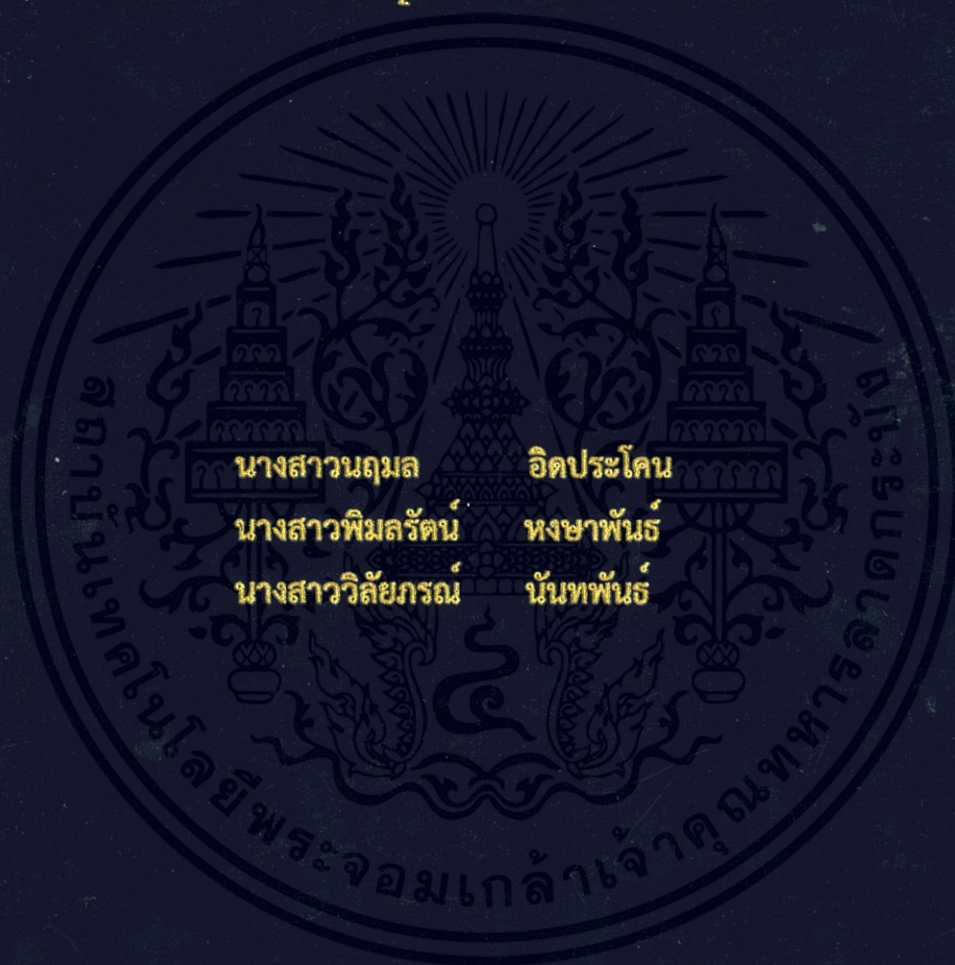


การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์และความว่องไวต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก
ของตัวเร่งปฏิกิริยาผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

PREPARATION, CHARACTERIZATION AND PHOTPCATALYTIC
ACTIVITY OF TiO_2 -rGO HYBRID CATALYST



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์และความว่องไวต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก
ของตัวเร่งปฏิกิริยาผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

PREPARATION, CHARACTERIZATION AND PHOTOCATALYTIC
ACTIVITY OF TiO_2 -rGO HYBRID CATALYST



นางสาวนฤมล อิตประโคน
นางสาวพิมพ์รัตน์ หงษาพันธ์
นางสาววิไลภรณ์ นันทพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับโครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิชาประกอบด้านการศึกษา
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

PREPARATION, CHARACTERIZATION AND PHOTOCATALYTIC
ACTIVITY OF TiO₂-rGO HYBRID CATALYST



MISS NARUEMON

IDPRAKHON

MISS PIMONRAT

HONGSAPHAN

MISS WILAIORN

NUNTAPUN

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

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ACADEMIC YEAR 2014

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์และความว่องไวต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก
ของตัวเร่งปฏิกิริยาผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์
PREPARATION, CHARACTERIZATION AND PHOTOCATALYTIC
ACTIVITY OF TiO_2 -rGO HYBRID CATALYST

ชื่อนักศึกษา นางสาวณมล อิดประโคน รหัสนักศึกษา 54050190
นางสาวพิมลรัตน์ หงษาพันธ์ รหัสนักศึกษา 54050232
นางสาววิไลภรณ์ นันทพันธ์ รหัสนักศึกษา 54050271

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา เคมี

ปีการศึกษา 2557

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมี
อุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร. เอกรัฐ เดชศรี ประธานกรรมการ	เอกรัฐ เดชศรี
ดร. กิตติมนต์ จิระกิตติดุส กรรมการ	กิตติมนต์
ดร. ชวาลย์ ศรีวงษ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	ชวาลย์ ศรีวงษ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องแจ้งมายังเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์และความว่องไวต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของตัวเร่งปฏิกิริยาผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์
PREPARATION, CHARACTERIZATION AND PHOTOCATALYTIC ACTIVITY OF TiO₂-rGO HYBRID CATALYST

ชื่อนักศึกษา นางสาวนฤมล อิตประโคน รหัสนักศึกษา 54050190
นางสาวพิมพ์รัตน์ หงษาพันธ์ รหัสนักศึกษา 54050232
นางสาววิไลภรณ์ นันทพันธ์ รหัสนักศึกษา 54050271

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา เคมี

ปีการศึกษา 2557

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ชวาลย์ ศรีวิงษ์

บทคัดย่อ

ในโครงการพิเศษเล่มนี้ศึกษาการเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์ และความว่องไวต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของตัวเร่งปฏิกิริยาผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ โดยการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ เริ่มจากการใช้สารแขวนลอยของกราฟีนออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อน้ำ 1 มิลลิลิตร ในปริมาณความเข้มข้นที่แตกต่างกันคือ 2.5, 5.0, 7.5 และ 10.0 มิลลิกรัม รีดิวซ์โดยใช้ไฮดราซีนและแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90-95 องศาเซลเซียส สังเกตการเปลี่ยนแปลงจากสีน้ำตาลไปเป็นสีดำ ปรับพีเอชของสารละลายแขวนลอยรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ได้ ให้เป็น 8.5 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลาร์ ผสมสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ 2000 มิลลิกรัมต่อน้ำ 200 มิลลิลิตร ที่ปรับพีเอชเป็น 5 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลาร์ จากนั้นเทสารทั้งสองผสมกัน ปั่นกวนเป็นเวลา 20 นาที แล้วจึงนำมากรองแบบลดความดัน อบสารให้แห้งและบดสารให้ละเอียด จากนั้นนำสารไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสารตัวอย่างด้วยเทคนิค XRD และ FT-IR จะพบพีคของไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ชัดเจน ส่วนพีคของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ สามารถตรวจพบได้จากเทคนิค Raman จากการวิเคราะห์ผลึกและ อนุภาคด้วยเทคนิค SEM พบว่าเมื่อมีการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ลงในไทเทเนียมไดออกไซด์ สารตัวอย่างมีการเกาะตัวกันมากขึ้น เมื่อปริมาณรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้น จากนั้นศึกษาลักษณะเฉพาะของสารตัวอย่างด้วยเทคนิค DRS PL และ BET พบว่าเมื่อมีการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ลงในไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ช่องว่างระหว่างชั้นพลังงานแคบ และมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสียอมมากขึ้น และศึกษาประสิทธิภาพกระบวนการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของสารตัวอย่างในการกำจัดสียอมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงต่างๆ คือ แสงยูวี แสงยูวี-วิสิเบิล และในแสงอาทิตย์ พบว่าสารตัวอย่างสามารถตอบสนองต่อแสงได้ทุกสภาวะการฉายแสง โดยเฉพาะภายใต้แสงอาทิตย์ สามารถกำจัดสี

ย้อมเมทิลีนบลูได้ถึง 90% ภายในเวลา 5 นาที และสามารถกำจัดสีย้อมได้สูงสุดถึง 99% ภายในระยะเวลา 30 นาที เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2\text{-rGO}$ มาใช้งานซ้ำ พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมลดลง เนื่องจากการสะสมของโมเลกุลสีย้อมเมทิลีนบลูบนพื้นผิวของสารตัวอย่าง และจากการศึกษาผลของพีเอชพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2\text{-rGO}$ จะมีประสิทธิภาพในการกำจัด สีย้อมได้ดีเมื่อสีย้อมอยู่ในสภาวะเบส

คำสำคัญ : ไทเทเนียมไดออกไซด์ ไรดิคซ์กราฟีนออกไซด์ กระบวนการโฟโตคะตะไลติก
สีย้อมเมทิลีนบลู



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

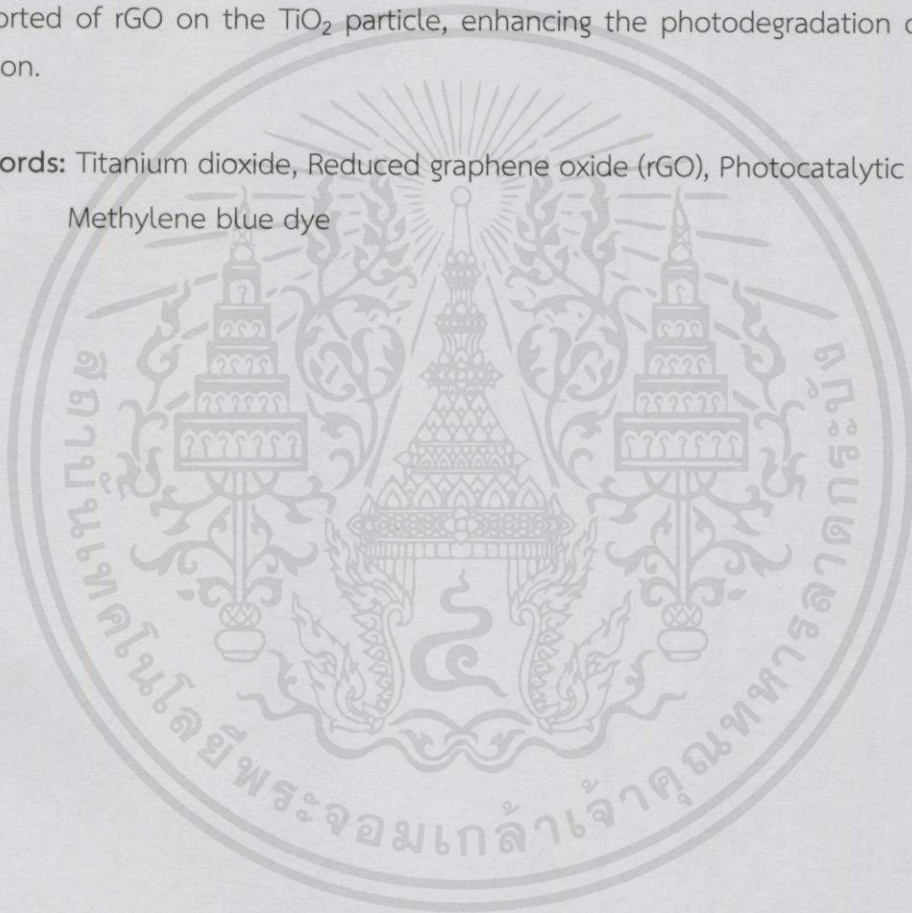
Title	PREPARATION, CHARACTERIZATION AND PHOTOCATALYTIC ACTIVITY OF TiO ₂ -rGO HYBRID CATALYST		
Student	Miss Naruemon	Idprakhon	Student ID 54050190
	Miss Pimonrat	Hongsaphan	Student ID 54050232
	Miss Wilaiporn	Nuntapun	Student ID 54050271
Degree	Bachelor of Science (Industrial chemistry)		
Department	Chemistry		
Academic Year	2014		
Advisor	Dr. Chaval	Sriwong	

ABSTRACT

In this special project is to study the preparation, characterization and photocatalytic activity of TiO₂-reduced graphene oxide (TiO₂-rGO) hybrid catalyst. In the preparation section, the TiO₂-rGO hybrid catalyst was easily prepared by directly mixing of TiO₂ (Degussa P25) suspension and reduced graphene oxide (rGO) suspension which the pH of the TiO₂ suspension was adjusted to pH 5 using hydrochloric solution (1M) whereas the rGO suspension was also adjusted to pH 8.5 using the same acid and was stirred for 20 min. After that the homogenized mixture was filtered under vacuum, washed by using distilled water until the pH of filtered solution as pH 7, then dried at 85 °C for 45 min and was grained to the fine powder, finally the TiO₂-rGO hybrid catalyst was obtained. In the procedure above, the amount of TiO₂ aqueous suspension was fixed as 2g/200mL and while the different amounts of rGO suspension (2.5, 5.0, 7.5 and 10.0 mg/mL) were prepared by varying graphene oxide aqueous suspension. The appropriate content of hydrazine solution was used as reducing agent along with ammonia solution was also used as stabilizing agent. Then, the mixture was refluxed at 90-95 °C for 1 h and the black aqueous suspension of rGO was obtained and ready to use in the further. The as-prepared TiO₂-rGO hybrid catalysts were characterized by SEM, XRD, FT-IR, DRS, Raman, BET and PL techniques. The results showed the morphologies of all the TiO₂-rGO hybrid catalysts were not distinctively different from the pristine TiO₂ powder (uncoated-TiO₂). From the XRD and FT-IR results, the characteristic peaks of rGO were not observed in the spectra of all hybrid catalysts because of its amorphous structure and the too small amount of rGO which could not be detected by these techniques. From the DRS spectra, the absorption band edge of all hybrid catalysts shift to the long wavelength (red shift) compared with uncoated-TiO₂ catalyst,

indicating the narrower band gap energy of the hybrid catalysts than the pristine TiO_2 . While the PL intensity of TiO_2 -rGO catalysts were decreased with the increasing amounts of added rGO, implying the recombination of negative electron (e^-) and positive hole (h^+) were reduced. In addition, the photocatalytic activities of the TiO_2 -rGO hybrid catalysts were evaluated by the photodegrading of methylene blue (MB) dye solution under UV, UV-Visible (fluorescent lamps) and the sunlight irradiation. The results showed that all of the TiO_2 -rGO hybrid catalysts could be degraded MB dye faster than the pristine TiO_2 alone under lights illuminated, especially under the sunlight. The reason of this is due to the fact that it is relatively with the well-supported of rGO on the TiO_2 particle, enhancing the photodegradation of MB dye solution.

Keywords: Titanium dioxide, Reduced graphene oxide (rGO), Photocatalytic process, Methylene blue dye



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ความสำเร็จของโครงการพิเศษนี้จะไม่เกิดขึ้น หากไม่ได้รับความช่วยเหลือ คำแนะนำ คำ
ตักเตือน และแนวทางการแก้ไขปัญหาต่างๆ จากผู้มีอุปการคุณ ดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.ขวาลย์ ศรีวงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษเป็นอย่างยิ่ง ที่คอยให้
การสนับสนุน คำแนะนำ ข้อเสนอแนะต่างๆ ตลอดจนแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่างๆ จนโครงการ
พิเศษนี้ลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ดร. เอกรัฐ เดชศรี และดร.กิตติมนต์ จิระกิตติดุลย์ อาจารย์คณะกรรมการ
ตรวจสอบโครงการพิเศษ ที่คอยให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะต่างๆ ซึ่งเป็นประโยชน์ในการทำโครงการ
พิเศษ

ขอขอบพระคุณ นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการ เจ้าหน้าที่ห้องธุรการและเจ้าหน้าที่ปฏิบัติการ
ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้
ความช่วยเหลือด้านสถานที่ อุปกรณ์ และคำแนะนำด้านเอกสารต่างๆ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่คอยให้กำลังใจ และให้ความช่วยเหลือในทุกๆด้าน จนโครงการ
พิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดาและบุคคลในครอบครัว ที่เป็นกำลังใจสำคัญที่ทำให้
โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นอกจากนี้ยังมีบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลืออีกมากมายที่มีได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ ซึ่งคณะผู้จัดทำต้อง
ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

นางสาวนฤมล

อิตประโคน

นางสาวพิมพ์รัตน์

หงษาพันธ์

นางสาววิไลภรณ์

นันทพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูปภาพ	ฎ
คำย่อ/สัญลักษณ์	ท
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 กระบวนการโฟโตคะตะไลติก	4
2.1.1 หลักการของกระบวนการโฟโตคะตะไลติก	4
2.1.2 ชนิดของโฟคะตะไลซิส	4
2.1.3 พลังงานแสง	5
2.1.4 ชนิดของตัวแคตาลิสต์	6
2.1.5 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในการบำบัดสารอินทรีย์	7
2.1.6 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส	8
2.2 ไทเทเนียมไดออกไซด์	9
2.2.1 ประโยชน์ของไทเทเนียมไดออกไซด์	10
2.3 กราฟีน	11
2.3.1 สมบัติหลักของกราฟีน	13
2.4 กราไฟต์	13
2.4.1 ประเภทของแร่กราไฟต์	14
2.5 ประเภทสีย้อม	15
2.6 เมทิลีนบลู	16
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี	20
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	20
3.3 การเตรียมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ การเตรียมสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ และการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู	21
3.3.1 การเตรียมกราฟีนไดออกไซด์ด้วยวิธีการปรับปรุงวิธีของฮัมเมอร์	21
3.3.2 การเตรียมกราฟีนออกไซด์ด้วยวิธีการใช้คลื่นความถี่สูง (Ultrasonic)	22
3.3.3 การเตรียมสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์	22
3.3.4 การเตรียมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์	22
3.3.5 การเตรียมสารผสมระหว่างสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์	23
3.3.6 การทดสอบการกำจัดสีย้อม	24
3.3.7 ทดสอบความสามารถในการใช้ซ้ำ	26
3.3.8 เปรียบเทียบการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูที่มีค่าพีเอชที่แตกต่างกัน ระหว่างพีเอช 3 และพีเอช 10	26
3.4 เครื่องมือที่ใช้พิสูจน์เอกลักษณ์ของสารตัวอย่างในการทดลอง	26
3.4.1 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)	27
3.4.2 เครื่องวิเคราะห์สารด้วยระบบอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR)	28
3.4.3 เครื่องวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบของสาร (Raman Spectrometer)	28
3.4.4 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงในสถานะของแข็ง (UV-VIS Diffuse reflectance Spectrometer)	28
3.4.5 เครื่องวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบของสารโดยการเปล่งแสง (Photoluminescence Spectrometer, PL)	29
3.4.6 เครื่องวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิวของสาร (Surface area and porosity analyzer, BET)	29
3.4.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)	31
3.4.8 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-VIS Spectrophotometer)	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์และศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของสารตัวอย่าง	33
4.1.1 X-ray Diffractometer (XRD)	33
4.1.2 Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR)	35
4.1.3 Raman Spectroscopy	37
4.1.4 UV-Visible Diffuse Reflectance Spectroscopy (DRS)	40
4.1.5 Photoluminescence Spectrometer (PL)	42
4.1.6 Brunauer-Emmett-Teller (BET)	43
4.2 ศึกษาลักษณะสัณฐานของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม TiO ₂ -rGO	43
4.2.1 Scanning electron microscopy (SEM)	43
4.3 ศึกษาประสิทธิภาพกระบวนการเกิดโฟโตคะตะไลติกของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม TiO ₂ -rGO ในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงต่างๆ	45
4.3.1 ผลการทดสอบการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้ความมืด	46
4.3.2 ผลการทดสอบการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงยูวี	48
4.3.3 ผลการทดสอบการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงยูวี-วิสเบิล	50
4.3.4 ผลการทดสอบการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอาทิตย์	52
4.3.5 ผลการทดสอบการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในการใช้งานซ้ำ	53
4.3.6 ผลการทดสอบเปรียบเทียบการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูที่มีพีเอชแตกต่างกัน	54

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการพิสูจน์เอกลักษณ์และศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม TiO ₂ -rGO ที่ผสมในปริมาณที่ต่างกัน	57
5.2 สรุปผลประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม	57
5.3 สรุปผลประสิทธิภาพในการใช้งานซ้ำ	58
5.4 สรุปผลการเปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดสีย้อมที่มีค่าพีเอชแตกต่างกัน	58
5.5 ข้อเสนอแนะ	58

เอกสารอ้างอิง

59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

ภาคผนวก	หน้า
ภาคผนวก ก	64
ภาคผนวก ข	66
ภาคผนวก ค	79



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 แสดงค่าความยาวคลื่นและค่าช่องว่างระหว่างพลังงาน	41
4.2 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิวและขนาดอนุภาค	43
4.3 แสดงค่าร้อยละในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้ความมืด	46
4.4 แสดงค่าร้อยละในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงยูวี	48
4.5 แสดงค่าร้อยละในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงยูวี-วีลบี	50
4.6 แสดงค่าร้อยละในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอาทิตย์	52
4.7 แสดงค่าการดูดกลืนแสงและค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในสภาวะกรด	55
4.8 แสดงค่าการดูดกลืนแสงและค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในสภาวะเบส	55
ค-1 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของเมทิลีนบลูภายใต้ความมืด	79
ค-2 ตารางแสดงค่าความเข้มข้นของสีย้อมภายใต้ความมืด	79
ค-3 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลีนบลูภายใต้แสงยูวี	80
ค-4 แสดงความเข้มข้นของเมทิลีนบลูภายใต้แสงยูวี	80
ค-5 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลีนบลูภายใต้แสงยูวี-วีลบี	81
ค-6 แสดงความเข้มข้นของเมทิลีนบลูภายใต้การให้แสงยูวี-วีลบี	81
ค-7 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลีนบลูภายใต้แสงอาทิตย์	82
ค-8 แสดงความเข้มข้นของเมทิลีนบลูภายใต้การให้แสงอาทิตย์	82
ค-9 แสดงค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของการใช้ซ้ำ	83
ค-10 แสดงค่าการดูดกลืนแสงและค่าความเข้มข้นของเมทิลีนบลูในสภาวะกรด	83
ค-11 แสดงค่าการดูดกลืนแสงและค่าความเข้มข้นของเมทิลีนบลูในสภาวะเบส	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส	1
2.1 พลังงานของการเกิดออกซิเดชันของสารอินทรีย์	4
2.2 สเปกตรัมของรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	5
2.3 สเปกตรัมของรังสียูวี	6
2.4 การเกิดโฮลและอิเล็กตรอนของไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อได้รับพลังงานแสง	7
2.5 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสบนสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์	7
2.6 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์	9
2.7 รูปแบบXRD pattern of TiO ₂ Degussa P25	10
2.8 อังเดรไกม์และคอนสแตนต์อิน โนวาเซลอฟ	12
2.9 โครงสร้างที่เกิดจากแผ่นกราฟีน	12
2.10 การรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์	13
2.11 a) แร่กราฟไฟต์ b) ผงกราฟไฟต์ c) โครงสร้างของกราฟไฟต์	14
2.12 โครงสร้างของเมทิลีนบลู	16
2.13 กลไกการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู	17
4.1 ผงตัวเร่งผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์	32
4.2 รูปแบบ XRD ของกราฟไฟต์ กราฟีนออกไซด์ และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์	33
4.3 รูปแบบ XRD ของไทเทเนียมไดออกไซด์และสารตัวอย่างที่เตรียมได้	34
4.4 FT-IR สเปกตรัมของกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์	35
4.5 FT-IR สเปกตรัมของไทเทเนียมไดออกไซด์และสารตัวอย่างที่เตรียมได้	36
4.6 รามานสเปกตรัมของกราฟไฟต์	37
4.7 รามานสเปกตรัมของกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์	38
4.8 รามานสเปกตรัมของสารตัวอย่างที่เตรียมเทียบกับไทเทเนียมไดออกไซด์ P25	39
4.9 กราฟ DRS สเปกตรัมของไทเทเนียมไดออกไซด์และสารตัวอย่างที่เตรียมได้	40
4.10 PL spectra สเปกตรัมของไทเทเนียมไดออกไซด์และสารตัวอย่างที่เตรียมได้	42
4.11 SEM ของ TiO ₂ Degussa P25	44
4.12 รูปถ่าย SEM ผงตัวอย่างที่เตรียม	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 กราฟแสดงค่าร้อยละในการกำจัดสีย้อมกับเวลาในการกำจัดสีย้อมภายใต้ความมืด	46
4.14 แผนภูมิเปรียบเทียบ%การดูดซับสีย้อมภายใต้ความมืดที่เวลา 180 นาที	47
4.15 กราฟแสดงค่าร้อยละในการกำจัดกับเวลาในการกำจัดสีย้อมภายใต้การฉายแสงยูวี	48
4.16 แผนภูมิเปรียบเทียบการกำจัดสีย้อมภายใต้แสงยูวี ที่เวลา 180 นาที	49
4.17 กราฟแสดงค่าร้อยละการกำจัดกับเวลาในการกำจัดสีย้อมภายใต้การฉายแสงยูวี-วิลิเบล	50
4.18 กราฟแสดงค่าร้อยละการกำจัดกับเวลาในการกำจัดสีย้อมภายใต้การฉายแสงยูวี-วิลิเบล	51
4.19 กราฟแสดงค่าร้อยละในการกำจัดกับเวลาในการกำจัดสีย้อมภายใต้แสงอาทิตย์	52
4.20 แผนภูมิเปรียบเทียบการกำจัดสีย้อมภายใต้แสงอาทิตย์ ที่เวลา 5 นาที	53
4.21 แผนภูมิแท่งแสดงค่าร้อยละในการกำจัดสีย้อมภายใต้แสงอาทิตย์	54
4.22 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบการกำจัดสีย้อมในสภาวะกรด-เบส	56
ก-1 กราฟมาตรฐานของเมทิลีนบลู	59
ข-1 รูปแบบ XRD ของไทเทเนียมไดออกไซด์	66
ข-2 รูปแบบ XRD ของ $\text{TiO}_2\text{-rGO}$ [2.5 mg]	66
ข-3 รูปแบบ XRD ของ $\text{TiO}_2\text{-rGO}$ [5.0 mg]	67
ข-4 รูปแบบ XRD ของ $\text{TiO}_2\text{-rGO}$ [7.5 mg]	67
ข-5 รูปแบบ XRD ของ $\text{TiO}_2\text{-rGO}$ [10.0 mg]	68
ข-6 กราฟ FT-IR ของกราฟีนออกไซด์	69
ข-7 กราฟ FT-IR ของกราฟีนออกไซด์	69
ข-8 กราฟรามาน สเปกตรัมของกราฟไฟต์	70
ข-9 กราฟรามาน สเปกตรัมของกราฟีนออกไซด์	70
ข-10 กราฟรามาน สเปกตรัมของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์	71
ข-11 กราฟรามาน สเปกตรัมของไทเทเนียมไดออกไซด์	71
ข-12 กราฟรามาน สเปกตรัมของ $\text{TiO}_2\text{-rGO}$ [2.5 mg]	72
ข-13 กราฟรามาน สเปกตรัมของ $\text{TiO}_2\text{-rGO}$ [10.0 mg]	72
ข-14 DRS สเปกตรัมของไทเทเนียมไดออกไซด์ P25	73
ข-15 DRS สเปกตรัมของ $\text{TiO}_2\text{-rGO}$ [2.5 mg]	73
ข-16 DRS สเปกตรัม ของ $\text{TiO}_2\text{-rGO}$ [5.0 mg]	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

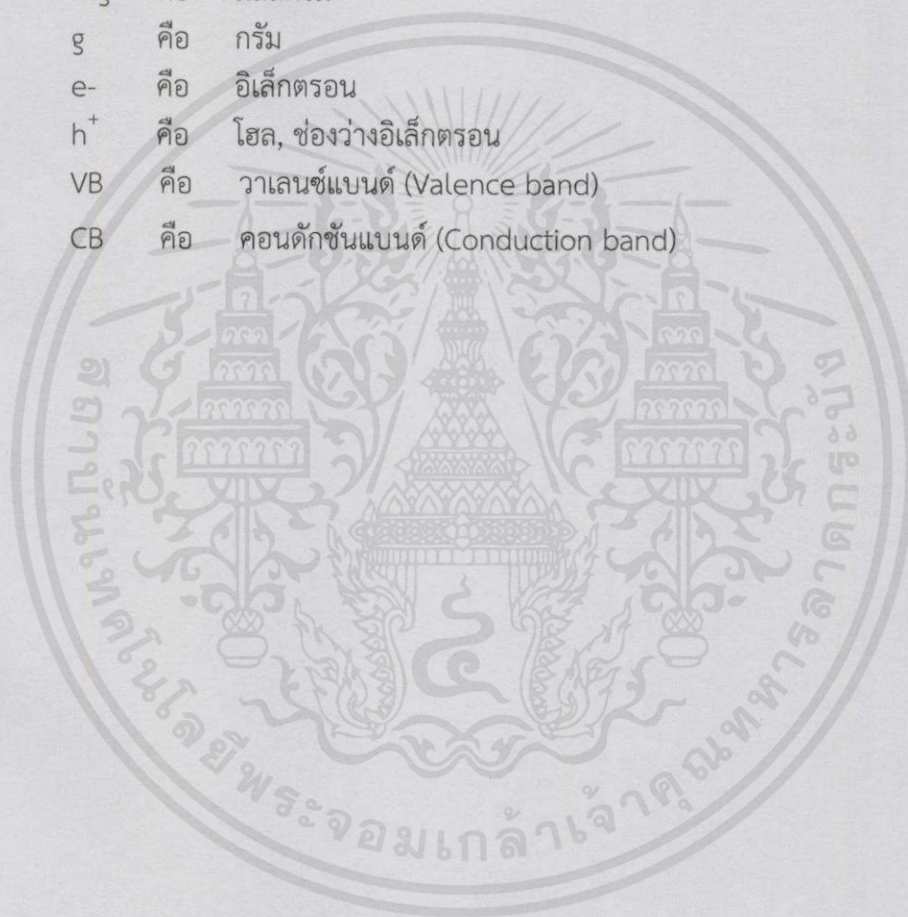
รูปที่	หน้า
ข-17 DRS สเปกตรัม ของ $\text{TiO}_2\text{-rGO}$ [7.5 mg]	74
ข-18 DRS สเปกตรัม ของ $\text{TiO}_2\text{-rGO}$ [10.0 mg]	75
ข-19สเปกตรัมของไทเทเนียมไดออกไซด์	76
ข-20 สเปกตรัมของ $\text{TiO}_2\text{-rGO}$ [2.5 mg]	76
ข-21 สเปกตรัมของ $\text{TiO}_2\text{-rGO}$ [5.0 mg]	77
ข-22สเปกตรัมของ $\text{TiO}_2\text{-rGO}$ [7.5 mg]	77
ข-23สเปกตรัมของ $\text{TiO}_2\text{-rGO}$ [10.0 mg]	78



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

E	คือ	พลังงานควอนตัม (Quantum Energy), จูล (J)
h	คือ	ค่าคงที่พลังค์ (Planck's Constant) = 6.625×10^{-34} จูล-วินาที (J-s)
ν	คือ	ความถี่ของคลื่นแสง, เฮิร์ต (Hz) หรือวินาที ⁻¹ (s ⁻¹)
λ	คือ	ความยาวคลื่นแสง, นาโนเมตร (nm)
c	คือ	ความเร็วคลื่นแสง = 2.99×10^8 เมตรต่อวินาที (m/s)
mg	คือ	มิลลิกรัม
g	คือ	กรัม
e-	คือ	อิเล็กตรอน
h^+	คือ	โฮล, ช่องว่างอิเล็กตรอน
VB	คือ	วาเลนซ์แบนด์ (Valence band)
CB	คือ	คอนดักชันแบนด์ (Conduction band)



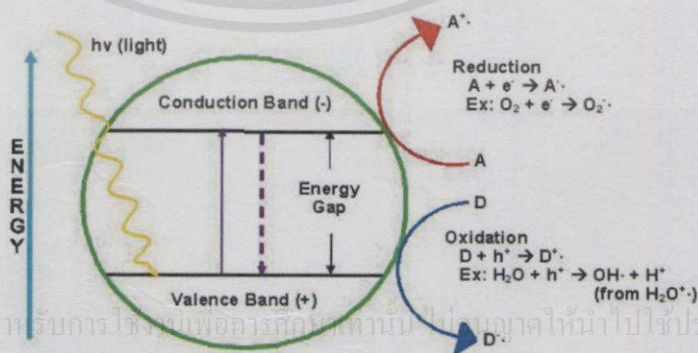
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันความเจริญก้าวหน้าของเทคโนโลยีและวิทยาการสมัยใหม่ ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างต่อเนื่อง การเกิดมลพิษสารอินทรีย์ตกค้างในสิ่งแวดล้อมทั้งในดิน อากาศ หรือแม้กระทั่งแหล่งน้ำ การจัดการสารเคมีในน้ำเสียคือหนึ่งในการกระตุ้นการจัดการทางเคมีสิ่งแวดล้อมและทางวิศวกรรม โดยทั่วไประบบการบำบัดน้ำเสียนั้นประกอบด้วยวิธีการทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีววิทยา เช่น การตกตะกอน การดูดซับกลิ่นและสี แต่วิธีการเหล่านี้ยังไม่สามารถกำจัดสารอินทรีย์ ได้ทั้งหมด โดยเฉพาะสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนและมีประสิทธิภาพ เมื่อไม่นานมานี้ได้มีการนำสารตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalysis process) มาเพื่อการบำบัดสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ทั้งหมด เช่น การใช้วัสดุกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ภายใต้รังสียูวีได้ดี แต่ทั้งนี้แสงอาทิตย์สามารถใช้ในการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้ ซึ่งเป็นการประหยัดพลังงาน และเป็นการใช้แหล่งพลังงานธรรมชาติเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยแสงอาทิตย์มีส่วนประกอบของความยาวคลื่นในช่วงรังสีอินฟราเรด 50 เปอร์เซ็นต์ แสงในช่วงแสงวิสิเบิล 45 เปอร์เซ็นต์ และแสงช่วงอัลตราไวโอเล็ต 5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งไทเทเนียมไดออกไซด์มีการตอบสนองต่อช่วงแสงยูวีได้ดีกว่าแสงชนิดอื่น จึงได้มีการพัฒนาไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อให้สามารถตอบสนองต่อช่วงแสงวิสิเบิลและแสงอาทิตย์ ซึ่งได้มีงานวิจัยหลายอย่างเกี่ยวกับการพัฒนาประสิทธิภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ ยกตัวอย่าง เช่น วิธีการเจือด้วยธาตุโลหะชนิดต่างๆ เช่น กลุ่มของธาตุโลหะทรานซิชัน (Transition metal) ซึ่งจะเข้าไปช่วยลดแถบช่องว่างของพลังงานพลังงาน ทำให้อิเล็กตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยากระตุ้นด้วยแสงเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ลดการตกกลับมารวมตัวกันของอิเล็กตรอน เพิ่มประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้ดีขึ้น ได้แก่ Zn, Co หรือแม้กระทั่ง Ag แต่เนื่องจากโลหะเหล่านี้หลังจากทำการนำไปบำบัดน้ำแล้วอาจก่อให้เกิดมลพิษตกค้างในสิ่งแวดล้อมและยากต่อการกำจัดภายหลัง



รูปที่ 1.1 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส [1]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้มีการศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (TiO₂-rGO Hybrid Catalyst) โดยใช้รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มาเพิ่มประสิทธิภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก เนื่องจากปัจจุบันกราฟีนเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมสูงอย่างแพร่หลาย เพราะมีเอกลักษณ์เฉพาะตัวที่โดดเด่นและมีประสิทธิภาพสูง เกิดจากอะตอมคาร์บอนเรียงตัวกันเป็นรูปหกเหลี่ยม (hexagonal) คล้ายรังผึ้ง มีความหนาเพียง 1 อะตอมของคาร์บอนมีพื้นที่ผิวสูงถึง 2600 m²/g โครงสร้างมีการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ ทำให้มีความสามารถในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (Electron mobility) สูงและมีช่องว่างระหว่างพลังงานต่ำ ส่งผลให้มีสมบัติทางไฟฟ้าที่โดดเด่น และค่าความจุความร้อนเพิ่มขึ้น ดังนั้น การนำเอารีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ผสมกับไทเทเนียมไดออกไซด์นั้น เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดกลืนแสง ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีความว่องไวเพิ่มมากขึ้น สามารถยับยั้งการรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนและช่องว่างของอิเล็กตรอนในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสได้ดีเช่นเดียวกับการใช้ธาตุโลหะต่างๆ และที่สำคัญลดการก่อกมลพิษทางสิ่งแวดล้อมภายหลังการบำบัด ทำให้การพัฒนากระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงในระดับอุตสาหกรรมมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์
- 2) เพื่อพิสูจน์เอกลักษณ์และศึกษาลักษณะเฉพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์
- 3) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการเป็นตัวดูดซับของตัวเร่งปฏิกิริยาผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ภายใต้ความมืด
- 4) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ภายใต้แสงยูวี แสงยูวี-วีลิตเบิล และแสงอาทิตย์ในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู
- 5) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการนำกลับใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์
- 6) เพื่อศึกษาความเป็นกรดและเบสของสีย้อมเมทิลีนบลู ว่ามีผลต่อกระบวนการเกิดโฟโตคะตะไลติกของตัวเร่งปฏิกิริยาผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

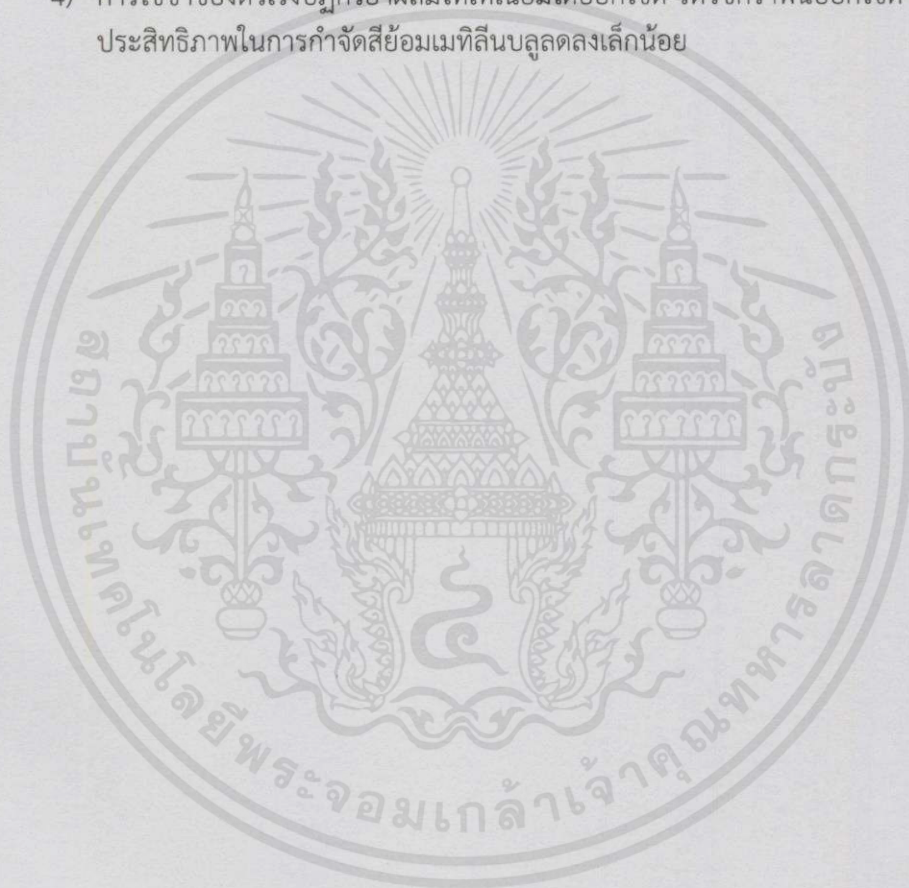
1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1) ศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกในการกำจัดสีย้อมภายใต้ความมืด แสงยูวี แสงยูวี-วีลิตเบิล และแสงอาทิตย์
- 2) พิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์
- 3) ศึกษากระบวนการเกิดโฟโตคะตะไลติก เมื่อสีย้อมอยู่ในสภาวะกรดและเบส
- 4) ศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยาผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ที่ผ่านการใช้งานแล้วนำกลับมาใช้ซ้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มีอนุสัญญาที่ห้ามมิให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) มีความเข้าใจและสามารถอธิบายหลักการเกิดโฟโตคะตะไลติกของตัวเร่งปฏิกิริยาผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ได้
- 2) ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ มีประสิทธิภาพในการกำจัด สีย้อมเมทิลีนบลูได้ดี
- 3) เมื่อสีย้อมเมทิลีนบลูอยู่ในสภาวะกรด-เบส ส่งผลต่อกระบวนการเกิดโฟโตคะตะไลติก เป็นไปในทางที่ดีขึ้น
- 4) การใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูลดลงเล็กน้อย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

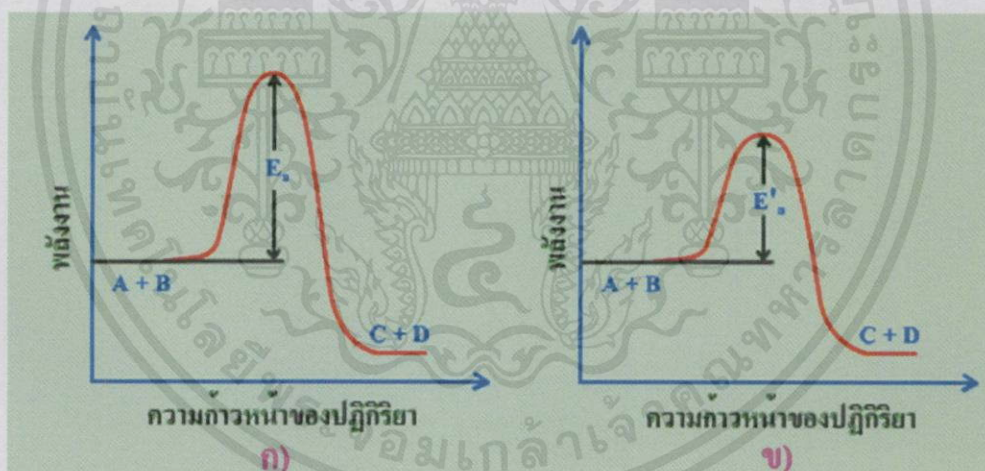
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการโฟโตคะตะไลติก

2.1.1 หลักการของกระบวนการโฟโตคะตะไลติก (Fundamental of Photocatalytic Process)

กระบวนการโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic process) เป็นกระบวนการที่ทำให้สารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาหรือคะตะลิสต์ ที่สามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ โดยการกระตุ้นด้วยแสง ซึ่งจะทำหน้าที่ในการลดพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยาแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งจะเรียกตัวคะตะลิสต์ในกระบวนการนี้ว่า โฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis) ซึ่งโฟโตคะตะไลซิสจำเป็นต้องมีองค์ประกอบ [2] คือ

- 1) ตัวเร่งปฏิกิริยาหรือคะตะลิสต์
- 2) พลังงานแสง ซึ่งมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับพลังงานโฟตอนของตัวคะตะลิสต์
- 3) น้ำ
- 4) ออกซิเจน หรือตัวออกซิเดชันอื่น



รูปที่ 2.1 พลังงานของการเกิดออกซิเดชันของสารอินทรีย์ [2]

2.1.2 ชนิดของโฟโตคะตะไลซิส

โฟโตคะตะไลซิส สามารถแยกได้ 2 ประเภท เมื่อพิจารณาจากสถานะของตัวคะตะลิสต์

- 1) โฟโตคะตะไลซิสแบบสถานะเดียว (Homogeneous photocatalysis) เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมีสถานะเดียวกับสารอินทรีย์ที่ต้องกำจัด (โดยทั่วไปแล้วจะเป็นของเหลว) ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น
- 2) โฟโตคะตะไลซิสแบบสถานะต่าง (Heterogeneous photocatalysis) เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมีสถานะต่างกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด

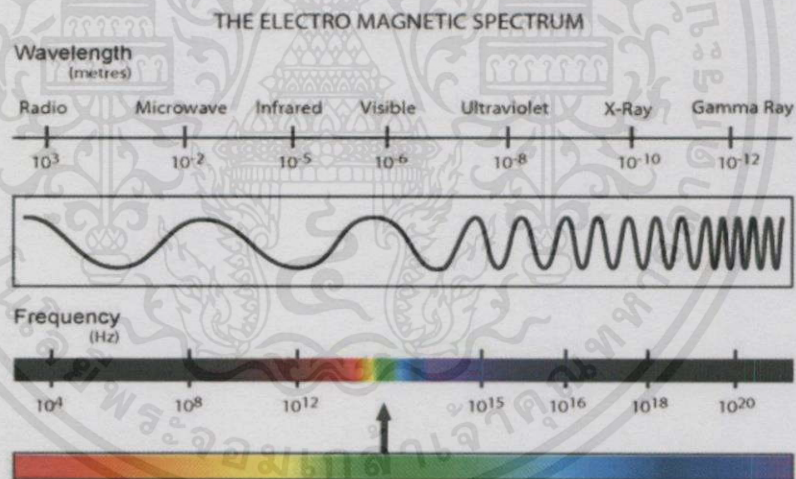
2.1.3 พลังงานแสง

การฉายแสงในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส นั้น เป็นการใช้พลังงานกับระบบในรูปของพลังงานโฟตอน (Photon energy) มากพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาขึ้นได้ ซึ่งเรียกพลังงานดังกล่าวนี้ว่า พลังงานกระตุ้น (Activation energy) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1

$$E = hv = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.1)$$

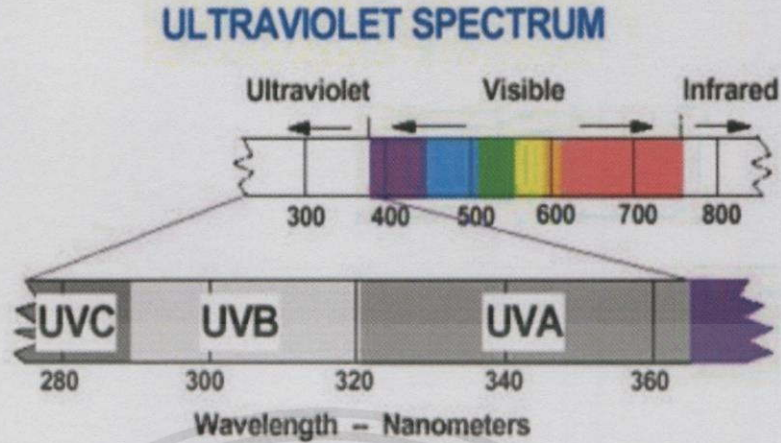
E	คือ	พลังงานควอนตัม (Quantum Energy), จูล (J)
h	คือ	ค่าคงที่พลังค์ (Planck's Constant) = 6.625×10^{-34} , จูล-วินาที (J-s)
v	คือ	ความถี่ของคลื่นแสง, เฮิร์ต (Hz) หรือวินาที ⁻¹ (s^{-1})
λ	คือ	ความยาวคลื่นแสง, นาโนเมตร (nm)
c	คือ	ความเร็วคลื่นแสง = 2.99×10^8 เมตรต่อวินาที (m/s)

พลังงานแสงมีค่าแปรผกผันกับความยาวคลื่น โดยพลังงานของแสงเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวคลื่นลดลง แสดงความสัมพันธ์ของความยาวคลื่นและพลังงานแสง ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 สเปกตรัมของรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 สเปกตรัมของรังสียูวี [4]

รูปที่ 2.3 แสดงสเปกตรัมของรังสียูวี ซึ่งเป็นที่สนใจในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ความยาวคลื่นของแสงยูวีจะอยู่ในช่วง 100-400 นาโนเมตร สำหรับความยาวคลื่นแสงช่วงที่คนมองเห็น (Visible หรือ แสงขาว) อยู่ในช่วง 380-750 นาโนเมตร รังสียูวีแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ

- 1) คลื่นยาว (Long Wave UV, UV-A) อยู่ในช่วง 400-320 นาโนเมตร
- 2) คลื่นกลาง (Middle Wave UV, UV-B) อยู่ในช่วง 320-280 นาโนเมตร
- 3) คลื่นสั้น (Short Wave UV, UV-C) อยู่ในช่วง 280-200 นาโนเมตร

ความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า 200 นาโนเมตร มีความสำคัญน้อยมาก เพราะรังสีที่อยู่ในช่วง Vacuum UV ซึ่งจะถูกลดทอนในอากาศจนหมดในช่วงระยะทางสั้นๆ ที่แสงเดินทาง

2.1.4 ชนิดของตัวคะตะลิสต์

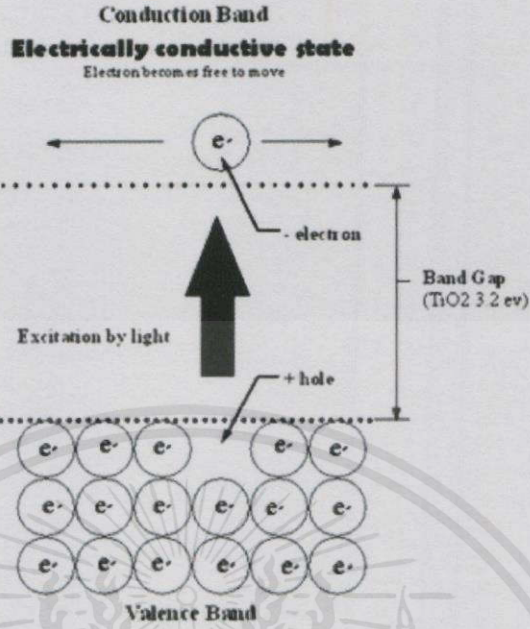
สารที่ใช้เป็นตัวคะตะลิสต์ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสมี 2 ประเภทหลัก คือ

- 1) โลหะตัวนำ (Transition metal) เช่น ทองแดง โครเมียม นิกเกิล เป็นต้น
- 2) สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นต้น

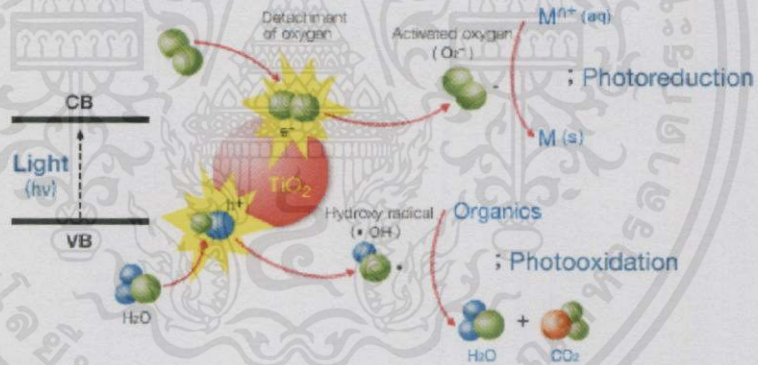
องค์ประกอบของโลหะตัวนำและสารกึ่งตัวนำ ประกอบด้วยวาเลนซ์แบนด์ (Valence band) และคอนดักชันแบนด์ (Conduction band) ในโลหะตัวนำจะมีวาเลนซ์แบนด์และคอนดักชันแบนด์ติดกัน แต่ในสารกึ่งตัวนำ วาเลนซ์แบนด์และคอนดักชันแบนด์จะไม่ติดกัน โดยเกิดเป็นช่องว่างเรียกว่า ค่าแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap) เมื่ออิเล็กตรอน (Electron, e^-) ที่อยู่ในวาเลนซ์แบนด์ได้รับพลังงานโฟตอนจากแสง ($h\nu$) อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังคอนดักชันแบนด์ ในขณะที่เดียวกันที่บริเวณวาเลนซ์แบนด์จะเกิดโฮล (Hole, h^+) ซึ่งเป็นประจุบวกสามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระในวาเลนซ์แบนด์ ส่วนคอนดักชันแบนด์อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่มาจากวาเลนซ์แบนด์เคลื่อนที่อย่างอิสระทั่วคอนดักชันแบนด์เช่นเดียวกัน ปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล (Electron-hole pairs, e^-/h^+)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยและพัฒนาเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 การเกิดโฮลและอิเล็กตรอนของไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อได้รับพลังงานแสง [5]

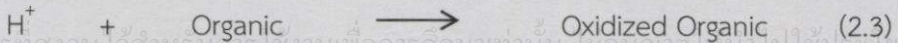
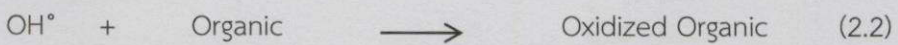


รูปที่ 2.5 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสบนสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ [6]

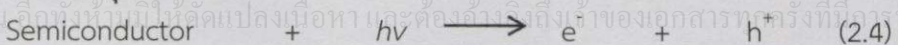
2.1.5 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในการบำบัดสารอินทรีย์

ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในการบำบัดสารอินทรีย์ แสดงดังสมการที่ (2.2) และสมการที่ (2.3)

การบำบัดน้ำเสีย

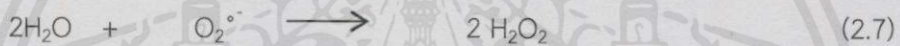


การกระตุ้น

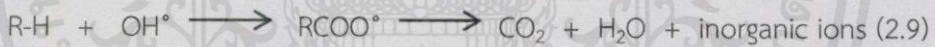


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีเมลนี้ให้อัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่จะนำไปใช้

เมื่อสารกึ่งตัวนำได้รับพลังงานแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งมีพลังงานสูงกว่าช่องว่างแถบพลังงาน (Band gap energy) สารกึ่งตัวนำจะถูกดูดกลืนพลังงานเท่ากับช่องว่างพลังงาน (energy gap) ทำให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ (Valance band, VB) ถูกกระตุ้นขึ้นไปสู่แถบการนำ (Conduction band, CB) ส่งผลให้อิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นในแถบการนำ (e^-_{CB}) และเกิดสภาวะการขาดอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์หรือโฮล (hole, h^+_{VB}) ดังสมการที่ (2.4) ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า เกิดเป็นคู่อิเล็กตรอน-โฮล (e^-/h^+ pair) เมื่อบริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำในสภาวะที่มีคู่อิเล็กตรอนและโฮลสัมผัสกับโมเลกุลของน้ำหรือออกซิเจนที่มีอยู่ในอากาศ จะทำให้เกิดเรดิคัล (Radical) ที่มีความว่องไวสูงบนผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ โดยโมเลกุลของน้ำจะถูกออกซิไดซ์ด้วย h^+_{VB} เกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH^\bullet) ดังสมการที่ (2.5) ส่วนโมเลกุลของออกซิเจนจะถูกรีดิวซ์โดย e^-_{CB} เกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลไอออน (O_2^\bullet) ดังสมการที่ (2.6) และเกิดเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ดังสมการที่ (2.7) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้รับพลังงานแสงเกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH^\bullet) ดังสมการที่ (2.8)



ไฮดรอกซิลเรดิคัลที่เกิดขึ้นเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรง สามารถย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ได้ ดังสมการที่ (2.9)



2.1.6 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

1) ความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยา การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกจะเกิดที่ผิวอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น จะทำให้เพิ่มพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น และมีโอกาสเกิด e^-_{CB} และ h^+_{VB} มากขึ้น ซึ่งทำให้มีปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลมากตามด้วย ส่งผลทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันของสารอินทรีย์มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย

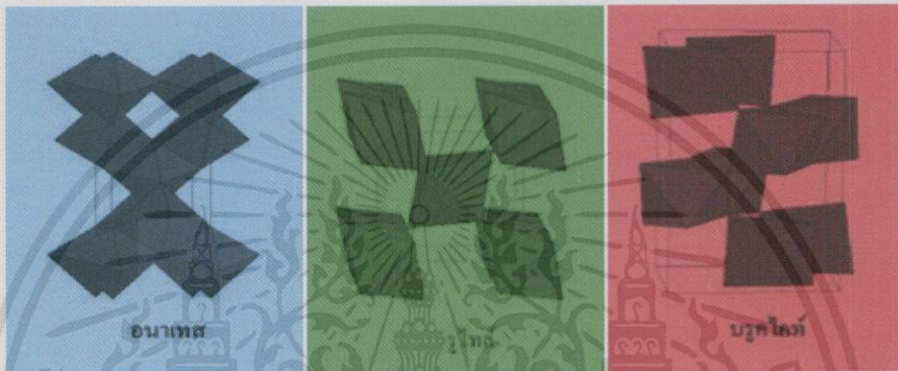
2) ค่าพีเอช (pH) ประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะไลติกขึ้นอยู่กับค่าพีเอชในสารละลาย เนื่องจากค่าพีเอชมีผลต่อการมีประจุไฟฟ้าที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา และส่งผลต่อความสามารถในการยึดเกาะของสารประกอบไอออนิกที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

3) ระยะเวลาการให้แสงยูวี เป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อการกำจัดสารอินทรีย์ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก หากให้ระยะเวลาการให้แสงยูวีนานขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์จะมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของสารอินทรีย์มีโอกาสสัมผัสกับพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถสลายสารอินทรีย์ได้อย่างสมบูรณ์

4) อุณหภูมิมีผลต่อปฏิกิริยาการสลายสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติก พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อัตราการกำจัดสารอินทรีย์ในสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น

2.2 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide, TiO_2)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide: TiO_2) เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียม ที่ถูกนำมาใช้มากในอุตสาหกรรมด้านต่างๆ เนื่องจากมีความเสถียรสูง ไม่เป็นพิษ และราคาถูก ถูกค้นพบครั้งแรกเมื่อ ค.ศ. 1791 ในเหมืองแร่เหมืองคอร์นวอลล์ ประเทศอังกฤษ โดยนักธรณีวิทยาชื่อ William Gregor ไทเทเนียมไดออกไซด์โดยธรรมชาติจะพบน้อยมาก ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแร่อิลเมนไนต์ (ilmenite) หรือ ลิวโซซิน (leucocene) โดยไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน 3 แบบ คือ บรูคไคท์ อนาเทส และรูไทล์ [7] ดังรูปที่ 2.6



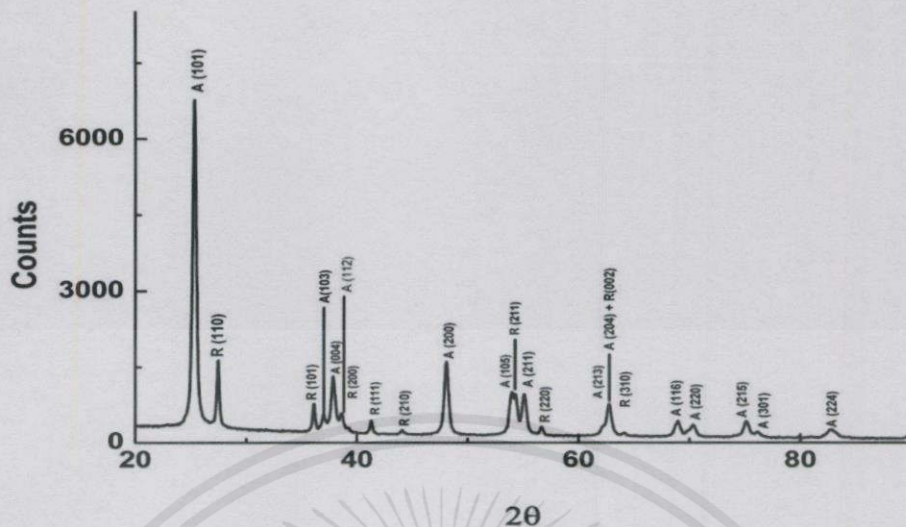
รูปที่ 2.6 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ [8]

เนื่องจากการจัดเรียงตัวของออกตรอะตอมที่แตกต่างกัน จึงส่งผลให้มีสมบัติบางประการแตกต่างกันออกไป และมีความเหมาะสมในการทำงานที่แตกต่างกัน พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อยู่ในรูปของรูไทล์และอนาเทสนั้น มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายด้วยแสงสูง เนื่องจากการรวมตัวกันระหว่างอิเล็กตรอนและช่องว่างอิเล็กตรอนน้อย และมีความสามารถในการดูดซับผิวสูงกว่า บรูคไคท์ โดยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสจะมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์มากกว่าโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ เนื่องจากโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสนั้นมีแถบช่องว่างพลังงาน สูงกว่าโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ โดยค่าแถบช่องว่างพลังงานของโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสมีค่าเท่ากับ 3.23 eV ในขณะที่รูไทล์มีค่าเท่ากับ 3.02 eV [9] และโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์จะใช้อุณหภูมิขณะสังเคราะห์สูงกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์โครงสร้างผลึกแบบอนาเทส ทำให้โครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ เกิดการสูญเสียพื้นที่ผิวที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา [10] แต่ทั้งนี้การใช้ไทเทเนียมในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำนั้นก็ยังมีประสิทธิภาพไม่เพียงพอสำหรับภาคอุตสาหกรรม

ในงานวิจัยนี้ได้นำไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) มาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) เป็นไทเทเนียมเกรดเชิงการค้าที่หาได้ง่าย มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสและรูไทล์รวมกัน ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 รูปแบบ XRD ของ TiO_2 Degussa P25 [11]

ประโยชน์ของไทเทเนียมไดออกไซด์

1) ความสามารถในการต้านแบคทีเรีย ไทเทเนียมไดออกไซด์ มีประสิทธิภาพสูงกว่าสารต้านแบคทีเรียชนิดอื่นๆ ที่จะทำงาน เมื่อมีเซลล์แบคทีเรียสัมผัสกับพื้นผิว และที่สำคัญไทเทเนียมไดออกไซด์จะไม่เกิดการเสื่อมประสิทธิภาพ หลังจากที่ทำลายเชื้อแบคทีเรีย ทำให้คงประสิทธิภาพการใช้งานที่ยาวนาน และไทเทเนียมไดออกไซด์ยังมีประสิทธิภาพด้านการยับยั้งหรือต่อต้านการติดเชื้อมากกว่าคลอรีน 3 เท่า และมากกว่าโอโซน 1.5 เท่า

2) ความสามารถด้านการกำจัดกลิ่น ด้วยคุณสมบัติของการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยการทำลายพันธะระหว่างโมเลกุลของสารให้แตกออกเป็นโมเลกุลเดี่ยว สามารถกำจัดโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ระเหยอยู่ในอากาศ (Volatile Organic Compounds หรือ VOCs) อันเป็นสาเหตุของกลิ่นไม่พึงประสงค์ เช่น กลิ่นบุหรี กลิ่นยาสูบ สารประเภทฟอร์มาลดีไฮด์ ยูรีน กลิ่นอุจจาระ น้ำมันเชื้อเพลิง ควัน เกสรดอกไม้ และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอีกหลายชนิดในอากาศ ฯลฯ การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ จึงเป็นการแก้ปัญหาที่ต้นเหตุ

3) ความสามารถในการฟอกอากาศ ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกเร่งด้วยปฏิกิริยาแสง สามารถกำจัดสารที่ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศได้ เช่น สารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ควันบุหรี สารระเหยต่างๆ ที่ออกมาจากอาคาร รวมถึงช่วยกำจัดสารประเภทที่ทำลายชั้นบรรยากาศ เช่น ก๊าซคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFC) และก๊าซเรือนกระจกประเภทอื่น ทั้งทางตรงและทางอ้อม เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแสง แม้ในบริเวณที่มีมลภาวะสูง ไทเทเนียมไดออกไซด์ จึงช่วยลดสารก่อมลภาวะเหล่านี้ได้

4) ความสามารถในการป้องกันการเกิดคราบ และคุณสมบัติการทำความสะอาดตัวเอง ด้วยคุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ ในการทำความสะอาดตัวเองเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงเมื่อผนังด้านนอกของอาคารที่มีก่อดังกล่าวมาจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ ที่มีส่วนประกอบเป็นน้ำมัน ได้รับการปกป้องด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ ไทเทเนียมไดออกไซด์จะทำลายสารประกอบ

ไฮโดรคาร์บอน รวมทั้งฝุ่นผงต่างๆ ที่เกาะติดอยู่กับผนัง จึงถูกชะล้างออกจากผนังอย่างง่ายดายได้เมื่อ ฝนตกลงมา ทำให้ผนังตึกดูสะอาดและใหม่อยู่เสมอ

5) ความสามารถในการทำน้ำสะอาด สามารถกำจัดสารอินทรีย์ที่ก่อมลภาวะให้กลายเป็นสารที่ไม่เป็นอันตรายได้ เช่น ทำให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ โดยไทเทเนียมไดออกไซด์ จะนำไปใช้ในขั้นตอนที่สองของการบำบัดน้ำเสีย โครงการต้นแบบในการบำบัดน้ำเสียแสดงให้เห็นว่า กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงนั้นมีประสิทธิภาพสูงในการฆ่าแบคทีเรียที่ปนเปื้อนในน้ำได้เป็นอย่างดี

6) ใช้สำหรับสารให้สี อุตสาหกรรมสีที่เกี่ยวข้องมักใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นส่วนผสมของ สีทาบ้านด้วยสมบัติให้สารสีขาว สามารถดูดกลืน และหักเหช่วงแสงที่ตามนุษย์มองเห็นได้สูง ขนาดอนุภาคเล็ก มีความยืดหยุ่นสูง ทำให้ปกปิดรอยร้าว รอยตำหนิได้ดี และทนต่อสภาพความเป็นกรด-ด่าง ทนต่อแสง และความชื้น รวมถึงใช้เป็นส่วนผสมของสีสำหรับงานพิมพ์ งานศิลปะ เนื่องจากมีคุณสมบัติให้สีขาวสว่าง

7) ใช้เป็นสารเคลือบผลิตภัณฑ์ มักใช้เป็นสารเคลือบในอุตสาหกรรมต่างๆ อาทิ อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมแก้ว อุตสาหกรรมกระจก อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ การผลิตสุญญากาศ การผลิตเซรามิก อุตสาหกรรมโลหะสำหรับการเคลือบผิวโลหะ อุตสาหกรรมกระดาษสำหรับการเคลือบกระดาษเพื่อลดการทะลุผ่านของแสง ด้วยคุณสมบัติที่สามารถยึดเกาะ และเคลือบติดผิวได้ง่าย มีความทนทานต่อการกัดกร่อน รวมถึงคุณสมบัติที่กล่าวในข้างต้น นอกจากนี้ การใช้ไททาเนียมไดออกไซด์สำหรับเคลือบผิวผลิตภัณฑ์สามารถช่วยลดต้นทุนการผลิต และลดน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ได้อีกทาง

8) เป็นสารกึ่งตัวนำผลิตกระแสไฟฟ้า การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์นิยมใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นส่วนประกอบ ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า

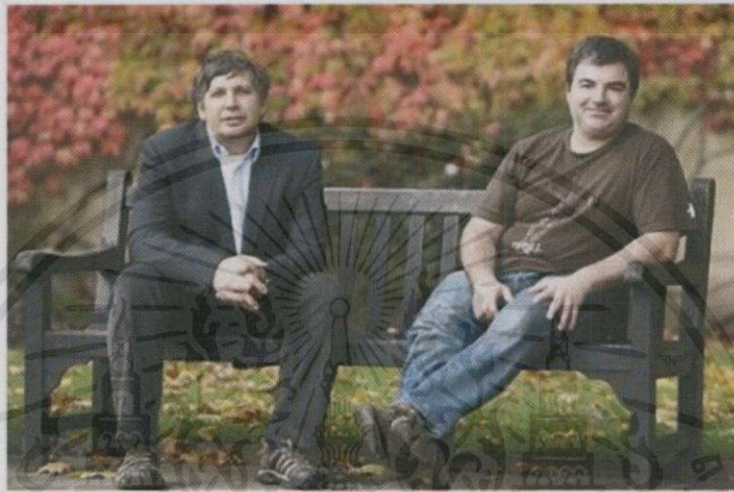
9) ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องกับวงจรไฟฟ้า มักใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้า ด้วยคุณสมบัติมีค่าคงที่ทางไฟฟ้า และค่าความต้านทานไฟฟ้าสูง

10) ใช้เป็นส่วนผสมในเครื่องสำอาง เครื่องสำอางบางยี่ห้อ มีการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นส่วนผสม สำหรับทำหน้าที่ให้ผิวงละเอียดยิ่งขึ้น มีคุณสมบัติทึบแสง สามารถสะท้อน และหักเหแสงได้สูง และสะท้อนรังสียูวีได้ดี ไม่เป็นอันตรายต่อผิว ผลิตภัณฑ์ที่พบใช้เป็นส่วนผสมมาก ได้แก่ ครีมบำรุงผิว ครีมกันแดด แป้งรองพื้น เป็นต้น[12]

2.3 กราฟีน (Graphene)

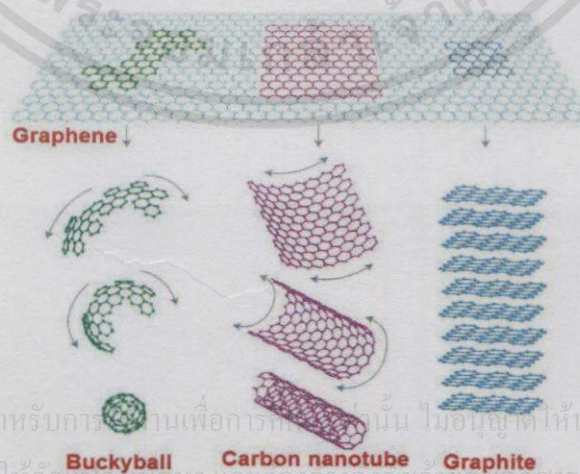
กราฟีน เกิดจากอะตอมคาร์บอนเรียงตัวกันเป็นรูปหกเหลี่ยม (hexagonal) คล้ายรังผึ้งบนระนาบเดียวกัน โดยมีความหนาเท่ากับความหนาของคาร์บอนเพียงอะตอมเดียว หรือประมาณ 0.34 นาโนเมตร และมีระยะห่างระหว่างอะตอมคาร์บอน 0.142 นาโนเมตร กราฟีนมีความแข็งแรงมาก น้ำหนักเบา โดยกราฟีนขนาด 1 ตารางเมตรมีน้ำหนักเพียง 0.77 มิลลิกรัม เกือบโปร่งใส และเป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าที่ดี เนื่องจากมีโครงสร้างที่เสถียร มีพื้นที่ผิวสูง ความสามารถในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนสูง มีสมบัติที่โดดเด่นเฉพาะตัว จึงมีการนำกราฟีนไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง

มีการศึกษาค้นคว้ากราฟีนหลายงานวิจัยและถูกค้นพบโดยอังเดรไกม์ (Andre Geim) และ คอนสแตนตินโนโวเซลอฟ (Konstantin Novoselov) (รูปที่ 2.8) อาจารย์และศิษย์จาก มหาวิทยาลัยแมนเชสเตอร์ (University of Manchester) สหราชอาณาจักรและราชบัณฑิตยสถานด้านวิทยาศาสตร์แห่งสวีเดน (The Royal Swedish Academy of Sciences) ประกาศให้ได้รับรางวัลโนเบล สาขาฟิสิกส์ ประจำปี 2010 กราฟีนจึงเป็นวัสดุที่น่าสนใจ และได้มีการพัฒนามาจนถึงปัจจุบัน



รูปที่ 2.8 อังเดรไกม์และคอนสแตนติน โนวเซลอฟ [13]

เมื่อนำกราฟีนมาห่อให้เป็นลูกกลมๆ เราจะได้ บัคกี้บอล (buckyball) ถ้าเอากราฟีนมาม้วนเป็นแท่งกลมๆ ก็จะได้ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube) และถ้าเอากราฟีนมาซ้อนกันเป็นชั้นๆ เราจะได้แกรไฟต์หรือกราไฟต์ (Graphite) ดังรูปที่ 2.9 แผ่นกราฟีนจะเชื่อมต่อกันเป็นชั้นๆ ด้วยแรงแรงแวนเดอร์วาลส์ จะสามารถแยกกราฟีนออกมาได้ต้องใช้ปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อให้พันธะที่เชื่อมต่อยกห่างกราฟีนอ่อนลง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่นับผูกพันให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแบบลงนอกราย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.9 โครงสร้างที่เกิดจากแผ่นกราฟีน [14]

2.3.1 สมบัติหลักของกราฟีน

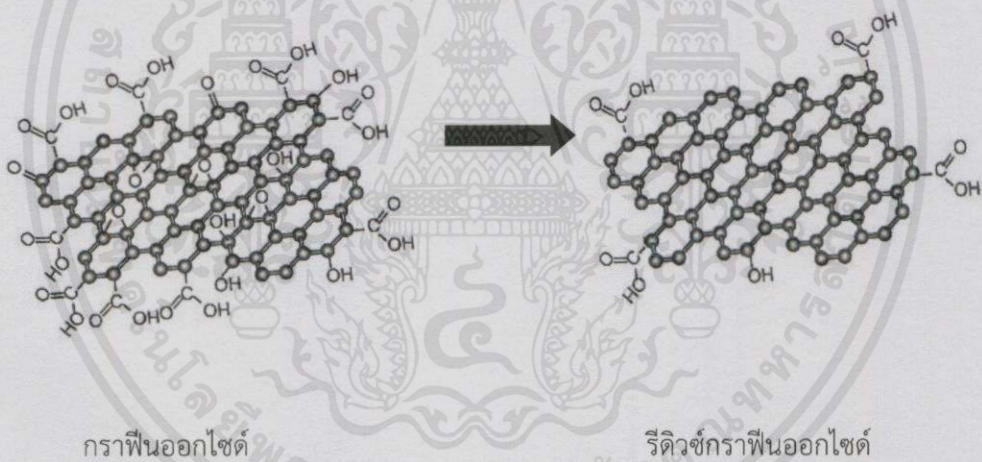
1) ความโปร่งแสง (Optical transparency) กราฟีนมีความโปร่งใสที่สามารถดูดซับแสงประมาณร้อยละ 2.3 ของความเข้มแสงทั้งหมดที่เป็นอิสระของความยาวคลื่นแสงในโดเมน (Domain)

2) สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) กราฟีนมีระดับความแข็งแรงอยู่ที่ 42 N/m แผ่นเหล็กกล้าที่มีความหนาเท่ากับแผ่นของ กราฟีน กราฟีนจะมีความแข็งแรงมากกว่าเหล็กกล้า 100 เท่า

3) การนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) กราฟีนมีค่าความสามารถในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนสูงมาก ทำให้สามารถสร้างทรานซิสเตอร์ที่ทำงานเร็วมากได้

4) การนำความร้อน (Thermal conductivity) กราฟีนมีค่าการนำความร้อนจำเพาะของสูงกว่าวัสดุประเภทอื่นๆ และยังสามารถนำความร้อนได้ดีกว่าเพชร ด้วยคุณสมบัตินี้เอง จึงมีการนำกราฟีนไปช่วยในระบบระบายความร้อนใน CPU

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วยไฮดราซีน [15] เพื่อกำจัดหมู่ไฮดรอกซิล หมู่คาร์บอนิล และหมู่ต่างๆในโครงสร้างของกราฟีนออกไซด์ ดังรูปที่ 2.10 เพื่อให้โครงสร้างมีความเสถียรมากยิ่งขึ้น โครงสร้างที่เสถียรของกราฟีนจะสามารถลดการเกิดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนและโฮลในการเกิดปฏิกิริยาดำเนินไปด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ได้[16]



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ [18]

2.4 กราไฟต์ (Graphite)

กราไฟต์ เป็นอัญรูปหนึ่งของธาตุคาร์บอน ชื่อสามัญเรียกว่า พลัมเบโก (Plumbago) หรือ แร่ดินสอดำ มีลักษณะเป็นของแข็ง มีรูปผลึกเป็นแผ่นบาง ๆ ทึบแสง อ่อนนุ่ม สีเทาเข้มถึงดำ เนื้ออ่อน มักใช้ทำไส้ดินสอดำ เบ้าหลอมโลหะ น้ำมันหล่อลื่นบางชนิด ไล้ถ่านไฟฉาย ไล้ไฟอาร์ก ใช้เป็นตัวลดความเร็ว ช่วยควบคุมจำนวนอนุภาคนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ถูกนำมาใช้เมื่อ 4 พันปีก่อนคริสตกาล ในงานทาสีตกแต่งเครื่องเซรามิกในทางตะวันออกเฉียงใต้ของยุโรป ได้มีการค้นพบแหล่งสะสมตัวของแร่กราไฟต์ขนาดใหญ่มากที่รัฐคัมเบรีย ประเทศอังกฤษ แร่ที่พบมีลักษณะบริสุทธิ์ไม่แข็ง แตกหักง่าย และมีรูปแบบการสะสมตัวอัดแน่นกัน มีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าหรือกึ่งตัวนำ

ไฟฟ้า กราไฟต์มีการจัดเรียงตัวแบบเสถียรที่สภาวะมาตรฐาน แต่บางครั้งแร่กราไฟต์เกิดจากถ่านหินเมื่อมีความร้อน ความดันสูงขั้นระดับหนึ่งซึ่งพบอยู่บนแอนทราไซต์ (Anthracite) และเมตา-แอนทราไซต์ (Meta-anthracite) ซึ่งโดยปกติแล้ว มักไม่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเพราะติดไฟยาก

2.4.1 ประเภทของกราไฟต์

- 1) แร่กราไฟต์ที่มีลักษณะเป็นแผ่นบาง สั้น ๆ หน้าแผ่นเป็นรูป 6 เหลี่ยม เมื่อแตกจะเป็นมุมที่ขอบ หรือมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ
- 2) กราไฟต์ที่มีลักษณะอสัณฐาน มีลักษณะเม็ดละเอียด เกิดในกระบวนการแปรสภาพของหินแปรของถ่านโดยความร้อนสูง เป็นขั้นสุดท้ายของการเกิดถ่านหิน บางครั้งเรียกว่าแอนทราไซต์ (Meta-anthracite)
- 3) กราไฟต์ที่มีลักษณะเป็นก้อนๆ บางครั้งอาจเรียกว่า สายแร่แกรไฟต์ เกิดขึ้นในช่องหรือรอยแตกเป็นเนื้อเดียวกัน มีลักษณะกลุ่มผลึกเส้นใยหรือรูเสี้ยนยาว มักเกิดในสายแร่ที่มีน้ำร้อน



รูปที่ 2.11 a) แร่กราไฟต์ b) ผงกราไฟต์ c) โครงสร้างของกราไฟต์ [19]

2.5 ประเภทของสีย้อม

การจำแนกสีย้อมที่นิยมจำแนกตามการนำไปใช้ เพราะจะต้องมีความคงทนการซัก มีความคงทนต่อแสงและยังต้องมีความคงทนต่อความร้อน ซึ่งในกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมได้จำแนกสีย้อมตามวิธีใช้ออกเป็น 11 ประเภท โดยที่สีย้อมแต่ละประเภทจะมีสูตรโครงสร้างทางเคมี สมบัติของสีย้อม ตลอดจนวิธีใช้ที่แตกต่างกันไป ซึ่งภายหลังจากการทำอุตสาหกรรมสีย้อมที่ก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำ จำเป็นต้องมีการกำจัดสีย้อมอย่างเป็นระบบ จึงต้องทราบประเภทสีย้อมเพื่อให้ง่ายต่อวิธีการกำจัด และเลือกใช้วิธีกำจัดที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุด

- 1) สีย้อมกรด (Acid dye) สีย้อมชนิดนี้เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ มีประจุลบ ละลายน้ำได้ดี ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน กลไกในการติดสีเกิดเป็นพันธะไอออนิก ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรดเจือจาง สีย้อมบางตัวสามารถนำไปใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์ได้เช่น ปอ ป่าน ไนลอน โยขนแกะ ไหม และอะคลริกได้ดี วิธีการใช้จะนำสีย้อมที่เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ไปละลายน้ำย้อมที่เป็นกรดหรือเป็นกลาง สีย้อมไม่ทนการซัก ไม่ทนเหงื่อ
- 2) สีย้อมตรง (Direct dye) หรืออาจเรียกว่าสีย้อมฝ้าย สีย้อมชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอะโซที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิคที่ทำให้ตัวสีสามารถละลายน้ำได้ มีประจุลบ นิยมใช้

ย้อมเส้นใยเซลลูโลส สีจะติดเส้นใยได้โดยโมเลกุลของสีจะจัดเรียงตัวแทรกอยู่ในระหว่างโมเลกุลเส้นใย และยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน สีไม่ทนต่อการซักน้ำ ตกง่าย ทนแสง

3) สีเบสิก (Basic or cationic dye) สีย้อมชนิดนี้เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ (Organic base) ให้ประจุบวก ละลายน้ำได้ นิยมใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ไนลอนและใยอะคริลิกได้ดี ในขณะที่ย้อมโมเลกุลของสีส่วนที่มีประจุลบจะยึดจับกับโมเลกุลของเส้นใย เป็นสีที่ติดทน ไม่ควรใช้ย้อมเส้นใยธรรมชาติเพราะจะไม่ทนการซักและแสง

4) สีดีสเพอร์ส (Disperse dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำแต่มีสมบัติกระจายได้ดี สามารถย้อมเส้นใยอะซิเตท เส้นใยโพลีเอสเตอร์ ไนลอน และอะคริลิกได้ดี การย้อมจะใช้สารพา (Carrier) เพื่อช่วยเร่งอัตราการดูดซึมของสีเข้าไปในเส้นใยหรือย้อมโดยใช้อุณหภูมิ และความดันสูง สีดีสเพอร์สเป็นสีที่ทนแสงและการซักฟอกค่อนข้างดี แต่สีจะซีดถ้าถูกควันทหรือแก๊สบางชนิด เช่น แก๊สไนโตรสออกไซด์ สีดีสเพอร์สแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม โดยพิจารณาจากกลุ่มเคมีในตัวสีย้อม ได้แก่ สีย้อมอะโซ (Azo dyes) และสีย้อมแอมมิโน แอนทราควิโนน (Amino anthraquinone) ซึ่งทั้ง 2 กลุ่ม ประกอบด้วยอนุพันธ์ของเอทานอลามีน (Ethanotamine; $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}$) หรืออนุพันธ์ที่คล้ายคลึงกัน

5) สีรีแอกทีฟ (Reactive dye) เป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบ เมื่ออยู่ในน้ำจะมีสมบัติเป็นต่าง สีย้อมชนิดนี้เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด โมเลกุลของสีจะยึดจับกับหมู่ ไฮดรอกไซด์ (OH) ของเซลลูโลสและเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ในสถานะที่เป็นต่าง กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส สีรีแอกทีฟมี 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง $70-75^\circ\text{C}$ และกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิต่ำ สีรีแอกทีฟให้สีที่สดใส ทุกสีติดทนในทุกสภาวะ

6) สีอะโซอิก (Azoic dye) สีย้อมชนิดนี้ไม่สามารถละลายน้ำได้ การที่สีจะก่อรูปเป็นเส้นใยได้ต้องย้อมด้วยสารประกอบฟีนอลซึ่งละลายน้ำได้ก่อน ซึ่งเป็นกระบวนการทำให้รวมตัวเป็นสี (coupling) แล้วย้อมทับด้วยสารไดอะโซคอมโพเนนท์จึงจะเกิดเป็นสีได้ สีอะโซอิกใช้ย้อมเส้นใยได้ทั้งเซลลูโลส ไนลอน หรืออะซิเตท สีอะโซอิกเป็นสีที่ทนต่อการซัก แต่ไม่ทนต่อการขัดถู

7) สีแว็ต (Vat dye) เป็นสีที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ เมื่อทำการย้อมต้องเตรียมน้ำย้อมให้สีแว็ตละลายน้ำโดยให้ทำปฏิกิริยากับสารรีดิวซ์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ สีแว็ตจะถูกรีดิวซ์ให้กลายเป็นเกลือจึงซึมเข้าไปในเส้นใยได้ เมื่อนำผ้าไปผึ่งในอากาศสีในเส้นใยจะถูกออกซิไดส์เป็นสีแว็ต สีย้อมชนิดนี้มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญอยู่ 2 ชนิด คือ สีอินดิโก (Indigoid) และสีแอนทราควิโนอยด์ (Anthraquinoid)

8) สีเมอร์แดนท์ หรือโครม (Mordant or chrome dye) สีย้อมชนิดนี้ต้องใช้สารช่วยติดเข้าไปช่วยเพื่อให้เกิดการติดสีบนเส้นใย สารที่ช่วยติดที่ใช้คือ สารประกอบออกไซด์ของโลหะ เช่น โครเมียม ดีบุก เหล็ก อะลูมิเนียม เป็นต้น สีเมอร์แดนท์เป็นสีที่มีโมเลกุลใหญ่ซึ่งเกิดจากสีเมอร์แดนท์หลายโมเลกุลจับกับโลหะแล้วละลายน้ำได้จึงทำให้ย้อมได้ง่าย ซึ่งใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนและเส้นใยพอลิเอไมด์ได้ดี

9) สีอินเกรน เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ โดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยากับน้ำ สีย้อมชนิดนี้ใช้สำหรับย้อมผ้า

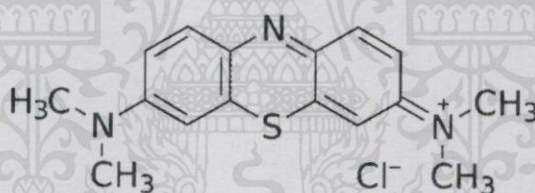
10) สีออกซิเดชัน (Oxidation dye) เป็นสีที่มีละลายน้ำโดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยาในน้ำโดยสีจะติดแน่น อาศัยปฏิกิริยาการตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย ใช้สำหรับย้อมผ้าและขนสัตว์

11) สีซัลเฟอร์ (Sulfer dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ เมื่อทำการย้อมต้องรีดิวซ์เพื่อให้โมเลกุลอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้ แต่สีซัลเฟอร์บางชนิดที่ผลิออกมาจำหน่ายในรูปที่ถูกรีดิวซ์จะละลายน้ำได้นิยมนำสีซัลเฟอร์มาย้อมผ้าฝ้าย สีจะติดทน และยังเป็นสีที่มีราคาถูก แต่สีที่อ่อนจะไม่ทนต่อการซัก [20]

2.6 เมทิลีนบลู (Methylene blue)

เมทิลีนบลู (3,7-bis (Dimethylamino)-phenothiazin-5-ium chloride) เป็นสีประเภทเบสิก (Basic or Cationic Dye) ซึ่งมีไอออนบวกเป็นตัวให้สี สีย้อมชนิดนี้เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ (Organic Base) แตกตัวให้ประจุลบ ละลายน้ำได้ มีค่าการดูดกลืนแสงที่ประมาณ 670 nm มีโครงสร้างโมเลกุลเป็น $C_{16}H_{18}N_3S^+Cl^-$ มีลักษณะเป็น Heterocyclic มีจุดเดือดอยู่ที่ $100-110^{\circ}C$ มีน้ำหนักโมเลกุล 319.85 g/mol นิยมใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ไนลอนและใยอะคริลิกได้ดี ในขณะที่ย้อมโมเลกุลของสีส่วนที่มีประจุลบจะยึดจับกับโมเลกุลของเส้นใย เป็นสีที่ติดทน ไม่ควรใช้ย้อมเส้นใยธรรมชาติเพราะจะไม่ทนการซัก และแสง บางที่จะเรียกสีย้อมชนิดนี้ว่าสีแคดไอออน ส่วนไอออนบวกของสีจะจับกับไอออนลบของกรดนิวคลีอิก โดยจับกันด้วยพันธะหลายชนิด เช่น พันธะไอออนิก พันธะไฮโดรเจน และแรงแวนเดอร์วาลส์ [21]

ในงานวิจัยนี้ได้นำตัวเร่งปฏิกิริยาสมโทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เตรียมได้มาศึกษาความสามารถในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู โดยใช้ความเข้มข้น $2.5 \times 10^{-5} M$

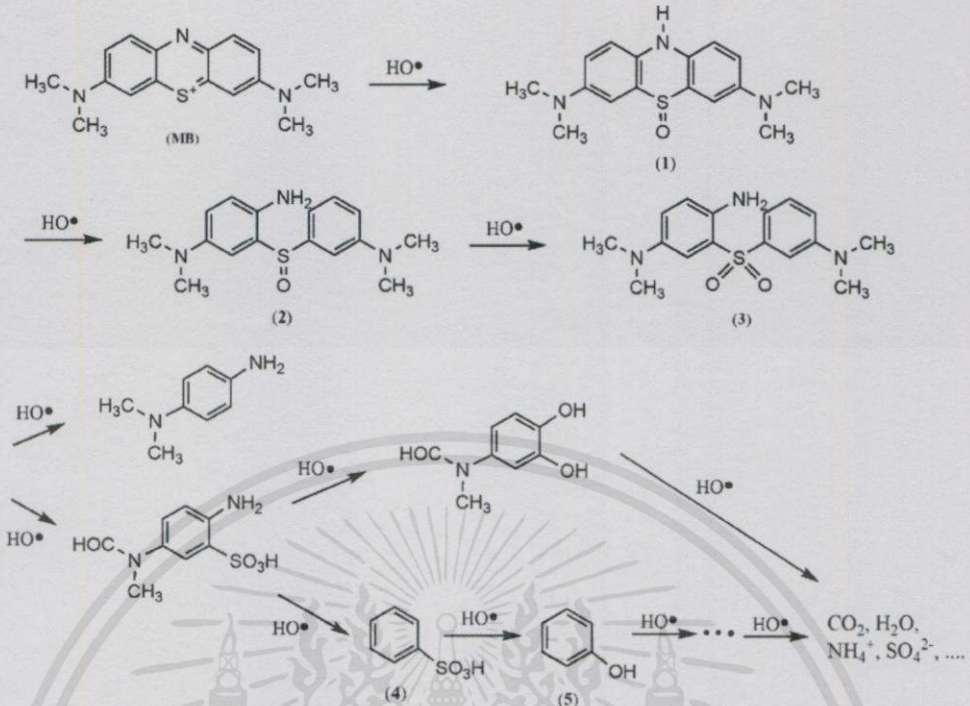


รูปที่ 2.12 โครงสร้างโมเลกุลของเมทิลีนบลู [22]

2.6.1 กลไกการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู

กลไกการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู เป็นไปตามลำดับดังนี้ เริ่มจากไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH°) ที่เกิดจากกระบวนการโฟโตคะตะไลติก เข้าไปทำปฏิกิริยากับโครงสร้างโมเลกุลของสีย้อมเมทิลีนบลู เป็นหมู่ซัลฟอกไซด์ (Sulfoxide) ซัลฟอน (Sulfone) และจากนั้นก็ทำการเปิดวงอะโรมาติกที่ N-heteroatom เป็นอะนิลีน (Aniline) ตามโครงสร้างโมเลกุลที่ (1) (3) และ (2) ตามลำดับ จากนั้นไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH°) จะเกิดปฏิกิริยาอย่างรุนแรง ทำให้เกิดการแยกกันของวงอะโรมาติกขึ้นเป็น 2 วง เป็นโมเลกุลของกรดซัลโฟนิก (sulfonic acid) และฟีนอล ตามโครงสร้างโมเลกุลที่ (4) และ (5) และในที่สุดโมเลกุลเหล่านี้ก็จะถูกออกซิไดซ์ไปอย่างง่ายดาย เกิดเป็นโมเลกุลหรือไอออนขนาดเล็ก เช่น H_2O , CO_2 , NH_4^+ และ SO_4^{2-} เป็นต้น [23] ดังแสดงในรูปที่ 2.13

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 กลไกการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู. [23]

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Chao Chen และคณะ [24] ได้ทำการศึกษาศักยภาพการเตรียมสารประกอบนาโนกราฟีนออกไซด์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (GOT) โดยใช้กราฟีนออกไซด์ (GO) 1.3 กรัมต่อลิตร และโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต (SDS) 0.05 โมลต่อลิตร และเจือจางด้วยน้ำ จากนั้นใส่ไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ (TiCl₃) 0.12 โมลต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร โซเดียมซัลเฟต (Na₂SO₄) 0.6 โมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร และ (H₂O₂) 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ปั่นกวนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง และเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส โดยปริมาณของ GO:SDS:H₂O (mL) คือ 1.85:0.11:71.88 (GOT-A), 3.7:0.22:69.92 (GOT-B), 7.4:0.44:66 (GOT-C), 18.5:1.10:54.24 (GOT-D) และ 37:2.20:34.64 (GOT-E) นำไปศึกษาการย่อยสลายสีย้อมเมทิลลอรันจ์ ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล จากการทดลอง พบว่าประสิทธิภาพการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของ GOT-E > GOT-D > GOT-C > GOT-B > GOT-A > P25 เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่ตอบสนองต่อแสงวิสิเบิล จึงมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมได้ไม่ดี การเติมกราฟีนออกไซด์จึงเป็นตัวช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ในช่วงแสงวิสิเบิล จึงทำให้ GOT-E มีปริมาณกราฟีนออกไซด์ที่เหมาะสมที่สุดจึงสามารถย่อยสลายสีย้อมเมทิลลอรันจ์ได้ดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับงานวิจัยของภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

Feng Wang และคณะ [25] ได้ทำการศึกษาศักยภาพการเตรียมสารประกอบบริดจ์กราฟีนออกไซด์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (RGO-TiO₂) จากปฏิกิริยาทางความร้อน โดยการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศที่เป็นอาร์กอน ใช้อัตราส่วนระหว่างรีดิวซ์กราฟีน

ออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ 1:100, 1:40, 1:20, 1:10 และ 1:3 เปอร์เซ็นโดยน้ำหนัก เมื่อนำไปศึกษาการย่อยสลายสีย้อมโรดาไมน์ บี ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก ภายใต้การฉายแสงยูวีและแสงวิสิเบิล จากการทดลองพบว่า RGO-TiO₂ (1:20) สามารถย่อยสลายสีย้อมได้ดีที่สุด ซึ่งพิจารณาจากอัตราส่วนของกราฟีนที่ใส่ลงไป หากมีปริมาณของกราฟีนมากจะทำให้บดบังไทเทเนียมไดออกไซด์ในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก ทำให้ประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง

Ju Hu และคณะ ศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์เส้นลวดนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์กับสารประกอบรีดิวซ์ กราฟีนออกไซด์ (TiO₂ -RGO) โดยวิธีการปรับปรุงจากวิธีไฮโดรเทอร์มอลด้วยเจือสารลดแรงตึงผิว Cetyl Trimethyl Ammonium Bromide, CTAB) แล้วพิสูจน์เอกลักษณ์ของโครงสร้างผลึก แสดงให้เห็นว่าส่วนใหญ่กราฟีนออกไซด์ได้ถูกรีดิวซ์ให้อยู่ในรูปแบบของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในระหว่างการรักษาความร้อนขึ้น และพบว่าเส้นลวดนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์มีการเกาะตัวเกิดขึ้นบนพื้นผิวของชั้นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์แล้วนำมาทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเทียบระหว่าง TiO₂ -RGO ที่ไม่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว(CTAB) และ TiO₂/RGO-C ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว พบว่ารีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในสารประกอบTiO₂/RGO-C เกิดเป็นชั้นที่มีพื้นผิวเรียกว่าและสารประกอบเส้นลวดนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์อยู่นานกว่าเส้นนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการเดียวกัน นอกจากนี้ยังมีพิสูจน์ได้อีกว่าเส้นลวดนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์มีแนวโน้มที่จะยาวหลายไมโครเมตร เมื่อเทียบกับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และลวดนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และสารประกอบ TiO₂ -RGO ส่วนผลของปฏิกิริยากระตุ้นด้วยแสงนั้นพบว่าประสิทธิภาพสูงขึ้น เป็นผลมาจากรวมกันระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์โดยสารประกอบ TiO₂ -RGO ที่มีอัตราการเพิ่มประสิทธิภาพของมวล TiO₂ ต่อ RGO เป็น 0.6 มีประสิทธิภาพดีที่สุด

Tamas Szabo และคณะ [27] ได้ทำการศึกษาทดลองเกี่ยวกับการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง โดยอาศัยการกระจายตัวในน้ำ ซึ่งจะใช้สารประกอบนาโนกราฟีนออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยมีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ ที่ใช้ปริมาณกราฟีนออกไซด์ 1-10 เปอร์เซ็นโดยน้ำหนัก และไทเทเนียมไดออกไซด์ 90-99 เปอร์เซ็นโดยน้ำหนัก โดยกระจายกราฟีนออกไซด์ในน้ำ 1.6 ลิตร ปรับ pH เป็น 8.5 (+/-0.3) หมุนเหวี่ยง 15 นาที และเก็บไว้ในที่มืด 1 วัน แล้วนำไปผสมกับสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ปรับ pH เป็น 5 ทิ้งไว้ให้ตกตะกอน แล้วนำไปกรองแบบลดความดัน จากนั้นไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จากการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า กราฟีนออกไซด์จะมีการแยกตัวออกจากไทเทเนียมไดออกไซด์มาเกาะกลุ่มกันเอง ซึ่งมีการยึดเกาะกันด้วยแรงแรงแวนเดอร์วาลส์ สามารถยึดเกาะกันได้สูงกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ และจากการศึกษาของการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในการกำจัดฟินอล TiO₂-GO ที่มี GO ที่กระจายตัวอยู่ใน TiO₂ ไม่เกิน 2 เปอร์เซ็นโดยน้ำหนักจะสามารถกำจัดฟินอลได้ดี

Yong Gao และคณะ [28] ทำการศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงพื้นผิวเมมเบรน ด้วยการใส่ไทเทเนียมไดออกไซด์ กราฟีนออกไซด์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยากระตุ้นด้วยแสง โดยใช้คุณสมบัติของกราฟีนออกไซด์ที่สามารถช่วยขยายช่วงการดูดกลืนแสง จากเดิมที่ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นคะตะลิสต์ที่จะถูกกระตุ้นในกระบวนการกระตุ้นด้วยแสงภายใต้รังสียูวีเท่านั้น ทำให้สามารถถูกกระตุ้นภายใต้แสงวิสิเบิล ซึ่งการเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ ใช้วิธี layer-by-layer โดยใช้โพลีซัลโฟน (Polysulfone) เป็นฐานเมมเบรน แล้วทำการกระจายตัว

ไทเทเนียมไดออกไซด์ ก่อนลงกราฟีนออกไซด์ทับถมไป วิเคราะห์พื้นผิวขณะทำการเตรียมตัวอย่าง โดยเทคนิค QCM-D และตรวจดูพื้นผิวด้วยเทคนิค SEM จากนั้นทำการศึกษาประสิทธิภาพของ เมมเบรนที่ผ่านการปรับปรุงแล้ว โดยตรวจสอบอัตราการไหลผ่านของสารละลาย และทดสอบ ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมโดยใช้เมทิลีนบลู พบว่าเมมเบรนที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วย ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์นั้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมและเพิ่มปฏิกิริยากระตุ้น ด้วยแสง อีกทั้งยังเพิ่มอัตราการไหลผ่านของสารละลายให้ดีขึ้น 3-4 เท่า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

- 1) กราฟีนออกไซด์ (Graphene oxide)
- 2) ไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดเชิงการค้า (TiO₂ Degussa P25, anatate 80%, rutile 20%)
- 3) ไฮดราซีน (Hydrazine, N₂H₂)
- 4) แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide, NH₄OH)
- 5) กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (conc. HCl)
- 6) สารละลายเมทิลีนบลู (Methylene blue, C₁₆H₁₈N₃SCl, MW = 319.85 g/mol)

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 1) เครื่องแก้ว
- 2) เครื่องชั่งความละเอียด 4 ตำแหน่ง
- 3) เครื่องปั่นกวนแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)
- 4) เครื่องกรองแบบลดความดัน (Ultrafiltration)
- 5) กระดาษกรอง
- 6) ไมโครปิเปต (Micro pipett)
- 7) เครื่องวัดพีเอช (pH meter)
- 8) เตาอบ
- 9) เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centifuge)
- 10) ตู้ทำปฏิกิริยาโพโตคะตะไลติก (1m x 1m x 1m)
- 11) เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)
- 12) เครื่องวิเคราะห์สารด้วยระบบอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR)
- 13) เครื่องวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบของสาร (Raman Spectrometer)
- 14) เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงในสถานะของแข็ง(UV-VIS Diffuse reflectance Spectrometer, UV-VIS DRS)
- 15) เครื่องวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบของสารโดยการเปล่งแสง (Photoluminescence Spectrometer, PL)
- 16) เครื่องวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิวของสาร (Surface area and porosity analyzer, BET)
- 17) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)
- 18) เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Visible spectrophotometer)
- 19) หลอดฟลูออเรสเซนซ์ แบล็คไลท์ ขนาด 18 วัตต์ 5 หลอด
- 20) หลอดฟลูออเรสเซนซ์ เดย์ไลท์ ขนาด 18 วัตต์ 5 หลอด

3.3 การเตรียมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ การเตรียมสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ และการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทีลีนบลู

รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ เตรียมได้จากสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์โดยวิธีการสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อนอย่างง่าย โดยการเติมไฮดราซีน (Hydrazine) เป็นตัวรีดิวซ์และสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide) เป็นตัวคงเสถียรภาพ ส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้เป็นสารแขวนลอยในน้ำ 2000 มิลลิกรัม โดยใช้ปริมาณของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ 2.5, 5.0, 7.5 และ 10.0 มิลลิกรัม

3.3.1 การเตรียมกราฟีนออกไซด์ด้วยวิธีการปรับปรุงวิธีของฮัมเมอร์

การเตรียมกราฟีนออกไซด์ด้วยวิธีการปรับปรุงวิธีของฮัมเมอร์ [29] โดยมีวิธีการเตรียมดังนี้

ชั่งผงกราฟีนมา 2 กรัม และโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4) 6 กรัม เติลงในขวดก้นกลม พร้อมกับทำการบั่นกวนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน

นำขวดก้นกลมไปวางไว้ในถังน้ำแข็งที่มีอุณหภูมิ 0-3 องศาเซลเซียส

ค่อยๆเติมสารละลายกรด (ซัลฟิวริก 3 ส่วน: ไนตริก 1 ส่วน) 48 มิลลิลิตร ภายใต้การบั่นกวนเบาๆ เป็นเวลา 20 นาที (ได้สารที่มีลักษณะเป็นโคลนสีน้ำตาลดำ)

ยกขวดก้นกลมออกจากถังน้ำแข็ง จากนั้นทำการบั่นกวนที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

นำขวดก้นกลมไปตั้งไว้ในถังน้ำแข็งอีกครั้ง จากนั้นค่อยๆ เติมน้ำกลั่นลงในขวดก้นกลมจำนวน 192 มิลลิลิตร ภายใต้การบั่นกวน แล้วทำการบั่นกวนทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ทำการล้างตะกอนด้วยวิธีการหมุนเหวี่ยง ทั้งสารละลาย และเติมน้ำกลั่นเข้าไปเรื่อยๆ จนเมื่อตรวจสอบสารละลายที่ได้มี pH เท่ากับ 7

ทำการกรองตะกอน ล้างตะกอนด้วยอะซิโตนจำนวน 5 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทำการบดตะกอนให้ละเอียด ก็จะได้ผงกราฟีนออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้อัปโหลดขึ้นทวิตเตอร์ และส่งข้อมูลถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การเตรียมกราฟีนออกไซด์ด้วยวิธีการใช้คลื่นความถี่สูง (Ultrasonic)

การเตรียมกราฟีนออกไซด์ตามวิธีของ ซินหลง [30] ด้วยวิธีการใช้คลื่นความถี่สูงโดยมีวิธีการเตรียมดังต่อไปนี้

ชั่งผงกราฟีนออกไซด์มา 300 มิลลิกรัม จากนั้นเทลงไปในหลอดเซนตริฟิวส์ ขนาด 50 มิลลิลิตร

เติมน้ำกลั่นลงไป 30 มิลลิลิตร แล้วนำไปวางไว้ในตู้อัลตราโซนิก ทำการ sonicated เป็นเวลา 1.30 ชั่วโมง

นำสารแขวนลอยที่ได้ไปทำการหมุนเหวี่ยง เพื่อแยกสารละลายออกจากผง กราฟีนที่ขังเหลืออยู่ เป็นเวลา 30 นาที

รินสารละลายออกจากหลอดเซนตริฟิวส์ก็จะได้สารละลายกราฟีนออกไซด์ ซึ่งมีสีน้ำตาลเข้ม

3.3.3 การเตรียมสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์

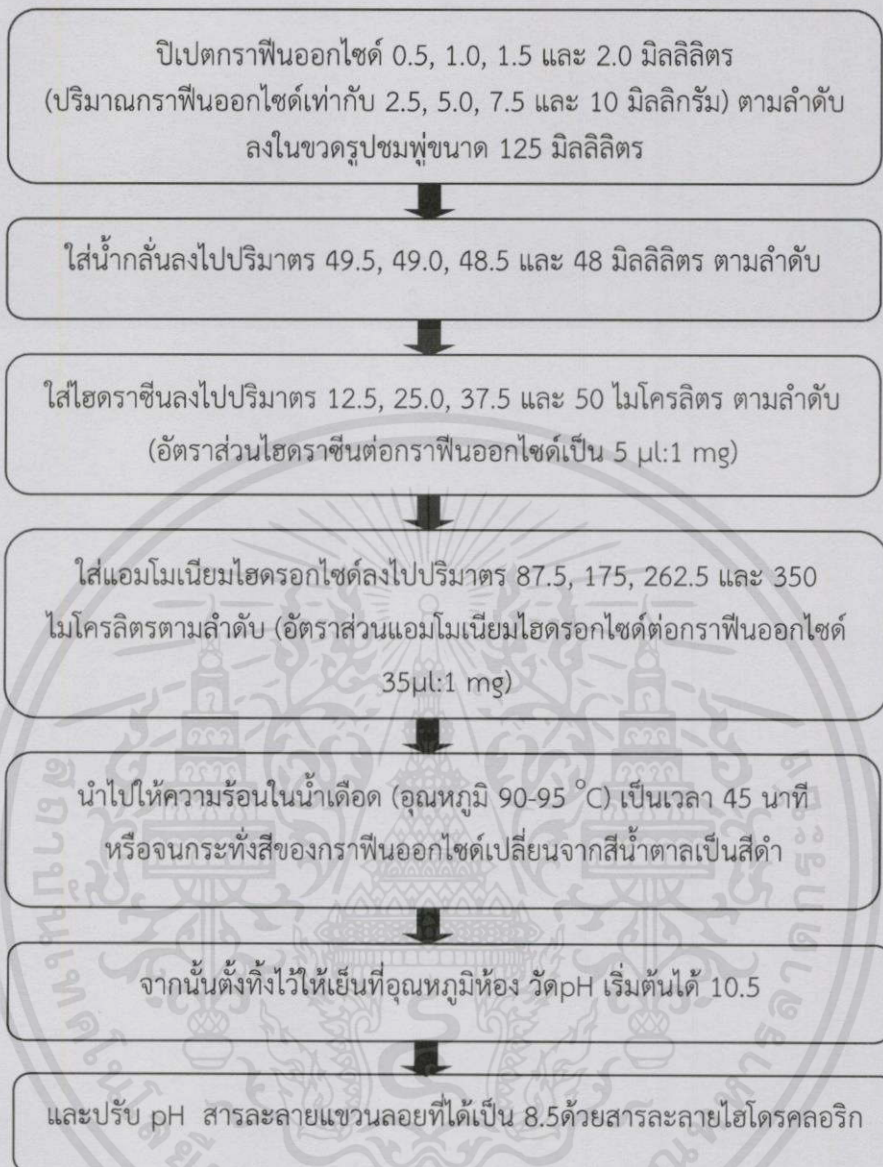
ชั่งไทเทเนียมไดออกไซด์ 2,000 มิลลิกรัม เติมน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร ปั่นกวนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ได้สารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ วัด pH เริ่มต้นได้ 6.5

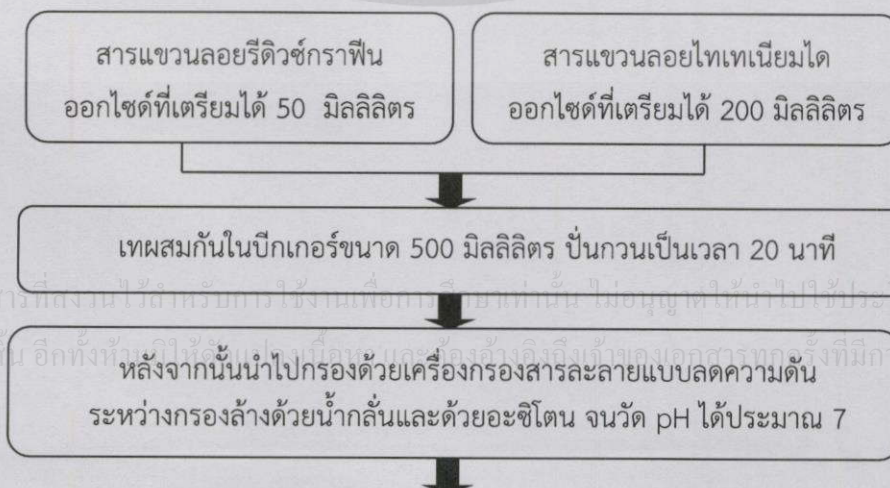
จากนั้นปรับ pH เป็น 5 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก

3.3.4 การเตรียมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

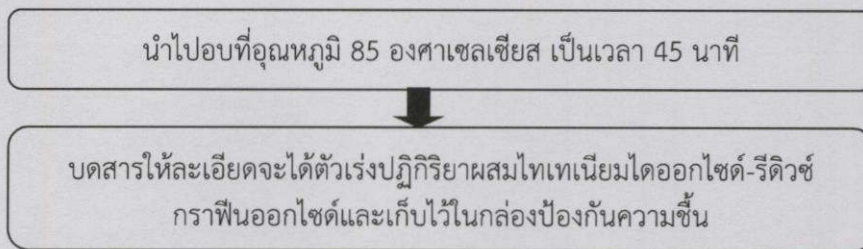
ในขั้นตอนการเตรียมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นี้ จะใช้ไฮดราซีนซึ่งเป็นตัวรีดิวซ์ โดยจะใช้ อัตราส่วนไฮดราซีน 5 ไมโครลิตร ต่อกราฟีนออกไซด์ 1 มิลลิกรัม และใส่สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ผสมลงไปด้วย ในอัตราส่วนแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 35 ไมโครลิตร ต่อกราฟีนออกไซด์ 1 มิลลิกรัม โดยมีรายละเอียดการทดลองดังต่อไปนี้ [31]



3.3.5 การเตรียมสารผสมระหว่างสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์



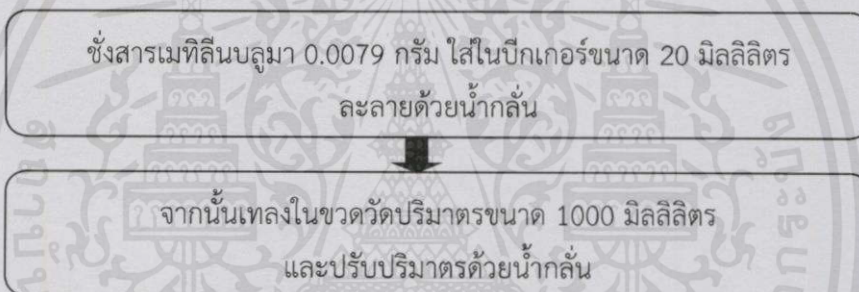
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำไปเผยแพร่หรืออ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



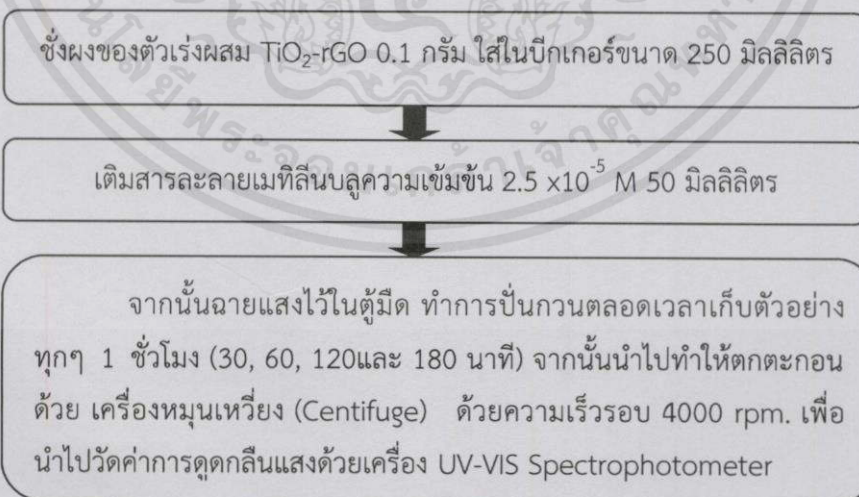
3.3.6 การทดสอบการกำจัดสีย้อม

ศึกษาประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของตัวเร่งปฏิกิริยาผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ภายใต้ความมืด แสงยูวี-วีลิตเบิล แสงยูวี และแสงอาทิตย์ เปรียบเทียบกับไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยใช้ทดสอบสีย้อมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 2.5×10^{-5} M

3.3.6.1 เตรียมสารละลายเมทิลีนบลู ที่ความเข้มข้น 2.5×10^{-5} M

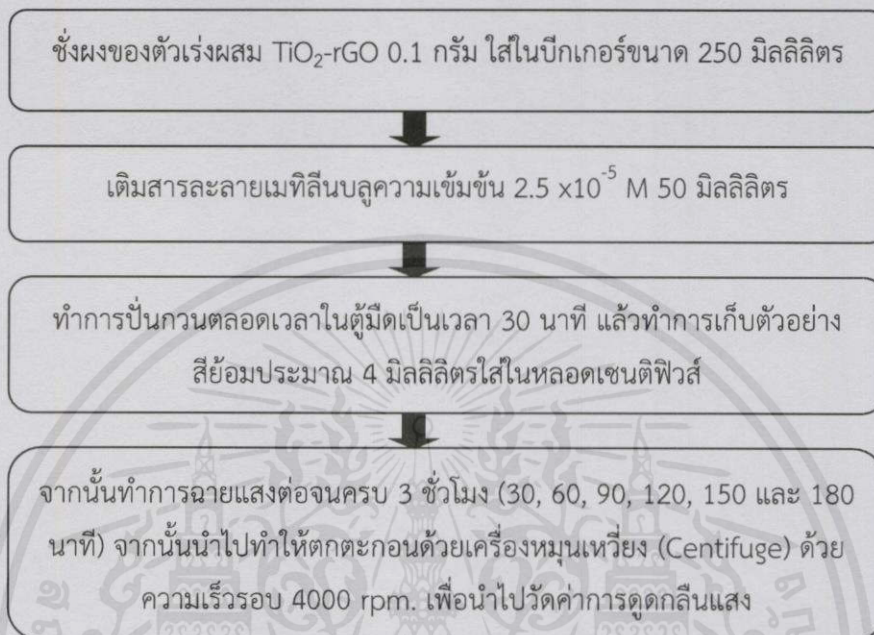


3.3.6.2 ทดสอบการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู ภายใต้ความมืด

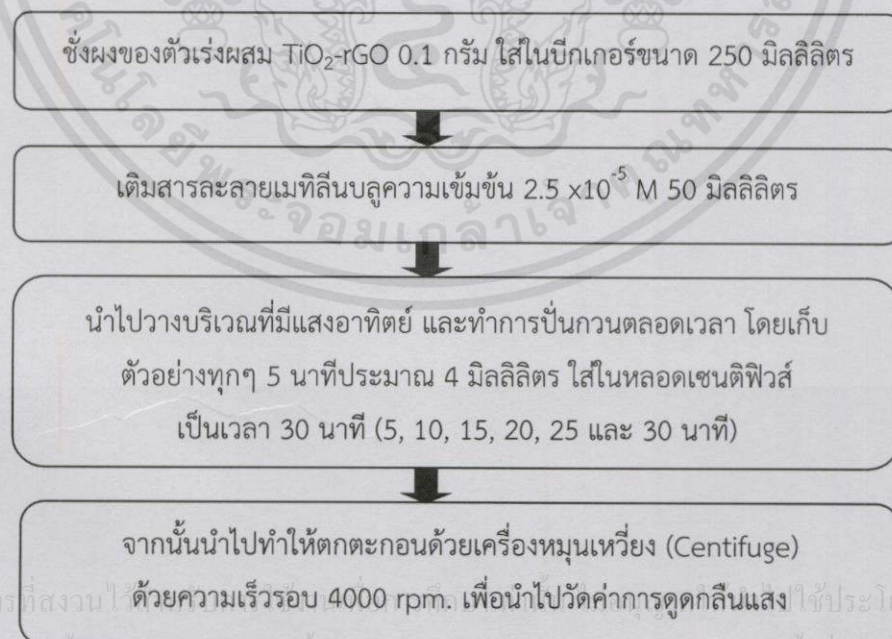


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.6.3 ทดสอบการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในการกำจัดสี้อมเมทิลีนบลู ภายใต้แสงยูวี และแสงยูวี-วีลิตเปิล



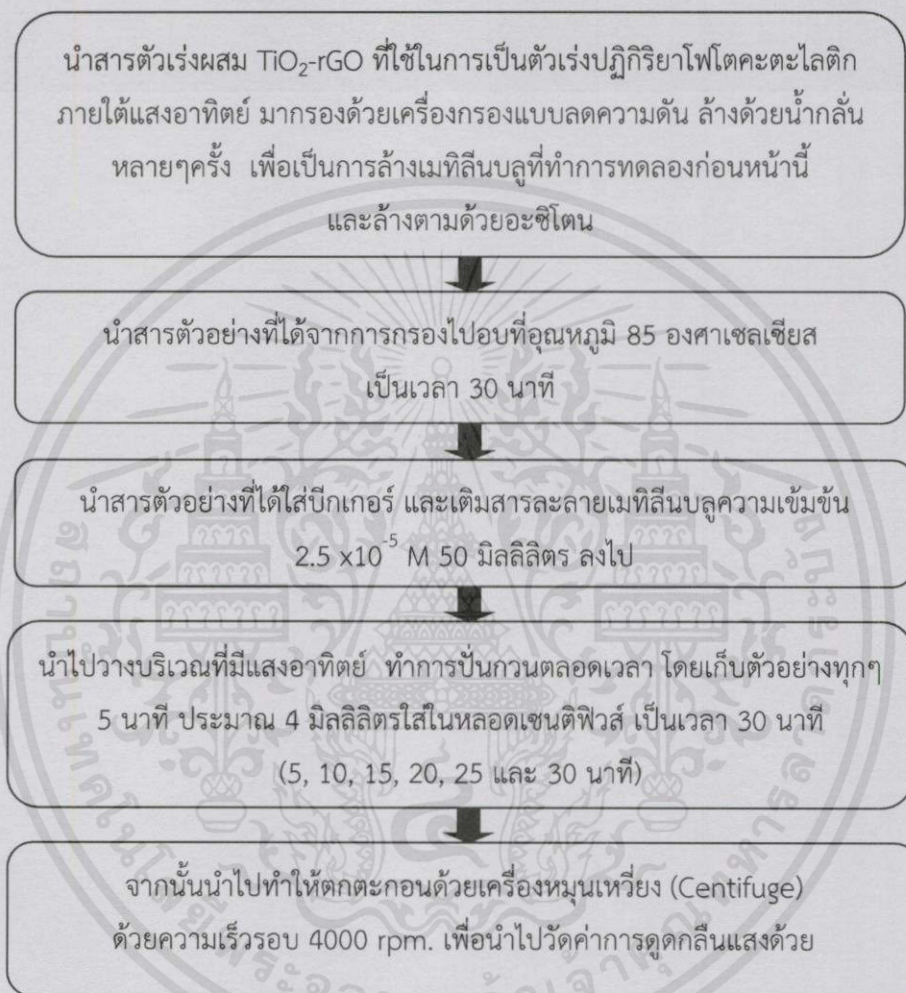
3.3.6.4 ทดสอบการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในการกำจัดสี้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอาทิตย์ (ช่วง 11.00-12.00 น.)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ด้วยความเร็วรอบ 4000 rpm. เพื่อนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามแก้ไขคัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.7 ทดสอบความสามารถในการใช้ซ้ำ

ศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ โดยการนำกลับมาใช้ใหม่ และเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมในแต่ละครั้ง โดยศึกษาภายใต้แสงอาทิตย์กำจัดสีย้อมเมทิลินบลูความเข้มข้น 2.5×10^{-5} M

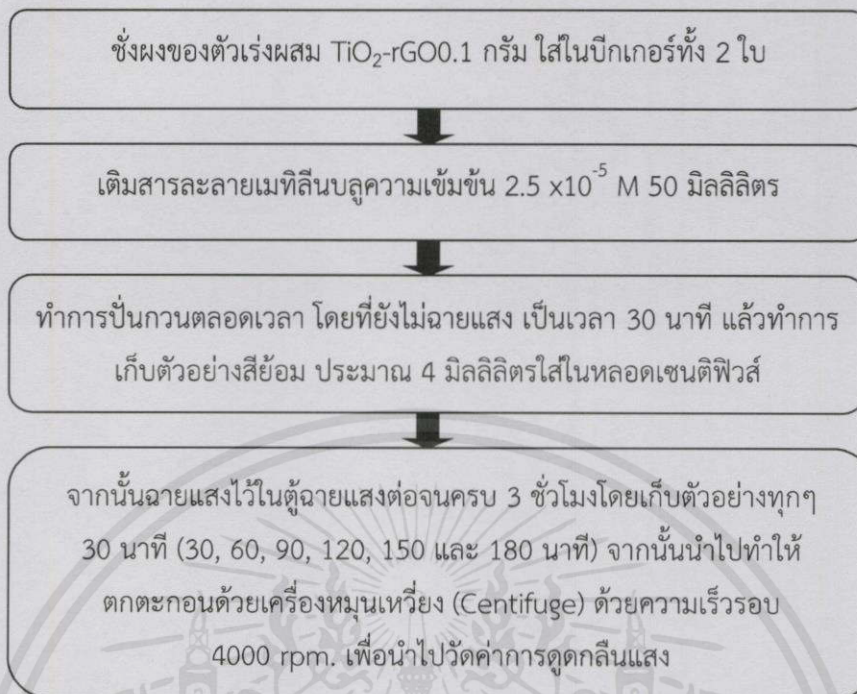


3.3.8 เปรียบเทียบการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลูที่มีค่าพีเอชที่แตกต่างกันระหว่างพีเอช3 และพีเอช10

ศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลูที่มีค่าพีเอชที่แตกต่างกัน โดยทำการทดลองภายใต้แสงยูวี-วิสิเบิล และเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม

บีกเกอร์ที่ 1 ปรับพีเอชของเมทิลินบลู เป็น 3 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก

บีกเกอร์ที่ 2 ปรับพีเอชของเมทิลินบลู เป็น 10 ด้วยแอมโมเนีย



3.4 เครื่องมือที่ใช้พิสูจน์เอกลักษณ์ของสารตัวอย่างในการทดลอง

3.4.1 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)

เครื่อง XRD เป็นเครื่องมือวิเคราะห์เลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในผลึกของตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการของ Bragg's law ในการคำนวณค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ยังผ่านชั้นผลึกที่อยู่ในตัวอย่าง ดังสมการที่ 3.1

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

โดยจะใช้ Detector รับความเข้มของรังสีเอกซ์ ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนในมุมต่างๆ ของสารทดสอบ เป็นเทคนิคที่มีการใช้กันแพร่หลายในการวิเคราะห์วัสดุต่างๆ โดยสามารถใช้ในการวิเคราะห์ทดสอบชนิดปริมาณคุณภาพของสารประกอบแบบผลึกต่างๆในชิ้นงานได้ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เมื่อรังสีตกกระทบวัตถุหรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของรังสีสะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของรังสีตกกระทบ ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบและแร่สามารถแยกแยะประเภทและชนิดของวัสดุที่พบในธรรมชาติว่ามีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบใดหรือจำแนกได้ว่าวัสดุที่พบเห็นนั้นเป็นธาตุชนิดใด โดยทำการวัดค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่างๆเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัด เครื่อง XRD สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งในรูปแบบของแข็งหรือตัวอย่างที่เป็นผงได้ โดยนำเทคนิคนี้มาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 เครื่องวิเคราะห์สารด้วยระบบอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างของสารโดยการวัดการดูดกลืนรังสีที่อยู่ในช่วงอินฟราเรดช่วงเลขคลื่น (Wave number) ประมาณ $12800-10\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้ง ของแข็ง ของเหลว และก๊าซรังสีอินฟราเรด (Infrared radiation) เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า แต่ให้ความร้อนที่สัมผัสได้ รังสีอินฟราเรดอยู่ระหว่างช่วง Visible radiation กับ Microwave radiation ช่วงของรังสีอินฟราเรดที่ใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ทางเคมี ได้แก่ ช่วง Middle IR เนื่องจากรังสีอินฟราเรดมีพลังงานค่อนข้างต่ำ เมื่อโมเลกุลของสารดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเข้าไปจะทำให้พันธะในโมเลกุลเกิดการสั่นและการหมุน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุล การที่โมเลกุลจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้นั้น ความถี่ของรังสีอินฟราเรดต้องเท่ากับความถี่การสั่นของโมเลกุลของสารนั้นๆ ซึ่งสารอินทรีย์แต่ละชนิดจะมีค่าความถี่ของการสั่นที่จำเพาะและแตกต่างกันไปทำให้สามารถนำเทคนิคนี้มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างและชนิดของสารอินทรีย์ได้ จึงนำมาใช้ศึกษาอันตรกิริยาของไทเทเนียมไดออกไซด์ และตัวเร่งปฏิกิริยาผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

3.4.3 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของสาร (Raman Spectrometer)

เป็นปรากฏการณ์ในการกระเจิงของแสงรูปแบบหนึ่งที่เกิดจากการที่แสงตกกระทบวัตถุและส่งผลทำให้โมเลกุลของสารถูกกระตุ้นให้อยู่ในสถานะเร้า (หากพิจารณาให้ลึกซึ้งเข้าไปในระดับโมเลกุลก็คือการที่พันธะระหว่างอะตอมในโมเลกุลถูกชักนำให้มีสภาพขั้วหรือ Polarizability เปลี่ยนแปลงไป) และเมื่อโมเลกุลที่ถูกกระตุ้นพยายามที่จะกลับคืนสู่สถานะปกติซึ่งมีพลังงานต่ำกว่า (และไม่มี Dipole moment ในพันธะเคมี) ก็จะทำให้เกิดการกระเจิงแสง (Scattered light) ออกมาใช้วิเคราะห์วัตถุตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์หาชนิด (Qualitative analysis) ของตัวอย่างที่เป็นของแข็ง เช่น อัญมณี แร่ และวัสดุต่างๆ โดยไม่ทำลายตัวอย่างหรือทำให้ตัวอย่างเสียหายหรือเปลี่ยนแปลงคุณภาพการที่ผลต่างของพลังงาน (หรือความถี่) ของแสงที่ตกกระทบกับพลังงานแสงที่กระเจิงเรียกว่า Raman shift จะมีค่าตรงกันกับพลังงาน (หรือความถี่) ของพันธะในการสั่นของโมเลกุลที่วัดได้จากเทคนิคอินฟราเรด ดังนั้น สเปกตรัมที่ได้จากเทคนิครามานจึงมีลักษณะคล้ายกันกับสเปกตรัมที่ได้จากเทคนิคอินฟราเรดโดยในสเปกตรัมรามานจะมีพีคของพันธะที่ไม่มีขั้ว เช่น พันธะระหว่างคาร์บอน (C-C) ปรากฏให้เห็นชัดและมีความเข้มของพีคสูง จึงนำเทคนิคนี้มาใช้เพื่อวิเคราะห์กราฟีนและตัวเร่งปฏิกิริยาผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

3.4.4 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงในสถานะของแข็ง (UV-VIS Diffuse reflectance Spectrometer, DSR)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่าความเข้มแสงในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงวิสิเบิลที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่าง โดยสารตัวอย่างจะอยู่ในรูปของแข็ง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนและสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้ คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของสารเมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสง

ที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆตามกฎของ Beer-Lambert ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในการระบุชนิดและปริมาณของสารต่างๆที่มีอยู่ในตัวอย่างได้ จึงใช้เทคนิคนี้ในการหาค่าการดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก และเทคนิคนี้สามารถวิเคราะห์หาค่า energy band gap จากกราฟการดูดกลืนแสงได้ ดังสมการที่ 3.2

$$E_g = h\frac{c}{\lambda} = \frac{1240}{\lambda} \quad (3.2)$$

3.4.5 เครื่องวิเคราะห์หาค่าประกอบของสารโดยการเปล่งแสง (Photoluminescence Spectrometer, PL)

เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบของสาร โดยอาศัยการคายพลังงานของอิเล็กตรอนของธาตุองค์ประกอบ แล้ววัดค่าพลังงานแสงที่เปล่งออกมาในรูปของสเปกตรัม ซึ่งข้อมูลสเปกตรัมจะเป็นตัวชี้วัดสมบัติเฉพาะตัวของวัสดุ ซึ่งมีองค์ประกอบในการตรวจวัด มีความยาวคลื่นที่ใช้กระตุ้นพลังงานในระดับต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์, ช่วงตรวจวัด 0.4-2.7 ไมครอนและอุณหภูมิจากการวิเคราะห์ 4-300 เคลวิน เทคนิควิเคราะห์องค์ประกอบของสารโดยการใช้หาระดับความบริสุทธิ์หรือปริมาณสิ่งเจือปนในวัสดุ โดยดูจากระดับความเข้มของสเปกตรัม ถ้าสเปกตรัมมีความเข้มต่ำ แสดงว่าวัสดุความบริสุทธิ์ต่ำ และใช้หาค่าปริมาณการตกกลับของอิเล็กตรอน ซึ่งมีความสัมพันธ์กับปริมาณแสงที่เปล่งออกมา แปรผันตรงกับ ปริมาณการตกกลับของอิเล็กตรอน และความบริสุทธิ์ของวัสดุ ตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์นั้น วัดตัวอย่างได้ทั้งของแข็ง ของเหลว ของเหลวที่บดแสง และเป็นผง เช่น อัญมณี ผิวนาโนของเซมิคอนดักเตอร์ และอื่นๆ เป็นต้น สามารถแสดงผลกราฟสเปกตรัมทั้งในรูปแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ จึงนำเทคนิคนี้มาใช้ในการวิเคราะห์ความสามารถในการรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮลในสารผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ เพื่อเปรียบเทียบกับไทเทเนียมไดออกไซด์

3.4.6 เครื่องวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิวของสาร Brunauer-Emmett-Teller (BET)

การทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนใช้เซลล์สำหรับใส่ตัวอย่าง (Sample cell) จำนวน 2 เซลล์ เซลล์หนึ่งบรรจุวัสดุตัวอย่างที่ต้องการทดสอบพื้นที่ผิวจำเพาะ ส่วนอีกเซลล์ไม่ใส่วัสดุตัวอย่าง แต่ทำหน้าที่เป็นเซลล์อ้างอิง ก่อนการทดสอบต้องให้ความร้อนแก่เซลล์ที่บรรจุวัสดุตัวอย่าง เพื่อไล่ความชื้นและโมเลกุลของสารถูกดูดซับชนิดอื่นให้ออกจากผิวหน้าของวัสดุตัวอย่าง จากนั้นทำให้เซลล์ทั้งสองเป็นสุญญากาศ เพื่อให้ภายในเซลล์ไม่มีโมเลกุลของแก๊สชนิดอื่น ก่อนจุ่มเซลล์ทั้ง 2 ลงในภาชนะที่บรรจุไนโตรเจนเหลวเพื่อให้เซลล์ทั้งสองอยู่ในภาวะอุณหภูมิต่ำ จากนั้นผ่านแก๊สไนโตรเจนเข้ามาในเซลล์ ทั้ง 2 โดยแก๊สไนโตรเจนที่เข้ามาในเซลล์ที่มีวัสดุตัวอย่าง จะถูกดูดซับบนผิวของวัสดุทำให้ความดันภายในเซลล์ที่บรรจุวัสดุตัวอย่างลดลงจนกระทั่งคงที่ (P) ในขณะที่เซลล์ที่ไม่มีวัสดุตัวอย่างความดันของแก๊สไนโตรเจนจะคงที่ (P₀) ข้อมูลที่เครื่องบันทึกผลคือค่าความดันสัมพันธ์ (P/P₀) และปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับ (W) โดย

วัสดุตัวอย่าง จากนั้นเครื่องจะปล่อยแก๊สไนโตรเจนเข้ามาอีกเช่นเดียวกับครั้งแรก และแก๊สไนโตรเจน ถูกดูดซับจนความดันคงที่อีกเป็นเช่นนี้จนกระทั่งความดันภายในเซลล์ที่มีวัสดุตัวอย่างไม่ลดลง ($P/P_0 \sim 1$) แสดงว่าไม่เกิดการดูดซับแก๊สไนโตรเจนอีกแล้ว จากข้อมูลค่าความดันสัมพัทธ์และปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับที่ได้ เครื่องจะทำการประมวลผลโดยใช้โปรแกรมตามสมการของ BET แสดงผลออกมาเป็นค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรของรูพรุน ผลการศึกษานี้สามารถเขียนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแก๊สที่ถูกดูดซับ (W) กับความดันสัมพัทธ์ (P/P_0) ของวัสดุที่เพิ่มขึ้นเป็นสมการที่ เรียกว่า “สมการของ BET” ได้ดังสมการที่ 3.3

$$W \frac{1}{\left(\left[\frac{P_0}{P}\right] - 1\right)} = \frac{1}{W_m C} - \frac{C - 1}{W_m C} \left(\frac{P}{P_0}\right) \quad (3.3)$$

W = ปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์ P/P_0

W_m = ปริมาณแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับ เคลือบบนผิวของสารลักษณะเป็นโมเลกุลชั้นเดียว

P = ความดันของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในขณะทำการทดลอง (หน่วยเป็นมิลลิเมตรปรอท)

P_0 = ความดันอิ่มตัวของแก๊สไนโตรเจน (หน่วยเป็นมิลลิเมตรปรอท)

C = ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับพลังงานที่ใช้ในการดูดซับ

พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุ คำนวณโดยนำ W_m แทนค่าในสมการที่ 3.4

$$S_t = \frac{W_m N A_{cs}}{M} \quad (3.4)$$

S_t = พื้นที่ผิวของวัสดุ (หน่วยเป็นตารางเมตร)

N = เลขอาโวคาโดร (6.023×10^{23}) (หน่วยเป็นโมเลกุลต่อโมล)

M = น้ำหนักโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจน (28 กรัมต่อโมล)

A_{cs} = พื้นที่หน้าตัดของโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับ (16.2×10^{-23})

(หน่วยเป็นตารางเมตร)

ค่า S_t ที่ได้เมื่อหารด้วยปริมาณของตัวอย่างวัสดุที่ใช้ทดสอบ (w) จะได้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ หน่วยเป็นตารางเมตรต่อกรัม ดังสมการที่ 3.5

$$S = \frac{S_t}{w} \quad (3.5)$$

ปริมาตรรูพรุนรวม (V_p) และขนาดรูพรุนเฉลี่ย (r_p) ของวัสดุ คำนวณได้จากความสัมพันธ์ของสมการดังที่ 3.6 และ 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลง ครอบงำ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_p = \frac{W_s}{P} \quad (3.6)$$

$$r_p = \frac{2V}{S_t} \quad (3.7)$$

W_s = ปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิวของวัสดุที่ความดันสัมพัทธ์ $(P/P_0) \approx 1$

r = ความหนาแน่นของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิวของวัสดุที่ความดันสัมพัทธ์ $(P/P_0) \approx 1$

S_t = พื้นที่ผิวของวัสดุที่ทดสอบได้

ตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์จะต้องเป็นของแข็งและสามารถแบ่งขนาดให้มีขนาด พอเหมาะ กับอุปกรณ์ของเครื่องที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้ เช่น Catalyst, ash, membrane เป็นต้น จึงนำเทคนิค นี้มาใช้ศึกษาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาสมโทเทเนียมไดออกไซด์-ริติวซ์กราฟีนออกไซด์

3.4.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของ ตัวอย่างที่ทำการสำรวจซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น หลักการทำงานของเครื่อง SEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา แปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าและแสดงออกมาเป็นภาพ แสดงหลักการทำงานของเครื่อง SEM โดยจะใช้เทคนิคนี้ในการศึกษารูปร่างลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาสมโทเทเนียมไดออกไซด์-ริติวซ์กราฟีนออกไซด์

3.4.8 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-VIS Spectrophotometer, UV-VIS)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่าความเข้มแสงในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงวิสิเบิลที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืน โดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่าง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนและสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้ คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของสาร เมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่มีความยาวคลื่นค่าต่างๆตามกฎของ Beer-Lambert ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในระบุชนิดและปริมาณของสารต่างๆที่มีอยู่ในตัวอย่างได้ จึงใช้เทคนิคนี้ในการหาค่าการดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาสม

โทเทเนียมไดออกไซด์-ริติวซ์กราฟีนออกไซด์ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการถ้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (TiO_2 -rGO Hybrid Catalyst) โดยเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก โดยการทดลองเริ่มจากการรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ เพื่อลดหมู่ออกไซด์และเพื่อเพิ่มรีดิวซ์ กราฟีนออกไซด์บนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ สามารถเตรียมได้โดยการกำหนดปริมาณสารละลายรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ใช้ต่างกัน คือ 2.5, 5.0, 7.5 และ 10.0 มิลลิกรัม ตัวอย่างผงของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม แสดงดังรูปที่ 4.1 นำไปพิสูจน์เอกลักษณ์และศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วยเทคนิค ดังต่อไปนี้ X-ray Diffractometer (XRD), Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR), Raman Spectroscopy, UV-Visible Diffuse Reflectance Spectroscopy (DRS), Photoluminescence Spectrometer (PL), Brunauer-Emmett-Teller (BET) ศึกษาลักษณะสัณฐานของสารผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) จากนั้นศึกษาประสิทธิภาพกระบวนการเกิดโฟโตคะตะไลติกของตัวเร่งปฏิกิริยาผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในการกำจัดย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงต่างๆ เช่น แสงยูวี แสงยูวี-วิสิเบิล ด้วยเทคนิค UV-VIS Spectroscopy นอกจากนี้ศึกษาการนำสารตัวอย่างที่เตรียมได้มาใช้ซ้ำ และเปรียบเทียบการกำจัด สีย้อมเมทิลีนบลูที่มีพีเอชแตกต่างกัน



รูปที่ 4.1 ผงตัวเร่งผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (TiO_2 -rGO hybrid catalyst)

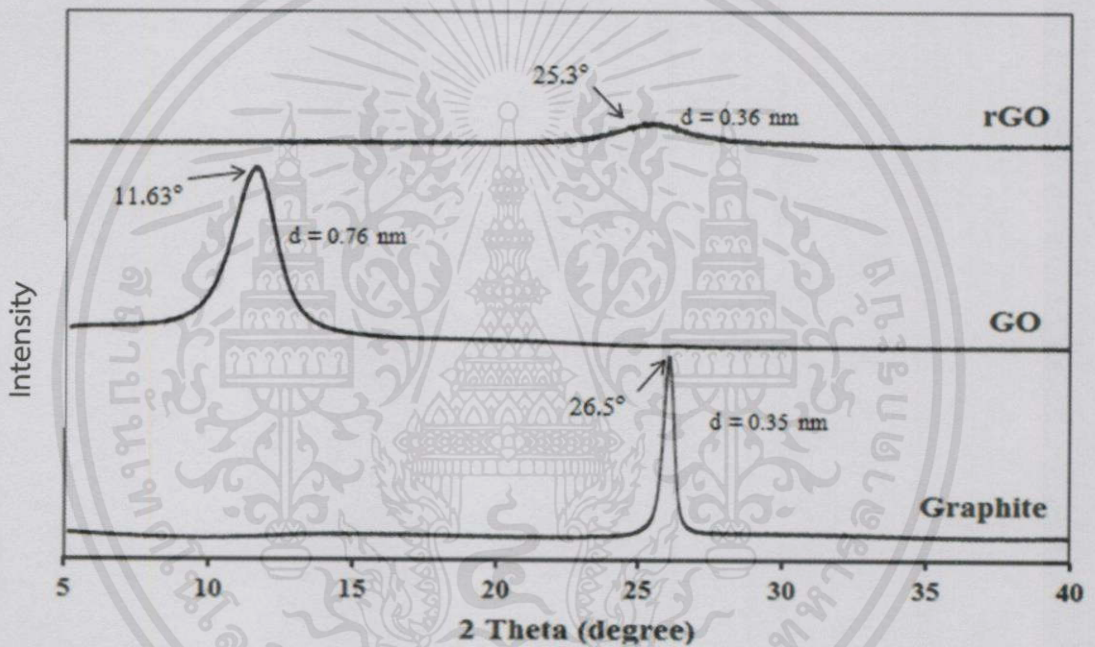
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์และศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

4.1.1 X-ray Diffractometer (XRD)

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกและอสังฐานของผงตัวเร่งปฏิกิริยาผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ เปรียบเทียบกับไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยกำหนดปริมาณของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ใช้คือ 2.5, 5.0, 7.5 และ 10.0 มิลลิกรัม โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

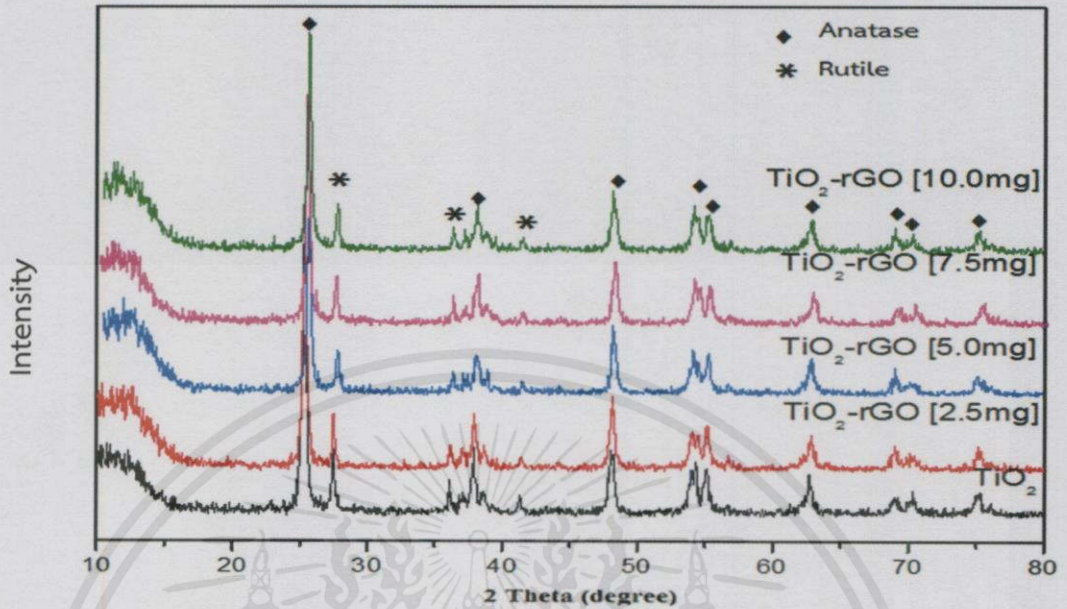
4.1.1.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกและอสังฐานของกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์



รูปที่ 4.2 รูปแบบ XRD ของกราฟไฟต์ กราฟีนออกไซด์ และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

จากรูปที่ 4.2 การตรวจสอบด้วย XRD มุม 2θ ในช่วง 5° - 40° ของกราฟไฟต์ กราฟีนออกไซด์ และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ซึ่งกราฟไฟต์พบการเลี้ยวเบนที่มุม 2θ เท่ากับ 26.5° เป็นพีคเอกลักษณ์ของกราฟไฟต์โครงสร้างเฮกซะโกนอล [15] จากนั้นเมื่อกราฟไฟต์ถูกออกซิไดซ์กลายเป็นกราฟีนออกไซด์พบการเลี้ยวเบนที่มุม 11.63° พบว่าพีคการเลี้ยวเบนมีค่าต่ำลง แสดงว่ามีระยะห่างระหว่างระนาบมากขึ้น เนื่องจากค่าที่ได้สามารถนำมาประกอบกับการที่พบฟังก์ชันออกซิเจน พวกไฮดรอกไซด์ คาร์บอกซิล คาร์บอนิล และอีพอกซิบนกราฟีนออกไซด์ และภายหลังจากที่ทำการรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์พบการเลี้ยวเบนที่มุม 2θ เท่ากับ 25.3° ซึ่งเป็นพีคเอกลักษณ์ของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ มีลักษณะพีคที่กว้าง เนื่องจากหลังจากถูกรีดิวซ์ หมู่ฟังก์ชันออกซิเจนดังกล่าวลดน้อยลงและรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นั้นมีความเป็นผลึกต่ำ

4.1.1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกและออสัณฐานของไทเทเนียมไดออกไซด์ เปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์



รูปที่ 4.3 รูปแบบ XRD ของไทเทเนียมไดออกไซด์และสารตัวอย่างที่เตรียมได้ในปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 4.3 การตรวจสอบด้วย XRD มุม 2θ ในช่วง 10° - 80° ของไทเทเนียมไดออกไซด์ เปรียบเทียบกับตัวเร่งผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ พบพีคการเลี้ยวเบนของไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่มุม 2θ เท่ากับ 25.3° , 37.2° , 48.2° , 54.3° , 55.8° , 64.7° , 68° , 70.2° และ 77.8° ซึ่งเป็นพีคเอกลักษณ์ของเฟสอนาเทส [21] โครงสร้างเตตระโกนอล และพบเฟสรูไทล์ที่ 27.5° , 36.1° , 41.2° [22] ส่วนพีคของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ไม่แสดงพีคที่ชัดเจน [23] ทำให้ลักษณะรูปแบบ XRD ที่เติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ลงไปไม่ต่างจากไทเทเนียมไดออกไซด์ อาจเกิดจากรีดิวซ์ กราฟีนออกไซด์ที่เติมลงไป มีปริมาณสัดส่วนต่อไทเทเนียมไดออกไซด์น้อยมาก และเป็นออสัณฐาน จึงไม่แสดงพีคเอกลักษณ์ที่ชัดเจน ดังนั้นจึงต้องทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วยเทคนิครามาน

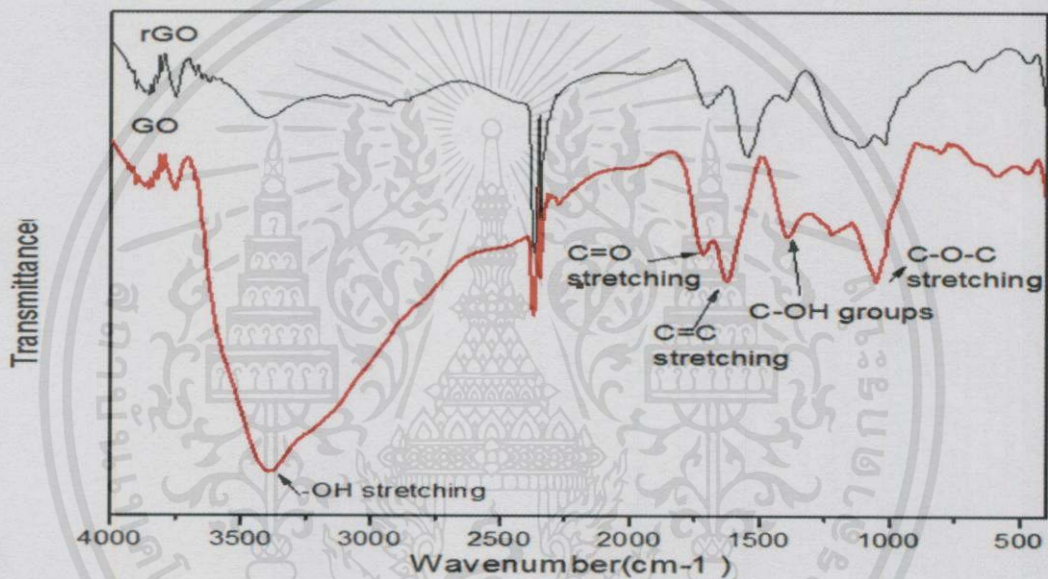
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR)

การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันตรวจสอบโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมี โดยการวัดการดูดกลืนรังสีที่อยู่ในช่วงอินฟราเรดช่วงเลขคลื่น (Wave number) ประมาณ $4000-400\text{ cm}^{-1}$

4.1.2.1 วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

ในขั้นตอนการเตรียมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ได้มีการเติมสารรีดิวซ์เพื่อลดหมู่เกาะต่างๆภายในโครงสร้างของกราฟีนออกไซด์ สามารถตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันต่างๆที่หายไปด้วยเทคนิค FT-IR เปรียบเทียบความแตกต่างดังรูปที่ 4.4

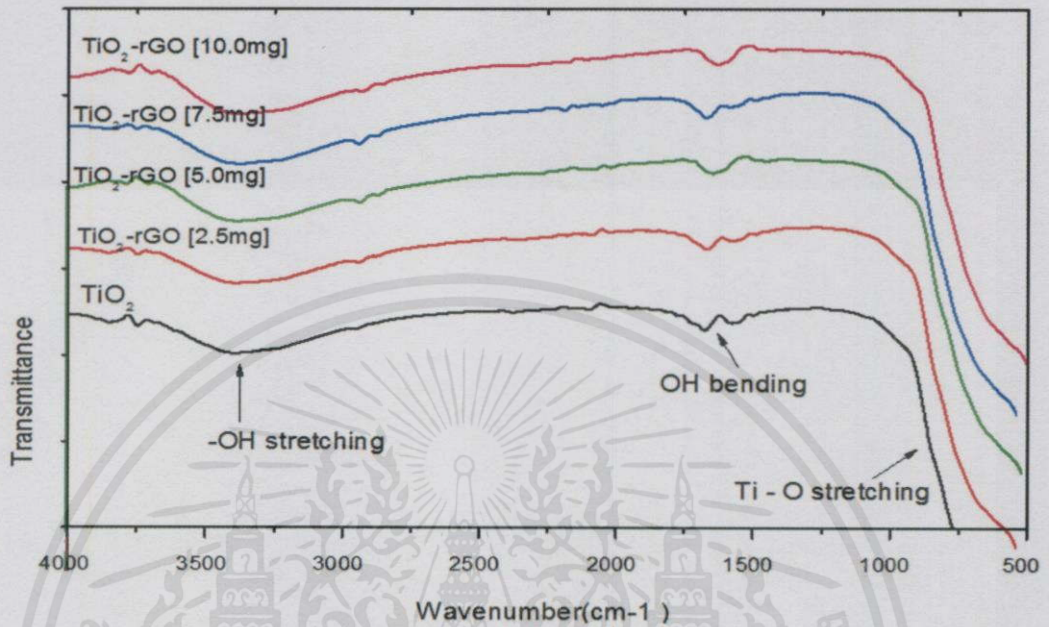


รูปที่ 4.4 FT-IR สเปกตรัมของกราฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO)

จากรูปที่ 4.4 แสดงกราฟ FT-IR สเปกตรัม ของกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ซึ่งกราฟีนออกไซด์จะปรากฏพีกกว้างในช่วง 3400 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบ O-H Stretching ของหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl) พีกที่ 1745 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบ C=O Stretching ของหมู่คาร์บอนิลหรือคีโตน พีกที่ 1646 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบ C=C Stretching ถัดมาพบพีกที่ 1390 cm^{-1} พบการสั่นแบบ C-OH groups และภายหลังจากทำการรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์พบว่าความเข้มพีกในช่วง 3400 cm^{-1} , 1740 cm^{-1} และ 1390 cm^{-1} ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากของหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl) ที่อยู่ในโครงสร้างกราฟีนออกไซด์ ถูกรีดิวซ์ออกไปด้วยไฮดราซีน แต่เกิดพีกที่ 1570 cm^{-1} และ 467 cm^{-1} เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการสั่น C-C stretching ของกราฟีน [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.2 วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของผงตัวเร่งปฏิกิริยาผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ปริมาณความเข้มข้นต่างๆ



รูปที่ 4.5 กราฟ FT-IR สเปกตรัมของไทเทเนียมไดออกไซด์กับสารตัวอย่างที่เตรียมได้

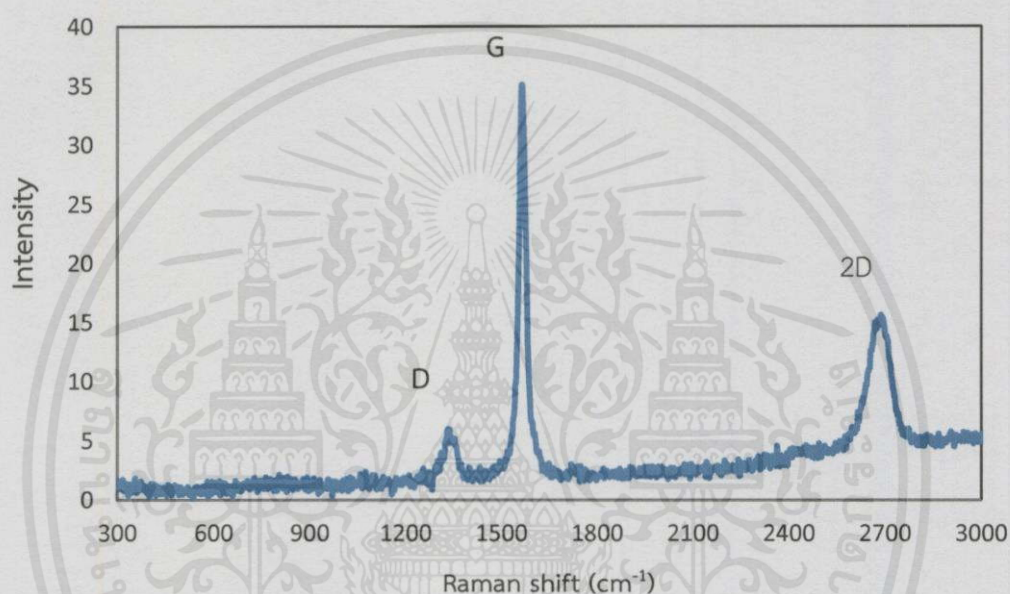
จากรูปที่ 4.5 กราฟ FT-IR เปรียบเทียบไทเทเนียมไดออกไซด์กับตัวเร่งปฏิกิริยาผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ปริมาณต่างๆ พบพีคที่ช่วง 3400 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบ O-H Stretching ของหมู่ไฮดรอกซิล ถัดมาพบพีคที่ช่วง 1624 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบ O-H Bending ของน้ำ บริเวณพีคที่พบต่ำกว่า 800 cm^{-1} เป็นพีคของ Ti-O Stretching ของไทเทเนียมไดออกไซด์ และของ Ti-O-C ของตัวเร่งผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ จากกราฟจะเห็นว่าไม่พบความแตกต่างระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์กับตัวเร่งผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากสัดส่วนปริมาณรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ผสมกับไทเทเนียมไดออกไซด์มีน้อยมาก และอาจเพราะรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ไม่ได้เกิดพันธะทางเคมีที่รุนแรงต่อโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อนำมาทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR กราฟที่ได้จึงคล้ายกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 Raman Spectroscopy

ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผงตัวเร่งผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ โดยเทคนิครามาน ซึ่งมีลักษณะคล้ายกันกับสเปกตรัมที่ได้จากเทคนิคอินฟราเรด โดยในสเปกตรัมรามาน จะมีพีคของพันธะที่ไม่มีขั้ว เช่น พันธะระหว่างคาร์บอน (C-C) ปรากฏให้เห็นชัดเจนและมีความเข้มของพีคสูง

4.1.3.1. ผลการตรวจสอบรามานสเปกตรัมของกราฟไฟต์

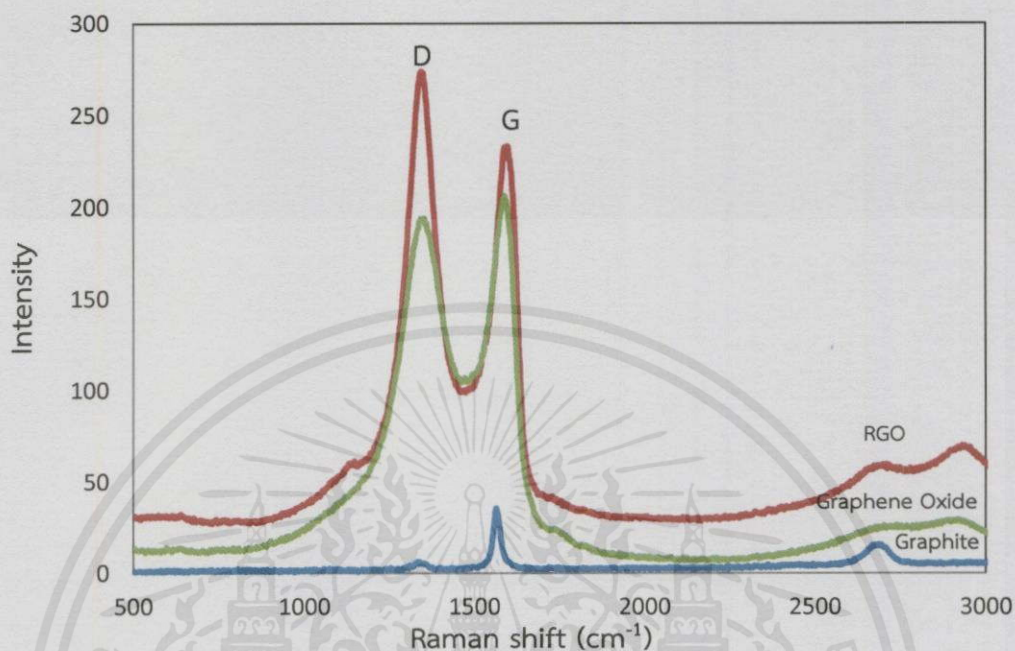


รูปที่ 4.6 รามานสเปกตรัมของกราฟไฟต์

จากรูปที่ 4.6 จากรามานสเปกตรัม โดยกราฟไฟต์พบพีคเอกลักษณ์ขึ้นสองพีคที่ 1350 cm^{-1} และ 1586 cm^{-1} นั่นก็คือพีค D band (sp^3 carbon atom) และ G band (sp^2 carbon atom) ตามลำดับ ซึ่ง D band แสดงความไม่เป็นระเบียบภายในโครงสร้าง ส่วน G band แสดงพีคเอกลักษณ์ของกราฟไฟต์ ลักษณะพีคแหลมสูง นอกจากนี้ยังมีพีคที่พบในช่วง 2700 cm^{-1} คือพีค 2D ที่แสดงความไม่เป็นระเบียบหรือการมีหมู่ฟังก์ชันก่เกาะอยู่ในโครงสร้างกราฟไฟต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3.2. ผลการตรวจสอบรามานสเปกตรัมของกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

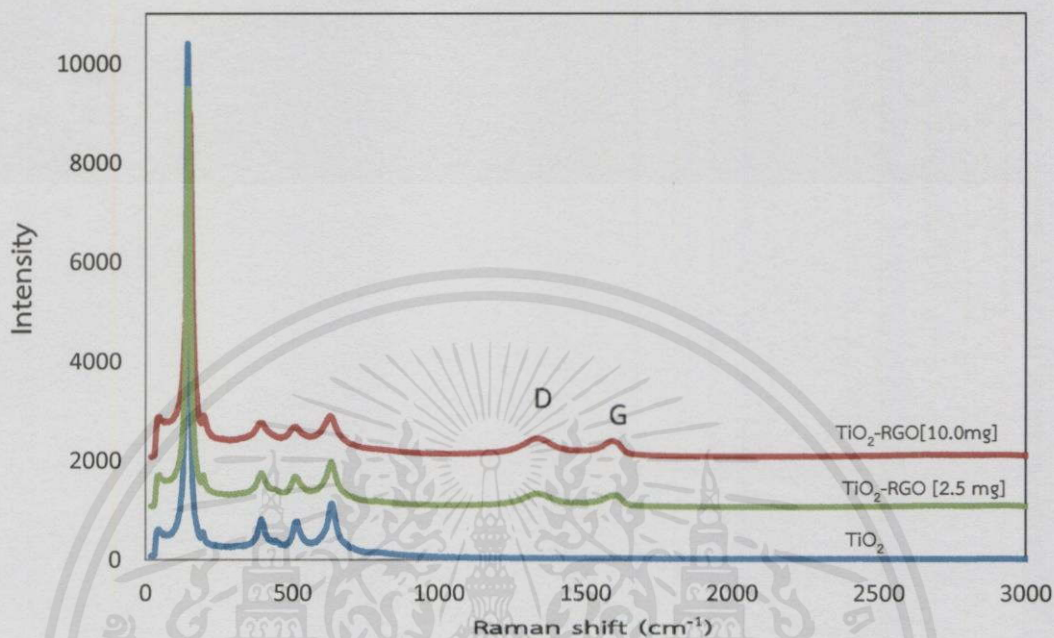


รูปที่ 4.7 รามานสเปกตรัมของกราฟไฟต์ กราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

จากรูปที่ 4.7 รามานสเปกตรัมของกราฟไฟต์ กราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ เปรียบเทียบโครงสร้างภายในที่เปลี่ยนไปของกราฟไฟต์ ดังรูปที่ 4.6 พบว่า หลังจากกราฟไฟต์ถูกนำไปเข้ากระบวนการ Hummers' method ได้เป็นกราฟีนออกไซด์ พบที่ค D band จะกว้างขึ้น ในขณะที่ที่ค D band มีความเข้มฟิคสูงขึ้น แสดงว่าภายในโครงสร้างของกราฟไฟต์เกิดการเปลี่ยนแปลงโดยพบความไม่เป็นระเบียบภายในโครงสร้างมากขึ้นอาจเนื่องมาจากหมู่ออกไซด์ที่เข้ามาเกาะระหว่างพันธะ C=C จากนั้นเมื่อผ่านกระบวนการรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ พบว่าที่ค D band มีความเข้มฟิคสูงขึ้นในขณะที่ G-band แคบลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อกราฟีนออกไซด์ถูกรีดิวซ์จะพบว่าหมู่ฟังก์ชันหรือหมู่ออกไซด์ที่เกาะอยู่ลดลงไปบางส่วน มีการสร้างพันธะคู่เพิ่มขึ้น และอัตราส่วน I_D / I_G ที่มีค่าสูงขึ้นแสดงว่าในโครงสร้างยังมีความไม่เป็นระเบียบอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3.3. ผลการตรวจสอบรามานสเปกตรัมของไทเทเนียมไดออกไซด์ เปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์



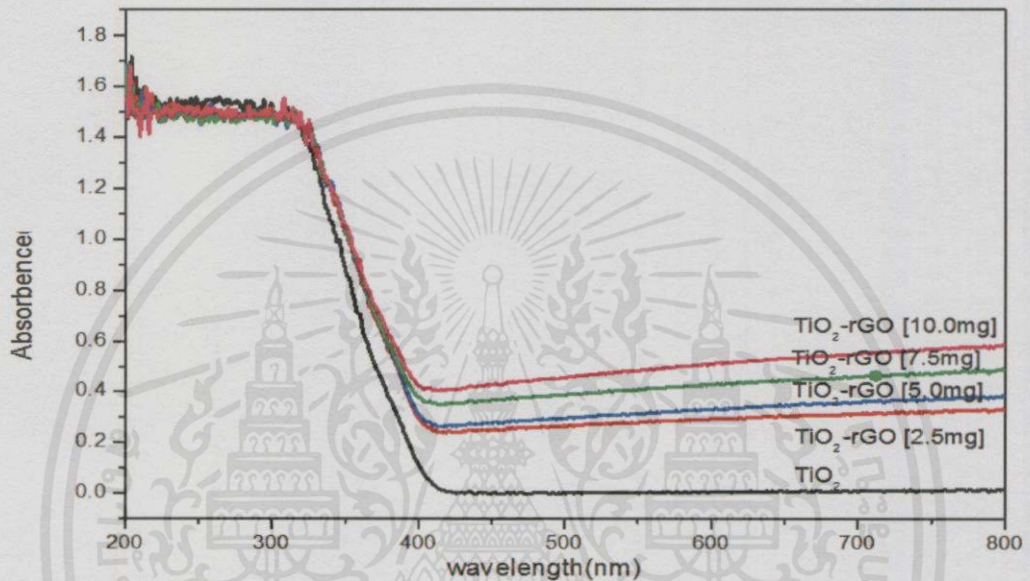
รูปที่ 4.8 รามานสเปกตรัมของไทเทเนียมไดออกไซด์เปรียบเทียบกับสารตัวอย่างที่เตรียมได้

จากรูปที่ 4.8 จากรามานสเปกตรัมของไทเทเนียมไดออกไซด์ จะพบพีคเอกลักษณ์ที่ 144, 397, 523 และ 649 cm^{-1} ซึ่งเมื่อทำการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ลงไป พีคเหล่านี้ก็ยังคงอยู่ แต่จะพบพีคเอกลักษณ์ของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คือ D band และ G band แต่ค่าความเข้มพีคลดลง แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเมื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาผสมของรีดิวซ์ กราฟีนออกไซด์ และเมื่อเพิ่มปริมาณของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์เป็น 10.0 มิลลิกรัม อาจจะแสดงว่าภายในโครงสร้างมีความเป็นระเบียบมากขึ้น ทั้งนี้เกิดจากการที่สามารถกำจัดหมู่เกาะต่างๆภายในโครงสร้างได้มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 UV-Visible Diffuse Reflectance Spectroscopy (DRS)

วิเคราะห์ตัวอย่างที่เป็นของแข็ง ศึกษาค่าพลังงานและการดูดกลืนของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เปรียบเทียบกับตัวเร่งผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ โดยอาศัยหลักการสะท้อนแสง (ลักษณะที่สะท้อนจะเป็นแบบกระเจิง) และการดูดกลืนแสง ศึกษาความยาวคลื่นตั้งแต่ 200-800 nm. ได้ผลดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 DRS สเปกตรัมของไทเทเนียมไดออกไซด์กับสารตัวอย่างที่เตรียมได้

เทคนิค DRS นำมาใช้ศึกษาค่าการดูดกลืนแสงของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก ดูอันตรกิริยาระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์เปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ปริมาณความเข้มข้นต่างๆ โดยสามารถคำนวณค่าแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap energy) ได้จากสมการที่ 4.1 โดยทำการลากเส้นกราฟจาก absorption edge ของแต่ละตัว ซึ่งจะได้ความยาวคลื่นที่ดูดกลืน (λ) และนำค่าที่ได้ไปคำนวณตามสมการดังต่อไปนี้

$$E_g = h \frac{c}{\lambda} = \frac{1240}{\lambda} \quad (4.1)$$

โดย	E_g	คือ	ค่าแถบพลังงาน (eV)
	h	คือ	ค่าคงที่พลังค์ (Planck's Constant) = 6.625×10^{-34} , จูล/วินาที (J/s)
	λ	คือ	ความยาวคลื่นที่ดูดกลืน, นาโนเมตร (nm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต

นอกจากนี้ยังมีให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความยาวคลื่นและค่าช่องว่างระหว่างพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์กับตัวเร่งผสมที่เตรียมได้ในปริมาณต่างกัน

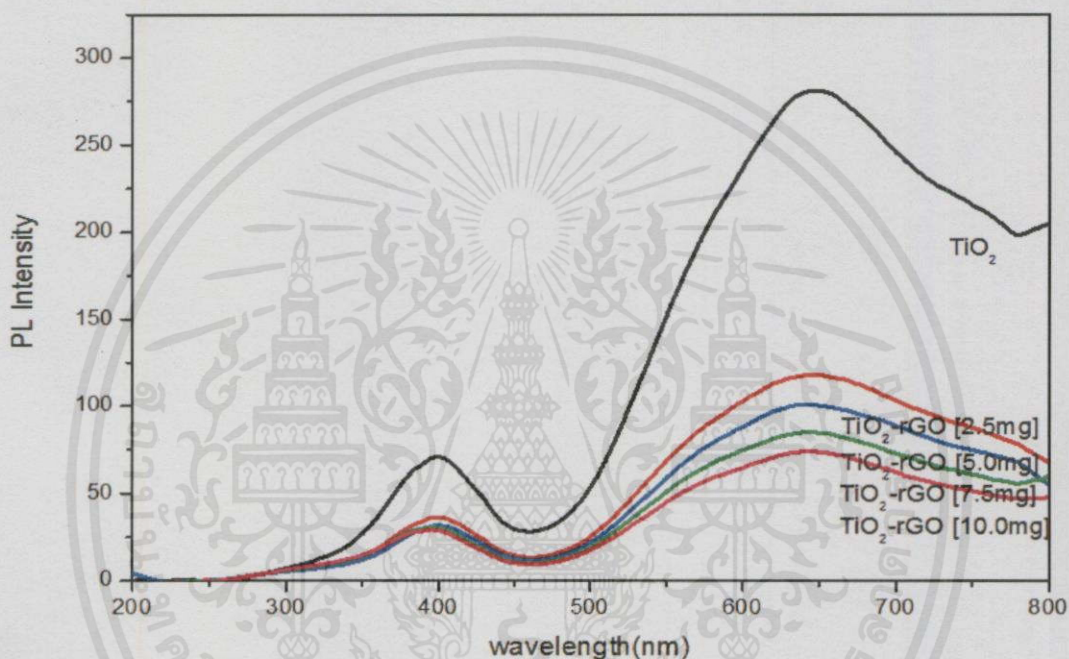
Sample	λ_{onset} (nm.)	ช่องว่างระหว่างพลังงาน (Band gap energies, eV.)
TiO ₂	404	3.07
TiO ₂ -rGO [2.5 mg.]	410	3.02
TiO ₂ -rGO [5.0 mg.]	411	3.01
TiO ₂ -rGO [7.5 mg.]	414	3.00
TiO ₂ -rGO [10.0 mg.]	418	2.97

จากรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่า DRS สเปกตรัมของไทเทเนียมไดออกไซด์ดูดกลืนที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 404 นาโนเมตร ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมดูดกลืนที่ความยาวคลื่นที่เพิ่มขึ้นดังตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ สามารถดูดกลืนแสงในช่วงวิสิเบิลได้มากขึ้น ตามปริมาณของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับไทเทเนียมไดออกไซด์และคำนวณค่าแถบพลังงานพบว่า ค่าแถบพลังงานลดน้อยลงเมื่อสัดส่วนปริมาณของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าสารตัวอย่างมีการเกิดอันตรกิริยาต่อกันระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์กับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ แสดงในตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.5 Photoluminescence Spectrometer (PL)

เมื่อทำการผสมรีดิวซ์กราฟีนลงไปไนโทเทเนียมในปริมาณต่างๆ เพื่อช่วยในการลดการเกิดการตกกลับของอิเล็กตรอน (Recombination) แล้วใช้เทคนิค PL ซึ่งเป็นเครื่องมือที่วัดค่าการเปล่งแสง (Luminescence) ของสาร โดยมีกระบวนการดูดกลืนแสง (Excitation) และคายแสง (Emission) ของ พลังงานที่อยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ต และยูวี-วิสิเบิลเพื่อตรวจสอบพลังงานที่ตกกลับของผงไทเทเนียมได-ออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์



รูปที่ 4.10 PL สเปกตรัมของไทเทเนียมไดออกไซด์กับสารตัวอย่างที่เตรียมได้

จากรูปที่ 4.10 เป็นผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PL สามารถบอกได้ว่า สารตัวตัวอย่างที่เตรียมขึ้น มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก เนื่องจากมีพีคขึ้นที่ความยาวคลื่นประมาณ 400 นาโนเมตร ซึ่งเป็นความยาวคลื่นของไทเทเนียมไดออกไซด์ ความเข้มของสเปกตรัมมีค่าต่ำลงเมื่อมีการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น และมีการเลื่อนของเส้นสเปกตรัมไปทางขวามากขึ้น ซึ่งทำให้มีความยาวคลื่นเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ มีค่าช่องว่างแถบพลังงานแคบลงเมื่อทำการเจือรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น และอิเล็กตรอนมีการตกกลับน้อยลง เนื่องจากปริมาณการตกกลับของอิเล็กตรอน แปรผันตรงกับความเข้มของสเปกตรัมและแปรผกผันกับปริมาณรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เติมลงไปไนโทเทเนียมไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.6 Brunauer-Emmett-Teller (BET)

การศึกษาลักษณะพื้นที่ผิวเฉลี่ยและการกระจายตัวของรูพรุน (Surface area and porosity analyzer) ด้วยเทคนิค BET โดยอาศัยเทคนิคการแทนที่พื้นที่ผิว หรือรูพรุนด้วยแก๊สไนโตรเจน จากข้อมูลที่ได้จากการการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET ดังจากตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการเติม ไรติวซ์กราฟีนออกไซด์ลงในไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณมากขึ้น จะส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะของสาร ตัวอย่างสูงขึ้น ทำให้มีความสามารถในการดูดซับสีย้อมได้มากขึ้น โมเลกุลของสีย้อมเมทิลีนบลูก็จะไปจับตัวบนพื้นที่ผิวของผงตัวเร่งปฏิกิริยาผสมเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิวและขนาดอนุภาค

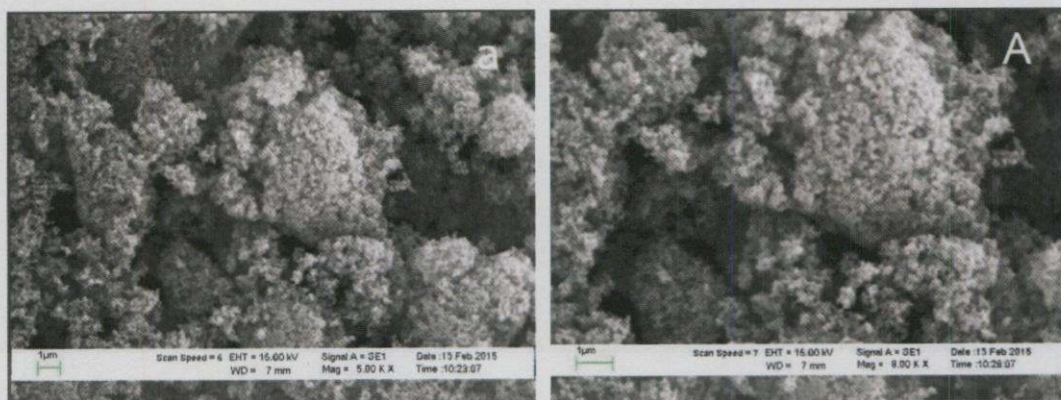
Sample	BET surface Area (m ² /g)	Particle size (nm.)
TiO ₂	51.95	19.19
TiO ₂ -rGO [2.5 mg.]	69.08	19.11
TiO ₂ -rGO [5.0 mg.]	73.44	19.15
TiO ₂ -rGO [7.5 mg.]	82.82	19.14
TiO ₂ -rGO [10.0 mg.]	85.88	19.30

4.2 ศึกษาลักษณะพื้นฐานของตัวเร่งปฏิกิริยาผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ไรติวซ์กราฟีนออกไซด์

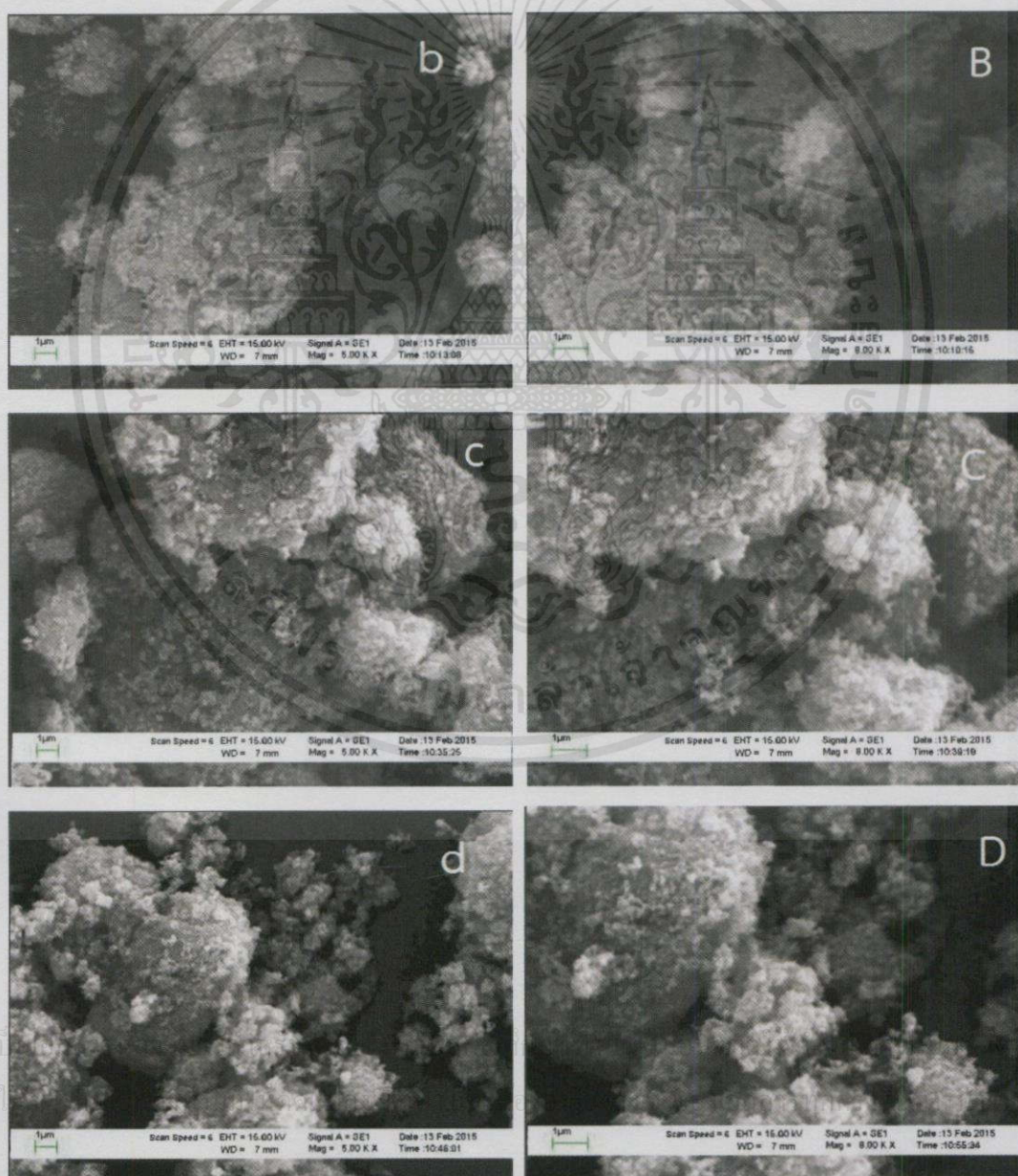
4.2.1 Scanning Electron Microscopy (SEM)

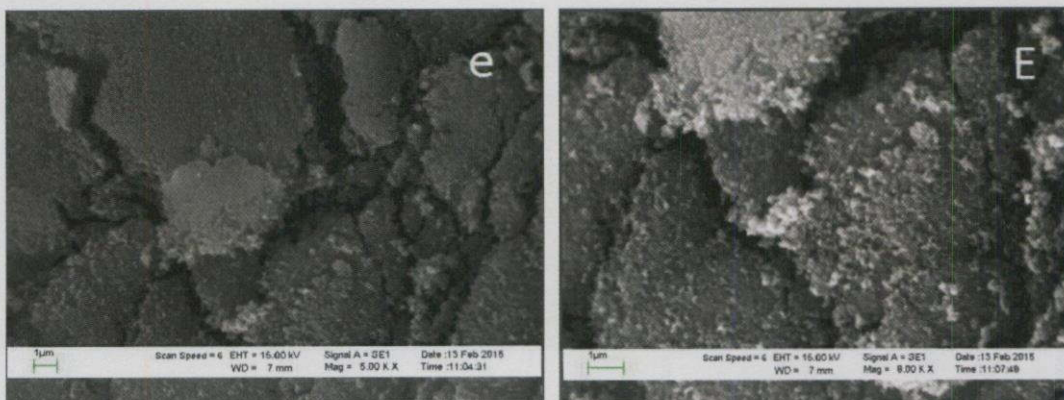
การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของตัวเร่งปฏิกิริยาผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ไรติวซ์กราฟีนออกไซด์ โดยทำการวัดที่กำลังขยาย 5000 และ 8000 เท่า ได้ผลดังรูปที่ 4.11 และ 4.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 SEM ของ TiO₂ Degussa P25 (a) กำลังขยาย 5000 เท่า (A) กำลังขยาย 8000 เท่า





รูปที่ 4.12 รูปถ่าย SEM ของผงตัวอย่างที่เตรียม

TiO₂-rGO [2.5 mg.] (b) กำลังขยาย 5000 เท่า (B) กำลังขยาย 8000 เท่า
 TiO₂-rGO [5.0 mg.] (c) กำลังขยาย 5000 เท่า (C) กำลังขยาย 8000 เท่า
 TiO₂-rGO [7.5 mg.] (d) กำลังขยาย 5000 เท่า (D) กำลังขยาย 8000 เท่า
 TiO₂-rGO [10.0 mg.] (e) กำลังขยาย 5000 เท่า (E) กำลังขยาย 8000 เท่า

จากรูปที่ 4.11 พบลักษณะการกระจายตัวของผงผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ และภายหลังจากการเจือรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในลงไป มีลักษณะการเกาะตัวเป็นก้อนกันมากขึ้น เมื่อเทียบกับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีการเจือรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ สันนิษฐานว่าอาจมีการเกาะตัวกันระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์กับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ดูได้จากรูปที่ 4.12

4.3 ศึกษาประสิทธิภาพกระบวนการเกิดโฟโตคะตะไลติกของตัวเร่งปฏิกิริยาผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงต่างๆ

ในการทดลองนี้ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการเกิดโฟโตคะตะไลติกของสารตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเพิ่มประสิทธิภาพให้มีความว่องไวต่อสภาวะที่หลากหลายมากขึ้น โดยการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณต่างกันคือ 2.5, 5.0, 7.5 และ 10.0 มิลลิกรัม ใช้ปริมาณของสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ 2,000 มิลลิกรัม แล้วนำมาทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู โดยกำหนดความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลูอยู่ที่ 2.5×10^{-5} M และใช้เวลาทดสอบเท่าๆกันคือ 3 ชั่วโมง พร้อมเก็บตัวอย่างทุกๆ 30 นาที เพื่อวัดค่าการดูดกลืนแสงในสภาวะต่างๆ ได้ผลการทดสอบดังนี้

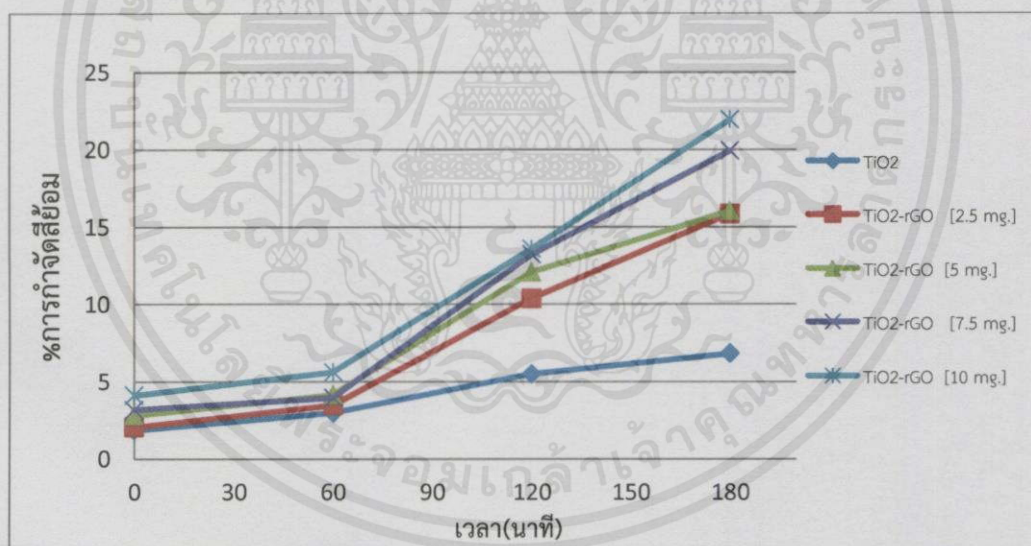
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 ผลการทดสอบการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้ความมืด

การทดสอบการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้ความมืด เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของตัวเร่งปฏิกิริยาผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ภายในระยะเวลา 3 ชั่วโมง

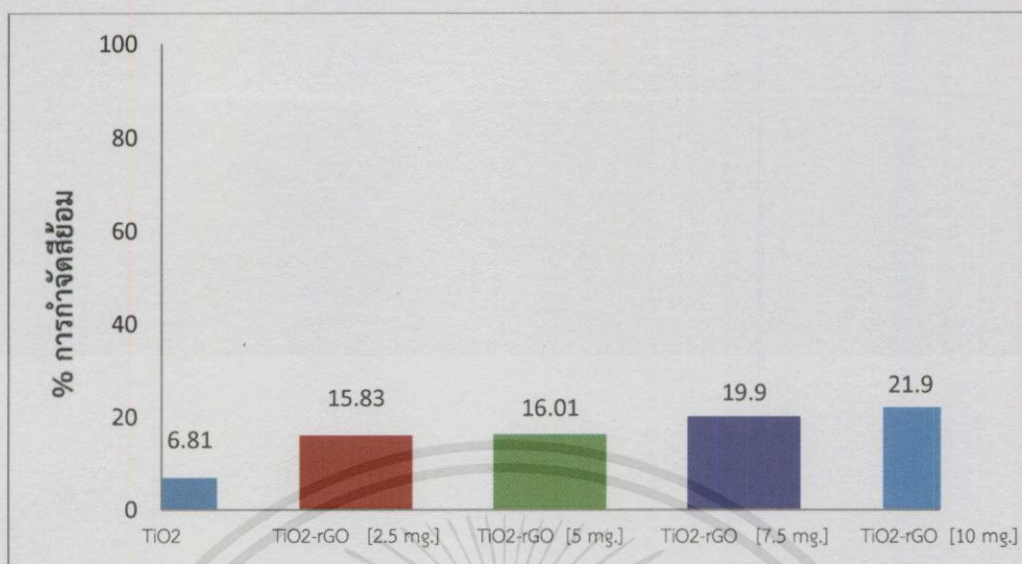
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้ความมืด

เวลา (นาที)	% การกำจัดสีย้อม				
	TiO ₂	TiO ₂ -rGO [2.5 mg.]	TiO ₂ -rGO [5 mg.]	TiO ₂ -rGO [7.5 mg.]	TiO ₂ -rGO [10 mg.]
0	1.86	2.04	2.79	3.16	4.10
60	2.98	3.46	4.13	3.95	5.59
120	5.47	10.35	12.06	13.21	13.57
180	6.81	15.83	16.01	19.90	21.90



รูปที่ 4.13 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ในการกำจัดสีย้อมกับเวลาในการกำจัดสีย้อมภายใต้ความมืด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 แสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมภายใต้ความมืดที่เวลา 180 นาที

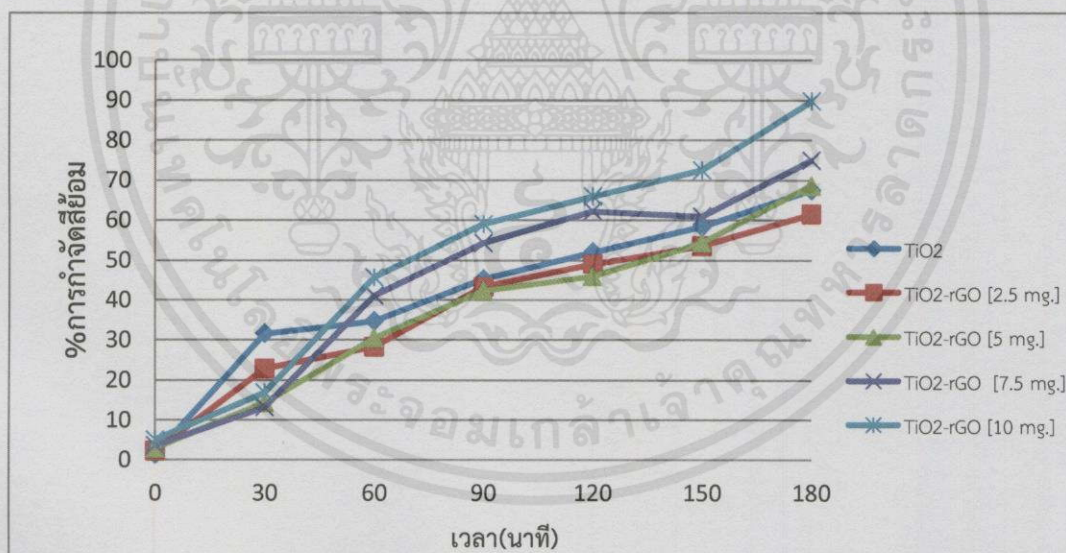
จากรูปที่ 4.13 และ 4.14 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้ความมืดในการดูดซับสีย้อม พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปสารตัวอย่างสามารถกำจัดสีย้อมได้มากขึ้น โดยตัวเร่งปฏิกิริยาผสมที่มีการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้น 10.0 มิลลิกรัม (TiO₂-rGO [10 mg.]) สามารถดูดซับสีย้อมได้ดีที่สุดคือ 21.90 % ซึ่งมากกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีการเติม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ลงในไทเทเนียมไดออกไซด์นั้น สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูได้ดีขึ้น เนื่องจากรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะของสารตัวอย่างสูงจึงสามารถดูดซับสีย้อมได้มาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ผลการทดสอบการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลูภายใต้การฉายแสงยูวี

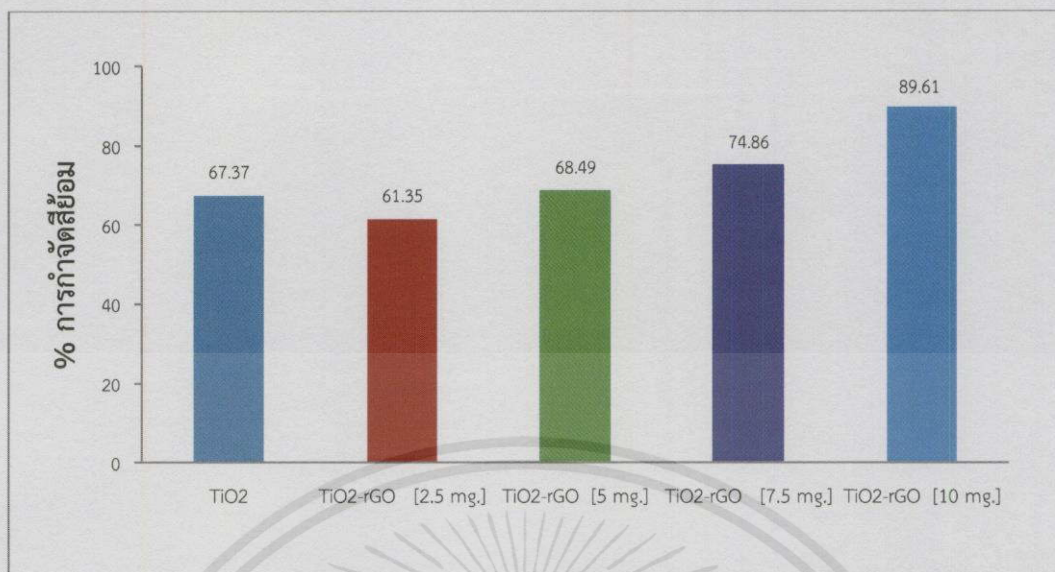
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ในการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลูภายใต้การฉายแสงยูวี

เวลา (นาที)	% การกำจัดสีย้อม				
	TiO ₂	TiO ₂ -rGO [2.5 mg.]	TiO ₂ -rGO [5 mg.]	TiO ₂ -rGO [7.5 mg.]	TiO ₂ -rGO [10 mg.]
0	1.15	2.07	2.71	3.37	4.88
30	31.52	22.71	14.31	13.08	16.79
60	34.63	28.18	30.37	40.96	45.58
90	45.16	43.21	42.31	54.16	58.85
120	51.92	48.93	45.83	62.08	65.79
150	58.24	53.49	54.29	60.81	72.42
180	67.37	61.35	68.49	74.86	89.61



รูปที่ 4.15 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ในการกำจัดกับเวลาในการกำจัดสีย้อมภายใต้การฉายแสงยูวี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 แสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมภายใต้แสงยูวี ที่เวลา 180 นาที

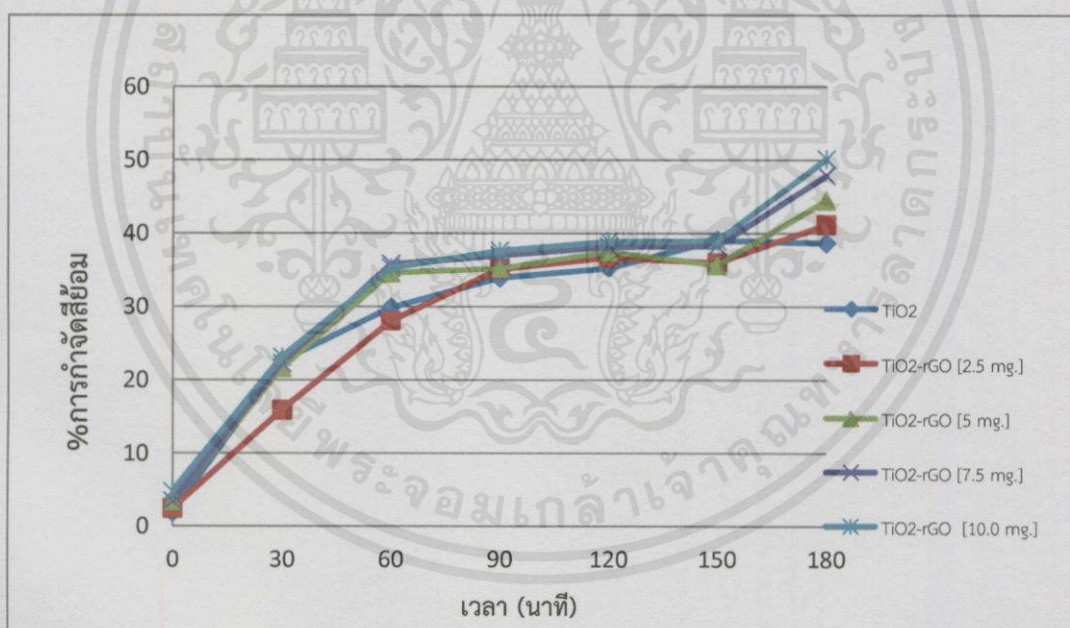
จากรูปที่ 4.15 และ 4.16 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงยูวีในการเกิดโฟโตคะตะไลติก พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาผสมที่มีการเจือริติวซ์กราฟีนออกไซด์ 10.0 มิลลิกรัม ลงในไทเทเนียมไดออกไซด์ 2,000 มิลลิกรัม (TiO₂-rGO [10 mg.]) มีการตอบสนองต่อแสงยูวี ในการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกได้ดีกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ในนาทีที่ 60 เป็นต้นไป และเมื่อเวลาผ่านไป ถึงนาทีที่ 180 สารตัวอย่างสามารถกำจัดสีย้อมได้มากขึ้น โดยสามารถกำจัดสีย้อมได้ดีที่สุดคือ 89.61% ซึ่งมากกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีการเติมริติวซ์กราฟีนออกไซด์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติมริติวซ์กราฟีนออกไซด์ลงในไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมได้ เนื่องจากริติวซ์กราฟีนออกไซด์ จะไปช่วยลดการตกกลับของอิเล็กตรอนจากชั้นคอนดักชันแบนด์ ลงมาชั้นวาเลนซ์แบนด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 ผลการทดสอบการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงยูวี-วีลบี

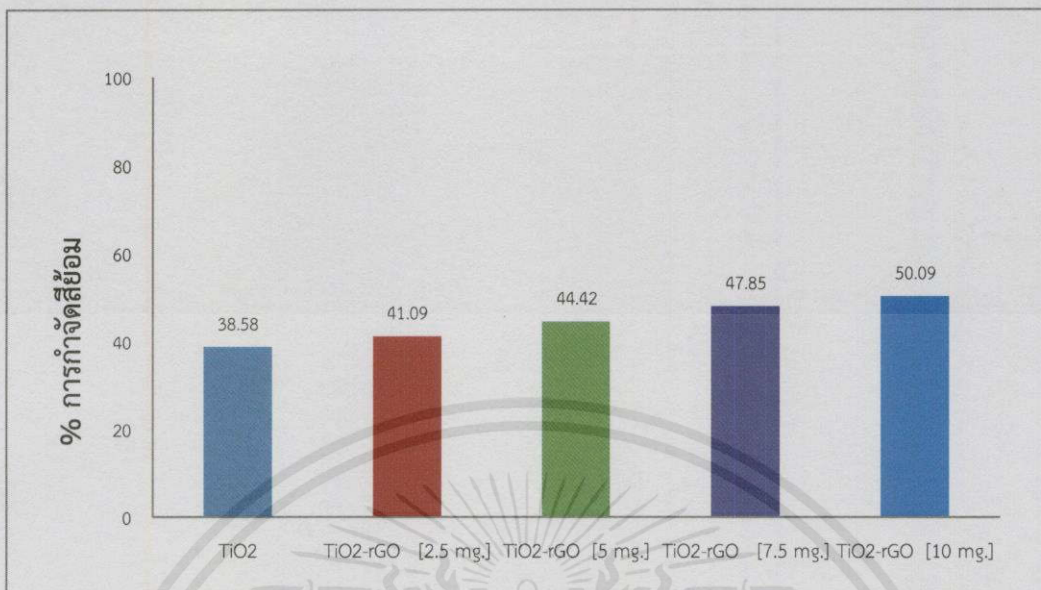
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงยูวี-วีลบี

เวลา (นาที)	% การกำจัดสีย้อม				
	TiO ₂	TiO ₂ -rGO [2.5 mg.]	TiO ₂ -rGO [5 mg.]	TiO ₂ -rGO [7.5 mg.]	TiO ₂ -rGO [10 mg.]
0	1.81	2.41	3.34	3.38	4.71
30	22.58	15.88	21.6	22.21	23.06
60	29.82	27.99	34.57	35.72	35.24
90	33.84	35.08	35.17	36.91	37.54
120	35.21	36.66	37.42	38.12	38.83
150	38.96	35.9	35.61	38.22	38.89
180	38.58	41.09	44.42	47.85	50.09



รูปที่ 4.17 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดกับเวลาในการกำจัดสีย้อมภายใต้การฉายแสงยูวี-วีลบี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



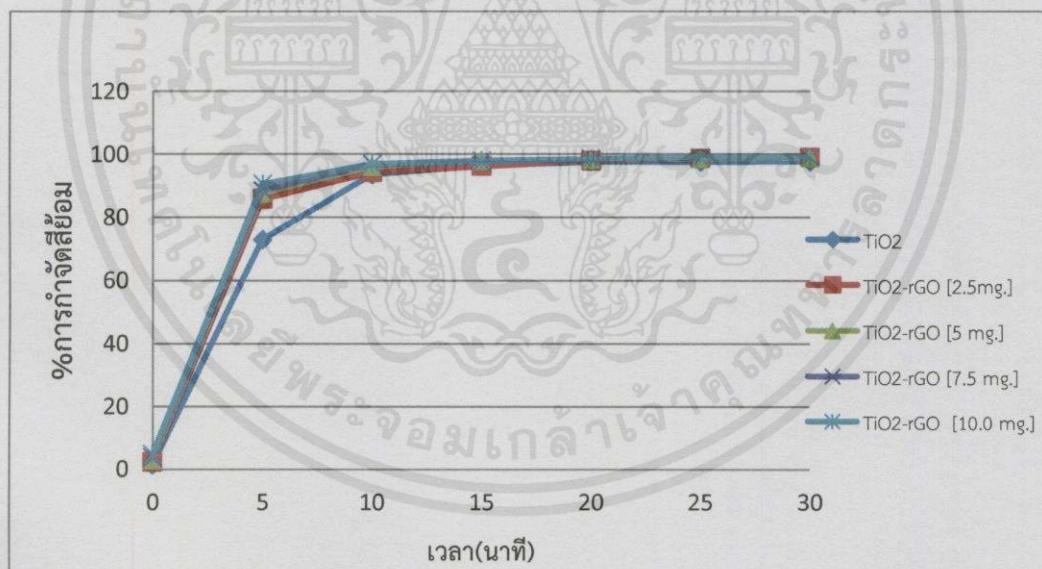
รูปที่ 4.18 แสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การกำจัดสี้อมภายใต้แสง ยูวี-วิสิเบิล ที่เวลา 180 นาที

จากรูปที่ 4.17 และ 4.18 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ในการกำจัดสี้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงยูวี-วิสิเบิลในการเกิดโฟโตคะตะไลติก พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ 10 มิลลิกรัม ลงในไทเทเนียมไดออกไซด์ 2,000 มิลลิกรัม (TiO₂-rGO [10 mg.]) มีค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสี้อมมากที่สุดเพียง 50.09 % ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในเวลา 180 นาที สารตัวอย่างที่มีการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณสูงสุด มีประสิทธิภาพในการกำจัดสี้อมเมทิลีนบลูได้เพียงครั้งเดียวเท่านั้น เนื่องจากแสงยูวี-วิสิเบิล มีพลังงานแสงต่ำ จึงมีประสิทธิภาพการกำจัดสี้อมได้น้อย

4.3.4 ผลการทดสอบการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอาทิตย์

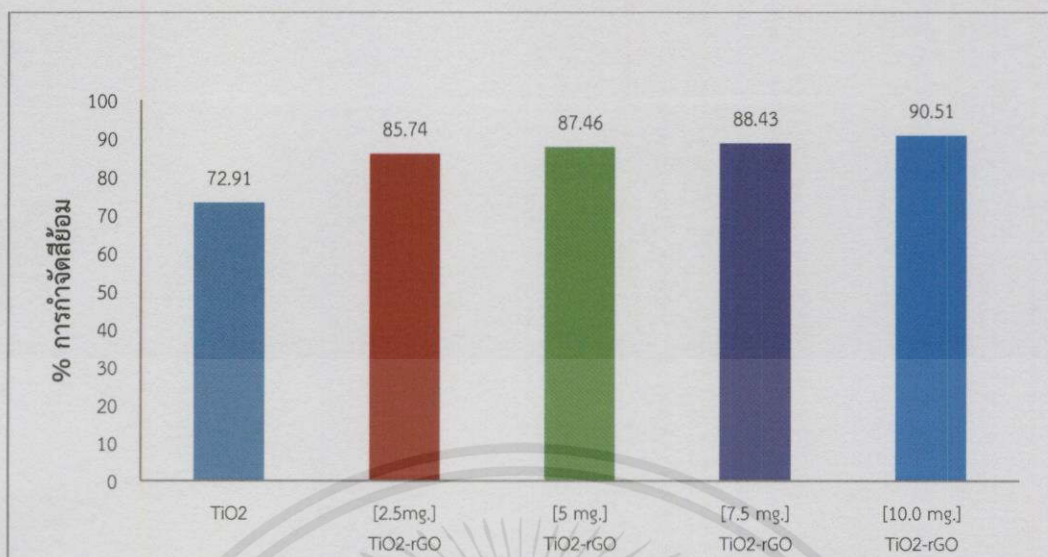
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอาทิตย์

เวลา (นาทึ)	%การกำจัดสีย้อม				
	TiO ₂	TiO ₂ -RGO [2.5mg.]	TiO ₂ -RGO [5 mg.]	TiO ₂ -RGO [7.5 mg.]	TiO ₂ -RGO [10 mg.]
0	1.26	2.32	2.81	3.65	4.57
5	72.91	85.74	87.46	88.43	90.51
10	93.36	94.17	95.86	96.65	96.77
15	96.46	96.16	97.81	97.44	97.86
20	97.51	97.86	98.17	98.29	98.41
25	97.51	98.53	98.53	98.84	99.02
30	97.56	98.89	98.91	99.02	99.02



รูปที่ 4.19 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ในการกำจัดกับเวลาในการกำจัดสีย้อมภายใต้แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



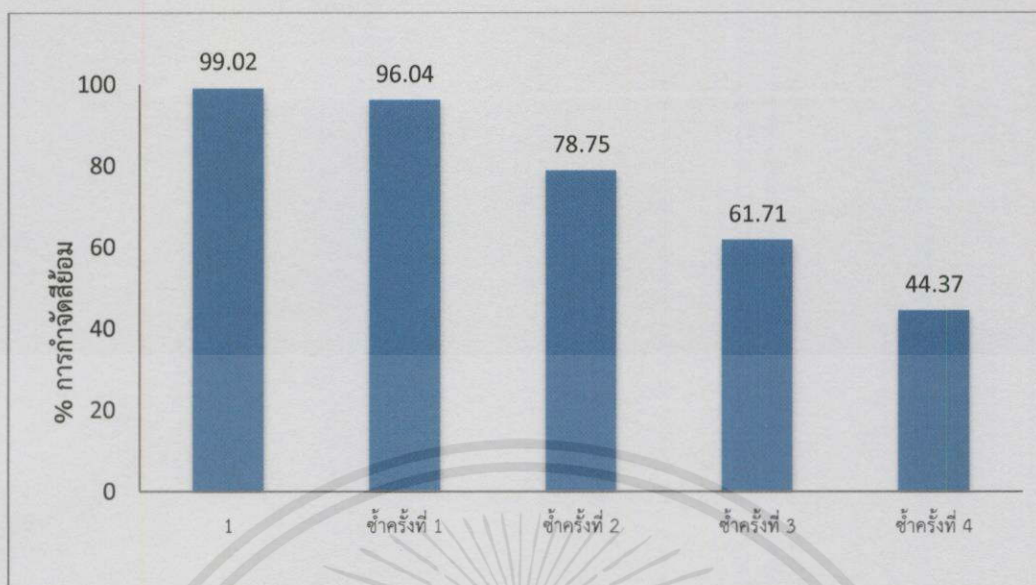
รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีข้อม ภายใต้แสงอาทิตย์ ที่เวลา 5 นาที

จากรูปที่ 4.19 และ 4.20 แสดงเปอร์เซ็นต์ในการกำจัดกับเวลาในการกำจัดสีข้อมเมทิลีนบลู ภายใต้แสงแดดในการเกิดโฟโตคะตะไลติก พบว่าสารตัวอย่างที่เตรียมได้สามารถกำจัดสีข้อมได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งจะเห็นว่า ภายใต้แสงอาทิตย์ ที่เวลา 5 นาที ประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมเมทิลีนบลู ของตัวเร่งผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมได้มากกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์อย่างชัดเจน และที่เวลา 30 นาที พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์เข้มข้น 7.5 และ 10.0 มิลลิกรัม สามารถกำจัดสีข้อมได้สูงสุดถึง 99.02% ทั้งนี้ เนื่องจากในแสงอาทิตย์มีพลังงาน และความเข้มแสงสูงจึงมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมได้มาก จากสารตัวอย่าง TiO₂-RGO [7.5 mg.] และ TiO₂-rGO [10 mg.] มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมใกล้เคียงกัน แต่ TiO₂-RGO [7.5 mg.] มีการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณน้อยกว่า จึงได้นำตัวเร่งผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ 7.5 มิลลิกรัม ไปศึกษาประสิทธิภาพในการใช้งานซ้ำภายใต้แสงอาทิตย์ต่อไป

4.3.5 ผลการทดสอบการกำจัดสีข้อมเมทิลีนบลูในการใช้งานซ้ำ

การทดสอบประสิทธิภาพในการใช้ซ้ำ จะนำสารตัวอย่างไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมรีดิวซ์-กราฟีนออกไซด์ปริมาณ 7.5 มิลลิกรัม มาทำการทดลองการกำจัดสีข้อมเมทิลีนบลู ภายใต้แสงอาทิตย์ เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมที่ดี มีค่าร้อยละการกำจัดสีข้อมเมทิลีนบลูที่สูง แต่ใช้ปริมาณรีดิวซ์ กราฟีนออกไซด์ที่น้อยกว่า จึงเป็นการประหยัดทรัพยากร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 แผนภูมิแท่งแสดงเปอร์เซ็นต์ในการกำจัดสีย้อมภายใต้แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 4.21 เมื่อนำสารตัวอย่างมาใช้งานซ้ำ พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูครั้งแรกสามารถกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูได้ 99,02% และในการใช้ซ้ำครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม คือ 96,04% และ 78,75% ตามลำดับ และจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูลดลงอย่างมากในครั้งที่ 3 และครั้งที่ 4 มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดเท่ากับ 61,71% และ 44,37% ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากสีย้อมเมทิลีนบลูไปยึดเกาะกับพื้นผิวของสารตัวอย่าง ทำให้บับองภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ ส่งผลให้เกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกได้น้อยลง

4.3.6 ผลการทดสอบการเปรียบเทียบการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูที่มีพีเอชแตกต่างกัน

การเปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดสีย้อมที่มีค่าพีเอชแตกต่างกันโดยจะปรับพีเอชของสีย้อมเมทิลีนบลูเป็น 3 และ 10 แล้วใส่สารตัวอย่างที่เตรียมได้ลงไปโดยใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลติก ภายใต้การฉายแสงยูวี-วิสิเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.6.1. ผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในสภาวะกรด

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าการดูดกลืนแสงและค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลูในสภาวะกรด

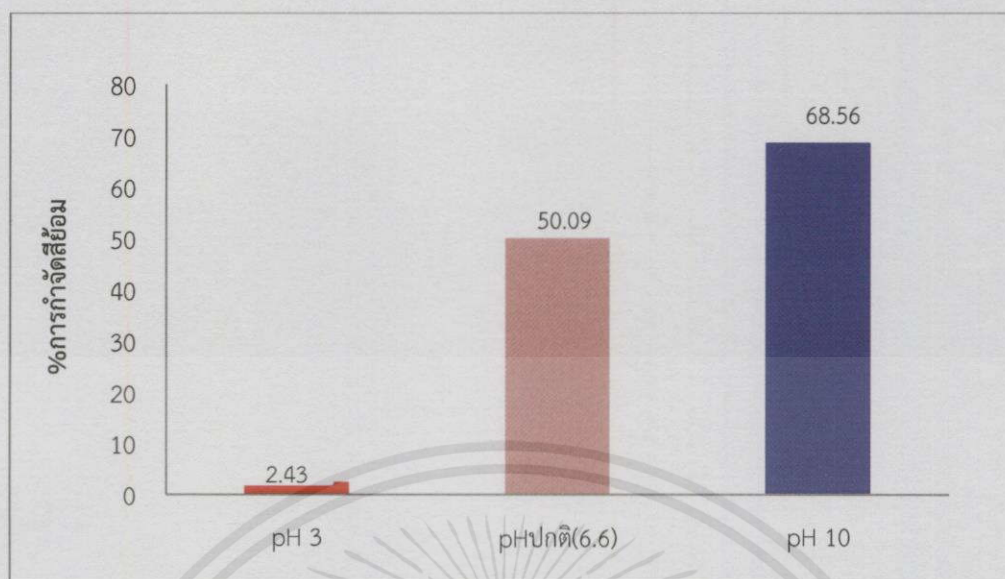
เวลา (นาท)	ค่าการดูดกลืนแสง	%การกำจัดสีย้อม
0	1.637	0.37
30	1.624	1.16
60	1.610	2.01
90	1.618	1.52
120	1.606	2.25
150	1.618	1.52
180	1.603	2.43

4.3.6.2. ผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในสภาวะเบส

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าการดูดกลืนแสงและค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลูในสภาวะเบส

เวลา (นาท)	ค่าการดูดกลืนแสง	%การกำจัดสีย้อม
0	1.405	14.42
30	1.430	12.91
60	1.563	4.81
90	1.331	18.92
120	1.220	25.68
150	1.007	38.64
180	0.516	68.56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบการกำจัดสีของสีย้อมในสภาวะกรด-เบสและพีเอชปกติของสีย้อม

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.22 พบว่า เมื่อสีย้อมเมทิลีนบลูมีสภาวะเป็นกรด ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีของเมทิลีนบลู 2.43% เนื่องจากพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่พีเอชต่ำ เกิดเป็นโปรโตเนท แดกตัวเป็นโปรตอน ให้ประจุบวก ซึ่งจะทำให้เกิดการผลักกันระหว่างประจุบนพื้นผิวของสารตัวอย่างกับสีย้อมเมทิลีนบลูที่มีประจุเป็นบวกเช่นกัน ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีของเมทิลีนบลูต่ำลง

สภาวะที่สีย้อมเมทิลีนบลูเป็นเบส สามารถกำจัดสีของเมทิลีนบลูได้สูงสุด 68.56% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารตัวอย่างที่เตรียมได้สามารถกำจัดสีของสีย้อมภายใต้การฉายแสงยูวี-วิสิเบิลได้ดีกว่า เมื่อเทียบกับสารละลายเมทิลีนบลูที่อยู่ในสภาวะที่เป็นกลาง และเป็นกรด เนื่องจากสีย้อมเมทิลีนบลูที่มีสภาวะเป็นเบส ทำให้พื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ จะมีค่าพีเอชสูง จะเกิดเป็นดี-โปรโตเนท มีการดึงโปรตอนออก ทำให้ประจุบนพื้นผิวเป็นลบ หรือมีการรีดิวซ์ออกซิเจนออกไป 1 อะตอม ทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์มีความเป็นบวกลดลง จะทำให้จับกับอนุภาคของสีย้อมที่มีประจุเป็นบวกได้ดี มีแรงดึงดูดระหว่างประจุจึงมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีของสีย้อมสูง

ทั้งนี้เนื่องจากประจุบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์มีการเปลี่ยนแปลงตามค่า pH เริ่มต้นของสารละลายนั้นๆ ซึ่งไทเทเนียมไดออกไซด์ในสภาวะปกติจะมีค่า $\text{pH}_{\text{pzc}} \sim 6.3$ [33] ประจุบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์จะเป็นศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการพิสูจน์เอกลักษณ์และศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยา

ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ผสมในปริมาณที่ต่างกัน

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสารตัวอย่างด้วยเทคนิค XRD และ FT-IR จะพบพีกเอกลักษณ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ชัดเจน แต่จะไม่พบพีกเอกลักษณ์ของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ เนื่องจากปริมาณรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ต่อสัดส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์น้อยมาก รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีความเป็นผลึกที่ต่ำ และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นั้นไม่เกิดพันธะทางเคมีที่รุนแรงกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งสามารถตรวจพีกเอกลักษณ์ของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ได้จากเทคนิค Raman จากการวิเคราะห์ผลึกและอสัณฐานด้วยเทคนิค SEM สันนิษฐานว่า เมื่อมีการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ลงในไทเทเนียมไดออกไซด์ สารตัวอย่างมีการเกาะตัวกันเป็นแผ่นและเป็นชั้นมากขึ้น เมื่อปริมาณรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้น และศึกษาลักษณะเฉพาะของสารตัวอย่างด้วยเทคนิค DRs, PL และ BET พบว่าเมื่อมีการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ลงในไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ช่องว่างระหว่างชั้นพลังงานแคบลง จึงสามารถลดการรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮลของไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ และทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมมากขึ้น เพิ่มความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก

5.2 สรุปผลประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม

จากผลการทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2\text{-rGO}$ ตอบสนองต่อแสงในทุกสภาวะแสงที่ใช้ทดสอบ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2\text{-rGO}$ ที่มีปริมาณรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์เจือในปริมาณความเข้มข้นที่มากขึ้น จะทำให้สามารถดูดซับและกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูได้ดีขึ้น

5.3 สรุปผลประสิทธิภาพในการใช้งานซ้ำ

จากผลการทดสอบประสิทธิภาพของสารตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2\text{-rGO}$ พบว่า เมื่อนำไปใช้งานซ้ำ ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมจะลดลง เนื่องจากมีการสะสมของโมเลกุลสีย้อมเมทิลีนบลูบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2\text{-rGO}$ เพิ่มมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 สรุปผลการเปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดสีย้อมที่มีค่าพีเอชแตกต่างกัน

จากการศึกษาอิทธิพลของพีเอชที่มีผลต่อตัวเร่งปฏิกิริยาผสม TiO_2 -rGO เปรียบเทียบเมื่อสีย้อมเมทิลีนบลูอยู่ในสภาวะกรด เบส พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูที่ดีที่สุด เมื่อสีย้อมอยู่ในสภาวะเป็นเบส

5.5 ข้อเสนอแนะ

- 1) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม โดยใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลติก
- 2) ศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาผสม TiO_2 -rGO ให้อยู่ในรูปของวัสดุประกอบ เช่น นำไปผสมในแผ่นยาง ทำให้สามารถนำไปใช้งานได้สะดวก
- 3) ศึกษาสีย้อมชนิดอื่นๆมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยนี้
- 5) ในการใช้งานซ้ำ ควรล้างด้วยน้ำกลั่นหลายๆครั้ง เนื่องจากหลังการใช้งานจะมีสีย้อมติดอยู่
- 6) ในการทดลองนี้ ใช้วิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาผสม TiO_2 -rGO ด้วยวิธีการเตรียมทางเคมีทั่วไป โดยไม่มีปัจจัยอื่นกระตุ้น เนื่องจากวิธีการเตรียมสารประกอบชนิดนี้มีหลากหลาย เช่น วิธีทางความร้อนไฮโดรเทอเมอร์ จึงอาจใช้วิธีการเตรียมสารอย่างอื่นมาทำการทดลองเปรียบเทียบกับงานวิจัยนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] "Phocatalysis." [Online]. Available: <http://www.snipview.com/q/Photocatalysis>. 26 มีนาคม 2558.
- [2] ฉลาด บรรเทา และ ชูสิทธิ์ ศรีสุทธิกมล. 2548. "กระบวนการ Photocatalytic." [Online]. Available: <http://sichon.wu.ac.th/file/envi-shh-20090110-112240-pwrqR.pdf>. 26 มีนาคม 2558.
- [3] "พลังงานของการเกิดออกซิเดชันของสารอินทรีย์." [Online]. Available: <http://4.bp.blogspot.com/k13RGM0ZP0M/UEN70zhIBiI/AAAAAAAAAEE/qXLtRzaCsFU/s1600/21..jpg>. 26 มีนาคม 2558
- [4] "สเปกตรัมของรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า." [Online]. Available: <http://www0.tint.or.th/nkc/nkc55/pictures55/nkc55-060b.jpg>. 26 มีนาคม 2558
- [5] "สเปกตรัมของรังสียูวี." [Online]. Available: <http://ozone.tmd.go.th/uvbasic.files/image005.jpg>. 26 มีนาคม 2558
- [6] "การเกิดโฮลและอิเล็กตรอนของไทเทเนียมไดออกไซด์." [Online]. Available: <http://www.vcharkarn.com/uploads/45/45745.gif>. 26 มีนาคม 2558
- [7] "กลไกของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสบนสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์." [Online]. Available: http://www.jcc2u.com/main/wp-content/uploads/2013/07/oimg_GC00403282_CA00403290.gif. 26 มีนาคม 2558.
- [8] Siamchemi. "ไทเทเนียมไดออกไซด์." [Online]. Available: <http://www.siamchemi.com/ไททาเนียมไดออกไซด์>. 26 มีนาคม 2558
- [9] "โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์." [Online]. Available: <http://www.siamchemi.com/wp-content/uploads/2014/.jpg>. 28 มีนาคม 2558.
- [10] ชลดา ธีรการณวงศ์. 2554. "ปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสงโดยไทเทเนียมไดออกไซด์." ฉบับที่ 1. ปีที่ 6. ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์
- [11] ดร.นัดดา เวชชากุล. 2555. "การกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานาโนไทเทเนียมไดออกไซด์." *Technology promotion*. (38): 53-55.
- [12] "XRD pattern of TiO₂ Degussa P25." [Online]. Available: <http://file.scirp.org/Html/6-7500377/60ebc7cd-b71d-4479-914f-bf8219bbd948.jpg>
- [13] nano Technology. "ประโยชน์ของนาโนไททาเนียมไดออกไซด์." [Online]. Available: <http://www.nanoyothai.com/1294190/ประโยชน์ของนาโนไททาเนียมไดออกไซด์>.
- [14] "นักวิจัยอังกฤษ-รัสเซีย คัวร์รางวัลโนเบล "ฟิลิกส์" หลังค้นพบ "กราฟีน". (2553). [Online]. Available: <http://www.matichon.co.th/online/2010/10/12862777751286278654l.jpg>
- [15] วิกีพีเดีย. 2558. "กราฟีนออกไซด์." [Online]. Available: <http://th.wikipedia.org/wiki/กราฟีนออกไซด์>. 21 เมษายน 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สร้างขึ้นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากท่านพบเห็นผิดปกตินี้ กรุณาแจ้งเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [16] Shizhen Liu, Hongqi Sun, Shaomin Liu, and Shaobin Wang. "Graphene facilitated visible light photodegradation of methylene blue over titanium dioxide photocatalysts." *Chemical Engineering Journal* 214(2013) 298-303.
- [17] Graeme Williams, Brian Seger, and Prashant V. Kamat. 2008. "TiO₂-Graphene nanocomposites.UV-Assisted photocatalytic reduction of graphene oxide." *acsnano*. 2(7) :1487-1491.
- [18] "Reduced Graphene." [Online]. Available: <http://www.matichon.co.th/onlinel.jpg>
- [19] วิกิพีเดีย. 2558. "กราฟไฟต์." [Online]. Available: <http://th.wikipedia.org/wiki/กราฟไฟต์>.
21 เมษายน 2558
- [20] ขนิษฐา. 2007. "ประเภทของสีย้อม." [Online]. Available: http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?pageid=6&bookID=370&read=true&count=true
- [21] "เมทิลีนบลู." [Online]. Available: http://th.wikipedia.org/wiki/Methylene_blue. 17 พฤษภาคม 2558
- [22] "โครงสร้างของเมทิลีนบลู." [Online]. Available: <http://www.scielo.br/img/revistas/jbchs/v20n8/a03sch01.gif>
- [23] Zhe-Qi Li, Hui-Long Wang, Long-Yun Zi, Jian-Jun Zhang, and Yao-ShanZhang. 2015. "Preparation and photocatalytic performance of magnetic TiO₂-Fe₃O₄/graphene (RGO) composites under VIS-light irradiation." [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.04.163>
- [24] Chao Chen, Weimin Cai, Mingce, Boaoxue Zhou, Yahui Wu, Deyong wu, and Yujie Feng. 2010. "Synthesis of visible-light responsive graphene oxide/TiO₂ composites with p/n heterojunction." *acsnano*. 11(4) : 6425-6432.
- [25] Feng Wanga and Kan Zhang. "Reduced graphene oxide-TiO₂ nanocomposite with high photocatalytic activity for the degradation of rhodamine B." *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical* 345(2011) 101-107.
- [26] Ju Hu, Hansheng Li, Qin Wu, Yun Zhao, and Qingze Jiao. "Synthesis of TiO₂ nanowire/reduce graphene oxide nanocomposites and their photocatalytic performances." *Chemical Engineering Journal* 263(2015) 144-150.
- [27] Tamas Szabo, Agnes Veres, Eunju Cho, Jeehyeong Khim, Noemi Varga, and Imre Dekany. "Photocatalyst separation from aqueous dispersion using graphene Oxide/TiO₂ nanocomposites" *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 433(2013) 230-239.

- [28] Yong Gao, Meng Hu, and Baoxia Mi. "Membrane surface modification with TiO₂-graphene oxide for enhanced photocatalytic performance." *Journal of Membrane Science* 455(2014) 349-356.
- [29] C. Nethravathi and Michael Rajamathi. "Chemically modified graphene sheets produced by the solvothermal reduction of colloidal dispersions of graphite oxide." *Carbon* 46(2008) 1994-1998.
- [30] Xinlong Wang and Wangqi Dou. "Preparation of graphene oxide (GO) and the thermal stability of silicone rubber/GO nanocomposites." *Thermochimica Acta* 529(2012) 25-28.
- [31] Nivea Raghavan, Sakthivel Thangavel, and Gunasekaran Venugopal. "Enhanced photocatalytic degradation of methylene blue by reduced graphene oxide/titanium dioxide/zinc oxide ternary nanocomposites." *Materials Science in semiconductor Processing* 30(2015) 321-329.
- [32] Lling-Lling Tan, Wee-Jun Ong, Siang-Piao Chai, and Abdul Rahman Mohamed. "Reduced graphene oxide-TiO₂ nanocomposite as a promising visible-light-active photocatalyst for the conversion of carbon dioxide" 2013. *Nanoscale Research Letters*. 8(1) : 465-473.
- [33] Supat Buddee, Sumpun Wongnawa, Pimpaporn Sriprang, and Chaval Sriwong. 2014. "Curcumin-sensitized TiO₂ for enhanced photodegradation of dyes under visible light." [Online]. Available: *Journal nanopart Research*
- [34] Yaxin Zhang, Zeyu Zhou, Tan Chen, Hongtao Wang, and Wenjing Lu. 2014. "Graphene TiO₂ nanocomposites with high photocatalytic activity for the degradation of sodium pentachlorophenol." *Journal of Environmental Science*. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jes.2014.08.011>
- [35] Mingce Long, Yalin Qin, Chen Chen, Xiaoyan Guo, Beihui Tan, and Weimin Cai. "Origin of Visible light photoactivity of reduced graphene oxide/TiO₂ by situ hydrothermal growth of undergrown TiO₂ with graphene oxide." *The journal of physical chemistry*
- [36] Luisa M. Pastrana-Martinez, Sergio Morales-Torres, Vlassis Likodimos, Polycarpos Falaras, Jose L. Figueiredo, Joaquim L. Faria, and Adrian M.T.Silva. "role of oxygen functionalites on the synthesis of photocatalytically active graphene-TiO₂ composites." *Applied Catalysis B: Environmental* 158-159(2014) 329-340.

[37] Zhuang-jun Fan, Wang Kai, Jun Yan, Tong Wei, Lin-Jie Zhi, Jing Feng, Yue-ming Ren, Li-ping Song, and Fei Wel. 2011. "Facile Synthesis of graphene nanosheets via Fe reduction of exfoliated graphite oxide." *acsnano*. 1(5) : 191-198.

[38] Nivea Raghavan, Sakthivel Thangavel, and Gunasekaran Venugopal. "Enhanced photocatalytic degradation of methylene blue by reduced graphene oxide/titanium dioxide/zinc oxide ternary nanocomposites." *Materials Science in semiconductor Processing* 30(2015) 321-329.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

1. การเตรียมสารละลายเมทิลีนบลู (Methylene blue ; MB)

สูตรโมเลกุล (Molecular) คือ $C_{16}H_{18}N_3SCl$

มวลโมเลกุล (Molecular Weight) คือ 319.85 g/mol

$$\frac{g}{MW} = \frac{MV}{1000}$$

$$g = \frac{2.5 \times 10^{-5} \times 1000}{1000} \times 100$$

$$g = 0.0079 \text{ g.}$$

ดังนั้น ชั่งเมทิลีนบลู เท่ากับ 0.0079 กรัม

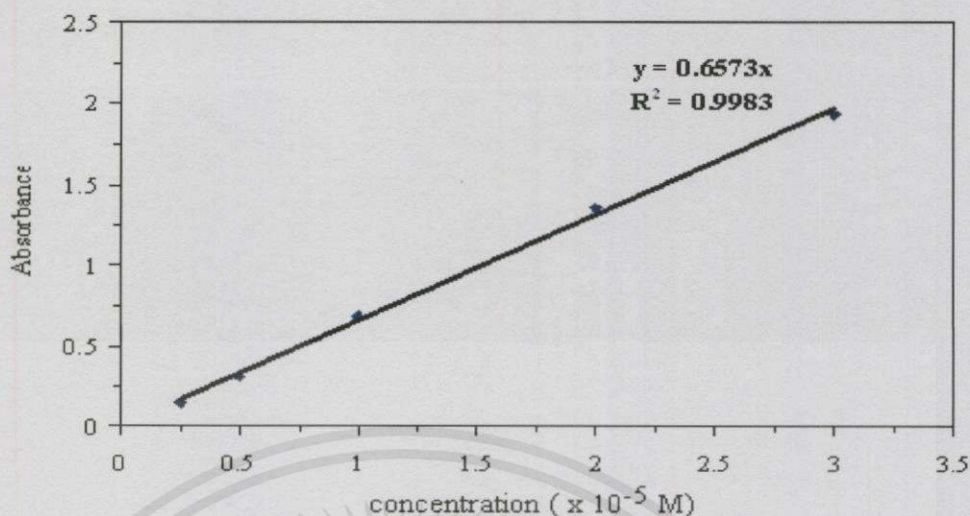
2. การคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม

จากการเตรียมสารผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ และการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูโดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงข้างต้นแล้ว จากนั้นจึงนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มาหาค่าดังต่อไปนี้

2.1 ค่าความเข้มข้นของเมทิลีนบลู

เพื่อนำค่าที่ได้ไปหาอัตราส่วนความเข้มข้นของเมทิลีนบลูขณะทำปฏิกิริยาและความเข้มข้นของเมทิลีนบลูเริ่มต้น โดยเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้กับกราฟมาตรฐานความเข้มข้นเมทิลีนบลู หรือคำนวณหาจากสมการเส้นตรงของกราฟมาตรฐานเมทิลีนบลู ดังรูปที่ ก-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-1 กราฟมาตรฐานของเมทิลีนบลู

โดย y คือ ค่าการดูดกลืนแสง
 x คือ ความเข้มข้นของเมทิลีนบลู

จากนั้นหาค่าอัตราส่วนความเข้มข้นของเมทิลีนบลูขณะทำปฏิกิริยากับความเข้มข้นของเมทิลีนบลูเริ่มต้น จากสมการ C/C_0 จากนั้นพลอตกราฟระหว่างเวลากับ C/C_0

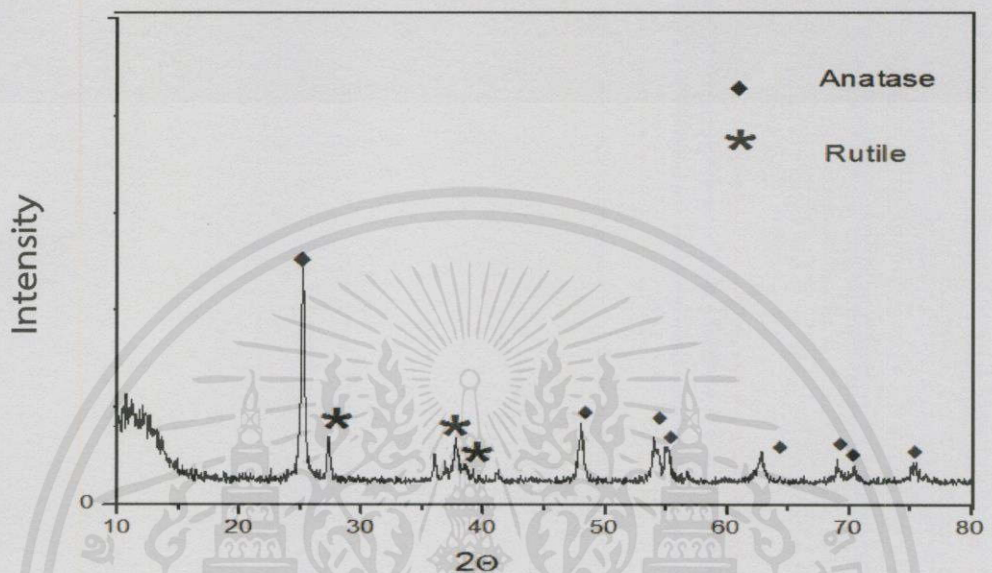
$$\text{หรือ จากสมการ } \% \text{ การกำจัดสีย้อม} = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100$$

A_0 คือ ค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้น
 A_t คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่เวลาใดๆ
 C_0 คือ ความเข้มข้นเมทิลีนบลูเริ่มต้น = 2.5×10^{-5} M
 C_t คือ ความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่เวลาใดๆ

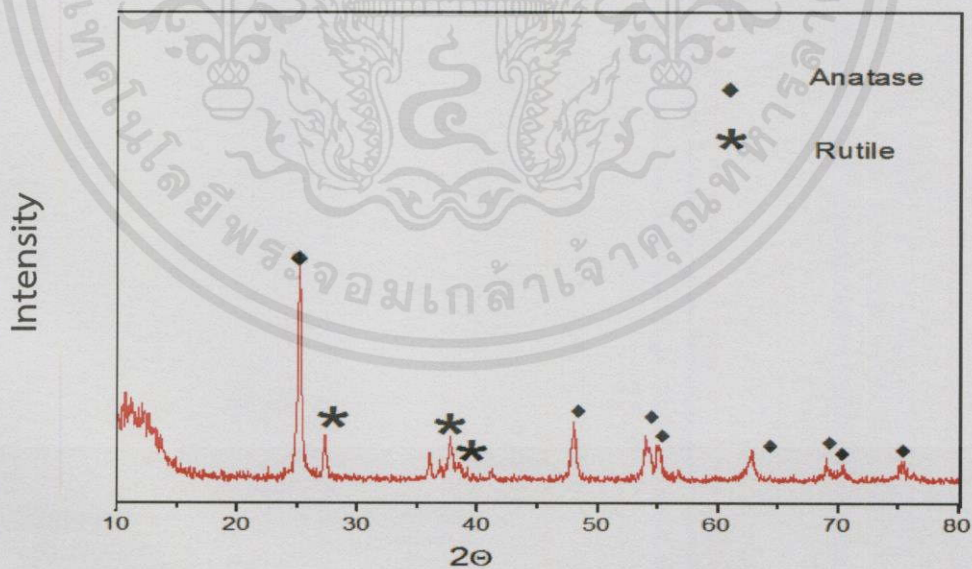
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

1. X-ray Diffractometer (XRD)

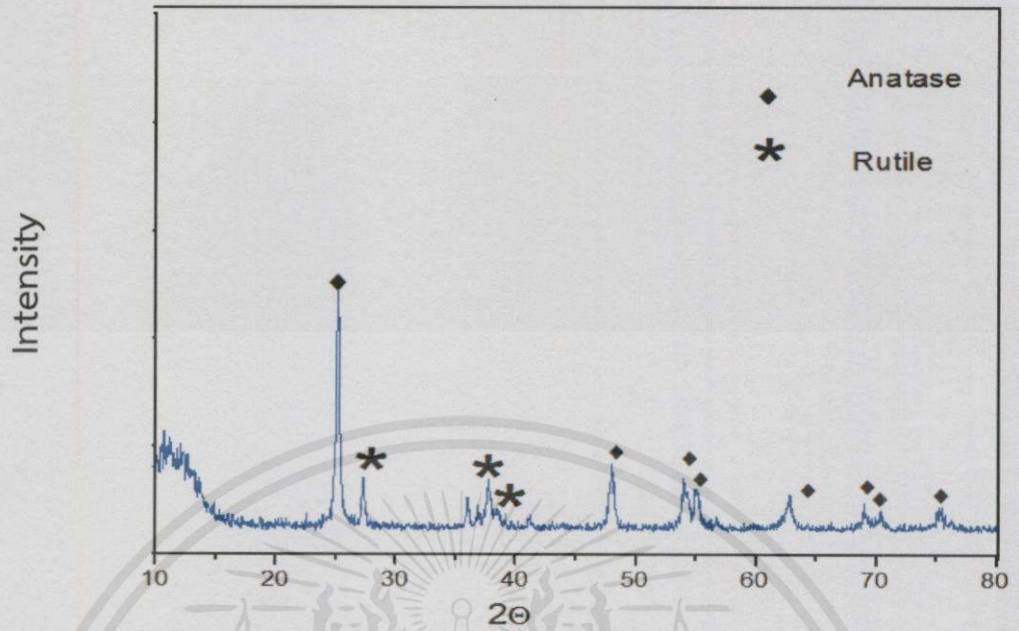


รูปที่ ข-1 รูปแบบ XRD ของไทเทเนียมไดออกไซด์

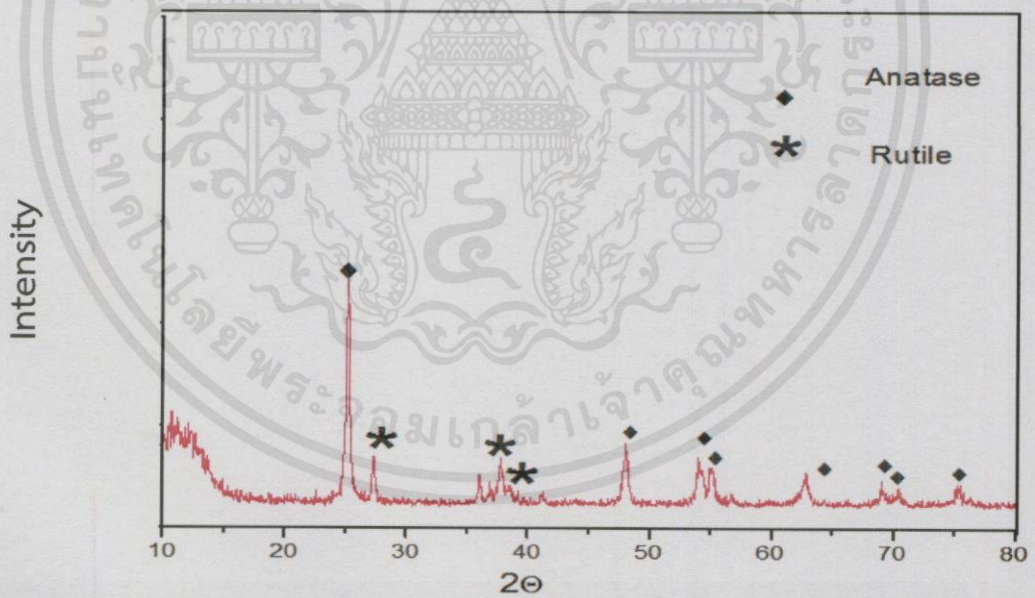


รูปที่ ข-2 รูปแบบ XRD ของ $\text{TiO}_2\text{-rGO}$ [2.5 mg]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในห้องปฏิบัติการเท่านั้นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

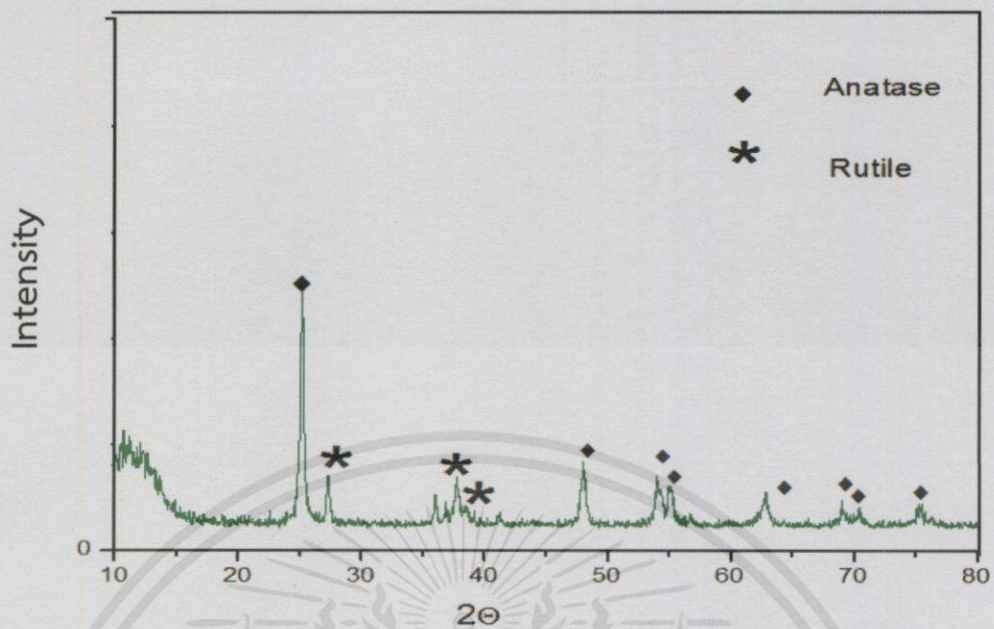


รูปที่ ข-3 รูปแบบ XRD ของ $\text{TiO}_2\text{-rGO}$ [5.0 mg]



รูปที่ ข-4 รูปแบบ XRD ของ $\text{TiO}_2\text{-rGO}$ [7.5 mg]

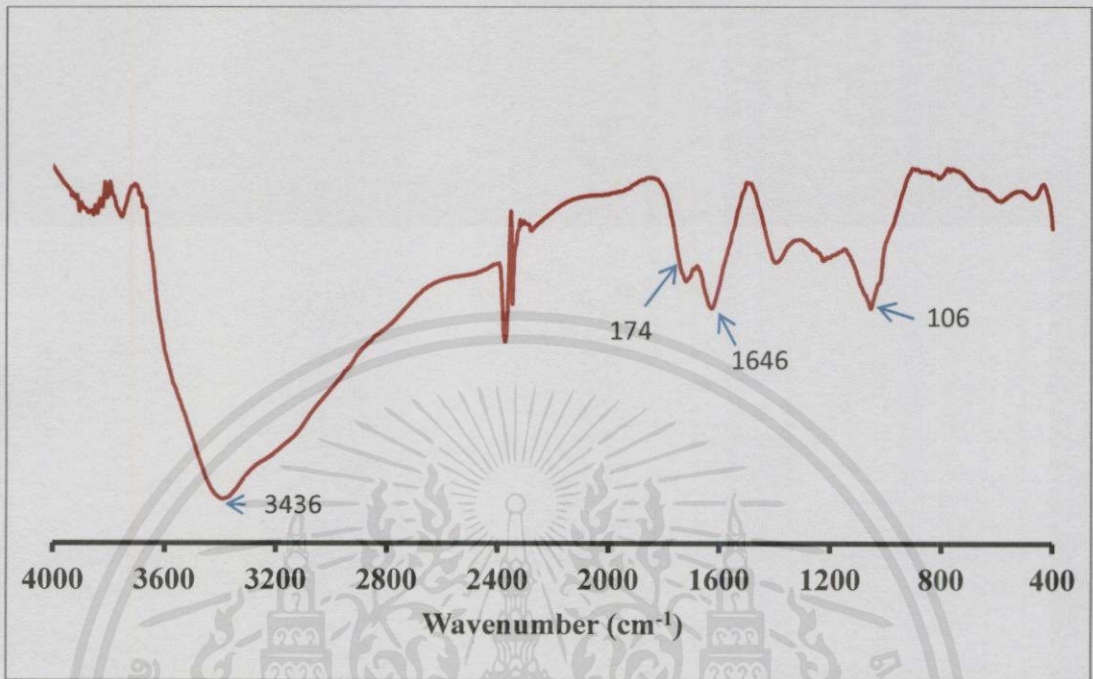
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



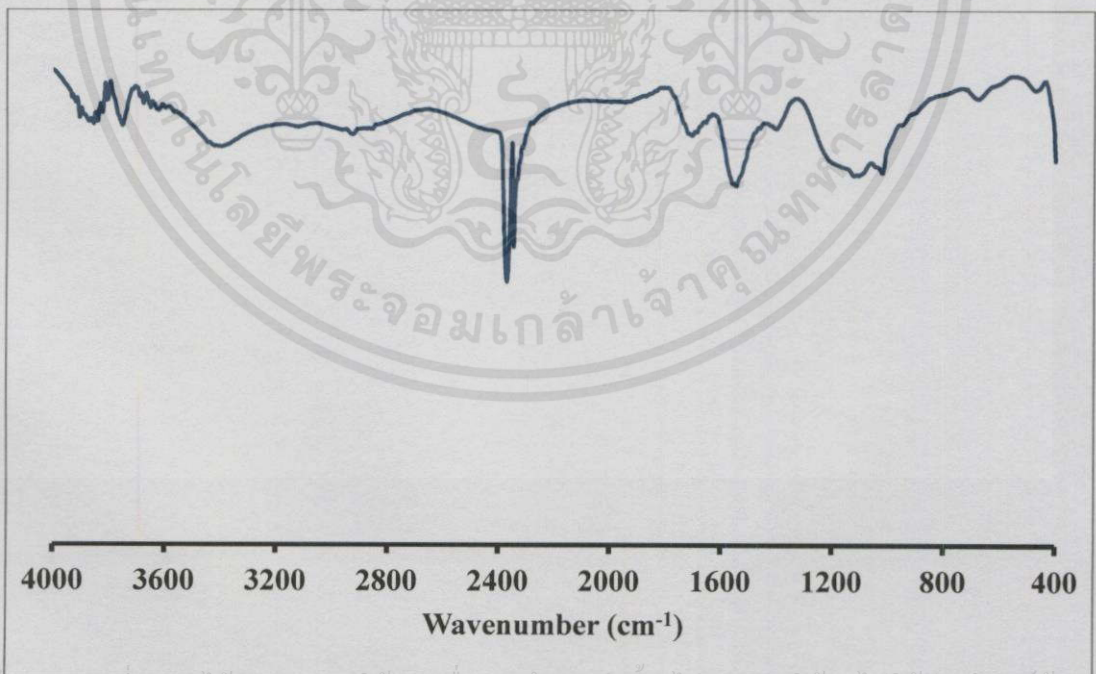
รูปที่ ข-5 รูปแบบ XRD ของ $\text{TiO}_2\text{-rGO}$ [10.0 mg]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR)

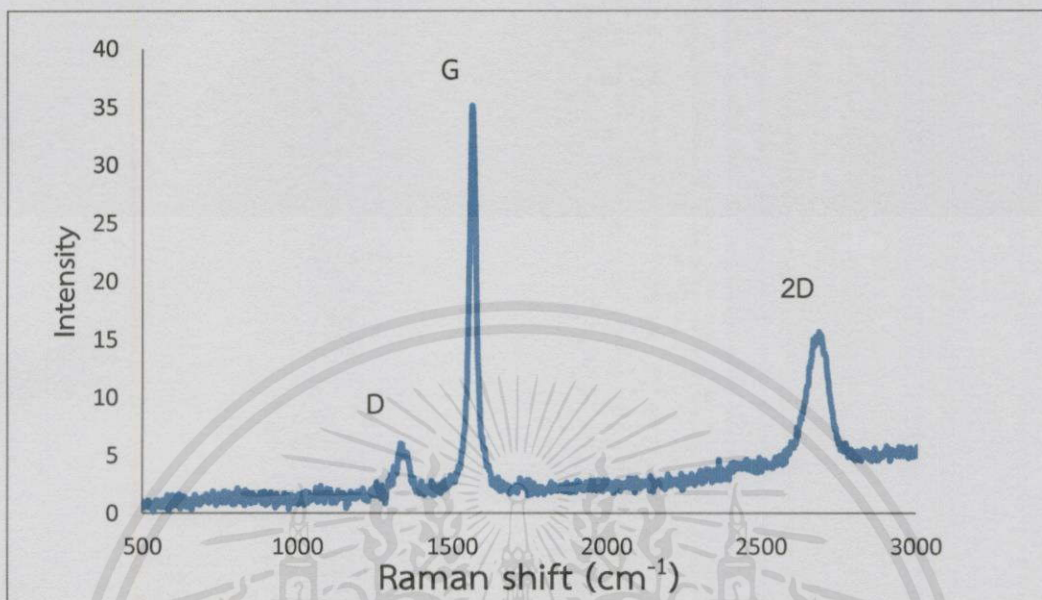


รูปที่ ข-6 FT-IR ของกราฟีนออกไซด์

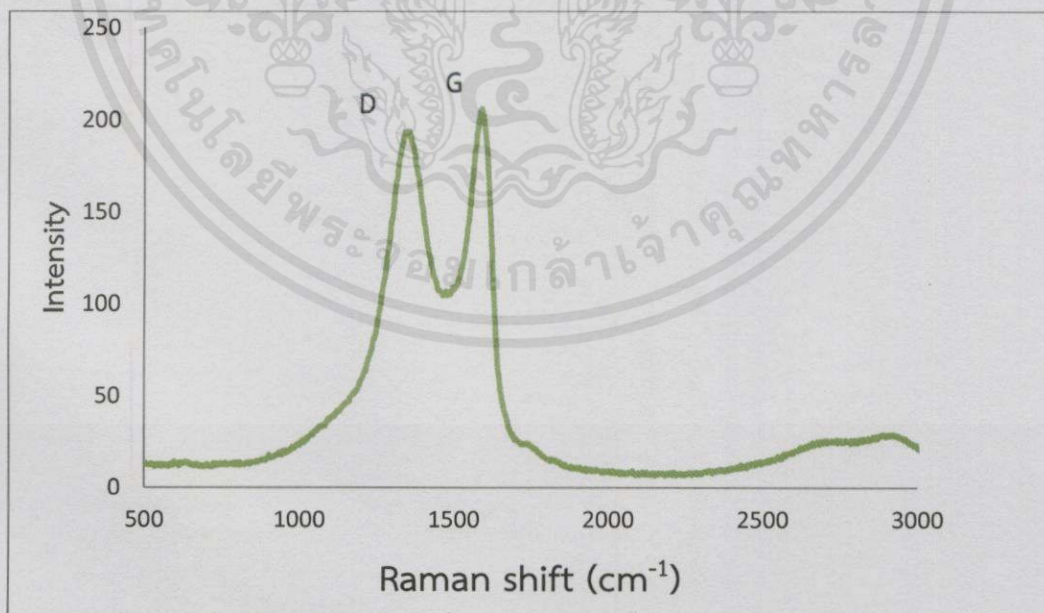


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดรูปที่ ข-7 FT-IR ของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

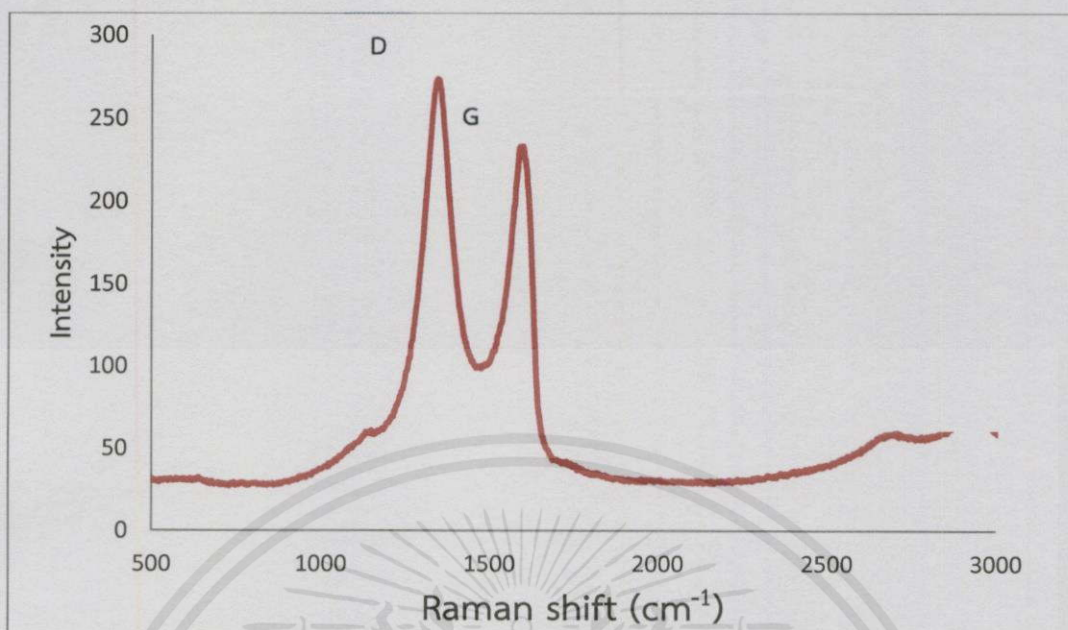
2. Raman Spectroscopy



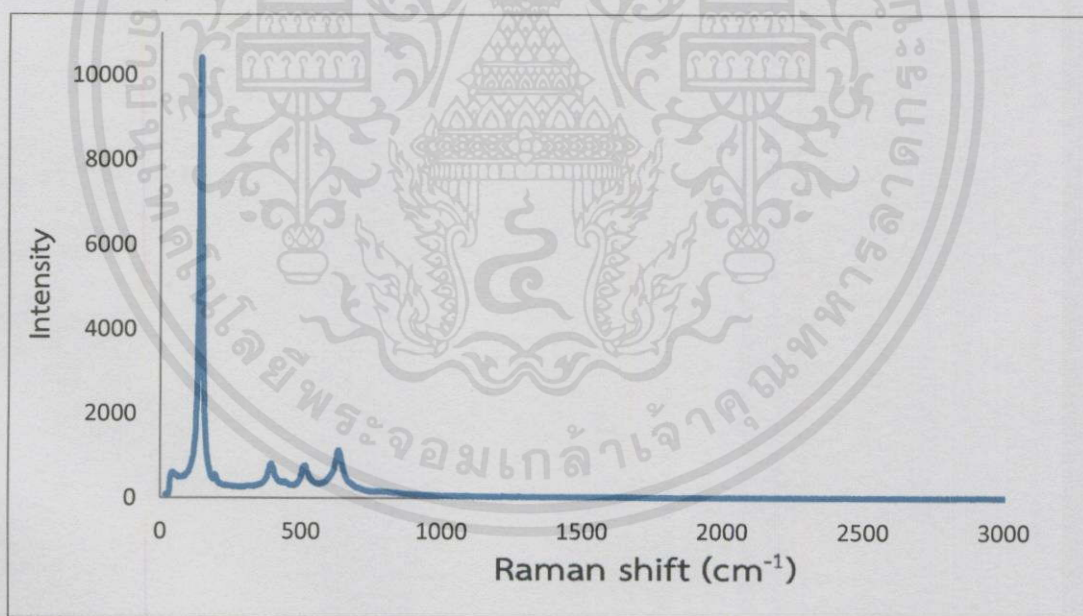
รูปที่ ข-8 กราฟรามาน สเปกตรัมของกราไฟต์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีรูปที่ ข-9 กราฟรามาน สเปกตรัมของกราฟีนออกไซด์ ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

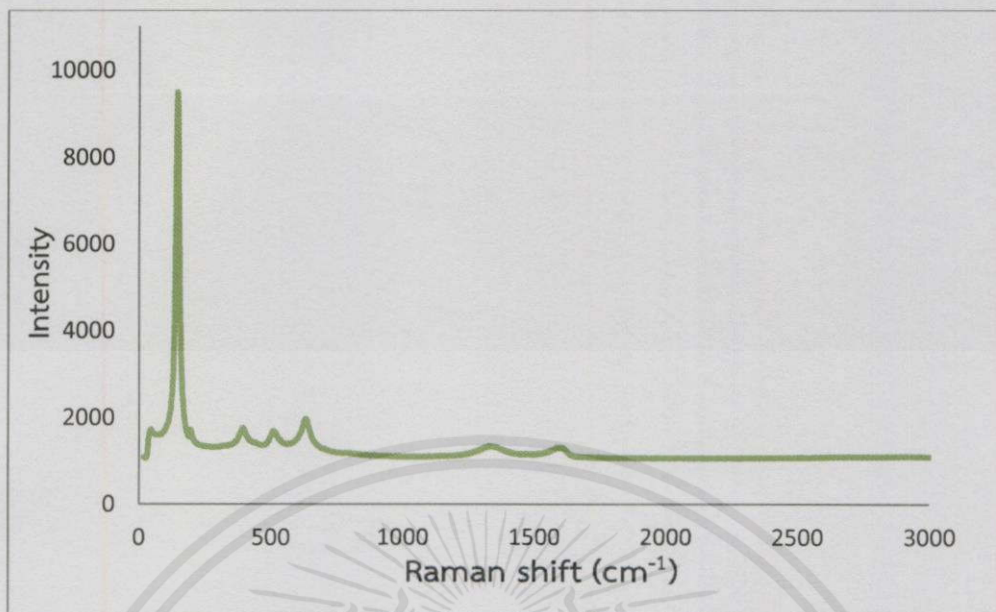


รูปที่ ข-10 กราฟรามาน สเปกตรัมของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

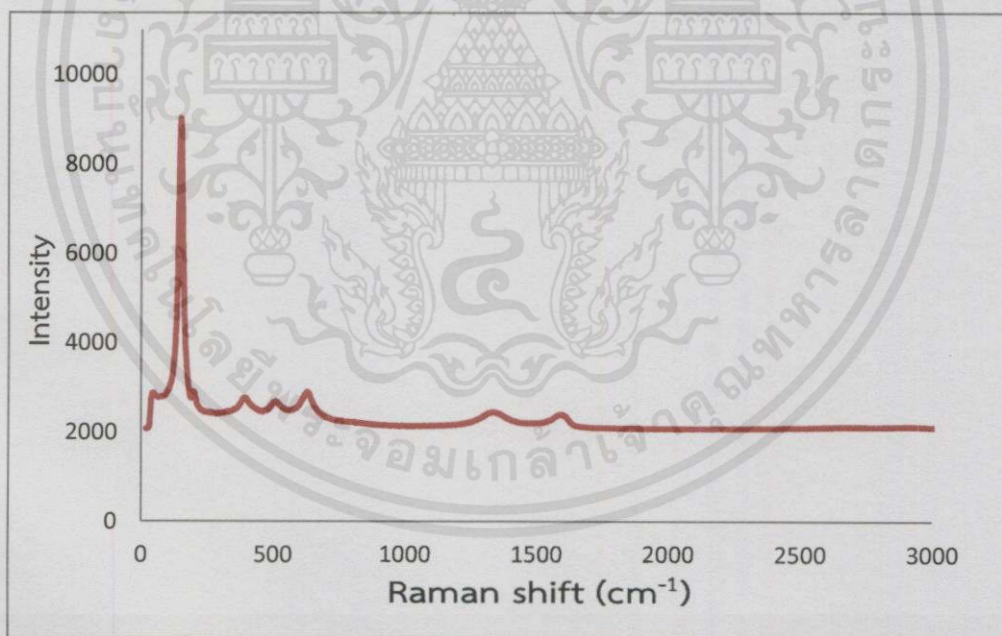


รูปที่ ข-11 กราฟรามาน สเปกตรัมของโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



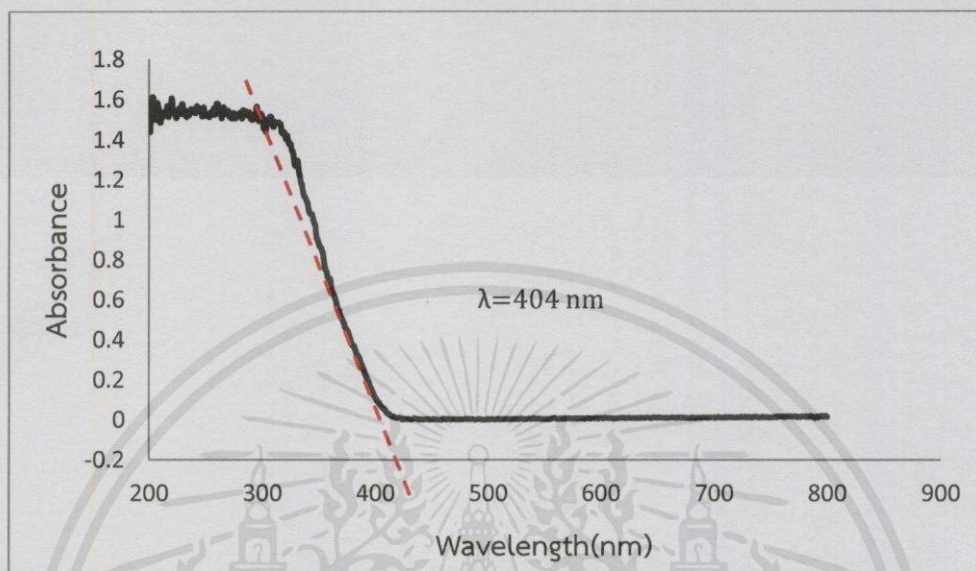
รูปที่ ข-12 กราฟรามาน สเปกตรัมของ TiO₂-rGO [2.5 mg]



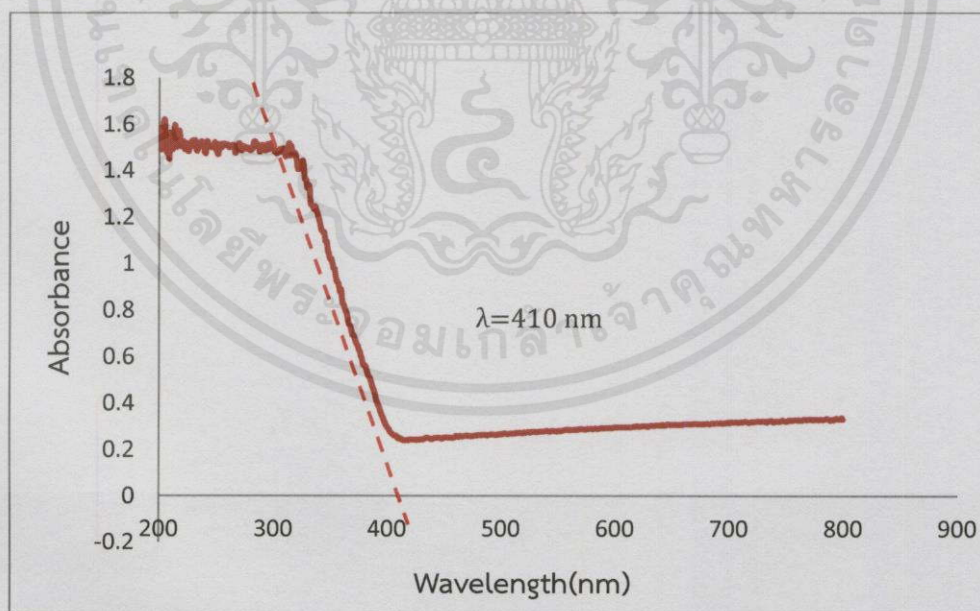
รูปที่ ข-13 กราฟรามาน สเปกตรัมของ TiO₂-rGO [10.0 mg]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4 UV-Visible Diffuse Reflectance Spectroscopy (DRS)

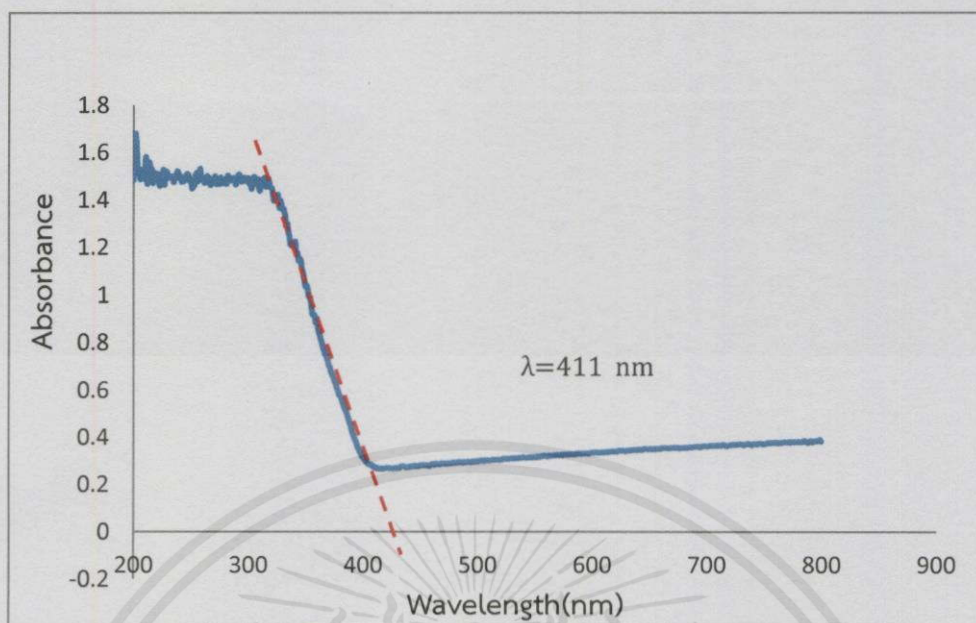


รูปที่ ข-14 DRS สเปกตรัมของไทเทเนียมไดออกไซด์ P25

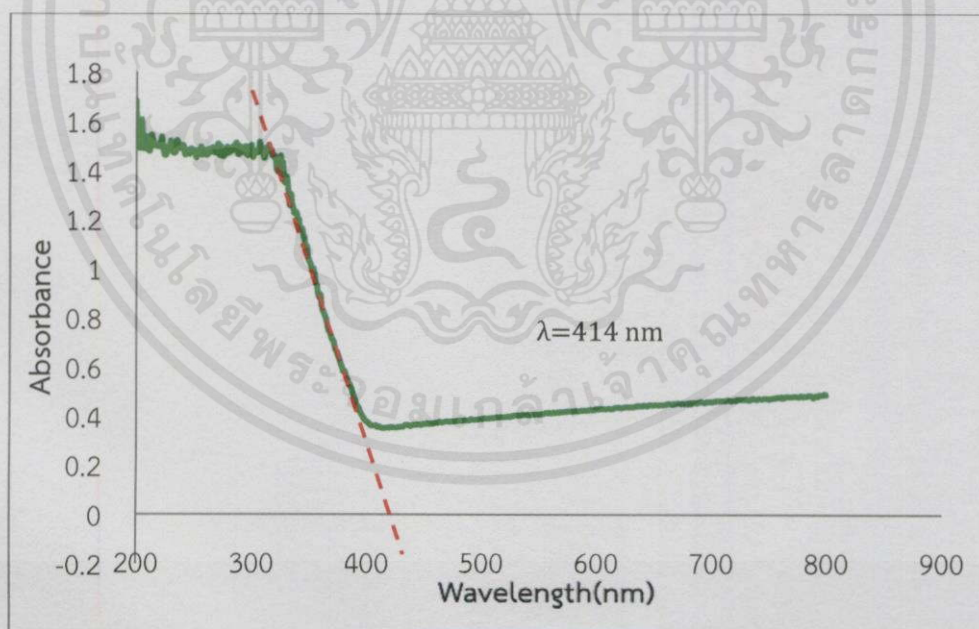


รูปที่ ข-15 DRS สเปกตรัมของ TiO₂-rGO [2.5 mg]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

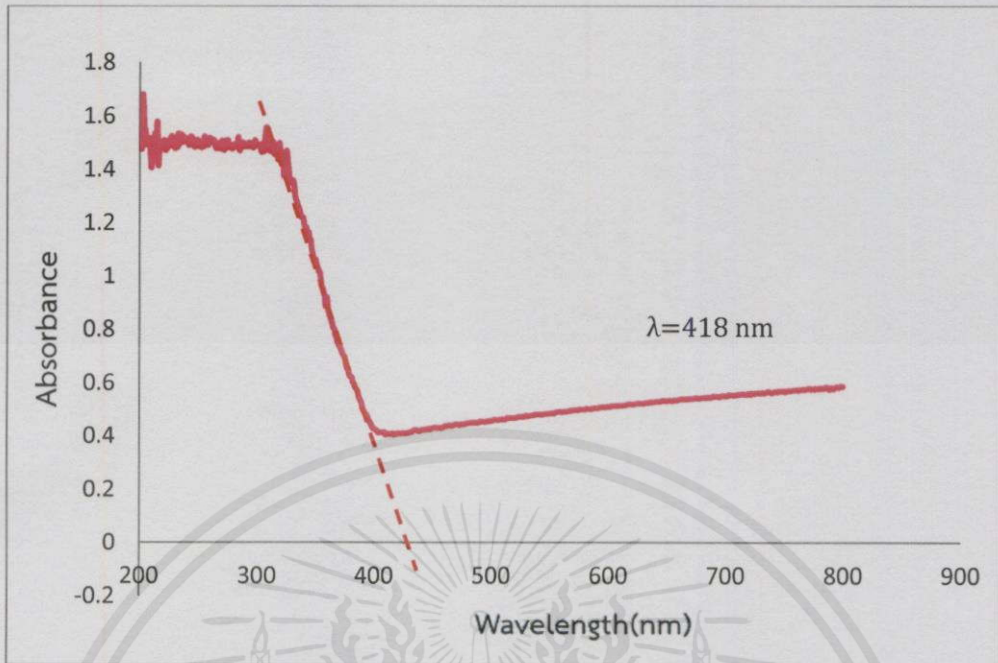


รูปที่ ข -16 DRS สเปกตรัม ของ $\text{TiO}_2\text{-rGO}$ [5.0 mg]



รูปที่ ข -17 DRS สเปกตรัม ของ $\text{TiO}_2\text{-rGO}$ [7.5 mg]

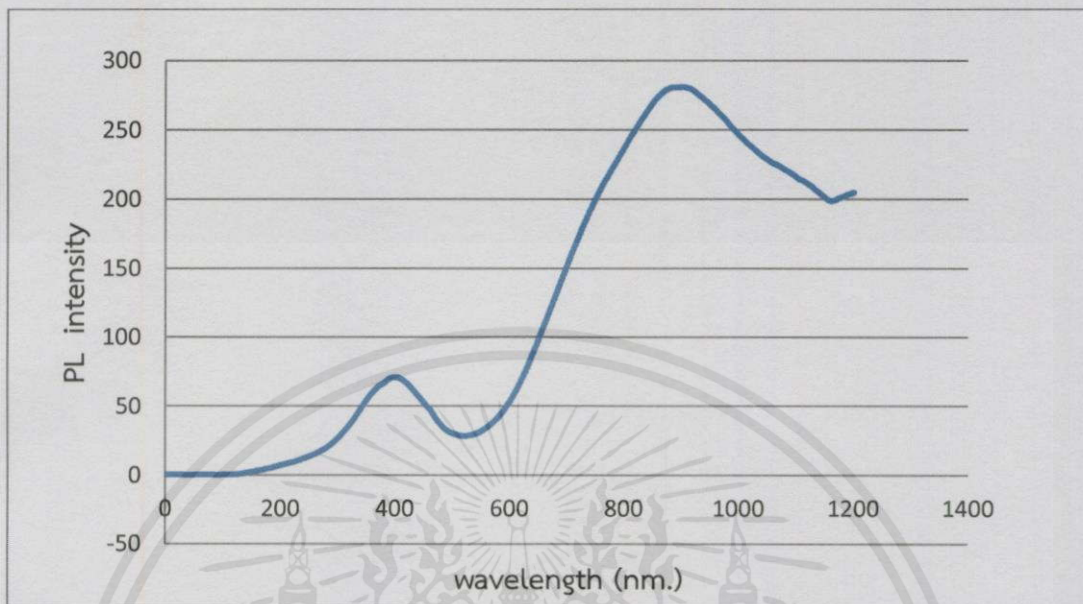
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



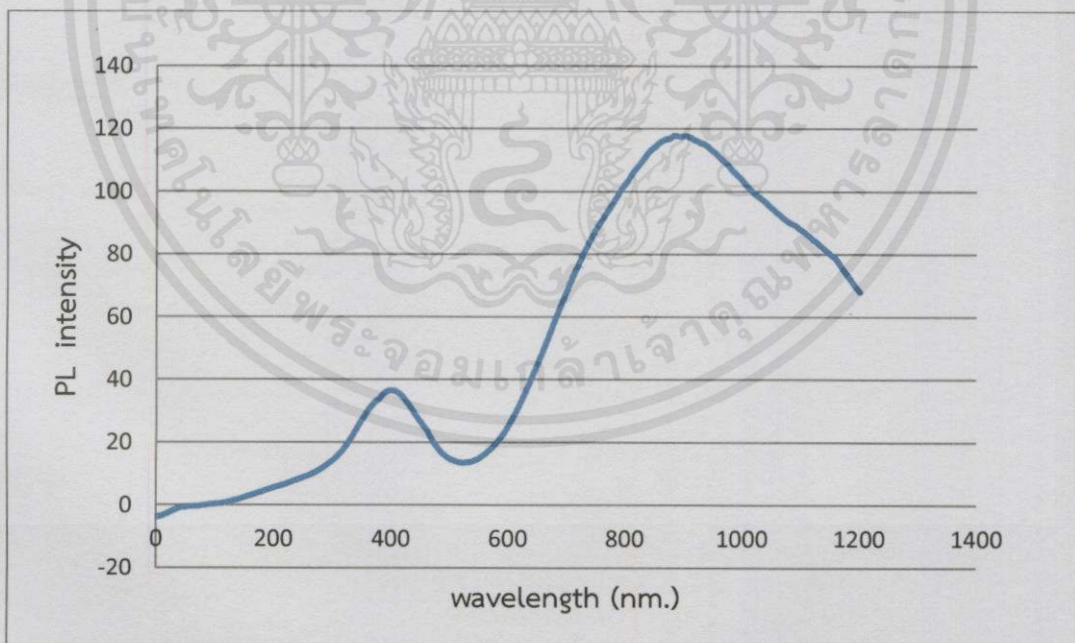
รูปที่ ข -18 DRS สเปกตรัม ของ $\text{TiO}_2\text{-rGO}$ [10.0 mg]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

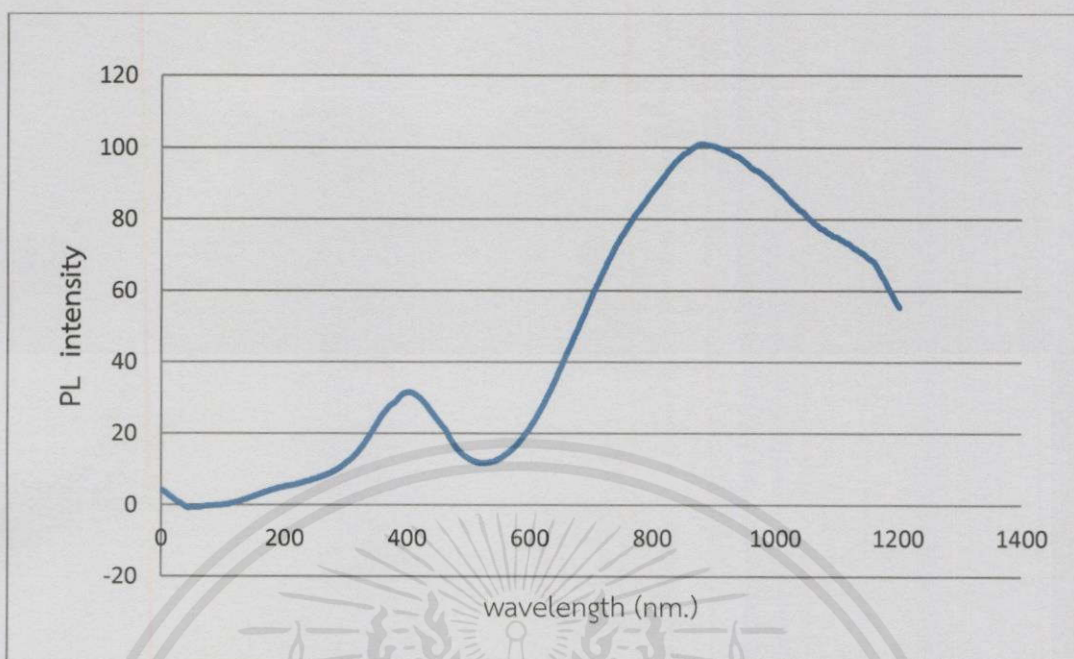
5. Photoluminescence Spectrometer, PL



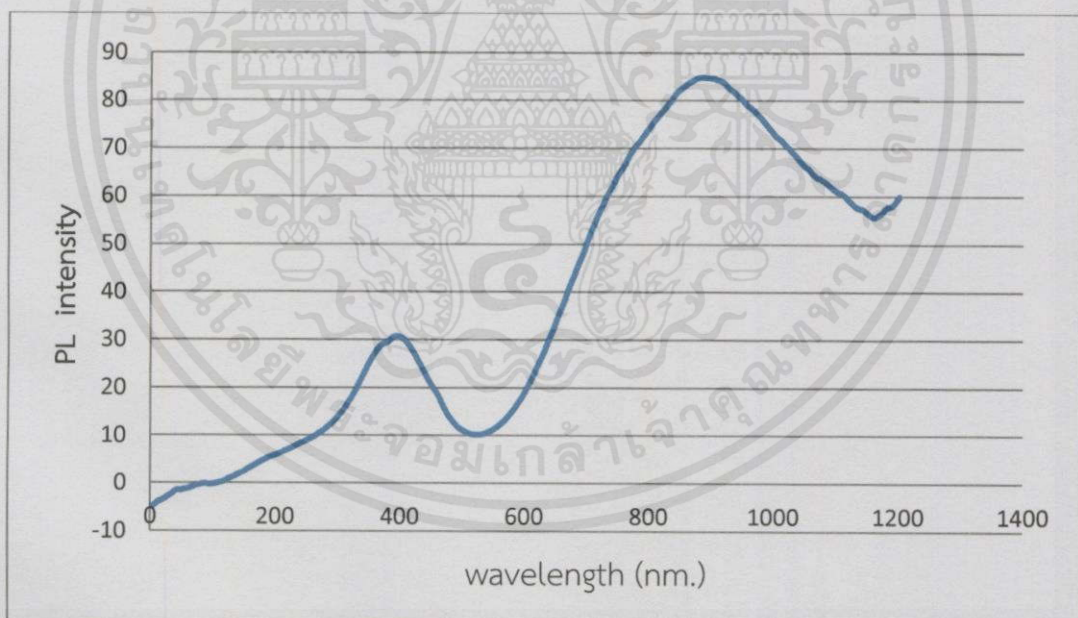
รูปที่ ข-19 สเปกตรัมของไทเทเนียมไดออกไซด์

รูปที่ ข-20 สเปกตรัมของ $\text{TiO}_2\text{-rGO}$ [2.5 mg]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับวงจำกัดและสิ่งบางอย่างนั้นไปออกนอกให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

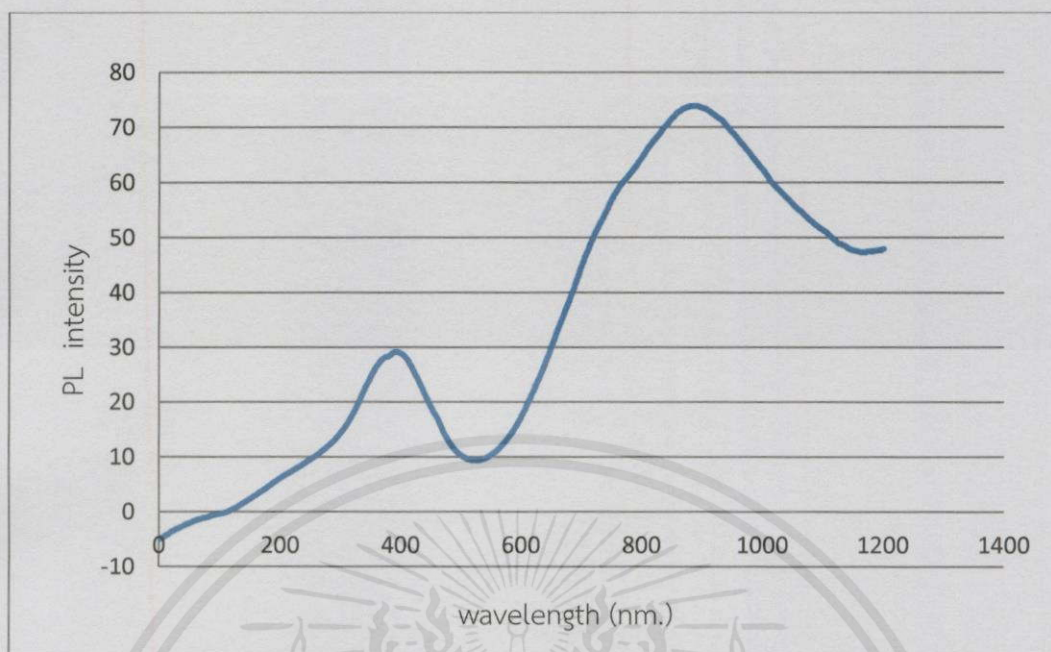


รูปที่ ข-21 สเปกตรัมของ $\text{TiO}_2\text{-rGO}$ [5.0 mg]



รูปที่ ข-22 สเปกตรัมของ $\text{TiO}_2\text{-rGO}$ [7.5 mg]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-23 สเปกตรัมของ TiO₂-rGO [10.0 mg]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

1. ศึกษาประสิทธิภาพกระบวนการเกิดโฟโตคะตะไลติกของตัวเร่งปฏิกิริยาผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงต่างๆ

ตารางที่ ค-1 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้ความมืด

เวลา (นาทีก)	ค่าการดูดกลืนแสง				
	TiO ₂	TiO ₂ -rGO [2.5 mg.]	TiO ₂ -rGO [5 mg.]	TiO ₂ -rGO [7.5 mg.]	TiO ₂ -rGO [10 mg.]
0	1.611	1.608	1.596	1.590	1.574
60	1.593	1.585	1.574	1.577	1.550
120	1.552	1.471	1.443	1.425	1.419
180	1.530	1.382	1.379	1.315	1.282

ตารางที่ ค-2 ตารางแสดงความเข้มข้นของเมทิลีนบลูภายใต้ความมืด

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นของสีย้อม (C) x10 ⁻⁵ M				
	TiO ₂	TiO ₂ -rGO [2.5 mg.]	TiO ₂ -rGO [5 mg.]	TiO ₂ -rGO [7.5 mg.]	TiO ₂ -rGO [10 mg.]
0	2.428	2.423	2.429	2.420	2.422
60	2.425	2.412	2.396	2.400	2.359
120	2.362	2.190	2.323	2.169	2.160
180	2.329	2.053	2.099	2.002	2.002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-3 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลีนบลูภายใต้แสงยูวี

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง				
	TiO ₂	TiO ₂ -rGO [2.5 mg.]	TiO ₂ -rGO [5 mg.]	TiO ₂ -rGO [7.5 mg.]	TiO ₂ -rGO [10 mg.]
0	1.623	1.608	1.597	1.586	1.561
30	1.124	1.269	1.407	1.427	1.366
60	1.073	1.179	1.143	0.969	0.893
90	0.900	0.932	0.947	0.752	0.675
120	0.789	0.838	0.889	0.622	0.561
150	0.685	0.763	0.750	0.643	0.4528
180	0.535	0.634	0.517	0.412	0.171

ตารางที่ ค-4 แสดงความเข้มข้นของเมทิลีนบลูภายใต้แสงยูวี

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสีย้อม (C) $\times 10^{-5}$ M				
	TiO ₂	TiO ₂ -rGO [2.5 mg.]	TiO ₂ -rGO [5 mg.]	TiO ₂ -rGO [7.5 mg.]	TiO ₂ -rGO [10 mg.]
0	2.469	2.446	2.429	2.412	2.374
30	1.710	1.930	2.140	2.171	2.078
60	1.632	1.793	1.738	1.474	1.358
90	1.369	1.417	1.440	1.144	1.026
120	1.200	1.274	1.352	0.946	0.853
150	1.042	1.160	1.141	0.978	0.688
180	0.813	0.964	0.786	0.626	0.260

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ค-5 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลีนบลูภายใต้แสงยูวี-วิสิเบิล

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง				
	TiO ₂	TiO ₂ -rGO [2.5 mg.]	TiO ₂ -rGO [5 mg.]	TiO ₂ -rGO [7.5 mg.]	TiO ₂ -rGO [10 mg.]
0	1.612	1.602	1.587	1.586	1.564
30	1.271	1.382	1.287	1.277	1.263
60	1.152	1.182	1.074	1.055	1.063
90	1.086	1.065	1.064	1.035	1.025
120	1.063	1.040	1.027	1.016	1.004
150	1.002	1.052	1.057	1.014	1.003
180	1.008	0.967	0.912	0.856	0.819

ตารางที่ ค-6 แสดงความเข้มข้นของเมทิลีนบลูภายใต้การให้แสงยูวี-วิสิเบิล

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสีย้อม (C) $\times 10^{-5}$ M				
	TiO ₂	TiO ₂ -rGO [2.5 mg.]	TiO ₂ -rGO [5 mg.]	TiO ₂ -rGO [7.5 mg.]	TiO ₂ -rGO [10 mg.]
0	2.452	2.437	2.414	2.412	2.379
30	1.933	2.102	1.958	1.942	1.921
60	1.752	1.798	1.633	1.605	1.617
90	1.652	1.620	1.618	1.574	1.559
120	1.617	1.582	1.562	1.545	1.527
150	1.524	1.600	1.608	1.542	1.525
180	1.533	1.471	1.387	1.302	1.246

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-7 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลีนบลูภายใต้แสงแสงอาทิตย์

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง				
	TiO ₂	TiO ₂ -rGO [2.5 mg.]	TiO ₂ -rGO [5 mg.]	TiO ₂ -rGO [7.5 mg.]	TiO ₂ -rGO [10 mg.]
0	1.603	1.595	1.582	1.566	1.566
30	0.234	0.205	0.189	0.155	0.155
60	0.095	0.067	0.055	0.053	0.053
90	0.063	0.035	0.042	0.035	0.035
120	0.035	0.030	0.028	0.026	0.026
150	0.024	0.024	0.019	0.016	0.016
180	0.018	0.0178	0.016	0.016	0.016

ตารางที่ ค-8 แสดงความเข้มข้นของเมทิลีนบลูภายใต้การให้แสงอาทิตย์

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสีย้อม(C) x10 ⁻⁵ M				
	TiO ₂	TiO ₂ -rGO [2.5 mg.]	TiO ₂ -rGO [5 mg.]	TiO ₂ -rGO [7.5 mg.]	TiO ₂ -rGO [10 mg.]
0	2.4387	2.4265	2.4068	2.3824	2.3824
5	0.3560	0.3118	0.2875	0.2358	0.2358
10	0.1445	0.1019	0.0836	0.0806	0.0806
15	0.0958	0.0532	0.0638	0.0532	0.0532
20	0.0532	0.0456	0.0425	0.0395	0.0395
25	0.0365	0.0365	0.0289	0.0243	0.0243
30	0.0273	0.0270	0.0243	0.0243	0.0243

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การศึกษาการใช้งานซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 - rGO [7.5 mg] ภายใต้แสงอาทิตย์

ตาราง ค-9 แสดงค่าการดูดกลืนแสง และ ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 - rGO [7.5 mg] ภายใต้แสงอาทิตย์ ของการใช้ซ้ำ

การใช้งาน(ครั้ง)	ค่าการดูดกลืนแสง	$C \times 10^{-5} M$
1	0.016	0.0243
ซ้ำ 1	0.065	0.0988
ซ้ำ 2	0.349	0.5309
ซ้ำ 3	0.629	0.9569
ซ้ำ 4	0.914	1.3905

3. การศึกษาการใช้งานซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง TiO_2 - rGO [7.5 mg] ภายใต้แสงยูวี-บีในสภาวะกรด-เบส (pH~3 และ10)

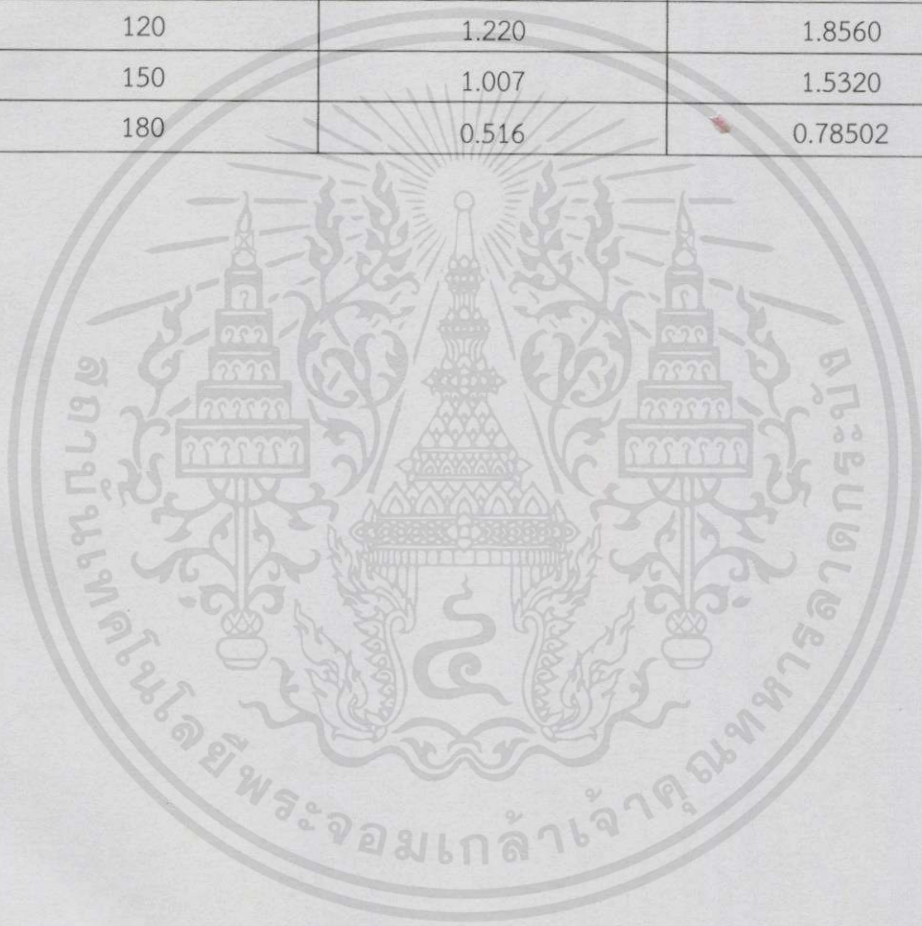
ตารางที่ ค-10 แสดงค่าการดูดกลืนแสงและค่าความเข้มข้นของเมทิลีนบลูในสภาวะกรด

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	$C \times 10^{-5} M$
0	1.637	2.50
30	1.624	2.47
60	1.610	2.45
90	1.618	2.46
120	1.606	2.44
150	1.618	2.46
180	1.603	2.44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น "ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า" ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-11 แสดงค่าการดูดกลืนแสงและค่าความเข้มข้นของเมทิลีนบลูในสภาวะเบส

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	$C \times 10^{-5} M$
0	1.405	2.1375
30	1.430	2.1755
60	1.563	2.3779
90	1.331	2.0249
120	1.220	1.8560
150	1.007	1.5320
180	0.516	0.78502



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้