

การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์และสมบัติโฟโตคะตะไลติกของ
แผ่นของผสมยางธรรมชาติ/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ไทเทเนียม-
ไดออกไซด์ที่ถูกเติมด้วยซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตร

PREPARATION, CHARACTERIZATION AND
PHOTOCATALYTIC PROPERTIES OF AgNPs LOADED
TiO₂/rGO/NR COMPOSITE SHEETS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์และสมบัติโฟโตคะตะไลติกของ
แผ่นของผสมยางธรรมชาติ/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ไทเทเนียม-
ไดออกไซด์ที่ถูกเติมด้วยซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตร

PREPARATION, CHARACTERIZATION AND
PHOTOCATALYTIC PROPERTIES OF AgNPs LOADED
TiO₂/rGO/NR COMPOSITE SHEETS



T149450

ชาธิญา ใจหาญ
สิริรัตน์ อุวัฒน์สมบัติ

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 149450
วันเดือนปี - 8 อ.ค. 2561

b. 1288439X
i.

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PREPARATION, CHARACTERIZATION AND
PHOTOCATALYTIC PROPERTIES OF AgNPs LOADED
TiO₂/rGO/NR COMPOSITE SHEETS



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
(INDUSTRIAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY,
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2016




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์และสมบัติโฟโตคะตะไลติกของแผ่นของ
ผสมยางธรรมชาติ/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกเติม
ด้วยซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตร
Preparation, Characterization and Photocatalytic Properties of
AgNPs Loaded TiO₂/rGO/NR Composite Sheets

ชื่อนักศึกษา นางสาว ชาติญา ใจหาญ รหัสนักศึกษา 56050627
นางสาว สิริรัตน์ อุวัฒน์สมบัติ รหัสนักศึกษา 56050629

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา เคมี
ปีการศึกษา 2559
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. ขวาลย์ ศรีวงษ์

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

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. ปานไพลิน สีหาราช ประธานกรรมการ	
ดร. สามารถ คงทวีเลิศ กรรมการ	
ดร. ขวาลย์ ศรีวงษ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. การใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์และสมบัติโฟโตคะตะไลติกของแผ่นของผสมยางธรรมชาติ/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกเติมด้วยซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตร	
ชื่อนักศึกษา	นางสาว ชาติญา ใจหาญ	รหัสนักศึกษา 56050627
	นางสาว สิริรัตน์ อุวัฒน์สมบัติ	รหัสนักศึกษา 56050629
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)	
ภาควิชา	เคมี	
คณะ	วิทยาศาสตร์	
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)	
ปีการศึกษา	2559	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. ชวาลย์ ศรีวงษ์	

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาการเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์และสมบัติโฟโตคะตะไลติก ของแผ่นของผสมยางธรรมชาติที่ถูกเติมด้วยซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตร สำหรับขั้นตอนการเตรียมแผ่นของผสมยางธรรมชาตินี้ สามารถทำได้ง่าย ๆ โดยการผสมกันโดยตรงของไทเทเนียมไดออกไซด์ สารแขวนลอยรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ และน้ำยางธรรมชาติ ภายใต้การเปลี่ยนแปลงปริมาณสารแขวนลอยซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตรในสัดส่วนต่างๆ ได้แก่ 0.02, 0.08, 0.12, 0.17, 0.21 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จากนั้นนำแผ่นตัวอย่างที่เตรียมได้มาวิเคราะห์ และพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคต่างๆ ได้แก่ XRD, ATR-FTIR, Raman, SEM, TEM, EDS และ DRS ซึ่งจากผลการวิเคราะห์พบว่า จะพบพีกเอกลักษณ์เฟสวัฏภาคและหมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติและไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีอยู่ในแผ่นของผสมตัวอย่าง แต่ไม่ปรากฏพีกเอกลักษณ์ของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตร อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์จากเทคนิครามานจะปรากฏพีกเอกลักษณ์ของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM พบว่าความขรุขระและขนาดของรูพรุนบนพื้นผิวของแผ่นของผสมยางธรรมชาตินี้จะมีปริมาณเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณการเติมสารแขวนลอยซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตร ผลจากเทคนิค DRS พบว่าพีกการดูดกลืนแสงของแผ่นของผสมที่มีการเติมซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตร มีการเลื่อนตำแหน่งไปที่ความยาวคลื่นมากขึ้นเมื่อเทียบกับแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ นอกจากนี้สมบัติโฟโตคะตะไลติกของแผ่นของผสมตัวอย่างสามารถทดสอบโดยการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของแผ่นของผสมยางธรรมชาติที่ถูกเติมด้วยซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตรปริมาณ 0.12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูสูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องมาจากการทำงานร่วมกันเป็นอย่างดีของตัวเร่งไทเทเนียมไดออกไซด์ ซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตร และตัวดูดซับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ที่เพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดกลืนแสงวิสิเบิล และลดการตกกลับของอิเล็กตรอนร่วมกับโฮล

คำสำคัญ : กระบวนการโฟโตคะตะไลติก ไทเทเนียมไดออกไซด์ รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตร ยางธรรมชาติ แผ่นของผสมยางธรรมชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Preparation, Characterization and Photocatalytic Properties of AgNPs Loaded TiO ₂ /rGO/NR Composite Sheets	
Students	Miss Sathiya Jaihan	Student ID 56050627
	Miss Sirirat Awattanasombut	Student ID 56050629
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)	
Department	Chemistry	
Faculty	Science	
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	
Academic Year	2016	
Advisor	Dr. Chaval Sriwong	

Abstract

The objective of this special project is to investigate the preparation, characterization and photocatalytic properties of silver nanoparticles (AgNPs) loaded titanium dioxide (TiO₂)/reduced graphene oxide (rGO)/natural rubber (NR) composite sheets. In the preparation process, these NR composite sheets were easily prepared by directly mixing method based on the use of fixed TiO₂, rGO suspension and natural rubber latex contents with the varying amounts of AgNPs suspension such as 0.02, 0.08, 0.12, 0.17 and 0.21 %wt., respectively. Then, the obtained NR composite sheet samples were characterized by 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 showed that the crystalline phases and functional groups of these composite sheets are corresponding to pristine NR and TiO₂ (Degussa P25), whereas all of the rGO and AgNPs characteristic peaks are not observed. Nevertheless, the characteristic peaks of rGO in the composite sheets could be observed and well-confirmed by Raman technique. From the SEM results, the roughness and pore sizes on the surface of NR composite sheets were appeared and also increased with the increasing amount of AgNPs loading. The DRS spectra showed that the absorption band edge of the AgNPs loaded on NR composite sheet had shift to the longer wavelength compared with unloaded NR sheets. Moreover, the photocatalytic properties of all NR composite sheet samples were evaluated by photodegrading of methylene blue (MB) dye solution under visible light irradiation. The results indicated that the photocatalytic activity of the NR composite sheet prepared with 0.12 %wt. AgNPs has the highest efficiency for the photodegradation of MB dye than the other sheets. This may be due to the fact that it is relatively with

the incorporation effect of well-combined TiO_2 -AgNPs catalyst and rGO adsorbent, enhancing visible light absorption, electron-hole pair separation and improving surface area of the NR composite sheet.

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้ประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาในการให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และแนวทางปฏิบัติในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ จากผู้มีอุปการะคุณ ดังนี้

ขอขอบพระคุณ ดร. ขวาลย์ ศรีวงษ์ อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่ได้ให้คำแนะนำและสนับสนุนโครงการพิเศษนี้ กระทั่งสำเร็จลุล่วงเป้าหมาย

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. ปานไพลิน สีหาราช และ ดร. สามารถ คงทวีเลิศ อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นคณะกรรมการสอบ ที่ให้คำแนะนำและแนวทางแก้ไขในจุดผิดพลาดต่าง ๆ

ขอขอบพระคุณ นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ และเจ้าหน้าที่ปฏิบัติการประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความสนับสนุน ทางด้านอุปกรณ์ สถานที่ และคำแนะนำทางด้านเอกสาร

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ ในการตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์เฉพาะของชิ้นงานด้วยเทคนิคต่าง ๆ ด้วยความถูกต้องแม่นยำ

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา-มารดา ที่ให้ได้รับการศึกษา เป็นกำลังใจสำคัญในการทำโครงการพิเศษชิ้นนี้ให้ลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอบคุณรุ่นพี่บัณฑิต และเพื่อนๆ รวมถึงบุคคลอื่น ๆ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือต่างๆ คณะผู้จัดทำโครงการพิเศษขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ซาธินา ไจหาญ
สิริรัตน์ อุวัฒน์สมบัติ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ปฏิกริยาโฟโตคะตะไลซิส.....	5
2.1.1 กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.....	5
2.1.2 หลักการของปฏิกริยาโฟโตคะตะไลซิส.....	5
2.1.3 กลไกการเกิดปฏิกริยาโฟโตคะตะไลซิส.....	6
2.2 พลังงานแสง.....	8
2.3 ชนิดของโฟโตคะตะไลซิส.....	9
2.3.1 โฟโตคะตะไลซิสแบบเอกพันธ์.....	9
2.3.2 โฟโตคะตะไลซิสแบบวิวิธพันธ์.....	9
2.4 ชนิดของตัวคะตะลิสต์.....	9
2.5 กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.....	9
2.5.1 กระบวนการดูดติดผิว (Adsorption).....	10
2.5.2 กระบวนการการฉายแสง (Irradiation).....	11
2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการออกซิเดชันของปฏิกริยาโฟโตคะตะไลซิส.....	11
2.6.1 ชนิดของสารพิษ.....	11
2.6.2 ชนิดของตัวเร่งปฏิกริยา.....	11
2.6.3 ปริมาณตัวคะตะลิสต์.....	12
2.6.4 ความเข้มแสง.....	12
2.6.5 อุณหภูมิ.....	12
2.6.6 ปริมาณของออกซิเจนที่ละลายในน้ำ.....	12
2.6.7 ความเป็นกรด-ด่าง.....	12
2.7 ไทเทเนียมไดออกไซด์.....	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.7.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์	15
2.7.2 ผลึกสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์	16
2.8 ประโยชน์ของไทเทเนียมไดออกไซด์	16
2.9 รีติวซ์กราฟีนออกไซด์	18
2.9.1 การเตรียมรีติวซ์กราฟีนออกไซด์.....	19
2.9.2 สมบัติและการใช้ประโยชน์รีติวซ์กราฟีนออกไซด์	19
2.10 ไทเทเนียมไดออกไซด์และรีติวซ์กราฟีนออกไซด์.....	20
2.11 ซิลเวอร์ขนาดอนุภาคนาโนเมตร.....	21
2.11.1 การสังเคราะห์ซิลเวอร์นาโน.....	21
2.11.2 ประโยชน์ซิลเวอร์ขนาดอนุภาคนาโนเมตร	22
2.11.3 การนำไปใช้ซิลเวอร์ขนาดอนุภาคนาโนเมตร	23
2.12 ยางธรรมชาติ.....	24
2.12.1 น้ำยางข้น	25
2.12.2 กระบวนการเตรียมน้ำยางข้นจากน้ำยางสด	25
2.12.3 การใช้งานของยางธรรมชาติ	26
2.13 ประเภทของสิ่งสกปรกที่เจือปนในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อม	27
2.13.1 สีย้อม	27
2.13.2 เศษเส้นใย	27
2.13.3 สารเคมีที่ใช้ช่วยในการฟอกย้อม และสารเคมีที่ใช้ในการตกแต่งสำเร็จ	27
2.13.4 สิ่งสกปรกเจือปนในเส้นใยผ้า	27
2.13.5 สิ่งสกปรกอื่น ๆ	27
2.14 สีสังเคราะห์	28
2.14.1 ประเภทของสีย้อม	28
2.14.2 เมทิลีนบลู.....	31
2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	36
3.1 สารเคมี.....	36
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	37
3.3 วิธีการทดลอง.....	38
3.3.1 การเตรียมกราฟไฟต์ออกไซด์	38
3.3.2 การเตรียมสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์และการหาความเข้มข้นของสาร แขวนลอย	40
3.3.3 การเตรียมรีติวซ์กราฟีนออกไซด์	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3.4 การเตรียมอนุภาคซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตร	43
3.3.5 การเตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ ซิลเวอร์ขนาดอนุภาคนาโนเมตร	44
3.4 การวิเคราะห์พิสูจน์เอกลักษณ์.....	47
3.4.1 Energy-dispersive X-ray Spectroscopy (EDX).....	47
3.4.2 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)	47
3.4.3 Raman spectroscopy	47
3.4.4 Scanning electron microscope (SEM).....	47
3.4.5 Thermogravimetric Analysis (TGA).....	47
3.4.6 UV-Visible spectrophotometer (UV-vis).....	48
3.4.7 X-ray diffractometer (XRD).....	48
3.4.8 Transmission electron microscope (TEM).....	48
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล.....	49
4.1 ผลการวิเคราะห์พิสูจน์เอกลักษณ์ของสารองค์ประกอบที่เติมลงแผ่นยางผสม	49
4.1.1 ผลการศึกษาการตรวจวัดปริมาณแสงและค่าความเข้มแสง.....	49
4.1.2 ผลการศึกษาการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันโครงสร้างของสาร.....	52
4.1.3 ผลการศึกษาด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโคปี เพื่อวิเคราะห์สารตัวอย่างเชิง คุณภาพและปริมาณ	54
4.1.4 ผลการศึกษาจากเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ เพื่อการตรวจสอบลักษณะ โครงสร้างผลึกและอสัณฐาน	56
4.1.5 ผลการศึกษาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	59
4.2 ผลการวิเคราะห์พิสูจน์เอกลักษณ์ของแผ่นยางธรรมชาติผสม	60
4.2.1 ผลการศึกษาการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันโครงสร้างของสาร	60
4.2.2 ผลการศึกษาด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโคปี เพื่อวิเคราะห์สารตัวอย่างเชิง คุณภาพและปริมาณ	61
4.2.3 ผลการศึกษาการตรวจวัดปริมาณแสงและค่าความเข้มแสง.....	62
4.2.3 ผลการศึกษาจากเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ เพื่อการตรวจสอบลักษณะ โครงสร้างผลึกและอสัณฐาน.....	63
4.2.3 ผลการศึกษาการตรวจวัดปริมาณแสงและค่าความเข้มแสง.....	62
4.2.3 ผลการศึกษาจากเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ เพื่อการตรวจสอบลักษณะ โครงสร้างผลึกและอสัณฐาน.....	63
4.2.4 ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด	64

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2.5 ผลการศึกษาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบ บนพื้นผิวตัวอย่าง	67
4.2.6 ผลการศึกษาความเสถียรของวัสดุตัวอย่าง	71
4.2.7 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับและการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู	73
4.2.8 ผลการศึกษาความเป็นไปได้ในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นยางผสม	80
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	81
เอกสารอ้างอิง.....	83
ภาคผนวก.....	87
ภาคผนวก ก.....	89
ภาคผนวก ข.....	91
ภาคผนวก ค.....	92



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติทางกายภาพที่สำคัญของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	13
2.2 แสดงปริมาณสีย้อมในการย้อมเส้นใย	30
2.3 ค่าการดูดซับของเมทิลีนบลู.....	33
3.3 แสดงปริมาณสารในการขึ้นรูปแผ่นของผสมยางธรรมชาติ.....	45
4.1 แสดงค่าการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีน-ออกไซด์/ซิลเวอร์นาโนที่มีปริมาณต่างๆ ในที่มีด.....	73
4.2 แสดงค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ซิลเวอร์นาโนที่มีปริมาณต่างๆ ภายใต้แสง Visible.....	76



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	5
2.2	6
2.3	10
2.4	13
2.5	14
2.6	16
2.7	18
2.8	19
2.9	21
2.10	23
2.11	24
2.12	25
2.13	31
2.14	33
3.1	38
3.2	39
3.3	40
3.4	41
3.5	42
3.6	42
3.7	43
3.8	44
3.9	46
4.1	50
4.2	51
4.3	52
4.4	53
4.5	53
4.6	54

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 รามานสเปกตรัมของไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide Degussa P25)	55
4.8 รามานสเปกตรัมของยางธรรมชาติ	56
4.9 XRD pattern ของกราฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO)	57
4.10 XRD pattern ของไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide Degussa P25)	58
4.11 XRD pattern ของยางธรรมชาติ	58
4.12 อนุภาคนาโนซิลเวอร์ (a) อนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ (c) และอนุภาคของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (b)	59
4.13 FT-IR spectra ของแผ่นยางผสมไทเทเนียม แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/ รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ และแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ ซิลเวอร์นาโน ในปริมาณ 0.12 และ 0.21 wt. %	60
4.14 รามานสเปกตรัมของ แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (a) แผ่นยางผสมไทเทเนียมได- ออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (b) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ซิลเวอร์นาโนปริมาณ 0.12 wt.% (c) และแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีน ออกไซด์/ซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณ 0.21 wt.% (d)	61
4.15 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของ (a) NR+TiO ₂ (b) NR+TiO ₂ +rGO (c) NR+TiO ₂ +rGO+AgNPs.....	62
4.16 XRD pattern ของแผ่นยางธรรมชาติ (e) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (a) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (b) แผ่นยางผสมไทเทเนียมได- ออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ซิลเวอร์นาโนปริมาณ 0.12 wt. % (c) และแผ่นยาง ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ ซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณ 0.21 Wt. % (c)...	63
4.17 ลักษณะสัญญาณของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (a) และแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ซิลเวอร์นาโน 0.02 wt. % (b) 0.12 wt. % (c) และ 0.21wt. % (d) ที่กำลังขยาย x 500 เท่า.....	64
4.18 ลักษณะสัญญาณของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (a) และแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ซิลเวอร์นาโน 0.02 wt. % (b) 0.12 wt. % (c) และ 0.21wt. % (d) ที่กำลังขยาย x 1000 เท่า.....	65
4.19 ลักษณะสัญญาณของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (a) และแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ซิลเวอร์นาโน 0.02 wt.% (b) 0.12 Wt. % (c) และ 0.21wt. % (d) ที่กำลังขยาย x 3000เท่า.....	65
4.20 ลักษณะสัญญาณของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (a) และแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ซิลเวอร์นาโน 0.02 wt. % (b) 0.12 wt. % (c) และ 0.21wt. % (d) ที่กำลังขยาย x 6000 เท่า.....	66
4.21 EDX Spectrum ของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์	67
4.22 EDX Spectrum ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 EDX Spectrum ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ ซิลเวอร์นาโนปริมาณ 0.12 Wt.%	69
4.24 EDX Spectrum ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ ซิลเวอร์นาโนปริมาณ 0.21 Wt. %	70
4.25 เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ TGA ของแผ่นยางธรรมชาติ แผ่นยางผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์ แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ และแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ซิลเวอร์นาโน ที่ปริมาณ 0.12 wt. %	71
4.26 กราฟแสดงการวิเคราะห์ TGA เปรียบเทียบระหว่างแผ่นยางธรรมชาติ และแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ซิลเวอร์นาโน ที่ปริมาณ 0.12 wt. %.....	72
4.27 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างเวลาเก็บประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทีลีนบลู	74
4.28 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทีลีนบลูของ แผ่นยางผสมแต่ละชนิด	75
4.29 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างเวลาเก็บประสิทธิภาพใน การดูดซับสีย้อมเมทีลีนบลู.....	77
4.30 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทีลีนบลูของแผ่นยางผสม แต่ละชนิดภายใต้การฉายแสง visible	78
4.31 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม เมทีลีนบลูในที่มืด กับประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทีลีนบลูภายใต้แสง visible ของแผ่นยางผสมแต่ละชนิด	79
4.31 ภาพการทดสอบการยับยั้งเชื้อ <i>Escherichia coli</i> (a) และ <i>Staphylococcus aureus</i> (b) ของแผ่นยางธรรมชาติผสมแต่ละชนิด	80

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ในช่วงเวลาหลายปีที่ผ่านมาประเทศไทยได้มีการขยายตัวทางเศรษฐกิจส่งผลให้ภาคอุตสาหกรรมเพิ่มมากขึ้นด้วย อาทิเช่น อุตสาหกรรมเครื่องหนัง อุตสาหกรรมฟอกลีย้อม อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมกระดาษ เป็นต้น [1] ซึ่งอุตสาหกรรมต่างๆเหล่านี้ล้วนแล้วแต่เป็นอุตสาหกรรมที่มีการนำสีสังเคราะห์มาใช้ในกระบวนการผลิต และตกแต่งผลิตภัณฑ์ โดยพบว่าสีสังเคราะห์ที่ถูกนำมาใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆทั่วโลกรวมกันจะมีปริมาณมากกว่า 700,000 เมตริกตันต่อเมตร เมื่อสีสังเคราะห์ถูกนำมาใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมจะเกิดความสูญเสียขึ้นประมาณ 10-15% ในระหว่างกระบวนการที่มีการนำสีสังเคราะห์มาใช้ เช่น กระบวนการฟอกลีย้อม กระบวนการพิมพ์ และกระบวนการตกแต่งสำเร็จ เป็นต้น โดยสีสังเคราะห์จะถูกปล่อยลงสู่ธรรมชาติทำให้เกิดสารปนเปื้อนจำพวกสีย้อมในปริมาณสูง จึงส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทำให้ระบบนิเวศขาดความสมดุล และเกิดความเสื่อมโทรม ในที่สุดก็เกิดมลพิษทางน้ำ ซึ่งนับได้ว่าเป็นปัญหาที่รุนแรงที่พบเห็นได้ตามเมืองใหญ่ๆ [2] อย่างไรก็ตามทางด้านโรงงานอุตสาหกรรมจะมีการบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ เช่น กระบวนการทางกายภาพ กระบวนการทางเคมี และกระบวนการชีวภาพ การแลกเปลี่ยนไอออน การออกซิไดซ์และการดูดซับ เป็นต้น [3] แต่พบว่ากระบวนการต่างๆเหล่านี้ยังมีประสิทธิภาพไม่ดีพอที่ใช้ในการกำจัดสารพิษที่มีโครงสร้างซับซ้อน และมีเสถียรภาพสูง ดังนั้นนักวิจัยจึงได้พยายามคิดค้นหากระบวนการอื่นที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและดีกว่ามาใช้ในการกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำ

กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส คือกระบวนการเกิดปฏิกิริยาที่ใช้ตัวคะตะลิสต์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ โดยอาศัยการกระตุ้นด้วยแสง ตัวเร่งปฏิกิริยานี้ทำหน้าที่ลดพลังงานก่อกัมมันต์ของการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งความยาวคลื่นที่เหมาะสมที่สามารถกระตุ้นการทำงานของตัวเร่งจะอยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) หรือในช่วงแสงที่เห็นได้ด้วยตาเปล่า (Visible) เป็นแสงที่มีความยาวคลื่น (Wavelength) ระหว่าง 200 ถึง 800 นาโนเมตร การทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาก็คือ เมื่อมีพลังงานแสงที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับแถบพลังงาน (band gap) ภายในตัวเร่งจึงจะทำให้เกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส [4]

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นสารกึ่งตัวนำประเภท N-type ที่มีสมบัติฆ่าเชื้อโรคในรูปอนุภาคนาโนโดยกระบวนการจะใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต (แสงยูวี) ฉายลงไปยังไทเทเนียมไดออกไซด์จะเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่สามารถกำจัดสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำหรืออากาศที่สัมผัสกับพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้ ไทเทเนียมไดออกไซด์มีลักษณะเป็นผงสีขาวและทึบแสง เป็นวัสดุกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ คือ รูไทล์ (Rutile) อนาเทส (Anatase) และบรูคไคท์ (Brookite) [5] อย่างไรก็ตามการนำไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบผงมาใช้งานนั้นค่อนข้างยุ่งยากและก่อปัญหาตามมา เช่น การนำกลับมาใช้ซ้ำของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบผงจะต้องผ่านกระบวนการที่ยุ่งยากและซับซ้อน ปลิวไปในอากาศได้ง่ายเมื่อโดนลมพัดส่งผลให้เกิดอันตรายกับระบบหายใจ หรืออาจปนอยู่ในน้ำในรูปของสารแขวนลอย (suspension) แล้วไหลไปกับน้ำทำให้ยุ่งยากต่อการกำจัดและแยกเอาผงไทเทเนียมไดออกไซด์ออกไปจากระบบ จึงส่งผลเสียต่อระบบบำบัดและสิ่งแวดล้อมอีกทั้งยังส่งผลให้เกิดการ

สิ้นเปลืองเวลา และค่าใช้จ่ายจำนวนมากในการแยกไทเทเนียมไดออกไซด์ออกจากระบบ ดังนั้นนักวิจัยจึงได้พยายามคิดค้นหาวิธีใหม่ๆ เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบของผง รวมทั้งเพื่อให้ไทเทเนียมไดออกไซด์อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ที่กว้างขวางมากขึ้น โดยกระบวนการที่น่าสนใจเป็นการขึ้นรูปแบบแผ่นฟิล์ม คือการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ลงบนซับสเตรท (substrates) ต่างๆ เช่น แก้ว ไม้ อลูมิเนียม โลหะ และพอลิเมอร์ เป็นต้น [6] แต่พบว่ากระบวนการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ลงบนแผ่นซับสเตรทนั้นต้องใช้กระบวนการที่มีความยุ่งยากซับซ้อนใช้เครื่องมือที่มีเทคโนโลยีระดับสูงและราคาแพง ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้เป็นการเตรียมขึ้นรูปแบบแผ่นอย่างง่ายเพื่อสะดวกในการนำไปใช้งานในด้านคะตะลิสต์ จากงานวิจัยที่ผ่านมา มีการนำไทเทเนียมไดออกไซด์มาขึ้นรูปโดยนำผงไทเทเนียมไดออกไซด์ไปฝังในแผ่นยาง [7] แล้วนำไปใช้สลายสีย้อมพบว่าแผ่นยางที่เตรียมขึ้นสามารถสลายสีย้อมได้ และนำกลับมาใช้งานซ้ำได้ อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยข้างต้นพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมค่อนข้างช้าอีกทั้งใช้งานนานๆ แผ่นยางจะเริ่มเสื่อมสภาพไป ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและเสถียรภาพของแผ่นยางไทเทเนียมไดออกไซด์ จึงจำเป็นต้องมีการเติมแต่ง (Filler) ที่ช่วยแก้ปัญหาและเพิ่มประสิทธิภาพของแผ่นยางนี้

รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (Reduce Graphene Oxide; rGO) คือ อนุภาคพื้นฐานของสารประกอบคาร์บอน เป็นวัสดุสองมิติที่ประกอบด้วยอะตอมคาร์บอนจัดเรียงตัวกันอย่างหนาแน่นในแลตทิซแบบ หกเหลี่ยม ลักษณะคล้ายรังผึ้ง และมีไฮบริดเซชัน (Hybridization) แบบ sp^2 มีความหนาเพียง 1 อะตอม ซึ่งมีสมบัติหลายด้าน เช่น มีค่ายังมอดูลัสที่สูง มีความสามารถในการนำความร้อนจำเพาะสูง และเป็นตัวนำที่นำไฟฟ้าได้ดีเยี่ยม เป็นต้น [8] โดยนำกราฟีนออกไซด์ (Graphene oxide) มาทำปฏิกิริยารีดักชันกับ hydrazine hydrate (N_2H_4) จะได้รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ซึ่งหมู่ออกไซด์ส่วนใหญ่ที่อยู่บริเวณผิวของกราฟีนหลุดออก โดยงานวิจัยนี้จะใช้ rGO เป็นตัวช่วยในการส่งผ่านอิเล็กตรอน เพื่อลดการตกกลับของอิเล็กตรอน (electron hole pair recombination) ช่วยในการดูดซับและเป็น Active site ด้วย ส่งผลให้ประสิทธิภาพโฟโตคะตะไลซิสเพิ่มสูงขึ้น

เป็นที่ทราบกันว่าอนุภาคนาโนซิลเวอร์ (Silver nanoparticles) เป็นสารที่ใช้ในเรื่องการต่อต้าน และยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ทั้งแกรมลบ และแกรมบวกได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยอนุภาคนาโนซิลเวอร์จะกระจายอยู่ตามผนังเซลล์และแทรกเข้าไปภายในเซลล์ของแบคทีเรียทำให้เกิดเอ็นเอภายในเซลล์ซึ่งประกอบด้วยฟอสฟอรัสจำนวนมากรวมตัว และสูญเสียความสามารถในการเพิ่มจำนวน นอกจากนี้ยังพบว่า นาโนซิลเวอร์สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพโฟโตคะตะไลซิสของไทเทเนียมไดออกไซด์ให้ทำงานได้ดีภายใต้แสง visible ได้อีกด้วย โดยเกิดการดูดกลืนแสงผ่านปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ (Surface Plasmon Resonance; SPR) [9,10]

ดังนั้นการเตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่งเป็นการหลีกเลี่ยงการนำตัวเร่งปฏิกิริยานี้มาใช้ในรูปแบบที่เป็นผง และเป็นการหลีกเลี่ยงความสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายโดยไม่จำเป็นต้องกระบวนการนำมาใช้ใหม่หรือนำมาใช้งานซ้ำ เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสในการสลายสารพิษต่างๆ ในสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู ดังนั้นความสำคัญในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการเตรียมแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ และอนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยวิธีการอย่างง่าย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสมบัติโฟโตคะตะไลซิสในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสง Visible และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศึกษาคุณลักษณะเฉพาะรวมทั้งศึกษาความเป็นไปได้ในการยับยั้งแบคทีเรียของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ซิลเวอร์ขนาดอนุภาคนาโนเมตร

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาวิธีการและหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของการเติมซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตร ต่อแผ่นของผสมยางธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์
2. เพื่อศึกษาและตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของแผ่นของผสมยางธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/อนุภาคนาโนซิลเวอร์
3. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของแผ่นของผสมยางธรรมชาติไทเทเนียม-ไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/อนุภาคนาโนซิลเวอร์ ในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงวิสิเบิล (Visible light)
4. เพื่อศึกษาสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นของผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตร

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าเอกสารและรวบรวมผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการเตรียมแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ และซิลเวอร์ขนาดอนุภาคนาโนเมตร
2. เตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และซิลเวอร์ขนาดอนุภาคนาโนเมตรด้วยวิธีอย่างง่าย โดยจะศึกษาร้อยละปริมาณของซิลเวอร์ขนาดอนุภาคนาโนเมตรต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู ได้แก่ 0.02 0.08 0.12 0.17 และ 0.21 wt.%
3. ตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ และซิลเวอร์ขนาดอนุภาคนาโนเมตร ด้วยเทคนิคต่างๆ ได้แก่ UV-vis TEM XRD SEM FT-IR EDS TGA DRS และ Raman เป็นต้น
4. ทดสอบความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของแผ่นของผสมยางธรรมชาติไทเทเนียม-ไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ซิลเวอร์ขนาดอนุภาคนาโนเมตรในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล (Visible light)
5. ศึกษาสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นของผสมยางธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตร
6. วิเคราะห์ผลวิจัย อภิปรายผลการวิจัย สรุปผลการวิจัย เขียนรายงาน และนำเสนอผลงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รับองค์ความรู้เกี่ยวกับการเตรียมแผ่นของผสมยางธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์-กราฟีนออกไซด์/ซิลเวอร์ขนาดอนุภาคนาโนเมตร
2. ได้รับองค์ความรู้เกี่ยวกับเครื่องมือและเทคนิคต่างที่ใช้พิสูจน์เอกลักษณ์ของแผ่นของผสมยางธรรมชาตินี้
3. ได้แผ่นของผสมยางธรรมชาติที่มีสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่สามารถใช้งานได้ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล (Visible light) และมีสมบัติในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย
4. เป็นการลดต้นทุนและความยุ่งยากในการเตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียม/รีดิวซ์กราฟีน-ออกไซด์/ซิลเวอร์ขนาดอนุภาคนาโนเมตร ที่อยู่ในรูปที่เหมาะสม และสามารถนำไปใช้งานในการกำจัดสีย้อมสังเคราะห์ในน้ำได้
5. ช่วยเพิ่มมูลค่า และความหลากหลายของยางธรรมชาติในการนำมาใช้ประโยชน์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

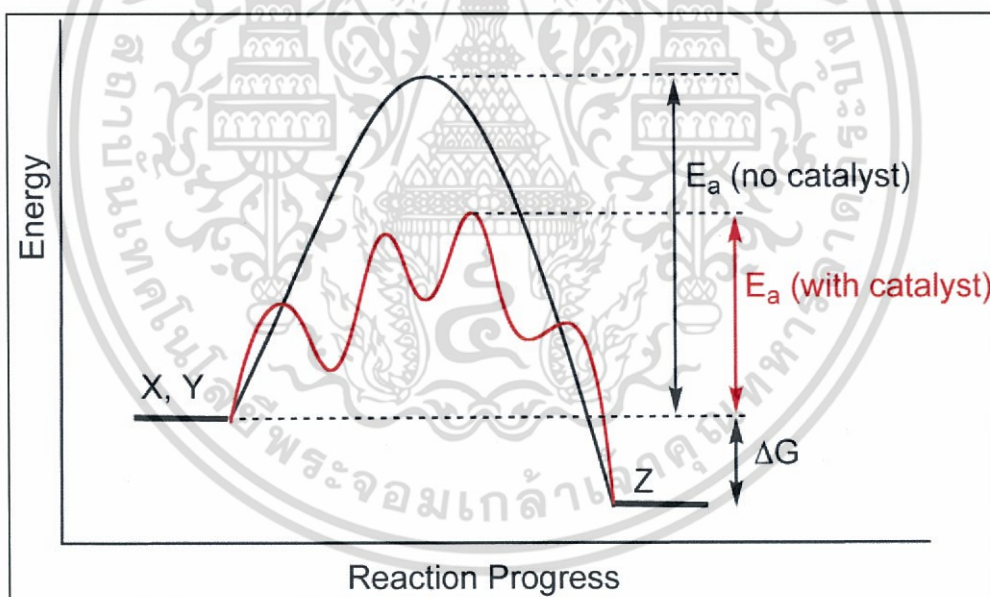
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปฏิกริยาโฟโตคะตะไลซิส

2.1.1 กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis)

กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis Process) เป็นปฏิกริยาโดยใช้ตัวคะตะไลสต์ซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกริยาได้ โดยการกระตุ้นด้วยแสง ตัวเร่งปฏิกริยานี้จะทำหน้าที่ลดพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกริยา ภาพที่ 2.1 แสดงการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation) ของสารอินทรีย์ที่มีและไม่มีตัวเร่งปฏิกริยา และแสดงพลังงานกระตุ้น (Activation Energy, E) ของปฏิกริยาที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกริยาซึ่งมีค่ามากกว่าในปฏิกริยาที่มีตัวเร่งปฏิกริยา และพลังงานของผลิตภัณฑ์จะต่ำกว่าพลังงานของสารอินทรีย์ พลังงานการกระตุ้นนี้จะลดลงในปฏิกริยาที่มีตัวเร่งปฏิกริยา ถึงแม้ว่าพลังงานของสารอินทรีย์ และผลิตภัณฑ์ยังคงเท่าเดิม ตัวเร่งปฏิกริยานี้จะเพิ่มอัตราเร็วของปฏิกริยา โดยการลดพลังงานกระตุ้นอีกทั้งตัวมันเองยังตอบสนองต่อแสง กล่าวคือจะเกิดการกระตุ้นโดยการถ่ายทอดพลังงานที่มีมากกว่าพลังงานแบนด์แก๊ป (Band Gap)



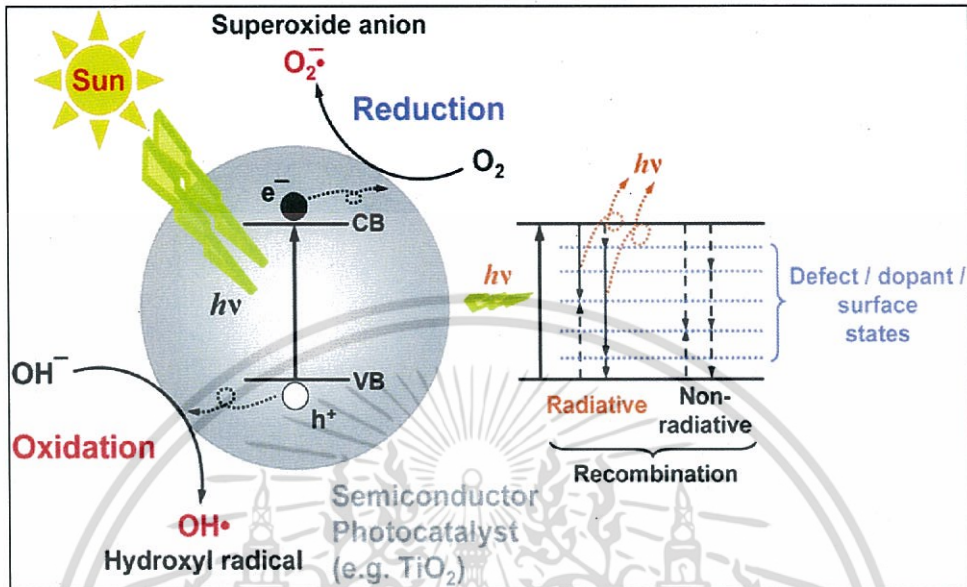
รูปที่ 2.1 พลังงานของการเกิดออกซิเดชันของสารอินทรีย์ [11]

2.1.2 หลักการของปฏิกริยาโฟโตคะตะไลซิส (Fundamental of photocatalyst reaction)

หลักการของกระบวนการนี้คือ การให้พลังงานแสงกับเซมิคอนดักเตอร์ (โฟโตคะตะไลสต์) มากกว่า หรือเท่ากับค่าพลังงานแบนด์แก๊ป (Band Gap Energy) เพื่อทำให้เกิดการกระตุ้นอิเล็กตรอนจากวาเลนซ์แบนด์ (Valence Band) ไปยังคอนดักชันแบนด์ (Conduction Band) ทำให้เกิดเป็น $e_{c.b.}^- - h_{v.b.}^+$ pair ขึ้น ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์และรีดิวซ์ที่แรงโดยศักย์ไฟฟ้าที่ $h_{v.b.}^+$ มีค่า +1.0 ถึง +3.5 โวลต์ ส่วน $e_{c.b.}^-$ มีค่า +0.5 ถึง -1.5 โวลต์ ทำให้สารพิษต่างๆ น้ำ และออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ $e^-_{c.b.} - h^+_{v.b.}$ pair และดูดซับที่ผิวเซมิคอนดักเตอร์ก็จะเกิดปฏิกิริยาทำให้สารพิษเกิดการสลายตัวได้ ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงกลไกกระบวนการเฮเทอโรจีเนียสโฟโตคะตะไลซิส [12]

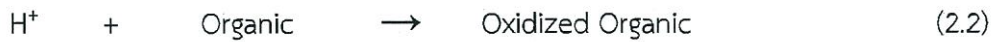
อย่างไรก็ตามในกระบวนการเฮเทอโรจีเนียสโฟโตคะตะไลซิสนิยมใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็น โฟโตคะตะไลสต์ เพราะมีความเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีและทางชีวภาพ รวมทั้งทนต่อการกัดกร่อนต่อสารเคมีและพลังงานแสง นอกจากนั้นยังมีราคาไม่แพง และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ในขณะที่โลหะซัลไฟด์จะไม่ทนต่อการกัดกร่อน ส่วนเพอริกออกไซด์ ถึงแม้ว่าจะมีราคาไม่แพงแต่ก็ไม่ทนต่อการกัดกร่อนเช่นกัน นอกจากไทเทเนียมไดออกไซด์แล้ว ที่นิยมรองลงมาคือ ซิงค์ออกไซด์ แต่จะมีข้อเสียคือ ไม่เสถียรต่อสารละลายเคมีบางชนิด และยังเกิด $Zn(OH)_2$ ที่ผิวของซิงค์ออกไซด์ทำให้ความสามารถในการเป็นโฟโตคะตะไลสต์ลดลง

2.1.3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

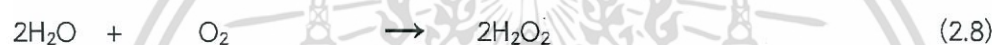
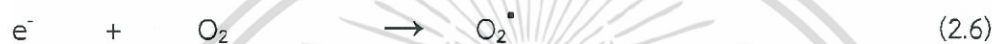
ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในการบำบัดสารอินทรีย์ แสดงดังสมการที่ (2.1) และสมการที่ (2.2) ซึ่งมีกลไกดังนี้ ส่วนที่ผิวของสารกึ่งตัวนำที่มีโฮลจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) และน้ำเกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl radical, OH^{\cdot}) ตัวอย่างดังแสดงในสมการที่ (2.4) และสมการที่ (2.5) ส่วนที่ผิวสารกึ่งตัวนำที่มีอิเล็กตรอน จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับออกซิเจนที่ดูดติดบนผิวสารกึ่งตัวนำ เกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล เอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Perhydroxy Radical, OH_2^{\cdot}) ดังสมการที่ (2.6) และสมการที่ (2.7) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) แสดงในสมการที่ (2.8) และสมการที่ (2.9) ในขณะที่สภาวะในการทดลองมีออกซิเจนที่ไม่เพียงพอ โฟตอนซึ่งเกิดจากการแตกตัวของน้ำจะเข้ามารับอิเล็กตรอนแทน เกิดเป็นไฮโดรเจนเรดิคัล (Hydrogen radical, H^{\cdot}) ดังสมการที่ (2.10) ไฮดรอกซิลเรดิคัลเป็นสารออกซิไดซ์หลักในการโฟโตคะตะไลซิส เพราะไฮดรอกซิลเรดิคัลเป็นสารที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาซึ่งรองจากฟลูออไรด์ไอออน (Fluoride, F^-) แต่สูงกว่าคลอไรด์ไอออน (Chloride, Cl^-) และทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์ได้ทุกชนิดการเกิดเรดิคัลต่างๆ แสดงไว้ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

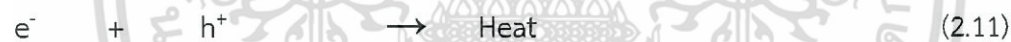
การบำบัดสารอินทรีย์



การกระตุ้น

การเกิดเรดิคอลลจาก e^-/h^+ 

การรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮล (Electron-Hole Recombination)



h^+ คือ โฮลที่วาเลนซ์แบนด์ (Valence Band Hole)

e^- คือ อิเล็กตรอน (Electron)

OH^- คือ ไฮดรอกซิลไอออน (Hydroxyl Ion)

OH^\bullet คือ ไฮดรอกซิลเรดิคอลล (Hydroxyl Radical)

H^+ คือ ไฮโดรเจนไอออน (Hydrogen Ion)

O_2 คือ โมเลกุลของออกซิเจนในอากาศ

O_2^\bullet คือ ซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคอลล (Superoxide Ion Radical)

OH_2^\bullet คือ เปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคอลล (Perhydroxyl Radical)

H_2O_2 คือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogenperoxide)

H^\bullet คือ ไฮโดรเจนเรดิคอลล (Hydrogen Radical)

เนื่องจากไฮดรอกซิลเรดิคอลลและโฮลที่มีวของตัวคะตะลิสต์ มีสมบัติเป็นประจุบวกการออกซิไดซ์ของโฮลกับไฮดรอกไซด์ไอออน ได้ไฮดรอกซิลเรดิคอลล และขณะเดียวกันโฮลเกิดจากการออกซิไดซ์กับสารอินทรีย์ด้วย ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโฟโตคะตะไลซิสจึงเกิดขึ้นได้ 2 ทาง คือ

1) การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโพลีไฮดรอกซิลไอออนหรือน้ำ

การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโพลีไฮดรอกซิลไอออนหรือน้ำ ได้ไฮดรอกซิลเรดิคัล และปฏิกิริยาของอิเล็กตรอนกับออกซิเจนหรือไฮโดรเจนไอออนได้ซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล เปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล หรือไฮโดรเจนเรดิคัล

2) การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตรงของสารอินทรีย์ที่ดูดติดบนตัวเร่งปฏิกิริยากับโพลี

การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตรงของสารอินทรีย์ที่ดูดติดบนตัวเร่งปฏิกิริยากับโพลี ซึ่งความสามารถของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์มีมากกว่าความสามารถของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนไทเทเนียมไดออกไซด์หรือตัวเร่งปฏิกิริยาอื่น

Kwaguchi และ Matthews [13] สรุปว่าการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของไทเทเนียมไดออกไซด์นั้น ตัวปฏิกิริยาหลักคือ ไฮดรอกซิลเรดิคัลกับสารอินทรีย์ ส่วนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโพลีกับสารอินทรีย์โดยตรงเป็นปฏิกิริยารองซึ่งเกิดได้น้อยกว่า ดังนั้นในโฟโตคะตะไลซิสมีการเกิดปฏิกิริยาของ ไฮดรอกซิลเรดิคัลและสารอินทรีย์จะเกิดได้ในตำแหน่งต่างๆดังนี้

- ไฮดรอกซิลเรดิคัลอยู่ที่ผิวและสารอินทรีย์อยู่ที่ผิวคะตะลิสต์
- ไฮดรอกซิลเรดิคัลไม่อยู่ที่ผิวแต่สารอินทรีย์อยู่ที่ผิวคะตะลิสต์
- ไฮดรอกซิลเรดิคัลอยู่ที่ผิวแต่สารอินทรีย์ไม่อยู่ที่ผิวคะตะลิสต์
- ไฮดรอกซิลเรดิคัลไม่อยู่ที่ผิวและสารอินทรีย์ไม่อยู่ที่ผิวคะตะลิสต์

2.2 พลังงานแสง

การฉายแสงในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสนั้น เป็นการให้พลังงานกับระบบในรูปแบบของพลังงานโฟตอน (Photon Energy) มากพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาขึ้นได้ ซึ่งพลังงานดังกล่าวนี้เรียกว่า พลังงานควอนตัม สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้ [14]

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

เมื่อ E คือ พลังงานควอนตัม (Quantum Energy), จูล (J)

h คือ ค่าคงที่พลังค์ (Planck's Constant)
 $= 6.625 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

ν คือ ความถี่ของแสง, เฮิร์ตซ์ (Hz) หรือ s^{-1}

λ คือ ความยาวคลื่นแสง, นาโนเมตร (nm)

c คือ ความเร็วของคลื่นแสง

$$= 2.99 \times 10^8 \text{ เมตรต่อวินาที}$$

ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสที่ใช้สารไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวคะตะลิสต์นั้น เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีพลังงานแบนด์แก๊ปประมาณ 3.2 โวลต์ ดังนั้นการให้พลังงานกับระบบจึงต้องใช้พลังงานมากกว่าหรือเท่ากับพลังงานแบนด์แก๊ป ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจึงจะเกิดขึ้นได้ ซึ่งช่วงของแสง UV ที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 400 นาโนเมตร จะให้ค่าพลังงานที่มากกว่าหรือเท่ากับพลังงานแบนด์แก๊ปของไทเทเนียมไดออกไซด์ แต่เนื่องจากแสงอาทิตย์ที่ส่งมายังพื้นผิวโลกมีช่วงแสงที่เป็น UV เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปริมาณน้อยมาก คือ เฉพาะช่วง 350-400 นาโนเมตร เท่านั้น ปัจจุบันจึงมีงานวิจัยที่มุ่งเน้นการปรับปรุงไทเทเนียมไดออกไซด์ให้มีความสามารถที่จะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงแสงอาทิตย์ เพื่อลดการใช้หลอดไฟยูวีในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

2.3 ชนิดของโฟโตคะตะไลซิส

โฟโตคะตะไลซิสสามารถแยกได้ 2 ประเภท เมื่อพิจารณาจากสถานะของตัวคะตะลิสต์ ดังนี้

2.3.1 โฟโตคะตะไลซิสแบบเอกพันธ์ (Homogeneous Photocatalysis) เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวคะตะลิสต์ซึ่งมีสถานะเดียวกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด (โดยทั่วไปแล้วจะเป็นของเหลว) เช่นการย่อยสลาย 2,4-Dinitrofluorene โดยใช้ UV/H₂O₂

2.3.2 โฟโตคะตะไลซิสแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous Photocatalysis) เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการกำจัด หรือสลายสารพิษต่างๆในสิ่งแวดล้อม เช่น สารอะโรมาติก แอลกอฮอล์ คลอโรฟอร์ม ยาฆ่าแมลง โลหะหนัก และสีสังเคราะห์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการใช้สารเซมิคอนดักเตอร์ (Semiconductor Material) เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃) และเซอร์โคเนียมออกไซด์ (ZrO₂) หรือโลหะซัลไฟด์ มาเป็นตัวคะตะลิสต์

ข้อดี ของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous Photocatalysis)

- ใช้ต้นทุนต่ำและใช้เวลาน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นๆ
- เมื่อเทียบในระยะเวลาสั้นๆ วิธีนี้จะทำให้เกิดการสลายตัวสูง
- สามารถที่จะทำเป็นกระบวนการแบบต่อเนื่อง
- สามารถใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ได้

2.4 ชนิดของตัวคะตะลิสต์

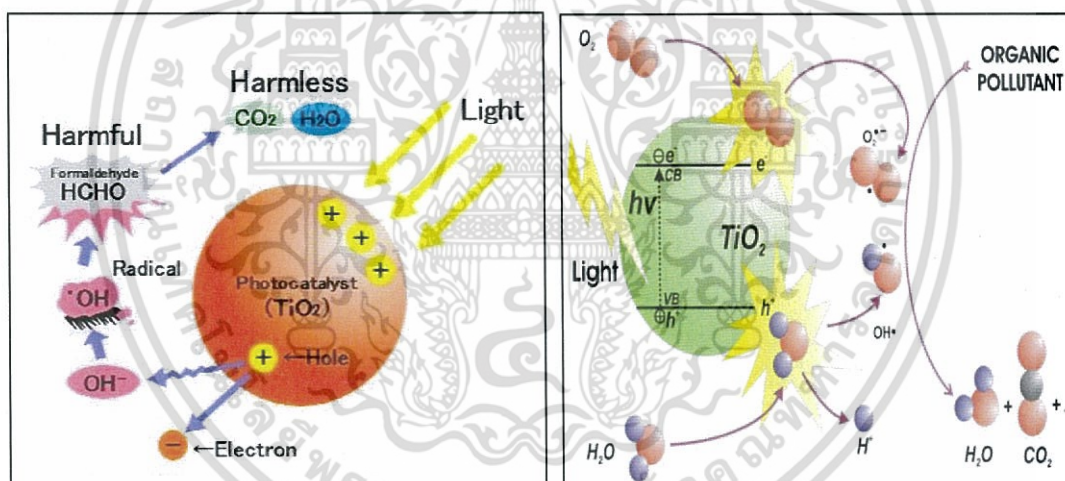
สารที่ใช้เป็นตัวคะตะลิสต์ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ได้แก่

- 1) โลหะทรานซิชัน (transition Metal) เช่น ทองแดง โครเมียม นิกเกิล เป็นต้น
- 2) สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) สังกะสีออกไซด์ (ZnO)

องค์ประกอบของโลหะตัวนำ และสารกึ่งตัวนำประกอบด้วยวาเลนซ์แบนด์ (Valence Band) และคอนดักชันแบนด์ (Conduction Band) ในโลหะตัวนำจะมีวาเลนซ์แบนด์และคอนดักชันแบนด์ติดกัน แต่ในสารกึ่งตัวนำวาเลนซ์แบนด์ และคอนดักชันแบนด์จะไม่ติดกัน โดยเกิดเป็นช่องว่างซึ่งเรียกว่าแบนด์แก๊ป (Band Gap) เมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นวาเลนซ์แบนด์ได้รับพลังงานแสง อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังคอนดักชันแบนด์ ในขณะที่เดียวกันที่บริเวณวาเลนซ์แบนด์จะเกิดโฮล (Hole, h⁺) ซึ่งเป็นประจุบวก สามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระในวาเลนซ์แบนด์ ส่วนคอนดักชันแบนด์ อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่มาจากวาเลนซ์แบนด์เคลื่อนที่อย่างอิสระทั่วคอนดักชันแบนด์เช่นกัน ปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล (Electron-Hole Pairs) สามารถเคลื่อนที่ไปมาระหว่างวาเลนซ์แบนด์และคอนดักชันแบนด์ได้ง่าย และรวดเร็วเพราะว่าไม่มีแบนด์แก๊ปเหตุนี้จึงเป็นสาเหตุให้ e⁻/h⁺ รวมตัวกันใหม่ได้ง่ายสำหรับโลหะตัวนำ ในทางตรงกันข้ามการรวมตัวกันใหม่ของ e⁻/h⁺ ในสารกึ่งตัวนำเกิดได้ยาก เพราะว่ามีแบนด์แก๊ปคั่นอยู่ทำให้ e⁻/h⁺ แยกจากกันได้นาน ข้อแตกต่างของ

พลังงานแบนด์แก๊ปของโลหะกึ่งตัวนำและฉนวนแยกได้ยากขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายปัจจัยได้แก่ ระดับพลังงานแบนด์แก๊ป ระดับพลังงานคอนดักชันแบนด์ และระดับพลังงานวาเลนส์แบนด์

ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในน้ำประกอบด้วยแสงที่ส่องผ่านน้ำไปยังตัวคะตะลิสต์ ซึ่งมีพลังงาน โฟตอนที่สูงกว่าพลังงานแบนด์แก๊ปของตัวคะตะลิสต์ ซึ่งอิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นจากวาเลนส์แบนด์ให้เคลื่อนที่ไปยังคอนดักชันแบนด์ ผลคือทำให้ e^-/h^+ ซึ่งจะวิ่งกระจายอยู่ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนผิวคอนดักชันแบนด์ และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในสารละลายเกิดขึ้นดังนี้ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากคอนดักชันแบนด์ไปยังตัวรับอิเล็กตรอน (Electron Acceptor) ในสารละลายจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ส่วนอีกด้านหนึ่งคือวาเลนส์แบนด์ซึ่งมี h^+ จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) โดยตัวสารละลายทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่คอนดักชันแบนด์ (Electron Donor) ในสภาวะปกติความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของอิเล็กตรอนที่คอนดักชันแบนด์ไม่มีประสิทธิภาพพอที่จะบำบัดสารอินทรีย์ได้ แต่เนื่องจากในระบบบำบัดมีออกซิเจนละลายน้ำอยู่ (O_2) ออกซิเจนนี้จะเป็นตัวรับ e^- เกิดปฏิกิริยารีดักชันเป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล (Superoxide Radical, $O_2^{\cdot-}$) ซึ่งเป็นตัวออกซิแทนซ์ที่แรงมาก สามารถเกิดปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ต่างๆได้ แต่ในทางตรงกันข้าม h^+ ที่วาเลนส์แบนด์เป็นตัวออกซิแดนซ์ที่แรงมากเช่นกัน



รูปที่ 2.3 รูปที่ 2.3 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ [15]

2.5 กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

ประกอบด้วยขั้นตอน 2 ขั้นตอนคือ

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

2.5.1 กระบวนการดูดติดผิว (Adsorption)

กระบวนการดูดติดผิวเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพและเคมี เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสารหรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวหรือระหว่างผิว (Interface) กระบวนการดูดติดผิวสามารถเกิดขึ้นที่ระหว่างผิวหน้าของ 2 สภาวะใดๆ เช่น ของเหลวกับก๊าซ ของเหลวกับของเหลว หรือของเหลวกับของแข็ง การดูดติดพื้นผิวเกี่ยวข้องกับการสะสมตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิว (Interface) โดยการแยกองค์ประกอบที่ต้องการออกจากสารละลายของเหลวหรือก๊าซจากสถานะที่เป็นของเหลวหรือก๊าซไปยังสถานะที่เป็นของแข็ง โดยโมเลกุลที่ถูกดูดติดผิวเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นตัวเกาะจับสารดูดติดผิว เรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent)

2.5.2 กระบวนการการฉายแสง (Irradiation)

เมื่อมีการฉายแสงด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) ในระดับที่มากกว่าหรือเท่ากับค่า Band Gap ตกกระทบลงบนอนุภาคของสารกึ่งตัวนำ แล้วจะมีอิเล็กตรอนเคลื่อนหลุดออก และกระโดดข้ามฝั่งของวาเลนส์แบนด์ไปยังฝั่งคอนดักชันแบนด์พร้อมๆกันนั้น ทางฝั่งของวาเลนส์แบนด์ก็เกิดช่องว่างขึ้น เรียกว่า โฮล ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของไทเทเนียมไดออกไซด์ควรมีความยาวคลื่นไม่เกิน 400 นาโนเมตร โดยช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ประมาณ 380 นาโนเมตร

2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการออกซิเดชันของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

2.6.1 ชนิดของสารพิษ (Type of Pollutions)

สารพิษแต่ละชนิดมีศักยภาพในการถูกสลายแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดและองค์ประกอบของสารพิษชนิดนั้นๆ อย่างเช่น Prairie, และคณะ [16] ได้ทำการทดสอบการกำจัดโลหะหนัก 6 ชนิด คือ เงิน แคดเมียม ทองแดง ปรอท นิกเกิล และแพลทินัม พบว่ากระบวนการโฟโตคะตะไลซิสที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถกำจัดปรอทและทองแดงได้ ส่วนตัวอื่นนั้นต้องใช้กระบวนการที่ยุ่งยากในการกำจัด

2.6.2 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา (Type of Catalyst)

สารกึ่งตัวนำที่นำมาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสมีหลายชนิดแต่ที่นิยมนำมาใช้คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ เพราะมีคุณสมบัติที่ดีคือ มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ ราคาถูก ไม่เป็นพิษ ทนต่อการกัดกร่อน มีพื้นที่ผิวมาก มีแบนด์แก๊พกว้าง จึงสามารถป้องกันการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนกับโฮลได้ดี นอกจากนี้ยังสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้หลายครั้ง

การนำสารกึ่งตัวนำมาใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสแบบต่างสถานะ สามารถพิจารณาได้ 2 แบบ ดังนี้

1. แบบแขวนลอย (Slurry) เป็นการนำสารกึ่งตัวนำมาผสมกับสารละลายอินทรีย์ โดยสารกึ่งตัวนำจะแขวนลอยอยู่ในสารละลาย แบบนี้จะประสบปัญหาในการแยกสารกึ่งตัวนำออกจากน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดแล้ว ซึ่งปัจจุบันยังไม่มียุทธวิธีการแยกสารกึ่งตัวนำแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพเท่าที่ควร
2. แบบเคลือบผิว (Immobilize) เป็นกระบวนการนำสารกึ่งตัวนำเคลือบลงบนตัวกลางหรือที่ผิวของปฏิกิริยา แบบเคลือบผิวจะสะดวกกว่าการทำแบบแขวนลอย เนื่องจากไม่ต้องแยกสารกึ่งตัวนำออกจากน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดแล้ว แต่การศึกษาที่ผ่านมามีพบว่าการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดอนาเทสแบบเคลือบผิวให้ประสิทธิภาพต่ำกว่าแบบแขวนลอยภายใต้สภาวะเดียวกัน

2.6.3 ปริมาณตัวกระตุ้น (Catalyst Dosage)

ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสได้ ถ้าหากอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์มากเกินไป จะไปขัดขวางแสงยูวีที่ส่องลงไปโดยสารละลายทำให้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกกระตุ้นด้วยแสง และปริมาณของไฮดรอกซิลเรดิคอลลดลง ซึ่งปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสส่วนใหญ่จะมีปริมาณความเข้มข้น 1-5 กรัมต่อลิตร

2.6.4 ความเข้มแสง (Light Intensity)

ปริมาณความเข้มแสงต่อการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มแสงมากขึ้นจะทำให้เกิดอัตราการย่อยสลายเพิ่มขึ้น

2.6.5 อุณหภูมิ (Temperature)

การเพิ่มอุณหภูมิทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเกิดอิเล็กตรอนกับโฮลมีมากกว่าการรวมตัวกัน ทำให้โมเลกุลเกิดการชนกันบ่อยครั้งขึ้น และช่วยลดพลังงานการกระตุ้นของปฏิกิริยา แต่การเพิ่มขึ้นของอัตราการเกิดปฏิกิริยาก็ไม่ได้เกิดขึ้นทุกช่วงของการเพิ่มอุณหภูมิ โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่อช่วงอุณหภูมิเพิ่มขึ้นไม่เกิน 21 องศาเซลเซียส

2.6.6 ปริมาณของออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (Dissolved, DO)

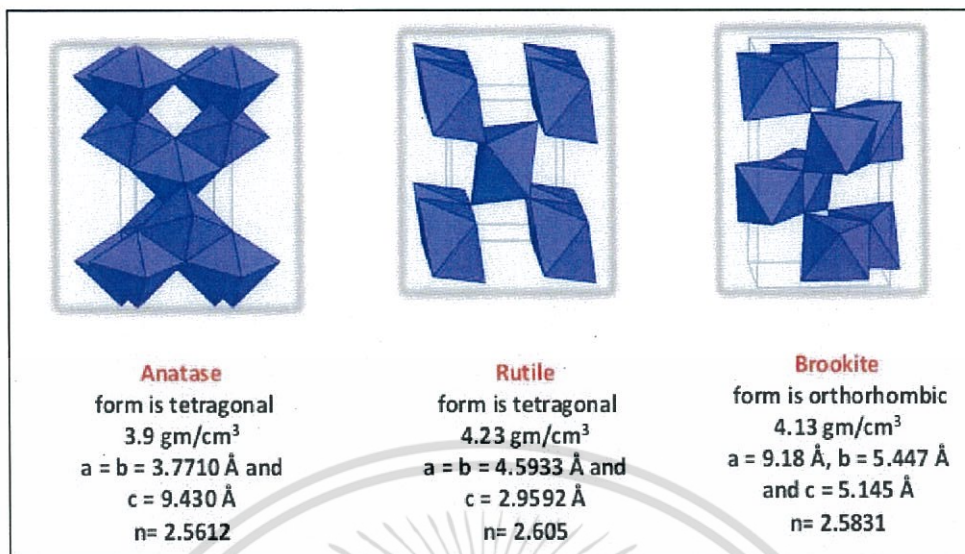
ออกซิเจนที่ละลายในน้ำและตัวรับอิเล็กตรอนอื่นๆ จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีโมเลกุลที่จะเข้าทำปฏิกิริยากับโฮลได้เป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคอลลเพิ่มมากขึ้น และทำให้อิเล็กตรอนกับโฮลเกิดการรวมตัวกันได้ยากขึ้น

2.6.7 ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

พีเอชมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดสารอินทรีย์ โดยพบว่าในสภาวะที่เป็นด่างมีอัตราการย่อยสลายของสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น เพราะว่าเป็นการเพิ่มไฮดรอกไซด์ไอออน และเกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคอลลที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้น

2.7 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide, TiO_2)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide) หรือไทเทเนีย (Titania) มีลักษณะเป็นผงสีขาวมีมวลโมเลกุล 79.9 กรัมต่อโมล เป็นสารกึ่งตัวนำประเภท N-type มีคุณสมบัติเป็นสารเคมีที่เสถียรต่อปฏิกิริยาเคมีไม่เป็นพิษ และราคาไม่แพง ไทเทเนียมไดออกไซด์มีผลึก 3 แบบ คือ รูไทล์ (Rutile) อนาเทส (Anatase) และบรูคไคท์ (Brookite) มีโครงสร้างผลึกดังแสดงในรูป 2.4



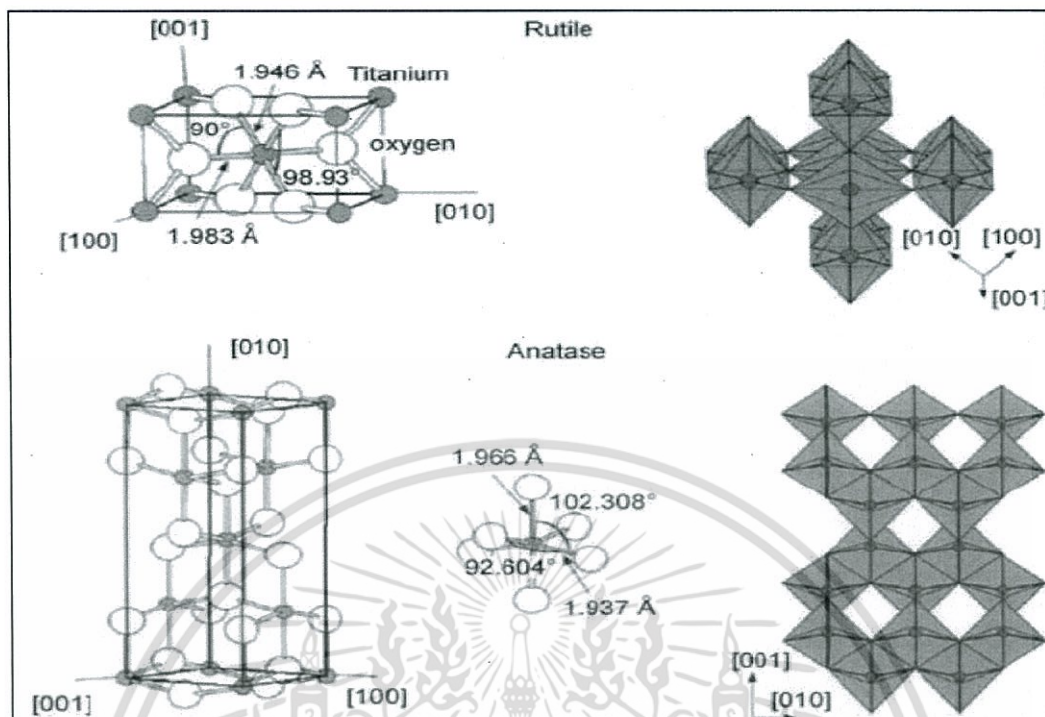
รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างไทเทเนียมไดออกไซด์มีผลึก 3 แบบ คือ รูไทล์ อนาเทส และบรูคไคท์ [17]

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพที่สำคัญของไทเทเนียมไดออกไซด์

สมบัติที่ศึกษา	Rutile	Anatase	Bookite
โครงสร้างผลึก	Tetragonal	Tetragonal	Orthorhombic
ความหนาแน่น g/cm ³	4.25	3.894	4.170
Hardness Mohs scale	5.5-6.0	5.5-6.0	7.0-7.5
ดัชนีหักเห	2.71	2.52	-
จุดหลอมเหลว	1858 °C	เปลี่ยนเป็นรูไทล์เมื่ออุณหภูมิสูง	-
ช่องว่างแถบพลังงาน	3.0 eV	3.2 eV	-

(ที่มา: อูชา สุขขา, 2551)[18]

ขนาดมิติของรูปทรงของโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ a=b=4.587 °A, c=9.502 °A ในโครงสร้างทั้งคู่เป็นรูปทรงแปดเหลี่ยมบิดเบี้ยวบาง ความยาวของพันธะ และมุมของรูปทรงแปดเหลี่ยมที่ประสานกับอะตอมของ Ti ดังรูป (ด้านซ้าย) และโครงสร้างที่เป็นรูปทรงแปดหน้าตั้งรูป (ด้านขวา)



รูปที่ 2.5 แสดงมิติของรูปทรงของโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ และอนาเทส [19]

ผลึกแต่ละแบบของไทเทเนียมไดออกไซด์มีความสามารถในการเป็นโฟโตคะตะลิสต์แตกต่างกัน โดยอนาเทสมีความสามารถในการเป็นคะตะลิสต์ดีกว่ารูไทล์และบรูคไคท์ โดยโครงสร้างผลึกที่นำมาใช้สำหรับกำจัดสีย้อมสังเคราะห์ คือ โครงสร้างแบบอนาเทส และรูไทล์ มีการจัดเรียงตัวของอะตอมไทเทเนียมเป็นแบบ Orthorhombic และอะตอมออกซิเจนเข้าไปเติมเต็มในช่องว่างแบบ Octahedron โดยที่มุมระหว่างแกนของ Octahedron ในแบบของรูไทล์มีค่าเท่ากับ 90 และ 81.21 องศา ในขณะที่มุมระหว่างแกนเท่ากับ 78.12 และ 92.43 องศา โดยโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสและแบบรูไทล์นั้น มีความแตกต่างทางด้านหักเหของแสง ความหนาแน่น และการทำปฏิกิริยาของแสงแบบรูไทล์มีรูปผลึกที่แน่นอน สามารถดูดกลืนแสงยูวีได้น้อยกว่าแบบอนาเทส และแบบรูไทล์มีลักษณะค่อนข้างสี่เหลี่ยม สำหรับการนำไทเทเนียมไดออกไซด์ไปใช้กับแสงที่มีความเข้มข้นสูง เพราะวาทันการหักเหสูง และการกระจายของแสงของผลึกแบบรูไทล์ มีผลกระทบในตัวกลางสารอินทรีย์มากกว่าแบบอนาเทส ประมาณ 20% นอกจากนี้การศึกษาการสลายสีสังเคราะห์ชนิดต่างๆ โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นคะตะลิสต์ พบว่าการสลายสีสังเคราะห์ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ชนิดของไทเทเนียมไดออกไซด์ ค่าพีเอชของสารละลายสีสังเคราะห์ ความเข้มข้นของคะตะลิสต์ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีสังเคราะห์ และความเข้มของแสงยูวี เป็นต้น [20]

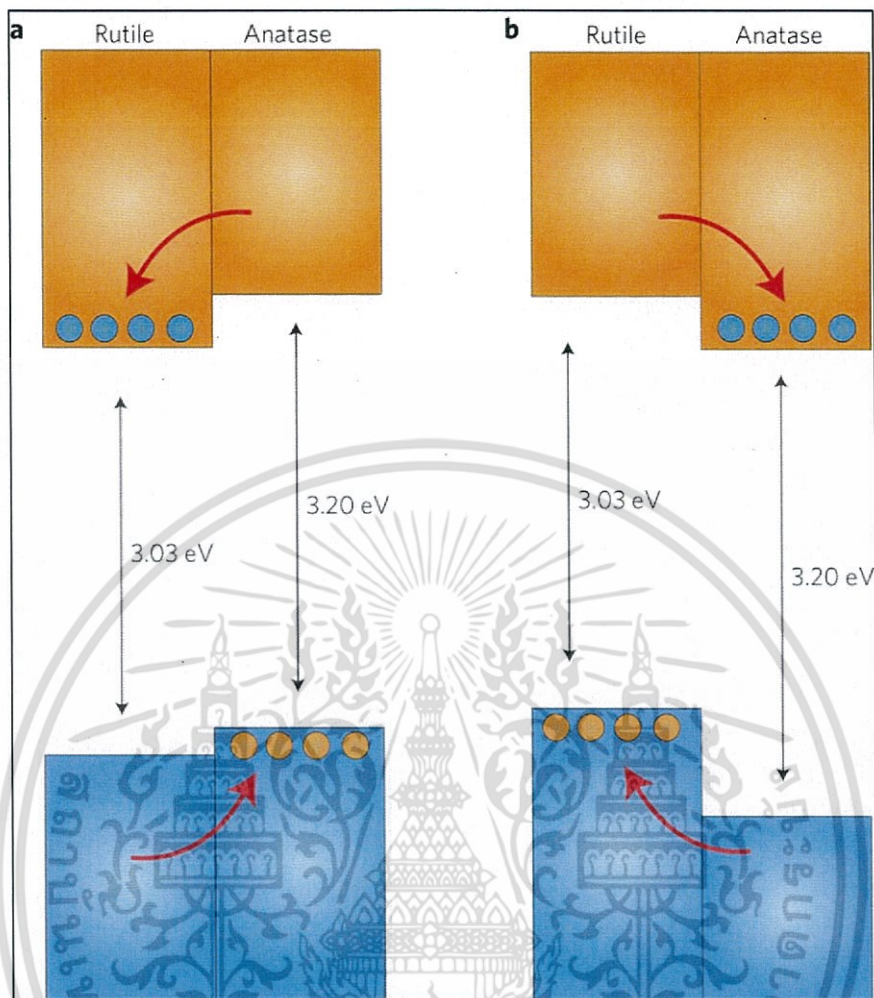
จากการที่ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันนั้น ส่งผลทำให้มีคุณสมบัติที่ต่างกันอย่างเห็นได้ชัด เมื่อพิจารณาทางด้านเทอร์โมไดนามิกส์ พบว่าพลังงานเสรีของกิบส์ (Gibbs Free Energy) ของการเกิดที่สภาวะมาตรฐาน สำหรับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส มีค่า -884.5 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งมากกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบรูไทล์ที่มีค่าเท่ากับ -889.5 กิโลจูลต่อโมล อีกทั้งความหนาแน่นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสมีค่าเท่ากับ 3.894 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร คุณสมบัติที่ต่างกันอย่างนี้ดังกล่าวทำให้โครงสร้างผลึกของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบอนาเทสนั้นมีค่าพลังงานแบนด์แก๊ปเท่ากับ 3.23 โวลต์ ซึ่งมีค่าสูงกว่าโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์มีค่าเท่ากับ 3.02 โวลต์ จึงทำให้โครงสร้างผลึกแบบรูไทล์มีค่าวงเวในการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ โครงสร้างผลึกแบบรูไทล์จะเกิดการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮลได้ง่าย ทั้งยังมีความสามารถในการติดผิวต่ำกว่าโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส ในปัจจุบันจึงนิยมใช้โครงสร้างผลึกแบบอนาเทสมากกว่าแบบอื่น โครงสร้างผลึก ขนาดอนุภาค ผิวหน้าผลึก ปริมาณการรวมตัวเป็นผลึก และความบริสุทธิ์ของกระบวนการผลิตถูกควบคุมให้เหมาะสมกับการใช้งาน ไทเทเนียมไดออกไซด์มีลักษณะทางเคมีที่ดี ทำให้มีผลข้างเคียงน้อยมาก จึงปลอดภัยและใช้งานง่าย

2.7.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide Degussa P25)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 เป็นไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดหนึ่งที่มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสมากที่สุด มีเฟสที่เป็นผลึกอยู่ด้วยกัน 2 เฟส คือ อนาเทส และรูไทล์ โดยอัตราส่วนของสองเฟสนี้จะอยู่ที่ประมาณ 70:30 หรือ 80:20 ดังรูปที่ 2.5 และเนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 มีการเชื่อมต่อกันระหว่างสองเฟส จึงทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 มีระดับพลังงานการกระตุ้นในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่สูง เนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮลเกิดการแยกออกจากกันได้ดี จึงเพิ่มความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสให้สูงขึ้น และลดการเกิดการรวมตัวกัน (Recombination) ทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงมีความสามารถในการสลายสีสังเคราะห์ได้ดีมากขึ้น



รูปที่ 2.6 แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิส และแสดงอัตราส่วนของเฟสอนาเทส และรูไทล์ ในไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 [21]

2.7.2 ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ (Amorphous Titanium Dioxide, Am-TiO₂)

ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดที่ไม่มีผลึกหรือเป็นแบบอสัณฐาน สามารถเตรียมได้จากไทเทเนียมเตตระคลอไรด์กับสารละลายแอมโมเนียเจือจาง โดยเติมสารละลายแอมโมเนียเจือจางลงในไทเทเนียมเตตระคลอไรด์อย่างช้าๆ แล้วรอตกตะกอนเป็นสีขาวแล้วล้างด้วยน้ำกลั่น จะได้ไทเทเนียมไดออกไซด์อสัณฐานออกมา

2.8 ประโยชน์ของไทเทเนียมไดออกไซด์

1) ความสามารถในการต้านแบคทีเรียและฆ่าเชื้อโรค

ไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่เพียงแต่ฆ่าเชื้อแบคทีเรีย (Bacteria) ได้เท่านั้น แต่ยังช่วยในการย่อยสลายซากของมันด้วย เพราะไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นสารเร่งปฏิกิริยาดูดแสงนั้น มีประสิทธิภาพสูงกว่าสารต้านแบคทีเรียชนิดอื่นๆ เนื่องจากปฏิกิริยาจะทำงานเมื่อมีเซลล์แบคทีเรียสัมผัสกับพื้นผิว หรือเมื่อแบคทีเรียสัมผัสกับพื้นผิว หรือเมื่อแบคทีเรียแพร่กระจายไปบนพื้นผิว นอกจากนี้สารพิษที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้กับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นว่าเป็นประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดจากการตายของเซลล์ก็จะถูกทำลายจากการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วย และที่สำคัญจะไม่เกิดการเสื่อมประสิทธิภาพหลังจากที่ทำลายเชื้อแบคทีเรีย ทำให้ประสิทธิภาพในการใช้งานที่ยาวนาน โดยทั่วไปเมื่อกล่าวถึงประสิทธิภาพด้านการยับยั้งหรือต่อต้านการติดเชื้อ ไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีความสามารถมากกว่า คลอรีน 3 เท่า และมากกว่าไอโซน 1.5 เท่า

2) ความสามารถในการกำจัดกลิ่น

ด้านการกำจัดกลิ่นนั้น มีอนุภาคไฮดรอกซิลไอออนที่เกิดจากไทเทเนียมไดออกไซด์ สามารถกำจัดโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ระเหยอยู่ในอากาศ (Volatile Organic Compounds หรือ VOCs) อันเป็นสาเหตุของกลิ่นไม่พึงประสงค์ได้ โดยการทำลายพันธะระหว่างโมเลกุลของสารเหล่านั้น ด้วยวิธีการนี้จะทำให้สารอินทรีย์ที่ระเหยในอากาศแตกออกเป็นโมเลกุลเดี่ยวจึงไม่สามารถทำอันตรายหรือส่งผลกระทบต่อร่างกายมนุษย์ได้ นอกจากนี้ยังมีประสิทธิภาพในการฟอกอากาศให้สะอาด โดยการกำจัดโมเลกุลของสารที่ทำให้เกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์ตัวอย่างเช่น กลิ่นบุหรี กลิ่นยาสูบ สารประเภท ฟออร์มาดีไฮด์ ไนโตรเจนไดออกไซด์ ยูเรีย กลิ่นอูจจาระ น้ำมันเชื้อเพลิง และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอีกหลายชนิดในอากาศ ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถทำให้อากาศสะอาดจากควีน เกสรดอกไม้ แบคทีเรีย และไวรัส รวมถึงกำจัดอันตราย ด้วยคุณสมบัติของการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

3) ความสามารถในการฟอกอากาศ

ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงจะสามารถกำจัดสารที่ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศได้ เช่น สารประกอบไนโตรเจน ควีนบุหรี รวมถึงสารระเหยต่างๆ ที่ออกมาจากอาคาร รวมทั้งโครงสร้างของตึกได้ นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันเขม่า และคราบดำต่างๆ ที่จะเกาะบนผนังบ้าน รวมถึงช่วยกำจัดสารประเภทที่ทำลายชั้นบรรยากาศ เช่น ก๊าซคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFC) และก๊าซเรือนกระจกประเภทอื่น รวมถึงก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ทั้งทางตรงและทางอ้อม เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแสง ในบริเวณที่มีมลภาวะสูง ไทเทเนียมไดออกไซด์จะช่วยลดสารก่อมลภาวะเหล่านี้ได้

4) ความสามารถในการทำความสะอาดตัวเอง

ผนังด้านนอกของอาคารที่ถูกปกคลุมด้วยคราบเขม่าจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ ที่มีส่วนประกอบเป็นน้ำมัน เมื่อผนังตึกถูกทาด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งมีสมบัติการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง จะทำให้ผนังมีคุณสมบัติในการทำความสะอาดตัวเอง โดยเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง ไทเทเนียมไดออกไซด์จะทำลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอน รวมทั้งฝุ่นผงต่างๆ ที่เกาะติดอยู่กับผนัง และถูกชะล้างออกจากผนังอย่างง่ายได้เมื่อฝนตกลงมา ทำให้ผนังตึกดูสะอาดและใหม่อยู่เสมอ

5) ความสามารถในการทำน้ำสะอาด

สารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ ร่วมกับรังสีอัลตราไวโอเล็ต สามารถกำจัดสารอินทรีย์ที่ก่อมลภาวะให้กลายเป็นสารที่ไม่เป็นอันตรายได้ เช่น ทำให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ รวมถึงมีคุณสมบัติในการต้านแบคทีเรีย เทคโนโลยีนี้มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารอินทรีย์อันตราย และช่วยฆ่าแบคทีเรียหลายชนิดรวมถึงไวรัสในขั้นตอนที่สองของการบำบัดน้ำเสีย โครงการต้นแบบแสดงให้เห็นว่า กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงนั้นมีประสิทธิภาพสูงในการฆ่าแบคทีเรีย *Escherichia coli* ซึ่งเป็นแบคทีเรียในอุจจาระที่ปนเปื้อนในน้ำได้เป็นอย่างดี ซึ่งสามารถนำไปใช้ได้เป็นอย่างดีในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย

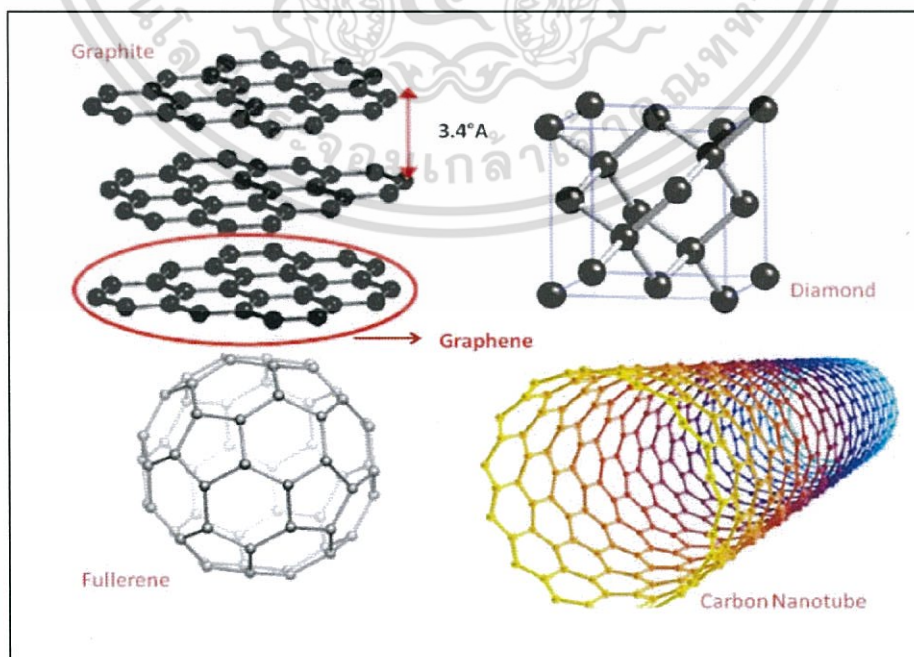
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) ความสามารถด้านพลังงานแสงอาทิตย์

ไทเทเนียมไดออกไซด์จัดเป็นสารที่อยู่ในกลุ่มของเซมิคอนดักเตอร์ มีการนำไปใช้เป็น ส่วนประกอบในโซลาเซลล์มากขึ้น เช่น นำไปเคลือบบนอิเล็กทรอนิกส์เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น ราคาของโซลาเซลล์ค่อนข้างแพง เพราะกระบวนการผลิตต้องใช้ต้นทุนสูง และให้ประสิทธิภาพต่ำเมื่อเทียบกับปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ทำให้มีขีดจำกัดในการใช้งาน ดังนั้นจึงมีงานวิจัยและพัฒนาการทำโซลาเซลล์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น การนำเจอร์เมเนียม (Ge) ผสมลงไปไนไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อเป็น Quantum dot ในโซลาเซลล์ การนำซิลิคอนและไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบลงบน Si โซลาเซลล์ เพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆให้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์ให้อยู่ในรูปของท่อนาโนที่ผลิตด้วย Rf sputtering สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของโซลาเซลล์ได้เช่นกัน โดยเพิ่ม Electron lifetime และประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้อย่างต่อเนื่อง

2.9 รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (Reduce Graphene Oxide)

รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (Reduce Graphene Oxide) เป็นวัสดุสองมิติที่ประกอบด้วยอะตอมคาร์บอนจัดเรียงตัว กันอย่างหนาแน่นในแลตทิซแบบหกเหลี่ยม ลักษณะคล้ายรังผึ้ง และมีไฮบริด-เซชัน (Hybridization) แบบ sp^2 มีความหนาเพียง 1 อะตอม หรืออาจกล่าวได้เป็นชั้นเดียวของแกรไฟต์ หรือประมาณ 0.335 nm และเป็นอัญรูปพื้นฐานของสารประกอบคาร์บอนอื่นๆ ได้แก่แกรไฟต์, คาร์บอน นาโนทิวป์ และฟูลเลอร์ีน ดังที่แสดงในรูปที่ 2.7 เป็นวัสดุสารกึ่งโลหะ หรือเป็นสารกึ่งตัวนำที่ไม่มีแถบช่องว่างพลังงานมีความสัมพันธ์ของพลังงานกับเวกเตอร์คลื่นของอนุภาคพาหะ (charge carriers) ในโซนบริลลูวอน (Brillouin zone) เป็นแบบเชิงเส้น จึงทำให้รีดิวซ์กราฟีนมีความแตกต่างจาก วัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น และทำให้เกิดสมบัติทางไฟฟ้าที่มีลักษณะเฉพาะตัว มวลยังผล (Effective mass) ของอิเล็กตรอนและโฮลในรีดิวซ์กราฟีนเป็นศูนย์

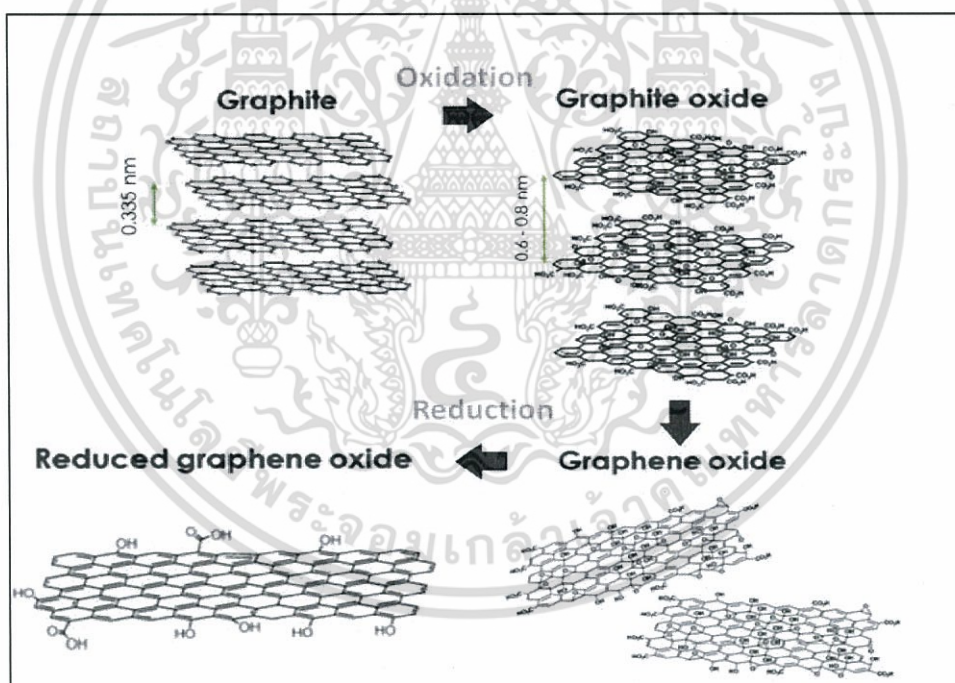


รูปที่ 2.7 อัญรูปพื้นฐานของสารประกอบคาร์บอน [22]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเข้าถึงของนักศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นแก่ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.1 การเตรียมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

งานวิจัยนี้ได้เตรียมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ซึ่งใช้วิธีในการเตรียมอย่างง่าย โดยเริ่มจากการใช้กราไฟต์ (Graphite) เป็นสารตั้งต้น แล้วผ่านกระบวนการตัดแปลงกระบวนการของฮัมเมอร์ (Modified Hummer's method) เพื่อเปลี่ยนให้เป็นกราไฟต์ออกไซด์ (Graphite oxide) ที่มีหมู่ฟังก์ชันต่างๆ แทรกอยู่ตามระนาบของกราไฟต์ ทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นของ กราไฟต์นั้นกว้างมากขึ้น เมื่อนำกราไฟต์ออกไซด์มาผ่านกระบวนการโซนิเคชัน (Sonication process) ในตัวทำละลาย (น้ำกลั่น) จะทำให้แต่ละชั้นที่จากเดิมเกาะกันหลุดลอกออกมาได้เป็นสารแขวนลอยของแผ่นนาโนกราฟีนออกไซด์ (Graphene oxide nanosheets) แต่เนื่องจากคุณสมบัติที่ดีกว่าในด้านการส่งผ่านอิเล็กตรอนของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ จึงต้องทำการรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วยกระบวนการรีดักชันทางเคมี และใช้ความร้อนช่วยในการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ไฮดราซีน (Hydrazine, N_2H_4) ที่เป็นสารรีดิวซ์เชิงเอเจนท์ ช่วยในกระบวนการรีดิวซ์ให้มีความรวดเร็วมากยิ่งขึ้น ภาพแสดงการเตรียมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์จากสารตั้งต้นแกรไฟต์ แสดงในรูปที่ 2.8 และใช้สารละลายแอมโมเนีย (Ammonia, NH_4OH) เป็นตัวช่วยในการรักษาเสถียรภาพของสารแขวนลอย รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ได้ไม่ให้จับตัวเป็นก้อนแล้วตกตะกอน



รูปที่ 2.8 แสดงการเตรียมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์จากสารตั้งต้นแกรไฟต์ โดยผ่านกระบวนการออกซิเดชัน โซนิเคชัน และรีดักชันตามลำดับ [23]

2.9.2 สมบัติและการใช้ประโยชน์จากรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

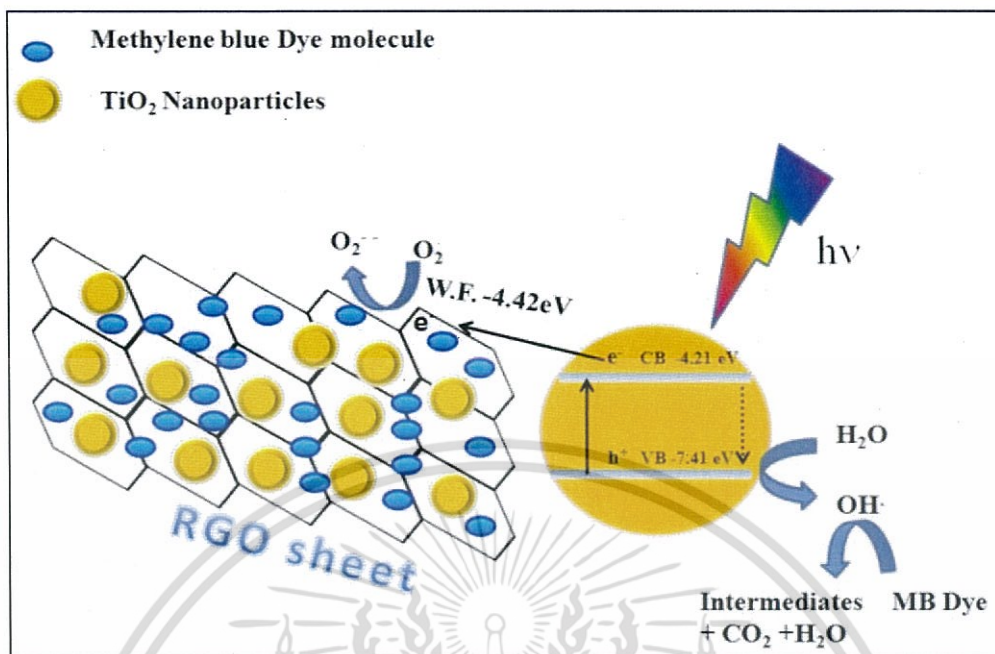
รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ มีคุณสมบัติที่ดีอยู่หลายประการ เช่น ความแข็งแรงและสมบัติเชิงกลสูง ความสามารถในการ นำไฟฟ้า น้ำหนักเบา รูปพรุนในโครงสร้างสูง เป็นต้น จึงถูกนำไปใช้ประโยชน์ในการทำเป็นขั้วไฟฟ้า ใช้ในงานอุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่ และอุตสาหกรรมผลิตเบรกรถยนต์ นอกจากนี้ยังใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีการผสมผสานที่เป็นเอกลักษณ์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของการนำไฟฟ้าสูง และความโปร่งใสของแสง ซึ่งทำให้มันเป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ แผ่นเดียวของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่มี band gap เป็นศูนย์ ที่ซึ่งตัวขนส่งประจุจะไม่ถูกกระจายไปทั่วพื้นที่ขนาดใหญ่ ซึ่งหมายความว่า การกระจัดกระจายของตัวขนส่งจะไม่เกิดขึ้น เนื่องจากวัสดุนี้จะดูดซับเพียง 2.3 % ของแสงที่ตามองเห็นเท่านั้น มันจึงเป็นตัวเลือกสำหรับการใช้งานในฐานะตัวนำไฟฟ้าโปร่งใส รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์สามารถประกอบขึ้นเป็นขั้วไฟฟ้าบางที่มีผิวเรียบ แต่ในทางปฏิบัติแผ่นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์บางๆ ที่ถูกผลิตผ่านกระบวนการสารละลายจะประกอบด้วยข้อบกพร่องของตาข่าย และจุดวงรอบเล็กๆ ที่ทำหน้าที่เป็นศูนย์รวมตัวใหม่ และลดการนำไฟฟ้าของวัสดุ ดังนั้นแผ่นบางเหล่านี้จะต้องถูกทำให้หนากว่าหนึ่งชั้นอะตอม เพื่อให้ได้ความหนืดที่ผิวที่สัมผัสได้ ความหนืดที่ถูกเพิ่มเข้าไปนี้สามารถถูกต่อต้านโดยการผสมผสานวัสดุเพิ่มการนำไฟฟ้า เช่น เมทริกซ์ซิลิกา การนำไฟฟ้าของฟิล์มกราฟีนที่ถูกลดลงไปยังสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้น โดยการเติมโมเลกุลอะโรมาติกขนาดใหญ่ เช่น กลีโกลิโคเลียม กรดซัลโฟนิค (Pys) และกลีโกลิโคเลียม ของ 3,4,9,10 - perylenetetracarboxylic diimide bisbenzenesulfonic acid (PDI) โมเลกุลกรดอะโรมาติกที่มีขนาดใหญ่เหล่านี้ ภายใต้อุณหภูมิสูงจะช่วยให้การจับคู่แบบไพ (π) ของแผ่นฐานของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ได้ดีขึ้น แผ่นรีดิวซ์กราฟีนบางๆ มีความโปร่งใสในระดับสูงในภูมิภาคที่ตามองเห็นได้ และภูมิภาคใกล้อินฟราเรด และนอกจากนี้ยังมีเสถียรภาพทางเคมีและความร้อนที่สูง

2.10 โทเทเนียมไดออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีคุณสมบัติในการช่วยส่งผ่านอิเล็กตรอน คือ เมื่อโทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับพลังงานทำให้ไปกระตุ้นอิเล็กตรอนที่ชั้นวาเลนซ์แบนด์เคลื่อนที่ไปยังคอนดักชันแบนด์ ซึ่งอิเล็กตรอนบางตัวอาจเกิดการตกกลับมายังชั้นวาเลนซ์แบนด์ได้ (e^- hole Recombination) แต่เมื่อมีการผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ลงไปจะไปช่วยให้อิเล็กตรอน เพื่อลดการตกกลับอิเล็กตรอน (e^- hole Recombination) ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 จากการวิจัยที่ผ่านมาของ Yuan-Cheng Cao และคณะ [24] ได้ทำการเตรียมวัสดุผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์กับโทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการโฟโต-คะตะไลติกในการกำจัดสีย้อมเมทิลออเรนจ์ โดยการเตรียมวัสดุผสมดังกล่าวเตรียมได้จาก การนำเอาผงโทเทเนียมไดออกไซด์มาผสมกับผงกราฟีนออกไซด์และน้ำ แล้วปั่นกวนภายใต้ความร้อนเพื่อเป็นการทำให้กราฟีนออกไซด์อยู่ในรูปของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ จากนั้นสารแขวนลอยผสมที่ได้จึงนำไปหมุนเหวี่ยงและอบให้แห้ง จะได้ตัวเร่งผสมแบบผงของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และโทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อนำไปใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกพบว่า สามารถกำจัดสีย้อมเมทิลออเรนจ์ได้มากกว่าร้อยละ 90 เมื่อใช้เวลาตั้งแต่ 120 นาทีขึ้นไป โดยตัวเร่งผสมดังกล่าวสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่ต้องผ่านกระบวนการหมุนเหวี่ยงและนำไปอบอีกครั้งก่อนนำมาใช้นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ K.Deepak Kumar และคณะ[7] ได้ทำการสังเคราะห์โทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างนาโนสไลงในรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO/TiO_2) โดยการใช้ไมโครเวฟเข้าร่วมเพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพของการโฟโตคะตะไลติก จากงานวิจัยทำการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลูเปรียบเทียบกับระหว่างโทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์กับโทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้าง นาโนที่สไลงในรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ที่เวลา 0 และ 45 นาที พบว่า การกำจัดสีย้อมเมทิลินบลูของ rGO/TiO_2 มีประสิทธิภาพมากกว่า เนื่องจากรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์สามารถรับอิเล็กตรอนจากโทเทเนียมไดออกไซด์ที่เข้าทำปฏิกิริยากับแสงยูวี เกิดออกซิเจนเรดิคอลลกลับไปทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลเรดิคอลลซึ่งสามารถไปกำจัดสีย้อมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 แสดงกลไกการเกิดโฟโตคะตะลิส โดยมีรีดิวซ์กราฟีนช่วยส่งผ่านอิเล็กตรอน [25]

2.11 ซิลเวอร์ขนาดอนุภาคนาโนเมตร (Silver Nanoparticles)

ซิลเวอร์นาโน (Silver Nano) คือ เทคโนโลยีการสังเคราะห์เงินหรือซิลเวอร์ (Silver) ให้มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร (Nanometer) คือ มีขนาดไม่เกิน 100 นาโนเมตร เทียบเท่ากับดีเอ็นเอ ในร่างกายของมนุษย์ และเนื่องจากขนาดที่เล็กนี้เอง ทำให้มีปริมาณพื้นที่ผิวสูง ซึ่งสามารถสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียได้มากขึ้น โลหะเงินสามารถแตกตัวเป็นประจุบวก (Ag^+) ในระดับอนุภาคนาโน จากนั้นอนุภาคซิลเวอร์จะไปเกาะที่ผนังของเชื้อแบคทีเรีย และแทรกเข้าไปภายในเซลล์พร้อมกับเข้าจับกับหมู่ซัลเฟต (Sulphate) ของเอนไซม์ที่ทำหน้าที่เผาผลาญออกซิเจนและพลังงาน ทำให้เอนไซม์และการเผาผลาญพลังงานเกิดผิดปกติ จนแบคทีเรียถูกทำลาย และตายในที่สุด อนุภาคของซิลเวอร์นาโนสามารถต้านเชื้อแบคทีเรียได้มากถึง 650 ชนิด โดยเฉพาะแบคทีเรียสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการใช้ชีวิตมนุษย์ อาทิเช่น แบคทีเรียสเตรปโตคอกคัส (*Streptococcus*) แบคทีเรียแลคโตบาซิลลัส (*Lactobacillus*) แบคทีเรียสแตฟิโลค็อกคัส (*Staphylococcus*) และอีโคไล (*Escherichia coli*, *E. coli*) ที่มักพบในอาหารที่เน่าเสียได้ในเวลาไม่กี่นาที

2.11.1 การสังเคราะห์ซิลเวอร์นาโน

การผลิตซิลเวอร์นาโนสามารถผลิตได้หลากหลายวิธี ได้แก่

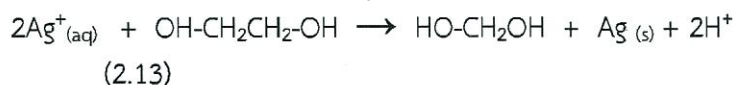
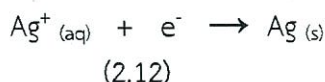
1. การผลิตด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Assisted Synthesis)
2. การผลิตด้วยเลเซอร์ (Laser Mediated Synthesis)
3. การกระตุ้นด้วยความร้อนให้สารประกอบซิลเวอร์แตกตัว (Thermal Decomposition of Silver Compound)

โดยการเกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์ซิลเวอร์นาโน ดังนี้

1. ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ปฏิกิริยารีดักชัน เริ่มจากการใช้ซิลเวอร์คอลลอยด์ (Silver Colloid) ที่มีความเข้มข้นสูง ได้แก่ สารละลายซิลเวอร์ไนเตรท (AgNO_3) เข้าสู่กระบวนการทำให้เกิดการแตกตัวเป็น ซิลเวอร์ไอออน (Ag^+) และไนเตรทไอออน (NO_3^-) หลังจากนั้น ซิลเวอร์ไอออน (Ag^+)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเปลี่ยนเป็นซิลเวอร์ (Ag) ด้วยการรับอิเล็กตรอนจากตัวให้อิเล็กตรอน ดังแสดงให้เห็นปฏิกิริยาในสมการที่ 2.12



จากสมการที่ 2.13 แสดงให้เห็นปฏิกิริยารีดักชันของซิลเวอร์ในเอทิลีนไกลคอล (Ethylene Glycol, EG) เมื่อซิลเวอร์ไอออนได้รับอิเล็กตรอนจากเอทิลีนไกลคอลซึ่งเป็นตัวให้อิเล็กตรอน

2. สารให้ความคงตัว (Stabilizer) และตัวทำละลาย (Solvent) สารให้ความคงตัวจะใช้เป็นตัวยึด (Substrate) ระหว่างตัวทำละลาย และอนุภาคโดยทั่วไปจะนิยมใช้เป็นสารจำพวกพอลิเมอร์นำมาใช้ในการสังเคราะห์เพื่อขัดขวางไม่ให้อนุภาครวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ (Agglomerate) อนุภาคจะเกาะอยู่กับสารให้ความคงตัวที่ปลายสายโซ่ประสิทธิภาพของสารให้ความคงตัวจะสัมพันธ์กับสมบัติของตัวทำละลายที่ใช้ เนื่องจากตัวทำละลายที่ดีจะต้องช่วยให้สารให้ความคงตัวเพิ่มระยะห่างระหว่างอนุภาคได้ แต่ในทางตรงข้ามถ้าหากอยู่ในตัวทำละลายที่ไม่ดีเป็นผลให้สายโซ่ของสารให้ความคงตัวซึ่งเป็นพอลิเมอร์ม้วนตัวเข้าหากันเองทำให้อนุภาคอยู่ใกล้กันและรวมกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ขึ้น

2.11.2 ประโยชน์ซิลเวอร์ขนาดอนุภาคนาโนเมตร

ซิลเวอร์ขนาดอนุภาคนาโนเมตร มีคุณสมบัติเด่นที่ถูกประยุกต์ใช้ประโยชน์หลัก คือการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ซึ่งมีการใช้ในหลายด้าน ได้แก่

1. สำหรับการนำอนุภาคซิลเวอร์ไปใช้งานทางการแพทย์ เช่น นำไปเคลือบอุปกรณ์ทางการแพทย์ ผ้าปิดแผล หรือวัสดุต่างๆ รวมถึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของยาปฏิชีวนะ และรักษาบาดแผลให้มีประสิทธิภาพ ยกตัวอย่างวัสดุที่มีการนำนาโนซิลเวอร์มาประยุกต์ใช้ ได้แก่ พอลิยูรีเทน (Polyurethane; PU) ซึ่งเป็นหนึ่งในพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ถูกนำมาใช้ในทางการแพทย์อย่างกว้างขวาง เพราะสามารถเข้ากับเนื้อเยื่อของร่างกายได้ดี รวมถึงมีความแข็งแรงทนทาน สามารถทนรับแรงกดทับ ทนต่อการเสียดสี และฉีกขาด มีความเหนียว และยืดหยุ่นได้ดี ทั้งนี้ พอลิยูรีเทนไม่สามารถต้านทานเชื้อจุลินทรีย์ได้ ดังนั้น จึงนิยมนำอนุภาคซิลเวอร์นาโน (Ag-Nano) เมื่อผสมลงบนผิวของพอลิยูรีเทนเพื่อช่วยยับยั้งแบคทีเรียชนิดต่างๆ โดยเฉพาะ *E. coli* และ *Bacillus subtilis*

2. ซิลเวอร์นาโนถูกนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์ผ้าเช็ดทำความสะอาด เสื้อผ้าเด็ก รวมถึงหนังสือสัตว์ที่ฟอกสี เพื่อช่วยลดการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย รวมถึงซิลเวอร์นาโนถูกนำมาใช้เป็นส่วนผสมผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด อาทิ ผงซักฟอก น้ำยาล้างมือ และสบู่ เป็นต้น ซึ่งหลังการใช้ ซิลเวอร์นาโนบางส่วนจะเกาะติดกับผิววัสดุ ทำหน้าที่ต้านเชื้อจุลินทรีย์ต่างๆที่มาเกาะได้

3. ซิลเวอร์นาโนถูกนำมาใช้ในเครื่องมือ เครื่องใช้เพื่อการอุปโภค และบริโภค ได้แก่ ใช้ในเครื่องกรองน้ำ เครื่องปรับอากาศ เสนอสังกะสี และเครื่องสำอาง เป็นต้น นอกจากนี้ซิลเวอร์นาโนถูกใช้ในบรรจุภัณฑ์ ทั้งการเคลือบหรือผลิตเป็นแผ่นฟิล์มเพื่อต้านเชื้อจุลินทรีย์ต่างๆที่เป็นสาเหตุของอาหารบูดเน่า โดยนิยมเติมลงไปในวัสดุบรรจุที่ความเข้มข้นประมาณร้อยละ 0.1-5 ของน้ำหนัก และ

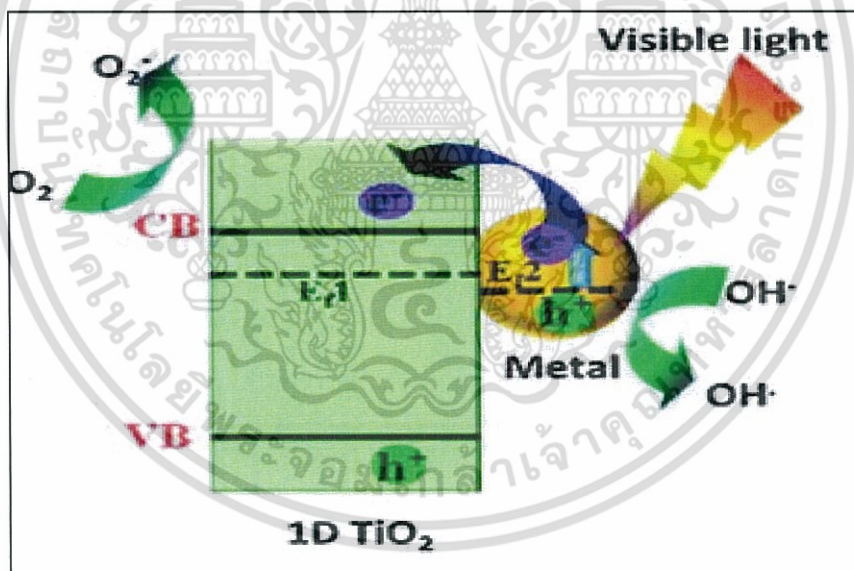
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้เป็นส่วนผสมของงานสีต่างๆ อาทิ สีระบาย สีย้อม และสีทาบ้าน เป็นต้น เพื่อป้องกันเชื้อราไม่ให้ทำลายสีที่ทาไว้

2.11.3 การนำไปใช้ซิลเวอร์ขนาดอนุภาคนาโนเมตร

1. วัสดุไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมซิลเวอร์นาโน

Selim Demirci และคณะ [26] ได้ทำการศึกษาและสังเคราะห์แผ่นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ใสอนุภาคซิลเวอร์นาโน ด้วยวิธีโซลเจลสปีนลงบนซิลิกาเวเฟอร์ เพื่อศึกษาเกี่ยวประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสภายใต้แสงยูวีในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู เปรียบเทียบปริมาณอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ใส่ลงไปแตกต่างกันคือ 0.1% 0.3% 0.5% 0.7% 0.9% พบว่าการใส่อนุภาคซิลเวอร์นาโนลงไปนั้นได้เข้าไปเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้ใส่อนุภาคซิลเวอร์นาโน ผลการวิจัยพบว่า ปริมาณซิลเวอร์นาโนที่เหมาะสมที่สุดคือ 0.5% ซึ่งมีความสามารถในการต้านทานแบคทีเรียที่ดี และเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้เหมาะสม แต่เมื่อใส่ปริมาณอนุภาคซิลเวอร์นาโนตั้งแต่ 0.7% นั้นจะเกิดควมบกพร่องแบบเส้นทำให้เกิดการแตกบนผิวหน้าของแผ่นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ ช่องว่างของระดับพลังงานแคบลง นอกจากนี้ยังไปเพิ่มคุณสมบัติความชอบน้ำของแผ่นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์อีกด้วย



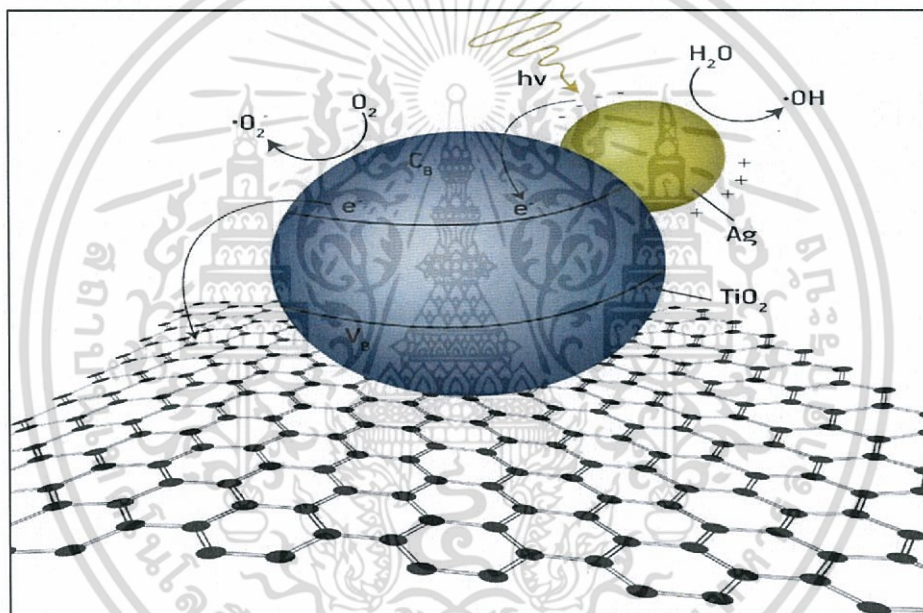
รูปที่ 2.10 แสดงการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของวัสดุผสมระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์กับซิลเวอร์นาโน

2. วัสดุไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และซิลเวอร์นาโน

E.vasilaki และคณะ[27] ได้ทำการศึกษาเตรียมแผ่นวัสดุผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ถูกเติมด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ และซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตรโดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล ปริมาณ 1 – 4 wt% เพื่อศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงวิสิเบิล จากผลการทดลองพบว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับสีย้อมของวัสดุตัวอย่าง คืออนุภาคขนาดนาโนเมตรของโลหะ และปริมาณอนุภาคซิลเวอร์นาโนเมตรที่เติมลงไป โดยขนาดอนุภาคเฉลี่ยแล้วเพียง 4.2 นาโนเมตร และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นเข้าเป็นประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพในการกำจัดสียอมดีขึ้นเมื่อมีการเติมปริมาณซิลเวอร์นาโนเมตรมากขึ้น ซึ่งปริมาณที่ดีที่สุดคือ 3wt% สามารถกำจัดสียอมได้ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสียอมของไทเทเนียมไดออกไซด์ เกรดP25 กับ วัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ หรือ วัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ซิลเวอร์นาโนเมตร พบว่า วัสดุที่มีการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และซิลเวอร์กราฟีนออกไซด์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสียอมมากกว่า เนื่องจากซิลเวอร์นาโนเมตรทำหน้าที่เป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยาในช่วงแสงวิสิเบิล ส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ฝังตัวอยู่เมตทริกซ์รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ซึ่งรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นั้นมีความสมบัติในการนำไฟฟ้าจึงสามารถรับส่งอิเล็กตรอนและและมีปริมาณพื้นที่ผิวสูงเมื่อทำงานร่วมกับซิลเวอร์นาโนเมตรจึงไปลดการตกกลับของอิเล็กตรอนและเพิ่มจำนวนการเกิดกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน ท้ายที่สุด ช่องว่างของแถบพลังงานแคบลง เนื่องจากการเชื่อมกันของพันธะ Ti-O-C และ Ti-O โลหะ จึงทำให้เกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกดีขึ้น



รูปที่ 2.11 แสดงการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของวัสดุผสมระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์ รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ และซิลเวอร์นาโน [27]

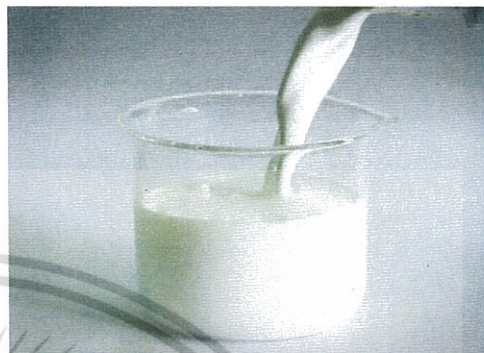
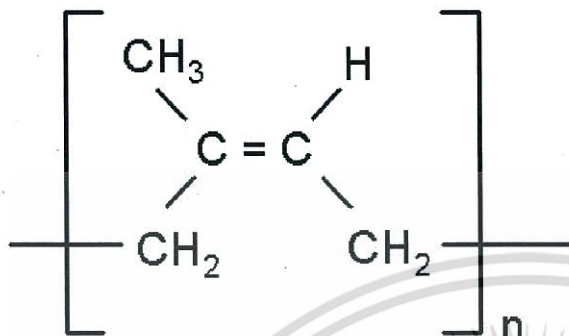
2.12 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR)

ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR) มีชื่อทางเคมีคือ cis-1,4-polyisoprene เป็นพอลิเมอร์สายโซ่ตรง มีหน่วยซ้ำๆ กันคือ isoprene (C_5H_8) โดย n มีค่าตั้งแต่ 15,000 -20,000 เป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ ซึ่งได้จากการรีดจากต้นไม้มือที่ชื่อว่า “ยางพารา” มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า Hevea Brazillensis ซึ่งมีต้นกำเนิดจากกลุ่มแม่น้ำอเมซอนในทวีปอเมริกาใต้ ต่อมาได้นำมาปลูกในทวีปเอเชียและแอฟริกา ยางสามารถงอกงามได้ดีทางภาคใต้ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย

น้ำยางธรรมชาติ (Latex) ลักษณะของน้ำยางที่ได้เป็นสีขาวขุ่น ความหนืดประมาณ 12-14 centipoise (น้ำบริสุทธิ์มีความหนืด 1 centipoise) มีความหนาแน่นประมาณ 0.975-0.980 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีความเป็นกรด-เบส (pH) ที่ 6.5-7.0 มีการกระจายตัวของอนุภาค cis-polyisoprene ที่แสดงดังรูปที่ 2.8 ยางธรรมชาติประกอบด้วย polyisoprene rubber polymer ประมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นว่าเป็นประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

60-65% และส่วนที่ไม่ใช่เนื้อเยื่อประมาณ 30-35% นอกจากนี้มีส่วนประกอบของสารต่างๆ ในปริมาณที่คงที่อย่างกว้างขวาง โดยขึ้นกับปัจจัยต่างๆ เช่น พันธุ์ยาง อายุยาง ฤดูกาล กรีดยาง และวิธีการกรีดยาง



(ก) cis-1,4-polyisoprene

(ข) น้ำยางข้น

รูปที่ 2.12 (ก) สูตรโครงสร้างของยาง cis-1,4-polyisoprene และ (ข) น้ำยางข้น

โดยปกติมีการเติมแอมโมเนีย (Ammonia) ถูกเติมลงไปในน้ำยางธรรมชาติเป็นการช่วยรักษาสภาพของยางธรรมชาติให้เก็บไว้ได้นาน และทำให้น้ำยางมีความเสถียรมากขึ้นการเติมแอมโมเนียลงไป ในน้ำยางธรรมชาติทำให้ pH เพิ่มขึ้น เชื้อจุลินทรีย์เกิดการเจริญเติบโตได้ช้าลง เมื่อน้ำยางธรรมชาติเสถียรแล้ว หลังจากนั้นจะส่งออกสู่ตลาดเพื่อนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ถุงมือยาง ถุงยางอนามัย ลูกโป่ง จุกหัวนม เป็นต้น ส่วนยางแห้งได้นำน้ำยางสดมาเติมกรด ทำให้เกิดการจับตัวของน้ำยางเป็นก้อนแข็ง แยกตัวจากน้ำออกมา และนำไปอบรมควัน ยางที่ได้จากกระบวนการนี้คือ ยางแผ่นรมควัน

2.12.1 น้ำยางข้น (Concentrated Latex)

น้ำยางข้น หมายถึง น้ำยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการเพิ่มความเข้มข้น โดยน้ำยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการเพิ่มความเข้มข้นแล้วจะมีปริมาณเนื้อเยื่อประมาณ 55-65% ซึ่งสูงกว่าน้ำยางสดที่มีปริมาณเนื้อเยื่อประมาณ 25-30% ทำให้สามารถ ทำได้สามารถทำการขนส่งได้ง่ายขึ้นเป็นอย่างมาก

2.12.2 กระบวนการเตรียมน้ำยางข้นจากน้ำยางสด

โดยทั่วไปแล้วกระบวนการเตรียมน้ำยางข้นมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน แต่วิธีการที่นิยมใช้ในการเตรียมน้ำยางข้นมีอยู่ 4 วิธี คือ

1. การระเหยน้ำ (evaporation)

วิธีนี้ต้องการเติมสารที่ทำให้น้ำยางคงตัว (stabilizer) เช่น Potassium soap ในถึงน้ำยางแล้วให้ความร้อนรอบๆ ถึง เมื่อน้ำระเหยไปน้ำยางข้นที่ได้จะมีปริมาณของแข็งทั้งหมด 75% ปริมาณเนื้อเยื่อแห้ง 60% caustic potash 1.5% และสารที่ทำให้น้ำยางคงตัวกับโปรตีนประมาณ 13.5% วิธีนี้เหมาะกับการขนย้ายน้ำยางไปในระยะทางไกล และเหมาะกับการนำไปผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องใส่สารเติม (filler) จำนวนมากเช่น การผลิตกาว (Latex-cement) น้ำยางนี้เหมาะหรือใช้ได้ดีกรณีที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องการนำไปทำกาวยประเภทอื่นๆ ที่อยู่ในน้ำยาง และคุณสมบัติความคงตัวของน้ำยางเป็นข้อได้เปรียบกับการทำกาวยนั้นๆ

2. การทำครีม (Creaming method)

การทำน้ำยางข้นโดยวิธีการทำครีม เป็นวิธีที่อาศัยหลักการที่อนุภาคของเม็ดยางเบากว่าน้ำ เป็นไปตามกฎของ Stokes การทำน้ำยางข้นโดยวิธีการทำครีม ไม่ค่อยนิยมกันมากนัก เนื่องจากต้องใช้เวลานานในการเตรียมสาร และใช้เวลาทำค่อนข้างนาน สารทำครีมได้แก่ gum bragacarth, sodium aginate, tragon seed gum, ammonium aginate, locust bean gum และ pectin สมบัติของสารทำครีม คือ เป็นคอลลอยด์ที่ชอบน้ำ และจะพองตัวเมื่อใส่น้ำมัน ขั้นตอนการทำครีมค่อนข้างง่าย คือ

- ใส่สารทำครีม ปริมาณ 0.3% ในส่วนของน้ำ สงในน้ำยางสดที่เก็บรักษาโดยแอมโมเนีย
- กวนให้สารทำครีมละลาย ตั้งทิ้งไว้ 24-40 ชั่วโมง
- กรองเอาชิ้นน้ำออกจากของผสม
- ปรับปริมาณเนื้อยางและความเข้มข้นของแอมโมเนียภายหลัง
- ความเข้มข้นของเนื้อยางจะสูงประมาณ 55% ในช่วงระยะเวลา 18 ชั่วโมง ในการทำน้ำยางข้นโดยวิธีการทำครีม หากต้องการเนื้อยางสูงถึง 60% ต้องตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 4-5 วัน

3. การปั่น (centrifuging)

วิธีนี้แยกส่วนที่เป็นเนื้อยางออกจากส่วนที่เป็นน้ำ คือ ซีรัม โดยใช้เครื่องปั่นแยก น้ำยางข้นที่ได้มีปริมาณเนื้อยางแห้งประมาณ 60% วิธีนี้เป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในทางการค้า การผลิตน้ำยางข้นด้วยวิธีการปั่น

- รวบรวมน้ำยางสด
- การตรวจสอบน้ำยางสด

4. การใช้กระแสไฟฟ้าแยก (electro decantation)

วิธีนี้ใช้ไฟฟ้าเข้ามาช่วยแยกส่วนของเนื้อยางจากส่วนของซีรัม โดยจุ่มขั้วไฟฟ้าที่เป็นขั้วบวกลงในน้ำยางที่เติมสารช่วยให้ยางคงตัวไว้แล้ว เนื่องจากอนุภาคยางมีประจุลบหุ้มอยู่ จึงค่อยๆ เคลื่อนไปรวมที่ขั้วบวกและลอยตัวสูงขึ้นสู่ผิวของน้ำยาง แต่วิธีนี้ไม่สะดวกและลงทุนสูง

2.12.3 การใช้งานของยางธรรมชาติ

ในรูปแบบของน้ำยางข้น

1. ผลิตภัณฑ์จุ่ม เช่น ถุงมือผ่าตัด ถุงมือตรวจโรค ถุงมือแม่บ้าน ถุงมืออุตสาหกรรม ถุงยางอนามัยลูกโป่ง จุกนมยาง ท่อสวนปัสสาวะ เป็นต้น
2. ผลิตภัณฑ์น้ำยางในอุตสาหกรรมพรม เช่น พรม tufted carpet มีการใช้น้ำยางอาบหลังพรมเพื่อยึดพรมไว้เรียกชั้นยางที่ยึดว่า anchor coat
3. ผลิตภัณฑ์ยางฟองน้ำ (latex foam) ใช้ทำที่นอน หมอน เบาะรองนั่ง เป็นต้น
4. สายยางยืด เช่น ยางยืดขอบกางเกงใน ถุงเท้า เสื้อชั้นใน ยางรัดขาไก่ ยางรัดป้ายติดกระเป๋า
5. ใช้น้ำยางเป็นตัวยึดฟูโยขนสัตว์และกาบมะพร้าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.13 ประเภทของสิ่งสกปรกที่เจือปนในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อม

ในแต่ละขั้นตอนของอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีการใช้น้ำและสารเคมีต่าง ๆ ในปริมาณที่แตกต่างกัน น้ำที่ผ่านกระบวนการผลิตในแต่ละขั้นตอนจะกลายเป็นน้ำเสีย น้ำเสียที่ได้จะมีสิ่งสกปรกเจือปนอยู่มากมายหลายประเภท ซึ่งอาจจะจำแนกออกเป็นประเภทที่สำคัญๆ ได้ดังนี้ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

2.13.1 สีย้อม

ในขั้นตอนการย้อมสีเส้นใยจะมีการดูดซึมสีย้อม จากสารละลายสีย้อมเพียงบางส่วนเท่านั้น สีย้อมที่เหลือจะคงอยู่ในสารละลายสีย้อม และจะถูกปล่อยออกมาพร้อมกับน้ำเสียโดยปริมาณสีย้อมที่ยังคงเหลืออยู่ในสารละลายสีย้อมจะแตกต่างกันไปตั้งแต่ร้อยละ 5-50% ขึ้นอยู่กับประเภทของสีย้อมที่ใช้

2.13.2 เศษเส้นใย

ในน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมจะมีเศษใยผ้าที่หลุดออกมาซึ่งเป็นองค์ประกอบที่จะหลีกเลี่ยงไม่ได้เศษเส้นใยนี้หากมีปริมาณมากก็อาจทำให้เกิดปัญหาการอุดตันของน้ำเสียในเครื่องย้อมได้นอกจากนี้ ในกรณีของเส้นใยโพลีเอสเตอร์ยังมีสารโอลิโกเมอร์ที่อาจจะหลุดออกมาจากเส้นใย และปะปนมากับน้ำเสียด้วย

2.13.3 สารเคมีที่ใช้ช่วยในการฟอกย้อม และสารเคมีที่ใช้ในการตกแต่งสำเร็จ

สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมและการตกแต่งสำเร็จมีอยู่หลายประเภทสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 3 กลุ่ม ดังนี้

- สารช่วยย้อม ได้แก่ สารช่วยจัดสิ่งสกปรก สารช่วยเปียกและสารที่ช่วยในการย้อมให้สม่ำเสมอ
- สารเคมีพื้นฐาน เป็นสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมโดยตรงได้แก่ กรด ต่าง บัฟเฟอร์เกลือ สารฟอกขาว และสารลอกแป้ง
- สารเคมีตกแต่งสำเร็จ ได้แก่ สารที่ป้องกันการซึมของน้ำ สารกันเชื้อรา และสารกันไฟ

สารเคมีต่างๆ ที่กล่าวมานี้เมื่อนำมาใช้ในกระบวนการฟอกย้อมส่วนใหญ่จะคงเหลืออยู่ในสารละลายสีย้อมหรือน้ำซักล้าง และจะถูกปล่อยปนออกมาพร้อมกับน้ำเสีย

2.13.4 สิ่งสกปรกเจือปนในเส้นใยผ้า

วัสดุสิ่งทอที่ถูกนำมาผ่านกระบวนการฟอกย้อมล้วนแต่มีสิ่งสกปรกเจือปนอยู่ โดยทั่วไปเส้นใยธรรมชาติจะมีสิ่งสกปรกเจือปนสูงกว่าเส้นใยสังเคราะห์ สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้ มีทั้งที่เป็นสารซีมีน ไขมัน โปรตีน ตลอดจนสารประกอบโลหะต่างๆ นอกจากนี้ในกระบวนการผลิตก็ยังมีสารเคมีต่างๆ ลงไปในเส้นใยด้วย เช่น พวกสารหล่อลื่น และแป้งที่ใช้ในการลงแป้ง เส้นด้ายยีน เป็นต้น สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้จะถูกขจัดออกจากเส้นใยในขั้นตอนการเตรียมผ้าก่อนการฟอกย้อม และหลุดออกมาในน้ำเสีย

2.13.5 สิ่งสกปรกอื่น ๆ

นอกจากสิ่งสกปรกเจือปนต่างๆ ดังกล่าวข้างต้นแล้ว น้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมยังอาจมีสิ่งสกปรกเจือปนชนิดอื่น ๆ เช่น สารเคมีพิเศษที่ใช้ในการขจัดรอยเปื้อนบนผ้า ซึ่งมักจะเป็นสารประกอบพวกคลอรีนเตทเบนซีน และสารเคมีที่ใช้ในการล้างเครื่องจักรเป็นต้น ซึ่งสารเคมีบางตัว ก็อาจมีผลอย่างมากต่อลักษณะสมบัติของน้ำเสียในภายหลัง

เพื่อลดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม จึงต้องมีการบำบัดน้ำเสียเหล่านี้ให้ได้มาตรฐานก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 เรื่อง กำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน

2.14 สีสังเคราะห์

สีย้อม (dyestuffs) คือ สีชนิดหนึ่งที่ใช้ในการย้อมเส้นใยของผ้า อาจจะเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ก็ได้ มีลักษณะเป็นผลึกหรือผงละเอียดสร้างมาเพื่อดูดซึม หรือดูดซับแสงโดยการทำให้อยู่บน หรือในผิวหน้าของวัตถุ แล้วเกิดการแพร่แทรกซึมเข้าสู่ภายในโครงสร้างของวัตถุเพื่อที่จะทำให้อัตถุนั้นมีสีขึ้นมา สีย้อมบางชนิดละลายน้ำได้ บางชนิดจะไม่สามารถละลายน้ำแต่จะละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ได้ เมื่อนำสีย้อมไปใช้ในกระบวนการย้อมจะทำให้โมเลกุลของสีย้อมซึมผ่านเข้าไปในโมเลกุลของเส้นใยโดยจะทำลายโครงสร้างผลึกของวัตถุนั้นชั่วคราว ซึ่งอาจเกิดพันธะไอออนิก (ionic bond) หรือพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) กับวัตถุที่ต้องการย้อมโดยตรง สีที่เห็นจากสีย้อมนั้นเกิดจากอิเล็กตรอนในพันธะคู่ซึ่งอยู่ในโมเลกุลของสีย้อมนั้นมีความสามารถดูดกลืนพลังงานในช่วงสเปกตรัมต่างกัน พลังงานแสงที่สายตามองเห็นจะมีความยาวคลื่นช่วง 400-700 นาโนเมตร สีย้อมที่มีโครงสร้างทางโมเลกุลต่างกันจะมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ กันไป ซึ่งสายตาสถาสามารถรับภาพได้ จึงทำให้โมเลกุลสีย้อมต่างโทนสีกันแสดงสีให้เราเห็นด้วยสายตาคออกมาเป็นต่างกันไป ทั้งนี้เราสามารถแบ่งสีย้อมออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

- สีย้อมธรรมชาติ (natural dyestuffs) เป็นสีย้อมที่มาจากแหล่งธรรมชาติ โดยเฉพาะพืชและสัตว์ สีย้อมที่มาจากส่วนประกอบพืช เช่น ส่วนลำต้น ส่วนดอก ส่วนที่เป็นเปลือก ส่วนที่เป็นใบ เป็นต้น ตัวอย่างเช่น สีดำจากลูกมะเกลือ สีน้ำเงินจาก ต้นคราม สีเหลืองจากเนื้อไม้ไผ่ สีแดงจากดอกกรรณิการ์ สีแดงจากรากต้นเข็ม ส่วนสีย้อมที่มาจากสัตว์ เช่น สีม่วงแดงของครั่ง สีม่วงจากหอยสังข์หนาม เป็นต้น
- สีย้อมสังเคราะห์ (synthetic dyestuffs) เป็นสีย้อมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการทางเคมี

2.14.1 ประเภทของสีย้อม

การจำแนกสีย้อมที่นิยมกันมากที่สุด คือ การจำแนกสีย้อมตามการนำไปใช้ เพราะจะต้องมีความคงทนการซัก มีความคงทนต่อแสง และยังต้องมีความคงทนต่อความร้อน ซึ่งในกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมได้จำแนกสีย้อมตามวิธีใช้ออกเป็น 11 ประเภท คือ (1) สีเอซิด (2) สีไดเร็กต์ (3) สีเบสิค (4) สีดีสเพอร์ส (5) สีรีแอคทีฟ (6) สีอะโซอิก (7) สีแว็ต (8) สีมอร์แดนท์ (9) สีอินเกรน (10) สีออกซิเดชัน และ (11) สีซัลเฟอร์ โดยที่สีย้อมแต่ละประเภทจะมีสูตรโครงสร้างทางเคมี สมบัติของสีย้อม ตลอดจนวิธีใช้ที่แตกต่างกันไป ดังนั้นการเลือกใช้สีย้อมจึงมีความสำคัญอย่างมากในการย้อมสี เพราะวัตถุที่ต้องการย้อมอาจสามารถย้อมด้วยสีย้อมเพียงชนิดเดียวหรือย้อมด้วยสีย้อมหลายชนิดที่ต่างชนิดกันได้ เช่น เส้นใยเซลลูโลสส่วนใหญ่จะย้อมด้วยสีไดเร็กต์ เป็นต้น

1) สีเอซิด (acid dye) สีชนิดนี้เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ มีประจุลบ ละลายน้ำได้ดี ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน กลไกในการติดสีเกิดเป็นพันธะไอออนิก ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรดเจือจาง สีเอซิดบางตัวสามารถนำไปใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่น ปอ ป่าน ไนลอน โยขนแกะ ไหม และอะคลริกได้ดี วิธีการใช้จะนำสีย้อมที่เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ไปละลายน้ำย้อมที่เป็นกรดหรือเป็นกลาง สีเอซิดไม่ทนการซัก ไม่ทนเหงื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) สีไตรง์ (direct dye) หรืออาจเรียกว่าสีย้อมฝ้าย สีชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบเอโซที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิกที่ทำให้ตัวสีสามารถละลายน้ำได้ มีประจุลบ นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส สีจะติดเส้นใยได้โดยโมเลกุลของสีจะจัดเรียงตัวแทรกอยู่ในระหว่างโมเลกุลเส้นใยและยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน สีไม่ทนต่อการซักน้ำ ตกง่าย ทนแสง

3) สีเบสิก (basic or cationic dye) สีย้อมชนิดนี้เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ (organic base) ให้ประจุลบ ละลายน้ำได้ นิยมใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ไนลอน และใยอะคริลิกได้ดี ในขณะที่ย้อมโมเลกุลของสีส่วนที่มีประจุลบจะยึดจับกับโมเลกุลของเส้นใย เป็นสีที่ติดทน ไม่ควรใช้ย้อมเส้นใยธรรมชาติ เพราะจะไม่ทนการซักและแสง

4) สีดีสเพอร์ส (disperse dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำแต่มีสมบัติกระจายได้ดี สามารถย้อมเส้นใยอะซิเตท เส้นใยโพลีเอสเตอร์ ไนลอน และอะคริลิกได้ดี การย้อมจะใช้สารพา (carrier) เพื่อช่วยเร่งอัตราการดูดซึมของสีเข้าไปในเส้นใยหรือย้อมโดยใช้อุณหภูมิ และความดันสูง สีดีสเพอร์สเป็นสีที่ทนแสงและการซักฟอกค่อนข้างดี แต่สีจะซีดถ้าถูกควันทันหรือแก๊สบางชนิด เช่น แก๊สไนโตรซอกไซด์ สีดีสเพอร์ส แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม โดยพิจารณาจากหมู่เคมีในตัวสีย้อม ได้แก่ สีย้อมเอโซ (azo dyes) และสีย้อมแอมมิโน แอนทราควิโนน (amino anthraquinone) ซึ่งทั้ง 2 กลุ่ม ประกอบด้วยอนุพันธ์ของเอทานอลามีน (ethanolamine; $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$) หรืออนุพันธ์ที่คล้ายคลึงกัน

5) สีรีแอคทีฟ (reactive dye) เป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบ เมื่ออยู่ในน้ำจะมีสมบัติเป็นต่าง สีย้อมชนิดนี้เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด โมเลกุลของสีจะยึดจับกับหมู่ไฮดรอกไซด์ (OH^-) ของเซลลูโลส และเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ในสถานะที่เป็นต่าง กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส สีรีแอคทีฟมี 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง 70-75 °C และกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิต่ำ สีรีแอคทีฟให้สีที่สดใส ทุกสีติดทนในทุกสภาวะ

6) สีอะโซอิก (azoic dye) สีย้อมชนิดนี้ไม่สามารถละลายน้ำได้ การที่สีจะก่อรูปเป็นเส้นใยได้ต้องย้อมด้วยสารประกอบฟีนอล ซึ่งละลายน้ำได้ก่อน เป็นกระบวนการทำให้รวมตัวเป็นสี (coupling) แล้วย้อมทับด้วยสารไดอะโซคอมโพเนนท์ จึงจะเกิดเป็นสีได้ สีอะโซอิกใช้ย้อมเส้นใยได้ทั้งเซลลูโลส ไนลอน หรืออะซิเตท สีอะโซอิกเป็นสีที่ทนต่อการซัก แต่ไม่ทนต่อการขัดถู

7) สีแว็ต (vat dye) เป็นสีที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ เมื่อทำการย้อมต้องเตรียมน้ำย้อมให้สีแว็ต ละลายน้ำโดยให้ทำปฏิกิริยากับสารรีดิวซ์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ สีแว็ตจะถูกรีดิวซ์ให้กลายเป็นเกลือจึงซึมเข้าไปในเส้นใยได้ เมื่อนำผ้าไปผึ่งในอากาศสีในเส้นใยจะถูกออกซิไดส์เป็น สีแว็ต สีย้อมชนิดนี้มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญอยู่ 2 ชนิด คือ สีอินดิโก (indigoid) และสีแอนทราควิโนอยด์ (anthraquinoid)

8) สีมอร์แดนท์ หรือโครม (mordant or chrome dye) สีย้อมชนิดนี้ต้องใช้สารช่วยติดเข้าไปช่วยเพื่อให้เกิดการติดสีบนเส้นใย สารที่ช่วยติดที่ใช้คือ สารประกอบออกไซด์ของโลหะ เช่น โครเมียม ดีบุก เหล็ก อะลูมิเนียม เป็นต้น สีมอร์แดนท์เป็นสีที่มีโมเลกุลใหญ่ซึ่งเกิดจาก สีมอร์แดนท์หลายโมเลกุลจับกับโลหะแล้วละลายน้ำได้จึงทำให้ย้อมได้ง่าย ซึ่งใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนและเส้นใยพอลิเอไมด์ได้ดี

9) สีอินเกรน เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ โดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยากับน้ำ สีย้อมชนิดนี้ใช้สำหรับย้อมฝ้าย

10) สีย้อมออกซิเดชัน (oxidation dye) เป็นสีที่มีละลายน้ำโดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยาในน้ำโดยสีจะติดแน่น อาศัยปฏิกิริยาการตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย ใช้สำหรับย้อมผ้าฝ้ายและขนสัตว์

11) สีซัลเฟอร์ (sulfur dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ เมื่อทำการย้อมต้องรีดิวซ์สีเพื่อให้โมเลกุลอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้ แต่สีซัลเฟอร์บางชนิดที่ผลิตออกมาจำหน่ายในรูปที่ถูกรีดิวซ์จะละลายน้ำได้ นิยมนำสีซัลเฟอร์มาย้อมผ้าฝ้าย สีจะติดทน และยังเป็นสีที่มีราคาถูก แต่สีที่อ่อนจะไม่ทนต่อการซัก

อุตสาหกรรมการผลิตสีย้อมจัดเป็นอุตสาหกรรมเล็ก ๆ ของอุตสาหกรรมเคมี กล่าวคือ มีเพียงร้อยละ 3-4 ของอุตสาหกรรมเคมีทั้งหมด ถึงแม้อุตสาหกรรมประเภทนี้จะมีปริมาณการผลิตค่อนข้างน้อย แต่มีความหลากหลายของผลิตภัณฑ์มาก ในระหว่างกระบวนการผลิตสีย้อมรวมทั้งในอุตสาหกรรมที่ใช้สีย้อมในการผลิต จะมีสีย้อมที่ถูกปลดปล่อยออกมาสู่สิ่งแวดล้อมถึงประมาณร้อยละ 10-15 ดังแสดงในตารางที่ 2.2 เนื่องจากโครงสร้างที่ซับซ้อนของสีย้อมสังเคราะห์ ทำให้สารประกอบประเภทนี้มีความคงตัวค่อนข้างสูง กล่าวคือสามารถทนต่อการย่อยสลายในธรรมชาติ และทนต่อการย่อยของจุลินทรีย์ได้ดี ดังนั้นน้ำเสียที่ได้จากโรงงานการผลิตสีย้อม และอุตสาหกรรมที่ใช้สีย้อมในกระบวนการผลิต จึงบำบัดโดยวิธีการบำบัดทั่วไปได้ค่อนข้างยาก โดยธรรมชาติสีที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่ามีทั้งข้อดีและข้อเสียของสีย้อม ข้อเสียที่เห็นได้ชัดเจนในกรณีที่ปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งธรรมชาติ ทำให้แหล่งน้ำเปลี่ยนสีได้ เป็นผลให้เป็นที่พ่งเล็งของสาธารณชน และเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้อง ส่วนข้อดีของการมองเห็นสีเหล่านั้นก็คือ ทำให้เราทราบว่ามีสีย้อมปนเปื้อนอยู่ และหาทางช่วยลดปริมาณหรือป้องกันปล่อยน้ำเสียสู่สิ่งแวดล้อมได้

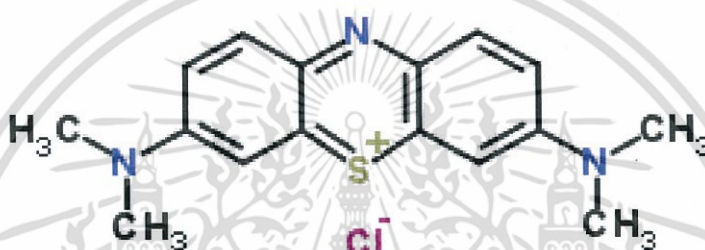
ตารางที่ 2.2 แสดงปริมาณสีย้อมในการย้อมเส้นใย

ชนิดของสี	ปริมาณการใช้ต่อปี (ตัน)		
	1988	1992	2004
สีรีแอคทีฟ	60,000	109,000	178,000
สีไดเรก	74,000	60,000	68,000
สีซัลเฟอร์	90,000	70,000	70,000
สีแวท	36,000	21,000	22,000
สีอินดิโก	12,000	12,000	12,000
สีอาโซอิก	28,000	18,000	13,000
รวมทั้งหมด	300,000	290,000	354,000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

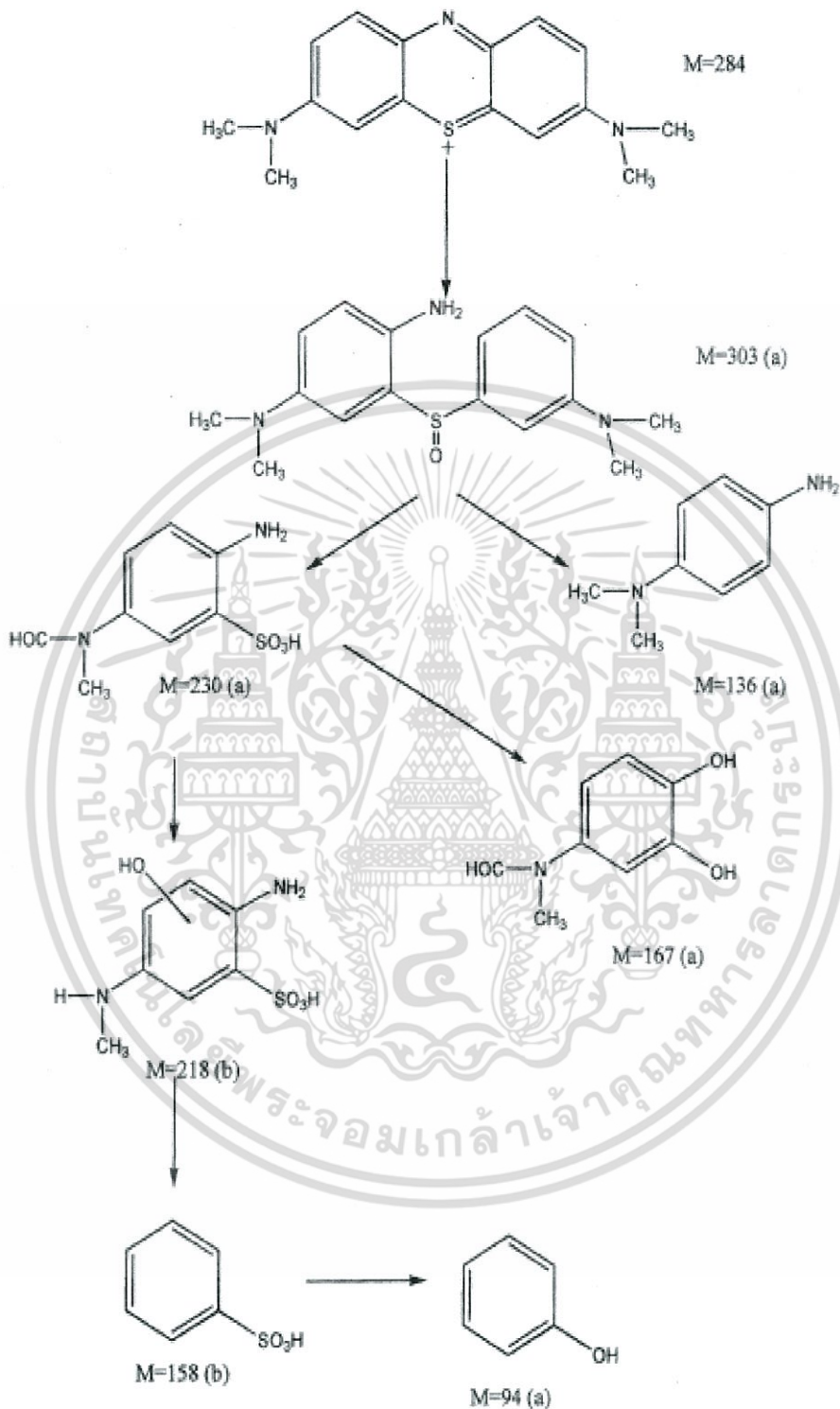
2.14.2 เมทิลีนบลู (Methylene blue)

เมทิลีนบลูมีโครงสร้างเป็นแคทไอออนในส่วนประกอบที่ให้สี บางครั้งเรียกสีประเภทนี้ว่า สีแคทไอออนิก เมื่อปนเปื้อนน้ำก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำ ดังนั้นจึงควรมีการกำจัดสีสังเคราะห์ในน้ำเสียก่อนทิ้งลงแหล่งน้ำธรรมชาติ โครงสร้างเมทิลีนบลู ($C_{16}H_{18}N_3SCl$) ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเมทิลีนบลู โดยการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงซึ่งอาศัยไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งพบว่าการกำจัดสารละลายเมทิลีนบลูทำได้ภายใต้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง เกิดการเปลี่ยนแปลงวงแหวนเบนซีนในโครงสร้างของเมทิลีนบลูให้อยู่ในรูปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซัลเฟตไอออน แอมโมเนียมไอออน และไนเตรตไอออน ส่งผลทำให้สีของเมทิลีนบลูจางลง



รูปที่ 2.13 สูตรโครงสร้างของเมทิลีนบลู (Methylene Blue)

เมทิลีนบลู เป็นสีย้อมที่เป็นด่าง (Basic dye) ซึ่งมีไอออนบวกเป็นตัวให้สี เมื่อนำไปย้อมรวมกับส่วนประกอบของเซลล์ที่อยู่บนผิว หรือภายในเซลล์ไอออนบวกของสีจะจับกับไอออนลบของกรดนิวคลีอิก โดยจับกันด้วยพันธะหลายชนิด เช่น พันธะไอออนิก พันธะไฮโดรเจน และแรงแวนเดอร์วาล เมทิลีนบลูมี CAS Number: 61-73-4 สามารถใช้เป็นสีย้อมสีในการศึกษาทางแบคทีเรียเป็นรีเอเจนท์ ตัวย้อมยังกระบวนกรสร้างโพลีเมอร์ และสีย้อมผสมชนิดไม่ถาวร ใช้เป็นสีย้อมกระดาษสิ่งทอและหนัง เป็นต้น ที่อุณหภูมิห้องจะมีลักษณะเป็นของแข็ง เป็นผงสีเขียวเข้ม ไม่มีกลิ่น จะกลายเป็นสีฟ้าละลายน้ำ เมทิลีนบลูเป็นสีย้อมที่มีประจุบวกที่มีการดูดซับสูงสุดที่ความยาวคลื่น 670 นาโนเมตร ซึ่งความสามารถในการดูดซับขึ้นอยู่กับปัจจัยการแตกตัวเป็นประจุบวก ชนิดของวัสดุดูดซับ ความเข้มข้น และปฏิกิริยาเคมีอื่นๆ เป็นต้น โดยแต่ละชนิดของเมทิลีนบลูมีค่าการดูดซับ ดังนี้ตารางที่ 2.3



a) Detected by GC/MS (extraction)

b) Detected by LC/MS

รูปที่ 2.14 กลไกการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของเมทิลีนซัลฟิวไรด์ [28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ค่าการดูดซับของเมทิลีนบลู [29]

Species	Absorption peaks (nm)	Extinction coefficient cm ³ /mol.com
MB ⁺ (Solution)	664	95,000
MBH ₂ ⁺ (Solution)	741	76,000
(MB ⁺) ₂ (Solution)	605	132,000
(MB ⁺) ₃ (Solution)	580	110,000
MB ⁺ (Absorbed on clay)	673	116,000
MBH ₂ ⁺ (Absorbed on clay)	763	86,000
(MB ⁺) ₂ (Absorbed on clay)	596	80,000
(MB ⁺) ₃ (Absorbed on clay)	570	114,000

2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Stange และคณะ [30] ได้ทำการศึกษาเทคนิคโฟโตคะตะไลติกกับการบำบัดน้ำเสีย โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) เพื่อเป็นตัวเร่ง (Catalyst) ในงานวิจัยแสดงให้เห็นว่า เมื่อให้แสงช่วงอัลตราไวโอเล็ตใกล้กับไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำที่มีคลอรีนเตตระไฮโดรคาร์บอน (Chlorinated aliphatic hydrocarbon) ปนเปื้อนมากับน้ำ จะสามารถลดปริมาณคลอรีน และเปลี่ยนให้เป็นผลิตภัณฑ์อินทรีย์ได้ทั้งหมด นอกจากนั้นในขบวนการนี้สารปนเปื้อนอื่นๆ รวมทั้งสารประกอบ อะโรมาติก (Aromatic compounds) ที่ถูกออกซิไดซ์ได้ยากก็สามารถเปลี่ยนให้เป็น คาร์บอนไดออกไซด์ด้วย ดังนั้นการให้แสงอัลตราไวโอเล็ตใกล้กับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่แขวนลอยอยู่เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ สมควรนำมาใช้ประโยชน์ จึงได้มีการนำเทคนิคนี้ไปประยุกต์ใช้กับการบำบัดน้ำที่มีสิ่งเจือปน แต่การใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ วิธีนี้มีข้อจำกัดคือ หลังจากขบวนการบำบัดน้ำเสร็จสิ้นแล้ว จำเป็นต้องแยกผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นอนุภาคเล็กๆ นี้ออก เนื่องจากมันสามารถที่จะติดอยู่ที่ผิวของภาชนะหรืออุปกรณ์ เช่น แก้ว ได้อย่างง่ายดาย ซึ่งถ้าปล่อยให้สารแขวนลอยของไทเทเนียมไดออกไซด์นี้แห้งติดอยู่บนเครื่องแก้วจะขจัดออกได้ยาก คราบของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ติดอยู่ในภาชนะ จะมีลักษณะเป็นฟิล์มเมื่อแห้งจะติดอยู่คล้ายขาว ไม่สามารถล้างน้ำออกได้

Kolen'ko และคณะ [31] ได้ทำการสังเคราะห์ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล สารตั้งต้นที่ใช้ คือ สารละลายไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก และอุณหภูมิเท่ากับ 150 และ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่า อนุภาคมีขนาด ประมาณ 20-50 นาโนเมตร และมีพื้นที่ผิว เท่ากับ 20-80 ตารางเมตรต่อกรัม คุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นสารประเภท โฟโตคะตะลิส โดยทำการศึกษาใช้ในการกำจัดสารประกอบ ฟีนอลในน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าประสิทธิภาพที่ดีที่สุด คือ มีโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบของรูโหล และ อนุภาค เท่ากับ 15:85

N.Yuangpho และคณะ [32] ได้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของอนุภาคไทเทเนียมในสัดส่วนผสมระหว่างเฟส อนุภาคและรูโหล ผู้วิจัยทำการเตรียมไทเทเนียม-ไดออกไซด์โดยเปลี่ยนจากเฟสอนุภาคเป็นรูโหล พบว่าการเปลี่ยนเฟสแปรผันตรงกับอุณหภูมิที่เผา ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส อนุภาคจะเปลี่ยนไปเป็นรูโหล 100% จากการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาพบว่า การเพิ่มขึ้นของขนาดกลุ่มก้อน และการลดลงของพื้นที่ผิวจะเกิดขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเผาสูงขึ้น การทดสอบปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดผงนั้น ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูที่ดีที่สุดคือ ที่อุณหภูมิ 900 และ 925 องศาเซลเซียส มีสัดส่วนของอนุภาคต่อ รูโหลเท่ากับ 92:8 และ 77:23 ตามลำดับ สามารถกำจัดสีย้อมได้ถึง 89%

ชวาลย์ และคณะ [33] ได้ศึกษาความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส โดยทำการทดสอบการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู และดูความสามารถในการนำกลับมาใช้ซ้ำของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่แตกต่างกัน 2 ชนิด คือ ไทเทเนียม Carlo Erba (Anatase grade) และ ไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 จากผลการวิจัยพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู รูปแบบแผ่นต่ำกว่าแบบผง แต่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยที่ประสิทธิภาพในการเกิดโฟโตคะตะไลซิสไม่เปลี่ยนไปมากนัก และยางที่ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 มีความสามารถในการกำจัดสีย้อมดีกว่า ยางที่ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ Carlo Erba ทั้งแบบแผ่นและผงละเอียด

กาญจนา และนงนุช [34] จากการศึกษา มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อม โดยศึกษาผลของกระบวนการบำบัดแบบผสมผสานระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์ และถ่านกัมมันต์ น้ำย้อมที่ใช้ในการบำบัดได้แก่ น้ำย้อมสีไคเร็กซ์ สีรีแอคทีฟ สีแอซิด สีดิสเพิร์ส และสีเบสิค ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในการ บำบัด คือ 0 5 10 และ 15 กรัมต่อลิตร เวลา คือ 0 2 4 6 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่าสีไคเร็กซ์และสีรีแอคทีฟ มีความเหมาะสมในการบำบัดด้วยเทคนิคโฟโตคะตะไลติกที่ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 10 กรัมต่อลิตร เวลา 6 ชั่วโมง และ ถ่านกัมมันต์ 5 กรัมต่อลิตร เวลา 2 ชั่วโมง ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าเทคนิคโฟโตคะตะไลซิสร่วมกับกระบวนการดูดซับสามารถใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมได้

K.Deepak Kumar และคณะ [35] ได้ทำการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างนาโนใส่ลงในรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO/TiO_2) โดยการใช้ไมโครเวฟเข้าร่วม เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพของการโฟโตคะตะไลซิส จากงานวิจัยทำการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูเปรียบเทียบกับระหว่าง ไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์กับไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างนาโนที่ใส่ลงในรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ที่เวลา 0 และ 45 นาที พบว่า การกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของ rGO/TiO_2 มีประสิทธิภาพมากกว่า เนื่องจากรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์สามารถรับอิเล็กตรอนจากไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เข้าทำปฏิกิริยากับแสงยูวี เกิดออกซิเจนเรดิคอลลกลับไปทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลเรดิคอลลซึ่งสามารถไปกำจัดสีย้อมได้

Nicholas J. Whiteside และคณะ [36] ได้ทำการเตรียมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์โดยใช้ไฮดราซีนเป็นสารรีดิวซ์เอเจนต์ โดยเตรียมจากผงกราฟไฟต์แล้วนำมาผ่านการปรับสภาพโครงสร้างให้ได้กราฟไฟต์ออกไซด์ด้วยวิธีการของฮัมเมอร์ จากนั้นผ่านกระบวนการโซนิเคชันเพื่อให้กราฟไฟต์ออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แยกออกมาเป็นแผ่นกราฟีนออกไซด์ จากนั้นจึงใช้ไฮโดรราซินเป็นตัวรีดิวซ์ แล้วใช้แอมโมเนียเป็นตัวช่วยรักษาสภาพไม่ให้สารแขวนลอยรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เตรียมได้ตกตะกอน โดยในงานวิจัยได้นำเอารีดิวซ์กราฟีนที่เตรียมได้ไปผสมกับแป้งเจแลนกัน ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหารในด้านฟิล์มเคลือบอาหาร โดยการใส่รีดิวซ์กราฟีนลงไปในนั้นสามารถเพิ่มความแข็งแรงเชิงกลให้แก่แผ่นฟิล์มได้มากยิ่งขึ้น นอกจากนั้นเมื่อนำเอาไปทดสอบสมบัติด้านการนำไฟฟ้าก็พบว่า แผ่นฟิล์มเจแลนกันที่มีการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีความสามารถในการนำไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อีกหลากหลาย

Selim Demirci และคณะ [37] ได้ทำการศึกษาและสังเคราะห์แผ่นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ใสอนุภาคซิลเวอร์นาโน ด้วยวิธีโซลเจลสปีนลงบนซิลิกาเวเฟอร์ เพื่อศึกษาเกี่ยวประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสภายใต้แสงยูวีในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู เปรียบเทียบปริมาณอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ใส่ลงไปแตกต่างกันคือ 0.1% 0.3% 0.5% 0.7% 0.9% พบว่าการใส่อนุภาคซิลเวอร์นาโนลงไปในนั้นได้เข้าไปเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้ใส่อนุภาคซิลเวอร์นาโน ผลการวิจัยพบว่า ปริมาณซิลเวอร์นาโนที่เหมาะสมที่สุดคือ 0.5% ซึ่งมีความสามารถในการต้านทานแบคทีเรียที่ดี และเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้เหมาะสม แต่เมื่อใส่ปริมาณอนุภาค ซิลเวอร์นาโนตั้งแต่ 0.7% นั้นจะเกิดควมบกพร่องแบบเส้นทำให้เกิดการแตกบนผิวหน้าของแผ่นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ ช่องว่างของระดับพลังงานแคบลง นอกจากนี้ยังไปเพิ่มคุณสมบัติความชอบน้ำของแผ่นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์อีกด้วย

Yuhao Yang และคณะ [38] ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ของวัสดุผสมระหว่างซิลเวอร์นาโนในไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกราฟีน และการแยกไฮโดรเจนจากโมเลกุลน้ำ ผู้วิจัยได้ทำการโฟโตคะตะไลซิส เพื่อกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูใน 3 ตัวอย่าง คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ (P25) วัสดุผสมไทเทเนียมกราฟีน (PG) และวัสดุผสมซิลเวอร์นาโนในไทเทเนียมกราฟีน (APG) พบว่าปรากฏการณ์เชิงแสง (surface plasmon resonance; SPR) มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของ P25 PG APG เป็น 7% 17% 45% ตามลำดับ เนื่องมาจากผลของ SPR ที่มีต่ออนุภาค ซิลเวอร์นาโน และอัตราการแยกไฮโดรเจนใน APG มีมากกว่า P25 และ PG โดยจะแปรผันกับการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู ซึ่งเห็นได้ชัดว่าผลจากการใช้กราฟีน และ SPR ไปเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในส่วนของบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนในการเตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์-กราฟีนออกไซด์/ซิลเวอร์นาโนอนุภาคนาโนเมตรด้วยวิธีการอย่างง่ายพร้อมทั้งหาสภาวะที่เหมาะสมของซิลเวอร์นาโนอนุภาคนาโนเมตร รวมไปถึงการตรวจสอบลักษณะเฉพาะและประสิทธิภาพของแผ่นยางผสมนี้ โดยจะเริ่มต้นอธิบายตั้งแต่สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือ การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของแผ่นยางผสมนี้ และการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางผสม

3.1 สารเคมี

1. ไทเทเนียมไดออกไซด์ เกรดการค้า (Titanium Dioxide (TiO_2) Degussa P25; Anatase 80: Rutile 20) บริษัท Degussa AG ประเทศ Germany
2. น้ำยางธรรมชาติเข้มข้น (Natural Rubber Latex) 60% HA, บริษัท Chana Latex Co.Ltd จังหวัด สงขลา ประเทศไทย
3. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide, NH_4OH) เกรดวิเคราะห์ ความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร, บริษัท Baker ประเทศ USA
4. ไฮดราซีน (Hydrazine, N_2H_4) reagent grade, บริษัท sigma-aldrich ประเทศ Switzerland
5. ผงกราไฟต์ (Graphite Powder), ขนาดอนุภาค <20 micron, บริษัท Sigma-aldrich ประเทศ Switzerland
6. โซเดียมไนไตรต์ (Sodium nitrite, NaNO_2) บริษัท Carlo Erba Reagents, ประเทศ Italy
7. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (Sulfuric acid, H_2SO_4), เข้มข้น 96% บริษัท Carlo Erba Reagents, ประเทศ Italy
8. โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (potassium permanganate, KMnO_4) บริษัท Carlo Erba Reagents, ประเทศ Italy
9. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide, H_2O_2) บริษัท Merck ประเทศ Germany
10. กรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid, HCl), ความเข้มข้น 5 % บริษัท Baker ประเทศ USA
11. โพลีไวนิลไพโรลิโดน (polyvinylpyrrolidone, PVP, Mw 4,000) บริษัท Sigma-aldrich ประเทศ USA
12. ซิลเวอร์ไนเตรต (silver nitrate, AgNO_3) บริษัท Merck ประเทศ Germany
13. สีย้อมเมทิลีนบลู (Methylene Blue, $\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{N}_3\text{S}$) บริษัท Fluka ประเทศ USA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. อุปกรณ์เครื่องแก้วต่างๆ บริษัท DURAN Group GmbH
2. ตู้ฉายแสงขนาด 38× 76× 76 เซนติเมตร, day light 18 watt, Panasonic จำนวน 4 หลอด
3. เครื่องวัดการดูดกลืนแสงของสาร (UV-Visible spectrophotometer) Evolution 201 Thermo Fisher Scientific ประเทศ USA
4. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) รุ่น JEOL-JSM5800LV ประเทศ Japan
5. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer, XRD) X'Pert MPD, Phillips ประเทศ Netherland
6. เครื่องวิเคราะห์สารด้วยระบบอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR) Nicolet iS50, Thermo Fisher Scientific Inc. ประเทศ USA
7. เครื่องวัดธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive Spectrometer, EDS) Oxford ISIS 300 ประเทศ England
8. เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis, TGA) Mettler Toledo ประเทศ USA
9. เครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์ (Raman spectrometer) Thermo Fisher Scientific Inc. ประเทศ USA
10. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM) JM-2010, JEOL, Japan
11. เครื่องวัดการดูดกลืนแสงของสารที่มีสถานะของแข็ง (UV-Visible Diffuse Reflectance spectrophotometer) UV-2401, Shimadzu, Japan
12. เครื่องปั่นกวนแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)
13. เครื่องกรองแบบลดความดัน (Ultrafiltration) Model WJ-20 Serial no.1 YS94S บริษัท SIBATA
14. เครื่องชั่งความละเอียด 4 ตำแหน่ง GR-200 บริษัท A&D Company
15. เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) LMC-4200 4200RPM, Medifriger-BLT ประเทศ USA
16. เตาอบ (Oven) Serial no.8 502.0552 บริษัท MEMMERT ประเทศ Germany
17. ตู้ดูดควัน (Hood) FH5-03 Flexlab, Nakorn Pathom ประเทศ Thailand
18. กระดาษกรอง Whatman No.42 บริษัท Whatman International Ltd
19. ไมโครปิเปต (Micropipette) ขนาด 10-100 ไมโครลิตร และขนาด 100-1000 ไมโครลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

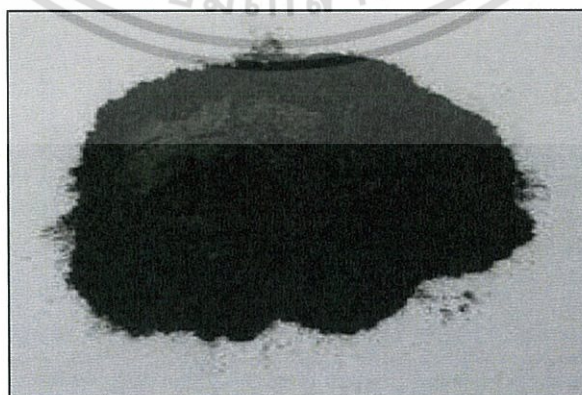
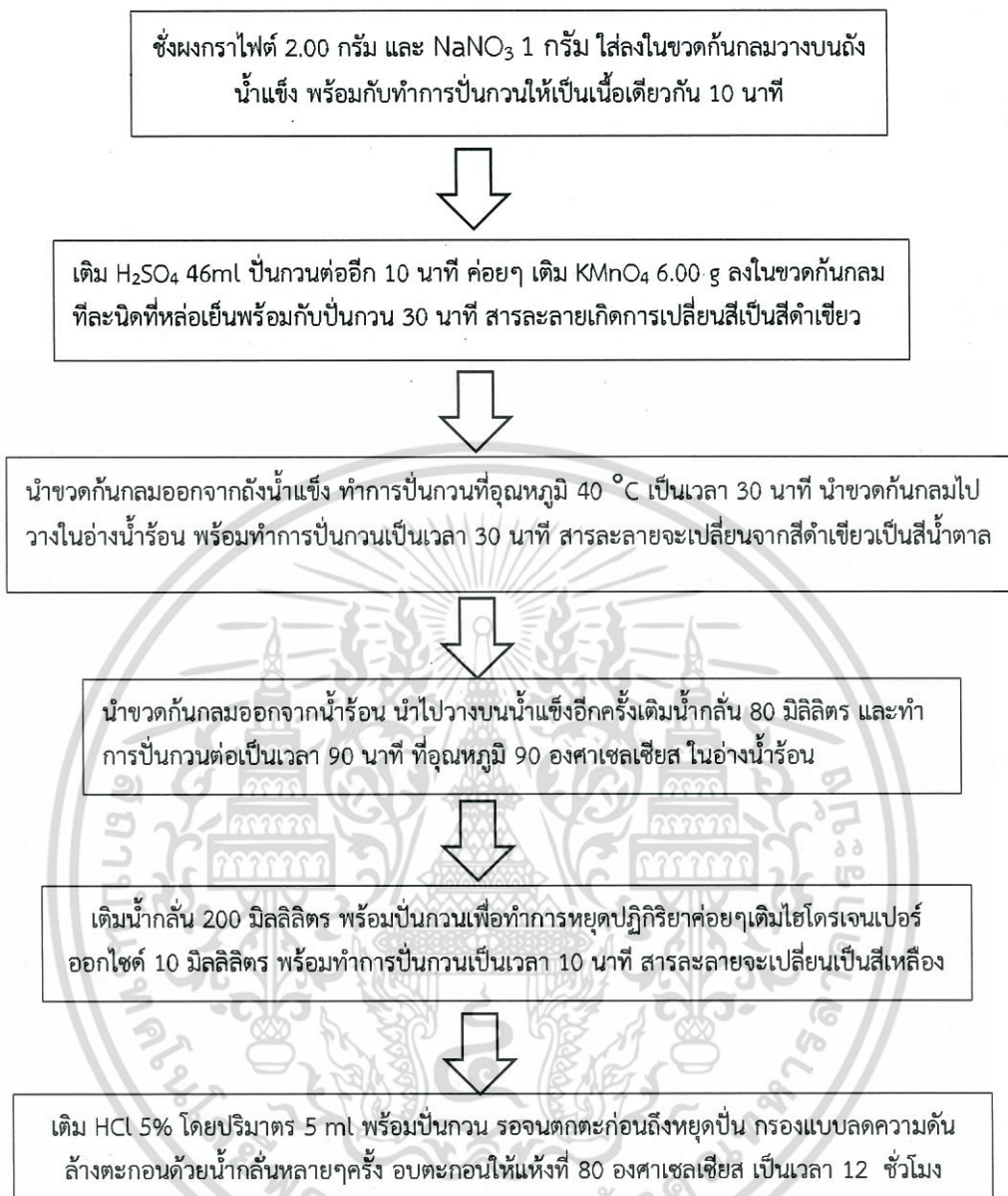
3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมกราไฟต์ออกไซด์

1. ชั่งผงกราไฟต์ 2.00 กรัม และโซเดียมไนเตรท (NaNO_3)
2. ใส่ลงในขวดก้นกลม นำไปวางบนถังน้ำแข็ง พร้อมกับทำการปั่นกวนให้เป็นเนื้อเดียวกันเป็นเวลา 10 นาที
3. เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นปริมาตร 46 มิลลิลิตร พร้อมปั่นกวนต่ออีก 10 นาที
4. ค่อยๆ เติมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตจำนวน 6.00 กรัม ลงในขวดก้นกลมที่ละนิดที่หล่อเย็นพร้อมๆ กับปั่นกวน เป็นเวลา 30 นาที สารละลายเกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีดำเขียว
5. นำขวดก้นกลมออกจากถังน้ำแข็ง ทำการปั่นกวนที่อุณหภูมิ 40°C ในอ่างน้ำร้อน เป็นเวลา 30 นาที สารละลายจะเปลี่ยนจากสีดำเขียวเป็นสีน้ำตาล
6. นำขวดก้นกลมออกจากน้ำร้อน นำไปวางบนน้ำแข็งอีกครั้ง เติมน้ำกลั่น 80 มิลลิลิตร และทำการปั่นกวนต่อเป็นเวลา 90 นาที ที่อุณหภูมิ 90°C ในอ่างน้ำร้อน
7. เติมน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร พร้อมปั่นกวนเพื่อทำการหยุดปฏิกิริยา
8. ค่อยๆ เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10 มิลลิลิตร พร้อมทำการปั่นกวนเป็นเวลา 10 นาที สารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง
9. เติมหัยดรคลอริก 5% โดยปริมาตร จำนวน 5 มิลลิลิตร พร้อมปั่นกวน รอจนตกตะกอนถึงหยุดปั่น
10. ทำการกรองแบบลดความดัน ล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นหลายๆ ครั้ง
11. นำตะกอนเข้าอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80°C ในอ่างน้ำร้อน เป็นเวลา 12 ชั่วโมง



รูปที่ 3.1 กราไฟต์ออกไซด์ที่เตรียมได้หลังนำอบเป็นเวลา 12 ชั่วโมง



รูปที่ 3.2 แสดงการเตรียมกราไฟต์ออกไซด์และภาพผงกราไฟต์ออกไซด์ (Graphite Oxide)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การเตรียมสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์และการหาความเข้มข้นของสารแขวนลอย

นำกราฟต์ออกไซด์ที่เตรียมได้มาทำให้อยู่ในรูปสารแขวนลอย เพื่อที่จะทำให้สะดวกในการนำไปใช้งานต่อไป โดยมีขั้นตอนดังนี้

การเตรียมสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์

1. บดแกรไฟต์ออกไซด์ให้ละเอียด จากนั้นชั่งมา 0.40 กรัม จากนั้นเติมน้ำกลั่นลงไป 40 มิลลิลิตร
2. นำสารที่ได้ไปทำการโซนิเคต เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
3. นำไปหมุนเหวี่ยงโดยใช้เครื่องเซนติฟิวก์ความเร็วรอบ 4000 rpm เป็นเวลา 5 นาที
4. รินสารละลายที่แยกชั้นด้านบนมาเก็บไว้ในขวดแก้ว (ระวังการเกิดตะกอน)



รูปที่ 3.3 ภาพสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide; GO)

การหาความเข้มข้นของสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์

1. นำกระจกใส 2 อัน มาล้างและอบกำจัดความชื้นเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
2. ชั่งน้ำหนักและบันทึกค่าที่ได้หลังอบของนำกระจกใส
3. ใช้ไมโครปิเปตดูดสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ หยดลงบนกระจกใสอันละ 1 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
4. นำออกจากเตาอบและบันทึกค่าน้ำหนักที่ได้ เพื่อคำนวณหาค่าความเข้มข้น

บดแกรไฟต์ออกไซด์ให้ละเอียด จากนั้นชั่งมา 0.40 กรัม
จากนั้นเติมน้ำกลั่นลงไป 40 มิลลิลิตร นำไปโซนิเกต 2 ชั่วโมง



นำไปหมุนเหวี่ยงโดยเครื่อง Centrifuge ใช้ความเร็วรอบ
4000 rpm เป็นเวลา 5 นาที รินสารละลายที่แยกชั้นด้านบน



นำกระจกใส 2 อัน มาล้างและอบกำจัดความชื้นเป็นเวลา 2 ชั่วโมง



ใช้ไมโครปิเปตดูดสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ หยดลงบนกระจกใสอันละ
1 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง



นำออกจากเตาอบและบันทึกค่าน้ำหนักที่ได้ เพื่อคำนวณหาค่าความเข้มข้น

รูปที่ 3.4 แผนผังแสดงการเตรียมและการหาความเข้มข้นของสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์

3.3.3 การเตรียมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (Reduce Graphene Oxide; rGO)

1. เมื่อทราบความเข้มข้นของสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ แล้วจึงปรับความเข้มข้นด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 1 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร
2. นำสารแขวนลอยที่ได้มา 8 มิลลิลิตร เติมลงขวดแก้วขนาด 20 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่นอีก 8 มิลลิลิตร
3. เติมสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 0.20 มิลลิลิตร และสารละลายไฮดราซีน 0.02 มิลลิลิตร ลงในขวดแก้ว
4. ให้ความร้อนในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 3.5 พร้อมกับการ ปั่นกวนเป็นเวลา 20 นาที จะได้สารแขวนลอยสีดำของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์



รูปที่ 3.5 การเตรียมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (Reduce Graphene Oxide) ให้ความร้อนอย่างง่าย



รูปที่ 3.6 เปรียบเทียบลักษณะสารแขวนลอยรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์(rGO) และกราฟีนออกไซด์ (GO)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 การเตรียมอนุภาคซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตร

เพื่อศึกษาถึงผลของการเติมซิลเวอร์ขนาดอนุภาคนาโนเมตรต่อการย่อยสลายสีเขียวในแสง visible จึงทำการเตรียมสารที่จะเติมลงไป โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ชั่งโพลิไวนิลไพโรลิโดน 0.30 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 15 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปปั่นจนเป็นเวลา 5 นาที
2. ชั่งซิลเวอร์ไนเตรต 0.30 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 10 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปปั่นจนเป็นเวลา 5 นาที
3. นำปิกเกอร์ทั้งสองเทรวมกัน จากนั้นนำไปปั่นจนเป็นเวลา 5 นาที
4. นำสารที่ได้จากการปั่นจน เข้าไมโครเวฟที่ 300 วัตต์ เป็นเวลา 90 วินาที โดยพักสารละลายทุก 15 วินาที และทิ้งให้เย็นตัวลงอีก 10 วินาที จึงเข้าไมโครเวฟต่อ
5. เติสารที่ได้ลงขวดแก้ว ดังรูปที่ 3.7 และเก็บไว้ในตู้เย็น รอใช้ในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 3.7 ซิลเวอร์ขนาดอนุภาคนาโนเมตรที่เตรียมโดยใช้ไมโครเวฟเข้าร่วม

เตรียมสารละลายเจือจางซิลเวอร์นาโน และการเก็บรักษา

1. บีบเปิดสารละลายซิลเวอร์นาโนมา 5 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดแก้ว
2. เติมน้ำกลั่นรวมลงไปลงในขวดแก้ว 30 มิลลิลิตร และสารละลายแอมโมเนียลงไป 5 มิลลิลิตร เพื่อรักษาเสถียรภาพของอนุภาคของซิลเวอร์นาโน คนสารละลายให้เข้ากัน
3. จากนั้นซิลเวอร์ที่ถูกเจือจางแล้วเก็บรักษาไว้ในตู้เย็น

3.3.5 การเตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ซิลเวอร์ขนาดอนุภาคนาโนเมตร

โดยปริมาณของน้ำยางธรรมชาติ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คงที่ แต่ทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณของซิลเวอร์ขนาดอนุภาคนาโนเมตร

1. ชั่งไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.0300 กรัม
2. เติมน้ำละลายแอมโมเนีย 5 มิลลิลิตร แล้วปั่นกวนเป็นเวลา 5 นาที
3. เติมซิลเวอร์ขนาดอนุภาคนาโนเมตร 0.02 0.08 0.12 0.17 และ 0.21 wt.% แล้วปั่นกวนเป็นเวลา 5 นาที
4. เติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ 3 มิลลิลิตร และเติมน้ำกลั่น 2 มิลลิลิตร ปั่นกวนต่อเป็นเวลา 5 นาที
5. เติมน้ำยางเข้มข้น 7 มิลลิลิตร แล้วปั่นกวนเป็นเวลา 5 นาที
6. เทขึ้นรูปในแบบที่เตรียมไว้ จากนั้นวางให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
7. แกะแผ่นยางผสมออกจากแบบ ก็จะได้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/อนุภาคนาโนซิลเวอร์

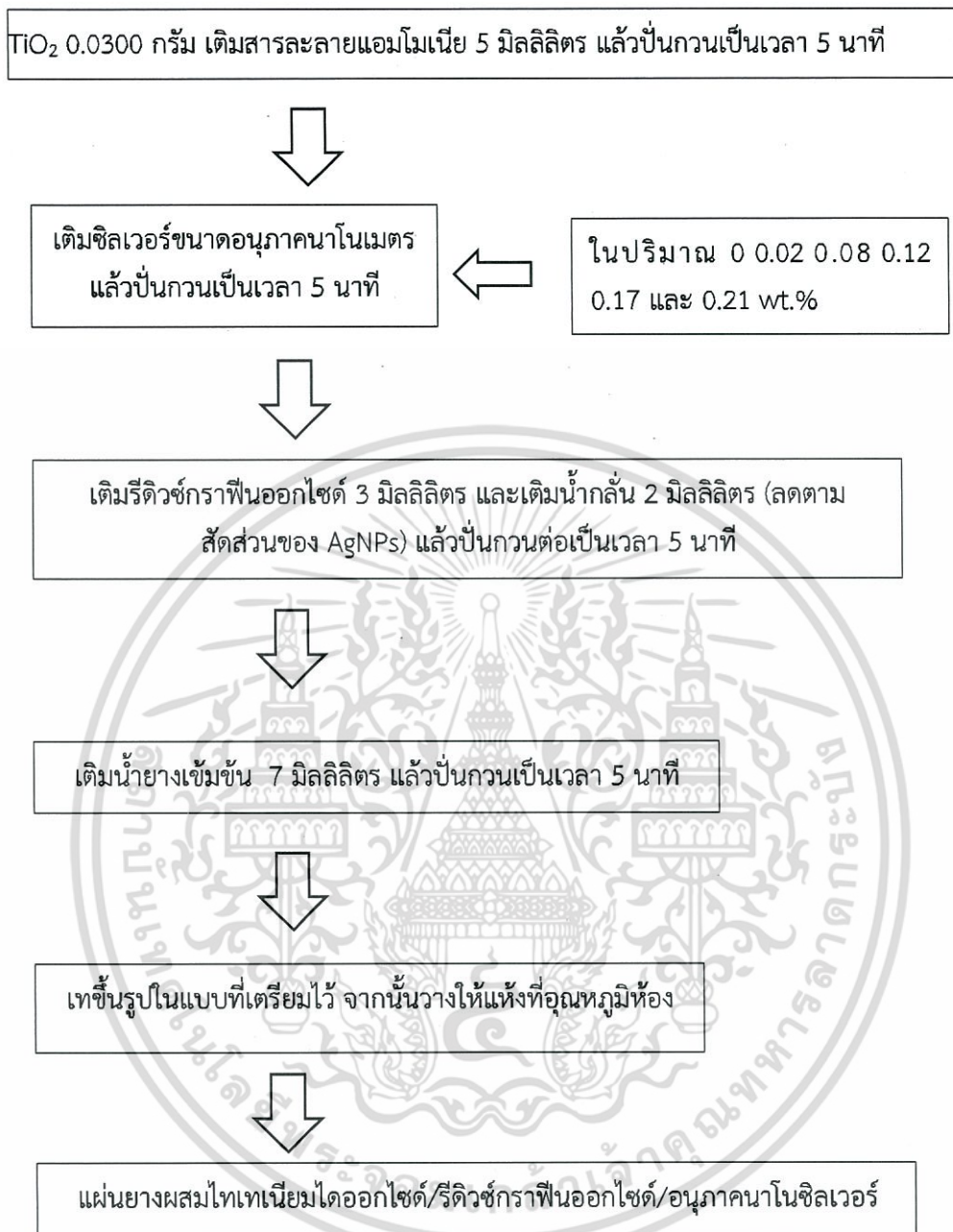


รูปที่ 3.8 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ซิลเวอร์ขนาดอนุภาคนาโนเมตร

ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณสารต่างๆในการเตรียมแผ่นของผสมยางธรรมชาติ

ชื่อสารตัวอย่าง	NR (ml.)	TiO ₂ (g.)	NH ₄ OH (ml.)	rGO (ml.)	น้ำกลั่น (ml.)	AgNPs (ml.)
NR+TiO ₂	7.00	0.0300	5.00	0	2.0000	0
NR+TiO ₂ +rGO	7.00	0.0300	5.00	3.00	2.0000	0
NR+TiO ₂ +rGO+ AgNPs 0.02 wt.%	7.00	0.0300	5.00	3.00	1.990	0.0100
NR+TiO ₂ +rGO+ AgNPs 0.08 wt.%	7.00	0.0300	5.00	3.00	1.9500	0.0500
NR+TiO ₂ +rGO+ AgNPs 0.12 wt.%	7.00	0.0300	5.00	3.00	1.9250	0.0750
NR+TiO ₂ +rGO+ AgNPs 0.17 wt.%	7.00	0.0300	5.00	3.00	1.9000	0.1000
NR+TiO ₂ +rGO+ AgNPs 0.21 wt.%	7.00	0.0300	5.00	3.00	1.8575	0.1250

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 การเตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ซิลเวอร์นาโน

3.4 การวิเคราะห์พิสูจน์เอกลักษณ์

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

อุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวชิ้นงานตัวอย่าง การใช้กล้องจุลทรรศน์ SEM ร่วมกับเทคนิค EDS หรือ EDX ทำให้การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานมีความละเอียด และได้ข้อมูลที่สมบูรณ์มากขึ้น ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยต้องการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวชิ้นงานของแผ่นยางผสมนี้

3.4.2 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)

เป็นเทคนิคที่ใช้เพื่อตรวจสอบสารเชิงคุณภาพ กล่าวคือใช้วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันโครงสร้างของสาร โดยอาศัยหลักการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด เมื่อรังสีอินฟราเรดถูกดูดกลืนพลังงานนั้นจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานหมุนและการสั่นของโมเลกุล โดยโมเลกุลของสารแต่ละชนิดจะให้สเปกตรัมที่เป็นเอกลักษณ์ของพันธะในโมเลกุลนั้นๆ ซึ่งเป็นการพิสูจน์หาโครงสร้างของสาร ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยต้องการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันโครงสร้างของสารประกอบในชิ้นงานยางผสมนี้

3.4.3 Raman spectroscopy

เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณวิเคราะห์สารต่างๆ ทั้งสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และชีวสาร ซึ่งการวิเคราะห์นี้จะได้ออกมาคล้ายกับเทคนิคทางอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี ดังนั้น เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์จึงสามารถทำได้ในทำนองเดียวกัน คือ ใช้หลักการเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานเพื่อการพิสูจน์ตรวจสอบชนิดของสารโดยสเปกตรัมจะต้องเหมือนกันถ้าเป็นสารเดียวกัน แต่ถ้าลักษณะของสเปกตรัมไม่เหมือนกัน ก็อาจใช้หาพวกฟังก์ชันนัลกรุปของโมเลกุลได้โดยเทียบตำแหน่งของแบนด์ในสารตัวอย่างกับ correlation chart หรือตำแหน่งของฟังก์ชันนัลกรุป โดยงานวิจัยนี้ผู้วิจัยต้องการตรวจวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันโครงสร้างของชิ้นงาน

3.4.4 Scanning electron microscope (SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลัขยายสูง การเตรียมตัวอย่างเพื่อที่จะใช้ในการวิเคราะห์ไม่จำเป็นต้องมีขนาดบางก็ได้ เนื่องจากไม่ได้ตรวจวัดจากการที่อิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่าง ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะมีลักษณะเป็นภาพ 3 มิติ ดังนั้นจึงใช้เพื่อศึกษาสัณฐานวิทยาและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง ในงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาสัณฐานวิทยา และดูรายละเอียดพื้นผิวของแผ่นยางผสมนี้

3.4.5 Thermogravimetric Analysis (TGA)

เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุโดยเฉพาะพอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อนโดยการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง เทคนิคนี้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสภาพของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับแก๊สหรือระเหย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของน้ำ การตกผลึก (crystallization) อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนเฟส การแตกตัวของวัสดุ (decomposition) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน หรือ ปริมาณสารสัมพันธ์ (stoichiometry) ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง ตัวอย่างจะถูกวางบนจานขนาดเล็ก ซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่อง ซึ่งละเอียดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง โดยที่ทั้งหมดจะอยู่ในเตาที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและบรรยากาศได้ บรรยากาศภายในอาจจะเป็นแก๊สเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน หรือแก๊สที่มีความว่องไว เช่น อากาศ หรือ ออกซิเจน โดยน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเฉพาะของสารแต่ละชนิด โดยน้ำหนักที่หายไปนั้นเกิดมาจากการระเหย การย่อยสลาย หรือการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ

3.4.6 UV-Visible spectrophotometer

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่าความเข้มแสง ในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่าง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนและสาร อินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้ ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยต้องการตรวจปริมาณแสงและความเข้มแสงในสารละลายเมทิลีนบลู ที่ช่วงความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตร

3.4.7 X-ray diffractometer (XRD)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ที่ไม่ทำลายตัวอย่าง (Non-destructive Method) โดยใช้กันแพร่หลายในการวิเคราะห์วัสดุต่างๆโดยสามารถใช้ในการวิเคราะห์ทดสอบชนิด ปริมาณคุณภาพของสารประกอบแบบผลึกต่างๆในชิ้นงานได้โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุหรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของลำรังสีสะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบ โดยในงานวิจัยนี้ต้องการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก และระบุนิวเคลียสองค์ประกอบต่างๆ ของแผ่นยางผสมนี้

3.4.8 Transmission electron microscope (TEM)

transmission electron microscope (TEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ศึกษาตัวอย่างชนิดบาง ซึ่งเตรียมขึ้นโดยวิธีพิเศษเพื่อให้ลำอนุภาคอิเล็กตรอนผ่านทะลุได้ การสร้างภาพจากกล้องประเภทนี้จะทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่างนั่นเอง เครื่อง TEM เหมาะสำหรับศึกษารายละเอียดขององค์ประกอบภายในของตัวอย่าง เช่น องค์ประกอบภายในเซลล์ ลักษณะของเยื่อหุ้มเซลล์ ผนังเซลล์ เป็นต้น ซึ่งจะให้รายละเอียดสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากมีกำลังขยายและประสิทธิภาพในการแจกแจงรายละเอียดสูงมาก (กำลังขยายสูงสุดประมาณ 0.1 นาโนเมตร)

บทที่ 4

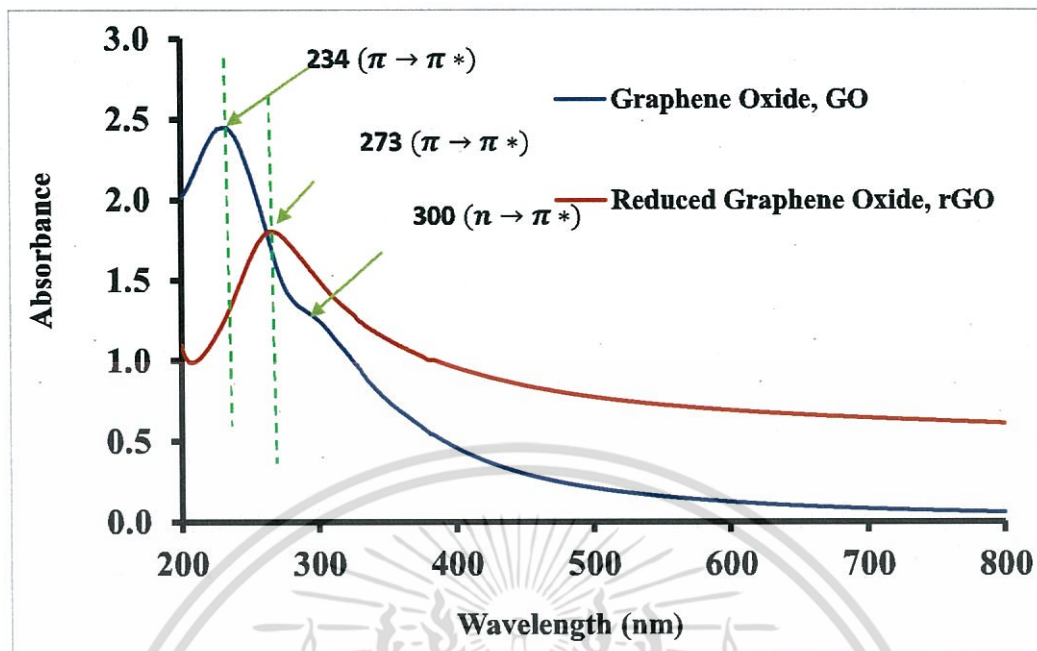
ผลการทดลองและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความสามารถในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสง Visible โดยทั่วไปแล้วจะใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวทำหน้าที่โฟโตคะตะไลซิสภายใต้การแสงยูวี แต่งานวิจัยนี้จะใช้คุณสมบัติ Surface Plasmon Resonance (SPR) ของซิลเวอร์นาโนอนุภาคนาโนเมตร เพื่อไปเพิ่มประสิทธิภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ให้สามารถทำงานได้ภายใต้แสง Visible และมีการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่มีคุณสมบัติรูพรุนสูงช่วยในเรื่องการดูดซับ ยังช่วยในการส่งผ่านอิเล็กตรอน และลดการตกกลับของอิเล็กตรอน (e^- hole recombination) ได้อีกด้วย โดยทำการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของซิลเวอร์นาโน ดังนี้ 0.02 0.08 0.12 0.17 และ 0.21 wt.% ซึ่งจะทำการศึกษาการกำจัดสีย้อม โดยใช้การวัดการดูดกลืนแสง (UV-Vis Spectroscopy) รวมถึงผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารที่นำไปวิเคราะห์ ได้แก่ โครงสร้างของตัวอย่างและองค์ประกอบของโมเลกุลด้วยเครื่องตรวจวัด Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) โครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วย Scanning electron microscope (SEM) วิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณด้วย Energy-dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) การวิเคราะห์ความเสถียรของแผ่นย้อมผสมด้วย Thermogravimetric Analysis (TGA) และ Transmission electron microscope (TEM) วิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาค รวมทั้งศึกษาความเป็นไปได้ในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย โดยมีรายละเอียดตามลำดับต่อไปนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์พิสูจน์เอกลักษณ์ของสารองค์ประกอบที่เติมลงแผ่นย้อมผสม

4.1.1 ผลการศึกษาการตรวจวัดปริมาณแสงและค่าความเข้มแสง ด้วยเครื่องมือ UV-Visible spectrophotometer

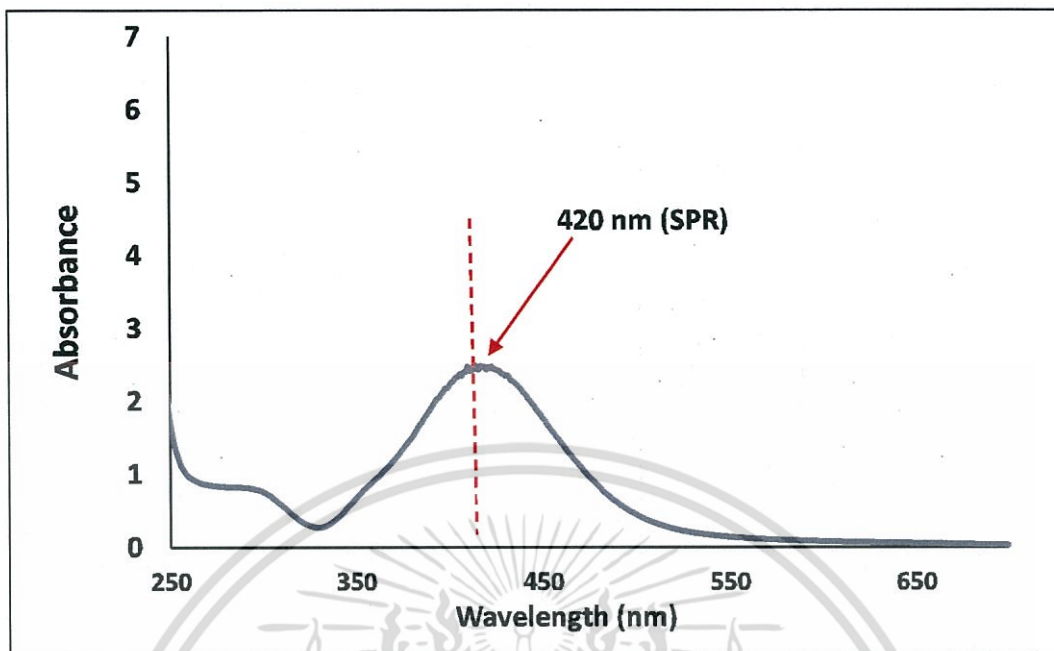
UV-Visible spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่าความเข้มแสง ในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่าง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนและสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้ ซึ่งใช้วิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของกราฟีนออกไซด์ และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์



รูปที่ 4.1 UV-vis spectra ของสารแขวนลอย Graphene Oxide และ Reduce Graphene Oxide

จากกราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ก่อน และหลังการทำปฏิกิริยารีดักชันโดยให้ความร้อนอย่างง่าย ในรูปที่ 4.1 พบว่าสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์มีการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุด (λ_{max}) ประมาณ 234 nm ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสถานะของอิเล็กตรอนจากชั้น $\pi \rightarrow \pi^*$ ของโครงสร้างแบบวงอะโรมาติก (C=C) ของกราฟีนออกไซด์ คือจะมีการดูดกลืนแสงสูงสุดขยับไปทางด้านที่มีความยาวคลื่นเพิ่มขึ้นหรือทางด้านช่วงแสงสีแดง เรียกว่า Red Shift จากผลนี้ชี้ให้เห็นว่าหลังทำปฏิกิริยารีดักชันพันธะภายในของโครงสร้างกราฟีนออกไซด์ มีการปรับเปลี่ยนเป็นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ โดยโครงสร้างที่ถูกปรับเปลี่ยนเป็นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นั้น จะมีการสร้างพันธะคู่แบบอะโรมาติกเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากหมู่ฟังก์ชันออกไซด์ลดลง ซึ่งความยาวคลื่นสูงสุดใหม่ที่ดูดกลืนแสงอยู่ที่ประมาณ 273 nm [39]

จากการทดลองยังพบว่าสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์มีการเปลี่ยนแปลง หลังทำปฏิกิริยารีดักชันโดยให้ความร้อนอย่างง่ายที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 20 นาที สีของสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์จากน้ำตาลเข้มไปเป็นสารแขวนลอยสีดำ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสีของสารแขวนลอยนี้สามารถยืนยันได้ได้ว่า กราฟีนออกไซด์ถูกรีดิวซ์เป็นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

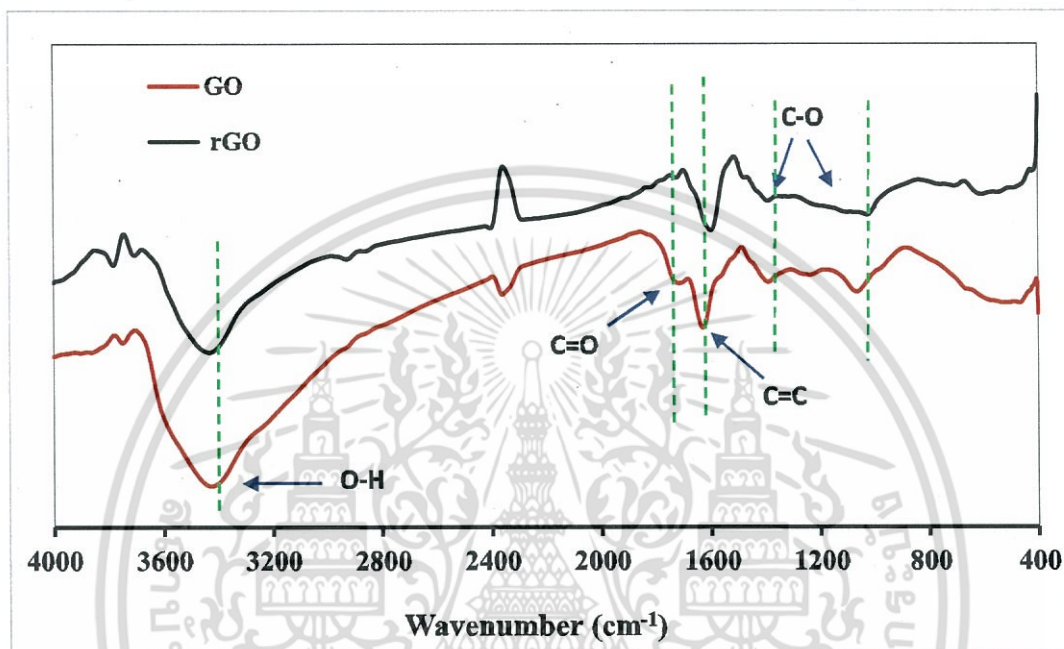


รูปที่ 4.2 สเปกตรัมค่าการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโน

กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโน ดังรูปที่ 4.2 ปรากฏพีกเอกลักษณ์ของสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโน โดยมีค่าการดูดกลืนที่ความยาวคลื่นสูงสุดที่ 420 nm [39] จากการทดลองทำการสังเคราะห์ซิลเวอร์นาโนด้วยวิธีการรีดิวซ์โดยใช้ไมโครเวฟเข้าร่วม ซึ่งพบว่าซิลเวอร์นาโนที่เตรียมได้นั้นเป็นสารแขวนลอยที่มีสีเหลือง เนื่องจากการดูดแสงที่ความถี่ดังกล่าวเป็นค่าการดูดกลืนสีในช่วงแสงสีน้ำเงิน ทำให้เห็นสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนเป็นสีเหลือง เพราะอนุภาคของสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนดูดกลืนแสงสีน้ำเงินไป แสงที่สะท้อนออกมาจากอนุภาคจึงเป็นแสงสีเหลืองนั่นเอง การเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่า Surface Plasmon Resonance (SPR) ซึ่งปรากฏการณ์ SPR ที่เกิดขึ้นนี้ ส่งผลให้ให้แผ่นอย่างผสมนี้สามารถทำงานได้ภายใต้แสงวิสิเบิล (Visible light) เนื่องจากซิลเวอร์นาโนได้รับพลังงานจากภายนอกอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกจำกัดอยู่ในอนุภาคระดับนาโนนั้นจะเกิดการสั่นรวม และเมื่อพลังงานภายนอกที่มากกระตุ้นมีพลังงานเท่ากับพลังงานที่อิเล็กทรอนิกส์ในอนุภาคนาโน จะทำให้เกิดการสั่นแบบ กำทอนทอนขึ้น [39] เป็นผลให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นส่งไปยังชั้นคอนดักชันแบนด์ของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ได้

4.1.2 ผลการศึกษาการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันโครงสร้างของสาร ด้วย Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)

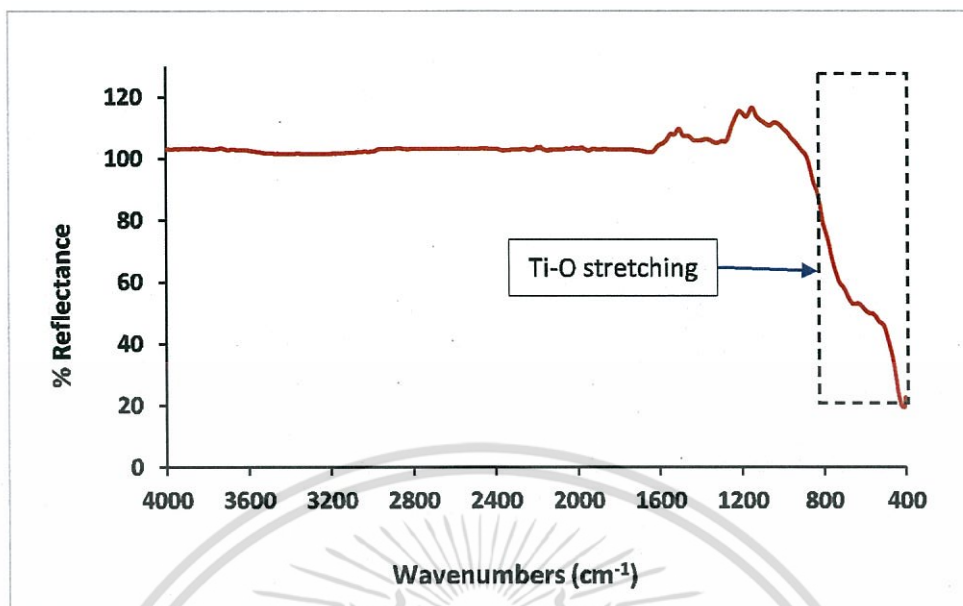
เทคนิค FT-IR เป็นเทคนิคที่ใช้เพื่อตรวจสอบสารเชิงคุณภาพ กล่าวคือใช้วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันโครงสร้างของสาร โดยอาศัยหลักการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด ซึ่งผลการทดลองเป็นดังนี้



รูปที่ 4.3 FT-IR Spectra ของกราฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO)

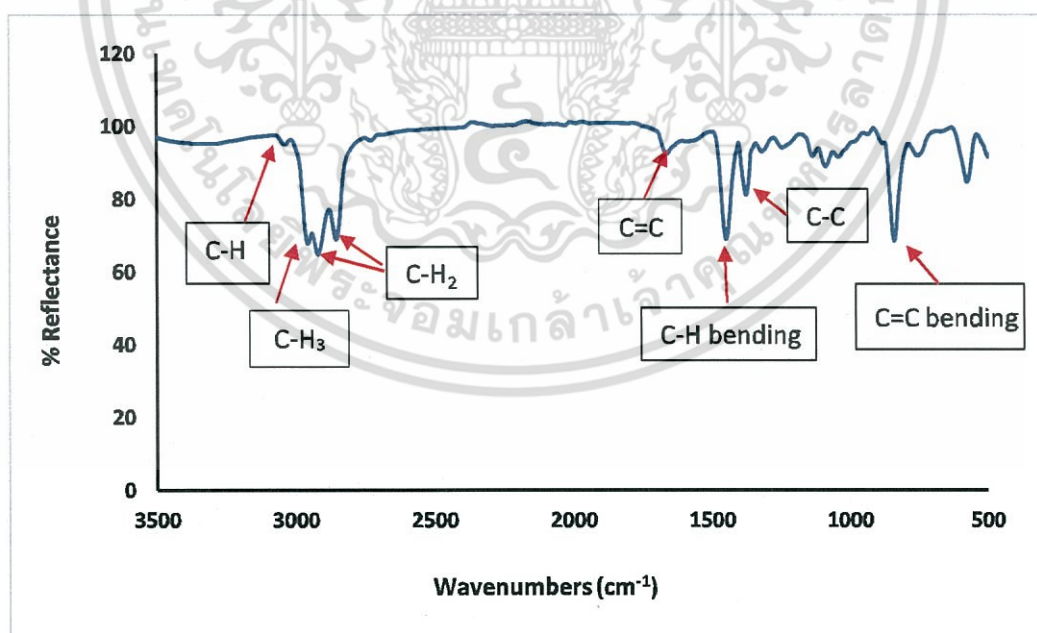
ผลการวิเคราะห์ FT-IR Spectra ของกราฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO) ดังแสดงในรูปที่ 4.3 จะปรากฏแถบการดูดกลืนพลังงานของกราฟีนออกไซด์ที่ประมาณ 3410 cm^{-1} ซึ่งเป็นของหมู่ไฮดรอกซิล (O-H stretching) ที่การแถบการดูดกลืนที่ 1714 cm^{-1} เป็นของหมู่คาร์บอนิลและหมู่คาร์บอกซิล (C=O stretching) ที่การแถบการสั่นของคลื่นประมาณ 1387 cm^{-1} กับ 1070 cm^{-1} ซึ่งเป็นของหมู่อีพอกซี (C-O stretching) ซึ่งลักษณะการสั่นข้างต้นเป็นกลุ่มของออกไซด์ ส่วนแถบการสั่นที่ 2854 cm^{-1} เป็นของอะโรมาติกคาร์บอน (C-H stretching) และที่ประมาณ 1633 cm^{-1} เป็นแถบการสั่นเฉพาะของ sp^2 (C=C stretching) เป็นลักษณะแถบการดูดกลืนพลังงานของวงอะโรมาติกในโครงสร้างของแกรไฟต์ [40]

หลังจากผ่านปฏิกิริยารีดักชันจะได้รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO) พบว่าแถบการดูดกลืนพลังงานที่มีหมู่ฟังก์ชันออกไซด์จะมีความเข้มแสงลดลง และเกิด red shift เนื่องจากหมู่ออกไซด์ในโครงสร้างของกราฟีนออกไซด์นั้นถูกไฮดรอกซิลรีดิวซ์ ซึ่งจะมีการสร้างพันธะคู่ขึ้นมาใหม่ในลักษณะวงอะโรมาติก [39,40]



รูปที่ 4.4 FT-IR Spectra ของไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้า (Titanium Dioxide Degussa P25)

จากกราฟแสดง FT-IR Spectra ของไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้า (Titanium Dioxide Degussa P25) ในรูปที่ 4.4 พบแถบการสั่นเฉพาะของกลุ่ม Metal Oxide ที่บริเวณ $400-1000\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งที่ประมาณ 800 cm^{-1} เป็นแถบการสั่นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (Ti-O stretching) [41]



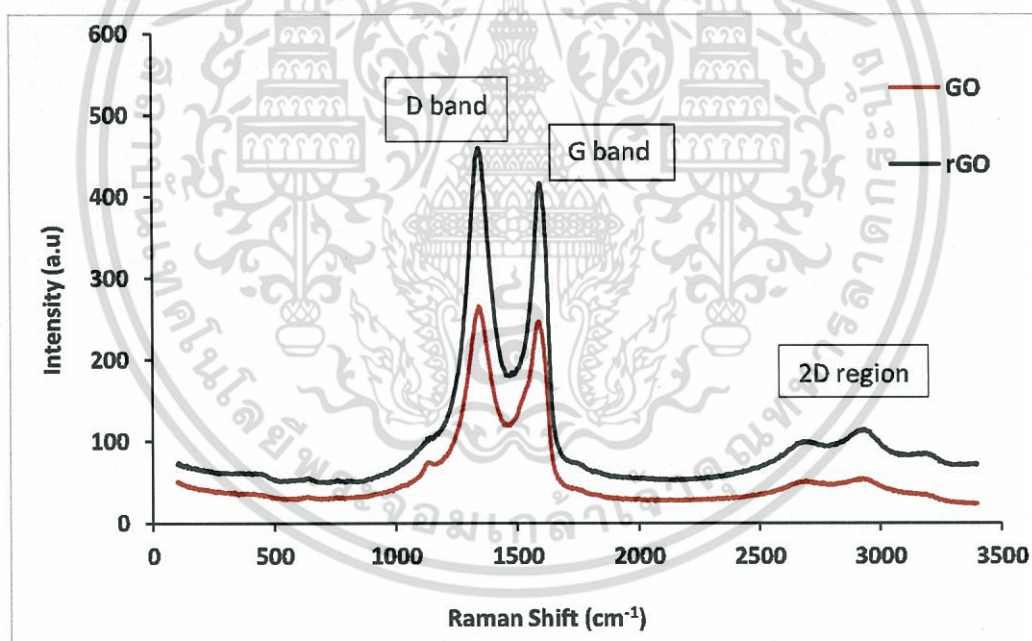
รูปที่ 4.5 FT-IR Spectra ของแผ่นยางธรรมชาติ

จากรูปที่ 4.5 กราฟแสดง FT-IR Spectra ของแผ่นยางธรรมชาติ จากการวิเคราะห์พบว่า แถบการสั่นของคลื่นที่ 3031 cm^{-1} เป็นของ C-H stretching ที่แถบการสั่นที่ 2952 cm^{-1} เป็นแถบเอกซอร์เป็นเอกซอร์ที่สั่นไหวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสั่นของ C-H₃ stretching แถบการสั่นที่ 2912 cm⁻¹ กับ 2841 cm⁻¹ เป็นแถบการสั่นของ C-H₂ stretching ส่วนแถบการสั่นที่ 1650 cm⁻¹ เป็นการสั่นของ C=C stretching แถบการสั่นที่ 1369 cm⁻¹ เป็นของพันธะ C-C bending ส่วนการสั่นของคลีนที่ 1442 cm⁻¹ ซึ่งเป็นการสั่นของ C-H₂ bending และที่ 835 cm⁻¹ แสดงแถบการสั่นของ C=C bending นอกจากนี้ยังพบแถบการดูดกลืนพลังงานของสารชนิดอื่นที่บริเวณ 3500-3100 cm⁻¹ เป็นการสั่นแบบ stretching modes ของหมู่ฟังก์ชัน O-H และ N-H เป็นแถบการสั่นของน้ำและโมเลกุลของแอมโมเนียตามลำดับ เนื่องจากที่ใช้ในวิจัยนั้นเป็นยางชั้น 60% ที่มีการเติมแอมโมเนียเพื่อความเสถียรของน้ำยาง [39-41]

4.1.3 ผลการศึกษาด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโคปี เพื่อวิเคราะห์สารตัวอย่างเชิงคุณภาพและปริมาณ (Raman spectroscopy)

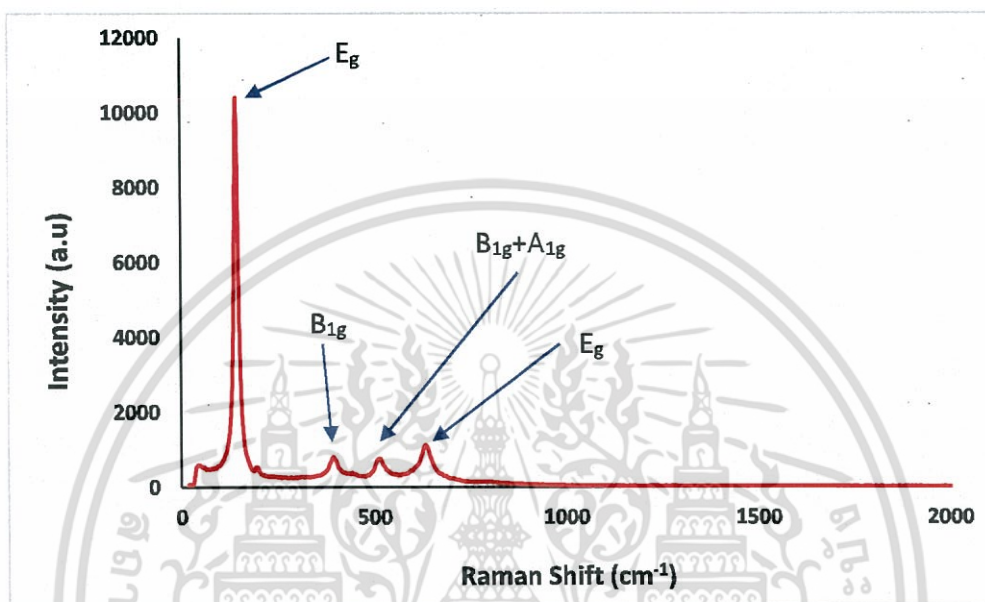
เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณวิเคราะห์สารต่างๆ ทั้งสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และชีวสาร ซึ่งการวิเคราะห์นี้จะได้ผลออกมาคล้ายกับเทคนิคทางอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี ดังนั้น เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์จึงสามารถทำได้ในทำนองเดียวกัน



รูปที่ 4.6 แสดงรามานสเปกตรัมของกราฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO)

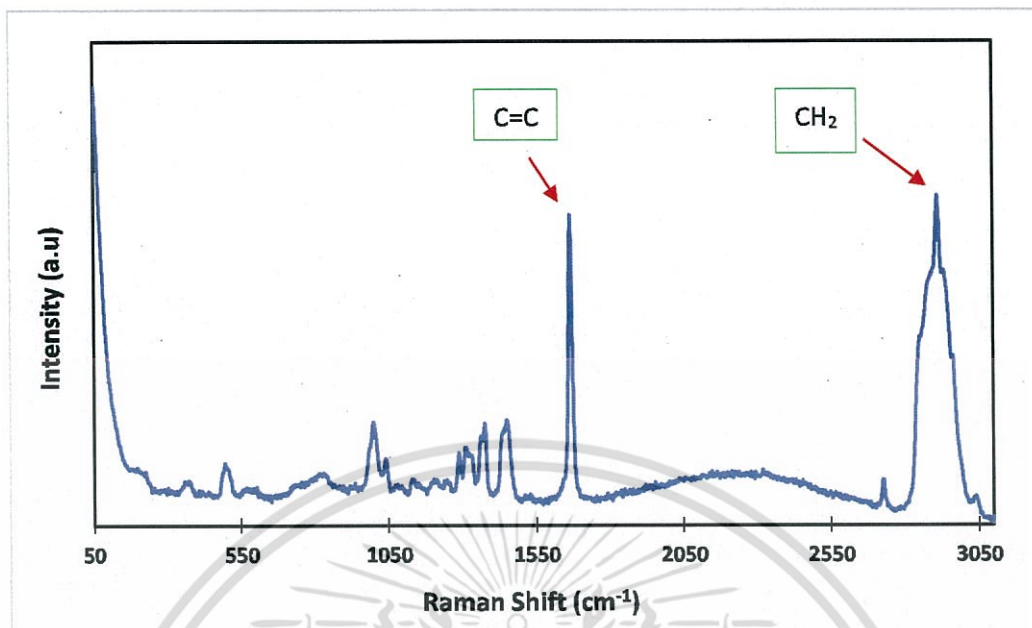
จากรูปที่ 4.6 แสดงรามานสเปกตรัมของกราฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO) ที่ได้จากการทำปฏิกิริยารีดักชัน (rGO) ความเป็นกราฟีนสามารถตรวจสอบได้โดยใช้ Raman spectroscopy (Elaser = 2.41 eV) พบว่า defect ที่เกิดจากการปฏิกิริยาเคมีส่งผลให้พีคของกราฟีนออกไซด์หายไปบริเวณ 2D เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันที่แทรกตัวและเกาะบนระนาบของโครงสร้างแผ่นกราฟีนหลังจากทำปฏิกิริยารีดักชันพบว่าเกิดพีคที่ไม่สูงมากประมาณ 2700 cm⁻¹ หลังจากการผ่านปฏิกิริยารีดักชันทำให้ defect เพิ่มขึ้นไปทำลายลักษณะสัญญาณของกราฟีนออกไซด์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สังเกตได้จากสเปกตรัมของรีติวซ์กราฟีนออกไซด์ แสดง D band ที่ตำแหน่งประมาณ 1352 cm^{-1} มีพิคสูงชันโดยค่า ID/IG เพิ่มขึ้นจากประมาณ 0.99 เป็นประมาณ 1.25 และมี G band ที่ตำแหน่งประมาณ 1605 cm^{-1} นอกจากนี้ ยังแสดงถึงขนาดที่ลดลงของ in-plane sp^2 ของแผ่นรีติวซ์กราฟีนออกไซด์มากขึ้น [42]



รูปที่ 4.7 แสดงรามานสเปกตรัมของไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide Degussa P25)

กราฟแสดงสเปกตรัมของไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้า P25 จะปรากฏพิคเอกลักษณ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกัน 4 ตำแหน่ง คือ E_g , B_{1g} , $B_{1g}+A_{1g}$ และ E_g ซึ่งจะมีแถบการสั่นของเลขคลื่นที่ 143 , 400 , 525 และ 634 cm^{-1} ตามลำดับ [42] ซึ่ง Titanium Dioxide Degussa P25 จะประกอบด้วยเฟสสองเฟส คือ เฟสอนาเทสต่อรูไทล์ เป็น 80:20 จากรูปที่ 4.7 ปรากฏพิคของเฟสอนาเทสเท่านั้น ส่วนพิคของรูไทล์ที่ 446 cm^{-1} และ 612 cm^{-1} ไม่ปรากฏในสเปกตรัม เนื่องจากอนาเทสมีอัตราส่วนที่มากกว่ารูไทล์อยู่มาก [41,42]

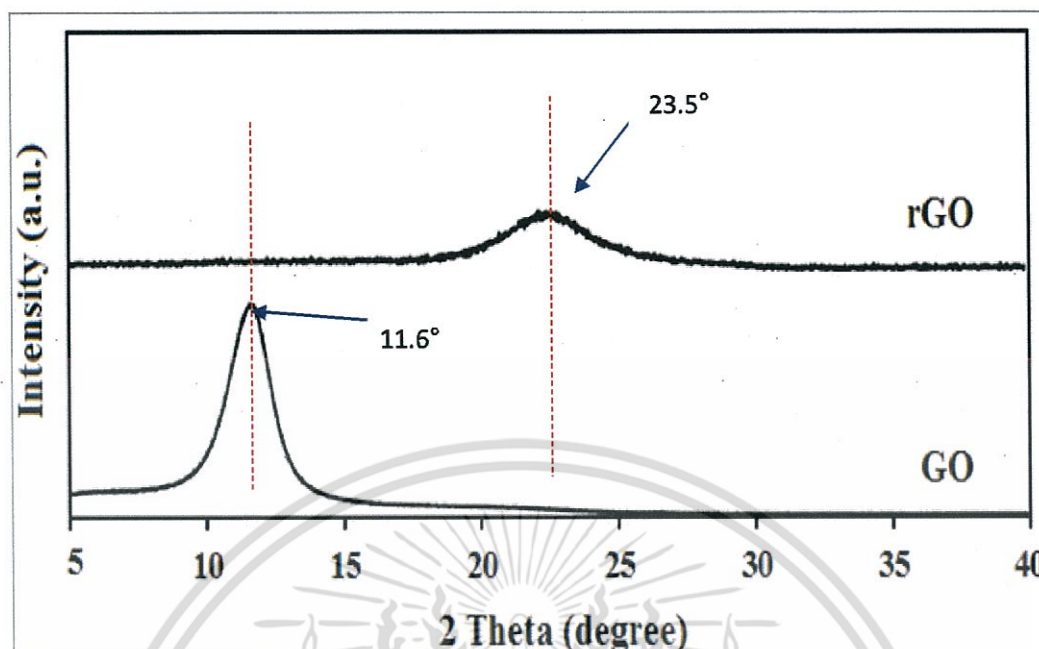


รูปที่ 4.8 แสดงรามานสเปกตรัมของแผ่นยางธรรมชาติ

จากกราฟแสดงรามานสเปกตรัมของแผ่นยางธรรมชาติ จะปรากฏพีกที่ประมาณ 1667 cm^{-1} ซึ่งเป็นแถบการสั่นของพันธะ $\text{C}=\text{C}$ ของหมู่ไอโซพรีน (isoprene group) และยังพบพีกที่ประมาณ 2900 cm^{-1} เป็นการสั่นของพันธะ $\text{C}-\text{H}_2$ ในโครงสร้างของยางธรรมชาติอีกด้วย ซึ่งผลที่ได้จากการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิครามานมีความสอดคล้องกับการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR คือพบพีกเอกลักษณ์ดังกล่าว [43] แต่ในเทคนิค FT-IR ปรากฏพีกเอกลักษณ์ของแถบการสั่น $\text{C}=\text{C}$ ได้ไม่ชัดเจน เนื่องจากโครงสร้างของยางธรรมชาติมีสมมาตรสูง แต่เมื่อใช้เทคนิครามานจะเห็นแถบการสั่น $\text{C}=\text{C}$ ได้อย่างชัดเจน

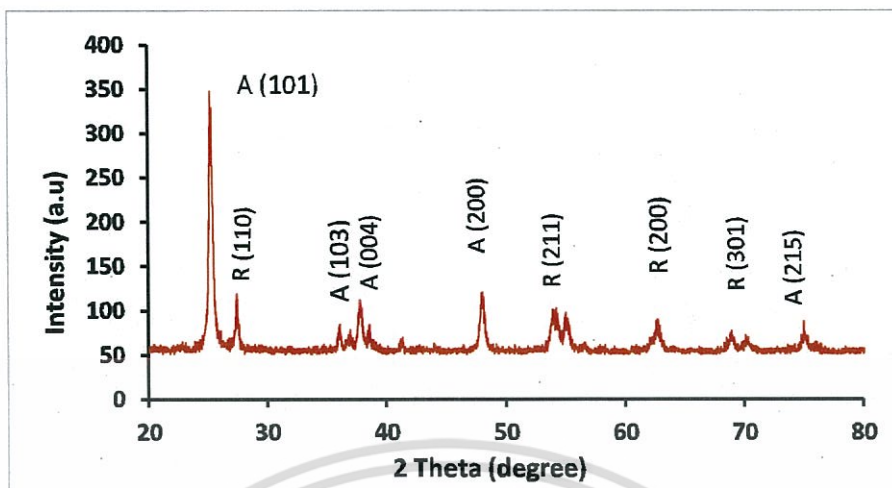
4.1.4 ผลการศึกษาจากเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ เพื่อการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึก และ ออสซิลโลกราฟี (X-ray diffractometer, XRD)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ที่ไม่ทำลายตัวอย่าง (Non-destructive Method) โดยใช้กันแพร่หลายในการวิเคราะห์วัสดุต่างๆ โดยสามารถใช้ในการวิเคราะห์ทดสอบชนิด ปริมาณคุณภาพของสารประกอบแบบผลึกต่างๆ ในชิ้นงานได้โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุหรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของลำรังสีสะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบ โดยในงานวิจัยนี้ต้องการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก และ ระบุวิวัฒนาการขององค์ประกอบต่างๆ ของแผ่นยางผสมนี้



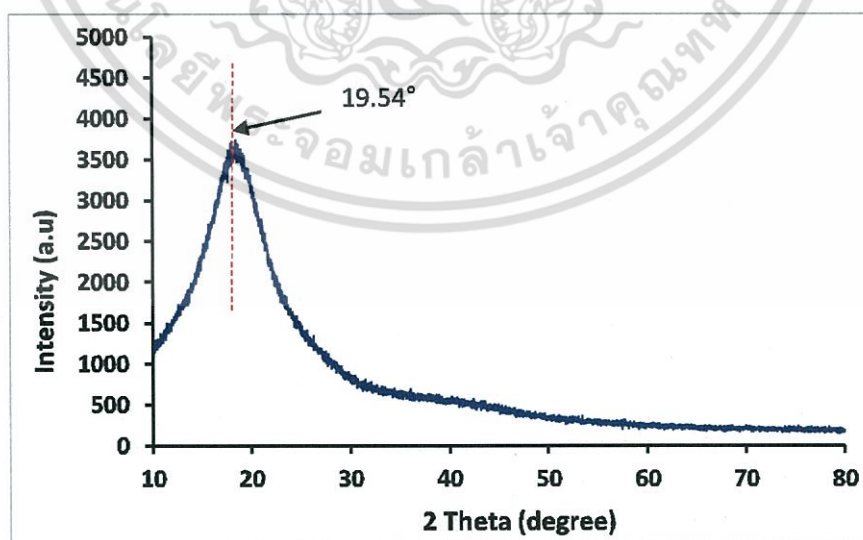
รูปที่ 4.9 XRD pattern ของกราฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO)

แสดงกราฟ XRD pattern เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างกราฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO) ในรูปที่ 4.9 จากกราฟของ GO พบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มุมการเลี้ยวเบน 2θ เท่ากับ 11.6° เป็นมุมการเลี้ยวเบนของกราฟีนออกไซด์ ที่มีอะตอมเรียงกันเป็นชั้นๆ แต่ละชั้นเกิดจากอะตอมคาร์บอนเรียงตัวกันเป็นรูปหกเหลี่ยมคล้ายรังผึ้ง [44] โดยเชื่อมกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ ซึ่งความกว้างของระหว่างชั้นมากขึ้น เนื่องมาจากองค์ประกอบที่มีออกซิเจนจากหมู่คาร์บอกซิล ไฮดรอกซิล และอีพอกไซด์ จึงทำให้ได้กราฟที่มีความเข้มสูงมาก หลังจากกระบวนการรีดักชันโดยให้ความร้อนอย่างง่าย กราฟีนออกไซด์จะเปลี่ยนเป็นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ จะพบมุมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ 23.5° ซึ่งพีคที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะกว้าง (broad) แสดงให้เห็นว่าเป็นผลึกที่ลดลงมาก และพีคเลื่อนไปทางด้านขวา เนื่องจากในกระบวนการรีดิวซ์ให้ความร้อนประมาณ 90°C ทำให้แผ่นกราฟีนออกไซด์ถูกฉีกขาด ทำให้ความเป็นระเบียบลดลงตามไปด้วย ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าระยะห่างระหว่างระนาบได้จากกฎของแบรกก์ ซึ่งค่านี้จะแปรผกผันกับ 2θ เมื่อคำนวณหาค่าระยะห่างระหว่างระนาบของ GO และ rGO จะได้ 0.76 nm และ 0.38 nm ตามลำดับ ระยะห่างระหว่างระนาบลดลงจึงสามารถยืนยันได้ว่าเกิดการรีดิวซ์ทำให้ชั้นออกไซด์หลุดออกกระหว่างของชั้นจึงของกราฟีนออกไซด์จึงลดลงด้วย [45]



รูปที่ 4.10 XRD pattern ของไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide Degussa P25)

จากกราฟแสดง XRD pattern ของไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide Degussa P25) ในรูปที่ 4.10 จะพบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มุมการเลี้ยวเบน ที่บริเวณ 2θ เท่ากับ 25.28° 38.43° 39.24° 48.92° 76.80° มีรูปแบบการเลี้ยวเบนเป็น (101) (103) (004) (200) และ (215) ตามลำดับ ซึ่งเป็นเฟสอนาเทส (Anatase) และพบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มุมการเลี้ยวเบนที่บริเวณ 2θ เท่ากับ 27.62° 54.42° 63.28° 69.48° มีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เป็น (110) (211) (200) (301) คือ เฟสรูไทล์ (Rutile) เนื่องจาก Titanium Dioxide Degussa P25 Powder จะประกอบด้วยกัน 2 เฟส คือ เฟสอนาเทส (Anatase) 80 ต่อเฟสรูไทล์ (Rutile) 20 [46] และแสดงในรูปที่ 4.11 เป็น XRD pattern ของยางธรรมชาติจะพบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มุมการเลี้ยวเบนที่บริเวณ 2θ เท่ากับ 19.54° [46]

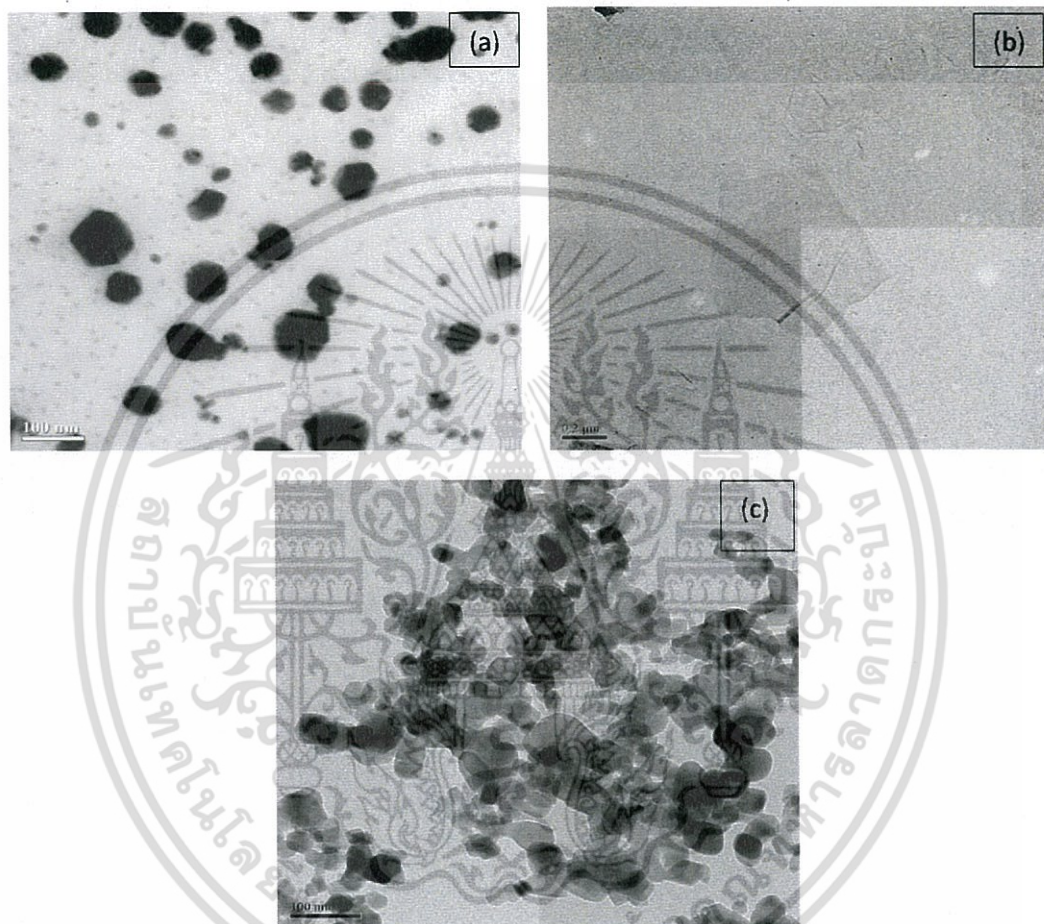


รูปที่ 4.11 XRD pattern ของแผ่นยางธรรมชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.5 ผลการศึกษาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM)

เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ศึกษาตัวอย่างชนิดบาง ซึ่งเตรียมขึ้นโดยวิธีพิเศษเพื่อให้ลำอนุภาคอิเล็กตรอนผ่านทะลุได้ เพื่อดูลักษณะสองมิติของชิ้นงาน



รูปที่ 4.12 แสดง (a) อนุภาคนาโนซิลเวอร์ (b) อนุภาคของรีดิซกรราฟีนออกไซด์ และ (c) อนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์

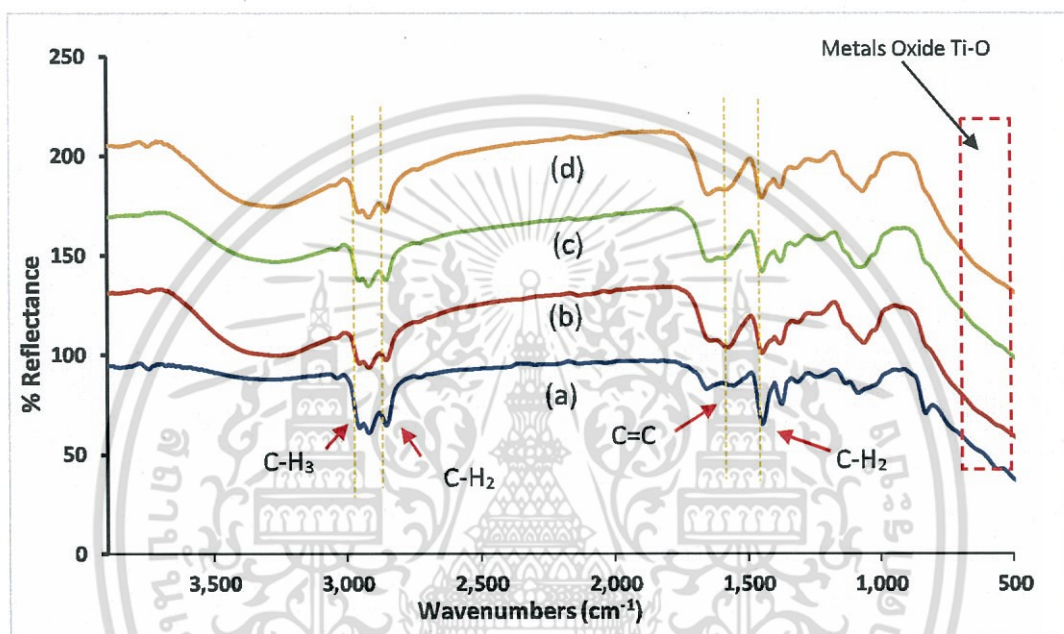
จากรูปที่ 4.12 (a) พบว่าอนุภาคซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตร มีลักษณะเป็นทรงกลมขนาดต่างๆ การกระจายตัวอย่างความสม่ำเสมอ ส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์มีลักษณะคล้ายทรงกลม ดังรูปที่ 4.12 (c) ในขณะที่รีดิซกรราฟีนออกไซด์มีลักษณะเป็นแผ่นบางมีสมมาตรรูปร่างไม่แน่นอน ดังแสดงในรูปที่ 4.12 (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการวิเคราะห์ที่พิสูจน์เอกลักษณ์ของแผ่นยางธรรมชาติผสม

4.2.1 ผลการศึกษาการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันโครงสร้างของสาร ด้วย Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)

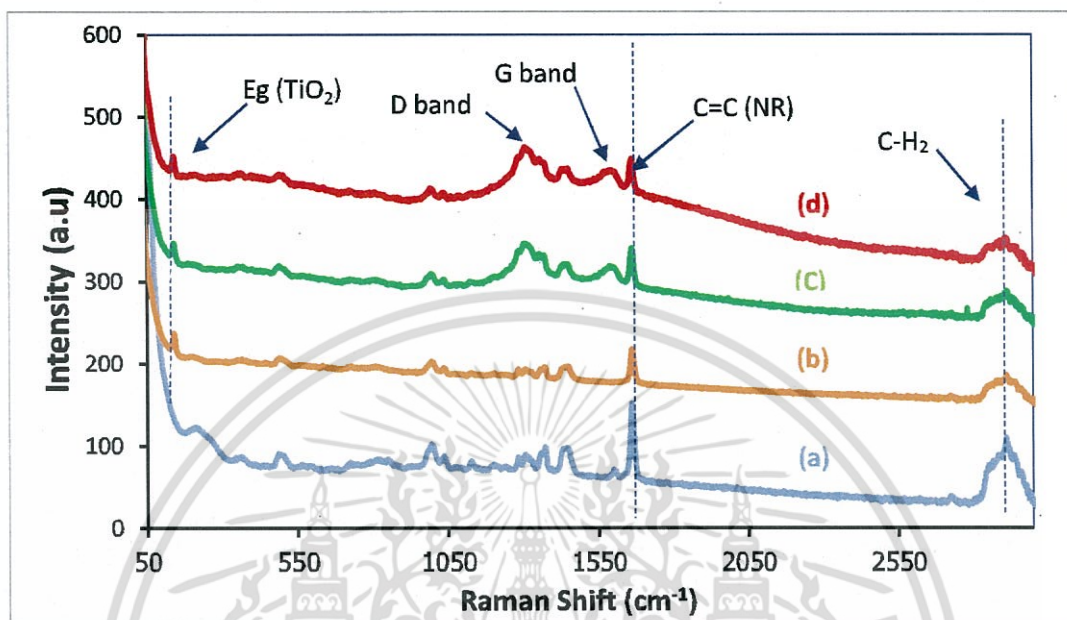
Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) เป็นหนึ่งในเทคนิคทางด้าน Infrared Spectroscopic ที่มีประสิทธิภาพในการจำแนกประเภทต่างๆ ของสารอินทรีย์



รูปที่ 4.13 FT-IR spectra (a) NR+TiO₂ (b) NR+TiO₂+rGO (c) NR+TiO₂+rGO+AgNPs 0.12 wt.% และ NR+TiO₂+rGO+AgNPs 0.21 wt.%

จากการวิเคราะห์ผลจาก FT-IR spectra พบว่าแผ่นยางที่มีการผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ จะแสดงการสั่นที่ 3265 cm⁻¹ เป็นการสั่นลักษณะของ O-H stretching พบการสั่นของคลิ่นที่ 2950 cm⁻¹ ซึ่งเป็นการสั่นของ CH₃ stretching และที่ 2920 cm⁻¹ เป็นการสั่นลักษณะของ CH₂ stretching การสั่นที่เลขคลื่น 2845 cm⁻¹ มีลักษณะการสั่นแบบ Symmetry Stretching แลพบการสั่นที่ 1650 cm⁻¹ มีลักษณะการสั่นแบบ C=C Stretching และพบแถบการสั่นที่ความยาวคลื่น 1440 cm⁻¹ เป็นลักษณะการสั่นแบบ CH₂ Bending ซึ่งแถบที่กล่าวมาข้างต้นนั้นเป็นการสั่นที่ตรงกับยางพารา และยังพบแถบการสั่นของคลิ่นที่ช่วงความยาวคลื่น 500 cm⁻¹ ถึง 1000 cm⁻¹ จะเป็นช่วงการสั่นที่ตรงกับ การสั่นของไทเทเนียมไดออกไซด์ จากกราฟแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างวัสดุแผ่นยางผสมทั้ง 4 ชนิดนั้น พบพีคสเปกตรัมที่สอดคล้องไปทางลักษณะเดียวกัน [39-41]

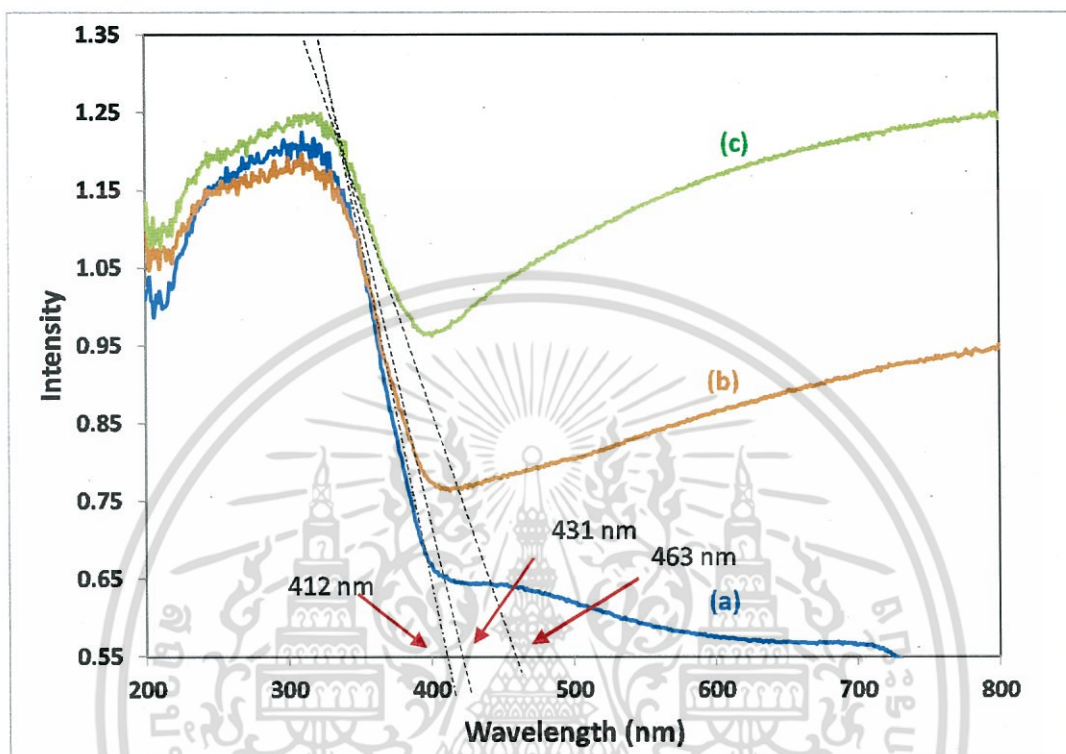
4.2.2 ผลการศึกษาด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโคปี (Raman spectroscopy) เพื่อวิเคราะห์สารตัวอย่างเชิงคุณภาพและปริมาณ



รูปที่ 4.14 รามานสเปกตรัมของ แผ่นยางธรรมชาติ (a) แผ่นยางผสมไทเทเนียม (b) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (c) และแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณ 0.21 wt.% (d)

ศึกษาองค์ประกอบโมเลกุลของวัสดุตัวอย่างด้วยปรากฏการณ์การกระเจิงแสงของปรากฏการณ์ดังแสดงในรูปที่ 4.14 โดยผลการตรวจวิเคราะห์พบ รามานสเปกตรัมของยางธรรมชาติที่ตำแหน่งพิกัด 1660 cm^{-1} รามานสเปกตรัมของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ตำแหน่งพิกัด 143 cm^{-1} และรามานสเปกตรัมของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ที่ตำแหน่งพิกัดบริเวณ $1300 - 1500\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเมื่อสังเกตเปรียบเทียบแผ่นยางของผสมทั้ง 4 ชนิด พบว่าการที่ความเข้มพิกัดเอกลักษณ์ของยางธรรมชาติ C=C ลดต่ำลง เนื่องจากเมื่อมีการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ และซิลเวอร์นาโนอนุภาคนาโนเมตร ยางธรรมชาติซึ่งเป็นเมทริกซ์นั้นมีสิ่งเจือปนทำให้ลักษณะการสั่นของพลังงานเปลี่ยนไป ความเข้มพิกัดของยางธรรมชาติจึงลดลง นอกจากนี้ยังพบพิกัดเอกลักษณ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่บริเวณประมาณ $130-520\text{ cm}^{-1}$ [41-43]

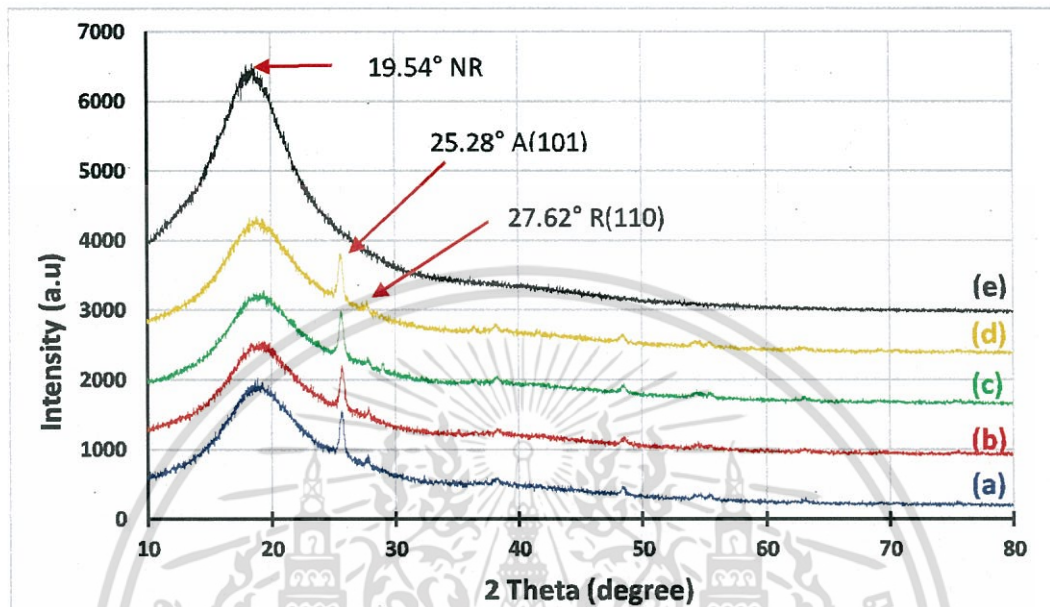
4.2.3 ผลการศึกษาการตรวจวัดปริมาณแสงและค่าความเข้มแสง ด้วยเครื่องมือ UV-DRS spectrophotometer



รูปที่ 4.15 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของ (a) NR+TiO₂ (b) NR+TiO₂+rGO (c) NR+TiO₂+rGO+AgNPs 0.21 wt.%

รูปที่ 4.15 แสดงผลการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ของแผ่นผสมยางธรรมชาติ พบว่า แผ่นของผสมยางธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการเติมอนุภาคซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตรนั้น สามารถดูดกลืนแสงในช่วงวิสิเบิลได้สูงมาก เมื่อเทียบกับแผ่นของผสมยางธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์ และยางธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ความเข้มที่สูงมากของแผ่นของผสมยางธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการเติมอนุภาคซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตร เป็นผลมาจากอนุภาคของซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตรที่มีความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นของแถบวิสิเบิล คลื่นแสงที่ถูกดูดกลืนจะเป็นช่วงความยาวคลื่นที่ยาวขึ้นกว่าเดิม และมีความเข้มของการดูดกลืนก็มีค่าเพิ่มขึ้นสูงอีกด้วย เนื่องจากคุณสมบัติของอนุภาคซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตรในการเกิดปรากฏการณ์เชิงแสงที่เรียกว่า surface plasmon resonance [44]

4.2.3 ผลการศึกษาจากเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ เพื่อการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึกและออสัญฐาน (X-ray diffractometer, XRD)

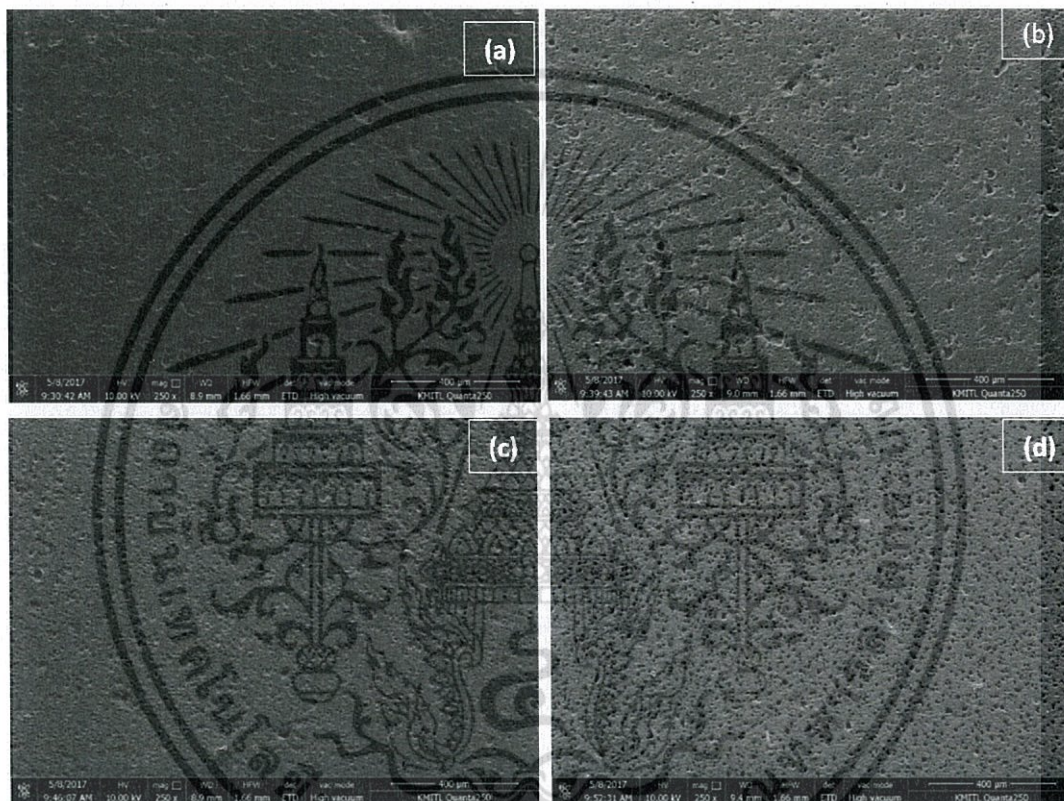


รูปที่ 4.16 XRD pattern (a) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (b) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (c) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ซิลเวอร์นาโนปริมาณ 0.12 wt.% (d) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ซิลเวอร์นาโน 0.21 wt.% และ (e) ของแผ่นยางธรรมชาติ

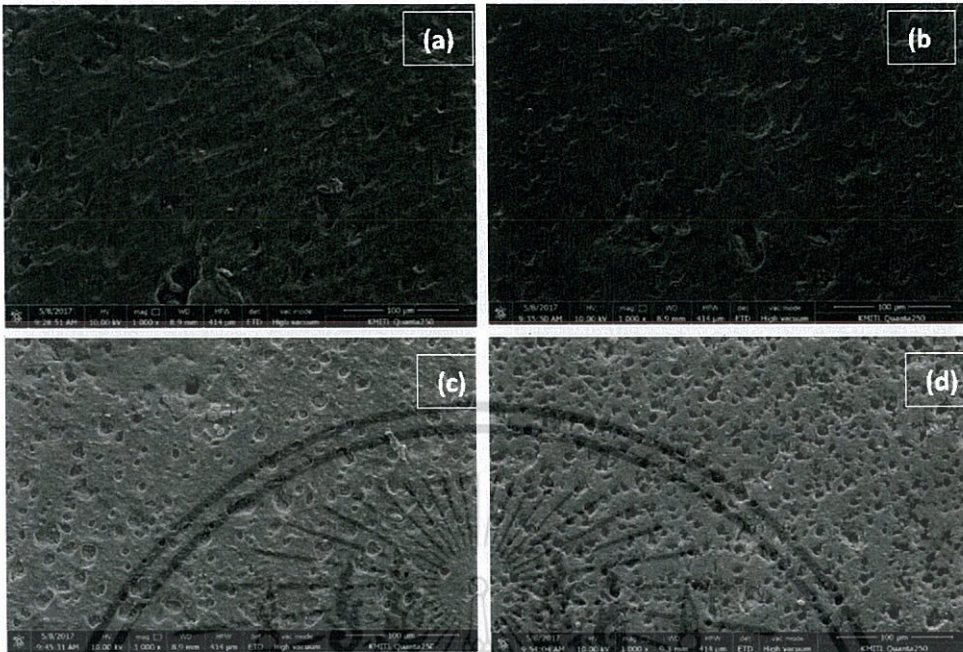
จากกราฟแสดง XRD pattern แผ่นของผสมยางธรรมชาติ/ไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ และซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตรในปริมาณต่างๆ พบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มีการเลี้ยวเบน บริเวณ 2θ เท่ากับ 19.54° ซึ่งเป็นพีคเอกลักษณ์ของยางธรรมชาติ ส่งผลให้ฐานพีคมีบริเวณกว้าง เนื่องจากความเป็นพอลิเมอร์อสัญฐาน และยังพบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มีการเลี้ยวเบนบริเวณ 2θ เท่ากับ 25.28° และ 27.62° ของไทเทเนียมไดออกไซด์ เฟสอนาเทส (Anatase) และเฟสรูไทล์ (Rutile) ซึ่งตรงกับระนาบ (101) และ (110) ตามลำดับ ตรวจสอบความเข้มของพีคได้ในทั้ง 4 ตัวอย่างที่มีการเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ แต่ไม่พบพีคของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ เนื่องจากอาจถูกบดบังด้วยพีคของไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสอนาเทส ซึ่งมีมุมเลี้ยวเบนใกล้เคียงกับพีคเอกลักษณ์ของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ และไม่ปรากฏพีคเอกลักษณ์ของซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตรทุกตำแหน่งการเลี้ยวเบนที่ $38.18(111)$ $44.25(200)$ $64.72(220)$ $77.4(311)$ เนื่องจากเมื่อเทียบสัดส่วนต่อน้ำยางธรรมชาติที่เป็นเมทริกซ์ของของผสมแล้วมีปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น [45]

4.2.4 ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

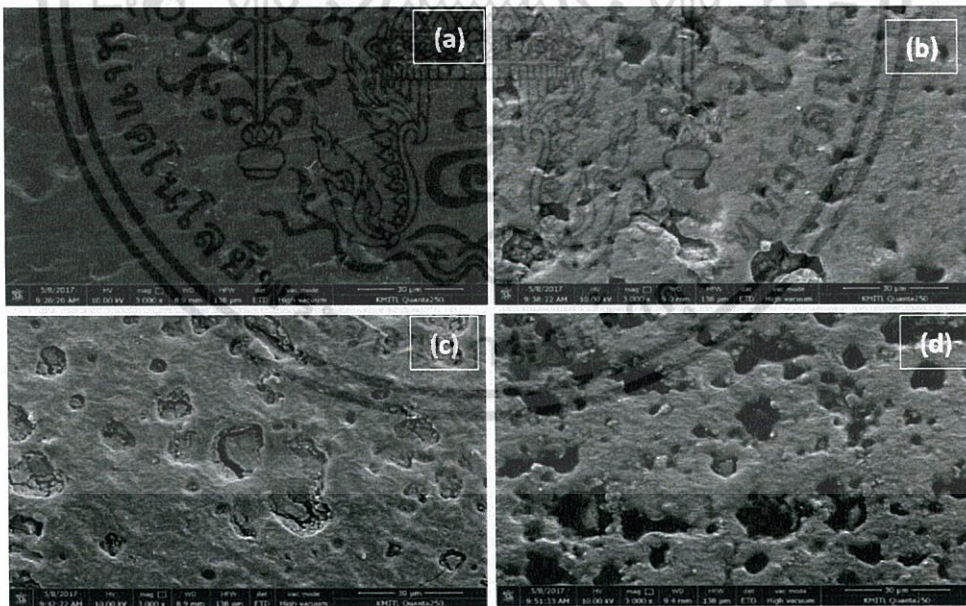
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ใช้ในการศึกษาสัณฐานวิทยา และรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างสามารถแสดงให้เห็นลักษณะพื้นผิวของวัสดุ ขนาด และรูปร่างหรือตำแหน่งที่สนใจบนชิ้นงาน และแสดงให้เห็นการกระจายตัวของเฟสในโครงสร้างจุลภาค



รูปที่ 4.17 แสดงลักษณะสัณฐานของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (a) และแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ซิลเวอร์นาโน 0.02 % wt. (b) 0.12 wt.% (c) และ 0.21 wt.% (d) ที่กำลังขยาย x 500 เท่า

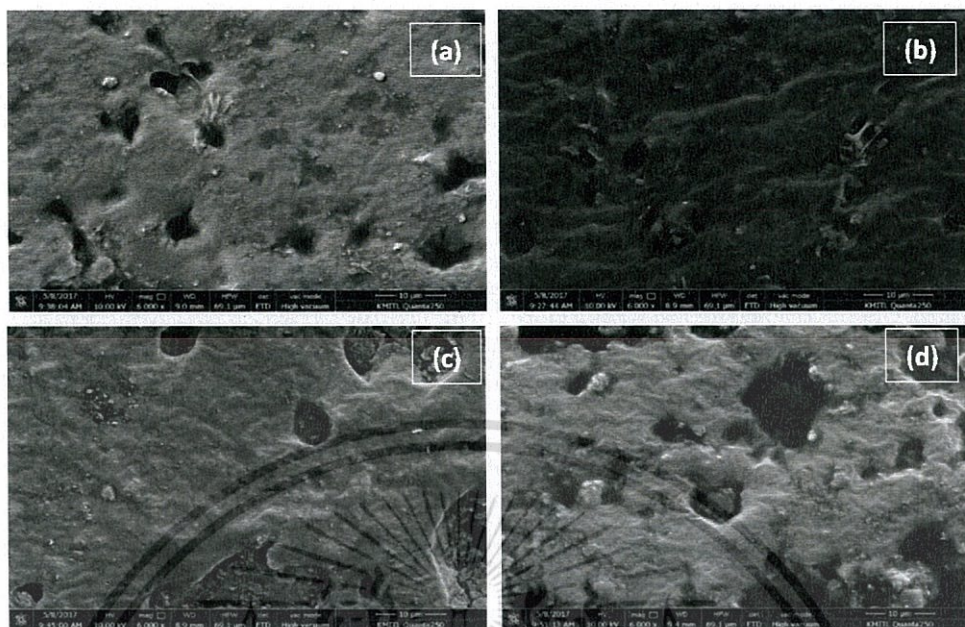


รูปที่ 4.18 แสดงลักษณะสัณฐานของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (a) และแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ซิลเวอร์นาโน 0.02 % wt. (b) 0.12 wt.% (c) และ 0.21 wt.% (d) ที่กำลังขยาย $\times 1000$ เท่า



รูปที่ 4.19 แสดงลักษณะสัณฐานของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (a) และแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ซิลเวอร์นาโน 0.02 % wt. (b) 0.12 wt.% (c) และ 0.21 wt.% (d) ที่กำลังขยาย $\times 3000$ เท่า

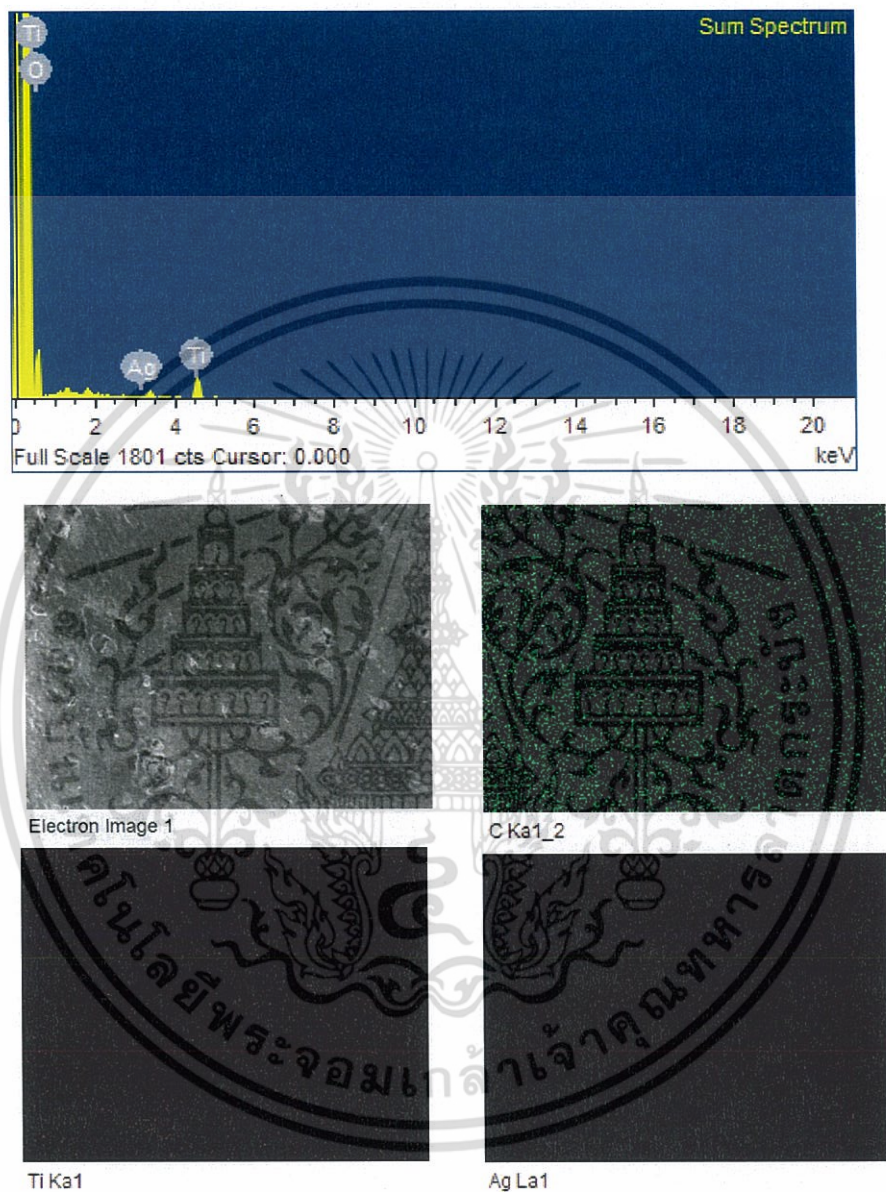
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 แสดงลักษณะสัญญาณของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (a) และแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ซิลเวอร์นาโน 0.02 wt.% (b) 0.12 wt.% (c) และ 0.21 wt.% (d) ที่กำลังขยาย x 6000 เท่า

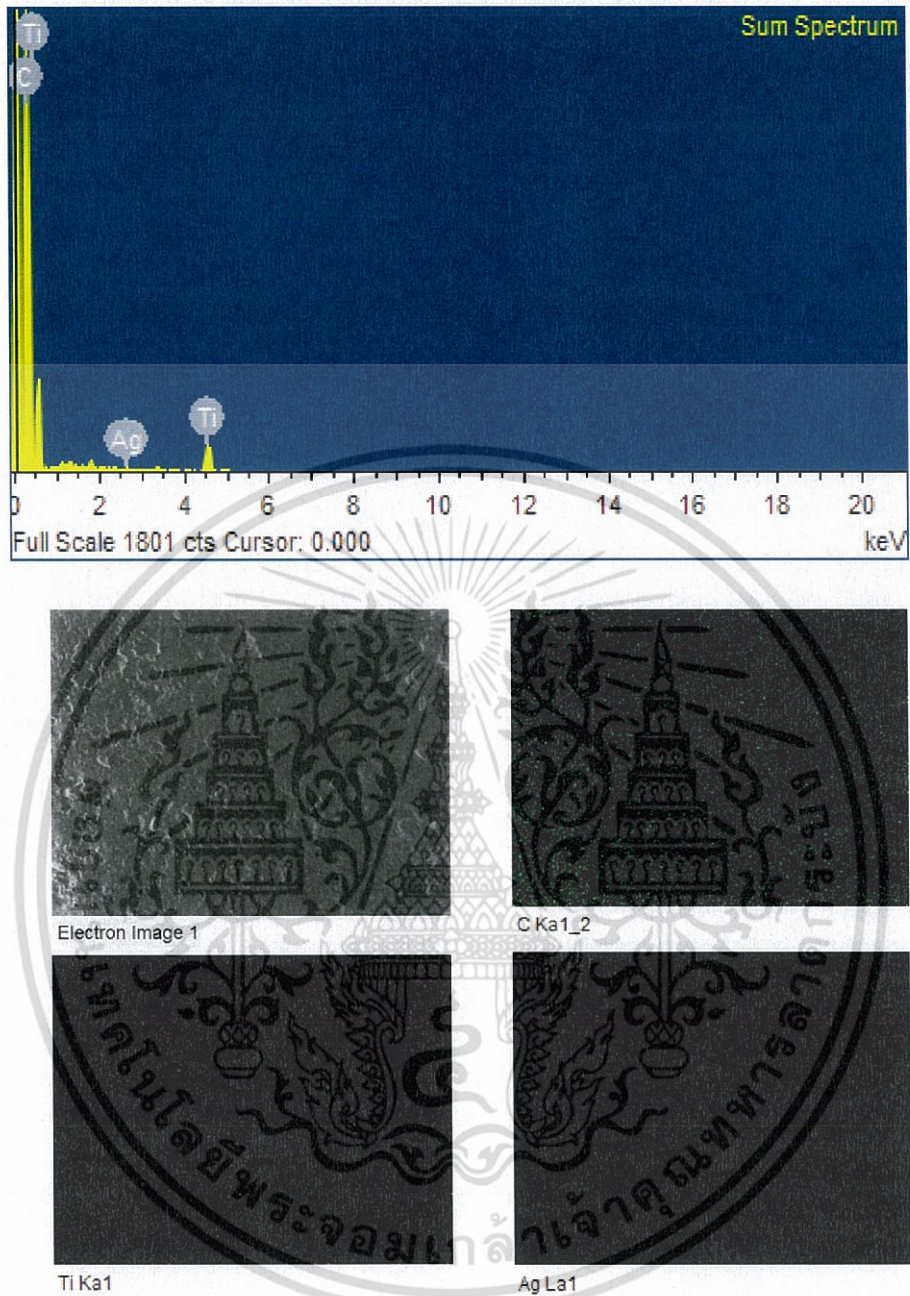
เมื่อศึกษาลักษณะสัญญาณของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (a) และแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ซิลเวอร์นาโน 0.02 wt.% (b) 0.12 wt.% (c) และ 0.21 wt.% (d) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) พบว่าเมื่อทำการเติมซิลเวอร์ขนาดอนุภาคนาโนลงไปบนแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้น พื้นผิวของแผ่นยางผสมนี้จะเกิดรูพรุนและความขรุขระมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.16 และ 4.17 ซึ่งรูพรุนแปรผันตามปริมาณของซิลเวอร์นาโน เกิดจากการแทรกตัวของแก๊สแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ขณะรอให้แผ่นยางผสมนี้แห้ง ในขั้นตอนของการขึ้นรูป สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์จะเพิ่มขึ้นเมื่อซิลเวอร์นาโนเพิ่มขึ้น เนื่องจากงานวิจัยนี้จะต้องเตรียมเจือจางซิลเวอร์นาโนด้วยน้ำและแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งขนาดของการเกิดรูพรุนก็แตกต่างกันอีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.18 และ 4.19

4.2.5 ผลการศึกษาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวตัวอย่าง (Energy-dispersive X-ray Spectroscopy, EDX)



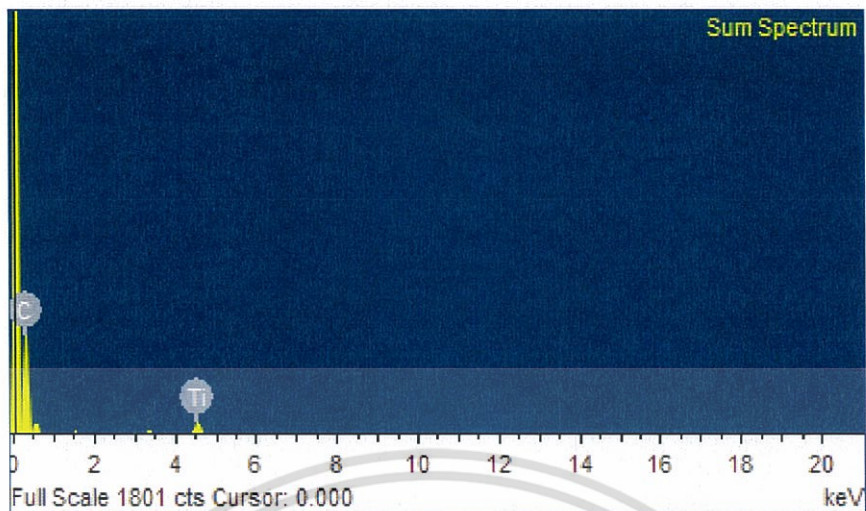
รูปที่ 4.21 แสดง EDX Spectrum ของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 แสดง EDX Spectrum ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Electron Image 1



C Ka1_2



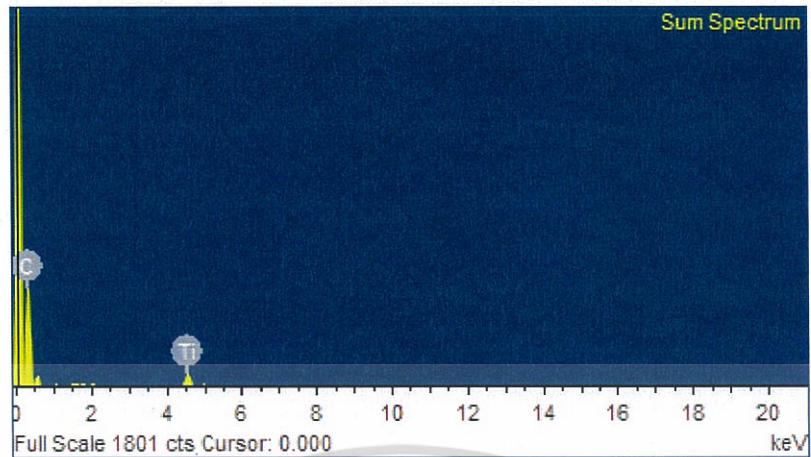
Ti Ka1



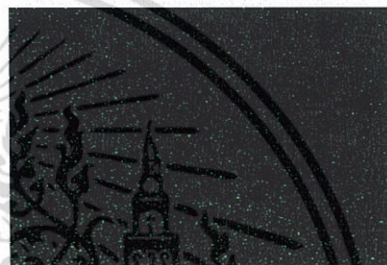
Ag La1

รูปที่ 4.23 แสดง EDX Spectrum ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/
ซิลเวอร์นาโนปริมาณ 0.12 wt.%

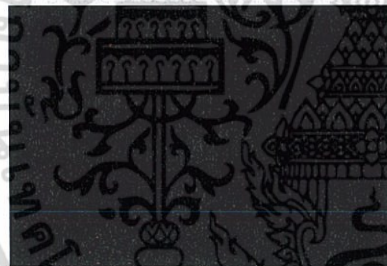
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Electron Image 1



C Ka1_2



Ti Ka1



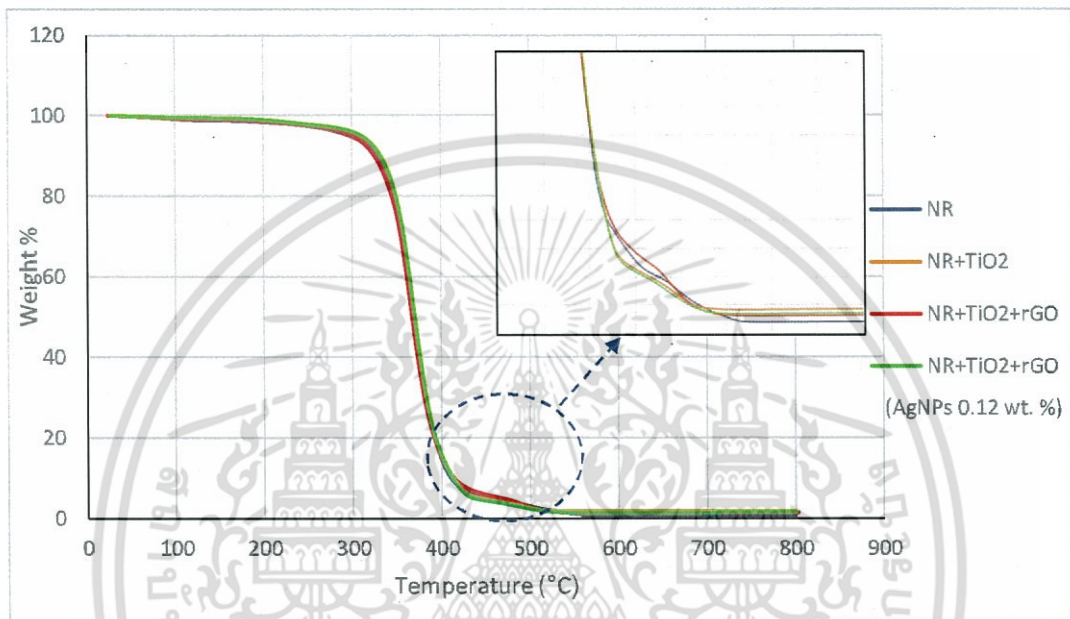
Ag La1

รูปที่ 4.24 แสดง EDX Spectrum ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ซิลเวอร์นาโนปริมาณ 0.21 %wt.

จาก EDX Spectrum ของแผ่นของผสมยางธรรมชาติแต่ละชนิด ที่ตรวจพบธาตุบนผิวของตัวอย่าง ได้แก่ ไทเทเนียมปริมาณ และคาร์บอนไดออกไซด์ ธาตุที่ตรวจพบมีการกระจายตัวที่ดีอยู่บนพื้นผิวของแผ่นยางธรรมชาติผสม แต่ในแผ่นของผสมยางธรรมชาติที่มีการเติมซิลเวอร์ลงไปนั้น ไม่มีการตรวจพบเนื่องจากซิลเวอร์นาโนที่เติมลงไปนั้นมีปริมาณที่น้อยมาก และบริเวณที่เลือกตัววัดค่อนข้างแคบจึงทำให้ไม่พบธาตุของซิลเวอร์

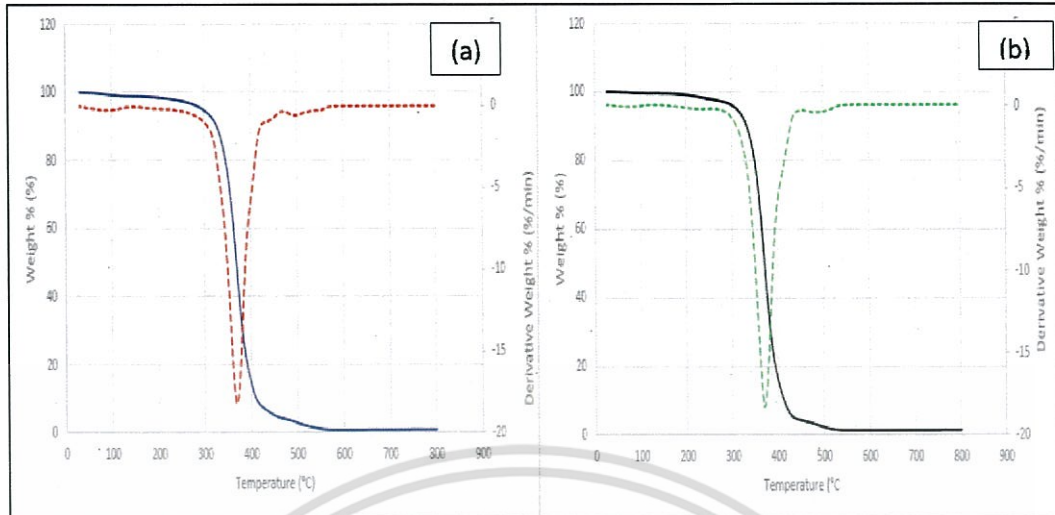
4.2.6 ผลการศึกษาความเสถียรของวัสดุตัวอย่าง ด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA)

เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุโดยเฉพาะพอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อนโดยการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่องซึ่งที่มีความไวสูง โดยใช้อุณหภูมิในช่วง 0 ถึง 800 °C ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน โดยวิเคราะห์แผ่นยางธรรมชาติผสม 4 ตัวอย่าง



รูปที่ 4.25 แสดงเทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ TGA ของแผ่นยางธรรมชาติ แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ และแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ซิลเวอร์ขนาดอนุภาคนาโน ที่ปริมาณ 0.12 wt. %

จากกราฟพบว่าแผ่นยางธรรมชาติ แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ และแผ่นของผสมยางธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ซิลเวอร์ขนาดอนุภาคนาโน ที่ปริมาณ 0.12 wt. % ทั้งหมดไม่ทำให้การสลายตัวของแผ่นยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ นั้นเริ่มสลายตัวได้ง่ายกว่ายางธรรมชาติส่งผลให้เสถียรภาพทางความร้อนไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก และการเติมรีดิวซ์กราฟีนนั้นเติมในปริมาณที่น้อยมาก ส่วนอนุภาคนาโนซิลเวอร์ จะช่วยให้เสถียรภาพทางความร้อนในพอลิเมอร์คอมโพสิตดีขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากซิลเวอร์เป็นโลหะที่มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 960 °C แต่งานวิจัยได้ทำการเติมซิลเวอร์นาโนในปริมาณเพียงเล็กน้อย จึงไม่ทำให้เสถียรภาพทางความร้อนเปลี่ยนแปลงมากนัก โดยสังเกตอุณหภูมิการสลายตัว ตามรูปที่ 4.24 ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ซิลเวอร์ขนาดอนุภาคนาโน ปริมาณ 0.12 wt. % ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 300-400 °C มีค่าไม่แตกต่างกันมากนักกับแผ่นยางธรรมชาติ แผ่นยางผสมไทเทเนียม และแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงการวิเคราะห์ TGA เปรียบเทียบระหว่างแผ่นยางธรรมชาติ (a) และแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ซิลเวอร์ขนาดอนุภาคนาโน ที่ปริมาณ 0.12 wt.%

(b)

จากรูปที่ 4.25 พบว่าแผ่นยางธรรมชาติเริ่มสลายตัวที่ 342.92°C ส่วนแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ซิลเวอร์ขนาดอนุภาคนาโน ที่ปริมาณ 0.12 wt.% สลายตัวที่ 343.43°C และแผ่นยางธรรมชาติสลายตัวเกือบหมดที่ 497.58°C ส่วนแผ่นของผสมยางธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ซิลเวอร์ขนาดอนุภาคนาโน ที่ปริมาณ 0.12 wt.% สลายตัวเกือบหมดที่ 484.76°C ซึ่งความเสถียรทางความร้อนแตกต่างกันน้อยมาก

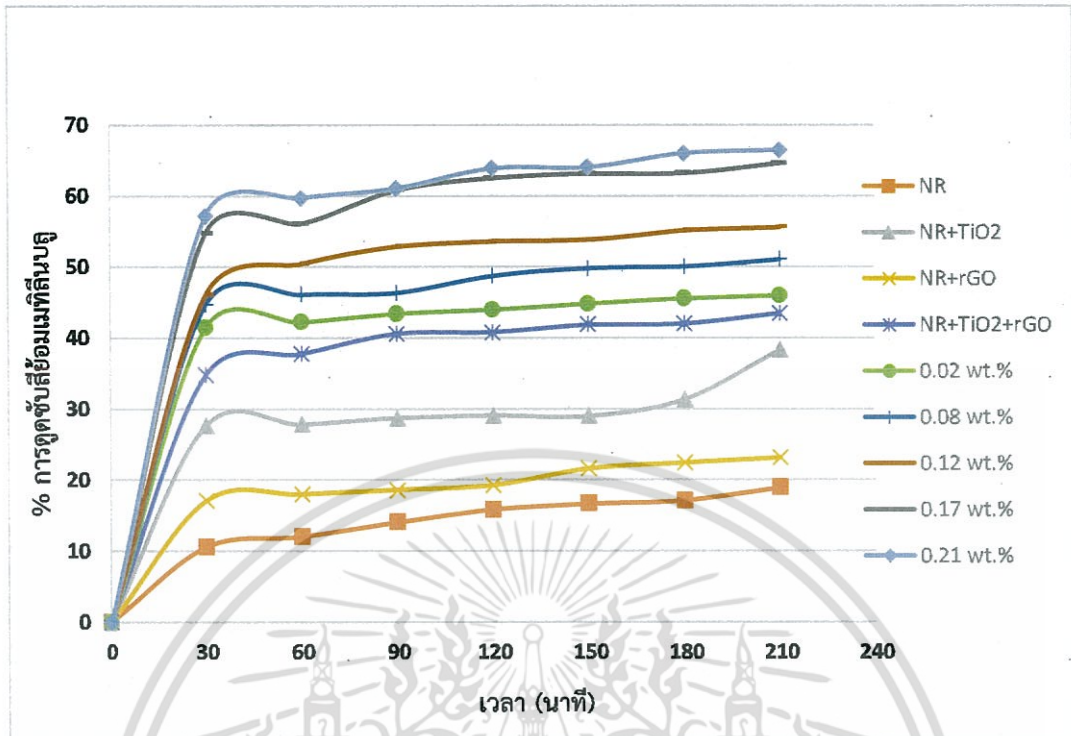
4.3.7 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับและการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู

หลังจากเตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ซิลเวอร์นาโนที่มีปริมาณต่างๆกันแล้ว นำไปทำการฉายแสง Visible เพื่อทดสอบความสามารถในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู (Methylene Blue) โดยทำการเก็บตัวอย่างทุก 30 นาที เป็นเวลา 210 นาที ผลที่ได้จากการทดสอบเป็นดังนี้

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ซิลเวอร์นาโนที่มีปริมาณต่างๆ ในที่มีด

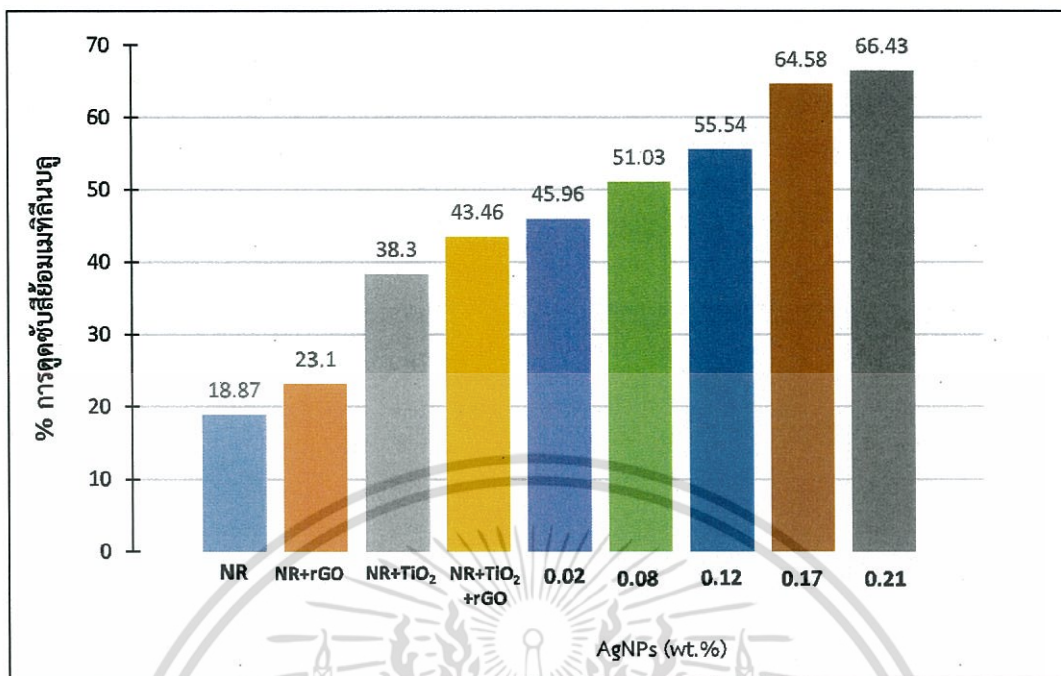
สารตัวอย่าง	%การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู						
	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที	150 นาที	180 นาที	210 นาที
NR	10.56	11.98	14.00	15.78	16.60	17.10	18.87
NR+TiO ₂	27.64	27.85	28.72	29.00	29.06	31.34	38.30
NR+rGO	17.10	17.96	18.58	19.25	21.56	22.38	23.10
NR+TiO ₂ +rGO	34.79	37.71	40.57	40.78	41.83	41.97	43.46
NR+TiO ₂ +rGO+AgNPs 0.02 wt.%	41.41	42.19	43.37	43.93	44.77	45.53	45.96
NR+TiO ₂ +rGO+AgNPs 0.08 wt.%	44.71	46.09	46.31	48.69	49.79	50.02	51.03
NR+TiO ₂ +rGO+AgNPs 0.12 wt.%	46.02	50.38	52.78	53.57	53.77	55.04	55.54
NR+TiO ₂ +rGO+AgNPs 0.17 %wt.	54.68	56.08	60.77	62.48	63.11	63.18	64.58
NR+TiO ₂ +rGO+AgNPs 0.21 %wt.	57.14	59.64	61.02	63.86	64.05	65.98	66.43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างเวลากับประสิทธิภาพในการดูดซับสี้อมเมทีลีนบลูในที่มีด

จากรูปที่ 4.26 กราฟแสดงประสิทธิภาพในการดูดซับสี้อมเมทีลีนบลูในที่มีดของแผ่นของผสมยางธรรมชาติชนิดต่างๆ โดยการทดลองจะทำการดูดซับสี้อมในที่มีดเป็นเวลา 210 นาที เมื่อเวลาเปลี่ยนไป % ค่าการดูดซับสี้อมเมทีลีนบลู จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพของการดูดซับสี้อมจะเพิ่มขึ้นตามระดับ ซึ่งแปรผันตรงกับปริมาณของซิลเวอร์นาโน คือ เมื่อเติมซิลเวอร์นาโนในปริมาณมากขึ้นการดูดซับก็ตีมากขึ้นด้วย ซึ่งผลของการดูดซับนี้สอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ SEM คือ เมื่อเติมปริมาณซิลเวอร์นาโนมากจะเกิดรูพรุนบนพื้นผิวของแผ่นยางตัวอย่างมากขึ้นด้วย การดูดซับเกิดได้ดีขึ้นเมื่อมีการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ เนื่องจากกราฟีนออกไซด์มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง นอกจากนี้กราฟพบว่าตั้งแต่นาทีที่ 60 เป็นต้นไป ความสามารถในการดูดซับเริ่มคงที่ในทุกๆ ตัวอย่าง



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทีลีนบลูในที่มีดของแผ่นยางผสมแต่ละชนิด เป็นเวลา 210 นาที

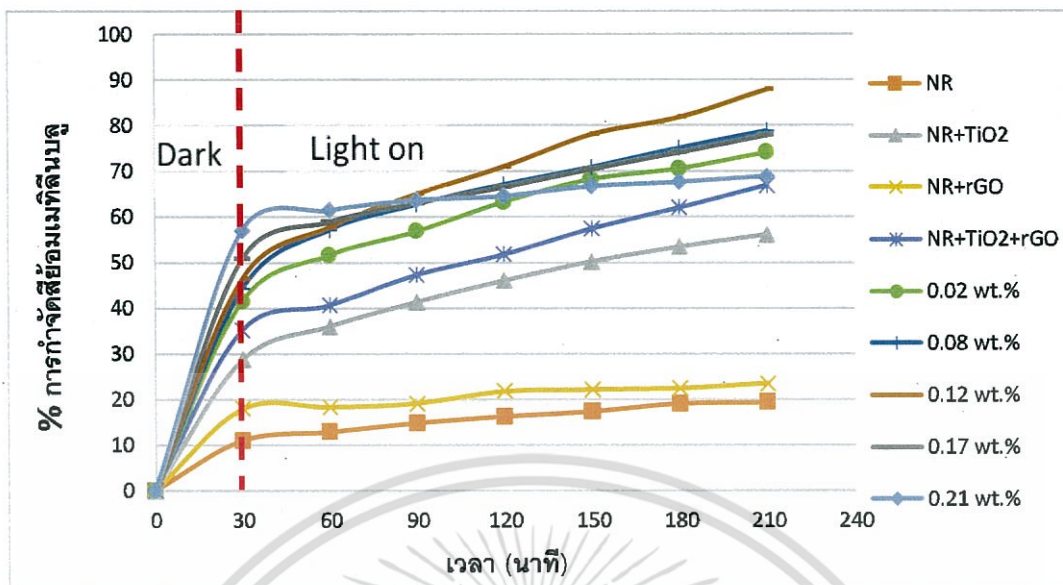
จากกราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทีลีนบลูในที่มีดของแผ่นยางธรรมชาติดูดซับได้เพียง 18 % เมื่อทำการเติม rGO ทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้นเป็น 23 % การดูดซับของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์มีการดูดซับอยู่ที่ 38.3 % และแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ดูดซับได้ 43.46 %

งานวิจัยนี้ได้ทำการเติมซิลเวอร์นาโนลงในแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของซิลเวอร์นาโนโดยเติมในปริมาณดังนี้ 0.02 0.08 0.12 0.17 และ 0.21 wt.% ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเติมในปริมาณมากขึ้นการดูดซับดีขึ้น คือที่ปริมาณ 0.2 wt.% มีการดูดซับดีที่สุด คือ ดูดซับได้ถึง 66.43 % เนื่องจากมีรูพรุนเกิดขึ้นมากซึ่งสอดคล้องกับผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค SEM ซึ่งรูพรุนที่เกิดขึ้นเนื่องจากปริมาณของแอมโมเนียที่มากขึ้น และซิลเวอร์นาโนมีความสามารถในการย่อยสลายโปรตีน ทำให้เกิดรูพรุนขึ้นนั่นเอง

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ซิลเวอร์นาโนที่มีปริมาณต่างๆ ภายใต้แสง Visible

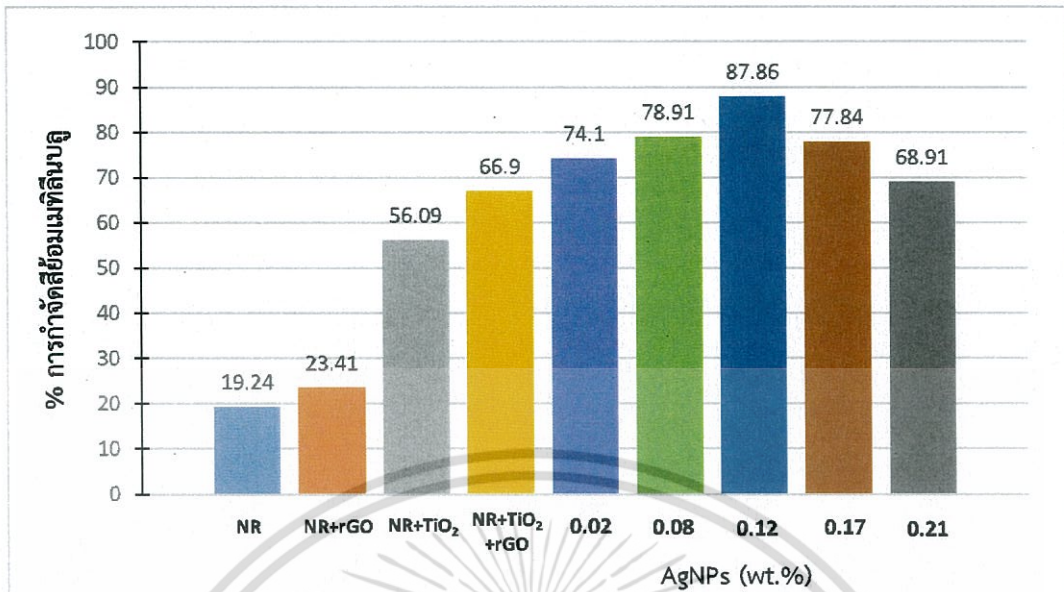
สารตัวอย่าง	%การกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู						
	30 นาที (ดูดซับ)	60 นาที	90 นาที	120 นาที	150 นาที	180 นาที	210 นาที
NR	10.98	12.81	14.75	16.13	17.26	18.96	19.24
NR+TiO ₂	28.69	35.92	41.38	46.03	50.15	53.42	56.09
NR+rGO	17.91	18.22	19.06	21.71	22.07	22.38	23.41
NR+TiO ₂ +rGO	35.11	40.60	47.25	51.75	57.33	61.98	66.90
NR+TiO ₂ +rGO + AgNPs 0.02 %wt.	41.50	51.62	56.82	63.23	68.19	70.54	74.10
NR+TiO ₂ +rGO + AgNPs 0.08 %wt.	44.30	57.16	62.67	67.11	70.87	75.12	78.91
NR+TiO ₂ +rGO + AgNPs 0.12 %wt.	46.37	57.71	64.88	70.93	78.02	81.76	87.86
NR+TiO ₂ +rGO + AgNPs 0.17 %wt.	50.83	58.90	62.95	66.46	70.46	74.13	77.84
NR+TiO ₂ +rGO + AgNPs 0.21 %wt.	57.00	61.39	63.64	64.51	66.68	67.59	68.91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



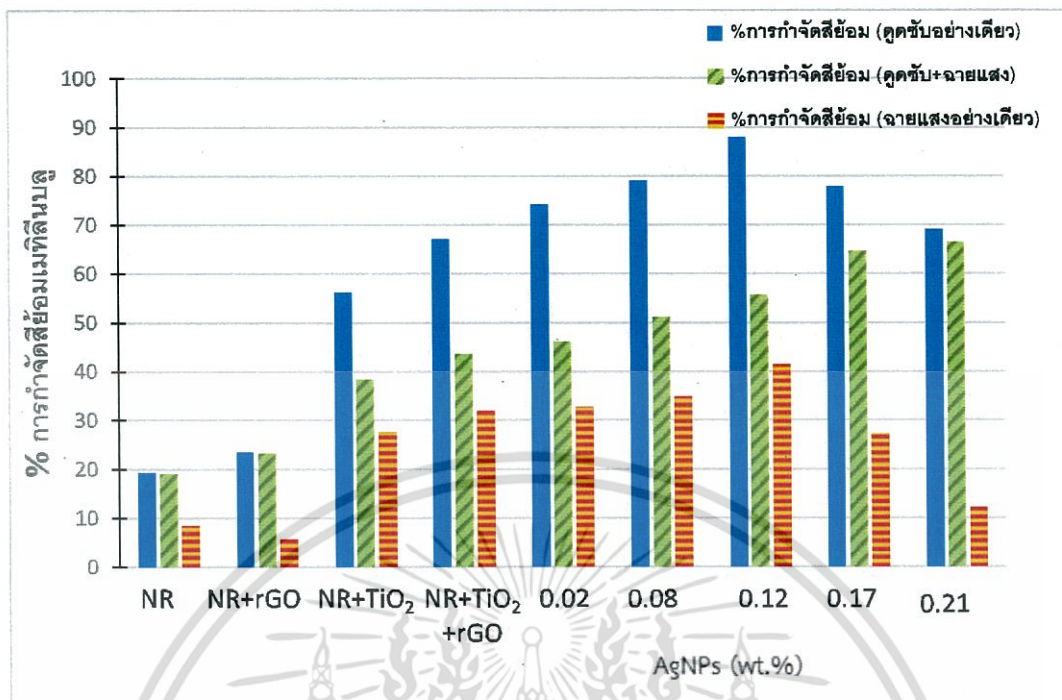
รูปที่ 4.29 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างเวลากับประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู ภายใต้การฉายแสงวิจิเบิลแผ่นยางธรรมชาติแต่ละชนิด

จากรูปที่ 4.28 แสดงค่าประสิทธิภาพในการดูดซับและกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางชนิดต่างๆ คือ แผ่นยางธรรมชาติ แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ แผ่นยางผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ และแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ซิลเวอร์ขนาดอนุภาคนาโน ที่ปริมาณ 0.02 0.08 0.12 0.17 และ 0.21 wt.% ภายใต้แสง visible ซึ่งเวลาเริ่มต้น 30 นาทีแรกจะทำการดูดซับสารในที่มีดเพื่อปรับให้แผ่นอย่างผสมนี้เข้าสู่สมดุล เมื่อเวลาเปลี่ยนไปจนถึงนาทีที่ 210 จะได้ค่า % การกำจัดสีย้อมเป็น 19.24%, 56.09%, 23.41%, 66.90%, 74.10%, 78.91%, 87.86%, 77.84%, และ 68.91% จะพบว่าประสิทธิภาพที่มีการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูเพิ่มขึ้นไปในทางที่ดี และประสิทธิภาพที่กำจัดสีย้อมได้ดีที่สุดจะอยู่ที่ 87.86% ซึ่งเป็นของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ซิลเวอร์ขนาดอนุภาคนาโนเมตร ที่ปริมาณ 0.12 wt.% และเมื่อทำการเติมซิลเวอร์นาโนลงไป ปริมาณ 0.17 และ 0.21 wt.% ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมเหล่านี้จะลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากอาจมีปริมาณของซิลเวอร์ขนาดอนุภาคนาโนเมตรมากเกินไป ทำให้ไปปกคลุมบนพื้นผิวของตัวอย่างทำให้ความสามารถในการโฟโตคะไลซิสของไทเทเนียมไดออกไซด์ลดลง แต่เมื่อนำแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ซิลเวอร์ขนาดอนุภาคนาโนเมตร ที่ปริมาณ 0.17 และ 0.21 wt.% ไปเทียบกับแผ่นยางที่ไม่เติมซิลเวอร์นาโน หรือแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ พบว่าประสิทธิภาพของแผ่นยางตัวที่เติมซิลเวอร์นาโน ปริมาณ 0.17 และ 0.21 wt.% ก็ยังมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมภายใต้แสง visible ได้ดีกว่า



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟอร์มัลดีไฮด์ของแผ่นยางผสมแต่ละชนิดภายใต้การฉายแสง visible เป็นเวลา 180 นาที

จากรูปที่ 4.29 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดฟอร์มัลดีไฮด์ของแผ่นยางผสมผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ซิลเวอร์ขนาดอนุภาคนาโนในปริมาณต่างๆ ภายใต้แสง visible ผลที่ได้คือ แผ่นยางธรรมชาติไม่มีการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่สามารถกำจัดได้ 19.24% เกิดจากการดูดซับเท่านั้น แผ่นธรรมชาติที่มีการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ลงไปสามารถกำจัดได้ 23.41% เนื่องจากกราฟีนออกไซด์มีพื้นที่ผิวสูงช่วยในเรื่องการดูดซับ แผ่นยางธรรมชาติที่มีการเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ลงเริ่มมีการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเกิดขึ้นโดยไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องไทเทเนียมไดออกไซด์ทำงานได้ดีในแสงยูวีเท่านั้นจึงทำให้ภายใต้แสง visible กำจัดได้เพียง 56.09% ส่วนแผ่นยางธรรมชาติที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดดีขึ้นเกิดจากทั้งกระบวนการดูดซับและกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส สามารถกำจัดได้ถึง 66.9% และแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ที่มีการเติมซิลเวอร์นาโนในปริมาณต่างๆ มีประสิทธิภาพดีขึ้นเรื่อยๆจนเติมซิลเวอร์นาโนในปริมาณ 0.12 wt.% มีประสิทธิภาพในการกำจัดที่ดีที่สุดคือ มี %การกำจัดสูงถึง 87.86% ถ้ามีการเติมซิลเวอร์ในปริมาณที่มากกว่า 0.12 wt.% ประสิทธิภาพของแผ่นยางผสมนี้จะลดลง เนื่องมาจากปริมาณซิลเวอร์จะไปแทรกตัวในเนื้อเยื่อมากเกินไปทำให้ไปขัดขวางการทำงานของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

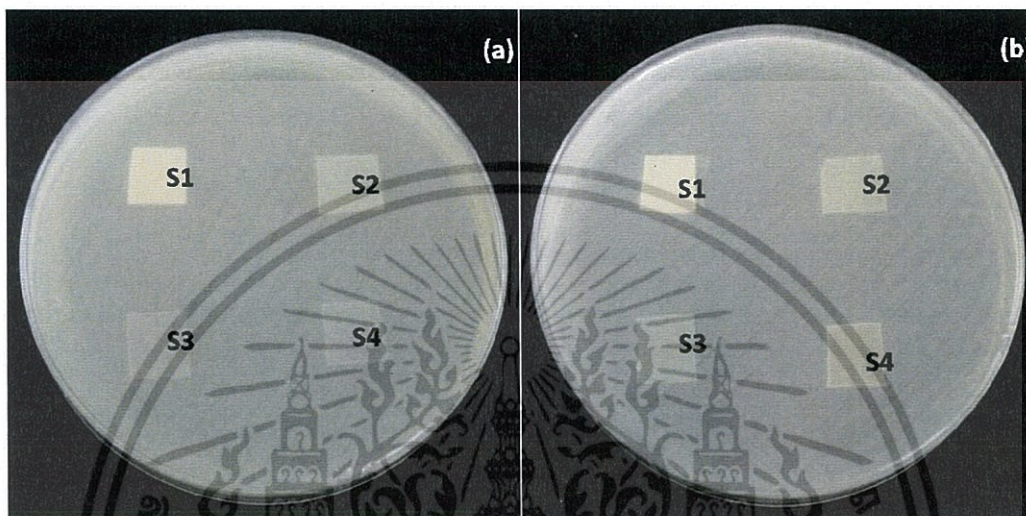


รูปที่ 4.31 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มีด กับประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสง visible ของแผ่นยางผสมแต่ละชนิด

จากการทดลองปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกภายในที่มีดและภายใต้แสงวิซิเบิล ผลที่ได้คือ แผ่นของผสมทั้ง 9 ตัวอย่างข้างต้นให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือ เมื่อพิจารณาในที่มีด แผ่นของผสมยางธรรมชาติ ไทเทเนียมไดออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ พบว่า รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมได้ดีขึ้น 3 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับแผ่นของผสมยางธรรมชาติและไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ไม่ได้เติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ และประสิทธิภาพสูงขึ้นถึง 30 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีการเติมซิลเวอร์อนุภาคนาโนเมตร ต่อมาพิจารณาการกำจัดสีย้อมภายใต้แสงวิซิเบิล พบว่า รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมได้ดีขึ้น 10 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับแผ่นของผสมยางธรรมชาติและไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ไม่ได้เติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ และปริมาณซิลเวอร์ที่ดีที่สุดในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู คือ 0.12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งจากผลการทดลองสามารถยืนยันได้ว่า รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ และซิลเวอร์อนุภาคนาโนเมตรนั้น สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกได้จริงทั้งในที่มีดและภายใต้แสงวิซิเบิล

4.3.8 ผลการศึกษาความเป็นไปได้ในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นยางผสม

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย โดยเชื้อที่ใช้ทดสอบคือ *Escherichia coli* ATCC 25922 และ *Staphylococcus aureus* ATCC 25923 โดยทำการทดสอบตัวอย่างละสามซ้ำ ผลที่ได้ดังนี้



รูปที่ 4.32 ภาพการทดสอบการยับยั้งเชื้อ *Escherichia coli* (a) และ *Staphylococcus aureus* (b) ของแผ่นยางธรรมชาติผสมแต่ละชนิด

จากภาพการทดสอบการยับยั้งเชื้อ *Escherichia coli* ATCC 25922 (a) และ *Staphylococcus aureus* ATCC 25923 (b) ของแผ่นยางธรรมชาติผสมแต่ละชนิด คือ แผ่นยางธรรมชาติ (S1) แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (S2) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ซิลเวอร์นาโนปริมาณ 0.12 wt.% (S3) และแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ซิลเวอร์นาโนปริมาณ 0.21 wt.% (S4) ผลที่ได้คือ ไม่พบบริเวณ Active คือ ไม่มีฤทธิ์ยับยั้งจุลินทรีย์ทดสอบ อาจเกิดจากปริมาณของซิลเวอร์นาโนที่เติมลงไปมีปริมาณที่น้อยมาก

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการพิเศษนี้จากการทดลองทำให้สามารถยืนยันถึงความเป็นไป ของการใช้แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ที่เติมซิลเวอร์นาโนในปริมาณต่างๆ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูได้จริงภายใต้แสงวิสิเบิล สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. จากการศึกษาและตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/อนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่ปริมาณต่างๆ ด้วยเทคนิค TEM XRD SEM FT-IR EDS TGA และ Raman พบว่าฟีกที่เป็นเอกลักษณ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ซึ่งสามารถยืนยันได้ถึงการมีไทเทเนียมไดออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์จริง ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในกระบวนการ โฟโตคะตะไลซิส

2. แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ซิลเวอร์นาโน สามารถดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มีด และแผ่นยางผสมที่เติมซิลเวอร์นาโนปริมาณ 0.21 wt.% สามารถดูดซับสีย้อมได้สูงสุดได้ถึง 66.43 % ซึ่งประสิทธิภาพดีขึ้นตามลำดับเมื่อมีการเติมปริมาณซิลเวอร์นาโนที่มากขึ้น ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ SEM คือเมื่อเติมปริมาณซิลเวอร์นาโนมากจะเกิดรูพรุนบนพื้นผิวของแผ่นยางตัวอย่างมากขึ้นด้วย

3. แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ซิลเวอร์นาโน สามารถสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้จริง โดยทำงานภายใต้แสงวิสิเบิล (Visible light) ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส พบว่าประสิทธิภาพของแผ่นยางธรรมชาติผสมที่มีการเติมซิลเวอร์นาโน 0.12 wt.% สามารถสลายสีย้อมได้ดีที่สุดคือสามารถกำจัดสีย้อมสูงถึง 87.86 %

4. ผลการศึกษาความเป็นไปได้ในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ซิลเวอร์นาโน นั้นยังไม่ประสบความสำเร็จ เนื่องจาก ซิลเวอร์นาโนที่เติมลงไปนั้นปริมาณน้อยมาก ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาจากเทคนิค EDS ที่ไม่ปรากฏธาตุของซิลเวอร์จากการกระเจิงของแสงที่ผิวหน้า

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งในโรงงานอุตสาหกรรมโดยตรง โดยใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส
2. การเลือกแบบพิมพ์และการวางแบบพิมพ์เพื่อทิ้งให้แห้ง ควรเลือกแบบพิมพ์ที่มีลักษณะฐานที่เรียบสม่ำเสมอ และวางในที่ราบเสมอกัน และอุณหภูมิต้องไม่ร้อนจนเกินไป เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่สมบูรณ์
3. ศึกษาถึงประสิทธิภาพของแผ่นยางธรรมชาติผสมนี้ในการกำจัดสีย้อมชนิดอื่นๆเพิ่มเติม เพื่อนำมาเปรียบเทียบ หรือเพื่อเพิ่มตัวเลือกของผู้ใช้งาน
4. ศึกษาแนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพของของแผ่นยางธรรมชาติผสมนี้ เช่น นำแผ่นของผสมยางธรรมชาตินี้ไปใช้กับน้ำเสียจากโรงงานจริงๆ รวมทั้งประสิทธิภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายสีย้อม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สิริชัย ภิบาลจอมมี, “การกำจัดสีของน้ำเสียสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตแคตาไลติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์”, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2543.
- [2] ภิญญ์ชิตา มุ่งการดี, ฉลาด บรรเทา และชูสิทธิ์ ศรีสุทธิกมล. (2551). “การบำบัดสีน้ำเสียโรงงานกระดาษด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์”. การประชุมวิชาการเทคโนโลยี และนวัตกรรมสำหรับการ พัฒนาอย่างยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น , 28-29 มกราคม 2551
- [3] ภิญญ์ชิตา มุ่งการดี, ฉลาด บรรเทา และชูสิทธิ์ ศรีสุทธิกมล. (2551). “การบำบัดสีน้ำเสียโรงงานกระดาษด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์”. การประชุมวิชาการเทคโนโลยี และนวัตกรรมสำหรับการ พัฒนาอย่างยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น , 28-29 มกราคม 2551
- [4] Feng Chen, Yinde Xie, Jincal Zhao, Gongxuan Lu. “Photocatalytic degradation of dyes on a magnetically separated photocatalyst under visible and UV irradiation”. Chemosphere 44 (2001) 1159-1168.
- [5] ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂). โครงสร้างผลึกของไทเทเนียม: บรูคไคท์ [ออนไลน์].
ได้จาก : <http://ruby.colorado.edu/~smyth/min/tio2.html>.
- [6] Hoffman M. R., Martin S. T., Choe W. and Bahnemann D. W. (1995).
“Environmental applications of semiconductor photocatalysis”.
Chemical Reviews 95: 69-96.
- [7] C. Sriwong, S. Wongnawa, O. Pataeapai-boolchai “Photocatalytic activity of rubber sheet impregnated with TiO₂ particles and its recyclability”
Catalysis Communications 9 (2008) 213-218.4.
- [8] H. Aguilar-Bolados, J. Brasero, M.A. Lopez-Manchado. “High performance natural rubber/thermally reduced graphite oxide nanocomposites by latex technology”. Composites: Part B 67 (2014), 449-454
- [9] Sun L, Li J, Wang C, Li S, Lai Y, Chen H, et al. Ultrasound aided photochemical synthesis of Ag loaded TiO₂ nanotube arrays to enhance photocatalytic activity. J Hazard Mater 2008;171:1045e50
- [10] Zhou Y, Wang C, Liu H. Preparation and studies of Ag-TiO₂ hybrid nanoparticles of core-shell structure. Mater Sci Eng B1999;67:95e8.
- [11] Nakata K., Ochiaia T., Murakami T. and Fujishima A. (2012). “Photoenergy conversion with TiO₂ photocatalysis”. New materials and recent applications. Electrochimica Acta, 1(84), 103-111.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] Singh, H. Mahalingam, P. K. Singh “**Polymer-supported titanium dioxide photo-catalysts for environmental remediation: A review**” *Applied Catalysis A: General* 463 (2013) 178-195.
- [10] M.A. Tarr, “**Chemical Degradation Methods for Wastes and Pollutants**”, Marcel Dekker, New York, 2003.
- [14] Umar M., and Aziz H.A. (2013). “Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants in Water”. Retrived July 1, 2015, from <http://www.intechopen.com/books-/organic-pollutants-monitoring-risk-and-treatment/photocatalyticdegradation-of-organic-pollutants-in-water>
- [15] Sun L, Li J, Wang C, Li S, Lai Y, Chen H, et al. Ultrasound aided photochemical synthesis of Ag loaded TiO₂ nanotube arrays to enhance photocatalytic activity. *J Hazard Mater* 2008;171:1045e50.
- [16] X. Zeng, Z. Wang, N. Meng, D. T. McCarthy, A. Deletic, J. H. Pan, X. Zhang “**Highly dispersed TiO₂ nanocrystals and carbon dots on reduced graphene oxide: Ternary nano-composites for accelerated photocatalytic water disinfection**” *Applied Catalysis B: Environmental* 202 (2017) 33-41.3.
- [17] K. Madhusudan Reddy; Sunkara V. Manorama, A. Ramachandra Reddy. (2002) “**Bandgap studies on anatase titanium dioxide nanoparticles**”. *Materials Chemistry and Physics*. 78:239-245
- [18] กาญจนา ลือพงษ์ และคณะ. “**การลดความเข้มของสีที่เหลืออยู่ในน้ำทิ้งจากกระบวนการย้อมโดยวิธีการออกซิเดชันและรีดักชัน**”. 2547
- [19] O. Carp, C.L. Huisman, and A. Reller, “**Photoinduced reactivity of titanium dioxide, Prog**”. *Solid State Chem.*, 2004, 32, 42-90.
- [20] N. Yuangpho, S.T.T.Le, T.Treerujiraphapong, W.Khanitchaidecha, A.Nakaruk. “**Enhanced photocatalytic performance of TiO₂ particles via effect of anatase-rutile ratio**”. *Physica E* 67, (2015) 18–22.
- [21] Wang, H., Wu, Z., Zhao, W. and Guan, B. (2005). “**Photocatalytic oxidation of nitrogen oxides using TiO₂ loading on woven glass fabric**”. *Chemosphere*, 66: 185–190.
- [22] Gao, W., Alemany, L.B., Ci, L. and Ajayan, P.M. (2009). “**New insights into the structure and reduction of graphite oxide**”. *Nature Chemistry*, 1, 403.
- [23] Castro Neto, A.H., Guinea, F., Peres, N.M.R., Novoselov, K.S. and Geim, A.K. (2009). “**The electronic properties of graphene**”. *Reviews of Modern Physics*, 81, 109.

- [24] Y. C. Cao, Z. Fu, W. Wei, L. Zou, T. Mi, D. He, C. Yan, X. Liu, Y. Zhu, L. Chen, Y. Sun "Reduced graphene oxide supported titanium dioxide nanomaterials for the photocatalysis with long cycling life" Applied Surface Science 355 (2015) 1289-1294.2.
- [25] Castro Neto, A.H., Guinea, F. and Peres, N.M.R. (2006). Drawing conclusions from graphene. Physics World. 19, 33.
- [26] Selim Demirci, Tuncay Dikici, Metin Yurddaskal, Serdar Gultekind, Mustafa Toparli, Erdal Celik. "Synthesis and characterization of Ag doped TiO₂ heterojunction films and their photocatalytic performances". Applied surface science 390, (2016) 591-601.
- [27] E. Vasilakial, Georgaki, D. Vernardou, Ag-loaded TiO₂/reduced graphene oxide nanocomposites for enhanced visible-light photocatalytic activity. Applied Surface Science 353 (2015) 865–872.
- [28] Sakthive S, Kisch H. Daylight photocatalysis by carbonmodified titanium dioxide. Angew Chem Int Ed 2003;42:4908e11.
- [29] A.A. Ashkarran, H. Hamidinezhad, H. Haddadi, M. Mahmoudi, Double-doped TiO₂ nanoparticles as an efficient visible-light-active photocatalyst and antibacterial agent under solar simulated light, Appl. Surf. Sci. 301 (2014) 338–345.
- [30] Singh, H. Mahalingam, P. K. Singh "Polymer-supported titanium dioxide photo-catalysts for environmental remediation: A review" Applied Catalysis A: General 463 (2013) 178-195.
- [31] Kolen'ko, R. Churagulov, M. Kunst, L. Mazerolles, C. Colbeau. "Photocatalytic properties of titania powders prepared by hydrothermal method". Appl. Catal. B-Environ. 54: 51.
- [32] Yuhao Yang, Enzhou Liu, Hongzhe Dai, Limin Kang, Huitong Wu, Jun Fan, Xiaoyun Hu, Hanchen Liu. "Photocatalytic activity of Ag/TiO₂-graphene ternary nanocomposites and application in hydrogen evolution by water splitting". International journal of hydrogen energy 39, (2014) 7664-7671.
- [33] C. Sriwong, S. Wongnawa, O. Pataeapai-boolchai "Photocatalytic activity of rubber sheet impregnated with TiO₂ particles and its recyclability" Catalysis Communications 9 (2008) 213-218.4.
- [34] กาญจนา ลือพงษ์ และคณะ. "การลดความเข้มของสีที่เหลืออยู่ในน้ำทิ้งจากกระบวนการย้อมโดยวิธีการออกซิเดชันและรีดักชัน". 2547

- [35] K. Deepak Kumar, G. Praveen Kumar, and K. Srinivasulu Reddy. “**Rapid microwave synthesis of reduced graphene oxide-supported TiO₂ nanostructures as high performance photocatalyst**”. *Materials Today: Proceedings* 2 (2015), 3736-3742.
- [36] Yu, Y., Wang, J. and Parr, J. F. (2012). “**Preparation and properties of TiO₂/fumed silica composite photocatalytic materials**”. *Procedia Engineering* 27: 448 – 456.
- [37] Selim Demirci, Tuncay Dikici, Metin Yurddaskal, Serdar Gultekind, Mustafa Toparli, Erdal Celik. “**Synthesis and characterization of Ag doped TiO₂ heterojunction films and their photocatalytic performances**”. *Applied surface science* 390, (2016) 591-601.
- [38] อธิษฐาน นุชเนียม และ นางสาวทิพวัลย์ ตุ่มทอง. “**การบำบัดน้ำย้อมด้วยกระบวนการผสมผสานระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์**”. *ปริญญาานิพนธ์ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ มหาวชิยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, กรุงเทพฯ, 2552*
- [39] Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Katsnelson, M. I., Grigorieva, I. V., Dubonos, S. V. and Firsov, A. A. (2004). **Electric field effect in atomically thin carbon films**. *Science*, 306, 666.
- [40] Bolotin, K.I., Sikes, K.J., Jiang, Z., Klimac, M., Fudenberg, G., Honec, J. and Kim, P. (2008). **Ultrahigh electron mobility in suspended graphene**. *Solid State Communications*, 146, 351.
- [41] Lee, C., Wei, X., Kysar, J.W. and Hone, J. (2008). **Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene**. *Science*, 321, 385.
- [42] Kim, J., Ishihara, M., Koga, Y., Tsugawa, K., Hasegawa, M. and Iijima, S. (2011). **Low-temperature synthesis of large-area graphene-based transparent conductive films using surface wave plasma chemical vapor deposition**. *Applied Physics Letters*, 98, 091502.
- [43] Bonaccorso, F., Sun Z., Hasan, T. and Ferrari, A.C. (2010). **Graphene photonics and optoelectronics**. *Nature Photonics*, 4, 611.
- [44] J.G. Yu, Q. Li, S.W. Liu, M. Jaroniec, **Ionic-liquid-assisted synthesis of uniform fluorinated B/C-codoped TiO₂ nanocrystals and their enhanced visible-light photocatalytic activity**, *Chem. Eur. J.* 19 (2013) 2433–2441.

- [45] H.H. Li, S. Yin, Y.H. Wang, T. Sato, **Persistent fluorescence-assisted TiO₂-xNy-based photocatalyst for gaseous acetaldehyde degradation**, *Environ. Sci. Technol.* 46 (2012) 7741–7745.
- [46] Z.L. He, W.X. Que, J. Chen, X.T. Yin, Y.C. He, J.B. Ren, **Photocatalytic degradation of methyl orange over nitrogen-fluorine codoped TiO₂ nanobelts prepared by solvothermal synthesis**, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 4 (2012) 6816–6826.
- [47] G.D. Yang, T.C. Xiao, J. Sloan, G.Q. Li, Z.F. Yan, **Low-temperature synthesis of visible-light active fluorine/sulfur co-doped mesoporous TiO₂ microspheres**, *Chem. Eur. J.* 17 (2011) 1096–1100.
- [48] J.K. Zhou, L. Lv, J. Yu, H.L. Li, P.Z. Guo, H. Sun, X. Zhao, **Synthesis of self-organized polycrystalline F-doped TiO₂ hollow microspheres and their photocatalytic activity under visible light**, *J. Phys. Chem. C* 112 (2008) 5316–5321.
- [49] Akhavan O, Abdolahad M, Esfandiar A, Mohatashamifar M. **Photodegradation of graphene oxide sheets by TiO₂ nanoparticles after a photocatalytic reduction**. *J Phys Chem C* 2010;114:12955e9.
- [50] Ren WJ, Ai ZH, Jia FL, Zhang LZ, Fan XX, Zou ZG. **Low temperature preparation and visible light photocatalytic activity of mesoporous carbon-doped crystalline TiO₂**. *Appl Catal B* 2007;69:138e44.
- [51] Sher Shah MSA, Zhang K, Park AR, Kim KS, Park NG, Park JH, et al. **Single-step solvothermal synthesis of mesoporous Ag₂O/TiO₂ reduced graphene oxide ternary composites with enhanced photocatalytic activity**. *Nanoscale* 2013;5:5093e101.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

1. การคำนวณความเข้มข้นของสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์

งานวิจัยนี้จะทำการเตรียมสารแขวนลอยรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ จึงจะต้องทราบความเข้มข้นของสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ก่อน ซึ่งทำได้โดยนำกระจกใส 2 อัน มาล้างและอบกำจัดความชื้นเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นชั่งน้ำหนักและบันทึกค่าที่ได้หลังอบของนำกระจกใส ใช้ไมโครปิเปตดูดสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ หยดลงบนกระจกใสอันละ 1 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง นำออกจากเตาอบและบันทึกค่าน้ำหนักที่ได้ เพื่อคำนวณหาความเข้มข้น ได้จาก

$$\text{หาความเข้มข้น} = \text{น้ำหนักก่อนอบ} - \text{น้ำหนักหลังอบ}$$

จะได้ความเข้มข้นสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์

ตัวอย่าง	น้ำหนักก่อนอบ(กรัม)	น้ำหนักหลังอบ(กรัม)	น้ำหนักสาร(กรัม)
แผ่นกระจกใสที่ 1	52.6442	52.6421	0.0021
แผ่นกระจกใสที่ 2	53.6258	53.6236	0.0022
		เฉลี่ย	0.0022

ดังนั้น ความเข้มข้นของสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ เท่ากับ 2.2 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

2. การเตรียมความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลู

สูตรโครงสร้างและมวลโมเลกุลของสีย้อมที่ใช้ในโครงการพิเศษ คือ เมทิลีนบลู (Methylene blue) ($C_{16}H_{18}N_3S$) ซึ่งมีมวลโมเลกุล 319.85 กรัมต่อโมล ซึ่งในงานวิจัยจะเตรียมเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 1.25×10^{-5} M ปริมาตรที่ต้องการคือ 1000 ml จากสูตรดังนี้

$$\frac{C}{1000 \text{ ml}} = \frac{g}{Mw}$$

ซึ่งเตรียมได้ดังนี้ ชั่งผงเมทิลีนบลู 0.0040 g ใส่ลงในขวดปรับปริมาตร 1000 ml ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

3. การคำนวณร้อยละของประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู

การคำนวณร้อยละของประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\% \text{การกำจัดสีย้อม} = \frac{A - At}{A} \times 100$$

เมื่อ A คือ ค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้น

At คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่เวลาใดๆ

4. การคำนวณความเข้มข้นของสารแขวนลอยซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตร

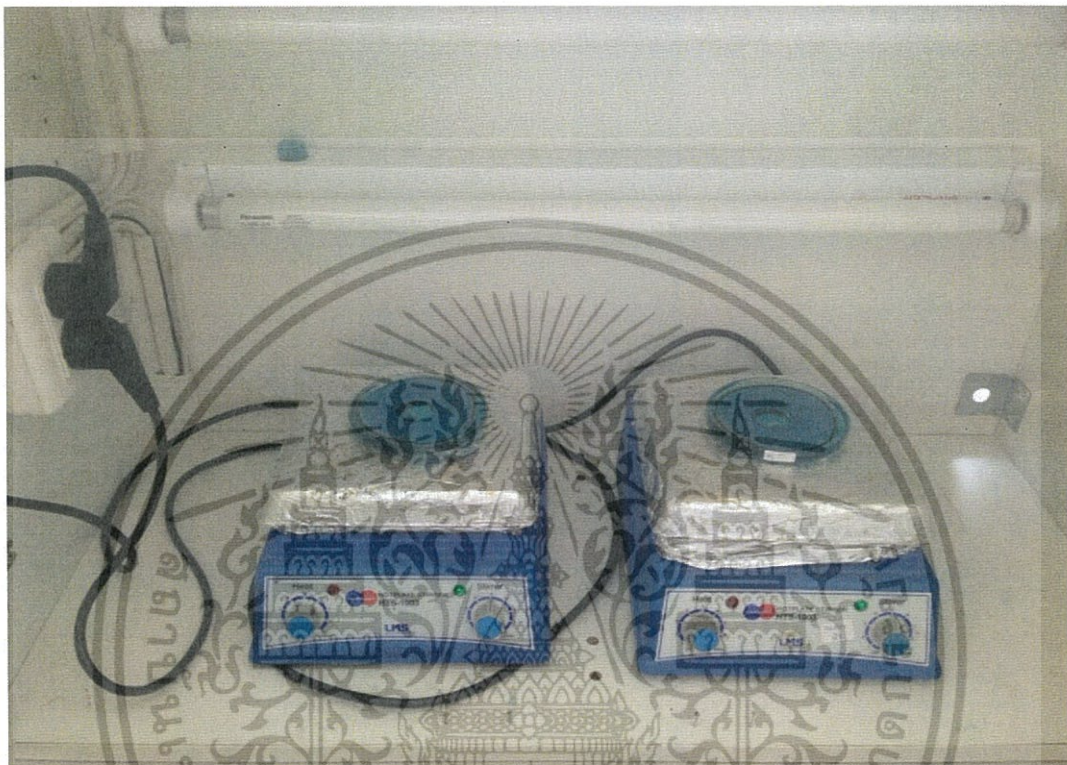
หาความเข้มข้นของสารแขวนลอยซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตร ทำได้โดยหาความเข้มข้นซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตร โดยหยดสารแขวนลอย 1 ml ลงในกระจกใสนำไปอบแล้วชั่งเพื่อหาน้ำหนัก และหาความเข้มข้นของ PVP โดยนำหยดใส่กระจกใส 1 ml แล้วนำไปอบชั่งเพื่อหาน้ำหนัก นำไปคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ความเข้มข้น AgNPs} = \text{น้ำหนักสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนที่ได้} - \text{น้ำหนักสาร PVP ที่ได้}$$

ดังนั้น หาความเข้มข้นของสารแขวนลอยซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตร เท่ากับ 0.0005 กรัมต่อมิลลิลิตร

ภาคผนวก ข

1. ตู้ไฟโตคะตะไลซิส

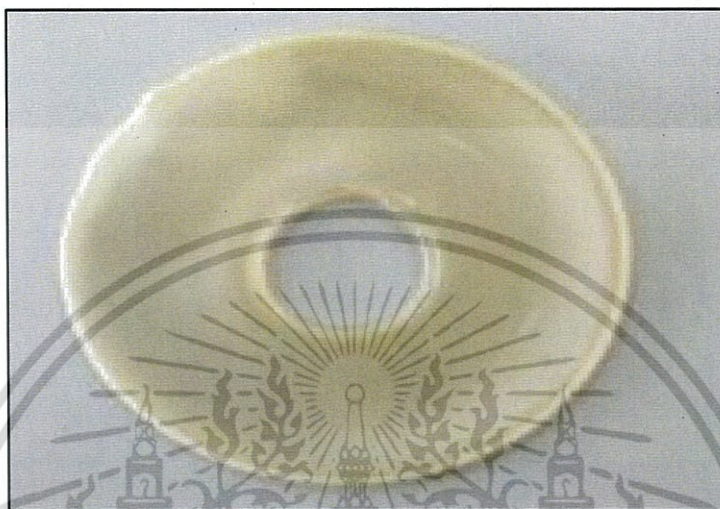


รูปที่ ค-1 The wooden compartment 0.76 m x 0.37 m x 0.76 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

1. ลักษณะของแผ่นยางธรรมชาติผสม

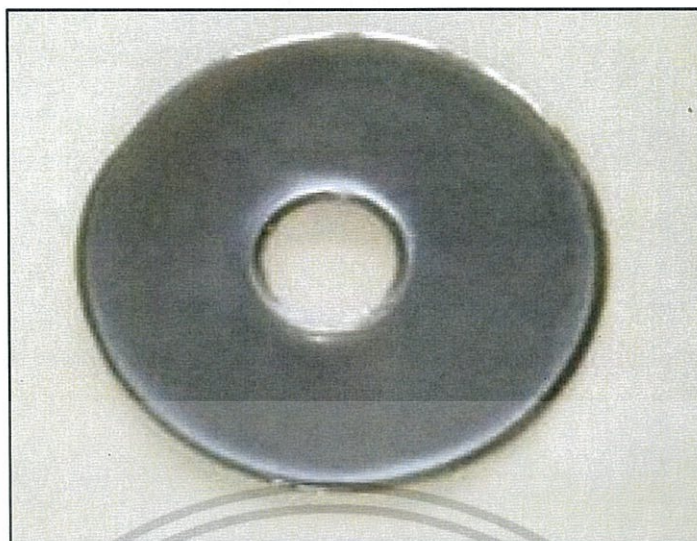


รูปที่ ง-1 แผ่นยางธรรมชาติ



รูปที่ ง-2 แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง-3 แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์



รูปที่ ง-4 แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ซิลเวอร์นาโนปริมาณ
0.21 wt.%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

