

การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์/
ซีเรียออกไซด์/ไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อใช้ในการสลายสีย้อม
ด้วยแสง

DEVELOPMENT OF $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{TiO}_2$ PHOTOCATALYSTS
FOR PHOTODEGRADATION OF DYE



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ปีการศึกษา 2561

DEVELOPMENT OF $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{TiO}_2$ PHOTOCATALYSTS
FOR PHOTODEGRADATION OF DYE



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

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ACADEMIC YEAR 2018

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์/ซีเรียม-ออกไซด์/ไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อใช้ในการสลายสีย้อมด้วยแสง
 Development of g-C₃N₄/CeO₂/TiO₂ photocatalysts for photo-degradation of dye

ชื่อนักศึกษา นางสาวณัฐมล สุขพานิชย์ รหัสนักศึกษา 58050473
 นายปรเมษฐ์ อังวรวงค์ รหัสนักศึกษา 58050499

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา เคมี
คณะ วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา 2561
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ปานไพลิน สี่หาราช

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.นราธิป วิทยากร ประธานกรรมการ	
ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ กรรมการ	
ผศ.ดร.ปานไพลิน สี่หาราช กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์/ซีเรียมออกไซด์/ไทเทเนียมไดออกไซด์ ($g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{TiO}_2$) เพื่อใช้เป็นตัวเร่งในปฏิกิริยา-การสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยแสง			
ชื่อนักศึกษา	นางสาวณัฐมล	สุขพานิชย์	รหัสนักศึกษา	58050473
	นายปรเมษฐ์	อังวรารักษ์	รหัสนักศึกษา	58050499
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)			
ภาควิชา	เคมี			
คณะ	วิทยาศาสตร์			
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)			
ปีการศึกษา	2561			
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ปานไพลิน สีหาราช			

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและพัฒนาวัสดุที่จะใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเพื่อใช้เป็นตัวเร่งในปฏิกิริยาการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยแสง โดยเลือกใช้วัสดุหลักเป็นไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เกรดการค้าชนิด P25 และไทเทเนียมไดออกไซด์วัฏภาคอนาเทส จากนั้นนำมาปรับปรุงพื้นผิวด้วยวิธีโซโนเคมี (sonochemistry) ที่สภาวะเบส เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงแล้วจึงทำการปรับปรุงโดยทำเป็นวัสดุผสมร่วมกับกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์/ซีเรียมออกไซด์/ไทเทเนียมไดออกไซด์ ($g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{TiO}_2$) โดยการเติมซีเรียมออกไซด์ (CeO_2) ร้อยละ 1 และกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ ($g\text{-C}_3\text{N}_4$) ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จากการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยวิธีโซโนเคมีทำให้ความเป็นผลึกของ TiO_2 ลดลง จากการตรวจสอบพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุน (BET) พบว่า TiO_2 ที่ผ่านปรับปรุงพื้นผิวแล้วมีปริมาณพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนเพิ่มมากขึ้น และจากการศึกษาค่าแถบพลังงาน (E_g) ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-DRS) พบว่าเมื่อไทเทเนียมไดออกไซด์ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวแล้วจะมีค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ลดลง เมื่อนำมาทำเป็นวัสดุผสมจากการศึกษาด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตเมทรี (FT-IR) พบพีกเอกลักษณ์ Ti-O-Ti ของ TiO_2 และยังพบพีกเอกลักษณ์ของ $g\text{-C}_3\text{N}_4$ คือ C-N และ C=N แต่ไม่พบพีกของ CeO_2 อาจเป็นผลมาจากมีปริมาณน้อย และการเติม CeO_2 และ $g\text{-C}_3\text{N}_4$ ส่งผลให้วัสดุผสมมีค่า E_g ลดลง ซึ่งผลที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นว่าอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์เกาะอยู่บนกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่มีลักษณะเป็นเกล็ด ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) พบว่าอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์กระจายตัวอยู่บนกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ โดยจากภาพถ่าย TEM ไม่สามารถระบุถึงรูปร่างและการกระจายตัวของซีเรียมออกไซด์ได้อย่างชัดเจน เนื่องจากซีเรียมออกไซด์มีเอกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนักศึกษาเห็นว่าเว็บไซต์ของงานวิจัยนี้ไม่เหมาะสมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดอนุภาคที่เล็กและยังมีการเติมซีเรียมออกไซด์ลงไปปริมาณที่น้อย จากนั้นได้นำตัวเร่งมาวัดประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลินบลู พบว่าวัสดุผสม $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ P25 มีประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตดีที่สุด โดยมีประสิทธิภาพรวมร้อยละ 49.59 และค่าอัตราการสลายสีย้อม (k_{app}) 0.0019 ซึ่งเป็นผลมาจากการปรับปรุงผิวด้วยวิธีโซโนเคมี และการเติม $g\text{-C}_3\text{N}_4$ และ CeO_2 ทำให้ได้วัสดุผสมที่มีพื้นที่ผิวสูงและมีค่า E_g ที่ต่ำโดยมีค่า 2.92 eV

คำสำคัญ : ตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง สลายสีย้อม วัสดุผสม โซโนเคมี โทเทเนียมไดออกไซด์ ซีเรียมออกไซด์ กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Development of $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{TiO}_2$ photocatalysts for photo-degradation of dye		
Students	Miss Nattamon Sukpanit	Student ID 58050473	
	Mr. Poramet Aungwarawong	Student ID 58050499	
Degree	Bachelor of Science (INDUSTRIAL CHEMISTRY)		
Department	Chemistry		
Faculty	Science		
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
Academic Year	2018		
Advisor	Assistant Professor Dr.Panpailin Seeharaj		

Abstract

This research studied to enhance photocatalytic performance of titanium dioxide commercial grade (TiO_2 , P25) and anatase for photodegradation of methylene blue. Firstly, TiO_2 surface was modified with high intensity ultrasonic wave in basic solution. To improve photocatalytic efficiency, TiO_2 nanocomposites were prepared by adding of 1 wt% cerium oxide (CeO_2) and 20. wt% graphitic carbon nitride ($g\text{-C}_3\text{N}_4$). X-ray diffractometry (XRD) results indicated that the degree of crystallinity of modified TiO_2 was reduced and BET results showed that the modified TiO_2 had higher pore size and surface area. Then TiO_2 nanocomposites characterized by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) showed vibration of a Ti-O-Ti for TiO_2 and C-N and C=N for $g\text{-C}_3\text{N}_4$ but the vibration related to CeO_2 did not appear due to the small quantity. Results from scanning electron microscopy (SEM) of TiO_2 nanocomposites showed that TiO_2 particles were distributed on flake-like $g\text{-C}_3\text{N}_4$ surface. According to results from transmission electron microscopy (TEM) showed that TiO_2 particles were distributed on flake-like $g\text{-C}_3\text{N}_4$ surface and TEM results cannot clearly identified structure and particles distribution of CeO_2 due to CeO_2 has small particle size and small quantity. Optical properties analysed by UV-Vis and fluorescence spectroscopy indicated that the band gap (E_g) and electron-hole recombination rate were decreased after surface modification and incorporation TiO_2 with $g\text{-C}_3\text{N}_4$ and CeO_2 . The $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ P25 showed the best methylene blue (MB) dye photo-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

degradation efficiency under ultraviolet irradiation by having total efficiency 49.59% and k_{app} 0.0019

Keywords : Photodegradation, Nanocomposite, Sonochemistry, Titanium dioxide, Cerium oxide, Graphitic carbon nitride



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์จากผู้มีอุปการะคุณหลายท่าน ดังนี้

ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ที่ปรึกษาของโครงการพิเศษ ผศ.ดร.ปานไพลิน สีหาราช อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่กรุณาคอยให้คำปรึกษา แก้ไขปัญหาต่าง ๆ ตลอดจนคอยช่วยให้คำชี้แนะแนวทาง หลักการและวิธีการต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างสูง จนทำให้โครงการพิเศษเล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ รศ.ดร.นราธิป วิทยากร ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการให้ใช้เครื่อง-ไฮโนเคมีและช่วยให้คำแนะนำต่าง ๆ เกี่ยวกับการเตรียมวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นประโยชน์อย่างสูงต่อโครงการพิเศษเล่มนี้

ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ ดร.ชวัลย์ ศรีวงษ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือให้คำแนะนำในขั้นตอนการสังเคราะห์กราฟิติคาร์บอนไนไตรด์และวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ตลอดจนการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจนโครงการพิเศษสามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณพี่ ๆ นักวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่ที่ดูแลเครื่องมือทุกท่าน ที่ปริญาโทที่กำลังศึกษา-อยู่ที่คอยให้ความช่วยเหลือต่าง ๆ คอยให้คำแนะนำ ช่วยสอนการใช้เครื่องมือทุกอย่างเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณบิดา มารดา และเพื่อน ๆ ที่ได้ให้กำลังใจและเป็นแรงผลักดันในการทำโครงการพิเศษนี้เสมอมา

ผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่าโครงการพิเศษเล่มนี้จะเป็นประโยชน์ต่อท่านผู้อ่านไม่ว่ามากหรือน้อยเพียงใด ผู้จัดทำขอยกความดีความชอบนี้ให้แก่คณาจารย์ทุกท่านที่คอยดูแลช่วยเหลือจนโครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี หากเกิดความผิดพลาดประการใดผู้จัดทำต้องขออภัยมา ณ ที่นี้

ณัฐมล สุขพานิชย์
ประเมษฐ์ อังวรารวงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง.....	4
2.1.1 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาทางแสงในการย่อยสลายสารอินทรีย์.....	5
2.1.2 กลไกของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในการเปลี่ยนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	6
2.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง.....	7
2.2.1 วัสดุสารกึ่งตัวนำ.....	8
2.3 วัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่ใช้ในการสลายสีย้อมด้วยแสง.....	10
2.3.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์.....	10
2.3.2 การปรับปรุงสมบัติการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์..	12
2.3.2.1 การปรับปรุงพื้นผิวและโครงสร้างจุลภาค.....	12
2.3.2.2 การเติมสารเติมแต่ง.....	13
2.3.2.2.1 ซีเรียมออกไซด์.....	14
2.3.2.2.2 กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์.....	17
2.4 วิธีการปรับปรุงวัสดุตัวเร่งทางแสง.....	23
2.4.1 เทคนิคโซโนเคมี.....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	25
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	25
3.2 สารเคมี.....	26
3.3 การสังเคราะห์วัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง.....	27
3.3.1 การปรับปรุงพื้นผิวนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์	27
3.3.2 การเตรียมวัสดุกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์/ซีเรียมออกไซด์/ไทเทเนียมไดออกไซด์ (P25) ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว.....	28
3.3.2.1 การสังเคราะห์ซีเรียมออกไซด์ (CeO ₂)	28
3.3.2.2 การเตรียมกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ (g-C ₃ N ₄)	29
3.3.2.3 การเตรียมวัสดุกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์/ซีเรียมออกไซด์/ไทเทเนียมไดออกไซด์ (P25) ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว.....	30
3.4 การศึกษาสมบัติการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง.....	31
3.4.1 การเตรียมกราฟมาตรฐานของสีย้อมเมทิลีนบลู.....	31
3.4.2 การศึกษาการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู.....	32
3.5 การตรวจสอบสมบัติของวัสดุผสมกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์/ซีเรียมออกไซด์/ไทเทเนียมไดออกไซด์ (P25) ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว.....	33
3.5.1 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน.....	33
3.5.2 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	35
3.5.3 การตรวจสอบสมบัติทางแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์.....	36
3.5.4 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.....	36
3.5.5 การตรวจสอบพื้นที่ผิวและรูพรุน โดยใช้สมการของ BET.....	37
3.5.6 การตรวจสอบสมบัติทางแสงด้วยเครื่องฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรมิเตอร์.....	38
3.5.7 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	39
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	41
4.1 การเตรียมวัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง.....	41
4.1.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกและโครงสร้างโมเลกุล.....	41
4.1.1.1 การปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีโซโนเคมี.....	41
4.1.1.2 ซีเรียมออกไซด์.....	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.1.3 กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์.....	46
4.1.2 การศึกษาพื้นที่ผิวและรูพรุน.....	47
4.1.3 การศึกษาสัณฐานวิทยา.....	48
4.1.3.1 กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์.....	48
4.1.4 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบ.....	49
4.1.4.1 กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์.....	49
4.1.5 การศึกษาสมบัติทางแสง.....	51
4.1.5.1 การปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีโซโนเคมี... 51	
4.1.5.2 ซีเรียมออกไซด์.....	55
4.1.5.3 กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์.....	57
4.2 การเตรียมวัสดุผสมตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์/ซีเรียมออกไซด์/ ไทเทเนียมไดออกไซด์.....	59
4.2.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกและโครงสร้างโมเลกุล.....	59
4.2.2 การศึกษาพื้นที่ผิวและรูพรุน.....	63
4.2.3 การศึกษาสัณฐานวิทยา.....	64
4.2.4 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบ.....	67
4.2.5 การศึกษาสมบัติทางแสง.....	70
4.3 การศึกษาประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู.....	75
4.3.1 การสร้างกราฟมาตรฐาน.....	75
4.3.2 การศึกษาประสิทธิภาพการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอ- เลต.....	76
4.3.3 การศึกษาประสิทธิภาพการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล... 84	
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	87
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	87
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	89
เอกสารอ้างอิง.....	90
ภาคผนวก.....	96
ภาคผนวก ก การคำนวณสารที่ใช้ในการสังเคราะห์.....	96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ข การคำนวณหาขนาดผลึก.....	98
ภาคผนวก ค การคำนวณธาตุองค์ประกอบตามทฤษฎี.....	100
ภาคผนวก ง การคำนวณหาค่าพลังงานช่องว่างระหว่างชั้นพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง.....	102
ภาคผนวก จ การคำนวณปริมาณสารที่ใช้ในการเตรียมสารมาตรฐาน.....	107
ภาคผนวก ฉ การคำนวณประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง.....	108
ภาคผนวก ช รูปภาพจากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM).....	109



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงอัตราส่วน (wt%) และปริมาณ (g, ml) ของสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง	31
3.2 ความเข้มข้นและปริมาตรที่ใช้ในการเตรียมสารละลายมาตรฐาน	32
4.1 ปริมาณพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของวัสดุอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และอนาเทสก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นที่ผิว	48
4.2 ปริมาณพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของวัสดุกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ก่อนและหลังปรับปรุงพื้นที่ผิว	48
4.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบในตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง	49
4.4 ค่าแถบช่องว่างระหว่างพลังงานจากวิธี Tuac's และค่าเริ่มต้นของการดูดกลืนแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นที่ผิว	53
4.5 ค่าแถบช่องว่างระหว่างพลังงานจากวิธี Tuac's และค่าเริ่มต้นของการดูดกลืนแสงของซีเรียมออกไซด์และกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์	58
4.6 ปริมาณพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของวัสดุผสมกลุ่มไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และวัสดุผสมกลุ่มไทเทเนียมไดออกไซด์อนาเทสก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นที่ผิว	63
4.7 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบในตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง	67
4.8 ค่าแถบช่องว่างระหว่างพลังงานจากวิธี Tuac's และค่าเริ่มต้นของการดูดกลืนแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ที่ผ่านการเจือซีเรียมออกไซด์และกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์	72
4.9 ค่าแถบช่องว่างระหว่างพลังงานจากวิธี Tuac's และค่าเริ่มต้นของการดูดกลืนแสงของซีเรียมออกไซด์และกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์	73
4.10 แสดงประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูของไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และวัสดุอนาเทส เมื่อทำการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลา 5 ชั่วโมง	79
4.11 แสดงประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูของวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และวัสดุอนาเทส เมื่อทำการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลา 5 ชั่วโมง	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	5
2.2 โครงสร้างของสีย้อมเมทิลีนบลู.....	6
2.3 การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคอนเวอร์ชันของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	7
2.4 ผลกระทบที่ได้จากปฏิกิริยาโฟโตคอนเวอร์ชัน.....	7
2.5 ทฤษฎีแถบพลังงานของวัสดุ.....	8
2.6 สารกึ่งตัวนำประเภท n-type.....	9
2.7 สารกึ่งตัวนำประเภท p-type.....	9
2.8 โครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์วัฏภาคแบบอนาเทส.....	10
2.9 โครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์วัฏภาคแบบรูไทล์.....	11
2.10 โครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์วัฏภาคแบบบรูคไคท์.....	11
2.11 พื้นผิวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์วัฏภาคอนาเทสที่แตกออกเป็นแผ่นขนาดนาโนเมตร.....	13
2.12 โครงสร้างแบบฟลูออไรด์ของซีเรียมออกไซด์.....	14
2.13 กระบวนการสลายสีย้อมคองโกเรด ภายใต้แสงวิสิเบิลด้วยการเจือซีเรียมออกไซด์ในอัตราส่วนต่าง ๆ.....	15
2.14 ยูวี-วิสิเบิลสเปกตร้าของไทเทเนียมไดออกไซด์ก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นผิวและวัสดุผสม.....	16
2.15 แผนภาพการกระตุ้นของอิเล็กตรอนในวัสดุผสมซีเรียมออกไซด์/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/ไทเทเนียม-ไดออกไซด์เมื่อได้รับพลังงานกระตุ้นทำให้เกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนแบบชั้นบันได.....	17
2.16 ลักษณะโครงสร้างของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์.....	18
2.17 กลไกปฏิกิริยาการเกิดกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์.....	18
2.18 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์จากเมลามีนและยูเรีย.....	19
2.19 ภาพถ่าย TEM ของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่สังเคราะห์จากเมลามีนและยูเรีย.....	20
2.20 กราฟปริมาณการเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์.....	20
2.21 ยูวี-วิสิเบิลสเปกตร้าและค่าแถบช่องว่างระหว่างพลังงานของวัสดุผสม.....	22
2.22 ประสิทธิภาพการสลายสีย้อมของเมทิลออเรนจ์และฟีนอลภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล.....	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.23 ขั้นตอนการระเบิดเย็นของฟองอากาศในกระบวนการโซเคมี.....	24
2.24 เจ็ทสตรีมที่เกิดขึ้นจากการแตกตัวของฟองแก๊สในของเหลว.....	24
3.1 แผนผังการปรับปรุงพื้นที่ผิวอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์.....	27
3.2 แผนผังแสดงการสังเคราะห์ซีเรียมออกไซด์.....	28
3.3 แผนผังแสดงการเตรียมกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์.....	29
3.4 แผนผังการเตรียมวัสดุกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์/ซีเรียมออกไซด์/ไทเทเนียมไดออกไซด์.....	30
3.5 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน.....	34
3.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน.....	34
3.7 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	35
3.8 เครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	35
3.9 เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์.....	36
3.10 เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์.....	37
3.11 เครื่องตรวจสอบพื้นที่ผิวและรูพรุน.....	38
3.12 การเปล่งแสงเนื่องจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอะตอม.....	39
3.13 เครื่องฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรมิเตอร์.....	39
3.14 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	40
3.15 ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง SEM.....	40
4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นที่ผิวด้วยวิธีโซโนเคมี.....	42
4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์วัฏภาคอนาเทสก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นที่ผิวด้วยวิธีโซโนเคมี.....	43
4.3 อินฟราเรดสเปกตร้าของไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และไทเทเนียมไดออกไซด์วัฏภาคอนาเทสที่ผ่านการปรับปรุงพื้นที่ผิวด้วยวิธีโซโนเคมี.....	44
4.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคซีเรียมออกไซด์.....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 อินฟราเรดสเปกตร้าของซีเรียมออกไซด์.....	45
4.6 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์.....	46
4.7 อินฟราเรดสเปกตร้าของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์.....	47
4.8 ภาพถ่าย SEM สภาพพื้นผิวของอนุภาคกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์.....	49
4.9 EDS สเปกตรัมของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์.....	50
4.10 ภาพถ่าย SEM ของวัสดุกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์และภาพการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบ..	50
4.11 ยูวี-วิสิเบิลสเปกตร้าของไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และวัสดุภาคอนาเทสที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยวิธีโซโนเคมี.....	52
4.12 การหาค่าพลังงานช่องว่างระหว่างพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์ก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นผิวด้วยวิธีของ Tauc's.....	53
4.13 ฟลูออเรสเซนซ์สเปกตร้าของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นผิวด้วยวิธีโซโนเคมี.....	54
4.14 ฟลูออเรสเซนซ์สเปกตร้าของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์วัสดุภาคอนาเทส ก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นผิวด้วยวิธีโซโนเคมี.....	55
4.15 ยูวี-วิสิเบิลสเปกตรัมของวัสดุซีเรียมออกไซด์.....	55
4.16 การหาค่าพลังงานช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของซีเรียมออกไซด์ด้วยวิธีของ Tauc's.....	56
4.17 ฟลูออเรสเซนซ์สเปกตร้าของอนุภาคซีเรียมออกไซด์.....	56
4.18 ยูวี-วิสิเบิลสเปกตร้าของวัสดุกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์.....	57
4.19 การหาค่าพลังงานช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ด้วยวิธีของ Tauc's.....	57
4.20 ฟลูออเรสเซนซ์สเปกตร้าของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์.....	58
4.21 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ P25.....	60
4.22 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์วัสดุภาคอนาเทส.....	61
4.23 อินฟราเรดสเปกตร้าของวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ P25.....	62
4.24 อินฟราเรดสเปกตร้าของวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์วัสดุภาคอนาเทส.....	62
4.25 ภาพถ่าย SEM ของวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ P25.....	64
4.26 EDS สเปกตร้าของวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และไทเทเนียมไดออกไซด์วัสดุภาคอนาเทส.....	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.27 ภาพถ่าย SEM ของวัสดุผสมและภาพการกระจายตัวของธาตุดังประกอบ.....	69
4.28 ยูวี-วิสิเบิลสเปกตร้าของวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ที่ผ่านการเจือซีเรียมออกไซด์และกราฟิติกคาร์บอนไนโตรด.....	70
4.29 การหาค่าพลังงานช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ที่ผ่านการเจือด้วยกราฟิติกคาร์บอนไนโตรดและซีเรียมออกไซด์ด้วยวิธีของTuac's.....	71
4.30 ยูวี-วิสิเบิลสเปกตร้าของวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์วัฏภาคอนาเทสที่ผ่านการเจือซีเรียมออกไซด์และกราฟิติกคาร์บอนไนโตรด.....	72
4.31 การหาค่าพลังงานช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์วัฏภาคอนาเทส Tuac's.....	73
4.32 ฟลูออเรสเซนส์สเปกตร้าของวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ P25.....	74
4.33 ฟลูออเรสเซนส์สเปกตร้าของวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์วัฏภาคอนาเทส.....	75
4.34 กราฟมาตรฐานสารละลายเมทิลีนบลู.....	75
4.35 กราฟการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของกราฟิติกคาร์บอนไนโตรดภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลา 5 ชั่วโมง.....	77
4.36 กราฟการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และไทเทเนียมไดออกไซด์อนาเทสก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นผิว ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลา 5 ชั่วโมง.....	77
4.37 ค่าคงที่อัตราการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของกราฟิติกคาร์บอนไนโตรดภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต (ไม่รวมการดูดซับ 60 นาที).....	78
4.38 ค่าคงที่อัตราการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และไทเทเนียมไดออกไซด์วัฏภาคอนาเทสก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นผิว ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต (ไม่รวมการดูดซับ 60 นาที).....	79
4.39 กราฟการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของกลุ่มวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตได้เป็นเวลา 5 ชั่วโมง.....	81
4.40 กราฟการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของกลุ่มวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์วัฏภาคอนาเทสภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตได้เป็นเวลา 5 ชั่วโมง.....	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.41 ค่าคงที่อัตราการสลายสี่ย้อมเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของกลุ่มวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต (ไม่รวมการดูดซับ 60 นาที).....	82
4.42 ค่าคงที่อัตราการสลายสี่ย้อมเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของกลุ่มวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์วัฏภาคอนาเทสภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต (ไม่รวมการดูดซับ 60 นาที).....	82
4.43 กราฟการสลายสี่ย้อมเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิลเป็นเวลา 5 ชั่วโมง.....	84
4.44 กราฟการสลายสี่ย้อมเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และไทเทเนียมไดออกไซด์อนาเทสก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นผิวภายใต้การฉายแสงวิสิเบิลเป็นเวลา 5 ชั่วโมง.....	85
4.45 กราฟการสลายสี่ย้อมเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิลเป็นเวลา 5 ชั่วโมง.....	85
4.46 กราฟการสลายสี่ย้อมเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์วัฏภาคอนาเทสภายใต้การฉายแสงวิสิเบิลเป็นเวลา 5 ชั่วโมง.....	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาปัญหาสิ่งแวดล้อมมีมากขึ้นเรื่อย ๆ โดยมีสารปนเปื้อนอยู่ในน้ำ ซึ่งส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม สุขภาพอนามัยและชีวิตประจำวันของมนุษย์ รวมทั้งการสะสมในแหล่งน้ำ ดินและห่วงโซ่อาหาร เมื่อมนุษย์กินพืชหรือสัตว์ที่มีสารปนเปื้อนเหล่านั้นก็จะเข้าสู่ร่างกายและสะสมเพิ่มมากขึ้น จนถึงในระดับหนึ่งมนุษย์ก็จะป่วยเป็นโรค [1] ซึ่งสารปนเปื้อนส่วนหนึ่งมาจากการปล่อยน้ำเน่าเสียจากโรงงานที่เกิดจากสีย้อมผ้า ซึ่งสีย้อมที่ปนเปื้อนยังอาจเปลี่ยนสภาพกลายเป็นสารก่อมะเร็ง มีฤทธิ์ทำให้เกิดการแปรสภาพของยีนส่งผลต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำและพื้นที่ใกล้เคียงได้ ปัจจุบันจึงได้มีการใช้เทคนิคการย่อยสลายด้วยแสงร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อการบำบัดน้ำเสีย ดังนั้นโครงการพิเศษนี้จึงได้พัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (photocatalysis) ในการสลายสีย้อม โดยอาศัยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเพื่อใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำให้กลายเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก เช่น CO_2 , H_2 , N_2 และ SO_2 เป็นต้น ทำให้น้ำสะอาด ไม่เป็นอันตรายต่อสภาพแวดล้อมและสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในน้ำ [2]

ในโครงการพิเศษนี้ได้ศึกษาและพัฒนาวัสดุที่จะใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยแสง โดยเลือกใช้วัสดุหลักเป็นไทเทเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide; TiO_2) ซึ่งเป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียมที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำและมีการประยุกต์การใช้งานที่หลากหลาย เนื่องจากมีสมบัติการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงสูง ความเสถียรสูง ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม มีราคาถูกและมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารพิษทั้งทางอากาศและทางน้ำ โครงการพิเศษนี้จึงได้ศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงไทเทเนียมไดออกไซด์มาปรับปรุงพื้นที่ผิวโดยวิธีโซโนเคมี (sonochemistry) ที่สภาวะเบส เพื่อให้มีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาทางแสงที่มากขึ้น โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้าชนิด P25 ที่มีวัฏภาคผสมระหว่างอนาเทส (anatase) และรูไทล์ (rutile) ในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 4:1 ของวัฏภาคอนาเทสต่อรูไทล์และใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีวัฏภาคอนาเทสเพียงวัฏภาคเดียว ซึ่งไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้งสองเกรดนี้มีสมบัติในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงที่ดี และมีแถบช่องว่างพลังงาน (band gap energy, E_g) ที่แตกต่างกัน โดยวัฏภาคอนาเทสมีค่าเป็น 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) และวัฏภาครูไทล์มีค่าเป็น 3.0 eV ทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ (P25) สามารถเกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอน (transfer electron) แบบขั้นบันไดได้ส่งผลให้มีอัตราการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮล (electron-hole recombination) ที่ลดลง จึงสามารถเคลื่อนที่ไปเกิดปฏิกิริยาเชิงแสงได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามเนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีแถบช่องว่างพลังงานที่กว้าง (3.2 eV) จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาภายใต้การฉายรังสีอัลตราไวโอเลตเท่านั้น ดังนั้นจึงได้ทำการปรับปรุงคุณสมบัติการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง โดยการเติมธาตุโลหะออกไซด์คือ ซีเรียมออกไซด์ (cerium oxide; CeO_2) ที่มีแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 2.80 eV ซึ่งมีค่าแถบช่องว่างพลังงานต่ำกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อช่วยลดอัตราการรวมตัวของอิเล็กตรอนและ

2.4) กราฟฟิติกคาร์บอนไนไตรด์/ซีเรียมออกไซด์/ไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวร้อยละ 50:1:49

3) ตรวจสอบพิกัดลักษณะและสมบัติต่าง ๆ ด้วยเทคนิคดังนี้

3.1) ตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope; TEM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope; SEM)

3.2) ตรวจสอบโครงสร้างผลึกและโครงสร้างโมเลกุลด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer; XRD)

3.3) ตรวจสอบสมบัติทางแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Diffused Reflectance UV-Vis Spectroscopy; UV-DRS) และเครื่องฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรมิเตอร์ (fluorescence spectrometer)

3.4) ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrophotometer; FT-IR)

3.5) ตรวจสอบพื้นที่ผิวและรูพรุนด้วยการดูดซับและคายซับของแก๊สไนโตรเจน (surface area and porosity analyzer) โดยวิธีของ Brunauer Emmett Teller (BET)

4) ตรวจสอบประสิทธิภาพการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู

4.1) ศึกษาผลของไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ชนิดที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยวิธีโซโนเคมี

4.2) ศึกษาผลของกราฟฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ ($g-C_3N_4$) และ ซีเรียมออกไซด์ (CeO_2)

4.3) ศึกษาผลของวัสดุผสมที่มีดังนี้ $g-C_3N_4/CeO_2/TiO_2$ P25, $g-C_3N_4/CeO_2/TiO_2$ anatase, $g-C_3N_4/modified TiO_2$ P25, $CeO_2/modified TiO_2$ P25, $g-C_3N_4/CeO_2/modified TiO_2$ anatase, $g-C_3N_4/CeO_2/modified TiO_2$ P25 และ $50\%g-C_3N_4/CeO_2/modified TiO_2$ P25

4.4) ศึกษาการดูดซับเป็นเวลา 60 นาที

4.5) ศึกษาประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมด้วยปฏิกิริยาเชิงแสงเป็นเวลา 300 นาที

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) สามารถปรับปรุงพื้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์โดยใช้วิธีโซโนเคมี

2) สามารถเตรียมวัสดุผสมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงกราฟฟิติกคาร์บอนไนไตรด์/ซีเรียมออกไซด์/ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปรับปรุงพื้นผิว

3) สามารถนำวัสดุผสมกราฟฟิติกคาร์บอนไนไตรด์/ซีเรียมออกไซด์/ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นที่ผิวไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในการสลายสีย้อมด้วยแสงเพื่อกำจัดสารพิษที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำให้กลายเป็นน้ำสะอาดและสามารถย่อยใช้ในการผลิตระดับภาคอุตสาหกรรมได้ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

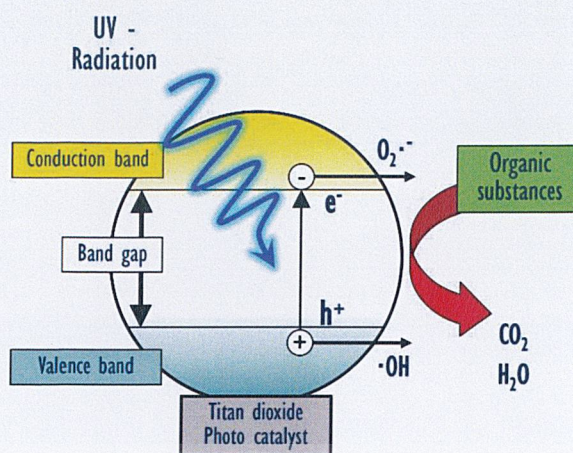
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานวิธีในการสังเคราะห์และการประยุกต์ใช้งานของตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงและกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์/ซีเรียมออกไซด์/ไทเทเนียมไดออกไซด์ ($g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{TiO}_2$) ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงในการสลายสีย้อม และได้รวบรวมเอกสารทางวิชาการ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalysis)

กระบวนการโฟโตแคตะไลติกเป็นปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับการกระตุ้นด้วยแสง โดยการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกต้องอาศัย 2 องค์ประกอบ ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยาและพลังงานแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet) หรือในช่วงที่เห็นได้ด้วยตาเปล่า (visible) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ซึ่งทำหน้าที่ลดพลังงานการกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยาซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดบริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำและเมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาถูกกระตุ้นด้วยแสงจะดูดซับพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าแถบช่องว่างพลังงาน (band gap) ซึ่งเป็นค่าของความแตกต่างระหว่างการทำงานของแถบตัวนำ (conduction band; CB) กับแถบวาเลนซ์ (valence band; VB) และเมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานเพิ่มมากขึ้น ทำให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานจากชั้นสถานะพื้นหรือแถบวาเลนซ์ (ground state) ไปสู่ระดับชั้นพลังงานสูงขึ้นไปเรียกว่าชั้นสถานะถูกกระตุ้นหรือแถบตัวนำ (excited-state) ซึ่งกระบวนการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปสู่ชั้นแถบตัวนำ ส่งผลให้เกิดสถานะขาดอิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์เกิดเป็นหลุมประจุบวกหรือโฮล (positive hole; h^+) ส่วนอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น (negative electron; e^-) จะไปอยู่ในแถบตัวนำเพื่อรอเกิดปฏิกิริยาเชิงแสง [5] ซึ่งจะเกิดบริเวณพื้นผิวของวัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (photocatalyst) โดยอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นในแถบตัวนำจะทำปฏิกิริยารีดักชันกับโมเลกุลของออกซิเจนในอากาศเกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล (superoxide radical; $\text{O}_2^{\cdot-}$) ซึ่งสามารถเกิดออกซิไดซ์กับคาร์บอนในสารประกอบอินทรีย์เกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนโฮลจะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้โมเลกุลของน้ำแตกตัวเป็นแก๊สไฮโดรเจนและซูเปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล (hydroxyl radical; OH^{\cdot}) และสามารถทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนในองค์ประกอบของสารอินทรีย์เกิดเป็นน้ำ [6] ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยจะมีปัจจัยสำคัญที่ทำให้การเกิดปฏิกิริยาทางแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงเกิดจากอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นได้รับพลังงานต่ำกว่าแถบช่องว่างพลังงานจึงไม่สามารถเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานได้ และการที่อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นไปยังแถบตัวนำเกิดการคายพลังงาน (emission) ออกมาเพื่อที่จะกลับมารวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์ เรียกว่า รีคอมบิเนชัน (electron-hole recombination) จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาลดลง

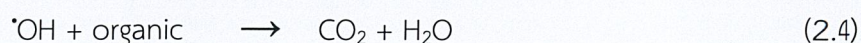
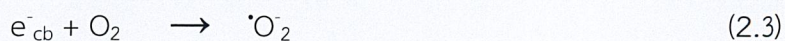
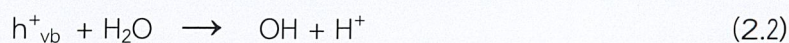
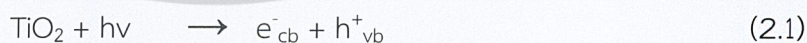
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์ [7]

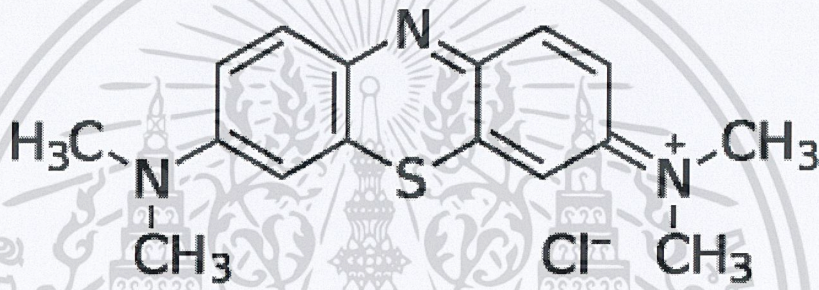
2.1.1 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาทางแสงในการย่อยสลายสารอินทรีย์

กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถใช้ในการกำจัดหรือสลายสารมลพิษที่มีอันตรายจากแหล่งกำเนิดต่าง ๆ โดยกระบวนการโฟโตแคตะไลซิสเป็นกระบวนการดูดซับโฟตอน ($h\nu$) ที่มีพลังงานมากกว่าแถบของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งประกอบไปด้วยระดับพลังงาน 2 ระดับคือ แถบวาเลนซ์ และแถบตัวนำ โดยแถบวาเลนซ์จะเป็นระดับพลังงานที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่จนเต็ม ส่วนแถบตัวนำจะเป็นระดับพลังงานที่มีออร์บิทัลว่างอยู่และมีพลังงานสูงกว่าแถบวาเลนซ์ ดังนั้นเมื่อมีการให้พลังงานที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าพลังงานของช่องว่างแถบพลังงาน (band gap energy; E_g) ของสารกึ่งตัวนำ จึงทำให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ถูกกระตุ้นและเคลื่อนที่ไปอยู่ในแถบตัวนำ ส่งผลให้ในแถบวาเลนซ์เกิดหลุมประจุบวก (hole; h^+) ขึ้น และเกิดอิเล็กตรอน (electron; e^-) ขึ้นที่แถบตัวนำ เมื่อหลุมประจุบวกสัมผัสกับความชื้นหรือน้ำจะเกิดเป็น ไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\cdot OH$) ส่วนอิเล็กตรอนจับกับออกซิเจนเกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล ($\cdot O_2^-$) ซึ่งทั้งสองตัวเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรง จนสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดบริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในสมการ 2.1-2.4 [9] แล้วจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และน้ำ (H_2O) ซึ่งไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมทิลีนบลู (Methylene blue, $C_{16}H_{18}ClN_3S$) ซึ่งมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.2 นิยมใช้เป็นสีย้อมในอุตสาหกรรมเป็นสารเคมีที่ไม่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา (inert) มีความเป็นพิษและเสถียรตัวในสิ่งแวดล้อม เมทิลีนบลูนั้นไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (non-biodegradable) จึงเป็นเรื่องยากที่จะสามารถแยกเมทิลีนบลูออกจากน้ำเสียได้ เพราะเมทิลีนบลูละลายน้ำได้ดี ทำให้เกิดผลเสียต่อระบบนิเวศและมนุษย์โดยตรง ไทเทเนียมไดออกไซด์จึงเป็นหนึ่งในตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพที่สามารถลดหมู่ฟังก์ชันในเมทิลีนบลูได้ทำให้ความเข้มข้นลดลง โดยครึ่งชีวิต (half-life) ของเมทิลีนบลูอยู่ที่ประมาณ 5 – 6.5 ชั่วโมง ซึ่งเมทิลีนบลูจะทำปฏิกิริยารีดักชันกับซุเปอร์ออกไซด์แรดิคัลและทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไฮดรอกซิลแรดิคัล จึงเกิดการสลายตัวของโครงสร้างชนิดวง 6 เหลี่ยมของเมทิลีนบลู จนกระทั่งสลายจนเหลือผลิตภัณฑ์คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ คลอไรด์-ไอออน ซัลเฟต และไนเตรท เป็นต้น [10]



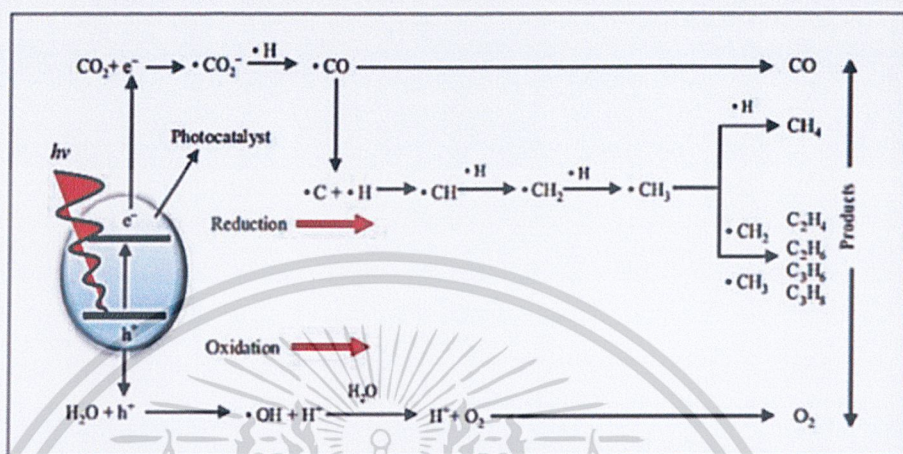
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของสีย้อมเมทิลีนบลู [11]

2.1.2 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในการเปลี่ยนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเชื้อเพลิง

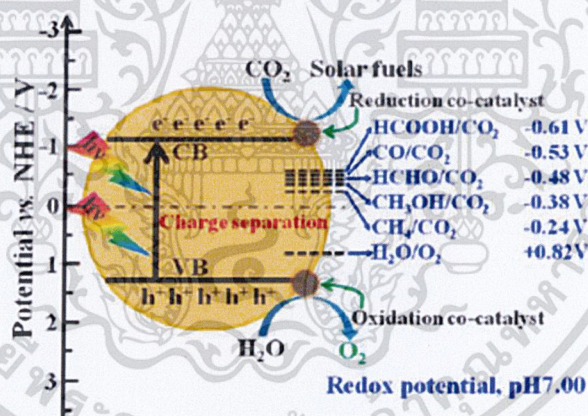
การเปลี่ยนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเชื้อเพลิง จะอาศัยกระบวนการโฟโตคอนเวอร์ชัน (photoconversion process) ซึ่งใช้สารกึ่งตัวนำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับการกระตุ้นด้วยแสง ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งกระบวนการโฟโตคอนเวอร์ชันที่เกิดขึ้นต้องอาศัยปฏิกิริยารีดักชันและปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยเมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาถูกกระตุ้นด้วยแสงที่มีค่าพลังงานแสงมากกว่าหรือเท่ากับค่าพลังงานช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำแล้ว จะทำให้เกิดการสร้างคู่อิเล็กตรอนและโฮลขึ้น โดยอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ได้ถูกกระตุ้นให้ไปอยู่ที่แถบตัวนำและทำให้เกิดโฮลขึ้นที่แถบวาเลนซ์ ซึ่งอิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบตัวนำนั้นจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับโมเลกุลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์แรดิคัล (carbon dioxide radical; $\cdot CO_2$) และโฮลจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งโฮลจะมีประจุเป็นบวกจึงรับอิเล็กตรอนจากโมเลกุลของน้ำ ทำให้พันธะไฮโดรเจนของน้ำถูกทำลายจึงแตกตัวเป็นโปรตรอน (H^+) และไฮดรอกไซด์แรดิคัล ($\cdot OH$) ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์แรดิคัลมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา จึงทำให้เกิดการรวมตัวกับโปรตรอน (H^+) ที่ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และกรด-

เอกสารนี้เป็นสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในวงวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟอร์มิก (HCOOH) เป็นต้น โดยผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นนั้นสามารถรวมตัวกันได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ขึ้น เช่น ฟอร์มัลดีไฮด์ (HCHO) เมทานอล (CH₃OH) เอทานอล (C₂H₅OH) และแก๊สมีเทน (CH₄) เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยดังนี้ คือ จำนวนโมลของ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จำนวนโมลของอิเล็กตรอน จำนวน-โมลโปรตรอน และค่าศักย์ไฟฟ้า [12]



รูปที่ 2.3 การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคอนเวอร์ชันของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ [13]



รูปที่ 2.4 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาโฟโตคอนเวอร์ชัน [12]

2.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalyst)

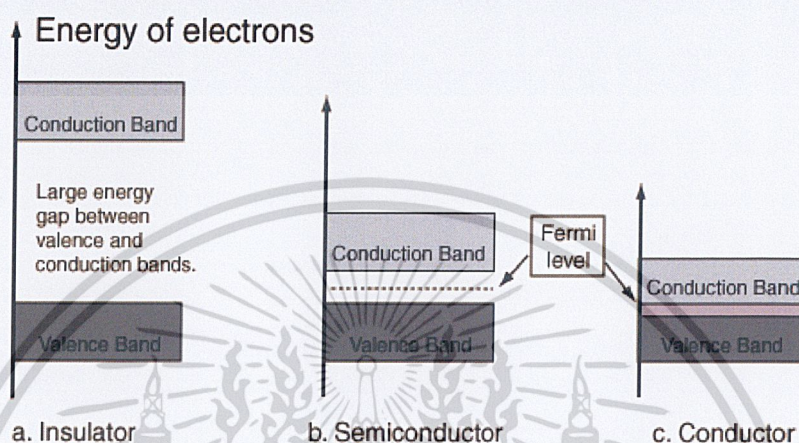
ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีได้โดยการกระตุ้นด้วยแสง ตัวเร่งปฏิกิริยานี้จะทำหน้าที่ลดพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยาเคมี จึงสามารถเพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมีได้โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) [14] เนื่องจากในสารกึ่งตัวนำจะมีระยะห่างระหว่างแถบวาเลนซ์ (valence band; VB) และแถบการตัวนำ (conduction band; CB) หรือที่เรียกว่า “แถบช่องว่างพลังงาน” (band gap; E_g) ค่อนข้างมาก แต่

ในโลหะทรานซิชัน (transition metal) แถบวาเลนซ์และแถบการนำไฟฟ้าจะอยู่ติดกันทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตีตแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาทางแสงลดลง ดังนั้นจึงไม่นิยมใช้โลหะทรานสิชันหรือโลหะตัวนำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ซึ่งค่าพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นจะขึ้นกับค่าพลังงานช่องว่างระหว่างแถบวาเลนซ์กับแถบตัวนำ (E_g) ของวัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิด [5] ดังนั้นการเลือกประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง สามารถพิจารณาจากแถบช่องว่างพลังงาน (E_g) ซึ่งอธิบายได้จากทฤษฎีแถบพลังงาน (energy band theory) ดังแสดงในรูปที่ 2.5



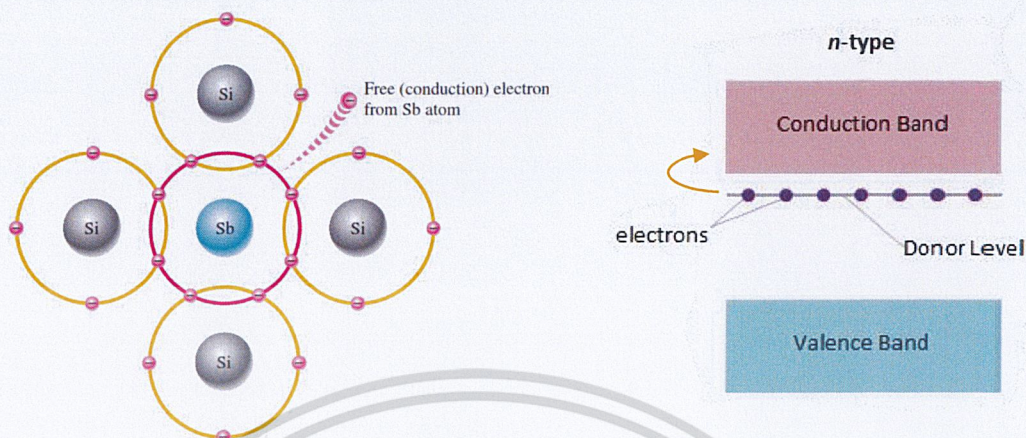
รูปที่ 2.5 ทฤษฎีแถบพลังงาน (energy band theory) [14]

2.2.1 สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)

สารกึ่งตัวนำเป็นวัสดุที่มีความกว้างของช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (energy gap) อยู่ระหว่างสารนำไฟฟ้า (conductor) กับฉนวน (insulator) สารกึ่งตัวนำจะไม่นำไฟฟ้าในสภาวะปกติ แต่สามารถ นำไฟฟ้าได้เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแสง ไฟฟ้า หรือความร้อนที่มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน และสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระทำให้เกิดสภาพนำไฟฟ้าได้ โดยอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ (valence band; VB) จะหลุดจากโครงสร้างอะตอมข้ามช่องว่างระหว่างแถบพลังงานขึ้นไปอยู่ในแถบตัวนำ (conduction band; CB) แถบวาเลนซ์ที่สูญเสียอิเล็กตรอนจะเกิดโฮล (hole) ที่สามารถรับอิเล็กตรอนจากอะตอมข้างเคียงต่อเนื่องกันไปได้อย่างอิสระเสมือนว่าหลุมเคลื่อนที่ได้ในแถบวาเลนซ์ สารกึ่งตัวนำประเภทนี้มีสภาพการนำไฟฟ้าไม่แน่นอน จึงมีการปรับปรุงโดยการเจือ (dope) อะตอมของธาตุเจือปนที่มีโครงสร้างอิเล็กตรอนต่างกันลงไป ในโครงสร้างผลึกบริสุทธิ์หรือเอาอะตอมของธาตุบางชนิดมาทำปฏิกิริยากันให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) เป็นการเจือด้วยอะตอมของธาตุที่มีจำนวนวาเลนซ์อิเล็กตรอนมากกว่าจำนวนอิเล็กตรอนของอะตอมโครงสร้างผลึก [5] เช่น การเจืออะตอมของธาตุพลวง (Sb) หรือฟอสฟอรัส (P) ลงในโครงสร้างผลึกของซิลิคอน (Si) หรือเจอร์มาเนียม (Ge) ซึ่งสารเจือปนที่เติมลงไปนี้ เรียกว่าสารเจือปนผู้ให้ (donor impurity) โดยทุก ๆ อะตอมของสารเจือปนที่เติมเข้าไปจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระหนึ่งตัว ทำให้เกิด

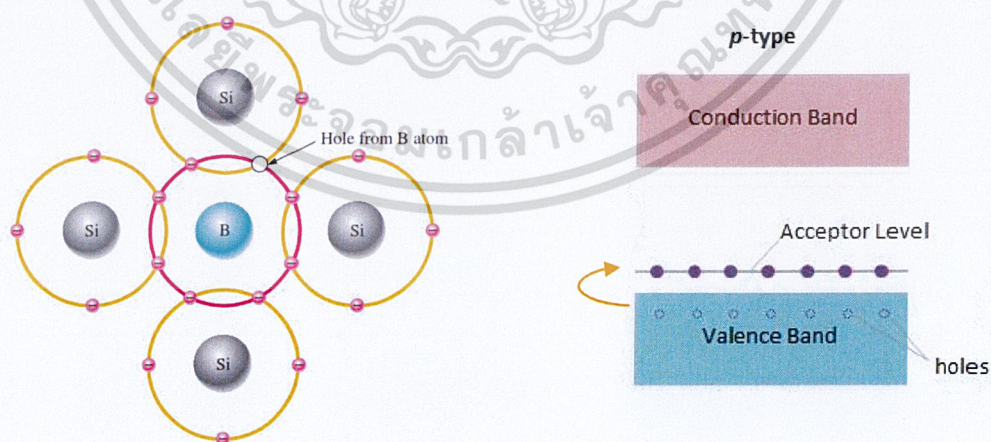
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แถบพลังงานใหม่อยู่ใกล้กับแถบตัวนำ เรียกว่าแถบผู้ให้ (donor level) [6] ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ทำให้การกระตุ้นอิเล็กตรอนจากแถบผู้ให้ไปสู่แถบตัวนำใช้พลังงานที่น้อยลง



รูปที่ 2.6 สารกึ่งตัวนำประเภท n-type [15 , 16]

สารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductor) คือการเติมสารเจือปนที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ชนิด เช่น การเจืออะตอมของธาตุอินเดียม (In) หรือโบรอน (B) ลงในโครงสร้างผลึกของซิลิคอนหรือเจอร์มาเนียม เป็นการเจือด้วยอะตอมของธาตุที่มีจำนวนวาเลนซ์อิเล็กตรอนน้อยกว่าจำนวนอิเล็กตรอนของอะตอมโครงสร้างผลึก [15] สารเจือปนที่เติมให้นี้เรียกว่า สารเจือปนผู้รับ (acceptor impurity) ซึ่งจะมีโฮลเกิดขึ้นทุก ๆ อะตอมของสารเจือปนที่เติมเข้าไปดังนั้นจำนวนโฮลจึงมีมากกว่าจำนวนอิเล็กตรอนอิสระ และเกิดเป็นแถบพลังงานใหม่เหนือแถบวาเลนซ์ (valence band; VB) เรียกว่า แถบผู้รับ (acceptor level) [16] ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ทำให้การกระตุ้นอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์เพื่อเข้าสู่สภาวะตัวนำ ทำได้โดยการใช้พลังงานที่น้อยลง



รูปที่ 2.7 สารกึ่งตัวนำประเภท p-type [15 , 16]

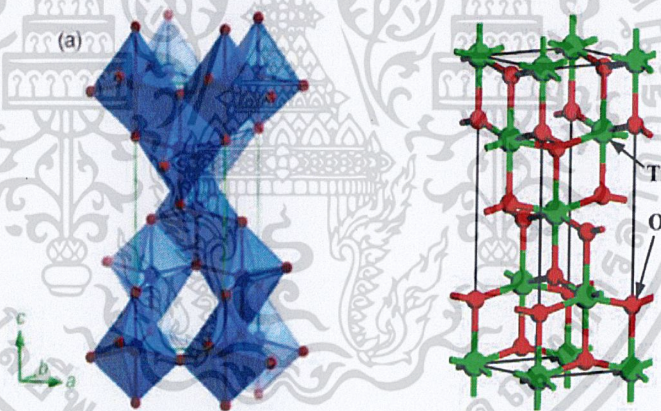
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสารกึ่งตัวนำที่นิยมใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการศึกษาวิจัยมากที่สุด คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide; TiO_2) เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีความสามารถในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ได้ดีมีเสถียรภาพทางเคมีสูง และราคาถูก

2.3 วัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่ใช้ในการสลายสีย้อมด้วยแสง

2.3.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide; TiO_2)

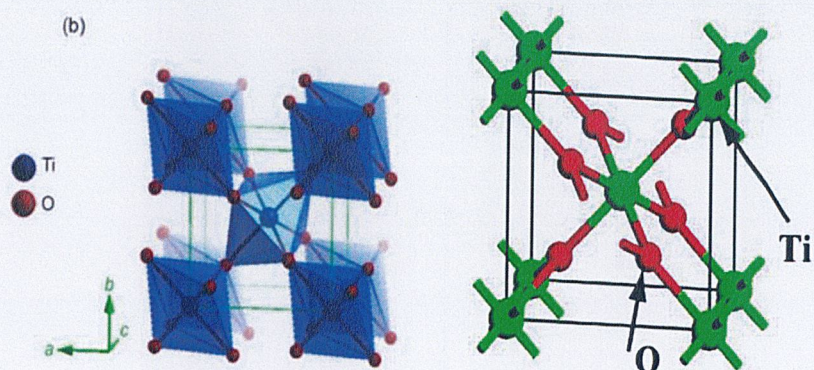
ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นวัสดุตัวเร่งเชิงแสง ซึ่งมีการใช้งานที่หลากหลาย เช่น ตัวเร่งทางแสง ตัวเร่งทางไฟฟ้า เซนเซอร์ เซลล์เชื้อเพลิง ตัวกักเก็บพลังงานและเซลล์แสงอาทิตย์ ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นที่นิยมมากเพราะมีความว่องไวต่อแสงที่มองเห็น มีความเสถียรสูง ไม่มีความเป็นพิษและมีราคาถูก ไทเทเนียมไดออกไซด์มีจัดเรียงตัว 3 ภูมิภาคที่แตกต่างกัน เช่น อนาเทส (anatase) รูไทล์ (rutile) บรูคไคท์ (brookite) ส่งผลให้มีค่าพลังงานช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (E_g) ที่แตกต่างกัน [17] ภูมิภาคแบบอนาเทส (anatase) มีโครงสร้างรูปแบบหน่วยเซลล์เป็นทรงสี่หน้า (tetragonal) มีการเชื่อมต่อระหว่างโครงสร้างบริเวณขอบและหน้าของโครงสร้างมีการเชื่อมต่อเฉพาะอะตอมของออกซิเจน มีช่องว่างระหว่างแถบพลังงานเท่ากับ 3.29 eV [18] ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ภูมิภาคแบบอนาเทส [18]

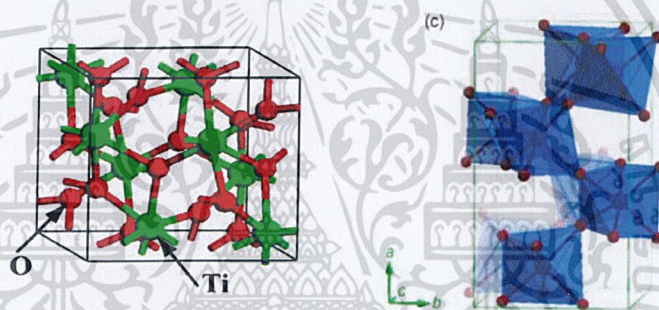
ภูมิภาคแบบรูไทล์ (rutile) มีโครงสร้างรูปแบบทรงสี่หน้า (tetragonal) มีการเชื่อมต่อระหว่างโครงสร้างบริเวณมุมของโครงสร้างโดยด้านที่อยู่ตรงกันข้ามกับทรงแปดหน้าจะเชื่อมต่อกันเป็นเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.9 มีแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 3.05 eV [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์วิภาคแบบรูไทล์ [19]

วิภาคแบบบรูคไคท์ (brookite) มีโครงสร้างรูปแบบออร์โธโรมบิก (orthorhombic) มีการเชื่อมต่อระหว่างโครงสร้างบริเวณมุมของทรงแปดหน้าจึงเกิดการบิดตัวของโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 2.10 มีแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 3.14 eV [17]



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์วิภาคแบบบรูคไคท์ [20]

วิภาคผสมอนาเทสและรูไทล์หรือไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้า (P25) คือไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีวิภาคอนาเทสและรูไทล์ผสมกันอยู่ โดยมีอัตราส่วนของวิภาคอนาเทสร้อยละ 80-90 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนของวิภาครูไทล์ร้อยละ 10-20 โดยน้ำหนัก ซึ่งไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงที่ดี เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากและมีการผสมของสองวิภาค ซึ่งวิภาครูไทล์ทำหน้าที่เพิ่มช่วงการดูดกลืนความยาวคลื่นช่วงแสงขาวและการจัดเรียง-ตัวระหว่างวิภาคอนาเทสและรูไทล์มีขนาดผลึกใกล้เคียงกันส่งผลให้เกิด “ฮอตสปอต” บริเวณรอยต่อของวิภาครูไทล์และอนาเทส โดยวิภาคอนาเทสมีแถบช่องว่างพลังงานมากกว่าวิภาครูไทล์ซึ่งต้องการพลังงานกระตุ้นมากกว่าวิภาครูไทล์ แต่มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาที่ดีกว่า [21] และวิภาครูไทล์มีแถบช่องว่างพลังงานน้อยกว่าวิภาคอนาเทสส่งผลให้ไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้าต้องการพลังงาน-กระตุ้นที่น้อยลง ซึ่งมีหลักการทำงานคือเมื่อวิภาคอนาเทสได้รับพลังงานจะส่งผ่านอิเล็กตรอนไปสู่วิภาครูไทล์ส่งผลให้ลดการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนและโฮลของวิภาคอนาเทส นำไปสู่การแยกแยะระหว่างอิเล็กตรอนและโฮลที่ดีขึ้นและการเกิดปฏิกิริยาที่ดีขึ้น [22]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

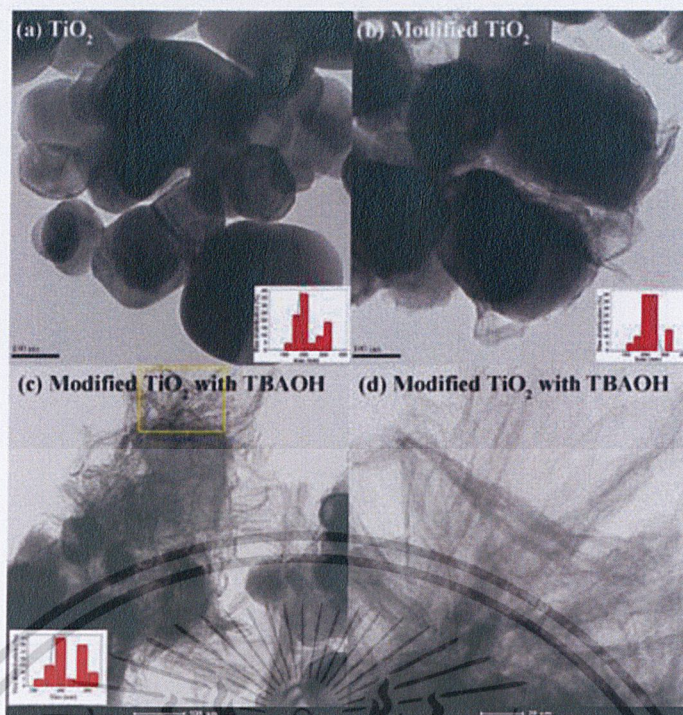
2.3.2 การปรับปรุงสมบัติการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์

การปรับปรุงพื้นผิวจุลภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสในการทำปฏิกิริยามากขึ้นจึงเป็นการปรับปรุงสมบัติตัวเร่งทางแสงให้ดีขึ้นโดยมีลักษณะสัณฐานของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่แตกต่างไปจากเดิม

2.3.2.1 การปรับปรุงพื้นผิวและโครงสร้างจุลภาค

โครงสร้างจุลภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ประกอบขึ้นจากโครงสร้างแบบ 2 มิติที่มีการเชื่อมต่อของชั้นไทเทเนียมและออกซิเจนที่จัดเรียงตัวแบบออกตรเซฮีตรอล (octahedral TiO_6) โดยแต่ละระนาบจะส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่เท่ากัน จากการศึกษาของไทเทเนียมไดออกไซด์พบว่าระนาบ {001} มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยามากที่สุด เนื่องจากระนาบนี้อะตอมของไทเทเนียมไดออกไซด์แคทไอออน (Ti^{4+}) และอะตอมของออกซิเจนแอนไอออน (O^{2-}) อยู่บริเวณระนาบเดียวกันทั้งหมดทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดี [23] ดังนั้นวิธีการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา จากการศึกษาพบว่าแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนเมตรมีผลลัพธ์ที่ดีในการเกิดปฏิกิริยาเนื่องจากมีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาได้มาก

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงนั้น Eakkasit Thasirisap และคณะ [24] ได้ทำการปรับปรุงพื้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีโซโนเคมีโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก 20 kHz, 150 W/cm² ในสภาวะเบสพร้อมกับสารลดแรงดึงผิวเตตระบิวทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (tetrabutylammonium hydroxide; TBAOH) ส่งผลให้พื้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์แตกตัวออกเป็นแผ่นขนาดนาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งโครงสร้างที่เกิดขึ้นมีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยามากขึ้นเป็น 93.65 m²/g แถบช่องว่างพลังงาน (E_g) และการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮลของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพของสมบัติตัวเร่งทางแสงเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.11 พื้นผิวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์วัฏภาคอนาเทสที่แตกออกเป็นแผ่นขนาดนาโนเมตร [24]

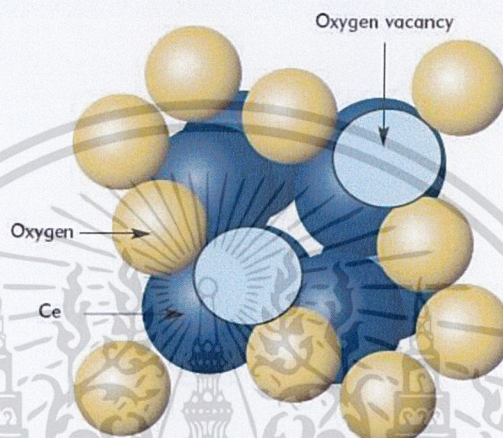
2.3.2.2 การเติมสารเติมแต่ง

การเติมสารเติมแต่งเป็นการปรับปรุงสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงให้ดีขึ้น โดยโครงการพิเศษนี้ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเชื้อเพลิง แต่ยังมีข้อจำกัดของไทเทเนียมไดออกไซด์คือมีแถบช่องว่างพลังงาน (E_g) มากจึงส่งผลทำให้ต้องใช้แสงที่มีพลังงานสูงในการแยกแหว่งอิเล็กตรอนและโฮล โดยการเติมโลหะออกไซด์ที่มีแถบช่องว่างพลังงานที่มีค่าน้อยกว่าลงบนผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถเกิดปฏิกิริยาทางแสงได้ดีขึ้น เนื่องจากการเติมโลหะออกไซด์สามารถช่วยลดแถบช่องว่างพลังงานส่งผลให้ลดการใช้พลังงานกระตุ้นในการเกิดปฏิกิริยาทางแสง และลดอัตราการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนและโฮล ในโครงการพิเศษนี้ได้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์โดยการเติมกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ ($g-C_3N_4$) และเติมซีเรียมออกไซด์ (CeO_2) ซึ่งมีแถบช่องว่างพลังงานน้อยกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนของโลหะเจือไปยังแถบตัวนำของไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดได้ง่ายขึ้น จึงสามารถลดพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นอิเล็กตรอนได้ นอกจากนี้ไทเทเนียมไดออกไซด์ยังสามารถส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังแถบตัวนำได้มากขึ้น ส่งผลให้อัตราการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนและหลุมประจุบวกมีค่าลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.2.1 ซีเรียมออกไซด์ (Cerium oxide; CeO₂)

ซีเรียมออกไซด์มีสูตรโมเลกุล CeO₂ น้ำหนักโมเลกุล 172.11 กรัมต่อโมล ความหนาแน่น 7.65 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรจุดหลอมเหลว 2400 องศาเซลเซียส จุดเดือด 3500 องศาเซลเซียส ลักษณะทั่วไปของซีเรียมออกไซด์ ผงสีเหลืองซีด จากการที่ผลึกโครงสร้างของซีเรียมออกไซด์เป็นโครงสร้างในรูปแบบของฟลูออไรต์ (fluorite) ทำให้อะตอมของออกซิเจนอยู่ในทุกระนาบของโครงสร้างผลึก ดังแสดงในรูปที่ 2.12



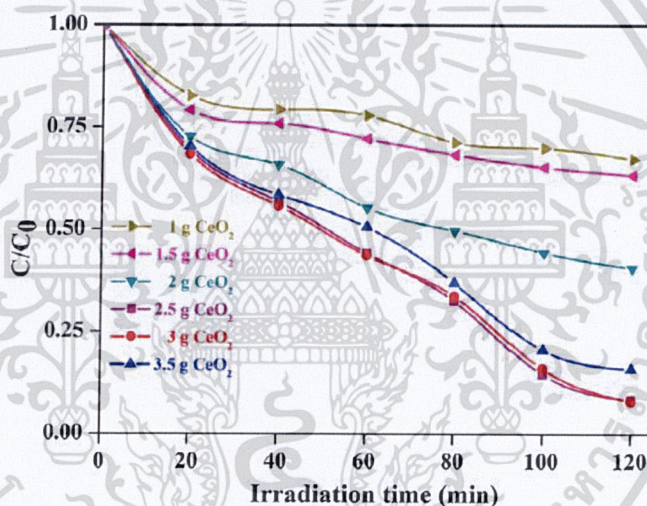
รูปที่ 2.12 โครงสร้างแบบฟลูออไรต์ของซีเรียมออกไซด์ [25]

จึงทำให้เกิดการถ่ายโอนออกซิเจนได้ง่ายและรวดเร็ว ทำให้เกิดช่องว่างของอะตอมออกซิเจนเกิดขึ้นในโครงสร้างที่จะสามารถหมุนเวียนออกซิเจนไปตามช่องว่างต่าง ๆ และนำไปใช้งานเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดี โดยซีเรียมออกไซด์สามารถถูกรีดิวซ์กลายเป็นซีเรียมออกไซด์ที่มีเลขออกซิเดชันเป็น 3+ ซึ่งทำให้ขนาดของซีเรียมออกไซด์มีขนาดเล็กลงในระดับนาโนได้ จากลักษณะสมบัติเฉพาะดังกล่าวของซีเรียมออกไซด์จึงได้มีการนำซีเรียมออกไซด์นำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) เซลล์เชื้อเพลิง และสารอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) ในงานอุตสาหกรรม ปัจจุบันมีการศึกษาวิจัยอย่างกว้างขวางในการใช้สารประกอบซีเรียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ในการแยกไฮโดรเจนจากสารไฮโดรคาร์บอน โดยงานวิจัยส่วนใหญ่จะใช้เทคโนโลยีการสังเคราะห์อนุภาคนาโน (nano-sized particle) ของสารประกอบของซีเรียมออกไซด์โดยมีธาตุอื่น ๆ เจือปน (dope) ในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาในการแยกไฮโดรเจน นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้สารประกอบซีเรียมออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคนาโนเมตรสามารถช่วยลดอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป (sintering) ทำให้เนื้อวัสดุมีความสม่ำเสมอสูงและมีสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานทางด้านสารเร่งปฏิกิริยาได้ดี [25]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P. Latha และคณะ [26] ได้ศึกษาสมบัติตัวเร่งเชิงแสงของซีเรียมออกไซด์/อะลูมินา การเตรียมซีเรียมออกไซด์เตรียมโดยการนำ 0.1 โมลาร์ ซีริกไนเตรท ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร จากนั้นใส่ กลูโคส 1 กรัม และหยดสารละลายแอมโมเนีย จนกระทั่งเกิดเป็นสารคอลลอยด์จากนั้นทำการล้าง และอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 คืน จากนั้นนำไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง การเตรียมวัสดุผสมซีเรียมออกไซด์/อะลูมินา โดยนำซีเรียมออกไซด์ปริมาณต่าง ๆ (1 1.5 2 2.5 3 และ 3.5 กรัม) และอะลูมินา 1 กรัม นำมาผสมกันจากนั้นนำไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นจะได้วัสดุผสมซีเรียมออกไซด์/อะลูมินา

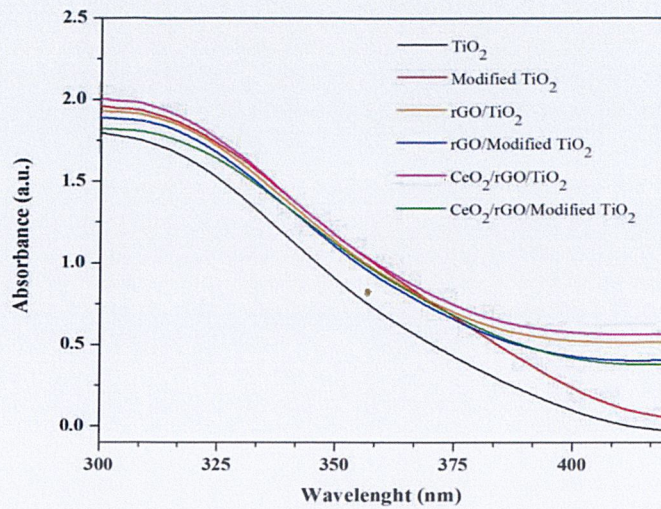
เมื่อนำไปตรวจสอบประสิทธิภาพการสลายสีของคอนกรีต ภายใต้การฉายรังสีช่วงวิสิเบิล ด้วยยูวี-วิสิเบิลโฟโตมิเตอร์ จากผลการทดลองพบว่าการเจือซีเรียมออกไซด์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสลายสีของเมื่อเทียบกับอะลูมินาที่ไม่ผ่านการเจือด้วยซีเรียมออกไซด์ โดยพบว่าปริมาณการเจือด้วยซีเรียมออกไซด์ปริมาณ 2.5 กรัม ส่งผลให้มีประสิทธิภาพการสลายสีของสูงที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.13 [26]



รูปที่ 2.13 กระบวนการสลายสีของคอนกรีต ภายใต้แสงวิสิเบิลด้วยการเจือซีเรียมออกไซด์ในอัตราส่วนต่าง ๆ [26]

จากงานวิจัยของ ปัญญา คงมัน ปิยาลักษณ์ ไปปลอดและเสาวนีย์ ประกอบมิตร [9] ศึกษาสมบัติทางแสงของสารผสมจากการเจือริตวิซ์แกรฟีนออกไซด์และซีเรียมออกไซด์ในไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ พบว่าเกิดความแตกต่างระหว่างสารผสมริตวิซ์แกรฟีนออกไซด์/ไทเทเนียมไดออกไซด์และริตวิซ์แกรฟีนออกไซด์/ซีเรียมออกไซด์/ไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยสารผสมที่เจือซีเรียมมีค่าเริ่มต้นของการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นเพิ่มขึ้น (red shift) และค่าแถบช่องว่างพลังงาน (E_g) ลดลง ดังรูป 2.14 และตารางที่ 2.1 [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 ยูวี-วิสิเบิลสเปกตร้าของไทเทเนียมไดออกไซด์ก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นผิวและวัสดุผสม [9]

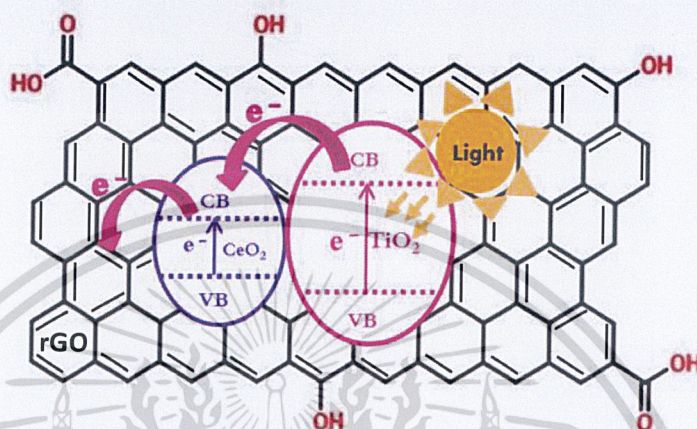
ตารางที่ 2.1 ค่าพลังงานช่องว่างระหว่างแถบพลังงานจากวิธีของ Tuac's และค่าเริ่มต้นขอบการดูดกลืนแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์และวัสดุผสม [9]

ตัวอย่าง	ค่าเริ่มต้นขอบการดูดกลืนแสง (nm)	Energy gap (eV)
TiO ₂	385	3.16
Modified TiO ₂	395	3.07
rGO/TiO ₂	387	3.05
rGO/Modified TiO ₂	396	3.04
CeO ₂ /rGO/TiO ₂	392	3.03
CeO ₂ /rGO/Modified TiO ₂	398	3.02

เมื่อทำการเปรียบเทียบวัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยวิธีโซโนเคมี (modified TiO₂) พบว่าอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยวิธีโซโนเคมีนั้นมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเมทานอลและเอทานอลที่สูงกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ (P25) ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว และหลังจากเติมวัสดุผสมพบว่าวัสดุผสมที่เตรียมจากการเติมทั้งซีเรียมออกไซด์และรีดิวซ์แกรไฟีนออกไซด์มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีกว่าการเติมรีดิวซ์แกรไฟีนออกไซด์เพียงอย่างเดียว ซึ่งวัสดุผสมตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงที่มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเชื้อเพลิงสูงสุด คือ CeO₂/rGO/modified TiO₂ เนื่องจากการปรับปรุงพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีโซโนเคมี ทำให้มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาที่มากขึ้นและมี

สมบัติทางแสงที่ดีขึ้นและการเติมรีดิวซ์แกรไฟีนออกไซด์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงและมีสภาพคล่อง (mobility) ร่วมกับการเติมซีเรียมออกไซด์ที่มีค่าพลังงานช่องว่างระหว่างแถบพลังงานที่น้อยกว่า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อวัสดุผสมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงได้รับพลังงานกระตุ้นที่มากกว่าหรือเท่ากับพลังงานช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน จะทำให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ ถูกกระตุ้นขึ้นไปยังแถบตัวนำและเกิดถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปยัง แถบตัวนำของซีเรียมออกไซด์หรือรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ซึ่งสามารถลดอัตราการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนและโฮลได้ จึงส่งผลให้อิเล็กตรอนสามารถเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีขึ้น [9]

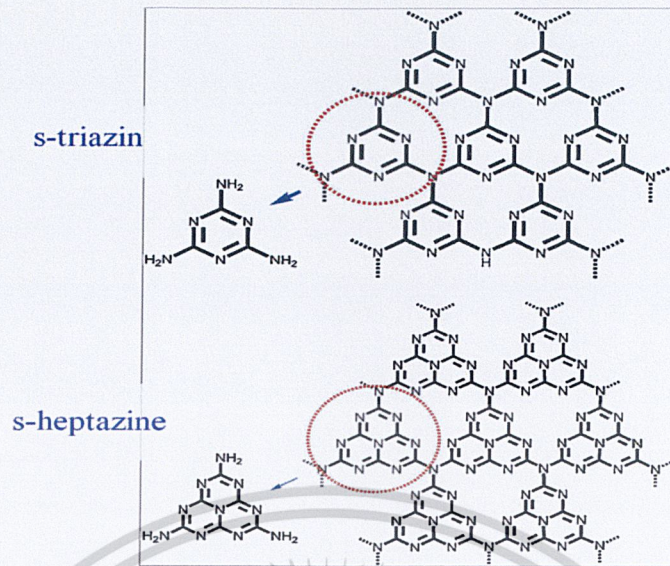


รูปที่ 2.15 แผนภาพการกระตุ้นของอิเล็กตรอนในวัสดุผสมซีเรียมออกไซด์/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/ไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อได้รับพลังงานกระตุ้นทำให้เกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนแบบชั้นบันได [9]

2.3.2.2 กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ (Graphitic carbon nitride; $g\text{-C}_3\text{N}_4$)

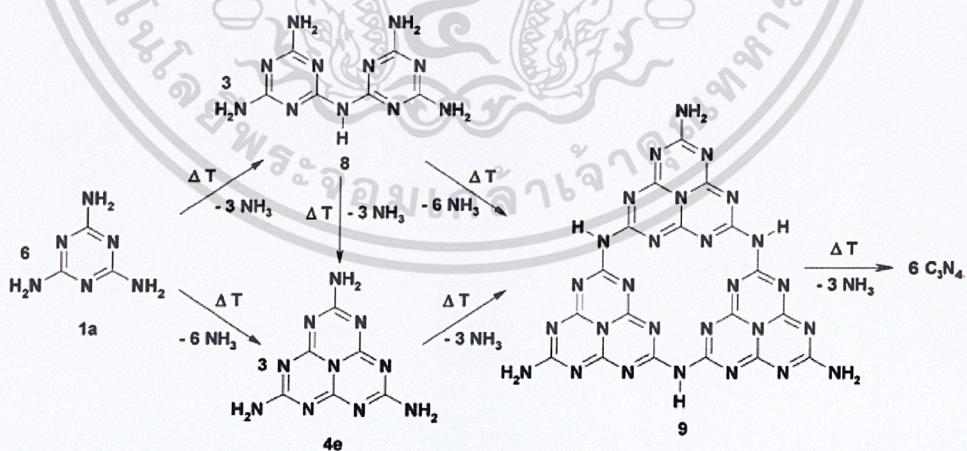
กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ เป็นรูปแบบหนึ่งของสารประกอบคาร์บอนไนไตรด์และมีโครงสร้างหลัก 2 ชนิด คือหน่วย s-triazine และ s-heptazine ซึ่งเป็นวัสดุชนิดพอลิเมอร์โดยเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปราศจากโลหะมีลักษณะเป็นแผ่นเรียงตัวต่อกันเป็นโครงสร้างหกเหลี่ยม (hexagonal) ดังแสดงในรูปที่ 2.16 เมื่อนำกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์มาวางซ้อนกันหลาย ๆ ชั้นและแต่ละชั้นมีแรงดึงดูดระหว่างกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals forces) ทำให้มีสมบัติที่ไม่ละลายน้ำ เอทานอล โทลูอีนและไดเอทิลอีเธอร์และทนต่อสารเคมี กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์มีโครงสร้างแบบสองมิติและเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่มีแถบช่องว่างพลังงานที่ปรับได้ เนื่องจากสามารถควบคุมชั้นระดับพลังงานต่ำสุดที่ไม่มีอิเล็กตรอนอยู่ (LUMO) และชั้นระดับพลังงานสูงที่สุดที่มีอิเล็กตรอนอยู่ (HOMO) ได้จากวิธีการ-สังเคราะห์ ซึ่งส่งผลต่อสมบัติทางแสงของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ ทำให้กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์มีประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงได้ดีขึ้นเมื่อทำการเจือสารกึ่งตัวนำอื่น ๆ เพื่อให้เกิดเป็นวัสดุผสม [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 ลักษณะโครงสร้างของกราฟิติการ์บอนไนไตรด์ [3]

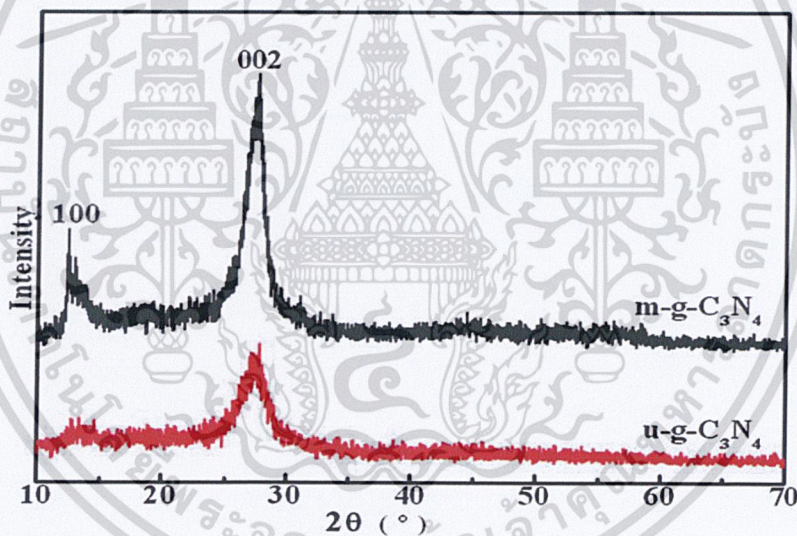
กราฟิติการ์บอนไนไตรด์สามารถสังเคราะห์ได้ด้วยวิธีการบ่มทางความร้อน (thermal treatment) โดยการให้ความร้อนกับสารที่ประกอบด้วยธาตุที่มีปริมาณออกซิเจนและไนโตรเจนมาก เช่น ยูเรีย (urea) เมลามีน (melamine) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาการสลายแอมโมเนีย (deammonation) ที่อุณหภูมิ 545-630 องศาเซลเซียสพร้อมกับปฏิกิริยาการควบแน่นที่อุณหภูมิ 297-390 องศาเซลเซียส หลังจากเกิดปฏิกิริยาแล้วจะเกิดผลิตภัณฑ์ มัธยม (intermediate product) เป็นเมลาม (melam) เมเลม (melem) และ เมลอน (melon) จากนั้นจะเกิดเป็นกราฟิติการ์บอนไนไตรด์ในที่สุดแสดงดังรูปที่ 2.17 [3]



รูปที่ 2.17 กลไกปฏิกิริยาการเกิดกราฟิติการ์บอนไนไตรด์ [3]

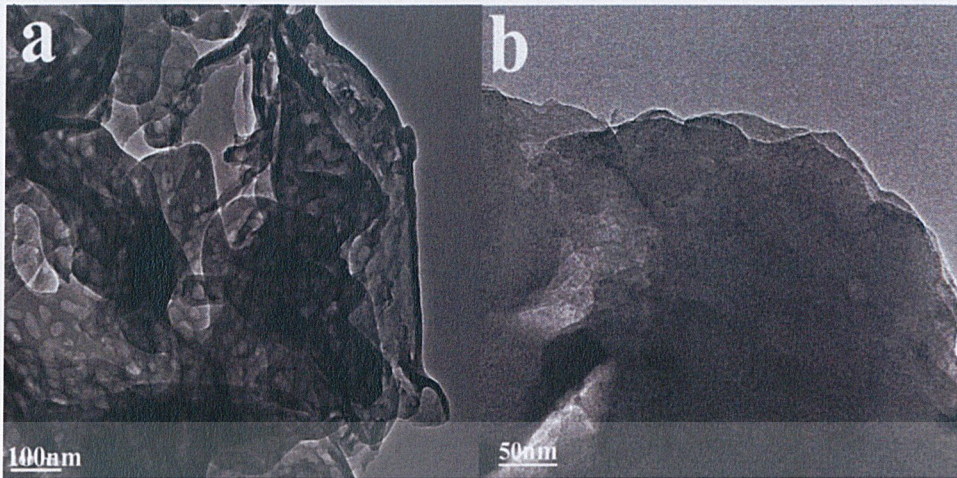
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Jin Mao และคณะ [4] ได้ศึกษาอิทธิพลของโครงสร้างที่แตกต่างกันของกราฟิติการ์บอนไนไตรด์ โดยโครงสร้างของกราฟิติการ์บอนไนไตรด์เกิดจากการสังเคราะห์โดยวิธีการบ่มทางความร้อน โดยใช้สารตั้งต้นที่แตกต่างกันระหว่างสังเคราะห์จากเมลามีนและยูเรีย โดยนำสารตั้งต้นยูเรียหรือเมลามีนเผาด้วยอุณหภูมิ 580 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จากรูปที่ 2.18 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) พบว่าพีคของกราฟิติการ์บอนไนไตรด์ที่สังเคราะห์จากเมลามีนมีพีคที่แคบและความเข้ม (intensity) ต่ำกว่ากราฟิติการ์บอนไนไตรด์ที่สังเคราะห์จากยูเรีย เนื่องจากความแตกต่างของขนาดผลึกของสารโดยการคำนวณจากสมการของ debye-Scherrer พบว่าเมื่อใช้ยูเรียเป็นสารตั้งต้นจะได้กราฟิติการ์บอนไนไตรด์ที่มีขนาดผลึกเท่ากับ 4.8 นาโนเมตร และเมื่อใช้เมลามีนเป็นสารตั้งต้นจะได้ขนาดผลึกเท่ากับ 8.8 นาโนเมตร ซึ่งกราฟิติการ์บอนไนไตรด์ที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ยูเรียที่มีขนาดผลึกเล็ก เนื่องจากขณะที่ทำการบ่มทางความร้อนยูเรียได้เกิดแก๊สแอมโมเนียและคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณมากกว่าเมลามีน ส่งผลให้กราฟิติการ์บอนไนไตรด์ที่สังเคราะห์จากการใช้ยูเรียมีรูพรุนมากจึงมีขนาดผลึกที่เล็กและพื้นที่ผิวที่สูงกว่า ดังแสดงในภาพถ่ายของกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน 2.19 [4]



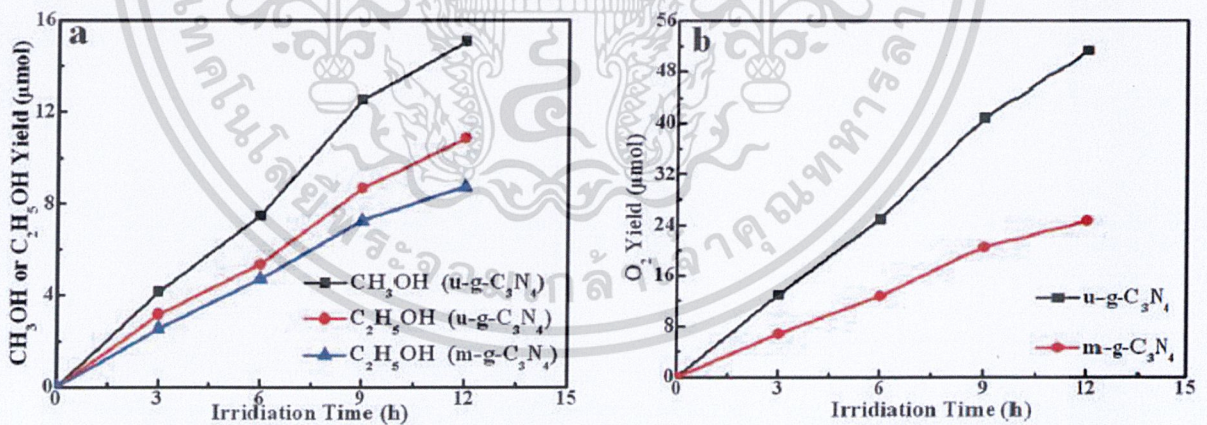
รูปที่ 2.18 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของกราฟิติการ์บอนไนไตรด์จากเมลามีนและยูเรีย [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 ภาพถ่าย TEM ของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่สังเคราะห์จาก a) เมลามีน และ b) ยูเรีย [4]

จากการศึกษาปฏิกิริยาการเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเชื้อเพลิงพบว่าผลิตภัณฑ์ของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์จากยูเรียที่ได้คือเอทานอลและเมทานอล สำหรับกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์จากเมลามีนมีผลิตภัณฑ์หลักคือเอทานอลดังแสดงในรูปที่ 2.20 และยังพบว่าปริมาณผลิตภัณฑ์เอทานอลที่ได้จาก กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์จากการใช้ยูเรียเป็นสารตั้งต้นพบปริมาณเอทานอลมากกว่ากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ผลิตจากเมลามีน 1.2 เท่า เนื่องจากยูเรียกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์มีพื้นผิวสัมผัสและรูพรุนมากกว่าเมลามีนกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ทำให้สามารถทำปฏิกิริยารีดักชันได้มากกว่าส่งผลให้มีผลผลิตมากกว่า [4]

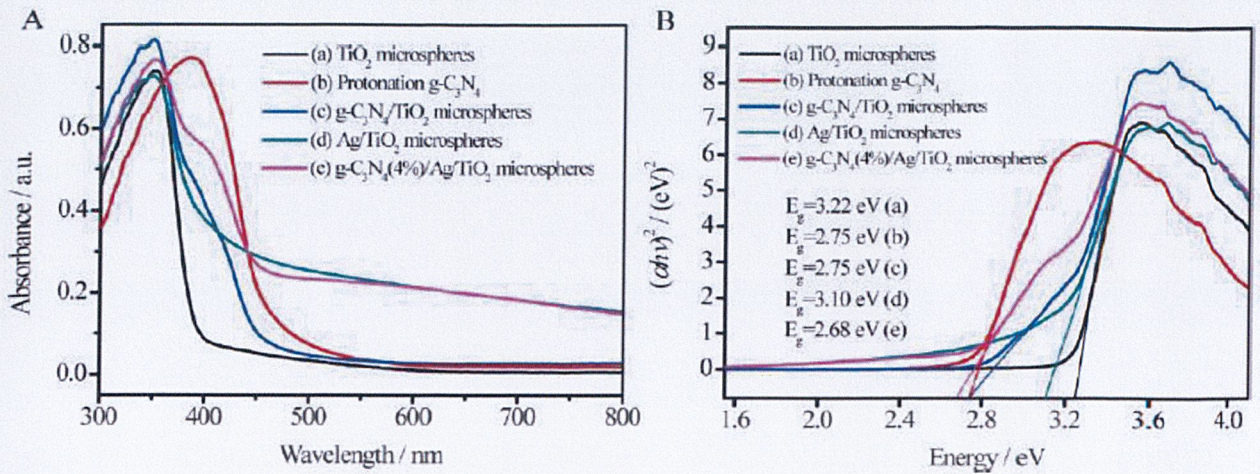


รูปที่ 2.20 กราฟปริมาณการเปลี่ยนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ a) เมทานอลและเอทานอล และ b) ออกซิเจนเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์จากเมลามีนและยูเรียภายใต้การฉายรังสีช่วงวิซีเบิลที่เวลาต่าง ๆ [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

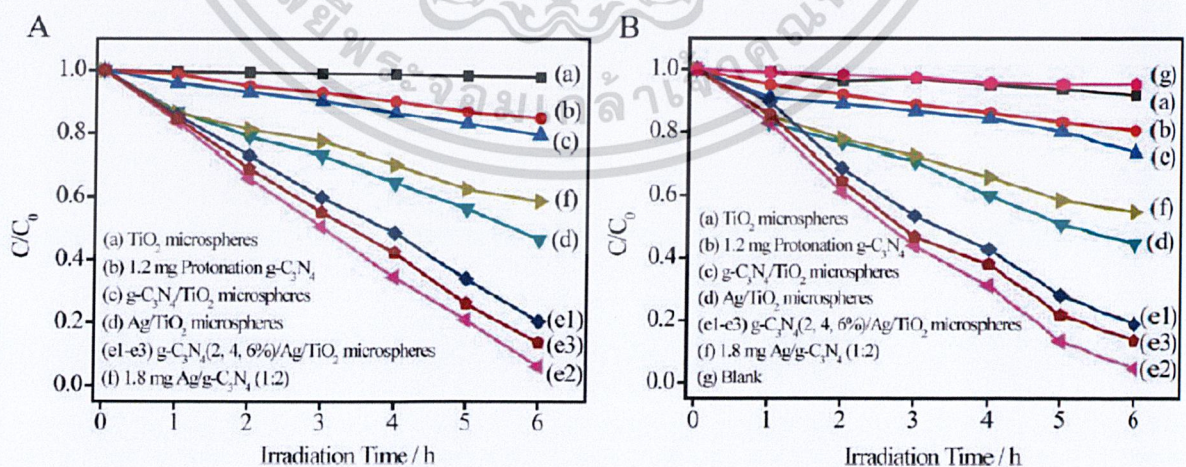
จากการทดลองของ Yan feng Chen และคณะ [27] สังเคราะห์กราฟิติคาร์บอนไนไตรด์ โดยเผาเอลามีนที่ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อน 2 องศาต่อนาที จากนั้นนำไปปรับปรุงผิวด้วยกรดไฮโดรคลอริก แล้วทำการสังเคราะห์วัสดุผสมกราฟิติคาร์บอนไนไตรด์/ซิลเวอร์/ไทเทเนียมไดออกไซด์ กระจายตัวในน้ำปราศจากไอออน (deionized water) ด้วยกระบวนการอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นใส่พอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 1 มิลลิลิตร และปั่นกวนเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นทำการเคลือบซิลเวอร์ลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิคโฟโตดีโพสิชัน (photodeposition) ของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท จากนั้นเติมกราฟิติคาร์บอนไนไตรด์ในวัสดุผสมทำการกรองและล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน แล้วนำสารไปอบแห้ง รูปที่ 2.21 แสดงผลการศึกษาสมบัติทางแสงของสารตัวอย่างที่เตรียมได้ด้วยเทคนิควัดค่าการสะท้อนจากรังสียูวี-วิสิเบิล รูปที่ 2.21A แสดงสเปกตรัมการสะท้อนของวัสดุผสมชนิดต่าง ๆ พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ มีการดูดกลืนแสงมากในช่วงความยาวคลื่น 300-370 นาโนเมตร และมีการดูดกลืนแสงที่น้อยลงที่ความยาวคลื่น 370-800 นาโนเมตร การเติมกราฟิติคาร์บอนไนไตรด์ช่วยเพิ่มการดูดกลืนในช่วง 300-450 นาโนเมตร ส่วนการเติมซิลเวอร์ช่วยเพิ่มการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นในช่วง 370-800 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงที่ไทเทเนียมไดออกไซด์ดูดกลืนน้อย โดยการเติมทั้งกราฟิติคาร์บอนไนไตรด์และซิลเวอร์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดกลืนแสงสูงที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุผสมชนิดอื่น ๆ และมีการดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่นที่สูงขึ้น (red shift) เมื่อเทียบกับไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ จึงสรุปได้ว่าการเติมซิลเวอร์และกราฟิติคาร์บอนไนไตรด์ช่วยให้อัตราการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่สูงขึ้นจากการสังเคราะห์วัสดุผสมกราฟิติคาร์บอนไนไตรด์/ซิลเวอร์/ไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่าการเติมกราฟิติคาร์บอนไนไตรด์และซิลเวอร์ส่งผลให้มีค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงานมีค่าเท่ากับ 2.68 eV ซึ่งมีค่าน้อยกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ 1.20 เท่า และมีค่าน้อยกว่าวัสดุผสมกราฟิติคาร์บอนไนไตรด์/ไทเทเนียมไดออกไซด์ และ ซิลเวอร์/ไทเทเนียม 1.02 เท่า และ 1.15 เท่า ตามลำดับ สรุปได้ว่าการเติมวัสดุผสมทั้งสองชนิดสามารถช่วยลดแถบช่องว่างพลังงานและลดอัตราการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนโฮลได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 a) ยูวี-วิสิเบิลสเปกตรัม และ b) ค่าแถบช่องว่างพลังงานของวัสดุผสม [27]

เมื่อนำไปทดสอบประสิทธิภาพในการสลายสี้อมด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลโฟโตมิเตอร์ จากรูปที่ 2.22A และ 2.22B เป็นการทำปฏิกิริยาการสลายสี้อมเมทิลออเรนจ์และฟีนอลภายใต้รังสีช่วงวิสิเบิลเป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่าวัสดุผสมที่มีการกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์และซิลเวอร์มีประสิทธิภาพการสลายสี้อมสูงที่สุดและปริมาณการเจือกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ส่งผลต่อประสิทธิภาพการสลายสี้อม โดยปริมาณการเจือกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่มีประสิทธิภาพการสลายสี้อมที่เหมาะสมก็คือกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก เนื่องจากกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ทำให้ความต้องการพลังงานในการกระตุ้นเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาน้อยลงจึงสามารถเกิดปฏิกิริยาได้มาก แต่หากปริมาณกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์มีมากเกินไปจะทำให้ประสิทธิภาพการสลายสี้อมลดลง เนื่องจากกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์จะไปบดบังพื้นที่การเกิดปฏิกิริยาของไทเทเนียมไดออกไซด์ส่งผลให้ประสิทธิภาพการสลายสี้อมลดลง



รูปที่ 2.22 ประสิทธิภาพการสลายสี้อม A) เมทิลออเรนจ์ B) ฟีนอล ภายใต้การฉายรังสีวิสิเบิล [27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

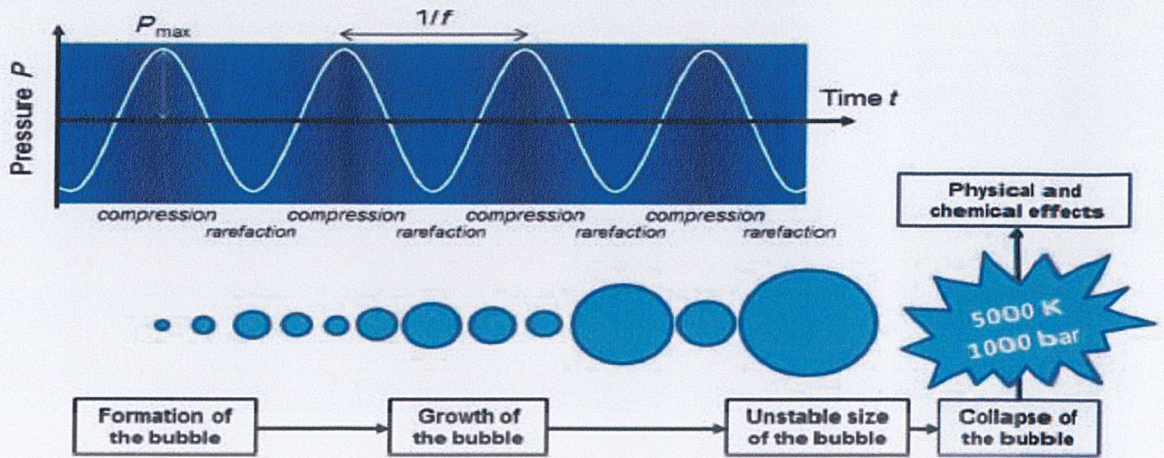
2.4 วิธีการเตรียมวัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

จากการศึกษารายงานวิจัยที่ผ่านมาโครงการพิเศษนี้จึงได้พัฒนาสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงโดยการปรับปรุงพื้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีการโซโนเคมี (sonochemical technique) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ส่งผลต่อการแตกตัวเป็นแผ่นระดับนาโนเมตรบริเวณพื้นผิวทำให้เกิดพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยามากขึ้นและสารละลายเกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและใช้เวลาน้อยในการปรับปรุงพื้นที่ผิว และได้ศึกษาผลของการเติมซีเรียมออกไซด์และกราฟิติกคาร์บอนไตรไตต์โดยใช้วิธีการปั่นกววนเพื่อให้เกิดการกระจายตัวของแต่ละวัสดุอย่างสม่ำเสมอ

2.4.1 เทคนิคโซโนเคมี (Sonochemical technique)

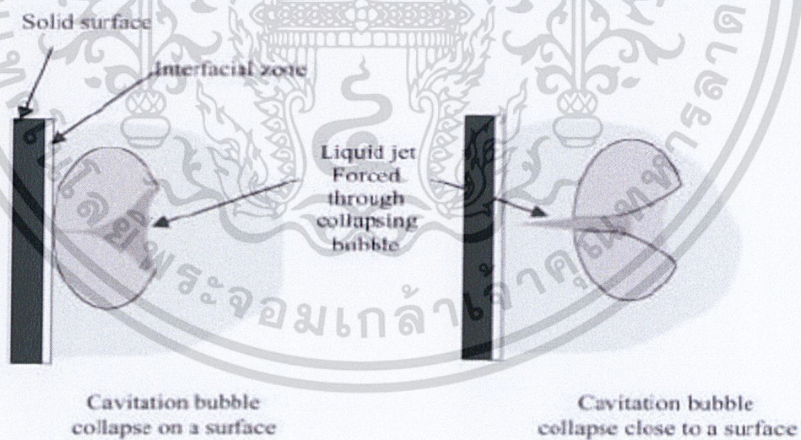
เทคนิคโซโนเคมีเป็นหนึ่งในวิธีการเตรียมวัสดุนาโนที่อาศัยคลื่นเสียงความถี่สูงหรือคลื่นอัลตราซาวด์ (ultrasonic wave) ในกระบวนการทางเคมี ได้แก่ การแตกพันธะเคมีและการกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีให้เกิดการฟอร์มผลึกทั้งแบบสัณฐานและอสัณฐาน โซโนเคมีเป็นปรากฏการณ์ของกลไกการเปลี่ยนสภาพของฟองอากาศภายในของเหลวอันเนื่องมาจากพลังงานเสียงหรือที่เรียกว่า อะคูสติกคาวิตีเทชั่น (acoustic cavitation) ประกอบด้วย การเกิด (creation) การเติบโต (growth) และการแตกของฟองแก๊ส (collapse of bubbles) ในช่วงเวลา ซึ่งเป็นการทำให้สารมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous solution) มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ในขั้นตอนแรกของการเกิดฟองอากาศนั้นต้องอาศัยพลังงานของเสียงที่มีความเข้มสูงกว่า 10 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเพียงพอที่จะสลายพันธะเคมีของสารละลายให้แตกออกจากกันเป็นอนุพันธ์ของไอออนบวกและลบ (อนุพันธ์ที่เหนียวน้ำหรือกระตุ้น ให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์) รวมทั้งไอ (diffused vapor) ของสารละลาย ซึ่งไอนี้กล่าวว่าเป็นตัวการของการฟอร์มนิวเคลียสของฟองแก๊สในของเหลว [28] ขึ้นต่อมาจะเกิดการแพร่ของไอของสารละลายเข้าไปในฟองแก๊สเพิ่มขึ้น จนทำให้มีขนาดเพิ่มขึ้น และในท้ายที่สุด ฟองแก๊สเหล่านั้นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 10 - 300 ไมครอน ที่ไม่สามารถทนแรงดันภายในได้อีก จะเกิดการระเบิดจากภายในฟองแก๊ส (implosive collapse) โดยปลดปล่อยความร้อนสูงถึง 5,000 เคลวิน และความดัน 200 - 500 ความดันบรรยากาศ ที่บริเวณเฉพาะตำแหน่งของแต่ละฟองแก๊ส (local implosion) อย่างรวดเร็ว ($<10^{-9}$ วินาที) ซึ่งเป็นเวลาที่สั้นมาก จึงส่งผลให้เกิดอัตราการเย็นตัวที่สูงมาก ($>10^{11}$ K/วินาที) รูปที่ 2.23 แสดงขั้นตอนการระเบิดเย็นของฟองอากาศในกระบวนการโซโนเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 แสดงถึงขั้นตอนการระเบิดเย็นของฟองอากาศในกระบวนการโซโนเคมี [28]

ผลของกระบวนการโซโนเคมีก่อให้เกิดเจ็ทสตรีม (jet stream) จากการแตกตัวของฟองแก๊สดังแสดงในรูปที่ 2.24 ส่งผลให้เกิดแรงเฉือน (shear force) และคลื่นกระแทก (shock wave) จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการชนกันของอนุภาคด้วยความเร็วสูงและรุนแรง เกิดความร้อนสูงในตำแหน่งที่ชนจนเกิดการหลอม (local melting) ของอนุภาคของแข็งที่แขวนลอยอยู่ในสารละลาย โดยมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็งและของเหลวเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลัน ทำให้เกิดการฟอร์มเป็นผลึกของสารขึ้น ดังนั้นวิธีนี้จึงเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ และปฏิกิริยาเกิดอย่างรวดเร็ว ช่วยประหยัด พลังงาน เวลา และค่าใช้จ่าย [29]



รูปที่ 2.24 เจ็ทสตรีม (jet stream) ที่เกิดขึ้นจากการแตกตัวของฟองแก๊สในของเหลว [30]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

โครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์และทดสอบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา-เชิงแสงวัสดุผสมกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์/ซีเรียมออกไซด์/ไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนดังนี้ คือ การปรับปรุงพื้นผิววัสดุไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดทางการค้า P25 และไทเทเนียมออกไซด์วัฏภาคอนาเทส (anatase) โดยวิธีโซโนเคมี และการปรับปรุงสมบัติการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยการเติมซีเรียมออกไซด์และกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ และทดสอบประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่ใช้ในการสลายสีย้อมด้วยแสง ซึ่งมีเนื้อหาดังต่อไปนี้

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 3.1.1 ปีกเกอร์ขนาด 1000 600 250 และ 50 มิลลิลิตร
- 3.1.2 กระบอกตวงสารขนาด 100 50 และ 10 มิลลิลิตร
- 3.1.3 ขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร
- 3.1.4 ปีเปตขนาด 1 มิลลิลิตร
- 3.1.5 ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 3.1.6 ไมโครปีเปต
- 3.1.7 แผ่นอลูมิเนียมฟลอยด์
- 3.1.8 ขวดสามคอสำหรับกระบวนการโซโนเคมี
- 3.1.9 ซ้อนตักสารอลูมิเนียม
- 3.1.10 หลอดเซนตริฟิวจ์
- 3.1.11 ยูนิเวอร์ซัลอินดิเคเตอร์
- 3.1.12 หลอดหยด
- 3.1.13 ตู้อบ
- 3.1.14 เครื่องชั่งทศนิยมสี่ตำแหน่ง
- 3.1.15 ครูซิเบิล
- 3.1.16 ชุดควบคุมการไหลของแก๊ส
- 3.1.17 เครื่องเขย่าผสมสาร (orbital shaker) บริษัท GALLENKAMP
- 3.1.18 ตู้ให้แสงพร้อมหลอดยูวีซี (ultraviolet-C lamp, UVC) บริษัท TOKIVA ความยาวคลื่น 247 นาโนเมตร และหลอดแสงที่ตามองเห็นบริษัท LAMPTON ความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร
- 3.1.19 เครื่องโซโนเคมี (sonicator) รุ่น SONICS บริษัท VIBRACELL
- 3.1.20 เครื่องปั่นเหวี่ยงตะกอน (centrifuge) รุ่น EBA 20 บริษัท HETTICH

เอกสารนี้เป็นเอกสารทงสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนูญตเห็นาไปเซประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

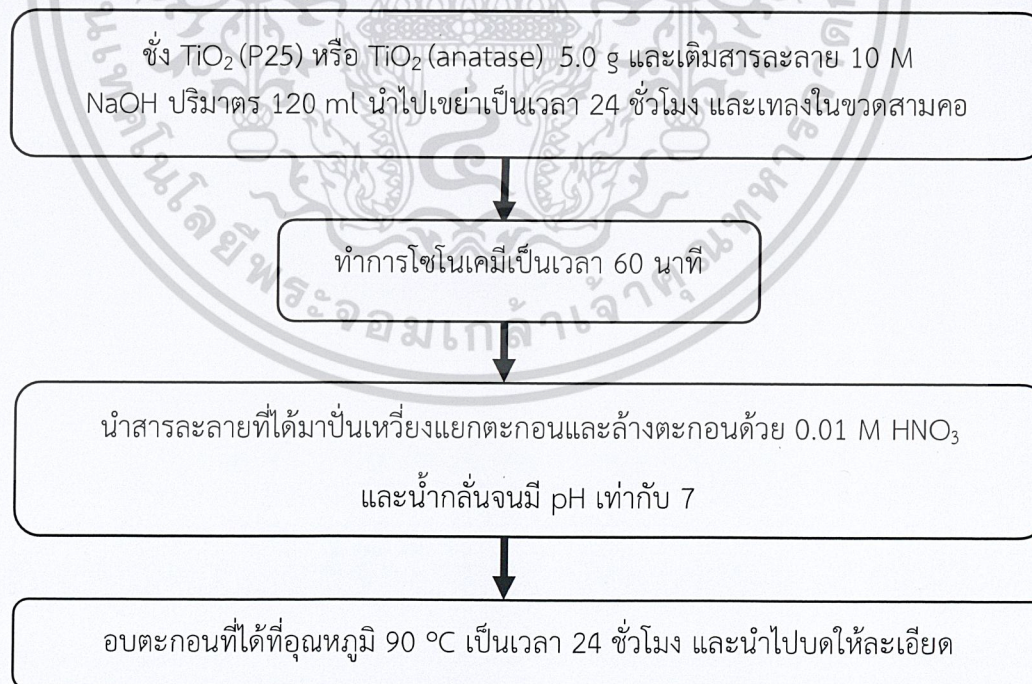
- 3.1.21 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope; TEM) รุ่น TECNAI 20 TWIN บริษัท FEI และรุ่น JEM-400 บริษัท JEOL
- 3.1.22 เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer; XRD) รุ่น XRD-6100 บริษัท SHIMADZU
- 3.1.23 เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrophotometer; FT-IR) รุ่น IR Tracer-100 บริษัท SHIMADZU
- 3.1.24 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและรูพรุนโดยวิธีของ Brunauer Emmett Teller; BET) รุ่น autosorb 1 บริษัท AUTOSORB
- 3.1.25 เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible spectroscopy; UV-Vis) รุ่น T60 บริษัท BANGKOK HIGH LAB และ UV-Visible Diffuse Reflectance spectroscopy; UV-DRS รุ่น EVOLUTION 201 บริษัท THERMO SCIENTIFIC
- 3.1.26 เครื่องฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรมิเตอร์ (fluorescence spectrometer) รุ่น FP-6300 บริษัท JASCO
- 3.1.27 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope; SEM) รุ่น QUANTA 250 บริษัท FEI
- 3.2 สารเคมี**
- 3.2.1 ผงไทเทเนียมออกไซด์เกรดการค้า P25 บริสุทธิ์ 99.5% บริษัท SIGMA ALDRICH
- 3.2.2 ผงไทเทเนียมไดออกไซด์รูปภาคอนาเทส (anatase) บริสุทธิ์ 99.8% บริษัท ACROS ORGANICS
- 3.2.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) บริสุทธิ์ 98% บริษัท CARLO ERBA
- 3.2.4 กรดไนตริก (HNO₃) บริสุทธิ์ 65% บริษัท MERCK
- 3.2.5 น้ำกลั่น (distilled water)
- 3.2.6 แอมโมเนียมซีเรียม (IV) ไนเตรท ((NH₄)₂Ce(NO₃)₆) บริสุทธิ์ 99% บริษัท ACROS ORGANICS
- 3.2.7 กรดไฮโดรคลอริก (HCl) บริสุทธิ์ 35.4% บริษัท LOBA CHEMIE
- 3.2.8 เมทิลีนบลู (C₁₆H₁₈N₃SCl·3H₂O) ความบริสุทธิ์ 95% บริษัท CARLO ERBA
- 3.2.9 เมทานอล (CH₃OH) บริสุทธิ์ 99.9% บริษัท CARLO ERBA
- 3.2.10 เอทานอล (C₂H₅OH) บริสุทธิ์ 99.9% บริษัท CARLO ERBA
- 3.2.11 ยูเรีย ((NH₂)₂CO) บริสุทธิ์ 99.0% บริษัท CARLO ERBA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การสังเคราะห์วัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

3.3.1 การปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์

- 1) ชั่งผงไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และไทเทเนียมไดออกไซด์วิฎภาคอนาเทส (anatase) จำนวน 5.0 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่แล้วเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ ปริมาตร 120 มิลลิลิตร
 - 2) นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าสารเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นเทสารที่เขย่าแล้วใส่ในขวดสามคอสำหรับทำปฏิกิริยาโซโนเคมี
 - 3) ทำการโซโนเคมีด้วยกำลังไฟฟ้า 750 วัตต์ ที่จังหวะของการให้สัญญาณต่อจังหวะหยุดให้สัญญาณ 4:1 วินาที เป็นเวลา 60 นาที
 - 4) นำสารแขวนลอยที่ได้จากการโซโนเคมีมาทำการปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกตะกอนด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงแยกตะกอนที่ความเร็วของการปั่นเหวี่ยง 8,000 รอบต่อนาที
 - 5) แยกตะกอนที่ได้จากการปั่นเหวี่ยงและทำการล้างตะกอนด้วยสารละลายกรดไนตริก (HNO_3) ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ 2 ครั้ง
 - 6) ล้างตะกอนซ้ำด้วยน้ำกลั่น จนสารละลายที่ได้จากการแยกตะกอนมีค่า pH เท่ากับ 7
 - 7) อบตะกอนที่ได้ให้แห้งที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
 - 8) นำตะกอนที่ได้มาบดให้ละเอียดด้วยโกร่งบดสารจะได้เป็นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นที่ผิว (modified TiO_2)
- แผนผังแสดงการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ (P25) และไทเทเนียมไดออกไซด์ (anatase) ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังการปรับปรุงพื้นผิวอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การเตรียมวัสดุผสมกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์/ซีเรียมออกไซด์/ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว

3.3.2.1 การสังเคราะห์ซีเรียมออกไซด์ (CeO_2)

1) ชั่งผงแอมโมเนียมซีเรียม(IV) ไนเตรต จำนวน 6.3706 กรัม มาทำการละลายและปรับ-ปริมาตรในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น

2) เทสารละลายที่เตรียมได้ในข้อ 1) ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วทำการปั่นกวน โดยใช้เครื่องปั่นกวน จากนั้นค่อย ๆ เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ลงไป เพื่อปรับค่า pH จนสารละลายที่ได้มี pH เท่ากับ 12 โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ประมาณ 150 มิลลิลิตร

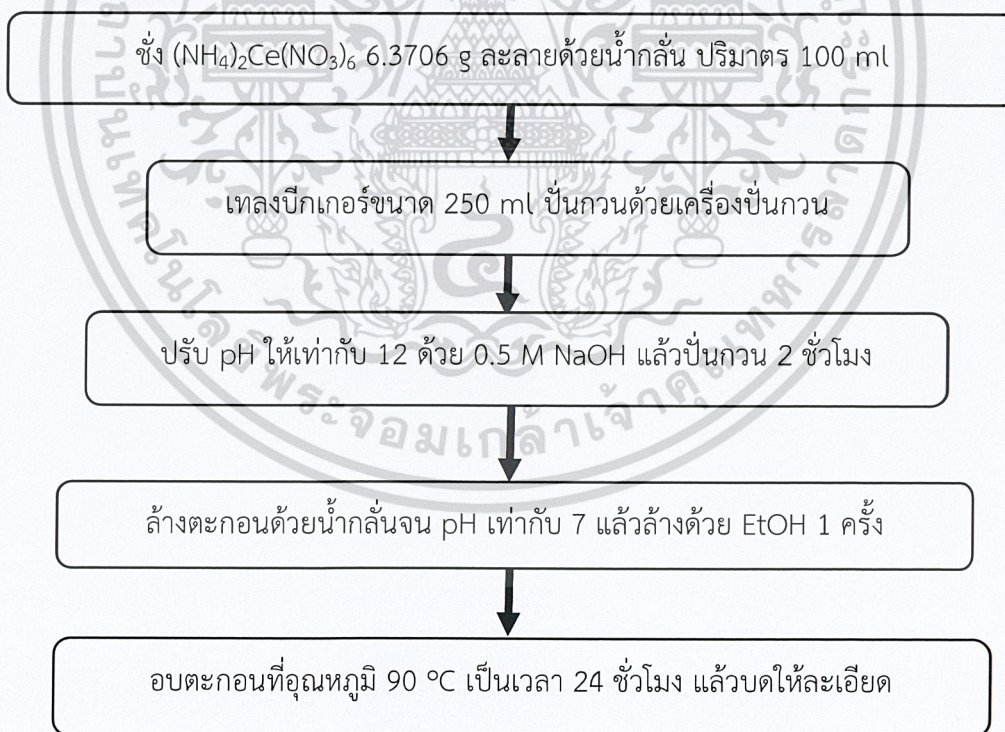
3) นำสารละลายที่ผ่านการปรับค่า pH แล้วมาทำการปั่นกวนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

4) นำสารที่ได้มาปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกตะกอนและล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นจนสารละลายมีค่า pH เท่ากับ 7

5) ล้างตะกอนด้วยสารละลายเอทานอลจำนวน 1 รอบ

6) นำตะกอนไปอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปดัดให้ละเอียดด้วยโม่บดสาร

แผนผังแสดงการสังเคราะห์ซีเรียมออกไซด์ (CeO_2) ดังแสดงในรูปที่ 3.2

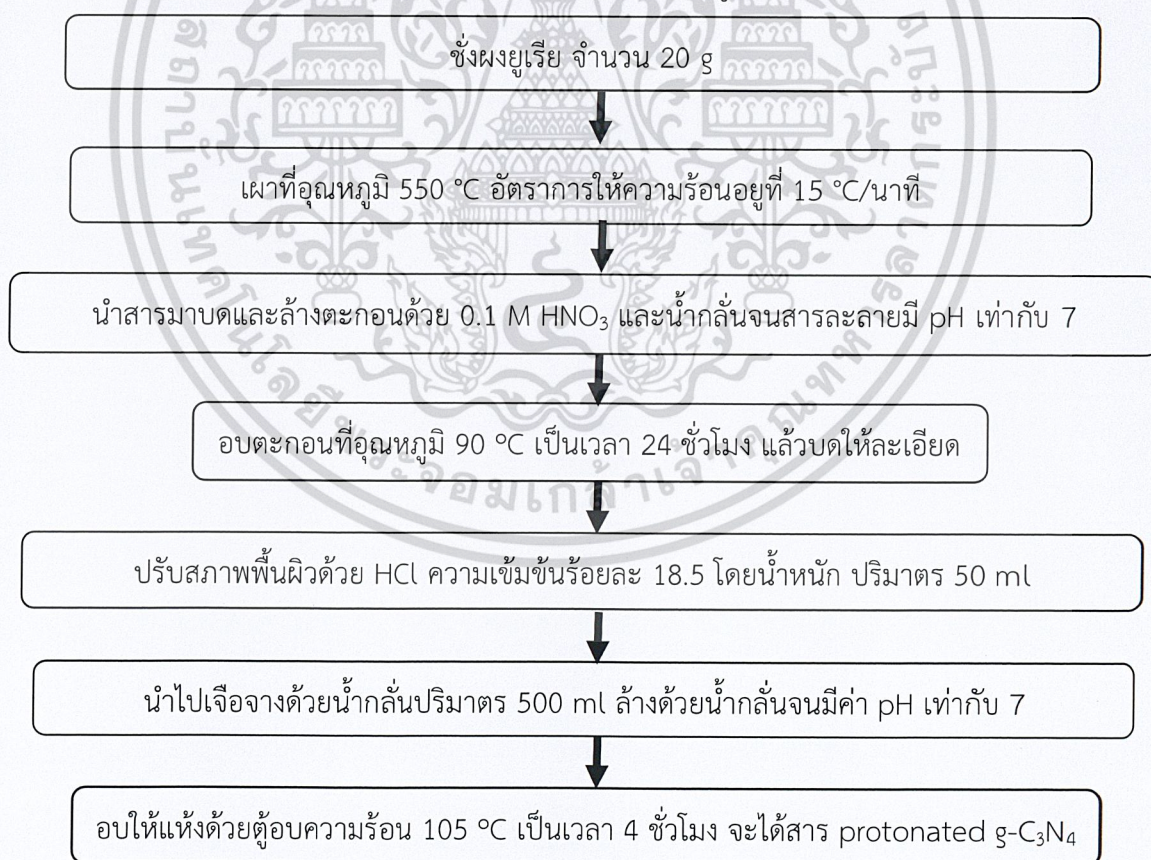


รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงการสังเคราะห์ซีเรียมออกไซด์ (CeO_2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2.2 การเตรียมกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ (graphitic carbon nitride; g-C₃N₄)

- 1) ชั่งผงยูเรีย จำนวน 20 กรัม ใส่ในครุชชีเบลพร้อมปิดฝาให้สนิท
 - 2) นำไปเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง อัตราการให้ความร้อนอยู่ที่ 15 °C/นาที ในบรรยากาศปกติ
 - 3) นำสารมาบดให้ละเอียดแล้วนำมาล้างตะกอนด้วยสารละลายกรดไนตริก (HNO₃) ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ 2 ครั้งและปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกตะกอน
 - 4) ล้างตะกอนซ้ำด้วยน้ำกลั่น จนสารละลายที่ได้จากการแยกตะกอนมีค่า pH เท่ากับ 7
 - 5) นำตะกอนไปอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปบดให้ละเอียดด้วยโกร่งบดสาร
 - 6) นำกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์จำนวน 1 กรัม มาปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้นร้อยละ 18.5 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 50 มิลลิลิตรและปั่นกวน 10 นาที
 - 7) นำไปเจือจางด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 500 มิลลิลิตรและปั่นกวน 10 นาที
 - 8) ปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกตะกอนแล้วล้างด้วยน้ำกลั่นจนมีค่า pH เท่ากับ 7
 - 9) อบให้แห้งด้วยตู้อบความร้อน 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
 - 10) จะได้สารเป็นกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่มีพื้นผิวเป็นประจุบวก
- แผนผังการเตรียมกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนผังแสดงการเตรียมกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ (g-C₃N₄)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของงานวิจัยที่จัดทำขึ้นโดยผู้เขียนเพื่อประโยชน์ด้านการค้า ไม่สามารถนำออกเผยแพร่ได้ หากมีผู้ใดคัดลอกหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจะถือว่าผิดกฎหมาย

3.3.2.3 การเตรียมวัสดุผสมกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์/ซีเรียมออกไซด์/ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว

ในการเตรียมวัสดุผสมเพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงจะเตรียมที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักเป็นร้อยละ 20 ของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์และร้อยละ 1 ของซีเรียมออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปรับปรุงพื้นที่ผิว (modified TiO_2) โดยมีวิธีการเตรียมดังนี้

1) ชั่งกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ ซีเรียมออกไซด์ และไทเทเนียมไดออกไซด์ตามปริมาณที่แสดงในตารางที่ 3.1

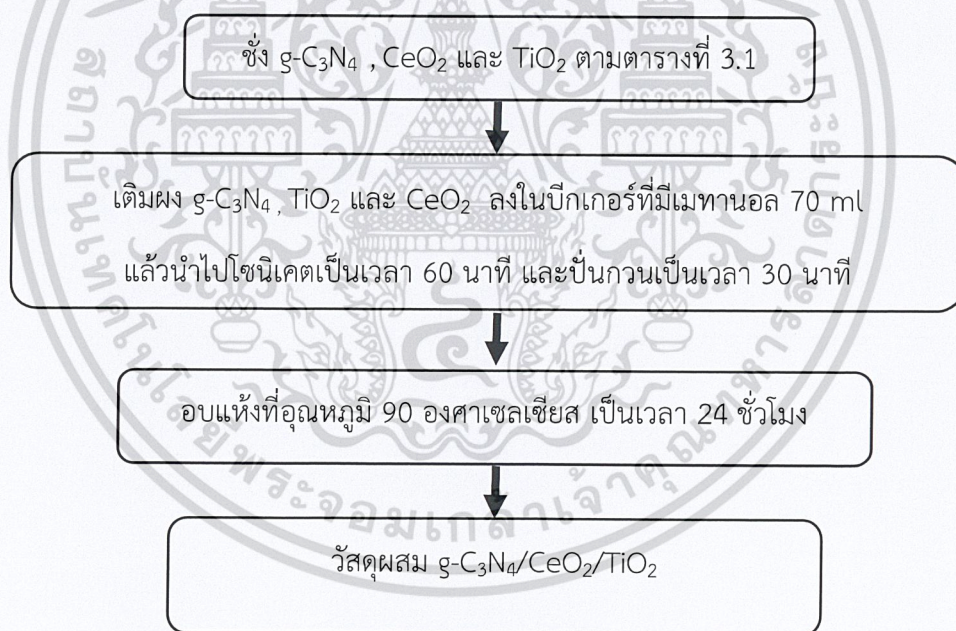
2) ตวงเมทานอลมา 70 มิลลิลิตร เทลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมผงกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ ไทเทเนียมไดออกไซด์และซีเรียมออกไซด์ที่ชั่งเตรียมไว้แล้วลงในบีกเกอร์แล้วนำไปโซนิเคตประมาณ 60 นาที หลังจากนั้นทำการปั่นกวนต่อเป็นเวลา 30 นาที

3) นำสารผสมที่ได้ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

4) บดให้ละเอียดด้วยโกร่งบดสาร

5) จะได้เป็นวัสดุผสม $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{TiO}_2$

แผนผังการเตรียมวัสดุผสมซีเรียมออกไซด์/กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์/ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผนผังการเตรียมวัสดุผสมกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์/ซีเรียมออกไซด์/ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว

ตารางที่ 3.1 แสดงอัตราส่วนโดยน้ำหนัก (wt%) และปริมาณ (g) ของสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงปริมาณ 2 กรัม

ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง	g-C ₃ N ₄		CeO ₂		TiO ₂	
	wt%	ปริมาณ (g)	wt%	ปริมาณ (g)	wt%	ปริมาณ (g)
modified TiO ₂ (P25)	-	-	-	-	100	2
modified TiO ₂ (anatase)	-	-	-	-	100	2
g-C ₃ N ₄ /CeO ₂ /TiO ₂ (P25)	20	0.40	1	0.02	79	1.58
g-C ₃ N ₄ /CeO ₂ /TiO ₂ (anatase)	20	0.40	1	0.02	79	1.58
g-C ₃ N ₄ /modified TiO ₂ (P25)	20	0.40	-	-	80	1.60
CeO ₂ /modified TiO ₂ (P25)	-	-	1	0.02	99	1.98
g-C ₃ N ₄ /CeO ₂ /modified TiO ₂ (anatase)	20	0.40	1	0.02	79	1.58
g-C ₃ N ₄ /CeO ₂ /modified TiO ₂ (P25)	20	0.40	1	0.02	79	1.58
50%g-C ₃ N ₄ /CeO ₂ /modified TiO ₂ (P25)	50	1.00	1	0.02	49	0.98

3.4 การศึกษาสมบัติการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

3.4.1 การเตรียมกราฟมาตรฐานของสีย้อมเมทิลีนบลู

1) ชั่งเมทิลีนบลู 0.04 กรัม แล้วนำมาละลายด้วยน้ำกลั่น และปรับปริมาตรในขวดปรับปริมาตรที่หุ้มด้วยแผ่นอะลูมิเนียมขนาด 2000 มิลลิตร จะได้สารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm)

2) เตรียมสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 0.1, 0.5, 1, 2, 3 และ 4 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการปิเปตสารละลายเมทิลีนบลูที่เตรียมได้จากข้อ 1) มาเติมในขวดปรับปริมาตรขนาด 25 มิลลิตร และทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น โดยความเข้มข้นและปริมาตรเมทิลีนบลูที่ต้องปิเปตมา ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ทำการหุ้มแผ่นอะลูมิเนียมที่บีกเกอร์และขวดปรับปริมาตรที่ใช้ใส่สารละลายเมทิลีนบลู เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาของสารละลายกับแสง

3) นำสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลูที่เตรียมได้ จากข้อที่ 2) มาตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ใช้ประโยชน์ด้านการค้า โดยไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยาวคลื่น 664 นาโนเมตร ซึ่งเป็นค่าความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{\max}) ของเมทิลีนบลู จากนั้นนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปสร้างกราฟมาตรฐาน

ตารางที่ 3.2 ความเข้มข้นและปริมาตรที่ใช้ในการเตรียมสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลู

ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู (mg/L)	ปริมาตรสารละลายเมทิลีนบลู ความเข้มข้น 10 mg/L ที่ต้องปิเปต (mL)
0.1	0.125
0.5	0.625
1	1.250
2	2.500
3	3.750
4	5.000

3.4.2 การศึกษาการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู

1. ชั่งตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงที่สังเคราะห์ได้ 0.02 กรัม ลงในปิกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. ตวงสารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร (ที่เตรียมได้จากตอน 3.4.1) ปริมาตร 200 มิลลิลิตร แล้วเทลงในปิกเกอร์ที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง จากนั้นนำเข้าไปในตู้เร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเป็นเวลา 60 นาที โดยทำการปั่นกวนและยังไม่ให้แสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) หรือแสงที่ตามองเห็น (visible light)
3. เมื่อครบเวลาทุก ๆ 30 นาที ดูดสารละลายมา 15 มิลลิลิตร ไปทำการปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกตะกอน และนำสารละลายเมทิลีนบลูไปทำการตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร โดยใช้เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์
4. หลังจากผ่านไป 60 นาที ทำการปั่นกวนและให้แสงอัลตราไวโอเล็ตความยาวคลื่น 254 นาโนเมตรหรือแสงที่ตามองเห็นในตู้เร่งปฏิกิริยาเชิงแสงต่อเป็นเวลา 5 ชั่วโมง และเก็บตัวอย่างสารละลายเมทิลีนบลูเมื่อเวลาผ่านไปทุก ๆ 1 ชั่วโมง เพื่อไปทำการตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสง
5. นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปหาความเข้มข้นโดยการเทียบจากกราฟมาตรฐานแล้วจึงหาความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทำปฏิกิริยา และประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ตและแสงที่ตามองเห็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

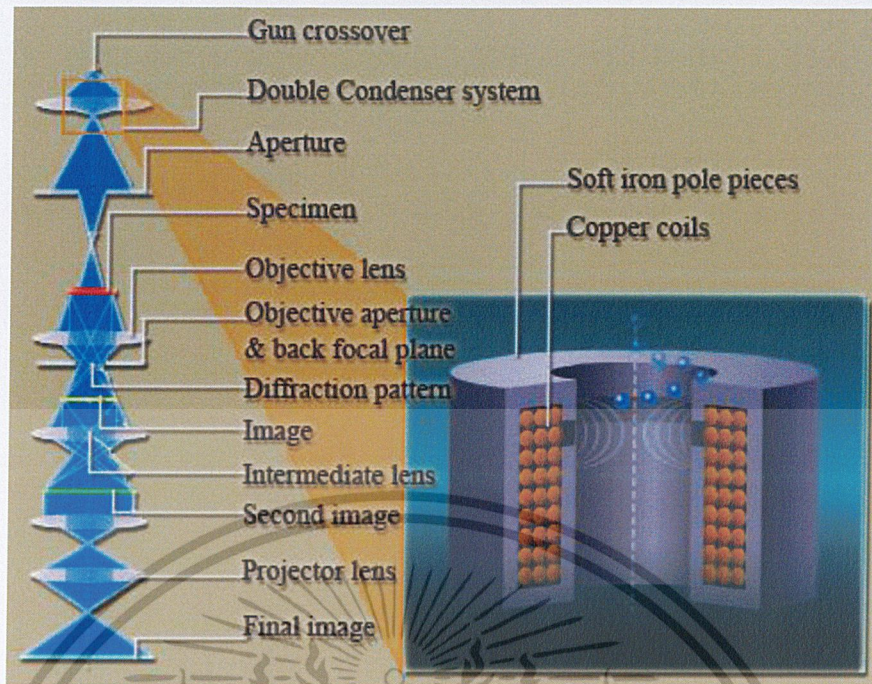
3.5 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์และสมบัติของตัวเร่งที่เป็นวัสดุผสมกราฟิติการ์บอนไน- ไตรด์/ซีเรียมออกไซด์/ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว

เมื่อทำการเตรียมตัวเร่งที่เป็นวัสดุผสมกราฟิติการ์บอนไนไตรด์ซีเรียมออกไซด์/ไทเทเนียม- ไดออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวเรียบร้อยแล้วนั้น จะถูกนำไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์สัณฐาน- วิทยาและสมบัติในด้านต่างๆดังนี้

3.5.1 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน- แบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope; TEM)

เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ในการศึกษาวัตถุ ในระดับนาโนเมตร โดยอาศัยการยิง- ลำอิเล็กตรอนทะลุผ่านชิ้นงานตัวอย่างที่มีความบางมากน้อยกว่า 100 นาโนเมตร ซึ่งลำอิเล็กตรอนที่ ทะลุและเลี้ยวเบนผ่านตัวอย่างจะถูกนำมาสร้างเป็นภาพด้วยการโฟกัสและขยายด้วยเลนส์แม่เหล็ก และฉายลงบนฉากรับภาพ เนื่องจากอิเล็กตรอนมีความยาวคลื่นที่สั้นกว่าแสงมากจึงทำให้กล้อง TEM มีกำลังขยายและกำลังแยกแยะ (resolution) สูงกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงมาก หลักการทำงานของ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านนั้นดังแสดงในรูปที่ 3.5 [31] จะอาศัยลำแสงอิเล็กตรอน เคลื่อนที่ชนกับวัตถุที่ต้องการตรวจสอบโดยอาศัยการป้อนพลังงานไฟฟ้าไปยังขดลวดที่เป็นขั้วแคโทด เมื่อพลังงานมากพอ อิเล็กตรอนจากขั้วแคโทดจะถูกปลดปล่อยออกมา แต่เนื่องจากอิเล็กตรอนเป็น ขั้วประจุไฟฟ้า ทำให้วิ่งเข้าไปหาอนุภาคที่มีขั้วประจุต่างกันเช่นในอากาศ ทำให้อิเล็กตรอนไม่สามารถ วิ่งเข้าไปชนเป้าชิ้นงานตัวอย่างได้ ดังนั้นภายในกล้องจุลทรรศน์จึงเป็นระบบสุญญากาศและจะมี เลนส์รวมแสง (condenser) เป็นตัวเพิ่มความเข้มแสง ซึ่งจะใช้เป็นขดลวดพันรอบแท่งเหล็ก เพื่อ เหนี่ยวนำให้ทิศทางของลำอิเล็กตรอนอยู่ในทิศทางเดียวกัน ซึ่งจะให้เกิดความเข้มของอิเล็กตรอน เพิ่มขึ้น เมื่ออนุภาคหรือลำแสงอิเล็กตรอนสามารถวิ่งไปชนวัตถุหรือชิ้นงาน แสงจะถูกดุดกกลืนและ ลำแสงส่วนที่เหลือจะสามารถทะลุผ่านชิ้นวัตถุไปยังเลนส์วัตถุ (objective len) หลังจากนั้นทาง ด้านล่างของเลนส์วัตถุจะมีระบบเลนส์ต่าง ๆ เพื่อแยกการมองออก เป็นสองเส้นทาง ทำให้ได้ภาพเป็น 2 มิติโดยฉากรับฟลูออเรสเซนส์ (fluorescence screen) เป็นฉากรับภาพ โดยความเข้มของภาพจะ ขึ้นอยู่กับค่าเลขอะตอมของวัตถุที่ถูกแสงอิเล็กตรอนส่องผ่าน [32] รูปที่ 3.6 แสดงกล้องจุลทรรศน์- อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน [33]

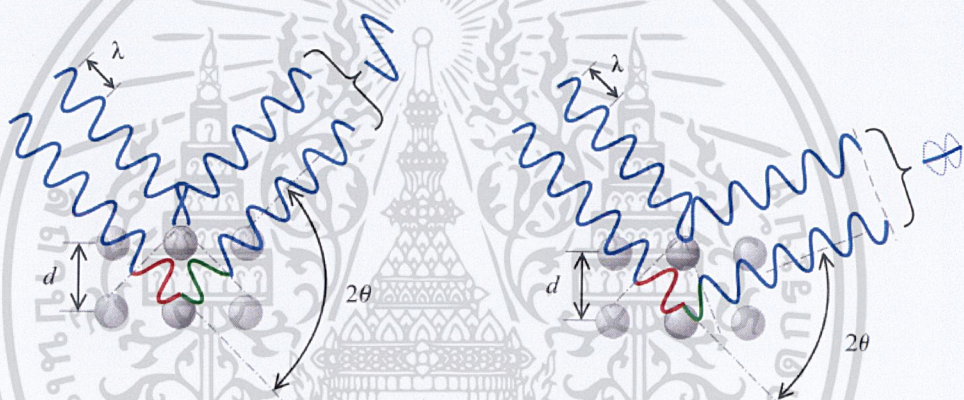


รูปที่ 3.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน [33]

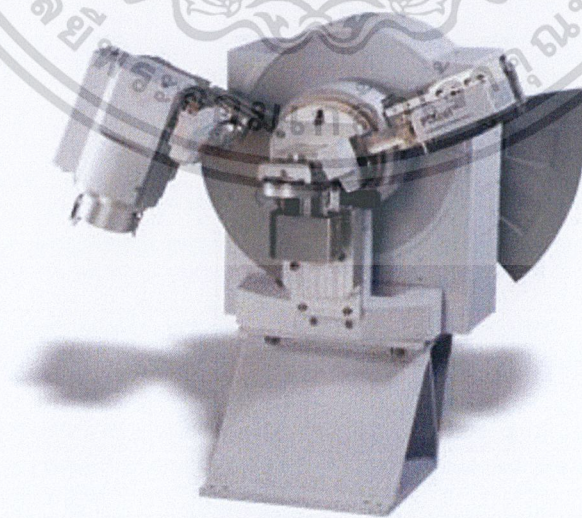
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 การตรวจโครงสร้างหลักด้วยเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer; XRD)

เป็นเทคนิคที่นำรังสีเอ็กซ์ (X-ray) มาใช้วิเคราะห์และระบุชนิดบโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง ทั้งในเชิงคุณภาพ (qualitative) และเชิงปริมาณ (quantitative) เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์อาศัยหลักการของการยิงรังสีเอ็กซ์ไปกระทบที่ชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนและสะท้อนออกมาที่มุมต่าง ๆ กันดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยมีจุดตรวจวัดสัญญาณ (detector) เป็นตัวรับข้อมูล องค์ประกอบและโครงสร้างของสารจะมีองค์ประกอบในการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (2θ) ในมุมที่แตกต่างกันออกไปขึ้นกับองค์ประกอบ รูปร่าง และลักษณะผลึก ซึ่งเมื่อทราบค่าระนาบผลึก (d-spacing) ที่ได้จึงสามารถบ่งชี้ชนิดและโครงสร้างผลึกของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง นอกจากนั้นแล้วยังสามารถศึกษาและวิเคราะห์ ปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึก ความสมบูรณ์ของผลึก และความเค้นของสารประกอบในสารตัวอย่าง โดยคำนวณจากกฎของแบรกก์ (Bragg's law) ซึ่งมีสมการคือ $n\lambda = 2d\sin\theta$ [34] รูปที่ 3.8 แสดงเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์



รูปที่ 3.7 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ [35]



รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ [36]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.3 การตรวจสอบสมบัติทางแสงด้วยเครื่องด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Diffused Reflectance UV-Vis Spectroscopy; UV-DRS)

เป็นเทคนิคที่ใช้ในการตรวจวัดการ ดูดกลืนแสง (absorbance) การส่องผ่านแสง (transmittance) และการสะท้อนแสง (reflectance) ซึ่งปริมาณการดูดกลืนแสงและมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเข้มข้น (intensity) ของสารตัวอย่างในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงวิสิเบิล ทำให้เทคนิคนี้สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ และยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ทดสอบสารได้อย่างหลากหลายทั้งในกลุ่มสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์และสารประกอบเชิงซ้อนที่ดูดกลืนรังสีในช่วงดังกล่าวได้ เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเปรียบเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่มีความยาวคลื่น ตามกฎของ Beer-Lambert โดยค่าการดูดกลืนแสงของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถระบุชนิดและปริมาณของสารที่ตัวอย่างได้และสามารถหาค่าแถบช่องว่างพลังงาน (band gap energy; E_g) ของสารตัวอย่าง [37] รูปที่ 3.9 แสดงเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

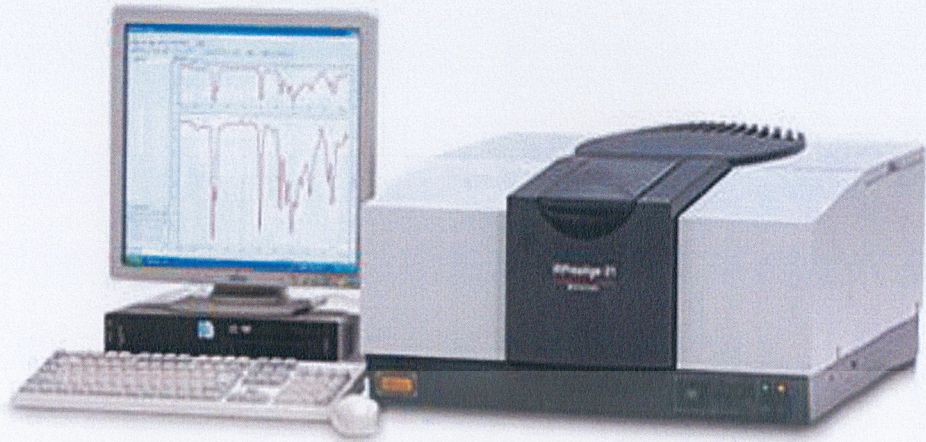


รูปที่ 3.9 เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-DRS) [38]

3.5.4 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier-transform infrared spectroscopy; FT-IR)

เป็นเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของโมเลกุล โดยข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างที่ได้เป็นทั้งคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยการให้แสงอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ กระตุ้นสารตัวอย่างโดยพันธะเคมีในโมเลกุลของสารจะดูดกลืนพลังงานที่ค่าความยาวคลื่นหนึ่ง จากนั้นข้อมูลจะถูกประมวลผลโดยคอมพิวเตอร์โดยการใช้สมการเชิงอนุพันธ์ที่เรียกว่าฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม ซึ่งจะคำนวณพลังงานของแต่ละความยาวคลื่นแปรผลออกมาเป็นสเปกตรัม เนื่องจากสารแต่ละชนิดให้สเปกตรัมที่มีลักษณะเฉพาะ สามารถนำมาเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของสารที่มีอยู่ในฐานข้อมูลเพื่อใช้ในการพิสูจน์และบ่งชี้ชนิดของสารตัวอย่างได้ [39] รูปที่ 3.10 แสดงเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ [40]

3.5.5 การตรวจสอบพื้นที่ผิวและรูพรุน โดยใช้สมการของ BET (Surface area and porosity analyzer; BET)

เป็นเทคนิคที่ใช้ในการหาพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) และการกระจายตัวของรูพรุน (pore size distribution) รวมถึงปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (total pore volume) ในการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน ทำได้โดยการใช้เซลล์สำหรับใส่สารตัวอย่าง (sample cell) จำนวน 2 เซลล์ เซลล์หนึ่งบรรจุวัสดุตัวอย่างที่ต้องการทดสอบพื้นที่ผิวจำเพาะ ส่วนอีกเซลล์ไม่ใส่วัสดุตัวอย่างแต่ทำหน้าที่เป็นเซลล์อ้างอิง จากนั้นทำการปล่อยแก๊สไนโตรเจน (N_2) เพื่อให้เกิดการดูดซับบนพื้นผิวแล้วใช้สมการจากทฤษฎี BET (The Brunauer-Emmett-Teller) มาคำนวณ ซึ่งได้มาจากข้อมูลของกราฟไอโซเทอม (isotherm) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันสัมพัทธ์ (P/P_0) กับปริมาตรหรือน้ำหนักของแก๊สที่ถูกดูดซับ (adsorption) และการคายซับ (desorption) ของวัสดุนั้น ๆ โดยการหาพื้นที่ผิวจำเพาะ ตามทฤษฎีของ BET จะใช้หลักการของการดูดซับแก๊สบนพื้นผิวของตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ โดยมีสมมติฐานว่าการดูดซับของแก๊สเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอทั่วพื้นผิวไม่จำเพาะบริเวณใดบริเวณหนึ่ง [41] รูปที่ 3.11 แสดงเครื่องตรวจสอบพื้นที่ผิวและรูพรุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

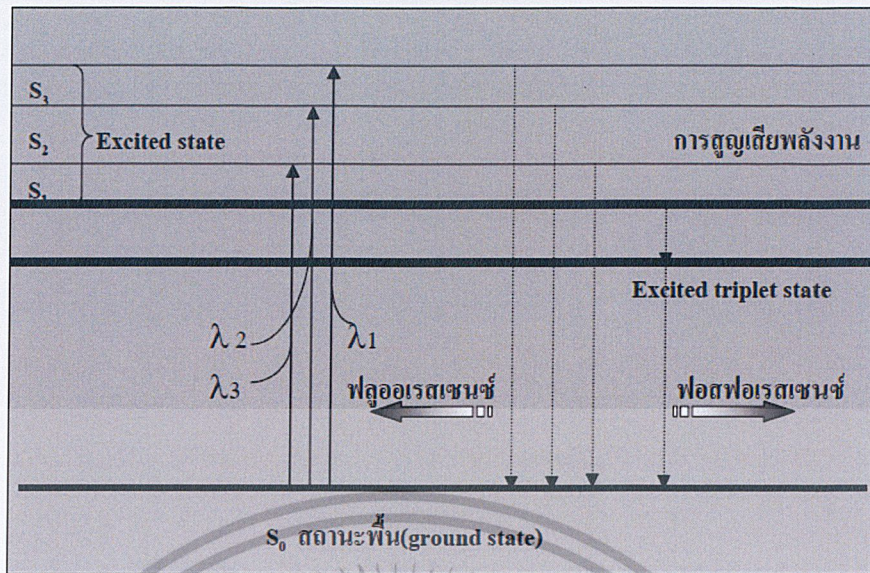


รูปที่ 3.11 เครื่องตรวจสอบพื้นที่ผิวและรูพรุน [42]

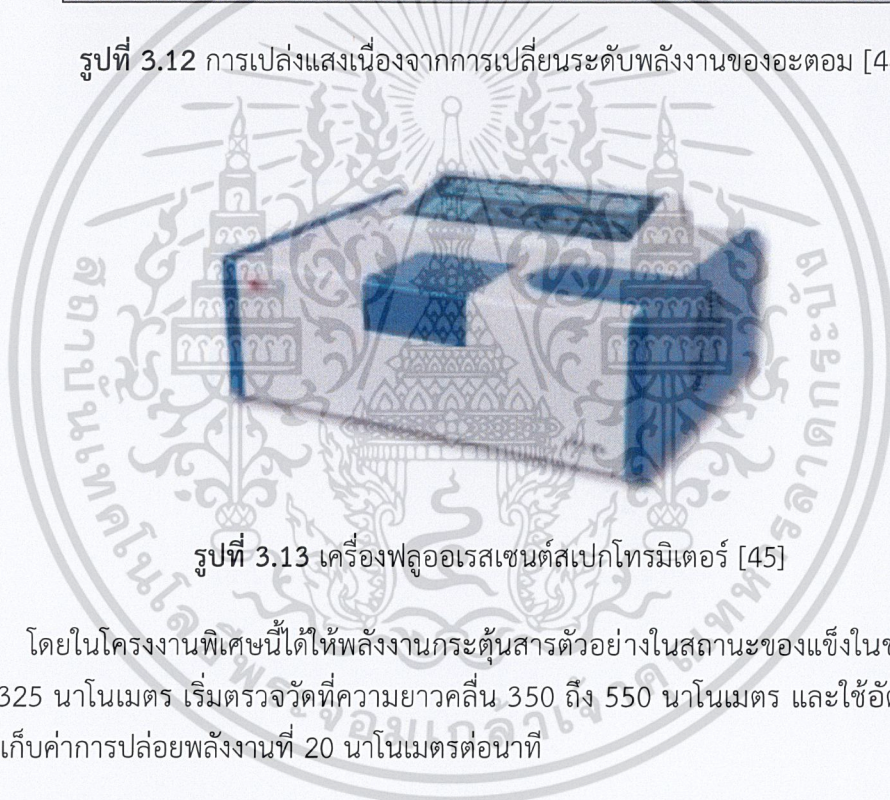
3.5.6 การตรวจสอบสมบัติทางแสงด้วยเครื่องฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fluorescence spectrophotometer)

เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์คุณสมบัติของสารโดยการอาศัยการดูดกลืนรังสียูวีที่ส่งผลให้โมเลกุลถูกกระตุ้นและมีการสั่นภายในโมเลกุลจากระดับชั้นพลังงานสถานะพื้น (ground state) ไปสู่ระดับชั้นพลังงานที่สูงขึ้น (excited state) เรียกว่าการดูดพลังงาน (excite energy) เนื่องจากโมเลกุลที่มีการเคลื่อนที่ไปอยู่ในระดับของชั้นพลังงานที่สูงจะไม่มี ความเสถียร จึงมีการปลดปล่อยพลังงานและตกลงมาในชั้นระดับพลังงานที่ต่ำกว่า พลังงานที่โมเลกุลปลดปล่อยจากระดับชั้นพลังงานกระตุ้นชั้นที่หนึ่งสู่ระดับชั้นพลังงานสถานะพื้นจะทำให้เกิดการคายโฟตอน (emission of photon) [43] เนื่องจากการกลับเข้าสู่สถานะพื้นของอิเล็กตรอนของอะตอมของสารมีการสูญเสียพลังงานไปส่วนหนึ่ง เนื่องจากการชน (collision) และการสั่น (vibration) ของอะตอม และการถ่ายเทพลังงานให้สารละลายจึงทำให้แสงที่เปล่งออกมาขณะกลับเข้าสู่สถานะพื้นซึ่งจะมีความยาวคลื่นแสงมากกว่าแสงที่ถูกดูดกลืน (direct line fluorescence) แสงดังกล่าวจะเกิดขึ้นในช่วงสั้น ๆ ($10^{-7} - 10^{-9}$ วินาที) หลังจากหยุดส่องแสงตกกระทบ เรียกการเปล่งแสงชนิดนี้ว่า “การวาวแสง” [44] และทำให้เกิดสเปกตรัมในช่วงฟลูออเรสเซนส์ ณ ค่าพลังงานที่กระตุ้นที่จำเพาะของสารแต่ละชนิด ดังแสดงในภาพที่ 3.12 และรูปที่ 3.13 แสดงภาพเครื่องฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 การเปล่งแสงเนื่องจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอะตอม [44]



รูปที่ 3.13 เครื่องฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรมิเตอร์ [45]

โดยในโครงการพิเศษนี้ได้ให้พลังงานกระตุ้นสารตัวอย่างในสถานะของแข็งในช่วงความยาวคลื่น 325 นาโนเมตร เริ่มตรวจวัดที่ความยาวคลื่น 350 ถึง 550 นาโนเมตร และใช้อัตราเร็วในการสแกนเก็บค่าการปล่อยพลังงานที่ 20 นาโนเมตรต่อนาที

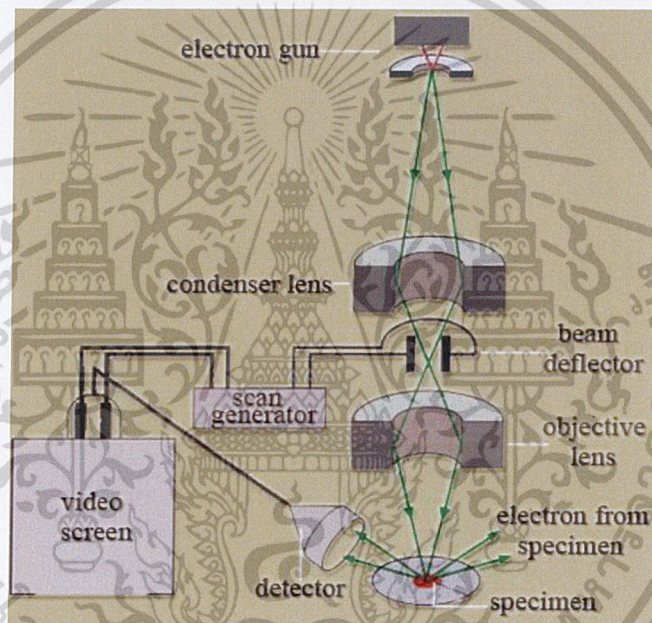
3.5.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM)

เครื่อง SEM มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) [46]



รูปที่ 3.15 ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง SEM [33]

เครื่อง SEM ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึกและแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และ ถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไปและสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้ [33]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการศึกษากการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และไทเทเนียมไดออกไซด์วัฏภาคอนาเทส (anatase) ด้วยวิธีโซโนเคมีและการเตรียมวัสดุผสมกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์/ซีเรียมออกไซด์/ไทเทเนียมไดออกไซด์เปรียบเทียบกับวัสดุผสมกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์/ซีเรียมออกไซด์/ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในการสลายสีย้อมด้วยแสง

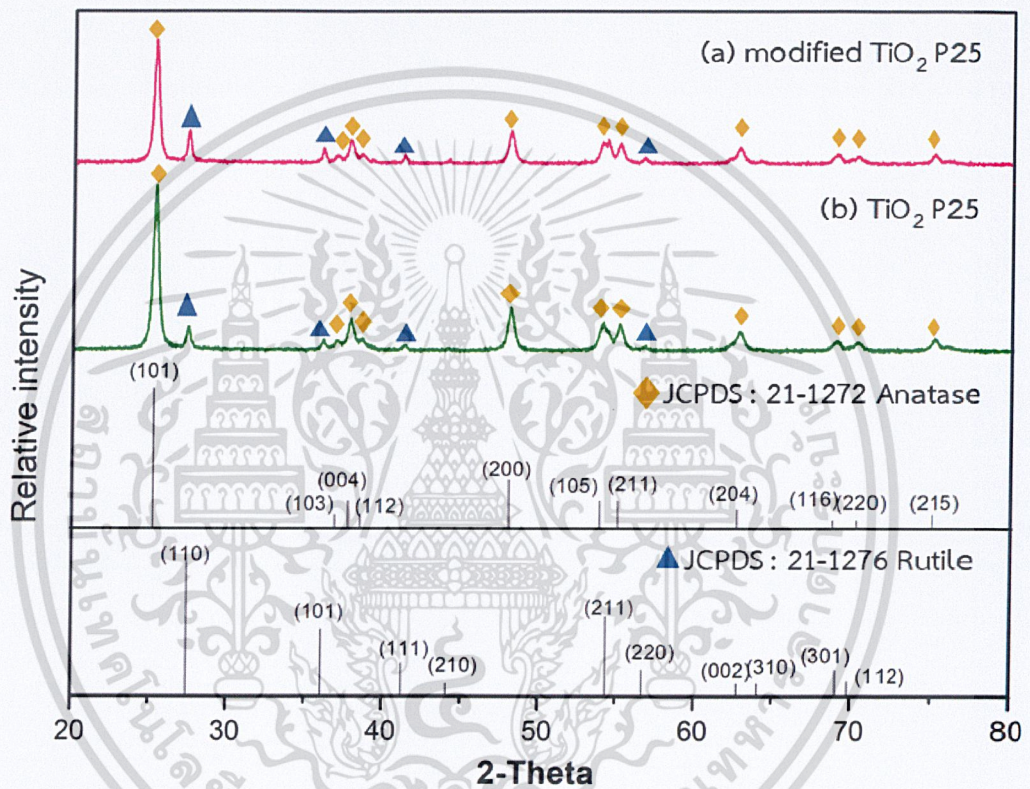
4.1 การเตรียมวัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

4.1.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกและโครงสร้างโมเลกุล

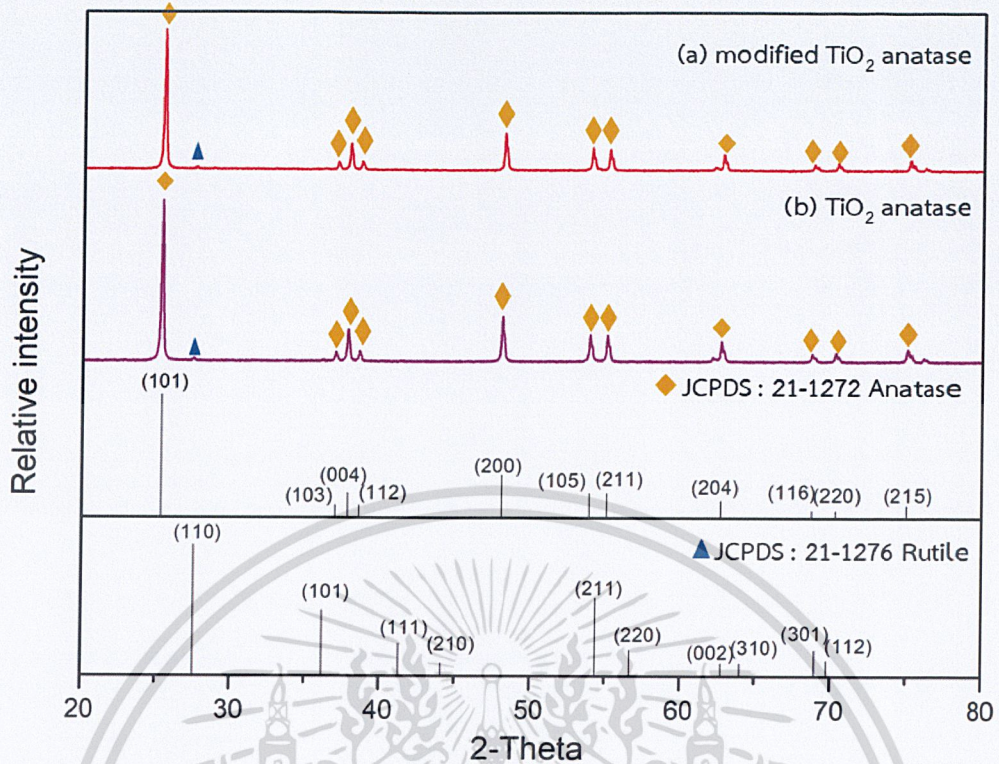
4.1.1.1 การปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีโซโนเคมี

เมื่อนำอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) P25 และไทเทเนียมไดออกไซด์วัฏภาคอนาเทส (anatase) ก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นผิวด้วยวิธีโซโนเคมีไปทำการตรวจวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometry; XRD) ผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD pattern) ของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ก่อนการปรับปรุง พบพีกเอกลักษณ์เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 2-theta ที่ 25.27, 37.78, 47.98, 53.88 และ 55.01 ซึ่งตรงกับการเลี้ยวเบนของระนาบ (101), (004), (200), (105) และ (211) ตามลำดับ ซึ่งตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนข้อมูลมาตรฐานของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีวัฏภาคแบบอนาเทส (anatase TiO_2 , JCPDS เลขที่ 21-1272) ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล (tetragonal) และพบพีกเอกลักษณ์เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 2-theta ที่ 27.40, 36.03, 41.20 และ 56.55 ซึ่งตรงกับการเลี้ยวเบนของระนาบ (110), (101), (111) และ (220) ตามลำดับ ซึ่งตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนตามข้อมูลมาตรฐานของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีวัฏภาคแบบรูไทล์ (rutile TiO_2 , JCPDS เลขที่ 21-1276) ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล เมื่อทำการเปรียบเทียบความเข้มของพีก (intensity) ของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 พบว่าความเข้มของพีกการเลี้ยวเบนของวัฏภาคแบบอนาเทสมีความมากกว่าความเข้มของพีกการเลี้ยวเบนของวัฏภาคแบบรูไทล์ โดยสามารถสังเกตได้ชัดเจนจากความเข้มของพีกที่ตำแหน่ง 2-theta ที่ 25.27 (101) ซึ่งเป็นของวัฏภาคแบบอนาเทสที่มีความเข้มสูงกว่าตำแหน่ง 2-theta ที่ 27.38 (110) ซึ่งเป็นของวัฏภาคแบบรูไทล์ ซึ่งสอดคล้องกับอัตราส่วนปริมาตรของวัฏภาคแบบอนาเทสและรูไทล์ในองค์ประกอบของไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ที่มีองค์ประกอบของวัฏภาคแบบอนาเทสและรูไทล์ ร้อยละ 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก ส่วนอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์วัฏภาคอนาเทสก่อนการปรับปรุง พบพีกเอกลักษณ์เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 2-theta ที่ 25.38, 37.86, 48.10, 53.95, 55.12 และ 62.74 ซึ่งตรงกับการเลี้ยวเบนของระนาบ (101), (004), (200), (105), (211) และ (204) ตามลำดับ ซึ่งตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนตามข้อมูลมาตรฐานของไทเทเนียมไดออกไซด์วัฏภาคแบบอนาเทส (anatase TiO_2 , JCPDS เลขที่ 21-1272) และยังพบพีกเอกลักษณ์ของวัฏภาครูไทล์เกิดขึ้นเล็กน้อยที่ตำแหน่ง 2-theta ที่ 27.40 ซึ่งตรงกับการไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลี้ยวเบนของระนาบ (110) ซึ่งตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนตามข้อมูลมาตรฐานของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีวัฏภาคแบบรูไทล์ (rutile TiO_2 , JCPDS เลขที่ 21-1276) เป็นผลมาจากไทเทเนียมไดออกไซด์วัฏภาคอนาเทสของทางเกรดการค้าที่สังเคราะห์ได้ไม่บริสุทธิ์ และรูปแบบการเลี้ยวเบนของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และไทเทเนียมไดออกไซด์วัฏภาคอนาเทสที่ผ่านการปรับปรุงพื้นที่ผิวแล้วนั้นยังคงมีรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ตรงกับวัฏภาคแบบอนาเทสและวัฏภาครูไทล์แต่ความเข้มของพีคมีค่าลดลงไปจากเดิม แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงพื้นที่ผิวด้วยวิธีโซโนเคมีนี้ส่งผลทำให้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ของทั้งสองชนิดมีค่าความเป็นผลึกลดลง (degree of crystallinity) แต่ไม่ส่งผลทำให้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผลึก



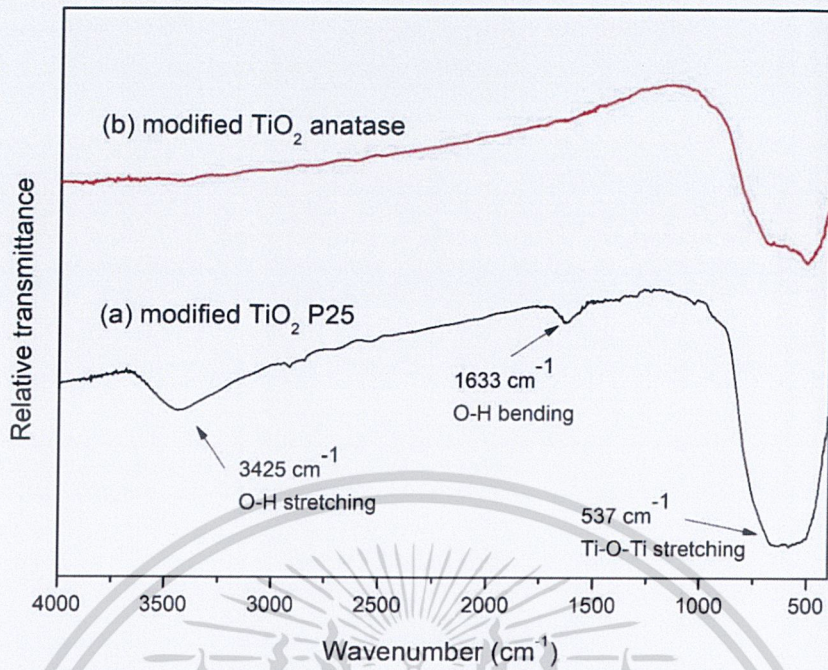
รูปที่ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นที่ผิวด้วยวิธีโซโนเคมี



รูปที่ 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์วัฏภาคอนาเทสก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นผิวด้วยวิธีโซโนเคมี

จากผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectrometry ; FT-IR) แสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และ วัฏภาคอนาเทสที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว พบช่วงการดูดกลืนช่วงการดูดกลืนแสงที่แสดงถึงเอกลักษณ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ คือ มีการสั่นแบบยืดหด (stretching) ของพันธะ Ti-O-Ti และพันธะ Ti-O ที่ช่วง 537 cm^{-1} และ 1360 cm^{-1} ตามลำดับ และยังพบการสั่นของพันธะ O-H ในช่วงการดูดกลืนแสงที่ 3425 cm^{-1} (แบบยืดหด) และ 1633 cm^{-1} (แบบบิดงอ) ตามลำดับ โดยไทเทเนียมไดออกไซด์วัฏภาคอนาเทสที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวจะพบว่ามีค่าลดลงของการดูดกลืนแสงที่แสดงถึงการสั่นของพันธะ Ti-O และ พันธะ O-H มีค่าลดลง [9]

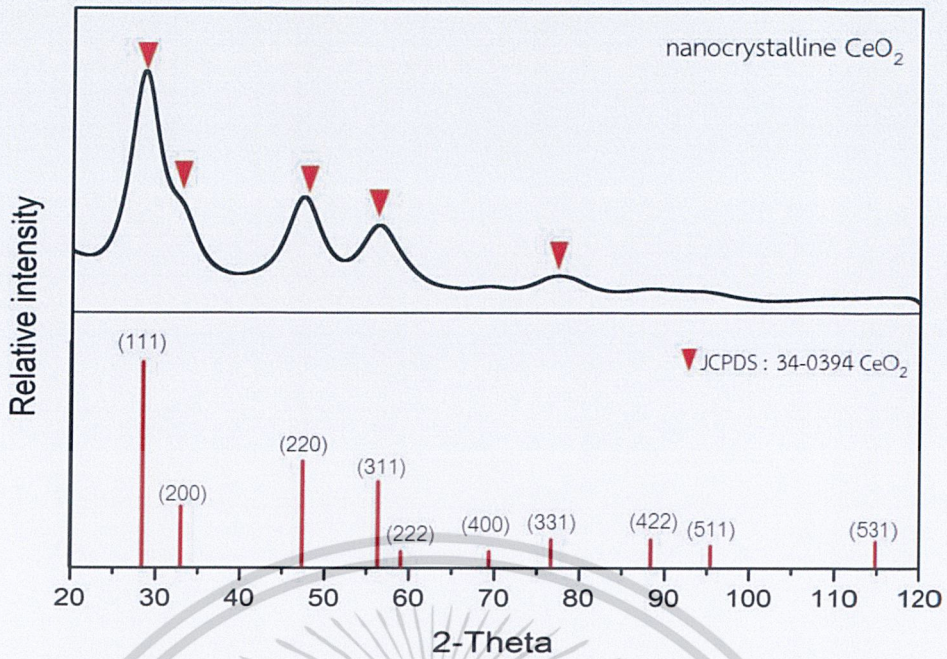
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 อินฟราเรดสเปกตรัมของ (a) ไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว และ (b) ไทเทเนียมไดออกไซด์วัฏภาคอนาเทสที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว

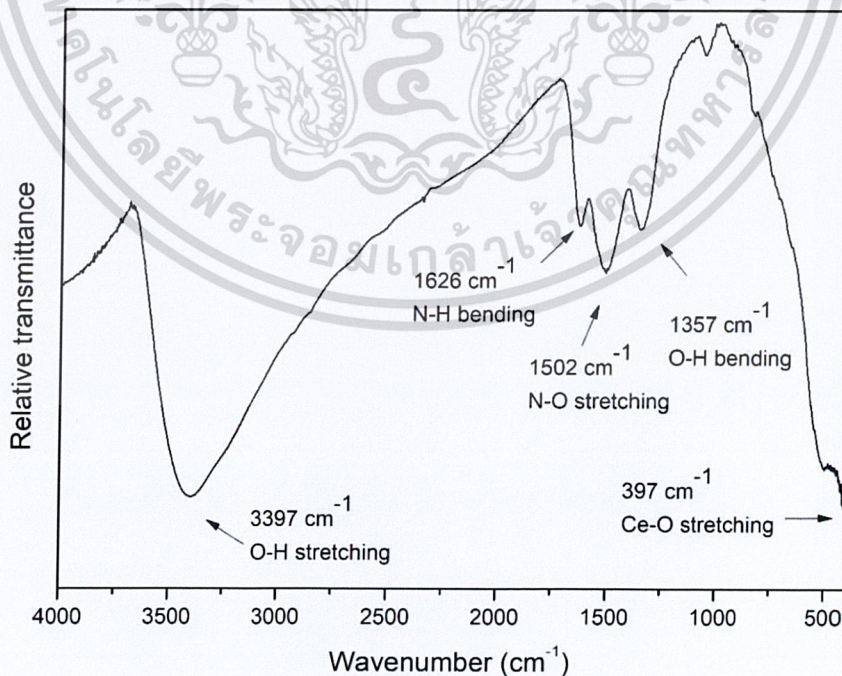
4.1.1.2 ซีเรียมออกไซด์ (Cerium oxide; CeO_2)

เมื่อทำการสังเคราะห์ซีเรียมออกไซด์ (CeO_2) แล้ว ได้นำไปตรวจวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) โดยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD pattern) ของอนุภาคซีเรียมออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 พบพีคเอกลักษณ์เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 2-theta ที่ 28.93, 33.13, 47.26, 56.33 และ 76.61 ตามลำดับ ซึ่งตรงกับการเลี้ยวเบนของระนาบ (111), (200), (220), (311) และ (331) ตามลำดับ และตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนตามข้อมูลมาตรฐานของซีเรียมออกไซด์ (CeO_2 , JCPDS เลขที่ 34-0394) ที่มีโครงสร้างผลึกแบบฟลูออไรต์ (fluorite) ซึ่งสามารถคำนวณขนาดผลึก (crystalline size) จากวิธีของเชอร์เรอร์ (Scherrer's method) ได้ 1.85 ± 0.15 นาโนเมตร [47] แสดงให้เห็นว่า CeO_2 ที่สังเคราะห์ได้มีขนาดอนุภาคในระดับนาโนเมตร (nanocrystalline size)



รูปที่ 4.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคซีเรียมออกไซด์

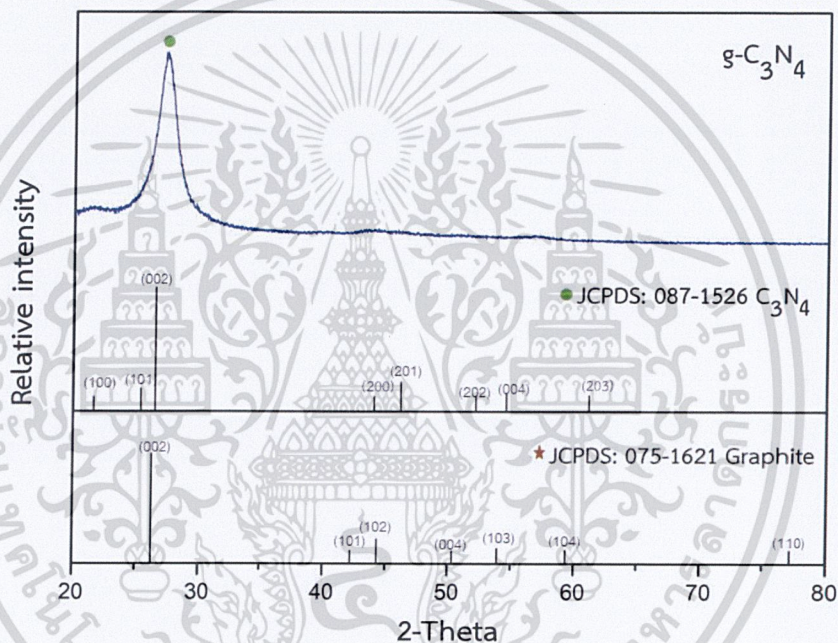
จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR) แสดงดังรูป 4.5 พบว่ามีช่วงการดูดกลืนแสงที่แสดงถึงเอกลักษณ์ของซีเรียมออกไซด์ คือ มีการสั่นแบบยืดหด (stretching) ของพันธะ Ce-O ที่ช่วงความยาวคลื่นที่ 397 cm^{-1} และยังพบช่วงดูดกลืนแสงของ O-H ที่เกิดจากความชื้นและ N-H และ N-O [48] ที่เกิดจากสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ เนื่องจากหลังจากระบวนการสังเคราะห์สารตั้งต้นกระจายตัวในตัวทำละลายไม่ได้จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาลดลง ส่งผลให้มีสารตั้งต้นเหลือตกค้าง ดังนั้นซีเรียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้คาดว่ามีซีเรียมไนเตรทผสมอยู่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 4.5 อินฟราเรดสเปกตร้าของซีเรียมออกไซด์ มาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1.3 กราฟฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ (Graphitic carbon nitride; g-C₃N₄)

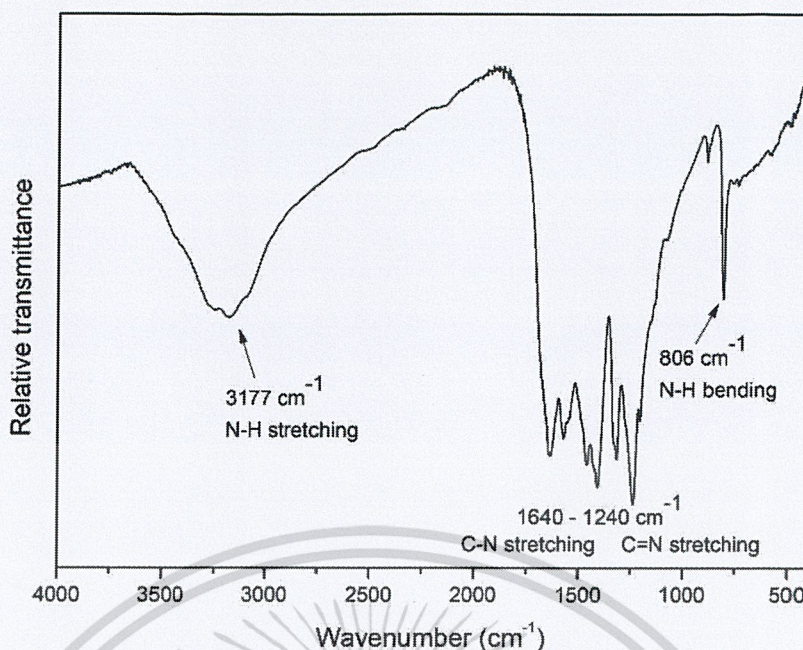
เมื่อสังเคราะห์กราฟฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ (g-C₃N₄) ด้วยวิธีการบ่มทางความร้อน โดยการเผาแคลไซด์ที่อุณหภูมิ 550 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทำการตรวจวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ซึ่งรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ กราฟฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ดังแสดงในรูปที่ 4.6 โดยพบพิกเอกลักษณะเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 2-theta ที่ 27.32 ซึ่งตรงกับการเลี้ยวเบนของระนาบ (002) ของรูปแบบการเลี้ยวเบนตามข้อมูลมาตรฐานของคาร์บอนไนไตรด์ (C₃N₄, JCPDS เลขที่ 087-1526) โดยได้ทำการหาขนาดเฉลี่ยของผลึก (crystallize size) ของกราฟฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ ด้วยวิธีของเซอร์เรอร์ (Scherrer's method) วิธีการคำนวณดังแสดงในภาคผนวก ค พบว่ามีขนาดเฉลี่ยของผลึกเท่ากับ 4.83 นาโนเมตร



รูปที่ 4.6 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคกราฟฟิติกคาร์บอนไนไตรด์

จากผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR) แสดงดังรูป 4.7 พบว่ามีช่วงการดูดกลืนแสงที่แสดงถึงเอกลักษณ์ของกราฟฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ คือ มีการสั่นแบบยืดหด (stretching) และบิดงอ (bending) ของพันธะ N-H ที่ 3177 cm⁻¹ และ 806 cm⁻¹ ตามลำดับ และพบช่วงการดูดกลืนแสงของพันธะ C-N พันธะ C=N ที่ช่วง 1640 – 1240 cm⁻¹ [49] ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 อินฟราเรดสเปกตรัมของกราฟิติการ์บอนไนไตรด์

4.1.2 การศึกษาพื้นที่ผิวและรูพรุน

เมื่อนำวัสดุที่ได้ไปทำการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนจากวิธีของ Brunauer-Emmett-Teller (BET) ผลที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ก่อนการปรับปรุงพื้นผิวมีปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) 59.38 ตารางเมตรต่อกรัม (m²/g) และขนาดรูพรุน 155.0 Å โดยค่าพื้นที่ผิวที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับที่ได้รายงานไว้ โดยบริษัทผู้ผลิตมีค่าอยู่ที่ 50 ± 15 m²/g [50] เมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยวิธีการโซโนเคมีพบว่าอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็น 59.99 m²/g และขนาดรูพรุนเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าซึ่งมีค่า 312.0 Å อาจเป็นผลมาจากปริมาณสารตั้งต้นที่มากเกินไปและมีขนาดอนุภาคเล็กทำให้เกิดการกระจายตัวในสารละลายน้อยจึงส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาได้ไม่ดี จากนั้นนำอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์วัฏภาคอนาเทส (anatase) ไปทำการวิเคราะห์พื้นที่ผิว พบว่าพื้นที่ผิวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์วัฏภาคอนาเทสก่อนผ่านการปรับปรุงพื้นผิวมีค่าอยู่ที่ 12.95 m²/g และขนาดรูพรุน 156.9 Å [23] และหลังจากการปรับปรุงพื้นผิวมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 19.54 m²/g และขนาดรูพรุน 179.7 Å เมื่อนำผลมาเปรียบเทียบกันแสดงให้เห็นว่าอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้งสองเมื่อผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยวิธีโซโนเคมีสามารถช่วยให้มีปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนเพิ่มขึ้น และยังแสดงให้เห็นว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 มีพื้นที่ผิวมากกว่าอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์วัฏภาคอนาเทส จากนั้นได้นำกราฟิติการ์บอนไนไตรด์ก่อนและหลังการปรับสภาพพื้นผิวที่ทำให้กราฟิติการ์บอนไนไตรด์มีสถานะพื้นผิวเป็นประจุบวกโดยการนำไปป้อนควบกับกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 18.5 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 50 มิลลิลิตร จากการวิเคราะห์เพื่อหาพื้นที่ผิวและรูพรุน ผลที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.2 โดยพบว่าอนุภาคกราฟิติการ์บอนไนไตรด์หลังการปรับสภาพพื้นผิวมีปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะ 96.33 m²/g และขนาดรูพรุน 163.5 Å ซึ่งมีค่าพื้นที่ผิวและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
 ขนาดรูพรุนเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับค่าอนุภาคกราฟิติการ์บอนไนไตรด์ก่อนการปรับสภาพพื้นผิวที่มี
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะ 86.88 m²/g และขนาดรูพรุน 125.4 Å แสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพพื้นผิวส่งผลให้อนุภาคกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์มีปริมาณพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.1 ปริมาณพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของวัสดุอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และอนุภาคก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นที่ผิว

ตัวอย่าง	พื้นที่ผิว (m ² /g)	ขนาดรูพรุน (Å)
TiO ₂ P25	59.38	155.0
Modified TiO ₂ P25	59.99	312.0
TiO ₂ anatase [23]	12.92	156.9
Modified TiO ₂ anatase	19.54	179.7

ตารางที่ 4.2 ปริมาณพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของวัสดุของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ (g-C₃N₄) ก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นที่ผิว

ตัวอย่าง	พื้นที่ผิว (m ² /g)	ขนาดรูพรุน (Å)
g-C ₃ N ₄	86.88	125.4
Protonated g-C ₃ N ₄	96.33	163.5

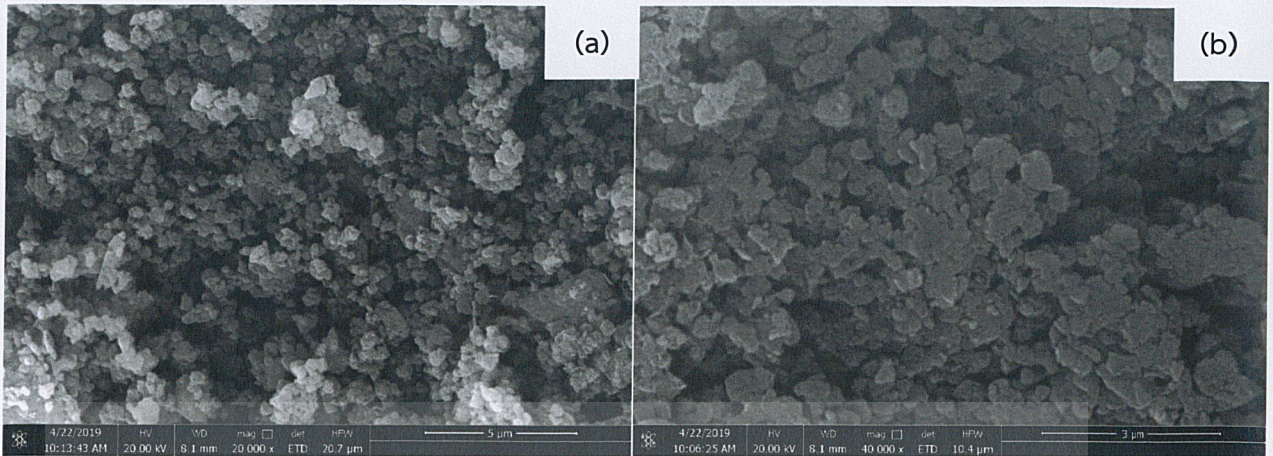
4.1.3 การศึกษาสัณฐานวิทยา

4.1.3.1 กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ (Graphitic carbon nitride; g-C₃N₄)

จากการศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope, TEM) ของอนุภาคกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ พบว่ามีโครงสร้างคล้ายเกล็ดและมีความเป็นเมโซพอร์ัส (mesoporous) ซึ่งมีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วง 2-50 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปภาคผนวก ข-1 โดยเกิดจากก๊าซ NH₃ และ CO₂ ที่ถูกปล่อยออกมาในระหว่างกระบวนการบ่มทางความร้อนของยูเรีย

จากนั้นได้ทำการศึกษาสภาพพื้นผิวของตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning electron microscope) ของอนุภาคกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ พบว่ามีลักษณะเหมือนเกร็ดและเกิดโครงสร้างรูพรุน ดังแสดงในรูป 4.8 เมื่อวัดขนาดอนุภาคจากโปรแกรม Image J พบว่ามีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเป็น 0.804 ± 0.340 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 (a) และ (b) ภาพถ่าย SEM สภาพพื้นผิวของอนุภาคกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์

4.1.4 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบ

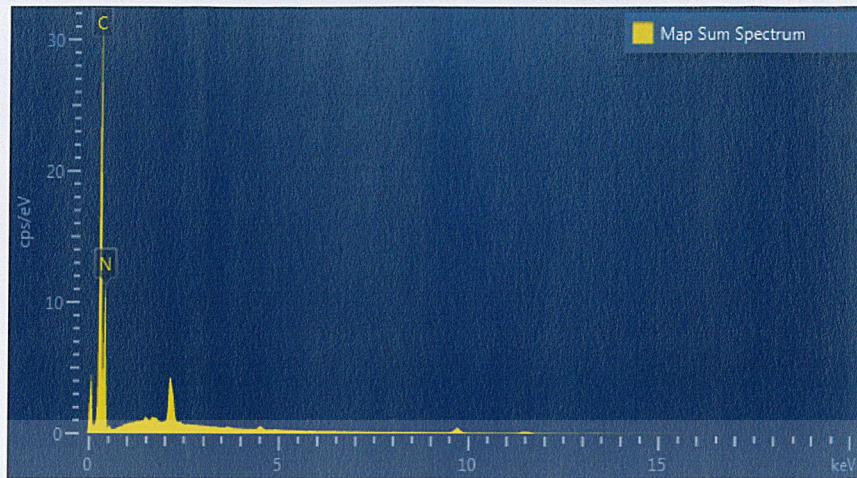
4.1.4.1 กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ (Graphitic carbon nitride; g-C₃N₄)

ผลการศึกษาธาตุองค์ประกอบของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ (g-C₃N₄) ด้วยเทคนิค energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบและการกระจายตัวของธาตุ ผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10 และตารางที่ 4.3 พบว่าสเปกตรัมและแผนภาพการกระจายตัวแสดงถึงองค์ประกอบของธาตุ คือ คาร์บอน (C) และไนโตรเจน (N) โดยมีแนวโน้มที่มีค่าร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุที่ใกล้เคียงกับค่าตามทฤษฎี

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบในตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ธาตุองค์ประกอบ (wt%)			
	C		N	
ทางแสง	ทฤษฎี	การทดลอง	ทฤษฎี	การทดลอง
g-C ₃ N ₄	39.16	37.13	60.87	62.87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 EDS สเปกตรัมของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ ($g\text{-C}_3\text{N}_4$)



รูปที่ 4.10 (a) ภาพถ่าย SEM ของวัสดุกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ และภาพการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบ b) คาร์บอน (C) และ (c) ไนโตรเจน (N)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

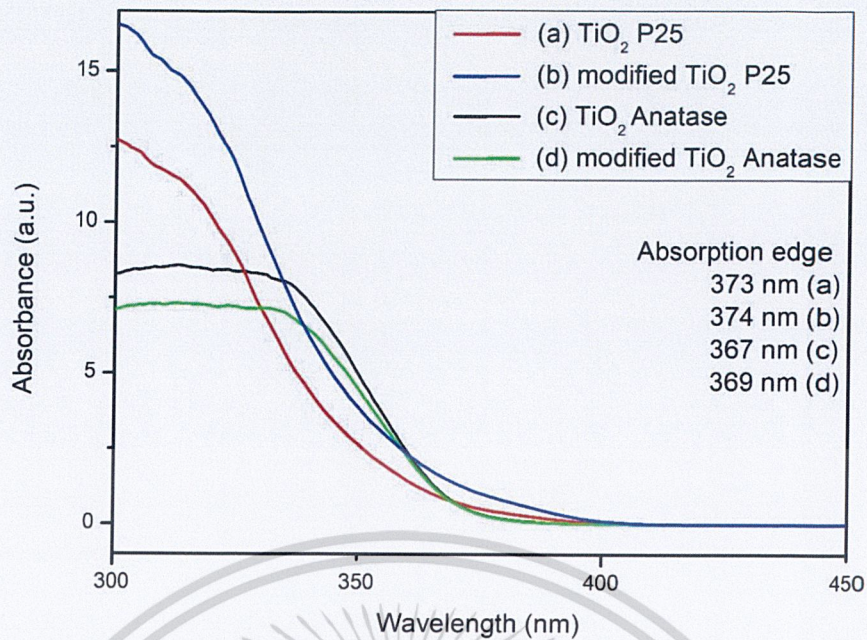
4.1.5 การศึกษาสมบัติทางแสง

4.1.5.1 การปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีโซโนเคมี

จากการศึกษาสมบัติทางแสงด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-visible spectroscopy) ไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และวัฏภาคอนาเทสก่อนการปรับปรุงพื้นผิวด้วยวิธีโซโนเคมี ดังแสดงในรูปที่ 4.11 พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 มีการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นมากกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์วัฏภาคอนาเทส (red shift) โดยซึ่งไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 มีค่าเริ่มต้นการดูดกลืนแสง (onset absorption edge) ที่ 373 nm และไทเทเนียมไดออกไซด์วัฏภาคอนาเทสมีค่าเท่ากับ 367 nm ดังนั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 จึงต้องการพลังงานกระตุ้นที่น้อยกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์วัฏภาคอนาเทส

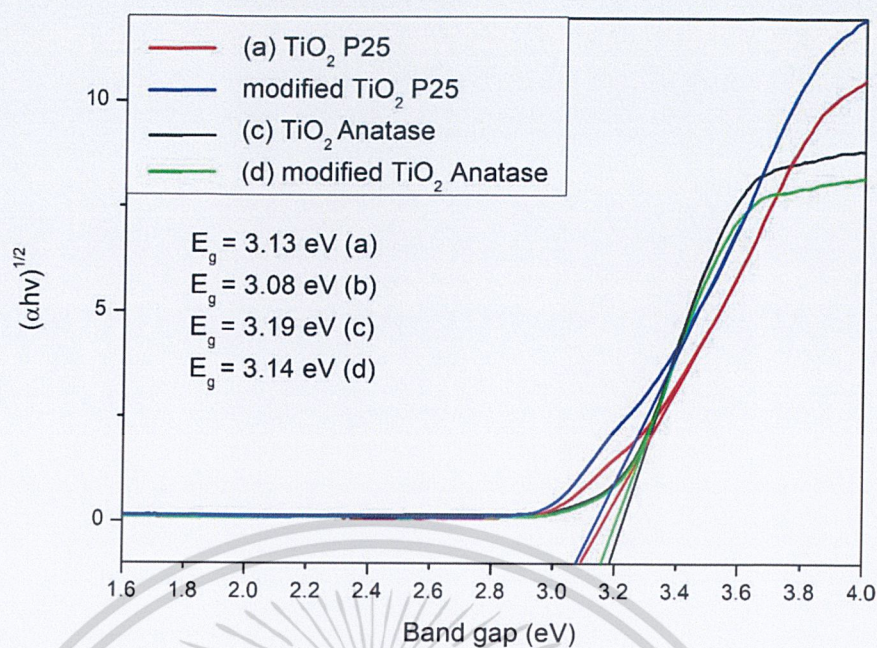
เมื่อนำค่าสเปกตรัมมาคำนวณหาค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (energy gap; E_g) วิธีคำนวณในภาคผนวก ง ผลดังแสดงในรูปที่ 4.12 พบว่าค่าแถบช่องว่างระหว่างพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 มีค่าเท่ากับ 3.13 eV ซึ่งมีค่าน้อยกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์วัฏภาคอนาเทสซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.19 eV เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 มีวัฏภาคอนาเทสและรูไทล์ ซึ่งมีค่าแถบพลังงานช่องว่างพลังงานต่างกัน ส่งผลทำให้เกิดการถ่ายโอนพลังงานแบบขั้นบันไดส่งผลให้การรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนลดลง ดังนั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 มีค่าแถบช่องว่างพลังงานน้อยกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์วัฏภาคอนาเทส

จากการศึกษาสมบัติทางแสงด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-visible spectroscopy) พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และวัฏภาคอนาเทสที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเทคนิคโซโนเคมี มีคุณสมบัติการดูดกลืนแสงช่วงความยาวคลื่นที่มากขึ้น (red shift) โดยมีค่าเริ่มต้นการดูดกลืนแสง (onset absorption edge) ที่เพิ่มขึ้นโดยไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 เพิ่มขึ้นจาก 373 nm เป็น 374 nm และไทเทเนียมไดออกไซด์วัฏภาคอนาเทสเพิ่มขึ้นจาก 367 nm เป็น 369 nm



รูปที่ 4.11 ยูวี-วิสิเบิลสเปกตรัมของไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และไทเทเนียมไดออกไซด์วิฏภาค-อนาเทสที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยวิธีโซโนเคมี

เมื่อนำค่าสเปกตรัมมาคำนวณหาค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (E_g) วิธีคำนวณในภาคผนวก ง ผลดังแสดงในรูปที่ 4.12 พบว่าค่าแถบช่องว่างระหว่างพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้งสองชนิด หลังจากกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวมีค่าลดลงจาก P25 มีค่า 3.13 eV และอนาเทสซึ่งมีค่า 3.19 eV ลดลงเหลือ 3.02 eV และ 3.14 eV ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่ากระบวนการโซโนเคมีช่วยลดค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงานลงได้ เนื่องจากกระบวนการโซโนเคมีเป็นปฏิกิริยาการแยกชั้นผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์เปลี่ยนแปลงเกิดเป็นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบแผ่น ส่งผลให้เกิดความไม่เสถียรเนื่องจากในระนาบโครงสร้างแบบแผ่นจะมีผลของประจุบวกของไทเทเนียมและประจุลบของพันธะไทเทเนียมต่อกับออกซิเจน (Ti-O) ทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบแผ่นเพิ่มความเสถียรให้กับโครงสร้างโดยการลดพลังงานบนพื้นผิวด้วยการหมุนกลับเข้ามาหากันของพันธะของประจุทั้งสองชนิดได้เป็นโครงสร้างแบบท่อ (nanotube) ส่งผลให้เกิดคุณสมบัติทางแสงที่ดีขึ้น [23]



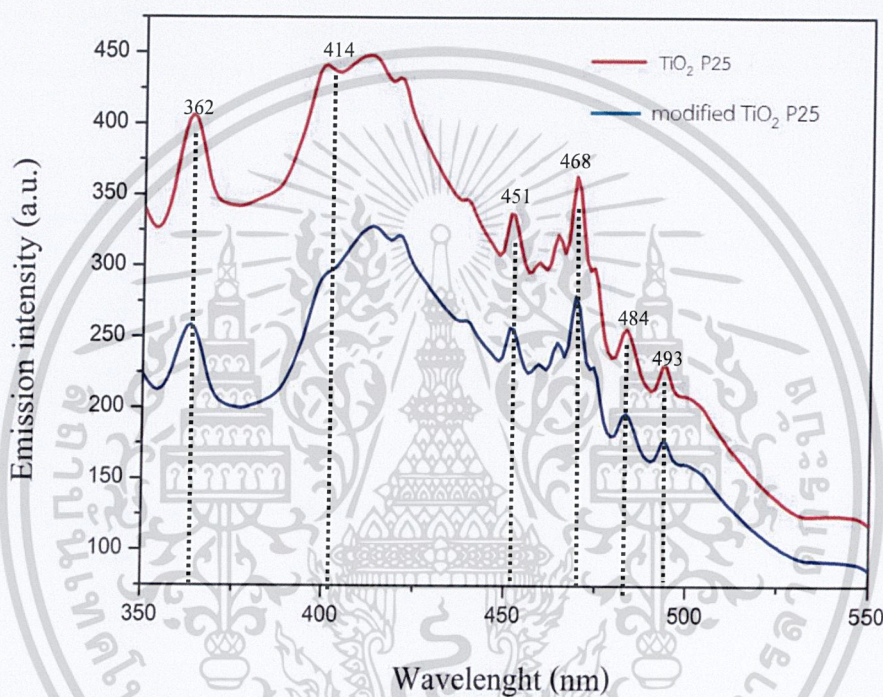
รูปที่ 4.12 การหาค่าพลังงานช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์ก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นผิวด้วยวิธีของ Tuac's

ตารางที่ 4.4 ค่าแถบช่องว่างระหว่างพลังงานจากวิธี Tuac's และค่าเริ่มต้นของการดูดกลืนแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์และหลังการปรับปรุงพื้นผิว

ตัวอย่าง	ค่าเริ่มต้นของการดูดกลืนแสง (nm)	Energy gap (eV)
TiO ₂ P25	373	3.13
Modified TiO ₂ P25	374	3.08
TiO ₂ anatase	367	3.19
Modified TiO ₂ anatase	369	3.14

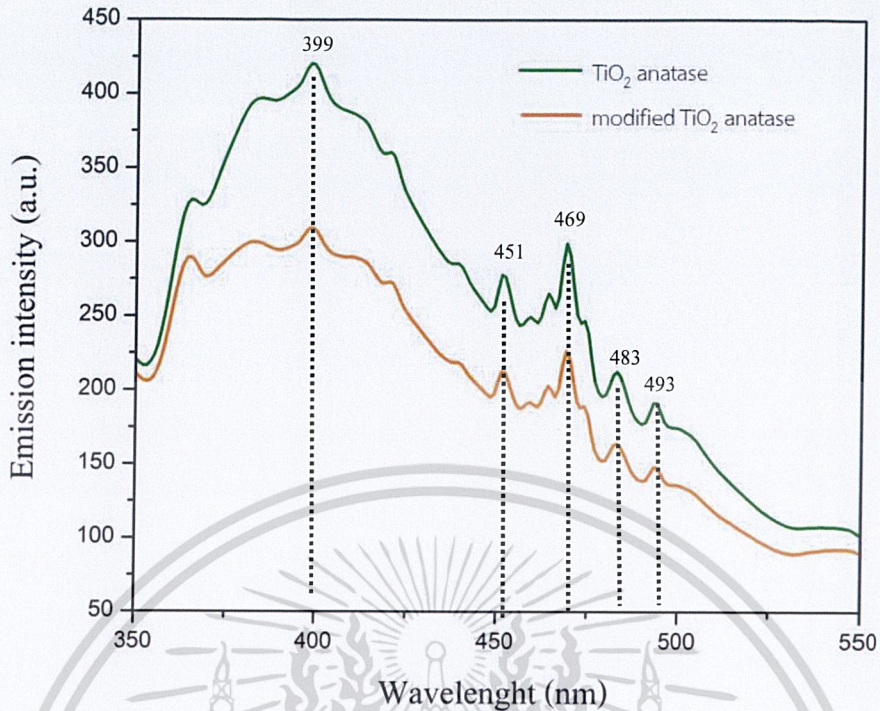
จากนั้นได้นำสารที่ได้ไปศึกษาสมบัติเชิงแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงด้วยเทคนิคฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปี (fluorescence spectroscopy) ซึ่งเทคนิคนี้เป็นการให้พลังงานแสงเพื่อกระตุ้น (excitation energy) ให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำเคลื่อนที่ไปยังแถบตัวนำ จากนั้นอิเล็กตรอนในแถบตัวนำจะเกิดการคายพลังงานโดยการเปล่งแสงออกมา (emission energy) และตกกลับมารวมกับโฮลในแถบวาเลนซ์ โครงงานพิเศษนี้ให้พลังงานกระตุ้นแก้วสุดที่ความยาวคลื่น 325 นาโนเมตร และเก็บข้อมูลการคายพลังงานในช่วง 350 ถึง 550 นาโนเมตร ผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.13 พบว่าฟลูออเรสเซนซ์สเปกตรัมของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ก่อนและหลังผ่านการปรับปรุงพื้นผิวมีการคายพลังงานในช่วงความยาวคลื่นใกล้เคียงกับช่วงความยาวคลื่นของไทเทเนียม-ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไดออกไซด์เกรดการค้า P25 ที่มีการรายงานไว้ [9] คือที่ความยาวคลื่น 362, 414, 451, 468, 484 และ 493 นาโนเมตร และฟลูออเรสเซนซ์สเปกตรัมของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์วิภาคก่อนและหลังผ่านการปรับปรุงพื้นผิวมีการคายพลังงานในช่วงความยาวคลื่น 399, 451, 469, 483 และ 493 นาโนเมตร โดยพบว่าความเข้มของการคายพลังงานแสงในสเปกตรัมของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวแล้วจะมีค่าความเข้มแสงต่ำกว่าก่อนการปรับปรุง แสดงให้เห็นถึงการลดลงของอัตราการตกกลับมารวมกันของอิเล็กตรอนและโฮล (electron-hole recombination) จึงส่งผลให้อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นสามารถอยู่บนแถบตัวนำของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงได้นานขึ้น



รูปที่ 4.13 ฟลูออเรสเซนซ์สเปกตรัมของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว

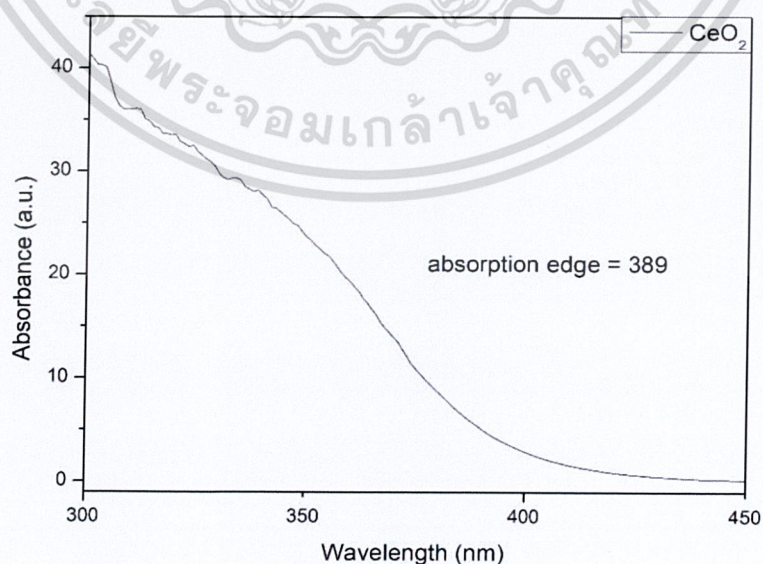
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 ฟลูออเรสเซนส์สเปกตรัมของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์วัฏภาคอนาเทสและไทเทเนียมไดออกไซด์ภาคอนาเทสที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว

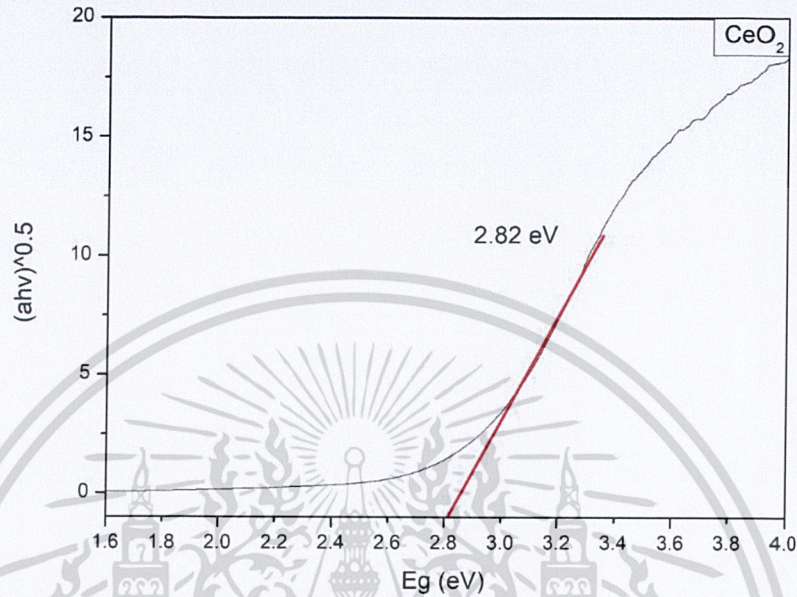
4.1.5.2 ซีเรียมออกไซด์

จากการศึกษาสมบัติทางแสงด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-visible spectroscopy) ตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงของซีเรียมออกไซด์ จากรูปที่ 4.15 พบว่าซีเรียมมีการดูดกลืนแสงช่วงวิสิเบิลและยูวีมากกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และไทเทเนียมไดออกไซด์วัฏภาคอนาเทส และมีค่าการเริ่มการดูดกลืนแสง (onset absorption edge) เท่ากับ 385 nm



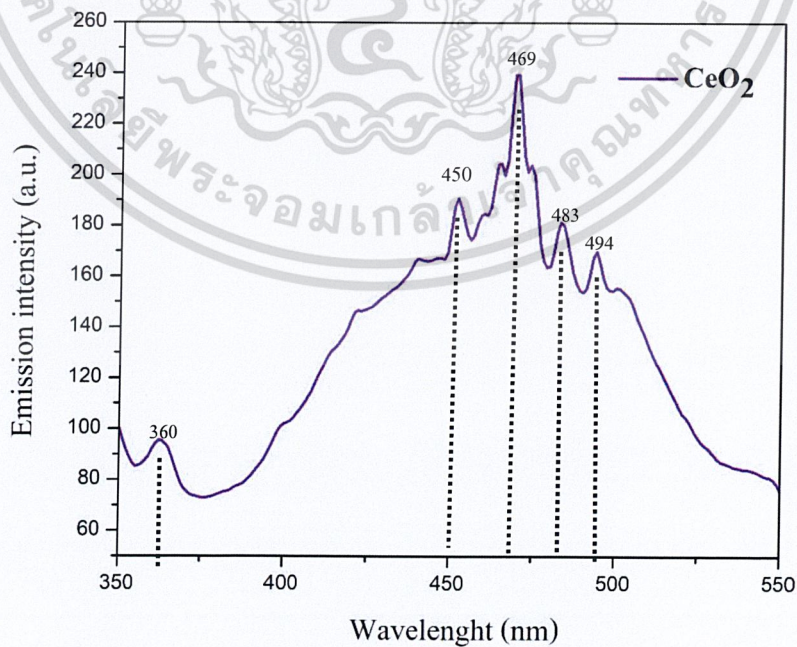
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.15 ยูวี-วิสิเบิลสเปกตรัมของวัสดุซีเรียมออกไซด์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำค่าสเปกตรัมมาคำนวณหาค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (energy gap; E_g) วิธีคำนวณแสดงในภาคผนวก ง ผลดังแสดงในรูปที่ 4.16 พบว่าค่าแถบช่องว่างระหว่างพลังงานของซีเรียมออกไซด์มีค่าเท่ากับ 2.81 eV ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมา [9] แสดงว่าซีเรียมออกไซด์ต้องการพลังงานกระตุ้นต่ำกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์



รูปที่ 4.16 การหาค่าพลังงานช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของซีเรียมออกไซด์ด้วยวิธีของ Tuac's

จากผลฟลูออเรสเซนส์สเปกตรัมของซีเรียมออกไซด์ (CeO_2) พบการคายพลังงานในช่วงความยาวคลื่น 360, 450, 469, 483 และ 494 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.17 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลที่เคยมีรายงานไว้ [51,52]

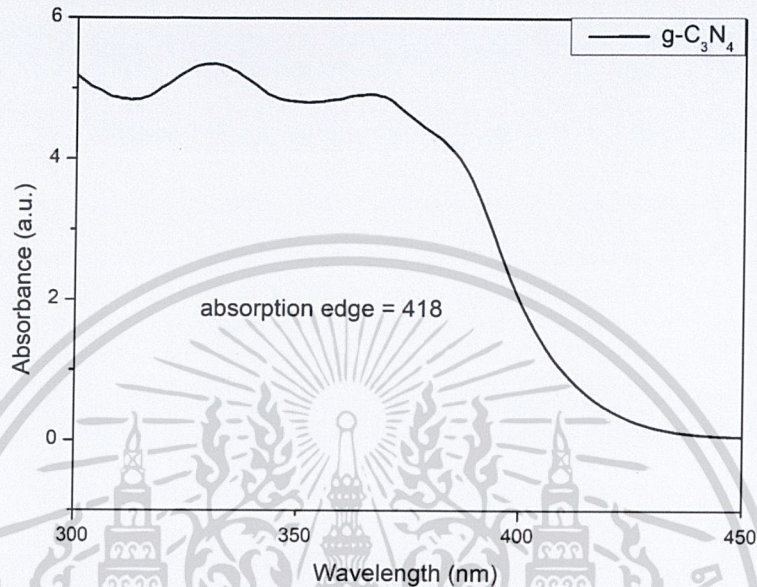


รูปที่ 4.17 ฟลูออเรสเซนส์สเปกตรัมของอนุภาคซีเรียมออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาและข้อมูลที่มีปรากฏในเอกสารนี้ ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

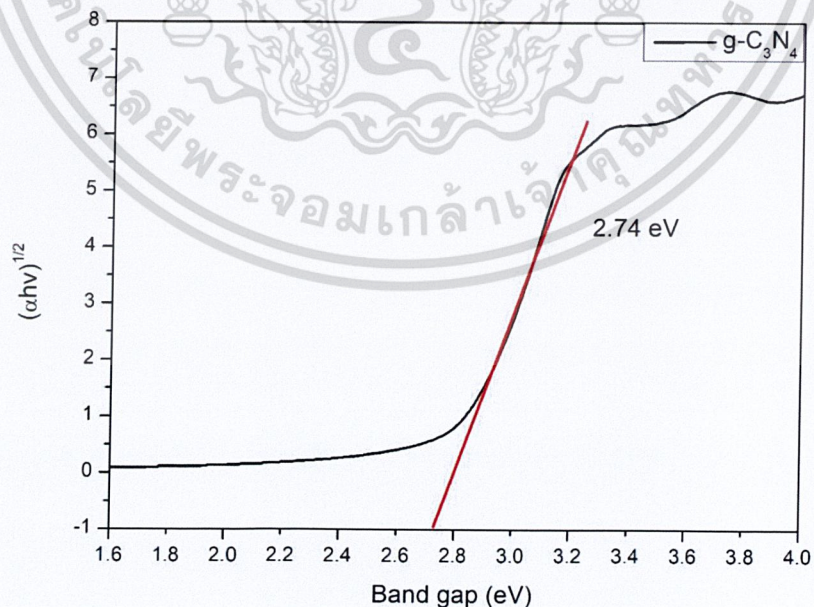
4.1.5.3 กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์

จากการศึกษาสมบัติทางแสงด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปีของตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ ผลแสดงดังรูปที่ 4.18 พบว่ามีการดูดกลืนแสงช่วงยูวีและวิสิเบิล โดยมีค่าการเริ่มการดูดกลืนแสงที่ 418 nm เนื่องจากกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์มีหมู่ฟังก์ชันเอมีน ($R-NH_3$) ในโครงสร้างจึงช่วยให้ดูดกลืนแสงในช่วงวิสิเบิลได้สูง [3]



รูปที่ 4.18 ยูวี-วิสิเบิลสเปกตรัมของวัสดุกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์

เมื่อนำค่าสเปกตรัมมาคำนวณหาค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (energy gap; E_g) วิธีคำนวณในภาคผนวก ง ผลดังแสดงในรูปที่ 4.19 พบว่าค่าแถบช่องว่างระหว่างพลังงานของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์มีค่าเท่ากับ 2.74 eV ดังนั้นกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์สามารถถูกกระตุ้นได้ในช่วงวิสิเบิล

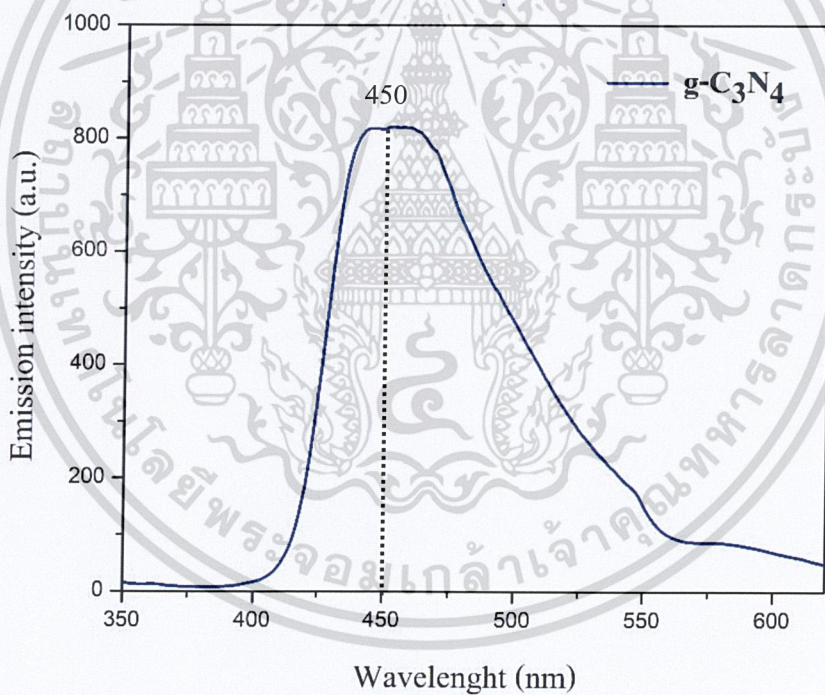


รูปที่ 4.19 การหาค่าพลังงานช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ด้วยวิธีของเอกสาร Tauc's เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ค่าเริ่มต้นของการดูดกลืนแสงและค่าแถบช่องว่างระหว่างพลังงานจากวิธี Tuac's ของซีเรียมออกไซด์และกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์

ตัวอย่าง	ค่าเริ่มต้นของการดูดกลืนแสง (nm)	Energy gap (eV)
CeO ₂	385	2.81
g-C ₃ N ₄	418	2.74

จากผลฟลูออเรสเซนส์สเปกตรัมของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ (g-C₃N₄) พบการคายพลังงานในช่วงความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.20 ซึ่งมีค่าตรงกับผลที่เคยมีรายงานไว้ [25] และมีค่าความเข้มของการคายพลังงานแสงสูงมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์มีอัตราการตกกลับของอิเล็กตรอนมารวมกับโฮลสูง โดยสอดคล้องกับผลของค่าพลังงานช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (E_g) ที่มีค่าน้อยสุดอยู่ที่ 2.74 eV



รูปที่ 4.20 ฟลูออเรสเซนส์สเปกตรัมของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์

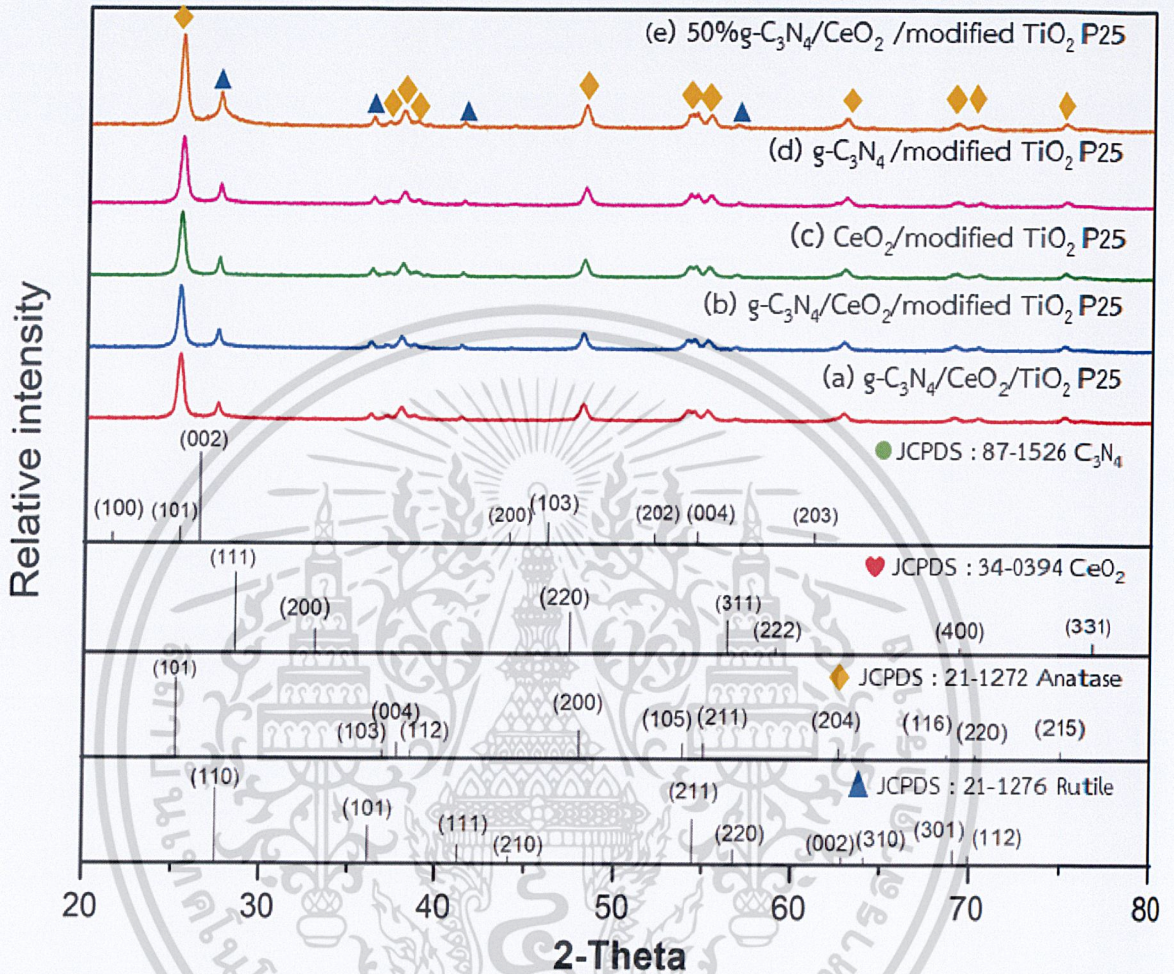
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การเตรียมวัสดุผสมตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์/ซีเรียม-ออกไซด์/ไทเทเนียมไดออกไซด์

4.2.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกและโครงสร้างโมเลกุล

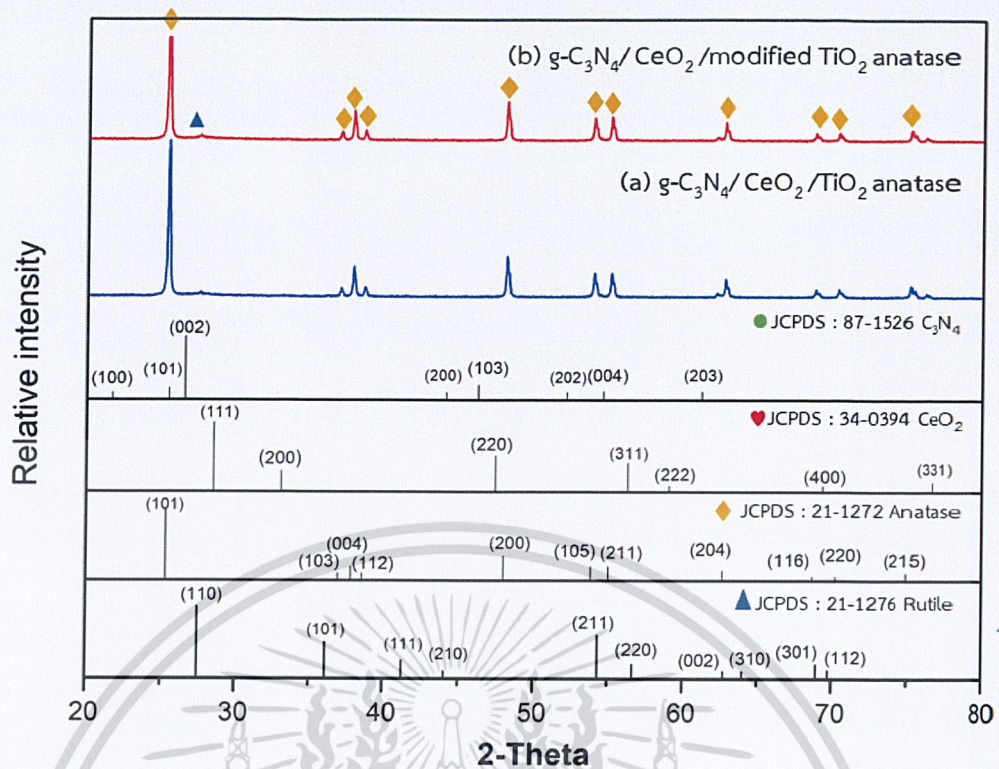
เมื่อนำวัสดุผสมตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงที่สังเคราะห์ที่ได้ไปตรวจวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่าวัสดุผสม 7 ตัวอย่างที่เตรียมตามอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 3.1 โดยการเติม CeO_2 ร้อยละ 1 และ $\text{g-C}_3\text{N}_4$ ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ได้แก่ $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{TiO}_2$ P25, $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{TiO}_2$ anatase, $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{modified TiO}_2$ P25, $\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ P25, $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ anatase, $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ P25, 50% $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ P25 ซึ่ง 5 ตัวอย่างจัดเป็นกลุ่มวัสดุผสมของไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และอีก 2 ตัวอย่างจัดเป็นกลุ่มวัสดุผสมของไทเทเนียมออกไซด์ออกไซด์วัฏภาคอนาเทส (anatase) โดยมีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.21 โดยวัสดุผสมกลุ่ม P25 ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยวิธีโซโนเคมี พบพิกเอกลักษณะเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 2-theta เช่นเดียวกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ที่ 25.27, 37.78, 47.98, 53.88 และ 55.01 ตรงกับการเลี้ยวเบนของระนาบ (101), (004), (200), (105) และ (211) ตามลำดับ ซึ่งตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนตามข้อมูลมาตรฐานของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีวัฏภาคแบบอนาเทส (anatase TiO_2 , JCPDS เลขที่ 21-1272) และยังพบพิกเอกลักษณะที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 2-theta ที่ 27.40, 36.03, 41.20 และ 56.55 ตรงกับการเลี้ยวเบนของระนาบ (110), (101), (111) และ (220) ตามลำดับ ซึ่งตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนตามข้อมูลมาตรฐานของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีวัฏภาคแบบรูไทล์ (rutile TiO_2 , JCPDS เลขที่ 21-1276) และอีก 2 ตัวอย่างซึ่งเป็นวัสดุผสมกลุ่มวัฏภาคอนาเทสที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยวิธีโซโนเคมี มีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.22 พบพิกเอกลักษณะเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 2-theta ที่ 25.38, 37.86, 48.10, 53.95, 55.12 และ 62.74 ซึ่งตรงกับการเลี้ยวเบนของระนาบ (101), (004), (200), (105), (211) และ (204) ตามลำดับ ซึ่งตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนตามข้อมูลมาตรฐานของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีวัฏภาคแบบอนาเทส (anatase TiO_2 , JCPDS เลขที่ 21-1272) และยังพบพิกเอกลักษณะของวัฏภาครูไทล์เกิดขึ้นเล็กน้อยที่ตำแหน่ง 2-theta ที่ 27.40 ซึ่งตรงกับการเลี้ยวเบนของระนาบ (110) ซึ่งตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนตามข้อมูลมาตรฐานของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีวัฏภาคแบบรูไทล์ (rutile TiO_2 , JCPDS เลขที่ 21-1276) เป็นผลมาจากไทเทเนียมไดออกไซด์วัฏภาคอนาเทสของทางเกรดการค้าที่สังเคราะห์ได้ไม่บริสุทธิ์ จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของวัสดุผสมพบเพียงวัฏภาคหลัก คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยไม่พบพิกที่ตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของซีเรียมออกไซด์ (CeO_2) และกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ ($\text{g-C}_3\text{N}_4$) ที่เติมลงไป เนื่องจากปริมาณของซีเรียมออกไซด์ (ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก) ที่เติมลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์นั้นมีปริมาณที่น้อยกว่าค่าจำกัดการตรวจวัด (detection limit) ซึ่งค่าจำกัดการตรวจวัดของเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ คือ ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของสารตัวอย่าง [8] และอาจเป็นผลมาจากความเข้มของพิกของซีเรียมออกไซด์มีความเข้มต่ำเมื่อเทียบกับความเข้มของพิกของไทเทเนียมไดออกไซด์ ส่วนกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ ($\text{g-C}_3\text{N}_4$) อาจเป็นเพราะโครงสร้างมีความเป็นผลึกน้อยกว่าอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ จึง

ทำให้ไม่สามารถตรวจพบพีคที่ตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของซีเรียมออกไซด์ (CeO_2) และกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ ($\text{g-C}_3\text{N}_4$) ได้โดยการใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์



รูปที่ 4.21 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของวัสดุผสม (a) $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{TiO}_2$ P25, (b) $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ P25, (c) $\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ P25, (d) $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{modified TiO}_2$ P25 และ (e) $50\%\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ P25

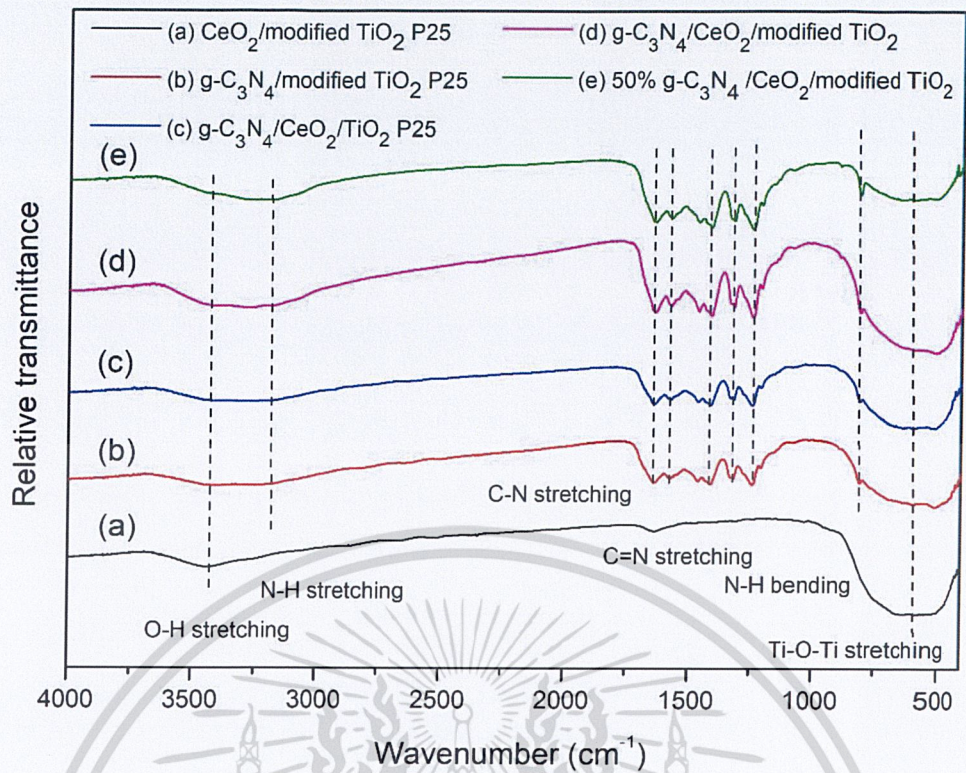
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



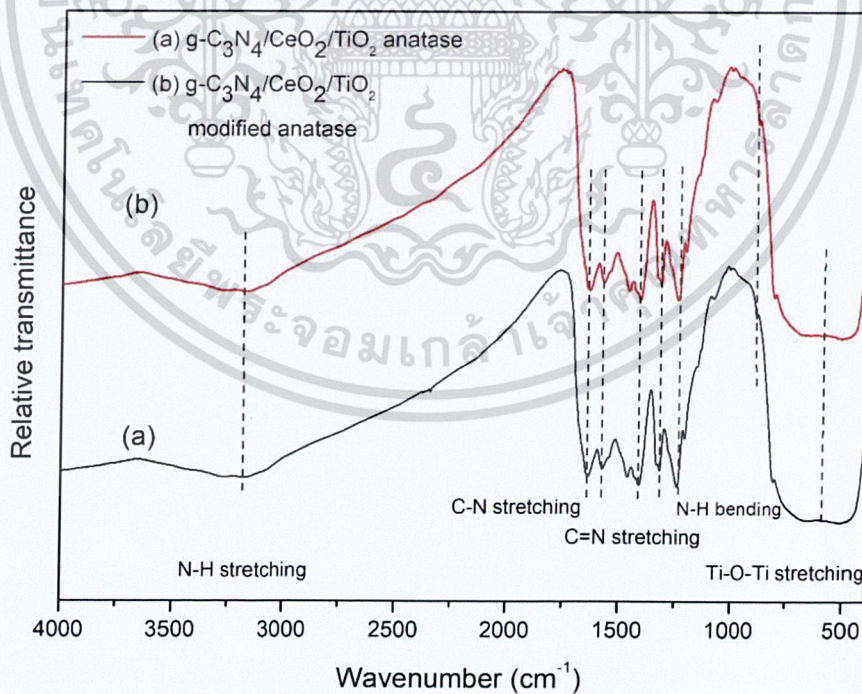
รูปที่ 4.22 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของวัสดุผสม (a) $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{TiO}_2$ anatase และ (b) $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ anatase

จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR) ของวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ทั้ง 5 ตัวอย่างและวิภูภาคอนาเทสทั้ง 2 แสดงดังรูปที่ 4.23 และรูปที่ 4.24 มีสเปกตรากการดูดกลืนแสงที่คล้ายคลึงกันโดยพบช่วงการสั่นแบบยืดหดที่เป็นเอกลักษณ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ตามผลที่กล่าวมาในตอนี่ 4.3 คือที่ $687 - 487 \text{ cm}^{-1}$ ของพันธะ Ti-O-Ti และยังพบช่วงการดูดกลืนแสงที่เป็นเอกลักษณ์ของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ช่วง 3180 cm^{-1} และ $1650 - 1250 \text{ cm}^{-1}$ ที่เป็นการสั่นแบบยืดหดและบิดงอของพันธะ N-H และ C-N ร่วมกับ C=N ตามลำดับ โดยความเด่นชัดของพีคซีเรียมออกไซด์ค่อนข้างไม่ชัดเจน เนื่องจากเติมซีเรียมออกไซด์ในปริมาณที่น้อยมาก คือ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และพีคเอกลักษณ์ของซีเรียมออกไซด์อยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 397 cm^{-1} (Ce-O) ซึ่งอาจซ้อนทับกับช่วงการดูดกลืนของไทเทเนียมไดออกไซด์ จึงไม่สามารถพบช่วงเอกลักษณ์ที่ชัดเจนของซีเรียมออกไซด์ได้ [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 อินฟราเรดสเปกตรัมของ (a) CeO_2 /modified TiO_2 P25 (b) $\text{g-C}_3\text{N}_4$ /modified TiO_2 P25 (c) $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{TiO}_2$ P25 (d) $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2$ /modified TiO_2 P25 (e) 50% $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2$ /modified TiO_2 P25



รูปที่ 4.24 อินฟราเรดสเปกตรัมของ (a) $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{TiO}_2$ anatase (b) $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2$ /modified TiO_2 anatase

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การศึกษาพื้นที่ผิวและรูพรุน

เมื่อนำวัสดุผสมไปทำการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนจากวิธีของ Brunauer-Emmett-Teller (BET) ผลที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.6 พบว่าเมื่อมีการเติมกราฟิติกคาร์บอนไนโตรดและซีเรียมออกไซด์ทำให้วัสดุผสมมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยวัสดุผสม $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{TiO}_2$ P25 มีปริมาณพื้นที่ผิว $69.48 \text{ m}^2/\text{g}$ และขนาดรูพรุน 385.70 \AA เป็นค่ามากที่สุด ซึ่งไม่สอดคล้องกับจากผล BET ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นที่ผิวแล้ว อาจเป็นผลมาจากการที่ไทเทเนียมไดออกไซด์กระจายตัวได้ดีบนกราฟิติกคาร์บอนไนโตรดจนบดบังพื้นที่ผิวของกราฟิติกคาร์บอนไนโตรด ส่วนวัสดุผสม $50\%g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ P25 โดยมีปริมาณพื้นที่ผิว $35.05 \text{ m}^2/\text{g}$ และขนาดรูพรุน 179.60 \AA ซึ่งเป็นค่าน้อยที่สุด แต่วัสดุผสมตัวนี้มีปริมาณของกราฟิติกคาร์บอนไนโตรดที่มีความเป็นรูพรุนมาก ซึ่งอาจเป็นผลจากกราฟิติกคาร์บอนไนโตรดเกาะกลุ่มกันเองมากกว่าจึงทำให้กระจายตัวได้ไม่ดี ส่วนผลของวัสดุผสม $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ anatase ซึ่งมีค่าปริมาณพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนน้อยกว่าวัสดุผสมกลุ่มไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ยกเว้นวัสดุผสม $50\% g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ P25 และเป็นไปตามผล BET ของไทเทเนียมไดออกไซด์วิฎุภาคอนาทเอส โดยมีค่าปริมาณพื้นที่ผิว $39.18 \text{ m}^2/\text{g}$ และขนาดรูพรุน 96.69 \AA

ตารางที่ 4.6 ปริมาณพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของวัสดุผสมกลุ่มไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และวัสดุผสมกลุ่มไทเทเนียมไดออกไซด์อนาทเอสก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นที่ผิว

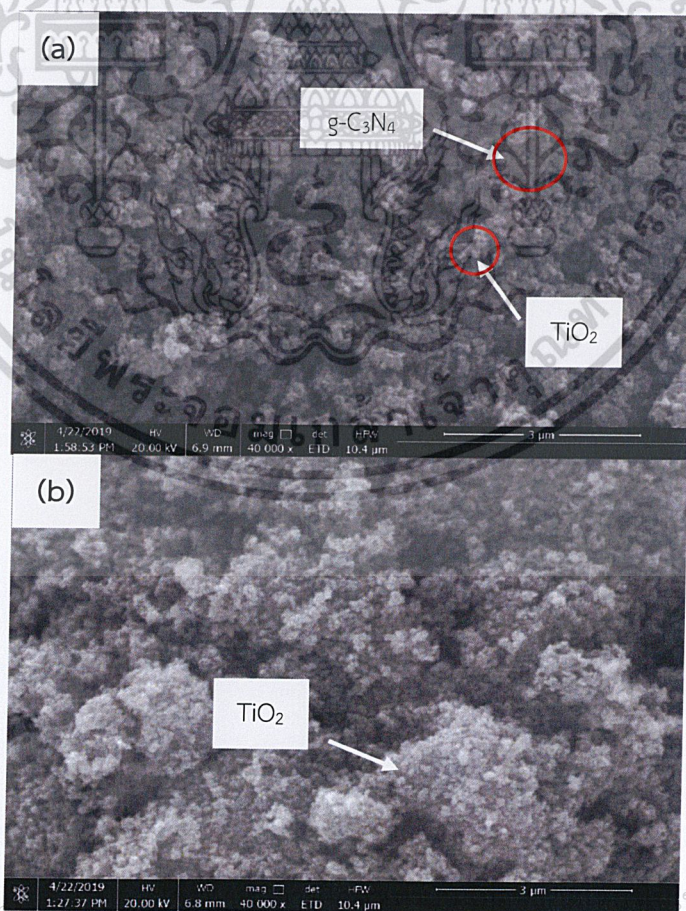
ตัวอย่าง	พื้นที่ผิว (m^2/g)	ขนาดรูพรุน (\AA)
$g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{modified TiO}_2$ P25	61.54	356.70
$\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ P25	60.76	307.20
$g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{TiO}_2$ P25	69.48	385.70
$g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ P25	60.73	312.70
$g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ anatase	39.18	96.69
$50\%g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ P25	35.05	179.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 การศึกษาสัณฐานวิทยา

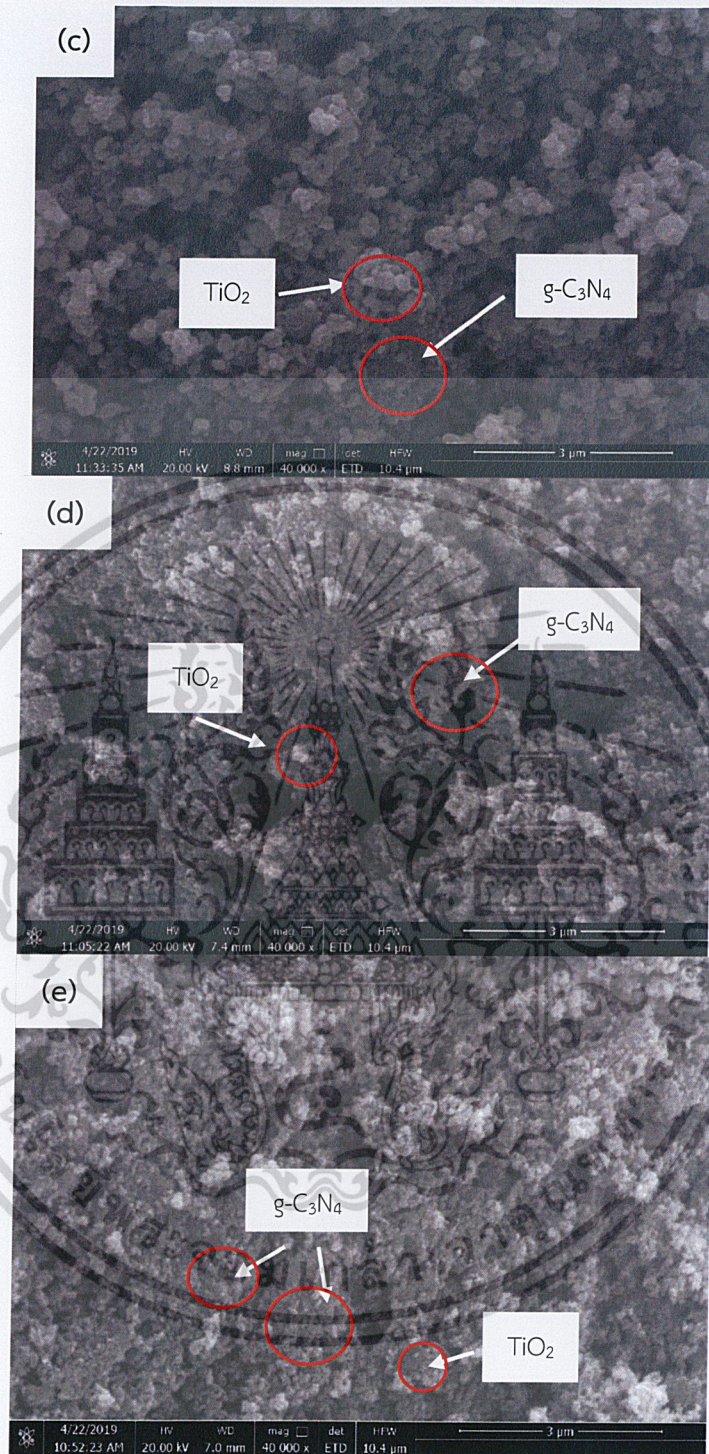
จากการศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope, TEM) ของวัสดุผสมของอนุภาคไทเทเนียมออกไซด์ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยการเติมซีเรียมออกไซด์และกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ของตัวอย่าง $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ P25 และ $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ anatase ดังแสดงในรูปภาคผนวกที่ ข-2 และ ข-3 ตามลำดับ พบว่าวัสดุผสมทั้ง 2 ชนิดมีอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์กระจายตัวอยู่บนกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ โดยจากภาพถ่าย TEM ไม่สามารถระบุถึงรูปร่างและการกระจายตัวของซีเรียมออกไซด์ได้อย่างชัดเจน เนื่องจากซีเรียมออกไซด์มีขนาดอนุภาคที่เล็กและยังมีการเติมซีเรียมออกไซด์ลงไปปริมาณที่น้อยจึงไม่สามารถสังเกตเห็นได้ แต่มีความแตกต่างที่ขนาดอนุภาคของไทเทเนียมซึ่งวัสดุผสม $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ anatase อนุภาคไทเทเนียมที่มีวิภาคอนาเทสเพียงอย่างเดียวมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคไทเทเนียมของวัสดุผสม $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ P25 ที่มีวิภาคอนาเทสผสมกับวิภาครูไทล์

จากนั้นทำการศึกษาลักษณะพื้นผิววัสดุผสมของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยการเติมซีเรียมออกไซด์และกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ของตัวอย่าง $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{modified TiO}_2$ P25, $\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ P25, $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{TiO}_2$ P25, $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ P25, $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ anatase และ $5\%g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ P25 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ผลดังแสดงในรูปที่ 4.25

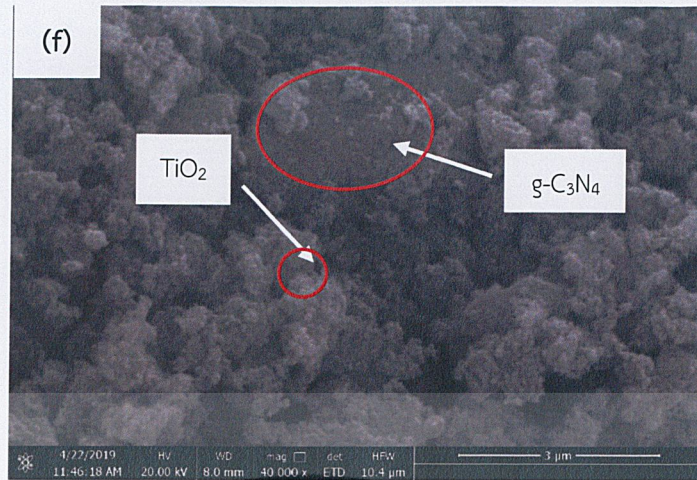


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ซึ่งประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 ภาพถ่าย SEM ของ (a) $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{modified TiO}_2$ P25 , (b) $\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ P25, (c) $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ anataseg, (d) $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{TiO}_2$ P25, (e) $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ P25 และ (f) $50\%g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ P25

จากการศึกษาสภาพพื้นผิวของตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning electron microscope) ของ $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{modified TiO}_2$ P25 ดังแสดงรูป 4.25(a) แสดงให้เห็นว่ามีอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 เกาะอยู่บนอนุภาคของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่มีลักษณะคล้ายเกล็ด จากรูป 4.25(b) แสดงสภาพพื้นผิวของ $\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ P25 แสดงให้เห็นว่าพบอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 เป็นหลักเนื่องจากอนุภาคซีเรียมออกไซด์มีอัตราส่วนร้อยละ 1 ซึ่งปริมาณน้อยมากจึงทำให้อนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์บดบังจึงทำให้บริเวณพื้นผิวอาจไม่พบอนุภาคของซีเรียมออกไซด์ จากรูป 4.25(c) ภาพพื้นผิวของ $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ anatase แสดงให้เห็นว่ามีอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์วัฏภาคอนาเทสชัดเจนเนื่องจากมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 เกาะอยู่บนกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์และไม่สามารถเห็นอนุภาคซีเรียมออกไซด์เนื่องจากมีขนาดอนุภาคเล็กระดับนาโนเมตรและมีอัตราส่วนร้อยละ 1 ซึ่งมีปริมาณน้อย จากรูป 4.25(d) และ (e) เป็นภาพสัณฐานวิทยาของ $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{TiO}_2$ P25 และ $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ P25 ซึ่งมีส่วนผสมของวัสดุ 3 ตัวเหมือนกันแต่ต่างกันที่ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยวิธีโซโนเคมีตามลำดับซึ่งจากภาพถ่าย SEM พบว่าวัสดุผสมมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันและรูป 4.25(f) เป็นวัสดุผสมที่มี กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์อัตราส่วนร้อยละ 50 ซีเรียมออกไซด์ร้อยละ 1 และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวร้อยละ 49 ($50\%g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ P25) ซึ่งจะเห็นว่าจะมีอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์-P25 เกาะอยู่บนอนุภาคของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์และไม่เห็นอนุภาคของซีเรียมออกไซด์เนื่องจากมีปริมาณน้อย โดยในรูปจะเห็นอนุภาคของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ชัดเจนเนื่องจากมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าซีเรียมออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์และยังมีปริมาณมากที่สุดอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

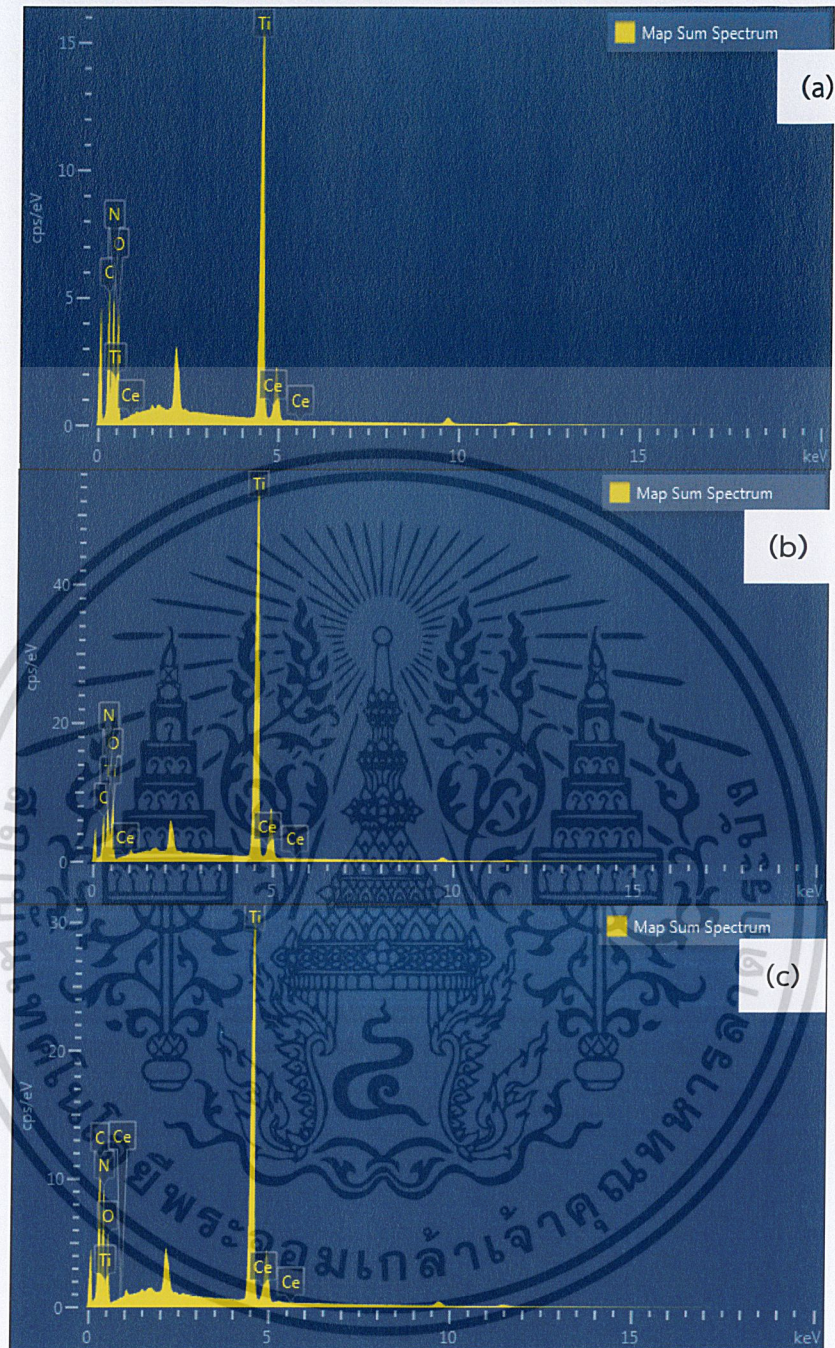
4.2.4 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบ

ผลการศึกษาดูองค์ประกอบของวัสดุผสม $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ anatase, $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ P25 และ $50\%g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ P25) ด้วยเทคนิค energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบและการกระจายตัวของธาตุในวัสดุผสม ผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.26, 4.27 และตารางที่ 4.7 พบว่าสเปกตรัมและแผนภาพการกระจายตัวแสดงถึงองค์ประกอบของธาตุผสมที่เติมลงไป คือ ไทเทเนียม (Ti) ออกซิเจน (O) คาร์บอน (C) ไนโตรเจนและซีเรียม (Ce) โดยวัสดุผสม $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ anatase และ $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ P25 ปริมาณของธาตุหลักที่พบ คือ Ti และ O และมีแนวโน้มค่าน้ำหนักใกล้เคียงตามทฤษฎี ส่วนวัสดุผสม $50\%g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ P25 ซึ่งต้องพบ C และ N เป็นหลัก แต่ผลค่าน้ำหนักไม่เป็นไปตามทฤษฎีซึ่งพบ O มากแทนอาจเป็นผลมาจากขั้นตอนการสังเคราะห์กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์โดยการเผาที่อุณหภูมิสูงจึงทำให้ออกซิเจนถูกกำจัดไม่หมดและเข้าไปอยู่ในรูพรุนของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์แทน และปริมาณของธาตุ Ce ของวัสดุผสมทั้ง 3 ตัวนั้นซึ่งมีค่าแตกต่างจากค่าทางทฤษฎีเล็กน้อยเป็นผลมาจากอนุภาคซีเรียมออกไซด์ การกระจายตัวไม่ดีในวัสดุผสม

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบในตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

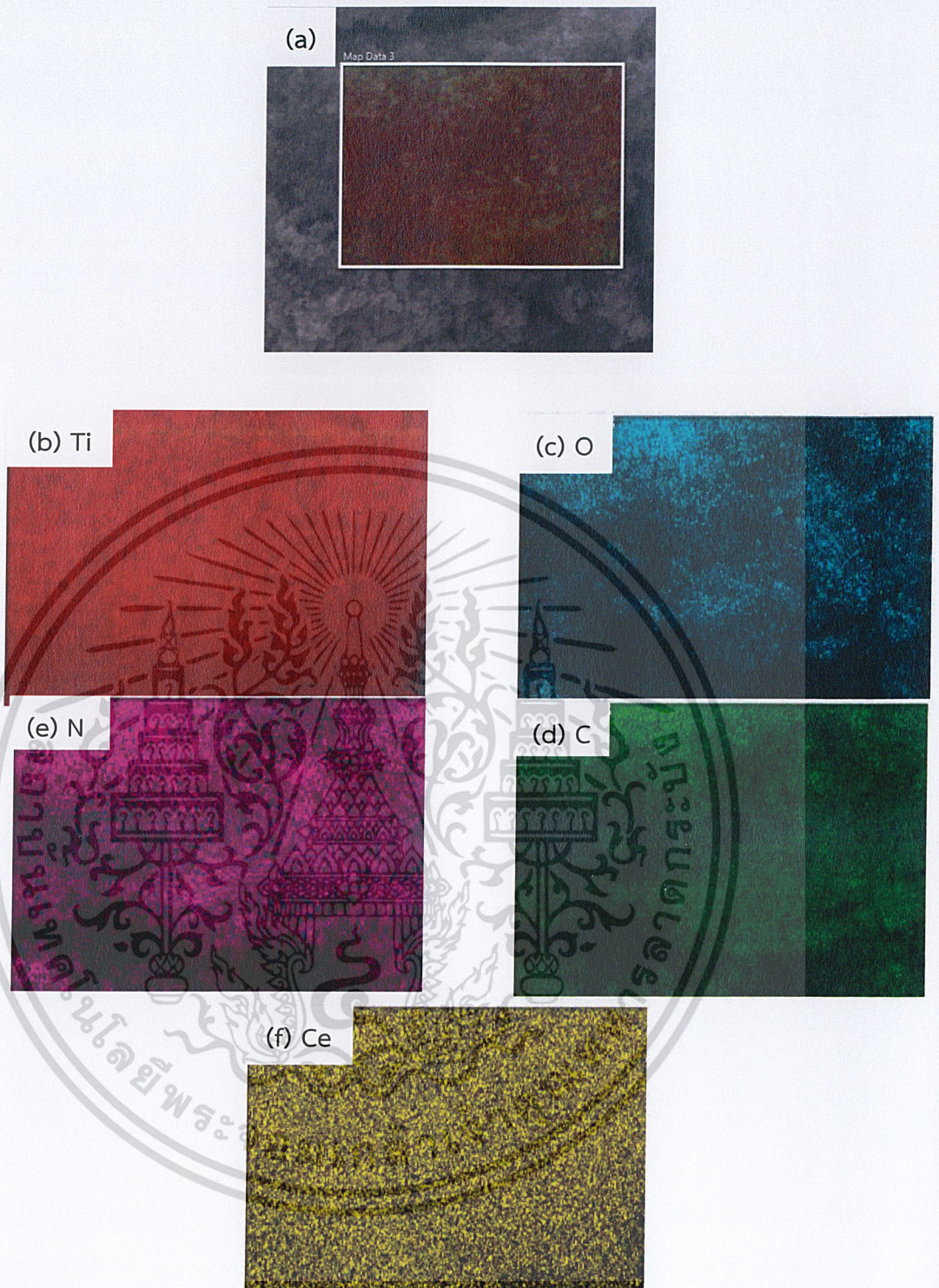
ธาตุองค์ประกอบ		ร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง (wt%)		
		$g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ anatase	$g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ P25	$50\%g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ P25
Ti	ทฤษฎี	47.35	47.35	29.37
	การทดลอง	33.99	35.22	17.75
O	ทฤษฎี	31.84	31.84	19.82
	การทดลอง	32.93	53.74	63.15
C	ทฤษฎี	7.83	7.83	19.57
	การทดลอง	16.66	6.87	10.64
N	ทฤษฎี	12.17	12.17	30.43
	การทดลอง	16.09	4.17	8.01
Ce	ทฤษฎี	0.81	0.81	0.81
	การทดลอง	0.34	0.00	0.45

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้วงเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 EDS สเปกตร้าของวัสดุผสม (a) $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ anatase, (b) $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ P25 และ (c) 50% $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ P25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

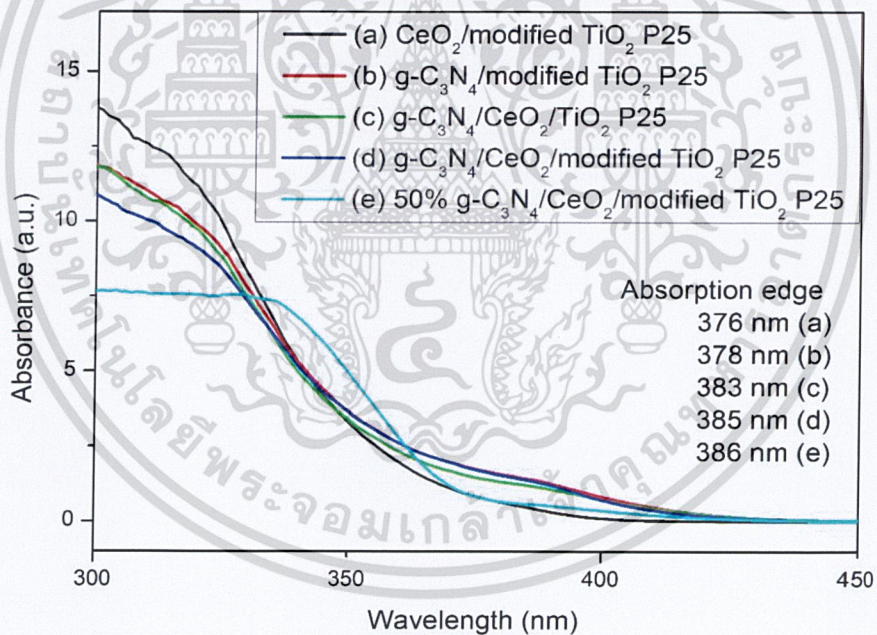


รูปที่ 4.27 (a) ภาพถ่าย SEM ของวัสดุผสม $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ P25 และภาพการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบ (b) ไทเทเนียม (Ti) (c) ออกซิเจน (O) (d) คาร์บอน (C) (e) ไนโตรเจน (N) และ (f) ซีเรียม (Ce)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

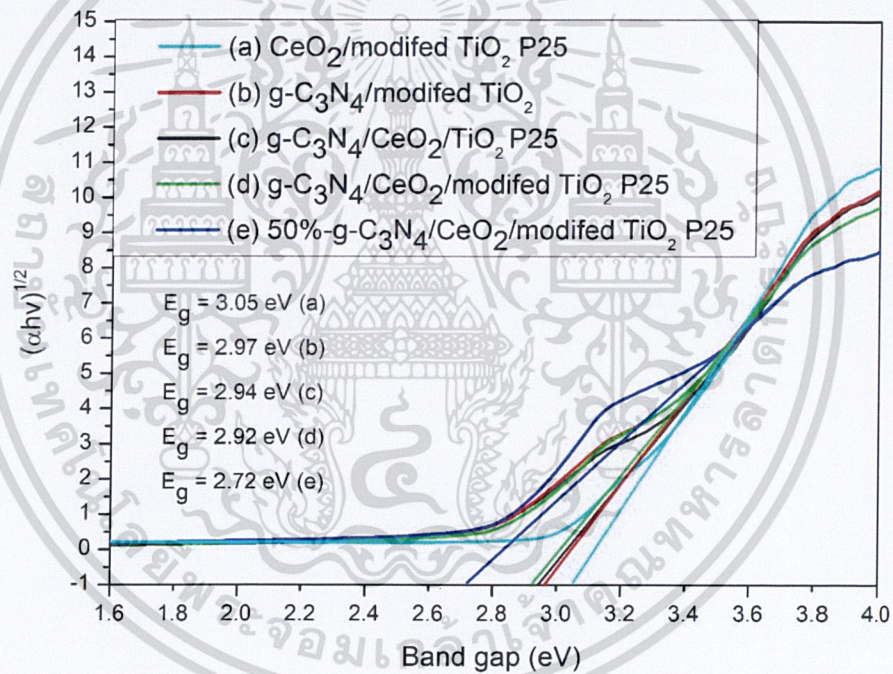
4.2.5 การศึกษาสมบัติทางแสง

จากการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงของวัสดุผสมที่เกิดจากการเจือกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์และซีเรียมออกไซด์ลงในไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ผลที่ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.28 พบว่าวัสดุผสมทั้งหมดที่มีค่าเริ่มต้นการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่สูงขึ้น (red shift) เมื่อเทียบกับไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 บริสุทธิ์หลังการปรับปรุงผิวที่มีค่า 374 nm และ 374 nm หลังการปรับปรุงผิวโดยวัสดุผสมที่มีการเจือซีเรียมออกไซด์ ($\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ P25) มีการดูดกลืนช่วงยูวีและวิสิเบิลมากขึ้นและมีค่าเริ่มต้นการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นเป็น 376 nm วัสดุที่มีการเจือกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ ($\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{modified TiO}_2$ P25) มีการดูดกลืนช่วงวิสิเบิลและค่าเริ่มต้นการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นเป็น 378 nm วัสดุผสมที่มีการเจือทั้งซีเรียมออกไซด์และกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ ($\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{TiO}_2$ P25 และ $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified-TiO}_2$ P25) พบว่ามีการดูดกลืนแสงช่วงยูวีลดลงและมีการดูดกลืนแสงช่วงวิสิเบิลเพิ่มมากขึ้นและค่าเริ่มต้นการดูดกลืนแสง เพิ่มขึ้นเป็น 383 nm และ 385 nm ตามลำดับ วัสดุผสมที่มีการกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์เป็นวัฏภาคหลัก ($50\%\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ P25) มีการดูดกลืนแสงช่วงยูวีต่ำที่สุด แต่มีการดูดกลืนแสงช่วงวิสิเบิลสูงที่สุดและค่าเริ่มต้นการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นเป็น 386 nm



รูปที่ 4.28 ยูวี-วิสิเบิลสเปกตรัมของวัสดุผสมกลุ่ม P25 ที่ผ่านการเจือซีเรียมออกไซด์และกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์

เมื่อนำค่าสเปกตรัมการดูดกลืนมาคำนวณหาค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (E_g) ของวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 วิธีคำนวณในภาคผนวก ง ผลดังแสดงในรูปที่ 4.29 และตารางที่ 4.8 พบว่าวัสดุผสมทั้งหมดมีค่าช่องว่างแถบพลังงานที่ลดลงเมื่อเทียบกับ TiO_2 P25 บริสุทธิ์ก่อนการปรับปรุงผิวที่มีค่า 3.13 eV ก่อนทำการปรับปรุงผิวที่มีค่า 3.08 eV โดยวัสดุผสมที่มีการเจือซีเรียมออกไซด์ ($\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ P25) มีค่าแถบช่องว่างระหว่างพลังงานเป็น 3.05 eV วัสดุที่มีการเจือกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ ($g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{modified TiO}_2$ P25) มีค่าแถบช่องว่างระหว่างพลังงานเป็น 2.97 eV วัสดุผสมที่มีการเจือทั้งซีเรียมออกไซด์และกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ ($g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{TiO}_2$ P25 และ $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ P25) มีค่าแถบช่องว่างระหว่างพลังงานเป็น 2.94 eV และ 2.92 eV ตามลำดับ วัสดุผสมที่มีการกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์เป็นวัฏภาคหลัก (50% $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ P25) มีค่าแถบช่องว่างระหว่างพลังงานต่ำที่สุด ซึ่งมีค่าลดลงเป็น 2.72 eV เนื่องจากกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์เป็นวัฏภาคหลักซึ่งเป็นวัสดุมีค่าแถบช่องว่างระหว่างพลังงานต่ำส่งผลให้วัสดุมีค่าแถบช่องว่างพลังงานต่ำที่สุด



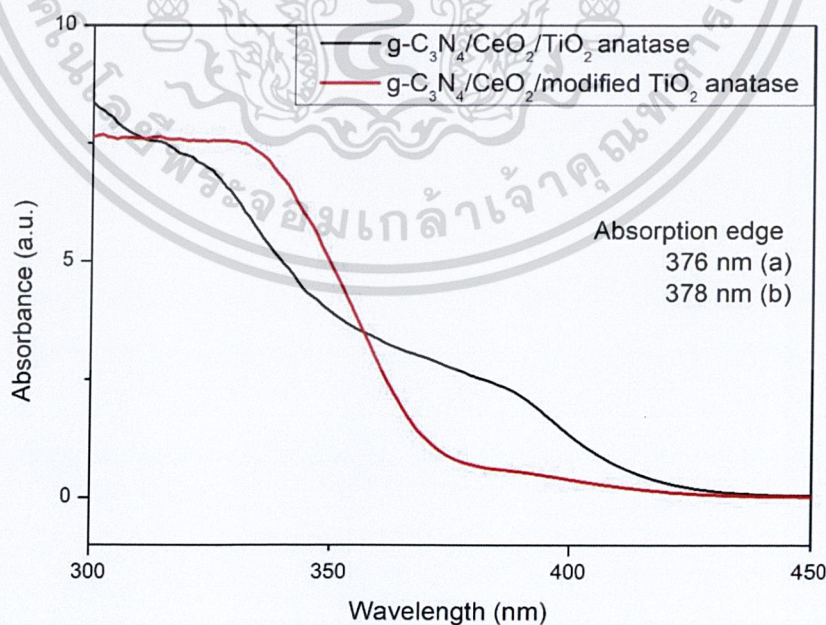
รูปที่ 4.29 การหาค่าพลังงานช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่ม P25 ที่ผ่านการเจือด้วยกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์และซีเรียมออกไซด์ด้วยวิธีของ Tuac's

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ค่าแถบช่องว่างระหว่างพลังงานจากวิธี Tuac's และค่าเริ่มต้นของการดูดกลืนแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ที่ผ่านการเจือซีเรียมออกไซด์และกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์

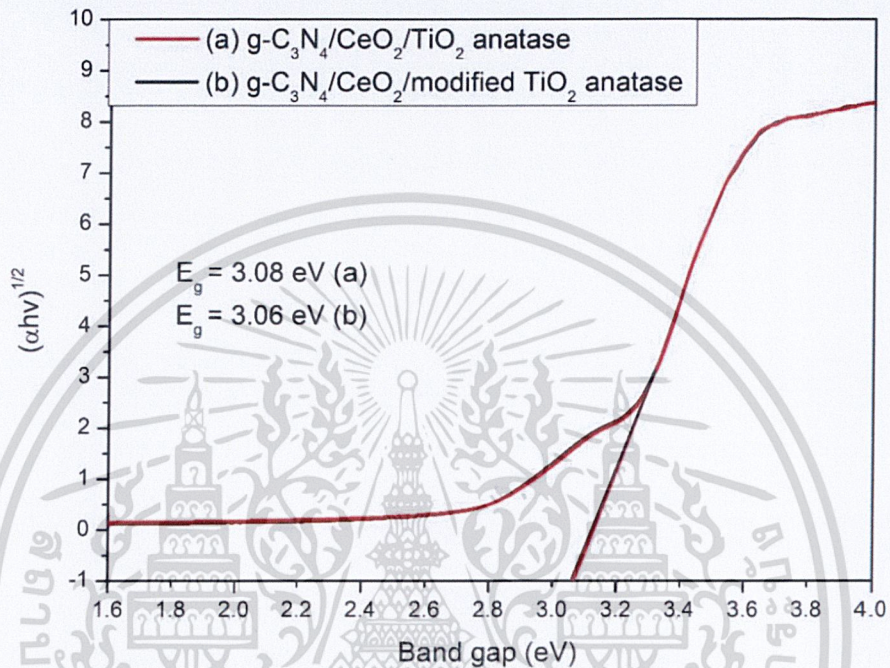
ตัวอย่าง	ค่าเริ่มต้นของการดูดกลืนแสง (nm)	Energy gap (eV)
CeO ₂ /modified P25	376	3.05
g-C ₃ N ₄ /modified P25	378	2.97
g-C ₃ N ₄ /CeO ₂ /P25	383	2.94
g-C ₃ N ₄ /CeO ₂ /modified P25	385	2.92
50%g-C ₃ N ₄ /CeO ₂ /modified P25	386	2.72

จากการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงของวัสดุผสมที่เกิดจากการเจือไทเทเนียมไดออกไซด์ วัสดุภาคอนาเทสด้วยกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์และซีเรียมออกไซด์ ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.30 พบว่าวัสดุผสมที่มีการเจือทั้งซีเรียมออกไซด์และกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ (g-C₃N₄/CeO₂/TiO₂ anatase และ g-C₃N₄/CeO₂/modified TiO₂ anatase) พบว่ามีการดูดกลืนแสงช่วงยูวีลดลงและมีการดูดกลืนแสงช่วงวิสิเบิลเพิ่มมากขึ้น โดยมีค่าเริ่มต้นการดูดกลืนแสง เป็น 376 nm ซึ่งเพิ่มขึ้นจาก 367 nm ของไทเทเนียมไดออกไซด์วัสดุภาคอนาเทสบริสุทธิ์ ก่อนการปรับปรุงพื้นผิวและซึ่งเพิ่มขึ้นจาก 369 nm ของไทเทเนียมไดออกไซด์วัสดุภาคอนาเทสหลังการปรับปรุงพื้นผิว มีค่าเป็น 378 nm ตามลำดับ



เอกสารรูปที่ 4.30 ยูวี-วิสิเบิลสเปกตรัมของวัสดุผสมกลุ่มอนาเทสที่ผ่านการเจือซีเรียมออกไซด์และกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ ซึ่งทั้งหมดนี้ให้คำปรึกษาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำสเปกตรัมการดูดกลืนแสงมาคำนวณหาค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (E_g) ของวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์วัฏภาคอนาเทส ผลดังแสดงในรูปที่ 4.31 และตารางที่ 4.9 พบว่าวัสดุผสมที่มีการเจือทั้งซีเรียมออกไซด์และกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ ($g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{TiO}_2$ anatase และ $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ anatase) มีค่าแถบช่องว่างระหว่างพลังงานลดลงจาก 3.19 eV เป็น 3.08 eV และ 3.14 eV เป็น 3.06 eV ตามลำดับ



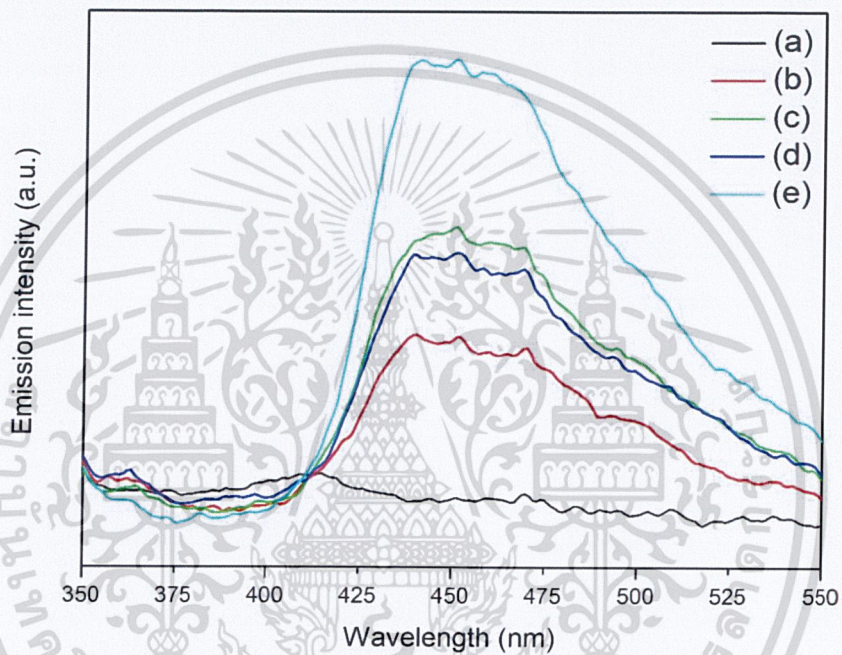
รูปที่ 4.31 การหาค่าพลังงานช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของวัสดุผสมกลุ่มอนาเทสด้วยวิธีของ Tuac's

ตารางที่ 4.9 ค่าแถบช่องว่างระหว่างพลังงานจากวิธี Tuac's และค่าเริ่มต้นของการดูดกลืนแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์วัฏภาคอนาเทส ที่ผ่านการเจือซีเรียมออกไซด์และกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์

ตัวอย่าง	ค่าเริ่มต้นของการดูดกลืนแสง (nm)	Energy gap (eV)
$g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{TiO}_2$ anatase	376	3.08
$g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ anatase	378	3.06

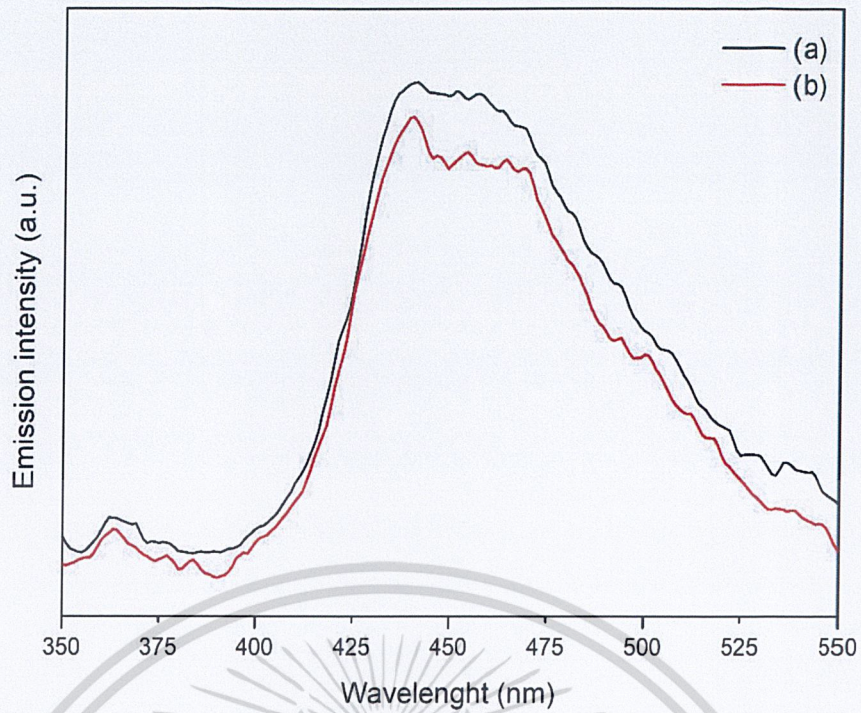
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาสมบัติทางแสงของวัสดุผสมเมื่อทำการปรับปรุงสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยการเติมซีเรียมออกไซด์และกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ จากการวัดค่าการคายพลังงานแสงด้วยเทคนิคฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปี พบว่าวัสดุผสมทั้งหมดที่มีการเจือกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ มีการคายพลังงานในช่วงความยาวคลื่นใกล้เคียงกับช่วงความยาวคลื่นเอกลักษณ์ของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่มีความยาวคลื่น 450 [49] และไม่พบพีคเอกลักษณ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์มีความเข้มของสัญญาณมาก และมีค่าช่องว่างระหว่างพลังงานต่ำจึงเกิดการตกกลับของอิเล็กตรอนง่ายทำให้มีค่าการคายพลังงานสูง ดังนั้นจึงทำให้พีคเอกลักษณ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกบดบัง ดังแสดงในรูปที่ 4.32 และ 4.33



รูปที่ 4.32 ฟลูออเรสเซนซ์สเปกตรัมของวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 (a) $\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ P25 (b) $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{modified TiO}_2$ P25 (c) $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{TiO}_2$ P25 (d) $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ P25 (e) 50% $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ P25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

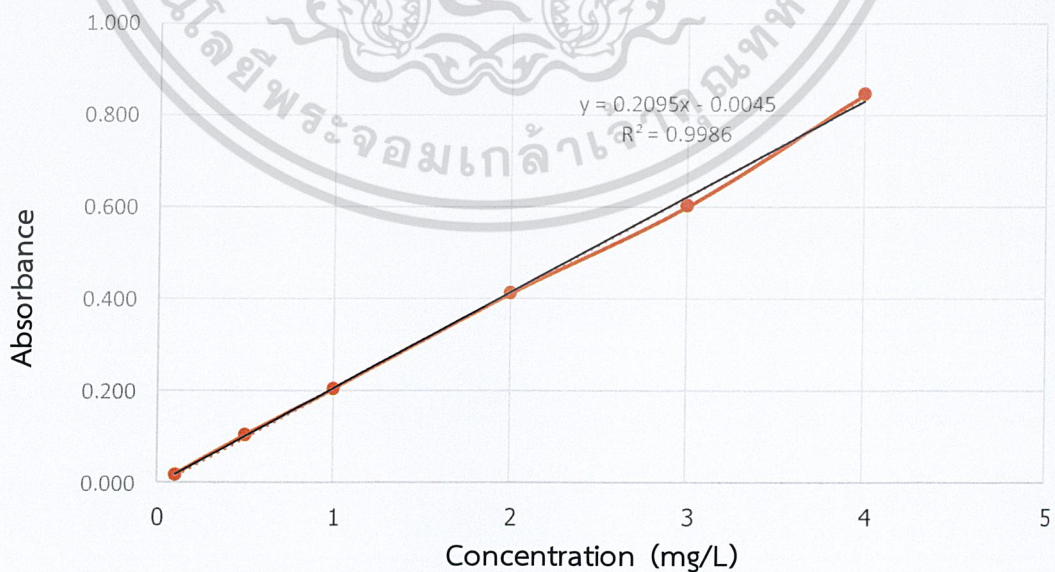


รูปที่ 4.33 ฟลูออเรสเซนซ์สเปกตรัมของวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์/กราฟิกอนาเทส (a) $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{TiO}_2$ anatase (b) $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ anatase

4.3 การศึกษาประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู

4.3.1 การสร้างกราฟมาตรฐาน

ได้ทำการสร้างกราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นต่าง ๆ โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนแสงสูงสุดของเมทิลีนบลูที่ 664 นาโนเมตร ผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.34 แสดงกราฟมาตรฐานสารละลายเมทิลีนบลู

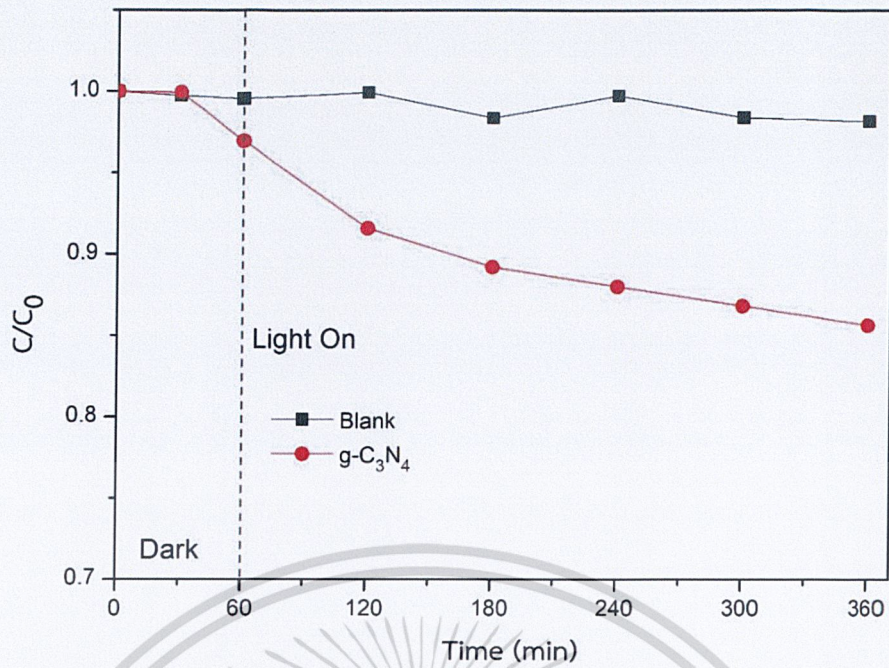
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมทิลีนบลูและค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 0.1 mg/L ถึง 4.00 mg/L โดยกราฟมาตรฐานที่ได้มีลักษณะเป็นกราฟเส้นตรงแสดงถึงการดูดกลืนแสงของสารละลายเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารละลายโดยมีความสัมพันธ์ดังสมการเส้นตรง $y = 0.2095x - 0.0045$ และมีค่า $R^2 = 0.9986$ ซึ่งเป็นค่าที่บอกขอบเขตความแม่นยำสำหรับใช้ในการหาค่าความเข้มข้นของสารละลาย และเพื่อให้ได้ผลที่ถูกต้อง R^2 ควรมีค่าใกล้เคียง 1

4.3.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต

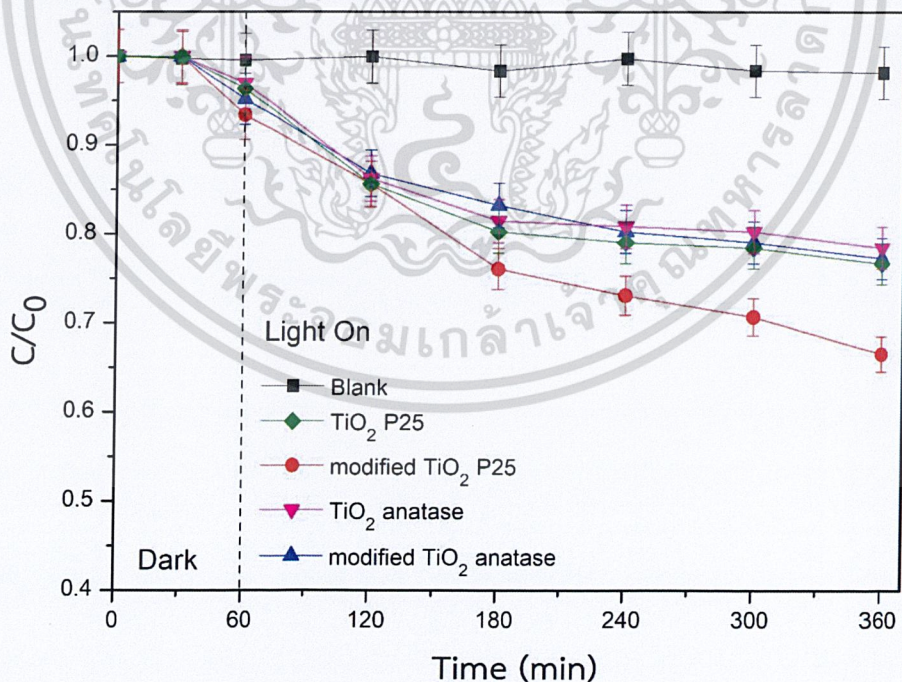
ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง กราฟิติกคาร์บอนไนโตรด, โทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และโทเทเนียมไดออกไซด์อนาเทสก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นผิว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง 0.02 กรัม กระจายตัวในสารละลายเมทิลีนบลู ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L) ปริมาตร 200 มิลลิกรัม ได้ศึกษาผลของการดูดซับโดยไม่ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลา 60 นาที หลังจากนั้นทำการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่นในช่วง 100-400 นาโนเมตร (ความเข้มสูงสุดที่ 254 นาโนเมตร) เป็นเวลา 300 นาที ซึ่งผลของกราฟิติกคาร์บอนไนโตรดดังแสดงในรูปที่ 4.35 โดยค่าประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูจากการดูดซับได้จากการวัดความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูหลังจากการปั่นกวนตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในสารละลายเมทิลีนบลูเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยไม่มีการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต ส่วนประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูจากปฏิกิริยาเชิงแสงได้จากความเข้มข้นหลังจากการฉายแสงที่เวลาต่าง ๆ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง และทำการหักกลับจากความเข้มข้นที่หายไปเนื่องจากการดูดซับ ผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงใด ๆ ลงไป เมื่อเวลาผ่านไปมีค่าลดลงเล็กน้อย และผลของ กราฟิติกคาร์บอนไนโตรดในช่วงที่ไม่มีการฉายแสงมีค่าประสิทธิภาพการดูดซับร้อยละ 3.04 หลังจากการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตพบว่ามีค่าประสิทธิภาพการฉายแสงร้อยละ 11.34 และมีค่า k_{app} 0.004 แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการฉายแสงความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูมีปริมาณลดลงเล็กน้อย ทำให้ทราบว่า กราฟิติกคาร์บอนไนโตรดมีการตอบสนองต่อแสงอัลตราไวโอเล็ตได้ไม่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.35 กราฟการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของกราฟิตคาร์บอนไนไตรด์ ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลา 5 ชั่วโมง

และผลการสลายสีย้อมและค่าประสิทธิภาพการสลายสีย้อมภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตของไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และไทเทเนียมไดออกไซด์อนาเทสก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นผิว ดังแสดงในรูปที่ 4.36 และ ตารางที่ 4.10

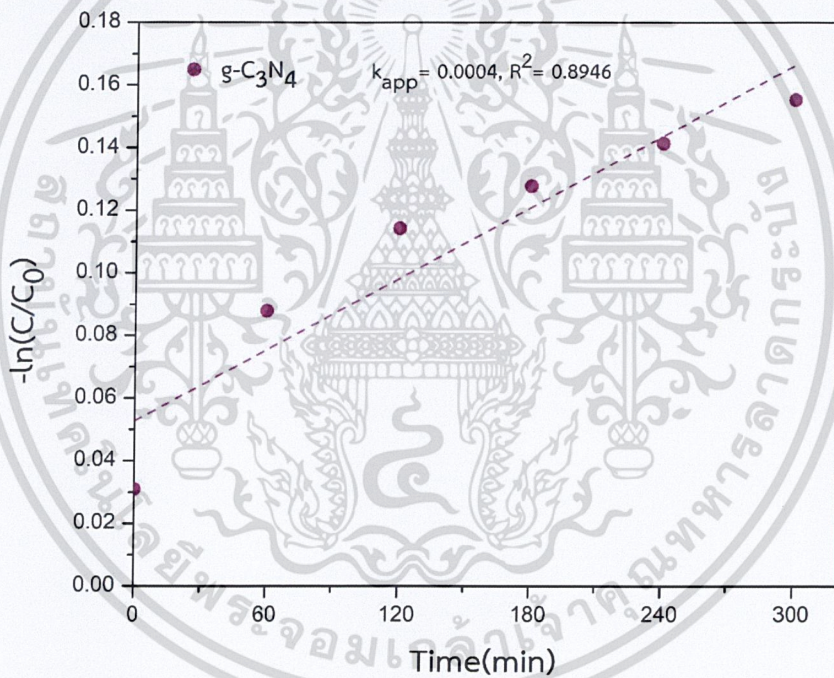


รูปที่ 4.36 กราฟการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ P25

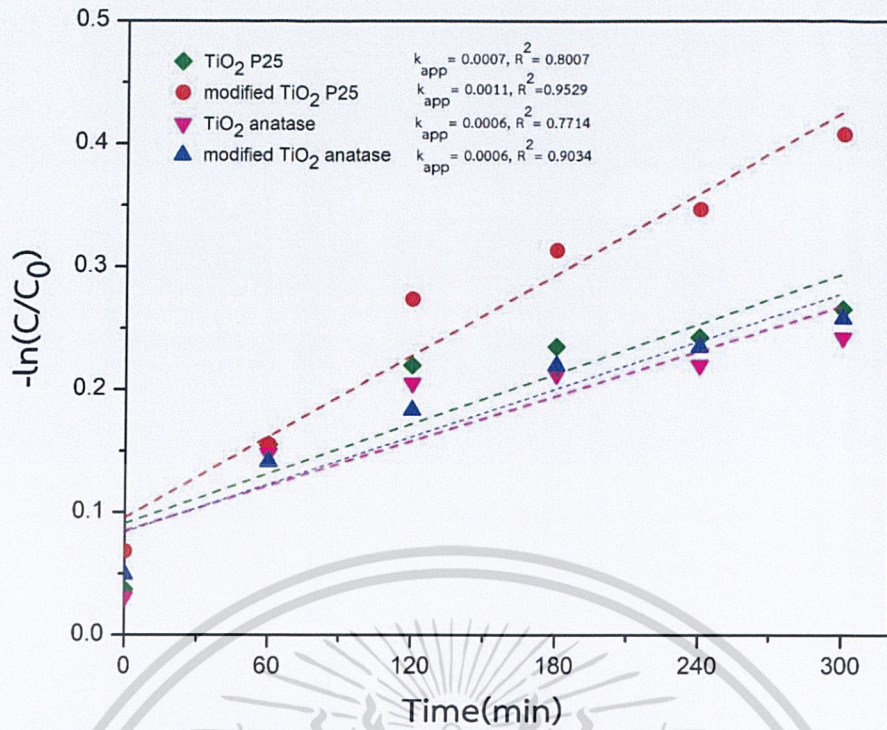
และไทเทเนียมไดออกไซด์อนาเทสก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นผิว ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลา 5 ชั่วโมง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูหลังจากเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และไทเทเนียมไดออกไซด์อนาเทสในสารละลายเมทิลีนบลู ในสภาวะที่ไม่มีการฉายแสงและในสภาวะฉายแสงเพื่อสลายสีย้อมเมทิลีนบลู พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และอนาเทสเมื่อผ่านการปรับปรุงพื้นผิวมีความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูลดลงโดย modified TiO₂ P25 มีค่าร้อยละการดูดซับและร้อยละการฉายแสงมากที่สุด คือ 6.62 และ 26.85 ตามลำดับ เนื่องด้วยประสิทธิภาพการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูเป็นผลรวมมาจากการดูดซับและปฏิกิริยาเชิงแสง ดังนั้นการหาประสิทธิภาพที่เกิดจากปฏิกิริยาเชิงแสงที่แท้จริงสามารถทำได้โดยการพล็อตกราฟระหว่าง $-\ln(C/C_0)$ กับเวลา ดังแสดงในรูปที่ 4.37 โดยให้เวลาที่ 60 นาทีเป็นการดูดซับที่เข้าสู่สมดุล ซึ่งเป็นวินาทีที่ 0 (normalized kinetic) ที่เริ่มทำการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต เพื่อหาค่าคงที่อัตราการสลายสีย้อมเชิงแสง (rate constant, k_{app}) กราฟที่ได้แสดงให้เห็นความสัมพันธ์แบบเส้นตรงของ $-\ln(C/C_0)$ และเวลา โดยค่าความชันแสดงถึงค่าคงที่อัตราการสลายสีย้อม (k_{app}) [53] ผลที่ได้ดังแสดงในตาราง 4.10



รูปที่ 4.37 ค่าคงที่อัตราการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของกราฟิติการ์บอน-ไนไตรด์ ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต (ไม่รวมการดูดซับ 60 นาที)



รูปที่ 4.38 ค่าคงที่อัตราการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และไทเทเนียมไดออกไซด์วัฏภาคอนาเทสก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นผิว ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต (ไม่รวมการดูดซับ 60 นาที)

จากผลที่ได้พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 มีประสิทธิภาพในการดูดซับและสลายสีย้อมที่ดีกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์วัฏภาคอนาเทส เนื่องจากการปรับปรุงผิวด้วยวิธีโซโนเคมีทำให้ได้วัสดุไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับและสลายสีย้อมที่ดีขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการมีพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นโดยดูได้จากผลของเทคนิค BET (ตารางที่ 4.1) ค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (E_g) และการกลับมารวมกันของอิเล็กตรอนและโฮลที่ลดลงหลังการปรับปรุงพื้นผิว ซึ่งดูได้จากผลของเทคนิค UV-Vis (ตารางที่ 4.4) และฟลูออเรสเซนซ์ (รูปที่ 4.13 และ 4.14)

ตารางที่ 4.10 แสดงประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเมื่อทำการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลา 5 ชั่วโมง

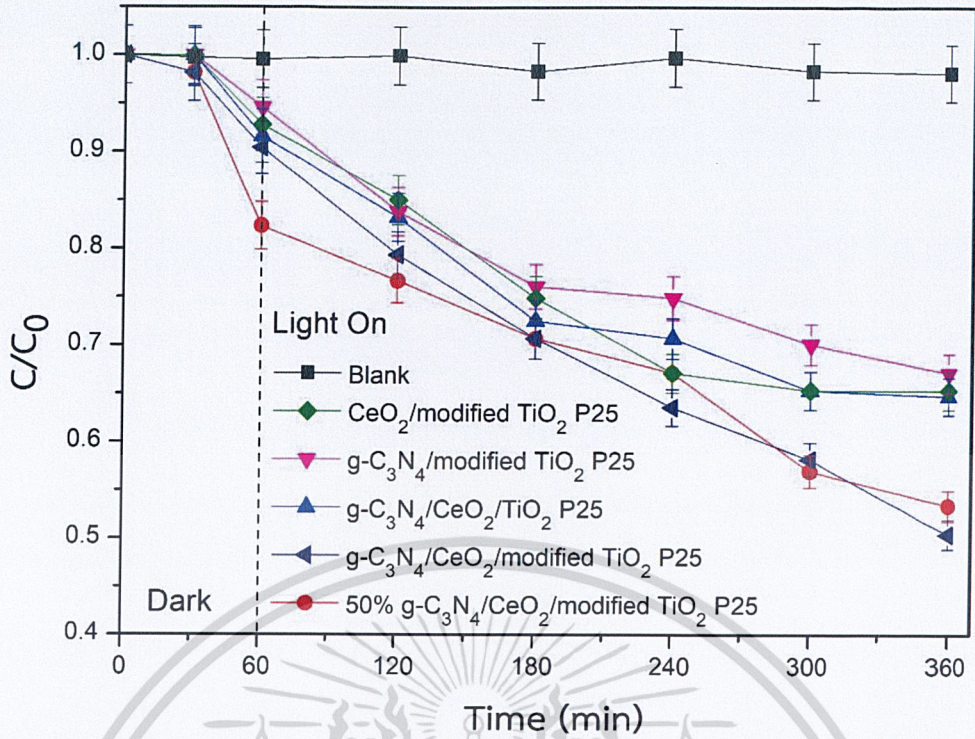
ตัวเร่งปฏิกิริยา เชิงแสง	ประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู ภายใต้ช่วงการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต (ร้อยละ)			ค่าคงที่ อัตราการ สลายสีย้อม (300 นาที)	R^2
	การดูดซับ	การฉายแสง	ประสิทธิภาพ		
			รวม		
TiO ₂ P25	3.64	19.69	23.32	0.0007	0.8007
modified TiO ₂ P25	6.62	26.85	33.47	0.0011	0.9529
TiO ₂ anatase	3.04	18.50	21.54	0.0006	0.7714
modified TiO ₂ anatase	3.04	18.50	21.54	0.0006	0.9034

เอกสารนี้เป็นของ TiO₂ anatase สำหรับกับ 3.04 งาน เพื่อ 18.50 เท่านั้น 21.54 ให้นำ 0.0006 โยชน์ 0.7714 ค่า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

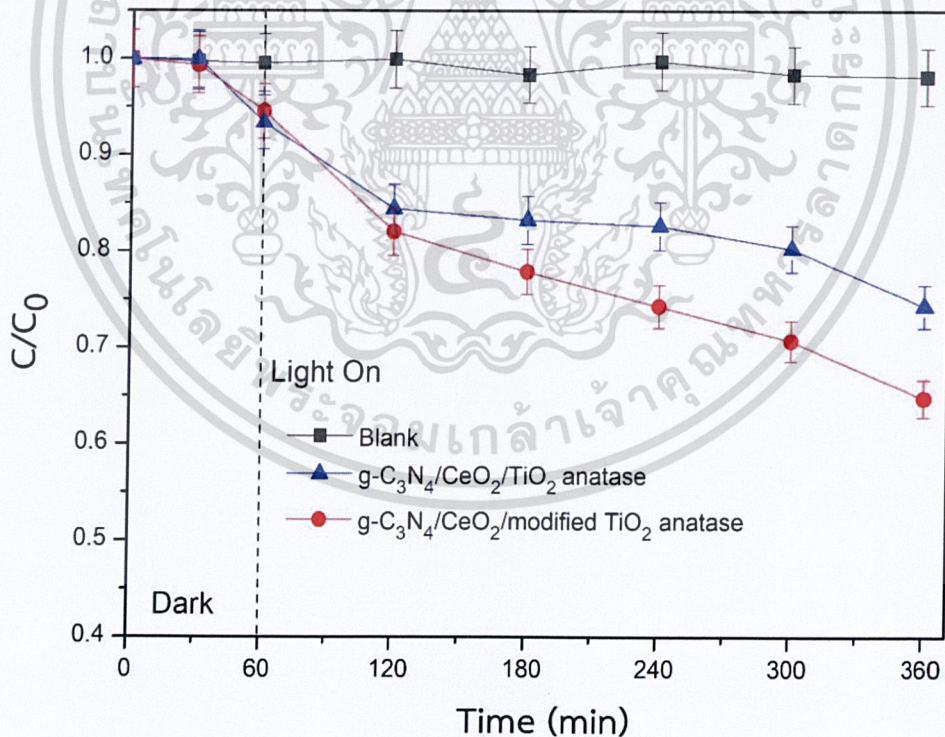
modified TiO ₂ anatase	4.83	17.90	22.73	0.0006	0.9034
g-C ₃ N ₄	3.04	11.34	14.38	0.0004	0.8946

ต่อมาได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิง-แสงและหาค่าคงที่อัตราการสลายสีย้อมของวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่ม P25 และวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มอนาเทส ดังแสดงในรูปที่ 4.38, 4.39, 4.40, 4.41 และตารางที่ 4.11 โดยผลที่ได้พบว่า วัสดุผสม 50%g-C₃N₄/CeO₂/modified TiO₂ P25 มีค่าร้อยละการดูดซับมากที่สุด 17.66 ซึ่งเป็นผลจากการมีองค์ประกอบของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่มีพื้นที่ผิวในการดูดซับสูงอยู่ถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ส่วนวัสดุผสมตัวอื่น ๆ มีค่าร้อยละในการดูดซับที่ใกล้เคียงกันในช่วง 5.43-9.61 และเมื่อทำการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลา 5 ชั่วโมง โดยพบว่าวัสดุผสมที่มีประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมจากการฉายแสงที่ดีที่สุดคือ g-C₃N₄/CeO₂/modified TiO₂ P25 โดยมีค่าประสิทธิภาพการดูดซับที่ร้อยละ 9.61 การฉายแสงร้อยละ 39.98 และค่า k_{app} 0.0019 ซึ่งผลที่ได้เกิดจากผลรวมจากข้อดีของการมีพื้นที่ผิวในการดูดซับที่สูง และค่า E_g ต่ำอยู่ที่ 2.92 และจากผลของประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมแสดงให้เห็นว่าวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่ม P25 มีค่าคงที่อัตราการสลายสีย้อม (k_{app}) ที่สูงกว่าวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มอนาเทสเนื่องจากมีพื้นที่ผิวในการดูดซับสูงและค่า E_g ต่ำกว่า ส่วนวัสดุผสมที่เตรียมจากไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุง-ผิวมีค่า k_{app} ที่ดีกว่าวัสดุผสมที่เตรียมจากไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิวเนื่องจากมีพื้นที่ผิวในการดูดซับเพิ่มขึ้น มีค่า E_g และอัตราการรวมกันของอิเล็กตรอนกับโฮลลดลง และวัสดุผสมที่มีการเติมทั้ง g-C₃N₄ และ CeO₂ ให้ผลที่ดีกว่าการเติม g-C₃N₄ หรือ CeO₂ เพียงอย่างเดียวเนื่องจากค่า E_g ที่ต่ำกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ จึงทำให้อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นไปยังแถบตัวนำของไทเทเนียม-ไดออกไซด์สามารถถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปยังแถบตัวนำของซีเรียมออกไซด์หรือเคลื่อนที่ไปยังแถบ-ตัวนำของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์จึงทำให้มีเวลาในการเกิดปฏิกิริยาได้นานขึ้น และสามารถลดอัตราการกลับมารวมกันของอิเล็กตรอนและโฮลได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

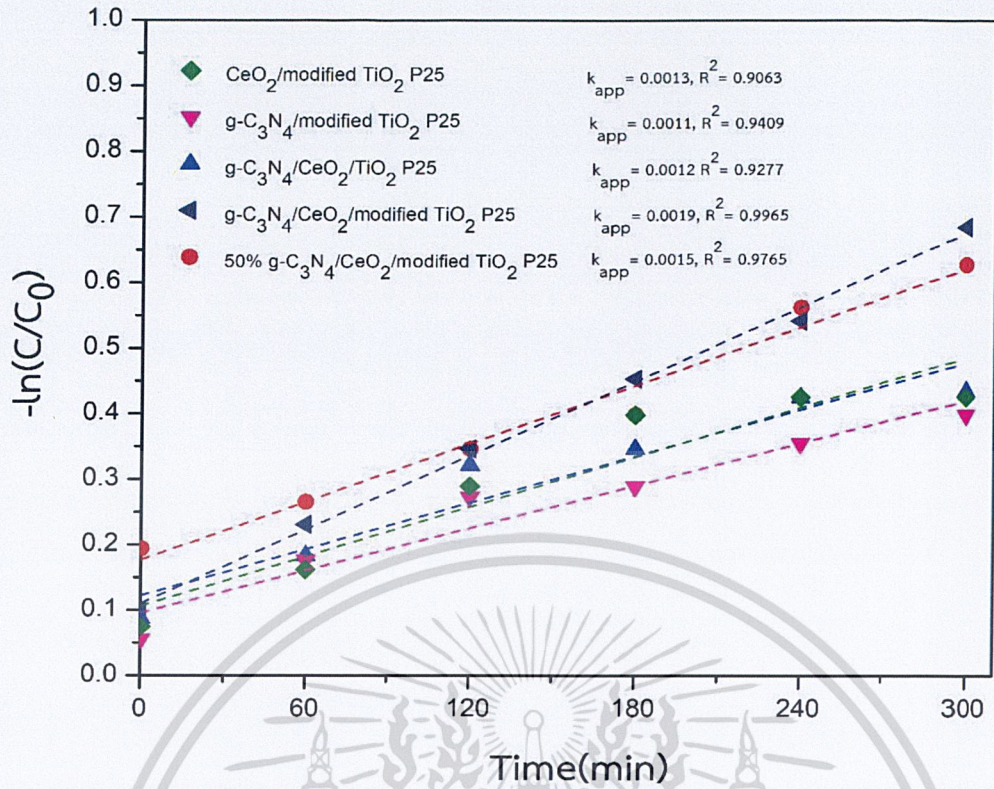


รูปที่ 4.39 กราฟการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของกลุ่มวัสดุผสมไทเทเนียม-ไดออกไซด์ P25 ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตได้เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

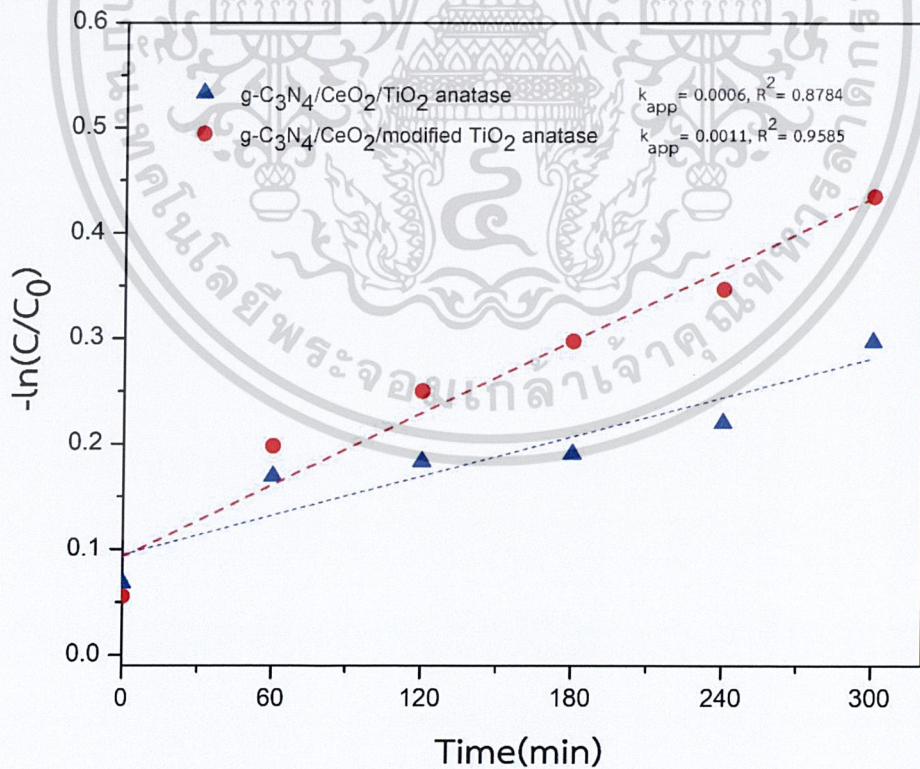


รูปที่ 4.40 กราฟการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของกลุ่มวัสดุผสมไทเทเนียม-ไดออกไซด์วัฏภาคอนาเทสภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตได้เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.41 ค่าคงที่อัตราการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของกลุ่มวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต (ไม่รวมการดูดซับ 60 นาที)



รูปที่ 4.42 ค่าคงที่อัตราการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของกลุ่มวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ตัวภาคอนาเทสภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต (ไม่รวมการดูดซับ 60 นาที) ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

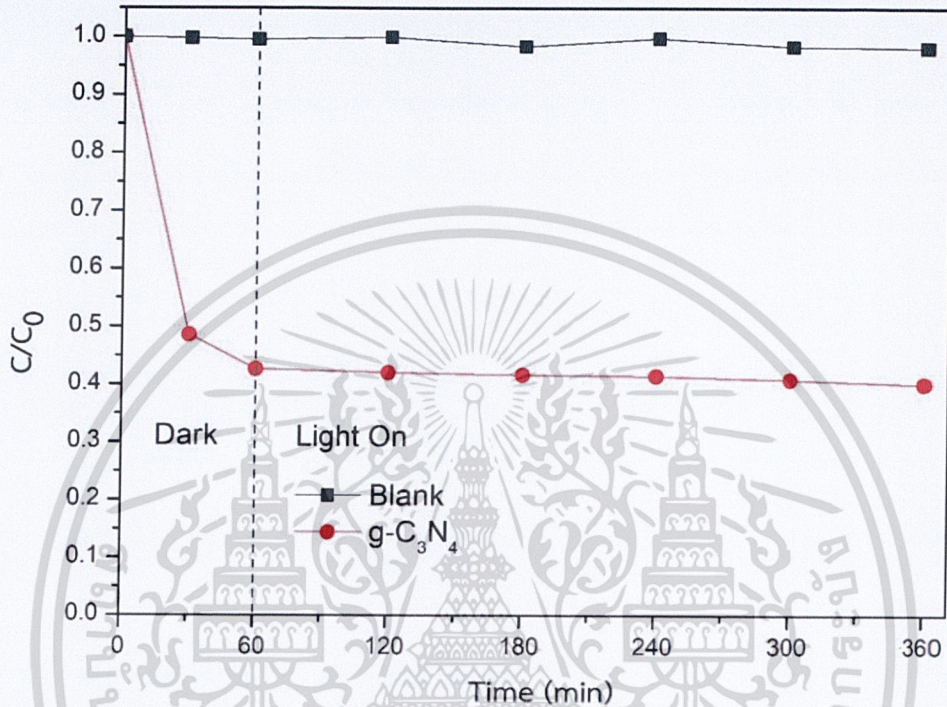
ตารางที่ 4.11 แสดงประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเมื่อทำการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลา 5 ชั่วโมง

ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง	ประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู ภายใต้ช่วงการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต (ร้อยละ)			ค่าคงที่ อัตรา การ สลายสีย้อม (300 นาที)	R ²
	การดูดซับ	ฉายแสง	ประสิทธิภาพ รวม		
CeO ₂ /modified TiO ₂ P25	7.22	27.45	34.67	0.0013	0.9063
g-C ₃ N ₄ /modified TiO ₂ P25	5.43	27.45	32.88	0.0011	0.9409
g-C ₃ N ₄ /CeO ₂ / TiO ₂ P25	8.41	26.85	35.26	0.0012	0.9277
g-C ₃ N ₄ /CeO ₂ /modified TiO ₂ P25	9.61	39.98	49.59	0.0019	0.9965
50%g- C ₃ N ₄ /CeO ₂ /modified TiO ₂ P25	17.66	28.94	46.60	0.0015	0.9765
g-C ₃ N ₄ /CeO ₂ / TiO ₂ anatase	6.62	19.09	25.71	0.0006	0.8784
g-C ₃ N ₄ /CeO ₂ /modified TiO ₂ anatase	5.43	29.83	35.26	0.0011	0.9585

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

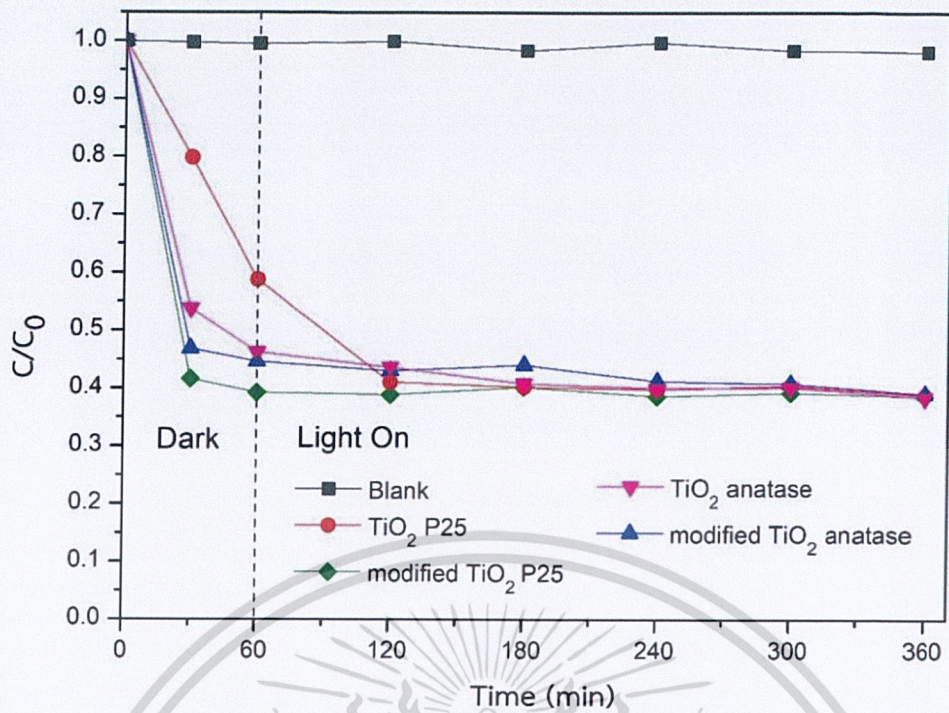
4.3.3 การศึกษาประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงวิธีเบิล

ผลการทดลองปฏิกิริยาการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 10 ppm ภายใต้การฉายแสงวิธีเบิลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง 0.02 กรัม ในสารละลายเมทิลีนบลู 200 มิลลิลิตร ใช้เวลาในการดูดซับ 60 นาทีแรกโดยยังไม่ทำการฉายแสง หลังจากนั้นทำการฉายแสงวิธีเบิลที่มีความยาวคลื่น 400 - 700 นาโนเมตร เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ผลดังแสดงในรูปที่ 4.43, 4.44, 4.45 และ 4.46

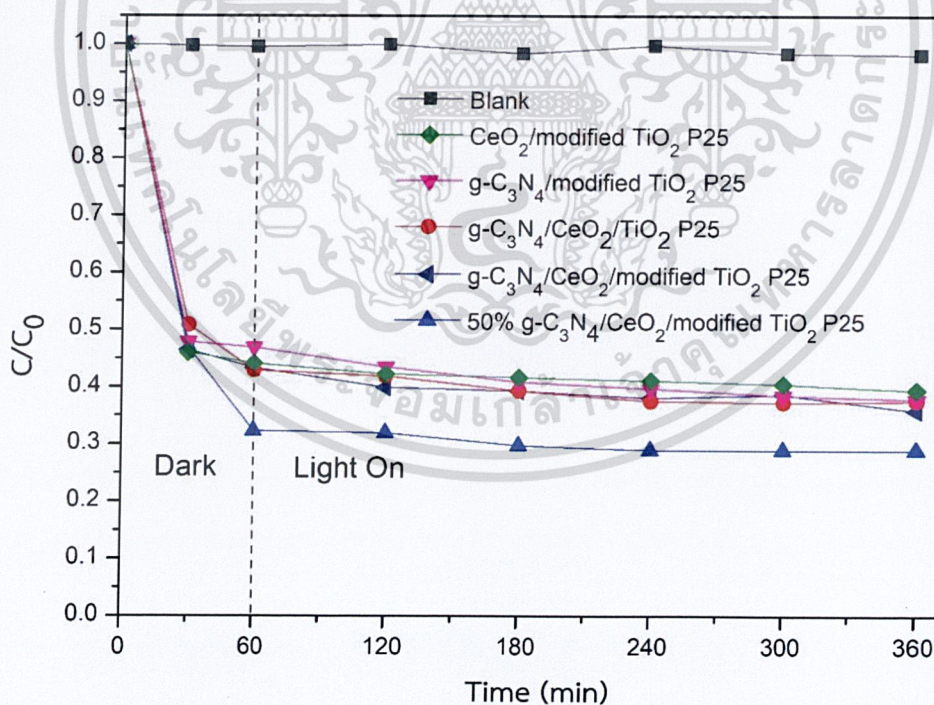


รูปที่ 4.43 กราฟการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของกราฟิติการ์บอนไนโตรต์ภายใต้การฉายแสงวิธีเบิลเป็นเวลา 5 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

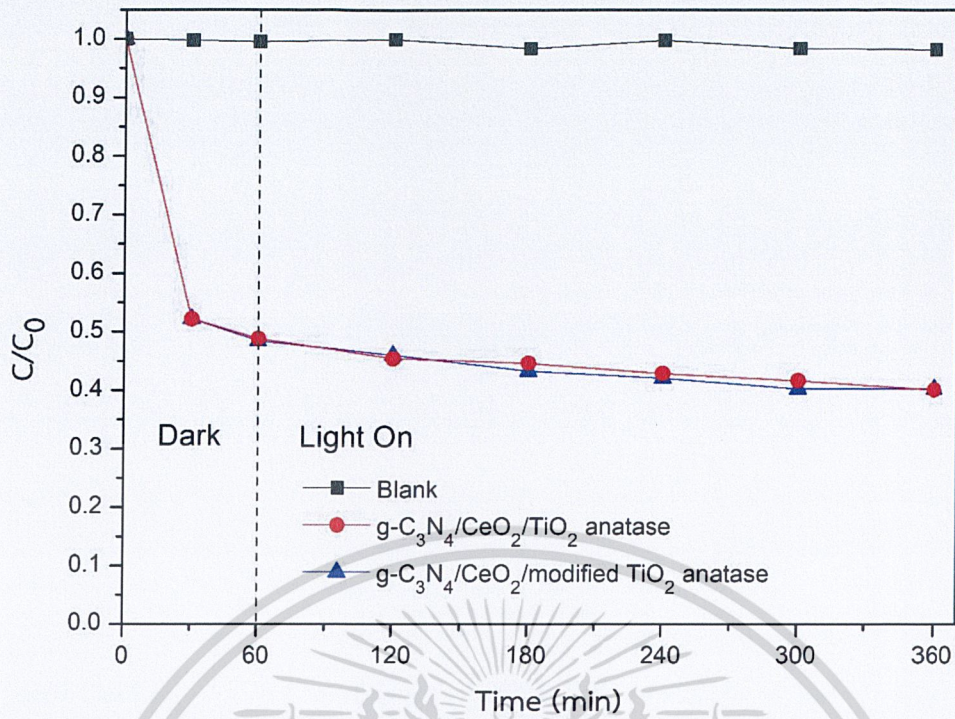


รูปที่ 4.44 กราฟการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และไทเทเนียมไดออกไซด์อนาเทสก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นผิวภายใต้การฉายแสงวิสิเบิลเป็นเวลา 5 ชั่วโมง



รูปที่ 4.45 กราฟการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิลเป็นเวลา 5 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.46 กราฟการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์วัฏภาคอนาเทสภายใต้การฉายแสงวิสิเบิลเป็นเวลา 5 ชั่วโมง

จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงทั้งหมดที่เตรียมขึ้นสามารถดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูได้ โดยค่าร้อยละในการดูดซับมีค่าสอดคล้องกับปริมาณพื้นที่ผิวที่ศึกษาได้จากเทคนิค BET อย่างไรก็ตามเมื่อทำการฉายแสงวิสิเบิล พบว่าความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลูไม่มีการเปลี่ยนแปลง แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งหมดไม่ตอบสนองต่อแสงวิสิเบิล อาจเป็นผลจากการที่สีย้อมเมทิลีนถูกดูดซับที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจนทำให้บดบังแสงที่ฉายลงมา จึงทำให้แสงวิสิเบิลซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่มีค่าพลังงานต่ำมีพลังงานไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาเชิงแสง ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงจึงไม่ตอบสนองภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

จากการศึกษาการปรับปรุงพื้นที่ผิวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 เทียบกับอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์วิภูภาคอนาเทส และผลของการเติมซีเรียมออกไซด์ (CeO_2) และแลสกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ ($\text{g-C}_3\text{N}_4$) ลงในไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีผลต่อสมบัติการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง การปรับปรุงพื้นที่ผิวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และไทเทเนียมไดออกไซด์วิภูภาคอนาเทสด้วยวิธีโซโนเคมี เมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) แสดงให้เห็นว่าไทเทเนียมไดออกไซด์หลังการปรับปรุงพื้นที่ผิวยังคงมีวิภูภาคแบบอนาเทส (JCPDS เลขที่ 21-1272) และวิภูภาคแบบรูไทล์ (JCPDS เลขที่ 21-1276) ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล และจากผลการศึกษาพื้นที่ผิวด้วยวิธีของ BET ของไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และไทเทเนียมไดออกไซด์วิภูภาคอนาเทส แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงพื้นที่ผิวด้วยวิธีโซโนเคมีช่วยเพิ่มปริมาณพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนให้มีความมากขึ้น และเมื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลด้วยการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR) พบว่าหลังการปรับปรุงพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และไทเทเนียมไดออกไซด์วิภูภาคอนาเทส พบช่วงการดูดกลืนแสงที่แสดงถึงเอกลักษณ์การสั่นของพันธะ Ti-O-Ti จากนั้นนำไปวิเคราะห์สมบัติทางแสงพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และไทเทเนียมไดออกไซด์วิภูภาคอนาเทสที่ผ่านการปรับปรุงพื้นที่ผิวมีค่าพลังงานช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (E_g) ลดลงจาก 3.14 eV เป็น 3.08 eV และ 3.19 eV เป็น 3.13 eV ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลของฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรมิเตอร์ (fluorescence spectrometer) คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และไทเทเนียมไดออกไซด์วิภูภาคอนาเทสที่ผ่านการปรับปรุงพื้นที่ผิวมีค่าการคายพลังงานลดลง จากผลการศึกษาประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และอนาเทสเมื่อผ่านการปรับปรุงพื้นที่ผิวสามารถสลายสีย้อมโดยมีค่าความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูลดลงและจากผลการศึกษาประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงวิสิเบิลพบว่าไม่มีการตอบสนองต่อแสงวิสิเบิล โดยความเข้มข้นสีย้อมเมทิลีนบลูไม่มีการลดลง

การศึกษากการปรับปรุงสมบัติตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์โดยการเติมซีเรียมออกไซด์ร้อยละ 1 และแลสกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ร้อยละ 20 ได้เป็นวัสดุผสม $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{TiO}_2$ P25, $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ P25, $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{modified TiO}_2$ P25, $\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ P25, $50\%\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ P25, $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{TiO}_2$ anatase และ $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ anatase ซึ่ง 5 ตัวอย่างจัดเป็นกลุ่มวัสดุผสมของไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และอีก 2 ตัวอย่างจัดเป็นกลุ่มวัสดุผสมของไทเทเนียมออกไซด์ออกไซด์วิภูภาคอนาเทส เมื่อทำการศึกษาสัญญาณวิทยาด้วยเทคนิค SEM พบว่าอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์จะไปเกาะอยู่บนกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ จากนั้นนำไปตรวจสอบธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค EDS พบว่าธาตุที่เติมลงไปกระจายตัวอยู่ในวิภูภาคหลัก คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์เพราะพบปริมาณธาตุของไทเทเนียมไดออกไซด์มากที่สุดซึ่ง

สอดคล้องกับผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ของวัสดุผสมของอนุภาคไทเทเนียมออกไซด์ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยการเติมซีเรียมออกไซด์ และกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ของตัวอย่าง $\gamma\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2\text{P25}$ และ $\gamma\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2\text{ anatase}$ พบว่าอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์กระจายตัวอยู่บนกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ โดยจากภาพถ่าย TEM ไม่สามารถระบุถึงรูปร่างและการกระจายตัวของซีเรียมออกไซด์ได้อย่างชัดเจน เนื่องจากซีเรียมออกไซด์มีขนาดอนุภาคที่เล็กและยังมีการเติมซีเรียมออกไซด์ลงไปปริมาณที่น้อยจึงไม่สามารถสังเกตเห็นได้ และได้ทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วย XRD พบว่าวัสดุทั้ง 7 ตัว มีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เช่นเดียวกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของวัฏภาคหลัก คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และเพื่อยืนยันผลจึงนำไปวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลด้วยเทคนิค FT-IR พบว่ามีช่วงการสั่นแบบยืดหดที่เป็นเอกลักษณ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ $687 - 487\text{ cm}^{-1}$ ของพันธะ Ti-O-Ti และพบช่วงที่ 3180 cm^{-1} ของพันธะ N-H และ $1650 - 1250\text{ cm}^{-1}$ ของ C-N และ C=N ซึ่งเป็นช่วงการสั่นแบบยืดหดและบิดงอของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ จากนั้นนำวัสดุผสมไปศึกษาสมบัติเชิงแสงพบว่าวัสดุผสมกลุ่ม P25 และกลุ่มอนาเทสมีค่าพลังงานช่องว่างระหว่างแถบพลังงานลดลงเมื่อมีการเติม $\gamma\text{-C}_3\text{N}_4$ และ CeO_2 โดย $\gamma\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{TiO}_2\text{P25}$, $\gamma\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2\text{P25}$, $\gamma\text{-C}_3\text{N}_4/\text{modified TiO}_2\text{P25}$, $\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2\text{P25}$ มีค่า 3.05, 2.97, 2.94 และ 2.92 eV ตามลำดับ ส่วน $50\%\gamma\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2\text{P25}$ ซึ่งมีค่าพลังงานช่องว่างระหว่างแถบพลังงานลดลงมากที่สุดโดยมีค่า 2.72 eV เนื่องจากกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์นั้นมีค่าพลังงานช่องว่างระหว่างแถบพลังงานอยู่ที่ 2.74 eV และผลจากอัตราส่วนผสมซึ่งมีปริมาณของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ถึงร้อยละ 50 ของน้ำหนักสารทั้งหมด และวัสดุผสมกลุ่มวัฏภาคอนาเทสมีค่า $\gamma\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{TiO}_2\text{ anatase}$ และ $\gamma\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2\text{ anatase}$ มีค่า 3.08 และ 3.06 eV ตามลำดับ ซึ่งผลของฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรมิเตอร์ พบว่าวัสดุผสมที่เติมกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ทุกตัวจะพบช่วงการคายพลังงานซึ่งตรงกับผลฟลูออเรสเซนซ์ของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่เป็นวัสดุเดี่ยว ดังนั้นวัสดุผสม $50\%\gamma\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2\text{P25}$ จึงมีค่าการคายพลังงานมากที่สุด ซึ่งวัสดุผสมตัวอื่นก็จะมีค่าการคายพลังงานลดลงมา จากผลการศึกษาประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่ม P25 และวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มอนาเทสมีค่าร้อยละการดูดซับและร้อยละการฉายแสงเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านการปรับปรุงผิวด้วยวิธีโซโนเคมีร่วมกับการเติม $\gamma\text{-C}_3\text{N}_4$ และ CeO_2 โดย $\gamma\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2\text{P25}$ มีค่าร้อยละประสิทธิภาพรวมมากที่สุด คือ 49.59 และมีค่าอัตราการสลายสีย้อม (k_{app}) สูงที่สุดที่ 0.0019 ซึ่งผลที่ได้เกิดจากพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้น ค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (E_g) และการกลับมารวมกันของอิเล็กตรอนและโฮลที่ลดลงและจากผลการศึกษาประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงวิสิเบิลพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่เตรียมได้ทั้งหมดไม่มีการตอบสนองต่อแสงวิสิเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงภายใต้แสงวิสิเบิล โดยการปรับปรุงสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงจากการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของซีเรียมออกไซด์และกราฟิติกคาร์บอนไนโตรดที่เติมลงในไทเทเนียมไดออกไซด์และศึกษาสภาวะในการทดลอง เช่น การปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูและปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา

5.2.2 ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับสารตั้งต้นในการสังเคราะห์กราฟิติกคาร์บอนไนโตรด เช่น การใช้เมลามีนแทนยูเรียเพื่อใช้ในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงภายใต้แสงวิสิเบิล

5.2.3 ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับวิธีการเตรียมวัสดุผสมเพื่อให้สารผสมกระจายตัวและเข้ากันได้ดี เช่น การใช้วิธีโซโนเคมีแทนการปั่นกวาน

5.2.4 ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับสีย้อมโดยเพิ่มการใช้สีย้อมประจุลบ (anion dry) เช่น Indigo carmine เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงภายใต้แสงวิสิเบิล

5.2.5 ควรมีการล้างซีเรียมออกไซด์หลังจากการสังเคราะห์ก่อนนำไปใช้งานเพื่อกำจัดสารไนโตรดที่ตกค้างอยู่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ก้องภพ ยศแพงและคณะ. 2562. การกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส และตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ ร่วมกับคาร์บอน. [Online]. เข้าถึงได้จาก : web.eng.nu.ac.th/eng2012/enmis/doc/project/fullpaper/Auppatum58.pdf
- [2] ดร.ศุภมาส ด่านวิทยากุล. 2556. “ซิงค์ออกไซด์กับการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสีย้อมผ้า.” *ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ*. : 39-50
- [3] Guoping Dong, Yuanhao Zhang, Qiwen Pan, Jianrong Qiu. 2014. “A Fantastic Graphitic Carbon Nitride (g-C₃N₄) Material: Electronic Structure, Photocatalytic and Photoelec-tronic Properties. ” *Journal of Photochemistry and Photobiology :Photochemistry Reviews*. 20 : 33–50.
- [4] Jin Mao, Tianyou Peng, Xiaohu Zhang, Kan Li, Liqun Ye and Ling Zan. 2013. “Effect of Graphitic Carbon Nitride Microstructures on The Activity and Selectivity of Photocatalytic CO₂ Reduction Under Visible Light.” *Catalysis Science & Technology*. 3 : 1253 -1260.
- [5] ดร.อัศคพงศ์ พันธุ์พุกษ์. 2562. บทที่ 2 พาทะอึระในวัสดุกึ่งตัวนำ. [Online]. เข้าถึงได้จาก <https://www.academia.edu.html>.
- [6] Engineering tutorial. 2016. N type and P type semiconductors. [Online]. Available:<https://engineeringtutorial.com/n-type-p-type-semiconductors.html>.
- [7] VISHAY. 2018. UVA and Titanium Oxide Photocatalysis – Another UVA LED Application. [Online]. Available :<https://vishayopto.com/2018/10/02/anotheruva-led-application/>.
- [8] สุจิตรา นาวารัตน์. 2553. “การกำจัดจุลินทรีย์ในน้ำเสียโรงพยาบาลด้วยปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะไลซิส การใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตซี และการเติมคลอรีน.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [9] ปัญญา คมมัน, ปิยาลักษณ์ ปลอดและเสาวนีย์ ประกอบมิตร. 2561. “การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงซีเรียมออกไซด์/ริตซ์แกรฟีนออกไซด์/ไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อใช้ในการเปลี่ยนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเชื้อเพลิง.” ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี ภาควิชาเคมี, คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [10] C. T. Nam.; & et al. 2012. Bulletin of Materials Science. 36. India : India Academy of Science

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [11] หลิงอามาน มัลลิกา โรจน์คงทรัพย์ และโกวิท ปิยะมั่งคลา 2561. “การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดโคโตซาน : สมดุลและการประยุกต์ใช้สำหรับโรงงาน” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ* 28(4) : 825-835
- [12] ผศ.ดร.พิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล และนายรัฐพล เจียวิริยะบุญญา. 2562. มาทำความเข้าใจกับแง่มุมต่างๆของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง. [Online]. เข้าถึงได้จาก :[https:// gep-power.com](https://gep-power.com).
- [13] Recent Advances in Heterogeneous Photocatalytic CO₂ Conversion to Solar Fuels. 2016. [Online]. Available [ชhttps://pubs.acs.org/doi/abs /10.1021/acscatal](https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acscatal).
- [14] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2557. สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor). [Online]. เข้าถึงได้จาก : <https://ienergyguru.com/2015/06.html>.
- [15] Howard University. 2018. Metals and Semiconductors. [Online]. Available : https://chem.libretexts.org/Courses/Howard_University/General_Chemistry.html.
- [16] Burak Ünlü, Soner Çakar Mahmut, Özacar. 2018. “ The Effects of Metal Doped TiO₂and Dithizone-metal Complexes on DSSCs Performance. ” *Solar Energy*. 166 : 441-449.
- [17] Wikipedia. 2561. วัฏภาคแบบอนาเทส (anatase). [Online]. เข้าถึงได้จาก : <https://en.wikipedia.org/wiki/Anatase.html>.
- [18] Ryan Lance. 2018. “Optical Analysis of Titania: Band Gaps of Brookite, Rutile and Anatase.” A Thesis Oresented in The Partial Fulfilment of The Requirements for The Degree of Bachelors of Physics. Department of Physics Oregon State University.
- [19] นราธิป วิทยากร. 2559. เอกสารประกอบการเรียนวิชาวัสดุอิเล็กทรอนิกส์. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [20] Evonik Industries. 2015. “Titanium Dioxide as Photocatalyst.” *Technical Information 1243* : 1-12.
- [21] Deanna C. Hurum, Alexander G. Agrios, and Kimberly A. Gray. 2003. “Explaining the Enhanced Photocatalytic Activity of Degussa P25 Mixed-Phase TiO₂ Using EPR.” *J. Phys. Chem. B*. 107(19) : 4545-4549.
- [22] L.Tsai, W. Yuqi and J. Zhiliang. 2010. “Structural-Dependent Photoactivities of TiO₂ Nanoribbon for Visible-Light-Induced H₂ Evolution:The Roles of Nanocavities and Alternate Structures.” *Langmuir*. (26) : 447-455.

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [23] T. Eakkasit, V. Naratip and S. Panpailin. 2017. “Ultrasonics – Sonochemistry.” *Advanced Materials Research Unit*. 39 : 733-740.
- [24] Nanosafety Database. 2559. ซีเรียมออกไซด์ (CeO₂). [Online]. เข้าถึงได้จาก : http://web.eng.nu.ac.th/eng2012/cei/nanodatabase/info2.php?cat_id=4&p_id.html.
- [25] Hailong Li, Yan Gao, Xianying Wu, Po-Heng Lee, Kaimin Shih. 2017. “Fabrication of Heterostructured g-C₃N₄/Ag-TiO₂ Hybrid Photocatalyst with Enhanced Performance in Photocatalytic Conversion of CO₂ Under Simulated Sunlight Irradiation.” *Applied Surface Science*. 402(2017) : 198–207.
- [26] P.Latha, K.Prakash and S.Karuthapandian. 2017. “Enhanced Visible Light PhotoCatalytic Activity of CeO₂/ Alumina Nanocomposite: Synthesized via Facile Mixing- Calcination Method for Dye Degradation.” *Advanced Powder Technology* : 1-11
- [27] Yanfeng Chen, Weixin Huang, Donglin He, Yue Situ, Hong Huang. 2014. “Construction of Heterostructured g-C₃N₄/Ag/TiO₂ Microspheres with Enhanced Photocatalysis Performance under Visible-Light Irradiation.” *Applied Materials & Interfaces*. 6(2014) : 14405-14414.
- [28] Gregory Chatel, Karine De Oliveira Vigier, and Francois Jerome. 2014. “Sonochemistry: What Potential for Conversion of Lignocellulosic Biomass into Platform Chemicals?.” *CHEMSUSCHEM REVIEWS*. (2014) : 4-5.
- [29] เอกศิษฐ์ ฐาศิริทรัพย์. 2559. “การสังเคราะห์วัสดุผสมซีเรียมออกไซด์-คอปเปอร์ออกไซด์ไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการเปลี่ยนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเชื้อเพลิงด้วยพลังงานแสง.” ปรญญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี ภาควิชาเคมี, คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [30] ฉัตร ผลนาค. 2559. “การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ด้วยวิธีโซโนเคมี.” *วารสารฟิสิกส์ไทย*. 33 : 16-19.
- [31] วิศิษฎ์พงษ์ ยอดศรี. 2557. “การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทรานสมิSSION.” *Materials Characterization ศูนย์เทคโนโลยีโลหะแห่งชาติ* : 67-72
- [32] Microscopes. 2558. Transmission Electron Microscope (TEM) . [Online]. Available : <http://www.microscopes.in.th/422.html>.
- [33] Nanotechnology. 2015. Electron Microscope. [Online]. Available : <https://il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [34] Industrial Section. X-Ray Diffractometer (XRD) เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <https://www.slri.or.th/bdd/th/22-บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์/71-x-ray-diffractometer-xrd.html>.
- [35] Particle Analytical. X-Ray Diffraction – XRD. [Online]. Available : <http://particle.dk/methods-analytical-laboratory/xrd-analysis.html>.
- [36] Rigaku. 2019. X-ray diffraction. [Online]. Available : <https://www.rigaku.com/en/techniques/xrd>.
- [37] Sarawoot's Webpage. 2562. เทคนิคปฏิบัติการใช้เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ในการวิเคราะห์ทางเคมี. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.mwit.ac.th/sarawoot/chem40235.htm>.
- [38] Industrial Sectio. 2019. UV-Vis Spectrophotometer เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์. [Online]. Available : <https://www.slri.or.th/bdd/th/22-บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์/68-uv-vis-spectrophotometer.html>.
- [39] วรจกานา อนุชิตโอฬาร. 2546. “FTIR-Imaging” *Materials Characterization* ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. : 67-70
- [40] ดร.กาญจนา ธรรมนุ. 2562. เทคนิค FTIR Spectrometer และ Microscope ในงานวิเคราะห์และวิจัย. [Online]. Available : http://www.tpa.or.Th/publisher/pdfFileDownloadS/TN212A_p95-96.pdf.
- [41] MTEC 2562 เทคนิคการวิเคราะห์ลักษณะของวัสดุ. [Online]. Available : https://old.mtec.or.th/mcu/phcl/files/presentation/Technique_for_PC.pdf
- [42] Products. 2004. BET surface area analyzer. [Online]. Available : <http://www.cjwgb.com/Products.php>.
- [43] ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (NANOTEC). 2562. Fluorescence Spectroscopy. [Online]. Available : https://www2.nanotec.or.th/th/?page_id=565.html.
- [44] รศ. ชูชาติ อารีจิตรานุสรณ์. 2562. บทที่ 13 : เครื่องวัดแสงฟลูออเรสเซนซ์ (fluorometer). [Online]. Available: <https://home.kku.ac.th /chuare /1 2/ fluorometer.pdf>
- [45] ฉงซิ่ง Pulab Technology Co., Ltd. 2562. เครื่องวัดค่าฟลูออเรสเซนซ์. [Online]. Available:<http://th.cqplab.com/spectrophotometer/fluorescencepectropho-to-meter/960-fluorescence-spectrophotometer.html>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [46] สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2562. **Scanning Electron Microscope (SEM)**. [Online]. Available : <https://www.slri.or.th/bdd/th/22-บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์/73-scanning-electron-microscope-sem.html>.
- [47] พัชรา พสุพงศ์. 2560. “การสังเคราะห์วัสดุผสมขนาดนาโนของซีเรียมออกไซด์-โคบอลต์เฟอร์ไรต์เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในการสลายสีย้อม.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตร สาขา วิชาเคมี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [48] Babitha et al. 2015. “Strucural Characterization and Optical studies of CeO₂ nanoparticles Synthesization by Chemical Precipitation.” *Indian Journal of Pure & Applied Physics*. (53) : 596-603
- [49] David Oluwatobi Adekoya et al. 2017. “g-C₃N₄/(Cu/TiO₂) nanocomposite for enhanced Photoreduction of CO₂ to CH₃OH and HCOOH under UV/ visible light.” *Journal of CO₂ Utilization* .(18) : 261-274
- [50] EVONIK Industries. **AEROXIDE, AERODISP and AEROPERL Titanium Dioxide as Photocatalyst**. Technical Information 1243
- [51] Animesh Kumar Ojha et al. 2016. “Correction: One step in situ synthesis of CeO₂ nanoparticles grown on reduced graphene oxide as an excellent fluorescent and photocatalyst material under sunlight irradiation.” *Physical Chemistry Chemical Physics*. (18) : 13126-13127
- [52] Sumalin Phokha et al 2012. Synthesis, Characterization, and Magnetic Properties of Monodisperse CeO₂ Nanospheres Prepared by PVP-assisted Hydrothermal Method. [Online]. Available:<https://nanoscalereslett.springeropen.com/articles/10.1186/1556-276X-7-425#Bib1>
- [53] พิชญ์สินี ดีมากและคณะ. 2560. “การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์และสมบัติการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของแอนติโมนีทังสเตทโดยวิธีโซลโวลเทอร์มอล.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตร สาขาวิชาเคมี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การคำนวณสารที่ใช้ในการสังเคราะห์

1. การคำนวณตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง

การคำนวณน้ำหนักของซีเรียมออกไซด์และกราฟิติการ์บอนไนไตรด์ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา-เชิงแสงซีเรียมออกไซด์/ไทเทเนียมไดออกไซด์, กราฟิติการ์บอนไนไตรด์/ไทเทเนียมไดออกไซด์, กราฟิติการ์บอนไนไตรด์/ซีเรียมออกไซด์/ไทเทเนียมไดออกไซด์และ50%กราฟิติการ์บอนไนไตรด์/ซีเรียมออกไซด์/ไทเทเนียมไดออกไซด์

1.1 การเตรียม 1%CeO₂/TiO₂

อัตราส่วนในการเตรียมคือ TiO₂ : CeO₂ เท่ากับ 99 : 1

ถ้าเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงปริมาณ 2 g

ใช้ปริมาณ CeO₂ เป็น $\frac{1 \times 2}{100} = 0.02$ g

ใช้ปริมาณ TiO₂ เป็น 2 - 0.02 = 1.98 g

ดังนั้นจำนวนสารที่ต้องใช้คือ TiO₂ 1.98 g เติมด้วย CeO₂ 0.02 g

1.2 การเตรียม 20%g-C₃N₄ /TiO₂

อัตราส่วนในการเตรียมคือ TiO₂ : g-C₃N₄ เท่ากับ 80 : 20

ถ้าเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงปริมาณ 2 g

ใช้ปริมาณ g-C₃N₄ เป็น $\frac{20 \times 2}{100} = 0.40$ g

ใช้ปริมาณ TiO₂ เป็น 2 - 0.40 = 1.60 g

ดังนั้นจำนวนสารที่ต้องใช้คือ TiO₂ 1.60 g เติมด้วย g-C₃N₄ 0.40 g

1.3 การเตรียม 20%g-C₃N₄/CeO₂/TiO₂

อัตราส่วนในการเตรียมคือ TiO₂ : g-C₃N₄ : CeO₂ เท่ากับ 80 : 20 : 1

ถ้าเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงปริมาณ 2 g

ใช้ปริมาณ g-C₃N₄ เป็น $\frac{20 \times 2}{100} = 0.40$ g

ใช้ปริมาณ CeO₂ เป็น $\frac{1 \times 2}{100} = 0.02$ g

ใช้ปริมาณ TiO₂ เป็น 2 - 0.42 = 1.58 g

ดังนั้นจำนวนสารที่ต้องใช้คือ TiO₂ 1.58 g เติมด้วย g-C₃N₄ 0.40 และ CeO₂ 0.02 g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 การเตรียม 50%g-C₃N₄/CeO₂/TiO₂

อัตราส่วนในการเตรียมคือ TiO₂ : g-C₃N₄ : CeO₂ เท่ากับ 49 : 50 : 1

ถ้าเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงปริมาณ 2 g

$$\text{ใช้ปริมาณ g-C}_3\text{N}_4 \text{ เป็น } \frac{50 \times 2}{100} = 1.00 \text{ g}$$

$$\text{ใช้ปริมาณ CeO}_2 \text{ เป็น } \frac{1 \times 2}{100} = 0.02 \text{ g}$$

$$\text{ใช้ปริมาณ TiO}_2 \text{ เป็น } 2 - 1.02 = 0.98 \text{ g}$$

ดังนั้นจำนวนสารที่ต้องใช้คือ TiO₂ 0.98 g เติมด้วย g-C₃N₄ 0.40 และ CeO₂ 0.02 g



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การคำนวณหาขนาดผลึก

การคำนวณหาขนาดผลึก (crystallize size) ของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ก่อนการปรับปรุงพื้นผิว ทำได้โดยการใช้สูตรในการคำนวณจากสมการของเชอร์เรอร์ (Scherrer's equation) ดังแสดงในสูตรต่อไปนี้

$$\text{สูตร} \quad D = \frac{k\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (\text{ข-1})$$

โดยที่ D คือ ขนาดอนุภาค

k คือ ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 0.94

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ (CuK α) มีค่าเท่ากับ 0.1540 นาโนเมตร

β คือ ค่าความกว้างที่ความสูงกึ่งหนึ่งของพีค (Full width at half maximum; FWHM) ของพีคในมุมเรเดียนที่ 2θ

θ คือ มุมของการเลี้ยวเบน (เรเดียน)

ตัวอย่างการคำนวณหาขนาดผลึกของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ก่อนการปรับปรุงพื้นผิว จากรูปที่ 4.6 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ก่อนการปรับปรุงพื้นผิวเทียบกับรูปแบบการเลี้ยวเบนตามข้อมูลมาตรฐานของคาร์บอนไนไตรด์ (C₃N₄, JCPDS เลขที่ 087-1526)

$$\text{โดยที่} \quad 2\theta = 27.3197^\circ$$

$$\text{จะได้} \quad \theta = 13.66^\circ$$

จากผลการวิเคราะห์เทียบกับข้อมูลมาตรฐาน JCPDS เลขที่ 087-1526 วิเคราะห์ได้ค่าความกว้างที่ความสูงกึ่งหนึ่งของพีค (FWHM) ของแต่ละพีค โดยที่ $2\theta = 27.3197^\circ$ มีค่าความกว้างที่ความสูงกึ่งหนึ่งของพีคเท่ากับ 1.7691°

จาก 180° เท่ากับ π rad

$$\text{ถ้า } 1.7691^\circ \text{ จะเท่ากับ} \quad \frac{\pi \text{ (rad)} \times 1.7691^\circ}{180^\circ} = 0.03086 \text{ rad}$$

$$\text{จากสูตร} \quad D = \frac{k\lambda}{\beta \cos\theta}$$

$$D = \frac{0.94 \text{ cm} \times 0.15405}{0.03086 \text{ (rad)} \times \cos(\text{rad}(13.66))}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ: **0.03086 (rad) x cos(rad(13.66))** ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D = 4.83 \text{ nm}$$

ที่ $2\theta = 27.3197^\circ$ สามารถคำนวณขนาดผลึกได้เท่ากับ 4.83 nm

ตารางที่ ฉ-1 ขนาดผลึกของงกราฟิติคาร์บอนไนไตรด์

Peak	2θ	FWHM	β	$\beta \cos\theta$	L (nm)
9	27.32	1.7691	0.031	0.030	4.83
ขนาดผลึกเฉลี่ย					4.83



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การคำนวณธาตุองค์ประกอบตามทฤษฎี

$$\text{ร้อยละธาตุองค์ประกอบ} = \frac{\text{มวลโมเลกุลของธาตุองค์ประกอบ}}{\text{มวลโมเลกุลของสารประกอบ}} \times \text{ร้อยละของน้ำหนักสารประกอบ}$$

เลขมวลของธาตุองค์ประกอบ

ไทเทเนียม (Ti) มีเลขมวลเท่ากับ 47.87 g/mol ออกซิเจน (O) มีเลขมวลเท่ากับ 16 g/mol

ซีเรียม (Ce) มีเลขมวลเท่ากับ 140.12 g/mol คาร์บอน (C) มีเลขมวลเท่ากับ 12 g/mol

และไนโตรเจนมีเลขมวลเท่ากับ 14 g/mol

หาธาตุองค์ประกอบโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง $g\text{-C}_3\text{N}_4$

คำนวณร้อยละธาตุคาร์บอน

แทนค่า ; $\frac{36}{92} \times 100 = 39.13 \%$

คำนวณร้อยละธาตุไนโตรเจน

แทนค่า ; $\frac{56}{92} \times 100 = 60.87 \%$

หาธาตุองค์ประกอบโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง 20% $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{TiO}_2$

แยกคิด TiO_2 ร้อยละ 79 โดยน้ำหนัก

คำนวณร้อยละธาตุไทเทเนียม

แทนค่า ; $\frac{47.87}{79.87} \times 79 = 47.35 \%$

คำนวณร้อยละธาตุออกซิเจน

แทนค่า ; $\frac{32}{79.87} \times 79 = 31.65 \%$

แยกคิด $g\text{-C}_3\text{N}_4$ ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

คำนวณร้อยละธาตุคาร์บอน

แทนค่า ; $\frac{36}{92} \times 20 = 7.83 \%$

คำนวณร้อยละธาตุไนโตรเจน

แทนค่า ; $\frac{56}{92} \times 20 = 12.17 \%$

แยกคิด CeO_2 ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

คำนวณร้อยละธาตุซีเรียม

แทนค่า ; $\frac{140.12}{172.11} \times 1 = 0.81 \%$

คำนวณร้อยละธาตุออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{แทนค่า ; } \frac{32}{172.11} \times 1 = 0.19\%$$

หาธาตุองค์ประกอบโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง 50%g-C₃N₄/CeO₂/TiO₂

แยกคิด TiO₂ ร้อยละ 49 โดยน้ำหนัก

คำนวณร้อยละธาตุไทเทเนียม

$$\text{แทนค่า ; } \frac{47.87}{79.87} \times 49 = 29.37\%$$

คำนวณร้อยละธาตุออกซิเจน

$$\text{แทนค่า ; } \frac{32}{79.87} \times 49 = 19.63\%$$

แยกคิด g-C₃N₄ ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

คำนวณร้อยละธาตุคาร์บอน

$$\text{แทนค่า ; } \frac{36}{92} \times 50 = 19.57\%$$

คำนวณร้อยละธาตุไนโตรเจน

$$\text{แทนค่า ; } \frac{56}{92} \times 50 = 30.43\%$$

แยกคิด CeO₂ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

คำนวณร้อยละธาตุซีเรียม

$$\text{แทนค่า ; } \frac{140.12}{172.11} \times 1 = 0.81\%$$

คำนวณร้อยละธาตุออกซิเจน

$$\text{แทนค่า ; } \frac{32}{172.11} \times 1 = 0.19\%$$

ดังนั้น g-C₃N₄, 20%g-C₃N₄/CeO₂/TiO₂ และ 50%g-C₃N₄/CeO₂/TiO₂ ประกอบด้วยธาตุองค์ประกอบดังแสดงในตารางที่ ค-1

ตารางที่ ค-1 แสดงปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักตามทฤษฎีของธาตุองค์ประกอบในตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่เติมสารเติม

ตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง (wt%)	ธาตุองค์ประกอบ (wt%)				
	Ti	O	C	N	Ce
g-C ₃ N ₄	-	-	39.13	60.87	-
20%g-C ₃ N ₄ /CeO ₂ /TiO ₂	47.35	31.84	7.83	12.17	0.81
50%g-C ₃ N ₄ /CeO ₂ /TiO ₂	29.37	19.82	19.57	30.43	0.81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

การคำนวณหาค่าพลังงานช่องว่างระหว่างชั้นพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง

$$\text{จากสูตร} \quad \alpha h\nu = B(h\nu - E_g)^n \quad (\text{ง-1})$$

$$\alpha = (2.303)A / L \quad (\text{ง-2})$$

$$\nu = c/\lambda \quad (\text{ง-3})$$

α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (6.626×10^{-34} J . s)

ν คือ ความถี่ของโฟตอนที่ตกกระทบ (s^{-1})

B คือ ค่าคงที่

E_g คือ ค่าพลังงานช่องว่างระหว่างพลังงาน (eV)

n คือ ค่าคงที่ (1/2 เป็นการยอมให้แสงผ่านได้โดยตรง หรือ 2 เป็นการยอมให้แสงผ่านโดยอ้อม หรือ 3/2 ไม่สามารถดูดกลืนแสงได้)

A คือ ค่าดูดกลืนแสง

L คือ ความกว้างของเซลล์ (cm) ซึ่งโดยทั่วไปมีค่า 1 cm

c คือ ความเร็วแสง (2.98×10^8 m/s)

λ คือ ความยาวคลื่น (nm)

ค่าพลังงานช่องว่างระหว่างชั้นพลังงาน (E_g) ได้จากการพล็อตกราฟระหว่าง Energy gap (แกน x) ที่คำนวณจาก $h\nu$ กับ $(\alpha h\nu)^2$ ยกตัวอย่างการคำนวณจากตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงไทเทเนียมได-ออกไซด์ P25 ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ซึ่งมีค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 374 นาโนเมตร และมีค่าการดูดกลืนแสง (A) 1.0850

หาค่า α โดยแทนค่าในสมการ (ง-2)

$$\alpha = \frac{2.303 \times 1.0850}{1}$$

$$\alpha = 2.4988$$

หาค่า ν โดยแทนค่าในสมการ (ง-3)

$$\nu = \frac{2.98 \times 10^8}{374 \times 10^{-9}}$$

$$\nu = 7.9679 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาค่า $h\nu$ โดยการแทนค่า

$$h\nu = (6.626 \times 10^{-34}) \times (7.9679 \times 10^{14}) \text{ J}$$

$$h\nu = 5.2795 \times 10^{-19} \text{ J}$$

เปลี่ยนหน่วยเป็น eV

$$h\nu = \frac{5.2795 \times 10^{-19}}{1.61 \times 10^{-19}}$$

$$h\nu = 3.2792 \text{ eV}$$

หาค่า $\alpha h\nu$ โดยการแทนค่า

$$\alpha h\nu = 2.4988 \times \left[\frac{(6.626 \times 10^{-34}) \times (7.9679 \times 10^{14})}{1.61 \times 10^{-19}} \right]$$

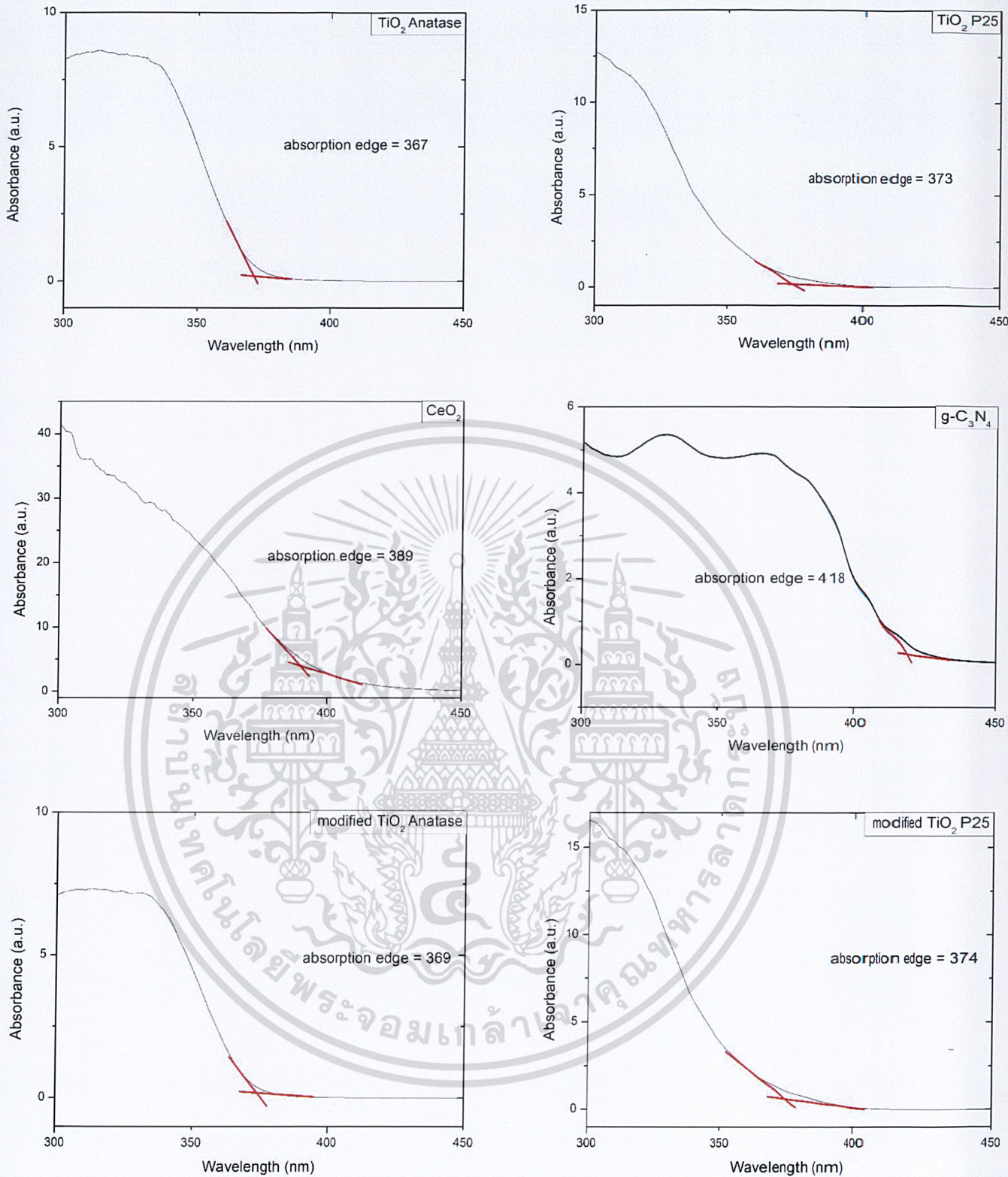
$$\alpha h\nu = 8.1940 \text{ eV/cm}$$

หาค่า $(\alpha h\nu)^{1/2}$ จะได้

$$(\alpha h\nu)^{1/2} = 2.8625 \text{ (eV/cm)}^{1/2}$$

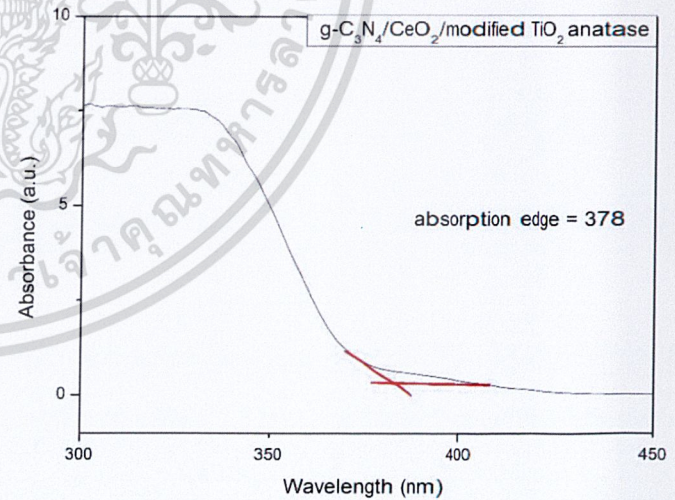
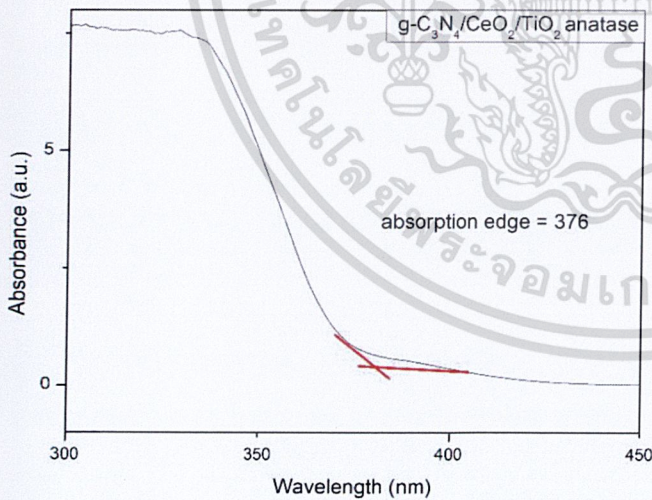
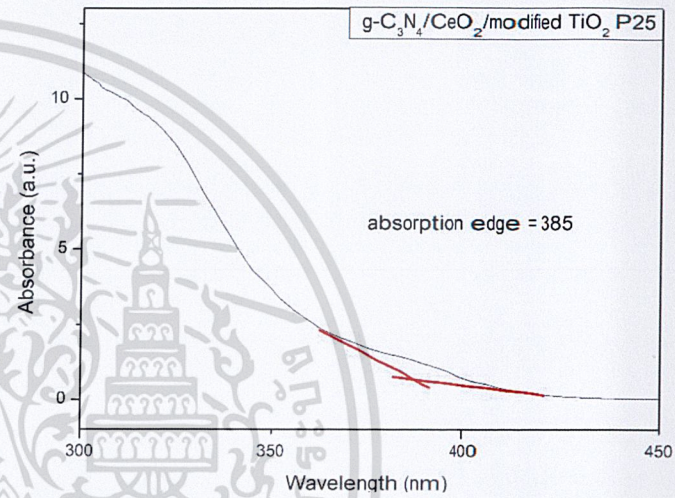
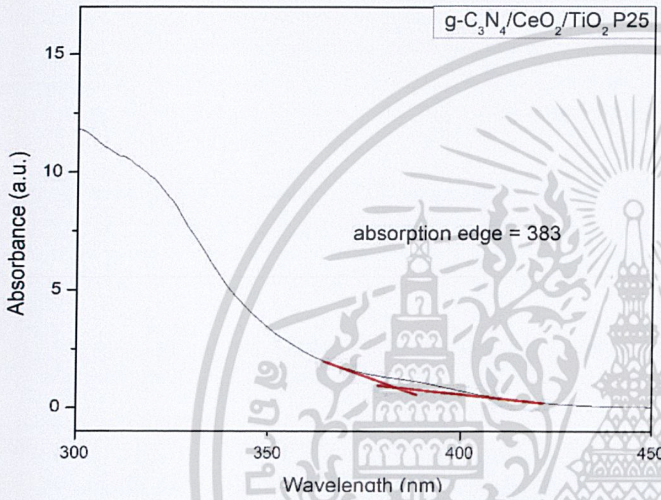
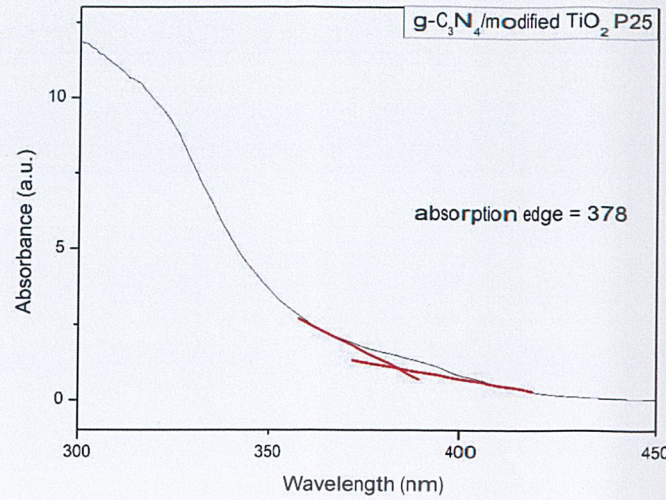
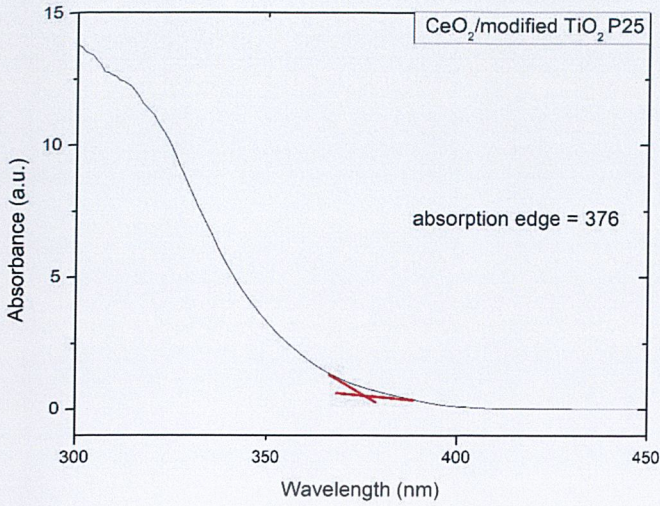


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



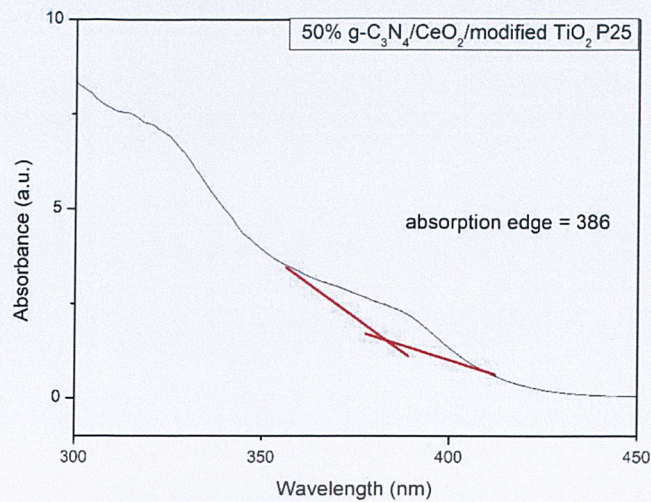
รูปที่ ง-1 กราฟแสดงค่าเริ่มต้นการดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง TiO_2 anatase, TiO_2 P25, CeO_2 , $\text{g-C}_3\text{N}_4$, modified TiO_2 anatase, modified TiO_2 P25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง-2 กราฟแสดงค่าเริ่มต้นการดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง CeO₂/modified TiO₂ P25, g-C₃N₄/modified TiO₂ P25, g-C₃N₄/CeO₂/TiO₂ P25, g-C₃N₄/CeO₂/modified TiO₂ P25, g-C₃N₄/CeO₂/TiO₂ anatase, g-C₃N₄/CeO₂/modified TiO₂ anatase

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง-3 กราฟแสดงค่าเริ่มต้นการดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง 50%g-C₃N₄ /CeO₂ / modifiedTiO₂ P25



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

การคำนวณปริมาณสารที่ใช้ในการเตรียมสารมาตรฐาน

การคำนวณการเตรียมสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลู จากสารละลายเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเตรียมสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 0.1, 0.5, 1, 2, 3 และ 4 มิลลิกรัมต่อลิตรในขวดปรับปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร

ตัวอย่างการเตรียมสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากสูตร

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

แทนค่า

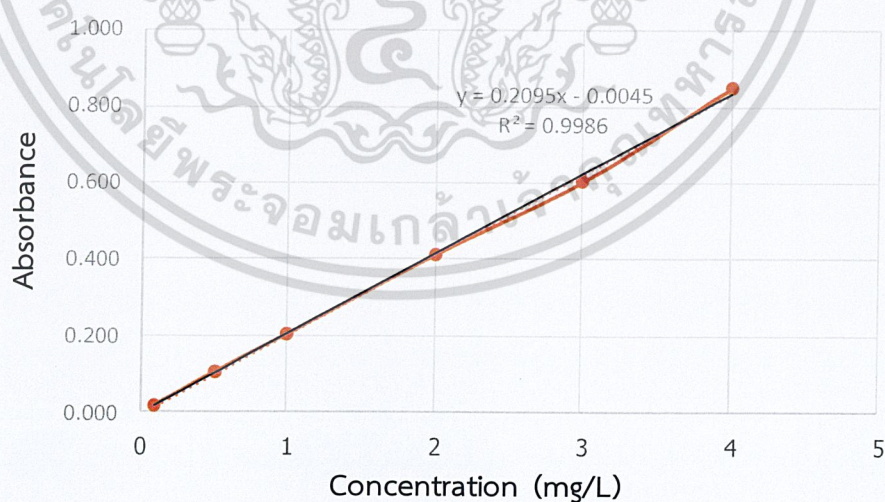
$$20 \text{ (mg/L)} \times V_1 = 2 \text{ (mg/L)} \times 25 \text{ (ml)}$$

จะได้

$$V_1 = 2.500 \text{ ml}$$

ดังนั้น ต้องปิเปตสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร มา ปริมาตร 2.500 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรให้เป็น 25 มิลลิลิตร ในขวดปรับปริมาตร ตารางที่ จ-1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของเมทิลีนบลูที่ใช้ในการสร้างกราฟมาตรฐาน

ความเข้มข้น (mg/L)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0.1	0.020	0.018	0.018	0.019
0.5	0.102	0.104	0.107	0.104
1	0.212	0.203	0.201	0.205
2	0.419	0.411	0.407	0.412
3	0.600	0.610	0.600	0.603
4	0.854	0.845	0.848	0.849



รูปที่ จ-1 กราฟมาตรฐานสารละลายเมทิลีนบลู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ

การคำนวณประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

สูตรการคำนวณประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู

$$\text{ประสิทธิภาพในการสลายสีย้อม} = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100$$

โดยที่ C_0 คือ ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น (mg/L)

C_1 คือ ความเข้มข้นของสีย้อมหลังทำปฏิกิริยา (mg/L)

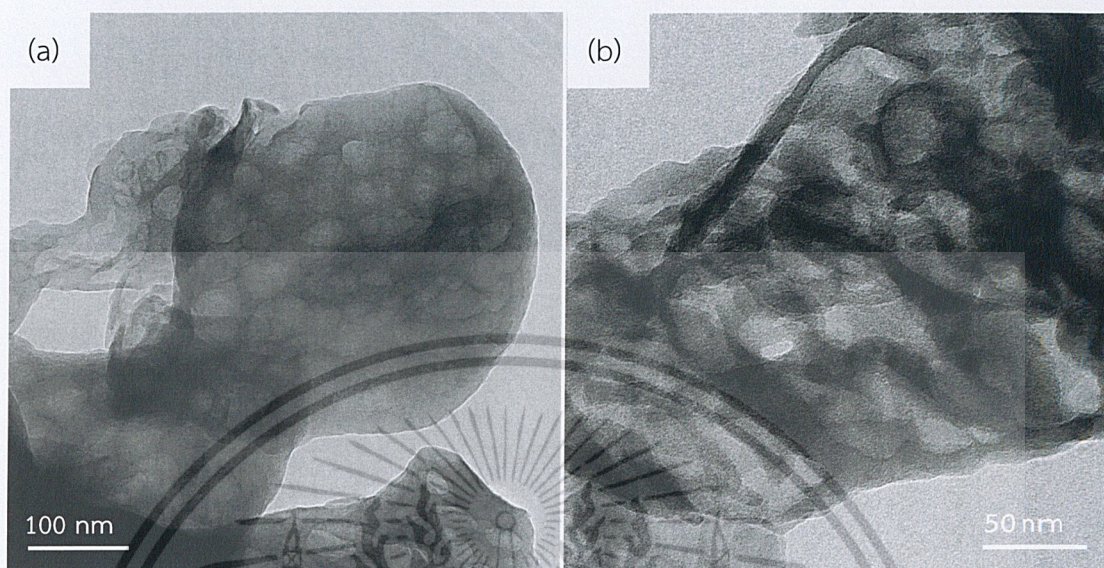
ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงวัสดุผสม $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ P25

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า ; ประสิทธิภาพในการสลายสีย้อม} &= \frac{20 - 10.08}{20} \times 100 \\ &= 49.59 \% \end{aligned}$$

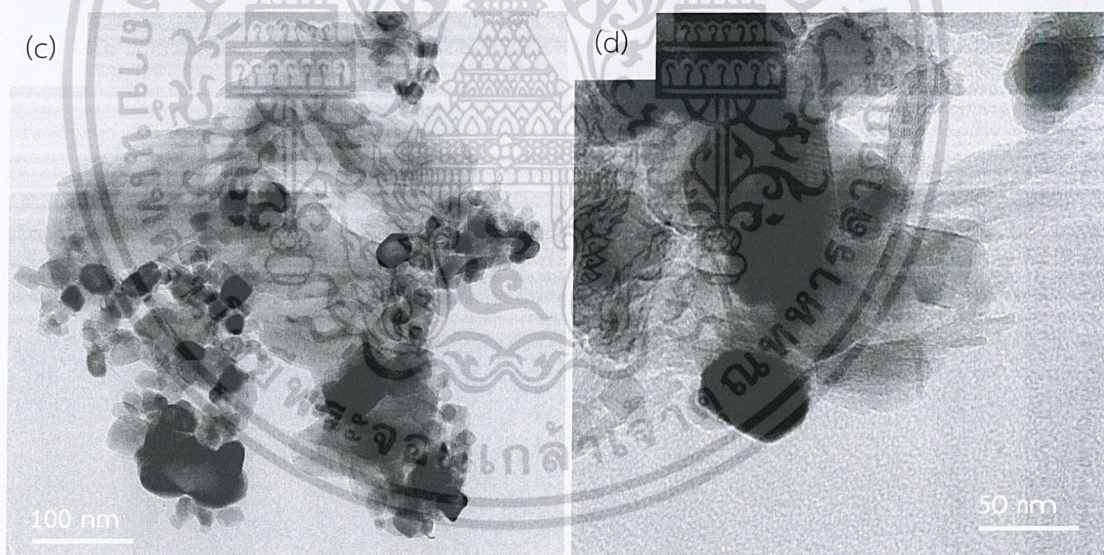
ดังนั้น ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงวัสดุผสม $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ P25 มีประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูร้อยละ 49.59

ภาคผนวก ข

รูปภาพจากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)

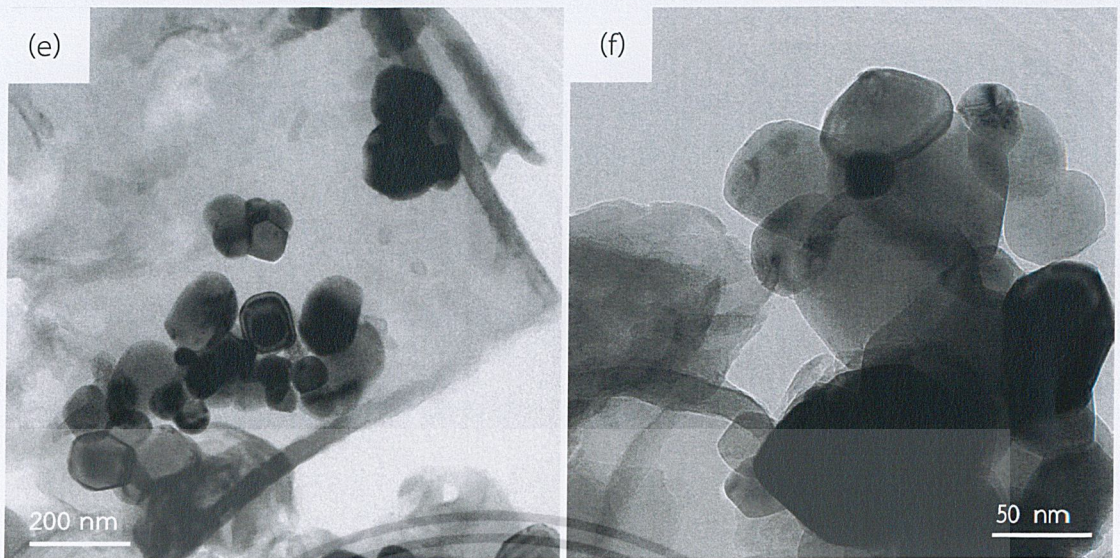


รูปที่ ข-1 (a) และ (b) ภาพถ่าย TEM ของอนุภาคกราฟิติการ์บอนไนไตรด์



รูปที่ ข-2 (c) และ (d) ภาพถ่าย TEM ของวัสดุผสมของอนุภาคไทเทเนียมออกไซด์ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยการเติมซีเรียออกไซด์และกราฟิติการ์บอนไนไตรด์ของตัวอย่าง $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2 \text{ P25}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-3 (e) และ (f) ภาพถ่าย TEM ของวัสดุผสมของอนุภาคไทเทเนียมออกไซด์ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยการเติมซีเรียมออกไซด์และกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ของ $\gamma\text{-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2/\text{modified TiO}_2$ anatase

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้