

การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์และสมบัติโฟโตคะตะไลติกของแผ่น
ยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

PREPARATION, CHARACTERIZATION AND PHOTOCATALYTIC
PROPERTIES OF rGO/TiO₂ /NATURAL RUBBER COMPOSITE SHEETS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมี (เคมีอินทรีย์)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-SC-M-012-039

การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์และสมบัติโฟโตคะตะไลติกของแผ่น
ยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

PREPARATION, CHARACTERIZATION AND PHOTOCATALYTIC
PROPERTIES OF rGO/TiO₂/NATURAL RUBBER COMPOSITE SHEETS



วรพล เตชางกูร
Worapol Tejangkura

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมี (เคมีอินทรีย์)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2560

KMITL-2017-SC-M-012-039

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PREPARATION, CHARACTERIZATION AND PHOTOCATALYTIC
PROPERTIES OF rGO/TiO₂/NATURAL RUBBER COMPOSITE SHEETS



Worapol Tejangkura

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN CHEMISTRY (INORGANIC CHEMISTRY)

DEPARTMENT OF CHEMISTRY

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2017

KMITL-2017-SC-M-012-039

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ “การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์และสมบัติโฟโตคะตะไลติกของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์”
“PREPARATION, CHARACTERIZATION AND PHOTOCATALYTIC PROPERTIES OF rGO/TiO₂/NATURAL RUBBER COMPOSITE SHEETS”

ชื่อนักศึกษา นายวรพล เตชางกูร
รหัสประจำตัว 57605035
ปริญญา วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (สาขาวิชาเคมี)
ภาควิชา เคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปานไพลิน สีหาราช ประธานกรรมการ ดร.กิตติศักดิ์ ชูจันทร์ อาจารย์บัณฑิตประจำ (ในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชีวิตา สุวรรณขวลิต ผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอกสถาบันฯ ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	

วัน/ เดือน/ ปี ที่สอบ พุทธศักราช ๒๕๖๐ 09.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้อง 302 อาคารพระจอมเกล้า

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ดุชนี ธนะบริพัฒน์)
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ ๒๐ เดือน ๗ พ.ศ. ๖๐

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์และสมบัติโฟโตคะตะไลติกของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์
ชื่อนักศึกษา	นายวรพล เตชาขงูร
รหัสประจำตัว	57605035
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เคมีอินทรีย์)
ภาควิชา	เคมี
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร. ชวาลย์ ศรีวงษ์

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์ และการศึกษาสมบัติโฟโตคะตะไลติกของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (RT-rGO) รวมทั้งยังได้ทำการศึกษสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงความร้อนของแผ่นของผสมนี้อีกด้วย ขั้นตอนกระบวนการเตรียมจะเริ่มจากการเตรียมสารแขวนลอยรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ขึ้นมาก่อนด้วยกระบวนการรีดักชันทางเคมีของสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ที่เป็นสารตั้งต้น จากนั้นแผ่นของผสมสามารถเตรียมได้อย่างง่ายด้วยกระบวนการผสมและเทขึ้นรูปแบบลาเท็กซ์ ภายใต้การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์และน้ำยางธรรมชาติในปริมาณคงที่ โดยมีปริมาณของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่แตกต่างกัน ได้แก่ 1.6 3.2 4.8 6.2 และ 7.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก หลังจากนั้นแผ่นของผสมที่เตรียมได้จะสามารถพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะได้ด้วยเทคนิคต่าง ๆ ดังนี้ เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FTIR) เครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์ (Raman) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) อุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDS) และเครื่องวิเคราะห์การกระจายและการสะท้อนของแสงอัลตราไวโอเล็ตและวิชิเบิล (DRS) เป็นต้น ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างผลึกและหมู่ฟังก์ชันของแผ่นของผสมมีความสอดคล้องกับยางธรรมชาติและไทเทเนียมไดออกไซด์เริ่มต้น ในส่วนของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่มีอยู่ในแผ่นของผสมสามารถตรวจพบพีคเอกลักษณ์และยืนยันได้เป็นอย่างดีด้วยเทคนิครามาน ผลของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าแผ่นของผสมมีความขรุขระเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เติมลงไปมากขึ้น ผลจากเทคนิค DRS พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์จะทำให้ขอบเขตการดูดกลืนแสงเคลื่อนที่ไปอยู่ในช่วงแสงวิชิเบิลได้มากขึ้น ซึ่งเป็นเหตุผลที่ทำให้แผ่นของผสมสามารถใช้งานได้ทั้งภายใต้แสงวิชิเบิลและ

แสงอาทิตย์ ผลการทดสอบแรงดึง (ค่ามอดูลัสของยัง ค่าการคงรูป ค่าความเค้นสูงสุด และค่าแรงดึงที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดขาด) พบว่าแผ่นของผสมมีสมบัติเชิงกลที่สูงขึ้นตามปริมาณของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากการเข้ากันได้ดีระหว่างยางธรรมชาติ โทเทเนียมไดออกไซด์ และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ในส่วนของสมบัติเชิงความร้อนพบว่าแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นของผสมในแต่ละตัวอย่างมีอุณหภูมิการสลายตัวที่ไม่แตกต่างกัน นอกจากนี้การศึกษาประสิทธิภาพกระบวนการโฟโตคะตะไลติกของแผ่นของผสมสามารถหาได้จากความสามารถในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต แสงวิซิเบิล และแสงอาทิตย์ ผลปรากฏว่าแผ่นของผสมที่มีการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมได้ดีกว่าแผ่นของผสมที่ไม่ได้เติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ซึ่งมีกลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกในการกำจัดสีย้อมเป็นแบบอันดับหนึ่งเทียม โดยแผ่นของผสมที่มีการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ 6.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (RT-rGO6.2%) มีประสิทธิภาพการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกในการกำจัดสีย้อมได้ดีที่สุดทั้งภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต แสงวิซิเบิล และแสงอาทิตย์ ทั้งนี้เนื่องมาจากรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์สามารถช่วยลดการรวมตัวกันระหว่างอิเล็กตรอนและโฮลของโทเทเนียมไดออกไซด์ อีกทั้งยังเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทอิเล็กตรอนและความสามารถในการดูดซับให้กับแผ่นของผสม ทำให้แผ่นของผสมนี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมที่สูงที่สุด นอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลของค่า pH และความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลู รวมไปถึงประสิทธิภาพในการใช้งานซ้ำของแผ่นของผสม RT-rGO6.2% ผลปรากฏว่าแผ่นของผสมนี้สามารถนำกลับมาใช้งานซ้ำได้หลายครั้งในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกเพื่อกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต ดังนั้นแผ่นยางธรรมชาติผสมโทเทเนียมไดออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นี้จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรมได้

คำสำคัญ: กระบวนการโฟโตคะตะไลติก โทเทเนียมไดออกไซด์ น้ายางธรรมชาติ แผ่นของผสม-ยางธรรมชาติ รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

Thesis Title	Preparation, Characterization and Photocatalytic Properties of rGO/TiO ₂ /Natural Rubber Composite Sheets
Student	Mr. Worapol Tejangkura
Student ID	57605035
Degree	Master of Science (Inorganic Chemistry)
Department	Chemistry
Year	2017
Thesis Advisor	Dr. Chaval Sriwong

Abstract

The purpose of this research was to investigate the preparation, characterization and photocatalytic properties of reduced graphene oxide (rGO)/titanium dioxide (TiO₂)/natural rubber composite (RT-rGO) sheets, including physical and thermal properties were also studied. In the preparation process, the rGO suspension was firstly synthesized through a chemical reduction method of graphene oxide (GO) suspension. Then, the RT-rGO sheets were easily prepared by a simple latex mixing-casting method based on the use of fixed TiO₂ powder and natural rubber (NR) latex contents with the different amounts of rGO suspension loading such as 1.6, 3.2, 4.8, 6.2 and 7.7 %wt., respectively. After that, the obtained RT-rGO sheet samples were characterized using X-ray diffraction (XRD), attenuated total reflection Fourier-transformed infrared spectroscopy (ATR-FTIR), Raman spectroscopy, scanning electron microscopy (SEM), transmission electron microscopy (TEM), energy dispersive X-ray spectrophotometer (EDS) and diffuse reflectance UV-visible spectrophotometer (DRS) techniques. The results demonstrated that the crystalline structures and functional groups of these composite sheets are corresponding to pristine NR and TiO₂ (Degussa P25), whereas the characteristic peaks of rGO in the sheets could be observed and well-confirmed by Raman technique. From the SEM results, the roughness morphology on the surface of the RT-rGO sheets were appeared and also increased with the increasing amount of rGO loading. The DRS spectra showed that the absorption band edges of the composite sheets shifted to visible-light region with increasing amount of rGO loading. This result implied that these RT-rGO sheets could active under both visible light and sunlight.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

From the tensile test found that the mechanical properties (such as young's modulus, stiffness, stress at maximum load and load at break) of the composite sheets were increased with increasing amounts of rGO loading. This may be due to the fact that it corroborates the strong interfacial interaction between rGO, TiO₂ and natural rubber. As compared with pristine NR, the TGA results of all composite sheets were not different. Moreover, the photocatalytic properties of all RT-rGO sheet samples were evaluated by photodegrading of methylene blue (MB) dye solution under ultra-violet light (UV), visible light and natural sunlight irradiation. The results revealed that all RT-rGO sheets exhibited much higher activity than those of the sheet without rGO loading, which has the kinetics of the photocatalytic degradation was of the pseudo first-order reaction. The photocatalytic activity of the sheet prepared with 6.2 %wt. rGO (RT-rGO6.2%) has the highest efficiency than the other sheets under three types of light irradiation. The improved photocatalytic activity can be attributed to the presence of rGO, leading to the reduction of electron (e⁻) - hole (h⁺) recombination of TiO₂, increasing charge transfer rate of electrons and surface-adsorbed amount of MB molecules which enhances the photocatalytic activity. Additional, the effects of pH, initial concentration and the repeatedly used on the photocatalytic efficiency of the RT-rGO6.2% sheet were also investigated. The results showed that the sheet could be repeatedly used and reused on the photodegradation of MB dye solution under UV irradiation. Thus, RT-rGO sheet appears to be an attractive-material for the wastewater treatment or the water purification industry.

Keywords: Photocatalytic process, Titanium dioxide, Natural rubber latex, Natural rubber composite sheet, Reduced graphene oxide

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ได้ให้องค์ความรู้ คำแนะนำ และความอนุเคราะห์ช่วยเหลือในการดำเนินวิทยานิพนธ์นี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ดร. ชวาลย์ ศรีวงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างยิ่ง สำหรับการอบรมสั่งสอน การแนะนำและให้คำปรึกษา รวมไปถึงความอนุเคราะห์ช่วยเหลือตลอดในการดำเนินวิทยานิพนธ์นี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. ปานไพลิน สีหาราช ผศ.ดร. ชีวิตา สุวรรณชวลิต และ ดร. กิตติศักดิ์ ชูจันทร์ คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้ทั้งคำปรึกษาและความอนุเคราะห์ในการตรวจทานเพื่อแก้ไขให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่และบุคลากร ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ทุกท่าน สำหรับความอนุเคราะห์ช่วยเหลือในเรื่องอุปกรณ์และเครื่องมือในการดำเนินวิทยานิพนธ์ รวมไปถึงคำปรึกษาและการแนะนำต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้อาจสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีหากขาดความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากทาง คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยให้การสนับสนุนนักศึกษาอย่างเต็มกำลังความสามารถ

สุดท้ายนี้ประโยชน์และองค์ความรู้อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขอมอบแต่บิดา มารดา ครอบครัว ผู้มีพระคุณ และคณาจารย์ทุกท่าน หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้ศึกษาขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

วรพล เตชางกูร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 มลพิษทางน้ำ.....	5
2.1.1 แหล่งกำเนิดมลพิษทางน้ำ.....	5
2.1.2 สารมลพิษทางน้ำ.....	6
2.1.3 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย.....	7
2.2 กระบวนการโฟโตคะตะไลติก.....	8
2.2.1 หลักการของกระบวนการโฟโตคะตะไลติก.....	8
2.2.2 ขั้นตอนในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก.....	9
2.2.3 ชนิดของกระบวนการโฟโตคะตะไลติก.....	9
2.2.4 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	10
2.2.5 พลังงานแสง.....	11
2.2.6 กลไกของกระบวนการโฟโตคะตะไลติก.....	12
2.2.7 ปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลติก.....	14
2.3 ไทเทเนียมไดออกไซด์.....	15
2.3.1 สมบัติพื้นฐานของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	15
2.3.2 สมบัติของโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	17
2.3.3 ความสามารถในการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกของ ไทเทเนียมไดออกไซด์.....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.4 ประโยชน์และการประยุกต์การใช้งานไทเทเนียมไดออกไซด์.....	20
2.4 ยางธรรมชาติ.....	22
2.4.1 ข้อมูลพื้นฐานของยางและยางธรรมชาติ.....	22
2.4.2 ลักษณะของน้ำยางธรรมชาติชนิดเข้มข้น.....	23
2.4.3 คุณสมบัติและการประยุกต์ใช้งานของยางธรรมชาติ.....	24
2.4.4 การประยุกต์ยางธรรมชาติมาใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก.....	25
2.5 รีดิวิซ์กราฟีนออกไซด์.....	25
2.5.1 ข้อมูลพื้นฐานของกราฟีนและรีดิวิซ์กราฟีนออกไซด์.....	25
2.5.2 การสังเคราะห์รีดิวิซ์กราฟีนออกไซด์.....	26
2.5.3 คุณสมบัติและการประยุกต์ใช้งานของรีดิวิซ์กราฟีนออกไซด์.....	28
2.5.4 การประยุกต์รีดิวิซ์กราฟีนออกไซด์มาใช้ในกระบวนการ โฟโตคะตะไลติก.....	29
2.6 สีย้อม.....	31
2.6.1 ข้อมูลพื้นฐานและที่มาของสีย้อม.....	31
2.6.2 ประเภทของสีย้อม.....	31
2.6.3 สีย้อมเมทิลีนบลู.....	33
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	36
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....	41
3.1 สารเคมี.....	41
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	42
3.3 การเตรียมรีดิวิซ์กราฟีนออกไซด์.....	43
3.3.1 การเตรียมกราฟไฟต์ออกไซด์ด้วยกระบวนการดัดแปลง กระบวนการของฮูมเมอร์.....	43
3.3.2 การเตรียมสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์.....	46
3.3.3 การเตรียมสารแขวนลอยรีดิวิซ์กราฟีนออกไซด์.....	47
3.4 การเตรียมแผ่นของผสมยางธรรมชาติ/ไทเทเนียมไดออกไซด์/ รีดิวิซ์กราฟีนออกไซด์.....	48
3.5 การพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะด้วยเทคนิคต่าง ๆ.....	50
3.5.1 เครื่องวัดค่าดูดกลืนแสง (UV-Vis spectrophotometer).....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5.2 เครื่อง Ultraviolet-visible diffuse-reflectance spectrophotometer; DRS.....	50
3.5.3 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer; XRD).....	50
3.5.4 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier-transform Infrared Spectroscopy; FT-IR).....	51
3.5.5 เครื่องรามานสเปกโตรสโคปี (Raman Spectroscopy).....	51
3.5.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM).....	52
3.5.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope; TEM).....	52
3.5.8 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ (Energy Dispersive X-ray Spectrometer; EDX).....	52
3.6 การศึกษาสมบัติเชิงความร้อนและสมบัติเชิงกล.....	53
3.6.1 เครื่องวิเคราะห์เชิงความร้อน (Thermogravimetric Analysis; TGA).....	53
3.6.2 เครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal Testing Machine; UTM).....	53
3.7 การทดสอบความสามารถในการกำจัดสีย้อม.....	54
3.7.1 การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับในที่มีดของแผ่นของผสม.....	54
3.7.2 การทดสอบประสิทธิภาพกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต.....	55
3.7.3 การทดสอบประสิทธิภาพกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ภายใต้แสงวิชิเบิล.....	55
3.7.4 การทดสอบประสิทธิภาพกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ภายใต้แสงอาทิตย์.....	56
3.7.5 การทดสอบประสิทธิภาพกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ภายใต้สภาวะกรด-เบส.....	57
3.7.5.1 กระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้สภาวะกรด.....	57
3.7.5.1 กระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้สภาวะเบส.....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.7.6 การทดสอบประสิทธิภาพกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ภายใต้ความเข้มข้นของสีย้อมที่ต่างกัน.....	57
3.7.7 การทดสอบประสิทธิภาพในการใช้ซ้ำ.....	57
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล.....	58
4.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์.....	58
4.1.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วย เครื่องวัดค่าดูดกลืนแสง (UV-Vis Spectrophotometer).....	59
4.1.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วย เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FT-IR).....	60
4.1.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วย รามานสเปกโตรมิเตอร์ (Raman Spectrometer).....	61
4.1.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วย เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD).....	63
4.1.5 การพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	65
4.1.6 การพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM).....	66
4.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะของแผ่นของผสม.....	66
4.2.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะของแผ่นของผสมด้วย เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FT-IR).....	67
4.2.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะของแผ่นของผสมด้วย รามานสเปกโตรมิเตอร์ (Raman Spectrometer).....	69
4.2.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะของแผ่นของผสมด้วย เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD).....	71
4.2.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะของแผ่นของผสมด้วยเครื่อง Ultraviolet -visible diffuse-reflectance spectrophotometer (DRS).....	73
4.2.5 การพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะของแผ่นของผสมด้วย เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ (EDX).....	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.6 การพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะของแผ่นของผสมด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	77
4.3 การศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงความร้อน.....	80
4.3.1 การศึกษาสมบัติเชิงกล (UTM).....	80
4.3.2 การศึกษาสมบัติเชิงความร้อน (TGA).....	83
4.4 การศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะไลติก.....	85
4.4.1 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มืด.....	85
4.4.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต.....	87
4.4.3 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู ภายใต้การฉายแสงวิซิเบิล.....	93
4.4.4 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู ภายใต้แสงอาทิตย์.....	96
4.4.5 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู ที่สภาวะ pH แตกต่างกัน.....	99
4.4.6 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน.....	102
4.4.7 การศึกษาประสิทธิภาพในการใช้งานซ้ำ.....	105
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	108
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	108
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	110
เอกสารอ้างอิง.....	111
ภาคผนวก.....	118
ภาคผนวก ก.....	119
ภาคผนวก ข.....	120
ภาคผนวก ค.....	121
ภาคผนวก ง.....	125
ประวัติผู้เขียน.....	126

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติพื้นฐานของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	16
2.2 คุณสมบัติพื้นฐานของเมทิลีนบลู.....	34
2.3 พลังงานสลายพันธะของสารแต่ละชนิดบนโครงสร้างของเมทิลีนบลู.....	36
3.1 แสดงสัดส่วนของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่แตกต่างกันในแต่ละชิ้นงาน.....	48
4.1 หมู่ฟังก์ชันที่สำคัญในไทเทเนียมไดออกไซด์และยางธรรมชาติ.....	67
4.2 สัดส่วนของธาตุไทเทเนียมและคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบหลักของแผ่นของผสม ในตัวอย่างของ RT RT-rGO3.2% และ RT-rGO7.7%.....	77
4.3 สมบัติเชิงกลของแผ่นของผสมในแต่ละชนิด.....	80
4.4 อุณหภูมิเฉลี่ยการสลายตัวของแผ่นของผสมทั้ง 3 ชนิด.....	83
4.5 ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มีผ่านแผ่นของผสมยางธรรมชาติ ไทเทเนียมไดออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณต่าง ๆ.....	85
4.6 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต ผ่านการใช้แผ่นของผสมยางธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์ และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณต่าง ๆ.....	87
4.7 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต ผ่านการใช้แผ่นของผสม RT-GO6.2% RT-rGO6.2% และ NR.....	90
4.8 ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มีด้วยความเข้มข้น 1.5×10^{-5} โมลาร์ ผ่านการใช้แผ่นของผสมทั้ง 4 ชนิด.....	93
4.9 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงวิชิเบิล ผ่านการใช้แผ่นของผสมทั้ง 4 ชนิด.....	93
4.10 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอาทิตย์ ผ่านการใช้แผ่นของผสมทั้ง 4 ชนิด.....	97
4.11 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้สภาวะ pH ที่แตกต่างกัน ผ่านการใช้แผ่นของผสม RT-rGO6.2%.....	99
4.12 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้ความเข้มข้นเริ่มต้น ที่แตกต่างกันของสีย้อมเมทิลีนบลู ผ่านการใช้แผ่นของผสม RT-rGO6.2%.....	102
4.13 ประสิทธิภาพการใช้งานซ้ำทั้งหมด 5 ครั้ง ในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต ผ่านการใช้แผ่นของผสม RT-rGO6.2%.....	105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างสารมลพิษที่สามารถพบได้ในแหล่งน้ำ (ก.) การทิ้งสีย้อมของโรงงานอุตสาหกรรม (ข.) การรั่วไหลของน้ำมันจากเรือบรรทุกสินค้า.....	6
2.2 กระบวนการโฟโตคะตะไลติกผ่านตัวเร่งด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต.....	8
2.3 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างของสารตัวนำ สารกึ่งตัวนำ และสารฉนวน สำหรับการใช้เป็น ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก.....	11
2.4 โทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดผงละเอียด.....	16
2.5 เปรียบเทียบโครงสร้างผลึกต่าง ๆ ของโทเทเนียมไดออกไซด์ (ก.) รูไทล์ (ข.) อนาเทส (ค.) บรูคไคท์.....	17
2.6 การถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสกับรูไทล์.....	18
2.7 กลไกการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกผ่านตัวเร่งโทเทเนียมไดออกไซด์.....	19
2.8 โครงสร้างพื้นฐานของยางธรรมชาติ.....	22
2.9 น้ำยางธรรมชาติเข้มข้นชนิดแอมโมเนียร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก (60% HA latex).....	23
2.10 เปรียบเทียบโครงสร้างระหว่างกราฟีนและรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์.....	26
2.11 การสังเคราะห์รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์โดยใช้กราฟไฟต์เป็นสารตั้งต้น.....	28
2.12 การเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกของโทเทเนียมไดออกไซด์โดยมี รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์เป็นตัวช่วยส่งเสริมประสิทธิภาพ.....	29
2.13 แบบจำลองของ M. Hamandi และคณะ อธิบายการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ของโทเทเนียมไดออกไซด์โดยมีกราฟีนออกไซด์เป็นตัวช่วยในการถ่ายเทอิเล็กตรอน.....	30
2.14 โครงสร้างพื้นฐานของสีย้อมเมทิลีนบลู.....	33
2.15 สารละลายสีน้ำเงินของสีย้อมเมทิลีนบลู.....	33
2.16 กระบวนการโฟโตคะตะไลติกในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูผ่านสารตัวเร่งผสม โทเทเนียมไดออกไซด์กับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์.....	34
2.17 ปฏิกิริยาการสลายตัวของสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้กระบวนการโฟโตคะตะไลติก.....	35
3.1 เตรียมสารตั้งต้นทั้ง 2 ชนิด ผสมให้เข้ากัน และหล่อเย็นด้วยน้ำแข็ง.....	43
3.2 เติมน้ำกลั่นฟิวรีกเข้มข้น และปั่นกวนต่อที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	44
3.3 เติมน้ำกลั่นที่ละเล็กละน้อย และปั่นกวนต่อที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที.....	44
3.4 เติมน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร และเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อีก 10 มิลลิลิตร ปั่นกวนต่ออีก 20 นาที.....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 ล้างตะกอนด้วยกรดไฮโดรคลอริก โดยการหมุนเหวี่ยงด้วย ความเร็วรอบ 4000 รอบ/นาที.....	45
3.6 กรองสารที่ได้ ปรับ pH ด้วยน้ำกลั่น และล้างด้วยอะซิโตน จากนั้นเมื่อนำไป อบและบดละเอียดจะได้ ผงกราฟต์ออกไซด์.....	46
3.7 การเตรียมสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ด้วยกระบวนการโซนิเคชัน.....	46
3.8 การเตรียมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์โดยกระบวนการรีดักชันเคมีผ่านการรีฟลักซ์.....	47
3.9 เปรียบเทียบลักษณะสีของสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์และ สารแขวนลอยรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์.....	47
3.10 การเตรียมแผ่นของผสมด้วยอัตราส่วนต่าง ๆ ก่อนเทลงแม่พิมพ์.....	49
3.11 เปรียบเทียบลักษณะของแผ่นของผสม RT-rGO7.7% RT-rGO3.2% และ RT ตามลำดับ.....	49
3.12 การทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นของผสมด้วยเทคนิค UTM.....	54
3.13 การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดสี้อมด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต.....	55
3.14 การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดสี้อมด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล.....	56
4.1 เปรียบเทียบสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ (GO) และสารแขวนลอย รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO).....	58
4.2 ค่าการดูดกลืนแสงของกราฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO)	59
4.3 FT-IR สเปกตรัมแสดงหมู่ฟังก์ชันของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO) และกราฟีนออกไซด์ (GO)...	60
4.4 FT-IR สเปกตรัมของกราฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO) จากงานวิจัยของ Yuhui Li และคณะ.....	61
4.5 รามานสเปกตรัมของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO) และกราฟีนออกไซด์ (GO).....	62
4.6 รามานสเปกตรัมของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO) และกราฟีนออกไซด์ (GO) จากงานวิจัยของ P. Fernandez-Ibanez และคณะ.....	63
4.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่แตกต่างกันระหว่างกราฟต์ กราฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO).....	63
4.8 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของกราฟต์ (GRT) กราฟีนออกไซด์ (GO) และ รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (TRG) จากงานวิจัยของ Srinivasarao Yaragalla และคณะ.....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอกการคา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของ (ก.) กราไฟต์ที่กำลังขยาย X3000 เท่า (ข.) กราไฟต์ออกไซด์ที่กำลังขยาย X2500 เท่า.....	65
4.10 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่กำลังขยาย X 500 เท่า.....	65
4.11 ภาพถ่ายจากเครื่อง TEM (ก.) กราฟีนออกไซด์ (ข.) รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์.....	66
4.12 FT-IR สเปกตรัมแสดงหมู่ฟังก์ชันของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO ₂) และยางธรรมชาติ (NR).....	67
4.13 FT-IR สเปกตรัมแสดงหมู่ฟังก์ชันของแผ่นของผสมชนิดต่าง ๆ.....	68
4.14 รามานสเปกตรัมแสดงโหมดการสั่นของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	70
4.15 รามานสเปกตรัมแสดงโหมดการสั่นเปรียบเทียบแผ่นของผสมชนิดต่าง ๆ.....	70
4.16 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของยางธรรมชาติ (NR) และไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO ₂).....	71
4.17 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่แตกต่างกันของแผ่นของผสมชนิดต่าง ๆ.....	72
4.18 DRS สเปกตรัมของแผ่นของผสมทั้ง 4 ชนิด.....	73
4.19 DRS สเปกตรัมจากงานวิจัยของ D. Maruthamani และคณะ.....	74
4.20 ภาพถ่ายวิเคราะห์สาร (ก.) Ti (ข.) C และ (ค.) EDX สเปกตรัมของ RT.....	75
4.21 ภาพถ่ายวิเคราะห์สาร (ก.) Ti (ข.) C และ (ค.) EDX สเปกตรัมของ RT-rGO3.2%.....	76
4.22 ภาพถ่ายวิเคราะห์สาร (ก.) Ti (ข.) C และ (ค.) EDX สเปกตรัมของ RT-rGO7.7%.....	76
4.23 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงพื้นผิวของแผ่นยางธรรมชาติ (NR) ที่กำลังขยาย (ก.) X150 เท่า (ข.) X500 เท่า.....	77
4.24 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงพื้นผิวของแผ่นของผสมยางธรรมชาติและไทเทเนียมไดออกไซด์ (RT) ที่กำลังขยาย (ก.) X150 เท่า (ข.) X500 เท่า.....	77
4.25 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงพื้นผิวของแผ่นของผสมยางธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์และ รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ RT-rGO1.6% ที่กำลังขยาย (ก.) X150 เท่า (ข.) X500 เท่า.....	78
4.26 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงพื้นผิวของแผ่นของผสมยางธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์และ รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ RT-rGO3.2% ที่กำลังขยาย (ก.) X150 เท่า (ข.) X500 เท่า.....	78
4.27 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงพื้นผิวของแผ่นของผสมยางธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์และ รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ RT-rGO4.8% ที่กำลังขยาย (ก.) X150 เท่า (ข.) X500 เท่า.....	78
4.28 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงพื้นผิวของแผ่นของผสมยางธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์และ รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ RT-rGO6.2% ที่กำลังขยาย (ก.) X150 เท่า (ข.) X500 เท่า.....	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.29 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงพื้นผิวของแผ่นของผสมยางธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ RT-rGO7.7% ที่กำลังขยาย (ก.) X150 เท่า (ข.) X500 เท่า.....	79
4.30 กราฟเปรียบเทียบค่ามอดูลัสของยังของแผ่นของผสมในแต่ละตัวอย่าง.....	81
4.31 กราฟเปรียบเทียบค่าการคงรูปของแผ่นของผสมในแต่ละชนิด.....	81
4.32 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดึงที่จุดขาดของแผ่นของผสมในแต่ละชนิด.....	82
4.33 กราฟเปรียบเทียบค่าความเค้นสูงสุดของแผ่นของผสมในแต่ละชนิด.....	82
4.34 TGA สเปกตรากการสลายตัวทางความร้อนของแผ่นของผสม NR RT และ RT-rGO7.7%.....	84
4.35 กราฟแสดงประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มีดที่เวลาใด ๆ ด้วยแผ่นของผสมชนิดต่าง ๆ.....	86
4.36 กราฟแสดงประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มีดที่เวลา 210 นาที ด้วยแผ่นของผสมชนิดต่าง ๆ.....	86
4.37 กราฟแสดงประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ตที่เวลาใดๆ ด้วยแผ่นของผสมชนิดต่าง ๆ.....	88
4.38 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับในที่มีดเป็นเวลา 210 นาที และการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ตที่เวลา 210 นาที (รวมดูดซับ 30 นาที) ด้วยแผ่นของผสมชนิดต่าง ๆ.....	88
4.39 ค่าคงที่อัตราในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตด้วยแผ่นของผสมแต่ละชนิด (รวมดูดซับ 30 นาที).....	90
4.40 กราฟแสดงประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ตที่เวลาใด ๆ ด้วยแผ่นของผสม RT-GO6.2% RT-rGO6.2% และ NR.....	91
4.41 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับที่เวลา 30 นาที และการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ตที่เวลา 210 นาที ด้วยแผ่นของผสม RT-rGO6.2% และ RT-GO6.2%.....	91
4.42 ค่าคงที่อัตราในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตด้วยแผ่นของผสม RT-rGO6.2% และ RT-GO6.2% (รวมดูดซับ 30 นาที).....	92
4.43 กราฟแสดงประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มีดด้วยความเข้มข้น 1.5×10^{-5} โมลาร์ ที่เวลาใด ๆ ด้วยแผ่นของผสมทั้ง 4 ชนิด.....	94
4.44 กราฟแสดงประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ตที่เวลาใด ๆ ด้วยแผ่นของผสมทั้ง 4 ชนิด.....	94

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.45 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับเป็นเวลา 210 นาที และการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงวิเชียเบิลเป็นเวลา 210 นาที (รวมการดูดซับ) ด้วยแผ่นของผสมทั้ง 4 ชนิด.....	95
4.46 ค่าคงที่อัตราในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงวิเชียเบิลด้วยแผ่นของผสมทั้ง 4 ชนิด (รวมดูดซับ 30 นาที).....	96
4.47 กราฟแสดงประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอาทิตย์ที่เวลาใด ๆ ด้วยแผ่นของผสมทั้ง 4 ชนิด.....	97
4.48 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับเป็นเวลา 90 นาที และการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอาทิตย์ที่เวลา 110 นาที (รวมดูดซับ 30 นาที) ด้วยแผ่นของผสมทั้ง 4 ชนิด.....	98
4.49 ค่าคงที่อัตราในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงอาทิตย์ด้วยแผ่นของผสมทั้ง 4 ชนิด.....	99
4.50 กราฟแสดงประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูที่สภาวะ pH แตกต่างกัน ที่เวลาใด ๆ ด้วยแผ่นของผสม RT-rGO6.2%.....	100
4.51 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับเป็นเวลา 30 นาที และการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้สภาวะ pH ที่แตกต่างกันที่เวลา 210 นาที (รวมดูดซับ 30 นาที) ด้วยแผ่นของผสม RT-rGO6.2%.....	100
4.52 ค่าคงที่อัตราในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้สภาวะ pH ที่แตกต่างกัน ผ่านการใช้แผ่นของผสม RT-rGO6.2% (รวมดูดซับ 30 นาที).....	102
4.53 กราฟแสดงประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นแตกต่างกันทั้ง 3 ความเข้มข้น ที่เวลาใด ๆ ด้วยแผ่นของผสม RT-rGO6.2%.....	103
4.54 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับเป็นเวลา 30 นาที และการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้สภาวะความเข้มข้นที่แตกต่างกันที่เวลา 210 นาที (รวมดูดซับ 30 นาที) ด้วยแผ่นของผสม RT-rGO6.2%.....	103
4.55 ค่าคงที่อัตราในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้สภาวะ pH ที่แตกต่างกันที่เวลา 210 นาที ด้วยแผ่นของผสม RT-rGO6.2% (รวมดูดซับ 30 นาที).....	104
4.56 กราฟแสดงประสิทธิภาพการใช้ซ้ำในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูที่เวลาใด ๆ ด้วยแผ่นของผสม RT-rGO6.2%.....	106
4.57 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับเป็นเวลา 30 นาที และการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูจากการใช้ซ้ำในการกำจัดสีย้อมทั้งหมด 5 รอบ ที่เวลา 210 นาที (รวมดูดซับ 30 นาที) ด้วยแผ่นของผสม RT-rGO6.2%.....	106

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.58 ค่าคงที่อัตราในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูหลังจากผ่านกระบวนการใช้ซ้ำที่เวลา 210 นาที ด้วยแผ่นของผสม RT-rGO6.2% (รวมดูดซับ 30 นาที).....	107



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

กระบวนการโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic process) คือ กระบวนการที่ต้องใช้แสงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสามารถใช้ได้ทั้งในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet light) และในช่วงแสงวิสิเบิล (Visible light) นิยมใช้กระบวนการนี้ในการบำบัดน้ำเสียหรือในกระบวนการกำจัดสารอินทรีย์ในสิ่งแวดล้อม โดยกระบวนการเริ่มขึ้นจาก แสงที่มีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับแถบช่องว่างพลังงานสารกึ่งตัวนำ (Semiconductors) ทำให้อิเล็กตรอน (Electron, e^-) ถูกกระตุ้นแล้วกระโดดขึ้นไปยังระดับชั้นเหนี่ยวนำ (Conduction band) ทำให้เกิดช่องว่างประจุบวก (Hole, h^+) ที่ระดับชั้นเวเลนซ์ (Valence band) จากนั้น e^- กับ h^+ จะเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศและน้ำในระบบก่อให้เกิดซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล (Superoxide radical, $O_2^{\cdot-}$) และ ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl radical, OH^{\cdot}) ตามลำดับ [1] ซึ่งทั้ง 2 เรดิคัลนี้จะไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) กับโมเลกุลของสีย้อม ทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์หรือสารจำพวกสีย้อมถูกทำลายแล้วเกิดเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และ น้ำ (H_2O) สารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นที่นิยมในการนำมาใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกเนื่องจากมีราคาไม่แพง มีความเสถียรภาพทางเคมีสูง และมีประสิทธิภาพในการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกได้ดี [2]

โดยทั่วไปการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบผงมีข้อดี คือ มีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาได้ดีเนื่องจากมีพื้นที่ผิวที่สูง แต่มีข้อเสียที่สำคัญคือ การแยกออกจากระบบหลังใช้งานมีราคาแพงและมีขั้นตอนที่ยุ่งยากซับซ้อน รวมไปถึงการนำกลับมาใช้ใหม่เป็นไปได้ยาก [3] ดังนั้นเพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว จึงได้เตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์ให้อยู่ในลักษณะของแผ่น หรือแบบฟิล์มบางทำให้สะดวกต่อการใช้งาน แยกออกจากระบบได้ง่าย และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการทดลองเลือกใช้การขึ้นรูปไทเทเนียมไดออกไซด์ให้เป็นวัสดุผสมกับพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ซึ่งพบว่าสะดวกต่อการใช้งานมากขึ้นแต่ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมก็ลดลง [4] ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ยางธรรมชาติ (Natural rubber) ซึ่งถือว่าเป็นทรัพยากรที่หาได้ง่ายและมีจำนวนมากในประเทศไทย มาผสมให้เข้ากันกับไทเทเนียมไดออกไซด์ก็จะได้แผ่นยางธรรมชาติผสม ซึ่งมีความยืดหยุ่นสูงและทนต่อแรงดึงได้ดีเป็นอย่างดี นอกจากนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม จึงได้เติมสารอนุพันธ์คาร์บอนลงไปเป็นแผ่นของผสม [5]

สารอนุพันธ์คาร์บอน (Carbon allotropes) ที่นิยมนำมาใช้เสริมประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ต่าง ๆ ในสิ่งแวดล้อม เช่น ท่อนาโนคาร์บอน ถ่านกัมมันต์ กราฟีนออกไซด์ และรีดิวซ์-กราฟีนออกไซด์ เป็นต้น โดยวัสดุเหล่านี้มีลักษณะเด่นคือ มีรูพรุนสูงทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสที่ดี มีความ

แข็งแรงเชิงกลสูง และมีความสามารถในการส่งผ่านอิเล็กตรอนได้ดีจึงทำให้นำไฟฟ้าได้ [6] ซึ่งสารอนุพันธ์คาร์บอนที่งานวิจัยนี้เลือกใช้ก็คือ รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (Reduced graphene oxide, rGO) ที่มีคุณสมบัติข้างต้นมาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทางด้านกระบวนการโฟโตคะตะไลติกในการกำจัดสีย้อม

คุณสมบัติของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ คือ มีความแข็งแรงและสมบัติเชิงกลสูง ความสามารถในการนำไฟฟ้าและการส่งผ่านอิเล็กตรอนที่ดีเยี่ยม น้ำหนักเบา มีพื้นที่ผิวหรือรูพรุนในโครงสร้างสูง โดยงานวิจัยนี้เตรียมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์เริ่มจากการใช้กราไฟต์ (Graphite) เป็นสารตั้งต้นแล้วผ่านกระบวนการดัดแปลงกระบวนการของฮัมเมอร์ (Modified Hummer's method) [7] เพื่อเปลี่ยนให้เป็นกราไฟต์ออกไซด์ (Graphite oxide) ที่มีหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ แทรกอยู่ตามระนาบของกราไฟต์ ทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นของกราไฟต์นั้นกว้างมากขึ้น เมื่อนำกราไฟต์ออกไซด์มาผ่านกระบวนการโซนิเคชัน (Sonication process) ในน้ำกลั่นจะทำให้แต่ละชั้นที่จากเดิมเกาะกันหลุดออกมาได้เป็นสารแขวนลอยของแผ่นนาโนกราฟีนออกไซด์ (Graphene oxide nano sheets) [8] แต่เนื่องจากคุณสมบัติที่ดีกว่าในด้านการส่งผ่านอิเล็กตรอนของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ จึงต้องทำการรีดิวซ์สารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ด้วยกระบวนการรีดักชันทางเคมีและใช้ความร้อนช่วยในการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ไฮดราซีน (Hydrazene) ที่เป็นสารรีดิวซ์ (reducing agent) และใช้แอมโมเนีย (Ammonia) เป็นตัวช่วยรักษาเสถียรภาพของสารแขวนลอยรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ให้มีเสถียรภาพสูงไม่เกาะตัวหรือตกตะกอน [9]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาและเตรียมแผ่นของผสมยางธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต แสงวิชิเบิล และแสงอาทิตย์ ซึ่งในกระบวนการเตรียมแผ่นของผสมนี้ได้มีการศึกษาผลของปริมาณการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่แตกต่างกันต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติก หลังจากนั้นจึงได้ทำการศึกษาและพิสูจน์เอกลักษณ์โดยใช้เทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis) เครื่องวิเคราะห์การกระจายและการสะท้อนของแสงอัลตราไวโอเล็ตและวิชิเบิล (DRS) เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FTIR) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) อุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDS) และ เครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์ (Raman) นอกจากนี้ยังได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ได้แก่ ผลของความเข้มข้นและสภาวะ pH เริ่มต้นของสีย้อม รวมไปถึงประสิทธิภาพในการใช้งานซ้ำ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาและเตรียมแผ่นของผสมยางธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์
2. เพื่อศึกษาผลของการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกัน ต่อแผ่นของผสมยางธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์
3. เพื่อศึกษาและพิสูจน์เอกลักษณ์ของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และแผ่นของผสมที่เตรียมได้ด้วยเทคนิคต่าง ๆ
4. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของแผ่นของผสมในด้านการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต แสงวิซิเบิล และแสงอาทิตย์
5. เพื่อศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมของแผ่นของผสม
6. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานซ้ำในของแผ่นของผสมในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เตรียมแผ่นของผสมยางธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ โดยศึกษาผลของการเติมสารแขวนลอยรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ที่มีปริมาณที่แตกต่างกัน ได้แก่ ร้อยละ 1.6 3.2 4.8 6.2 และ 7.7 โดยน้ำหนัก
2. พิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และแผ่นของผสม ด้วยเทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis) เครื่องวิเคราะห์การกระจายและการสะท้อนของแสงอัลตราไวโอเล็ตและวิซิเบิล (DRS) เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FTIR) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) อุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDS) และเครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์ (Raman) เป็นต้น
3. ศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงความร้อนของแผ่นของผสมด้วย เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (UTM) และ เครื่องวิเคราะห์เชิงความร้อน (TGA) ตามลำดับ
4. ศึกษาประสิทธิภาพของแผ่นของผสมในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตและแสงวิซิเบิล และยังศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้แผ่นของผสมในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้แสงอาทิตย์ โดยตรวจวัดความเข้มข้นของสีย้อมได้จากเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีของแผ่นของผสม ได้แก่ ผลของความเข้มข้นและสภาวะ pH เริ่มต้นของสีย้อมเมทีลีนบลู รวมไปถึงประสิทธิภาพในการใช้งานซ้ำ

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รับองค์ความรู้เกี่ยวกับเทคนิควิธีการเตรียมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และแผ่นของผสม
2. ได้รับองค์ความรู้เกี่ยวกับการพิสูจน์เอกลักษณ์ของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และแผ่นของผสม
3. สามารถนำแผ่นของผสมไปใช้ประโยชน์ในด้านการกำจัดสีย้อมและสิ่งปนเปื้อนภายในน้ำ รวมไปถึงสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้
4. สามารถเพิ่มความหลากหลายในด้านการใช้งานและเพิ่มมูลค่าให้แก่नी้อย่างธรรมชาติ
5. สามารถนำผลงานวิจัยไปเผยแพร่ในวารสารระดับชาติ นานาชาติ หรือเข้าร่วมงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 มลพิษทางน้ำ

มลพิษทางน้ำ (Water pollution) หมายถึง สภาวะที่ทำให้คุณภาพของน้ำเสื่อมลง เนื่องจากมีสารมลพิษสะสมและเข้าไปปะปนอยู่ในน้ำเป็นจำนวนมาก น้ำที่มีมลพิษสะสมเป็นจำนวนมากจะไม่เหมาะต่อการอุปโภคและบริโภคของมนุษย์ รวมไปถึงการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำต่าง ๆ [10]

2.1.1 แหล่งกำเนิดของมลพิษทางน้ำ

แหล่งกำเนิดของมลพิษทางน้ำมีด้วยกันหลายสาเหตุ ซึ่งส่วนใหญ่ล้วนมาจากวิถีประจำวันของมนุษย์ รวมไปถึงสภาพอากาศ และพฤติกรรมของสัตว์น้ำ โดยแหล่งกำเนิดของมลพิษทางน้ำ มีดังนี้

1. ชุมชน ได้แก่ บ้านเรือนที่อยู่อาศัย อาคารสำนักงาน รวมไปถึงสถานที่ต่าง ๆ ได้ทำการทิ้งเศษอาหาร เศษขยะ ของเสีย หรือ ผงซักฟอก เป็นต้น
2. โรงงานอุตสาหกรรม ได้แก่ โรงงานผลิตและเหมืองขุดเจาะชนิดต่าง ๆ ได้ทำการทิ้งสารอินทรีย์ที่เป็นของเสียจากการผลิตลงสู่แหล่งน้ำ รวมไปถึงโลหะหนักและสารประกอบที่เป็นพิษ เช่น สารหนู ปรอท ตะกั่ว เป็นต้น
3. การคมนาคมทางเรือ ได้แก่ เรือโดยสารและเรือขนส่งเชิงพาณิชย์ ได้ทำการทิ้งของเสียอย่าง น้ำมันเครื่องจักร หรือน้ำมันเชื้อเพลิงลงสู่แหล่งน้ำ ทำให้เกิดคราบน้ำมันปกคลุมที่ผิวน้ำ ซึ่งส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลง
4. การเกษตรกรรม ได้ทำการใช้ปุ๋ย ยาฆ่าแมลง และมูลจากสัตว์ ถูกชะไหลลงสู่แหล่งน้ำ ทำให้เกิดการสะสมจนเป็นพิษ โดยเป็นเหตุให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) ซึ่งก็คือปรากฏการณ์ที่แหล่งน้ำมีปริมาณฟอสฟอรัสและไนโตรเจนมากเกินไป จนส่งผลให้สิ่งมีชีวิตในน้ำขาดออกซิเจนในการดำรงชีวิต
5. ความร้อน ได้แก่ ความร้อนจากสภาพอากาศและโรงงาน ได้ทำเปลี่ยนให้อุณหภูมิในแหล่งน้ำร้อนจนสิ่งมีชีวิตภายในน้ำตายจนกลายเป็นขยะเน่าเสีย หรือทำให้สิ่งมีชีวิตเหล่านี้ต้องอพยพไปยังแหล่งน้ำอื่น จนทำระบบนิเวศน์ของแหล่งน้ำเดิมต้องสิ้นสุดลง [11]

2.1.2 สารมลพิษทางน้ำ

สารมลพิษทางน้ำ คือ สารเคมีและสิ่งมีชีวิตในน้ำที่ทำให้สภาพของแหล่งน้ำเสื่อมลง โดยแบ่งออกเป็น 5 ประเภท ดังนี้

1. สารมลพิษจากสิ่งมีชีวิต ได้แก่ จุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค เช่น แบคทีเรีย โพรโทซัว ไวรัส หรือเชื้อรา เป็นต้น นอกจากนี้ยังรวมไปถึงปริมาณของสาหร่ายในแหล่งน้ำ หากมีมากจนเกินไป ปริมาณออกซิเจนก็จะลดลง ส่งผลให้สิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ตายและเน่าเสีย

2. สารอินทรีย์ ได้แก่ โปรตีน กรดอะมิโน แป้ง หรือไขมัน จากของเสียที่ทิ้งลงแหล่งน้ำ อีกทั้งยังมีสารอื่น ๆ จากซากพืชซากสัตว์ที่สะสมอยู่ในน้ำ ซึ่งสาเหตุที่ทำให้น้ำเน่าเสียเนื่องมาจากเป็นสารที่ย่อยสลายได้ยาก เช่น โพลีแซคคาไรด์ หรือโพลีเปปไทด์ เป็นต้น

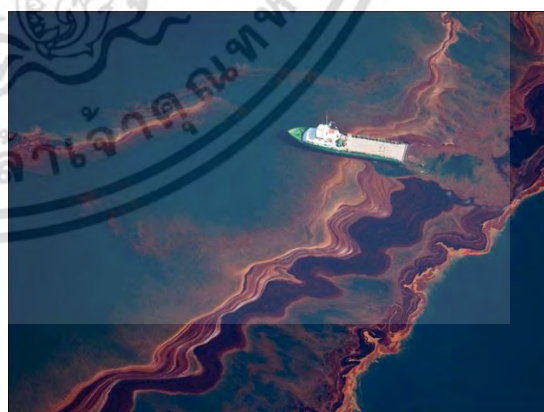
3. สารอนินทรีย์ ได้แก่ สารประกอบของโลหะทรานซิชัน หรือสารประกอบของโลหะหนักที่เป็นของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งนอกจากจะทำให้ น้ำเน่าเสียแล้ว ยังเป็นอันตรายต่อทั้งสิ่งมีชีวิตในน้ำ รวมไปถึงหากมนุษย์นำมาบริโภคก็อาจยังมีสารตกค้างที่ส่งผลเสียต่อร่างกายได้ ตัวอย่างของโลหะหนักที่มักพบและเป็นอันตราย เช่น สารหนู พรอท ตะกั่ว แคดเมียม เป็นต้น

4. สารลอยผิวหน้าน้ำ ได้แก่ สารแขวนลอย ตะกอน และน้ำมัน สารเหล่านี้ส่งผลในการขัดขวางการส่องผ่านของแสงและการแลกเปลี่ยนออกซิเจนในอากาศ ซึ่งเป็นสิ่งที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ ทำให้เกิดการเน่าตายและเน่าเสียของแหล่งน้ำ

5. สารกัมมันตรังสี เป็นสารอันตรายที่ส่งผลกระทบอย่างรุนแรงต่อพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิตในน้ำและมนุษย์ โดยสารกัมมันตรังสีที่ทิ้งลงแหล่งน้ำสามารถพบได้จากทั้งโรงงานอุตสาหกรรม และทางการแพทย์ เช่น โรงงานไฟฟ้าปรมาณูที่มีโอกาสทิ้งของเสียอย่างสารกัมมันตรังสีของยูเรเนียม โรงงานผลิตอาวุธนิวเคลียร์ หรือโรงพยาบาลที่ใช้รังสีในการฉายแสง เป็นต้น [12]



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 2.1 ตัวอย่างสารมลพิษที่สามารถพบได้ในแหล่งน้ำ [13]

(ก.) การทิ้งสีย้อมของโรงงานอุตสาหกรรม (ข.) การรั่วไหลของน้ำมันจากเรือบรรทุกสินค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย

กระบวนการบำบัดน้ำเสีย คือ กระบวนการที่ใช้ในการกำจัดสิ่งเจือปนหรือมลพิษทางน้ำให้หมดไป หรือคงเหลือน้อยที่สุด โดยให้อยู่ในปริมาณที่สิ่งมีชีวิตในน้ำสามารถดำรงชีพได้ รวมไปถึงมนุษย์สามารถอุปโภคและบริโภคได้ แบ่งเป็น 3 กระบวนการสำคัญ ดังนี้

1. กระบวนการทางเคมี (Chemical process) เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสีย โดยการเติมสารเคมี เพื่อใช้ในการแยกสารต่าง ๆ หรือเปลี่ยนสภาพน้ำให้สะอาดมากยิ่งขึ้น เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูง แต่ก็มีค่าใช้จ่ายที่สูงเช่นกัน ตัวอย่างการใช้กระบวนการทางเคมีในการบำบัดน้ำ เช่น

- การทำให้ตกตะกอน (Precipitation) เป็นการเติมสารเคมีที่ประจุตรงข้ามกับสารแขวนลอยที่มีอยู่ในแหล่งน้ำ ให้เกิดการตกตะกอนแล้วจึงทำการแยกออกจากแหล่งน้ำ

- การออกซิเดชัน หรือรีดักชันทางเคมี (Chemical oxidation/ reduction) เป็นการเติมสารเคมีที่ทำหน้าที่การรับหรือให้อิเล็กตรอนของสารที่มีความเป็นพิษ ให้เปลี่ยนไปเป็นสารที่อันตรายน้อยลง เช่น การเติมคลอรีน เพื่อเปลี่ยนประจุบวก 2 ของเหล็ก ไปเป็นบวก 3 ที่มีความเป็นพิษน้อยกว่า ($2\text{Fe}^{2+} + \text{Cl}_2 \rightarrow 2\text{Fe}^{3+} + 2\text{Cl}^-$)

- การสะเทิน (Neutralization) เป็นการเติมสารที่เปลี่ยนความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำให้เป็นกลางที่ pH เท่ากับ 7 เพื่อให้เหมาะสมแก่การนำไปใช้ในการบริโภคต่าง ๆ

2. กระบวนการทางชีวภาพ (Biological process) เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสีย โดยการใช้จุลินทรีย์ที่เหมาะสมกับสภาพแหล่งน้ำนั้น ๆ มาย่อยสลายสิ่งเจือปนอย่างสารอินทรีย์ ให้ไปอยู่ในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์และแอมโมเนีย ซึ่งเป็นสารที่ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต

3. กระบวนการทางกายภาพ (Physical process) เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสีย โดยใช้หลักในการคัดแยกอนุภาคของของเสียให้หลุดออกจากน้ำ เช่น การใช้ตะแกรงในการคัดแยกสารแขวนลอยที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ หรือการใช้วัสดุดูดซับที่เหมาะสมในการแยกสารที่ไม่ต้องการออกจากแหล่งน้ำ เป็นต้น [14]

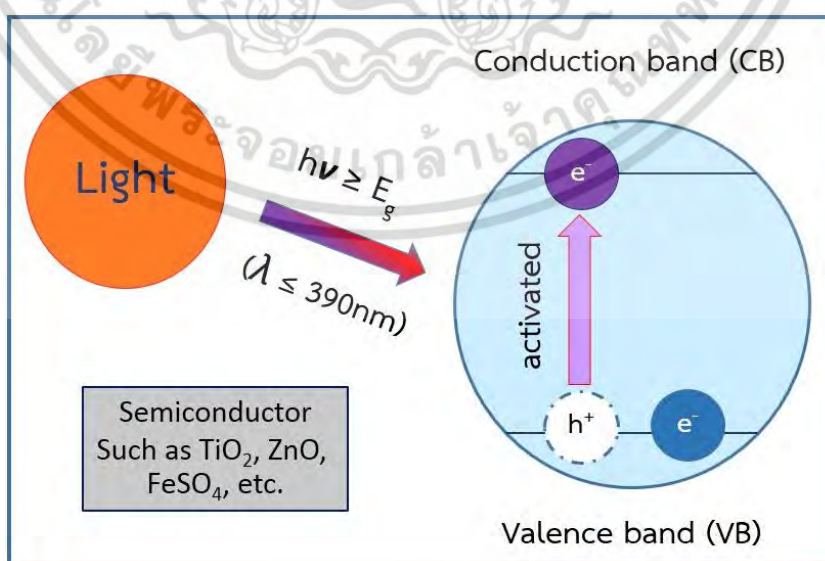
กระบวนการในการบำบัดน้ำเสียส่วนใหญ่แล้วจำเป็นต้องใช้กระบวนการต่าง ๆ ควบคู่กัน เช่น งานวิจัยของ Mohammad Al-Harashseh และคณะ [15] ได้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมการผลิตกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) โดยใช้หลักในการตกตะกอนของกระบวนการทางเคมี ด้วยการใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ในการจับอนุภาคของสิ่งเจือปนให้ตกตะกอน แล้วจึงใช้หลักในการกรองของกระบวนการทางกายภาพ ด้วยการใช้อีเอเล็ทผ่านแบบนาโนฟิลเทชัน (Nano-filtration membrane) ชนิดต่าง ๆ เป็นตัวคัดแยกอนุภาคของสิ่งเจือปนที่ตกตะกอนออกมา เป็นต้น ซึ่งการใช้หลายกระบวนการร่วมกันก็จะให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำสูง แต่ก็ต้องมีส่วนที่ยุ่งยาก ซับซ้อน ใช้เวลานาน และสิ้นเปลือง ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่มีขั้นตอนที่ไม่ยุ่งยากและมีความสามารถในการกำจัดสารเจือปนได้ดี มาทำการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสี ย้อมเมทิลีนบลู

2.2 กระบวนการโฟโตคะตะไลติก

โฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic) มาจากคำว่า แสง (Photo) และ ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ซึ่งเมื่อรวมแล้วมีความหมาย คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง ที่ทำให้อัตราในการเกิดปฏิกิริยา รวดเร็วยิ่งขึ้น โดยกระบวนการนี้ถูกคิดค้นโดย ดร.ฟูจิชิมา (Dr.Fujishima) ที่ทำการศึกษากลไก และปัจจัยสำคัญต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกผ่านสารตัวเร่งไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide; TiO_2) [16]

2.2.1 หลักการของกระบวนการโฟโตคะตะไลติก

กระบวนการโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic process) เป็นกระบวนการที่ใช้แสงเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยา จำเป็นต้องมีองค์ประกอบที่สำคัญอยู่ 2 ปัจจัยในการเกิดปฏิกิริยา นั่นก็คือ ตัวเร่งปฏิกิริยา และ พลังงานแสง โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ส่วนใหญ่จะเป็นสารชนิดกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ที่มีช่องว่างของแถบพลังงาน (Band gap energy; BG) หรือก็คือช่องว่างระหว่างแถบชั้นวาเลนซ์ (Valence band; VB) และ แถบชั้นเหนี่ยวนำ (Conduction band; CB) ห่างกันเหมาะสมเพียงพอที่จะเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกได้ดี ในส่วนของพลังงานแสงนั้นมีส่วนจำเป็นต่อการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาเป็นอย่างมาก เพราะหากใช้พลังงานแสงที่ไม่เหมาะสมกับช่องว่างของแถบพลังงานของสารตัวเร่งก็จะไม่สามารถกระตุ้นให้อิเล็กตรอน (Electron; e^-) ในชั้นวาเลนซ์เคลื่อนที่ไปยังชั้นเหนี่ยวนำได้ ซึ่งก็จะทำให้กระบวนการโฟโตคะตะไลติกเกิดได้อย่างไม่สมบูรณ์ รูปที่ 2.2 แสดงการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกผ่านตัวเร่งไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งจำเป็นต้องใช้แสงที่มีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับแสงอัลตราไวโอเล็ตถึงจะกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาได้



รูปที่ 2.2 กระบวนการโฟโตคะตะไลติกผ่านตัวเร่งด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ท่านไปเผยแพร่ข้อมูลด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 ขั้นตอนในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก

กระบวนการโฟโตคะตะไลติกประกอบไปด้วยขั้นตอนที่สำคัญ 2 ขั้นตอน ดังนี้

1. กระบวนการดูดซับ (Adsorption process) เป็นความสามารถเฉพาะตัวในการดึงโมเลกุลของสารอินทรีย์ซึ่งกระจายตัวอยู่ในของเหลวมาเกาะที่พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยสารอินทรีย์ที่ถูกดูดซับติดอยู่กับที่ผิวของตัวเร่งเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนตัวเร่งที่สามารถทำหน้าที่ในการดูดซับเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) การดูดซับจะเกิดขึ้นระหว่างสถานะต่าง ๆ ทั้ง 3 สถานะ ได้แก่ ของเหลว (Liquid) ก๊าซ (Gas) และ ของแข็ง (Solid) ซึ่งเกิดการดูดซับได้ทั้งแบบ ของเหลว-ของเหลว ก๊าซ-ของเหลว ก๊าซ-ของแข็ง และ ของเหลว-ของแข็ง โดยการดูดซับของโมเลกุลของสารอินทรีย์บนผิวของสารตัวเร่งอาจเกิดขึ้นด้วยแรงทางกายภาพ แรงทางเคมี หรือทั้งสองอย่างร่วมกัน ในส่วนของกระบวนการโฟโตคะตะไลติกส่วนใหญ่จะเป็นการดูดซับด้วยแรงทางเคมี

2. กระบวนการย่อยสลาย (Degradation process) จะเริ่มขึ้นเมื่อแสงเข้ากระทบกับอนุภาคของสารตัวเร่ง ซึ่งแสงนั้นต้องมีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับช่องว่างพลังงาน (Eg) ของสารตัวเร่งนั้น ๆ โดยแสงจะเข้าไปส่องผ่านพลังงานให้แก่อิเล็กตรอน (e) ที่ชั้นวาเลนซ์ (VB) กระตุ้นให้อิเล็กตรอนขึ้นไปอยู่ยังชั้นเหนี่ยวนำ (CB) ทำให้ชั้นวาเลนซ์เกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนเกิดเป็นช่องว่าง (Hole; h⁺) จากนั้นอิเล็กตรอนที่ชั้นเหนี่ยวนำและช่องว่างที่ชั้นวาเลนซ์ จะคอยทำหน้าที่แลกเปลี่ยนไอออนกับน้ำ (Water; H₂O) ในสารละลาย รวมไปถึงออกซิเจน (Oxygen; O₂) ในอากาศ เพื่อเปลี่ยนให้เป็นอนุพันธ์ของสารที่มีความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ [17]

2.2.3 ชนิดของกระบวนการโฟโตคะตะไลติก

กระบวนการโฟโตคะตะไลติก สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ซึ่งจะพิจารณาจากสถานะของตัวเร่งปฏิกิริยาเทียบกับสถานะของสารอินทรีย์ ดังนี้

1. กระบวนการโฟโตคะตะไลติกแบบสถานะเดียว (Homogeneous photocatalytic) เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสถานะเดียวกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด ซึ่งอยู่ในสถานะของเหลวเหมือนกันทั้งคู่ เช่น การใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide; H₂O₂) ในการกำจัดสีย้อมเมทิลออเรนจ์ (methyl orange; MO) โดยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกนี้ต้องผ่านการใช้แสงยูวีเป็นตัวกระตุ้น เป็นต้น

2. กระบวนการโฟโตคะตะไลติกแบบต่างสถานะ (Heterogeneous photocatalytic) เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสถานะต่างกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด ซึ่งส่วนใหญ่ตัวเร่งปฏิกิริยาจะอยู่ในสถานะของแข็ง ส่วนสารอินทรีย์จะอยู่ในสถานะของเหลว เช่น การใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ในการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลู (methylene blue; MB) โดยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกนี้ต้องผ่านการใช้แสงยูวีเป็นตัวกระตุ้น เป็นต้น [18]

2.2.4 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา

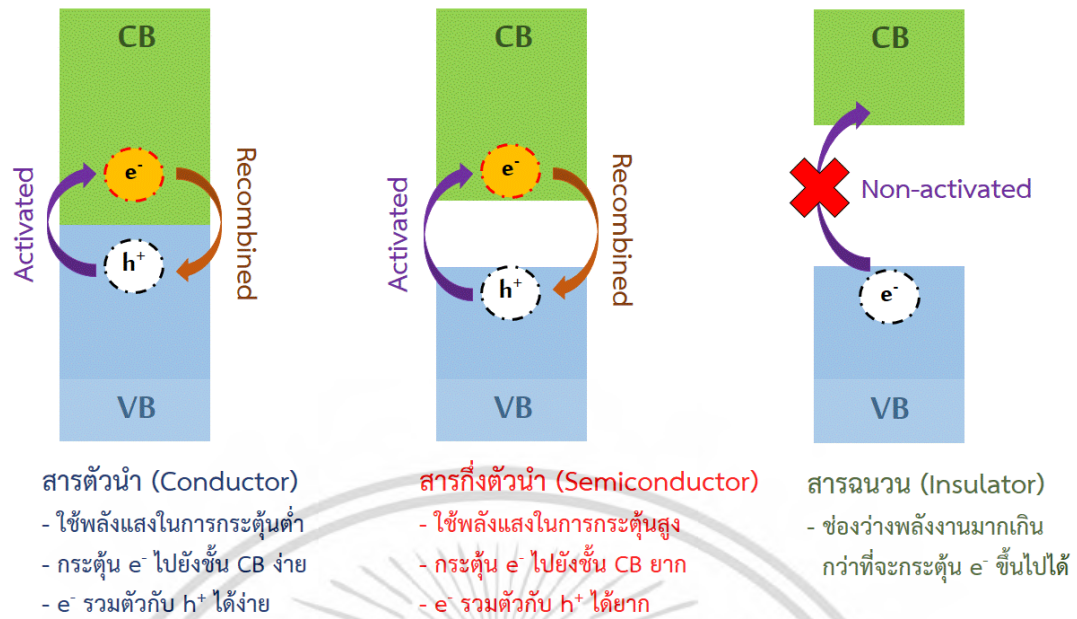
ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถนำมาใช้ได้อยู่ 2 ประเภท ดังนี้

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดสารตัวนำ (Conductor) ได้แก่ สารประเภทโลหะทรานซิชัน (Transition metal) เช่น โครเมียม (Chromium; Cr) เหล็ก (Iron; Fe) ทองแดง (Copper; Cu) หรือนิกเกิล (Nickel; Ni) เป็นต้น
2. ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ได้แก่ สารประกอบของโลหะออกไซด์ หรือสารประกอบโลหะชนิดอื่น ๆ เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide; TiO_2) ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide; ZnO) หรือ แคดเมียมซัลไฟด์ (Cadmium sulfide; CaS) เป็นต้น

โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดสารตัวนำกับสารกึ่งตัวนำต่างกันตรงที่ระยะห่างระหว่างช่องว่างพลังงาน ถ้าเป็นสารตัวนำหรือโลหะตัวนำจะไม่มีช่องว่างพลังงาน เนื่องจากชั้นวาเลนซ์กับชั้นเหนี่ยวนำอยู่ชิดติดกัน ทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ระหว่างสลับไปมาได้ เมื่อทำการให้พลังงานแสงเข้าไป อิเล็กตรอนจากชั้นวาเลนซ์จึงสามารถถูกกระตุ้นไปยังชั้นเหนี่ยวนำ และเกิดช่องว่างหรือโฮลได้อย่างรวดเร็ว แต่ขณะเดียวกันก็อิเล็กตรอนก็สามารถตกกลับลงมารวมตัวกับโฮล (electron-hole recombination) ได้อย่างรวดเร็วเช่นกัน การใช้ตัวเร่งชนิดตัวนำจึงมีประสิทธิภาพต่ำกว่า เมื่อเทียบกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานที่กว้างกว่า ทำให้เมื่อเกิดการกระตุ้นด้วยแสงที่มีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับช่องว่างพลังงานแล้ว อิเล็กตรอนกับโฮลจะกลับมารวมตัวกันได้ยากกว่า ระยะเวลาในการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกจึงเกิดได้ยาวนานกว่า ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์จึงทำได้ดีกว่า แม้ว่าช่องว่างพลังงานจะกว้างมากขึ้น แต่ก็จำเป็นต้องใช้แสงที่มีพลังงานที่สูงมากยิ่งขึ้นตาม นั้นจึงทำให้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ไม่สามารถนำเอาวัสดุฉนวน (Insulator) มาใช้ได้ เนื่องจากมีความกว้างของช่องว่างพลังงานมากเกินไป การกระตุ้นอิเล็กตรอนไปยังชั้นเหนี่ยวนำจึงเป็นได้ยาก ดังแสดงใน รูปที่ 2.3

Yoon Yun Lee และคณะ [19] ได้ทำการรวบรวมงานวิจัยของการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติก โดยใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ ในการกำจัดสารอินทรีย์ พบว่า ชนิดของสารตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลต่อประสิทธิภาพในการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกเป็นอย่างมาก หากใช้ซิลิกา (Si) หรือเจอร์เมเนียม (Ge) ที่มีแถบช่องว่างพลังงานเพียง 1.11 และ 0.67 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ ก็จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ที่น้อย เนื่องจากง่ายต่อการเกิดการรวมกันระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล จึงนิยมสารกึ่งตัวนำที่มีแถบช่องว่างพลังงานสูงเพื่อที่จะได้เกิดการรวมตัวกันได้ง่าย อย่าง ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ทังสเตนออกไซด์ (WO_3) หรือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่มีแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 3.30 2.60 และ 3.20 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ มาเป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก แต่ก็จำเป็นต้องใช้แสงที่มีความเหมาะสมและมีพลังงานสูงเป็นตัวกระตุ้นในการเกิดปฏิกิริยา เช่น WO_3 สามารถใช้แสงวิซิเบิลเป็นตัวกระตุ้นได้ เพราะมีแถบพลังงานต่ำกว่า 2.80 อิเล็กตรอนโวลต์ แต่ ZnO หรือ TiO_2 นั้นต้องใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตเป็นตัวกระตุ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างของสารตัวนำ สารกึ่งตัวนำ และสารฉนวน สำหรับการใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก

2.2.5 พลังงานแสง

แสง (Light) เป็นพลังงานรูปแบบหนึ่งจากการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic spectrum) ถึงแม้จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วแสงเท่ากันที่ 2.997×10^8 เมตรต่อวินาที (m/s) แต่ก็มีควมยาวคลื่น (Wavelength) หรือความถี่ (Frequency) ที่แตกต่างกัน ทำให้แสงมีพลังงานที่แตกต่างกัน ในส่วนของการฉายแสงหรือให้พลังงานแสงในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกนั้น เป็นการให้พลังงานกับระบบในรูปของพลังงานโฟตอน (Photon energy) ให้มากกว่าหรือเท่ากับช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาจึงทำให้เกิดกระบวนการขึ้นได้ โดยพลังงานนี้ เรียกว่า พลังงานกระตุ้น (Activation energy) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (1) ที่แสดงการคำนวณพลังงานตามกฎของพลังค์ (Planck's law) [20]

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

เมื่อ E คือ พลังงานของโฟตอน (Photon energy) หน่วยเป็น จูล (J)

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant) มีค่าเท่ากับ 6.625×10^{-34} จูลต่อวินาที (J/s)

ν คือ ความถี่ หน่วยเป็น เฮิรตซ์ (Hz)

c คือ ความเร็วของคลื่นแสง มีค่าเท่ากับ 2.997×10^8 เมตรต่อวินาที (m/s)

λ คือ ความยาวคลื่นแสง หน่วยเป็น นาโนเมตร (nm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงความยาวคลื่นที่นิยมใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกมีอยู่ 2 ช่วงได้แก่

1. ช่วงแสงที่มนุษย์สามารถมองเห็นได้ (Visible light) จะมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 380 ถึง 750 นาโนเมตร
2. ช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ต หรือแสงยูวี (Ultraviolet light; UV) จะมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 100 ถึง 380 นาโนเมตร โดยแสงยูวี สามารถแบ่งได้เป็น ยูวีเอ (UV-A) มีความยาวคลื่นในช่วง 315 ถึง 380 นาโนเมตร ยูวีบี (UV-B) มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 275 ถึง 315 นาโนเมตร และ ยูวีซี (UV-C) มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 100 ถึง 275 นาโนเมตร

2.2.6 กลไกของกระบวนการโฟโตคะตะไลติก

กระบวนการโฟโตคะตะไลติกจะเกิดขึ้นได้ต้องพลังงานแสงที่เพียงพอและสารตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกโลหะทรานซิชันหรือสารกึ่งตัวนำ เมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบชั้นวาเลนซ์ได้รับพลังงานโดยการฉายแสงที่มีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยานั้น ๆ อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่ไปยังแถบชั้นเหนือวงนำ แล้วเกิดโฮลในบริเวณแถบชั้นวาเลนซ์ขึ้นมาแทน โดยที่โฮลซึ่งมีประจุบวกจะสามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระในแถบชั้นวาเลนซ์ ส่วนแถบชั้นเหนือวงนำที่มีอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นขึ้นมา ก็สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระทั่วทั้งแถบชั้นเหนือวงนำเช่นกัน ดังแสดงในสมการที่ (2) ปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนกับโฮล (electron-hole pair) ขึ้นมาบนสารตัวเร่งปฏิกิริยาและเกิดกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ขึ้นในลำดับถัดมา แต่ธรรมชาติของอิเล็กตรอนกับโฮลมักกลับมารวมตัวกันด้วยแรงดึงดูดของประจุ เมื่ออิเล็กตรอนจากแถบชั้นเหนือวงนำและโฮลที่แถบชั้นวาเลนซ์กลับมารวมตัวกัน ดังแสดงในสมการที่ (3) กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ก็จะหยุดลง

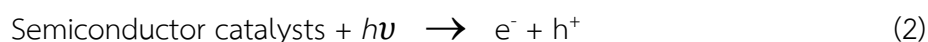
กระบวนการโฟโตคะตะไลติกในการย่อยสลายสารอินทรีย์ แสดงดังสมการที่ (4) และสมการที่ (5) ซึ่งมีกลไกดังนี้ เมื่อเกิดคู่อิเล็กตรอนกับโฮลที่มาจากการกระตุ้นด้วยแสงแล้ว ส่วนที่แถบชั้นวาเลนซ์ของสารตัวเร่งที่มีโฮลอยู่จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไฮดรอกไซด์ไอออน (Hydroxide ion; OH⁻) หรือน้ำ เกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl radical; OH[•]) และโปรตอน (Proton; H⁺) ขึ้นดังแสดงในสมการที่ (6) และสมการที่ (7) ในส่วนบริเวณแถบชั้นเหนือวงนำที่มีอิเล็กตรอนจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับออกซิเจนที่ถูกดูดซับติดบนผิวสารตัวเร่ง เกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล (Superoxide radical; O₂^{•-}) และเปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Perhydroxyl radical; HO₂[•]) ดังสมการที่ (8) และสมการที่ (9) ในส่วนของสมการที่ (10) และสมการที่ (11) แสดงกลไกการเกิดและการเปลี่ยนอนุพันธ์ของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide; H₂O₂) ที่เป็นสารออกซิไดส์เชิง

(Oxidizing agent) ที่สำคัญตัวหนึ่งในการย่อยสลายสารอินทรีย์ นอกจากนี้โปรตอนที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวของน้ำยังสามารถเข้ามารับอิเล็กตรอนแล้วเกิดเป็นไฮโดรเจนเรดิคัล (Hydrogen radical; H[•]) ดังสมการที่ (12) โดยกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์จะมีประสิทธิภาพสูงก็ต่อเมื่อ ในระบบผลิตไฮดรอกซิลเรดิคัลได้มาก เนื่องจากไฮดรอกซิลเรดิคัลเป็นสารออกซิไดส์ที่รุนแรงและว่องไวต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดปฏิกิริยา สามารถเข้าสลายสารอินทรีย์ได้ทุกประเภท โดยมีความสามารถเป็นรองแค่ ไอออนของฟลูออไรด์ (Fluoride ion; F⁻) และไอออนของคลอไรด์ (Chloride ion; Cl⁻) เท่านั้น

- การกระตุ้นให้เกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติก



- การรวมตัวของอิเล็กตรอนกับโฮล (electron-hole recombination)



- การย่อยสลายสารอินทรีย์



- การเกิดเรดิคัลต่าง ๆ จากอิเล็กตรอนและโฮล



เมื่อ	e ⁻	คือ อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น (Excited electron)
	h ⁺	คือ โฮลที่เกิดขึ้นบนแถบชั้นวาเลนซ์ (Hole)
	h	คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant) มีค่าเท่ากับ 6.625 x 10 ⁻³⁴ จูลต่อวินาที
	ν	คือ ความถี่ (Frequency)
	OH [•]	คือ ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl radical)
	OH ⁻	คือ ไฮดรอกไซด์ไอออน (Hydroxide ion)
	H ₂ O	คือ น้ำ (Water)
	O ₂	คือ ออกซิเจน (Oxygen)
	H ⁺	คือ โปรตอน (Proton)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $O_2^{\cdot -}$ คือ ซุปเปอร์ออกไซด์เรดิคัล (Superoxide radical)
 HO_2^{\cdot} คือ เปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Perhydroxyl radical)
 H_2O_2 คือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide)
 H^{\cdot} คือ ไฮโดรเจนเรดิคัล (Hydrogen radical)

จากสมการข้างต้นจึงสรุปได้ว่า ปฏิกิริยาในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์จะเกิดขึ้นที่ไฮลเป็นหลัก โดยไฮลสามารถทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดส์เปลี่ยนน้ำและไฮดรอกไซด์ไอออนในระบบ ให้กลายเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลที่มีบทบาทสำคัญในการย่อยสลายสารอินทรีย์ นอกเหนือไปจากนั้นยังพบว่า ไฮลเองก็สามารถทำหน้าที่ในการย่อยสลายสารอินทรีย์เองได้ ดังสมการที่ (5) เพียงแต่มีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าและสามารถเกิดขึ้นได้ยากกว่า [21, 22]

2.2.7 ปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลติก

1. ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถใช้ได้ทั้งแบบสารตัวนำหรือสารกึ่งตัวนำ แต่จะต้องมีคุณสมบัติให้เหมาะสมกับกระบวนการ และต้องเหมาะสมกับคุณลักษณะของสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด โดยเฉพาะในเรื่องของพื้นที่ผิวสัมผัส เมื่อมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากก็จะดึงดูดสารอินทรีย์ให้เข้ามาเกาะและเกิดกระบวนการสลายสารอินทรีย์ได้มากขึ้น เพราะฉะนั้นการเพิ่มปริมาณสารตัวเร่งก็จะทำให้ประสิทธิภาพในการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกดียิ่งขึ้น แต่ก็ต้องมีค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้นตามลำดับ

2. ชนิดของแสง จำต้องมีความเข้มของแสงหรือพลังงานมากพอที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนในชั้นวาเลนซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาเคลื่อนที่ไปยังชั้นเหนี่ยวนำได้ จึงจะเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกอย่างสมบูรณ์

3. ชนิดของสารอินทรีย์ สามารถส่งผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลติกได้ เช่น ในเรื่องของประจุของสารอินทรีย์ หากมีประจุตรงข้ามกับสารตัวเร่งปฏิกิริยา ก็จะสามารถเหนี่ยวนำให้ถูกดูดซับที่พื้นผิวของสารตัวเร่ง และเกิดกระบวนการสลายสารอินทรีย์ในชั้นถัดไปได้ดี แต่หากมีประจุแบบเดียวกันก็จะเกิดการผลักกันระหว่างสารตัวเร่งและสารอินทรีย์ ทำให้การดูดซับเกิดขึ้นน้อยลง กระบวนการย่อยสลายก็จะเกิดขึ้นน้อยลง นอกจากนี้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารอินทรีย์ก็ส่งผลต่อกระบวนการ เนื่องจากเมื่อมีความเข้มข้นเริ่มต้นมากอนุภาคของสารอินทรีย์ก็จะมีมากขึ้น มีโอกาสที่สารที่เป็นผลิตภัณฑ์จากการย่อยสลาย จะมาขัดขวางการดูดซับระหว่างสารตัวเร่งกับอนุภาคสารอินทรีย์ที่เหลือในระบบ นั้นทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ลดลง

4. อุณหภูมิ เนื่องจากความร้อนก่อให้เกิดพลังงานจลน์ในระบบมากยิ่งขึ้น อิเล็กตรอนจึงสามารถเคลื่อนที่ไปมาได้มากขึ้น โอกาสกลับมารวมตัวกับไฮลก็จะน้อยลง ประสิทธิภาพในการเกิดกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์จึงมีมากขึ้น แต่ก็ควรรักษาอุณหภูมิไม่ให้สูงจนเกินไป เพราะอาจทำให้โมเลกุลของน้ำในระบบเกิดการสลายตัวหรือระเหยขึ้น ปริมาณน้ำในระบบน้อยลงก็จะทำให้การ

ผลิตไฮดรอกซิลเรดิคัลเกิดขึ้นน้อยลงตามลำดับ ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ก็จะลดลง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ตู้อุปกรณ์ เป็นตัวควบคุมการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ต้องเลือกใช้ตู้อุปกรณ์ที่เหมาะสม คำนี้ถึงระยะห่างและปริมาณของแหล่งกำเนิดแสงให้เหมาะสมกับกระบวนการ นอกจากนี้ก็ควรมีระบบถ่ายเทความร้อน เพื่อไม่ให้ในระบบมีอุณหภูมิที่สูงจนเกินไป (ความร้อนมาจากเครื่องปั่นกวน และแหล่งกำเนิดแสง)

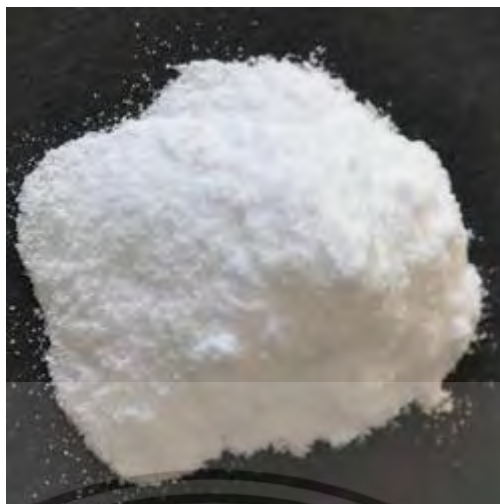
6. ออกซิเจนหรือตัวรับอิเล็กตรอนตัวอื่น ๆ มีหน้าที่คอยจับอิเล็กตรอนไม่ให้เกิดการกลับมา รวมกันกับโฮล ทำให้การเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกเกิดได้นานขึ้น ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ก็จะสูงขึ้น โดยออกซิเจนจับอิเล็กตรอนแล้วเกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาต่อไปเพื่อเปลี่ยนเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่เป็นออกซิไดส์ที่รุนแรง จึงสามารถส่งผลให้เกิดกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดียิ่งขึ้น [23]

2.3 ไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide; TiO_2) เป็นสารประกอบระหว่างโลหะไทเทเนียมกับออกซิเจน ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type semiconductor) ส่วนมากแล้วไทเทเนียมไดออกไซด์มักถูกนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการที่ใช้แสง เนื่องจาก สามารถดูดซับแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตได้ มีคุณสมบัติในการดูดซับสารอินทรีย์ที่ดี จึงสามารถนำมาใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกได้เป็นอย่างดี รวมไปถึงการนำมาใช้เป็นวัสดุที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าอย่าง โซลาร์เซลล์ (Solar cells) ไทเทเนียมไดออกไซด์มีเสถียรภาพทางเคมีที่สูงจึงทนต่อสภาวะกรดและเบสได้ดี อีกทั้งยังมีราคาไม่แพง และมีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตต่ำ จึงสามารถประยุกต์ไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น เครื่องสำอาง ครีมทาผิว หรือสารเคลือบกระจก เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์มีคุณสมบัติในการทำมาสะอาดตัวเอง (Self-cleaning) และมีความสามารถในการกำจัดแบคทีเรีย (Antibacterial) ได้ จึงถูกนำมาใช้เป็นสารเคลือบบนเส้นใยสิ่งทอให้มีความสามารถในการยับยั้งแบคทีเรีย เพื่อต้านทานเชื้อโรคและลดการเกิดกลิ่น ซึ่งประยุกต์ไปใช้เป็นเสื้อผ้ากีฬา หรือเสื้อผ้าในโรงพยาบาลได้ [24]

2.3.1 สมบัติพื้นฐานของไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นของแข็งอยู่ในลักษณะผงมีสีขาว ดังแสดงในรูปที่ 2.4 มีจุดเดือดอยู่ที่ 2972 องศาเซลเซียส และจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 1843 องศาเซลเซียส มีโครงสร้างทั้งหมด 3 อย่าง ได้แก่ รูไทล์ (Rutile) อนาเทส (Anatase) และบรูคไคท์ (Brookite) แต่ปกติแล้วจะพบเพียงแค่ 2 โครงสร้างอย่างรูไทล์และอนาเทส โดยคุณสมบัติต่าง ๆ ของไทเทเนียมไดออกไซด์แสดงดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.4 ไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดผงละเอียด [25]

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติพื้นฐานของไทเทเนียมไดออกไซด์ [26]

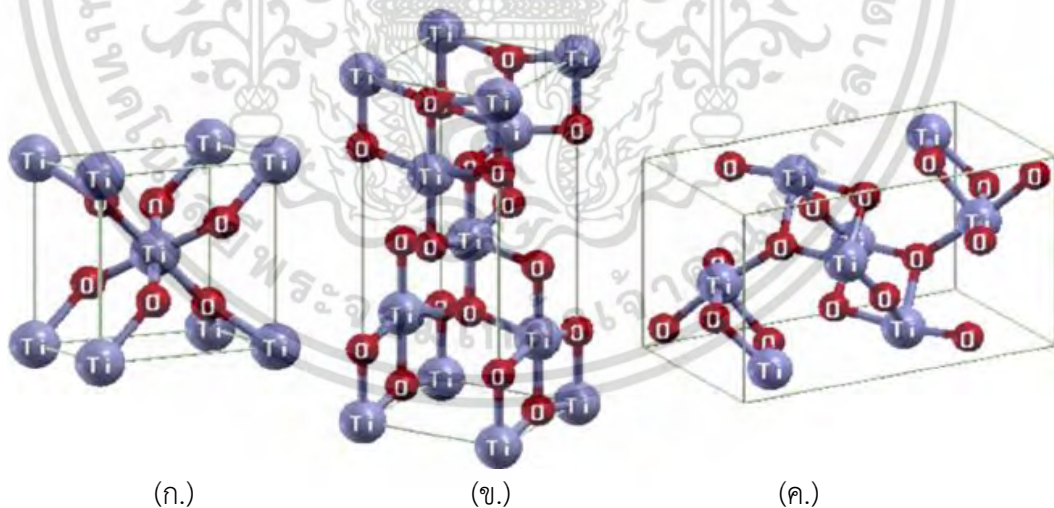
ชื่อและสูตรโมเลกุล	ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide) / TiO_2	
มวลโมเลกุล	79.86 กรัมต่อโมล	
ลักษณะและสี	ของแข็ง / สีขาว	
จุดเดือด	2972 องศาเซลเซียส	
จุดหลอมเหลว	1843 องศาเซลเซียส	
สมบัติการละลาย (น้ำ)	ไม่ละลาย	
ความหนาแน่น (g/cm^3)	4.26 (รูไทล์)	3.84 (อนาเทส)
ดัชนีหักเหแสง	1.90 (รูไทล์)	2.49 (อนาเทส)
ช่องว่างพลังงาน (eV)	3.05 (รูไทล์)	3.23 (อนาเทส)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบอนาเทสและรูไทล์นั้นจะมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเตตระโกนอล (Tetragonal) ที่ประกอบไปด้วยแต่ละหน่วยของออกตะฮีดรอล (Octahedral) ของ TiO_6^{2-} โดยในแต่ละออกตะฮีดรอลนั้นจะประกอบด้วยไทเทเนียมประจุบวก 4 (Ti^{4+}) อยู่ตรงกลางและถูกล้อมรอบโดยไอออนของออกซิเจน (O^{2-}) โดยที่มุมระหว่างแกนของออกตะฮีดรอลในรูไทล์มีจะค่าเท่ากับ 90 และ 81.21 องศา ในขณะที่อนาเทสนั้นจะมีค่ามุมระหว่างแกนเท่ากับ 78.12 และ 92.43 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 สมบัติของโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์

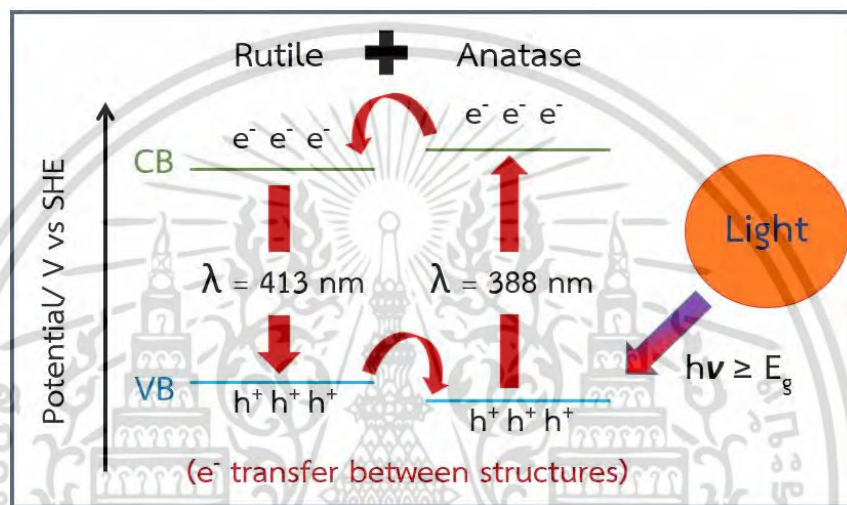
ไทเทเนียมไดออกไซด์มีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันอยู่ด้วยกัน 3 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ได้แก่ อนุนาเทส รูไทล์ และบรูคไคท์ จากการที่มีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน ส่งผลให้โครงสร้างผลึกแต่ละโครงสร้างมีสมบัติที่แตกต่างกันด้วย เมื่อพิจารณาทางด้านเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic) จะพบว่ามีพลังงานอิสระของกิบส์ (Gibbs Free Energy) ของการเกิดที่สภาวะมาตรฐาน อยู่ที่ -889.5 กิโลจูลต่อโมล (kJ/mol) สำหรับโครงสร้างแบบรูไทล์ ซึ่งน้อยกว่าโครงสร้างแบบอนุนาเทสที่มีค่าเท่ากับ -884.5 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งรวมไปถึงค่าความหนาแน่นที่แตกต่างกัน โดยโครงสร้างผลึกแบบอนุนาเทสมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 3.849 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3) ในขณะที่โครงสร้างผลึกแบบรูไทล์นั้นมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 4.260 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จากสมบัติที่แตกต่างกันดังกล่าวทำให้ผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนุนาเทสมีค่าช่องว่างพลังงานที่สูงกว่าโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ โดยอนุนาเทสมีช่องว่างพลังงานอยู่ที่ 3.23 อิเล็กตรอนโวลต์ (Electron volt; eV) ในขณะที่รูไทล์มีค่าช่องว่างพลังงานเพียง 3.05 อิเล็กตรอนโวลต์เท่านั้น นั่นทำให้ประสิทธิภาพในการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบอนุนาเทสนั้นสูงกว่ารูไทล์ เนื่องมาจากการเกิดการรวมกันของอิเล็กตรอนกับโฮล (e^-h^+ recombination) ในรูไทล์เกิดได้เร็วกว่า อีกทั้งยังในโครงสร้างแบบรูไทล์ยังมีความสามารถในการดูดติดผิวหรือดูดซับต่ำกว่า จึงทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบอนุนาเทสเป็นที่นิยมในการนำมาใช้ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์หรือกระบวนการโฟโตคะตะไลติก



รูปที่ 2.5 เปรียบเทียบโครงสร้างผลึกต่าง ๆ ของไทเทเนียมไดออกไซด์ [24]

(ก.) รูไทล์ (ข.) อนุนาเทส (ค.) บรูคไคท์

อย่างไรก็ตามพบว่า ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่นำมาใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ไม่จำเป็นต้องเป็นโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสเพียงอย่างเดียว เนื่องจากสามารถใช้ไทเทเนียม-ไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบผสมกันระหว่างอนาเทสกับรูไทล์ได้ เช่น ในโครงสร้างผลึกมีอนาเทสอยู่ร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก และมีรูไทล์อยู่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก เป็นต้น ซึ่งพบว่าโครงสร้างที่ผสมกันนี้สามารถช่วยในเรื่องการถ่ายเทอิเล็กตรอน (Electron transfer) ให้กระจายอยู่ในระบบได้นานมากขึ้น การที่เกิดการรวมตัวกันระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลจึงเกิดได้ยากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ทำให้ประสิทธิภาพในการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกนั้นสูงขึ้น



รูปที่ 2.6 การถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสกับรูไทล์

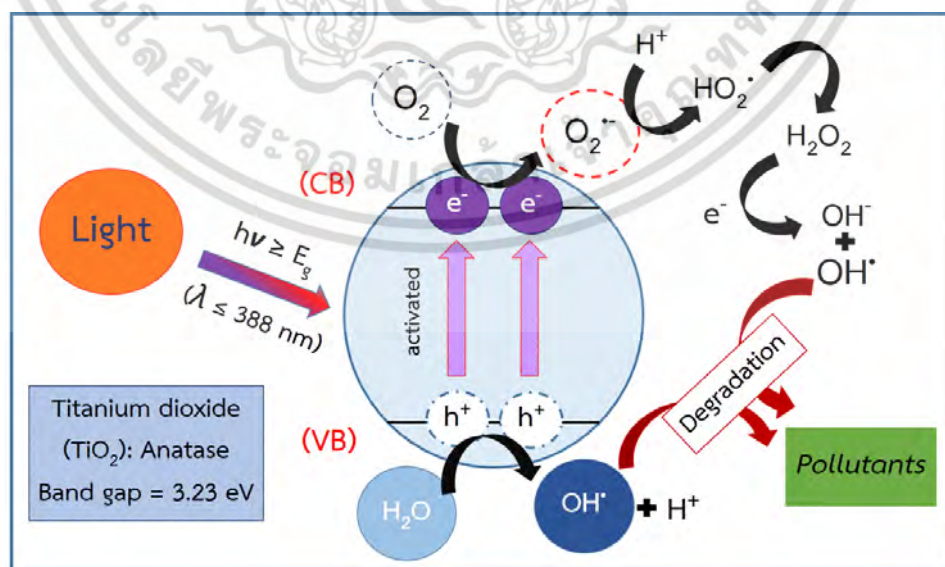
Wei-Kang Wang และคณะ [28] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสารอะทราซีน (Atrazine) ที่เป็นสารที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมยาฆ่าแมลง ผ่านการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผสมกันระหว่างอนาเทสกับรูไทล์ที่มีปริมาณของรูไทล์ที่แตกต่างกันทั้งหมด 6 ตัวอย่าง ได้แก่ ร้อยละ 7.5 10.3 12.6 17.5 20.9 และ 51.8 โดยน้ำหนัก พบว่า ปริมาณที่เหมาะสมของรูไทล์ที่ช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารอะทราซีนสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 10.3 โดยน้ำหนัก เนื่องจากโครงสร้างที่มีประสิทธิภาพในการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่ดีกว่าคือ โครงสร้างแบบอนาเทสที่มีแถบช่องว่างพลังงานมากกว่า การรวมตัวกันระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลนั้นจึงเกิดได้ยากกว่าแบบรูไทล์ แต่หากในโครงสร้างมีปริมาณรูไทล์มากเกินไปก็จะทำให้การรวมตัวกันของอิเล็กตรอนกับโฮลเกิดได้เร็วขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอะทราซีนจึงลดลง ในขณะที่หากมีปริมาณรูไทล์น้อยเกินไปก็จะทำให้การแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างระนาบผลึกทั้ง 2 โครงสร้างเกิดได้น้อยลง ประสิทธิภาพในการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกจึงแทบไม่ต่างกับการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบอนาเทสเพียงโครงสร้างเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 ความสามารถในการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์

สารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับความนิยมในการนำมาใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกเป็นอย่างสูง โดยโครงสร้างผลึกที่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกเป็นอย่างดี คือ โครงสร้างผลึกแบบอนาเทส เนื่องจากมีช่องว่างพลังงานอยู่ที่ 3.23 อิเล็กตรอนโวลต์ (ดูกลืนแสงความยาวคลื่นต่ำกว่า 388 นาโนเมตร) ซึ่งมากกว่าโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ที่มีช่องว่างพลังงานอยู่ที่ 3.05 อิเล็กตรอนโวลต์ (ดูกลืนแสงความยาวคลื่นต่ำกว่า 413 นาโนเมตร) ทำให้ระยะเวลาในการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกเกิดได้นานยิ่งขึ้น นั่นคือมีอิเล็กตรอนและโฮลอยู่ในระบบเพื่อผลิตเรดิคัลต่าง ๆ ที่ทำหน้าที่ในการย่อยสลายสารอินทรีย์มากยิ่งขึ้น ในขณะที่โครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ที่มีช่องว่างพลังงานที่แคบกว่า โอกาสที่อิเล็กตรอนและโฮลจะกลับมารวมตัวกันก็จะมีสูงกว่า ประสิทธิภาพในการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกจึงเกิดได้น้อยกว่า นอกจากนี้ปัจจัยด้านช่องว่างพลังงานของทั้ง 2 โครงสร้างแล้ว ยังพบว่าโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสสามารถเตรียมได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า ทำให้ที่พื้นผิวของสารมีไฮดรอกไซด์ไอออน (-OH) เกาะอยู่มากกว่า ซึ่งเป็นตัวที่ช่วยผลิตไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH[•]) ที่เป็นตัวออกซิไดส์ที่รุนแรง อีกทั้งยังสามารถช่วยดึงดูดสารอินทรีย์ที่มีประจุเป็นบวกให้เข้ามาเกาะบนไทเทเนียมไดออกไซด์ แล้วเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกต่อได้อีกด้วย

รูปที่ 2.7 แสดงการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกในการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยใช้สารตัวเร่งไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งการเกิดกระบวนการนี้ได้จำเป็นต้องมีแสงที่มีพลังงานมากพอที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนเคลื่อนไปยังแถบชั้นเหนี่ยวนำและเกิดโฮลที่ชั้นวาเลนซ์ ซึ่งการเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลกระจายทั่วผิวของสารตัวเร่ง จะเพิ่มไอออนที่ทำหน้าที่ในการผลิตไฮดรอกซิลเรดิคัลที่เป็นตัวออกซิไดส์สารอินทรีย์ จากอนุภาคสารขนาดใหญ่ที่เป็นพิษให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นพิษน้อยลง เช่น น้ำ หรือ คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide; CO₂) เป็นต้น [29]



รูปที่ 2.7 กลไกการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกผ่านตัวเร่งไทเทเนียมไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาที่แถบชั้นวาเลนซ์ที่มีโฮลอยู่จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังสมการที่ (13) โดยตัวให้อิเล็กตรอน (Electron donor) ในที่นี้คือ น้ำหรือไฮดรอกไซด์ไอออน จะเข้ามาทำปฏิกิริยากับโฮลแล้วเปลี่ยนไปเป็นโปรตอนและไฮดรอกซิลเรดิคัลที่เป็นสารออกซิไดส์ที่รุนแรง ในส่วนของแถบชั้นเหนี่ยวนำที่มีอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นขึ้นมาจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ดังสมการที่ (14) โดยตัวรับอิเล็กตรอน (Electron acceptor) ในที่นี้คือ ออกซิเจน จะเข้ามารับอิเล็กตรอนแล้วเปลี่ยนเป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล ซึ่งภายหลังสามารถเกิดเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และรับอิเล็กตรอนเพื่อเปลี่ยนไปเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลที่ทำหน้าที่ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ โดยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันขึ้นในเวลาเดียวกัน เรียกว่า ปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox reaction) ซึ่งสามารถรวมเป็นสมการได้ดังสมการที่ (15)

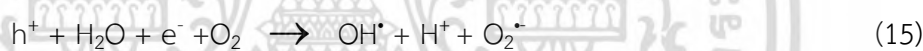
- ปฏิกิริยาออกซิเดชัน



- ปฏิกิริยารีดักชัน



- ปฏิกิริยารีดอกซ์



2.3.4 ประโยชน์และการประยุกต์การใช้งานไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมไดออกไซด์มีคุณสมบัติที่ทนทานต่อสภาวะเคมีต่าง ๆ ได้ดี ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและร่างกายมนุษย์ อีกทั้งยังมีคุณสมบัติเฉพาะตัวอีกมากมาย ทั้งความสามารถในการทำความสะอาดตัวเอง ความสามารถในการกำจัดแบคทีเรีย และความสามารถในการเป็นตัวเร่งด้วยแสงนั้นจึงทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกนำมาประยุกต์การใช้งานได้หลากหลาย ดังนี้

1. ใช้ในอุตสาหกรรมสี มักใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นส่วนผสมของสีทาบ้าน ด้วยคุณสมบัติให้สารสีขาวมันวาว สามารถดูดกลืนและหักเหแสงในช่วงที่ตามนุษย์มองเห็นได้สูง มีขนาดอนุภาคเล็กทำให้มีความยึดหยุ่นสูงจึงปกปิดรอยร้าวรอยตำหนิได้ดี ทนต่อสภาพความเป็นกรดและเบส รวมไปถึงทนต่อสภาพอากาศได้เป็นอย่างดี

2. ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นส่วนผสมเพื่อเพิ่มคุณสมบัติทึบแสง สามารถสะท้อนและหักเหแสงได้สูง ที่สำคัญคือสามารถสะท้อนรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ดี จึงนิยมนำมาใช้เป็นครีมบำรุงผิว แป้งรองพื้น หรือครีมกันแดด ที่ทำหน้าที่ในการปกป้องร่างกายจากรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าได้ดี เนื่องจากมีค่าคงที่ทางไฟฟ้าและค่าความต้านทานไฟฟ้าที่สูง นั่นจึงสามารถประยุกต์มาใช้เป็นแผงโซลาร์เซลล์ที่ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้

4. ใช้เป็นสารเคลือบผลิตภัณฑ์ มักใช้เป็นสารเคลือบในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมแก้วและกระจก หรืออุตสาหกรรมผลิตกระเบื้องและสุขภัณฑ์ เป็นต้น ด้วยคุณสมบัติที่สามารถยึดเกาะและเคลือบติดผิวได้ง่าย มีความทนทานต่อการกัดกร่อน มีคุณสมบัติในการทำความสะอาดตัวเอง นั่นจึงช่วยลดปัญหาเรื่องแบคทีเรียและกลิ่นได้ นอกจากนี้การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์สำหรับเคลือบผิวผลิตภัณฑ์สามารถช่วยลดต้นทุนการผลิต และลดน้ำหนักรวมของผลิตภัณฑ์ได้อีกด้วย

5. ใช้เป็นสารกำจัดมลพิษ ไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกใช้เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงอย่างแพร่หลาย ซึ่งสามารถประยุกต์มาใช้ในการกำจัดแบคทีเรีย ด้วยความทนทานต่อสภาวะเคมีต่าง ๆ ของไทเทเนียมไดออกไซด์จึงสามารถกำจัดแบคทีเรียได้ยาวนานกว่าคลอรีน (Chlorine) หรือโอโซน (Ozone) หลายเท่าตัว หรือความสามารถในการกำจัดมลพิษทางอากาศในการเปลี่ยนก๊าซที่อันตรายให้มีความอันตรายน้อยลง และความสามารถในการกำจัดมลพิษทางน้ำด้วยการใช้เป็นสารแขวนลอยในการกำจัดสารอินทรีย์ต่าง ๆ ในน้ำให้กลายเป็นสารที่มีพิษน้อยลงอย่าง น้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ นั่นจึงจะเห็นว่าเครื่องฟอกอากาศหรือเครื่องปรับอากาศมักนำไทเทเนียมไดออกไซด์ไปเป็นส่วนประกอบในเครื่องเพื่อทำหน้าที่กำจัดมลพิษดังกล่าว [30]

ปกติแล้วการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก มักพบว่าจะใช้ในรูปแบบของของแข็ง (ผง) หรือในรูปแบบของสารแขวนลอยแล้วนำไปใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำ ซึ่งการใช้ในลักษณะดังกล่าว จะให้ประสิทธิภาพในการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่ดีเยี่ยม เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับสารอินทรีย์ที่สูง แต่การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบผงก็มีข้อเสียที่สำคัญก็คือ หลังจากกระบวนการสิ้นสุดแล้ว ต้องมีขั้นตอนในการแยกเอาสารตัวเร่งไทเทเนียมไดออกไซด์ออกจากระบบ ซึ่งเป็นเรื่องที่ยุ่งยากซับซ้อน อีกทั้งยังต้องมีค่าใช้จ่ายสูงในการที่จะแยกออกมาจากระบบ เพราะสุดท้ายถ้าไม่สามารถแยกออกมาจากระบบได้ นอกจากจะสิ้นเปลืองแล้ว ยังเป็นการทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมเองอีกด้วย

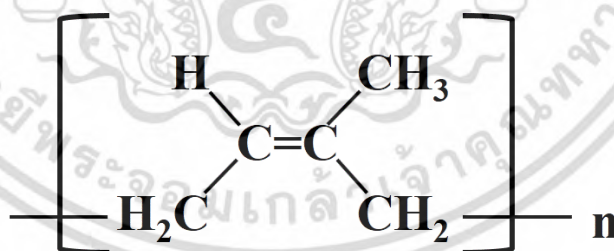
ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ยางธรรมชาติมาผสมกันกับไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อเตรียมให้อยู่ในรูปแบบของแผ่นของผสม ซึ่งนอกจากจะทำให้ง่ายต่อการใช้งานแล้ว เมื่อใช้เสร็จก็สามารถแยกออกมาจากระบบและนำกลับมาใช้ใหม่ได้ นอกจากนี้ยังสามารถเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่ยางธรรมชาติ ที่เป็นวัตถุดิบที่สำคัญของประเทศได้อีกด้วย

2.4 ยางธรรมชาติ

2.4.1 ข้อมูลพื้นฐานของยางและยางธรรมชาติ

ยาง (Rubber) คือ วัสดุพอลิเมอร์ (Polymer) ชนิดหนึ่ง ซึ่งประกอบไปด้วยสายโซ่ของไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) ต่อกันเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ มีองค์ประกอบหลักได้แก่ คาร์บอน (carbon; C) และไฮโดรเจน (Hydrogen; H) ซึ่งคุณสมบัติเด่นของยางคือ ความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ความทนทานต่อแรงกระทำ และความสามารถในการยืดหดที่สูง โดยยางแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ ยางธรรมชาติ (Natural rubber) ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่หาได้จากธรรมชาติ แต่เมื่อราคาที่ไม่แน่นอนของยางธรรมชาติ บวกกับการเข้าสู่ช่วงสงครามโลก จึงทำให้เกิดสภาวะขาดแคลนยางธรรมชาติ มนุษย์จึงได้ทำการศึกษาและสร้างสิ่งที่จะมาทดแทนยางธรรมชาติ นั่นก็คือ ยางสังเคราะห์ (Synthesis rubber)

ยางธรรมชาติ (Natural rubber; NR) หรือยางพารา (Para rubber) เป็นสารที่สกัดได้จากต้นยางพารา ซึ่งเป็นหนึ่งในตระกูลของต้นยางเฮเวีย บลาซิลเลียนซิส (Hevea Brazilliensis) ทำให้บางครั้งก็สามารถเรียกกยางธรรมชาติว่า ยางเฮเวีย (Hevea rubber) ได้เช่นกัน โดยต้นยางเฮเวียนั้น มีต้นกำเนิดมาจากกลุ่มแม่น้ำอะเมซอนจากทวีปอเมริกาใต้ ภายหลังเมื่อมีการนำมาปลูกที่พื้นที่อื่น พบว่าสามารถปลูกได้ดีในพื้นที่ที่มีลักษณะเป็นเขตร้อนชื้น ด้วยสภาพที่ต้องมีดินทราย ดินร่วน การถ่ายเทน้ำที่ดี มีฝนตกตลอด จึงเหมาะแก่การนำมาปลูกในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยเฉพาะประเทศไทยที่สามารถผลิตยางธรรมชาติได้มากที่สุดในโลก จากข้อมูลปี พ.ศ. 2552 พบว่าประเทศไทยสามารถผลิตได้อยู่ที่ปีละ 3.1 ล้านตันต่อปี [31]



รูปที่ 2.8 โครงสร้างพื้นฐานของยางธรรมชาติ

จากรูปที่ 2.8 แสดงลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของยางธรรมชาติที่ประกอบไปด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจน โดยยางธรรมชาติมีชื่อเรียกทางเคมีว่า ซิส-1,4-โพลีไอโซพรีน (Cis-1,4-polyisoprene) นั่นคือ เป็นโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยโมโนเมอร์ (Monomer) ของไอโซพรีน (Isoprene; C_5H_8) ต่อเป็นสายโซ่พอลิเมอร์ขนาดใหญ่ โดย n แทนที่ด้วยจำนวนไอโซพรีนที่ต่อกันเป็นสายโซ่ดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 ลักษณะของน้ำยางธรรมชาติชนิดเข้มข้น

น้ำยางธรรมชาติชนิดเข้มข้น (Concentrated latex rubber) สามารถเตรียมได้จากน้ำยางธรรมชาติ (Latex rubber) ที่ได้มาจากต้นยางพารา โดยน้ำยางธรรมชาติปกติแล้วมีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวขุ่น เป็นสารแขวนลอย (Suspension) ที่ประกอบไปด้วยเนื้อยางแห้ง (Dry rubber) ของพอลิไอโซพรีนอยู่ประมาณร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก มีสารอื่นเจือปน เช่น แมกนีเซียม (Magnesium; Mg) แคลเซียม (Calcium; Ca) หรือสังกะสี (Zinc; Zn) เป็นต้น อยู่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก นอกจากนั้นอีกประมาณร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก เป็นส่วนของน้ำ โดยการแปรสภาพน้ำยางธรรมชาติให้ได้น้ำยางธรรมชาติชนิดเข้มข้น สามารถเตรียมด้วยกระบวนการปั่นกวนด้วยความเร็วรอบสูง (Centrifugation) เพื่อเป็นการแยกน้ำและองค์ประกอบอื่น ๆ ที่ละลายน้ำอยู่ออกจากเนื้อยาง เมื่อปริมาณน้ำและองค์ประกอบอื่น ๆ ลดลงจะทำให้สัดส่วนระหว่างเนื้อยางแห้งกับน้ำนั้นมากขึ้น จากเดิมมีความเข้มข้นอยู่ที่ร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก จะเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก ซึ่งเมื่อสัดส่วนของเนื้อยางในน้ำยางนั้นเพิ่มขึ้น ก็มีโอกาที่อนุภาคของเนื้อยางจะจับตัวกันเองเป็นก้อน จึงต้องทำการรักษาสภาพของเนื้อยางด้วยการเติมแอมโมเนีย (Ammonia; NH_3) โดยการเติมแอมโมเนียไปรักษาสภาพน้ำยางสามารถทำได้เป็น 2 อัตราส่วน ได้แก่ น้ำยางชนิดแอมโมเนียมาก (High ammonia; HA) จะมีปริมาณแอมโมเนียอยู่ที่ร้อยละ 60 ถึง 70 โดยน้ำหนัก รูปที่ 2.9 แสดงถึงลักษณะของน้ำยางชนิดแอมโมเนียมาก โดยมีปริมาณแอมโมเนียอยู่ที่ร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก (60% HA latex) และน้ำยางชนิดแอมโมเนียน้อย (Low ammonia; LA) จะมีปริมาณแอมโมเนียอยู่ที่ร้อยละ 20 ถึง 30 โดยน้ำหนัก [32]



รูปที่ 2.9 น้ำยางธรรมชาติเข้มข้นชนิดแอมโมเนียร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก (60% HA latex)

2.4.3 คุณสมบัติและการประยุกต์ใช้งานของยางธรรมชาติ

คุณสมบัติที่ดีเยี่ยมหลายประการของยางธรรมชาติ รวมไปถึงต้นทุนราคาที่ไม่สูง ทำให้ยางธรรมชาติเป็นที่นิยมในการนำมาประยุกต์และดัดแปลงเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มากมาย โดยคุณสมบัติเด่นของยางธรรมชาติมีดังนี้

1. มีความยืดหยุ่น (Elasticity) ได้ดี ยางธรรมชาติจึงมีความสามารถในการทนต่อแรงกระทำจากภายนอกได้ดี เมื่อเกิดการดึงยืดก็สามารถกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิมได้อย่างรวดเร็ว
2. มีความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) ได้สูง โดยยางธรรมชาติมีความสามารถในการทนต่อแรงดึงได้สูง เนื่องมาจากการที่อนุภาคของยางธรรมชาติมีสมบัติเหนียวติดกัน (Track) ได้ดี
3. มีสมบัติเชิงพลวัต (Dynamic properties) ที่ดี ทำให้ยางธรรมชาติสามารถใช้ได้ทั้งที่อุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ โดยยางธรรมชาติยืดหยุ่นได้ดีเมื่อใช้ในอุณหภูมิสูง และมีความเหนียวติดกันได้ดีเมื่อใช้ในอุณหภูมิต่ำ
4. มีความต้านทานการฉีกขาด (Tear resistance) ได้ดี เนื่องจากยางธรรมชาติมีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบสูง เมื่อถูกฉีกหรือถูกดึงสายโซ่ของยางธรรมชาติจะมีความเป็นผลึกมากขึ้น ทำให้ทนต่อแรงฉีกขาดได้ดี
5. มีความเป็นฉนวน (Insulation) ยางธรรมชาติมีคุณสมบัติความเป็นฉนวน โดยมีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (Specific resistivity) สูงอยู่ที่ 1×10^{15} ถึง 1×10^{16} โอห์ม (ohm; Ω)

ด้วยคุณสมบัติที่ดีดังกล่าวยางธรรมชาติจึงถูกประยุกต์มาเป็น ยางล้อรถยนต์หรือยางล้อในพาหนะต่าง ๆ อุปกรณ์และเครื่องใช้ในบ้าน เช่น ถูมือ ยางรัดของ ปะเก็น เทปปิดลอยรั้ว หรือยางอนามัย เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการนำยางธรรมชาติไปผลิตเป็นวัสดุฉนวนกันไฟฟ้า รองเท้าหรือแผ่นยางรองรองเท้าได้อีกด้วย อย่างไรก็ตามในยางธรรมชาตียังสามารถเสื่อมสภาพได้เมื่อ สัมผัสกับแสงแดด (ถูกออกซิไดส์) หรือตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดไม่ขั้ว งานวิจัยของสุวดี ก้องพารากุล และคณะ [33] จึงได้รวบรวมวิธีการดัดแปลงที่น่าสนใจในการพัฒนาและปรับปรุงคุณสมบัติให้แกยางธรรมชาติ ดังนี้

- การทำเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่ เป็นการทำให้เกิดโครงสร้างตาข่ายแบบร่างแห (Crosslink network) เชื่อมกันมากขึ้นระหว่างสายโซ่ของยางธรรมชาติ เพื่อเป็นการเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลหรือคุณสมบัติเชิงพลวัต (Dynamic properties) ให้สูงขึ้น โดยกระบวนการที่นิยม คือ กระบวนการวัลคาไนเซชัน (Vulcanization process)

- การผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น เป็นการผสมยางธรรมชาติกับพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของยางธรรมชาติให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน เช่น การผสมยางธรรมชาติกับยางสไตรีน (SBR) เพื่อให้มีความทนทานต่อแรงเสียดสี มีความเหนียวที่สูง คงทนต่ออุณหภูมิ เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมล้อรถยนต์ เป็นต้น

- การเปลี่ยนพันธะคู่ในโครงสร้างให้เป็นพันธะเดี่ยว เป็นการสลายพันธะคู่ที่เป็นพันธะของคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัวในโครงสร้างของยางธรรมชาติให้เป็นพันธะเดี่ยว ซึ่งทำให้โครงสร้างของยางเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ธรรมชาติมีความทนทานต่อแสงแดด (โอโซน) หรือเสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้น สามารถทำด้วยกระบวนการคลอรีเนชัน (Chlorination process) หรือ กระบวนการไฮโดรจิเนชัน (Hydrogenation process) ที่เป็นกระบวนการในการเติมคลอรีนหรือไฮโดรเจนเข้าไปทำพันธะบริเวณพันธะคู่ของคาร์บอนในโครงสร้างของยางธรรมชาติ

2.4.4 การประยุกต์ยางธรรมชาติมาใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก

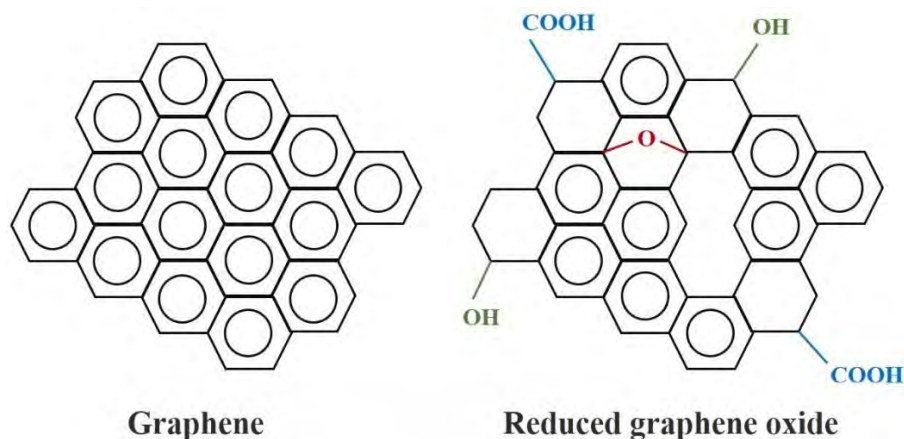
จากที่กล่าวไว้ข้างต้นว่างานวิจัยนี้ต้องการนำยางธรรมชาติที่เป็นผลผลิตสำคัญของประเทศมาเพิ่มมูลค่าด้วยการผสมกันกับไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยคาดหวังว่าจะได้รับผลิตภัณฑ์ที่มีความสะดวกสบายต่อการใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกได้เป็นอย่างดี ซึ่งเมื่อเป็นแผ่นของผสมแล้วก็จะสามารถแยกออกจากระบบได้ง่าย อีกทั้งยังสามารถนำกลับมาใช้ในกระบวนการเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ใหม่อีกด้วย แต่การเตรียมให้อยู่ในลักษณะแผ่นของผสม จะทำให้พื้นที่ผิวสัมผัส (Surface area) ของไทเทเนียมไดออกไซด์ลดลง ซึ่งนั่นเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ประสิทธิภาพในการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกลดลง จึงต้องทำการใส่สารตัวเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ลงไปเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการดูดซับสารอินทรีย์ในระบบให้มาเกาะติดกับแผ่นของผสมมากขึ้น และยังเป็น การเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งผ่านอิเล็กตรอนระหว่าง ไทเทเนียมไดออกไซด์กับระนาบของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ซึ่งเป็นการเพิ่มความสามารถในการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกให้ดียิ่งขึ้น

2.5 รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

2.5.1 ข้อมูลพื้นฐานของกราฟีนและรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

กราฟีน (Graphene) เป็นหนึ่งในอัญรูปของคาร์บอน (Carbon allotropes) ที่มีการจัดเรียงตัวในรูปแบบหกเหลี่ยม (Hexagon) รังผึ้งทั่วไป โดยคาร์บอนบนแผ่นกราฟีนมีการจัดเรียงตัวของออร์บิทัล (Orbital) แบบ sp^2 นั่นคือ คาร์บอน 1 ตัว ทำพันธะกับคาร์บอนตัวอื่นในระนาบเดียวกันอีก 3 ตัว ซึ่งกราฟีนมีโครงสร้างลักษณะแบบเดียวกันกับกราไฟต์ (Graphite) แตกต่างกันตรงที่กราไฟต์ จะเป็นการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของระนาบคาร์บอนซ้อนหน้ากันเป็นชั้น ๆ มีโครงสร้างผลึก (Unit cell) แบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) แต่กราฟีนคือแผ่นระนาบเพียงชั้นเดียวของกราไฟต์ ที่มีความหนาเพียง 0.335 นาโนเมตร นั้นทำให้กราฟีนเป็นวัสดุที่น้ำหนักเบา มีความแข็งแรงสูง เกือบโปร่งใสเนื่องจากมีความหนาน้อยมาก เป็นตัวนำความร้อนและนำไฟฟ้าได้ดี โดยกราฟีนบริสุทธิ์ถูกค้นพบโดย ดร. อังเดร เกม (Dr. Andre Geim) และดร. คอนสแตนติน โนโวเซลอฟ (Dr. Konstantin Novoselov) อาจารย์จากมหาวิทยาลัยแมนเชสเตอร์ (Manchester's university) ได้ใช้เทปกาวยาวปะทับกันเพื่อดึงลอก กราไฟต์ให้หลุดทีละชั้นจนได้แผ่นของกราฟีนที่มีความหนาเพียงคาร์บอนอะตอมเดียว ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีขั้นตอนยุ่งยากซับซ้อน ใช้เวลาในการผลิตสูง ยากต่อการผลิตเป็นจำนวนมากจึงทำให้กราฟีนมีราคาที่สูง [34]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 เปรียบเทียบโครงสร้างระหว่างกราฟีนและรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (Reduced graphene oxide; rGO) คือ กราฟีนที่เตรียมได้จากกระบวนการทางเคมี (Chemical process) โดยสามารถเตรียมได้ที่ละจำนวนมากจึงเหมาะต่อการผลิตในเชิงอุตสาหกรรม ถึงแม้รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์จะมีลักษณะเป็นแผ่นระนาบคาร์บอนชั้นเดียวเหมือนกันกับกราฟีนมาก ดังรูปที่ 2.10 ที่แสดงความแตกต่างกันตรงที่กราฟีนเป็นโครงสร้างที่มีแค่คาร์บอนและไฮโดรเจนเท่านั้น ทำให้กราฟีนมีสมบัติเป็นสารที่ไม่มีขั้ว (Non-polar) แต่รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีหมู่ฟังก์ชันของออกซิเจน เช่น หมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group; OH) หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group; COOH) หรือหมู่อีพอกซี (Epoxy group) เป็นต้น โดยหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวจะอยู่รอบ ๆ ที่ขอบหรือระหว่างโครงสร้างในปริมาณเล็กน้อย ทำให้รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีสมบัติเป็นสารที่มีขั้ว (Polar) ซึ่งส่วนใหญ่มีขั้วอยู่ในลักษณะของสารแขวนลอยกับน้ำ จึงสะดวกต่อการขนส่ง จัดเก็บ และนำไปใช้งาน

2.5.2 การสังเคราะห์รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

การสังเคราะห์รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์สามารถสรุปได้ด้วยรูปที่ 2.11 โดยเริ่มจากการเปลี่ยนกราไฟต์ไปเป็นกราไฟต์ออกไซด์ (Graphite oxide) แล้วจึงเปลี่ยนต่อให้กลายเป็นกราฟีนออกไซด์ (Graphene oxide; GO) และเมื่อผ่านกระบวนการรีดักชันก็จะได้รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในขั้นตอนสุดท้าย ซึ่งกระบวนการสังเคราะห์ดังกล่าวจะมีขั้นตอนและวิธีการ ดังนี้

1. การสังเคราะห์กราไฟต์ออกไซด์ เป็นขั้นตอนในการเปลี่ยนผงดินสอหรือผงกราไฟต์ ให้ได้ผงกราไฟต์ออกไซด์ ผ่านกระบวนการของฮัมเมอร์ (Hummer's method) ซึ่งเป็นกระบวนการตัดแปลงหมู่ฟังก์ชันให้แก่กราไฟต์ ด้วยการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันของออกซิเจน อย่าง หมู่คาร์บอกซิล หมู่คาร์บอนิล หมู่ไฮดรอกซิล หมู่คีโตน หรือหมู่อีพอกซี แทรกในระหว่างชั้นทำให้ความกว้างระหว่างระนาบผลึก (D-spacing) ของกราไฟต์นั้นกว้างมากขึ้น โดยกระบวนการนี้จะใช้ตัวออกซิไดส์ที่รุนแรง

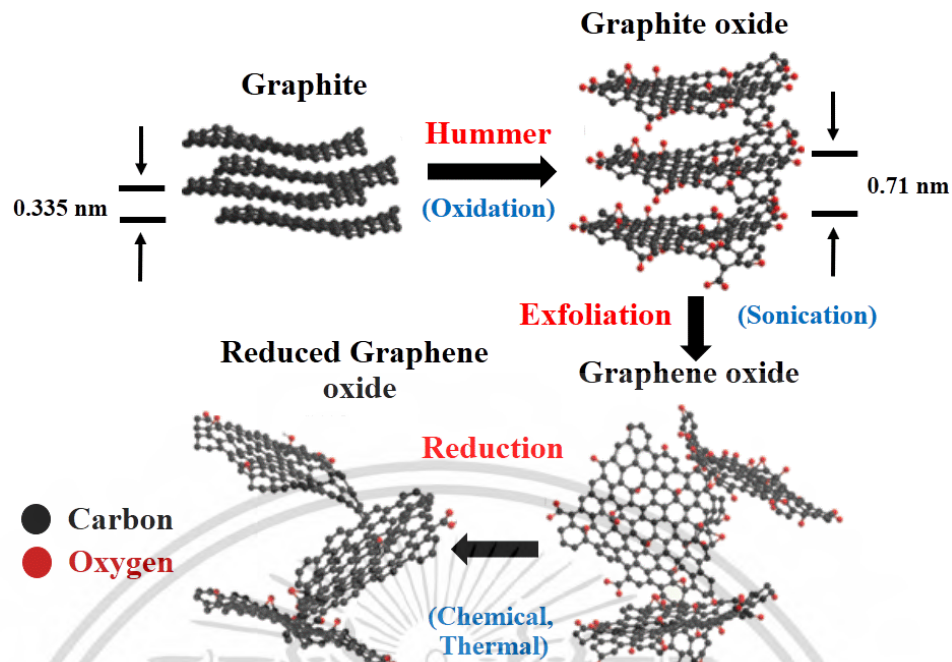
อย่าง กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid; H_2SO_4) กรดไนตริก (Nitric acid; HNO_3) หรือ โพแทสเซียม-เอกซาลเนตเป็นเอกซาลเนตที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปอร์แมงกาเนต (Potassium permanganate; KMnO_4) สำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในการดัดแปลงหมู่ฟังก์ชันดังกล่าว โดยผงกราฟไฟต์ออกไซด์มีลักษณะเป็นผงสีน้ำตาลแตกต่างจากผงกราฟไฟต์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้นที่มีสีดำ

2. การสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ เป็นขั้นตอนในการเปลี่ยนผงกราฟไฟต์ออกไซด์ให้ได้สารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ โดยการใช้กระบวนการคลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonication process) แทรกไประหว่างชั้นของกราฟไฟต์ออกไซด์ที่เกาะกันด้วยแรงแวนเดอวาลส์ (Van der Waals forcing) แล้วจึงหลุดออกมาเป็นแผ่นชั้นเดียวของกราฟีนออกไซด์ ทั้งนี้กระบวนการนี้เกิดขึ้นได้ก็เนื่องมาจากการดัดแปลงหมู่ฟังก์ชันด้วยกระบวนการฮุมเมอร์ทำให้ช่องว่างระหว่างชั้นของกราฟไฟต์กว้างมากขึ้น ส่งผลให้แรงแวนเดอวาลส์ที่เกาะกันระหว่างชั้นนั้นอ่อนลง เมื่อเจอความดันจากคลื่นความถี่สูงแทรกเข้ามาก็จะทำให้เกิดการแยกออกจากกันได้ง่ายขึ้น โดยสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์เป็นสารที่มีขี้วจึงสามารถละลายน้ำได้เป็นอย่างดี เนื่องมาจากมีหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ เกาะอยู่ทั่วทั้งแผ่นระนาบของคาร์บอน

3. การสังเคราะห์รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ เป็นขั้นตอนในการรีดิวซ์สารแขวนลอยสีน้ำตาลของกราฟีนออกไซด์ ให้ได้สารแขวนลอยสีดำของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ โดยในกระบวนการรีดักชันนั้นสามารถทำได้อยู่ 2 วิธีหลัก ๆ ได้แก่ กระบวนการรีดักชันทางความร้อน (Thermal reduction) และกระบวนการรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction) ในส่วนของกระบวนการรีดักชันทางความร้อนเป็นกระบวนการที่เรียบง่าย ไม่ซับซ้อน ไม่ต้องใช้สารเคมีที่เป็นอันตราย แต่จำเป็นต้องใช้เวลานานกว่าจะสามารถรีดิวซ์จนได้รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองเวลาและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายของเครื่องจักร โดยส่วนมากนิยมกระบวนการรีดักชันทางเคมี เพราะเป็นกระบวนการที่รวดเร็ว ให้ผลผลิตร้อยละ (Percent yield; % yield) ของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่สูง แต่ก็ต้องใช้สารเคมีจำพวกไฮดราซีน (Hydrazine; N_2H_4) ไฮโดรควิโนน (Hydroquinone; $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}_2$) หรือ โซเดียมโบโรไฮไดรด์ (Sodium borohydride) ซึ่งเป็นสารที่เป็นอันตรายต่อทั้งร่างกายมนุษย์และต่อสิ่งแวดล้อม เป็นตัวช่วยในการรีดิวซ์ [35]

รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีลักษณะและคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับกราฟีน โดยสามารถสังเคราะห์ได้จากกราฟีนออกไซด์ที่มีคุณสมบัติด้อยกว่าทั้งในด้านความแข็งแรง ความยืดหยุ่น ความโปร่งแสง หรือ สมบัติการนำไฟฟ้า ซึ่งหากใช้กระบวนการรีดักชันทางความร้อน หรือทางเคมีได้ดี รวมถึงการใช้เวลาให้มากพอในการกำจัดหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ บนระนาบของกราฟีนออกไซด์ได้หมด ก็จะทำให้ได้กราฟีน แต่จะเป็นการสิ้นเปลืองทั้งเวลาและต้นทุนในการทำปฏิกิริยา จึงนิยมให้กระบวนการสังเคราะห์สิ้นสุดลงที่การได้สารแขวนลอยสีดำของรีดิวซ์กราฟีน ที่มีคุณสมบัติแตกต่างเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกราฟีน แต่สามารถประหยัดต้นทุนและเวลาในการผลิตได้ดีกว่า [36]



รูปที่ 2.11 การสังเคราะห์รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์โดยใช้กราฟไฟต์เป็นสารตั้งต้น โดยดัดแปลงจาก [36]

2.5.3 คุณสมบัติและการประยุกต์ใช้งานของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์หรือกราฟีนกำลังเป็นที่สนใจ จากทั้งนักวิจัยและอุตสาหกรรมต่าง ๆ ทั่วโลก เนื่องจากมีคุณสมบัติที่เด่นอยู่หลายประการ เช่น ความแข็งแรง ความยืดหยุ่น สมบัติการนำไฟฟ้า ความทนทานต่อสารเคมี หรือความโปร่งแสง เป็นต้น นั่นจึงสามารถประยุกต์ไปใช้ได้อย่างหลากหลาย โดยรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีคุณสมบัติที่สำคัญและการประยุกต์ใช้งาน ดังนี้

1. ด้านอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic properties) รีดิวซ์กราฟีนมีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำมาก นั่นจึงทำให้มีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดีมากจนเกือบเทียบเท่าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด (Superconductor) โดยมาจากการที่รีดิวซ์กราฟีนไม่มีช่องว่างพลังงานระหว่างชั้นวาเลนซ์และชั้นเหนี่ยวนำ ทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระทั่วทั้งโครงสร้าง ซึ่งสามารถประยุกต์ไปใช้ในด้านของแผงวงจรไฟฟ้า ทรานซิสเตอร์ หรือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ เป็นต้น

2. ความโปร่งแสง (Translucent properties) จากความบางของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นั้น จึงทำให้เป็นวัสดุที่มีความโปร่งแสงสูง แต่ขณะเดียวกันก็สามารถดูดซับแสงได้สูงถึงร้อยละ 2.3 ซึ่งมากกว่าวัสดุอื่น ๆ ที่มีความโปร่งแสงเท่ากัน ด้วยการที่รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์เป็นวัสดุที่มีความใสสูง แต่สามารถดูดซับแสงได้ดี จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในด้านของแผงวงจรพลังงานอาทิตย์ ตัวตรวจจับแสง (Optical sensor) หรือ ไดโอดเปล่งแสง (Light emitting-diode) เป็นต้น

3. คุณสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีคุณสมบัติเชิงกลที่สูง โดยเฉพาะความแข็งแรง พบว่าที่ความหนาเทียบเท่ากับเหล็ก รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีความแข็งแรงสูงกว่าเป็นร้อยเท่า อีกทั้งยังมีความสามารถในการยืดหยุ่นได้สูง ซึ่งแตกต่างจากวัสดุอื่น ๆ ที่มีความแข็งแรงแต่

เอกสารนี้เป็นเอกสารสิทธิ์สงวนลิขสิทธิ์หรือเป็นการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการวิจัย ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

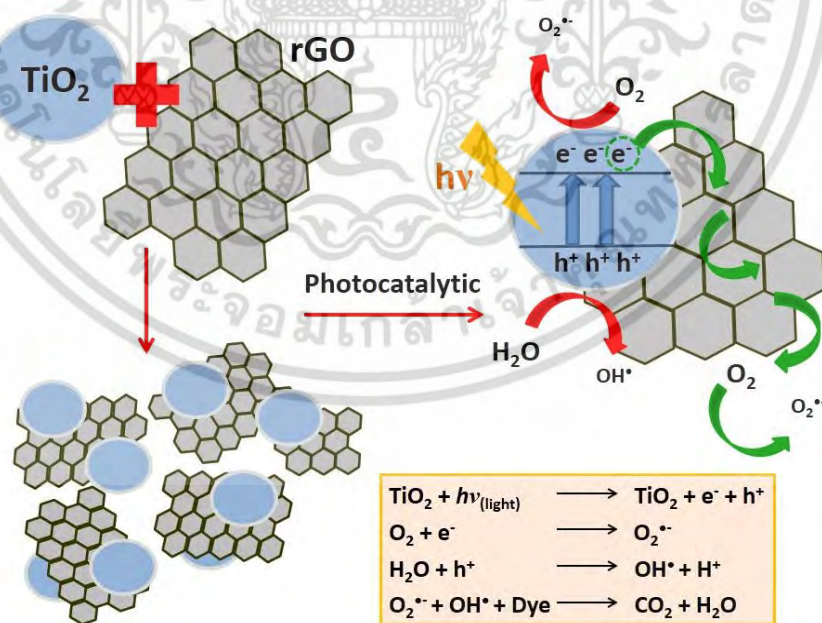
เพราะ จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในด้าน การเสริมแรงให้แก่ชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์ ที่ต้องการทั้งความแข็งแรงและความยืดหยุ่น เช่น โทรงศ์พท์มือถือ หรือ หน้าจอสกรีน เป็นต้น

4. คุณสมบัติเชิงความร้อน (Thermal properties) วัสดุกราฟีนออกไซด์มีความสามารถในการนำความร้อนได้ดี ซึ่งมาจากมีค่าการนำความร้อนจำเพาะที่สูง โดยสามารถนำความร้อนกระจายได้ทุกทิศทางตามระนาบของแผ่นวัสดุกราฟีนออกไซด์ ซึ่งเหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้ไปเป็นเครื่องจักรหรือชิ้นส่วนในโรงงาน หรือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อย่าง คอมพิวเตอร์ ที่ต้องการความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้ดี ที่จะป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนสะสมในระบบสูง ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญให้เกิดการชำรุดของอุปกรณ์

5. คุณสมบัติทางเคมี (Chemical properties) วัสดุกราฟีนออกไซด์เป็นสารที่มีขั้ว สามารถละลายเข้ากันกับน้ำได้ มีความสามารถในการดูดซับได้สูง เนื่องจากมีรูพรุนในโครงสร้างเป็นจำนวนมาก และมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง จึงสามารถประยุกต์ไปใช้เป็นเซลล์เยื่อเลือกผ่าน (Selective membrane) ในการกลั่นเอทานอล (Ethanol distillation) หรือ การแยกเกลือออกจากน้ำ นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นวัสดุในการตรวจจับแก๊ส (Gas sensor) อย่าง แอมโมเนีย เป็นต้น [37]

2.5.4 การประยุกต์วัสดุกราฟีนออกไซด์มาใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก

วัสดุกราฟีนออกไซด์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่ไทเทเนียมไดออกไซด์ในการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกได้ดังแสดงในรูปที่ 2.12

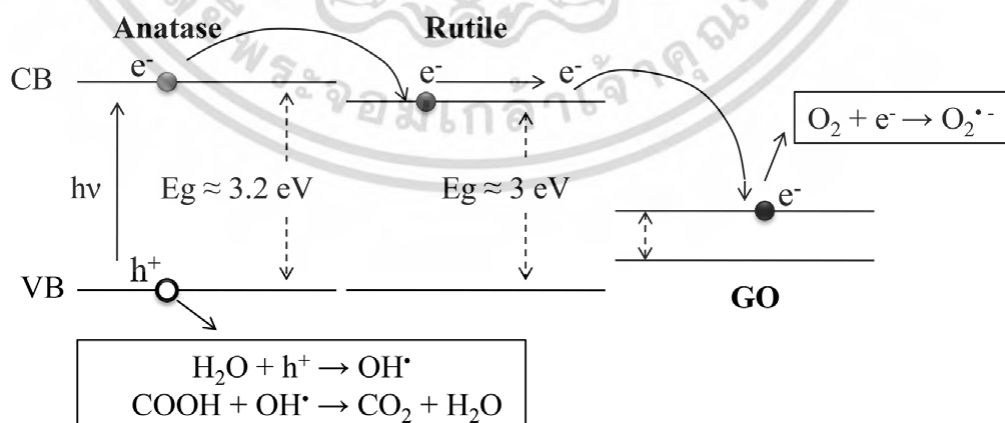


รูปที่ 2.12 การเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์โดยมีวัสดุกราฟีนออกไซด์เป็นตัวช่วยส่งเสริมประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.12 รีดิวิซ์กราฟีนออกไซด์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกได้เป็นอย่างดี โดยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนในการดูดซับ และ ขั้นตอนในการย่อยสลาย ในส่วนของขั้นตอนแรกรีดิวิซ์กราฟีนออกไซด์สามารถเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส ซึ่งเป็นการช่วยให้สารอินทรีย์ในระบบเข้ามาเกาะติดสารตัวเร่งได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ ในส่วนของขั้นตอนการย่อยสลาย เมื่อฉายแสงผ่านสารตัวเร่งแล้วเกิดอิเล็กตรอนกับโฮลขึ้น รีดิวิซ์กราฟีนออกไซด์จะช่วยในการส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังโครงสร้างของตัวเอง ทำให้อิเล็กตรอนเกิดการรวมตัวกันกับโฮลได้ยากขึ้น นอกจากนี้รีดิวิซ์กราฟีนออกไซด์เมื่อรับอิเล็กตรอนมาจากไทเทเนียมไดออกไซด์ก็สามารถช่วยทำหน้าที่เปลี่ยนออกซิเจนในอากาศให้เป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล ทำให้การเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกมีประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้น

M. Hamandi และคณะ [38] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะไลติกในการกำจัดกรดฟอร์มิกภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดเอ ซึ่งใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบผสม (อนาเทสกับรูไทล์) โดยใช้รีดิวิซ์กราฟีนออกไซด์และกราฟีนออกไซด์เป็นสารตัวเติมในการเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่กระบวนการโฟโตคะตะไลติก พบว่า ค่าคงที่อัตราในการกำจัดกรดฟอร์มิก (k_{exp} หน่วย $\mu\text{mol L}^{-1} \text{min}^{-1}$) ของไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างแบบผสม นั้นอยู่ที่ 13.8 ในขณะที่เมื่อทำการเติมกราฟีนออกไซด์ค่าคงที่อัตราจะเพิ่มขึ้นเป็น 30.1 และมีค่าคงที่อัตราเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในการผสมไทเทเนียมไดออกไซด์กับรีดิวิซ์กราฟีนออกไซด์อยู่ที่ 58.1 แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มความสามารถในด้านการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์กับรีดิวิซ์กราฟีนออกไซด์ ซึ่งเป็นการช่วยให้การรวมตัวกันระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลเกิดขึ้นน้อยลง ทำให้ประสิทธิภาพในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกนั้นสูงขึ้น อีกทั้งกราฟีนออกไซด์หรือรีดิวิซ์กราฟีนออกไซด์ เมื่อรับอิเล็กตรอนมาแล้วก็สามารถทำหน้าที่ในการผลิตซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล ที่เป็นเรดิคัลสำคัญของกระบวนการกำจัดสารอินทรีย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แบบจำลองของ M. Hamandi และคณะ อธิบายการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์โดยมีกราฟีนออกไซด์เป็นตัวช่วยถ่ายเทอิเล็กตรอน [38]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 สีย้อม

2.6.1 ข้อมูลพื้นฐานและที่มาของสีย้อม

สีย้อม (Dye) คือ สารที่ใช้เคลือบหรือทาเพื่อให้เกิดสีต่าง ๆ ตามแต่ละชนิดของสีย้อมนั้น ๆ โดยในอดีตมนุษย์ใช้สีย้อมจากธรรมชาติ (Natural dyes) ที่มาจาก พืช ผลไม้ หรือสัตว์ เป็นสารตั้งต้นในการสกัดสีเพื่อย้อมเสื้อผ้า แต่พบว่าสีย้อมจากธรรมชาติสามารถหลุดลอกหรือเสื่อมสภาพจากการใช้งานหรือการซักล้างได้ง่าย จึงทำให้เกิดสีสังเคราะห์ (Synthesis dyes) ที่มีประสิทธิภาพในการยึดเกาะติดกับเสื้อผ้าได้ดียิ่งขึ้น ทนทานต่อการใช้งานหรือการซักล้างมากกว่าสีย้อมจากธรรมชาติ ซึ่งสีสังเคราะห์นั้นถูกค้นพบโดยบังเอิญของ วิลเลียม เพอร์คิน (William Perkin) ที่พยายามสังเคราะห์ยาควินิน (Quinine) ที่เป็นยาในการรักษาโรคมาเลเรีย โดยสีย้อมสังเคราะห์ดังกล่าวถือเป็นจุดเริ่มต้นในการพัฒนาสีย้อมต่าง ๆ มากมายจนถึงปัจจุบัน [39]

2.6.2 ประเภทของสีย้อม

สีย้อมในปัจจุบันเป็นสีย้อมสังเคราะห์ที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรมสารเคมีที่เกี่ยวข้องกับการใช้สี หรือกระบวนการย้อมเครื่องแต่งกาย โดยสามารถแบ่งประเภทของสีย้อมจากกระบวนการย้อม สูตรโครงสร้างเคมี หรือคุณสมบัติของสีย้อมที่แตกต่างกันออกเป็น 9 ประเภท ดังนี้

1. สีเอซิด (Acid Dye) หรือสีแอนไอออน (Anionic dye) เป็นสีที่มีประจุลบ สามารถละลายน้ำได้ ส่วนใหญ่มีโครงสร้างเป็นเกลือของกรดซัลฟิวริก แต่ก็มีบางส่วนที่มีองค์ประกอบของหมู่เอโซ (Azo linkage; $-N=N-$) ในโครงสร้าง โดยกลไกในการย้อมสีชนิดนี้จะเกิดเป็นพันธะไอออนิกในน้ำสีสังเคราะห์ที่มีสภาพเป็นกรด สามารถนำไปย้อมเส้นใยเซลลูโลส อย่าง ปอ ไนลอน ไยขนแกะ ไหม หรือ อะคริลิกได้ สีเอซิดไม่ทนต่อการซัก หรือเหงื่อ จึงไม่เหมาะนำไปใช้ในการย้อมเครื่องแต่งกาย ตัวอย่างสีเอซิด เช่น เอซิดออเรนจ์ 6 (Acid orange 6) หรือ เอซิดบลู 45 (Acid blue 45) เป็นต้น

2. สีเบสิก (Basic dye) หรือสีแคทไอออน (Cationic dye) เป็นสีที่มีประจุบวก สามารถละลายน้ำได้ ส่วนใหญ่มีองค์ประกอบของหมู่เอโซในโครงสร้าง โดยกลไกในการย้อมสีชนิดนี้จะเกิดเป็นพันธะไอออนิกในน้ำสีสังเคราะห์ที่มีสภาพเป็นเบส นิยมย้อมเส้นใยโปรตีน หรือเส้นใยอะคริลิก มีคุณสมบัติเด่นคือ ความสดและความเข้มของสีที่สูง แต่ไม่ทนแสง ตัวอย่างของสีเบสิก เช่น เมทิลีนบลู (Methylene blue) หรือ เบสิกเรด 18 (Basic red 18) เป็นต้น

3. สีดิสเพิร์ส (Disperse dye) เป็นสีที่ไม่สามารถละลายน้ำ แต่กระจายตัวได้ดี ส่วนใหญ่มีองค์ประกอบของหมู่เอโซในโครงสร้าง โดยกลไกการย้อมสีชนิดนี้จะใช้สารตัวนำ หรืออูณหภูมิจึงและความดันที่สูงขึ้น ในการเร่งอัตราการดูดซึมของสีเข้าไปในเส้นใย นิยมย้อมเส้นใยอะซิเตท โพลี-เอสเทอร์ ไนลอน หรืออะคริลิก มีคุณสมบัติเด่นคือ มีความทนทานต่อแสงและแรงขัดถูได้ดี ตัวอย่างของสีดิสเพิร์ส เช่น ดิสเพิร์สออเรนจ์ 25 (Disperse orange 25) หรือ ดิสเพิร์สเรด 1 (Disperse red

1) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. สีไดเรกต์ (Direct dye) หรือสีจับสแทนทีฟ (Substantive dye) เป็นสีที่มีประจุลบ สามารถละลายน้ำได้ มีลักษณะใกล้เคียงกับสีเอซิด ส่วนใหญ่มีองค์ประกอบของหมู่เอโซและหมู่ซัลโฟนิค (Sulfonic; SO_3^-) ในโครงสร้าง โดยกลไกการย้อมสีชนิดนี้จะเกิดพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) กับเส้นใย มีคุณสมบัติเด่นคือ กระบวนการย้อมเกิดได้ง่าย ทนทานต่อแสง แต่ไม่ทนต่อการซักล้าง ตัวอย่างสีไดเรกต์ เช่น ไดเรกต์ออเรนจ์ 25 (Direct orange 25) หรือ ไดเรกต์บราวน์ 44 (Direct brown 44) เป็นต้น

5. สีรีแอคทีฟ (Reactive Dye) เป็นสีที่มีประจุลบ สามารถละลายน้ำได้ โดยแบ่งสีรีแอคทีฟออกเป็น 2 ชนิด ตามลักษณะของโครงสร้างได้แก่ แบบไตรเอซิล (Triazolyl) ที่ประกอบไปด้วยไตรคลอโรไตรเอซีน (Trichlorotriazine; $\text{C}_3\text{N}_3\text{Cl}_3$) และ แบบไวนิลซัลโฟเน (Vinyl sulfone) ที่ประกอบไปด้วยไวนิลซัลโฟเน ($\text{C}_2\text{H}_3\text{SO}_3^-$) กลไกของสีย้อมชนิดนี้จะเกิดพันธะโควาเลนต์กับตัวเส้นใย (จับกับหมู่ไฮดรอกซิลของเส้นใย) นิยมย้อมเส้นใยเซลลูโลส มีคุณสมบัติเด่นคือ ให้สีที่สดใส ทนทานต่อแรงซัก และแรงซักฟอกได้ดี ตัวอย่างสีรีแอคทีฟ เช่น รีแอคทีฟเรด 1 (Reactive red 1) เป็นต้น

6. สีแว้ต (Vat Dye) หรือสีแอนทราควิโนอยด์ (Anthraquinoid dye) เป็นสีที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ ส่วนใหญ่มีองค์ประกอบของหมู่ควิโนน (Quinone) และหมู่แอนทราซีน (Anthracene) ในโครงสร้าง โดยกลไกการย้อมสีชนิดนี้จำเป็นต้องทำการรีดักชันสีแว้ตให้เกิดการละลายและแตกตัวเป็นเกลือก่อน จึงจะสามารถซึมเกาะติดบนเส้นใยได้ ตัวอย่างของสีแว้ต เช่น อินแดนทรีนบลู (Indanthrene blue) เป็นต้น

7. สีเมอร์แดนท์ (Mordant dye) หรือสีโครม (Chrome Dye) เป็นสีสังเคราะห์ที่ต้องใช้สารช่วยยึดติดเข้าไปช่วย เพื่อให้สีสามารถติดบนเส้นใยได้ โดยสารที่ช่วยยึดติด คือ สารประกอบออกไซด์ของโลหะ อย่าง โครเมียม ดีบุก เหล็ก อะลูมิเนียม ซึ่งสารประกอบออกไซด์ของโลหะที่แตกต่างกันก็จะให้คุณสมบัติของสีที่แตกต่างกัน นิยมย้อมเส้นใยโปรตีน หรือเส้นใยพอลิเอไมด์ ตัวอย่างของสีเมอร์แดนท์ เช่น มอร์แดนท์บลู 3 (Mordant blue 3) เป็นต้น

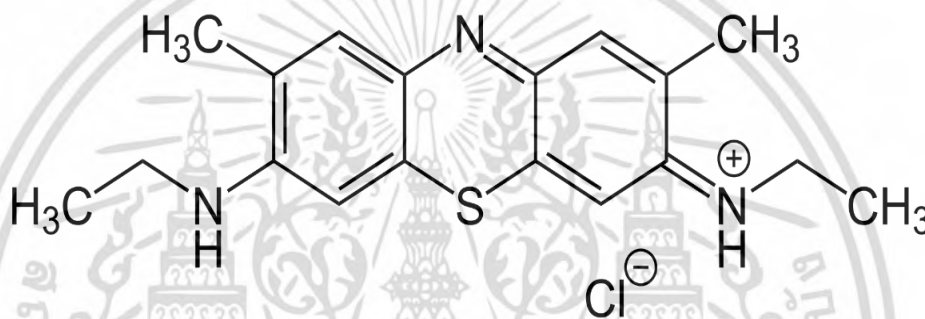
8. สีออกซิเดชัน (Oxidation Dye) เป็นสีที่สามารถละลายน้ำได้ โดยกลไกการย้อมสีชนิดนี้จะเกิดเป็นสารแขวนลอยหลังจากเกิดปฏิกิริยาในน้ำ แล้วสีจะเข้าไปติดแน่นผ่านกระบวนการตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย นิยมย้อมฝ้าย หรือขนสัตว์ ตัวอย่างของสีออกซิเดชัน เช่น รีซาซูลิน (Resazurin) เป็นต้น

9. สีซัลเฟอร์ (Sulfur Dye) เป็นสีที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ มีองค์ประกอบของซัลเฟอร์แทรกอยู่บนโครงสร้างของวงอะโรมาติก โดยกลไกการย้อมสีชนิดนี้จะต้องรีดิวซ์ซัลเฟอร์เพื่อให้อยู่ในรูปของหมู่ไดซัลไฟด์ (Disulfide) และหมู่ควิโนนอิมีน (Quinoneimine) ที่สามารถละลายน้ำแล้วจึงเข้าเกาะกับเส้นใย นิยมย้อมฝ้าย หรือเส้นใยเซลลูโลส มีคุณสมบัติเด่นคือ มีความทนทานสูง เป็นสีที่มีราคาถูก ตัวอย่างของสีซัลเฟอร์ เช่น ซัลเฟอร์แบล็ค 1 (Sulfur black 1) เป็นต้น [40]

2.6.3 สีย้อมเมทิลีนบลู

2.6.3.1 คุณสมบัติและการประยุกต์การใช้งานของสีย้อมเมทิลีนบลู

เมทิลีนบลู (Methylene blue; MB) เป็นสารอินทรีย์ชนิดหนึ่งที่ประกอบไปด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน คลอรีน และซัลเฟอร์ ($C_{16}H_{18}ClN_3S$) มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.14 โดย เมทิลีนบลูมีชื่อตามระบบ IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) ว่า 3,7-bis(Dimethylamino)-Phenazathionium Chloride หรือ Tetramethylthionine Chloride เมทิลีนบลูมีลักษณะเป็นผลึกของแข็งสีเขียวเข้ม เมื่อละลายน้ำแล้วให้สีน้ำเงินเข้มดังรูปที่ 2.15 ซึ่งสีย้อมเมทิลีนบลูจัดอยู่ในประเภทสีสังเคราะห์ชนิดสีเบสิก นั่นคือ มีประจุเป็นบวก สามารถละลายน้ำได้ โดยคุณสมบัติต่าง ๆ ของสีย้อมเมทิลีนบลูจะแสดงดังตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.14 โครงสร้างพื้นฐานของสีย้อมเมทิลีนบลู [41]

สีย้อมเมทิลีนบลูนิยมนำมาใช้เป็นสีย้อมในอุตสาหกรรมสีต่าง ๆ ที่ต้องการสีน้ำเงิน ซึ่งเป็นสีที่ได้จากละลายเมทิลีนบลู นอกจากนี้จะใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ แล้วยังนำมาใช้เป็นอินดิเคเตอร์ (indicator) ในการทดสอบความเป็นกรด-เบส ของสารละลาย อีกทั้งยังสามารถใช้ในการแพทย์ในการใช้เป็นยาฆ่าเชื้อในลำไส้ ยาฆ่าเชื้อทางเดินปัสสาวะ หรือยาฆ่าเชื้อมาเลเรียได้อีกด้วย



รูปที่ 2.15 สารละลายสีน้ำเงินของสีย้อมเมทิลีนบลู

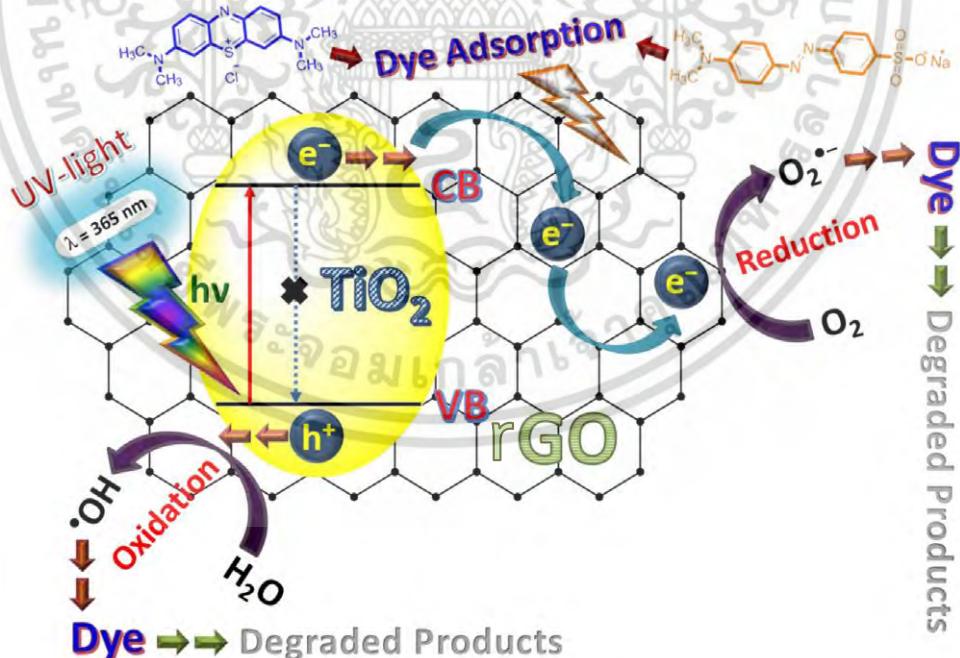
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติพื้นฐานของเมทิลีนบลู [42]

ชื่อและสูตรโมเลกุล	เมทิลีนบลู (Methylene blue) / $C_{16}H_{18}ClN_3S$
มวลโมเลกุล	319.85 กรัมต่อโมล
ลักษณะและสี	ของแข็ง / สีน้ำเงิน
สมบัติการละลายน้ำ	ละลาย
จุดหลอมเหลว	≈ 100 องศาเซลเซียส
ชนิดและประจุของสีย้อม	สีย้อมเบสิก / ประจุบวก
ความยาวคลื่น	665 นาโนเมตร

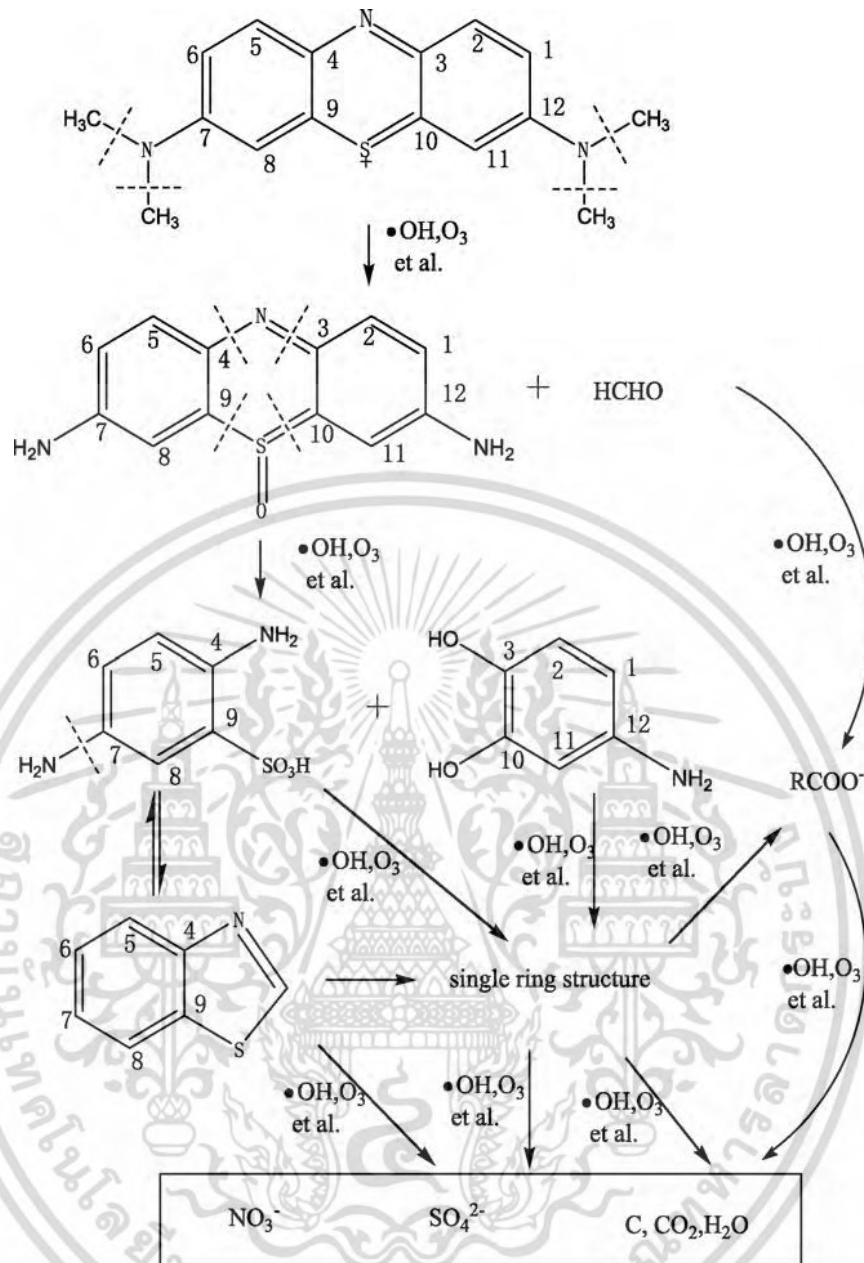
2.6.3.2 การสลายตัวของสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้กระบวนการโฟโตคะตะไลติก

สีย้อมเมทิลีนบลูนิยมถูกนำมาใช้เป็นสารอินทรีย์สำหรับทดสอบและศึกษาประสิทธิภาพในการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้สภาวะต่าง ๆ ในรูปที่ 2.16 แสดงกระบวนการโฟโตคะตะไลติกในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต ผ่านสารตัวเร่งปฏิกิริยาแบบผสมระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์กับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ซึ่งจะสามารถสรุปปฏิกิริยาการสลายตัวของสีย้อมเมทิลีนบลูได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.16 กระบวนการโฟโตคะตะไลติกในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูผ่านสารตัวเร่งผสมไทเทเนียม-ไดออกไซด์กับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ [43]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 ปฏิกิริยาการสลายตัวของสี่อ้อมเมทิลีนบลูภายใต้กระบวนการโฟโตคะตะไลติก [44]

จากรูปที่ 2.17 แสดงกลไกของปฏิกิริยาการสลายตัวของสี่อ้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตตามงานวิจัยของ Fangmin Huang และคณะ [44] โดยพบว่า ไฮดรอกซิลเรดิคัล จะเริ่มเข้าสลายโครงสร้างเมทิลีนบลูตามตำแหน่งที่มีแรงยึดเหนี่ยวพันธะต่ำซึ่งมีพลังงานสลายพันธะ (Bond dissociation energy; BDE) ที่น้อยดังแสดงในตารางที่ 2.3 จึงทำให้ง่ายและว่องไวต่อการสลายตัว ในส่วนของสารอินเทอร์มีเดียท (Intermediate filament) ที่เกิดขึ้นระหว่างการสลายตัวของโครงสร้างอย่าง ฟอรั่มลดีไฮด์ (HCOH) หรือสารประกอบฟีนอลิก (Phenolic) และผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้ายที่ได้ อย่าง ไนเตรต (NO_3^-) ซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) คาร์บอนไดออกไซด์หรือน้ำ จะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถยืนยันได้ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ-แมสสเปกโตรมิเตอร์ (Gas chromatograph-mass spectrometer; GC-MS)

ตารางที่ 2.3 พลังงานสลายพันธะของสารแต่ละชนิดบนโครงสร้างของเมทิลีนบลู

พันธะของโมเลกุล (Molecule bond)	พลังงานสลายพันธะ (kcal/mol)
$(\text{CH}_3)_2\text{-N-C}_6\text{H}_5$	70.8
$\text{C}_6\text{H}_5\text{-NH-C}_6\text{H}_5$	87.4
$\text{C}_6\text{H}_5\text{-S-C}_6\text{H}_5$	76 ± 2.0
$\text{C}_6\text{H}_5\text{-NH}_2$	102.6 ± 1.0

ในงานวิจัยนี้ต้องการศึกษากระบวนการโฟโตคะตะไลติกในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู ซึ่งเป็นสารที่มีโครงสร้างพื้นฐานใกล้เคียงกับสารอินทรีย์ต่าง ๆ มากมาย โดยหลีกเลี่ยงการใช้สารตัวเร่งไทเทเนียมไดออกไซด์แบบผง ที่มีขั้นตอนยุ่งยากซับซ้อนในการนำกลับมาใช้ใหม่ จึงเลือกที่จะผสมเป็นแผ่นของผสมที่สะดวกต่อการใช้งานและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยเลือกใช้อย่างธรรมชาติที่เป็นทรัพยากรสำคัญของประเทศ มีราคาถูก และมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี แต่การใช้งานแผ่นของผสมในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกจะมีประสิทธิภาพลดน้อยลง เนื่องจากมีพื้นที่สัมผัสของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่น้อยลงเมื่อเทียบกับแบบผงที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสที่สูงกว่า จึงทำการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มาเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับให้แก่แผ่นของผสม รวมไปถึงเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างไทเทเนียมกับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ทำให้การรวมตัวกันระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลเกิดขึ้นได้มากขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม นอกจากนี้รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ยังเป็นตัวเสริมความแข็งแรงให้แก่แผ่นของผสม ทำให้แผ่นของผสมมีความทนทานต่อการใช้งานได้มากยิ่งขึ้น

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Seema Singh และคณะ [45] ได้ทำการศึกษาและรวบรวมข้อมูลของงานวิจัยในอดีต ในหัวข้อเกี่ยวกับการนำพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ มาผสมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อใช้เป็นวัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก สำหรับการกำจัดสีย้อมและสารอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ อีกทั้งยังได้อธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการโฟโตคะตะไลติกผ่านสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ ตัวอย่างของพอลิเมอร์ที่ถูกรวบรวมมาทดสอบ เช่น การผสมทำแผ่นฟิล์มกับพอลิเอทิลีน (Polyethylene; PE) การผสมทำโพนัมกับพอลิเอทิลีน การผสมทำฟิล์มกับพอลิสไตรีน (Polystyrene; PS) การผสมทำแผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลต (Polyethylene terephthalate; PET) การผสมทำเป็นเม็ดกับพอลิ-
 สไตรีน เป็นต้น โดยพบว่าประสิทธิภาพของการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกของวัสดุผสม
 พอลิเมอร์กับไทเทเนียมไดออกไซด์จะดีไม่เท่ากับการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบผง เนื่องมาจากการ
 ที่มีพื้นผิวสัมผัสน้อยกว่า แต่ในงานวิจัยต่าง ๆ ก็แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการกำจัดสีย้อมหรือ
 สารอินทรีย์ได้มากกว่าร้อยละ 80 ซึ่งถือว่ามีประสิทธิภาพในการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกได้ดี
 อีกทั้งยังเพิ่มความสะดวกทั้งก่อนและหลังการใช้งาน

Boonchai Seentrakoon และคณะ [46] ได้ทำการศึกษาและพัฒนาคุณสมบัติให้แก่ยาง
 ธรรมชาติที่เป็นทรัพยากรสำคัญของประเทศ โดยยางธรรมชาตินั้นมีสมบัติเชิงกลสูงแต่กลับ
 เสื่อมสภาพได้ง่ายจากการถูกออกซิไดส์ (ที่บริเวณตำแหน่งพันธะคู่ของคาร์บอน) เมื่อสัมผัสกับโอโซน
 แสงแดด หรือแสงอัลตราไวโอเล็ต จึงนำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนมาผสมกับ
 ยางธรรมชาติ เนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีความสามารถในการดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ตได้ดี
 ผลการทดสอบพบว่า หลังจากผ่านการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตยางธรรมชาติที่ผสมไทเทเนียม-
 ไดออกไซด์มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างน้อยลง เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้เติมไทเทเนียมไดออกไซด์
 ในส่วนของความแข็งแรงเชิงกลวัสดุผสมยางธรรมชาติกับไทเทเนียมไดออกไซด์ แสดงแนวโน้มของค่า
 ความต้านทานการดึง (Tensile strength) และค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) ที่
 สูงขึ้น มาจากการที่ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง จึง
 สามารถทำพันธะได้ดีกับแมทริกซ์ของยางธรรมชาติ นอกจากนี้เมื่อนำไปทดสอบความสามารถในการ
 ยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *Escherichia coli* (*E. coli*) และ *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) ก็
 แสดงบริเวณที่ไม่เกิดการเติบโตของแบคทีเรีย หรือบริเวณใส (Clear zone) ได้อย่างชัดเจน

Chaval Sriwong และคณะ [47] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการเกิดกระบวนการ
 โฟโตคะตะไลติกและความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ของแผ่นของผสมยางธรรมชาติกับ
 ไทเทเนียมไดออกไซด์ นอกจากนี้ยังศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการ ได้แก่ สภาพความเป็นกรด-
 เบสของสีย้อม (ปัจจัยด้าน pH) ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้ยางธรรมชาติที่มีจำนวนมากในธรรมชาติและมี
 ราคาถูก มาเป็นตัวซับสเตรท (Substrate) ยึดเกาะกับไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยใช้การขึ้นรูปแผ่น
 ของผสมด้วยวิธีการอย่างง่าย (Latex mixing-casting method) เมื่อทดสอบกระบวนการโฟโตคะ
 ตะไลติกพบว่าที่เวลา 180 นาที สามารถกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูไปได้มากกว่าร้อยละ 90 นอกจากนี้
 พบว่าประสิทธิภาพในการใช้ซ้ำยังได้ผลที่ดีเยี่ยม ซึ่งสามารถใช้ซ้ำได้มากกว่า 4 ครั้ง (ประสิทธิภาพใน
 การกำจัดอยู่ที่ร้อยละ 99.67 99.89 98.35 และ 92.37 ตามลำดับ) โดยที่ประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับ
 การใช้ในครั้งแรกแทบไม่ได้แตกต่างกัน จึงสะดวกต่อการนำมาใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกและ
 การนำกลับมาใช้ใหม่ ในส่วนผลของสภาพความเป็นกรด (pH เท่ากับ 3) และเบส (pH เท่ากับ 11)
 พบว่า มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูที่ดีในสภาวะเบส เนื่องจากคุณสมบัติทางด้าน
 ประจุของไทเทเนียมไดออกไซด์ (pzc) จะเป็นลบมากขึ้นเมื่ออยู่ในสภาวะที่มี pH มากกว่า 6.7 ทำให้
 ดึงดูดอนุภาคสีย้อมเมทิลีนบลูที่เป็นบวกมาทำปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกได้ดียิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Dan Li และคณะ [48] ได้ทำการศึกษากระบวนการเตรียมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วยวิธีการทางเคมี (Chemical conversion) ที่เป็นกระบวนการที่รวดเร็วและให้ผลผลิตสูง แตกต่างจากวิธีการดึงลอกที่ละแผ่น (Mechanical exfoliation) ในอดีตที่ช้าและให้ผลผลิตต่ำ อีกทั้งรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เตรียมได้จากกระบวนการทางเคมีจะมีความสามารถในการละลายน้ำ ทำให้สะดวกต่อการจัดเก็บหรือนำไปใช้งานต่าง ๆ โดยเตรียมได้จากวิธีการดัดแปลงกระบวนการของฮัมเมอร์ (Modified Hummer's method) ในการเปลี่ยนกราฟไฟต์ไปเป็นกราฟไฟต์ออกไซด์ที่มีหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ แทรกบนระนาบของคาร์บอน จากนั้นจะใช้กระบวนการอัลตราโซนิเคชันและการหมุนเหวี่ยงในการแยกกราฟไฟต์ออกไซด์ให้หลุดออกมาจนได้กราฟีนออกไซด์ หลังจากนั้นจึงนำไปรีดิวซ์ทางเคมีโดยใช้ไฮดราซีน (Hydrazine) และมีแอมโมเนียเป็นตัวรักษาเสถียรภาพ ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่า สัดส่วนของไฮดราซีนที่เหมาะสมในการรีดิวซ์อยู่ที่ 7 ต่อ 10 ของปริมาณกราฟีนออกไซด์ นอกจากนี้ในตัวอย่างที่ไม่ได้เติมแอมโมเนียยังพบการจับตัวเป็นก้อนและตกตะกอนของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ มาจากการที่อนุภาคของแอมโมเนียที่เติมลงไปจะทำพันธะที่พื้นผิวของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ป้องกันไม่ให้รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์จับตัวกันเอง

Nicholas J. Whiteside และคณะ [49] ได้ทำการศึกษาเตรียมวัสดุผสมไฮโดรเจล (Hydrogel) ระหว่างรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์กับแ่งเจลแลนแกม (Gellan gum) ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหารในด้านฟิล์มเคลือบอาหาร เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการนำไฟฟ้าและสมบัติเชิงกลของวัสดุผสม โดยการสังเคราะห์รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ เริ่มจากวิธีการดัดแปลงกระบวนการดัดแปลงของฮัมเมอร์และกระบวนการโซนิเคชันเพื่อให้ได้กราฟีนออกไซด์ จากนั้นใช้ไฮดราซีนเป็นตัวรีดิวซ์และมีแอมโมเนียเป็นตัวรักษาเสถียรภาพ แล้วจึงนำไปบ่มจนผสมกับแ่งเจลแลนแกมที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยเติมแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) เป็นสารเชื่อมโยงเพื่อให้เกิดเป็นวัสดุผสมไฮโดรเจล ผลการศึกษสมบัติเชิงกลและสมบัติการนำไฟฟ้าแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนเมื่อทำการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ โดยมีค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) และค่าความต้านทานแรงดึงสูงขึ้นเมื่อเทียบกับแ่งเจลแลนแกม จาก 140 ± 16 เพิ่มเป็น 185 ± 46 เมกะปาสคาล (MPa) และ 7.8 ± 25 เพิ่มเป็น 8.7 ± 26 MPa ตามลำดับ ในส่วนของสมบัติการนำไฟฟ้าพบว่า มีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดีขึ้นจากคุณสมบัติในด้านการถ่ายเทอิเล็กตรอนของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ พิสูจน์ได้จากเมื่อวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า (Electrical resistance) แล้วมีค่าลดลงจาก 25 ± 2 กิโลโอห์ม ($\text{k}\Omega$) เหลือเพียง 6.3 ± 1 $\text{k}\Omega$ นั่นจึงแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติที่ดีของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่สามารถประยุกต์ไปใช้งานได้หลากหลาย

Peng Fei และคณะ [50] ได้ทำการเพิ่มประสิทธิภาพของสารประกอบซิงค์เฟอร์ไรท์ (Zinc ferrite) ในด้านความเป็นแม่เหล็กและความสามารถในการดูดซับ จากการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วยการเตรียมภายในขั้นตอนเดียว (One-pot method) โดยเริ่มจากการนำผงซิงค์คลอไรด์ไอออน (ZnCl_2) และผงกราฟีนออกไซด์มาผสมให้เข้ากัน จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการโซนิเคชันและกระบวนการโซลโวเทอร์มอล (Solvothermal process) จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารผสมซิงค์เฟอร์ไรท์กับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ เมื่อทำการทดสอบการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูพบว่า ในสารประกอบที่มีรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มากขึ้นจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับได้มากขึ้น เป็นผลมาจากรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีประจุเป็นลบจึงสามารถดึงดูดอนุภาคของเมทิลีนบลูที่มีประจุเป็นบวกได้ดี อีกทั้งการที่โครงสร้างของทั้งรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และเมทิลีนบลูมีองค์ประกอบหลักเป็นวงอะโรมาติก จึงสามารถเกิดพันธะ π - π (Van der Waals) ระหว่าง 2 โมเลกุลได้อีกด้วย

Yuan-Cheng Cao และคณะ [51] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะไลติกในการกำจัดสีย้อมเมทิลออเรนจ์ (Methyl orange; MO) ผ่านสารตัวเร่งปฏิกิริยาดัวยวัสดุผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์กับไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยการเตรียมวัสดุผสมดังกล่าวเตรียมได้จากการนำเอาผงไทเทเนียมไดออกไซด์มาผสมกับผงกราฟีนออกไซด์และน้ำ แล้วปั่นกวนภายใต้ความร้อนเพื่อเป็นการทำให้กราฟีนออกไซด์อยู่ในรูปของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ จากนั้นสารแขวนลอยผสมที่ได้จะนำไปหมุนเหวี่ยงและอบให้แห้ง จะได้วัสดุผสมแบบผงของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อนำไปใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกพบว่า เมื่อใช้เวลา 120 นาที สามารถกำจัดสีย้อมเมทิลออเรนจ์ได้ถึงร้อยละ 96.4 มากกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่เติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่กำจัดได้เพียงร้อยละ 77.4 ซึ่งมาจากความสามารถในการถ่ายเทอิเล็กตรอนที่ดีขึ้นเมื่อมีรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ อีกทั้งยังเพิ่มความสามารถในการดูดซับและพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาให้แก่วัสดุผสม โดยยืนยันได้จากผลของ BET ที่แสดงให้เห็นถึงพื้นที่ผิวที่มากขึ้นจาก 62.4 ตารางเมตรต่อกรัม ของไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็น 247.3 ตารางเมตรต่อกรัม นอกจากนี้หลังจากใช้งานในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกเสร็จแล้วยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่ต้องผ่านกระบวนการหมุนเหวี่ยงและนำไปบ่อนำมาใช้

Xiangkang Zeng และคณะ [52] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะไลติกในการกำจัดจุลินทรีย์ก่อโรค (Pathogen) อย่าง เชื้อแบคทีเรีย *E. coli* ผ่านสารตัวเร่งปฏิกิริยาดัวยวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ กลูโคส (Glucose) และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ โดยเตรียมได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal process) เพื่อให้ไทเทเนียมไดออกไซด์และกลูโคสกระจายตัวอยู่บนระนาบของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ผลของกระบวนการโฟโตคะตะไลติกพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรานั้นดีขึ้น เนื่องจากความสามารถในการถ่ายเทอิเล็กตรอนที่ดีขึ้น ทำให้เกิดการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลได้น้อยลง ในระบบจึงสามารถผลิตซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลได้มากขึ้น ซึ่งเป็นเรดิคัลสำคัญในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* อีกทั้งยังพบว่าสามารถใช้แสงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดแสงได้ โดยส่วนของแสงอัลตราไวโอเล็ตสามารถกระตุ้นไทเทเนียมไดออกไซด์ให้เกิดปฏิกิริยาได้โดยตรง แต่ในส่วนของแสงวิซิเบิลจะกระตุ้นผ่านรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์แล้วส่งอิเล็กตรอนไปเกิดปฏิกิริยาที่ไทเทเนียมไดออกไซด์ นอกจากนี้ยังมีกลูโคสที่ทำหน้าที่เป็นตัวช่วยถ่ายเทและเก็บอิเล็กตรอนให้อยู่ในโครงสร้างของวัสดุผสมนานยิ่งขึ้นอีกด้วย

Lu Lin และคณะ [53] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะไลติกเปรียบเทียบระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกับเหล็ก ($\text{TiO}_2\text{-Fe}$) และไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ($\text{TiO}_2\text{-rGO}$) ในการกำจัดสารอินทรีย์ที่เป็นของเสียจากอุตสาหกรรมยา ได้แก่ ไอบิวพรופן (Ibuprofen) คาร์บามาเซพีน (Carbamazepine) และซัลฟามेतอกซาโซล (Sulfamethoxazole) ทดสอบภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตและแสงวิซิเบิล โดยผลจากกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ตพบว่า ทั้ง $\text{TiO}_2\text{-rGO}$ และ $\text{TiO}_2\text{-Fe}$ นั้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดของเสียจากอุตสาหกรรมยาได้ดีกว่า TiO_2 เนื่องจากวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถเกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างโครงสร้างกับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์หรือเหล็กได้ดียิ่งขึ้น การเกิดการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลจึงเกิดได้ช้าลง แต่ใน $\text{TiO}_2\text{-rGO}$ นั้นมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า ซึ่งมาจากความสามารถในการถ่ายเทอิเล็กตรอนและความสามารถในการดูดซับของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นั้นสูงกว่าเหล็ก แต่ในส่วนของกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้แสงวิซิเบิลของ $\text{TiO}_2\text{-Fe}$ นั้นมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า $\text{TiO}_2\text{-rGO}$ เพราะมีค่าช่องว่างพลังงานของ $\text{TiO}_2\text{-Fe}$ (2.40 eV) ที่น้อยกว่า $\text{TiO}_2\text{-rGO}$ (2.85 eV) เมื่อช่องว่างพลังงานน้อยลงจึงสามารถดูดซับแสงวิซิเบิลที่มีพลังงานต่ำมาเกิดกระบวนการในการกำจัดเสียได้

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. ผงกราไฟต์ (Graphite powder): เกรดการค้า, SIGMA-ALDRICH
2. โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium permanganate; KMnO_4): เกรดการค้า, CARLO ERBA
3. กรดซัลฟิวริก (Sulphuric acid; H_2SO_4): ความเข้มข้นร้อยละ 96 โดยน้ำหนัก, เกรดการค้า, CARLO ERBA
4. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide; H_2O_2): ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก, เกรดการค้า, CARLO ERBA
5. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid; HCl): ความเข้มข้นร้อยละ 37 โดยน้ำหนัก, เกรดการค้า, CARLO ERBA
6. อะซิโตน (Acetone; $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$): เกรดการค้า, CARLO ERBA
7. สารละลายแอมโมเนีย (Ammonia solution; NH_4OH): ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก, เกรดการค้า, Baker, USA.
8. ไฮไดรราซีนไฮเดรต (Hydrazine hydrate; N_2H_4): ความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก, เกรดการค้า, SIGMA-ALDRICH
9. ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide; TiO_2): Degussa P25 (อนาเทสร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก และรูไทล์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก), เกรดการค้า, Degussa AG, Germany
10. น้ำยางธรรมชาติ (Natural rubber; NR): ความเข้มข้นร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก, ชนิด High ammonia, กรมการยาง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
11. สีย้อมเมทิลีนบลู (Methylene blue; $\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{N}_3\text{SCL}$): มวลโมเลกุลเท่ากับ 319.85, เกรดการค้า, Fluka, USA.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องแก้ว (Glassware)
2. ช้อนตักสาร (Spatula)
3. ไมโครปิเปต (Micropipette)
4. แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic bar)
5. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด 4 ตำแหน่ง (Analytical balance): FR-200, A&D Company
6. เครื่องปั่นกวนแบบให้ความร้อน (Hot plate)
7. เครื่องกรองสุญญากาศ (Vacuum pump)
8. เตาอบ (Oven): Serial no.8 502.0552, MEMMERT, Germany
9. ตู้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic reactor): ขนาด 40 x 80 x 60 เซนติเมตร (กว้าง x ยาว x สูง)
10. หลอดฟลูออเรสเซนซ์แสงอัลตราไวโอเล็ต (Black light, 18 วัตต์)
11. หลอดฟลูออเรสเซนซ์แสงวิสิเบิล (Visible light, 18 วัตต์)
12. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis Spectrophotometer): Evolution 201, Thermo Scientific, USA.
13. เครื่องวิเคราะห์การกระจายและสะท้อนของแสงอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิล (Ultraviolet-visible diffuse-reflectance spectrophotometer; DRS): UV-2401, Shimadzu, Japan
14. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction; XRD): XRD-6100, Shimadzu, Japan
15. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Attenuated Total Reflectance Fourier-Transform Infrared spectrometer; ATR-FTIR): Nicolet iS50, Thermo Fisher Scientific Inc., USA.
16. เครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์ (Raman Spectrometer): DXR Smart, Thermo Scientific, USA.
17. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM): JSM5800LV, JEOL, Japan
18. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope; TEM): JM-2010, JEOL, Japan
19. อุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer; EDS): Oxford, ISIS 300, England
20. เครื่องวิเคราะห์เชิงความร้อน (Thermal Gravity Analysis; TGA): Mettler, Toledo, USA.
21. เครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal Testing Machine; UTM): LR5K, LLYOD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การเตรียมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

การเตรียมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์จะเริ่มจาก การใช้กราฟาไฟต์เป็นสารตั้งต้นมาผ่านกระบวนการตัดแปลงวิธีการของฮัมเมอร์ (Modified Hummer's method) ในการเปลี่ยนกราฟาไฟต์เป็นกราฟาไฟต์-ออกไซด์ โดยใช้กระบวนการตัดแปลงเพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงการใช้สารโซเดียมไนเตรต (NaNO_3) ที่เป็นสารอันตราย อีกทั้งกระบวนการของฮัมเมอร์ยังควบคุมอุณหภูมิในการผลิตได้ยากทำให้อาจเกิดระเบิดหรือไฟลุกวาบได้ แตกต่างกับกระบวนการตัดแปลงที่ควบคุมได้ดีขึ้นทำให้ขั้นตอนในการผลิตปลอดภัยมากยิ่งขึ้น หลังจากนั้นจึงนำมาผ่านกระบวนการโซนิเคชันเพื่อให้กราฟาไฟต์ออกไซด์ที่เกาะกันเป็นชั้น ๆ หลุดออกมาจนได้เป็นสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ แล้วจึงใช้กระบวนการรีดักชันทางเคมี โดยการใช้ไฮดราซีนในการเปลี่ยนกราฟีนออกไซด์เป็นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

3.3.1 การเตรียมกราฟาไฟต์ออกไซด์ด้วยวิธีการตัดแปลงวิธีการของฮัมเมอร์

1. ชั่งกราฟาไฟต์ประมาณ 2 กรัม ผสมให้เข้ากันกับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนสประมาณ 6 กรัม
2. เทสารผสมลงในขวดก้นกลมที่หล่อเย็นด้วยน้ำแข็งเป็นเวลา 15 นาที จนขวดก้นกลม มีอุณหภูมิประมาณ 0 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.1 เตรียมสารตั้งต้นทั้ง 2 ชนิด ผสมให้เข้ากัน และหล่อเย็นด้วยน้ำแข็ง

3. ค่อย ๆ เติมกรดซัลฟิวริกชนิดเข้มข้น 46 มิลลิลิตร ปั่นกวนต่อเป็นเวลา 15 นาที
4. นำขวดก้นกลมออกจากถังน้ำแข็ง ปั่นกวนต่อที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น และปั่นกวนต่อที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

5. นำขวดก้นกลมมาหล่อเย็นต่อด้วยน้ำแข็ง จนขวดก้นกลมมีอุณหภูมิประมาณ 20 องศาเซลเซียส จากนั้นค่อย ๆ เติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ปั่นกวนต่อเป็นเวลา 30 นาที

6. นำขวดก้นกลมออกจากถังน้ำแข็ง แล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 90 องศาเซลเซียส พร้อมปั่นกวนต่อเป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 3.3 เติมน้ำกลั่นที่ละเล็กละน้อย และปั่นกวนต่อที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

7. นำขวดก้นกลมมาหล่อเย็นต่อด้วยน้ำแข็ง แล้วเติมน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร จากนั้นนำออกจากถังน้ำแข็งแล้วปั่นกวนต่อที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 20 นาที

8. เติมหัยโตรเจนเปอร์ออกไซด์ 10 มิลลิลิตร แล้วปั่นกวนต่อเป็นเวลา 20 นาที

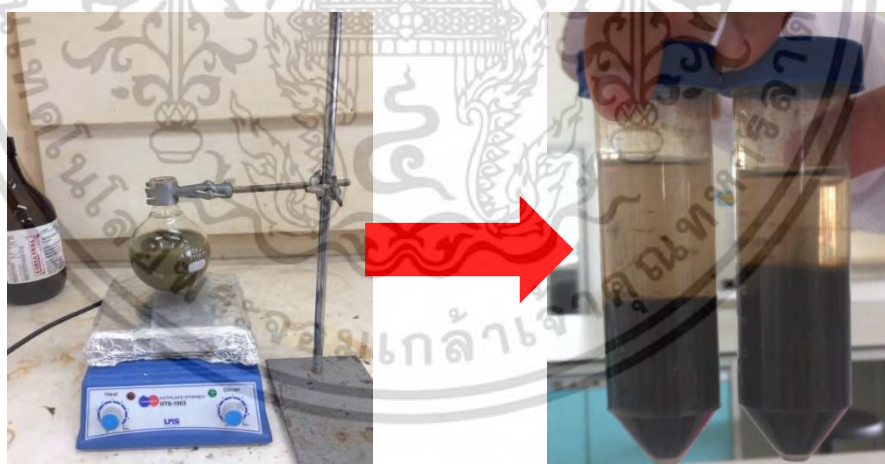
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 เติมน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร และเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อีก 10 มิลลิลิตร ปั่นกวนต่ออีก 20 นาที

9. นำสารที่ได้จากขวดก้นกลมมาหมุนเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 4000 รอบ/นาที เป็นเวลา 5 นาที โดยหมุนเหวี่ยงทั้งหมด 2 รอบ

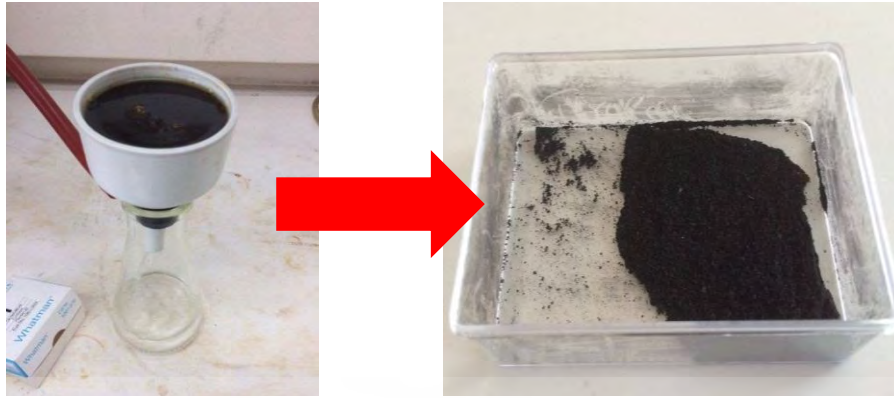
10. เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5 % ต่อปริมาตร มาล้างตะกอนแล้วหมุนเหวี่ยงต่อด้วยความเร็วรอบ 4000 รอบ/นาที เป็นเวลา 5 นาที โดยหมุนเหวี่ยงทั้งหมด 2 รอบ



รูปที่ 3.5 ล้างตะกอนด้วยกรดไฮโดรคลอริก โดยการหมุนเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 4000 รอบ/นาที

11. นำสารที่ได้ไปกรองแบบลดความดัน ล้างสารที่กรองด้วยน้ำกลั่นหลาย ๆ รอบเพื่อปรับ pH ให้เป็นกลาง และล้างด้วยอะซิโตน 10 มิลลิลิตร

12. นำสารที่ได้จากการกรองไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง บดให้ละเอียดจะได้ผงสีน้ำตาลเข้มของกราฟไฟต์ออกไซด์
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 กรองสารที่ได้ ปรับ pH ด้วยน้ำกลั่น และล้างด้วยอะซิโตน จากนั้นเมื่อนำไปอบและบดละเอียดจะได้ ผงกราไฟต์ออกไซด์

3.3.2 การเตรียมสารแขวนลอยกราไฟท์ออกไซด์

1. ชั่งกราไฟต์ออกไซด์ที่ได้ 0.4 กรัม จากนั้นเติมน้ำกลั่น 40 มิลลิลิตร แล้วคนให้เข้ากัน
 2. นำไปผ่านกระบวนการโซนิเคชันเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
 3. นำสารแขวนลอยที่ได้ไปหมุนเหวี่ยงต่อที่ความเร็วรอบ 4000 รอบ/นาที เป็นเวลา 5 นาที
- รินสารข้างบนที่เป็นสารแขวนลอยของกราไฟท์ออกไซด์เก็บไว้ในขวดแก้ว จะได้สารแขวนลอยสีน้ำตาลเข้ม
4. หยดสารแขวนลอยกราไฟท์ออกไซด์ 1 มิลลิลิตร ลงในงานเพาะเชื้อที่บันทึกน้ำหนักไว้แล้ว 2 ใบ อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
 5. นำงานเพาะเชื้อทั้ง 2 ใบ ออกจากเตาอบ ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปชั่ง เปรียบเทียบกับน้ำหนักงานเพาะตอนแรก เพื่อหาความเข้มข้นโดยเฉลี่ยของสารแขวนลอยกราไฟท์ออกไซด์ที่ได้ โดยมีหน่วยเป็น มิลลิกรัม/มิลลิลิตร (mg/mL)

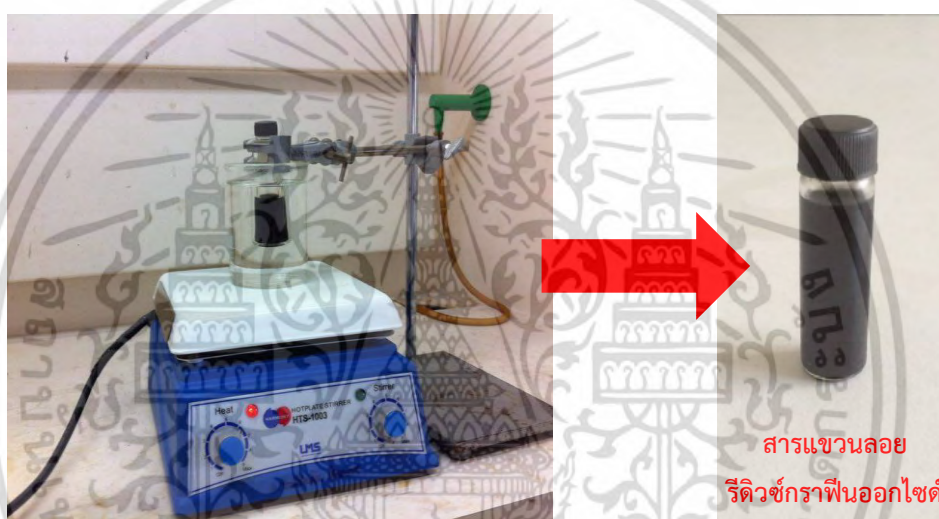


รูปที่ 3.7 การเตรียมสารแขวนลอยกราไฟท์ออกไซด์ด้วยกระบวนการโซนิเคชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การเตรียมสารแขวนลอยรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

1. เมื่อทราบความเข้มข้นของสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์แล้ว จึงปรับความเข้มข้นด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 1 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร
2. นำสารแขวนลอยที่ได้มา 8 มิลลิลิตร เติมลงขวดแก้วขนาด 20 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่นอีก 8 มิลลิลิตร
3. เติมสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 0.20 มิลลิลิตร และสารละลายไฮดราซีน 0.02 มิลลิลิตร ลงในขวดแก้ว
4. ให้ความร้อนผ่านน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส พร้อมกับการปั่นกวนเป็นเวลา 20 นาที จะได้สารแขวนลอยสีดำของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์



รูปที่ 3.8 การเตรียมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์โดยกระบวนการรีดักชันเคมีด้วยการใช้ความร้อน



รูปที่ 3.9 เปรียบเทียบลักษณะสีของสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์และสารแขวนลอยรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การเตรียมแผ่นของผสมยางธรรมชาติ/ไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

1. ชั่งไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.0300 กรัม ลงในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร เติมน้ำละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 5.0 มิลลิลิตร ปั่นกวนเป็นเวลา 5 นาที
2. เติมน้ำแขวนลอยรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ และน้ำกลั่นปริมาตรรวมเท่ากับ 5.0 มิลลิลิตร ปั่นกวนต่อเป็นเวลา 5 นาที
3. เติมน้ำยางธรรมชาติเข้มข้น 6.0 มิลลิลิตร ปั่นกวนต่อเป็นเวลา 5 นาที แล้วจึงเทสารผสมลงในแม่แบบที่เตรียมไว้ ทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง
4. ทำการศึกษาผลของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่แตกต่างกัน โดยจะทำการคงที่ปริมาณแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (5.0 มิลลิลิตร) และปริมาณน้ำยางธรรมชาติ (6.0 มิลลิลิตร) จะได้แผ่นของผสมที่สัดส่วนของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 3.1

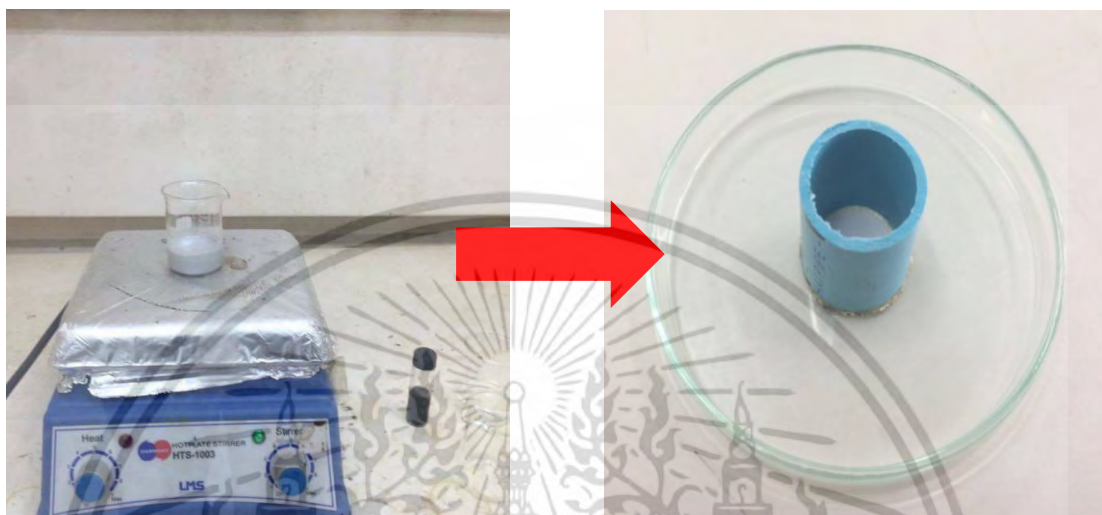
ตารางที่ 3.1 แสดงสัดส่วนของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่แตกต่างกันในแต่ละชิ้นงาน

ตัวอย่าง	ปริมาณ TiO ₂ (กรัม)	ปริมาณ rGO (มิลลิลิตร)*	ปริมาณน้ำกลั่น (มิลลิลิตร)
NR	-	-	5.0
RT	0.0300	-	5.0
RT-rGO1.6%	0.0300	1.0	4.0
RT-rGO3.2%	0.0300	2.0	3.0
RT-rGO4.8%	0.0300	3.0	2.0
RT-rGO6.2%	0.0300	4.0	1.0
RT-rGO7.7%	0.0300	5.0	-

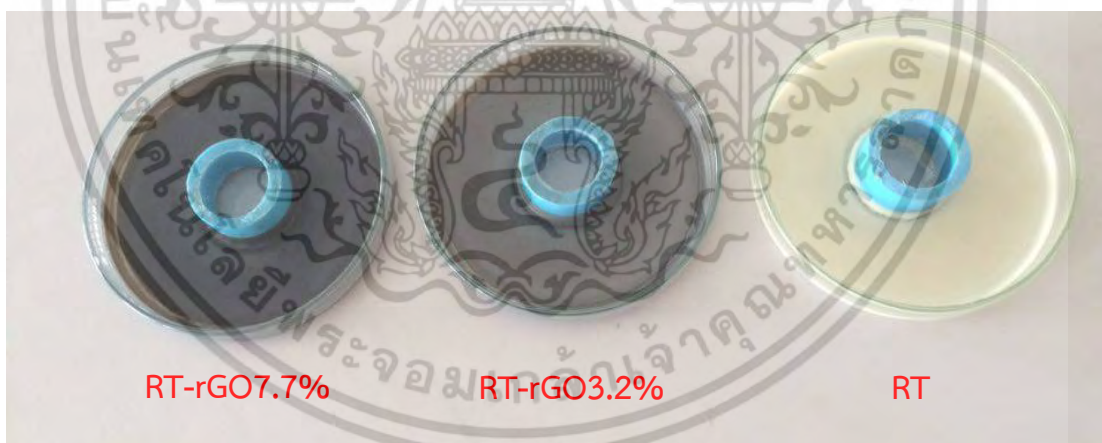
- เมื่อ * คือ ความเข้มข้นของรีดิวซ์กราฟีนที่ใช้คือ 0.50 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร
 โดยที่ R คือ ยางธรรมชาติ (Rubber)
 T คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂)
 rGO คือ รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยกตัวอย่างของชื่อย่อของแผ่นของผสม RT-rGO1.6% คือ แผ่นของผสมยางธรรมชาติ โทเทเนียมไดออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในอัตราส่วนของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ร้อยละ 1.6 โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณของโทเทเนียมไดออกไซด์ (น้ำหนักของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ 0.50 มิลลิกรัม ต่อน้ำหนักของโทเทเนียมไดออกไซด์ 30.00 มิลลิกรัม)



รูปที่ 3.10 การเตรียมแผ่นของผสมด้วยอัตราส่วนต่าง ๆ ก่อนเทลงแม่พิมพ์



รูปที่ 3.11 เปรียบเทียบลักษณะของแผ่นของผสม RT-rGO7.7% RT-rGO3.2% และ RT ตามลำดับ

จากรูปที่ 3.11 พบว่า รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์สามารถเปลี่ยนสีของแผ่นของผสมยางธรรมชาติ และโทเทเนียมไดออกไซด์ RT ให้เปลี่ยนเป็นสีดำในแผ่นของผสม RT-rGO3.2% และเห็นสีดำเข้มมากยิ่งขึ้นในแผ่นของผสม RT-rGO7.7% ซึ่งมาจากปริมาณที่มากขึ้นของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่มีลักษณะทางกายภาพเป็นสีดำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะด้วยเทคนิคต่าง ๆ

3.5.1 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis Spectrophotometer)

เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis) เป็นเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์สารได้ทั้งเชิงคุณภาพ (quality) และเชิงปริมาณ (quantity) โดยอาศัยหลักการดูดกลืนแสงของสารที่อยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ตจนถึงช่วงวิซิเบิล ที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 200 ถึง 1100 นาโนเมตร เนื่องจากสารแต่ละตัวมีความสามารถในการดูดซับแสงในช่วงความยาวคลื่นเฉพาะแตกต่างกันตามแต่ชนิดและองค์ประกอบของสารนั้น ๆ สามารถวัดได้ทั้ง สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ รวมไปถึงสารประกอบเชิงซ้อน ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จะแสดงออกมาเป็นสเปกตรัม (spectrum) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) และค่าความยาวคลื่น (wavelength) ซึ่งการใช้เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงจะใช้ในการพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เตรียมได้ และใช้เป็นเครื่องมือในการหาความเข้มข้นคงเหลือของสีย้อมเมทีลีนบลูหลังจากกระบวนการโฟโตคะตะไลติก

3.5.2 เครื่อง Ultraviolet-visible diffuse-reflectance spectrophotometer; DRS

เครื่องวิเคราะห์การกระจายและการสะท้อนของแสง (DRS) ถูกนำมาใช้สำหรับวิเคราะห์หาแนวโน้มในการดูดกลืนแสงของสาร ซึ่งสามารถใช้ในการคำนวณหาแถบช่องว่างพลัง (E_g) ของสารตัวอย่างได้ โดยใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการดูดกลืนแสงของแผ่นของผสมยางธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกัน สามารถคำนวณหาแถบช่องว่างพลังงาน (E_g) ของไทเทเนียมไดออกไซด์ในแต่ละตัวอย่างได้ด้วยการลากเส้นตัดกราฟ adsorption edge จะให้ค่าความยาวคลื่นที่ดูดกลืน (λ_{onset}) แล้วจึงนำไปคำนวณด้วยสมการของแพลงค์ดังสมการที่ (16)

$$E_g = hv = \frac{hc}{\lambda_{onset}} = \frac{1204}{\lambda_{onset}} \quad (16)$$

เมื่อ	E _g	คือ	แถบช่องว่างพลังงาน (eV)
	h	คือ	ค่าคงที่ของแพลงค์ (6.67 × 10 ⁻³⁴ J•s)
	c	คือ	ความเร็วแสง (3 × 10 ⁸ m•s ⁻¹)
	λ_{onset}	คือ	ค่าความยาวคลื่นที่ดูดกลืน

3.5.3 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer; XRD)

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) เป็นเทคนิคที่นำรังสีเอ็กซ์มาใช้วิเคราะห์สารตัวอย่างว่ามีองค์ประกอบของสารชนิดใดบ้าง และนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลึก เทคนิค XRD อาศัยหลักการยิงรังสีเอ็กซ์ที่ทราบความยาวคลื่น (ส่วนใหญ่ใช้ทองแดง) ไปกระทบชิ้นงานแล้วเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่าง ๆ กันโดยมีห้วัดเป็นตัวรับข้อมูล เนื่องจากองศาในการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จะขึ้นกับองค์ประกอบและโครงสร้างที่แตกต่างกันของสารที่มีอยู่ในตัวอย่าง ข้อมูลที่ได้รับจึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบและโครงสร้างที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้ จึงนำเทคนิคดังกล่าวมาใช้ในการวิเคราะห์สมบัติและโครงสร้างผลึกของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เตรียมได้อีกทั้งใช้พิสูจน์เอกลักษณ์ของแผ่นของผสมยางธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ โดยสามารถคำนวณหาระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก (D-spacing) ผ่านสมการที่ (17) ซึ่งเป็นสมการในการคำนวณตามกฎของแบรกกส์ (Bragg's Law)

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (17)$$

เมื่อ	n	คือ	จำนวนเต็มของลำดับการสะท้อน
	λ	คือ	ความยาวคลื่นของรังสีที่ใช้ หน่วยเป็น นาโนเมตร (nm)
	d	คือ	ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก หน่วยเป็น นาโนเมตร (nm)
	θ	คือ	องศาเลี้ยวเบน หน่วยเป็น ดีกรี (Degree)

3.5.4 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier-transform Infrared Spectroscopy; FT-IR)

เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FT-IR) เป็นเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันของสารโดยการวัดการดูดกลืนแสงของสารในช่วงอินฟราเรด (Infrared; IR) ซึ่งสารแต่ละชนิดจะมีค่าความถี่ของการสั่นที่แตกต่างกันไป ทำให้สามารถนำเทคนิคนี้มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันของสารได้ จึงใช้เทคนิค FT-IR ในการศึกษาหมู่ฟังก์ชันที่เปลี่ยนไปของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เตรียมได้ จากกระบวนการรีดักชันทางเคมีในการเปลี่ยนกราฟีนออกไซด์ไปเป็นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์โดยใช้ไฮดราซีน และยังใช้ในการพิสูจน์เอกลักษณ์ของแผ่นของผสมยางธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

3.5.5 เครื่องรามานสเปกโตรสโคปี (Raman Spectroscopy)

เครื่องรามานสเปกโตรสโคปี (Raman) เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์สารตัวอย่างในเชิงคุณภาพ โดยเป็นเทคนิคที่มีลักษณะใกล้เคียงกันกับ FT-IR แตกต่างตรงที่สามารถวัดโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว ที่ไม่สามารถแสดงสเปกตรัมในช่วงอินฟราเรดได้ โดยหลักการของรามานจะตรวจสอบโดยการวัดวิเคราะห์การกระเจิงแสงของวัสดุ ซึ่งการที่วัสดุแต่ละชนิดมีลักษณะการกระเจิงแสงที่แตกต่างกัน จะทำให้สามารถระบุหาประเภทของสารตัวอย่างนั้นได้ สามารถวิเคราะห์สารได้เกือบทุกชนิดทั้งสารอินทรีย์

และสารอนินทรีย์ที่อยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ จึงใช้เทคนิครามานมาศึกษาลักษณะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เตรียมได้ และแผ่นของผสมยางธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์ และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

3.5.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ใช้ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาและรายละเอียดของพื้นผิวของแผ่นของผสมยางธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ เนื่องจากตัวอย่างมีลักษณะเป็นแผ่นยางที่ไม่นำไฟฟ้าอิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ จึงเกิดปัญหาการในการเกิดจุดวาบแสงขึ้น (charge up) ต้องแก้ไขด้วยการเคลือบพื้นผิวของแผ่นของผสมด้วยทองคำ แล้วนำตัวอย่างที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยายต่าง ๆ

3.5.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope; TEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ใช้ศึกษาลักษณะทางกายภาพของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่มีขนาดเล็กระดับนาโนเมตร ซึ่งเล็กจนไม่สามารถใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดวิเคราะห์ได้ จึงจำเป็นต้องศึกษาจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่านที่มีกำลังขยายภาพที่สูงกว่ามาก โดยเริ่มจากการหดยดสารแขวนลอยรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ลงบนกริดทองแดง (copper's grid) ทิ้งไว้จนแห้งแล้วจึงนำมาวิเคราะห์ด้วยการใช้ลำแสงอิเล็กตรอนในการส่องผ่านตัวอย่าง เทคนิค TEM สามารถตรวจสอบอนุภาคขนาดเล็กระดับนาโน ที่มีขนาดตั้งแต่ 0.2 นาโนเมตร จนถึง 0.2 มิลลิเมตรได้

3.5.8 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ (Energy Dispersive X-ray Spectrometer; EDX)

เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ (EDX) เป็นเครื่องมือที่สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยวิเคราะห์ได้ตั้งแต่ธาตุคาร์บอนจนถึงธาตุยูเรเนียม ทดสอบได้ทั้งสถานะของแข็งและของเหลว หลักการของเทคนิคนี้คือ ให้อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดแสงเข้าไปชนสารตัวอย่าง รังสีเอกซ์จะทำให้อิเล็กตรอนชั้นในสุดของอะตอมของธาตุหลุดออกไป อิเล็กตรอนในวงถัดมา จะเข้ามาแทนที่และคายพลังงานออกมาในลักษณะของอิเล็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ ซึ่งสารแต่ละชนิดจะมีค่าพลังงานเฉพาะตัว โดยจะใช้เทคนิคนี้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุบนแผ่นของผสมยางธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การศึกษาสมบัติเชิงความร้อนและสมบัติเชิงกล

3.6.1 เครื่องวิเคราะห์เชิงความร้อน (Thermogravimetric Analysis; TGA)

เครื่องวิเคราะห์เชิงความร้อนเป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนของสาร ต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแล้ววัดการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวและความละเอียดสูงในสภาวะแวดล้อมที่ควบคุมได้ สามารถใช้ในการศึกษาสมบัติของสารตัวอย่างได้หลากหลายชนิด ทั้งตัวอย่างในกลุ่มเซรามิก (ceramic) พอลิเมอร์ หรือสารอนินทรีย์ต่าง ๆ โดยสามารถวิเคราะห์หาจุดหลอมเหลว การสูญเสียน้ำหนักรวมไปจนถึงการหาสารเจือปนในสารตัวอย่างได้ จึงนำเทคนิคดังกล่าวมาใช้ในการศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของแผ่นของผสมยางธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์และรีดิวซ์-กราฟีนออกไซด์ เพื่อทำการศึกษาวารีดิวซ์กราฟีนออกไซด์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านทานความร้อนให้แก่วัสดุได้มากน้อยเพียงใด การทดสอบเริ่มจากเตรียมแผ่นยางผสมที่เตรียมได้ให้มีน้ำหนักประมาณ 8-12 มิลลิกรัม บรรจุลงในจาน (Pan) ที่แขวนอยู่บน Micro balance แล้วทำการทดสอบโดยการตั้งโปรแกรมทดสอบให้ความร้อนต่อชิ้นงานตัวอย่างที่อุณหภูมิเริ่มต้น 40 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน

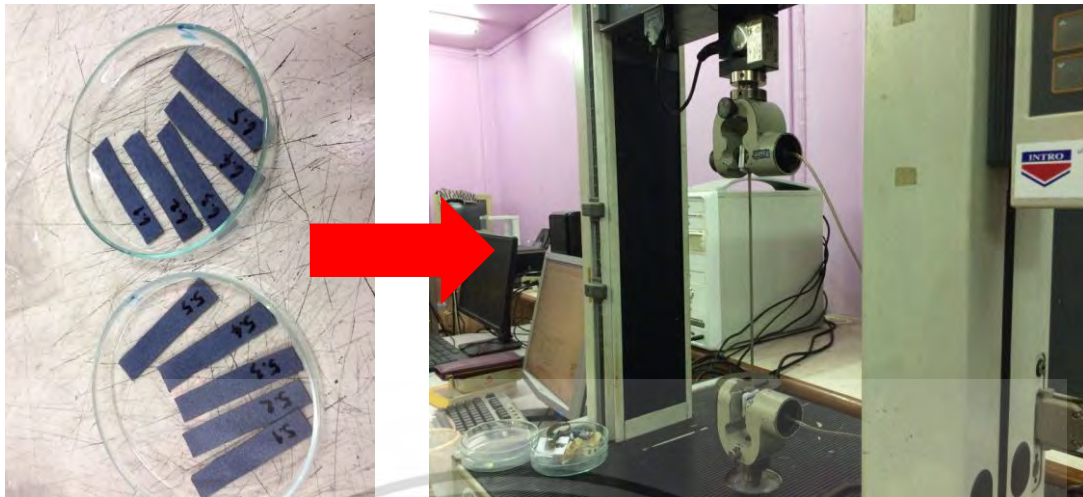
3.6.2 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine; UTM)

เครื่องทดสอบอเนกประสงค์เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติการต้านทานแรงดึงของวัสดุที่เป็นตัวบ่งบอกความแข็งแรงและความสามารถในการทนรับแรงดึงของวัสดุชนิดในระยะเวลาสั้น ๆ ด้วยอัตราการดึงคงที่ โดยการเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine; UTM) ตามมาตรฐาน ASTM D882 จะเตรียมชิ้นงานและกำหนดสภาวะเครื่องทดสอบดังนี้

- ขนาดชิ้นงาน 10 x 60 ตารางมิลลิเมตร (ความหนาเท่ากับ 0.52 มิลลิเมตร)
- ความเร็วในการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที
- ความยาวเกจ (Gauge length) 30 มิลลิเมตร
- ค่าแรงสูงสุดที่เครื่องรับได้ 1.0 นิวตัน
- จำนวนชิ้นงานที่ทดสอบ 5 ชิ้นต่อตัวอย่าง

การทดลองที่ได้จะแสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) รวมถึงค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus) ค่าการคงรูป (Stiffness) ค่าความเค้นสูงสุด (Stress at maximum load) และค่าแรงดึงที่จุดขาด (Load at break) จึงนำมาใช้ในการศึกษาหาค่าความแข็งแรงเชิงกลของแผ่นของผสมยางธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 การทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นของผสมด้วยเทคนิค UTM

3.7 การทดสอบความสามารถในการกำจัดสีย้อม

3.7.1 การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับในที่มืดของแผ่นของผสม

1. นำแผ่นของผสมที่เตรียมไว้ ใส่ลงจานเพาะเชื้อ จากนั้นเติมสีย้อมเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 2.5×10^{-5} โมลาร์ เป็นจำนวน 50.0 มิลลิลิตร จากนั้นทำการปั่นกวน
 2. ปั่นกวนโดยไม่ฉายแสง (ในที่มืด) เป็นเวลา 210 นาที โดยดูดสีย้อมเมทิลีนบลูเป็นจำนวน 2.0 มิลลิลิตร ทุก 30 นาที เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับสามารถตรวจสอบได้ด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer
 3. บันทึกข้อมูล ทำการทดสอบซ้ำเพื่อหาค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการดูดซับ
- การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับในที่มืดจะทดสอบทั้งหมด 7 ตัวอย่าง ได้แก่ NR RT RT-rGO1.6% RT-rGO3.2% RT-rGO4.8% RT-rGO6.2% และ RT-rGO7.7% สามารถคำนวณหาความเข้มข้นคงเหลือของเมทิลีนบลูได้จากสมการที่ (18)

$$\text{ร้อยละความเข้มข้นคงเหลือ} = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100 \quad (18)$$

เมื่อ	A_0	คือ ค่าดูดกลืนแสง (ความเข้มข้น) เริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลู
	A_t	คือ ค่าดูดกลืนแสง (ความเข้มข้น) ที่เวลาใด ๆ ของสีย้อมเมทิลีนบลู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.2 การทดสอบประสิทธิภาพกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต

1. นำแผ่นของผสมที่เตรียมไว้ ใส่ลงจานเพาะเชื้อ จากนั้นเติมสีย้อมเมทิลีนบลู ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 2.5×10^{-5} โมลาร์ เป็นจำนวน 50.0 มิลลิลิตร จากนั้นทำการปั่นกวน
2. ปั่นกวนโดยไม่ฉายแสง (ในที่มืด) เป็นเวลา 30 นาที โดยดูคอลลอยด์เมทิลีนบลูเป็นจำนวน 2.0 มิลลิลิตร
3. ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตต่อเป็นเวลา 180 นาที โดยหยุดเก็บสีย้อมเมทิลีนบลูทุก 30 นาที เพื่อนำไปหาค่าความสามารถในการกำจัดสีย้อม เปรียบเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลูก่อนผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ด้วยเครื่องมือ UV-Vis spectrophotometer
4. บันทึกข้อมูล ทำการทดสอบซ้ำเพื่อหาค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม



รูปที่ 3.13 การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต

การทดสอบประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ตจะทดสอบทั้งหมด 6 ตัวอย่าง ได้แก่ RT RT-rGO1.6% RT-rGO3.2% RT-rGO4.8% RT-rGO6.2% และ RT-rGO7.7%

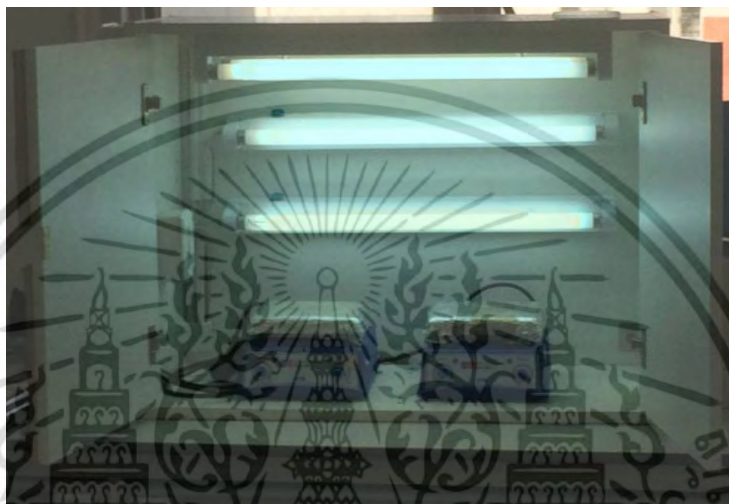
3.7.3 การทดสอบประสิทธิภาพกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้แสงวิซีเบิล

1. นำแผ่นของผสมที่เตรียมไว้ ใส่ลงจานเพาะเชื้อ จากนั้นเติมสีย้อมเมทิลีนบลู ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 1.5×10^{-5} โมลาร์ เป็นจำนวน 50.0 มิลลิลิตร จากนั้นทำการปั่นกวน
2. ปั่นกวนโดยไม่ฉายแสง (ในที่มืด) เป็นเวลา 30 นาที โดยดูคอลลอยด์เมทิลีนบลูเป็นจำนวน 2.0 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ฉายแสงวิชีเบลต่อเป็นเวลา 180 นาที โดยหยุดเก็บสีย้อมเมทิลีนบลูทุก 30 นาที เพื่อนำไปหาค่าความสามารถในการกำจัดสีย้อม เปรียบเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลูก่อนผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ด้วยเครื่องมือ UV-Vis spectrophotometer

4. บันทึกข้อมูล ทำการทดสอบซ้ำเพื่อหาค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม การทดสอบประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้แสงวิชีเบลจะทดสอบทั้งหมด 4 ตัวอย่าง ได้แก่ RT RT-rGO3.2% RT-rGO6.2% และ RT-rGO7.7%



รูปที่ 3.14 การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ภายใต้การฉายแสงวิชีเบล

3.7.4 การทดสอบประสิทธิภาพกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้แสงอาทิตย์

ความสามารถในการกำจัดสีย้อมภายใต้แสงอาทิตย์ จะทดสอบบริเวณชั้นดาดฟ้า อาคาร จุฬารภรณ์ฯ 1 ในช่วงเวลา 12.00 ถึง 14.00 น.

1. นำแผ่นของผสมที่เตรียมไว้ ใส่ลงจานเพาะเชื้อ จากนั้นเติมสีย้อมเมทิลีนบลู ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 2.5×10^{-5} โมลาร์ เป็นจำนวน 50.0 มิลลิลิตร จากนั้นทำการปั่นกวน

2. ปั่นกวนในที่มืด เป็นเวลา 30 นาที โดยดูดสีย้อมเมทิลีนบลูเป็นจำนวน 2.0 มิลลิลิตร

3. นำไปฉายแสงอาทิตย์บริเวณดาดฟ้าอาคารจุฬารภรณ์ 1 อีก 80 นาที โดยหยุดเก็บสีย้อมเมทิลีนบลูทุก 20 นาที เพื่อนำไปหาค่าความสามารถในการกำจัดสีย้อม เปรียบเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลูก่อนผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ด้วยเครื่องมือ UV-Vis spectrophotometer

4. บันทึกข้อมูล ทำการทดสอบซ้ำเพื่อหาค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม การทดสอบประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้แสงอาทิตย์จะทดสอบ

ทั้งหมด 4 ตัวอย่าง ได้แก่ RT RT-rGO3.2% RT-rGO6.2% และ RT-rGO7.7%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.5 การทดสอบประสิทธิภาพกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้สภาวะกรด-เบส

ความสามารถในการกำจัดสีย้อมภายใต้สภาวะกรด-เบส จะเลือกทดสอบจากชิ้นงานที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมสูงที่สุดนั่นคือ แผ่นของผสม RT-rGO6.2%

3.7.5.1 กระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้สภาวะกรด

ปรับสภาวะ pH ของสีย้อมเมทิลีนบลูเริ่มต้นให้ได้ pH เท่ากับ 3.0 ด้วยการเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์ ลงในสีย้อมเมทิลีนบลู 50.0 มิลลิลิตร ก่อนนำไปผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต (ในที่มีด 30 นาที และฉายแสงต่อ 180 นาที)

3.7.5.2 กระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้สภาวะเบส

ปรับสภาวะ pH ของสีย้อมเมทิลีนบลูเริ่มต้นให้เป็น pH เท่ากับ 11.0 ด้วยการเติมเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1.0 โมลาร์ ลงในสีย้อมเมทิลีนบลู 50.0 มิลลิลิตร ก่อนนำไปผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต (ในที่มีด 30 นาที และฉายแสงต่อ 180 นาที)

3.7.6 การทดสอบประสิทธิภาพกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้ความเข้มข้นของสีย้อมที่ต่างกัน

สีย้อมเมทิลีนบลูที่ใช้ทดสอบในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต มีความเข้มข้นเริ่มต้นที่ต้องการศึกษา ได้แก่ 1.5×10^{-5} 2.5×10^{-5} และ 3.5×10^{-5} โมลาร์ โดยเลือกทดสอบจากชิ้นงานที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมสูงที่สุดนั่นคือ แผ่นของผสม RT-rGO6.2%

3.7.7 การทดสอบประสิทธิภาพในการใช้งานซ้ำ

ความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ จะเลือกทดสอบจากชิ้นงานที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมสูงที่สุดนั่นคือ แผ่นของผสม RT-rGO6.2% โดยทดสอบการใส่ซ้ำเป็นจำนวน 5 ครั้ง แต่ละครั้งเมื่อผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติกโดยการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลา 180 นาที ที่ความเข้มข้นของเมทิลีนบลูเท่ากับ 2.5×10^{-5} โมลาร์ ในปริมาตร 50 มิลลิลิตร จะทำการล้างแผ่นของผสมผสมด้วยน้ำกลั่น แล้วจึงนำกลับมาใช้กำจัดสีย้อมใหม่จนครบจำนวน

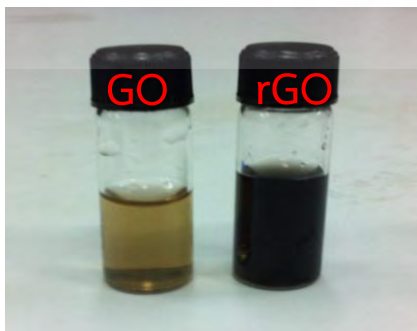
บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะไลติกในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู ผ่านสารตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมให้อยู่ในรูปแผ่นของผสมกับยางธรรมชาติและรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบผงที่มีขั้นตอนและกระบวนการยุ่งยากซับซ้อนในการนำกลับมาใช้ใหม่ อีกทั้งยังเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มาเพื่อเพิ่มความสามารถในการส่งผ่านอิเล็กตรอนในระหว่างการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติก รวมไปถึงยังสามารถเพิ่มความแข็งแรงเชิงกลให้แก่แผ่นของผสม การพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะของสารจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงการพิสูจน์เอกลักษณ์ของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ และช่วงการพิสูจน์เอกลักษณ์ของแผ่นของผสม โดยใช้เครื่องมือและเทคนิคต่าง ๆ ดังนี้ เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis) เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด-สเปกโตรมิเตอร์ (FT-IR) เครื่องวิเคราะห์การกระจายและการสะท้อนของแสงอัลตราไวโอเล็ตและวิชิเบิล (DRS) เครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์ (Raman spectrometer) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) อุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDS) เครื่องทดสอบเนกประสงค์ (UTM) และเครื่องวิเคราะห์เชิงความร้อน (TGA)

4.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

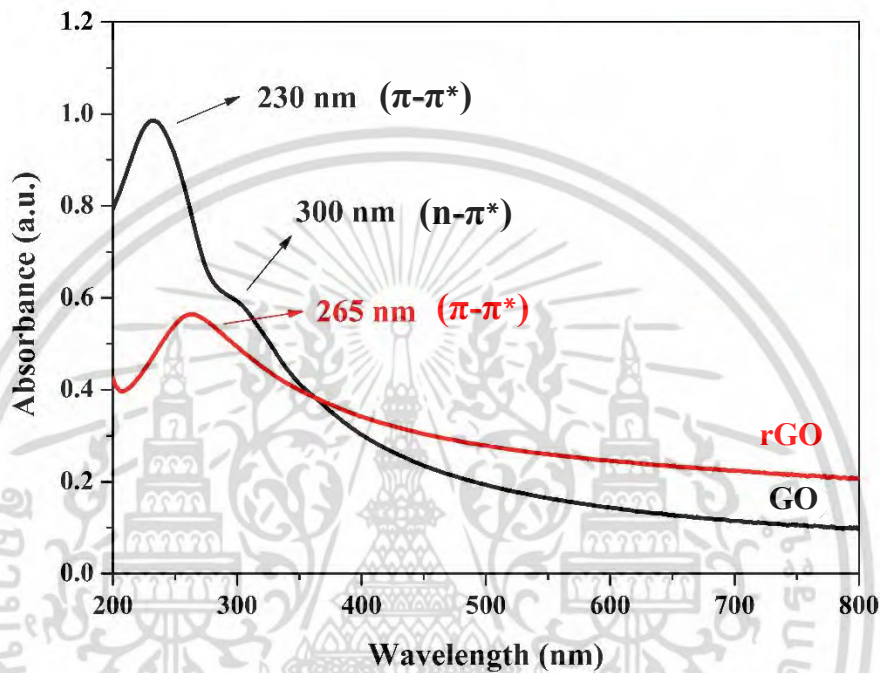
รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เตรียมได้จากกระบวนการรีดักชันทางเคมี ในการเปลี่ยนกราฟีนออกไซด์ที่เตรียมได้จากกระบวนการดัดแปลงของฮูมเมอร์ ให้ได้รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ โดยใช้ไฮดราซีนและความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 4.1 สารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์จะมีลักษณะเป็นสีน้ำตาล เมื่อผ่านกระบวนการรีดักชันแล้วจะได้สารแขวนลอยรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นสีดำ ซึ่งยืนยันได้ว่ากราฟีนออกไซด์ถูกรีดิวซ์ให้กลายเป็นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ [5]



รูปที่ 4.1 สารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ (GO) และสารแขวนลอยรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO)
เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่เป็นการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วยเครื่องวัดค่าดูดกลืนแสง (UV-Vis spectrophotometer)

การวัดค่าดูดกลืนแสงเป็นเทคนิคที่สะดวกและรวดเร็วในการพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ โดยให้ค่าดูดกลืนแสงที่แตกต่างชัดเจนระหว่างกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ค่าการดูดกลืนแสงของกราฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO)

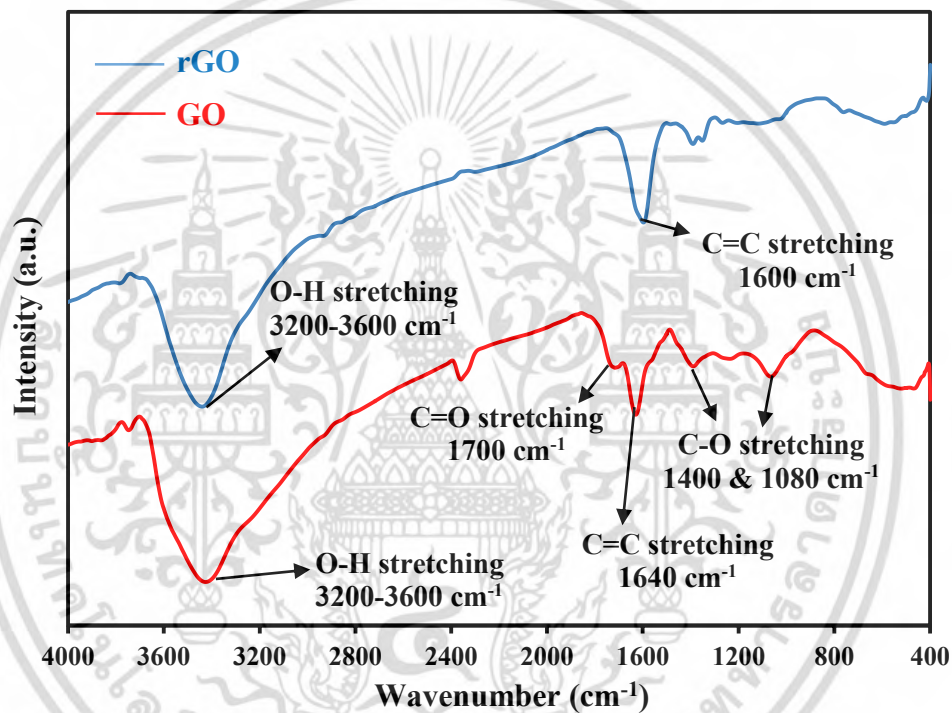
กราฟีนออกไซด์มีลักษณะการดูดกลืนแสงอยู่ 2 ช่วง ช่วงแรกที่ได้สังเกตเห็นค่าการดูดกลืนแสงอยู่ที่ 230 นาโนเมตร เป็นการเปลี่ยนสถานะพลังงานจากชั้น π ไปสู่ชั้น π^* ซึ่งเป็นค่าเอกลักษณ์ของพันธะคอนจูเกตของคาร์บอน (C=C Conjugated) ของวงอะโรมาติกที่เป็นโครงสร้างพื้นฐานของกราฟีนออกไซด์ [5] ในส่วนที่ช่วงที่ 2 ที่พบบริเวณค่าการดูดกลืนแสงที่ 300 นาโนเมตร มาจากการเปลี่ยนสถานะพลังงานจากชั้น n ไปสู่ชั้น π^* ซึ่งเป็นค่าเอกลักษณ์ของอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว (e^- lone-pair) ของออกซิเจนที่มีอยู่ในหมู่ฟังก์ชันอย่าง หมู่คาร์บอนิล ($-C=O$) หรือหมู่คาร์บอกซิล ($-COOH$) ที่สามารถเคลื่อนที่ไปมายังพันธะคู่ที่อยู่ติดกันได้ การเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนแบบ $n - \pi^*$ ใช้พลังงานน้อยกว่าแบบ $\pi - \pi^*$ เนื่องจาก n เป็นอิเล็กตรอนที่ยังไม่ได้ใช้ในการสร้างพันธะ (non-bonding) การกระตุ้นให้ขึ้นไปอยู่ระดับชั้น π^* จึงใช้พลังงาน (ΔE) น้อยกว่า [6] ในส่วนของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นั้นแตกต่างกันพบว่าในช่วงการดูดกลืนแสงอยู่ช่วงเดียวอยู่ที่ 265 นาโนเมตร ซึ่งเป็นการเปลี่ยนสถานะพลังงานแบบ $\pi - \pi^*$ จากเอกลักษณ์ของพันธะคอนจูเกตของคาร์บอนของวงอะโรมาติก แต่ที่มีการเคลื่อนไปยังความยาวคลื่นที่สูงมากขึ้น (Red shift) นั้นมาจากหมู่ฟังก์ชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่าง ๆ ฤทธิ์รีดิวซ์ พร้อมกับการสร้างพันธะคู่ของวงอะโรมาติกขึ้นมาใหม่ทำให้โครงสร้างเกิดคอนจูเกตของคาร์บอนมากขึ้น อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระมากขึ้นเมื่อเกิด conjugation ของ $\pi - \pi^*$ เพิ่มมากยิ่งขึ้น การกระตุ้นเพื่อให้เปลี่ยนสถานะแบบ $\pi - \pi^*$ จึงใช้พลังงานน้อยลง [7]

4.1.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FT-IR)

การศึกษาหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ เปรียบเทียบระหว่างรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ โดยได้สเปกตราดังแสดงในรูปที่ 4.3

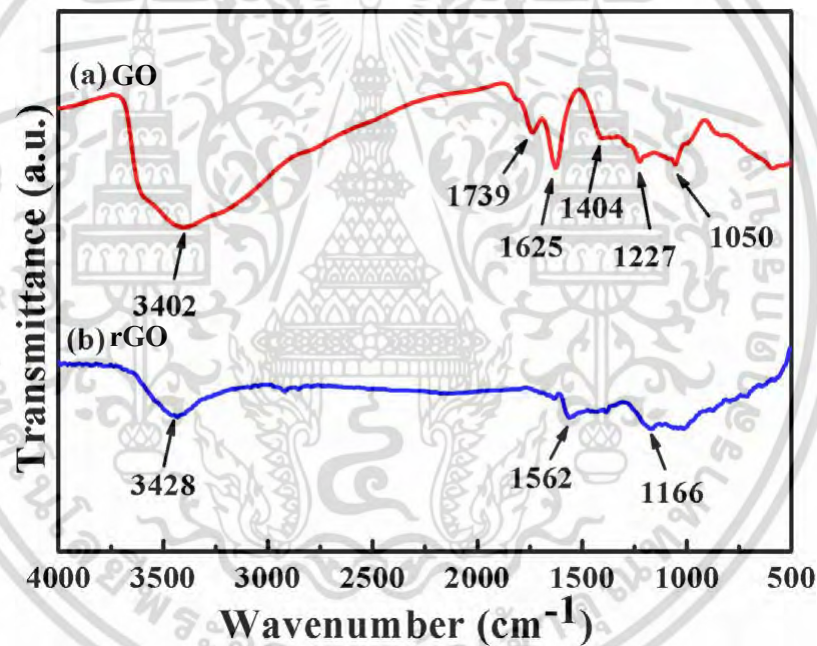


รูปที่ 4.3 FT-IR สเปกตร้าแสดงหมู่ฟังก์ชันของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO) และกราฟีนออกไซด์ (GO)

การดัดแปลงหมู่ฟังก์ชันให้แก่กราฟไฟต์เพื่อให้ได้กราฟีนออกไซด์นั้น เป็นการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ อย่างเช่น หมู่คาร์บอนิล หมู่คาร์บอกซิล หมู่คีโตน หมู่อีพอกซี หรือหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งสอดคล้องกับผลจากเทคนิค FT-IR ที่แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.3 สเปกตรัมของกราฟีนออกไซด์ปรากฏพิกสำคัญที่เห็นได้ชัดคือ ช่วงเลขคลื่นประมาณ 3200 ถึง 3600 cm^{-1} ซึ่งเป็นเอกลักษณ์เฉพาะในการสั่นของ O-H stretching ที่มาจากหมู่คาร์บอกซิลหรือหมู่ไฮดรอกซิล ถัดมาที่เลขคลื่นประมาณ 1700 cm^{-1} และ 1640 cm^{-1} แสดงการสั่นของ C=O stretching และ C=C stretching ตามลำดับ [8] พบว่าพิกของ C=C นั้นมีความเข้มที่สูงกว่า เนื่องจากโครงสร้างส่วนใหญ่ของกราฟีนออกไซด์นั้นเป็นคาร์บอนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พันธะคู่ต่อกันเป็นวงอะโรมาติก และพบช่วงเลขคลื่นบริเวณ 1400 cm^{-1} และ 1080 cm^{-1} จากการสั่นของพันธะ C-O stretching ที่มาจากการสั่นของหมู่คาร์บอกซิล (carboxyl; R-COOH) และหมู่แอลคอกซี (Alcoxy; R-O-R) ตามลำดับ ในส่วนสเปกตรัมของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์พบว่า ไม่ปรากฏพีคการสั่นของ C=O stretching ที่มาจากการสั่นของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ เพราะถูกกำจัดออกไปด้วยกระบวนการรีดักชัน โดยแสดงพีคของ C=C ที่เป็นการสั่นของคาร์บอนพันธะคู่ในวงอะโรมาติกอย่างชัดเจน [9]

ผลของ FT-IR ที่ได้สอดคล้องกับ FT-IR สเปกตรัมจากงานวิจัยของ Yuhui Li และคณะ [54] ดังแสดงในรูปที่ 4.4 สเปกตรัมของกราฟีนออกไซด์ปรากฏพีคการสั่นของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ เช่น O-H stretching ที่ช่วงการสั่นบริเวณ 3300 ถึง 3600 cm^{-1} (ประมาณ 3402 cm^{-1}) C=O stretching ที่บริเวณการสั่น 1739 cm^{-1} C=C stretching ที่บริเวณการสั่น 1625 cm^{-1} หรือ C-O stretching ที่บริเวณการสั่น 1050 cm^{-1} ในขณะที่สเปกตรัมของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์แสดงการสั่นของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ลดลง ซึ่งเป็นการช่วยยืนยันการกำจัดของหมู่ฟังก์ชันด้วยกระบวนการรีดักชัน

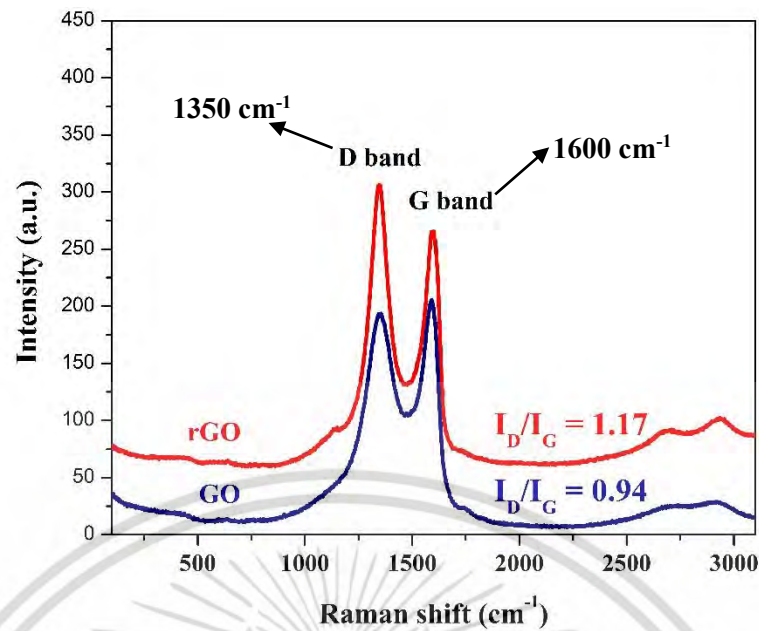


รูปที่ 4.4 FT-IR สเปกตรัมของกราฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO) จากงานวิจัยของ Yuhui Li และคณะ [54]

4.1.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วยเครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์ (Raman spectrometer)

เทคนิครามานถูกนำมาใช้ประกอบเพื่อยืนยันโครงสร้างผลึกและความเป็นระเบียบที่แตกต่างกันระหว่างกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

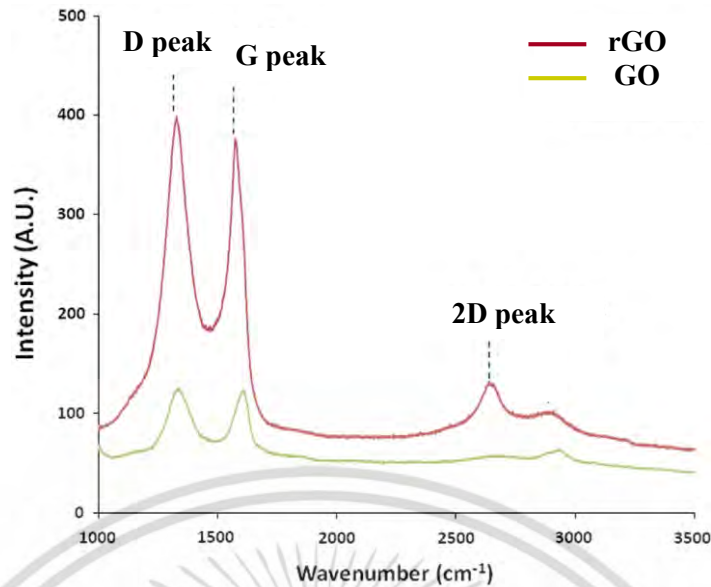


รูปที่ 4.5 รามานสเปกตรัมของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO) และกราฟีนออกไซด์ (GO)

ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะด้วยเทคนิครามานในสารอนุพันธ์ของคาร์บอนแสดงพีกที่เป็นเอกลักษณ์อยู่ 2 พีก นั่นคือ G band (Graphitic carbon band) ปรากฏพีกที่ตำแหน่งประมาณ 1600 cm^{-1} และ D band (Defect graphitic carbon band) ปรากฏพีกที่ตำแหน่งประมาณ 1350 cm^{-1} โดยที่ G band แสดงถึงความเป็นผลึกและความเป็นระเบียบของแผ่นในโครงสร้างที่มาจากคาร์บอน sp^2 (C=C conjugated) ตรงกันข้ามกับ D band ที่แสดงถึงความบกพร่อง (Defect) และความไม่เป็นระเบียบ (Disorder) ของโครงสร้างที่มาจากตำแหน่งที่เกิดหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ (C-O, C=O) [23] ในส่วนของกราฟไฟต์จะมีอัตราส่วนระหว่าง D band ต่อ G band หรือ I_D/I_G เท่ากับ 0.17 [31] เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นระเบียบและมีความเป็นผลึกสูงจึงมีสัดส่วนระหว่าง I_D/I_G ที่น้อย แตกต่างจากกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่แสดงในรูปที่ 4.5 พบว่ากราฟีนออกไซด์มีค่า I_D/I_G สูงขึ้นอยู่ที่ 0.94 มาจากการที่โครงสร้างของกราฟไฟต์ถูกออกซิเดชันให้มีหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ เพิ่มขึ้น ความไม่เป็นระเบียบจึงมีมากขึ้น เช่นเดียวกันกับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์เมื่อโครงสร้างถูกรีดิวซ์แล้วเกิดการสลายพันธะและหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ถูกกำจัด ทำให้เกิดช่องว่าง (Vacancies) มากยิ่งขึ้น ความเป็นระเบียบของคาร์บอน sp^2 จึงมีค่าน้อยลง [34] ทำให้ค่า I_D/I_G นั้นมากขึ้นเป็น 1.17

ผลของรามานที่ได้สอดคล้องกับรามานสเปกตรัมจากงานวิจัยของ P. Fernandez-Ibanez และคณะ [55] ดังแสดงในรูปที่ 4.6 แสดง D peak (band) ที่ตำแหน่งประมาณ 1325 cm^{-1} และ G peak ที่ตำแหน่งประมาณ 1571 cm^{-1} พบว่าสัดส่วนระหว่าง I_D/I_G ของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นั้นมีค่ามากกว่า I_D/I_G ของกราฟีนออกไซด์ ซึ่งมาจากกระบวนการรีดักชันทำให้พันธะระหว่างโครงสร้างเกิดการฉีกขาดจนกลายเป็นช่องว่างมากขึ้น ทำให้มีความบกพร่องและความไม่เป็นระเบียบที่มากกว่า

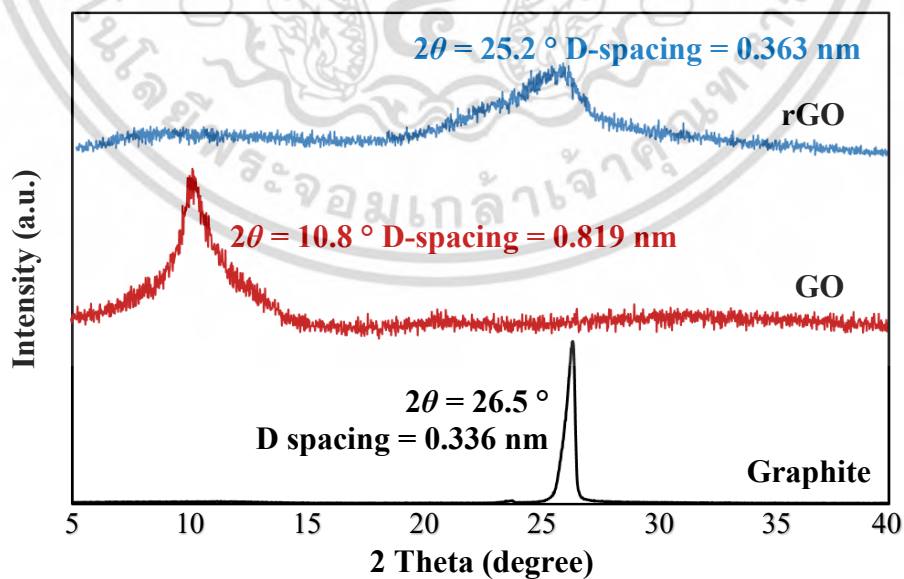
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 รามานสเปกตรัมของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO) และกราฟีนออกไซด์ (GO) จากงานวิจัยของ P. Fernandez-Ibanez และคณะ [55]

4.1.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

การใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เป็นการช่วยยืนยันรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เตรียมได้ว่ามีลักษณะของโครงสร้างและอสัณฐานอย่างไร เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟีนออกไซด์และกราฟไฟต์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้นก่อนผ่านกระบวนการของฮูมเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.7

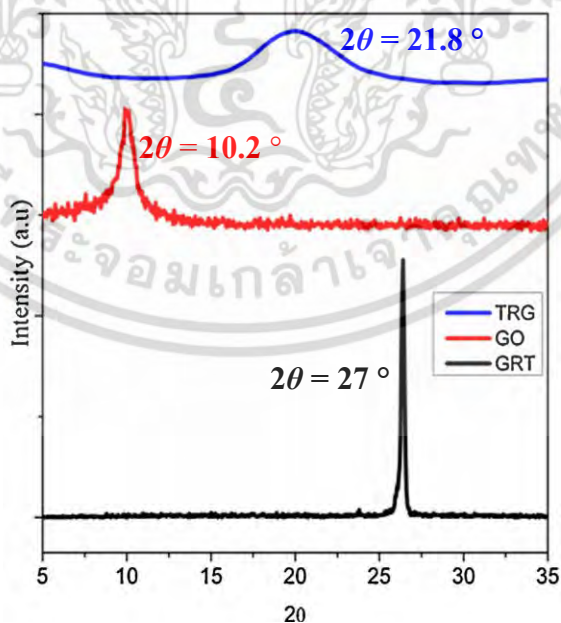


รูปที่ 4.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่แตกต่างกันระหว่างกราฟไฟต์ กราฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟไฟต์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้นมีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบจึงมีความเป็นผลึกสูง ทำให้ได้ฟิสิกที่แคบและมีความเข้ม (Intensity) ที่สูง ซึ่งมีองศาเลี้ยวเบน (2θ) อยู่ที่ 26.5° ของระนาบผลึก (002) เมื่อคำนวณตามกฎของแบรกก์ (Bragg's Law) จะได้ระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก (D-spacing) อยู่ที่ 0.336 นาโนเมตร หลังจากนั้นเมื่อนำกราฟไฟต์มาดัดแปลงหมู่ฟังก์ชันด้วยกระบวนการของฮูเมอร์ แล้วผ่านกระบวนการโซนิเคชันเพื่อให้ได้กราฟีนออกไซด์ ทำให้ความกว้างระหว่างระนาบของผลึกนั้นมากยิ่งขึ้นด้วยหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ อย่าง หมู่คาร์บอนิล หมู่คาร์บอกซิล หรือหมู่ไฮดรอกซิล ความเป็นผลึกและความเป็นระเบียบจึงลดลง ส่งผลให้ฟิสิกของกราฟีนออกไซด์มีความกว้างมากยิ่งขึ้น [35] โดยแสดงองศาเลี้ยวเบนอยู่ที่ 2θ เท่ากับ 10.8° ของระนาบผลึก (002) และมีระยะห่างระหว่างระนาบผลึกอยู่ที่ 0.819 นาโนเมตร สุดท้ายเมื่อผ่านกระบวนการรีดักชันแล้วได้รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ พบว่าฟิสิกกลับไปมีองศาเลี้ยวเบนใกล้เคียงกับกราฟไฟต์ อันเนื่องมาจากรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ก็คือคาร์บอนระนาบชั้นเดียวของกราฟไฟต์ แต่เนื่องจากความเป็นผลึกและความเป็นระเบียบลดลงจากการถูกรีดิวซ์ ทำให้ได้ฟิสิกที่มีความกว้างมากขึ้น [37] ซึ่งมีองศาเลี้ยวเบนอยู่ที่ 2θ เท่ากับ 25.2° ของระนาบผลึก (002) และมีระยะห่างระหว่างระนาบผลึกอยู่ที่ 0.363 นาโนเมตร

ผลของ XRD ที่ได้สอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากงานวิจัยของ Srinivasarao Yaragalla และคณะ [56] ดังแสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าองศาเลี้ยวเบนของกราฟไฟต์ที่ 2θ เท่ากับ 27° ของระนาบผลึก (002) มีระยะห่างระหว่างระนาบผลึกอยู่ที่ 0.330 นาโนเมตร ในส่วนของกราฟีนออกไซด์มี 2θ เท่ากับ 10.2° มีระยะห่างระหว่างระนาบผลึกอยู่ที่ 0.867 นาโนเมตร และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มี 2θ เท่ากับ 21.8° มีระยะห่างระหว่างระนาบผลึกอยู่ที่ 0.407 นาโนเมตร



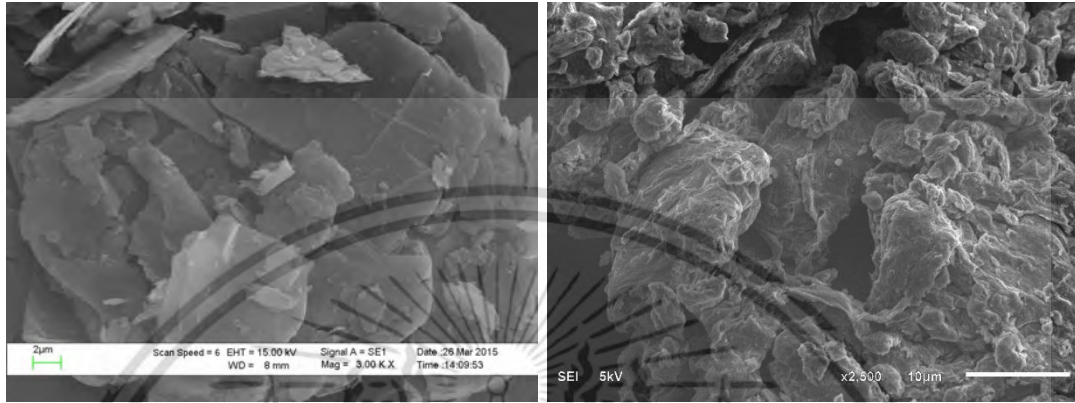
รูปที่ 4.8 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของกราฟไฟต์ (GRT) กราฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์-

กราฟีนออกไซด์ (TRG) จากงานวิจัยของ Srinivasarao Yaragalla และคณะ [56]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.5 การพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ในการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของกราฟไฟต์ กราฟีนออกไซด์ และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ แสดงดังรูปที่ 4.9 และ 4.10



(ก.)

(ข.)

รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของ

(ก.) กราไฟต์ที่กำลังขยาย X3000 เท่า (ข.) กราไฟต์ออกไซด์ที่กำลังขยาย X2500 เท่า



รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่กำลังขยาย X500 เท่า

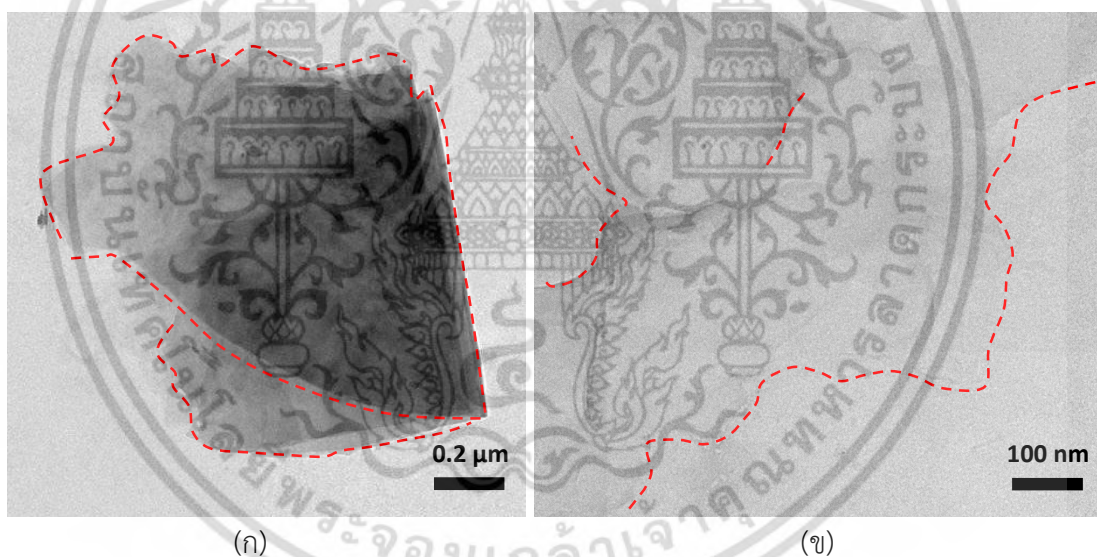
ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์พบว่า กราไฟต์ในรูปที่ 4.9 (ก.) แสดงลักษณะเป็นแผ่นเรียบที่มีความเป็นระเบียบสูง ซึ่งมาจากโครงสร้างที่เป็นผลึกและการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของคาร์บอน แตกต่างจากลักษณะพื้นผิวของกราฟไฟต์ออกไซด์ในรูปที่ 4.9 (ข.) ที่มีรอยย่นซ้อนทับไปมาของกราฟีนออกไซด์ ทำให้พื้นผิวมีความขรุขระและจับตัวกันเป็นก้อนมากขึ้น โดยมาจากกราฟีนออกไซด์ที่มีความเป็นระเบียบลดลงจากการมีหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ เพิ่มเข้าไปในโครงสร้าง ซึ่งสามารถกลับมาจับตัวเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก่อนได้จากการทำพันธะระหว่างระนาบของกราฟีนออกไซด์ [38] ในส่วนของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในรูปที่ 4.10 หลังจากถูกทำลายหมู่ฟังก์ชันด้วยกระบวนการรีดักชัน โครงสร้างของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์จะหลุดลอกออกมาเป็นแผ่น ๆ อยู่แยกออกจากกันได้อย่างชัดเจน

4.1.6 การพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)

การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่อง TEM เปรียบเทียบลักษณะสัณฐานวิทยาของกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ สามารถแสดงให้เห็นความแตกต่างชัดเจนในเรื่องความหนาของสาร โดยที่กราฟีนออกไซด์ที่มีความหนามากกว่าอาจมาจากการที่หมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ บนระนาบ สามารถทำพันธะกันเองกับหมู่ฟังก์ชันบนระนาบอื่น ๆ แตกต่างจากรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ถูกกำจัดหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ออกแล้วหลุดลอกเป็นแผ่นบาง จึงลดความสามารถในการทำพันธะระหว่างระนาบลงได้ ซึ่งทำให้รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีความหนาที่น้อยกว่า ส่งผลให้รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีความโปร่งแสงมากกว่ากราฟีนออกไซด์ [40] ดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายจากเครื่อง TEM (ก.) กราฟีนออกไซด์ กำลังขยาย X9600 เท่า (ข.) รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ กำลังขยาย X19000 เท่า

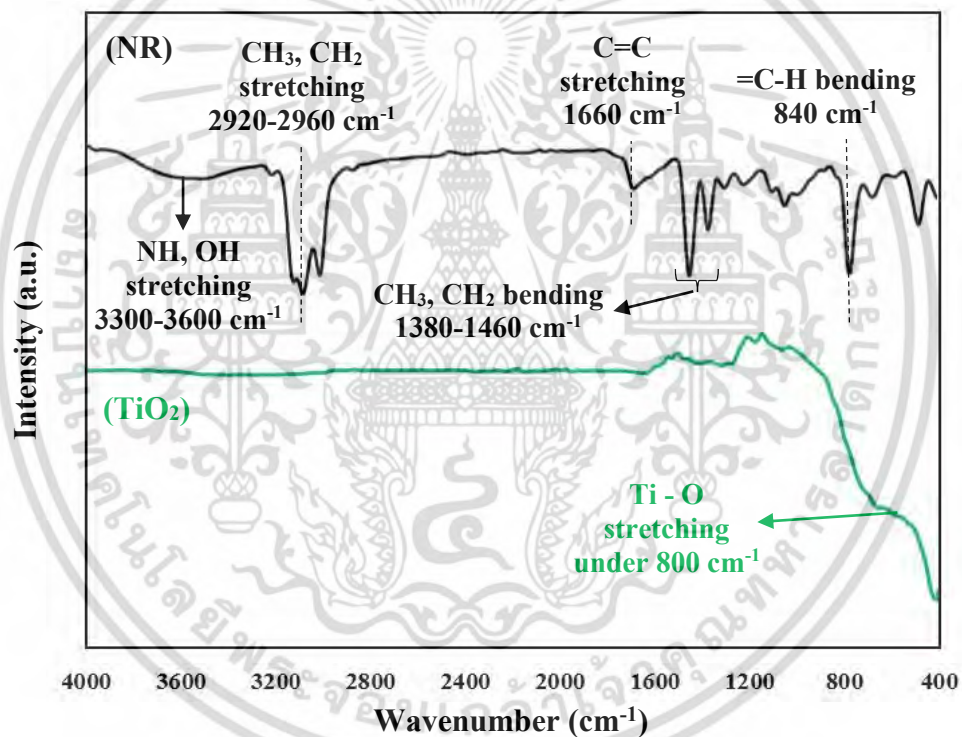
4.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะของแผ่นของผสม

การพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะของแผ่นของผสมยางธรรมชาติรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ จะศึกษาทั้งหมด 7 ตัวอย่าง ดังนี้ ยางธรรมชาติ (NR) ยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (RT) และยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกันไป (RT-rGO1.6% RT-rGO3.2% RT-rGO4.8% RT-rGO6.2% และ RT-rGO7.7%) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ยังได้ทำการพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะไทเทเนียมไดออกไซด์ที่นำมาใช้ เพื่อเป็นการศึกษาและเปรียบเทียบกับข้อมูลของแผ่นของผสม

4.2.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะของแผ่นของผสมด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม-อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FT-IR)

การศึกษาหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ จะเป็นการช่วยยืนยันองค์ประกอบของแผ่นของผสม ที่ประกอบไปด้วย ยางธรรมชาติ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และริตวิซกราฟีนออกไซด์ โดยผลการพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะของหมู่ฟังก์ชันในไทเทเนียมไดออกไซด์และยางธรรมชาติจะแสดงในรูปที่ 4.12 ซึ่งสามารถสรุปหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญได้ในตารางที่ 4.1 ในส่วนผลการพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะของแผ่นของผสมจะแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.12 FT-IR สเปกตรัมแสดงหมู่ฟังก์ชันของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) และยางธรรมชาติ (NR)

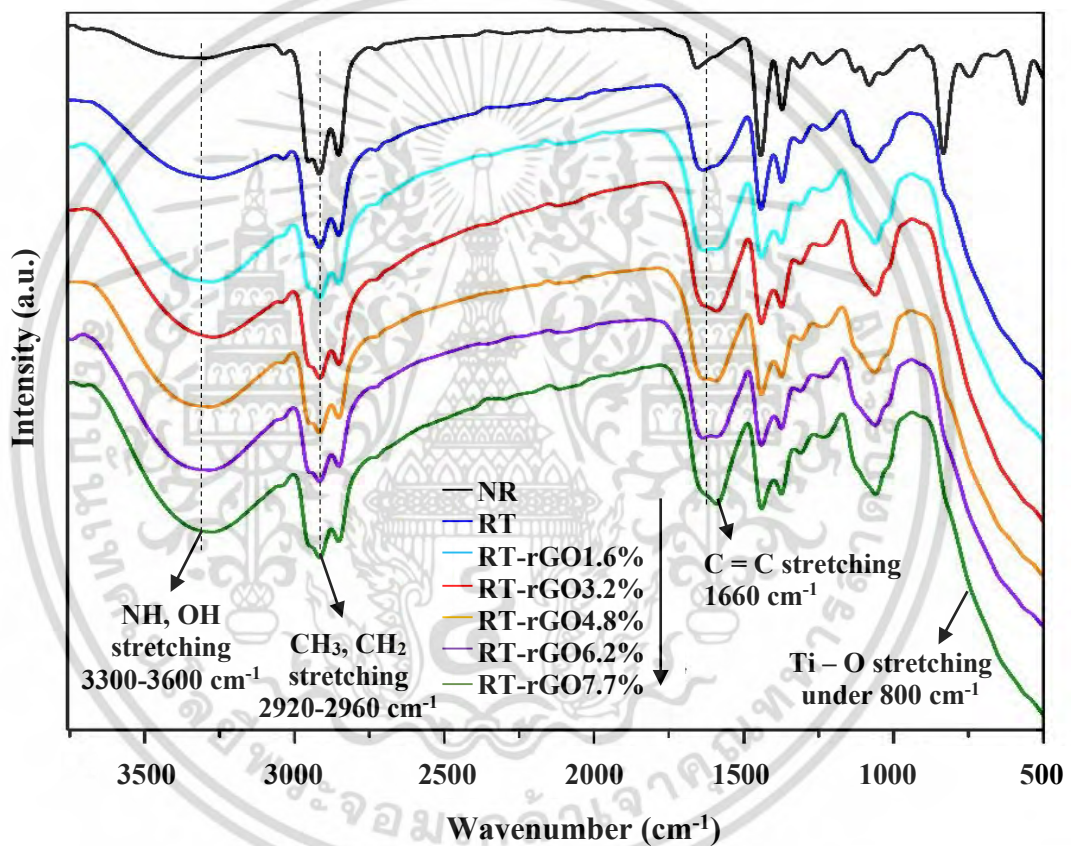
ตารางที่ 4.1 หมู่ฟังก์ชันที่สำคัญในไทเทเนียมไดออกไซด์และยางธรรมชาติ

หมู่ฟังก์ชัน (functional group)	เลขคลื่น (wavenumber, cm ⁻¹)
N-H และ O-H stretching	3300-3600
CH ₃ stretching	2960 และ 2850
CH ₂ stretching	2920

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 หมู่ฟังก์ชันที่สำคัญในไทเทเนียมไดออกไซด์และยางธรรมชาติ (ต่อ)

หมู่ฟังก์ชัน (functional group)	เลขคลื่น (wavenumber, cm^{-1})
C=C stretching	1660
CH_3 bending	1460
CH_2 bending	1380
=C-H bending	840
Ti-O stretching	ต่ำกว่า 800



รูปที่ 4.13 FT-IR สเปกตรัมแสดงหมู่ฟังก์ชันของแผ่นของผสมชนิดต่าง ๆ

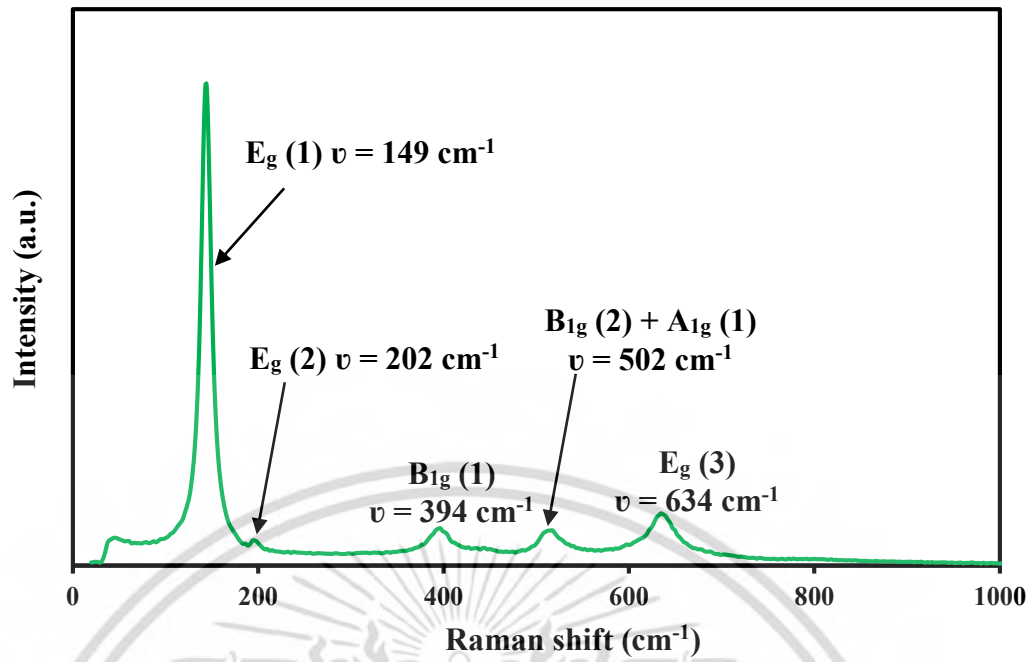
จากรูปที่ 4.12 แผ่นยางธรรมชาติจะแสดงสเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญ ได้แก่ ช่วงแรกที่มีประมาณเลขคลื่น 3600 ถึง 3300 cm^{-1} เป็นช่วงการสั่นของพันธะไนโตรเจนต่อไฮโดรเจน (N-H stretching) ของหมู่เอมีนที่มาจากแอมโมเนียที่ใช้ในการรักษาสภาพของยางธรรมชาติ หรือมาจากโหมดการสั่นของพันธะออกซิเจนต่อไฮโดรเจน (O-H stretching) ที่มาจากน้ำ ที่ช่วงเลขคลื่น 3030 cm^{-1} เป็นช่วงการสั่นของคาร์บอนพันธะคู่ต่อไฮโดรเจน (=C-H stretching) บริเวณช่วงเลขคลื่น 2960 และ 2850 cm^{-1} เป็นช่วงการสั่นของคาร์บอนพันธะเดี่ยวต่อไฮโดรเจน 3 ตัว (CH_3 stretching) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งใกล้เคียงกับเลขคลื่น 2920 cm^{-1} ที่เป็นการสั่นของคาร์บอนพันธะเดี่ยวต่อไฮโดรเจน 2 ตัว (CH_2 stretching) ถัดมาประมาณเลขคลื่น 1660 cm^{-1} เป็นช่วงการสั่นของคาร์บอนพันธะคู่ต่อคาร์บอน ($\text{C}=\text{C}$ stretching) ช่วงเลขคลื่น 1460 และ 1380 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบงอของคาร์บอนพันธะเดี่ยวต่อไฮโดรเจน 2 และ 3 ตัว (CH_2, CH_3 bending) ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบที่เลขคลื่น 840 cm^{-1} ที่เป็นการสั่นแบบงอของคาร์บอนพันธะคู่ต่อคาร์บอน ($\text{C}=\text{C}$ bending) หรือเป็นช่วงการสั่นที่เป็นเอกลักษณ์ของคาร์บอนพันธะคู่มีโครงสร้างแบบซิส (*cis*-double bond carbon) ในส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์จะพบพีกแถบกว้างที่บริเวณเลขคลื่นต่ำกว่า 800 cm^{-1} ที่มาจากการสั่นของไทเทเนียมต่อออกซิเจน ($\text{Ti}-\text{O}$ stretching) [8]

เมื่ออยู่ในรูปแผ่นของผสมในรูปที่ 4.13 พบพีกเอกลักษณ์ของยางธรรมชาติและไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้ง $\text{O}-\text{H}$ stretching หรือ $\text{N}-\text{H}$ stretching ที่ช่วงเลขคลื่นประมาณ 3600 ถึง 3300 cm^{-1} CH_2-CH_3 stretching ที่ช่วงเลขคลื่นประมาณ 2960 และ 2850 cm^{-1} $\text{C}=\text{C}$ stretching ที่ช่วงเลขคลื่น 1660 cm^{-1} และ $\text{Ti}-\text{O}$ stretching ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ช่วงเลขคลื่นต่ำกว่า 800 cm^{-1} ในส่วนของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ไม่พบว่าการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมของแผ่นของผสม ซึ่งอาจมาจากพีกเอกลักษณ์ของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีลักษณะใกล้เคียงกับยางธรรมชาติ อีกทั้งปริมาณที่เติมลงไปแผ่นของผสมนั้นมีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณของยางธรรมชาติและไทเทเนียมไดออกไซด์ [54]

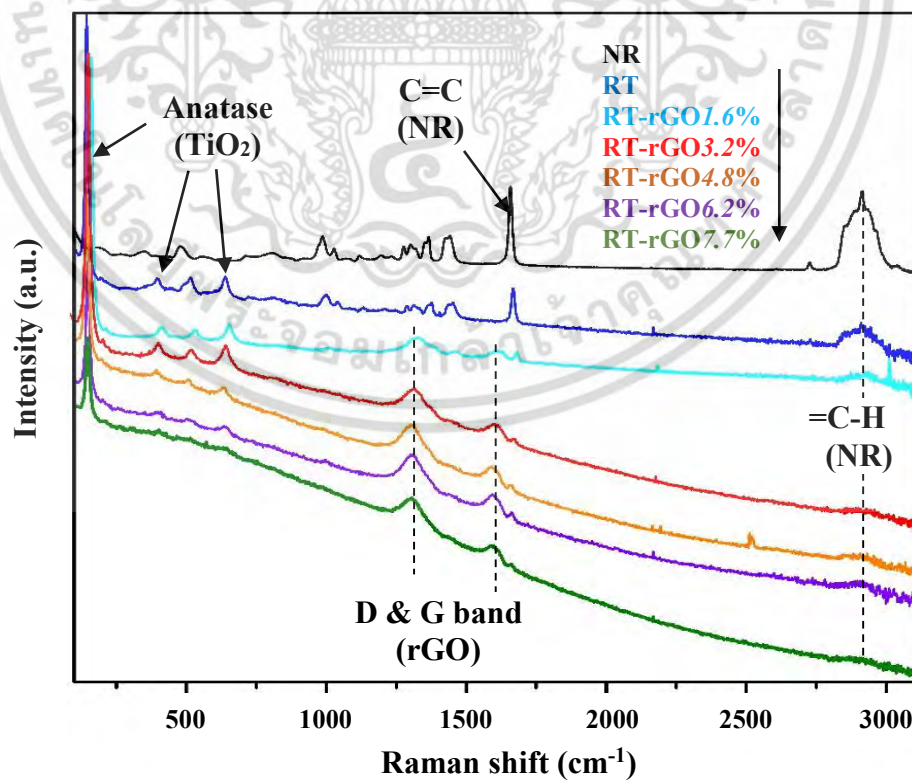
4.2.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะของแผ่นของผสมด้วยรามานสเปกโตรมิเตอร์ (Raman spectrometer)

การพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะด้วยเทคนิครามานเป็นการช่วยยืนยันโครงสร้างและองค์ประกอบของแผ่นของผสม ในรูปที่ 4.14 แสดงโหมดการสั่นที่สำคัญด้วยเลขคลื่นรามาน (Raman shift, cm^{-1}) ของไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่ามีช่วงการสั่นที่ชัดเจนที่บริเวณ 149 cm^{-1} โดยที่ฐานของพีกยังพบช่วงการสั่นเล็ก ๆ ที่บริเวณ 202 cm^{-1} นอกจากนี้ยังพบพีก 3 พีก ใกล้เคียง ๆ กันในช่วงบริเวณการสั่น 394 ถึง 634 cm^{-1} ซึ่งเป็นเอกลักษณ์เฉพาะของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส [23] ในส่วนของรูโพล์ที่อาจไม่พบพีกเพราะมีปริมาณสัดส่วนเพียงเล็กน้อยในโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 ที่มีอยู่ประมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก อีกทั้งยังมีช่วงการสั่นที่ใกล้เคียงกันกับอนาเทสจึงอาจเกิดการซ้อนเหลื่อมกันระหว่างพีกได้



รูปที่ 4.14 รามานสเปกตรัมแสดงโหมดการสั่นของไทเทเนียมไดออกไซด์

การพิสูจน์เอกลักษณ์ของแผ่นของผสมยางธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกันอย่างเทคนิครามาน แสดงดังรูปที่ 4.15



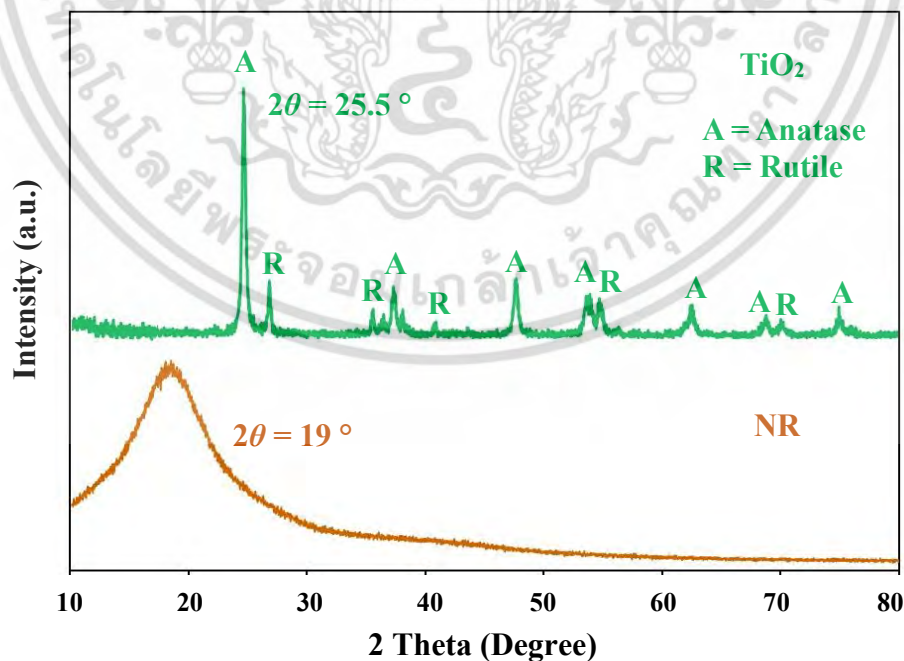
รูปที่ 4.15 รามานสเปกตรัมแสดงโหมดการสั่นเปรียบเทียบแผ่นของผสมชนิดต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ท่านไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.15 พบว่าเส้นสเปกตรัมของแผ่นยางธรรมชาติมีโหมดการสั่นที่สำคัญของเลขคลื่นของรามานอยู่ที่ 1000 1450 และ 1680 cm^{-1} รวมไปถึงช่วงการสั่นในบริเวณ 2800 ถึง 3000 cm^{-1} ที่เป็นช่วงเอกลักษณ์เฉพาะของยางธรรมชาติที่มีโครงสร้างหลักเป็นยางไอโซพรีน เมื่อทำการเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ลงไปดังแสดงในเส้นสเปกตรัมของ RT พบว่ามีช่วงการสั่นเพิ่มขึ้นมาที่บริเวณ 150 cm^{-1} และยังพบพีค 3 พีค ใกล้เคียง ๆ กันในช่วงบริเวณการสั่น 390 ถึง 640 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคเอกลักษณ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ ในส่วนของแผ่นของผสมที่เติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์พบว่า มีเอกลักษณ์เฉพาะของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ด้วยการมีพีคของ D band และ G band ปรากฏที่บริเวณการสั่น 1350 และ 1600 cm^{-1} ตามลำดับ เมื่อมีปริมาณรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น นอกจากพีคของ D band และ G band จะมีความเข้มของพีคมากขึ้นแล้ว ยังทำให้ความเข้มของพีคเอกลักษณ์ของทั้งยางธรรมชาติและไทเทเนียมไดออกไซด์ที่บริเวณต่าง ๆ นั้นลดลง ซึ่งมาจากการที่รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์กระจายตัวได้ดีทั่วทั้งแผ่นของผสม แล้วจึงเกิดการบดบังองค์ประกอบอื่น ๆ ที่พื้นผิว [34]

4.2.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะของแผ่นของผสมด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

การพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เป็นหนึ่งในเทคนิคที่สามารถยืนยันองค์ประกอบและโครงสร้างผลึกของแผ่นของผสม โดยผลการพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะของไทเทเนียมไดออกไซด์และยางธรรมชาติแสดงในรูปที่ 4.16

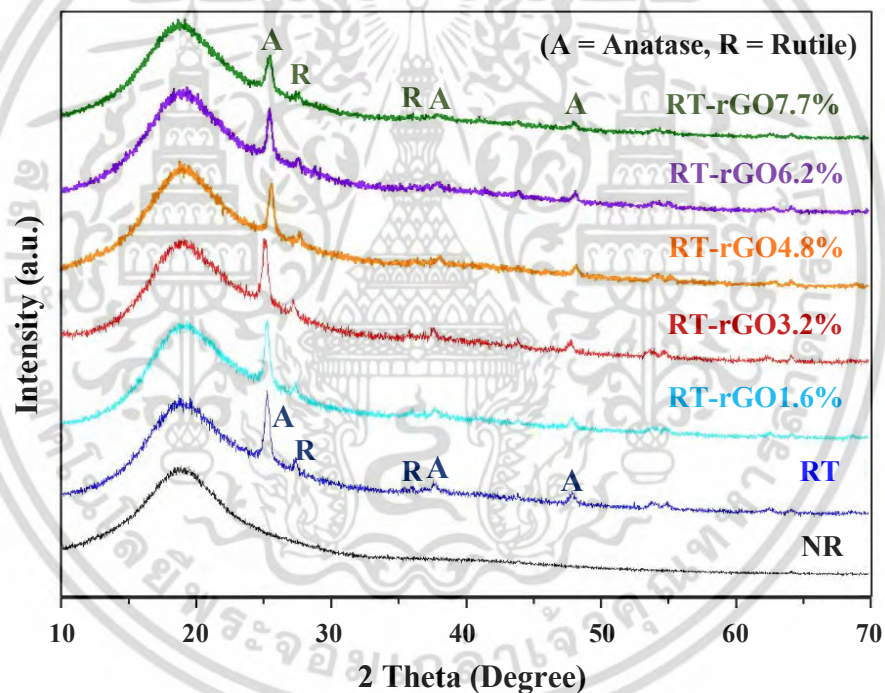


รูปที่ 4.16 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของยางธรรมชาติ (NR) และไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.16 พบว่า ไทเทเนียมไดออกไซด์แสดงโครงสร้างผลึกผสมของอนาเทสและรูไทล์ ซึ่งมาจากชนิดของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้คือ Degussa P25 ที่เป็นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างหลักเป็นอนาเทสอยู่ที่ประมาณร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก และมีโครงสร้างรองเป็นรูไทล์อยู่ที่ประมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก โดยมีองศาการเลี้ยวเบนที่สำคัญอยู่ที่ 2θ เท่ากับ 25.5° ซึ่งเป็นระนาบผลึก (101) นอกจากนี้ยังพบระนาบผลึก อย่างเช่น (103) (200) และ (105) ที่มีองศาเลี้ยวเบนอยู่ที่ 2θ เท่ากับ 37° 48° และ 54.5° ตามลำดับ ในส่วนของรูไทล์แสดงองศาการเลี้ยวเบนที่ถัดมาจากอนาเทสเล็กน้อยอยู่ที่ 2θ เท่ากับ 27.5° ที่มีระนาบผลึกอยู่ที่ (110) และแสดงระนาบผลึกอื่น ๆ อย่างเช่น (101) และ (211) ที่มีองศาเลี้ยวเบนอยู่ที่ 2θ เท่ากับ 35.9° และ 55.2° ตามลำดับ [37] สำหรับยางธรรมชาติจะพบพีกกว้างขององศาเลี้ยวเบนที่ 19° เพียงพีกเดียว

การพิสูจน์เอกลักษณ์ของแผ่นของผสมยางธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีน-ออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกันด้วยเทคนิค XRD แสดงดังรูปที่ 4.17



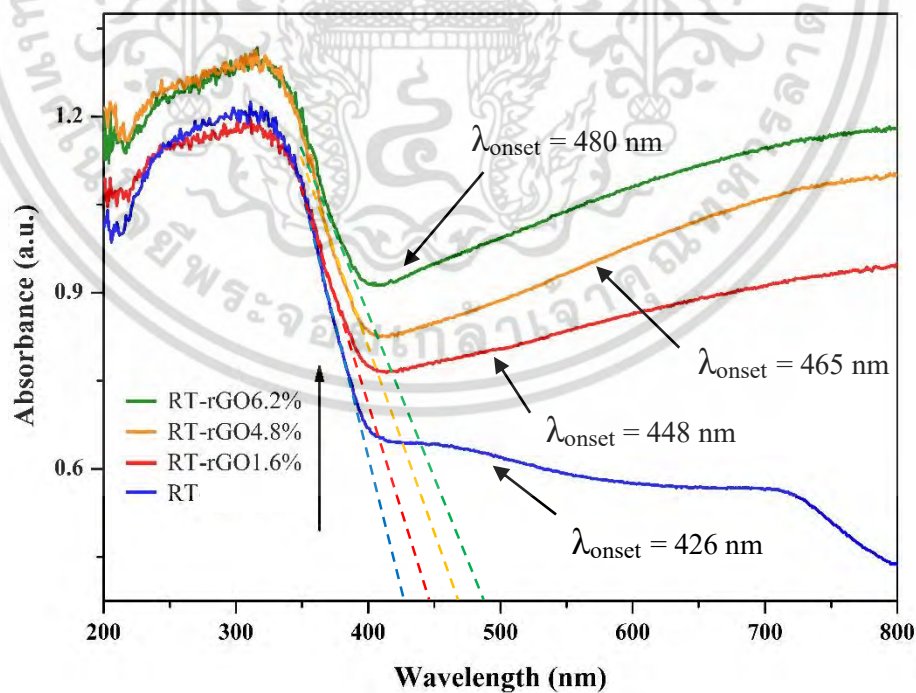
รูปที่ 4.17 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่แตกต่างกันของแผ่นของผสมชนิดต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.17 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของแผ่นผสมแต่ละชนิด พบว่ายังคงปรากฏพีกเอกลักษณ์ของยางธรรมชาติและไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยพีกกว้างที่แสดงถึงโครงสร้างที่เป็นอสัณฐาน (มีความเป็นผลึกเล็กน้อย) ของยางธรรมชาติมีองศาเลี้ยวเบนที่ 2θ เท่ากับ 19° เมื่อทำการเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวอย่าง RT พบพีกที่สำคัญของไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด P25 ที่องศาเลี้ยวเบนที่ 2θ เท่ากับ 25.5° (อนาเทส) และ 27.5° (รูไทล์) นอกจากนี้ยังมีบริเวณองศาเลี้ยวเบนอื่น ๆ ที่แสดงถึงโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสปรากฏขึ้นเล็กน้อย เช่น 37° 48° หรือ 54.5° เป็นต้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อคุณผู้ใดเห็นว่าเป็นประโยชน์ในการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนพีคของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่มีองศาเลี้ยวเบนที่ 2θ เท่ากับ 25.2° นั้นไม่ปรากฏขึ้นในทุกตัวอย่างที่มีการเติม เนื่องมาจากการที่รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีองศาเลี้ยวเบนที่ใกล้เคียงกับยางธรรมชาติและไทเทเนียมไดออกไซด์ (19° และ 25.5° ตามลำดับ) จึงสามารถถูกบดบังหรือเกิดการซ้อนทับกันระหว่างพีคได้ อีกทั้งปริมาณที่เติมลงไปในพื้นที่ของผสมก็ยังเป็นสัดส่วนที่เล็กน้อยถ้าเทียบกับปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์หรือยางธรรมชาติ แต่พบว่าเมื่อมีปริมาณของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มากขึ้น จะทำให้ความเข้มพีคของไทเทเนียมไดออกไซด์นั้นลดลง ซึ่งอาจมาจากการที่รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์กระจายปกคลุมทั่วทั้งแผ่นของผสมมากขึ้น ทำให้พบปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผิวของชิ้นงานลดลง [56]

4.2.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะของแผ่นของผสมด้วยเครื่อง Ultraviolet-visible diffuse-reflectance spectrophotometer (DRS)

การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค DRS จะนำมาใช้ในการหาแนวโน้มการดูดกลืนแสงที่สามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาแถบช่องว่างพลังงาน เพื่อใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของสารตัวเร่งในการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกได้ ซึ่งจะทำให้การทดสอบกับแผ่นของผสมทั้งหมด 4 ตัวอย่าง ได้แก่ RT RT-rGO1.6% RT-rGO4.8% และ RT-rGO6.2% โดยผลการพิสูจน์เอกลักษณ์จะแสดงดังรูปที่ 4.18

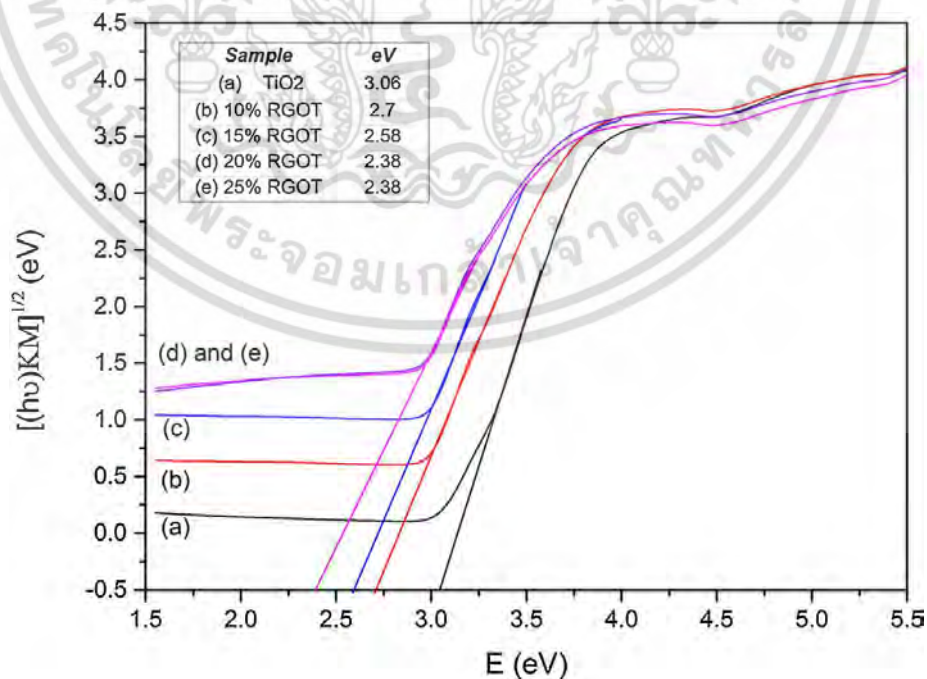


รูปที่ 4.18 DRS สเปกตร้าของแผ่นของผสมทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ RT RT-rGO1.6% RT-rGO4.8% และ RT-rGO6.2%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.18 สามารถหาแถบช่องว่างพลังงาน (E_g) ของไทเทเนียมไดออกไซด์ในแต่ละตัวอย่างได้ด้วยการลากเส้นตัดกราฟ Adsorption edge จะให้ค่าความยาวคลื่นที่ดูดกลืน (λ_{onset}) แล้วจึงนำไปคำนวณด้วยสมการของแพลงค์ [40] ซึ่งแสดงค่าแถบช่องว่างพลังงานของแผ่นของผสมแต่ละชนิด ดังนี้ RT มีแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 2.88 eV ในขณะที่เมื่อเพิ่มปริมาณรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในแผ่นของผสม RT-rGO1.6% RT-rGO4.8% และ RT-rGO6.2% พบว่ามีแถบช่องว่างพลังงานลดลงอยู่เท่ากับ 2.76 2.66 และ 2.55 eV ตามลำดับ ทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถดูดซับแสงที่มีพลังงานน้อยลงอย่างแสงวิชิเบิลในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งคาดว่า เป็นผลมาจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอะตอมคาร์บอนของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์กับอะตอมออกซิเจนของไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้แถบช่องว่างพลังงานแคบลงจนสามารถใช้แสงที่มีพลังงานน้อยลงได้ อีกทั้งด้วยคุณสมบัติในด้านการถ่ายเทอิเล็กตรอนที่ดีเยี่ยมของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ซึ่งอาจเป็นอีกหนึ่งปัจจัยในการช่วยให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น [51, 52]

ผลของ DRS ที่ได้สอดคล้องกับ DRS สเปกตรมาจากงานวิจัยของ D. Maruthamani และคณะ [57] ดังแสดงในรูปที่ 4.19 พบว่าปริมาณของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถดูดกลืนแสงช่วงวิชิเบิลได้ดียิ่งขึ้น โดยคำนวณแถบช่องว่างพลังงาน (E_g) จากเทคนิค DRS ได้ค่าดังนี้ 3.06 2.7 2.58 2.38 และ 2.38 eV (ของไทเทเนียมไดออกไซด์ และไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณร้อยละ 10 15 20 และ 25 ตามลำดับ) ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดอันตรกิริยาที่ดีระหว่างรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์กับไทเทเนียมไดออกไซด์ จนสามารถใช้แสงที่มีพลังงานน้อยลงในการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาได้



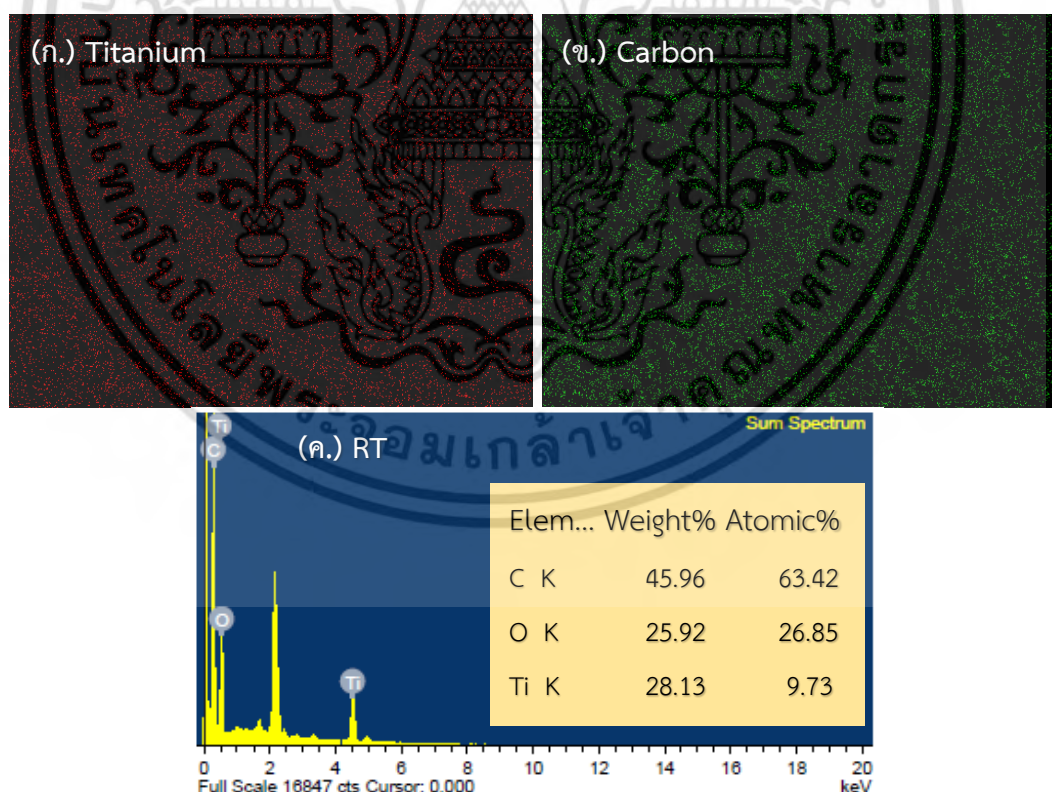
รูปที่ 4.19 DRS สเปกตรมาจากงานวิจัยของ D. Maruthamani และคณะ [57]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5 การพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะของแผ่นของผสมด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ (EDX)

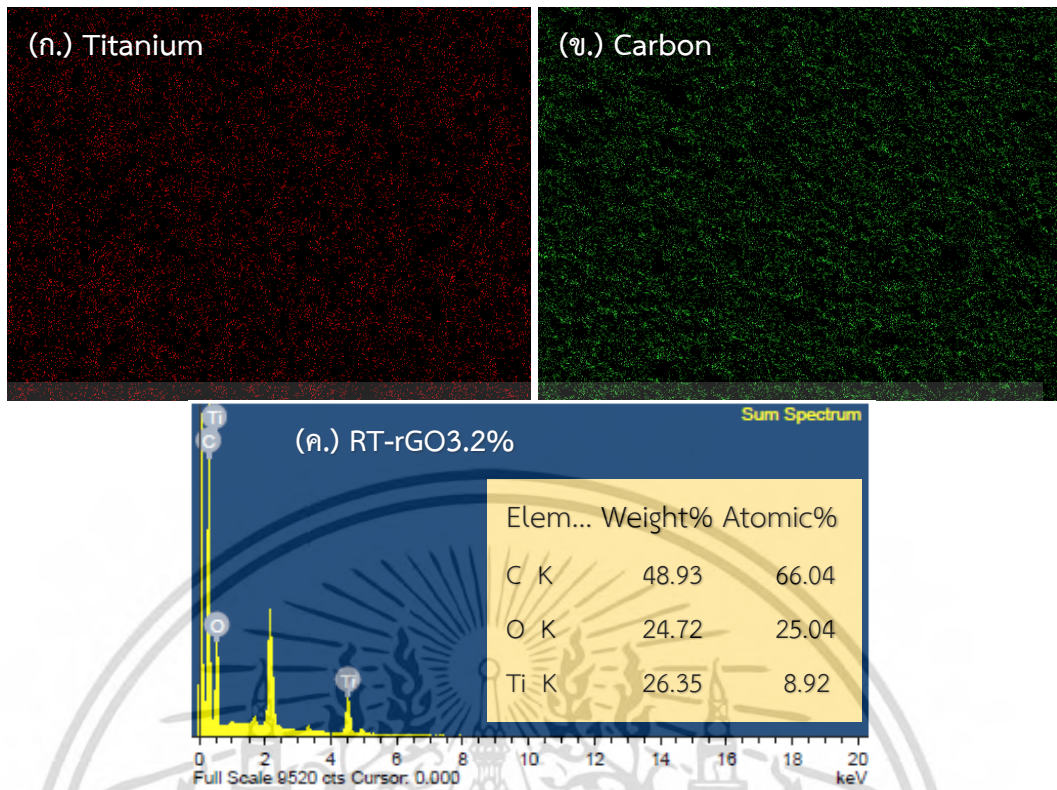
การพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะด้วยเทคนิค EDX จะเป็นการบอกสัดส่วนของธาตุองค์ประกอบที่อยู่ในแผ่นของผสม โดยทำการวิเคราะห์ทั้งหมด 2 ธาตุ ได้แก่ คาร์บอนและไทเทเนียม ตัวอย่างของแผ่นของผสมที่นำมาศึกษามีทั้งหมด 3 ตัวอย่าง ได้แก่ แผ่นของผสมยางธรรมชาติและไทเทเนียม-ไดออกไซด์ (RT) แผ่นของผสมยางธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ร้อยละ 3.2 โดยน้ำหนัก (RT-rGO3.2%) และแผ่นของผสมยางธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ร้อยละ 7.7 โดยน้ำหนัก (RT-rGO7.7%)

ผลการวิเคราะห์ในรูปแบบที่ 4.20 ถึง 4.22 พบว่า เมื่อทำการเพิ่มปริมาณรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ สัดส่วนของไทเทเนียมจะลดลงสวนทางกับสัดส่วนของคาร์บอนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งช่วยยืนยันในเรื่องของการที่รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์สามารถกระจายตัวปกคลุมไปทั่วทั้งแผ่นของผสม ทำให้เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุที่พื้นผิวของแผ่นของผสม จะพบปริมาณของไทเทเนียมน้อยลง แต่พบคาร์บอนมากยิ่งขึ้น สอดคล้องกับภาพถ่ายวิเคราะห์สาร (Element mapping) ที่แสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นของไทเทเนียมที่ลดลง แต่กลับแสดงความหนาแน่นของคาร์บอนที่เพิ่มมากขึ้น โดยสัดส่วนของธาตุจะแสดงในตารางที่ 4.2

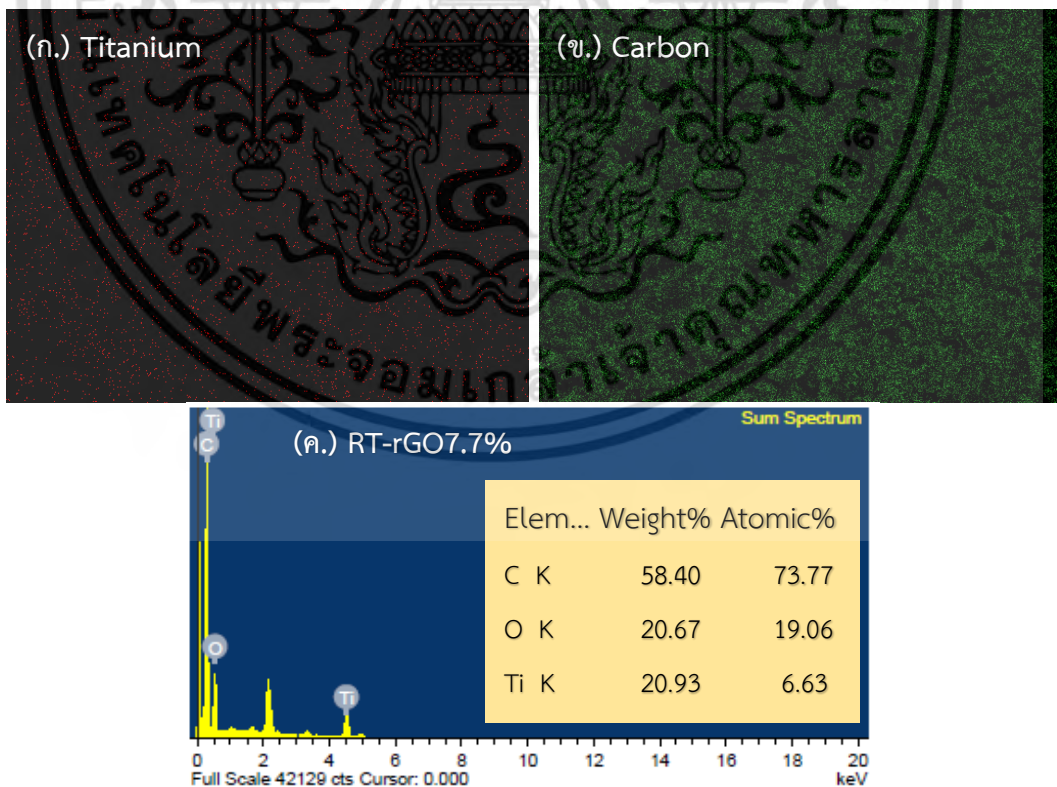


รูปที่ 4.20 ภาพถ่ายวิเคราะห์สาร (ก.) Ti (ข.) C และ (ค.) EDX สเปกตรัมของ RT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 ภาพถ่ายวิเคราะห์สาร (ก.) Ti (ข.) C และ (ค.) EDX สเปกตรัมของ RT-rGO3.2%



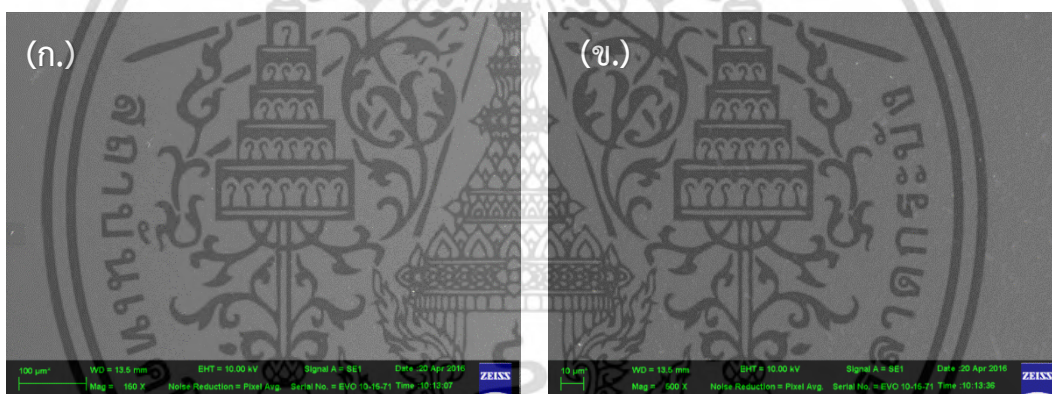
รูปที่ 4.22 ภาพถ่ายวิเคราะห์สาร (ก.) Ti (ข.) C และ (ค.) EDX สเปกตรัมของ RT-rGO7.7% เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 สัดส่วนของธาตุไทเทเนียมและคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบหลักของแผ่นของผสมในตัวอย่างของ RT RT-rGO3.2% และ RT-rGO7.7%

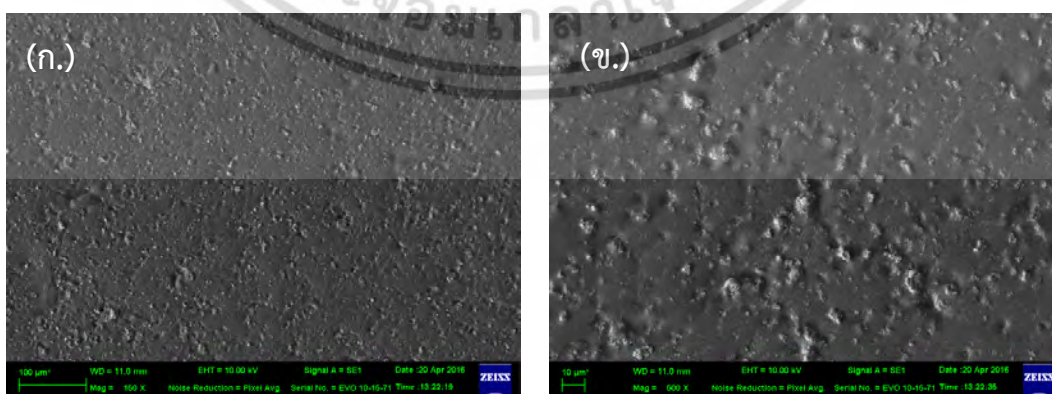
องค์ประกอบ (ธาตุ)	RT		RT-rGO3.2%		RT-rGO7.7%	
	% wt.	% atomic	% wt.	% atomic	% wt.	% atomic
ไทเทเนียม	28.13	9.73	26.35	8.92	20.93	6.63
คาร์บอน	45.96	63.42	48.93	66.04	58.40	73.77

4.2.6 การพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะของแผ่นของผสมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

การพิสูจน์เอกลักษณ์ในเรื่องของสีฐานวิทยาของแผ่นของผสม จะใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ในการศึกษาลักษณะภายนอกบนพื้นผิวของแผ่นของผสมชนิดต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.23 ถึง 4.29

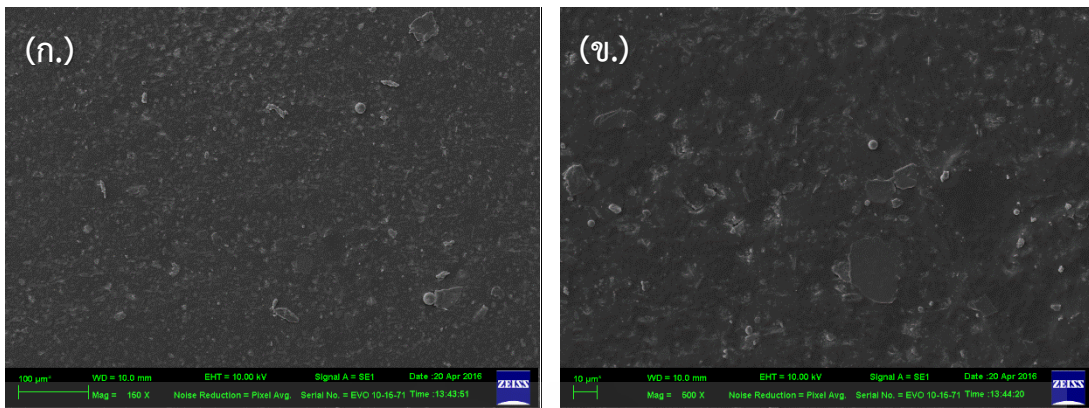


รูปที่ 4.23 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงพื้นผิวของแผ่นยางธรรมชาติ (NR) ที่กำลังขยาย (ก.) X150 เท่า (ข.) X500 เท่า

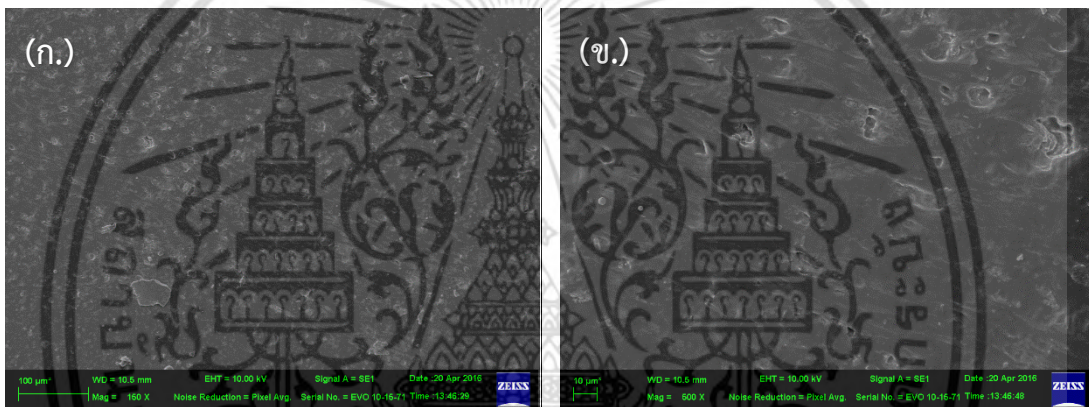


รูปที่ 4.24 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงพื้นผิวของแผ่นของผสมยางธรรมชาติและไทเทเนียมไดออกไซด์ (RT) ที่กำลังขยาย (ก.) X150 เท่า (ข.) X500 เท่า

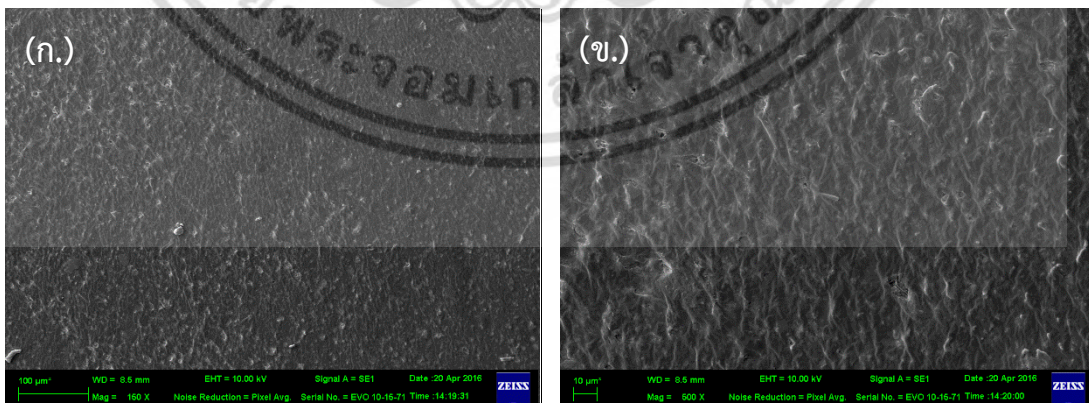
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของโรงเรียนเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงพื้นผิวของแผ่นของผสมยางธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ RT-rGO1.6% ที่กำลังขยาย (ก.) X150 เท่า (ข.) X500 เท่า

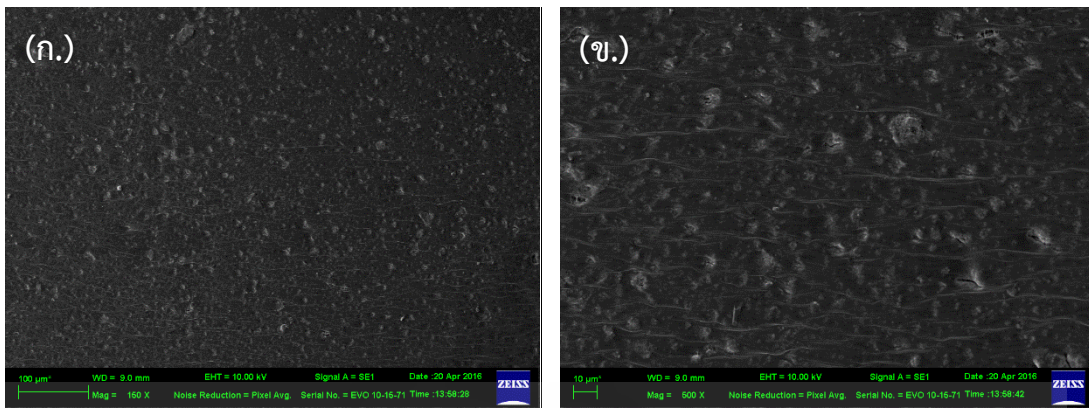


รูปที่ 4.26 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงพื้นผิวของแผ่นของผสมยางธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ RT-rGO3.2% ที่กำลังขยาย (ก.) X150 เท่า (ข.) X500 เท่า

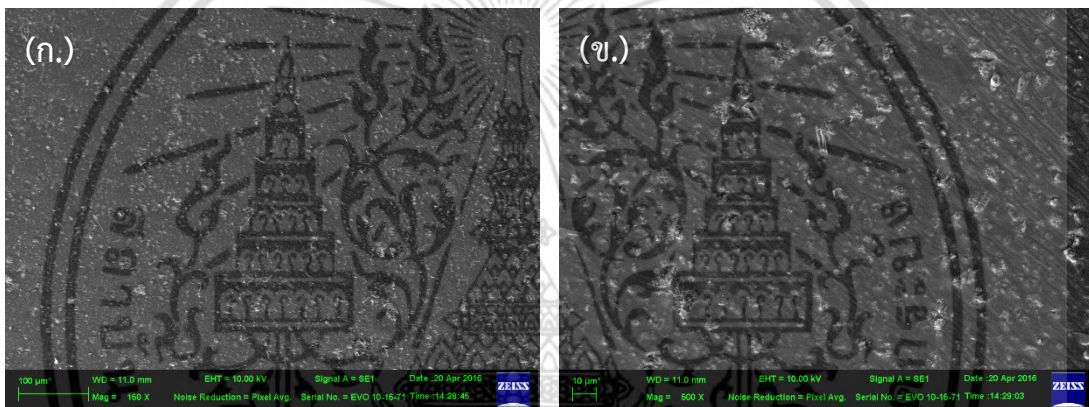


รูปที่ 4.27 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงพื้นผิวของแผ่นของผสมยางธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ RT-rGO4.8% ที่กำลังขยาย (ก.) X150 เท่า (ข.) X500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงพื้นผิวของแผ่นของผสมยางธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ RT-rGO6.2% ที่กำลังขยาย (ก.) X150 เท่า (ข.) X500 เท่า



รูปที่ 4.29 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงพื้นผิวของแผ่นของผสมยางธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ RT-rGO7.7% ที่กำลังขยาย (ก.) X150 เท่า (ข.) X500 เท่า

ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแผ่นยางธรรมชาติ ในรูปที่ 4.23 มีลักษณะพื้นผิวที่เรียบ แตกต่างจากแผ่นยางธรรมชาติที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ (RT) ในรูปที่ 4.24 ที่เริ่มจะมีความขรุขระที่พื้นผิวมากยิ่งขึ้น และจะเห็นความขรุขระชัดยิ่งขึ้นในรูปที่ 4.25 ถึง 4.29 ที่เป็นแผ่นของผสมที่มีการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกัันทั้ง 5 ตัวอย่าง (RT-rGO1.6% RT-rGO3.2% RT-rGO4.8% RT-rGO6.2% และ RT-rGO7.7%) โดยพบว่านอกจากความขรุขระที่พื้นผิวจะเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์แล้ว ยังสังเกตได้ว่าที่พื้นผิวมีรอยแตกและรอยย่นเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาจมาจากคุณสมบัติของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นแผ่นระนาบบาง ๆ สามารถบิดโค้งงอ เมื่อผสมกันกับยางธรรมชาติแล้วกระจายตัวอยู่ทั่วแผ่นของผสม จึงทำให้เกิดเป็นริ้วเป็นรอยต่าง ๆ ปรากฏขึ้นบนพื้นผิวได้ [56]

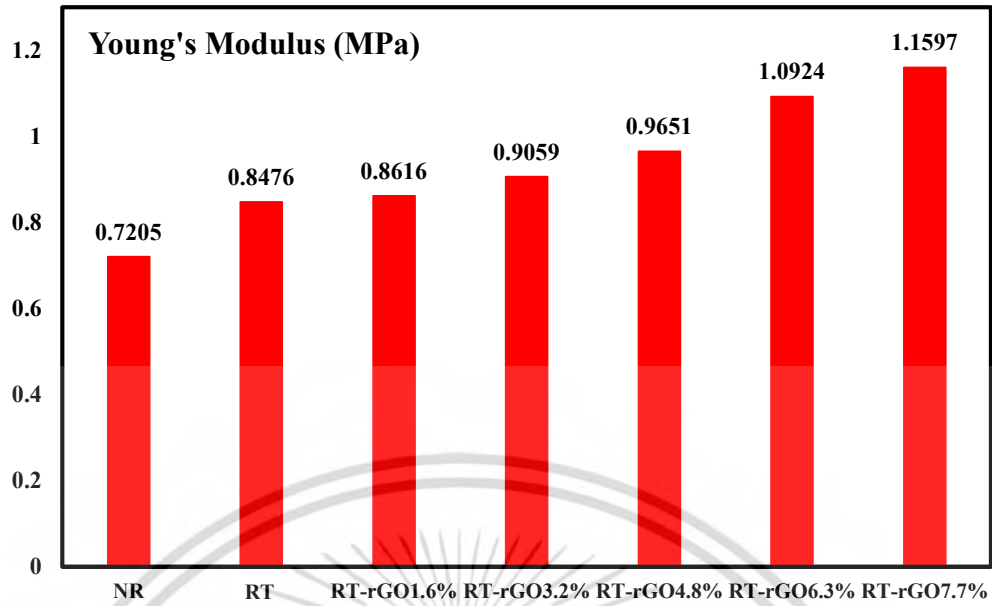
4.3 การศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงความร้อน

4.3.1 การศึกษาสมบัติเชิงกล (UTM)

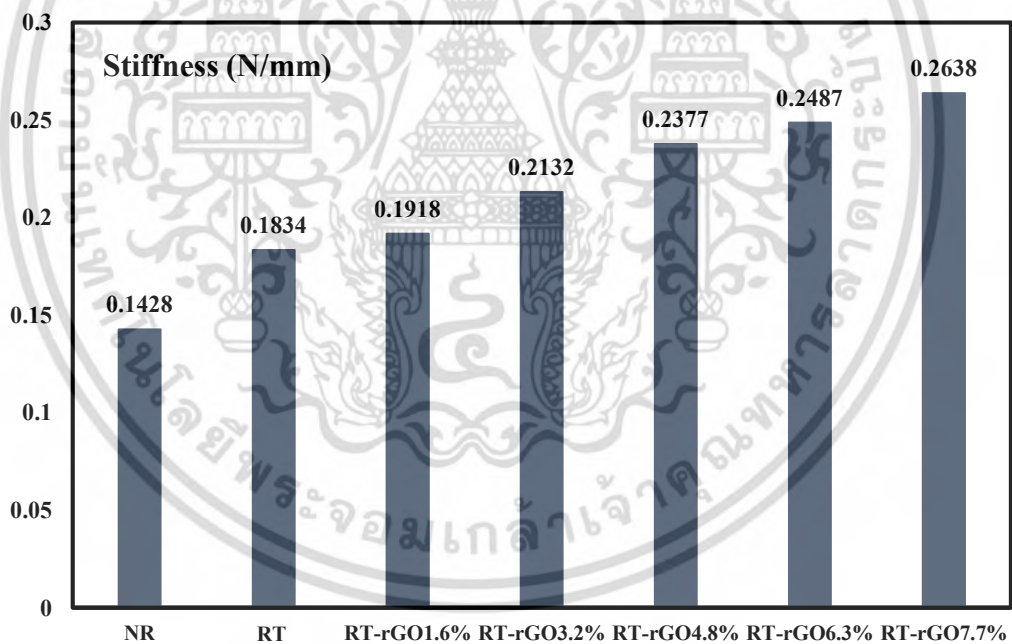
การศึกษาสมบัติเชิงกลเป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ว่าสามารถเสริมความแข็งแรงเชิงกลได้มากน้อยเพียงใดให้แก่แผ่นของผสมยางธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกันดังนี้ NR RT RT-rGO1.6% RT-rGO3.2% RT-rGO4.8% RT-rGO6.2% และ RT-rGO7.7% ซึ่งค่าสมบัติเชิงกลที่ทำการศึกษาคือ ค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus) ค่าการคงรูป (Stiffness) ค่าความเค้นสูงสุด (Stress at maximum load) และค่าแรงดึงที่จุดขาด (Load at break) โดยผลการทดสอบสมบัติเชิงกลแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สมบัติเชิงกลของแผ่นของผสมในแต่ละชนิด

ตัวอย่าง	Young's Modulus (MPa)	Stiffness (N/mm)	Stress at maximum load (MPa)	Load at break (N)
NR	0.7205	0.1428	1.2663	7.4103
RT	0.8476	0.1834	1.6478	10.832
RT-rGO1.6%	0.8616	0.1918	1.8515	12.072
RT-rGO3.2%	0.9059	0.2132	1.9762	13.169
RT-rGO4.8%	0.9651	0.2377	2.0126	14.449
RT-rGO6.2%	1.0924	0.2487	2.1063	15.585
RT-rGO7.7%	1.1597	0.2638	2.2325	16.687

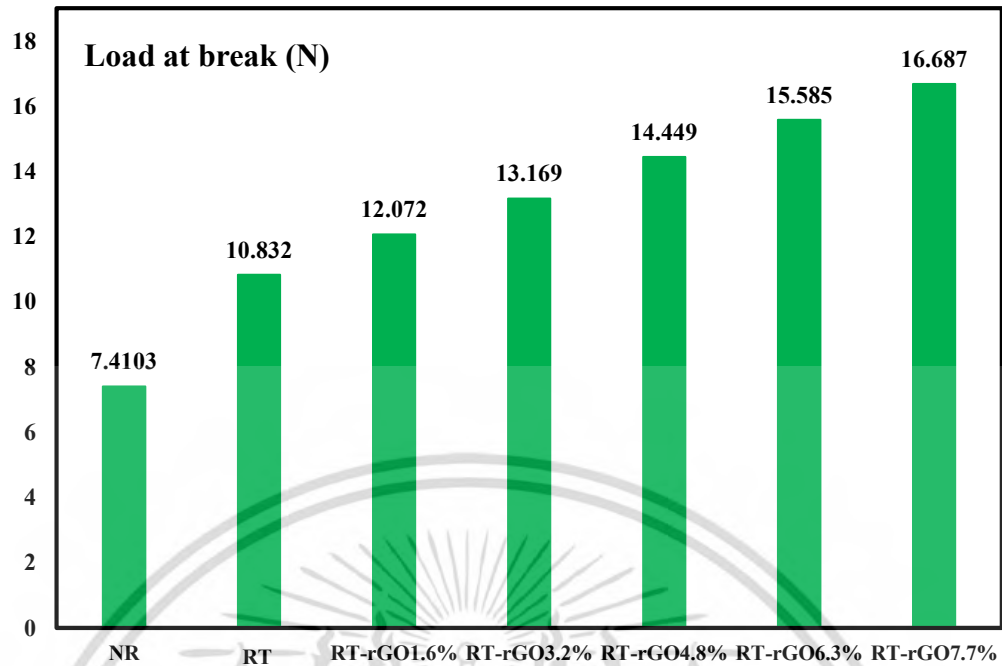


รูปที่ 4.30 กราฟเปรียบเทียบค่ามอดูลัสของยังของแผ่นของผสมในแต่ละตัวอย่าง

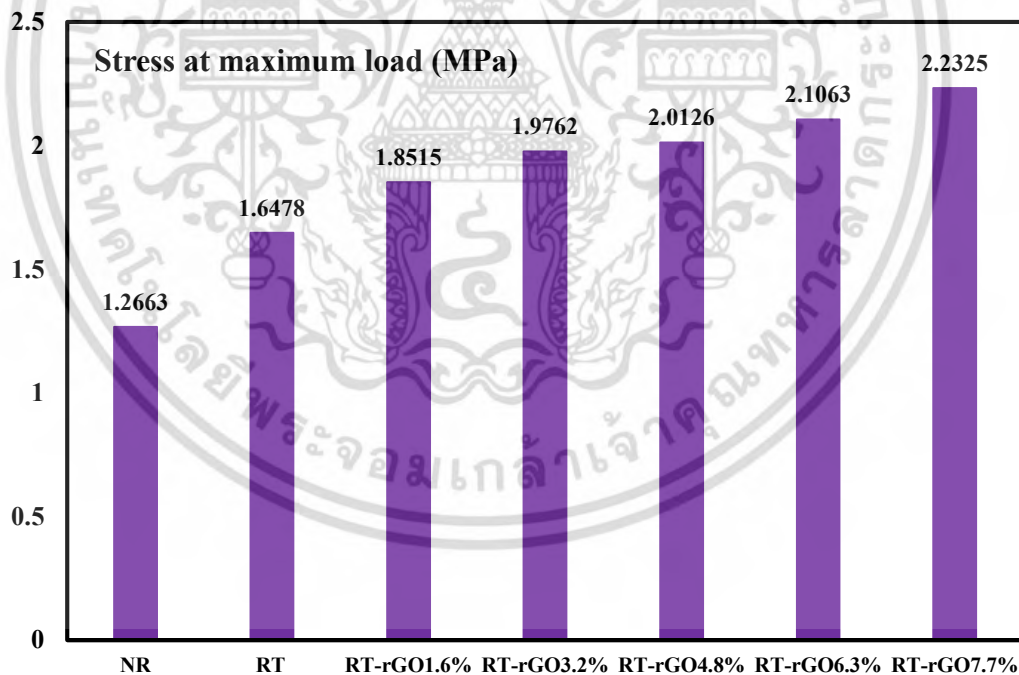


รูปที่ 4.31 กราฟเปรียบเทียบค่าการคงรูปของแผ่นของผสมในแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.32 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดึงที่จุดขาดของแผ่นของผสมในแต่ละชนิด



รูปที่ 4.33 กราฟเปรียบเทียบค่าความเค้นสูงสุดของแผ่นของผสมในแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

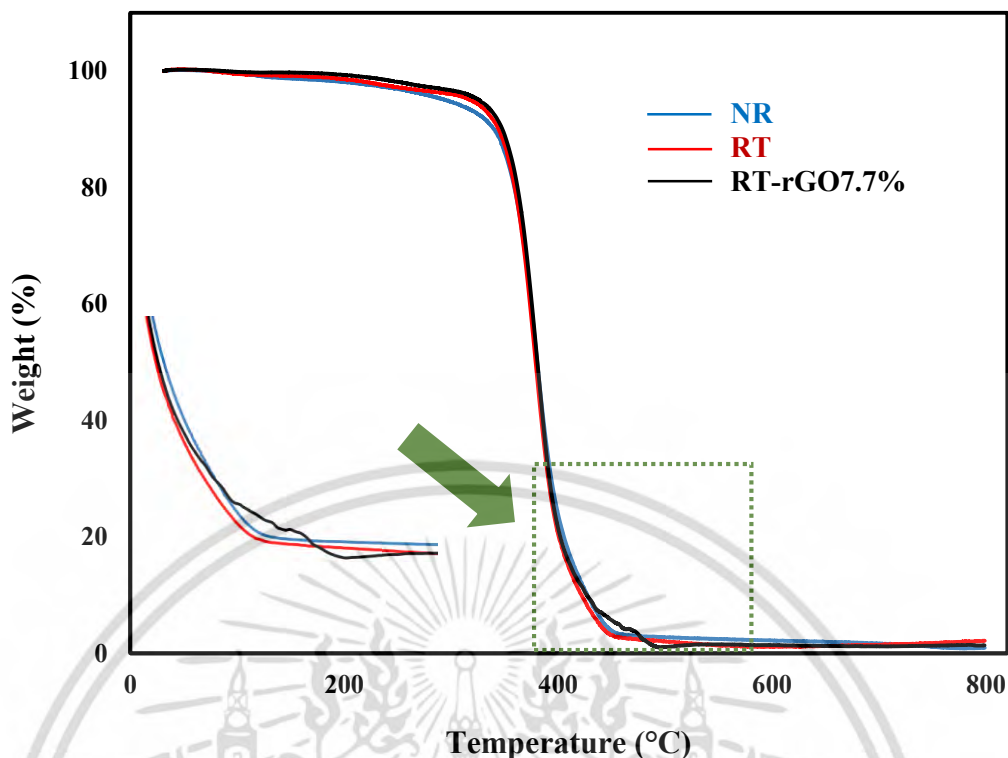
จากรูปที่ 4.30 ถึง 4.33 แสดงให้เห็นถึงสมบัติเชิงกลที่สูงขึ้นของแผ่นของผสมซึ่งมาจากไทเทเนียมไดออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ โดยไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีความแข็งแรงสูง เมื่อผสมเข้ากันได้ดีกับแมทริกซ์ของยางธรรมชาติก็จะทำให้มีความแข็งแรงและความเหนียวมากยิ่งขึ้นเมื่อเทียบกับแผ่นเปล่าของยางธรรมชาติ [33] สอดคล้องกับผลของค่ามอดูลัสของยัง ค่าการคงรูป ค่าแรงดึงที่จุดขาด และค่าความเค้นสูงสุด ที่เพิ่มขึ้นจาก 0.7205 MPa 0.1428 N/mm 7.4103 N และ 1.2663 MPa (ของยางธรรมชาติ) ไปเป็น 0.8476 MPa 0.1834 N/mm 10.832 N และ 1.6478 MPa (ของ RT) ตามลำดับ ในส่วนของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เป็นสารที่มีความแข็งแรงและความสามารถในการดัดยัดได้สูง [35] อีกทั้งยังมีลักษณะโครงสร้างเป็นแผ่นบาง ๆ บิดโค้งงอได้ จึงสามารถทำพันธะแล้วผสมเข้ากันได้ดีกับยางธรรมชาติ พบว่า ในแผ่นของผสมที่มีการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มากขึ้น ก็จะมีสมบัติเชิงกลที่สูงขึ้นตามลำดับ ในตัวอย่างของ RT-rGO7.7% ที่มีปริมาณรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มากที่สุด แสดงค่ามอดูลัสของยัง ค่าการคงรูป ค่าแรงดึงที่จุดขาด และค่าความเค้นสูงสุด อยู่ที่ 1.1597 MPa 0.2638 N/mm 16.687 N และ 2.2325 MPa ตามลำดับ ซึ่งมีสมบัติเชิงกลที่สูงกว่าทั้งแผ่นเปล่าของยางธรรมชาติ (NR) และแผ่นของผสมยางธรรมชาติกับไทเทเนียมไดออกไซด์ (RT) แสดงให้เห็นถึงความสามารถที่โดดเด่นของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในการเพิ่มสมบัติเชิงกลให้แก่แผ่นของผสม

4.3.2 การศึกษาสมบัติเชิงความร้อน (TGA)

การศึกษาสมบัติเชิงความร้อนเป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ว่าสามารถเพิ่มความทนทานต่อการสลายตัวภายใต้ความร้อนได้มากน้อยเพียงใด ให้แก่แผ่นของผสมยางธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ โดยทำการศึกษาแผ่นของผสมทั้งหมด 3 ตัวอย่าง ได้แก่ NR RT และ RT-rGO7.7% ซึ่งมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยการสลายตัวของแผ่นของผสมดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิเฉลี่ยการสลายตัวของแผ่นของผสมทั้ง 3 ชนิด

ตัวอย่าง	อุณหภูมิเฉลี่ยการสลายตัวของแผ่นของผสม (°C)
NR	354.4
RT	356.2
RT-rGO7.7%	358.4



รูปที่ 4.34 TGA สเปกตราแสดงการสลายตัวทางความร้อนของแผ่นของผสมทั้ง 3 ชนิด

จากรูปที่ 4.34 พบว่า แผ่นของผสมทั้ง 3 ชนิด มีลักษณะการสลายตัวทางความร้อนที่ใกล้เคียงกัน โดย แผ่นยางธรรมชาติ (NR) มีอุณหภูมิเฉลี่ยการสลายตัวอยู่ที่ 354.4 °C ซึ่งเป็นช่วงเอกลักษณ์เฉพาะในการสลายตัวของไอโซพรีนที่เป็นโครงสร้างหลักของยางธรรมชาติ ขณะที่แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (RT) มีอุณหภูมิการสลายตัวเฉลี่ยเท่ากับ 356.2 °C แสดงให้เห็นช่วงอุณหภูมิการสลายตัวที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวที่สูงกว่ายางธรรมชาติ (เริ่มสลายตัวที่ 600 °C) แต่เพราะปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ในแผ่นของผสมนั้นมีสัดส่วนน้อยมากเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ จึงทำให้แผ่นของผสม RT มีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย [45] เช่นเดียวกันกับแผ่นของผสมที่มีการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณร้อยละ 7.7 โดยน้ำหนัก (RT-rGO7.7%) พบว่ามีช่วงอุณหภูมิเฉลี่ยการสลายตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อยอยู่ที่ 358.4 °C ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวช่วงแรกประมาณร้อยละ 40 ของโครงสร้าง ที่ใกล้เคียงกับยางธรรมชาติอยู่ที่ 200 ถึง 400 °C จึงทำให้แผ่นของผสม RT-rGO7.7% มีอุณหภูมิการสลายตัวที่แตกต่างเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ NR และ RT [46]

4.4 การศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะไลติก

การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ทดสอบผ่านการใช้แผ่นของผสมยางธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ โดยศึกษาที่สภาพแวดล้อมและปัจจัยที่แตกต่างกัน ดังนี้

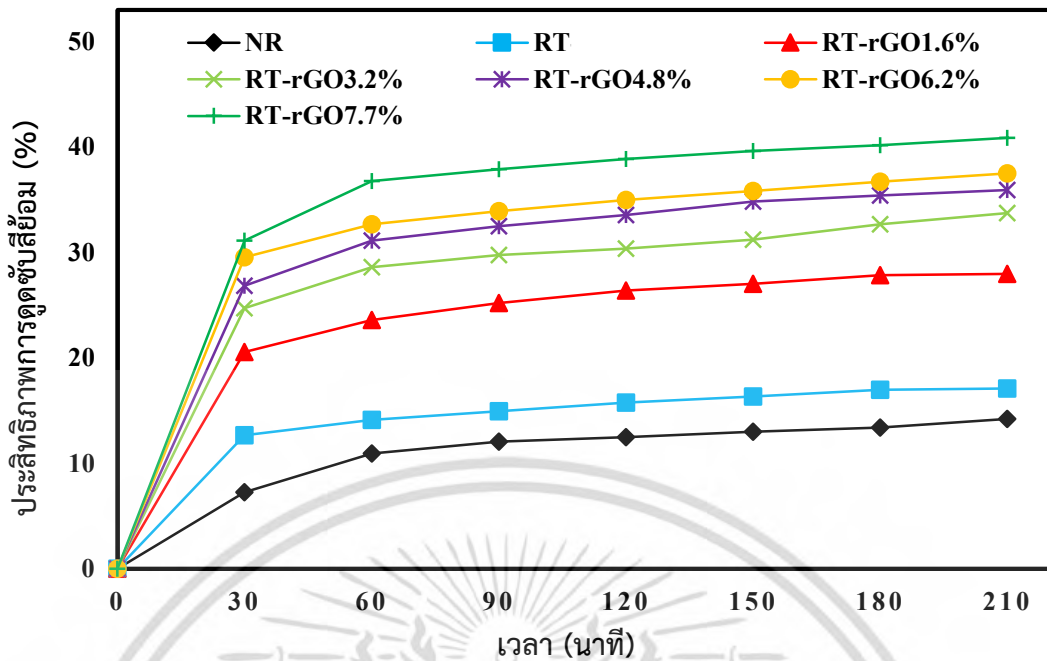
4.4.1 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มืด

การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มืด เป็นการศึกษาสภาวะการเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสีย้อม ผ่านการใช้แผ่นของผสมตัวอย่างต่าง ๆ จะใช้สีย้อมเมทิลีนบลูความเข้มข้นเท่ากับ 2.5×10^{-5} โมลาร์ ซึ่งการทดสอบจะทำในตู้กระบวนการโฟโตคะตะไลติกแบบไม่เปิดไฟเป็นเวลา 210 นาที โดยพักดูดซับเพื่อนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นคงเหลือทุก ๆ 30 นาที ค่าความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้จะแสดงดังตารางที่ 4.5

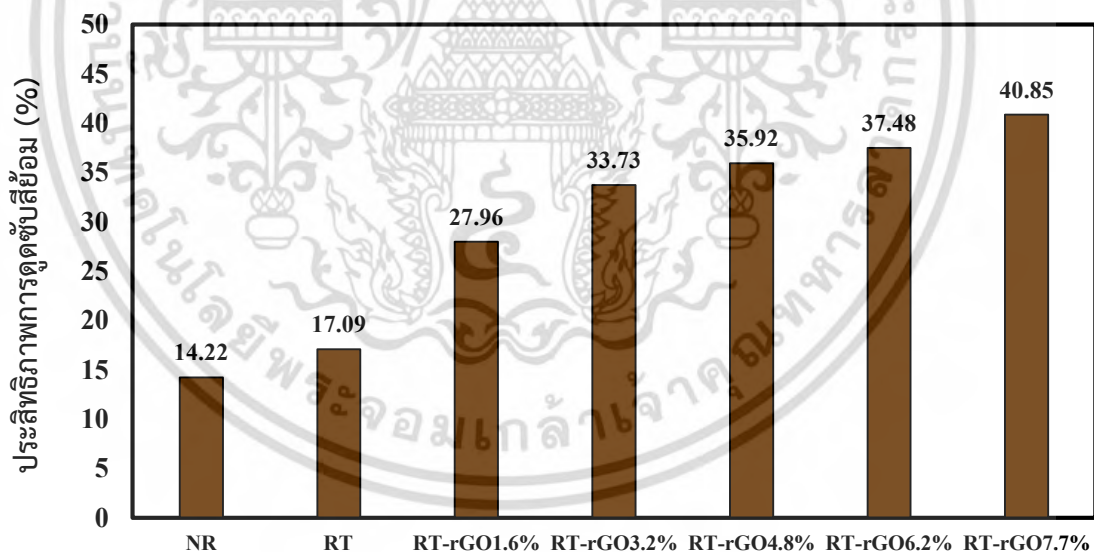
ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มืดผ่านแผ่นของผสมยางธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณต่าง ๆ

ตัวอย่าง	การกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มืดที่เวลาต่าง ๆ (%)						
	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที	150 นาที	180 นาที	210 นาที
NR	7.25	10.92	12.05	12.47	13.01	13.39	14.22
RT	12.65	14.12	14.94	15.77	16.33	16.98	17.09
RT-rGO1.6%	20.55	23.58	25.19	26.37	27.01	27.83	27.96
RT-rGO3.2%	24.71	28.59	29.74	30.36	31.21	32.66	33.73
RT-rGO4.8%	26.83	31.11	32.49	33.55	34.83	35.41	35.92
RT-rGO6.2%	29.53	32.68	33.90	34.98	35.82	36.70	37.48
RT-rGO7.7%	31.12	36.75	37.90	38.85	39.63	40.17	40.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.35 กราฟแสดงประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มีดที่เวลาใด ๆ ด้วยแผ่นของผสมชนิดต่าง ๆ



รูปที่ 4.36 กราฟแสดงประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มีดที่เวลา 210 นาที ด้วยแผ่นของผสมชนิดต่าง ๆ

จากตารางที่ 4.5 สามารถพลอตเป็นกราฟเส้นตรงแสดงการเปรียบเทียบความสามารถของการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มีดที่เวลาใด ๆ ได้ดังรูปที่ 4.35 แล้วจึงสรุปประสิทธิภาพการดูดซับของแผ่นของผสมที่เวลา 210 นาที ดังรูปที่ 4.36 พบว่าแผ่นยางธรรมชาติสามารถกำจัดสีย้อมไปได้เพียงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อยละ 14.22 เมื่อเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ของตัวแผ่นของผสม RT จะเห็นได้ว่าเป็นสามารถกำจัดได้มากขึ้นเป็นร้อยละเท่ากับ 17.09 ซึ่งอาจมาจากอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ส่งผลให้พื้นผิวของแผ่นของผสมมีความขรุขระมากขึ้น ทำให้มีพื้นที่ผิวในการดึงอนุภาคสียอมเมทิลีนบลูมาเกาะที่แผ่นของผสมได้มากขึ้น ในส่วนของแผ่นของผสมที่มีการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ได้แก่ RT-rGO1.6% RT-rGO3.2% RT-rGO4.8% RT-rGO6.2% และ RT-rGO7.7% นั้นมีความสามารถในการกำจัดสียอมเมทิลีนบลูในที่มีได้มากขึ้นมีค่าเป็นร้อยละ 27.96 33.73 35.92 37.48 และ 40.85 ตามลำดับ โดยที่แผ่นของผสมที่เติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีความสามารถในการกำจัดสียอมเมทิลีนบลูในที่มีหรือมีความสามารถในการดูดซับมากยิ่งขึ้น นั้นมาจากคุณสมบัติเฉพาะของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่นอกจากจะเป็นวัสดุที่มีรูพรุนหรือพื้นที่ผิวสูง ยังมีลักษณะโครงสร้างที่เป็นวงอะโรมาติกเหมือนกับเมทิลีนบลูทำให้สามารถเกิดแรงดึงดูดระหว่างโครงสร้าง ($\pi - \pi$ stacking) ได้ อีกทั้งรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีประจุเป็นลบตรงกันข้ามกับสียอมเมทิลีนบลูที่มีประจุบวก จึงทำให้สามารถดูดซับสียอมเมทิลีนบลูได้มากขึ้นตามปริมาณรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เพิ่มมากขึ้น [49]

4.4.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสียอมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต

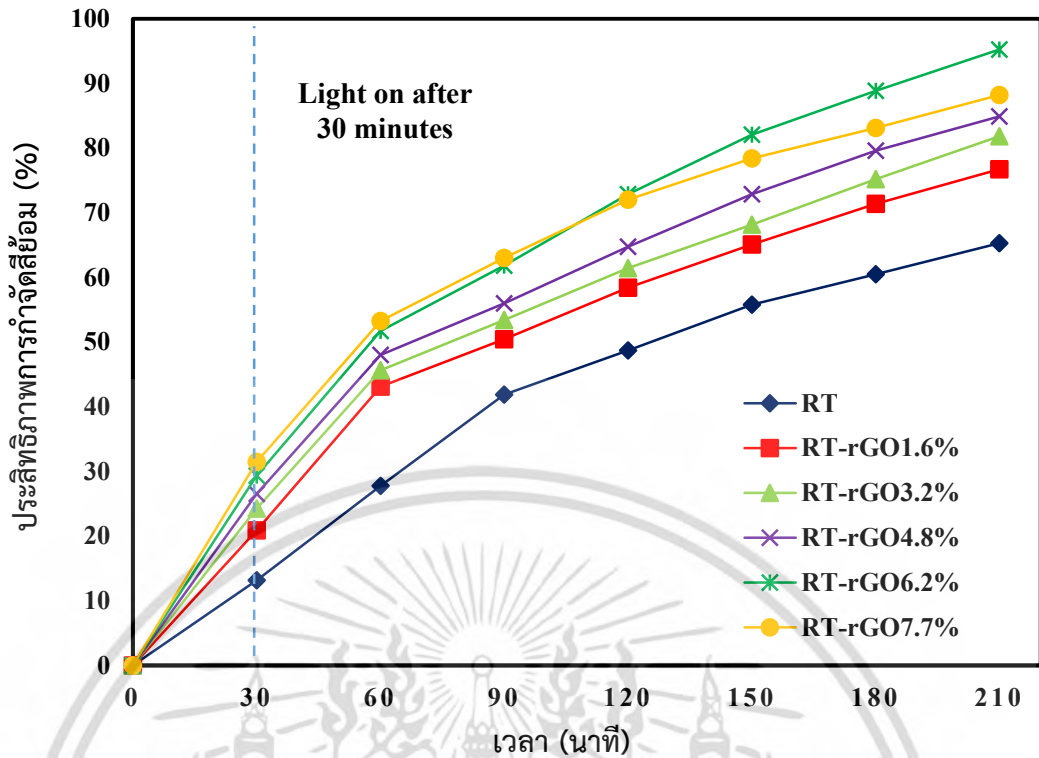
การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสียอมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 2.5×10^{-5} โมลาร์ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต จะทดสอบผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติกเป็นเวลา 210 นาที โดย 30 นาทีแรกจะทำการดูดซับในที่มีเพื่อให้เข้าสู่สมดุลการดูดซับของสียอม หลังจากนั้นจึงเปิดหลอดไฟเพื่อฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตต่ออีก 180 นาที ครบเวลาแล้วจึงนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นด้วยเครื่องวัดค่าดูดกลืนแสง (UV-Vis) โดยประสิทธิภาพในการกำจัดสียอมจะแสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ประสิทธิภาพในการกำจัดสียอมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต ผ่านการใช้แผ่นของผสมยางธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณต่าง ๆ

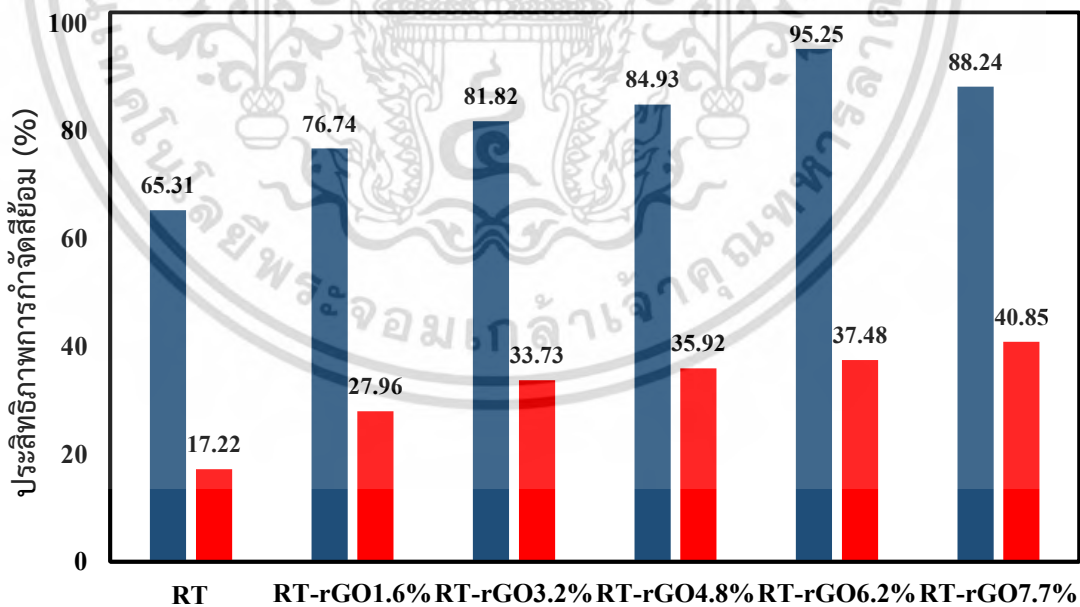
ตัวอย่าง	การกำจัดสียอมเมทิลีนบลูภายใต้แสงยูวีที่เวลาต่าง ๆ (%)						
	30 นาที (ดูดซับ)	60 นาที	90 นาที	120 นาที	150 นาที	180 นาที	210 นาที
RT	13.16	27.76	41.89	48.70	55.81	65.50	65.31
RT-rGO1.6%	20.88	43.12	50.45	58.41	65.08	71.41	76.74
RT-rGO3.2%	24.27	45.63	53.43	61.42	68.16	75.21	81.82
RT-rGO4.8%	26.52	48.01	55.98	64.75	72.86	79.63	83.93
RT-rGO6.2%	29.20	51.72	61.83	72.88	82.09	88.87	95.25
RT-rGO7.7%	31.48	53.26	63.02	72.05	48.43	83.12	86.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูอาจารย์ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.37 กราฟแสดงประสิทธิภาพการกำจัดสีของเมทิลีนบลูภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ตที่เวลาใด ๆ ด้วยแผ่นของผสมชนิดต่าง ๆ



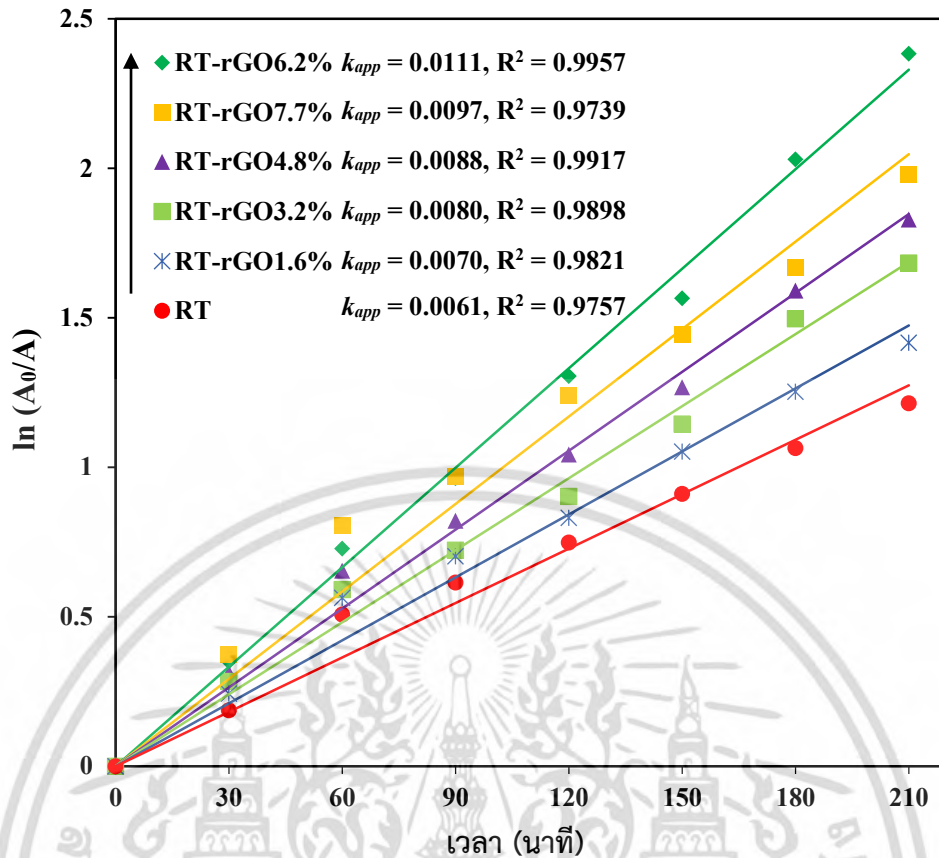
รูปที่ 4.38 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับในที่มีเป็นเวลา 210 นาที และการกำจัดสีของเมทิลีนบลูภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ตที่เวลา 210 นาที (รวมดูดซับ 30 นาที) ด้วยแผ่นของผสมชนิดต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.6 สามารถพลอตเป็นกราฟเส้นตรงแสดงการเปรียบเทียบความสามารถของการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตที่เวลาใด ๆ ได้ดังรูปที่ 4.37 แล้วจึงสรุปประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมด้วยแผ่นของผสมที่เวลา 210 นาที เปรียบเทียบกับการดูดซับ ดังรูปที่ 4.38 พบว่า แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ RT สามารถกำจัดสีย้อมไปได้ร้อยละ 65.31 เมื่อเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ใน RT-rGO1.6% RT-rGO3.2% RT-rGO4.8% RT-rGO6.2% และ RT-rGO7.7% พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมนั้นสูงมากขึ้น อยู่ที่ร้อยละ 76.74 81.82 83.93 95.25 และ 86.24 ซึ่งมาจากความสามารถในการดูดซับของแผ่นของผสมนั้นสูงมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ [48] นอกจากนี้ยังเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทอิเล็กตรอนในช่วงกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ทำให้อิเล็กตรอนรวมตัวกับโฮลได้ช้า (e^-h^+ recombination) ในระบบทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลได้มากยิ่งขึ้น ประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะไลติกในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูจึงสูงขึ้นตามลำดับ โดย RT-rGO6.2% นั้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 95.25 และลดลงเหลือร้อยละ 86.24 ใน RT-rGO7.7% เนื่องมาจากปริมาณรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่มากเกินไปจะทำให้เกิดการบดบังไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก สอดคล้องกับผลของ EDX ที่แสดงให้เห็นว่า ในตัวอย่างที่มีปริมาณรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มากขึ้น จะพบปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่พื้นผิวของแผ่นของผสมลดลง ดังนั้นเมื่อมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกที่พื้นผิวลดลง ก็จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมลดลงด้วย

ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต สามารถนำมาพลอตแสดงค่าคงที่อัตรา (Rate constant, k_{app}) ในการกำจัดสีย้อมได้ดังรูปที่ 4.39 จะพบว่า ค่าคงที่อัตราในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูจะสูงมากขึ้นตามปริมาณของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ที่เป็นตัวช่วยในการดูดซับและการถ่ายเทอิเล็กตรอนในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก โดย RT-rGO6.2% มีความชันของกราฟ หรือค่าคงที่อัตราในการกำจัดสีย้อมสูงสุด เนื่องจากมีปริมาณของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เหมาะสม ไม่มากเกินไปจนกระจายตัวทั่วทั้งแผ่นของผสมแล้วบดบังไทเทเนียมไดออกไซด์เหมือนดัง RT-rGO7.7% ที่มีประสิทธิภาพและค่าคงที่อัตราในการกำจัดสีย้อมลดลง

นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะไลติกในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต ด้วยแผ่นของผสมยางธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณร้อยละ 6.2 โดยน้ำหนักเมื่อเทียบกับปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ (RT-GO6.2%) ได้ผลดังตารางที่ 4.7

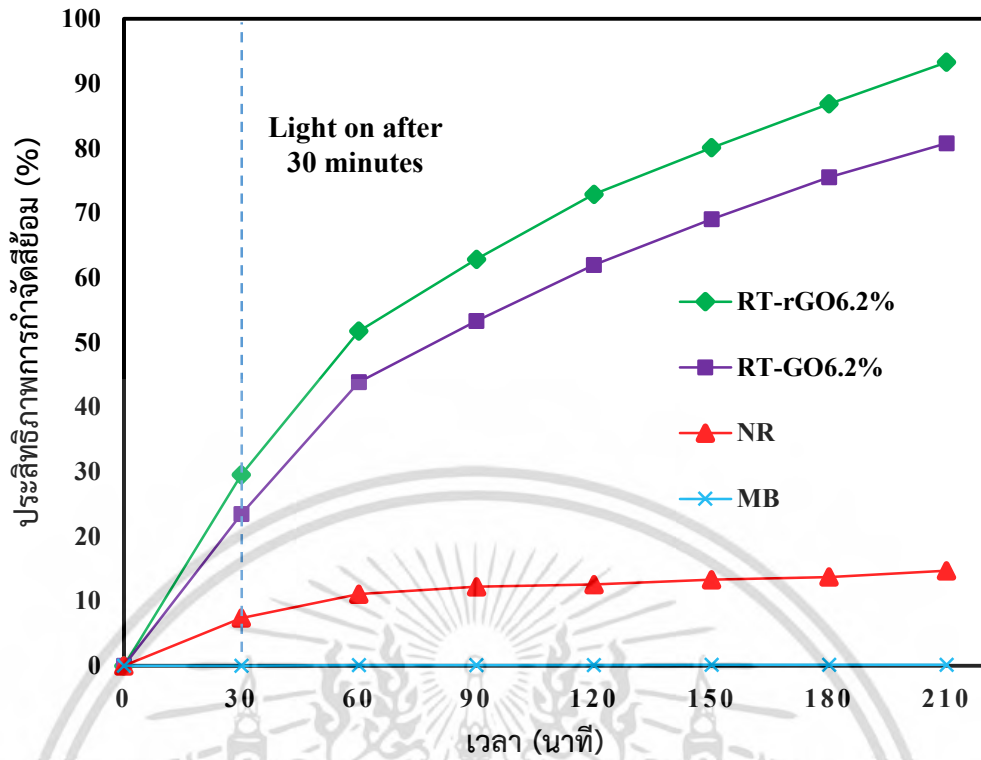


รูปที่ 4.39 ค่าคงที่อัตราในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตด้วยแผ่นของ ผสมแต่ละชนิด (รวมดูดซับ 30 นาที)

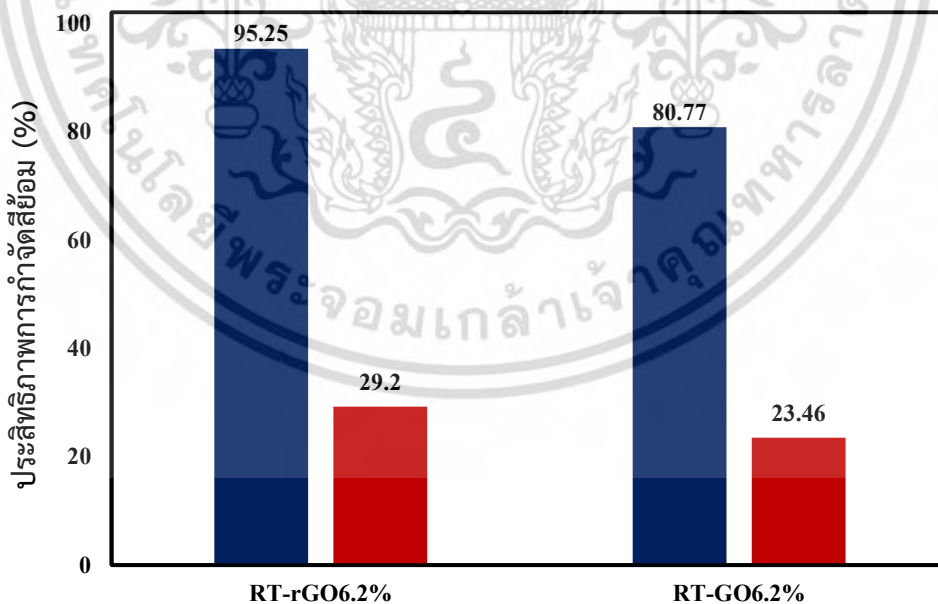
ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต ผ่านการใช้แผ่นของผสม RT-GO6.2% RT-rGO6.2% และ NR

ตัวอย่าง	การกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงยูวีที่เวลาต่าง ๆ (%)						
	30 นาที (ดูดซับ)	60 นาที	90 นาที	120 นาที	150 นาที	180 นาที	210 นาที
RT-GO6.2%	23.46	43.83	53.31	61.94	69.04	75.53	80.77
RT-rGO6.2%	29.20	51.72	61.83	72.88	80.09	86.87	95.25
NR	7.39	11.08	12.22	12.56	13.31	13.72	14.68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



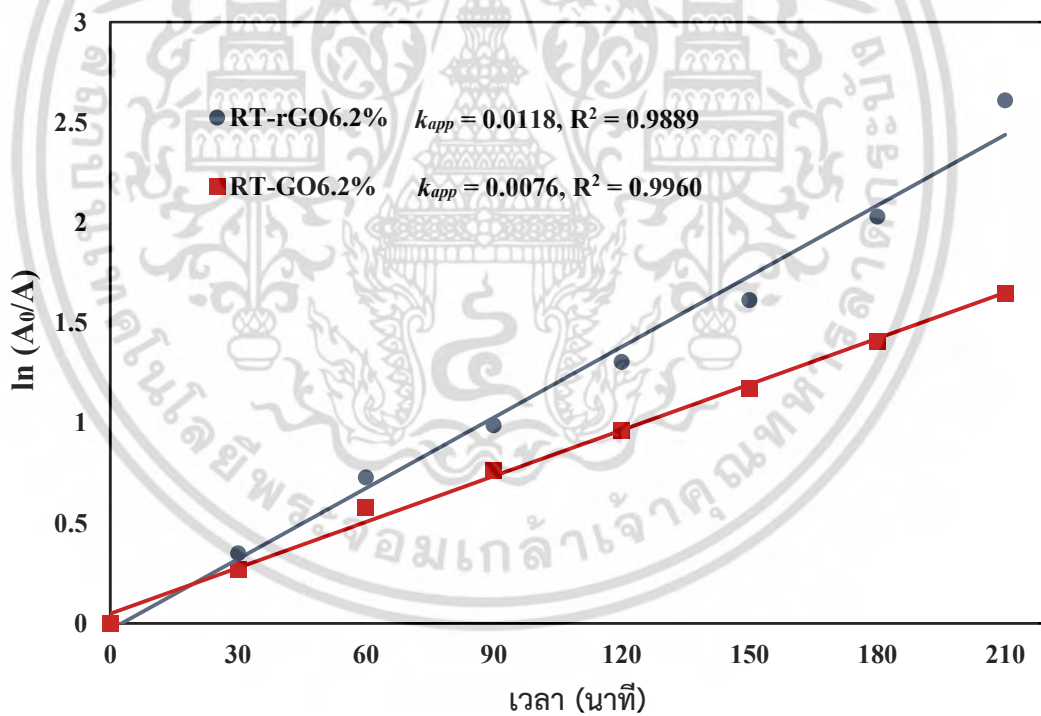
รูปที่ 4.40 กราฟแสดงประสิทธิภาพการกำจัดสีของเมทิลีนบลูภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ตที่เวลาใด ๆ ด้วยแผ่นของผสม RT-GO6.2% RT-rGO6.2% และ NR



รูปที่ 4.41 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับที่เวลา 30 นาที และการกำจัดสีของเมทิลีนบลู ภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ตที่เวลา 210 นาที (รวมดูดซับ 30 นาที) ด้วยแผ่นของผสม RT-rGO6.2% และ RT-GO6.2%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.7 สามารถพลอตเป็นกราฟเส้นตรงแสดงการเปรียบเทียบความสามารถของการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตที่เวลาใด ๆ ได้ดังรูปที่ 4.40 แล้วจึงสรุปประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมด้วยแผ่นของผสมที่เวลา 210 นาที เปรียบเทียบกับการดูดซับ ดังรูปที่ 4.41 พบว่า แผ่นของผสมกราฟีนออกไซด์ (RT-GO6.2%) สามารถกำจัดสีย้อมไปได้ร้อยละ 80.77 ในขณะที่แผ่นของผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (RT-rGO6.2%) นั้นมีประสิทธิภาพสูงกว่าสามารถกำจัดไปได้ร้อยละ 95.25 แสดงให้เห็นถึงความสามารถที่น้อยกว่าในการถ่ายเทอิเล็กตรอนของกราฟีนออกไซด์ อีกทั้งยังมีความสามารถในการดูดซับที่ต่ำกว่ารีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ จึงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมของ RT-GO6.2% นั้นต่ำกว่า RT-rGO6.2% นอกจากนี้ยังได้ทดสอบความสามารถในการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกของแผ่นยางธรรมชาติ (NR) รวมไปถึงการฉายแสงยังสีย้อมเมทิลีนบลูโดยไม่ใช้สารตัวเร่ง พบว่า ความเข้มข้นของสีย้อมแทบไม่แตกต่างจากเริ่มต้น เช่นเดียวกับ NR ที่ไม่สามารถเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกได้จึงให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมใกล้เคียงกับการทดสอบการดูดซับในที่มีด ในส่วนของค่าคงที่อัตราเปรียบเทียบระหว่าง RT-rGO6.2% และ RT-GO6.2% สามารถพลอตได้ดังแสดงในรูปที่ 4.42



รูปที่ 4.42 ค่าคงที่อัตราในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตด้วยแผ่นของผสม RT-rGO6.2% และ RT-GO6.2% (รวมดูดซับ 30 นาที)

4.4.3 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงวีซีบี

การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 1.5×10^{-5} โมลาร์ ภายใต้การฉายแสงวีซีบี จะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ การทดสอบการดูดซับในที่มืด เป็นเวลา 210 นาที และการทดสอบผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติกเป็นเวลา 210 นาที โดย 30 นาทีแรก จะทำในที่มืดเพื่อให้เข้าสู่สมดุลการดูดซับของสีย้อม หลังจากนั้นจึงเปิดหลอดไฟเพื่อฉายแสง วีซีบีต่ออีก 180 นาที จะทดสอบกับแผ่นของผสม 4 ตัวอย่าง ได้แก่ RT RT-rGO3.2% RT-rGO6.2% RT-rGO7.7% ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมจะแสดงดังตารางที่ 4.8 และ ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมภายใต้แสงวีซีบีจะแสดงดังตารางที่ 4.9

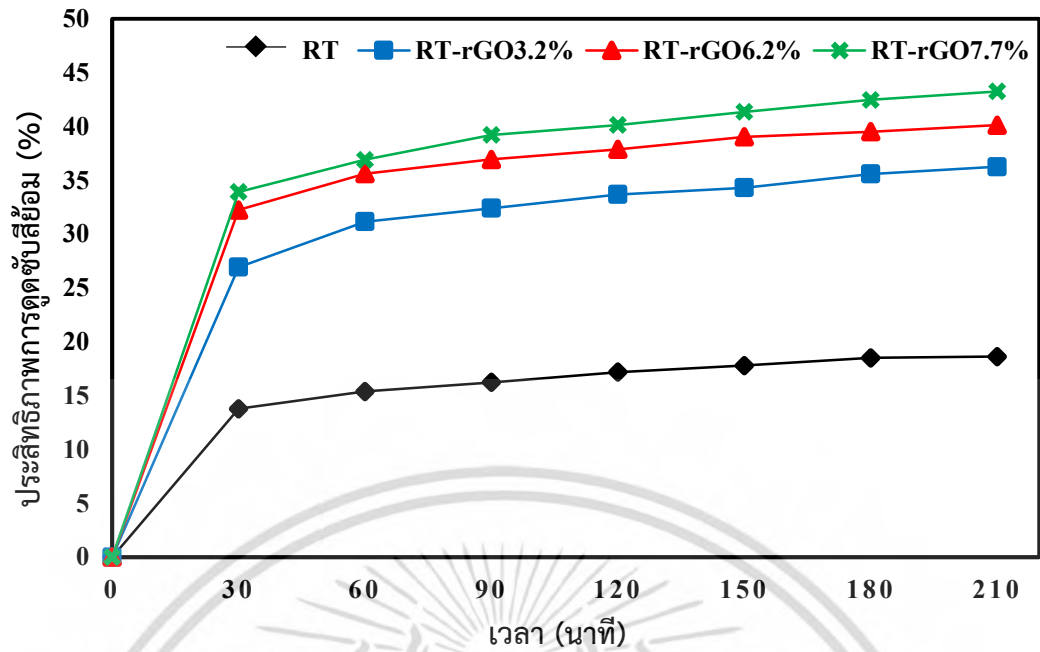
ตารางที่ 4.8 ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มืดด้วยความเข้มข้น 1.5×10^{-5} โมลาร์ ผ่านการใช้แผ่นของผสมทั้ง 4 ชนิด

ตัวอย่าง	การกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มืดที่เวลาต่าง ๆ (%)						
	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที	150 นาที	180 นาที	210 นาที
RT	13.78	15.39	16.23	17.18	17.79	18.5	18.62
RT-rGO3.2%	26.93	31.16	32.41	33.69	34.31	35.59	36.26
RT-rGO6.2%	32.24	35.62	36.95	37.88	39.04	39.51	40.13
RT-rGO7.7%	33.92	36.91	39.22	40.14	41.36	42.48	43.26

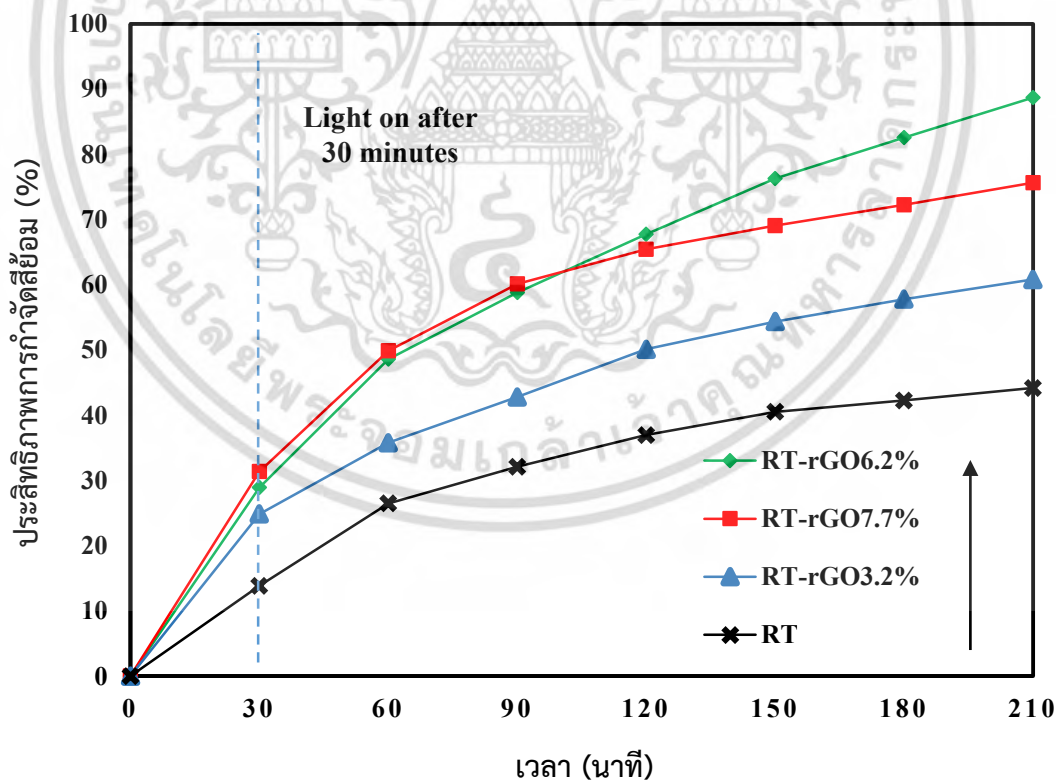
ตารางที่ 4.9 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงวีซีบี ผ่านการใช้แผ่นของผสมทั้ง 4 ชนิด

ตัวอย่าง	การกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงวีซีบีที่เวลาต่าง ๆ (%)						
	30 นาที (ดูดซับ)	60 นาที	90 นาที	120 นาที	150 นาที	180 นาที	210 นาที
RT	13.82	26.47	32.08	36.96	40.52	42.25	44.16
RT-rGO3.2%	24.85	35.76	42.80	50.11	54.34	57.79	60.81
RT-rGO6.2%	28.91	48.60	58.80	67.73	76.29	82.58	88.71
RT-rGO7.7%	31.35	49.89	60.15	65.42	69.04	72.37	75.63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



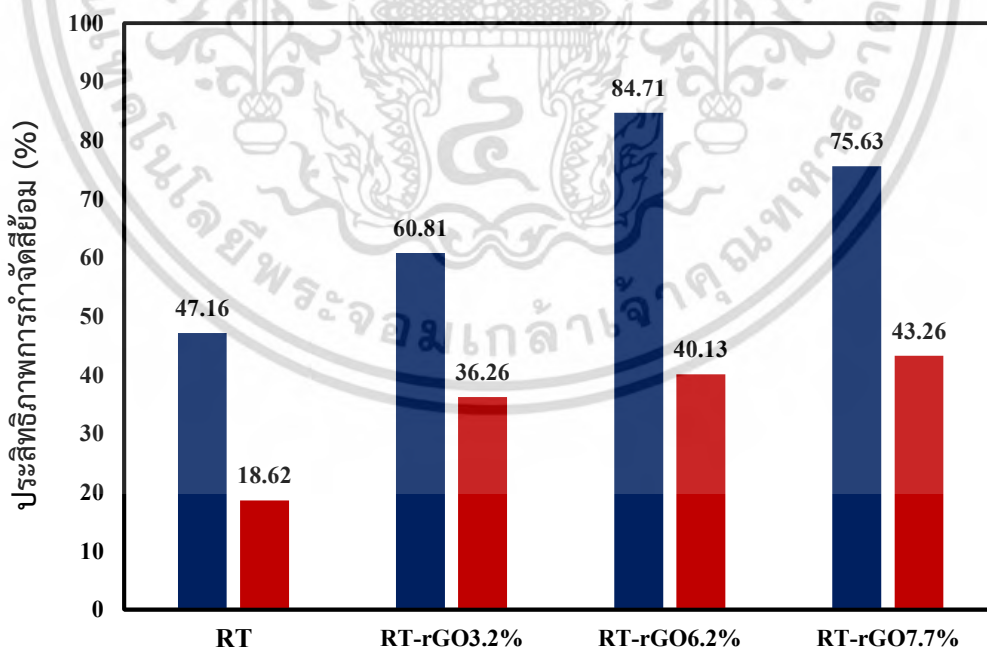
รูปที่ 4.43 กราฟแสดงประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มีดด้วยความเข้มข้น 1.5×10^{-5} โมลาร์ ที่เวลาใด ๆ ด้วยแผ่นของผสมทั้ง 4 ชนิด



รูปที่ 4.44 กราฟแสดงประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ตที่เวลาใด ๆ ด้วยแผ่นของผสมทั้ง 4 ชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

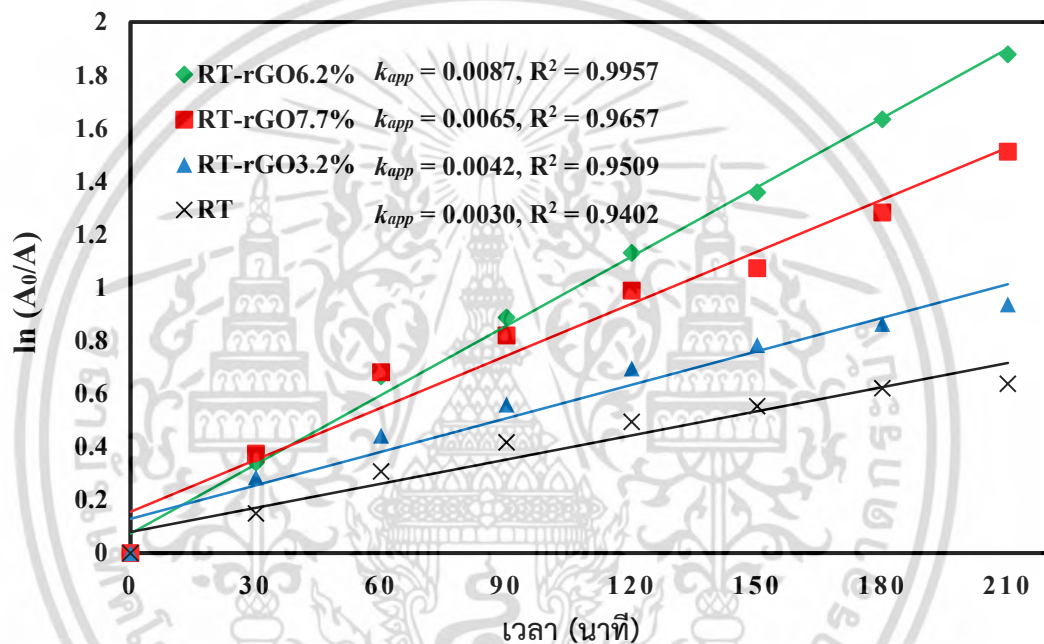
จากตารางที่ 4.9 สามารถพลอตเป็นกราฟเส้นตรงแสดงการเปรียบเทียบความสามารถของการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงวิซิเบิลที่เวลาใด ๆ ได้ดังรูปที่ 4.44 แล้วจึงสรุปประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมด้วยแผ่นของผสมที่เวลา 210 นาที เปรียบเทียบกับการดูดซับ ดังรูปที่ 4.45 พบว่า แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ RT สามารถกำจัดสีย้อมภายใต้แสงวิซิเบิลไปได้เพียงร้อยละ 44.16 เมื่อเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ใน RT-rGO3.2% RT-rGO6.2% และ RT-rGO7.7% พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมนั้นสูงมากขึ้นอยู่ที่ร้อยละ 60.81 88.71 และ 75.63 ตามลำดับ โดยมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกันกับการทดสอบภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต นั่นคือหากมีปริมาณของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มากเกินไปจะส่งผลในการบดบังแสงให้สัมพันธ์กับไทเทเนียมไดออกไซด์ได้น้อยลง ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมจึงลดลง อีกทั้งพลังงานจากแสงวิซิเบิลนั้นมีพลังงานต่ำกว่าพลังงานจากแสงอัลตราไวโอเล็ต การกระตุ้นให้เกิดอิเล็กตรอนกับโฮลบนสารตัวเร่งไทเทเนียม-ไดออกไซด์จึงเกิดได้ยากขึ้น ในระบบจึงมีไอออนในการผลิตไฮดรอกซิลเรดิคัลหรือซูเปอร์ออกไซด์-เรดิคัลได้น้อยลง อย่างไรก็ตามพบว่าในแผ่นของผสมที่มีรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์สามารถเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกได้ เป็นผลมาจากรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ช่วยในการถ่ายเทอิเล็กตรอนจึงทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถเกิดการกระตุ้นได้ง่ายขึ้น หรืออาจมาจากการซ้อนเหลื่อมกันระหว่างแถบช่องว่างพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ทำให้มีช่องว่างพลังงานที่แคบลง ส่งผลให้ใช้พลังงานในการกระตุ้นที่น้อยลงจึงใช้แสงในช่วงวิซิเบิลได้ [57] โดยยืนยันได้จากผลของ DRS ที่แสดงให้เห็นถึงช่วงการดูดกลืนแสงที่มากขึ้นของไทเทเนียมไดออกไซด์



รูปที่ 4.45 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับเป็นเวลา 210 นาที และการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงวิซิเบิลที่เวลา 210 นาที (รวมดูดซับ 30 นาที) ด้วยแผ่นของผสม

ทั้ง 4 ชนิด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงวิซิเบิล สามารถนำมาพลอตแสดงค่าคงที่อัตราในการกำจัดสีย้อมได้ดังรูปที่ 4.46 พบว่า มีแนวโน้มของค่าคงที่อัตราที่ได้ใกล้เคียงกับค่าคงที่อัตราในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต และมีความชันที่ลดลงสอดคล้องกับประสิทธิภาพในการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่ลดลง โดยค่าคงที่อัตราในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูจะสูงมากขึ้นตามปริมาณของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เพิ่มมากขึ้น โดย RT-rGO6.2% มีความชันของกราฟ หรือค่าคงที่อัตราในการกำจัดสีย้อมสูงที่สุด เนื่องจากมีปริมาณของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เหมาะสม ไม่มากเกินไปจนกระจายตัวแล้วดับแสงไม่ให้เกิดกับไทเทเนียมไดออกไซด์เหมือนดัง RT-rGO7.7% ที่มีประสิทธิภาพและค่าคงที่อัตราในการกำจัดสีย้อมลดลง



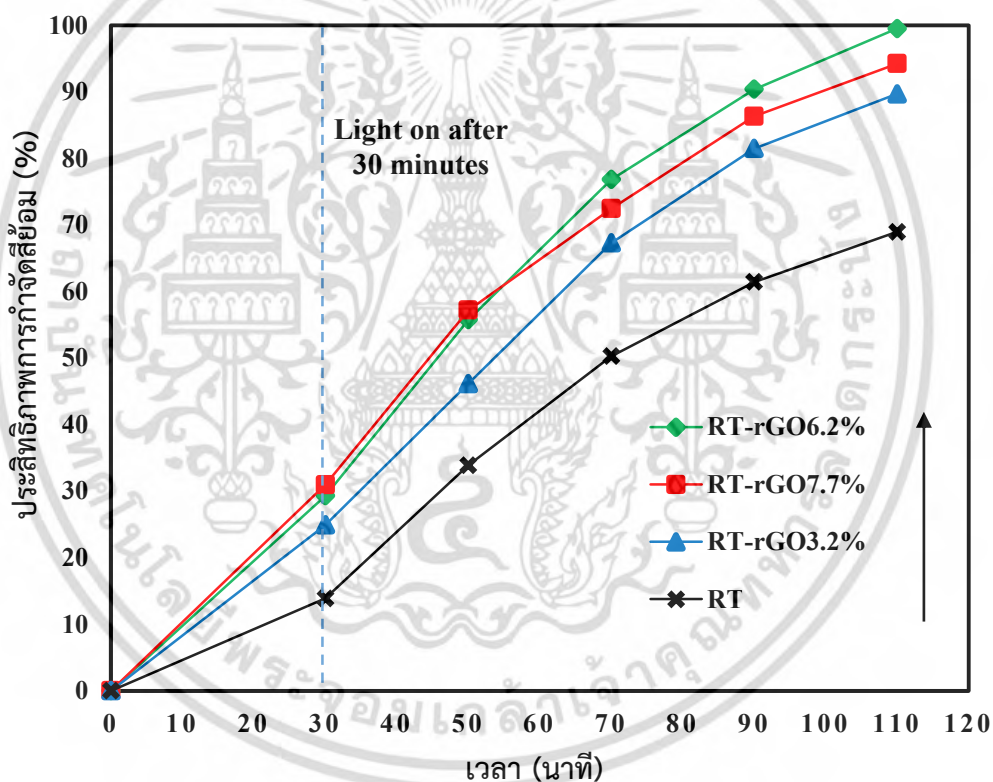
รูปที่ 4.46 ค่าคงที่อัตราในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงวิซิเบิลด้วยแผ่นของผสมทั้ง 4 ชนิด (รวมดูดซับ 30 นาที)

4.4.4 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอาทิตย์

การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 2.5×10^{-5} โมลาร์ ภายใต้การแสงอาทิตย์ จะทดสอบผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติกเป็นเวลา 110 นาที โดย 30 นาทีแรก จะทำในที่มืดเพื่อให้เข้าสู่สมดุลการดูดซับของสีย้อม หลังจากนั้นจะนำไปทดสอบในบริเวณที่สามารถรับแสงอาทิตย์ได้โดยตรงต่ออีก 80 นาที ครบเวลาแล้วจึงนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นด้วยเครื่องวัดค่าดูดกลืนแสง โดยจะทดสอบกับแผ่นของผสม 4 ตัวอย่าง ได้แก่ RT RT-rGO3.2% RT-rGO6.2% และ RT-rGO7.7% ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมจะแสดงดังตารางที่ 4.10

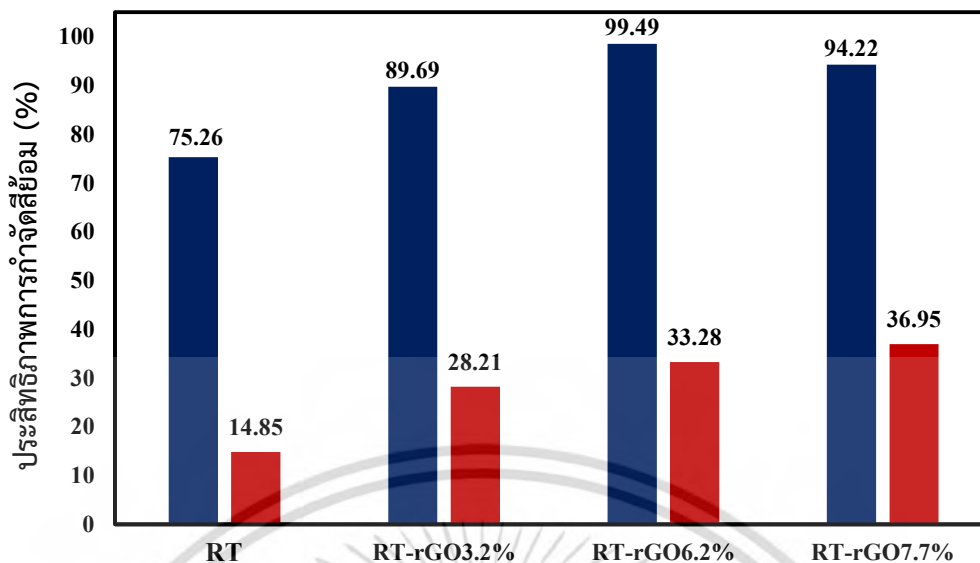
ตารางที่ 4.10 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอาทิตย์ ผ่านการใช้แผ่นของผสมทั้ง 4 ชนิด

ตัวอย่าง	การกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอาทิตย์ที่เวลาต่าง ๆ (%)				
	30 นาที (ดูดซับ)	50 นาที	70 นาที	90 นาที	110 นาที
RT	13.87	33.88	50.25	61.42	68.95
RT-rGO3.2%	24.92	46.14	67.28	81.47	89.69
RT-rGO6.2%	29.28	55.74	76.82	88.67	99.49
RT-rGO7.7%	30.95	57.19	72.44	86.31	94.22



รูปที่ 4.47 กราฟแสดงประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอาทิตย์ที่เวลาใด ๆ ด้วยแผ่นของผสมทั้ง 4 ชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

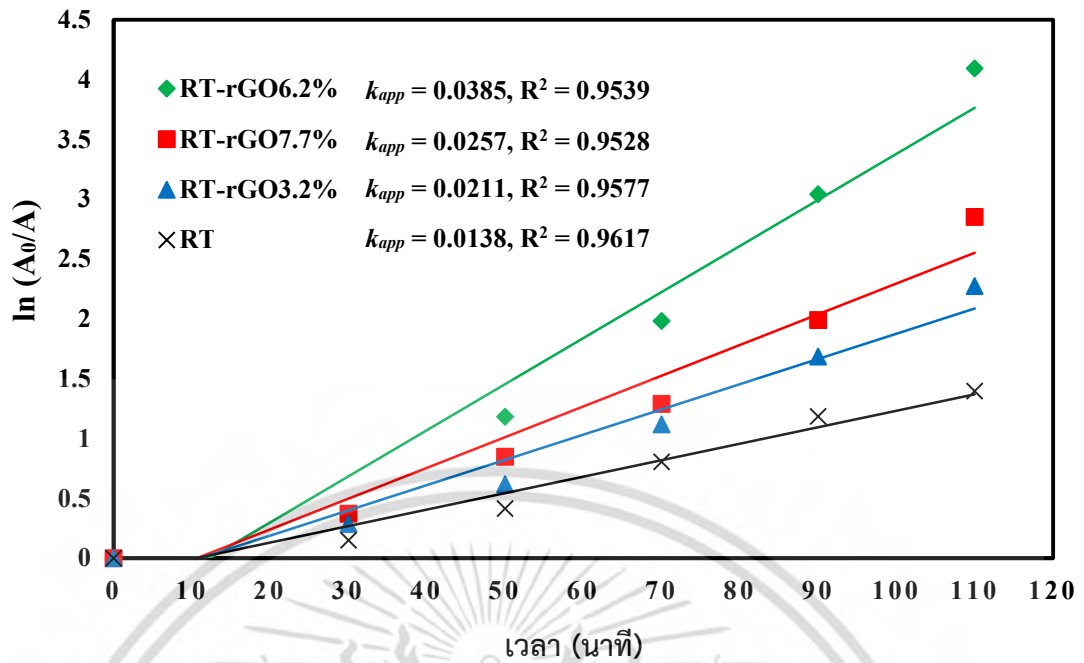


รูปที่ 4.48 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับเป็นเวลา 90 นาที และการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอาทิตย์เป็นเวลา 110 นาที (รวมดูดซับ 30 นาที) ด้วยแผ่นของผสมทั้ง 4 ชนิด

จากตารางที่ 4.10 สามารถพลอตเป็นกราฟเส้นตรงแสดงการเปรียบเทียบความสามารถของการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงอาทิตย์ในเวลาใด ๆ ได้ดังรูปที่ 4.47 แล้วจึงสรุปประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมด้วยแผ่นของผสมที่เวลา 110 นาที เปรียบเทียบกับการดูดซับ ดังรูปที่ 4.48 พบว่า แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (RT) สามารถกำจัดสีย้อมไปได้ร้อยละ 75.26 ในส่วนของแผ่นของผสมที่เติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ RT-rGO3.2% RT-rGO6.2% และ RT-rGO7.7% นั้นสามารถกำจัดสีย้อมได้มากขึ้นอยู่ที่ร้อยละ 89.69 98.49 และ 94.22 ตามลำดับ จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ารีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ยังสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมภายใต้การฉายแสงอาทิตย์ให้แก่แผ่นของผสม ทั้งในด้านการดูดซับและความสามารถในการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติก โดยประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมภายใต้แสงอาทิตย์เกิดได้ดีและใช้เวลาเพียง (80 นาที) เนื่องจากในแสงอาทิตย์มีทั้งแสงอัลตราไวโอเล็ตและแสงวิซิเบิล ซึ่งสามารถกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาได้ทั้ง 2 ชนิด อีกทั้งยังมีปัจจัยในด้านความร้อนที่ส่งผ่านมากับแสงอาทิตย์ เพราะความร้อนนั้นสามารถส่งผลให้อิเล็กตรอนมีพลังงานจลน์ที่สูงขึ้น จึงสามารถเคลื่อนที่ไปมาในโครงสร้างมากยิ่งขึ้น การเกิดรวมตัวกันระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลจึงเกิดได้มากขึ้น

ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอาทิตย์ สามารถนำมาพลอตแสดงค่าคงที่อัตราในการกำจัดสีย้อมได้ดังรูปที่ 4.49 พบว่า มีความชันของกราฟที่สูงมากเมื่อเทียบกับแหล่งกำเนิดแสงอื่น ๆ ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะไลติกในการกำจัดสีย้อมที่เกิดได้ดีเยี่ยมและใช้เวลาเพียงไม่นาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.49 ค่าคงที่อัตราในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงอาทิตย์ด้วยแผ่นของผสมทั้ง 4 ชนิด (รวมดูดซับ 30 นาที)

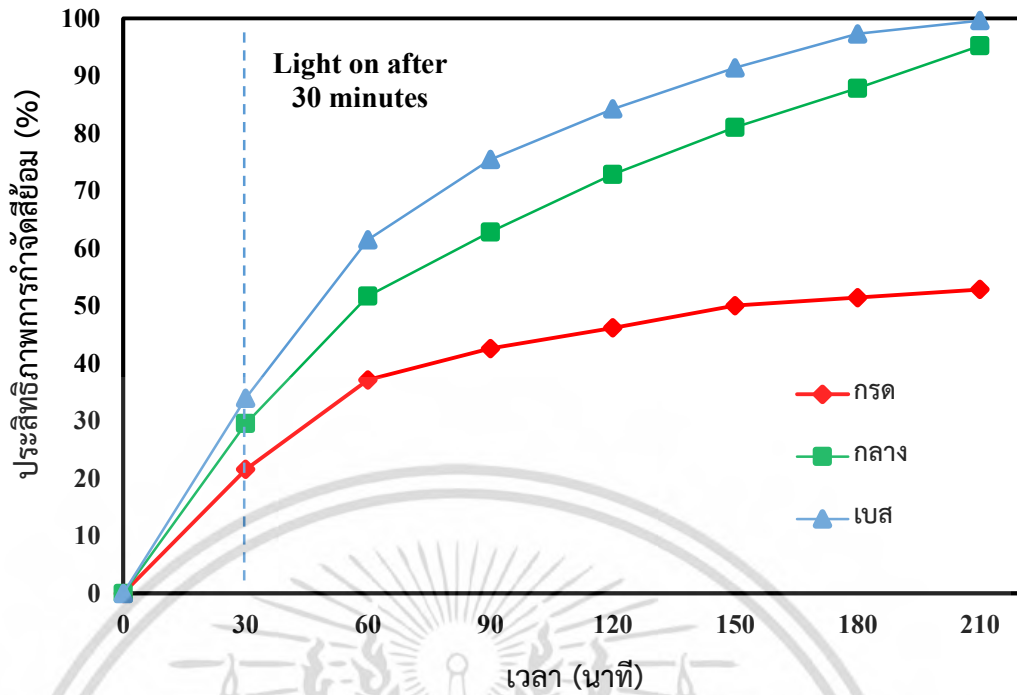
4.4.5 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูที่สภาวะ pH ต่างกัน

การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 2.5×10^{-5} โมลาร์ ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต แต่มีสภาวะของ pH ที่แตกต่างกันทั้งหมด 3 สภาวะ ได้แก่ สภาวะเป็นกลาง (pH = 7) สภาวะเป็นกรด (pH = 3) และสภาวะเป็นเบส (pH = 11) ซึ่งจะทดสอบผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติกเป็นเวลา 210 นาที โดย 30 นาทีแรก จะทำในที่มืดเพื่อให้เข้าสู่สมดุลการดูดซับของสีย้อม หลังจากนั้นจึงเปิดหลอดไฟเพื่อฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตต่ออีก 180 นาที ครบเวลาแล้วจึงนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นด้วยเครื่องวัดค่าดูดกลืนแสง โดยจะทดสอบกับแผ่นของผสม RT-rGO6.2% ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมจะแสดงดังตารางที่ 4.11

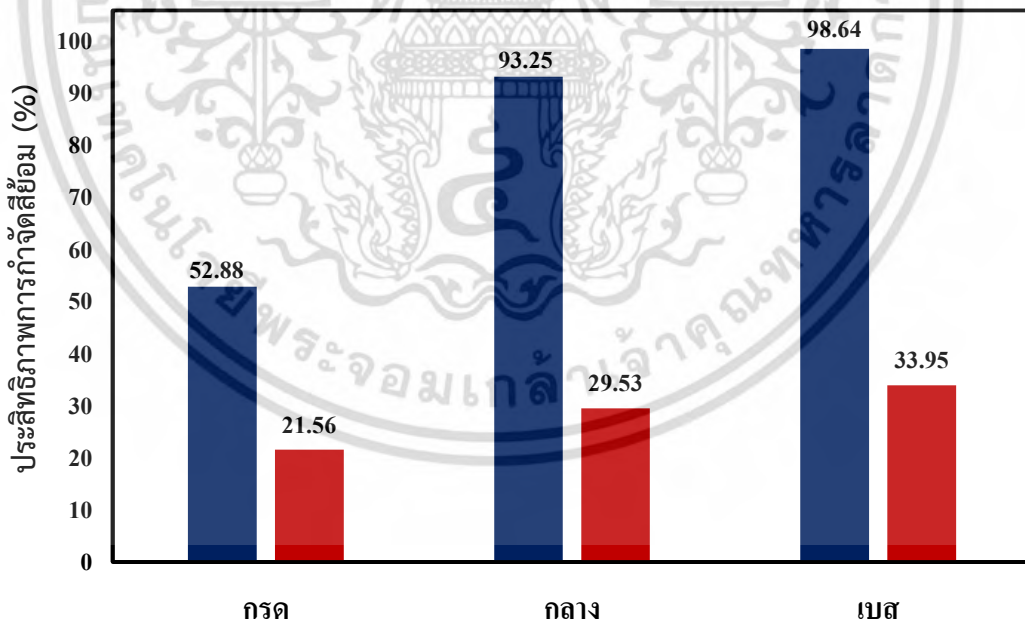
ตารางที่ 4.11 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้สภาวะ pH ที่แตกต่างกัน ผ่านการใช้แผ่นของผสม RT-rGO6.2%

สภาวะ (pH)	การกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงยูวีที่เวลาต่าง ๆ (%)						
	30 นาที (ดูดซับ)	60 นาที	90 นาที	120 นาที	150 นาที	180 นาที	210 นาที
กลาง (7)	29.53	51.72	61.83	72.88	82.09	88.87	95.25
กรด (3)	21.56	37.14	42.58	46.19	50.07	51.46	52.88
เบส (11)	33.95	61.54	75.48	82.77	89.94	95.83	98.64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีสืบค้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.50 กราฟแสดงประสิทธิภาพการกำจัดสีของเมทิลีนบลูที่สภาวะ pH ต่างกัน ที่เวลาใด ๆ ด้วยแผ่นของผสม RT-rGO6.2%



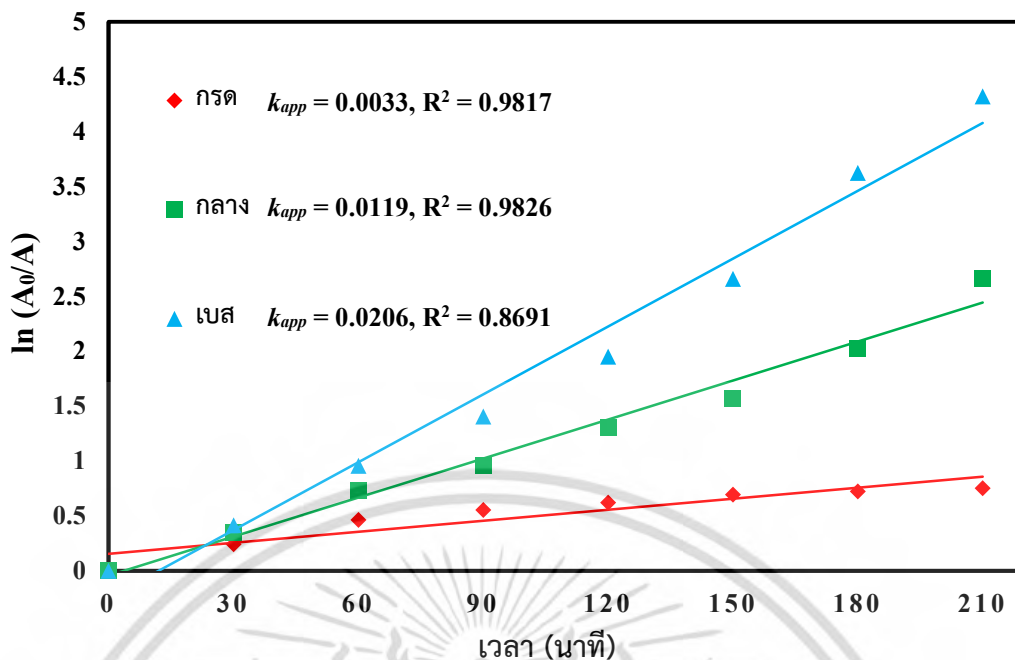
รูปที่ 4.51 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับเป็นเวลา 30 นาที และการกำจัดสีของเมทิลีนบลูภายใต้สภาวะ pH ที่แตกต่างกันที่เวลา 210 นาที (รวมดูดซับ 30 นาที) ด้วยแผ่นของผสม RT-rGO6.2%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.11 สามารถพลอตเป็นกราฟเส้นตรงแสดงการเปรียบเทียบความสามารถของการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้สภาวะ pH ที่แตกต่างกันที่เวลาใด ๆ ได้ดังรูปที่ 4.50 แล้วจึงสรุปประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมด้วยแผ่นของผสมที่เวลา 210 นาที เปรียบเทียบกับการดูดซับ ดังรูปที่ 4.51 พบว่า แผ่นของผสม RT-rGO6.2% สามารถกำจัดสีย้อมภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ตที่สภาวะเบสที่มี pH เท่ากับ 11 ได้ถึงร้อยละ 98.64 มากกว่าสภาวะกรดที่มี pH เท่ากับ 3 ซึ่งสามารถกำจัดสีย้อมไปได้เพียงร้อยละ 52.88 เนื่องมาจากคุณสมบัติในเรื่องประจุของไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่สามารถเปลี่ยนเป็นประจุบวกหรือลบตามสภาวะ pH เรียกค่านี้ว่า จุดไอโซอิเล็กทริก (Isoelectric point) หรือจุดที่มีประจุมรวมเป็นศูนย์ (Point of zero charge; PZC) โดยไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่า pzc อยู่ที่ประมาณ 6.6 [38] หากอยู่ในสภาวะที่มี pH ต่ำกว่า จะทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์มีประจุที่พื้นผิวเป็นบวกดังสมการที่ (19) ในทางตรงกันข้ามหากอยู่ในสภาวะที่มี pH สูงกว่า ก็จะทำให้ประจุที่พื้นผิวเป็นลบดังสมการที่ (20) ดังนั้นการใช้สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูที่มีประจุบวกก็คือสภาวะเบส ที่จะทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์มีประจุเป็นลบแล้วดึงดูดอนุภาคของเมทิลีนบลูเข้ามาเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกได้ดียิ่งขึ้น กลับกันหากอยู่ในสภาวะกรดไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีประจุเป็นบวกซึ่งเป็นประจุเดียวกันกับเมทิลีนบลูทำให้เกิดการผลักกัน การดูดติดเพื่อทำการโฟโตคะตะไลติกที่พื้นผิวจึงเกิดได้ยากขึ้น [47]



ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้สภาวะ pH ที่แตกต่างกัน สามารถนำมาพลอตแสดงค่าคงที่อัตราในการกำจัดสีย้อมได้ดังรูปที่ 4.52 พบว่าความชันของกราฟมีความสอดคล้องกับประสิทธิภาพในการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติก โดยสภาวะเบสที่มีความสามารถในการกำจัดสีย้อมได้ดีที่สุดมีความชันของกราฟสูงสุด ซึ่งตรงกันข้ามอย่างชัดเจนกับในสภาวะกรด



รูปที่ 4.52 ค่าคงที่อัตราในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้สภาวะ pH ที่แตกต่างกัน ผ่านการใช้แผ่นของผสม RT-rGO6.2% (รวมดูดซับ 30 นาที)

4.4.6 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน

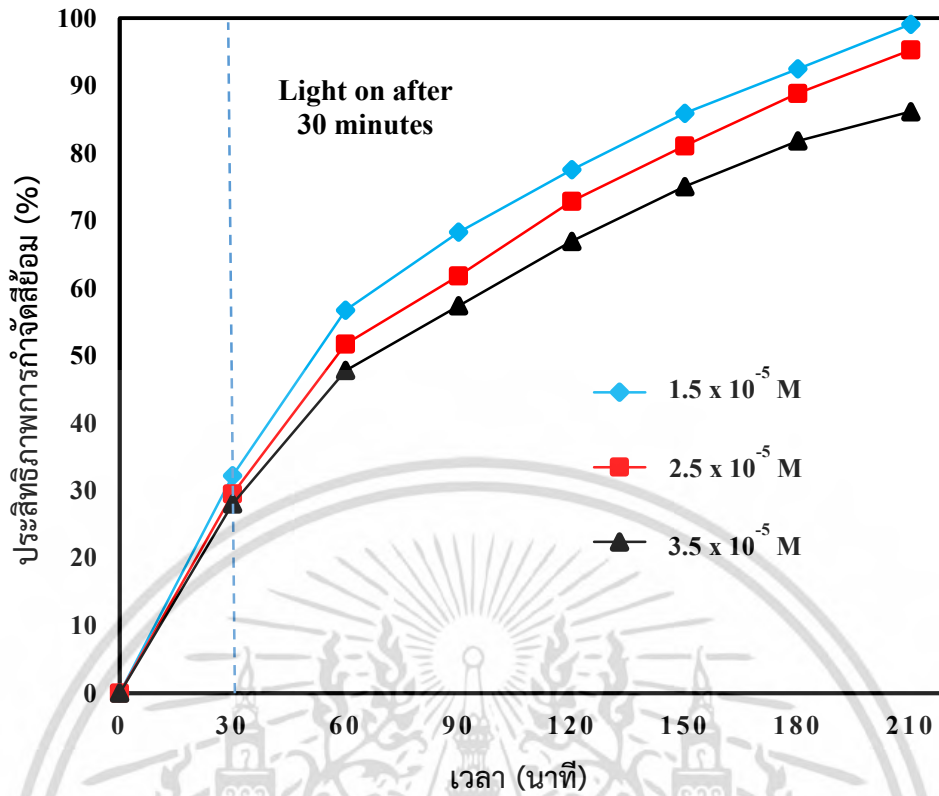
การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต โดยมีความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลูที่ทำการศึกษาทั้งหมด 3 ความเข้มข้น ได้แก่ 1.5×10^{-5} 2.5×10^{-5} และ 3.5×10^{-5} โมลาร์ ซึ่งจะทดสอบผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติกเป็นเวลา 210 นาที โดย 30 นาทีแรก จะทำในที่มืดเพื่อให้เข้าสู่สมดุลการดูดซับของสีย้อม หลังจากนั้นจึงเปิดหลอดไฟเพื่อฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตต่ออีก 180 นาที ครบเวลาแล้วจึงนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นด้วยเครื่องวัดค่าดูดกลืนแสง ซึ่งจะทดสอบกับแผ่นของผสม RT-rGO6.2% ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมจะแสดงดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้ความเข้มข้นเริ่มต้นที่แตกต่างกันของสีย้อมเมทิลีนบลู ผ่านการใช้แผ่นของผสม RT-rGO6.2%

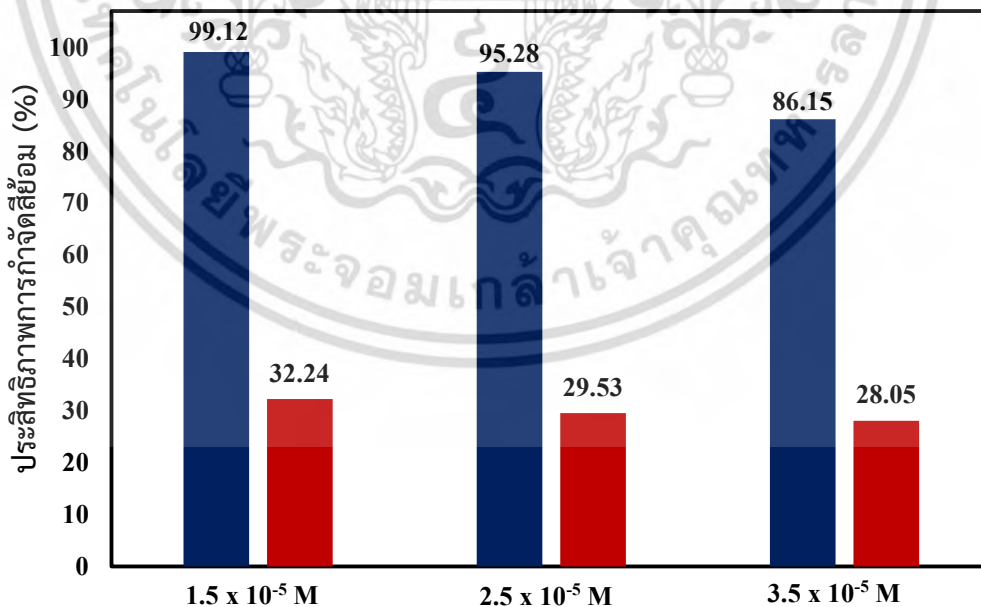
ความเข้มข้นเริ่มต้น MB (โมลาร์)	การกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงยูวีที่เวลาต่าง ๆ (%)						
	30 นาที (ดูดซับ)	60 นาที	90 นาที	120 นาที	150 นาที	180 นาที	210 นาที
1.5×10^{-5}	32.24	56.76	68.30	77.56	85.92	92.25	98.12
2.5×10^{-5}	29.53	51.72	61.83	72.88	82.09	88.87	95.25
3.5×10^{-5}	28.05	50.21	57.39	66.95	75.06	81.83	86.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูอาจารย์ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ไปโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

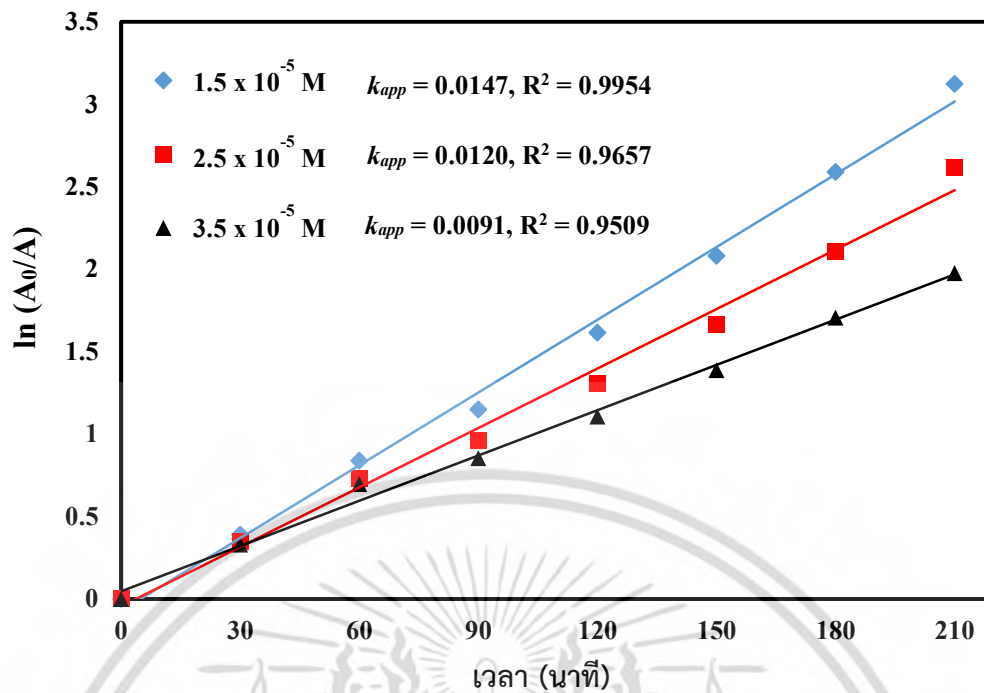


รูปที่ 4.53 กราฟแสดงประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นแตกต่างกันทั้ง 3 ความเข้มข้น ที่เวลาใด ๆ ด้วยแผ่นของผสม RT-rGO6.2%



รูปที่ 4.54 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับเป็นเวลา 30 นาที และการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้สภาวะความเข้มข้นที่แตกต่างกันที่เวลา 210 นาที (รวมดูดซับ 30 นาที) ด้วยแผ่นของผสม RT-rGO6.2%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.55 ค่าคงที่อัตราในการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลูที่ความเข้มข้นที่แตกต่างกันที่เวลา 210 นาที ด้วยแผ่นของผสม RT-rGO6.2% (รวมดูดซับ 30 นาที)

จากตารางที่ 4.12 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลูภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต ด้วยแผ่นของผสม RT-rGO6.2% ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นที่แตกต่างกันให้ผลดังนี้ ความเข้มข้นเท่ากับ 1.5×10^{-5} โมลาร์ สามารถถูกกำจัดไปได้ร้อยละ 98.12 ในขณะที่ความเข้มข้น 2.5×10^{-5} และ 3.5×10^{-5} โมลาร์ แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมที่น้อยกว่าอยู่ที่ร้อยละ 93.25 และ 86.15 ตามลำดับ โดยเป็นการแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลินบลูส่งผลต่อประสิทธิภาพในการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติก เนื่องจากในสีย้อมที่มีความเข้มข้นมากก็จะพบปริมาณอนุภาคของเมทิลินบลูที่มากขึ้น อนุภาคของสีย้อมจึงมีโอกาสนำแสงให้สัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาได้น้อยลง อีกทั้งอนุภาคของสีย้อมเมทิลินบลูก็สามารถเกิดการดูดกลืนแสงไว้ได้บางส่วน [42] ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมลดลงเมื่อมีความเข้มข้นมากขึ้น จากผลการทดสอบดังกล่าวสามารถสรุปประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมด้วยแผ่นของผสมที่เวลา 210 นาที เปรียบเทียบกับการดูดซับ ดังรูปที่ 4.54 นอกจากนี้ยังสามารถนำมาพลอตหาค่าคงที่อัตราในการกำจัดสีย้อมได้ดังรูปที่ 4.55 พบว่า ที่ความเข้มข้น 1.5×10^{-5} โมลาร์ แสดงความชันของกราฟหรือค่าคงที่อัตราในการกำจัดสีย้อมสูงที่สุด ในขณะที่ความเข้มข้น 2.5×10^{-5} และ 3.5×10^{-5} โมลาร์ มีค่าคงที่อัตราในการกำจัดสีย้อมลดลงตามลำดับ

4.4.7 การศึกษาประสิทธิภาพในการใช้งานซ้ำ

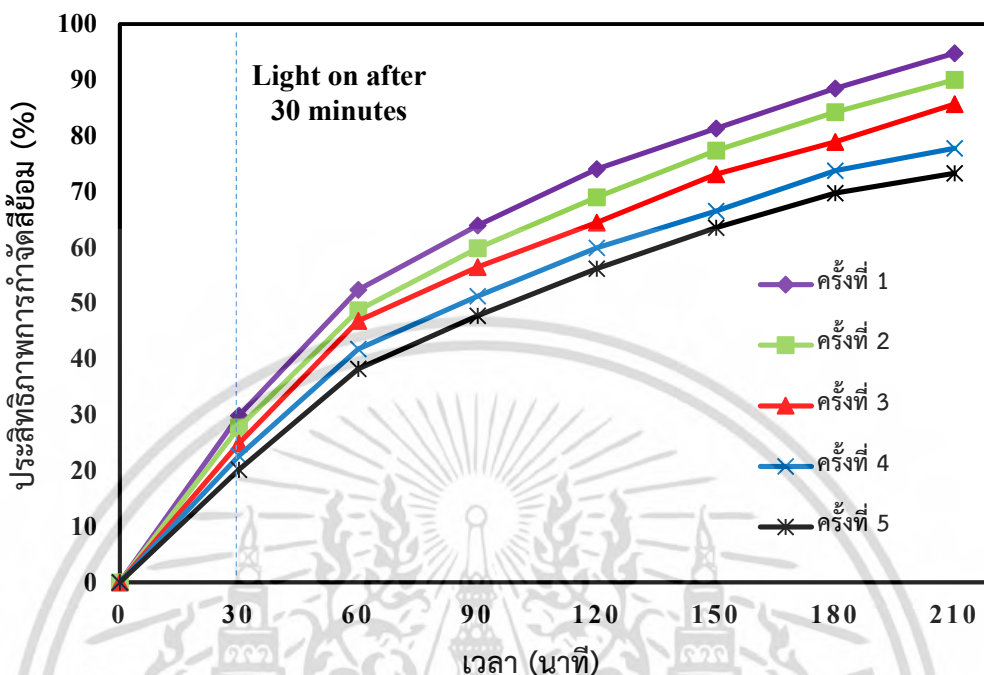
การศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานซ้ำในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 2.5×10^{-5} โมลาร์ ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต จะทดสอบการใช้งานซ้ำทั้งหมด 5 ครั้ง ผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติกเป็นเวลา 210 นาที โดย 30 นาทีแรก จะทำในที่มืดเพื่อให้เข้าสู่สมดุลการดูดซับของสีย้อม หลังจากนั้นจึงเปิดหลอดไฟเพื่อฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตต่ออีก 180 นาที ครบเวลาแล้วจึงนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นด้วยเครื่องวัดค่าดูดกลืนแสง โดยเลือกแผ่นของผสม RT-rGO6.2% มาใช้ในการทดสอบการใช้งานซ้ำ ประสิทธิภาพการใช้งานซ้ำในการกำจัดสีย้อมแต่ละครั้งจะแสดงดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 ประสิทธิภาพการใช้งานซ้ำทั้งหมด 5 ครั้ง ในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต ผ่านการใช้แผ่นของผสม RT-rGO6.2%

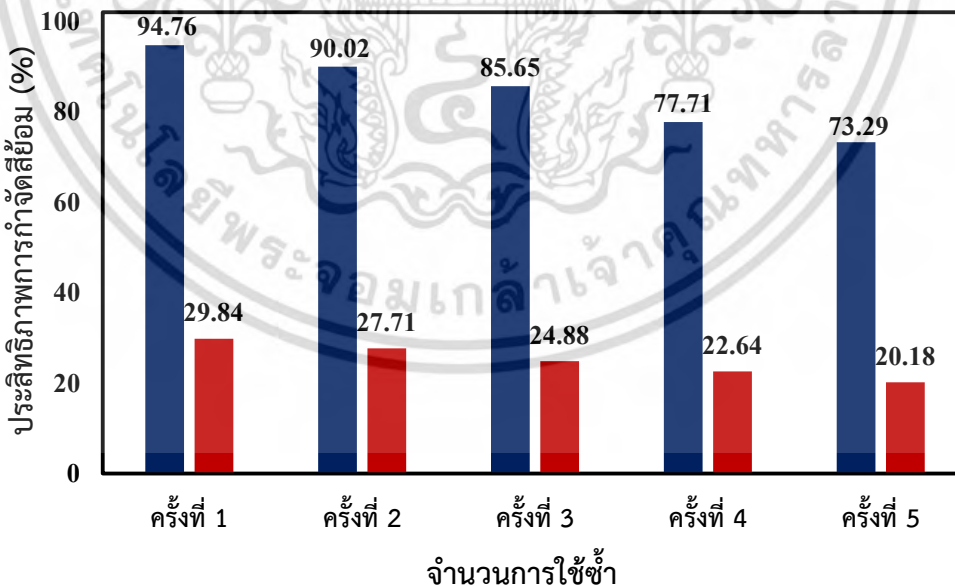
การใช้งานซ้ำ (ครั้งที่)	การกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงยูวีที่เวลาต่าง ๆ (%)						
	30 นาที (ดูดซับ)	60 นาที	90 นาที	120 นาที	150 นาที	180 นาที	210 นาที
1	29.84	52.39	63.92	74.02	81.27	87.84	94.76
2	26.41	48.69	59.83	68.98	77.35	84.21	90.02
3	24.88	46.84	56.45	64.41	73.08	78.89	85.65
4	20.14	41.76	51.25	59.91	66.48	73.25	77.71
5	19.02	38.21	47.73	56.16	63.50	69.68	73.29

จากตารางที่ 4.13 สามารถพลอตเป็นกราฟเส้นตรงแสดงการเปรียบเทียบความสามารถในการใช้งานซ้ำในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูที่เวลาใด ๆ ได้ดังรูปที่ 4.56 แล้วจึงสรุปประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมด้วยแผ่นของผสม RT-rGO6.2% ที่เวลา 210 นาที เปรียบเทียบกับการดูดซับ ดังรูปที่ 4.57 พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูครั้งแรกสามารถกำจัดไปได้ถึงร้อยละ 93.76 ในส่วนของการใช้งานซ้ำครั้งที่ 2 3 4 และ 5 มีประสิทธิภาพในการกำจัดลดลงเหลือร้อยละ 90.02 85.65 77.71 และ 73.29 ตามลำดับ เนื่องจากหลังการใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกในการกำจัดสีย้อมแต่ละครั้งจะทำการล้างแผ่นของผสมด้วยน้ำกลั่นเพียงเล็กน้อย ทำให้ไม่สามารถกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูที่เกาะอยู่ทั่วแผ่นของผสมได้หมด อนุภาคของสีย้อมจึงอาจบดบังไทเทเนียมไดออกไซด์ที่พื้นผิวไม่ให้เห็นสัมผัสกับแหล่งกำเนิดแสง แล้วทำให้ความสามารถในการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกลดลง เมื่อมีจำนวนการใช้งานมากขึ้นก็จะมีปริมาณสีย้อมเคลือบไปทั่วทั้งแผ่นของผสมมากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมลดลงตามลำดับ [53] โดยสามารถพลอตหาค่าคงที่อัตราในการกำจัดสีย้อมหลังจากผ่านการใช้งานในแต่ละครั้งได้ดังรูปที่ 4.58 พบว่า การใช้งานครั้งแรกมีค่าคงที่อัตราในการเกิดปฏิกิริยาสูงสุด แล้วจึงลดลงตามจำนวนการใช้งานซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพของ

กระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่ลดลง จากการใช้ครั้งแรกที่สามารถกำจัดไปได้ร้อยละ 93.76 แล้วลดเหลือร้อยละ 73.29 ในการใช้ซ้ำครั้งที่ 5



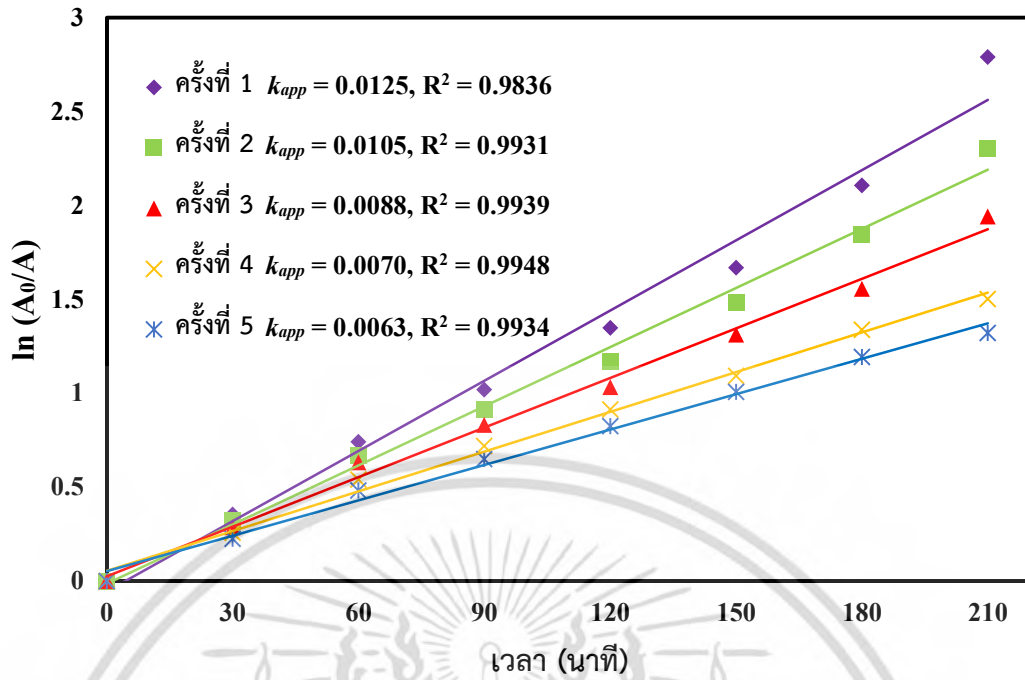
รูปที่ 4.56 กราฟแสดงประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูที่เวลาใด ๆ ด้วยแผ่นของผสม RT-rGO6.2%



รูปที่ 4.57 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับเป็นเวลา 30 นาที และการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูจากการใช้ซ้ำในการกำจัดสีย้อมทั้งหมด 5 รอบ ที่เวลา 210 นาที (รวมดูดซับ

30 นาที) ด้วยแผ่นของผสม RT-rGO6.2%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.58 ค่าคงที่อัตราในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูหลังจากผ่านกระบวนการใช้ซ้ำที่เวลา 210 นาที ด้วยแผ่นของผสม RT-rGO6.2% (รวมดูดซับ 30 นาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ประสบความสำเร็จในการเตรียมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ผ่านกระบวนการรีดักชันทางเคมีด้วยไฮดราซีนควบคู่กับความร้อน โดยใช้สารตั้งต้นเป็นกราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากการนำกราฟีนมาผ่านกระบวนการดัดแปลงกระบวนการของซุมเมอร์และกระบวนการโซนิเคชัน สารแขวนลอยสีดำของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์จะถูกนำมาใช้เป็นสารเติมแต่งแผ่นของผสมยางธรรมชาติและไทเทเนียมไดออกไซด์ ให้มีความสามารถในการกำจัดสี้อมที่ดีขึ้น อีกทั้งยังสามารถเพิ่มความแข็งแรงเชิงกลให้สูงขึ้น โดยผลการพิสูจน์เอกลักษณ์และประสิทธิภาพในการกำจัดสี้อมของแผ่นของผสมสามารถสรุปได้ดังนี้

เทคนิคการวัดค่าดูดกลืนแสงสามารถยืนยันรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เตรียมได้ โดยปรากฏฟิสิกเดียวที่ความยาวคลื่นของการดูดกลืนแสงเท่ากับ 265 นาโนเมตร ซึ่งเปลี่ยนแปลงชัดเจนจากฟิสิกเอกลักษณ์ของกราฟีนออกไซด์ที่จะปรากฏเป็นฟิสิก 2 ช่วง คือ ที่ความยาวคลื่น 230 และ 300 นาโนเมตร เทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์แสดงองศาเลี้ยวเบนที่แตกต่างกันระหว่างรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และกราฟีนออกไซด์อยู่ที่ 2θ เท่ากับ 25.2° และ 10.8° ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่ามีโครงสร้างและระนาบผลึกที่แตกต่างกัน สอดคล้องกับผลจากเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีที่ไม่แสดงฟิสิกการสั่นของพันธะ C=O หลังจากผ่านกระบวนการรีดักชัน เช่นเดียวกันกับผลจากเทคนิครามานที่แสดงค่าอัตราส่วนของ I_D/I_G ที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนระหว่างรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์กับกราฟีนออกไซด์

การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคต่างๆ ช่วยยืนยันและแสดงแนวโน้มของโครงสร้างที่เกิดขึ้นในแผ่นของผสมยางธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกัน ทั้ง 7 ตัวอย่าง (NR RT RT-rGO1.6% RT-rGO3.2% RT-rGO4.8% RT-rGO6.2% และ RT-rGO7.7%) พบว่า เมื่อปริมาณรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้นส่งผลให้เอกลักษณ์เฉพาะของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปรากฏนั้นลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นในเทคนิครามาน การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ ซึ่งมาจากการที่รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์กระจายปกคลุมอยู่ทั่วพื้นผิวของแผ่นของผสม

รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมทั้งในขั้นตอนการดูดซับ และขั้นตอนการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติก โดยขั้นตอนการดูดซับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์สามารถเกิด $\pi - \pi$ stacking ระหว่างโครงสร้างที่เป็นอะโรมาติกของทั้งรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และสีย้อมเมทิลีนบลู อีกทั้งด้วยค่าศักย์ไฟฟ้าของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เป็นลบจึงช่วยดึงดูดสีย้อมเมทิลีนบลูที่เป็นบวกได้ดียิ่งขึ้น ในส่วนของขั้นตอนการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์สามารถเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทอิเล็กตรอนให้แก่ไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้เกิดการรวมตัวกันระหว่างอิเล็กตรอนและโฮลได้ช้าลง ในระบบจึงมีไอออนในการผลิตไฮดรอกซิลเรดิคัลที่ทำหน้าที่ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้มากยิ่งขึ้น แต่พบว่าหากมีปริมาณรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่มากเกินไปในแผ่นของผสม RT-rGO7.7% ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูนั้นลดลง ซึ่งมาจากการที่รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์กระจายปกคลุมอยู่ที่พื้นผิวของแผ่นของผสม ทำให้มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่พื้นผิวน้อยลง ประสิทธิภาพการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูจึงลดลง

การศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่ารีดิวซ์กราฟีนออกไซด์สามารถเพิ่มความแข็งแรงให้แก่แผ่นของผสมได้มากขึ้น ซึ่งสามารถเพิ่มค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus) ค่าการคงรูป (Stiffness) ค่าความเค้นสูงสุด (Stress at maximum load) และค่าแรงดึงที่จุดขาด (Load at break) ให้สูงมากขึ้น ซึ่งมาจากการที่รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีโครงสร้างเป็นวงอะโรมาติกต่อกันเรียงตัวในลักษณะ 2 มิติสามารถโค้งงอและดึงยืดได้ดี เมื่อใส่ลงในแผ่นของผสมจึงเพิ่มสมบัติเชิงกลในทุก ๆ ด้าน ในส่วนของสมบัติเชิงความร้อนพบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการสลายตัวของวัสดุเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งมาจากช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีค่าใกล้เคียงกับยางธรรมชาติ อีกทั้งปริมาณของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในแผ่นของผสมนั้นมีปริมาณที่น้อยมากเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติหรือไทเทเนียมไดออกไซด์

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. กระบวนการตัดแปลงของฮูมเมอร์จำเป็นต้องมีการพัฒนาและปรับปรุงเพื่อให้ กราฟีน-ออกไซด์ที่เตรียมได้มีคุณภาพและมีความสม่ำเสมอในแต่ละรอบที่เตรียม
2. ปริมาณแอมโมเนียที่ใช้ในการรักษาสภาพทางธรรมชาติและรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ส่งผลต่อการทำให้เกิดรูบนแผ่นของผสม ซึ่งอาจทำให้แผ่นของผสมเกิดการเสียสภาพได้ง่าย
3. ตู้กระบวนการโฟโตคะตะไลติกควรมีระบบการระบายความร้อน เพื่อป้องกันไม่ให้อุณหภูมิภายนอกส่งผลต่อการทำกระบวนการโฟโตคะตะไลติก
4. การเตรียมเป็นแผ่นของผสมขนาดใหญ่จำเป็นต้องใช้เวลานานในการผสมที่นานขึ้น เพื่อให้แผ่นของผสมเข้ากันได้ดีและไม่เกิดการแยกตัวระหว่างยางธรรมชาติ ไทเทเนียม-ไดออกไซด์ และ รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Ding, D. Wang, P. Yang, X. Cheng. 2016. "Synthesis of anatase titanium dioxide nanocaps via hydrofluoric acid etching towards enhanced photocatalysis." *Materials Research Bulletin*. 74: 311-318.
- [2] L. Yuliati, W. R. Siah, N. A. Roslan, M. Shamsuddin, H. O. Lintang. 2016. "Modification of titanium dioxide nanoparticle with copper oxide co-catalyst for Photocatalytic degradation of 2, 4-dichloroethoxy acetic acid." *Malaysian Journal of Analytical Science*. 20: 171-178.
- [3] S. Salem, A. Salem, M. Rezaei. 2016 "Facile decoration of TiO₂ nanoparticles on graphene for solar degradation of organic dye." *Solid State Science*. 61: 131-135.
- [4] อุปถัมภ์ นาครักษ์. 2557. "การพัฒนาฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์แบบสถานะผสม." เอกสารรายงานโครงการวิจัย สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- [5] G. Liu, K. Han, H. Ye, C. Zhu, Y. Gao, Y. Liu, Y. Zhou. 2017. "Graphene oxide/triethanolamine modified titanate nanowires as Photocatalytic membrane for water treatment." *Chemical Engineering Journal*. 320: 74-80.
- [6] M. Bera, P. K. Maji. 2017. "Effect of structural disparity of graphene-based materials on thermomechanical and surface properties of thermoplastic polyurethane nanocomposites." *Polymer*. 119: 118-133.
- [7] Z-T. Xie, X. Fu, L-Y. Wei, M-C. Luo, Y-H. Liu, F-W. Ling. 2017. "New evidence disclosed for the engineered strong interfacial interaction of graphene/rubber nanocomposites." *Polymer*. 118: 30-39.
- [8] M. Sohail, H. Xue, Q. Jiao, H. Li, K. Khan. 2017. "Synthesis of well-dispersed TiO₂@reduced graphene oxide (rGO) nanocomposites and their photocatalytic properties." *Materials Research Bulletin*. 90: 125-130.
- [9] A. Trapalis, N. Todorova, T. Giannakopoulou, N. Boukos, T. Speliotis. 2016. "TiO₂/graphene composite photocatalysts for NO_x removal: A comparison of surfactant-stabilized graphene and reduced graphene oxide." *Applied Catalysis B: Environmental*. 180: 637-647.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] N. Saha, M. S. Rahman, M. B. Ahmed, J. L. Zhou, H. H. Ngo, W. Guo. 2017. "Industrial metal pollution in water and probabilistic assessment of human health risk." *Journal of Environmental Management*. 185: 70-78.
- [11] M. Asadullah, I. Jahan, M. B. Ahmed, P. Adawiyah, N. H. Malek, M. S. Rahman. 2014. "Preparation of microporous activated carbon and its modification for arsenic removal from water." *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 20: 887-896.
- [12] สุวิทย์ ทองทรัพย์. 2016. "การดูดซับเมทิลลิบลูของถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้มะพร้าว." *คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี*.
- [13] Retrieved May 18, 2012. [Online]. Available: <http://oknation.nationtv.tv/blog/kanis/2012/05/18/entry-1>.
- [14] J. M. Gohil, P. Ray. 2017. "A review on semi-aromatic polyamide TFC membranes prepared by interfacial polymerization: Potential for water treatment and desalination." *Separation and Purification Technology*. 181: 159-182.
- [15] M. A-Harashsheh, Y. A. Hussain, H. A-Zoubi, M. Batiha, E. Hammouri. 2017. "Hybrid precipitation-nanofiltration treatment of effluent pond water from phosphoric acid industry." *Desalination*. 406: 88-97.
- [16] A. Fujishima, T. N. Rao, D. A. Tryk. 2000. "Titanium dioxide photocatalysis." *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*. 1: 1-21.
- [17] M. Qamar, M. Muneer. 2009. "A comparative photocatalytic activity of titanium dioxide and zinc oxide by investigating the degradation of vanillin." *Desalination*. 249: 535-540.
- [18] D. Huang, X. Fu, J. Long, X. Jiang, L. Chang, S. Meng, S. Chen. 2015. "Hydrothermal synthesis of $M\text{Sn}(\text{OH})_6$ ($M = \text{Co}, \text{Cu}, \text{Fe}, \text{Mg}, \text{Mn}, \text{Zn}$) and their photocatalytic activity for the destruction of gaseous benzene." *Chemical Engineering Journal*. 269: 168-179.
- [19] Y. Y. Lee, H. S. Jung, Y. T. Kang. 2017. "A review: Effect of nanostructures on photocatalytic CO_2 conversion over metal oxides and compound semiconductors." *Journal of CO_2 Utilization*. 20: 163-177.

- [20] S. S. Turkyilmaz, N. Guy, M. Ozacar. 2017. "Photocatalytic efficiencies of Ni, Mn, Fe and Ag doped ZnO nanostructures synthesized by hydrothermal method: The synergistic/ antagonistic effect between ZnO and metals." *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 341: 39-50.
- [21] ศศิณา จันสุ, ชีวีตา สุวรรณชวลิต. 2014. "Synthesis of Cu₂O-TiO₂ photocatalysts and their Photocatalytic properties." *Journal Science and Technology Silpakorn University*. 3: 53-67.
- [22] Z. Zainal, L. K. Hui, M. Z. Hussein, A. H. Abdullah, I. R. Hamadne. 2009. "Characterization of TiO₂-Chitosan/Glass photocatalyst for the removal of a monoazo dye via photodegradation-adsorption process." *Journal of Hazardous Materials*. 164: 138-145.
- [23] Y. Zhang, X. Hou, T. Sun, X. Zhao. 2017. "Calcination of reduced graphene oxide decorated TiO₂ composites for recovery and reuse in photocatalytic applications." *Ceramics International*. 43: 1150-1159.
- [24] หทัยทิพย์ พันธุ์ดำ. 2556. "การสังเคราะห์อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนเพื่อฆ่าเชื้อราที่ทำให้เกิดโรคใบร่วงของต้นยางพารา." *วิทยานิพนธ์ สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์*.
- [25] Retrieved December 10, 2014. [Online]. Available: <http://www.viiprchemicals.com/titanium-dioxide-powder-1597964.html>.
- [26] V. Scuderi, M. A. Buccheri, G. Impellizzeri, A. D. Mauro, G. Rappazzo, K. Bergum, B. G. Svensson, V. Privitera. 2016. "Photocatalytic and antibacterial properties of titanium dioxide flat film." *Materials Science in Semiconductor Processing*. 42: 32-35.
- [27] Retrieved August 8, 2012. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/233d919810_fig1_Fig-1-Crystalline-structures-of-titanium-dioxide-a-anatase-b-rutile-c-brookite.
- [28] W-K. Wang, J-J. Chen, M. Gao, Y-X. Huang, X. Zhang, H-Q. Yu. 2016. "Photocatalytic degradation of atrazine by boron-doped TiO₂ with a tunable rutile/anatase ratio." *Applied Catalysis B: Environmental*. 195: 69-76.

- [29] C. Sriwong, S. Wongnawa, O. Patarapaiboolchai. 2012. "Rubber sheet strewn with TiO₂ particles: Photocatalytic activity and recyclability." *Journal of Environmental Sciences*. 24: 464-472.
- [30] อติพล สว่างอารมณ์. 2557. "การศึกษาประสิทธิภาพของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบอนุภาคทองคำต่อการเสื่อมสภาพของเมทิลีนบลูโดยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก." *ปริญญานิพนธ์ สาขาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*.
- [31] H. A-Bolados, M. A. L-Manchado, J. Brasero, F. Aviles, M. Y-Pedram. 2016. "Effect of the morphology of thermally reduced graphite oxide on the mechanical and electrical properties of natural rubber nanocomposites." *Composites Part B*. 87: 350-356.
- [32] S. Prasertsri, F. Lagarde, N. Rattanasom, C. Sirisinha, P. Daniel. 2013. "Raman spectroscopy and thermal analysis of gum and silica-filled NR/SBR blends prepared from latex system." *Polymer Testing*. 32: 852-861.
- [33] สุวดี ก้องพารากุล. 2013. "Natural Rubber Modification Technology and Its Applications." *KKU Science Journal*. 41: 567-581.
- [34] S. Drewniak, R. Muzyka, A. Stolarczyk, T. Pustelny, M. K-Moranska, M. Setkiewicz. 2016. "Studies of Reduced Graphene Oxide and Graphite Oxide in the Aspect of Their Possible Application in Gas Sensors." *Sensors*. 103: 1-16.
- [35] L-X. Gong, L. Zhao, L-C. Tang, H-Y. Liu, Y-W. Mai. 2015. "Balanced electrical, thermal and mechanical properties of epoxy composites filled with chemically reduced graphene oxide and rubber nanoparticles." *Composites Science and Technology*. 121: 104-114.
- [36] Retrieved October 12, 2016. [Online]. Available: <https://www.intechopen.com/books/recent-advances-in-graphene-research/graphene-based-material-functionalization-with-natural-polymeric-biomolecules>.
- [37] J. Qin, X. Zhang, C. Yang, M. Cao, M. Ma, R. Liu. 2017. "ZnO microspheres-reduced graphene oxide nanocomposite for photocatalytic degradation of methylene blue dye." *Applied Surface Science*. 392: 196-203.

- [38] M. Hamandi, G. Berhault, C. Guillard, H. Kochkar. 2017. "Influence of reduced graphene oxide on the synergism between rutile and anatase TiO₂ particles in photocatalytic degradation of formic acid." *Molecular Catalysis*. 432: 125-130.
- [39] M. J. Iqbal, M. N. Ashiq. 2007. "Adsorption of dyes from aqueous solutions on activated charcoal." *Journal of Hazardous Materials B*. 139: 57-66.
- [40] C. R. Minitha, M. Lalitha, Y. L. Jeyachandran, L. Senthilkumar, R. R. T. Kumar. 2017. "Adsorption behavior of reduced graphene oxide towards cationic and anionic dyes: Co-action of electrostatic and π-π interactions." *Materials Chemistry and Physics*. 194: 243-252.
- [41] Retrieved March 26, 2016. [Online]. Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:New_methylene_blue_structure.svg.
- [42] Z-Q. Li, H-L. Wang, L-Y. Zi, J-J. Zhang, Y-S. Zhang. 2015. "Preparation and Photocatalytic performance of magnetic TiO₂-Fe₃O₄ / graphene (RGO) composites under VIS-light irradiation." *Ceramic International*. 41: 10634-10643.
- [43] R. Atchudan, T. N. J. I. Edison, S. Perumal, D. Karthikeyan, Y. R. Lee. 2017. "Effective photocatalytic degradation of anthropogenic dyes using graphene oxide grafting titanium dioxide nanoparticles under UV-light irradiation." *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 333: 92-104.
- [44] F. Huang, L. Chen, H. Wang, Z. Yan. 2010. "Analysis of the degradation mechanism of methylene blue by atmospheric pressure dielectric barrier discharge plasma." *Chemical Engineering Journal*. 162: 250-256.
- [45] S. Singh, H. Mahalingam, P. K. Singh. 2013. "Polymer-supported titanium dioxide photocatalyst for environmental remediation: A review." *Applied Catalysis A: General*. 463: 178-195.
- [46] B. Seentrakoon, B. Junhasavasdikul, W. Chavasiri. 2013. "Enhanced UV-protection and antibacterial properties of natural rubber/rutile-TiO₂ Nanocomposites." *Polymer Degradation and Stability*. 98: 566-578.
- [47] C. Sriwong, S. Wongnawa, O. Pataeapai-boolchai. 2008. "Photocatalytic activity of rubber sheet impregnated with TiO₂ particles and its recyclability." *Catalysis Communications*. 9: 213-218.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [48] D. Li, M. B. Muller, S. Gilje, R. B. Kaner, G. G. Wallace. 2008. "Processable aqueous dispersions of graphene nanosheets." *Nature nanotechnology*. 3: 101-105.
- [49] N. J. Whiteside, G. G. Wallace, M. I. H. Panhuis. 2013. "Preparation and characterization of graphene composite hydrogels." *Synthetic Metals* 168: 36-42.
- [50] P. Fei, Q. Wang, M. Zhong. 2016. "Preparation and adsorption properties of enhanced magnetic zinc ferrite-reduced graphene oxide nanocomposites via a facile one-pot solvothermal method" *Journal of Alloys and Compounds*. 685: 411-417.
- [51] Y-C. Cao, Z. Fu, W. Wei, L. Zou, T. Mi, D. He, C. Yan, X. Liu, Y. Zhu, L. Chen, Y. Sun. 2015. "Reduced graphene oxide supported titanium dioxide nanomaterials for the photocatalysis with long cycling life." *Applied Surface Science*. 355: 1289-1294.
- [52] X. Zeng, Z. Wang, N. Meng, D. T. McCarthy, A. Deletic, J-H. Pan, X. Zhang. 2017. "Highly dispersed TiO₂ nanocrystals and carbon dots on reduced graphene oxide: Ternary nanocomposites for accelerated photocatalytic water disinfection." *Applied Catalysis B: Environmental*. 202: 33-41.
- [53] L. Lin, H. Wang, W. Jiang, A. R. Mkaouer, P. Xu. 2017. "Comparison study on photocatalytic oxidation of pharmaceuticals by TiO₂-Fe and TiO₂-reduced graphene oxide nanocomposites immobilized on optical fibers." *Journal of Hazardous Materials*. 333: 162-168.
- [54] Y. Li, H. Zhang, B. Wu, Z. Guo. 2017. "Improving the oxidation resistance and stability of Ag nanoparticles by coating with multilayered reduced graphene oxide." *Applied Surface Science*. 425: 194-200.
- [55] P. F-Ibanez, M. I. P-Lopez, S. Malato, S. Wadhwa, J. W. J. Hamilton, P. S. M. Dunlop, R. D. Sa, E. Magee, K. O. Shea, D. D. Dionysiou, J. A. Byrne. 2015. "Solar photocatalytic disinfection of water using titanium dioxide graphene composites." *Chemical Engineering Journal*. 261: 36-44.
- [56] S. Yaragalla, A. P. Meera, N. Kalarikkal, S. Thomas. 2015. "Chemistry associated with natural rubber-graphene nanocomposites and its effect on physical and structural properties." *Industrial and Products*. 74: 792-802.

- [57] D. Maruthamani, D. Divakar, M. Kumaravel. 2015. "Enhanced photocatalytic activity of TiO_2 by reduced graphene oxide in mineralization of Rhodamine B dye." *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 30: 33-43.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

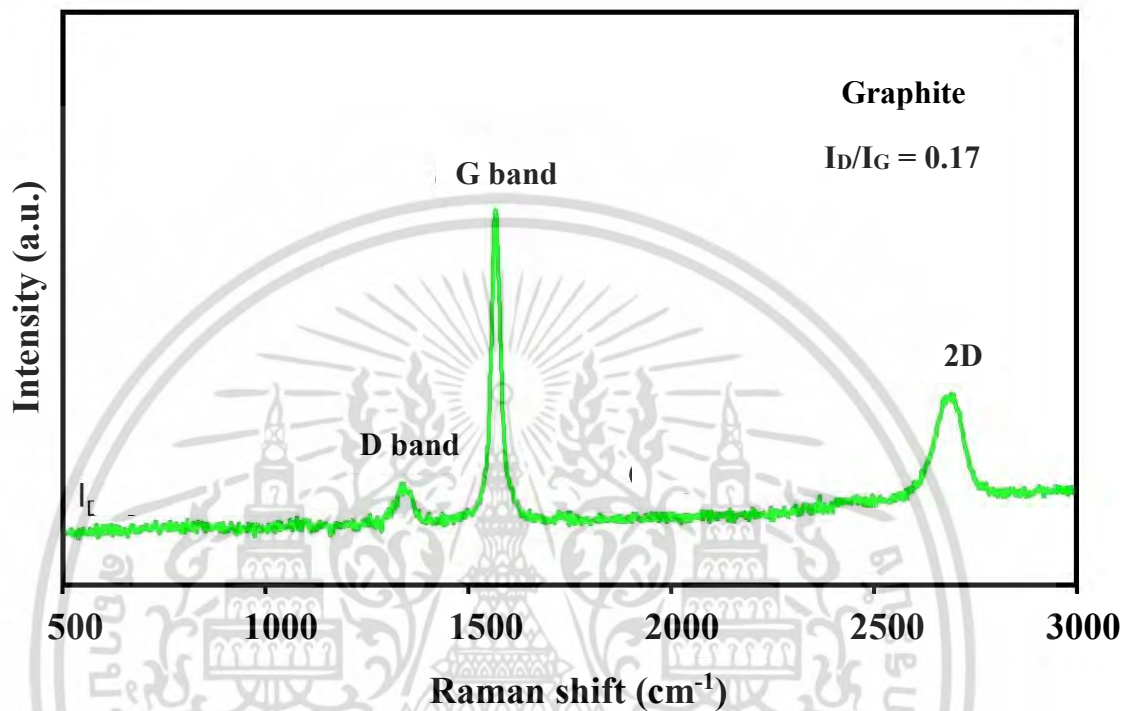


ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องรามาน (Raman spectrometer)

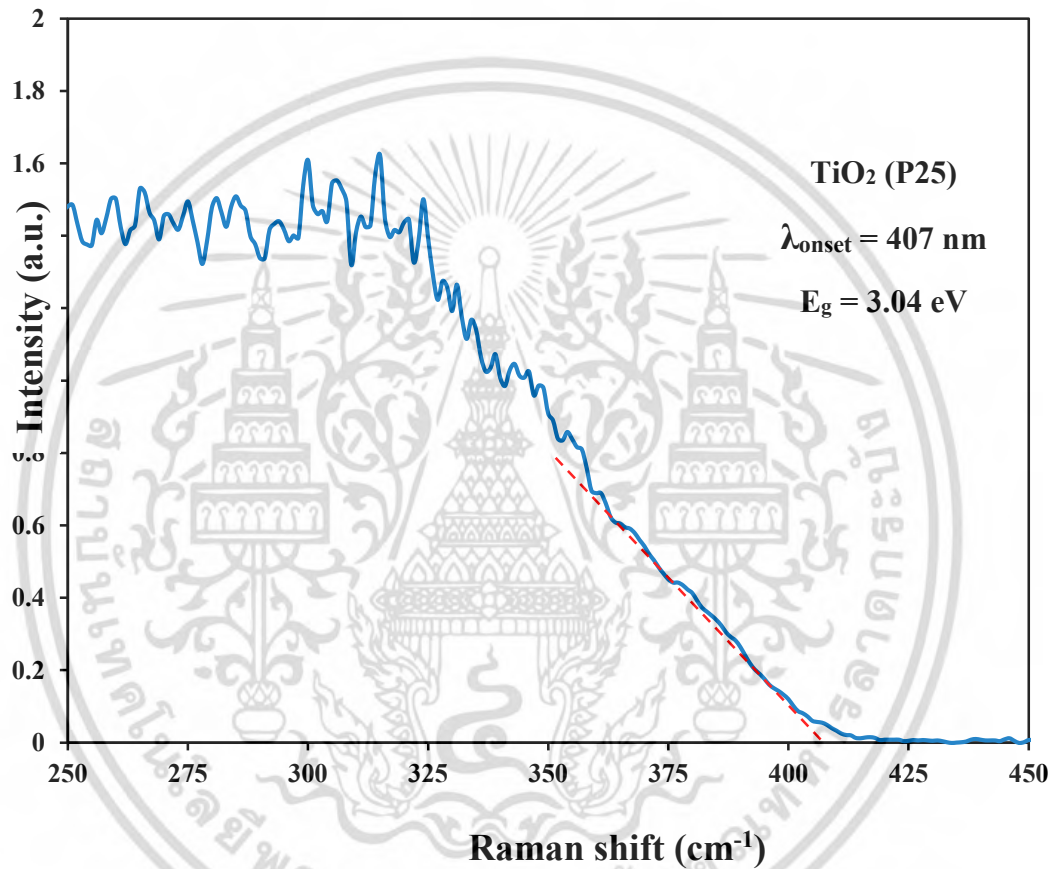


รูปที่ ก-1 รามานสเปกตรัมแสดงโหมดการสั่นของกราฟไฟต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Ultraviolet-visible diffuse-reflectance spectrophotometer (DRS)

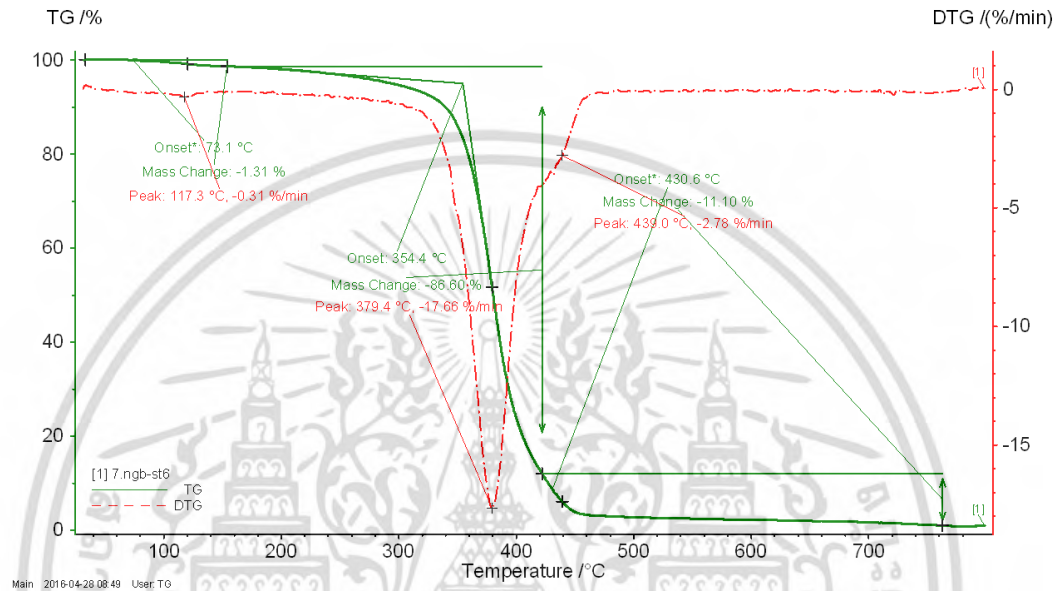


รูปที่ ข-1 DRS สเปกตรัมของไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25

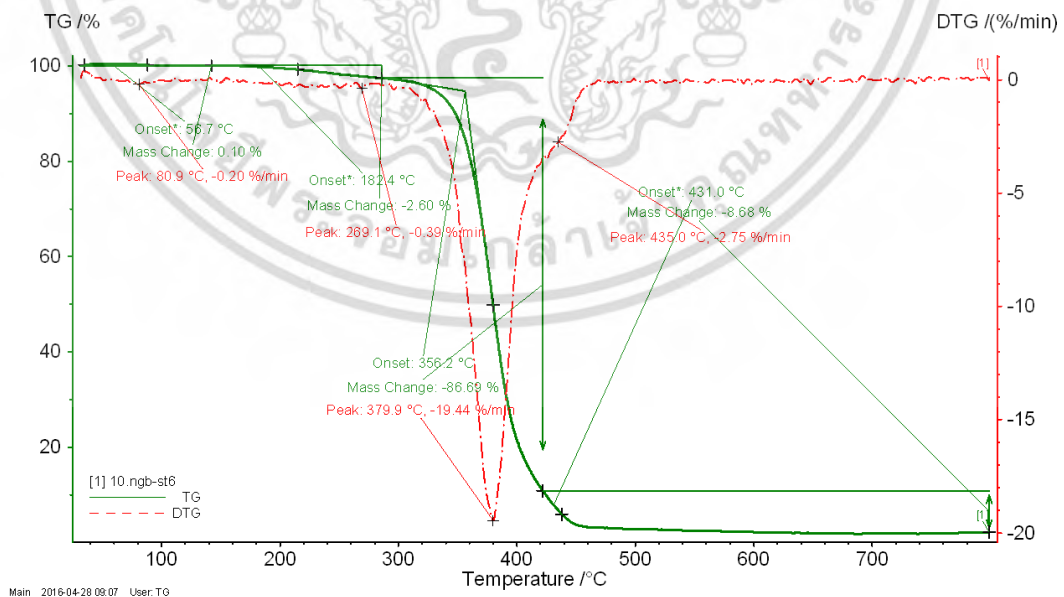
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์เชิงความร้อน (Thermal Gravity Analysis; TGA)

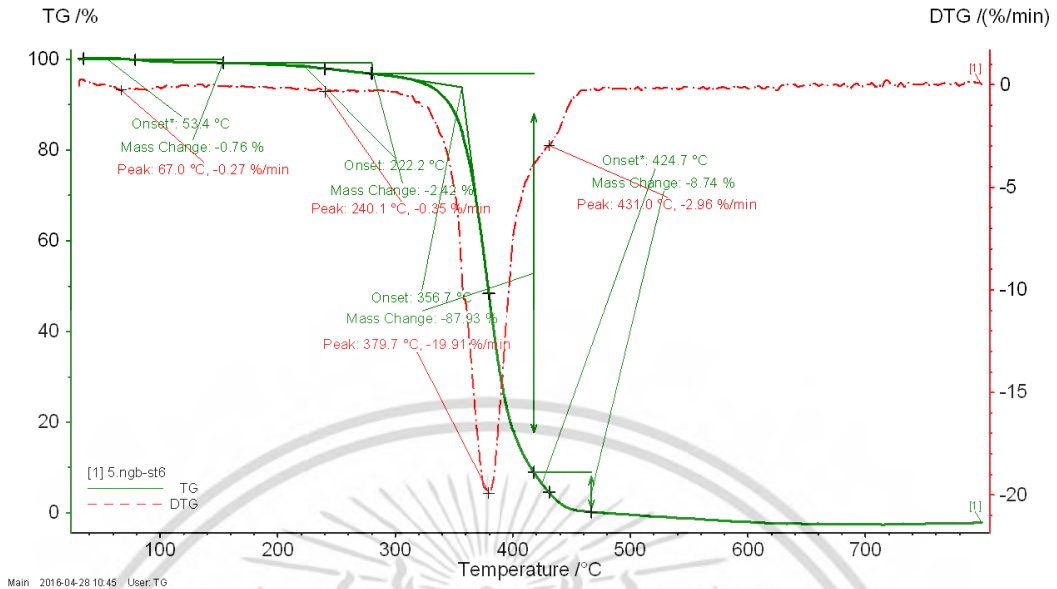


รูปที่ ค-1 TGA สเปกตรัมแสดงการสลายตัวทางความร้อนของ NR

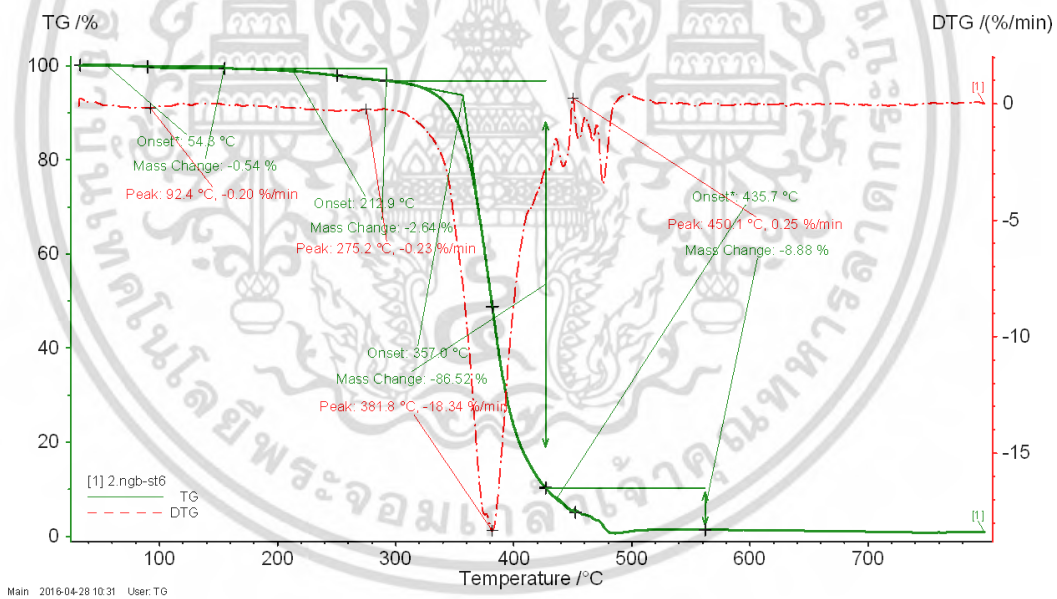


รูปที่ ค-2 TGA สเปกตรัมแสดงการสลายตัวทางความร้อนของ RT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

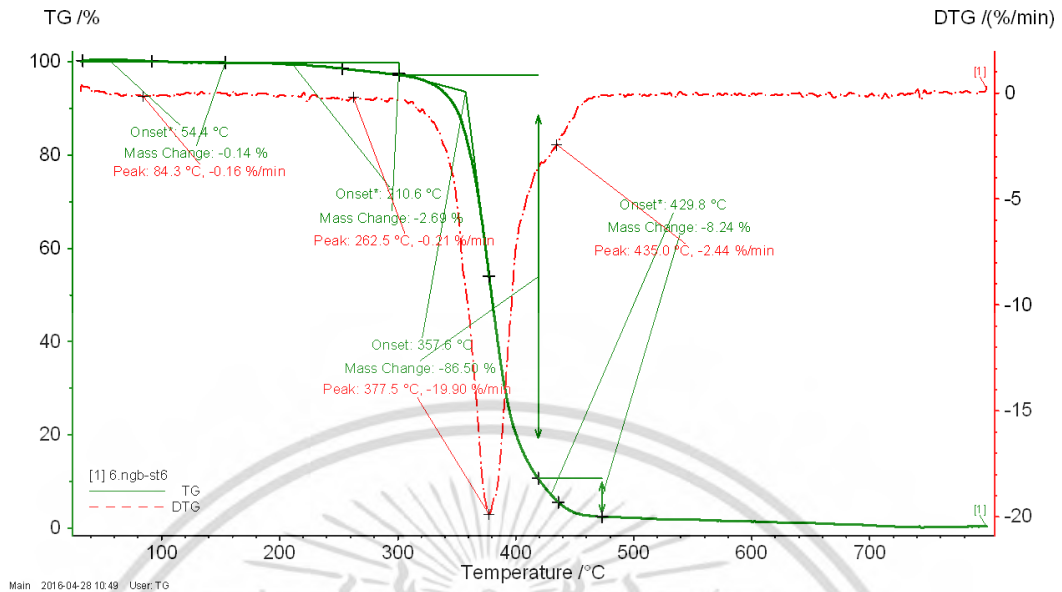


รูปที่ ค-3 TGA สเปกตรัมแสดงการสลายตัวทางความร้อนของ RT-rGO1.6%

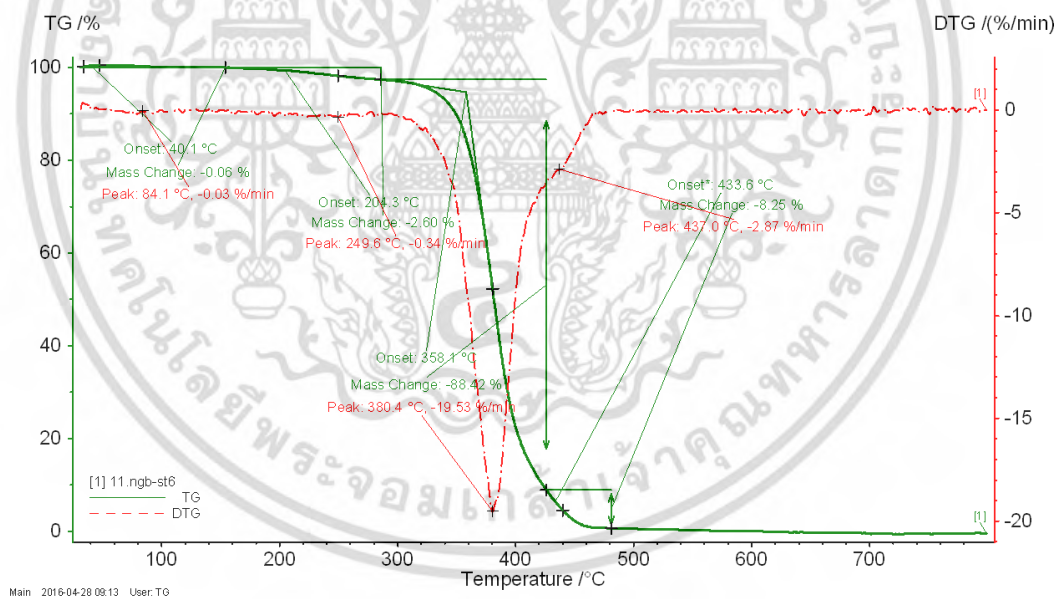


รูปที่ ค-4 TGA สเปกตรัมแสดงการสลายตัวทางความร้อนของ RT-rGO3.2%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

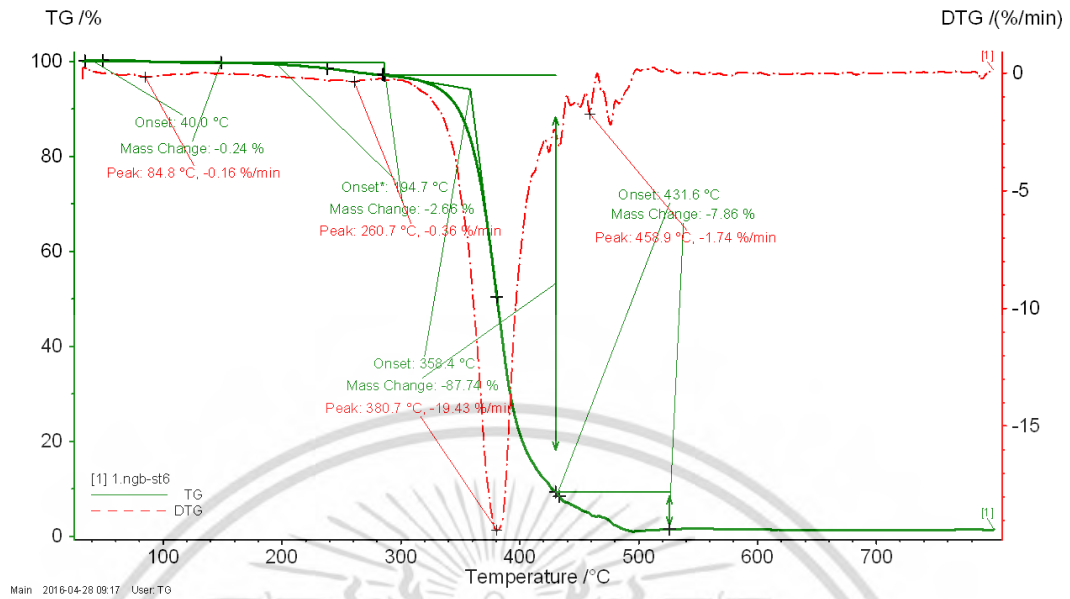


รูปที่ ค-5 TGA สเปกตรัมแสดงการสลายตัวทางความร้อนของ RT-rGO4.8%



รูปที่ ค-6 TGA สเปกตรัมแสดงการสลายตัวทางความร้อนของ RT-rGO6.2%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

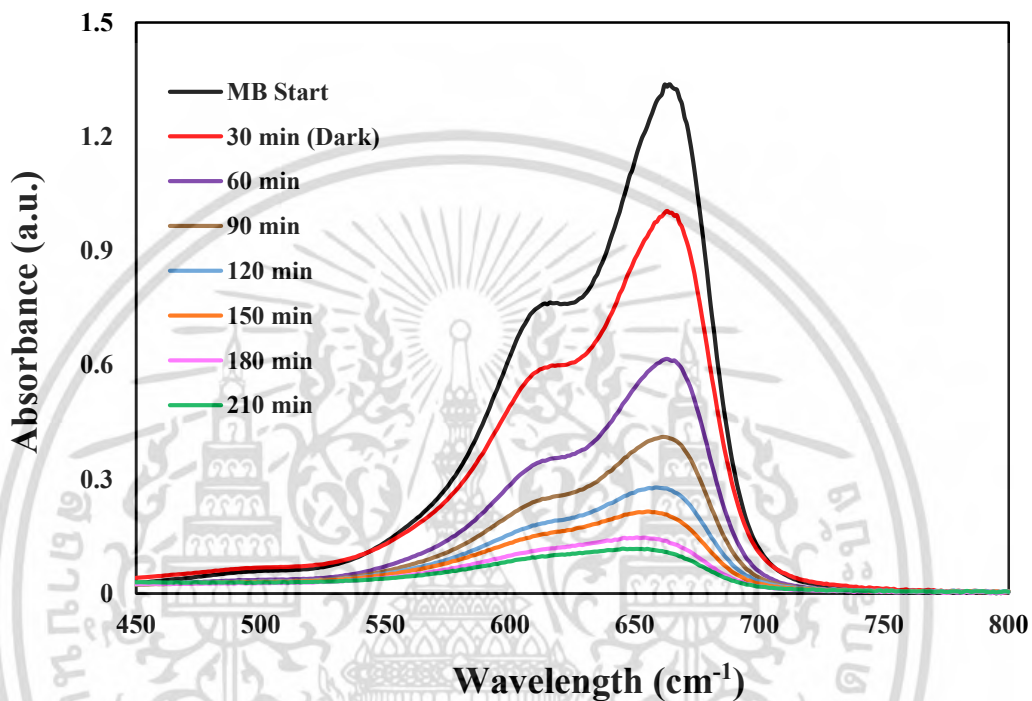


รูปที่ ค-7 TGA สเปกตรัมแสดงการสลายตัวทางความร้อนของ RT-rGO7.7%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis Spectrophotometer)



รูปที่ ง-1 ลักษณะการดูดกลืนแสงที่เวลาใด ๆ ของกระบวนการโฟโตคะตะไลติกในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ตผ่านแผ่นของผสม RT-rGO6.2%

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายวรพล เตชางกูร
วัน เดือน ปี เกิด	29 พฤศจิกายน พ.ศ. 2534
ที่อยู่	1068 ซอยนวมินทร์ 14 แยก 1 ถนนนวมินทร์ แขวงคลองจั่น เขตบางกะปิ จังหวัดกรุงเทพฯ รหัสไปรษณีย์ 10240
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2556 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม เกรตเฉลี่ย 2.78 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2559 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีประยุกต์ เกรตเฉลี่ย 3.93 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานทางวิชาการ	[Oral presentation] December 14, 2016. “MSAT-9 2016: 9 th International Conference on Materials Science and Technology.” Swissotel Le Concorde. Bangkok, Thailand. [Publication] W. Tejangkura, C. Sriwong, K. Choojun. 2017. “Preparation, Characterization and Photocatalytic Properties of Rubber-TiO ₂ -rGO Composite Sheets for Dye Decomposition in Wastewater.” Key Engineering Materials. 751: 738-744. [Publication] C. Sriwong, W. Tejangkura. 2015. “AC/TiO ₂ /rubber composite sheet catalysts; fabrication, characterization and Photocatalytic activities.” MATEC Web of Conference 30: 01006 (1-6).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้