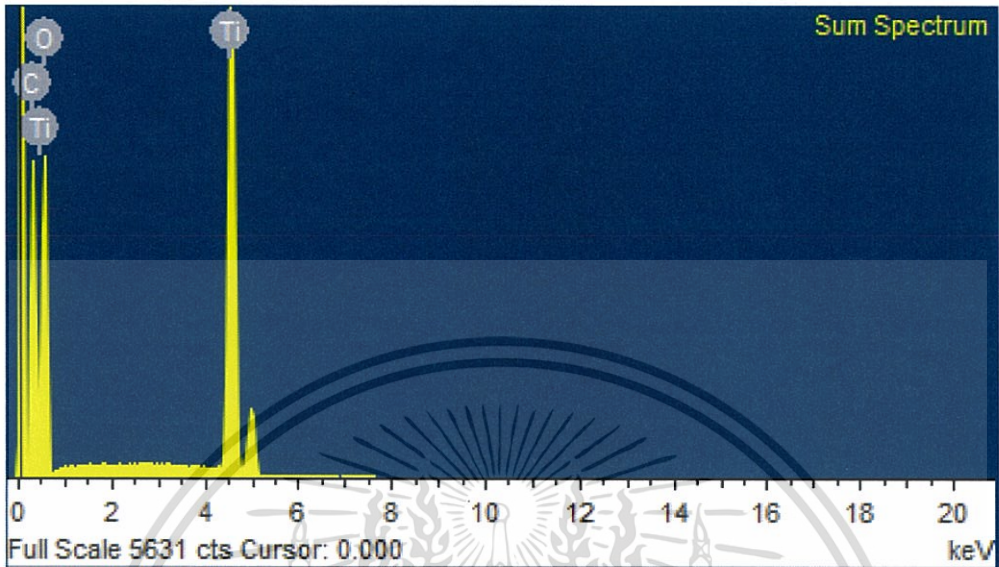
รูปที่ 4.13 ผล EDS สเปกตร้าของไทเทเนียมไดออกไซด์ (P25)



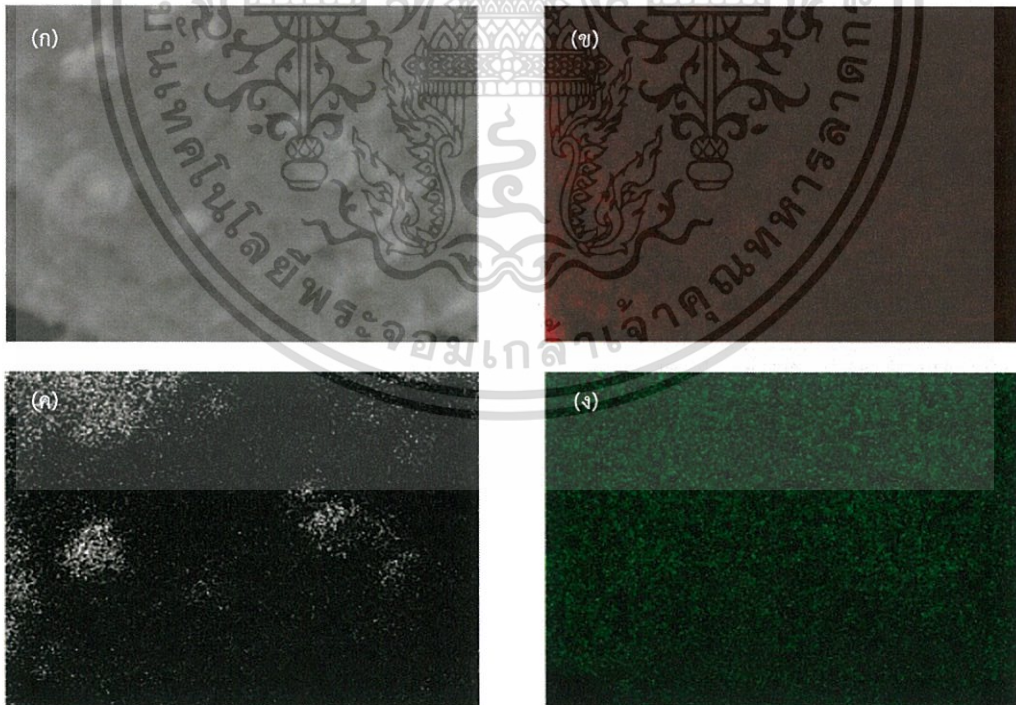
รูปที่ 4.14 (ก) ภาพ SEM ของไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้า (Degussa P25) (ข) การกระจายตัวของธาตุคาร์บอน (ค) การกระจายตัวของธาตุออกซิเจน และ (ง) การกระจายตัวของธาตุไทเทเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) ไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิต ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.50 wt%



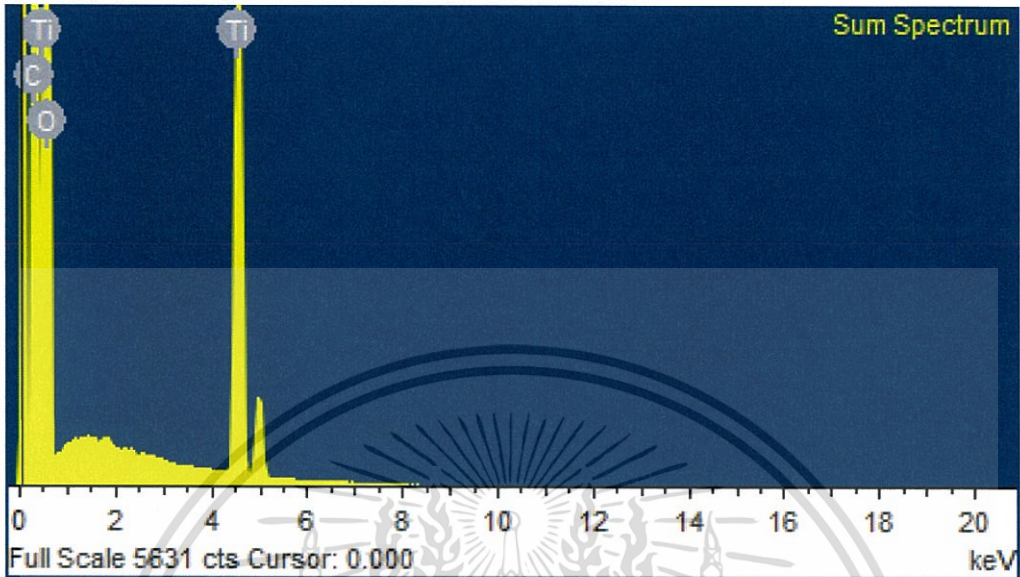
รูปที่ 4.15 ผล EDS สเปกตร้าของไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิตที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.50 wt%



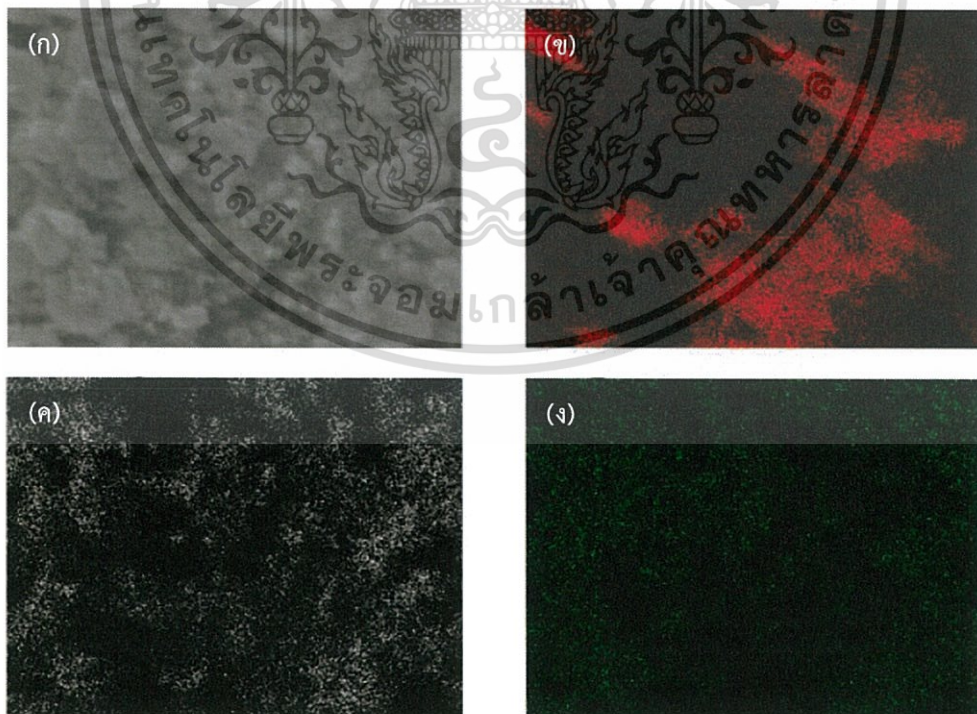
รูปที่ 4.16 (ก) ภาพ SEM TiO₂-rGO-0.50 wt% (ข) การกระจายตัวของธาตุคาร์บอน (ค) การกระจายตัวของธาตุออกซิเจน และ (ง) การกระจายตัวของธาตุไทเทเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิต ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 1.00 wt%



รูปที่ 4.17 ผล EDS สเปกตรัมของไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิต ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 1.00 wt%



รูปที่ 4.18 (ก) ภาพ SEM $\text{TiO}_2\text{-rGO-1.00 wt\%}$ (ข) การกระจายตัวของธาตุคาร์บอน (ค) การกระจายตัวของธาตุออกซิเจน และ (ง) การกระจายตัวของธาตุไทเทเนียม
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก EDX สเปกตรัมของไทเทเนียมไดออกไซด์ เกรดการค้า (Degussa P25) และไทเทเนียม-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิต ที่เติมปริมาณกราฟีนออกไซด์ในปริมาณต่างกัน คือ 0.50 และ 1.00 ดังรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.18 ตามลำดับที่แสดงการกระจายตัวของธาตุไทเทเนียม (Ti) ออกซิเจน (O) และคาร์บอน (C)

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบในไทเทเนียมไดออกไซด์ เกรดการค้า และไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิต

สารที่วิเคราะห์	ธาตุองค์ประกอบ (wt%)		
	ไทเทเนียม (Ti)	คาร์บอน (C)	ออกซิเจน(O)
TiO ₂	66.45	2.51	31.04
TiO ₂ -rGO-0.50 wt%	63.31	11.03	25.67
TiO ₂ -rGO-1.00 wt%	46.31	18.07	35.62

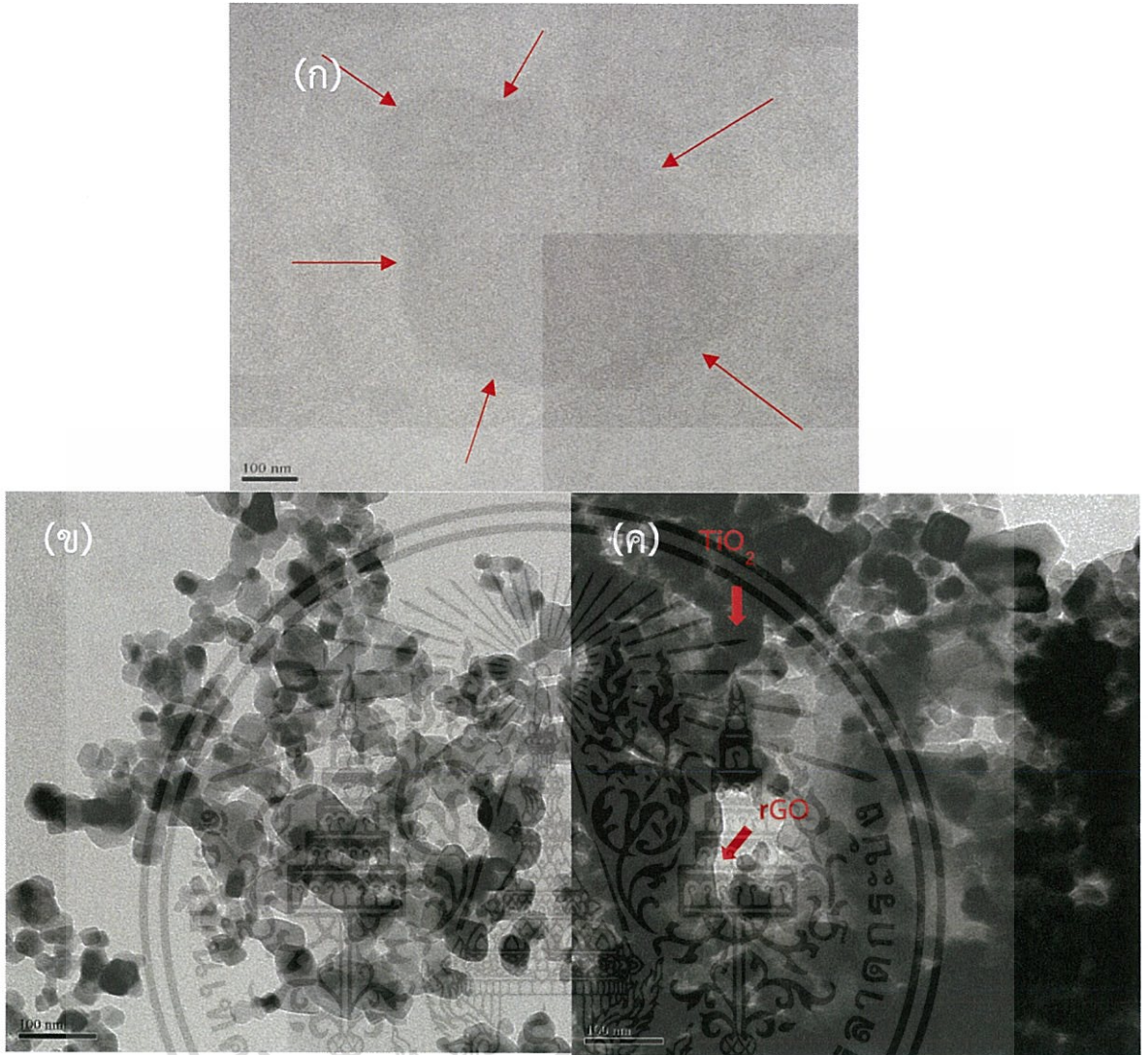
การศึกษาและวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบในไทเทเนียมไดออกไซด์ (P25) และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณ 0.5 และ 1.0 wt% พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์จะพบธาตุคาร์บอน (C) 2.51, 11.03, และ 18.07 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีธาตุคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนที่ใส่รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ลงไป เนื่องจากแผ่นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ปกคลุมบนอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ นอกจากนี้ยังพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์พบธาตุคาร์บอน 2.51 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักซึ่งอาจเกิดจากคาร์บอนเทปที่ใช้ในการติดตัวอย่างเพื่อทำการตรวจวัด [32]

4.1.10 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM)

การศึกษาโครงสร้างภายในของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และไทเทเนียมไดออกไซด์รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ นาโนคอมโพสิต เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างภายในของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และไทเทเนียมไดออกไซด์รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ นาโนคอมโพสิต ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.19 (ก) พบว่าอนุภาคจากแผ่นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์จะมีลักษณะเป็นแผ่น มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 650 นาโนเมตร ในขณะที่ไทเทเนียมไดออกไซด์พบว่ามีลักษณะเป็นก้อนทรงกลมขนาดเล็กมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 20 นาโนเมตร แสดงได้ดังรูปที่ 4.19 (ข) ซึ่งเมื่อสังเคราะห์เป็นไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ นาโนคอมโพสิต พบว่าโครงสร้างภายในของ ไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ นาโนคอมโพสิต ดังรูปที่ 4.19 (ค) แสดงอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีลักษณะกลมเกาะบนแผ่นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นแผ่นซึ่งสามารถยืนยันการเกิดเป็นนาโนคอมโพสิตร่วมกันของไทเทเนียมไดออกไซด์กับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ [33]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 ภาพแสดงลักษณะสัณฐานวิทยาจาก SEM ของ (ก) แผ่นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (ข) ไทเทเนียมไดออกไซด์ และ (ค) ไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ นาโนคอมโพสิตที่มีปริมาณกราฟีนออกไซด์

4.1.11 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับในที่มืด

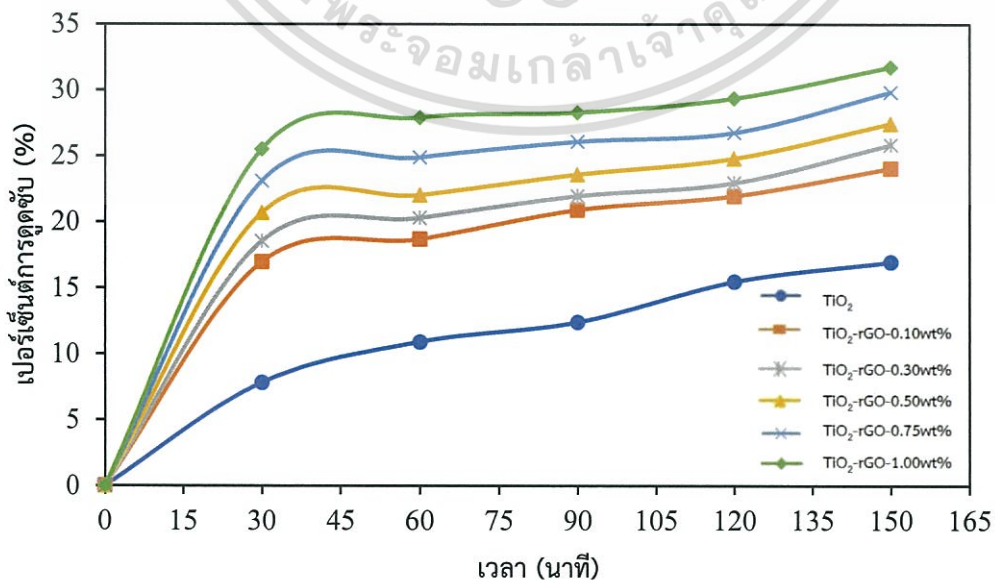
การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับในที่มืดของไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิตในอัตราส่วนของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ 0.10, 0.30, 0.50, 0.75 และ 1.00 wt% เพื่อทดสอบความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลินบลูในที่มืด โดยทำการปั่นกวนตัวเร่งปฏิกิริยากับสีย้อมเมทิลินบลูในตู้มืดแล้วทำการเก็บตัวอย่างสีย้อมทุก ๆ 30 นาที เป็นเวลา 150 นาที โดยประสิทธิภาพการดูดซับในที่มืด แสดงดังตารางที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ค่าประสิทธิภาพการดูดซับในที่มืด

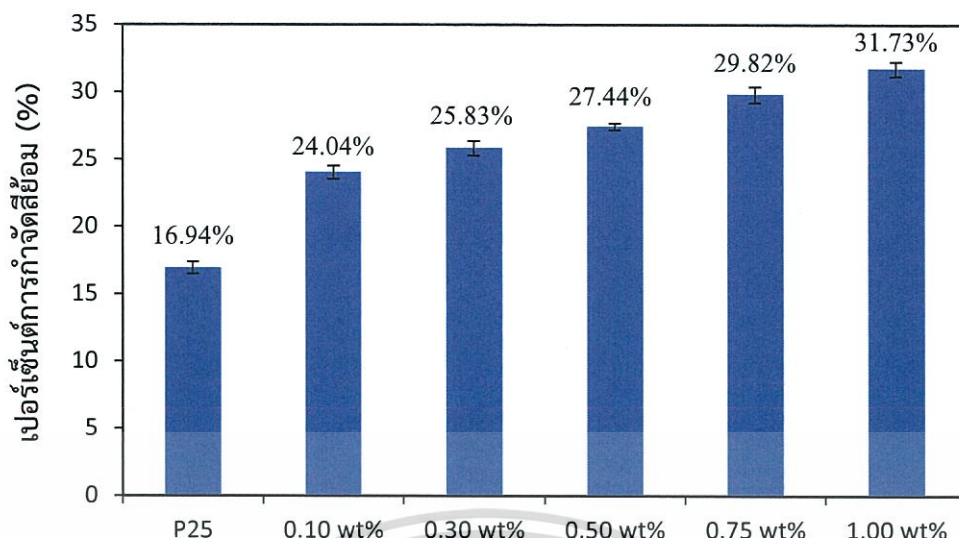
สารตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ				
	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที	150 นาที
TiO ₂	7.81	10.89	12.39	15.45	16.94
TiO ₂ -rGO-0.10 wt%	16.95	18.69	20.89	21.95	24.04
TiO ₂ -rGO-0.30 wt%	18.53	20.28	21.94	22.94	25.83
TiO ₂ -rGO-0.50 wt%	20.69	22.01	25.58	25.79	27.44
TiO ₂ -rGO-0.75 wt%	23.10	24.87	26.06	26.75	29.82
TiO ₂ -rGO-1.00 wt%	25.50	27.89	28.28	29.35	31.73

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.20 แสดงค่าประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มืดของไทเทเนียมไดออกไซด์ (P25) และไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิตที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณ 0.10, 0.30, 0.50, 0.75 และ 1.00 wt% ซึ่งพบว่าในช่วง 30 นาทีแรกมีการดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อเวลาผ่านไปจนถึง 150 นาที การดูดซับเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้นแสดงให้เห็นว่าเพียง 30 นาที การดูดซับจะเริ่มเข้าสู่ใกล้จุดสมดุล ซึ่งค่าการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูที่เวลา 150 นาที ของไทเทเนียมไดออกไซด์ และไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิต แสดงดังรูปที่ 4.21 ผลจากการทดลองพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ นาโนคอมโพสิต ที่เติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณ 1.00 wt% มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับสูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากการมีเปอร์เซ็นต์รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มากที่สุดส่งผลให้นาโนคอมโพสิตนี้มีพื้นที่ผิวสูง ซึ่งสอดคล้องกับเทคนิค BET เนื่องจากรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์เป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวสูงเมื่อมาปกคลุมอยู่บนไทเทเนียมไดออกไซด์จึงเพิ่มความสามารถในการดูดซับมากขึ้น [34]



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับในที่มืดที่เวลา 150 นาที

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ปริมาณรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

รูปที่ 4.21 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มีดที่เวลา 150 นาที

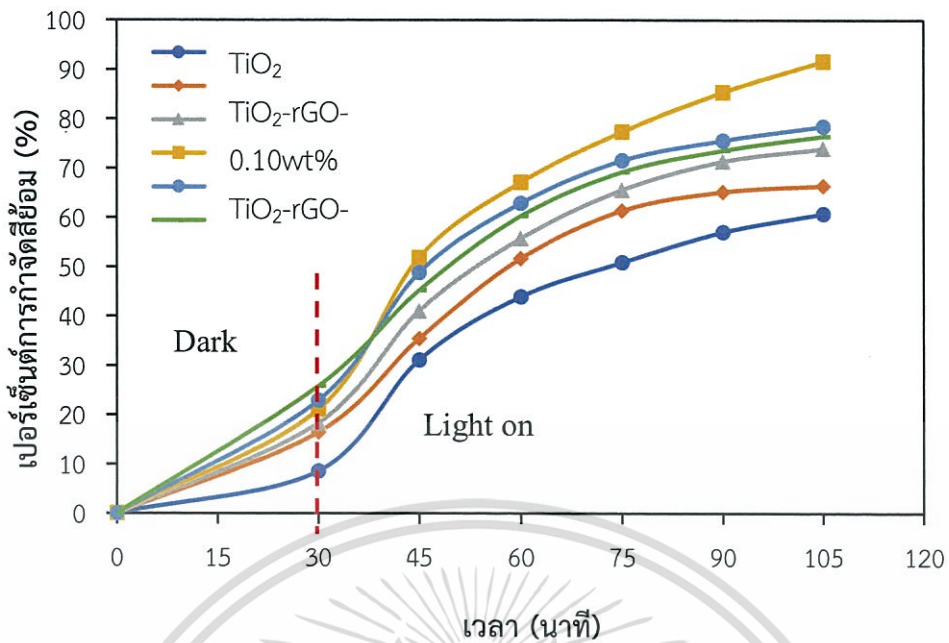
4.1.12 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมภายใต้การฉายแสงยูวี (UV)

การศึกษาประสิทธิภาพในเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิตในอัตราส่วนของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ 0.10, 0.30, 0.50, 0.75 และ 1.00 wt% ในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงยูวีสามารถทำได้โดยทำการปั่นกวนตัวเร่งปฏิกิริยากับสีย้อมเมทิลีนบลูความเข้มข้น 2.5×10^{-5} M ในตู้มืด เป็นเวลา 30 นาที เพื่อทำให้เกิดการสมดุลของการดูดซับจากนั้นทำการเปิดไฟเพื่อฉายแสงยูวีเป็นเวลา 75 นาที และทำการเก็บตัวอย่างทุก ๆ 15 นาที ซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมแสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าประสิทธิภาพการดูดซับและกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงยูวี (UV)

สารตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม					
	30 นาที (ดูดซับ)	15 นาที	30 นาที	45 นาที	60 นาที	75 นาที
TiO ₂	8.56	31.09	43.94	50.87	56.98	60.75
TiO ₂ -rGO-0.10 wt%	16.43	35.45	51.66	61.37	65.16	66.37
TiO ₂ -rGO-0.30 wt%	18.30	40.99	55.70	65.54	71.33	73.92
TiO ₂ -rGO-0.50 wt%	21.02	51.83	67.11	77.34	85.36	97.58
TiO ₂ -rGO-0.75 wt%	22.87	48.83	62.89	71.53	75.58	78.45
TiO ₂ -rGO-1.00 wt%	25.78	45.23	60.27	69.17	73.58	76.45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



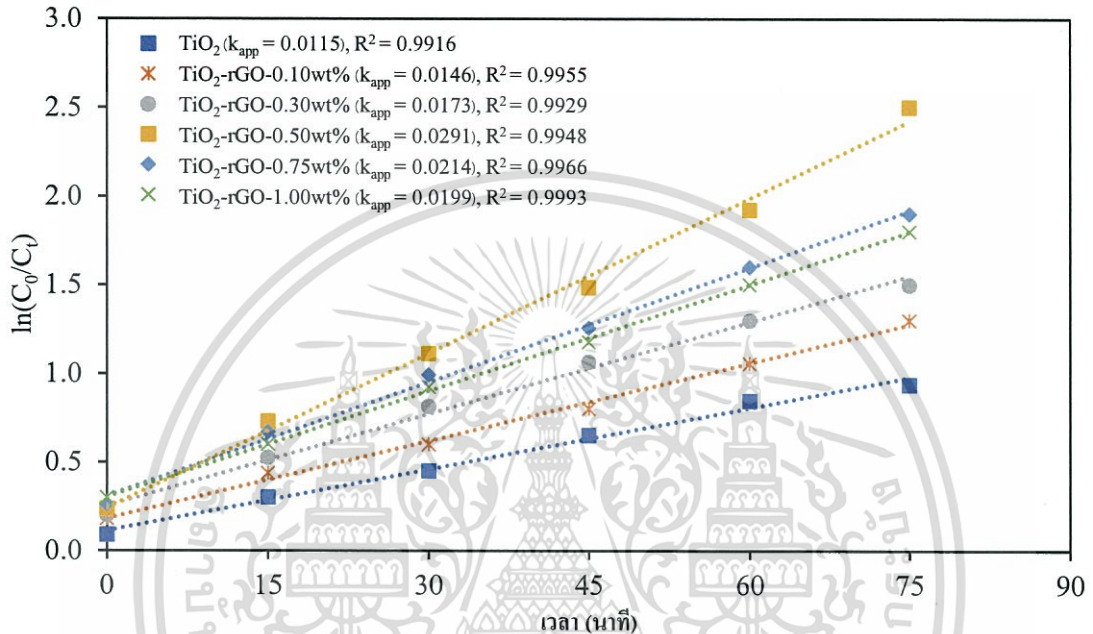
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงยูวี ของไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิตที่เวลา 105 นาที

จากรูปที่ 4.22 แสดงให้เห็นว่าไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ นาโนคอมโพสิต ที่มีปริมาณรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ 0.10, 0.30, 0.50, 0.75 และ 1.00 wt% เมื่อใช้งานภายใต้การฉายแสงยูวีพบว่า ไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ นาโนคอมโพสิต ที่มีปริมาณรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ 0.50 wt% จะแสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัด สีย้อมเมทิลีนบลูที่สูงที่สุด เนื่องจากมีการดูดซับบริเวณแผ่นรีดิวซ์กราฟีน ออกไซด์ และเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกพร้อมกัน

จากรูปที่ 4.23 แสดงอัตราการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในอัตราส่วนรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ 0.10, 0.30, 0.50, 0.75 และ 1.00 wt% ภายใต้การฉายแสงยูวีเป็นเวลา 75 นาที โดยเมทิลีนบลูมีความเข้มข้นเท่ากับ 2.5×10^{-5} M แสดงผลของกราฟแกน x คือ เวลา (นาที) และ แกน y คือ $\ln(C_0/C_t)$ เมื่อนำมาพล็อตกราฟเพื่อหาค่าความชันหรือค่าคงที่ในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู (K_{app}) ตามอันดับปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเทียม [10,26] พบว่า ไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่าคงที่ในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูเท่ากับ 0.0115 ต่อนาที และไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีน-ออกไซด์ในอัตราส่วนรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ 0.10, 0.30, 0.50, 0.75 และ 1.00 wt% มีค่าคงที่ในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูเท่ากับ 0.0146, 0.0173, 0.0291, 0.0214 และ 0.0199 ต่อนาที ตามลำดับ ซึ่งทำให้ทราบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในอัตราส่วนรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ 0.50 wt% นั้นมีค่าคงที่ในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูสูงที่สุดเนื่องมาจากการเกิดการดูดซับจากแผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกร่วมกัน ส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ใส่รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในอัตราส่วน 0.75 และ 1.00 wt% นั้น พบว่าการดูดซับจะดีกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ใส่รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ไปในอัตราส่วน 0.30 wt% แต่การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกนั้นจะมีประสิทธิภาพน้อยกว่าเนื่องมาจากการถูกแผ่นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์บดบังแสงที่มากกระตุ้นตัวเร่งหรือไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกเกิดได้ไม่ดี [35]

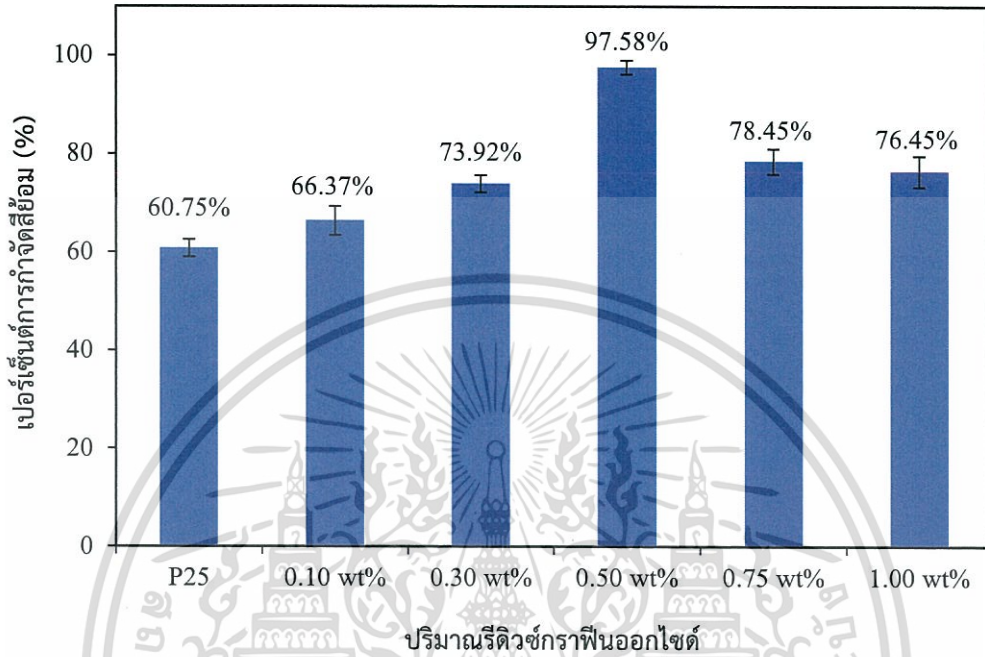


รูปที่ 4.23 กราฟแสดงอัตราเร็วของการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงยูวีเป็นเวลา 75 นาที

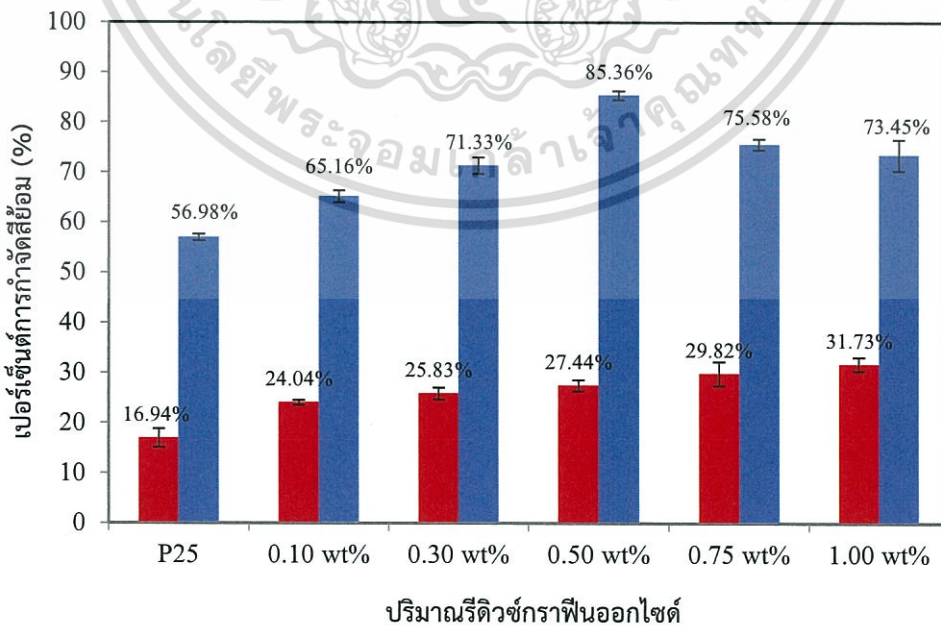
จากรูปที่ 4.24 แสดงค่าประสิทธิภาพในการดูดซับและการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิตที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณ 0.10, 0.30, 0.50, 0.75 และ 1.00 wt% ภายใต้แสงยูวีจะมีค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมเท่ากับ 60.75, 66.37, 73.92, 97.58, 81.05 และ 76.45 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูนั้นเป็นไปในทางที่ดี เนื่องจากเมทิลีนบลูมีประจุเป็นบวก ซึ่งทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ นาโนคอมโพสิต เกิดกระบวนการ 2 อย่าง คือ การดูดซับและกระบวนการโฟโตคะตะไลติก จากไทเทเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเพียง 60.75 เปอร์เซ็นต์เท่านั้นแต่เมื่อเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณ 0.10, 0.30 และ 0.50 wt% จะเห็นได้ว่าค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดนั้นก็เนื่องจากรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีส่วนช่วยในการดูดซับสีย้อม และช่วยลดการเกิดการตกกลับระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล (Recombination) ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก [35] แต่ในกรณีตัวอย่างที่มีเมื่อเติม กราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่มากกว่า 0.50 นั้นคือ 0.75 และ 1.00 wt% ความสามารถในการกำจัดสีย้อมจะลดลง เพราะถึงแม้ว่ากราฟีน-ออกไซด์เกิดการดูดซับสีย้อมในปริมาณที่มากเกินไป แต่ปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกเกิดได้ยากขึ้น เนื่องจากถูกรีดิวซ์-กราฟีนออกไซด์บดบัง จึงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.25 เป็นการแสดงเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูที่เวลา 90 นาที ระหว่างสภาวะภายใต้ที่มืดและการฉายแสงยูวี พบว่าภายใต้การฉายแสงยูวีมีประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูสูงกว่าภายใต้ที่มืด เนื่องจากเมื่อฉายแสงยูวีจะเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก ซึ่งช่วยในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู [28]



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงยูวีที่เวลา 75 นาที (รวมการดูดซับ 30 นาที)



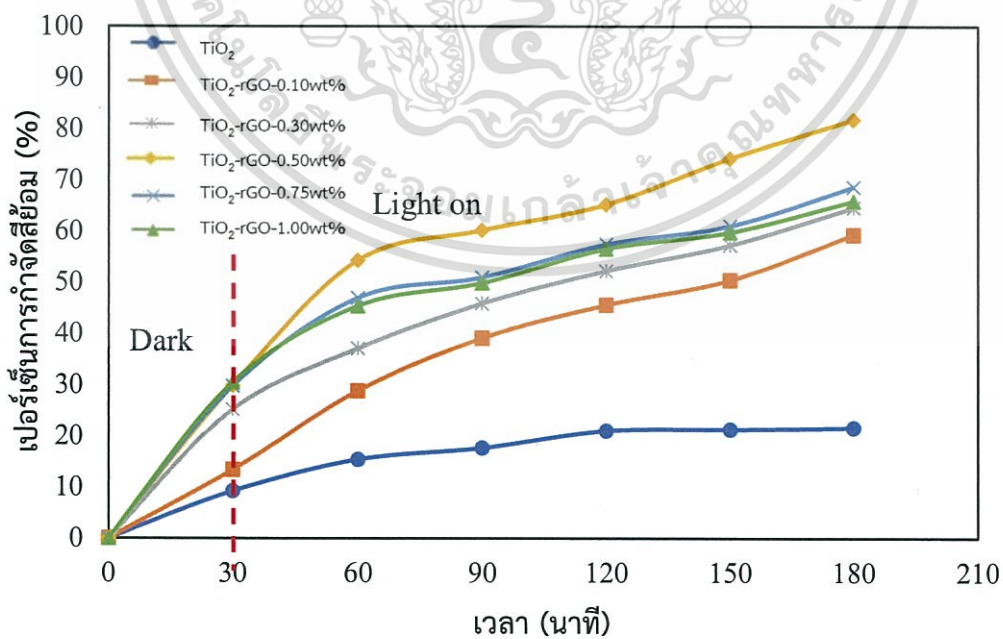
รูปที่ 4.25 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูระหว่างสภาวะในเอกสที่มืดและสภาวะภายใต้แสงยูวีเป็นเวลา 90 นาที การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.13 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล (Visible light)

การศึกษาประสิทธิภาพในเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิตในอัตราส่วนของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ 0.10, 0.30, 0.50, 0.75 และ 1.00 wt% ในการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลูภายใต้การฉายแสงยูวีสามารถทำได้โดยทำการปั่นกววนตัวเร่งปฏิกิริยากับสีย้อมเมทิลินบลูความเข้มข้น 1.25×10^{-5} M ในตุ้มมืด เป็นเวลา 30 นาที เพื่อทำให้เกิดการสมดุลของการดูดซับ จากนั้นทำการเปิดไฟเพื่อฉายแสงวิสิเบิลเป็นเวลา 150 นาที และทำการเก็บตัวอย่างทุก ๆ 30 นาที ซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมแสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าประสิทธิภาพการดูดซับและกำจัดสีย้อมเมทิลินบลูภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล (Visible)

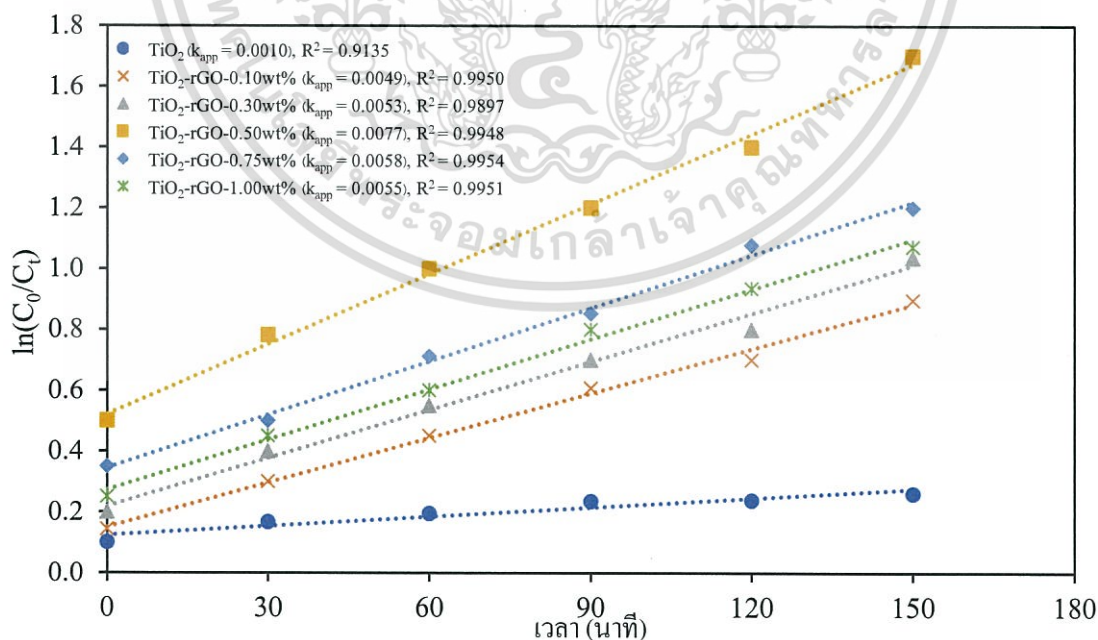
สารตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม					
	0 นาที (ดูดซับ)	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที	150 นาที
TiO ₂	10.19	15.37	17.62	20.93	21.18	21.54
TiO ₂ -rGO-0.10 wt%	13.36	28.77	39.07	45.52	50.37	59.21
TiO ₂ -rGO-0.30 wt%	25.09	37.01	45.80	52.16	57.21	64.55
TiO ₂ -rGO-0.50 wt%	29.80	54.23	60.15	65.14	74.15	81.74
TiO ₂ -rGO-0.75 wt%	29.67	50.93	50.93	57.36	65.95	68.53
TiO ₂ -rGO-1.00 wt%	30.42	45.33	49.82	56.47	60.72	65.79



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลูภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

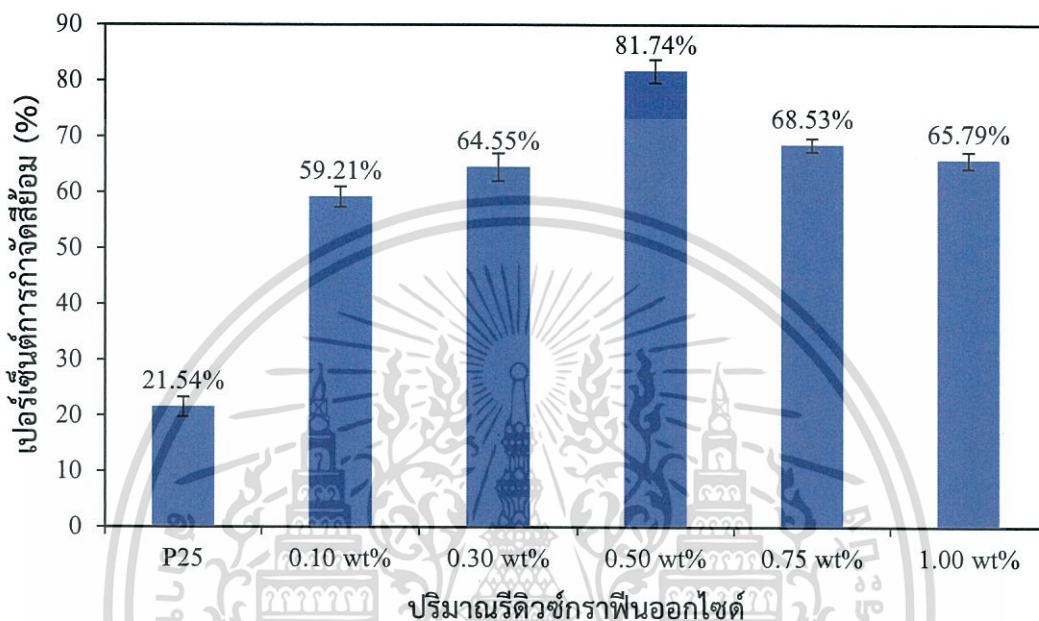
จากรูปที่ 4.27 แสดงอัตราการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในอัตราส่วนรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ 0.10, 0.30, 0.50, 0.75 และ 1.00 wt% ภายใต้การฉายแสงวิซิเบิลในช่วงเวลา 60 ถึง 150 นาที โดยเมทิลีนบลูมีความเข้มข้นเท่ากับ 1.25×10^{-5} M แสดงผลของกราฟแกน x คือ เวลา (นาที) และ แกน y คือ $\ln(C_0/C_t)$ เมื่อนำมาหาค่าความชันหรือค่าคงที่ในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู (K_{app}) พบว่า ไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่าคงที่ในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูเท่ากับ 0.0010 ต่อนาที และไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในอัตราส่วนรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ 0.10, 0.30, 0.50, 0.75 และ 1.00 wt% มีค่าคงที่ในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูเท่ากับ 0.0049, 0.0053, 0.0077, 0.0058 และ 0.0055 ต่อนาที ตามลำดับ ซึ่งทำให้พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์มีอัตราการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่น้อยที่สุดเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกได้น้อยเพราะพลังงานกระตุ้นจากแสงวิซิเบิลมีไม่เพียงพอที่จะกระตุ้นให้ไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก นอกจากนี้ยังพบว่าไทเทเนียม-ไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในอัตราส่วนรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ 0.50 wt% นั้นมีค่าคงที่ในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูสูงที่สุดเนื่องมาจากการเกิดการดูดซับจากแผ่นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกร่วมกัน ส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ใส่รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในอัตราส่วน 0.75 และ 1.00 wt% นั้น พบว่าการดูดซับจะดีกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ใส่รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ไปในอัตราส่วน 0.30 wt% แต่การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกนั้นจะมีประสิทธิภาพน้อยกว่าเนื่องมาจากการถูกแผ่นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์บดบังแสงที่มากกระตุ้นตัวเร่งหรือไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกเกิดได้ไม่ดี [35]



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงอัตราเร็วของการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงวิซิเบิลเป็นเวลา 150 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.28 แสดงค่าประสิทธิภาพในการดูดซับและการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิตที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณ 0.10, 0.30, 0.50, 0.75 และ 1.00 wt% ภายใต้แสงวิซิเบิล เมื่อเวลาเปลี่ยนไป 180 นาที จะหาค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมได้เป็น 21.54, 59.21, 64.55, 81.74, 68.53 และ 65.79 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงวิซิเบิลเป็นเวลา 150 นาที

จากการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงวิซิเบิลของไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้า และไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิตที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณต่างกัน ผลที่ได้คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิต ปริมาณ 0.50 wt% มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมที่ดีที่สุด เนื่องจากการทำงานร่วมกันระหว่างการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูและการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกที่เพิ่มขึ้นจากการลดการเกิดการตกกลับของอิเล็กตรอน

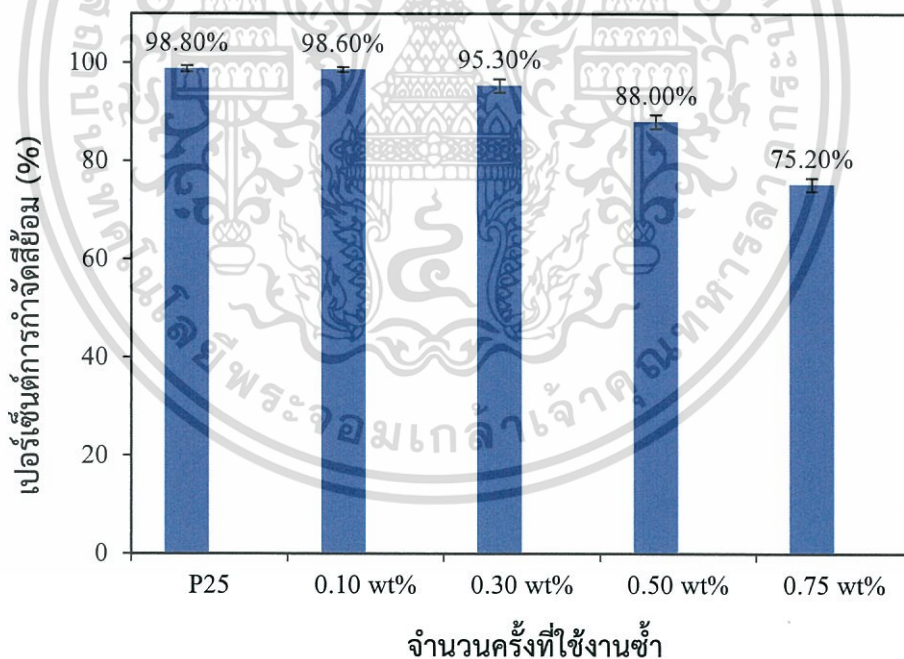
4.1.14 การศึกษาประสิทธิภาพในการใช้งานซ้ำ

จากการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของไทเทเนียมไดออกไซด์ และไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิตที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณต่างกัน ผลลัพธ์ที่ได้คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิต ปริมาณรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ 0.50 wt% ($\text{TiO}_2\text{-rGO-0.50 wt\%}$) มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมที่ดีที่สุด จึงทำการเลือกมาทำการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกภายใต้การฉายแสงยูวีโดยใช้เวลา 75 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นจำนวน 5 ครั้ง เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูว่าจะยังคงประสิทธิภาพดีเท่าเดิมหรือไม่หากผ่านการใช้งานซ้ำหลาย ๆ ครั้ง

จากผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.50 wt% และมีการฉายแสงยูวีเป็นเวลา 75 นาที ดังรูปที่ 4.29 พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมครั้งที่ 1 มีค่าเท่ากับ 98.80 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำไปทดสอบครั้งที่ 2 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมลดลงเล็กน้อย ซึ่งมีค่าเท่ากับ 98.60 เปอร์เซ็นต์ นำไปทดสอบต่อเป็นครั้งที่ 3 จะได้ค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู ลดลงไปเหลือ 95.30 เปอร์เซ็นต์ และนำไปทดสอบต่อครั้งที่ 4 และ 5 จะได้เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูลดลงเหลือเพียง 88.00 และ 75.20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อนำไปใช้งานซ้ำหลาย ๆ ครั้ง ประสิทธิภาพในการกำจัด สีย้อมเมทิลีนบลูของไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิตลดลงเนื่องจากเมื่อทำการใช้งานไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิตไปหลายครั้งจะทำให้เมทิลีนบลูเข้าไปเกาะบริเวณโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิตส่งผลทำให้การทำงานของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกลดลงเพราะการดูดซับในครั้งถัดไปจะน้อยลงเรื่อย ๆ รวมทั้งสีย้อมเมทิลีนบลูที่เคลือบบนอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์อาจไปบดบังแสงทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ทำงานได้ไม่ดีจึงส่งผลให้มีประสิทธิภาพลดลง [34]



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิต ที่เติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ 0.50 wt% โดยการทำการทดสอบ 5 ครั้ง โดยใช้เวลาภายใต้การฉายแสงยูวี 75 นาที

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

โครงการพิเศษนี้จากการทดลองทำให้สามารถยืนยันถึงความเป็นไปได้ของการใช้วัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิตที่เติมปริมาณกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่ต่าง ๆ กัน มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูได้จริง สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ในกระบวนการสังเคราะห์วัสดุผสมไทเทเนียม-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิตมีการใช้วิตามินซีเป็นตัวรีดิวซ์ และทำให้สภาพพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นประจุบวก สามารถเกาะบนพื้นผิวของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ได้ดีขึ้นซึ่งตรงกับผลของ SEM, TEM และ Raman

2. ในการทดสอบประสิทธิภาพของการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูพบว่า เมื่อมีการเติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณต่าง ๆ ลงในไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูโดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นเพราะสามารถลดกระบวนการตกกลับของอิเล็กตรอน (Recombination) ซึ่งตรงกับผลการทดลองในการกำจัดสีย้อมภายใต้การฉายแสงยูวีและแสงวิซิเบิล

3. เมื่อมีการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณต่าง ๆ พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในอัตราส่วนที่สูงขึ้นจะทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดีขึ้น เพราะรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์เป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวสูง เมื่อนำมาผสมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ จะทำให้ได้วัสดุผสมที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดีขึ้น

4. ในการทดสอบประสิทธิภาพของการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูพบว่า ไทเทเนียมไดออกไซด์ (P25) สามารถกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงยูวีเท่านั้น แต่เมื่อมีการเติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณต่าง ๆ ทำให้วัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิต สามารถกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงยูวีและวิซิเบิลได้ดียิ่งขึ้น

5. ในการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู โดยการฉายแสงยูวีและวิซิเบิลพบว่าอัตราส่วนรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ 0.50 wt% เป็นอัตราส่วนที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูได้ดีที่สุด โดยภายใต้การฉายแสงยูวีสามารถกำจัดได้ 98 เปอร์เซ็นต์ และภายใต้การฉายแสงวิซิเบิลสามารถกำจัดได้ 81 เปอร์เซ็นต์

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ศึกษาเพิ่มเติมวิธีการนำสารตัวอย่างที่ได้จากการฉายแสงยูวีและแสงวิซิเบิล ไปตรวจสอบด้วยเทคนิค UV-Visible spectrophotometer โดยไม่มีตะกอนหลงเหลืออยู่

5.2.2 ผลการวิจัยครั้งนี้สามารถกำจัดสีย้อมได้จริง และมีประสิทธิภาพสูงมาก แต่มีข้อเสียคือไม่สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมได้โดยตรง เนื่องจากวัสดุผสมที่ได้จากการสังเคราะห์เป็นผงละเอียดต้องผ่านกรรมวิธีดัดแปลงให้เป็นวัสดุที่ง่ายต่อการใช้งาน ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.3 ในกระบวนการสังเคราะห์วัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์รีติวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิตนั้น อาจทำให้รีติวซ์กราฟีนออกไซด์มีการกระจายตัวไม่ทั่วไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งเป็นผลให้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก มีประสิทธิภาพไม่ดีที่สุด เนื่องจากความไม่ชำนาญของผู้ทดลอง และขีดจำกัดของเครื่องมือที่ใช้

5.2.4 สารที่ใช้ในการทดลองเช่น ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ ผงเมทิลีนบลู ผงกราฟีนออกไซด์มีลักษณะเป็นผงขนาดเล็ก ควรทำการศึกษาทดลองด้วยความระมัดระวังและสวมใส่เสื้อกาวน์ทุกครั้งที่ทำกรทดลอง

5.2.5 ควรศึกษาแนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูกับการผสมกับสารกลุ่มอื่น ๆ ร่วมด้วย เช่น คาร์บอนนาโนไฟเบอร์ ซิลเวอร์ เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Z. Xiangkang, W. Zhouyou, M. Na, T. David, P. Jia-hong and Z. Xiwang. 2017. "Highly dispersed TiO₂ nanocrystals and carbon dots on reduced graphene oxide: Ternary nanocomposites for accelerated photocatalytic water disinfection." *Environmental* 202 : 33–41.
- [2] Y. Jiemei, L. Zongming, Z. Limin, H. Taizhong and H. Jitian. 2016. "Reduced graphene oxide supported TiO₂ as high-performance catalysts for oxygen reduction reaction." *Journal of hydrogen energy* 41 : 3436-3445.
- [3] Z. Lei, L. Zhao, L. Minghui, Y. Jin, S. Wulin, Z. Dawen and X. Changsheng. 2016. "A modular calcination method to prepare modified N-doped TiO₂ nanoparticle with high photocatalytic activity." *Applied Catalysis B: Environmental* 183 : 308-316.
- [4] S. Jianguo, W. Xinzhi and C. Chang-Tan. 2014. "Preparation and Characterization of Graphene Oxide." *Journal of Nanomaterials Volume* 276-143.
- [5] C. Yuan-Cheng, F. Zhongtian, W. Wenjun, Z. Linling, M. Tie, H. Dan, Y. Chaolu, L. Xiyou, Z. Ying, C. Liuqing and S. Yuanjie. 2015. "Reduced graphene oxide supported titanium dioxide nanomaterials for the photocatalysis with long cycling life." *Applied Surface Science* 355 : 1289–1294.
- [6] S.O. Fatin, H.N. Lim, W.T. Tan and N.M. Huang. 2012. "Comparison of Photocatalytic Activity and Cyclic Voltammetry of Zinc Oxide and Titanium Dioxide Nanoparticles toward Degradation of Methylene Blue." *Journal of Electrochem Science* 7 : 9074-9084.
- [7] K. Chang Hyo, K. Bo-Hye and Y. Kap Seung. 2012. "TiO₂ nanoparticles loaded on graphene/carbon composite nanofibers by electrospinning for increased photocatalysis." *CARBON* 50 : 2472–2481.
- [8] S. Min, S. Jianfeng, M. Hongwei, L. Zhiqiang, L. Xin, L. Na and Y. Mingxin. 2012. "Preparation of graphene–TiO₂ composite by hydrothermal method from peroxotitanium acid and its photocatalytic properties." *Physicochem Engineer Aspects* 405 : 30–37.

- [9] D. Hui, Z. Sam, C. Ji-Tao, H. Xiao-Ping, D. Zhao-Fu, Q. Yue-Xiu and Z. Dong-Liang. 2015. "Reduction of graphene oxide at room temperature with vitamin C for RGO-TiO₂ photoanodes in dye-sensitized solar cell." *Thin Solid Films*.
- [10] R. Xinshan, Q. Fengxian, Z. Chen, F. Liang, W. Yuanyuan and Y. Dongya. 2015. "Preparation, characterization and photocatalytic application of TiO₂-graphene photocatalyst under visible light irradiation." *Ceramics International* 41 : 2502-2511.
- [11] นัดดา เวชชากุล. 2556. "การกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานาโนไทเทเนียมไดออกไซด์." ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [12] กาญจนา ลือพงษ์ และ นงนุช ศศิธร. 2553. "การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมด้วยเทคนิคโฟโตคะตะไลติกร่วมกับกระบวนการดูดซับ." กรุงเทพมหานคร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [13] สรรค์ จิตรไคร์ครวญ. 2552. "การทำความสะอาดโดยตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์." วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ.
- [14] อานันท์ปภา ชื่นทรัพย์. 2555. "การบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้ทังสเตนไดออกไซด์." สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [15] อติพล สว่างอารมณ์. 2557. "การเปรียบเทียบปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกกับกระบวนการสังเคราะห์ด้วย." สาขาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- [16] ชลดา อีกรูณวงศ์. 2555. "วัสดุนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์: การสังเคราะห์ โครงสร้าง การประยุกต์ใช้." ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์.
- [17] C. Wonbong and L. Jo-won. "Graphene Synthesis and Applications." *CRC Press Taylor & Francis Group*.
- [18] สารานุกรมเสรี. 2560. กราไฟต์. [Online]. Available : <http://cwarttool.blogspot.com/2016/01/graphite-graphite-pencils.html>
- [19] นิรนาม. 2554. กราฟีนวัสดุมหัศจรรย์. [Online]. Available : <http://www.vcharkarn.com/varticle/41610>
- [20] สารานุกรมเสรี. 2559. กราฟีน. [Online]. Available : <https://th.wikipedia.org/wiki/แกรฟีน>
- [21] สารานุกรมเสรี. 2560. วิตามินซี. [Online]. Available : <https://th.wikipedia.org/wiki/วิตามินซี>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [22] G. Jian, L. Fang, L. Yiliu, M. Ning, W. Zhiqiang, and Z. Xi. “Environment-Friendly Method to Produce Graphene That Employs Vitamin C and Amino Acid” *Chemistry Mater* 22 : 2213–2218.
- [23] Anonymous. 2017. **Methylene blue**. [Online]. Available : https://en.wikipedia.org/wiki/Methylene_blue
- [24] L. Jing, L. Chun-yan and L. Yun. 2012. “Au/graphene hydrogel: synthesis, characterization and its use for catalytic reduction of 4-nitrophenol.” *Journal of Material Chemistry*.
- [25] L. Shizhen, S. Hongqi, L. Shaomin and W. Shaobin. 2013. “Graphene facilitated visible light photodegradation of methylene blue over titanium dioxide photocatalysts.” *Chemical Engineering Journal* 214 : 298–303.
- [26] K.D. Pawan, T. Prashant, R.S. Tiwari , A.S.K. Sinha and O.N. Srivastava. 2013. “Synthesis of reduced graphene oxide TiO₂ nanoparticle composite systems and its application in hydrogen production.” *International journal of hydrogen energy* 39 : 16282-16292.
- [27] Z. Zhe, Y. Wenshu, Z. Xiaoxin, X. Fugang, W. Xiaodan, Z. Bailin and T. Jilin. 2012. “One-pot, solvothermal synthesis of TiO₂–graphene composite nanosheets.” *Journal of Colloid and Interface Science* 386 : 198–204.
- [28] Y. Wein-Duo, L. Yan-Ru and L. Yi-Chao. 2016. “Synthesis of r-GO/TiO₂ composites via the UV-assisted photocatalytic reduction of graphene oxide.” *Applied Surface Science* 380 : 249–256.
- [29] Y. Yuhao, L. Enzhou, D. Hongzhe, K. Limin, W. Huitong, F. Jun, H. Xiaoyun and Hanchen Liu. 2013. “Photocatalytic activity of Age TiO₂-graphene ternary nanocomposites and application in hydrogen evolution by water splitting.” *International journal of hydrogen energy* 39 : 7664-7671.
- [30] N. Esmail, R.M. Mohammad and L. Panagiotis. 2016. “Impact of preparation method of TiO₂-RGO nanocomposite photoanodes on the performance of dye-sensitized solar cells.” *Electrochimica Acta* 219 : 38–48.
- [31] M.J. Agnieszka, K. Joanna, L. Rafał, Z. Dariusz, C. Ewelina, S. Maciej and O. Andrzej. 2016. “Synthesis of RGO/TiO₂ nanocomposite flakes and characterization of their unique electrostatic properties using zeta potential measurements.” *Journal of Alloys and Compounds* 679 : 470- 484.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [32] T. Lling-Lling, O. Wee-Jun, C. Siang-Piao and R.M. Abdul Rahman. 2013. "Reduced graphene oxide-TiO₂ nanocomposite as a promising visible-light-active photocatalyst for the conversion of carbon dioxide." *Tan et al. Nanoscale Research Letters* 8 : 465.
- [33] L. Xinning, G.W Teresa and W. Ying Wang. 2014. "Enhanced photocatalytic activity of graphene oxide/titania nanosheets composites for methylene blue degradation." *Materials Science in Semiconductor Processing*.
- [34] D. Kaituo, H. Jiandong, L. Junxue, L. Fengting, Y. Lianqing, Z. Yaping, Z. Xiaoyan and M. Hongzhang. 2016. "Photocatalytic performance of Cu₂O-loaded TiO₂/rGO nano heterojunctions obtained by UV reduction." *Journal Material Science* 52 : 6754–6766.
- [35] C. Yea, M.H. Nay, R.M. Abdul, N. Yusoff, R.M. Muhamad, H. Ian, N.L. Hong and H.L. Chin Hu. 2012. "Facile hydrothermal preparation of titanium dioxide decorated reduced graphene oxide nanocomposite." *International Journal of Nanomedicine* 80 : 7.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

การเตรียมสารละลายย้อมสีแคราะห์และการคำนวณค่าร้อยละการกำจัดสีย้อม

การเตรียมเมทิลีนบลู (Methylene Blue, MB) สูตรโครงสร้าง คือ $C_{16}H_{18}N_3SCl$
เตรียมสีย้อมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 2.5×10^{-5} M

วิธีทำ

- ชั่งผงเมทิลีนบลูที่ 0.0080 กรัม ในปิเกตอร์แล้วเติมน้ำกลั่น คนให้ละลาย
- เทลงในขวดปรับปริมาตร 1,000 มิลลิตร ด้วยน้ำกลั่น

การคำนวณค่าร้อยละการกำจัดสีย้อม

การคำนวณค่าร้อยละการกำจัดสีย้อม

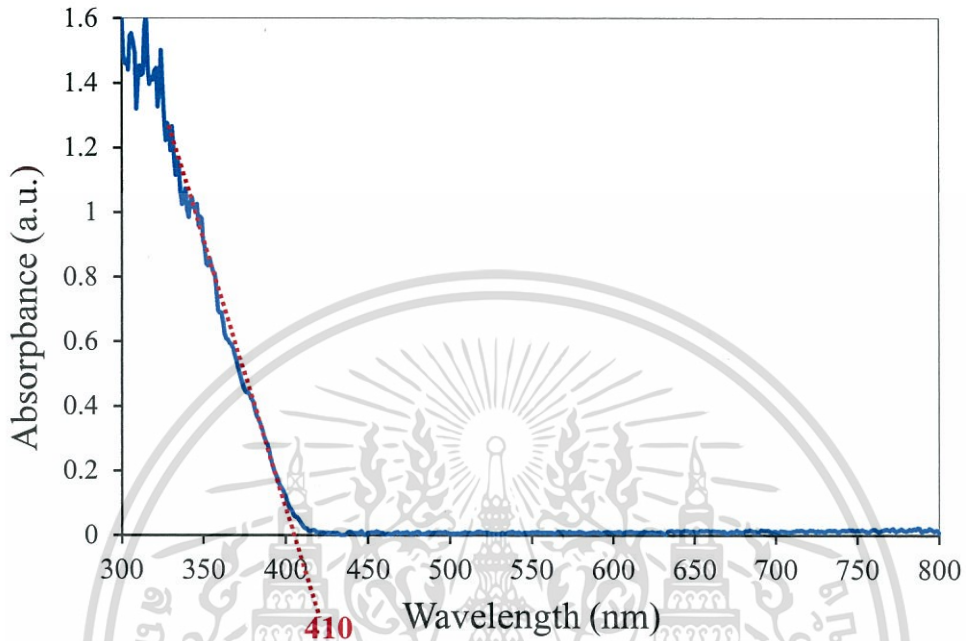
$$\text{จากสูตร } \% \text{การกำจัดสีย้อม} = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100\%$$

A_0 = ค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้น

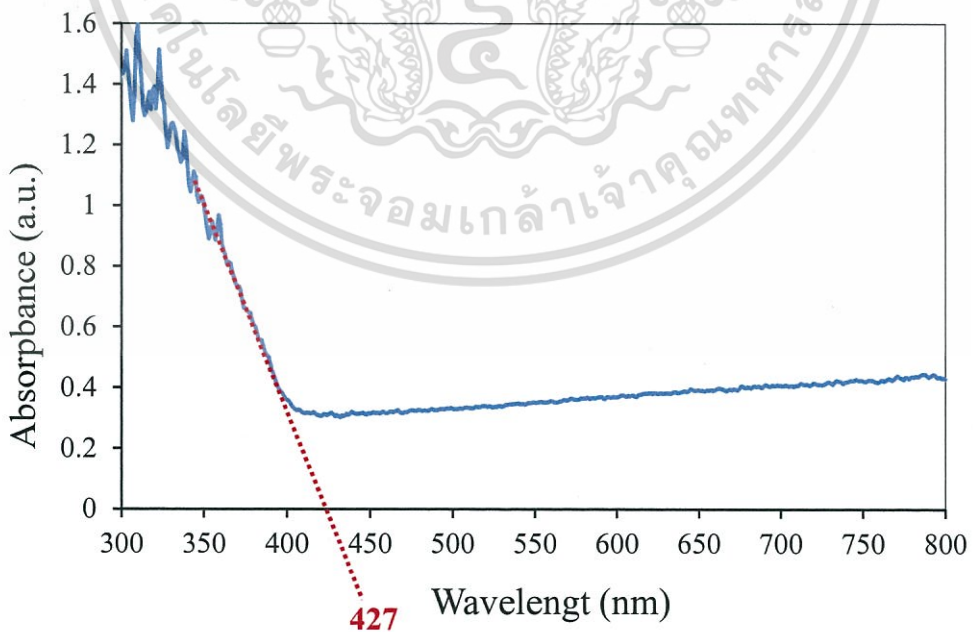
A_t = ค่าการดูดกลืนแสงที่เวลาต่างกัน

ภาคผนวก ข.

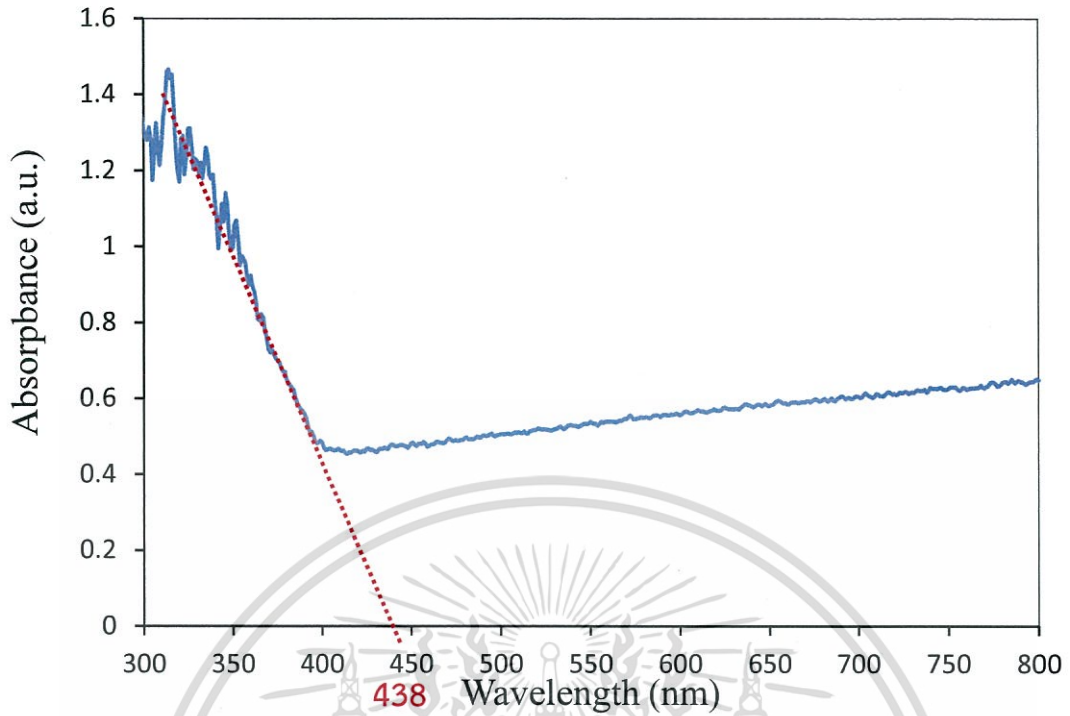
1. UV-Visible Diffuse Reflectance Spectroscopy



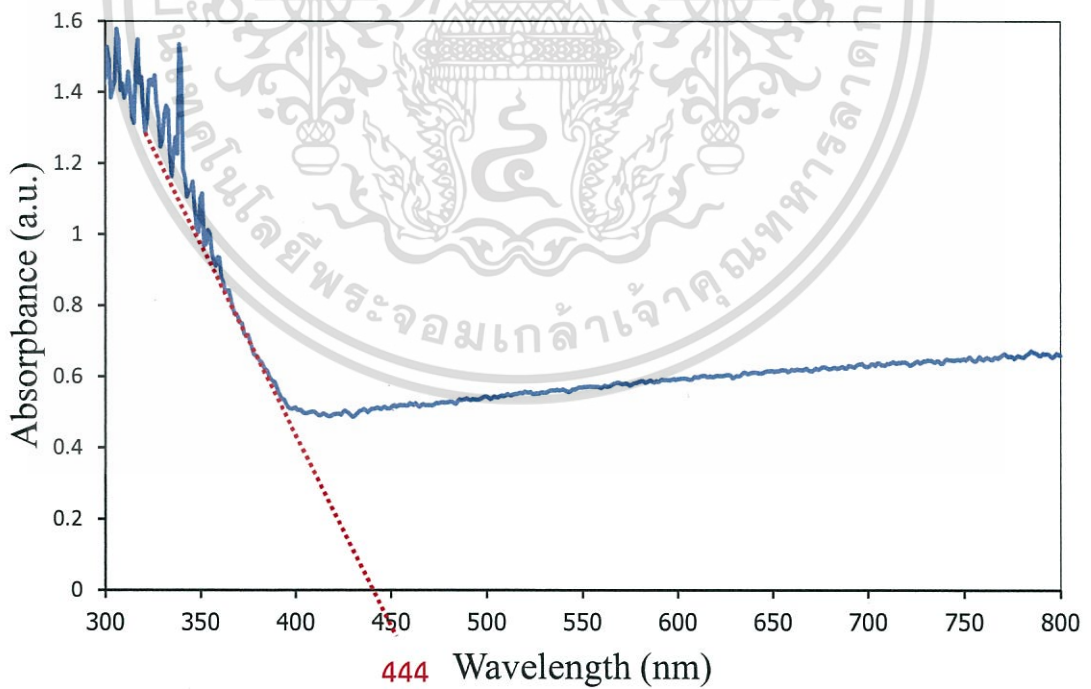
รูปที่ ข-1 DRS Spectra ของไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้า



รูปที่ ข-2 DRS Spectra ของไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิตที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

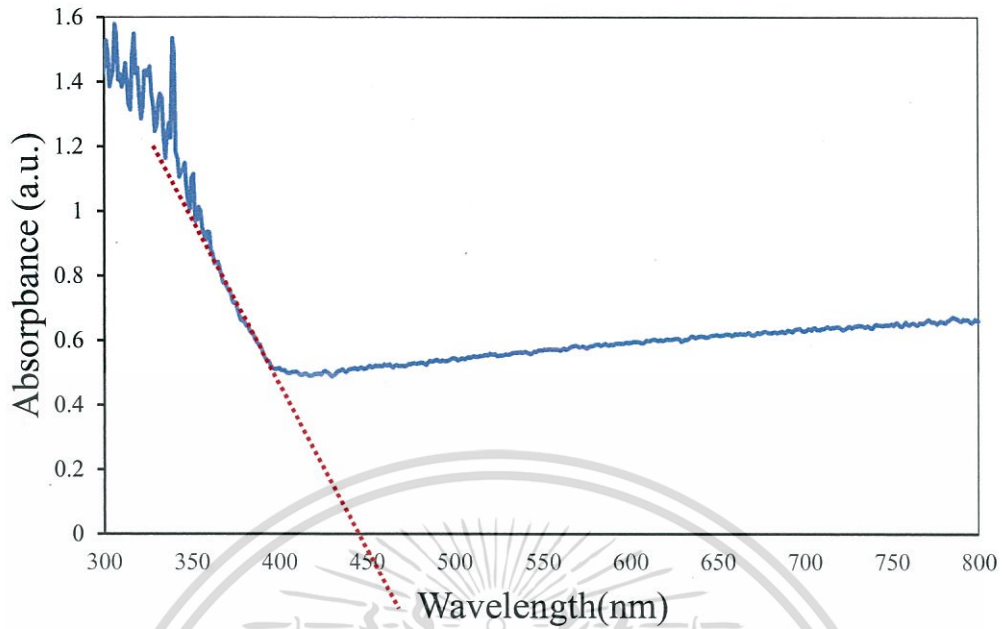


รูปที่ ข-3 DRS Spectra ของไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ นาโนคอมโพสิตที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

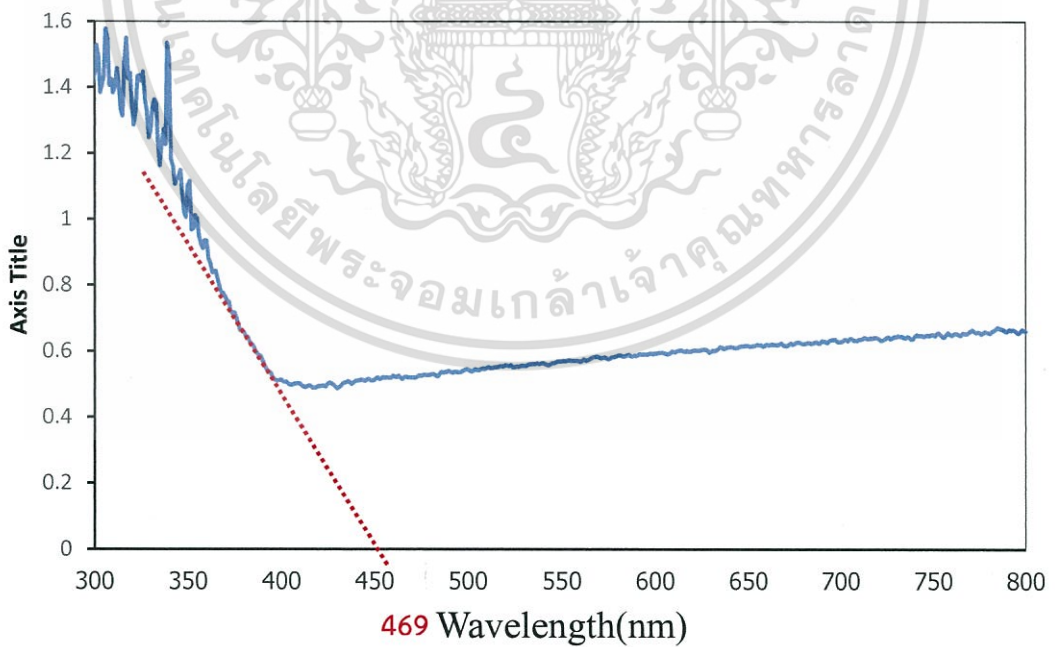


รูปที่ ข-4 DRS Spectra ของไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิตที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



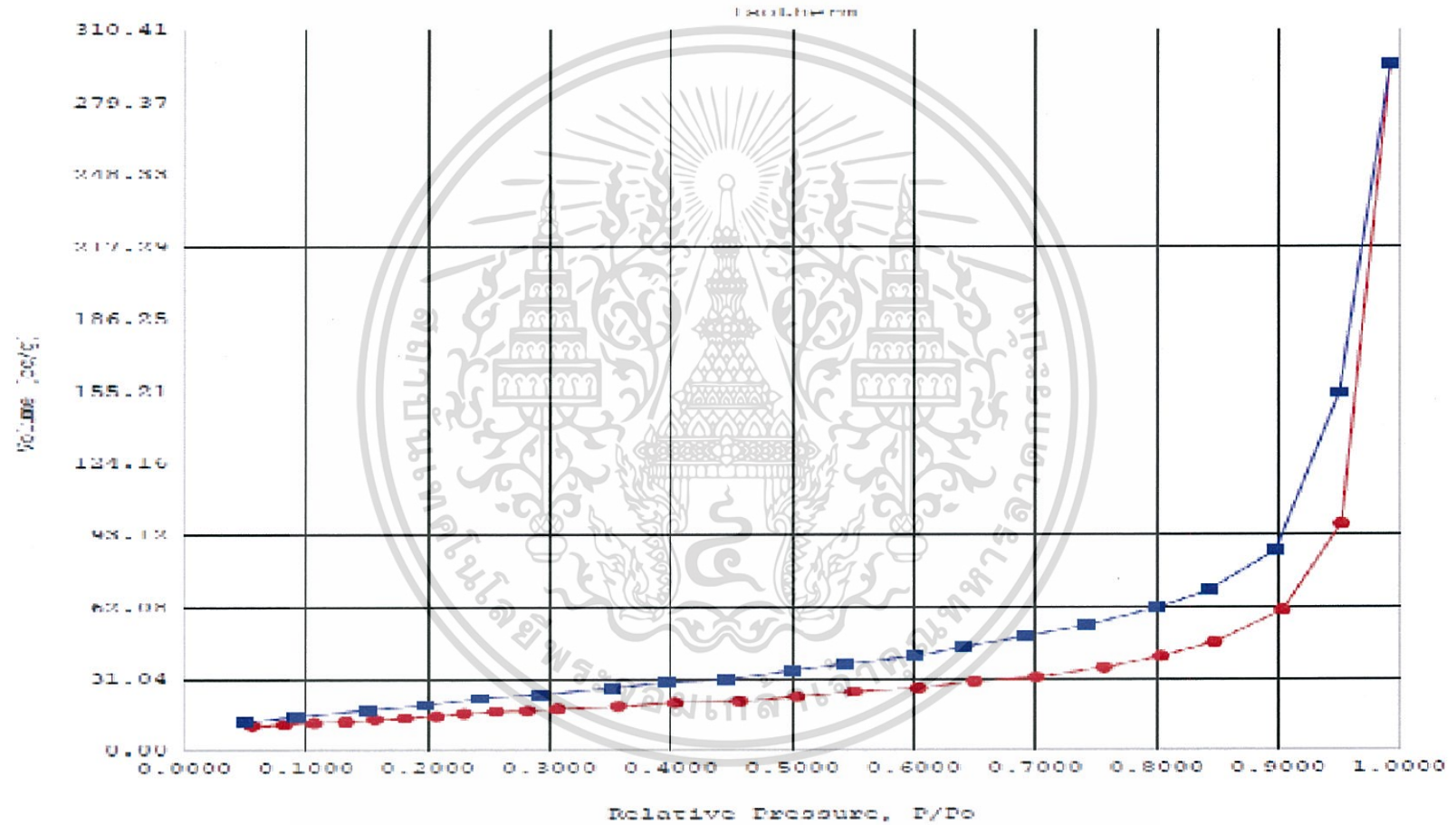
รูปที่ ข-5 DRS Spectra ของไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ นาโนคอมโพสิตที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



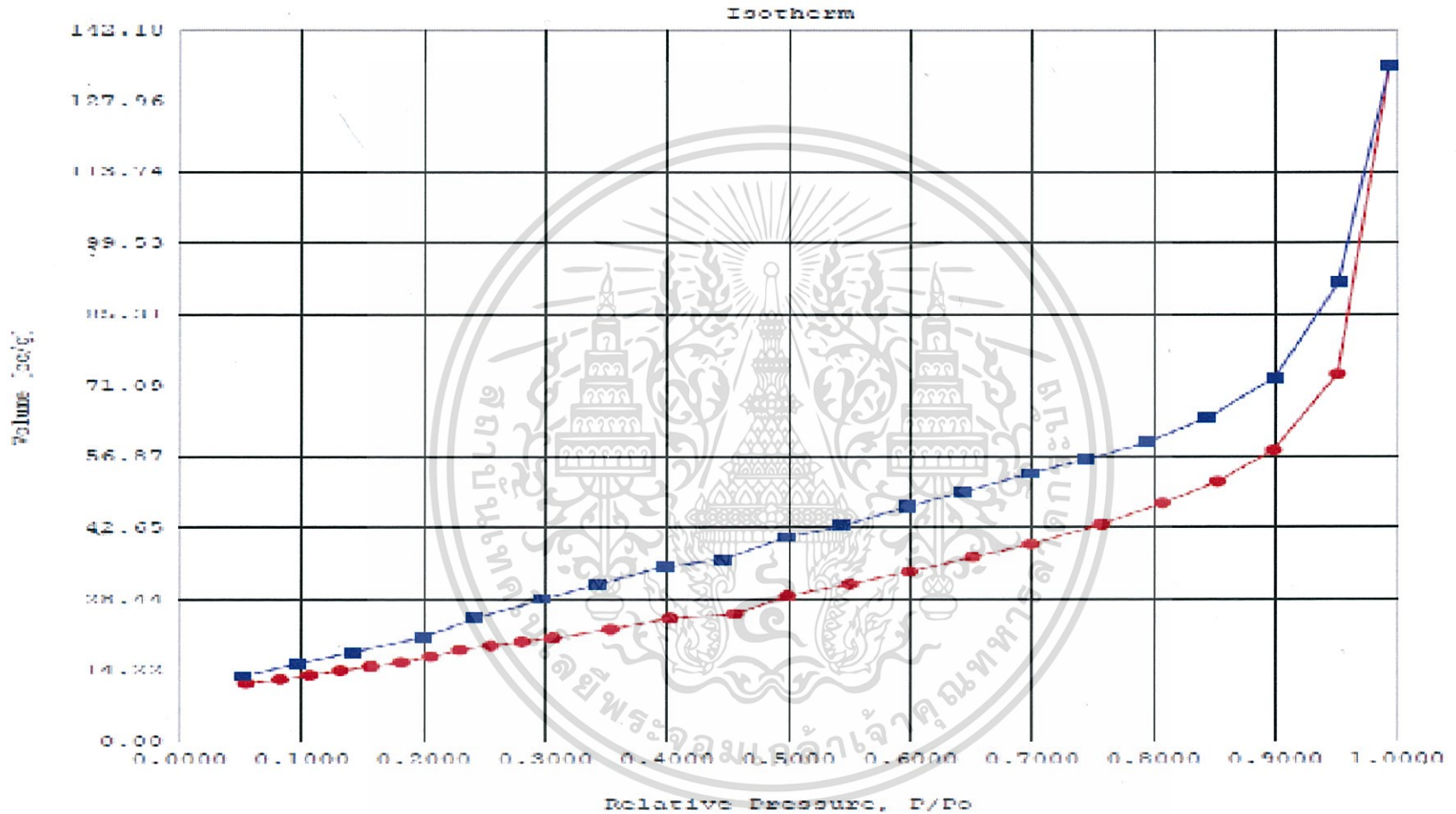
รูปที่ ข-6 DRS Spectra ของไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ นาโนคอมโพสิตที่เติมกราฟีนออกไซด์ 1.00 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Isotherm



ข-7 Isotherm ของโทเทเนียมไดออกไซด์



ข-8 Isotherm ของไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นาโนคอมโพสิต ที่มีปริมาณกราฟีนออกไซด์ 0.50 wt%