


การเตรียมและการพิสูจน์เอกลักษณ์ของกราฟาไฟติกคาร์บอน
ไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุน
โดยกระบวนการควบแน่นด้วยความร้อน
เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF POROUS
GRAPHITIC CARBON NITRIDE-REDUCED GRAPHENE
OXIDE COMPOSITE BY THERMAL CONDENSATION
PROCESS FOR THE PHOTOCATALYTIC APPLICATION



ศดานันท์ บุญาน
สุจิตรา กมขุนทด

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF POROUS
GRAPHITIC CARBON NITRIDE-REDUCED GRAPHENE
OXIDE COMPOSITE BY THERMAL CONDENSATION
PROCESS FOR THE PHOTOCATALYTIC APPLICATION



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การเตรียมและการพิสูจน์เอกลักษณ์ของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์ กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุนโดยกระบวนการควบแน่นด้วยความร้อนเพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

Preparation and characterization of porous graphitic carbon nitride-reduced graphene oxide composite by thermal condensation process for the photocatalytic application

ชื่อนักศึกษา นางสาว ศदानันท์ บุญนาน รหัสนักศึกษา 58050546

นางสาว สุจิตรา กมขุนทด รหัสนักศึกษา 58050557




ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา เคมี

ปีการศึกษา 2561

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. ชวาลย์ ศรีวงษ์

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

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

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การเตรียมและการพิสูจน์เอกลักษณ์ของกราฟาไฟติกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์ กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุนโดยกระบวนการควบแน่นด้วยความร้อนเพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวศดานันท์ บุญาน	รหัสนักศึกษา	58050546
	นางสาวสุจิตรา กมขุนทด	รหัสนักศึกษา	58050557
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)		
ภาควิชา	เคมี		
คณะ	วิทยาศาสตร์		
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)		
ปีการศึกษา	2561		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์		

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของวัสดุผสมกราฟาไฟติกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่มีรูพรุน (pg) โดยกระบวนการควบแน่นทางความร้อนอย่างง่าย โดยใช้ เมลามีน แปะและกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกัน (0.1 0.3 0.6 และ 0.9 มิลลิลิตร) เป็นวัสดุตั้งต้น ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่เตรียมได้ถูกตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์โดยเทคนิคต่างๆ เช่น เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) เครื่องวัดวิเคราะห์สสารด้วยอินฟราเรด (FT-IR) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยการเรืองแสงรังสีเอ็กซ์ (EDX) เครื่องวัดการดูดกลืนแสงของแข็ง (DRS) เครื่องวัดพื้นที่ผิวและรูพรุน (BET) และเครื่องมือวิเคราะห์เชิงความร้อน (TGA) เป็นต้น จากผล XRD และ FT-IR ยืนยันว่า $g-C_3N_4$ และวัสดุผสม pg ทั้งหมดได้รับการเตรียมผ่านกระบวนการควบแน่นทางความร้อน จากภาพ SEM แสดงให้เห็นว่าสัณฐานวิทยาของ $g-C_3N_4$ และวัสดุผสม pg ทั้งหมดมีลักษณะเป็นแผ่นและมีขนาดอนุภาคเล็กลงเมื่อเพิ่มปริมาณสาร GO ตั้งต้น ในขณะที่ผล BET แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ผิวของวัสดุผสม pg ทั้งหมดมีค่าสูงกว่า $g-C_3N_4$ จากผล DRS แสดงให้เห็นเมื่อเพิ่มปริมาณสาร GO ตั้งต้นพบว่าค่าการดูดกลืนแสงของวัสดุผสม pg มีการเลื่อนตำแหน่งไปยังช่วงแสงวิสิเบิล นอกจากนี้ยังมีการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูและสีย้อมอินดิโกคาร์มีนด้วยกระบวนการดูดซับและกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้แสงวิสิเบิล แสงยูวีและแสงอาทิตย์ ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง $g-C_3N_4$ และวัสดุผสม pg ทั้งหมด ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงวัสดุผสม pg ทั้งหมดเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสาร GO ตั้งต้นเพิ่มขึ้น ยกเว้นตัวอย่างที่เติมสาร GO ตั้งต้น 0.9 มิลลิลิตร (pg-0.9GO) ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง pg-0.6GO (GO 0.6 มิลลิลิตร) มีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูและสีย้อมอินดิโกคาร์มีนด้วยกระบวนการโฟโตคะ-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตะไลติกภายใต้การฉายแสงของแหล่งกำเนิดแสงทั้งหมด ดังนั้นผลจากการวิจัยข้างต้นเหล่านี้ทำให้
ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงวัสดุผสม pg เป็นวัสดุที่น่าสนใจสำหรับการนำไปใช้เพื่อบำบัดน้ำหรือน้ำเสีย

คำสำคัญ : กระบวนการควบแน่นด้วยความร้อน กระบวนการโฟโตคะตะไลติก กราฟีนออกไซด์ (GO)
กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ (g-C₃N₄) เมลามีน รีดิวิซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Preparation and characterization of porous graphitic carbon nitride–reduced graphene oxide composite by thermal condensation process for the photocatalytic application		
Students	Sadanan Boonnan	58050546	
	Sujitra Komkhuntod	58050557	
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)		
Department	Chemistry		
Faculty	Science		
University	King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
Academic Year	2018		
Advisor	Dr.Chaval Sriwong		

Abstract

This special project studied the preparation of porous graphitic carbon nitride-reduced graphene oxide (pg) composite photocatalyst through a simple thermal condensation method using melamine, starch and the different amounts of graphene oxide (GO) loading (0.1, 0.3, 0.6 and 0.9 mL) as starting materials. The as-prepared photocatalyst samples were characterized and confirmed by a several techniques, such as, X-ray diffraction (XRD), Fourier-transformed infrared spectroscopy (FT-IR), scanning electron microscopy (SEM), energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS), diffuse reflectance spectrometer (DRS), Brunauer Emmett Teller (BET) surface area and thermal gravimetric analysis (TGA). The XRD and FT-IR results confirmed that the $g\text{-C}_3\text{N}_4$ and all pg composite samples were successfully prepared via the thermal condensation method. SEM images implied that the morphologies of the $g\text{-C}_3\text{N}_4$ samples and all pg composite samples had flake-like structures with smaller particles size upon the increasing of GO precursor loading. While BET results showed that the surface areas of all pg composite samples had higher than the bare $g\text{-C}_3\text{N}_4$ samples. DRS results indicated that the absorption band edges of the pg composite samples shifted to visible-light region with increasing of GO precursor loading. Moreover, the photocatalytic performances of $g\text{-C}_3\text{N}_4$ samples and all pg composite samples were evaluated by degrading of methylene blue (MB) and indigo carmine (IC) dye solutions under visible light, ultraviolet (UV) and natural sunlight irradiations. The results

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

revealed that the photocatalytic activities of all pg composite samples were increased upon the increasing of GO precursor loading, except the sample prepared by 0.9 mL of GO loading (pg-0.9GO). The pg-0.6GO (0.6 mL of GO) composite photocatalyst has the highest efficiency for the degradation of both MB and IC dyes under all light sources irradiations. Thus, these results make pg photocatalyst to be an attractive-material for water or wastewater purification applications.

Keywords : Thermal condensation method, Photocatalysis, Graphene oxide (GO), Graphitic carbon nitride ($g\text{-C}_3\text{N}_4$), Melamine, Reduced graphene oxide (rGO)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ เป็นอย่างยิ่ง สำหรับการอบรมสั่งสอน ให้คำปรึกษาและให้คำแนะนำ รวมไปถึงความอนุเคราะห์ช่วยเหลือตลอดในการดำเนินโครงการพิเศษนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ปานไพลิน สีหาราช และ ดร.กิตติศักดิ์ ชูจันทร์ คณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษ ที่ให้ทั้งคำปรึกษาและความอนุเคราะห์ในการตรวจสอบ เพื่อแก้ไขให้โครงการพิเศษฉบับนี้มีความถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณะอาจารย์ เจ้าหน้าที่และบุคลากร ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ทุกท่านที่ให้ความรู้ คำแนะนำ และความอนุเคราะห์ช่วยเหลือในการดำเนินในเรื่องอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินโครงการพิเศษ ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

โครงการพิเศษฉบับนี้อาจไม่สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีถ้าหากขาดความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากทางคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยให้การสนับสนุนนักศึกษาอย่างเต็มที่

สุดท้ายนี้ประโยชน์และองค์ความรู้ที่มาจากโครงการพิเศษฉบับนี้ขอบแต่บิดา มารดา ครอบครัว ผู้มีพระคุณ และคณาจารย์ทุกท่าน หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้ศึกษาขออน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้

ศदानันท์ บุญนาน
สุจิตรา กมขุนทด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฎ
คำย่อ/สัญลักษณ์	ตม
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 มลพิษทางน้ำ.....	4
2.1.1 แหล่งกำเนิดมลพิษทางน้ำ.....	4
2.1.2 การบ่งชี้คุณภาพน้ำ.....	5
2.1.3 ผลกระทบจากภาวะมลพิษทางน้ำ.....	5
2.1.4 การป้องกันภาวะมลพิษทางน้ำ.....	5
2.1.5 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย.....	6
2.2 กระบวนการโฟโตคะตะไลติก.....	8
2.2.1 ชนิดของกระบวนการโฟโตคะตะไลติก.....	8
2.2.2 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	9
2.2.3 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติส.....	9
2.2.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลติก.....	12
2.3 เมลามีน	13
2.3.1 ข้อมูลเบื้องต้นของเมลามีน	13
2.4 กราไฟติกคาร์บอนไนโตรด	14
2.4.1 ข้อมูลเบื้องต้นของกราฟิกคาร์บอนไนโตรด	14
2.4.2 คุณสมบัติและการนำไปใช้.....	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.3 การสังเคราะห์กราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์.....	15
2.5 แป้งข้าวโพด.....	17
2.5.1 องค์ประกอบทางเคมีของเม็ดแป้ง	17
2.5.2 อะไมโลส	17
2.5.3 อะไมโลเพคติน	18
2.5.4 การเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ของแป้ง	19
2.6 วัสดุรูพรุน.....	19
2.6.1 สมดุลและโซเทอมของการดูดซับ	20
2.7 รีดิวิซ์กราฟีนออกไซด์.....	23
2.7.1 ข้อมูลพื้นฐานของกราฟีนและรีดิวิซ์กราฟีนออกไซด์.....	23
2.7.2 คุณสมบัติและการประยุกต์ใช้งานของรีดิวิซ์กราฟีนออกไซด์.....	24
2.7.3 การสังเคราะห์รีดิวิซ์กราฟีนออกไซด์	25
2.8 สีย้อม	28
2.8.1 ประเภทของสีย้อม.....	28
2.8.2 สีย้อมเมทิลีนบลู	30
2.8.3 สีย้อมอินดิโกคาร์มีน.....	31
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....	35
3.1 สารเคมี.....	35
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	35
3.3 วิธีการทดลอง.....	37
3.3.1 การเตรียมกราฟีนออกไซด์.....	37
3.3.2 การเตรียมกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์.....	38
3.3.3 การเตรียมกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ผ่านกระบวนการที่ปั่นผสม.....	38
3.3.4 การเตรียมกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ผสมแป้ง.....	39
3.3.5 การเตรียมกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ผสมรีดิวิซ์กราฟีนออกไซด์.....	39
3.3.6 การเตรียมกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวิซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่เป็น- รูพรุน.....	39

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.7 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู.....	41
3.3.8 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มีน.....	41
3.4 การตรวจสอบและพิสูจน์เอกลักษณ์.....	42
3.4.1 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	42
3.4.2 เครื่องวัดวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด	42
3.4.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด	42
3.4.4 เครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยการเรืองแสงรังสีเอ็กซ์	43
3.4.5 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและรูพรุน.....	43
3.4.6 เครื่องวัดการดูดกลืนแสงของแข็ง	43
3.4.7 เครื่องมือวิเคราะห์เชิงความร้อน	43
3.4.8 เครื่องรามาเนสเปคโตรมิเตอร์.....	44
3.4.9 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง	44
3.4.10 เครื่องสเปกโตรฟลูออโรมิเตอร์.....	44
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล.....	45
4.1 การวิเคราะห์พิสูจน์เอกลักษณ์	46
4.1.1 การศึกษาเพื่อโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer; XRD).....	46
4.1.2 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค (Fourier Transform Infrared Spectro photometer; FT-IR)	48
4.1.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM).....	50
4.1.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบภายในตัวอย่าง (Energy-dispersive X-ray spectroscopy; EDX)	53
4.1.5 การศึกษาและวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุนด้วยเครื่องวิเคราะห์ลักษณะพื้นที่ผิว(Surface area and porosity analyzer; BET)	54
4.1.6 การศึกษาการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง (UV-Visible Diffuse Reflectance spectroscopy; DRS).....	56
4.1.7 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analysis (TGA).....	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.8 เครื่องสเปกโตรฟลูออโรมิเตอร์ (spectrofluorometer).....	60
4.1.9 การพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะของกราฟีนออกไซด์ด้วยรามานสเปกโตรมิเตอร์ (Raman Spectrometer).....	61
4.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู.....	62
4.2.1 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับในที่มืด	62
4.2.2 การศึกษาประสิทธิภาพกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้การฉายแสง วิสิเบิล.....	64
4.3 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มีน.....	67
4.3.1 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับในที่มืด	67
4.3.2 การศึกษาประสิทธิภาพกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้การฉายแสง วิสิเบิล.....	68
4.3.3 การศึกษาประสิทธิภาพการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสงยูวี	71
4.3.4 การศึกษาประสิทธิภาพการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสงจากดวง อาทิตย์.....	74
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	77
5.1 สรุปผลการวิจัย	77
5.2 ข้อเสนอแนะ	79
เอกสารอ้างอิง.....	85
ภาคผนวก.....	86
ภาคผนวก ก.....	87
ภาคผนวก ข.....	88
คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ.....	95

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติที่แตกต่างกันของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน	18
3.1 สรุปเงื่อนไขการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ.....	40
4.1 ความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ	49
4.2 ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area; SBET) เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุน (Average pore diameter) และปริมาตรรูพรุน (Total pore volume).....	56
4.3 แสดงค่าการดูดกลืนแสงและแถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ.....	57
4.4 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยการสลายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ.....	59
4.5 แสดงค่าคงที่ในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูมินของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล.....	67
4.6 แสดงค่าคงที่ในการสลายสีย้อมอินดิโกคาร์มินของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล.....	71
4.7 แสดงค่าคงที่ในการสลายสีย้อมอินดิโกคาร์มินของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ ภายใต้การฉายแสงยูวี.....	74
4.8 แสดงค่าคงที่ในการสลายสีย้อมอินดิโกคาร์มินของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ ภายใต้แสงอาทิตย์ เป็นเวลา 25 นาที.....	86

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 มลพิษทางน้ำ	4
2.2 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตคะตะติก.....	10
2.3 สูตรโครงสร้างของเมลามีน.....	13
2.4 ผงเมลามีน	14
2.5 การเชื่อมต่อหน่วยย่อยต่างๆในระนาบ 2 มิติเพื่อสร้างเป็นแผ่นกราฟิติกคาร์บอน-ไนไตรด์ โดยหน่วยเล็กๆที่เชื่อมต่อกันสามารถเป็นเอส-ไตรอะซีน (ก) และ ไตร-เอส-ไตรอะซีน (ข).....	15
2.6 ภาพแสดงกลไกการสังเคราะห์กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์	16
2.7 โครงสร้างของอะไมโลส	17
2.8 โครงสร้างของอะไมโลแพคติน	18
2.9 การเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ของสารอินทรีย์	19
2.10 รูปารูปร่างแบบต่างๆ (ก) แบบทรงกระบอก (ข) แบบทรงกลม (ค) แบบที่เป็นแผ่น และ (ง) แบบที่บิดเป็นเกลียว	20
2.11 ประเภทไอโซเทอมการดูดซับพื้นฐาน 5 ชนิด	21
2.12 ประเภทไอโซเทอมของการดูดซับของ IUPAC.....	21
2.13 เปรียบเทียบโครงสร้างระหว่างกราฟีนและรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์	23
2.14 กระบวนการสังเคราะห์จากกราฟไฟท์เป็นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์	25
2.15 รูปแบบ XRD ของแกรฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (rGO)	27
2.16 รูปแบบ XRD ของกระบวนการรีดักชันทางความร้อนของแกรฟีนออกไซด์ที่อุณหภูมิห้องถึง 1000°C และแกรไฟต์	27
2.17 โครงสร้างของเมทิลีนบลู	30
2.18 ภาพแสดงกลไกการสลายสีย้อมของเมทิลีนบลู.....	31
2.19 โครงสร้างของอินดิโกคาร์มีน	32
2.20 ภาพแสดงกลไกการสลายสีย้อมของอินดิโกคาร์มีน	32
3.1 สารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ (GO) ที่สังเคราะห์ได้	38
3.2 ภาพ (a) $g-C_3N_4$ (b) $g-C_3N_4$ _1 (c) $g-C_3N_4$ +1%St และ (d) $g-C_3N_4$ +0.6GO	39
3.3 ผงกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุน (pg) ที่มีปริมาณของกราฟีนออกไซด์ความเข้มข้น 7.8 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร แตกต่างกันได้แก่ (a) pg-0.1GO (b) pg-0.3GO (c) pg-0.6GO และ (d) pg-0.9GO ตามลำดับ.....	40

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 ตัวอย่างผงกราฟไฟติกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่มีรูพรุน (pg) ที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกันได้แก่ (a) pg-0.1GO (b) pg-0.3GO (c) pg-0.6GO และ (d) pg-0.9GO ตามลำดับ	45
4.2 XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง	47
4.3 XRD pattern ของ g-C ₃ N ₄ _1 และ pg ที่เตรียมจาก GO ในปริมาณที่แตกต่างกันได้ (a) pg-0.1GO (b) pg-0.3GO (c) pg-0.6GO และ (d) pg-0.9GO ตามลำดับ	48
4.4 FT-IR spectra ของ (ก) g-C ₃ N ₄ _1 (ข) g-C ₃ N ₄ +1%St (ค) g-C ₃ N ₄ +0.6GO (ง) pg-0.3GO (จ) pg-0.6GO และ (ฉ) pg-0.9GO.....	49
4.5 ภาพ SEM ของg-C ₃ N ₄ (ก) กำลังขยาย 10000X (ข) 30000X และ g-C ₃ N ₄ _1 (ค) กำลังขยาย 10000X (ง) ที่กำลังขยาย 30000X.....	50
4.6 ภาพ SEM ของ g-C ₃ N ₄ _1 (ก) ที่กำลังขยาย 10000X (ข) 60000X g-C ₃ N ₄ +1%St (ค) ที่กำลังขยาย 10000X (ง) 60000X g-C ₃ N ₄ +0.6GO (จ) ที่กำลังขยาย 10000X (ฉ) กำลังขยาย 60000X และ pg-0.6GO (ช) กำลังขยาย 10000X (ซ) ที่กำลังขยาย 60000X.....	51
4.7 ภาพ SEM ของ pg-0.1GO (ก) ที่กำลังขยาย 10000X เท่า 60000X และ pg-0.3GO (ค) ที่กำลังขยาย 10000X (ง) กำลังขยาย 60000X และ pg-0.6GO (จ) กำลังขยาย 10000X (ฉ) ที่กำลังขยาย 60000X และ pg-0.9GO (ซ) กำลังขยาย 10000X (ซ) ที่กำลังขยาย 60000X.....	53
4.8 แสดง Nitrogen adsorption-desorption isotherm ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง	54
4.9 แสดง Nitrogen adsorption-desorption isotherm ของกราฟไฟติกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุน (pg) โดยการเติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกันได้แก่ (a) pg-0.1GO (b) pg-0.3GO (c) pg-0.6GO และ (d) pg-0.9GO ตามลำดับ	55
4.10 กราฟ UV-Vis diffuse reflectance spectra (DRS) ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ	57
4.11 TGA แสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ.....	58
4.12 DTG แสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ.....	59
4.13 ฟลูออโรสเปกตรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ	60
4.14 รามานสเปกตรัมของแกรไฟต์ (Graphite) และการฟีนออกไซด์ (GO).....	61
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงเทียบกับเวลาของการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มืด โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง	62

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงเทียบกับเวลาในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มีดของ $g-C_3N_4$ และ pg ที่เตรียมจาก GO ในปริมาณที่แตกต่างกัน ได้แก่ (a) pg-0.1GO, (b) pg-0.3GO, (c) pg-0.6GO และ (d) pg-0.9GO ตามลำดับ.....	63
4.17 กราฟแสดงประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มีดของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ	63
4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงเทียบกับเวลาของการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล.....	64
4.21 กราฟแสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ ภายใต้การดูดซับเป็นเวลา 30 นาที และการฉายแสงวิสิเบิลเป็นเวลา 150 นาที.....	65
4.22 กราฟแสดงอัตราเร็วของการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล	66
4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงเทียบกับเวลาของการดูดซับสีย้อมอินดิโกคาร์มินในที่มีดโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ	68
4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงเทียบกับเวลาในการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มินของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล	69
4.25 กราฟแสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มินของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ ภายใต้การดูดซับเป็นเวลา 30 นาที และการฉายแสงวิสิเบิลเป็นเวลา 150 นาที.....	69
4.26 กราฟแสดงอัตราเร็วของการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มินของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล	70
4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงเทียบกับเวลาในการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มินของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ ภายใต้การดูดซับเป็นเวลา 30 นาที และการฉายแสงยูวีเป็นเวลา 150 นาที.....	72
4.28 กราฟแสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มินของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ ภายใต้การฉายแสงยูวี.....	72
4.29 กราฟแสดงอัตราเร็วของการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มินของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ ภายใต้การฉายแสงยูวี.....	73
4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงเทียบกับเวลาของการสลายสีย้อมอินดิโกคาร์มินโดยใช้ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ ภายใต้แสงอาทิตย์เป็นเวลา 25 นาที	74

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.31 กราฟแสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มินของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ ภายใต้แสงอาทิตย์เป็นเวลา 25 นาที.....	75
4.32 กราฟแสดงอัตราเร็วของการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มินของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ.....	75
ข-1 (ก) ภาพ SEM และ (ข) ผล EDX สเปกตรัมของ $g-C_3N_4$ _1	87
ข-2 (ก) ภาพ SEM และ (ข) ผล EDX สเปกตรัมของ $g-C_3N_4+1\%St$	88
ข-3 (ก) ภาพ SEM และ (ข) ผล EDX สเปกตรัมของ $g-C_3N_4+0.6GO$	88
ข-4 (ก) ภาพ SEM และ(ข) ผล EDX สเปกตรัมของ $pg-0.3GO$	89
ข-5 (ก) ภาพ SEM และ (ข) ผล EDX สเปกตรัมของ $pg-0.6GO$	89
ข-6 แสดงการหาความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงของ $g-C_3N_4$	90
ข-7 แสดงการหาความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงของ $g-C_3N_4$ _1.....	90
ข-8 แสดงการหาความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงของ $g-C_3N_4+1\%St$	91
ข-9 แสดงการหาความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงของ $g-C_3N_4+0.6GO$	91
ข-10 แสดงการหาความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงของ $pg-0.1GO$	92
ข-11 แสดงการหาความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงของ $pg-0.3GO$	92
ข-12 แสดงการหาความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงของ $pg-0.6GO$	93
ข-13 แสดงการหาความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงของ $pg-0.9GO$	93
ข-14 สีของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มืด (บน) และสีของตัวเร่ง- ปฏิกิริยาหลังจากการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มืด (ล่าง).....	94
ข-15 สีของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนการดูดซับสีย้อมอินดิโกคาร์มินในที่มืด (บน) และสีของตัวเร่ง- ปฏิกิริยาหลังจากการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มืด (ล่าง).....	94

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
g-C ₃ N ₄	กราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์
g-C ₃ N ₄ _1	กราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ผ่านกระบวนการปั่นผสม
g-C ₃ N ₄ +1%St	กราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ผสมแบ่ง 1%w/w
g-C ₃ N ₄ +0.6GO	กราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ผสมกราฟีนออกไซด์ 0.6 มิลลิลิตร
pg	กราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุน
pg-0.1GO	กราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุนที่เตรียมจากกราฟีนออกไซด์ 0.1 มิลลิลิตร
pg-0.3GO	กราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุนที่เตรียมจากกราฟีนออกไซด์ 0.3 มิลลิลิตร
pg-0.6GO	กราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุนที่เตรียมจากกราฟีนออกไซด์ 0.6 มิลลิลิตร
pg-0.9GO	กราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุนที่เตรียมจากกราฟีนออกไซด์ 0.9 มิลลิลิตร
GO	กราฟีนออกไซด์
rGO	รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์
Eg	แถบช่องว่างพลังงาน (Energy Gap)
e ⁻	อิเล็กตรอน (Electron)
h ⁺	ช่องว่าง (Hole)
OH°	เปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Perhydroxyl radical)
O ₂ ^{°-}	ซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล (Superoxide ion radical)
OH ₂ [°]	เปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Perhydroxyl radical)
H°	ไฮโดรเจนเรดิคัล (Hydrogen radical)
VB	แถบเวเลนซ์ (Valence band)
CB	แถบชั้นตัวนำไฟฟ้า (Conduction band)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการวิจัย

การใช้เทคโนโลยีโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic process) เพื่อกำจัดมลพิษทางสิ่งแวดล้อม เช่น มลพิษทางน้ำ ได้รับความสนใจ เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็วและใช้เวลาในการย่อยสลายน้อยกว่าการย่อยสลายทางชีวภาพด้วยจุลินทรีย์ ซึ่งสารที่นิยมนำมาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงมักเป็นสารประกอบโลหะออกไซด์และซัลไฟด์ เช่น TiO_2 CdS Cu_2O และ ZnO เป็นต้น [1] แต่สารประกอบโลหะเหล่านี้มีความเป็นพิษสูง ก่อให้เกิดผลเสียต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมได้ ดังนั้นการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปราศจากโลหะเพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา Photocatalytic ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิลหรือแสงอาทิตย์ (Natural sun light) ก็เป็นทางเลือกใหม่ที่น่าสนใจ

กราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ (Graphitic carbon nitride; $g\text{-C}_3\text{N}_4$) คือวัสดุที่เป็นสัณฐานหนึ่งของสารประกอบคาร์บอนไนไตรด์ วัสดุนี้นี้ประกอบไปด้วยอะตอมคาร์บอนและไนโตรเจนที่มีการจัดเรียงตัวเป็นแผ่น เป็นผลึก โดยเรียงซ้อนกันคล้ายกราไฟต์ โดยในแต่ละแผ่นมีลักษณะการต่อเชื่อมโยงกันของหน่วยเล็กๆ ที่ต่อกันเป็นเครือข่าย 2 มิติ ประกอบด้วย เอส-ไตรอะซีน หรือ ไตร-เอส-ไตรอะซีน เป็นต้น การสังเคราะห์วัสดุกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ทำได้หลากหลายวิธี โดยส่วนใหญ่จะเป็นปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของสารตั้งต้นเช่น ไซยานาไมด์ ไดไซยาโนควินดีน เมลามีน หรือปฏิกิริยาการให้ความร้อนแก่ยูเรีย วัสดุกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์มีสมบัติเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวสูง มีเสถียรภาพทางเคมีและความร้อนสูง ไม่ละลายในตัวทำละลายทั่วไป มีค่าแถบการดูดกลืนเท่ากับ 2.7 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) มีประสิทธิภาพในการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้แสงวิสิเบิลได้ดี และไม่มีความเป็นพิษเนื่องจากปราศจากโลหะในองค์ประกอบ [2-3] อย่างไรก็ตามกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ยังมีประสิทธิภาพต่ำ เพราะเกิดการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮล (e^-h^+ pairs recombination) อย่างรวดเร็ว งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการปรับปรุงประสิทธิภาพกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์โดยการนำไปใช้งานร่วมกับสารกึ่งตัวนำอื่นๆ [4-5] และปรับปรุงโครงสร้างโดยการเพิ่มรูพรุนเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะ ทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดกระบวนการดูดซับ (Adsorption) และกระบวนการโฟโตคะตะไลติก [6-7]

รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (Reduced graphene oxide; rGO) เป็นหนึ่งในอนุพันธ์ของกราฟีน เกิดจากการออกซิไดซ์กราฟไฟต์เพื่อให้เกิดหมู่ฟังก์ชันที่ไปกั้นระหว่างชั้นของกราฟไฟต์ให้ห่างออกจากกัน (Exfoliation) และเรียกผลผลิตที่ได้ว่า กราไฟต์ออกไซด์ หรือ กราฟีนออกไซด์ ขึ้นอยู่กับความหนาของวัสดุ (กราฟีนออกไซด์ 1 ชั้นมีความหนาประมาณ 0.9 นาโนเมตร) จากนั้นทำปฏิกิริยารีดักชันเพื่อกำจัดหมู่ฟังก์ชันของออกซิเจนออกไป ทำให้ได้ผลผลิตคือ รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ซึ่งมีประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าสูง ส่งผ่านอิเล็กตรอนได้ดีอีกทั้งยังมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง ปัจจุบันมีการนำรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ไปประยุกต์ใช้ ในด้านต่างๆ เช่น การนำไปใช้ในวัสดุคอมโพสิตเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุ ทำหน้าจอบรรณกัฒนที่คั้งงอได้ นำมาเป็นขั้วไฟฟ้าในแบตเตอรี่และสามารถนำไปใช้งานร่วมกับสารกั้งตัวนำเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติก เพราะสามารถส่งผ่านอิเล็กตรอนได้อย่างรวดเร็วและช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังช่วยยับยั้งกระบวนการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮล (Recombination) [8-10]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้สังเคราะห์กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุนด้วยกระบวนการควบแน่นด้วยความร้อน (Thermal condensation process) โดยใช้เมลามีน กราฟีนออกไซด์ และแป้งเป็นสารตั้งต้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูและสีย้อมอินดิโกคาร์มินด้วยกระบวนการดูดซับและกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ในงานวิจัยนี้ศึกษาปริมาณการเติมกราฟีนออกไซด์ตั้งต้นในปริมาณที่แตกต่างกัน และทำการพิสูจน์เอกลักษณ์โดยใช้เทคนิคต่างๆ ได้แก่ XRD FTIR SEM EDX BET DRS TGA Raman UV-vis และ Fluorescence spectroscopy นอกจากนี้ยังศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ได้แก่ ผลของแหล่งกำเนิดแสง เช่น แสงยูวีและแสงอาทิตย์เปรียบเทียบกับแสงวิสิเบิล

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาและเตรียมกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุนด้วยกระบวนการควบแน่นด้วยความร้อน โดยใช้เมลามีน แป้ง และกราฟีนออกไซด์เป็นสารตั้งต้น ภายใต้การศึกษาผลของการเติมกราฟีนออกไซด์ตั้งต้นในปริมาณที่แตกต่างกัน
2. เพื่อศึกษาและพิสูจน์เอกลักษณ์ของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุนที่เตรียมได้ ด้วยเทคนิคต่างๆ
3. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูและสีย้อมอินดิโกคาร์มิน ด้วยกระบวนการดูดซับและกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล
4. เพื่อศึกษาผลของการฉายแสงชนิดต่างๆ เช่น แสงยูวีและแสงอาทิตย์เปรียบเทียบกับแสงวิสิเบิล ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มิน ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติก

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. เตรียมของกราฟิติการ์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุนด้วยกระบวนการควมแน่นด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 600 °c เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยใช้เมลามีนแป้ง และ กราฟีนออกไซด์เป็นสารตั้งต้น
2. ศึกษาปริมาณผลของการเติมกราฟีนออกไซด์ตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ที่แตกต่างกัน ได้แก่ 0.1 0.3 0.6 และ 0.9 มิลลิลิตร (GO เข้มข้น 7.8 mg/ml) ตามลำดับ
3. พิสูจน์เอกลักษณ์ของของกราฟิติการ์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุนด้วยเทคนิคต่างๆ ได้แก่ XRD FTIR SEM EDX BET DRS TGA Raman UV-Vis และ Fluorescence spectroscopy เป็นต้น
4. ศึกษาประสิทธิภาพกราฟิติการ์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุนในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูและสีย้อมอินดิโกคาร์มิน ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล 150 นาที รวมทั้งศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของกราฟิติการ์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่เป็นรูพรุนเป็นเวลา 180 นาที
5. ศึกษาผลของแหล่งกำเนิดแสงที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมของกราฟิติการ์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุนด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ได้แก่ แสงวิสิเบิล แสงยูวี และแสงจากแสงอาทิตย์ เป็นต้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รับองค์ความรู้เกี่ยวกับเทคนิคการเตรียมกราฟิติการ์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุน
2. ได้รับองค์ความรู้เกี่ยวกับการพิสูจน์เอกลักษณ์ของกราฟิติการ์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุน โดยการใช้เทคนิคต่างๆ
3. ได้รับองค์ความรู้เกี่ยวกับการกำจัดสีย้อมโดยใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลติกของกราฟิติการ์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุน
4. สามารถนำกราฟิติการ์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุนที่เตรียมได้ไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก เพื่อกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูและสีย้อมอินดิโกคาร์มินได้
5. ทราบถึงประสิทธิภาพของกราฟิติการ์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุนในการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มิน ภายใต้การฉายแสงยูวี แสงวิสิเบิลและแสงอาทิตย์

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 มลพิษทางน้ำ [11]

ภาวะมลพิษทางน้ำ (Water Pollution) หมายถึง สภาวะที่น้ำมีคุณภาพเปลี่ยนไปจากธรรมชาติเดิม จนมีสภาพที่เลวลง และส่งผลต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์และสิ่งมีชีวิตในน้ำ



รูปที่ 2.1 มลพิษทางน้ำ [12]

2.1.1 แหล่งกำเนิดภาวะมลพิษทางน้ำ

1. ชุมชน แหล่งน้ำเสียประเภทนี้ได้แก่ แหล่งพักอาศัย อาคารชุด โรงพยาบาล ร้านอาหาร โรงฆ่าสัตว์ โดยมีน้ำเสียเกิดจากการชำระร่างกาย การซักเสื้อผ้า การประกอบอาหาร
2. อุตสาหกรรม เกิดจากกระบวนการในการผลิตทางอุตสาหกรรม เช่น น้ำหล่อเย็น น้ำล้าง น้ำทิ้งจากกระบวนการผลิต การทิ้งของเสียจากการผลิตสู่แหล่งน้ำ รวมถึงการทำเหมืองแร่
3. เกษตรกรรม น้ำเสียมาจากการล้างภาชนะที่บรรจุหรืออุปกรณ์ฉีดพ่น และการระบายของเสียจากมูลสัตว์ลงแหล่งน้ำ เช่น ฟาร์มสุกร นาุ้ง บ่อเลี้ยงปลา การฉีดพ่นสารเคมี การชะล้างหน้าดิน เป็นต้น
4. อื่นๆ เช่น ภาวะมลพิษจากน้ำมันที่เข้ากับเครื่องจักรกลของเรือ การเกิดอุบัติเหตุของเรือขนส่งน้ำมัน และการขับถ่ายสิ่งปฏิกูลของผู้โดยสารบนเรือ การก่อสร้าง การล้างถนน น้ำเสียจากแพปลา ทำเทียบเรือประมง เป็นต้น

การใช้ปิโตรเคมีภัณฑ์ เช่น ปุ๋ยเคมี สารปราบศัตรูพืช และผงซักฟอก แม้ว่าปุ๋ยและผงซักฟอกไม่เป็นพิษโดยตรง แต่เป็นอาหารที่ติดต่อกับพืชน้ำบางชนิดเพราะมีสารฟอสเฟต โดยเฉพาะน้ำทิ้งจากบ้านเรือนจะมีผงซักฟอกปนอยู่ด้วย ฟอสเฟตจะกระตุ้นให้พืชน้ำเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว เมื่อพืชน้ำ

ตาย จุลินทรีย์ในน้ำจะต้องใช้ออกซิเจนจำนวนมากเพื่อย่อยสลายซากพืชเหล่านี้ เป็นเหตุให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลงจึงทำให้น้ำเกิดเน่าเสีย

2.1.2 การบ่งชี้คุณภาพของน้ำ

ตามปกติน้ำในธรรมชาติมีออกซิเจนละลายอยู่ 5-7 ส่วนในล้านส่วน (5-7 ppm) ปริมาณออกซิเจนในน้ำหรือค่า DO (Dissolved Oxygen) จึงมีความสำคัญและมีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการดำรงชีวิตของพืชและสัตว์น้ำ

การบ่งชี้คุณภาพของน้ำ อาจทำได้หลายวิธี เช่น

- 1) หาปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ต้องใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำ เรียกว่า ค่า BOD (Biochemical Oxygen Demand) ซึ่งจะบอกถึงปริมาณจุลินทรีย์ที่ต้องใช้ออกซิเจนในน้ำ
- 2) หาปริมาณความต้องการออกซิเจนของสารเคมีที่อยู่ในน้ำ เรียกว่า COD (Chemical Oxygen Demand) ซึ่งจะบอกถึงปริมาณสารเคมีที่สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในน้ำ

2.1.3 ผลกระทบจากภาวะมลพิษทางน้ำ

1. เป็นแหล่งแพร่ระบาดของเชื้อโรค เช่น อหิวาตกโรค บิด และท้องเสีย
2. ทำให้เกิดปัญหาหมอกพิษต่อดิน น้ำ และอากาศ
3. ทำให้เกิดความรำคาญ เช่น กลิ่นเหม็น
4. ทำให้สูญเสียทัศนียภาพและเกิดความไม่น่าดู
5. ทำให้สัตว์น้ำหลายชนิดเกิดการตาย ย้ายถิ่น หรืออาจสูญพันธุ์ในที่สุด

2.1.4 การป้องกันภาวะมลพิษทางน้ำ

1. ดำเนินการป้องกันและแก้ไขอย่างเป็นระบบทั้งพื้นที่ลุ่มน้ำ จากต้นน้ำถึงปากแม่น้ำโดยมีการจัดลำดับความสำคัญของปัญหาและการจัดทำแผนปฏิบัติการป้องกันและแก้ไข้ปัญหา
2. ควบคุมภาวะมลพิษจากแหล่งกำเนิดประเภทต่างๆ ได้แก่ ชุมชนและอุตสาหกรรม โดยการควบคุมน้ำทิ้งให้เป็นไปตามมาตรฐาน
3. การลดภาวะมลพิษจากแหล่งกำเนิด ได้แก่ การส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีหรือนำของเสียไปใช้ให้เกิดประโยชน์และการผลิตที่สะอาด
4. ควบคุมการใช้ที่ดินที่ใกล้แหล่งน้ำ ได้แก่ กำหนดแหล่งน้ำดิบเพื่อควบคุมและฟื้นฟู และจัดเขตที่ดินสำหรับกลุ่มอุตสาหกรรมที่ก่อมลพิษ
5. ใช้มาตรการให้ผู้ก่อมลพิษต้องเป็นผู้จ่ายค่าบำบัด โดยการส่งเสริมให้มีการจัดเก็บค่าธรรมเนียมบำบัดน้ำเสียจากชุมชน
6. ส่งเสริมให้ภาคเอกชนเข้ามามีส่วนร่วมและสนับสนุนในการก่อสร้างระบบบำบัดน้ำเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ปรับปรุงกฎหมายและเข้มงวดกับมาตรการที่ให้ภาคอุตสาหกรรมและกิจการพาณิชย์กรรม นำน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียรวม ก่อนปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำ
8. ส่งเสริมและสนับสนุนให้ผู้แทนชุมชน ประชาคม และองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นมีส่วนร่วม ในการป้องกันและแก้ไขปัญหาในพื้นที่
9. รณรงค์และประชาสัมพันธ์ให้ประชาชนได้รับความรู้และเกิดจิตสำนึกเกี่ยวกับการป้องกัน และแก้ไขปัญหาภาวะมลพิษทางน้ำอย่างต่อเนื่อง
10. กำหนดให้มีการสร้างระบบบำบัดน้ำเสียรวมของชุมชน โดยต้องสามารถรวบรวมน้ำเสียเข้าสู่ระบบได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 70 ของน้ำเสียที่เกิดขึ้น

2.1.5 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย [13]

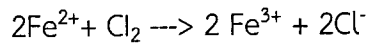
การบำบัดน้ำเสีย หมายถึง การกำจัดหรือทำลายสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียให้หมดไป หรือเหลือน้อยที่สุดให้ได้มาตรฐานที่กำหนดและไม่ทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม น้ำเสียจากแหล่งต่างกันจะมีคุณสมบัติไม่เหมือนกันดังนั้นกระบวนการบำบัดน้ำจึงมีหลายวิธี โดยระบบบำบัดน้ำเสียทั่วไปมี 3 วิธี คือ

1. กระบวนการทางเคมี (chemical process) เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยการแยกสารต่างๆ หรือสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียที่บำบัด เช่น โลหะหนัก สารพิษ สภาพความเป็นกรด ต่างสูงๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ด้วยการเติมสารเคมีต่าง ๆ ลงไปเพื่อให้เข้าไปทำปฏิกิริยาซึ่งจะมีประโยชน์ในการแยกสาร แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือ เมื่อเติมสารเคมีลงในน้ำเสียแล้ว ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและวิธีนี้จะมีค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมีค่อนข้างสูง ดังนั้นกระบวนการทางเคมีจะเลือกใช้ก็ต่อเมื่อน้ำเสียไม่สามารถบำบัดได้ด้วยกระบวนการทางกายภาพหรือชีวภาพ

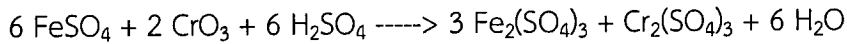
การทำให้เกิดตะกอน (precipitation) อาศัยหลักการเติมสารเคมีลงไปทำปฏิกิริยาทำให้เกิดกลุ่มตะกอนตกลงมา โดยทั่วไปสารแขวนจะมีประจุลบ ดังนั้นสารเคมีที่เติมลงไปจึงเป็นประจุบวกเพื่อทำให้เป็นกลาง การแยกด้วยวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายสูงแต่ก็มีประสิทธิภาพสูงเช่นกัน ดังนั้นวิธีนี้จะเลือกใช้ต่อเมื่อไม่สามารถ แยกได้โดยกระบวนการทางชีวภาพหรือกายภาพ

โดยส่วนมากสารเคมีที่ทำให้เกิดตะกอนจะละลายน้ำ เช่น เกลือของสารประกอบต่างๆ เช่น เกลืออะลูมิเนียมซัลเฟต หรือสารส้ม ($Al_2(SO_4)_3$) เกลือเหล็ก ($FeCl_3$, $FeSO_4$) และเกลือของแคลเซียม ($Ca(OH)_2$) ส่วนเกลือที่นำมาช่วยในการเกิดตะกอนได้ดียิ่งขึ้นนี้เป็นสารประกอบของ กลุ่ม Activated ของ Silica และ Polyelectrolytes โดยกระบวนการทางเคมีมีหลายวิธี

การเกิดออกซิเดชันทางเคมี (chemical oxidation) อาศัยหลักการเสียอิเล็กตรอนของอะตอมให้แก่สารเคมีที่เติมลงไป ในน้ำเสียโดยสารเคมีนี้จะทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ (oxidizing agent) ส่วนมากวิธีนี้จะนิยมใช้เปลี่ยนโมเลกุลของโลหะที่เป็นพิษ เช่น การเปลี่ยน Fe^{2+} ซึ่งมีพิษมากไปเป็นสาร Fe^{3+} ซึ่งมีพิษน้อย ด้วยคลอรีน ดังแสดงในสมการต่อไปนี้



การเกิดรีดักชันทางเคมี (chemical reduction) เป็นปฏิกิริยาที่มีการรับอิเล็กตรอน วิธีการนี้เป็นการเปลี่ยนสภาพของสารพิษไปเป็นสารที่มีอันตรายน้อยลง อะตอมหรือไอออน ของสารพิษจะรับอิเล็กตรอนจากสารเคมีที่เติมลงไปซึ่งมีสมบัติเป็นตัวรีดิวซ์ (reducing agent) เช่น การเปลี่ยน Cr^{6+} ซึ่งมีพิษมากไปเป็น Cr^{3+} ด้วย เฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO_4) ในสภาพที่เป็นกรด ดังแสดงในสมการต่อไปนี้



การสะเทิน (neutralization) เป็นการเปลี่ยนค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำเสียให้มีฤทธิ์เป็นกลาง (pH = 7) ถ้าต้องการปรับค่าน้ำเสียที่มีฤทธิ์เป็นกรด (pH < 7) ในน้ำเสียให้สูงขึ้นต้องเติมสารที่มีฤทธิ์เป็นด่าง เช่น แคลเซียมคาร์บอเนตหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ ส่วนกรณีถ้าต้องการปรับน้ำเสียมให้มีฤทธิ์เป็นด่าง (pH > 7) ให้มีค่า pH ต่ำลงจะต้องเติมกรด เช่น กรดซัลฟิวริก กรดไนตริก กรดเกลือและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น

2. กระบวนการทางชีววิทยา (Biological Process) กระบวนการทางชีววิทยา (biological process) เป็นการอาศัยหลักการใช้จุลินทรีย์ต่างๆ มาทำการย่อยสลายเปลี่ยนอินทรีย์สารไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และแอมโมเนีย เป็นการบำบัดน้ำเสียที่ดีที่สุดในแง่ของการลดปริมาณสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำ แต่หลักการนี้เลือกสภาวะแวดล้อมให้เหมาะกับการทำงานของจุลินทรีย์ โดยสัมพันธ์กับปริมาณของจุลินทรีย์ และเวลาที่ใช้ในการย่อยสลาย แบคทีเรียที่เลือกใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์แยกออกได้เป็น 2 ประเภท คือ แบคทีเรียที่ต้องใช้ออกซิเจน (aerobic bacteria) ส่วนกลุ่มที่ 2 เป็นพวกไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic bacteria)

3. กระบวนการทางกายภาพ (physical process) กระบวนการทางกายภาพ (physical process) เป็นการบำบัดน้ำเสียอย่างง่ายซึ่งจะแยกของแข็งที่ไม่ละลายน้ำออก วิธีนี้จะแยกตะกอนได้ประมาณ 50-65% ส่วนเรื่องการแยกความสกปรกในรูปของสารอินทรีย์ (BOD5) ประมาณ 20-30% เท่านั้น วิธีการต่าง ๆ ในกระบวนการนี้มีหลายวิธี เช่น การดักด้วยตะแกรง (screening) เป็นการแยกเศษขยะต่าง ๆ ที่มากับน้ำเสีย เช่น เศษไม้ ถุงพลาสติก กระจาด ตะแกรงมีหลายขนาด การดักด้วยตะแกรงจึงเป็นการแยกขั้นต้นแรกในการบำบัดน้ำเสีย การตัดย่อย (combination) คือ การใช้เครื่องตัดทำลายเศษขยะขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง การกวาด (skimming) เป็นการกำจัดน้ำมันและไขมันโดยทำการดักหรือกวาดออกจากน้ำเสีย การทำให้ลอย (floating) จะใช้กับตะกอนที่มีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าน้ำ การตกตะกอน (sedimentation) เป็นการแยกตะกอนออกจากน้ำเสียโดยอาศัยหลักการเรื่องแรงโน้มถ่วง ซึ่งจะใช้กับตะกอนที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่าน้ำ

ปัญหาน้ำเน่าเสียหรือการเกิดมลพิษทางน้ำ ส่วนใหญ่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ ดังนั้นการถ่ายทอดความรู้ให้กับเด็ก เยาวชน รวมทั้งพ่อแม่ผู้ปกครองและประชาชนทั่วไป ให้ตระหนักถึงผลเสียและรับรู้การป้องกันปัญหาน้ำเน่าเสียอย่างถูกต้อง เป็นการแก้ไขปัญหามลพิษทางน้ำอย่างถูกวิธีและได้ผลอย่างยั่งยืน [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 กระบวนการโฟโตคะตะไลติก [15]

โฟโตเคมี (Photochemistry) เป็นปฏิกิริยาที่ใช้แสงเป็นตัวกระตุ้นโมเลกุลของสารและหากการกระตุ้นด้วยแสงอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาหรืออาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการจะเรียกว่าโฟโตคะตะไลติก (Photocatalysis) โดยโฟโตคะตะไลติกนี้จะเกิดขึ้นได้จำเป็นต้องมีองค์ประกอบ 4 อย่าง คือ

- 1) ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เป็นต้น
- 2) พลังงานแสง ซึ่งมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับพลังงานโฟตอนของตัวคะตะลิสต์
- 3) น้ำ
- 4) ออกซิเจนหรือตัวออกซิแดนซ์อื่น ๆ

นอกจากนี้โฟโตคะตะไลติกจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อได้รับแสง หรือพลังงานโฟตอน (Photonenergy) ที่มากพอที่จะทำให้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกเกิดขึ้นได้โดยจะเรียกพลังงานตัวนี้ว่า พลังงานกระตุ้น (Activation energy) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.1)

$$E = hv = hc/\lambda \quad (2.1)$$

เมื่อ	E	คือ พลังงานของโฟตอน (Photon energy) (จูล)
	h	คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Plank's constant) = 6.625×10^{-34} จูล/วินาที
	V	คือ ความถี่ (เฮิรตซ์ หรือวินาที ⁻¹)
	C	คือ ความเร็วของคลื่นแสง = 2.997×10^8 (เมตร/วินาที)
	λ	คือ ความยาวคลื่นแสง (นาโนเมตร)

2.2.1 ชนิดของกระบวนการโฟโตคะตะไลติก

เมื่อพิจารณาจากสถานะของตัวเร่งปฏิกิริยาจะสามารถประเภทของปฏิกิริยาได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

- 1) โฟโตคะตะไลซิสแบบสถานะเดียวหรือแบบเนื้อเดียวกัน (Homogeneous Photocatalysis) เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสถานะเดียวกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด (โดยทั่วไปแล้วจะเป็นของเหลว) เช่น การย่อยสลาย 2,4-Dinitrofluorene โดยใช้ UV/H₂O₂
- 2) โฟโตคะตะไลซิสแบบสถานะต่างหรือแบบเนื้อผสม (Heterogeneous Photocatalysis) เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในสถานะที่ต่างกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด เช่น ย่อยสลาย 2-Chlorophenol โดยใช้ UV/TiO₂

2.2.2 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา

สารที่นิยมนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสมีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิด ได้แก่

- 1) โลหะทรานซิชัน (Transition Metal) เช่น ทองแดง โคโรเมียม นิเกิล เป็นต้น
- 2) สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่น ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) สังกะสีออกไซด์ (ZnO) เป็นต้น

สำหรับโลหะทรานซิชันนั้นเมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอนทำให้อิเล็กตรอนขึ้นไปอยู่ในสถานะกระตุ้น (Excited state) อิเล็กตรอนจะกลับสู่สถานะพื้น (Ground state) ได้ง่ายและรวดเร็วกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดสารกึ่งตัวนำ เพราะในโลหะทรานซิชันนั้นจะไม่มีแถบพลังงานระหว่างแถบคอนดักชัน (Conduction band) และแถบวาเลนซ์ (Valance band) ซึ่งจะส่งผลให้อัตราการรวมตัวกันระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลนั้นมีค่าสูง จึงทำตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดโลหะทรานซิชันนั้นไม่เป็นที่นิยมในการนำมาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก ในทางกลับกันตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดสารกึ่งตัวนำได้รับความนิยมน้อยกว่าหลาย ซึ่งก็มีสารกึ่งตัวนำหลายชนิดมากที่มีการนำมาใช้ เช่น กราไฟติกคาร์บอนไนไตรต์

นอกจากนั้นได้มีการศึกษาเปรียบเทียบสารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกในสภาพที่ต่างสถานะกัน ซึ่งสามารถพิจารณาได้ 2 สถานะดังนี้

- 1) สถานะสารแขวนลอย (Slurry) เป็นการนำสารกึ่งตัวนำมาผสมกับสารละลายอินทรีย์โดยใช้สารกึ่งตัวนำในสถานะที่เป็นสารแขวนลอยในการใช้สารกึ่งตัวนำในสภาพนี้จะพบปัญหาว่ามีการแยกตัวระหว่างสารกึ่งตัวนำกับน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว
- 2) สถานะสารเคลือบผิว (Immobilize) เป็นการนำสารกึ่งตัวนำไปเคลือบบนตัวกลางหรือบนผิวของถังปฏิกิริยา โดยการใช้สารกึ่งตัวนำในสถานะนี้จะทำได้สะดวกกว่าในสถานะสารแขวนลอย เพราะไม่มีการแยกกันของสารกึ่งตัวนำกับน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว

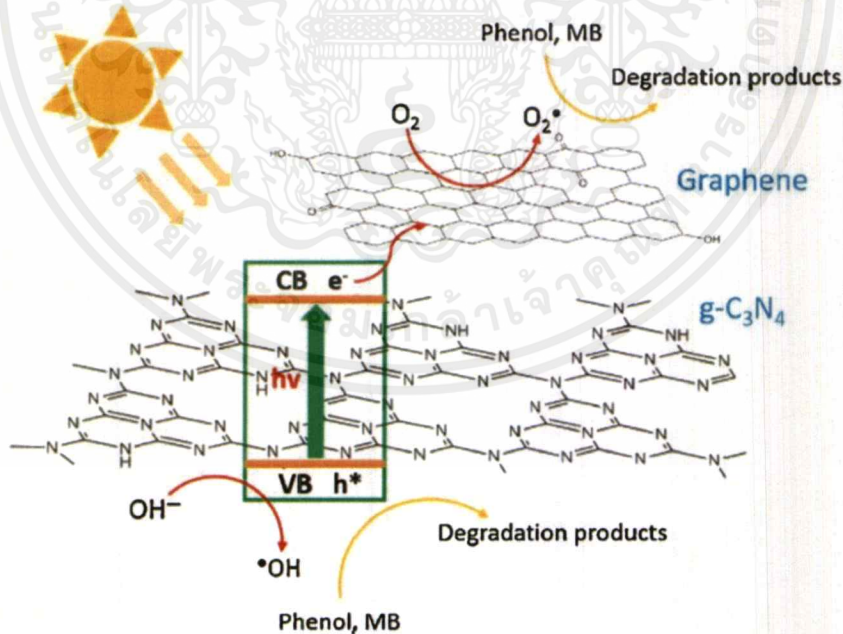
2.2.3 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกนั้นจะมีองค์ประกอบของโลหะทรานซิชันและสารกึ่งตัวนำ โดยจะประกอบด้วยแถบวาเลนซ์ และแถบคอนดักชัน ซึ่งในโลหะทรานซิชันนั้นจะมีแถบวาเลนซ์และแถบคอนดักชันที่ติดกัน แต่ในสารกึ่งตัวนำนั้นแถบวาเลนซ์และแถบคอนดักชันจะไม่ติดกันโดยจะถูกคั่นด้วยระดับชั้นพลังงาน เมื่ออิเล็กตรอน (Electron, e^-) ที่อยู่ในแถบวาเลนซ์เมื่อได้รับพลังงานโดยการฉายแสงด้วยพลังงานแสงที่มีพลังงานมากกว่าแถบพลังงานของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำซึ่งจะถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่ไปยังแถบคอนดักชันจึงทำให้เกิดโฮล (Hole, h^+) ในบริเวณแถบวาเลนซ์ โดยที่โฮลซึ่งมีประจุเป็นประจุบวกจะสามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระในแถบวาเลนซ์ ส่วนแถบคอนดักชันอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่มาจากแถบวาเลนซ์ก็จะเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระทั่วแถบคอนดักชันเช่นกัน ปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนกับโฮล (Electron-hole, e^-/h^+ pairs) ซึ่งการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำนี้สามารถเกิดขึ้นได้ 2 แบบคือ อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากแถบคอนดักชันไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยังตัวรับอิเล็กตรอนในสารละลายเกิดเป็นปฏิกิริยารีดักชัน และอีกวิธีหนึ่งคืออิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากตัวให้อิเล็กตรอนในสารละลายไปยังแถบวาเลนส์เกิดเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันในกระบวนการทำปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสนั้นจะเน้นความสำคัญไปยังการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในแถบวาเลนส์มากกว่าปฏิกิริยาที่เกิดให้แถบคอนดักชัน โดยการกลับมารวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนกับโฮลจะสามารถเกิดขึ้นได้ง่ายและรวดเร็วจนทำให้กลายเป็นตัวขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพของกระบวนการทำปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสนั้นลดต่ำลง ในตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะทรานซิชันนั้นการกลับมารวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนกับโฮลจะสามารถเกิดได้ง่ายและรวดเร็วเพราะว่าไม่มีแถบพลังงานและไม่มีช่องว่างระหว่างระดับชั้นพลังงานคั่นเหมือนกับสารกึ่งตัวนำ ส่งผลให้คู่ e^-/h^+ แยกจากกันได้ไม่นาน ข้อแตกต่างของพลังงานช่องว่างระหว่างระดับชั้นพลังงานของโลหะตัวนำ สารกึ่งตัวนำ และฉนวนแยกได้ยากโดย จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายปัจจัย ได้แก่ ระดับพลังงานช่องว่างระหว่างระดับชั้นพลังงาน ระดับพลังงานในแถบคอนดักชัน และระดับพลังงานในแถบวาเลนส์

เมื่อเกิดคู่อิเล็กตรอนกับโฮลขึ้น โดยโฮลจะเคลื่อนที่ไปอยู่บริเวณผิวของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งแสดงไว้ ดังรูปที่ 2.2 และจะกลายเป็นตัวออกซิแดนซ์ที่รุนแรงซึ่งสามารถทางการออกซิแดนซ์สารอินทรีย์ได้โดยตรงหรือทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไฮดรอกไซด์ไอออนจนเกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl radical, OH^\bullet) โดยไฮดรอกซิลเรดิคัลที่ได้นี้จะไปทำการออกซิเดซ์กับสารอินทรีย์อีกครั้ง ซึ่งถือเป็นปฏิกิริยาที่สำคัญ



รูปที่ 2.2 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตคะตะติก [10]

การบำบัดสารอินทรีย์



การกระตุ้น

การเกิดเรดิคอลลจาก e^- / h^+ 

การรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮล (Electron - Hole recombination)



- เมื่อ h^+ คือ โฮลที่แถบวาเลนส์ (Valence band hole)
 e^- คือ อิเล็กตรอน (Electron)
 OH° คือ ไฮดรอกซิลเรดิคอล (Hydroxyl radical)
 $\text{O}_2^{\circ-}$ คือ ซุปเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคอล (Superoxide ion radical)
 OH_2° คือ เปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคอล (Perhydroxyl radical)
 H° คือ ไฮโดรเจนเรดิคอล (Hydrogen radical)

2.2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลติก

2.2.4.1 ปัจจัยภายนอก (Extrinsic parameter) ได้แก่

ความเข้มแสงและความยาวคลื่นแสง ที่ใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกจะสัมพันธ์กับแถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาในการกระตุ้นอิเล็กตรอนและโฮล ความเข้มแสงที่เหมาะสมต่อการกระตุ้นอาจจะอยู่ในช่องแสงวิสิเบิลหรือแสงอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งขึ้นอยู่กับแถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยา

อุณหภูมิของปฏิกิริยา อัตราการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกสามารถเกิดในอัตราที่ต่ำหากอุณหภูมิในปฏิกิริยาสูงหรือต่ำเกินไป การรวมตัวกันใหม่ของคู่อิเล็กตรอน-โฮลจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วและเกิดเป็นความร้อน และส่งผลให้การดูดซับบริเวณผิวลดลง

ค่าพีเอชของสารละลาย มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าประจุบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งค่าประจุบนพื้นผิวส่งผลต่อการดูดซับสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ พีเอชที่เปลี่ยนแปลงไปสามารถเพิ่มหรือลดปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งส่งผลต่อการเกิดไฮดรอกซิลเรดติคอลล นอกจากนี้แล้วค่าพีเอชยังมีผลต่อค่าความเสถียรในการกระจายตัวของสารละลายผสมระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาและสารประกอบอินทรีย์

ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา หากมีมากเกินไปจะทำให้แสงที่ส่องผ่านไปยังตัวเร่งปฏิกิริยา ลดลงเนื่องจากมีความทึบแสงมากทำให้ความสามารถในการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกลดลง

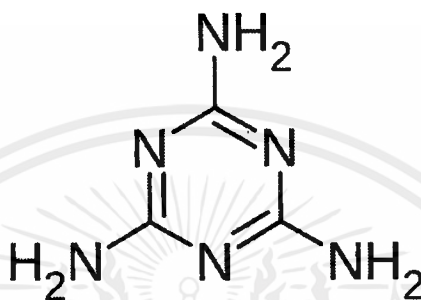
2.2.4.2 ปัจจัยภายใน (Intrinsic parameter) ได้แก่

ขนาดอนุภาค และพื้นที่ผิวเป็นส่วนสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะไลติก โดยที่ขนาดอนุภาคเล็กในระดับนาโนจะมีพื้นที่ผิวมาก ซึ่งเป็นข้อดีในการนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากสารประกอบอินทรีย์ที่เป็นมลพิษทางน้ำอาจสามารถดูดซับที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้มาก ทำให้มีประสิทธิภาพในการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกได้ดีกว่าอนุภาคที่มีพื้นที่ผิวน้อย

2.3 เมลามีน (Melamine) [16]

2.3.1 ข้อมูลเบื้องต้นของเมลามีน

เมลามีนเป็นไตรเมอร์ (สารประกอบที่เกิดจากโมเลกุล 3 ตัวที่เหมือนกันแต่เป็นสามขา) ของไซยานาไมด์ (cyanamide) เช่นเดียวกันกับไซยานาไมด์ เมลามีนถูกสังเคราะห์ขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1834 โดย Justus Von Liebig โดยการให้ความร้อนแคลเซียมไซยานาไมด์ (Calcium cyanamide, CaCN_2) จนถึงจุดหลอมเหลว ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแอมโมเนียและเมลามีน



รูปที่ 2.3 สูตรโครงสร้างของเมลามีน [17]

เมลามีนมีสูตรเคมีเป็น $\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6$ ชื่อตามระบบ IUPAC คือ 1,3,5-triazine-2,4,6-triamine ชื่อสามัญ 2,4,6-Triamino-s-triazine Cyanurotriamide Cyanurotriamine Cyanuramide มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 126.12 g/mol ความหนาแน่น 1574 kg/m³ จุดหลอมเหลวที่ 350 °C, 662 °F, 623 K และมีลักษณะทางกายภาพเป็นของแข็งสีขาว

โครงสร้างของเมลามีนประกอบด้วยไนโตรเจน 66% (โดยมวล) สามารถละลายน้ำได้เพียงเล็กน้อย มีความสามารถในการละลายน้ำ 3.1 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เมลามีนจึงเป็นสารที่มีคุณสมบัติทนไฟเมื่ออยู่ในรูปของเรซินด้วยการปลดปล่อยไนโตรเจนออกมาเมื่อถูกไหม้หรือถูกเผา มีการนำเอา Dicyandiamide (หรือ cyanoguanidine) ที่เป็นไดเมอร์ (dimer) ของไซยานาไมด์มาใช้เป็นสารทนไฟเช่นกันเนื่องจากโครงสร้างของเมลามีนมีหมู่ฟังก์ชันคือเอมีน (-NH₂) เมลามีนจึงแสดงสมบัติเป็นเบสอินทรีย์



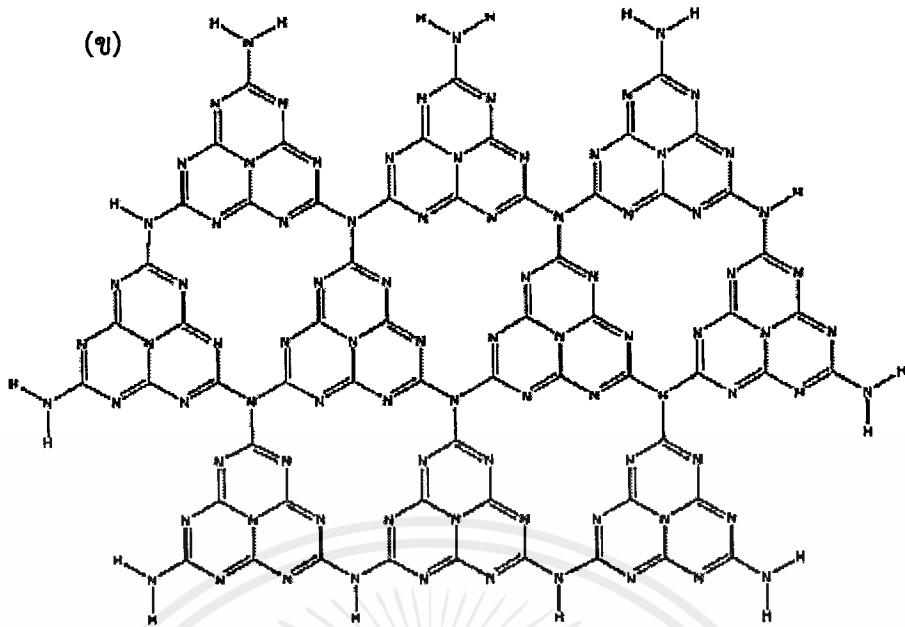
รูปที่ 2.4 ผงเมลามีน [18]

2.4 กราฟิติคาร์บอนไนไตรด์ (Graphitic carbon nitride, $g\text{-C}_3\text{N}_4$) [19]

2.4.1 ข้อมูลเบื้องต้นของกราฟิติคาร์บอนไนไตรด์

กราฟิติคาร์บอนไนไตรด์ ($g\text{-C}_3\text{N}_4$) คือ วัสดุที่เป็นสัณฐานหนึ่งของสารประกอบคาร์บอนไนไตรด์ วัสดุชนิดนี้ประกอบไปด้วยอะตอมคาร์บอนและไนโตรเจนที่มีการจัดเรียงตัวเป็นแผ่นและเรียงซ้อนกันคล้ายคาร์บอนกราฟิต โดยที่ในแต่ละแผ่นจะมีลักษณะการต่อเชื่อมโยงกันของหน่วยเล็กๆ ดังรูปที่ 2.5





รูปที่ 2.5 การเชื่อมต่อหน่วยย่อยต่างๆในระนาบ 2 มิติเพื่อสร้างเป็นแผ่นกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ โดยหน่วยเล็กๆ ที่เชื่อมต่อกันสามารถเป็น (ก) เอส-ไตรอะซีน และ (ข) ไตร-เอส-ไตรอะซีน [19]

หน่วยเล็กๆที่ต่อกันเป็นเครือข่าย 2 มิตินี้ได้แก่ เอส-ไตรอะซีน หรือ ไตร-เอส-ไตรอะซีน วัสดุกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์นี้มีความแข็งแรงมากโดยพิจารณาจากค่ามอดูลัสของยังหรือบัลก์มอดูลัส นอกจากเรื่องความแข็งแรงแล้ววัสดุกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์นี้ยังมีคุณสมบัติด้านอื่นๆที่น่าสนใจอีกมากมาย

2.4.2 คุณสมบัติและการนำไปใช้

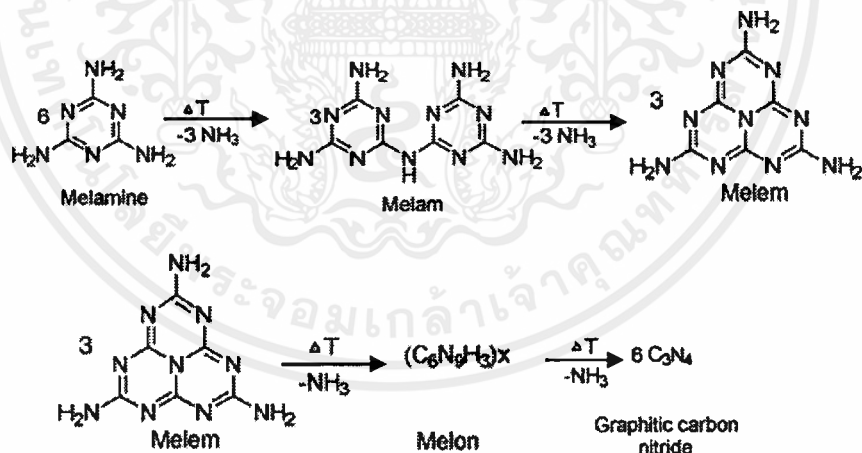
ในปัจจุบันวัสดุกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ได้รับความสนใจอย่างมากเนื่องจากคุณสมบัติที่เด่นๆ เช่นเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวสูง มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและความร้อนสูง เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีความห่างของแถบพลังงานที่เหมาะสมในการดูดกลืนพลังงานคลื่นแสงในช่วงยูวี-วิสิเบิลทำให้สามารถนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีโดยการกระตุ้นด้วยแสงซึ่งเป็นสมบัติที่โดดเด่นกว่าวัสดุท่อคาร์บอนนาโนและกราฟีน

ตัวอย่างการใช้งานของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ได้แก่การนำไปเป็นตัวเร่งโดยใช้แสงในการย่อยสลายแก๊สมลพิษไนตรัสออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ การใช้เป็นตัวเร่งโดยใช้แสงแยกโมเลกุลน้ำในเซลล์เชื้อเพลิง การใช้เป็นเซนเซอร์ของแก๊สชนิดต่างๆและใช้เป็นวัสดุขั้วพอร์ตสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆที่นำมาผสมบนวัสดุกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์มีได้หลากหลายประเภทเช่น โลหะ เกลือของโลหะ เมทัลออกไซด์ เมทัลซัลไฟด์ เป็นต้น กราไฟต์คาร์บอนไนไตรด์เชิง-

พาณิชย์มีวางจำหน่ายภายใต้ชื่อแบรนด์ Nicanite ในรูปแบบ กราไฟติกขนาดไมครอนมันสามารถใช้สำหรับการเคลือบ tribological การเคลือบทางการแพทย์ที่เข้ากันได้ทางชีวภาพ การเคลือบผิวทางเคมี ฉนวนและสำหรับโซลูชันการจัดเก็บพลังงาน กราไฟต์คาร์บอนไนไตรด์มีรายงานว่าเป็นหนึ่งในวัสดุเก็บไฮโดรเจนที่ดีที่สุด นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นตัวรองรับนาโนตัวเร่งปฏิกิริยาได้ [20]

2.4.3 การสังเคราะห์กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์

การสังเคราะห์วัสดุกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์นั้นทำได้หลากหลายวิธีโดยส่วนใหญ่จะเป็นปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของสารตั้งต้นต่างๆ เช่น ไซยานาไมด์ ไดไซยาโนกวินดีน เมลามีนหรือปฏิกิริยาการให้ความร้อนแก่ ยูเรีย แต่วิธีที่ง่ายและประหยัดเวลา คือ กระบวนการควบแน่นด้วยความร้อน ซึ่งเราก็นิยมกระบวนการนี้เพราะมันทำได้ง่าย โดยเริ่มจากการใช้สารตั้งต้นที่เป็นแหล่งของ C และ N ยกตัวอย่างเช่น เมลามีน แอมโมเนีย เป็นต้น ซึ่งสามารถเกิดได้ดังนี้ ในระหว่างการให้ความร้อนเมลามีนเป็นที่ทราบกันว่าได้รับการควบแน่นของไอน้ำด้วยการปลดปล่อยแอมโมเนียซึ่งเป็นสารเจือจางและสร้างผลิตภัณฑ์เช่น Melam, Melem และ Melon ผลิตภัณฑ์เหล่านี้ก่อตัวเป็น charlayer และมีความเสถียรมากกว่าเมลามีน (melam~350°C, melem~450°C และ melon ~600°C) Melem และ Melon เกิดที่อุณหภูมิสูง จากนั้นกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ก็ผลิตภายใต้การให้ความร้อนดังรูปที่ 2.6 [21]



รูปที่ 2.6 ภาพแสดงกลไกการสังเคราะห์กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ [21]

แต่อย่างไรก็ตาม ถ้าเกิดเราเตรียมแบบนี้เนื่องจากมันเอามาซ้อนทับกัน ดังนั้นลักษณะ สมบัติบางอย่างต่ำลงก็ได้ แล้วมันจะมีอะไรไหมที่จะมาช่วยเพิ่มรูพรุนแก่กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ ซึ่งจากงานวิจัยของ Waheed Iqbal และคณะ (2017) [6] เค้กก็สนใจที่จะใช้แป้งเพื่อมาเพิ่มรูพรุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

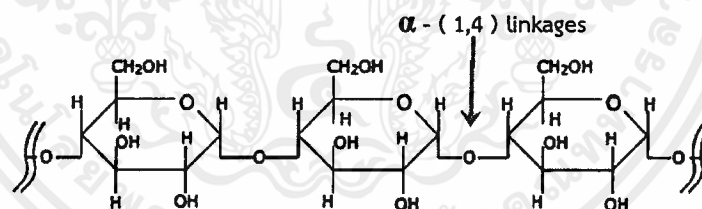
2.5 แป้งข้าวโพด [22]

2.5.1 องค์ประกอบทางเคมีของเม็ดแป้ง

แป้งเป็นโพลิเมอร์ของกลูโคสที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่มีสูตรทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ แป้งมีหน่วยพื้นฐานเป็น anhydroglucose unit เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -glycosidic linkage ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ของหน่วยกลูโคสกับคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 ของหน่วยกลูโคสที่อยู่ถัดไป ด้านปลายของโมเลกุลแป้งจะมี anomeric carbon (C1) ซึ่งว่างอยู่ไม่ได้จับกับโมเลกุลอื่นๆ ดังนั้นแต่ละโมเลกุลของแป้งจะมีด้านปลาย ที่มีคุณสมบัติรีดิวซ์ (reducing end) นั่นคือ แป้งหนึ่งโมเลกุลจะมีตำแหน่ง reducing end 1 ตำแหน่ง โมเลกุลแป้งแบ่งออกเป็น 2 ชนิดหลักๆ ตามขนาดโมเลกุลและลักษณะการจัดเรียงตัว คือ อะไมโลส ซึ่งมีขนาดเล็กและมีกิ่งก้านสาขาเพียงเล็กน้อย และอะไมโลเพคตินซึ่งมีขนาดใหญ่และมีกิ่ง ก้าน สาขา มาก มาย (รายละเอียดอยู่ในหัวข้อถัดไป) นอกจากนี้ยังพบโมเลกุลแป้งอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งมี ขนาดใหญ่ กว่าอะ-ไมโลสแต่เล็กกว่าอะไมโลเพคติน เรียกว่า “intermediate material” แต่พบในปริมาณไม่มากนัก

2.5.2 อะไมโลส (amylose)

อะไมโลสเป็นโพลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 1,000 – 6,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1, 4 –glycosidic linkage อาจพบกิ่งก้านสาขาในโมเลกุลของอะไมโลสได้บ้างในปริมาณเล็กน้อย



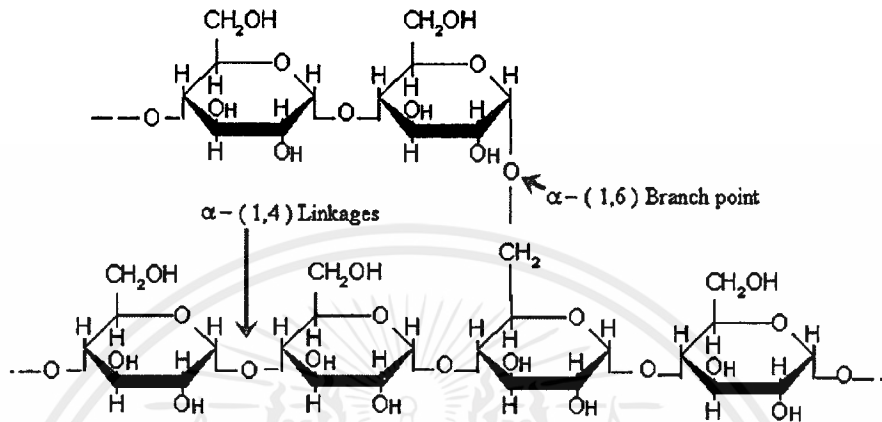
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของอะไมโลส [23]

โดยทั่วไปแป้งจากธัญพืช เช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี แป้งข้าวฟ่าง มีปริมาณอะไมโลสสูงประมาณ 22-30% ส่วนแป้งจากรากและหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง แป้งสาकुจะมีปริมาณอะไมโลสต่ำกว่าคืออยู่ในช่วง 18-24% น้ำหนักโมเลกุลอะไมโลสอยู่ในช่วง 105 ถึง 106 ดาลตัน โดยอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันไป เนื่องจากแป้งแต่ละชนิดมี degree of polymerization (DP) ของอะไมโลสแตกต่างกัน แป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังมี DP ของอะไมโลส อยู่ในช่วง 1,000 ถึง 6,000 สูงกว่าแป้งข้าวโพดและแป้งสาลีซึ่งมี DP ของอะไมโลสในช่วง 200 ถึง 1,200 แป้งที่มีสายของอะไมโลส ยาวมากจะมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรดชัน (retrogradation) ลดลง [Hizukuri, 1988] ปริมาณและสมบัติของอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3 อะไมโลเพคติน (amylopectin)

อะไมโลเพคตินเป็นโพลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1, 4-glycosidic linkage และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นโพลิเมอร์กลูโคสสายสั้นมี DP อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1, 6-glycosidic linkage ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน [23]

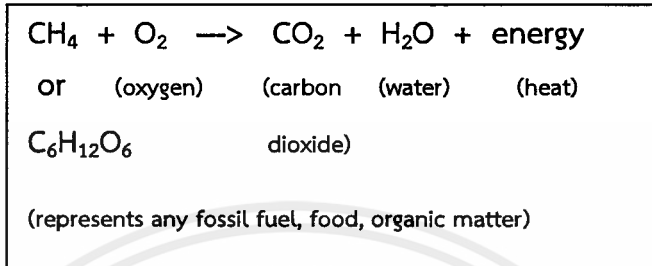
หน่วยกลูโคสที่มีพันธะ α -1, 6-glycosidic linkage มีอยู่ประมาณ 5% ของปริมาณหน่วยกลูโคสในอะไมโลเพคตินทั้งหมด อะไมโลเพคตินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของอะไมโลส คือ ประมาณ 107 ถึง 109 ดาลตัน และมีการคืนตัวต่ำ เนื่องจากอะไมโลเพคตินมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่ง อะไมโลเพคตินทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักของเม็ดแป้ง ดังนั้นเมื่อมีอะไมโลเพคตินเพียงอย่างเดียว จึงยังสามารถรวมตัวเป็นเม็ดแป้งได้

ตารางที่ 2.1 สมบัติที่แตกต่างกันของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน [22]

อะไมโลส	อะไมโลเพคติน
1. ประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสที่ต่อกันเป็นเส้นตรงด้วย พันธะ α -1,4	1. ประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสที่ต่อกันด้วย พันธะ α -1,4 และมีการแตกกิ่งด้วยพันธะ α -1,6
2. ประกอบด้วยกลูโคส 200-6000 หน่วย	2. แต่ละกิ่งมีกลูโคส 20-25 หน่วย
3. ละลายน้ำได้น้อยกว่า	3. ละลายน้ำได้ดีกว่า
4. เมื่อต้มในน้ำจะมีความข้นหนืดน้อยลง	4. ข้นหนืดมากและใส
5. ให้สีน้ำเงินกับสารละลายไอโอดีน	5. ให้ม่วงแดงหรือน้ำตาลแดงกับสารละลายไอโอดีน
6. ต้มแล้วทิ้งไว้จะจับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็งได้	6. ไม่จับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็ง

2.5.4 การเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ของแข็ง

การเผาไหม้เกิดขึ้นเมื่อสารอินทรีย์ใดๆ ถูกทำปฏิกิริยา (เผา) ภายใต้ ออกซิเจน เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และพลังงาน ดังรูปที่ 2.9 สารอินทรีย์สามารถเป็นเชื้อเพลิงฟอสซิลใดๆ เช่น ก๊าซธรรมชาติ (มีเทน) น้ำมันหรือถ่านหิน วัสดุอินทรีย์อื่นๆ ที่ติดไฟได้ เช่น ไม้ กระดาษ พลาสติกและ ผ้า เป็นต้น [24]

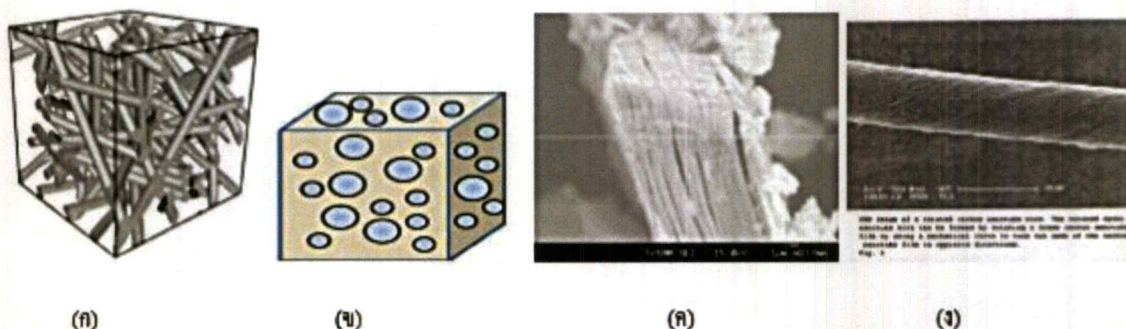


รูปที่ 2.9 การเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ของสารอินทรีย์ [25]

กระบวนการก่อตัวของแข็งก็ช่วยเพิ่มรูพรุนให้แก่กราฟิตคาร์บอนไนไตรด์ ในระหว่างการควบแน่นของเมลามีนในรูปแบบกราฟิตคาร์บอนไนไตรด์ แข็งสลายและทำหน้าที่เป็นเทมเพลตก๊าซแบบไดนามิกเพื่อปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์พร้อมกับแอมโมเนียซึ่งประกอบด้วยหลุมจำนวนมากในแผ่นนาโนกราฟิตคาร์บอนไนไตรด์ ดังนั้น การที่มันแทรกอยู่ในตัวสารตั้งต้นของเรา เวลามันถูกเผาออกไปมันก็จะทำรูพรุนเกิดขึ้นเหมือนกัน [6]

2.6 วัสดุรูพรุน (Porous Materials) [26]

วัสดุรูพรุนมีประโยชน์มากมายทั้งในงานทางวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม เช่น เป็นตัวคะตะลิสต์ สารดูดซับ เซ็นเซอร์ หรืออาจนำไปใช้ในเครื่องมือไมโครอิเล็กทรอนิกส์ รูพรุนสามารถแบ่งได้เป็นสองแบบคือ รูพรุนที่เป็นแบบเปิดและรูพรุนที่เป็นแบบปิด โดยรูพรุนแบบเปิดจะมีการเชื่อมต่อระหว่างรูพรุนและผิวของวัสดุ ส่วนรูพรุนแบบปิดรูพรุนจะปิดและแยกออกจากภายนอก ดังนั้นในการนำวัสดุรูพรุนไปใช้ในงานด้านต่างๆ เช่น ตัวดูดซับ คะตะลิสต์ และเซ็นเซอร์นั้น จะสามารถใช้งานได้เฉพาะในวัสดุที่มีรูพรุนเป็นแบบเปิดเท่านั้น โครงสร้างและสัณฐานของรูพรุนสามารถแบ่งได้หลายแบบ เช่น แบบทรงกระบอก แบบทรงกลม และแบบที่เป็นแผ่น เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีรูพรุนแบบที่เป็นทรงที่ซับซ้อน เช่น รูพรุนแบบหกเหลี่ยม ในรูพรุนอาจเป็นแบบเส้นตรง หรือ โค้ง หรือ เป็นรูพรุนแบบที่ปิดเป็นเกลียว



รูปที่ 2.10 รูพรุนรูปแบบต่างๆ (ก) แบบทรงกระบอก (ข) แบบทรงกลม (ค) แบบที่เป็นแผ่น และ (ง) แบบที่บิดเป็นเกลียว [26]

วัสดุรูพรุนสามารถแบ่งตามขนาดของรูพรุนได้ตามนิยามของสหภาพเคมีบริสุทธิ์และเคมีประยุกต์ระหว่างประเทศ (International Union of Pure and Applied Chemistry) หรือ IUPAC โดยสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทคือ

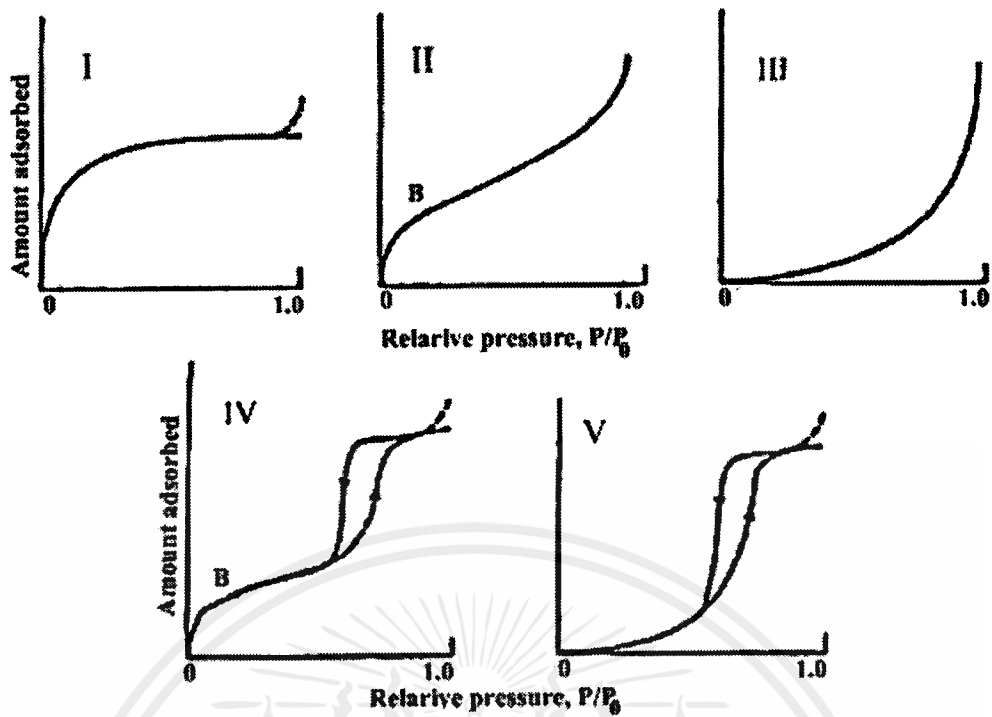
1. ไมโครพอร์ส (Microporous) เป็นรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 2 นาโนเมตร
2. เมโซพอร์ส (Mesoporous) เป็นรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 2 – 50 นาโนเมตร
3. แมโครพอร์ส (Macroporous) เป็นรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 50 นาโนเมตร

2.6.1 สมดุลและไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption equilibrium and adsorption isotherm)

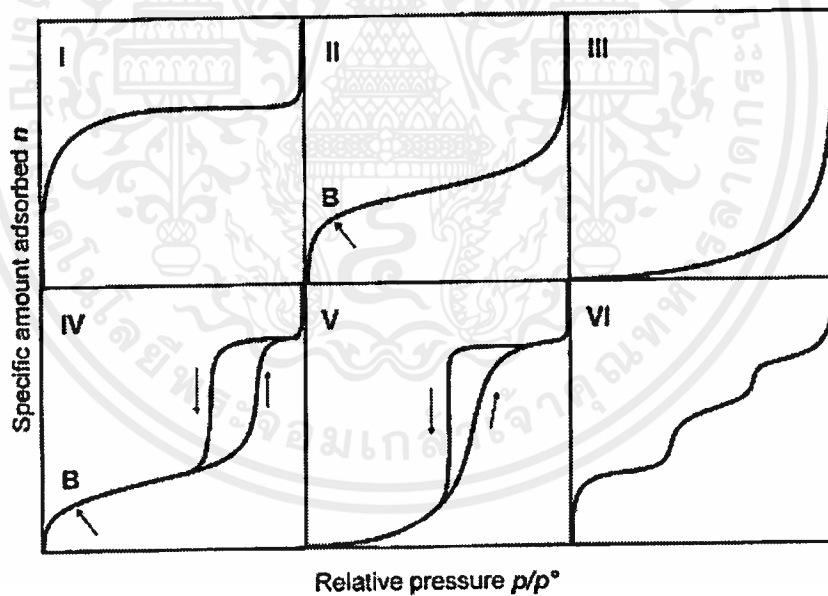
2.6.1.1 สมดุลของการดูดซับ (Adsorption equilibrium) คือ กระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นไปเรื่อยๆ โดยที่สารที่ถูกดูดซับจะถูกดูดซับและคายไปพร้อมๆกัน จนกว่าอัตราการดูดซับและอัตราการคายจะเท่ากัน ซึ่งจะทำให้เกิดสภาวะสมดุล เรียกว่าสมดุลของการดูดซับ

2.6.1.2 ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Isotherm) คือ ความสัมพันธ์ระหว่างความดันย่อยของตัวถูกดูดซับ โดยมักใช้ค่าความดันสัมพัทธ์ $P/P_0 = 0$ จนถึงอนันต์ เมื่อ $P/P_0 = 1$ ซึ่งเป็นจุดที่ผิวหน้าเปียกอย่างสมบูรณ์ นั่นคือการเกิดการควบแน่นของไอของโมเลกุลที่มาดูดซับ ไอโซเทอมการดูดซับมีหลายแบบแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของสารดูดซับ ชนิดสารที่ถูกดูดซับและอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลกับพื้นผิวของสารดูดซับ ในปีค.ศ.1940 ได้มีการจำแนกไอโซเทอมการดูดซับของสมดุลวัฏภาคแก๊สกับของแข็งขึ้นโดย Brunauer, Deming, Deming และ Teller เรียกว่า BDDT ได้แบ่งลักษณะไอโซเทอมการดูดซับออกเป็น 5 แบบ ดังรูปที่ 2.11 (Wang et al., 2012) ซึ่งการแบ่งประเภทไอโซเทอมการดูดซับของ BDDT ได้เป็นหลักในการแบ่งประเภทไอโซเทอม

การดูดซับของ IUPAC และปัจจุบันได้มีการเสนอประเภทไอโซเทอมการดูดซับเพิ่มอีก 1 ประเภท ซึ่งทำให้ไอโซเทอมการดูดซับของ IUPAC สมบูรณ์ เป็น 6 ประเภท ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 ประเภทไอโซเทอมการดูดซับพื้นฐาน 5 ชนิด [26]



รูปที่ 2.12 ประเภทไอโซเทอมของการดูดซับของ IUPAC [26]

ไอโซเทอมของการดูดซับทางกายภาพแต่ละประเภทอธิบายได้ดังนี้

1) แบบ I เป็นไอโซเทอมของการดูดซับลักษณะเฉพาะของสารดูดซับที่มีขนาดเล็กกว่า 2 nm (microporous adsorbent) การดูดซับส่วนใหญ่จะเป็นการดูดซับในรูพรุนขนาดเล็ก ลักษณะไอโซเทอมจะเป็นโค้งเข้า (concave) ทาแกน P/P_0 สารดูดซับมีขนาดใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่มาก สารดูดซับมีพื้นที่ผิวภายนอกน้อย ดังนั้นการดูดซับจะถูกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำกัดเนื่องจากไม่สามารถเข้าไปยังรูพรุนขนาดเล็กได้ การบรรจุโมเลกุลลงในรูขนาดเล็กของสารดูดซับนี้ อย่างสมบูรณ์และมีการอิมมัตว์ที่แน่นอนโดยเกิดการเรียงเป็นชั้นเดียว ไอโซเทอมแบบนี้บางครั้งเรียกว่า Langmuir หรือ L-shape isotherm

2) แบบ II เป็นรูปแบบปกติของไอโซเทอมที่เกิดในสารดูดซับที่ไม่มีรูพรุน (nonporous) หรือตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (microporous) โดยในแบบนี้จะเกิดการดูดซับที่ต่อเนื่องจากการเรียงตัวโมเลกุลเพียงชั้นเดียว (monolayer) อย่างสมบูรณ์ก่อนจึงเกิดเป็นหลายชั้น (multilayer) ในต่อมาจากไอโซเทอมตรงบริเวณจุดเปลี่ยนโค้งหรือจุด B (break through) จะแสดงถึงการดูดซับแบบชั้นเดียวนั้นเสร็จสมบูรณ์จากนั้นที่ความดันสูงขึ้นจะเกิดการดูดซับที่ต่อเนื่องจากชั้นแรกต่อไป และจะเกิดการดูดซับเสร็จสมบูรณ์ที่ความดันย่อยสูงๆ ไอโซเทอมแบบนี้บางครั้งเรียกว่า Sigmoid หรือ S-shape isotherm

3) แบบ III เป็นรูปแบบของการดูดซับที่มีแรงดึงดูดที่อ่อนระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ แต่แรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันมีค่อนข้างมาก จากกรณีนี้จะทำให้เกิดการรวมตัวกันของตัวถูกดูดซับก่อนที่การดูดซับชั้นแรกจะเสร็จสมบูรณ์ในแบบที่ III จะมีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวสารดูดซับมากกว่าแบบ II ซึ่งเส้นกราฟจะโค้งออก (convex) จากแกน P/P_0 จำนวนสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างไม่จำกัด ซึ่งเป็นแบบพิเศษ

4) แบบ IV เป็นไอโซเทอมของการดูดซับที่มีรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลที่ถูกดูดซับมาก จึงเกิดการเรียงตัวของโมเลกุลที่ผิวของสารดูดซับเป็นสองชั้น (bilayer) ความชันของกราฟเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อความดันเพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่าตัวถูกดูดซับเริ่มเข้าเติมในรูพรุนอีกครั้ง และการเปลี่ยนระดับของกราฟเมื่อความดันเพิ่มขึ้นอีกเป็นผลมาจากการควบแน่นภายในรูพรุนของของแข็ง (Capillary Condensation in Pores) โดยลักษณะของกราฟในช่วงแรกจะเหมือนกับชนิดที่ 2 ซึ่งจุดเปลี่ยนโค้ง จะแสดงถึงการดูดซับชั้นแรกอย่างสมบูรณ์

5) แบบ V เป็นไอโซเทอมรูปแบบพิเศษ มีความคล้ายกับแบบ III เกิดขึ้นเมื่อแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับมีค่าน้อย ซึ่งจะพบในสารดูดซับที่มีขนาดรูพรุนในช่วงเดียวกับไอโซเทอมแบบ IV สำหรับไอโซเทอมแบบ III และแบบ V นี้จะคำนวณหาพื้นที่ผิวได้ยาก เนื่องจากชั้นการดูดซับชั้นที่ 2 จะถูกสร้างขึ้นก่อนที่ชั้นแรกจะเสร็จสมบูรณ์

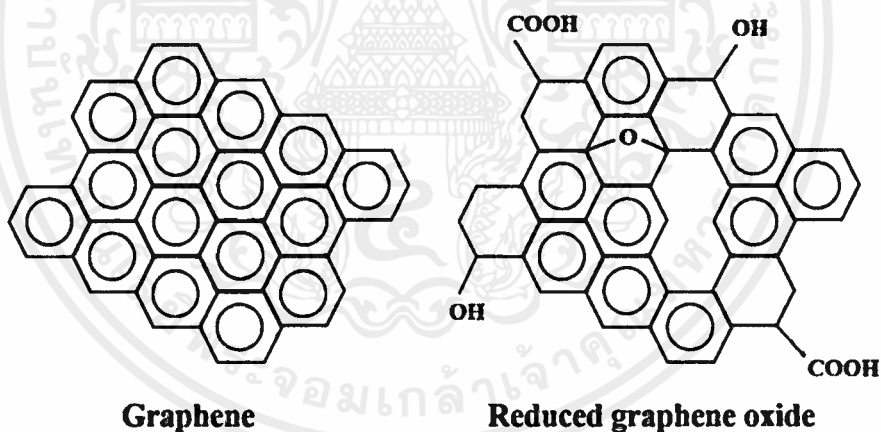
6) แบบ VI เป็นการดูดซับแบบ multilayer เป็นชั้นๆ ขึ้นบนผิวของ nonporous โดยความสูงของแต่ละชั้นจะเป็นความสามารถของ monolayer ในชั้นนั้นๆ

เนื่องจากการที่มันจะมีรูพรุนมากอย่างเดียวมันยังไม่พอเพราะช่องว่างระหว่างระดับชั้นพลังงานมันแคบมันเลยเกิดการกลับมารวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนกับโหนดได้ง่าย ดังนั้นเราก็หวังเป็นอย่างยิ่งว่าถ้าเกิดมีวัสดุอันนิ่งมารับอิเล็กตรอนจากแถบคอนดักชันของมัน มันก็น่าจะทำให้ลดการกลับมารวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนกับโหนดได้และปฏิกิริยาน่าจะเกิดได้ดีขึ้น เราเลยจะพัฒนาตัวเร่งนี้แหละโดยใช้วัสดุที่เรียกว่า กราฟีนออกไซด์

2.7 รีดิวิซ์กราฟีนออกไซด์ [27]

2.7.1 ข้อมูลพื้นฐานของกราฟีนและรีดิวิซ์กราฟีนออกไซด์

กราฟีน (Graphene) เป็นหนึ่งในอัญรูปของคาร์บอน (Carbon allotropes) ที่มีการจัดเรียงตัวในรูปร่างหกเหลี่ยม (Hexagon) รังผึ้งทั่วไป โดยคาร์บอนบนแผ่นกราฟีนมีการจัดเรียงตัวของออร์บิทัล (Orbital) แบบ sp^2 นั่นคือ คาร์บอน 1 ตัว ทำพันธะกับคาร์บอนตัวอื่นในระนาบเดียวกันอีก 3 ตัว ซึ่ง กราฟีนมีโครงสร้างลักษณะแบบเดียวกันกับกราฟไฟต์ (Graphite) แตกต่างกันตรงที่กราฟไฟต์จะเป็นการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของระนาบคาร์บอนซ้อนหน้ากันเป็นชั้นๆ มีโครงสร้างผลึก (Unit cell) แบบ เฮกซะโกนอล (Hexagonal) แต่กราฟีนคือแผ่นระนาบเพียงชั้นเดียวของกราฟไฟต์ ที่มีความหนาเพียง 0.335 นาโนเมตร นั่นทำให้กราฟีนเป็นวัสดุที่น้ำหนักเบา มีความแข็งแรงสูง เกือบโปร่งใส เนื่องจากมีความหนาน้อยมาก เป็นตัวนำความร้อนและนำไฟฟ้าได้ดี โดยกราฟีนบริสุทธิ์ถูกค้นพบโดย ดร.อังเดร เกม (Dr.Andre Geim) และ ดร.คอนสแตนติน โนโวเซลอฟ (Dr.Konstantin Novoselov) อาจารย์จากมหาวิทยาลัยแมนเชสเตอร์ (Manchester's university) ได้ใช้เทปกาวแปะทับกันเพื่อดึงลอกกราฟไฟต์ให้หลุดทีละชั้นจนได้แผ่นของกราฟีนที่มีความหนาเพียงคาร์บอนอะตอมเดียว ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีขั้นตอนยุ่งยากซับซ้อน ใช้เวลาในการผลิตสูง ยากต่อการผลิตเป็นจำนวนมากจึงทำให้กราฟีนมีราคาที่สูง



รูปที่ 2.13 เปรียบเทียบโครงสร้างระหว่างกราฟีนและรีดิวิซ์กราฟีนออกไซด์ [27]

รีดิวิซ์กราฟีนออกไซด์ (Reduced graphene oxide; rGO) คือกราฟีนที่เตรียมได้จากกระบวนการทางเคมี (Chemical process) โดยสามารถเตรียมได้ที่ละจำนวนมากจึงเหมาะสมต่อการผลิตในเชิงอุตสาหกรรม ถึงแม้รีดิวิซ์กราฟีนออกไซด์จะมีลักษณะเป็นแผ่นระนาบคาร์บอนชั้นเดียวเหมือนกับกราฟีนมาก ดังรูปที่ 2.13 ที่แสดงความแตกต่างกันตรงที่กราฟีนเป็นโครงสร้างที่มีแค่คาร์บอนและไฮโดรเจนเท่านั้น ทำให้กราฟีนมีสมบัติเป็นสารที่ไม่มีขั้ว (Non-polar) แต่รีดิวิซ์กราฟีนออกไซด์มีหมู่ฟังก์ชันของออกซิเจน เช่น หมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group; OH) หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl

group; COOH-) หรือหมู่อีพอกซี (Epoxy group) เป็นต้น โดยหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวจะอยู่รอบๆ ที่ขอบหรือระหว่างโครงสร้างในปริมาณเล็กน้อย ทำให้รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีสมบัติเป็นสารที่มีขั้ว (Polar) ซึ่งส่วนใหญ่มักอยู่ในลักษณะของสารแขวนลอยกับน้ำจึงสะดวกต่อการขนส่ง จัดเก็บ และนำไปใช้งาน

รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีลักษณะและคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับกราฟีน โดยสามารถสังเคราะห์ได้จาก กราฟีนออกไซด์ที่มีคุณสมบัติด้อยกว่าทั้งในด้านความแข็งแรง ความยืดหยุ่น ความโปร่งแสงหรือสมบัติการนำไฟฟ้า ซึ่งหากใช้กระบวนการรีดักชันทางความร้อนหรือทางเคมีได้ดี รวมไปถึงการใช้เวลาให้มากพอในการกำจัดหมู่ฟังก์ชันต่างๆ บนระนาบของกราฟีนออกไซด์ได้หมด ก็จะทำให้ได้กราฟีน แต่จะเป็นการสิ้นเปลืองทั้งเวลาและต้นทุนในการทำปฏิกิริยา จึงนิยมใช้กระบวนการสังเคราะห์สิ้นสุดลงที่การได้สารแขวนลอยสีดำของรีดิวซ์กราฟีน ที่มีคุณสมบัติแตกต่างเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกราฟีน แต่สามารถประหยัดต้นทุนและเวลาในการผลิตได้ดีกว่า

2.7.2 คุณสมบัติและการประยุกต์ใช้งานของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์หรือกราฟีนกำลังเป็นที่สนใจ จากทั้งนักวิจัยและอุตสาหกรรมต่างๆ ทั่วยุทธศาสตร์โลก เนื่องจากมีคุณสมบัติที่เด่นอยู่หลายประการ เช่น ความแข็ง ความยืดหยุ่น สมบัติการนำไฟฟ้า ความทนทานต่อสารเคมี หรือความโปร่งแสง เป็นต้น นั่นจึงสามารถประยุกต์ไปใช้ได้อย่างหลากหลาย โดย รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีคุณสมบัติที่สำคัญและการประยุกต์ใช้งาน ดังนี้

1. ด้านอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic properties) รีดิวซ์กราฟีนมีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำมาก นั่นจึงทำให้มีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดีมากจนเกือบเทียบเท่าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด (Superconductor) โดยมาจากการที่รีดิวซ์กราฟีนไม่มีช่องว่างพลังงานระหว่างชั้นวาเลนซ์และชั้นเหนี่ยวนำ ทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระทั่วยุทธศาสตร์โครงสร้าง ซึ่งสามารถประยุกต์ไปใช้ในด้านของแผงวงจรไฟฟ้า ทรานซิสเตอร์หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เป็นต้น

2. ความโปร่งแสง (Translucent properties) จากความบางของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นั้นจึงทำให้เป็นวัสดุที่มีความโปร่งแสงสูง แต่ขณะเดียวกันก็สามารถดูดซับแสงได้สูงถึงร้อยละ 2.3 ซึ่งมากกว่าวัสดุอื่นๆ ที่มีความโปร่งแสงเท่ากัน ด้วยการที่รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์เป็นวัสดุที่มีความใสสูงแต่สามารถดูดซับแสงได้ดี จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในด้านของแผงวงจรพลังงานอาทิตย์ ตัวตรวจจับแสง (Optical sensor) หรือ ไดโอดเปล่งแสง (Light emitting-diode) เป็นต้น

3. คุณสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีคุณสมบัติเชิงกลที่สูง โดยเฉพาะความแข็ง พบว่าที่ความหนาเทียบเท่ากับเหล็ก รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีความแข็งแรงสูงกว่าเป็นร้อยเท่า อีกทั้งยังมีความสามารถในการยืดหยุ่นได้สูง ซึ่งแตกต่างจากวัสดุอื่น ๆ ที่มีความแข็งแต่เปราะ จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในด้านการเสริมแรงให้แก่ชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์ ที่ต้องการทั้งความแข็งแรงและความยืดหยุ่น เช่น โทศัพท์มีถือหรือหน้าจอสกรีน เป็นต้น

4. คุณสมบัติเชิงความร้อน (Thermal properties) รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีความสามารถในการนำความร้อนได้ดี ซึ่งมาจากมีค่าการนำความร้อนจำเพาะที่สูง โดยสามารถนำความร้อนกระจาย

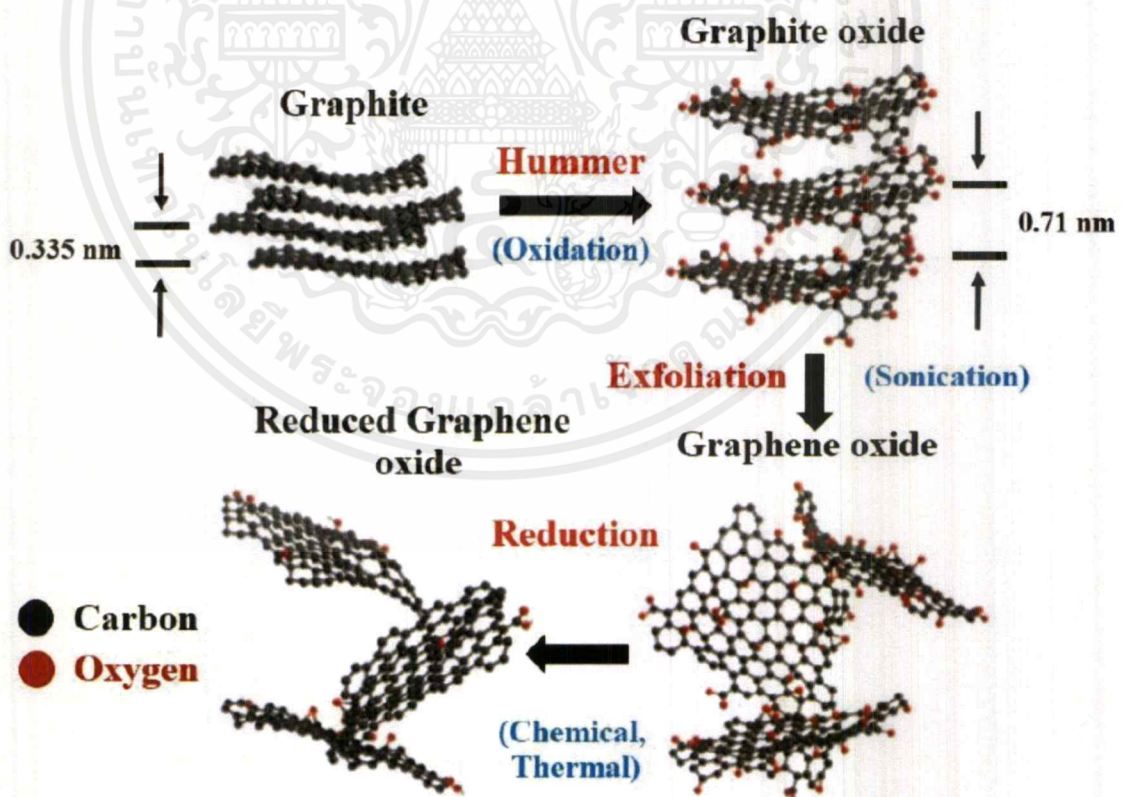
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ทุกทิศทางตามระนาบของแผ่นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ซึ่งเหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้ไปเป็นเครื่องจักรหรือชิ้นส่วนในโรงงานหรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อย่าง คอมพิวเตอร์ที่ต้องการความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้ดี ที่จะป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนสะสมในระบบสูงซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญให้เกิดการชำรุดของอุปกรณ์

5. คุณสมบัติทางเคมี (Chemical properties) รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์เป็นสารที่มีขั้ว สามารถละลายเข้ากันกับน้ำได้ มีความสามารถในการดูดซับได้สูง เนื่องจากมีรูพรุนในโครงสร้างเป็นจำนวนมากและมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง จึงสามารถประยุกต์ไปใช้เป็นเซลล์เยื่อเลือกผ่าน (Selective membrane) ในการกลั่นเอทานอล (Ethanol distillation) หรือ การแยกเกลือออกจากน้ำ นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นวัสดุในการตรวจจับแก๊ส (Gas sensor) อย่าง แอมโมเนีย เป็นต้น

2.7.3 การสังเคราะห์รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

การสังเคราะห์รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์สามารถสรุปได้ด้วยรูปที่ 2.14 โดยเริ่มจากการเปลี่ยนกราไฟต์ไปเป็นกราไฟต์ออกไซด์ (Graphite oxide) แล้วจึงเปลี่ยนต่อให้กลายเป็นกราฟีนออกไซด์ (Graphene oxide; GO) และเมื่อผ่านกระบวนการรีดักชันก็จะได้รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในขั้นตอนสุดท้าย ซึ่งกระบวนการสังเคราะห์ดังกล่าวจะมีขั้นตอนและวิธีการ ดังนี้



รูปที่ 2.14 กระบวนการสังเคราะห์จากกราไฟท์เป็นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ [27]

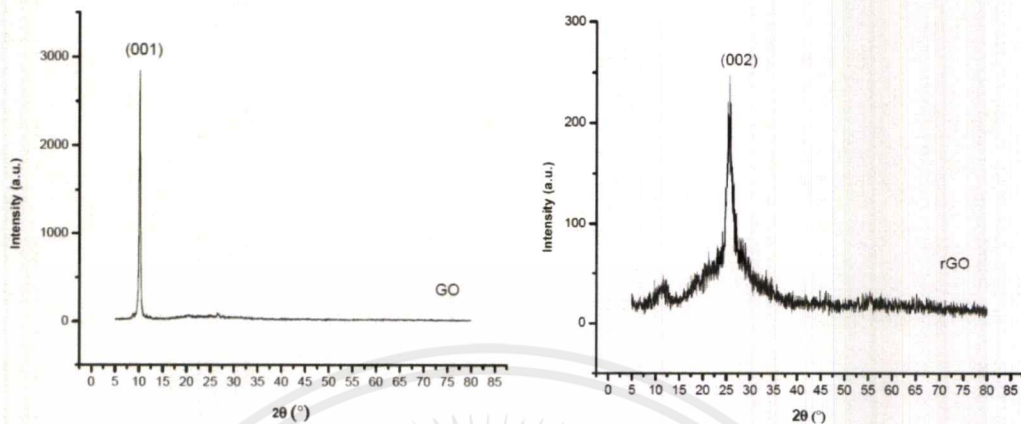
1. การสังเคราะห์กราฟไฟต์ออกไซด์ เป็นขั้นตอนในการเปลี่ยนผงดินสอหรือผงกราไฟต์ ให้ได้ ผงกราไฟต์ออกไซด์ ผ่านกระบวนการของฮัมเมอร์ (Hummer's method) ซึ่งเป็นกระบวนการดัดแปลง หมู่ฟังก์ชันให้แก่กราไฟต์ ด้วยการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันของออกซิเจน อย่างหมู่คาร์บอกซิล หมู่คาร์บอนิล หมู่ไฮดรอกซิล หมู่คีโตน หรือหมู่อีพอกซี แทรกในระหว่างชั้นทำให้ความกว้างระหว่างระนาบผลึก (D-spacing) ของกราไฟต์นั้นกว้างมากขึ้น โดยกระบวนการนี้จะใช้ตัวออกซิไดส์ที่รุนแรงอย่าง กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid; H_2SO_4) กรดไนตริก (Nitric acid; HNO_3) หรือ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium permanganate; $KMnO_4$) สำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในการดัดแปลงหมู่ฟังก์ชันดังกล่าว โดยผงกราไฟต์ออกไซด์มีลักษณะเป็นผงสีน้ำตาลแตกต่างจากผงกราไฟต์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้นที่มีสีดำ

2. การสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ เป็นขั้นตอนในการเปลี่ยนผงกราไฟต์ออกไซด์ให้ได้สารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ โดยการใช้กระบวนการคลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonication process) แทรกไประหว่างชั้นของกราไฟต์ออกไซด์ที่เกาะกันด้วยแรงแวนเดอวาลส์ (Van der Waals forcing) แล้วจึงหลุดออกมาเป็นแผ่นชั้นเดียวของกราฟีนออกไซด์ ทั้งนี้กระบวนการนี้เกิดขึ้นได้ก็เนื่องมาจากการดัดแปลงหมู่ฟังก์ชันด้วยกระบวนการฮัมเมอร์ทำให้ช่องว่างระหว่างชั้นของกราไฟต์กว้างมากขึ้น ส่งผลให้แรงแวนเดอวาลส์ที่เกาะกันระหว่างชั้นนั้นอ่อนลง เมื่อเจอความดันจากคลื่นความถี่สูงแทรกเข้ามาจะทำให้เกิดการแยกออกจากกันได้ง่ายขึ้น โดยสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์เป็นสารที่มีขั้ว จึงสามารถละลายน้ำได้เป็นอย่างดี เนื่องจากมีหมู่ฟังก์ชันต่างๆ เกาะอยู่ทั่วทั้งแผ่นระนาบของคาร์บอน

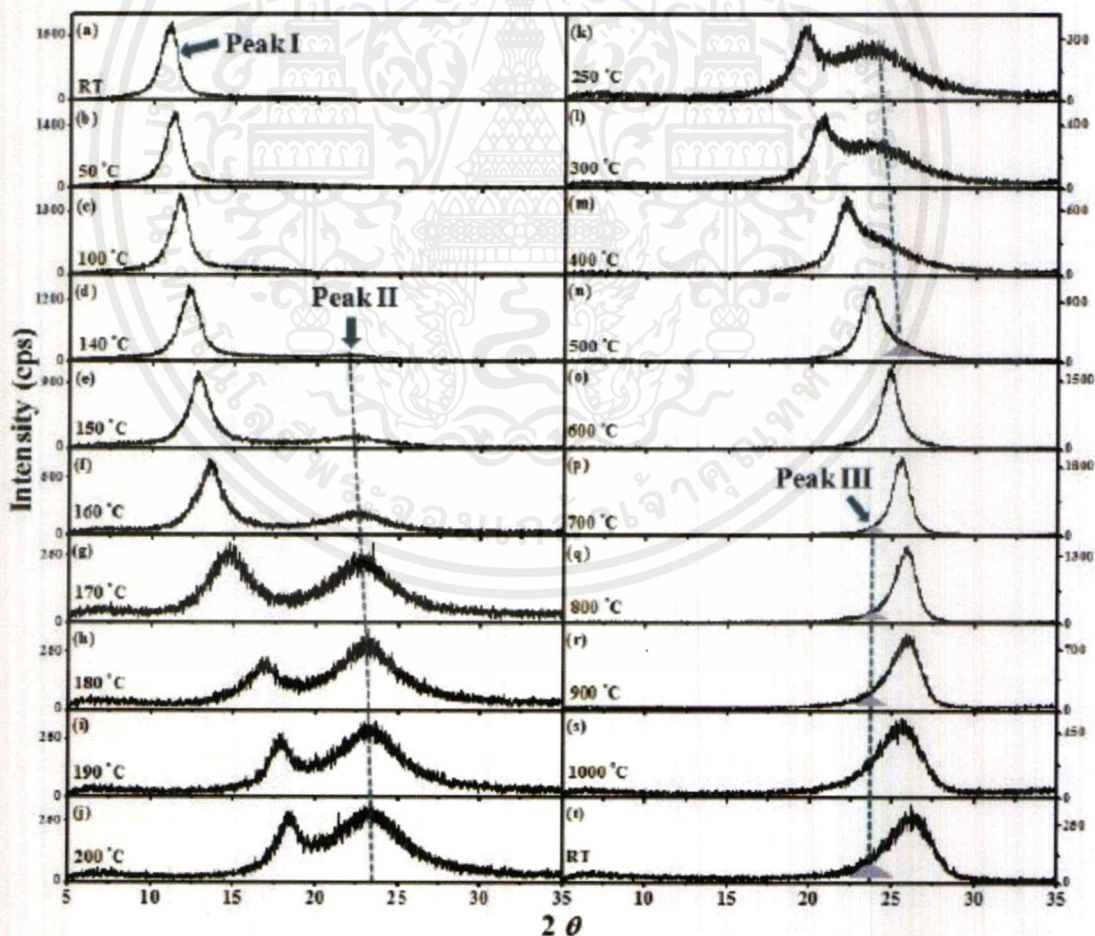
3. การสังเคราะห์รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ เป็นขั้นตอนในการรีดิวซ์สารแขวนลอยสีน้ำตาลของกราฟีนออกไซด์ ให้ได้สารแขวนลอยสีดำของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ โดยในกระบวนการรีดักชันนั้นสามารถทำได้อยู่ 2 วิธีหลักๆ ได้แก่ กระบวนการรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction) และ กระบวนการรีดักชันทางความร้อน (Thermal reduction) ในส่วนของกระบวนการรีดักชันทางความร้อน นั้นเป็นกระบวนการที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และไม่ต้องใช้สารเคมีที่เป็นอันตราย ในระหว่างการรีดิวซ์ของแกรฟีนออกไซด์ (GO) นี้ สารละลายสีเหลืองน้ำตาลค่อยๆ ถูกถ่ายโอนเป็นตะกอนสีดำของรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (rGO) ซึ่งได้รับการยืนยันว่าเป็นรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (rGO) โดยการปรากฏตัวของระนาบ 002 ณ มุมการเลี้ยวเบนสูงสุดที่ 25.5° และการหายไปของระนาบ 001 ณ มุมการเลี้ยวเบนสูงสุดที่ 11.8° ในรูปแบบ XRD ในรูปที่ 2.15 [28] นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Seung Hun Huh และคณะ ได้ทำการศึกษาผลของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล โดยการให้ความร้อนจากอุณหภูมิห้องจนถึง $2000^\circ C$ ผลจาก XRD จะเห็นว่าการขยับของพีคหลักไปเรื่อยๆ จนมีพีคที่ 2 เกิดขึ้น จนถึงช่วงอุณหภูมิที่ $400-600^\circ C$ จะเห็นพีคเอกลักษณ์ของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์เกิดขึ้น ดังรูปที่ 2.16 [29]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้สังเคราะห์กราฟิติกคาร์บอนไนโตรดด้วยกระบวนการควบแน่นด้วยความร้อน (Thermal condensation process) โดยใช้เมลามีน กราฟีนออกไซด์ และ

แบ่งเป็นสารตั้งต้น ที่เป็นกระบวนการสังเคราะห์ขั้นเดียวซึ่งเป็นกระบวนการที่สามารถทำได้ง่าย ไม่ซับซ้อน ไม่ต้องใช้สารเคมีที่เป็นอันตราย



รูปที่ 2.15 รูปแบบ XRD ของแกรฟีนออกไซด์ (GO) (ซ้าย) และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (rGO) (ขวา) [28]



รูปที่ 2.16 รูปแบบ XRD ของกระบวนการรีดักชันทางความร้อนของแกรฟีนออกไซด์ที่อุณหภูมิห้อง ถึง 1000°C [29]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 สีย้อม [30]

ปัจจุบันปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะมลพิษทางน้ำที่เกิดจากการเจริญเติบโตทางอุตสาหกรรมนับทวีความรุนแรงมากขึ้น โดยเฉพาะอุตสาหกรรมสิ่งทอซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่มีการขยายตัวสูง ทำให้มีการพัฒนาทั้งทางด้านกระบวนการผลิตและการแข่งขันที่สูงขึ้นเพื่อเพิ่มปริมาณสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ให้มากขึ้น น้ำเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ต้องใช้ร่วมกับวัตถุดิบในทุกขั้นตอนการผลิตไม่ว่าจะเป็นการผลิตเส้นใย การปั่น การทอ การดัดผ้า และการฟอกย้อมก็ตาม โดยวัตถุดิบที่ใช้ เช่น สีย้อมผ้า สารเคมี เป็นต้น บางชนิดละลายน้ำได้ บางชนิดละลายน้ำไม่ได้ จึงทำให้น้ำมีสภาพที่แปรเปลี่ยนไปที่เราเรียกว่าน้ำเสีย เช่น อุณหภูมิสูงขึ้น มีกลิ่น มีสี ตลอดจนทำให้สิ่งมีชีวิตที่อยู่ในน้ำตาย เนื่องจากมีสารอินทรีย์ในน้ำปริมาณที่สูง ทำให้ขาดออกซิเจนและผลกระทบของน้ำเสียนี้ยังเป็นตัวยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ต่างๆ ในกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ

2.8.1 ประเภทของสีย้อม

การจำแนกสีย้อมที่นิยมกันมากที่สุด คือ การจำแนกสีย้อมตามการนำไปใช้ เพราะจะต้องมีความคงทนการซัก มีความคงทนต่อแสงและยังต้องมีความคงทนต่อความร้อน ซึ่งในกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมได้จำแนกสีย้อมตามวิธีใช้ออกเป็น 11 ประเภท คือ

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

2) สีไดเรกต์ (direct dye) หรืออาจเรียกว่าสีย้อมฝ้าย สีชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบ อะโซ ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิคที่ทำให้ตัวสีสามารถละลายน้ำได้ มีประจุลบ นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส สีจะติดเส้นใยได้โดยโมเลกุลของสีจะจัดเรียงตัวแทรกอยู่ในระหว่างโมเลกุลเส้นใย และยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน สีไม่ทนต่อการซักน้ำ ตกง่าย ทนแสง

3) สีเบสิก (basic or cationic dye) สีย้อมชนิดนี้เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ (organic base) ให้ประจุลบ ละลายน้ำได้ นิยมใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ไนลอนและใยอะคริลิกได้ดี ในขณะที่ย้อมโมเลกุลของสีส่วนที่มีประจุลบจะยึดจับกับโมเลกุลของเส้นใย เป็นสีที่ติดทน ไม่ควรใช้ย้อมเส้นใยธรรมชาติเพราะจะไม่ทนการซักและแสง

4) สีดีสเพอร์ส (disperse dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำแต่มีสมบัติกระจายได้ดี สามารถย้อมเส้นใยอะซิเตท เส้นใยโพลีเอสเตอร์ ไนลอน และอะคริลิกได้ดี การย้อมจะใช้สารพา (carrier) เพื่อช่วยเร่งอัตราการดูดซึมของสีเข้าไปในเส้นใยหรือย้อมโดยใช้อุณหภูมิ และความดันสูง สีดีสเพอร์สเป็นสีที่ทนแสงและการซักฟอกค่อนข้างดี แต่สีจะซีดถ้าถูกควั่นหรือแก๊สบางชนิด เช่น แก๊สไนโตรสออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สีย้อมส้อมแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม โดยพิจารณาจากกลุ่มเคมีในตัวส้อม ได้แก่ สีย้อมอะโซ (azo dyes) และสีย้อมแอมมิโน แอนทราควิโนน (amino anthraquinone) ซึ่งทั้ง 2 กลุ่ม ประกอบด้วยอนุพันธ์ของเอทานอลามีน (ethanolamine; $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}$) หรืออนุพันธ์ที่คล้ายคลึงกัน

5) สีย้อมแอคทีฟ (reactive dye) เป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบ เมื่ออยู่ในน้ำจะมีสมบัติเป็นต่าง สีย้อมชนิดนี้เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด โมเลกุลของสีจะยึดจับกับหมู่ไฮดรอกไซด์ (OH) ของเซลลูโลสและเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ในสภาวะที่เป็นต่าง กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส สีย้อมแอคทีฟมี 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง $70-75^\circ\text{C}$ และกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิต่ำ สีย้อมแอคทีฟให้สีที่สดใส ทุกสัติดทนในทุกสภาวะ

6) สีย้อมอะโซอิก (azoic dye) สีย้อมชนิดนี้ไม่สามารถละลายน้ำได้ การที่สีจะก่อรูปเป็นเส้นใยได้ต้องย้อมด้วยสารประกอบฟีนอลซึ่งละลายน้ำได้ก่อน ซึ่งเป็นกระบวนการทำให้รวมตัวเป็นสี (coupling) แล้วย้อมทับด้วยสารไดอะโซคอมโพเนนท์จึงจะเกิดเป็นสีได้ สีย้อมอะโซอิกใช้ย้อมเส้นใยได้ทั้งเซลลูโลส ไนลอน หรืออะซิเตท สีย้อมอะโซอิกเป็นสีที่ทนต่อการซัก แต่ไม่ทนต่อการขัดถู

7) สีแวต (vat dye) เป็นสีที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ เมื่อทำการย้อมต้องเตรียมน้ำย้อมให้สีแวตละลายน้ำโดยให้ทำปฏิกิริยากับสารรีดิวซ์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ สีแวตจะถูกรีดิฟส์ให้กลายเป็นเกลือจึงซึมเข้าไปในเส้นใยได้ เมื่อนำผ้าไปผึ่งในอากาศสีในเส้นใยจะถูกออกซิไดส์เป็นสีแวต สีย้อมชนิดนี้มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญอยู่ 2 ชนิด คือ สีอินดิโก (indigoid) และสีแอนทราควิโนอยด์ (anthraquinoid)

8) สีมอร์แดนต์ หรือโครม (mordant or chrome dye) สีย้อมชนิดนี้ต้องใช้สารช่วยติดเข้าไปช่วยเพื่อให้เกิดการติดสีบนเส้นใย สารที่ช่วยติดที่ใช้คือ สารประกอบออกไซด์ของโลหะ เช่น โครเมียม ดีบุก เหล็ก อะลูมิเนียม เป็นต้น สีมอร์แดนต์เป็นสีที่มีโมเลกุลใหญ่ซึ่งเกิดจากสีมอร์แดนต์หลายโมเลกุลจับกับโลหะแล้วละลายน้ำได้จึงทำให้ย้อมได้ง่าย ซึ่งใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนและเส้นใยพอลิเอไมด์ได้ดี

9) สีอินเกรน เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ โดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยากับน้ำ สีย้อมชนิดนี้ใช้สำหรับย้อมผ้า

10) สีออกซิเดชัน (oxidation dye) เป็นสีที่มีละลายน้ำโดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยาในน้ำโดยสีจะติดแน่น อาศัยปฏิกิริยาการตกตะกอนผลึกภายในเส้นใยใช้สำหรับย้อมผ้าและขนสัตว์

11) สีซัลเฟอร์ (sulfur dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ เมื่อทำการย้อมต้องรีดิวซ์สีเพื่อให้โมเลกุลอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้ แต่สีซัลเฟอร์บางชนิดที่ผลิตออกมาจำหน่ายในรูปที่ถูกรีดิฟส์จะละลายน้ำได้ นิยมนำสีซัลเฟอร์มาย้อมผ้า สีจะติดทน และยังเป็นสีที่มีราคาถูก แต่สีที่อ่อนจะไม่ทนต่อการซัก

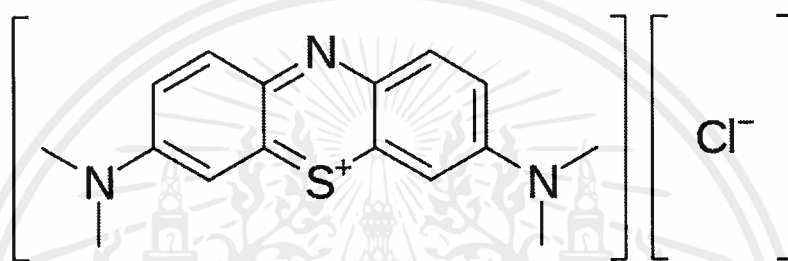
โดยที่สีย้อมแต่ละประเภทจะมีสูตรโครงสร้างทางเคมี สมบัติของสีย้อม ตลอดจนวิธีใช้ที่แตกต่างกันไป ดังนั้นการเลือกใช้สีย้อมจึงมีความสำคัญอย่างมากในการย้อมสี เพราะวัตถุที่ต้องการย้อมอาจ

สามารถย้อมด้วยสีย้อมเพียงชนิดเดียวหรือย้อมด้วยสีย้อมหลายชนิดที่ต่างชนิดกันได้ เช่น เส้นใยเซลลูโลสส่วนใหญ่จะย้อมด้วยสีโคเร็กซ์ เป็นต้น

2.8.2 สีย้อมเมทิลีนบลู

2.8.2.1 ข้อมูลเบื้องต้นของเมทิลีนบลู

เมทิลีนบลู (Methylene blue) เป็นอนุพันธ์ทางการของ phenothiazine เป็นผงสีเขียวเข้มที่ให้สารละลายสีน้ำเงินในน้ำ รูปแบบไฮเดรตมี 3 โมเลกุลของน้ำต่อหน่วยของเมทิลีนบลู Methylene blue มีค่า pH 3 ในน้ำ (10 g/L) ที่ 25 °C (77 °F) มีสูตรโมเลกุลเป็น $C_{16}H_{18}ClN_3S$ น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 319.85 กรัม/โมล ความยาวคลื่น 665 นาโนเมตร [31]



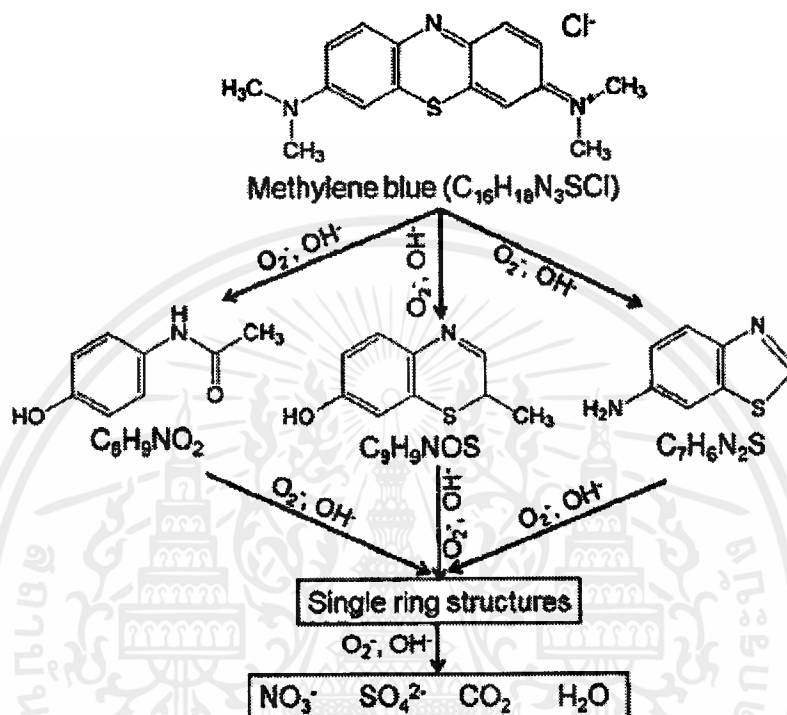
รูปที่ 2.17 โครงสร้างของเมทิลีนบลู [32]

เมทิลีนบลูเป็นสีเบสิก (basic dyes) ที่มีประจุเป็นบวกสามารถละลายน้ำได้ มีโครงสร้างที่ทำให้เกิดสี เมื่อมีการปนเปื้อนในน้ำจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อแหล่งน้ำ จึงต้องมีการบำบัดสีก่อนลงสู่แหล่งน้ำ การบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากการใช้สีในการย้อมผ้า สามารถดำเนินการได้หลากหลายวิธีการดูดซับเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจาก อุตสาหกรรมสิ่งทอ ที่ใช้ในกระบวนการกำจัดสี พบว่ามี ข้อดีคือ ไม่ต้องมีการเติมสารเคมีลงไปในการบำบัดน้ำเสีย ใช้น้ำน้อย ใช้เวลาในการบำบัดไม่นาน ใช้สถานที่ไม่มากนัก นอกจากนั้นสามารถดำเนินการได้ที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ [33] สีย้อมเมทิลีนบลูนิยมนำมาใช้เป็นสีย้อมในอุตสาหกรรมสีต่างๆ ที่ต้องการสีน้ำเงิน ซึ่งเป็นสีที่ได้จากละลายเมทิลีนบลู นอกจากจะใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ แล้วยังมาใช้เป็นอินดิเคเตอร์ (indicator) ในการทดสอบความเป็นกรด-เบส ของสารละลาย อีกทั้งยังสามารถใช้ในการแพทย์ในการใช้เป็นยาฆ่าเชื้อในลำไส้ ยาฆ่าเชื้อทางเดินปัสสาวะ หรือยาฆ่าเชื้อมาเลเรียได้อีกด้วย [31]

2.8.2.2 กลไกการสลายสีย้อมของเมทิลีนบลู [34]

ในช่วงเวลาที่สลายโมเลกุลเมทิลีนบลูในน้ำ คลอไรต์ไอออนจะแยกออกจากโครงสร้างแกนกลางกลุ่ม terminal $N-CH_3$ ซึ่งเชื่อมต่อกับโครงสร้างหลักของโครงสร้างโมเลกุลเมทิลีนบลูที่มีพลังงานสลายพันธะต่ำสุด ($CH_3-N(CH_3)C_6H_5$ พลังงานยึดเหนี่ยว = $70.8 \text{ kcal}\cdot\text{mol}^{-1}$) ระหว่างการเปลี่ยนแปลงด้วยแสง ความเสื่อมโทรมชนิดที่สร้างขึ้นอย่างรุนแรงเช่น OH^\cdot และ HO_2^\cdot จะทำลายพันธะ

N-CH₃ ก่อนจากนั้น -CH₃ จะถูกออกซิไดซ์กับ HCHO หรือ HCOOH อนุมูลอิสระ (OH[•] และ HO₂[•]) จากนั้นทำลายพันธะ C-S และ C-N ของโมเลกุล thionine (รูปที่ 2.18) เพื่อผลิตสารอินทรีย์ที่มีขนาดเล็กลงอย่างไม่เสถียร ปฏิกริยาออกซิเดชันเหล่านี้จะดำเนินต่อไปจนกว่าเมทิลีนบลูจะสลายตัวอย่างสมบูรณ์เพื่อผลิตโมเลกุลอนินทรีย์ที่มีขนาดเล็กลงเช่น H₂O, Cl⁻, CO₂, SO₄²⁻ และ NO₃⁻ ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาที่เป็นไปได้นั้นจะปรากฏในรูปที่

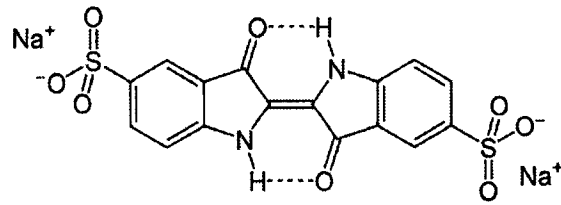


รูปที่ 2.18 ภาพแสดงกลไกการสลายตัวของเมทิลีนบลู [35]

2.8.3 สีย้อมอินดิโกคาร์มีน

2.8.3.1 ข้อมูลเบื้องต้นของอินดิโกคาร์มีน

อินดิโกคาร์มีน (Indigo carmine) หรือ 5,5'-indigodisulfonic acid sodium salt มีสูตรทางเคมีเป็น C₁₆H₈N₂Na₂O₈S₂ เป็นเกลืออินทรีย์ที่ได้มาจากสีครามโดย sulfonation ซึ่งทำให้สารประกอบที่ละลายในน้ำ ได้รับการอนุมัติให้ใช้เป็นสีผสมอาหารในสหรัฐอเมริกาและอียูมีหมายเลข E132 นอกจากนี้ยังเป็นตัวบ่งชี้ค่า pH [36] เป็นสารสีสังเคราะห์สีน้ำเงินเข้ม ละลายในน้ำได้เล็กน้อย แต่มีความคงตัวต่อความร้อน อาจเรียกว่า อินดิโกทีน (indigotine) [37]

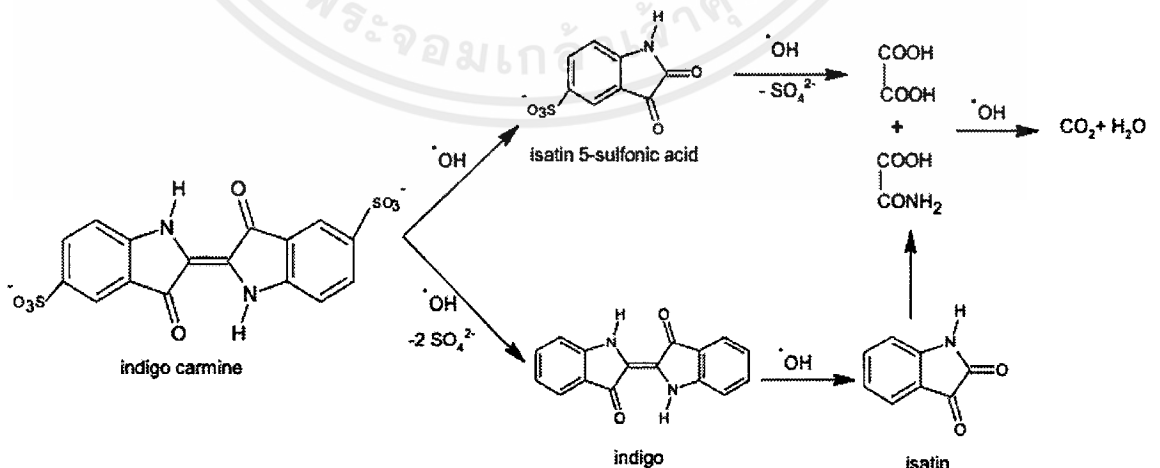


รูปที่ 2.19 โครงสร้างของอินดิโกคาร์มีน [36]

สีครามแดงในสารละลายน้ำ 0.2% เป็นสีน้ำเงินที่ pH 11.4 และสีเหลืองที่ 13.0 Indigo carmine ยังเป็นตัวบ่งชี้รีดอกซ์เปลี่ยนเป็นสีเหลืองเมื่อลดลง การใช้งานอีกอย่างคือเป็นตัวบ่งชี้ไอโชนที่ละลายผ่านการแปลงเป็นกรด isatin-5-sulfonic ปฏิกริยานี้แสดงให้เห็นว่าไม่เฉพาะเจาะจงกับไอโชน อย่างไรก็ตามมันยังตรวจจับซูเปอร์ออกไซด์ซึ่งเป็นความแตกต่างที่สำคัญในสรีรวิทยาของเซลล์ นอกจากนี้ยังใช้เป็นสีย้อมในการผลิตแคปซูล [37]

2.8.3.2 กลไกการสลายสีของอินดิโกคาร์มีน [38]

การสลายตัวของอินดิโกคาร์มีน กระบวนการเริ่มต้นด้วยไฮดรอกซิลเรดิคัลโจมตีที่ตำแหน่ง C(1) และ C(10) ของอินดิโกคาร์มีน แตกพันธะ C=C เพื่อให้ isatin 5-sulfonic acid เป็นผลิตภัณฑ์หลัก ออกซิเดชันของทั้งกลุ่มซัลโฟนิคของสารประกอบเริ่มต้นให้ indigo ด้วยการสูญเสีย sulfonic สองกลุ่ม ซึ่งต่อมาแปลงเป็น isatin การสลายของ isatin 5-sulfonic acid ด้วยการปลดปล่อยของกลุ่ม sulfonic และ isatin นำไปสู่การรวมตัวของ oxalic และ oxamic acid กรดคาร์บอกซิลิกเหล่านี้นำไปสู่การกลายเป็นแร่ธาตุแบบกิ่งสมบูรณ์จากผลิตภัณฑ์เหล่านี้เราใช้การย่อยสลายแบบเดียวกันกลไกที่แสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ภาพแสดงกลไกการสลายสีของอินดิโกคาร์มีน [38]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Yuanhui wang และคณะ (2017) ได้สังเคราะห์วัสดุคอมโพสิต $\text{TiO}_2/\text{SF-SSZ-13}$ ด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง โดยศึกษาปริมาณ TiO_2 ที่เติมในอัตราส่วน 20 40 60 และ 80% โดยน้ำหนัก จากการศึกษาพบว่า วัสดุคอมโพสิต $\text{TiO}_2/\text{SF-SSZ-13}$ ที่เติม TiO_2 60% โดยน้ำหนัก มีประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูสูงที่สุดและมีประสิทธิภาพในการแยกไฮโดรเจนจากน้ำสูงที่สุด ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกภายใต้แสงยูวี [13]

Kulandaivelu Kaviyaran และคณะ (2018) ได้ทำการสังเคราะห์ $\text{Cu}_2\text{O}@\text{TiO}_2$ ด้วยกระบวนการ Sonication ซึ่งได้ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมโรดามีนบีด้วยซูปเปอร์ออกไซด์แรดดิคัล ($\text{O}_2^{\cdot -}$) ผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้แสงวิสิเบิล จากการศึกษาพบว่า $\text{Cu}_2\text{O}@\text{TiO}_2$ สามารถกำจัดสีย้อมโรดามีนบีได้ 99.86 เปอร์เซ็นต์ภายใต้แสงวิสิเบิล และเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้แสงวิสิเบิลได้ 70 เปอร์เซ็นต์ [11]

Yu Zheng และคณะ (2017) ได้ทำการสังเคราะห์กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ผ่านกระบวนการให้ความร้อน (ไพโรไลซิส) ซึ่งได้ศึกษาผลของสารตั้งต้นที่ใช้สังเคราะห์ได้แก่ เมลามีนและ ยูเรีย และศึกษาผลอุณหภูมิที่ใช้สังเคราะห์ ได้แก่ 500 550 600 และ 650 องศาเซลเซียส จากผลการศึกษาพบว่า กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่สังเคราะห์โดยยูเรียที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพในการดูดซับและกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้แสงวิสิเบิลดีที่สุด เนื่องจากการใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์สูงขึ้นทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะของสารเพิ่มขึ้น [2]

Waheed Iqbal และคณะ (2017) ทำการสังเคราะห์กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่เป็นรูพรุนด้วยกระบวนการสังเคราะห์ชั้นเดียวด้วยวัสดุแม่แบบ โดยใช้เมลามีนเป็นสารตั้งต้นและใช้แป้งเป็นวัสดุแม่แบบ ซึ่งได้ศึกษาผลของการเติมแป้ง ได้แก่ 0.5 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากการศึกษาพบว่า การเติมแป้ง 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้แสงวิสิเบิลสูงที่สุด เนื่องจากการเติมแป้งเป็นการช่วยเพิ่มรูพรุนและทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะของสารเพิ่มขึ้น [6]

Long Sun และคณะ (2017) ได้สังเคราะห์วัสดุคอมโพสิต $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{GO}$ (1wt%GO) ด้วยกระบวนการ sonication โดยศึกษาผลของการเติม GO ที่ความเข้มข้น ได้แก่ 10 25 50 และ 100 $\mu\text{g}/\text{mL}$ จากการศึกษาพบว่า ที่ความเข้มข้นของ GO เท่ากับ 100 $\mu\text{g}/\text{mL}$ มีประสิทธิภาพในการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกสูงที่สุด สามารถกำจัดเชื้อโรค E.coli ได้ 97.9% ในเวลา 120 นาที ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้แสงวิสิเบิล [9]

Bing Ai และคณะ (2015) ได้สังเคราะห์วัสดุคอมโพสิต $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{rGO}$ ด้วยกระบวนการควบแน่นด้วยความร้อน (Thermal condensation process) โดยใช้เมลามีนและกราฟีนออกไซด์เป็นสารตั้งต้น โดยศึกษาการเติม GO ในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ 0.1 0.2 0.4 และ 0.6 กรัม จากการศึกษาพบว่า เมื่อเติมกราฟีนออกไซด์ปริมาณ 0.6 กรัม สามารถกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูด้วย

กระบวนการโฟโตคะตะไลติกได้มากที่สุด เนื่องจาก GO ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา ทำให้สามารถดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูและเพิ่มพื้นที่ในการรับแสงได้มากขึ้น [10]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. เมลามีนบริสุทธิ์ (Melamine 99 %, $C_3H_6N_6$, MW=126.12 g/mol, Aldrich)
2. เมทิลีนบลู (Methylene Blue, $C_{16}H_{18}ClN_3S$, MW=319.85 g/mol, Fluka)
3. อินดิโกคาร์มีน (Indigo Carmine, $C_{16}H_8N_2Na_2O_8S_2$, MW=466.36 g/mol, Fluka)
4. กราฟีนออกไซด์ (Graphene oxide, GO)
5. โซเดียมไนไตรต์ (Sodium nitrite, $NaNO_2$, MW= 84.9947 g/mol, CARLO ERBA Reagents S.A.S)
6. โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium permanganate, $KMnO_4$, MW= 158.034 g/mol, CARLO ERBA Reagents S.A.S)
7. แกรไฟต์ (Graphite, C, MW=12 g/mol, SIGMA-ALDRICH)
8. กรดซัลฟิวริก (sulfuric acid, H_2SO_4 , MW=98.079 g/mol, QReC)
9. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide, H_2O_2 , MW=34.0147 g/mol, SIGMAALDRICH, Co.,)
10. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, HCl, MW=36.46 g/mol, Fisher Chemical)
11. แป้งข้าวโพด (Corn starch, $(C_6H_{10}O_5)_n$)
12. น้ำปราศจากไอออน (De-ionized water, DI water, MW=18 g/mol)

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) รุ่น XRD-6100, Shimadzu, Japan
2. เครื่องวัดวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR) รุ่น Nicolet iS50, Thermo Fisher Scientific Inc, USA
3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น JEOL-JSM5800LV, Japan
4. เครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยการเรืองแสงรังสีเอกซ์ (Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer, EDX) Oxford ISIS 300
5. เครื่องวัดพื้นที่ผิวและรูพรุน (Brunauer Emmett Teller, BET) รุ่น autosorb 1, Quantachrome Instrument, USA
6. เครื่องวัดการดูดกลืนแสงของแข็ง (Diffused Reflectance UV-Vis Spectroscopy, UV / DRS) รุ่น UV-2401, Shimadzu, Japan

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. เครื่องมือวิเคราะห์เชิงความร้อน (Thermogravimetric Analysis, TGA) รุ่น Pyris TGA, USA
8. เครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์ (Raman Spectrometer) รุ่น DXR Smart, Thermo Scientific, USA.
9. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-visible Spectrophotometer) รุ่น Evolution 201, Thermo Scientific, USA
10. เครื่องสเปกโตรฟลูออโรมิเตอร์ (spectrofluorometer) รุ่น FP-6300, JASCO
11. อุปกรณ์เครื่องแก้วต่างๆ เช่น ปีกเกอร์ กระจบอกลง หลอดหยด
12. ช้อนตักสาร (Spatula)
13. ไมโครปิเปต (Micropipette)
14. แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic bar)
15. ตู้ปฏิกิริยาไฟโตคะตะไลติก ขนาด 0.4x0.6x0.8 เมตร
16. หลอดไฟยูวี (Black light) 18 วัตต์ จำนวน 4 หลอด
17. หลอดไฟฮีทลัม 18 วัตต์ 4 หลอด
18. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด 4 ตำแหน่ง (Analytical balance)
19. เครื่องปั่นกวนแบบให้ความร้อน (Hot plate)
20. เครื่องปั่นเหวี่ยงตกตะกอน (Centrifuge)
21. เครื่องกรองสุญญากาศ (Vacuum pump)
22. เตาอบ (Oven)

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมกราฟีนออกไซด์

3.3.1.1 การเตรียมแกรไฟต์ออกไซด์ด้วยวิธีการปรับปรุงวิธีของฮัมเมอร์

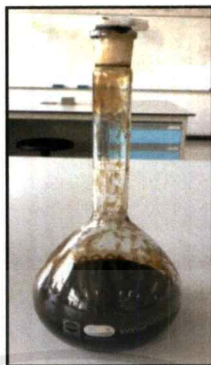
(Hummer's method)

- 1) ชั่งผงกราฟิต 4 กรัม โซเดียมไนเตรท 2 กรัม และโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 12 กรัม
- 2) เทผงกราฟิต 4 กรัม และโซเดียมไนเตรท 2 กรัม ในขวดก้นกลมแล้วค่อยๆเติมกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 92 มิลลิลิตร ลงในขวดก้นกลมแล้วนำไปวางไว้บนถังน้ำแข็งพร้อมกับทำการปั่นกวนให้เป็นเนื้อเดียวกัน เป็นเวลา 10 นาที สารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเขียวเข้ม
- 3) เติมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 12 กรัม ลงในขวดก้นกลมในข้อที่ 2) แล้วปั่นกวนต่อเป็นเวลา 15 นาที สารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลดำ
- 4) นำขวดก้นกลมออกจากถังน้ำแข็ง ไปวางในอ่างน้ำอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส แล้วทำการปั่นกวนเป็นเวลา 30 นาที
- 5) ค่อยเติมน้ำกลั่น 160 มิลลิลิตร ลงในขวดก้นกลมในข้อที่ 2) แล้วปั่นกวนต่อเป็นเวลา 5 นาที สารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล
- 6) นำขวดก้นกลมในข้อที่ 2) ในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ทำการปั่นกวนจนครบ 90 นาที
- 7) เติมน้ำกลั่น 400 มิลลิลิตร
- 8) เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 12 มิลลิลิตร ปั่นกวนเป็นเวลา 5 นาที
- 9) เติมกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร 10 มิลลิลิตร ทำการปั่นกวนต่อเป็นเวลา 5 นาที
- 10) ล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่น (ทำซ้ำ 5 รอบ)
- 11) รินสารละลายด้านบนทิ้งออก จะได้สารละลายของเหลวคล้ายโคลนลักษณะสีน้ำตาลเข้มก็จะได้เป็นสารแขวนลอยแกรไฟต์ออกไซด์

3.3.1.2 การเตรียมกราฟีนออกไซด์ด้วยวิธีการใช้คลื่นความถี่สูง (Ultrasonication)

- 1) นำสารแขวนลอยแกรไฟต์ออกไซด์ 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวดสี่คอ
- 2) เติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร แล้วนำไปวางในตู้อัลตราโซนิก ทำการโซนิเคชันเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- 3) นำสารแขวนลอยที่ได้ไปทำการหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) เพื่อแยกกราฟิตออกไซด์ที่เหลืออยู่จากสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ด้วยความเร็วรอบ 7000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที

4) เทสารแขวนลอยออกจากหลอดเซนตริฟิวจ์จะได้สารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ ลักษณะสารแขวนลอยสีน้ำตาลเข้ม ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 สารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ (GO) ที่สังเคราะห์ได้

3.3.2 การเตรียมกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ ($g-C_3N_4$)

3.3.2.1 ชั่งเมลามีน 5 กรัม ในกรูชีเบล

3.3.2.2 นำไปเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยให้อัตราความร้อนที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง

3.3.2.3 บดสารให้เป็นผงละเอียดก็จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง $g-C_3N_4$ ดังรูปที่ 3.2 (a)

3.3.3 การเตรียมกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ผ่านกระบวนการปั่นผสม ($g-C_3N_4_1$)

3.3.3.1 ชั่งเมลามีน 5 กรัม ในบีกเกอร์ ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร

3.3.3.2 นำไปปั่นกวน ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.3.3.3 นำไปกรองแบบลดความดัน

3.3.3.4 นำตะกอนไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.3.3.5 บดสารให้เป็นผงละเอียดแล้วใส่ในกรูชีเบล

3.3.3.6 นำไปเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยให้อัตราความร้อนที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง

3.3.3.7 บดสารให้เป็นผงละเอียดก็จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง $g-C_3N_4_1$ ดังรูปที่ 3.2

(b)

3.3.4 การเตรียมกราฟิติการ์บอนไนไตรด์ผสมแป้ง ($g-C_3N_4+1\%St$)

3.3.4.1 ชั่งเมลามีน 5 กรัม ในบีกเกอร์ ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร

3.3.4.2 เติมน้ำแป้ง 0.05 กรัม ปั่นกวน 10 นาที ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที

3.3.4.3 ทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองในข้อ 3.3.3.2 – 3.3.3.6

3.3.4.4 บดสารให้เป็นผงละเอียดก็จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง $g-C_3N_4+1\%St$ ดังรูปที่

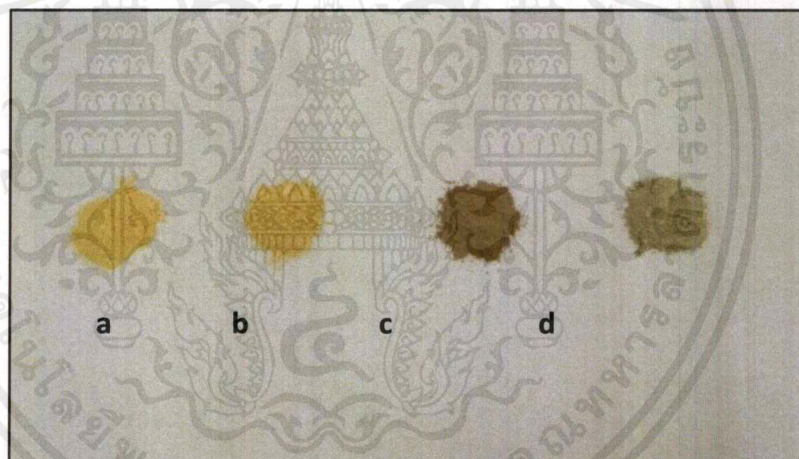
3.2 (c)

3.3.5 การเตรียมกราฟิติการ์บอนไนไตรด์ผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้น 7.8 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ในปริมาตร 0.6 มิลลิลิตร ($g-C_3N_4+0.6GO$)

3.3.5.1 ชั่งเมลามีน 5 กรัม ในบีกเกอร์ ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร

3.3.5.2 เติมกราฟีนออกไซด์ 0.6 มิลลิลิตร ปั่นกวน 10 นาที ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที

3.3.5.3 ทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองในข้อ 3.3.3.2 – 3.3.3.6 ก็จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง $g-C_3N_4+0.6GO$ ดังรูปที่ 3.2(d)



รูปที่ 3.2 ภาพ (a) $g-C_3N_4$ (b) $g-C_3N_4_1$ (c) $g-C_3N_4+1\%St$ และ (d) $g-C_3N_4+0.6GO$

3.3.6 การเตรียมกราฟิติการ์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่เป็นรูพรุน (pg) โดยผสมกราฟีนออกไซด์ความเข้มข้น 7.8 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ในปริมาณที่แตกต่างกัน ได้แก่ 0.1 0.3 0.6 และ 0.9 มิลลิลิตร

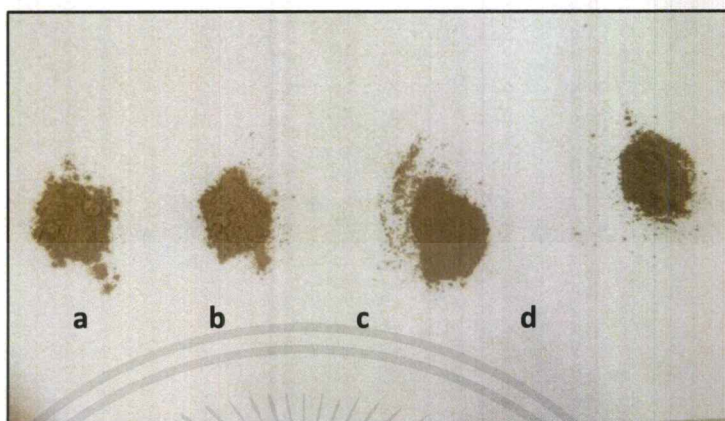
3.3.6.1 ชั่งเมลามีน 5 กรัม ในบีกเกอร์ ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร

3.3.6.2 เติมน้ำแป้ง 0.05 กรัม ปั่นกวน 10 นาที ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที

3.3.6.3 เติมกราฟีนออกไซด์ 0.1 มิลลิลิตร ปั่นกวน 10 นาที ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที

3.3.6.4 ทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองในข้อ 3.3.3.2 – 3.3.3.6

3.3.6.5 ทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองในข้อ 3.3.6 โดยเปลี่ยนจากเติมกราฟีนออกไซด์ 0.1 มิลลิลิตร เป็น 0.3 0.6 และ 0.9 มิลลิลิตร ก็จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง pg ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ผงกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุน (pg) ที่มีปริมาณของ กราฟีนออกไซด์ความเข้มข้น 7.8 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร แตกต่างกันได้แก่ (a) pg-0.1GO (b) pg-0.3GO (c) pg-0.6GO และ (d) pg-0.9GO ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 สรุปเงื่อนไขการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ

ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง	ปริมาณสารที่ใช้		
	เมลามีน	แป้ง	กราฟีนออกไซด์ความเข้มข้น 7.8 mg/ml
g-C ₃ N ₄	5 กรัม	-	-
g-C ₃ N ₄ _1	5 กรัม	-	-
g-C ₃ N ₄ +1%St	5 กรัม	1 %w/w	-
g-C ₃ N ₄ +0.6GO	5 กรัม	-	0.6 ml
pg-0.1GO	5 กรัม	1 %w/w	0.1 ml
pg-0.3GO	5 กรัม	1 %w/w	0.3 ml
pg-0.6GO	5 กรัม	1 %w/w	0.6 ml
pg-0.9GO	5 กรัม	1 %w/w	0.9 ml

3.3.7 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู

3.3.7.1 การทดสอบประสิทธิภาพกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้การฉายแสง วิธีเบิล

- 1) ชั่งผงตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่เตรียมได้ประมาณ 0.0300 กรัม
- 2) เติมสีย้อมเมทิลีนบลู ความเข้มข้น 1.0×10^{-5} โมลาร์ จำนวน 60 มิลลิลิตร จากนั้นทำการปั่นกวน 500 รอบ/นาที
- 3) ปั่นกวนโดยไม่เปิดหลอดไฟ (ในที่มืด) เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเก็บตัวอย่างสีย้อมเมทิลีนบลู จำนวน 3 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดเซนตริฟิวจ์
- 4) ฉายแสงวิธีเบิลเป็นเวลา 150 นาที โดยทำการเก็บตัวอย่างสีย้อมเมทิลีนบลูทุกๆ 30 นาที เพื่อนำไปหาค่าความสามารถในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยเทคนิค UV-Vis spectrophotometer
- 5) บันทึกข้อมูล ทำการทดลองซ้ำ 4 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู

3.3.7.2 การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับในที่มืดของนาโนคอมโพสิตกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่มีรูพรุน

- 1) ชั่งผงตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่เตรียมได้ประมาณ 0.0300 กรัม
- 2) เติมสีย้อมเมทิลีนบลูความเข้มข้น 1.0×10^{-5} โมลาร์ ปริมาณ 60 มิลลิลิตร
- 3) ปั่นกวนโดยไม่เปิดหลอดไฟ (ในที่มืด) เป็นเวลา 180 นาที โดยเก็บตัวอย่างสีย้อมเมทิลีนบลู จำนวน 3 มิลลิลิตร ทุกๆ 30 นาที เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับด้วยเทคนิค UV-Vis trophotometer
- 4) บันทึกข้อมูล ทำการทดลองซ้ำ 4 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการดูดซับ

3.3.8 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มีน

3.3.8.1 การทดสอบประสิทธิภาพกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้การฉายแสง วิธีเบิล (ทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองในข้อ 3.3.7.1) โดยเปลี่ยนจากสีย้อมเมทิลีนบลูเป็นสีย้อมอินดิโกคาร์มีน

3.3.8.2 การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับในที่มืดของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุน (ทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองในข้อ 3.3.6.2) โดยเปลี่ยนจากสีย้อมเมทิลีนบลูเป็นสีย้อมอินดิโกคาร์มีน

3.3.8.3 การทดสอบประสิทธิภาพการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสงยูวี (ทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองในข้อ 3.3.8.1) โดยผู้ทดลองจะเลือกทดสอบกับตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงทั้งหมด 4 ตัวอย่าง ซึ่งก็คือ $g-C_3N_4$, $1\%St$, $g-C_3N_4+0.6GO$ และ $pg-0.6GO$ และเปลี่ยนจากหลอดวิธีเบิลเป็นแสงยูวี

3.3.8.4 การทดสอบประสิทธิภาพการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสงอาทิตย์ (ทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองในข้อ 3.3.8.1) โดยผู้ทดลองจะเลือกทดสอบกับตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงทั้งหมด 4 ตัวอย่างซึ่งก็คือ $g-C_3N_4$ _1 $g-C_3N_4$ +1%St $g-C_3N_4$ +0.6GO และ $pg-0.6GO$ และเปลี่ยนจากหลอดวิลิเบิลเป็นแสงอาทิตย์

3.4 การตรวจสอบและพิสูจน์เอกลักษณ์

3.4.1 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)

เครื่องมือชนิดนี้อาศัย หลักการเลี้ยวเบน ของรังสีเอกซ์ เมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุ หรืออนุภาค จะเกิดการหักเหของลำรังสี สะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบ ใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างซึ่งสามารถนำผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของตัวอย่างได้อีกทั้งยังคำนวณหาปริมาณขององค์ประกอบต่างๆที่อยู่ในตัวอย่าง เพราะฉะนั้นงานวิจัยนี้เลยต้องการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกและองค์ประกอบของกราไฟติกคาร์บอน-ไนไตรด์และกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราไฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุน

3.4.2 เครื่องวัดวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR)

เป็นเทคนิคการกระตุ้นสารด้วยพลังงานแสงช่วงแสงอินฟราเรด (Infrared light) ที่ความยาวคลื่นต่างๆ เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่สามารถบอกหมู่ฟังก์ชันคร่าวๆ ในสารที่ไม่ทราบว่าเป็นสารอะไรได้ โดยเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลในตัวเครื่อง เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่นิยมใช้ในการตรวจยืนยันเอกลักษณ์ของสารเช่นเดียวกับเทคนิครามาน เพราะฉะนั้นงานวิจัยนี้ต้องการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันโครงสร้างของกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์และกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราไฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุน

3.4.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

ใช้ศึกษาผิวของเซลล์หรือผิวของตัวอย่างวัตถุที่นำมาศึกษา โดยลำแสงอิเล็กตรอนจะส่องกราดไปบนผิวของวัตถุทำให้ได้ภาพซึ่งมีลักษณะเป็นภาพ 3 มิติ ซึ่งสามารถศึกษาสภาพพื้นผิวของตัวอย่างทางวิทยาศาสตร์ชีวภาพ วิทยาศาสตร์กายภาพ และวัสดุศาสตร์ทั้งที่ผ่านการเคลือบและไม่เคลือบด้วยโลหะ การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุสามารถทำการวิเคราะห์ทดสอบตัวอย่างได้ทั้งของแข็งและผงดังนั้นงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาสัณฐานวิทยาและดูรายละเอียดพื้นผิวของกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์และกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราไฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุน

3.4.4 เครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยการเรืองแสงรังสีเอ็กซ์ (Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer, EDX)

เป็นเครื่องวิเคราะห์หาธาตุด้าน X-Ray สามารถวิเคราะห์ได้ตั้งแต่ ธาตุคาร์บอนถึงธาตุยูเรเนียม นำไปใช้งานได้กว้างขวาง หลากหลายวงการ ขนาดกระทัดรัด น้ำหนักเบา ใช้งานง่าย ทดสอบได้ทั้งของแข็ง ของเหลว หรือเป็นผง โดยชิ้นงานไม่เสียหาย อีกทั้งสามารถวัดความหนาของฟิล์มได้ และสามารถหาปริมาณธาตุหนักเช่น Hg ตามมาตรฐาน EU กำหนดว่าด้วย WEEE&RHS ดังนั้นจึงใช้เทคนิคนี้วิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวของกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์และกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราไฟนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุน

3.4.5 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและรูพรุน (Brunauer Emmett Teller, BET)

ใช้หลักการของการดูดซับก๊าซบนพื้นผิวของตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ โดยมีสมมติฐานว่าการดูดซับของก๊าซเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอทั่วพื้นผิวไม่จำเพาะบริเวณใดบริเวณหนึ่งและอีกสมมติฐานหนึ่งคือ ก๊าซที่ใช้มีความสามารถในการดูดซับบนพื้นผิวได้ดีกว่าการที่ก๊าซเกิดติดดูดกันเอง (ซึ่งในการวิเคราะห์นี้ใช้ก๊าซไนโตรเจน (N₂) เพราะฉะนั้นงานวิจัยนี้ผู้วิจัยต้องการวิเคราะห์หาปริมาณของรูพรุนบนพื้นผิวของกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์และกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราไฟนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุน

3.4.6 เครื่องวัดการดูดกลืนแสงของแข็ง (Diffused Reflectance UV-Vis Spectroscopy, UV/DRS)

เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่าการดูดกลืนแสงในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงวิสิเบิลที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารตัวอย่างซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์สารประกอบเชิงซ้อนและสารอนินทรีย์ใช้ในการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของสารต่างๆ ที่มีอยู่ในตัวอย่างได้ตัวอย่างที่จะนำมาวิเคราะห์จะอยู่ในสถานะของแข็งของเหลวหรือก๊าซโดยส่วนใหญ่เป็นสารละลายดังนั้นงานวิจัยนี้ต้องการตรวจวัดปริมาณแสงและค่าความเข้มของแสงในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงวิสิเบิลที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนของกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์และกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราไฟนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุน

3.4.7 เครื่องมือวิเคราะห์เชิงความร้อน (Thermogravimetric Analysis, TGA)

เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุโดยเฉพาะพอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อนโดยการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง เทคนิคนี้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสภาพของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับแก๊สหรือระเหยของน้ำ การตกผลึก (crystallization) อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงเฟสการแตกตัวของวัสดุ (decomposition) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน หรือ ปริมาณสารสัมพันธ์ (stoichiometry) ใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุจุดหลอมเหลวการสูญเสียน้ำหนักสารเจือปนในตัวอย่างรวมไปถึงการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเฟสของกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์และกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราไฟท์ออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุน

3.4.8 เครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์ (Raman Spectrometer)

เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการตรวจยืนยันเอกลักษณ์ของสาร โดยอาศัยหลักการทางแสง โดยที่สารแต่ละตัวจะมีลักษณะการกระเจิงแสงไม่เหมือนกัน ข้อดีของเทคนิครามานคือไม่ทำลายตัวอย่าง (Non-Destructive) และไม่ต้องสัมผัสสารโดยตรง สามารถวัดสารผ่านภาชนะบรรจุที่มีลักษณะใส จึงใช้เทคนิครามานมาศึกษาลักษณะโครงสร้างของแกรไฟต์และการฟีนออกไซด์

3.4.9 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-visible Spectrophotometer)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่า intensity ในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่างซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนและสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้ คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของสารเมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงในช่วงรังสียูวีหรือแสงขาวที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆตามกฎของ Beer-Lambert ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้วัดค่าการดูดกลืนแสงของเมทิลีนบลูและอินดิโกคาร์มีน

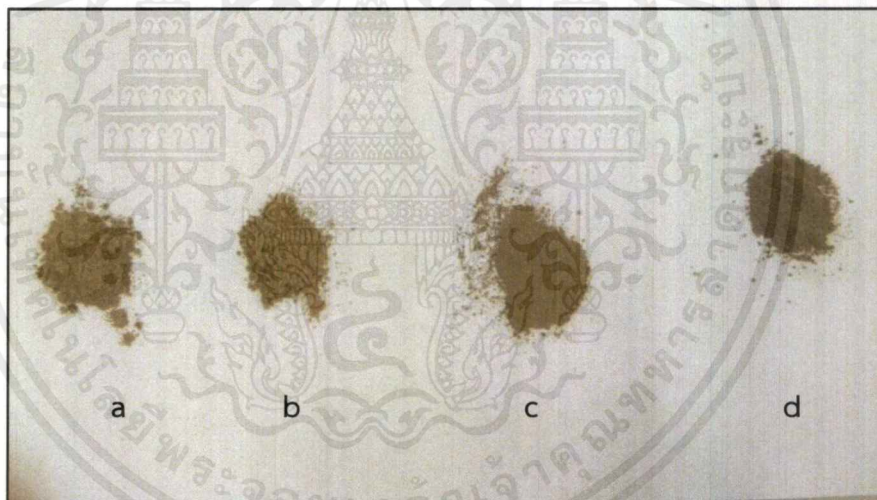
3.4.10 เครื่องสเปกโตรฟลูออโรมิเตอร์ (Spectrofluorometer)

สเปกโตรฟลูออโรมิเตอร์เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดการเรืองแสงของสารประกอบบางชนิดเพื่อให้ข้อมูลเกี่ยวกับความเข้มข้นและสภาพแวดล้อมทางเคมีในตัวอย่าง มีการเลือกความยาวคลื่นการกระตุ้นบางอย่างและการแผ่รังสีถูกสังเกตที่ความยาวคลื่นเดียวหรือทำการสแกนเพื่อบันทึกความเข้มเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นหรือที่เรียกว่าสเปกตรัมการเปล่งรังสี ดังนั้นจึงใช้เทคนิคนี้วิเคราะห์หากเกิดการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮล (e^-h^+ pairs recombination) ของกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์และกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราไฟท์ออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุน

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมสังเคราะห์กราฟิกคาร์บอนไนไตรด์ด้วยกระบวนการควบแน่นด้วยความร้อน (Thermal condensation process) โดยใช้เมลามีน กราฟีนออกไซด์ และแบ่งเป็นสารตั้งต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้จะศึกษาปริมาณการเติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกันได้แก่ 0.1 0.3 0.6 และ 0.9 มิลลิกรัม (GO เข้มข้น 7.8 mg./ml) ตามลำดับ จากรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าสีของผงกราฟิกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่มีรูปทรงที่เติมกราฟีนออกไซด์ 0.1 มิลลิกรัม มีลักษณะเป็นผงผลึกสีน้ำตาล จากนั้นจะค่อยๆ เปลี่ยนไปเป็นสีน้ำตาลเข้มขึ้นเมื่อการเติมกราฟีนออกไซด์สูงขึ้น ตามลำดับ ผงจะมีสีน้ำตาลเข้ม ซึ่งอาจจะทำให้สรุปได้เบื้องต้นว่ากราฟิกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่มีรูปทรง มีความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงแสงวิสิเบิลได้แตกต่างกัน



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างผงกราฟิกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่มีรูปทรง (pg) ได้แก่ (a) pg-0.1GO (b) pg-0.3GO (c) pg-0.6GO และ (d) pg-0.9GO ตามลำดับ

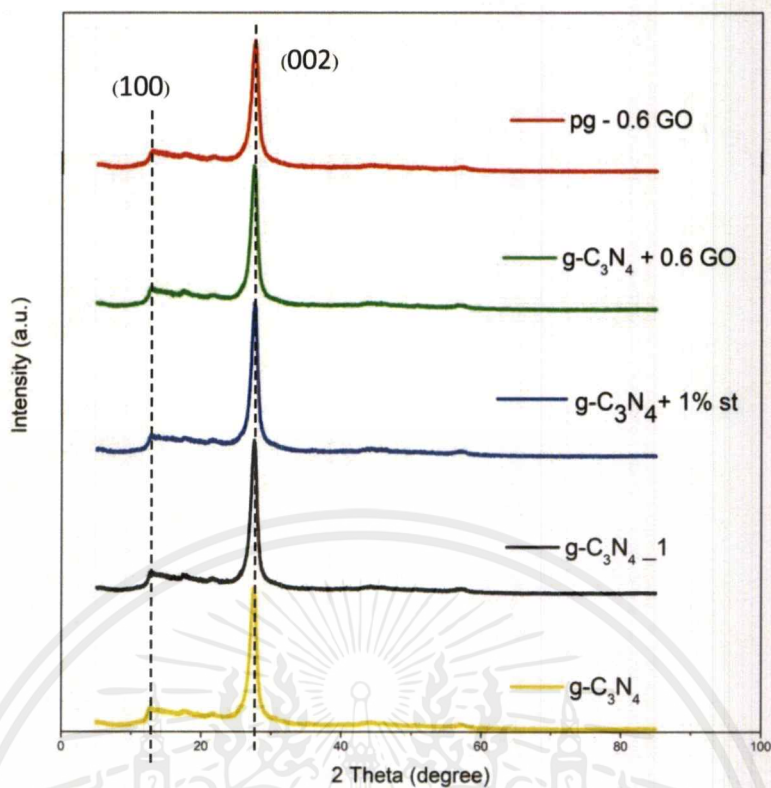
ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการพิสูจน์เอกลักษณ์และศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสี ย้อมเมทิลีนบลูและสีย้อมอินดิโกคาร์มีนด้วยกระบวนการดูดซับและกระบวนการโฟโตคะตะไลติกของ ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง นอกจากนี้ยังศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อส่งผลกระทบต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ได้แก่ ผลของแหล่งกำเนิดแสง เป็นต้น

4.1 การวิเคราะห์พิกัดเอกลักษณะ

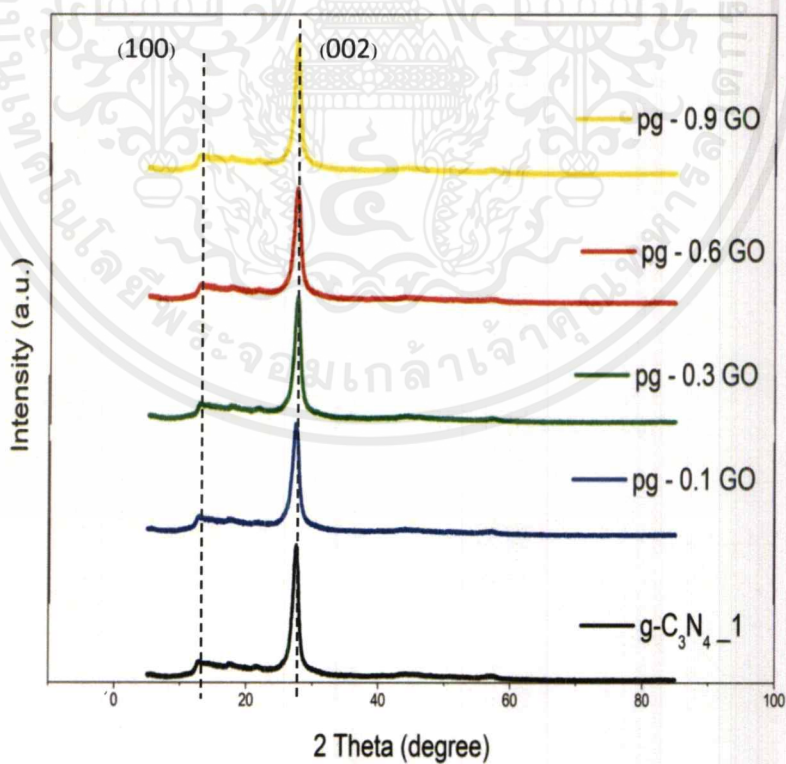
4.1.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer; XRD)

การศึกษาโครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเพื่อพิสูจน์พิกัดเอกลักษณะโดยใช้เทคนิค X-Ray Diffractometer (XRD) โดยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสารต่างๆ แสดงไว้ดังรูปที่ 4.2 จากผลการวิเคราะห์พบว่า $g-C_3N_4$ $g-C_3N_4$ _1 $g-C_3N_4+1\%St$ $g-C_3N_4+0.6GO$ และ $pg-0.6GO$ จะมีพิกัดเอกลักษณะปรากฏอยู่ที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 13° และ 27.4° โดยที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 13° แสดงเอกลักษณะของ s-heptazine และ 27.4° แสดงเอกลักษณะของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ตรงกับ การเลี้ยวเบนของระนาบ (100) และ (002) ตามลำดับ เมื่อเติมแบง์ในอัตราส่วน 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ($g-C_3N_4+1\%St$) แสดงในรูปที่ 4.2 พบว่า intensity ของพิกัดที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 27.4° ลดลง เนื่องจากการสลายตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนไนโมเลกุลของแบง์จะขัดขวางกระบวนการพอลิเมอไรเซชันของการเกิดกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ เมื่อเติมกราฟิติกออกไซด์ 0.6 มิลลิกรัม ($g-C_3N_4+0.6GO$) ดังแสดงในรูป 4.2 จะเห็นได้ว่า intensity ของพิกัดที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 27.4° เพิ่มมากขึ้น และฐานพิกัดมีลักษณะกว้างขึ้น เนื่องจากการซ้อนทับระหว่างพิกัดของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์และพิกัดของรีดิวซ์กราฟิติกออกไซด์ เป็นการยืนยันว่ามีรีดิวซ์กราฟิติกออกไซด์เป็นองค์ประกอบ ซึ่งพิกัดของรีดิวซ์กราฟิติกออกไซด์จะพบที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 26° ในขณะที่เติมแบง์ในอัตราส่วน 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรและเติมกราฟิติกออกไซด์ 0.6 มิลลิกรัม ($pg-0.6GO$) จะเห็นว่าพิกัดมีลักษณะคล้ายกับพิกัดของ $g-C_3N_4+0.6GO$ แต่มี intensity ของพิกัดที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 27.4° ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับ $g-C_3N_4+0.6GO$ เป็นการยืนยันว่าวัสดุคอมโพสิต $pg-0.6ml$ ที่สังเคราะห์ได้มีรีดิวซ์กราฟิติกออกไซด์เป็นองค์ประกอบและมีการสลายตัวของแบง์ร่วมด้วย [10,29,41] ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่าย SEM ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และ รูปที่ 4.6

จากนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณกราฟิติกออกไซด์ ได้แก่ 0.1 0.3 0.6 และ 0.9 มิลลิกรัม ดังแสดงในรูปที่ 4.3 พบว่า intensity ของพิกัดที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 27.4° มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มปริมาณของรีดิวซ์กราฟิติกออกไซด์



รูปที่ 4.2 XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง



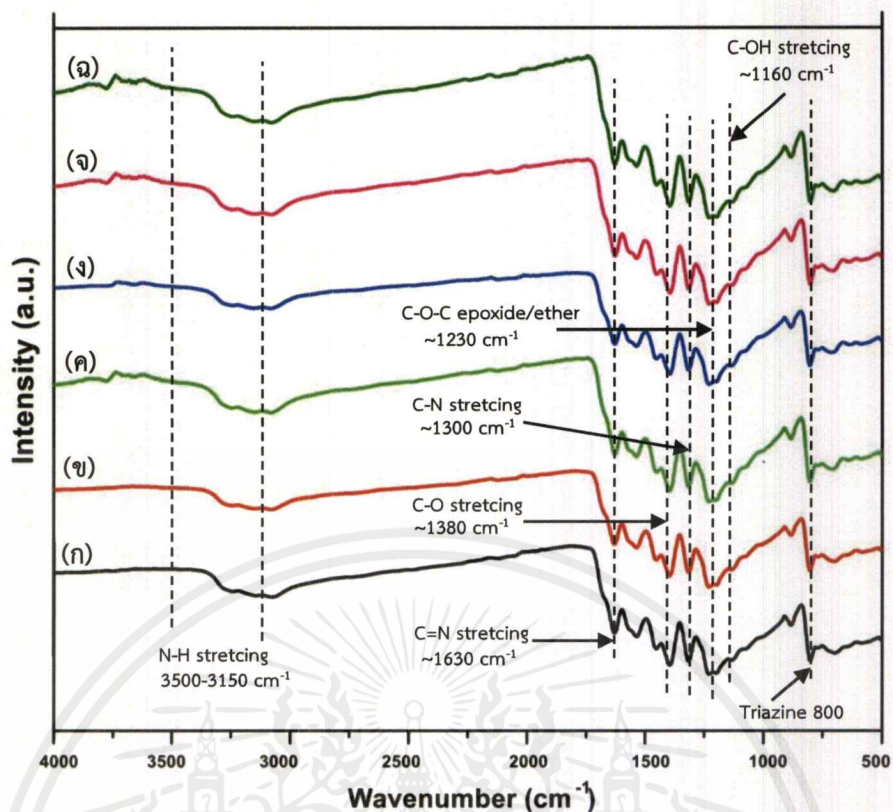
รูปที่ 4.3 XRD pattern ของ $g-C_3N_4_1$ และ pg ที่เตรียมจาก GO ตั้งต้นในปริมาณที่แตกต่างกัน

ได้แก่ (a) pg-0.1GO (b) pg-0.3GO (c) pg-0.6GO และ (d) pg-0.9GO ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงสามารถทำการศึกษาได้ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างของ $g-C_3N_4$, $g-C_3N_4+1\%St$, $g-C_3N_4+0.6GO$, $pg-0.3GO$, $pg-0.6GO$ และ $pg-0.9GO$ สามารถคาดคะเนการสั่นของเลขคลื่นได้ดังตารางที่ 4.1 จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างของ (ก) $g-C_3N_4$, (ข) $g-C_3N_4+1\%St$ และ (ค) $g-C_3N_4+0.6GO$ แสดงไว้ในรูปที่ 4.4 พบว่ามีการสั่นของเลขคลื่นในช่วงที่ใกล้เคียงกัน ได้แก่ การสั่นของเลขคลื่นที่ 812 (triazine breathing) การสั่นของเลขคลื่นในช่วง 1646-1225 (C-N heterocycles stretching) การสั่นของเลขคลื่นที่ 3189 (N-H stretching) แสดงให้เห็นว่าเป็นเอมีน ทูติยภูมิเนื่องจากเกิดการควบแน่นเป็นการไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ นอกจากนี้ยังพบการสั่นของเลขคลื่นที่ 1380 (C-O stretching) 1160 (C-OH stretching) และ 1230 (C-O-C epoxide/ether) ในรูปที่ 4.4 (ค) $g-C_3N_4+0.6GO$ (ง) $pg-0.3GO$ (จ) $pg-0.6GO$ และ (ฉ) $pg-0.9GO$ เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันของฟีนอลและควิโนนบนกราฟีนออกไซด์จะสลายตัวในอุณหภูมิช่วง 500-900 องศาเซลเซียส และหมู่ไฮดรอกซิลจะสลายตัวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการยืนยันว่านอกจากจะเกิดอันตรกิริยาระหว่างกันระพาย ($\pi-\pi$ stacking) แล้วระหว่างชั้นของกราฟิก-คาร์บอนไนไตรด์ และรีดิคัลกราฟีนออกไซด์ยังมีการเชื่อมกันด้วยพันธะ C-O-C (cross-linked) อีกด้วย [6,10,41] ซึ่งพันธะ C-O-C ที่เกิดขึ้นส่งผลให้วัสดุคอมโพสิตมีค่าช่องว่างของพลังงานแคบลงและสามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่มากขึ้น สอดคล้องกับค่าการดูดกลืนแสงที่แสดงในตารางที่ 4.3



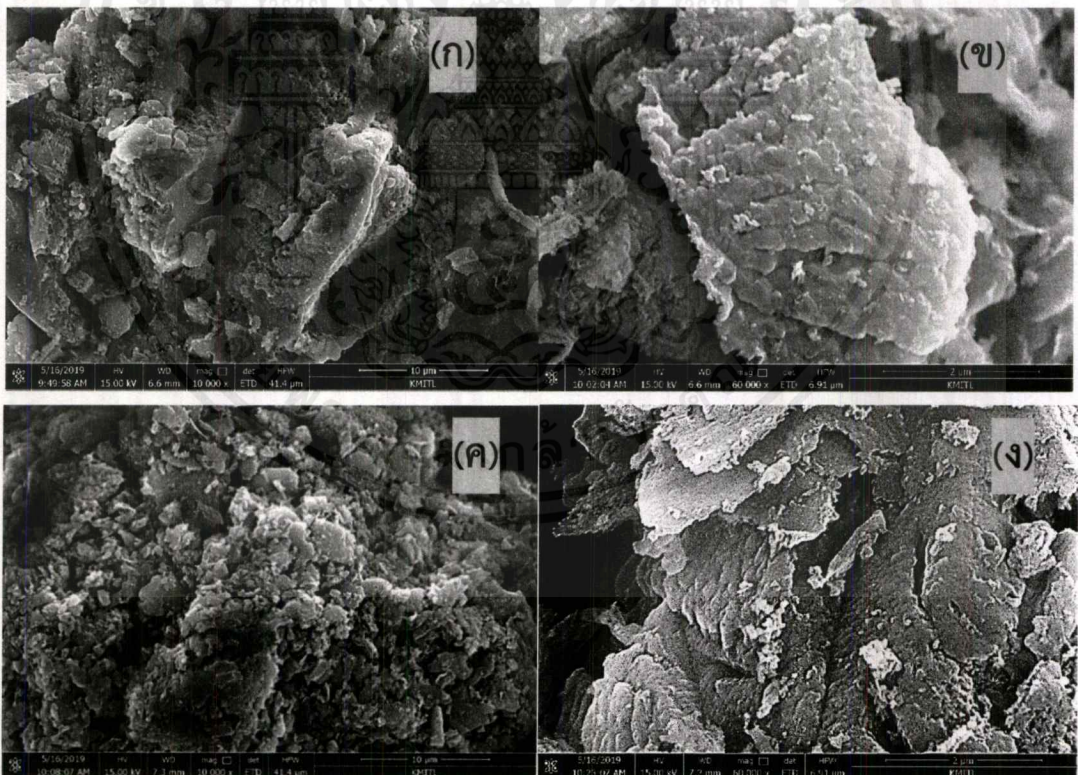
รูปที่ 4.4 FT-IR spectra ของ (ก) $g\text{-C}_3\text{N}_4$ _1 (ข) $g\text{-C}_3\text{N}_4$ +1%St (ค) $g\text{-C}_3\text{N}_4$ +0.6GO (ง) pg-0.3GO (จ) pg-0.6GO และ (ฉ) pg-0.9GO

ตารางที่ 4.1 ความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ [3]

หมู่ฟังก์ชัน	เลขคลื่น (cm^{-1})
N-H stretching	3500-3150
	เอมีนปฐมภูมิมี 2 แถบ เอมีนทุติยภูมิมี 1 แถบ
C-N heterocycles stretching	1646-1225
C=N stretching	1571 และ 1630
Aromatic C-N stretching	1300 1402 และ 1460
C-O stretching	1380
C-O-C epoxide/ether	1230

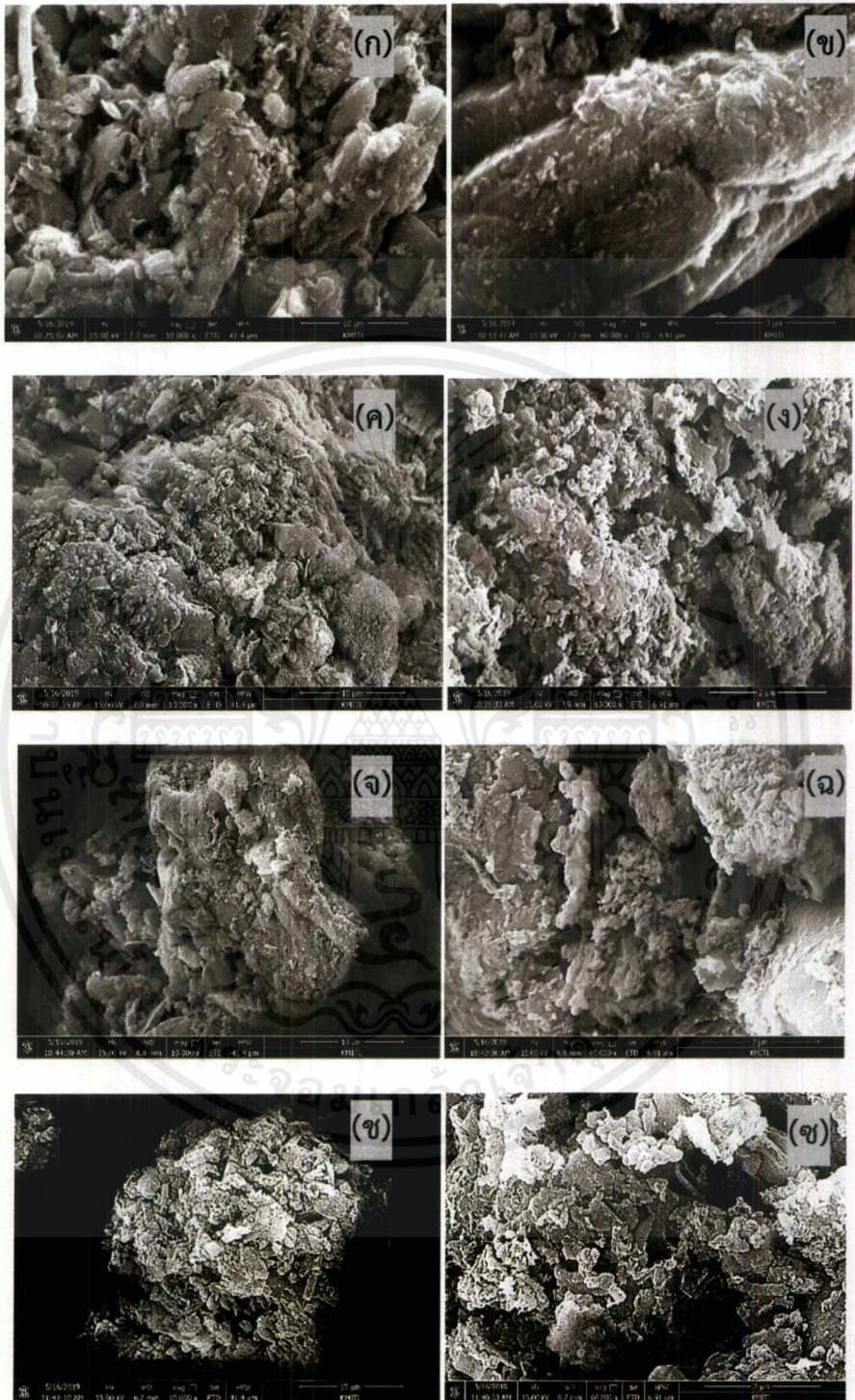
4.1.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ; SEM)

ผลการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีต่างกัน ได้แก่ กระบวนการควบแน่นทางความร้อน ($g\text{-C}_3\text{N}_4$) และกระบวนการเตรียมกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่มีรูพรุนโดยการใช้แป้งเป็นแม่แบบสีเขียวในการกำเนิดก๊าซ [6] ($g\text{-C}_3\text{N}_4\text{-1}$) สามารถศึกษาได้โดยใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ซึ่งผลการทดลองแสดงไว้ดังรูปที่ 4.5 พบว่าลักษณะผิวของอนุภาค $g\text{-C}_3\text{N}_4$ รูปที่ 4.5 (ข) มีลักษณะเป็นแผ่นเรียบซ้อนทับกัน และมีการเกาะกลุ่มของอนุภาคอย่างหนาแน่นเนื่องจากความร้อนจากการเผาส่งผลให้เกิดการควบแน่นทางความร้อน ทำให้แผ่นของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์มีขนาดใหญ่อขึ้นและมีการซ้อนทับของแผ่นมากขึ้น [3] ดังรูปที่ 4.5 (ก) ส่วน $g\text{-C}_3\text{N}_4\text{-1}$ รูปที่ 4.5 (ง) พบว่าผิวของอนุภาคมีลักษณะขรุขระและอนุภาคมีการเกาะกลุ่มกันอย่างหลวมๆ เนื่องจากการนำเมลามีนไปปั่นกวนในน้ำกลั่นจะทำให้ผงของเมลามีนมีการกระจายตัวได้ดีขึ้น เมื่อเกิดการควบแน่นทางความร้อนทำให้มีการที่เกาะกลุ่มของอนุภาคลดลงทำให้สัณฐานวิทยาของ $g\text{-C}_3\text{N}_4\text{-1}$ มีความเป็นรูพรุนมากขึ้น ดังแสดงในรูปรูปที่ 4.5 (ค) ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วย BET ดังแสดงในตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.5 ภาพ SEM ของ $g\text{-C}_3\text{N}_4$ (ก) กำลังขยาย 10000X (ข) 30000X และ $g\text{-C}_3\text{N}_4\text{-1}$ (ค) กำลังขยาย 10000X (ง) ที่กำลังขยาย 30000X

ผลการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ $g-C_3N_4$, $g-C_3N_4+1\%St$, $g-C_3N_4+0.6GO$ และ $pg-0.6GO$ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.6

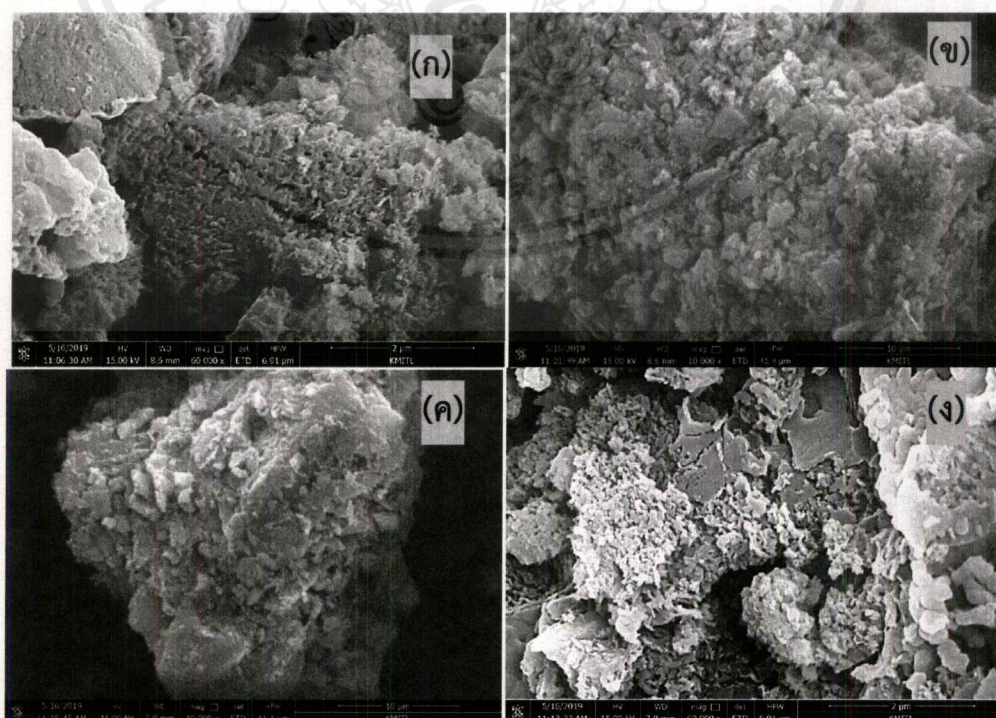


รูปที่ 4.6 ภาพ SEM ของ $g-C_3N_4$ (ก) ที่กำลังขยาย 10000X (ข) 60000X $g-C_3N_4+1\%St$ (ค) ที่กำลังขยาย 10000X (ง) 60000X เท่า $g-C_3N_4+0.6GO$ (จ) ที่กำลังขยาย 10000X (ฉ) กำลังขยาย 60000X และ $pg-0.6GO$ (ช) กำลังขยาย 10000X (ซ) ที่กำลังขยาย 60000X

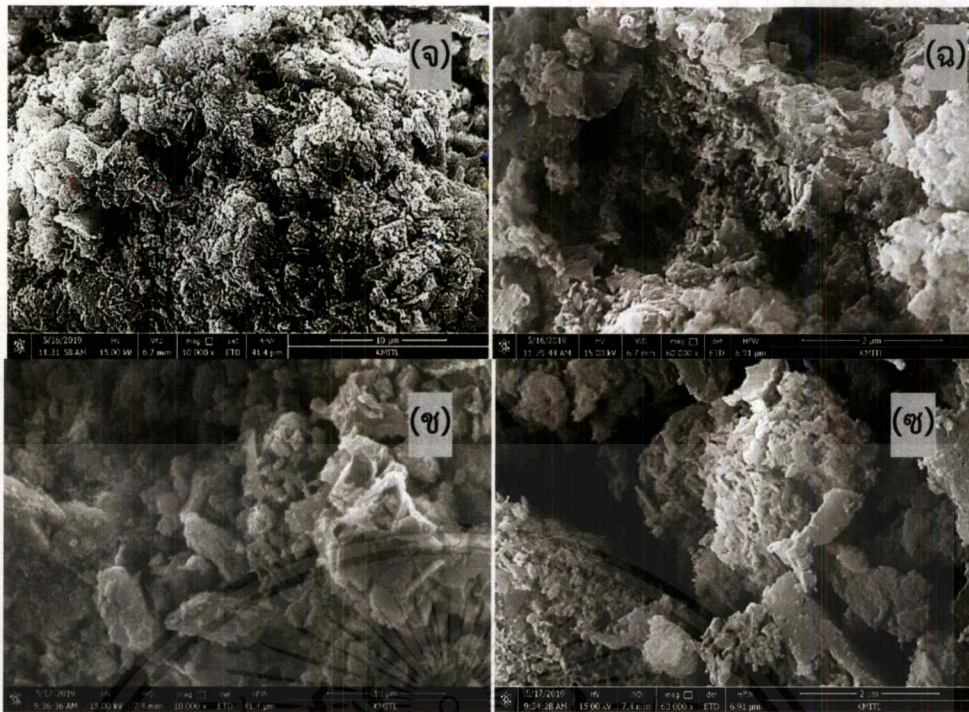
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ รูปที่ 4.6 (ค) ลักษณะสัณฐานวิทยาของ $g-C_3N_4+1\%St$ มีลักษณะเป็นรูพรุนมีผิวขรุขระและมีความหนาแน่นต่ำ เนื่องจากการสลายตัวของแก๊สที่มีอะตอมของคาร์บอนและออกซิเจนเป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของแอมโมเนียและการสลายตัวของแก๊สแอมโมเนีย ส่งผลให้เกิดโครงสร้างที่เป็นรูพรุนบนแผ่นของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ และแก๊สเหล่านี้ได้เข้าขัดขวางการเติบโตของแผ่นกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ ทำให้มีแผ่นของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์มีขนาดเล็กลง ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ง) [6] ในขณะที่ $g-C_3N_4+0.6GO$ รูปที่ 4.7 (จ) และ (ฉ) มีลักษณะสัณฐานวิทยาเป็นแผ่นซ้อนทับกันระหว่างแผ่นของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์และแผ่นของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ซึ่งในแต่ละชั้นจะเชื่อมกันด้วยพันธะโควาเลนต์ของอะตอม C-O-C และอันตรกิริยาของพันธะพาย ($\pi-\pi$ stacking) บริเวณผิวของอนุภาคมีรอยเหี่ยวย่นซึ่งเกิดจากการสลายตัวของหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบเนื่องจากกระบวนการรีดักชันด้วยความร้อนของกราฟีนออกไซด์ [39] ซึ่งสอดคล้องกับผล XRD ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และ $pg-0.6GO$ มีลักษณะสัณฐานวิทยาเป็นเกล็ดเล็กๆบริเวณผิวของอนุภาคมีรอยเหี่ยวย่นและมีความเป็นรูพรุน เนื่องจากการซ้อนทับกันของแผ่นกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์และแผ่นของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ และการสลายตัวของแอมโมเนียและหมู่ฟังก์ชันที่มีคาร์บอนและออกซิเจนทำให้อนุภาคมีขนาดมีขนาดเล็กลง

จากรูปที่ 4.7 เมื่อเติม GO ลงในกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ผสมแบ่งในอัตราส่วน 1เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยทำการเติม GO ในปริมาตร 0.1 0.3 0.6 และ 0.9 มิลลิลิตร พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาตรของ GO จะทำให้วัสดุคอมโพสิตมีความเป็นรูพรุนมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผล BET ดังแสดงในตารางที่ 4.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ภาพ SEM ของ pg-0.1GO (ก) ที่กำลังขยาย 10000X (ข) 60000X และ pg-0.3GO (ค) ที่กำลังขยาย 10000X (ง) กำลังขยาย 60000X และ pg-0.6GO (จ) กำลังขยาย 10000X (ฉ) ที่กำลังขยาย 60000X และ pg-0.9GO (ช) กำลังขยาย 10000X (ซ) ที่กำลังขยาย 60000X

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

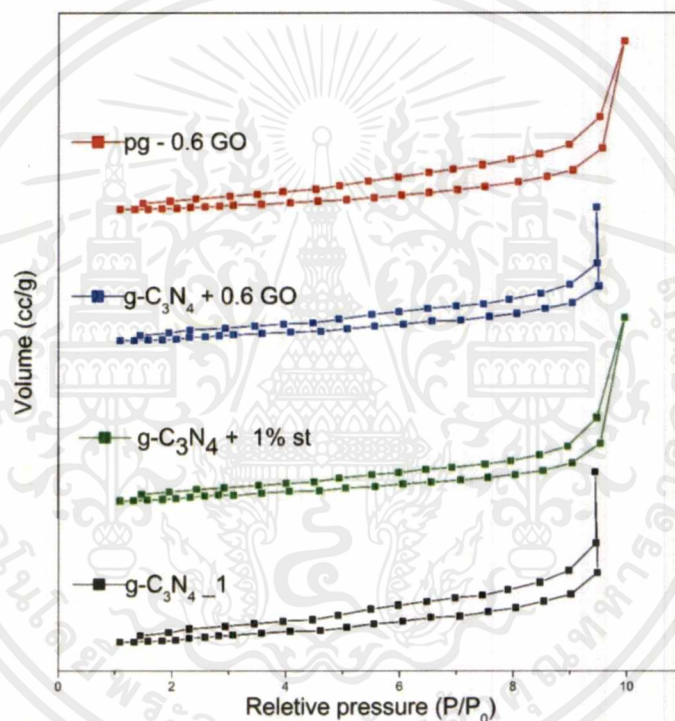
การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวของกราฟไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ผ่านกระบวนการปั่นผสม ($g-C_3N_4$ _1) กราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ผสมแป้ง 1%w/w ($g-C_3N_4$ +1%St) กราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ผสมกราฟีนออกไซด์ ($g-C_3N_4$ +0.6GO) และกราฟไฟติกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุน (pg-0.3GO และ pg-0.6GO) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ SEM ร่วมกับ EDX ทำให้การวิเคราะห์ลักษณะบนพื้นผิวมีความละเอียดและได้ข้อมูลที่สมบูรณ์มากขึ้น

จาก EDX สเปกตรัมของกราฟไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ ($g-C_3N_4$ _1) กราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ผสมแป้ง ($g-C_3N_4$ +1%St) กราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ผสมกราฟีนออกไซด์ ($g-C_3N_4$ +GO) และกราฟไฟติกคาร์บอนไนไตรด์รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุน (pg-0.3GO และ pg-0.6GO) ดังรูปที่ ข-1(ข) ข-2(ข) ข-3(ข) ข-4(ข) และ ข-5(ข) ตามลำดับ จะเห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์นั้นประกอบด้วยธาตุคาร์บอน (C) ธาตุไนโตรเจน (N) และธาตุออกซิเจน (O) เป็นหลัก ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ประกอบด้วยธาตุคาร์บอน (C) ไนโตรเจน (N) และธาตุออกซิเจน (O)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.5 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะขนาดรูพรุนเฉลี่ย ปริมาตรรูพรุนและการกระจายตัวของรูพรุนด้วยเทคนิคการดูดซับก๊าซ (Surface area and Pore size Analysis by Gas Adsorption Technique)

การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะขนาดรูพรุนเฉลี่ย ปริมาตรรูพรุนและการกระจายตัวของรูพรุนของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ผ่านกระบวนการปั่นผสม ($g-C_3N_4$ _1) กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ผสมแป้ง 1% w/w ($g-C_3N_4$ +1% St) กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ผสมกราฟีนออกไซด์ ($g-C_3N_4$ +0.6GO) และกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุน (pg -0.1GO pg -0.3GO pg -0.6GO และ pg -0.9GO) สามารถทำการศึกษได้ด้วยเทคนิคการดูดซับก๊าซ ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 4.8 รูปที่ 4.9 และตารางที่ 4.2

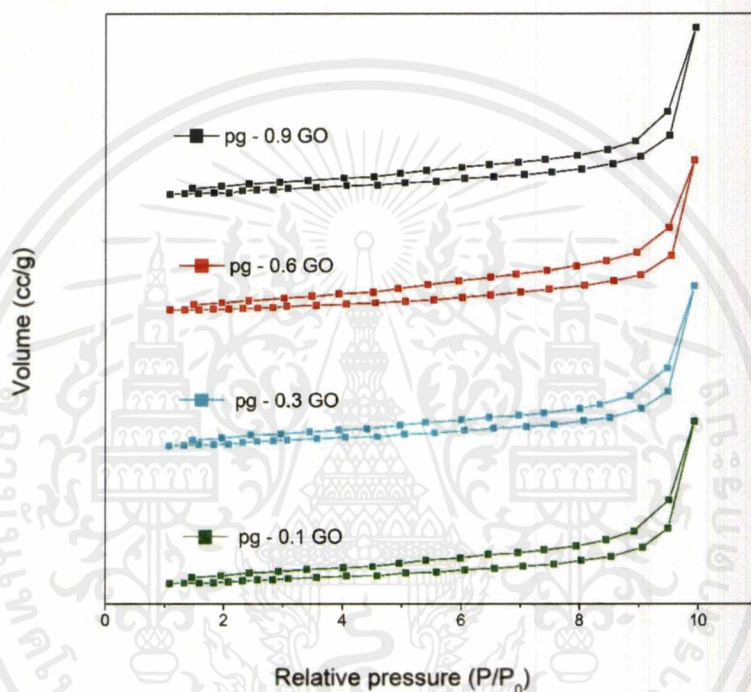


รูปที่ 4.8 แสดง Nitrogen adsorption – desorption isotherm ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ

จาก Adsorption-desorption isotherm ที่แสดงในรูปที่ 4.8 $g-C_3N_4$ _1 $g-C_3N_4$ +1% St $g-C_3N_4$ +0.6GO pg -0.6GO มีการดูดซับคล้าย Type IV isotherm [25] ซึ่ง Type IV isotherm เป็นการดูดซับที่เกิดบนมีโซพอร์ส (Mesoporous) และแมโครพอร์ส (Macropous) ซึ่ง Hysteresis loop แสดงถึงลักษณะรูพรุนแบบมีโซพอร์ส (Mesoporous) ในรูปที่ 4.8 ซึ่ง $g-C_3N_4$ _1 มีลักษณะรูพรุนแบบมีโซพอร์สน้อยที่สุดเนื่องจากมีพื้นที่ของ Hysteresis loop น้อยที่สุด ซึ่งพื้นที่ของ Hysteresis loop บ่งบอกถึงปริมาณของรูพรุนแบบมีโซพอร์ส ส่วน $g-C_3N_4$ +0.6GO มีปริมาณของรูพรุนแบบมีโซพอร์สเล็กน้อยเนื่องการสลายตัวของหมู่ฟังก์ชันในกราฟีนออกไซด์ [28,41] ในขณะที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

g-C₃N₄+1%St ปริมาณของรูพรุนแบบมีโซพอร์สเพิ่มขึ้น สารประกอบไฮโดรคาร์บอนในโมเลกุลของแป้ง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wanheed Iqbal และคณะ [6] เมื่อเพิ่มอัตราส่วนในการเติมแป้ง จะเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะเนื่องจากการสลายของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเพิ่มมากขึ้นซึ่งขัดขวางปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของกราฟิติกคาร์บอนในไตรต์ ส่งผลให้เกิดรูพรุนแบบแมคโครพอร์สเพิ่มมากขึ้น สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ XRD ในรูปที่ 4.2 และ pg-0.6GO ในรูปที่ 4.8 มีปริมาณรูพรุนแบบมีโซพอร์สมากที่สุดเนื่องจากการสลายตัวของหมู่ฟังก์ชันของ GO และการสลายตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในโมเลกุลของแป้ง



รูปที่ 4.9 แสดง Nitrogen adsorption-desorption isotherm ของกราฟิติกคาร์บอนในไตรต์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุน (pg) โดยการเติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกัน ได้แก่ pg-0.1GO pg-0.3GO pg-0.6GO และ pg-0.9GO ตามลำดับ

เมื่อเติมแป้งในอัตราส่วน 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 0.1 0.3 0.6 และ 0.9 มิลลิกรัม พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกราฟีนออกไซด์ทำให้พื้นที่ Hysteresis loop ลดลง แสดงให้เห็นว่าปริมาณของรูพรุนแบบมีโซพอร์สเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณกราฟีนออกไซด์จะเป็นการเพิ่มปริมาณรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ทำให้เกิดการสลายตัวของหมู่ฟังก์ชันในกราฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดรูพรุนแบบมีโซพอร์สเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และ pg-0.6GO มีปริมาณรูพรุนแบบมีโซพอร์สมากที่สุด

ตารางที่ 4.2 ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area; SBET) เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุน (Average pore diameter) และปริมาตรรูพรุน (Total pore volume)

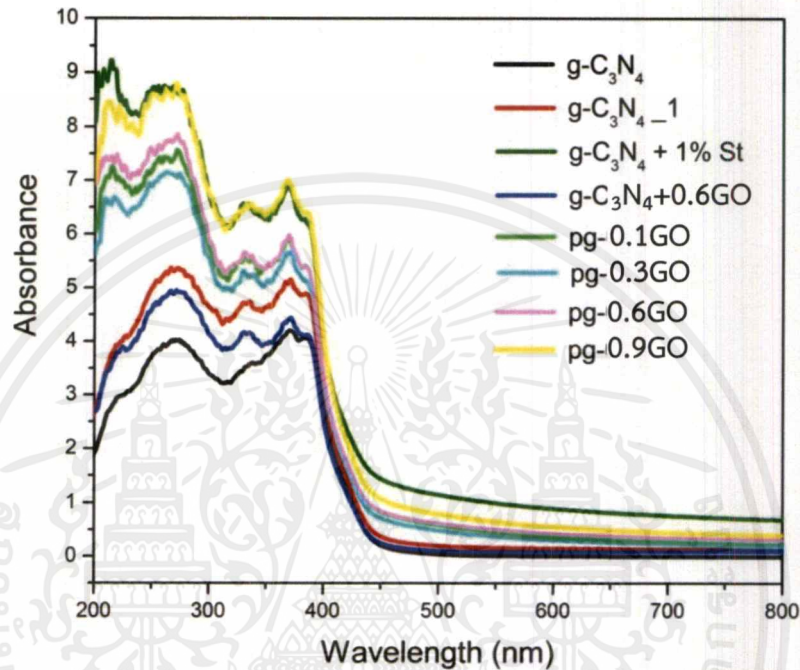
สารตัวอย่าง	SBET (m ² /g)	Average pore diameter (nm)	Total pore volume (cc/g)
g-C ₃ N ₄	18.43	29.27	0.1349
g-C ₃ N ₄ _1	16.45	57.28	0.2355
g-C ₃ N ₄ +1%St	49.26	23.31	0.2871
g-C ₃ N ₄ +0.6GO	14.56	49.88	0.1816
pg-0.1GO	32.93	25.78	0.2122
pg-0.3GO	34.02	28.90	0.2458
pg-0.6GO	26.78	44.69	0.2991
pg-0.9GO	30.74	31.47	0.2418

จากตารางที่ 4.2 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกราฟีนออกไซด์ในกราฟาไฟติกคาร์บอนไนโตรด์และแบ่ง 1 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักส่งผลให้เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนและปริมาตรของรูพรุนเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการสลายตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนของแบ่ง [6] และการสลายตัวของหมู่ฟังก์ชันของกราฟีนออกไซด์ [29] ดังรูปที่ 4.9

4.1.6 การศึกษาการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง (UV-Visible Diffuse Reflectance spectroscopy; DRS)

การศึกษาการดูดกลืนแสงและการวิเคราะห์หาค่าแถบพลังงาน (Eg) ที่เปลี่ยนแปลงของ g-C₃N₄ g-C₃N₄_1 g-C₃N₄+1%St g-C₃N₄+0.6GO pg-0.1GO pg-0.3GO pg-0.6GO และ pg-0.9GO ด้วยเทคนิค DRS จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.10 พบว่า g-C₃N₄ และ g-C₃N₄_1 มีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นใกล้เคียงกัน เนื่องจากสีของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเป็นสีเหลืองซีดไม่แตกต่างกัน เมื่อทำการเติมแบ่ง (g-C₃N₄+1%St) พบว่าสีของตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลทำให้ดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นเพิ่มขึ้น โดยขยับไปในช่วงแสงสีแดง (Red-Shift) ส่งผลให้แถบพลังงานมีค่าลดลงและเมื่อเติมทั้งแบ่งและกราฟีนออกไซด์พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลที่เข้มขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณกราฟีนออกไซด์สีของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลที่เข้มขึ้นกว่าเดิมทำให้ค่าการดูดกลืนแสงมีการขยับไปที่ความยาวคลื่นสูงขึ้นและแถบพลังงานมีค่าลดลง ดังแสดงในตารางที่ 4.3 (คำนวณโดยใช้สูตร $1240/\lambda = eV$) เนื่องจากสีของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเปลี่ยนจากสีน้ำตาลเป็นสีน้ำตาลที่เข้มขึ้นทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงสามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่เพิ่มมากขึ้น [10] และการเพิ่มปริมาณแสง กราฟีนออกไซด์เป็นการเพิ่มอันตรกิริยาของพันธะพาย ($\pi-\pi$ stacking)

และอิเล็กทรอนิกส์ในโครงสร้างของกราฟไฟติกคาร์บอนไนไตรด์สามารถเรโซแนนซ์เข้าไปในโครงสร้างของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ได้ ส่งผลให้สามารถดูดกลืนในช่วงแสงในช่วงวิสิเบิลได้มากขึ้น ในขณะที่เดียวกันกราฟไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ผสมกราฟีนออกไซด์โดยไม่ผสมแป้ง ($g-C_3N_4+0.6GO$) มีค่าความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงลดลงเป็น 429 นาโนเมตร โดยเป็นผลมาจากสีของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเป็นสีเขียวจึงดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นสั้นลงและแถบพลังงานมีค่าสูงขึ้น



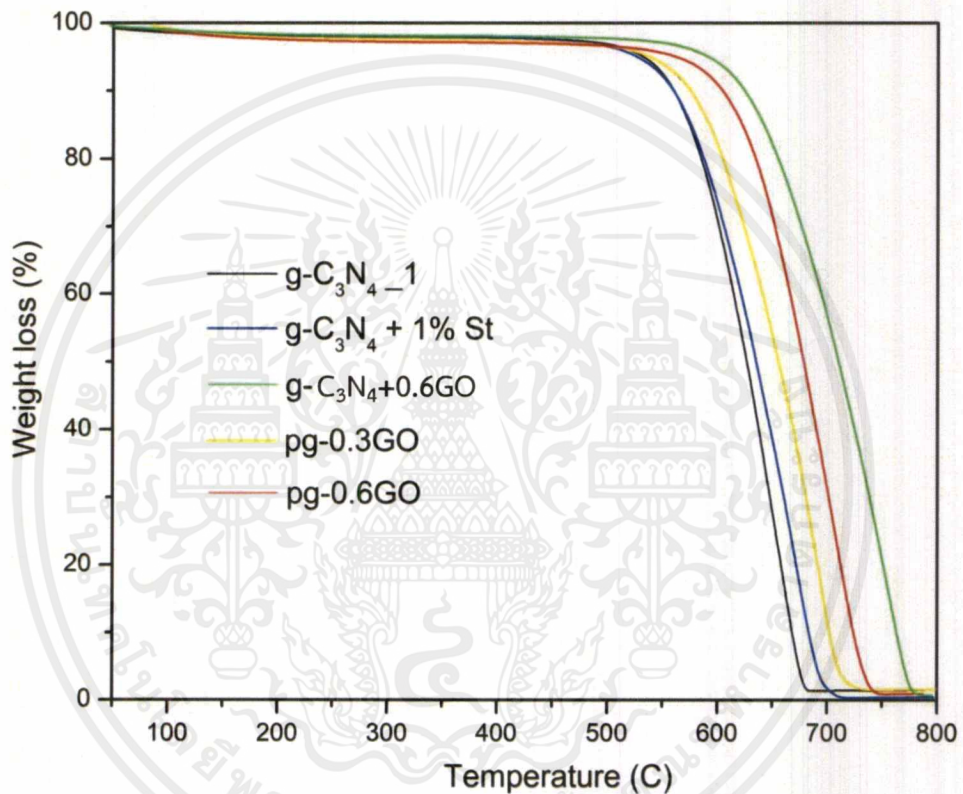
รูปที่ 4.10 กราฟ UV-Vis diffuse reflectance spectra (DRS) ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าการดูดกลืนแสงและแถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ

ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง	ความยาวคลื่นการดูดกลืนแสง(nm)	แถบช่องว่างพลังงาน (eV)
$g-C_3N_4$	440	2.81
$g-C_3N_4_1$	439	2.82
$g-C_3N_4+1\%St$	445	2.78
$g-C_3N_4+0.6GO$	429	2.89
pg- 0.1GO	443	2.79
pg-0.3GO	455	2.72
pg-0.6GO	457	2.71
pg-0.9GO	458	2.70

4.1.7 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analysis (TGA)

การศึกษาน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ โดยอาศัยสมบัติทางความร้อน ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric Analysis; TGA) ทำให้ทราบถึงเสถียรภาพของวัสดุซึ่งดูได้จากช่วงอุณหภูมิที่สารเริ่มเกิดปฏิกิริยาหรือเกิดการสลายตัว (decomposition) จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.16 จะเห็นว่าอุณหภูมิในการวิเคราะห์อยู่ใน ช่วง 0-800 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

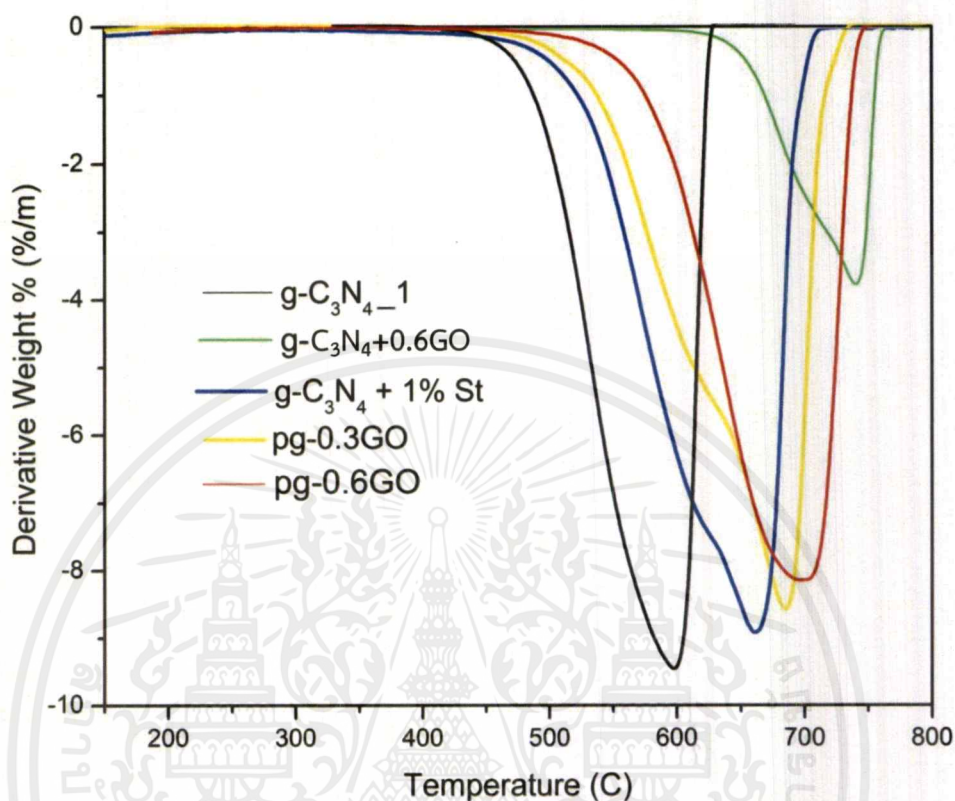


รูปที่ 4.11 TGA แสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ

จากรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่า $g-C_3N_4+0.6GO$ มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงที่สุด เนื่องจากรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีเสถียรภาพทางความร้อนสูง การคอนจูเกตของวงอะโรมาติก และอันตรกิริยาของพันธะพาย (π-π stacking) ระหว่างกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ทำให้โครงสร้างของ $g-C_3N_4+0.6GO$ มีความเสถียรมากขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณกราฟีนออกไซด์ลงในวัสดุคอมโพสิตจะส่งผลให้เสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้นด้วย นอกจากนี้การวิเคราะห์ด้วย Derivative Thermogravimetric analysis (DTG) แสดงในรูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่สังเคราะห์ได้ทั้งหมดมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักอยู่ช่วงเดียว คือ ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 500-750 องศาเซลเซียส ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของโครงสร้างกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ โครงสร้างของแป้ง และหมู่ฟังก์ชันของกราฟีนออกไซด์ [10] ซึ่งสอดคล้องกับผลจาก XRD และ FT-IR ที่แสดงให้เห็นว่าตัวเร่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาเชิงแสงที่สังเคราะห์มีโครงสร้างของกราฟิติกคาร์บอนไนโตรด้อยู่ โดยอุณหภูมิการสลายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงแสดงในตารางที่ 4.4



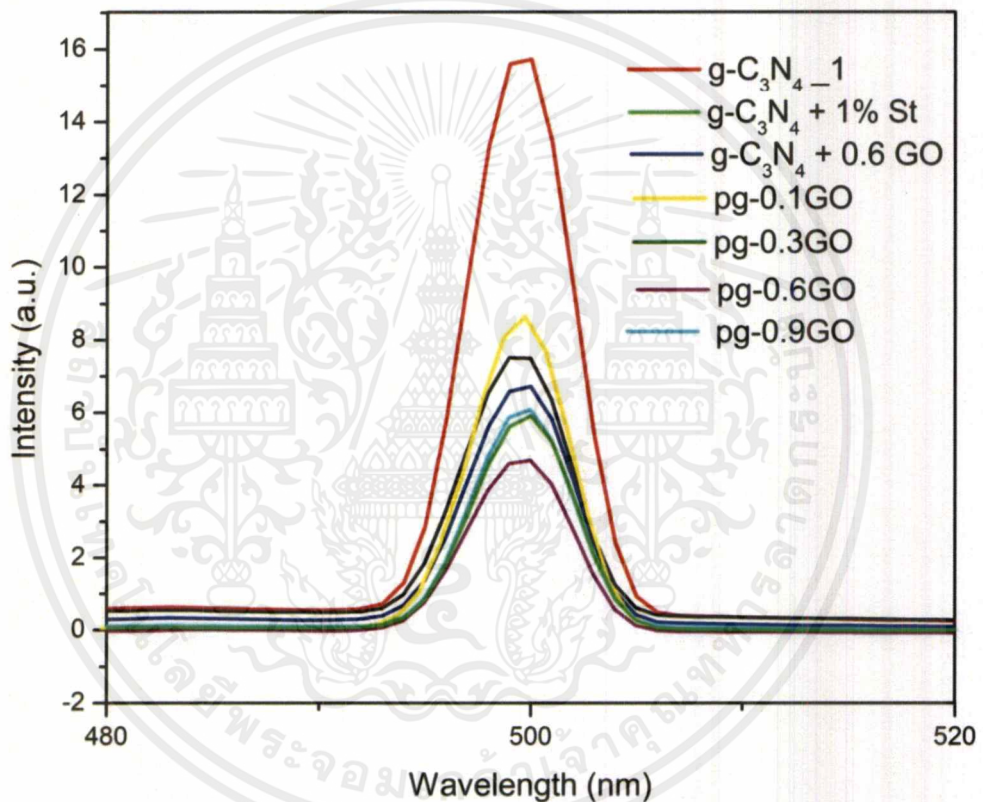
รูปที่ 4.12 DTG แสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ

ตารางที่ 4.4 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยการสลายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ

ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง	อุณหภูมิเฉลี่ยการสลายตัว(°C)
$g-C_3N_4_1$	642.09
$g-C_3N_4+1\%St$	657.13
$g-C_3N_4+0.6GO$	685.48
pg-0.3GO	670.66
pg-0.6GO	680.44

4.1.8 เครื่องสเปกโตรฟลูออโรมิเตอร์ (spectrofluorometer)

สเปกโตรฟลูออโรมิเตอร์เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดการเรืองแสงของกราฟิติการ์บอนไนไตรด์ ($g-C_3N_4$) กราฟิติการ์บอนไนไตรด์ที่ผ่านกระบวนการบ่มผสม ($g-C_3N_4-1$) กราฟิติการ์บอนไนไตรด์ที่ผสมแป้ง 1%w/w ($g-C_3N_4+1\%St$) กราฟิติการ์บอนไนไตรด์ที่ผสมกราฟีนออกไซด์ ($g-C_3N_4+0.6GO$) และกราฟิติการ์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุน ($pg-0.1GO$ $pg-0.3GO$ $pg-0.6GO$ และ $pg-0.9GO$) เพื่อให้ข้อมูลเกี่ยวกับความเข้มเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นหรือที่เรียกว่าสเปกตรัมการเปล่งรังสีวิเคราะห์หาการเกิดการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮล (e^-h^+ pairs recombination) ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงดังกล่าว



รูปที่ 4.13 ฟลูออโรสเปกตรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ

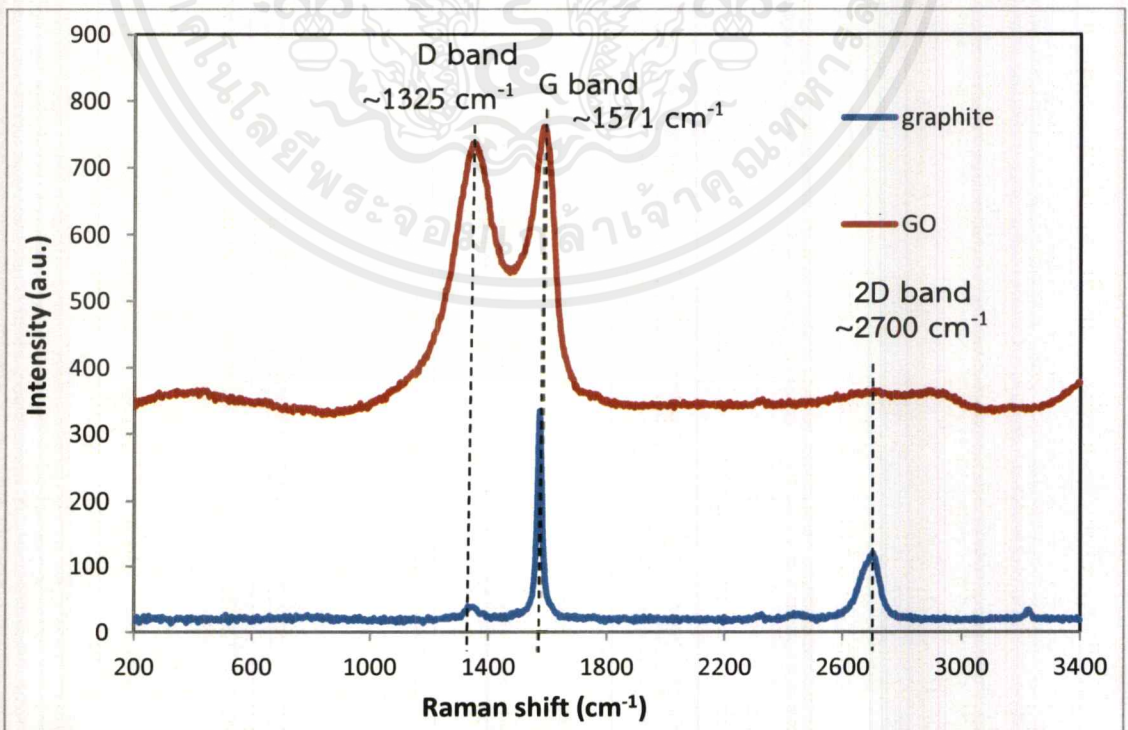
จากรูปที่ 4.13 แสดงฟลูออโรสเปกตรัมที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร พบว่า $g-C_3N_4-1$ มีค่าการคายแสงมากที่สุด $pg-0.1GO$ $g-C_3N_4$ $g-C_3N_4+0.6GO$ $pg-0.9GO$ $g-C_3N_4+1\%St$ $pg-0.3GO$ มีค่าการคายแสงลดลงตามลำดับและ $pg-0.6GO$ ที่มีค่าการคายแสงน้อยที่สุด เนื่องจากกราฟิติการ์บอนไนไตรด์สามารถส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังแผ่นของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ได้ ส่งผลให้อัตราการเกิดกระบวนการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮลลดลง [40]

4.1.9 การพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะของกราฟีนออกไซด์ด้วยรามานสเปกโตรมิเตอร์ (Raman Spectrometer)

เทคนิครามานได้ถูกนำมาศึกษาโครงสร้างผลึกและความเป็นระเบียบที่แตกต่างกันระหว่างแกรไฟต์กับกราฟีนออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.14

ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะด้วยเทคนิครามานในสารอนุพันธ์ของคาร์บอนแสดงพีกที่เป็นเอกลักษณ์อยู่ 2 พีก นั่นคือ G band (Graphitic carbon band) ปรากฏพีกที่ตำแหน่งประมาณ 1600 cm^{-1} และ D band (Defect graphitic carbon band) ปรากฏพีกที่ตำแหน่งประมาณ 1350 cm^{-1} โดยที่ G band แสดงถึงความเป็นผลึกและความเป็นระเบียบของแผ่นในโครงสร้างที่มาจากคาร์บอน sp^2 (C=C conjugated) ซึ่งต่างกับ D band ที่แสดงถึงความบกพร่อง (Defect) และความไม่เป็นระเบียบ (Disorder) ของโครงสร้างที่มาจากตำแหน่งที่เกิดหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ (C-O C=O) [26]

ผลของรามานที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.19 แสดง D peak ที่ตำแหน่งประมาณ 1325 cm^{-1} และ G peak ที่ตำแหน่งประมาณ 1571 cm^{-1} พบว่าสัดส่วนระหว่าง I_D/I_G ของกราฟีนออกไซด์นั้นมีค่ามากกว่า I_D/I_G ของแกรไฟต์ มาจากกระบวนการรีดักชันทางความร้อนที่ให้อุณหภูมิถึง 600°C ทำให้พันธะระหว่างโครงสร้างเกิดการการสลายพันธะและหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ถูกกำจัดทำให้เกิดเป็นช่องว่างมากขึ้น ทำให้มีความบกพร่องและความไม่เป็นระเบียบที่มากกว่า นอกจากนี้ยังพบ 2D peak ที่ตำแหน่งประมาณ 2700 cm^{-1} ในรามานสเปกตรัมของแกรไฟต์ซึ่งแสดงถึงการซ้อนทับของแผ่นโครงสร้างที่เป็นระเบียบ [29] จึงยืนยันได้ว่าสามารถสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์จากการเตรียมด้วยแกรไฟต์ได้



รูปที่ 4.14 รามานสเปกตรัมของแกรไฟต์ (Graphite) และกราฟีนออกไซด์ (GO)

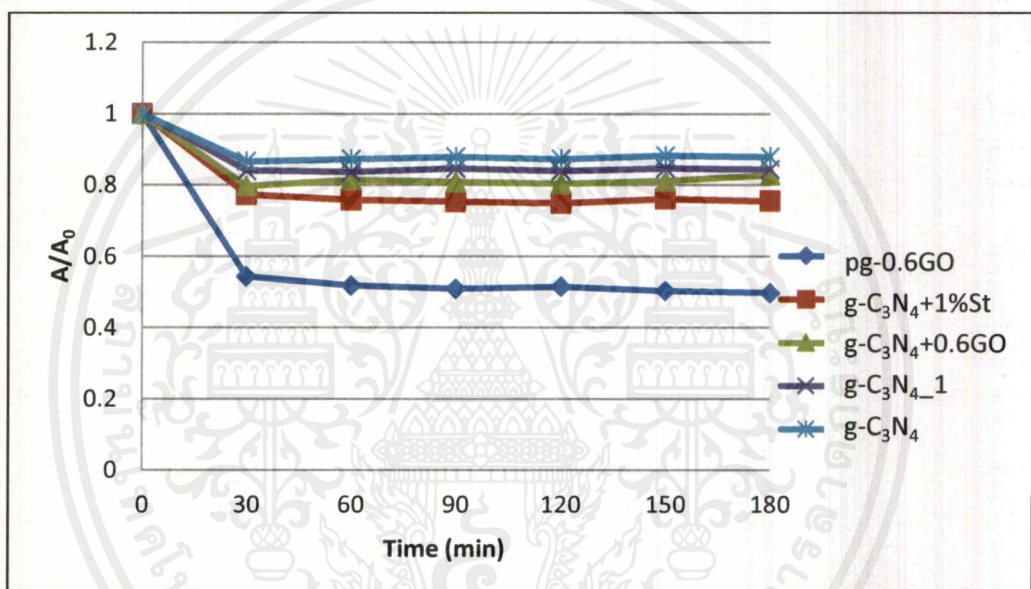
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู

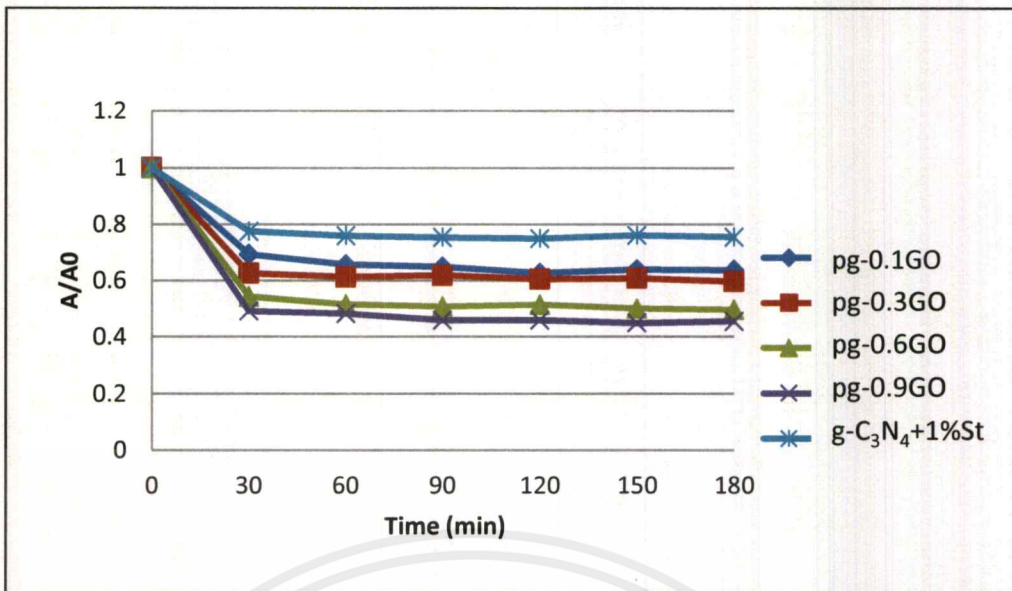
4.2.1 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับในที่มืด

การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับในที่มืดของ $g-C_3N_4$ $g-C_3N_4_1$ $g-C_3N_4+1\% St$ $g-C_3N_4+0.6GO$ $pg-0.1GO$ $pg-0.3GO$ $pg-0.6GO$ และ $pg-0.9GO$ เพื่อทดสอบความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูในที่มืด สามารถทำได้โดยทำการปั่นกวนตัวเร่งปฏิกิริยากับสีย้อมเมทิลีนบลูความเข้มข้น 1.0×10^{-5} โมลาร์ ในที่มืดเป็นเวลา 180 นาที และทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 30 นาที

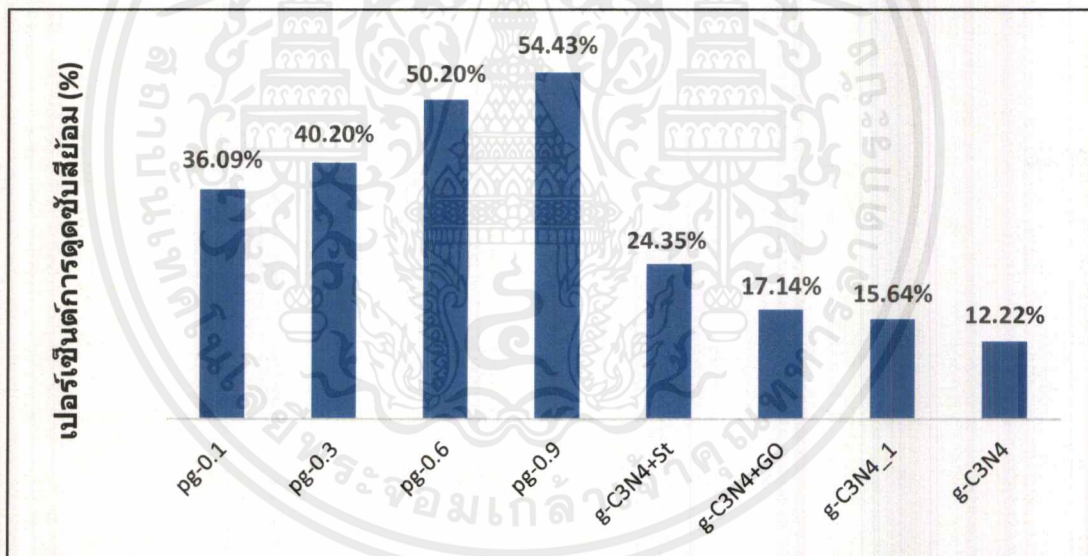
จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.15 และ 4.16 แสดงค่าความสามารถการดูดกลืนแสงในที่มืดของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง แสดงให้เห็นว่าการดูดซับเข้าสู่สมดุลโดยใช้เวลาเพียง 30-60 นาที และเมื่อเวลาผ่านไปจนถึง 150 นาทีไม่เกิดการดูดซับอีก



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงเทียบกับเวลาของการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มืด โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงเทียบกับเวลาในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มีดของ $g-C_3N_4$ และ pg ที่เตรียมจาก GO ในปริมาณที่แตกต่างกันได้แก่ (a) pg-0.1GO (b) pg-0.3GO (c) pg-0.6GO และ (d) pg-0.9GO ตามลำดับ



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มีดเป็นเวลา 180 นาที ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ

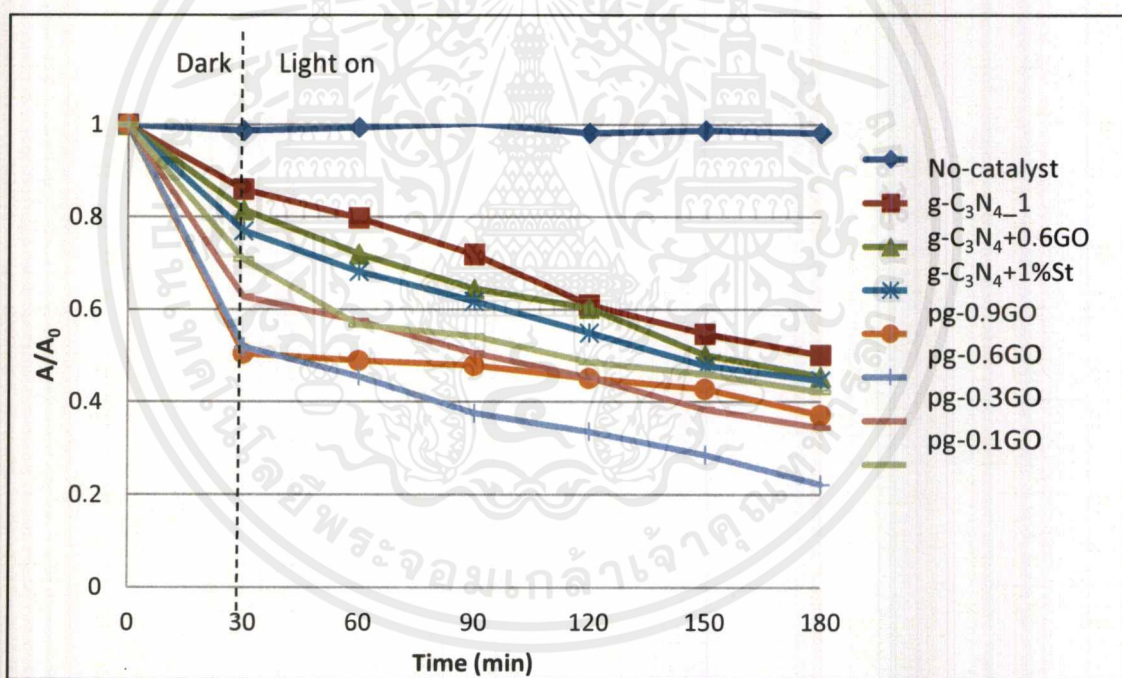
จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.17 แสดงค่าประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มีดของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ได้แก่ $g-C_3N_4$ $g-C_3N_4$ _1 $g-C_3N_4$ +1%St $g-C_3N_4$ +0.6GO pg-0.1GO pg-0.3GO pg-0.6GO และ pg-0.9GO พบว่า pg-0.9GO มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากเมทิลีนบลูเป็นสีย้อมที่เป็นประจุบวกและกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุนที่มีตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชันในกลุ่มออกซิเจนที่เป็นประจุลบจึงทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุเกิดขึ้น เพราะฉะนั้นการที่เราเพิ่มปริมาณการเติมกราฟีนออกไซด์มากขึ้นเสมือนเป็นการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

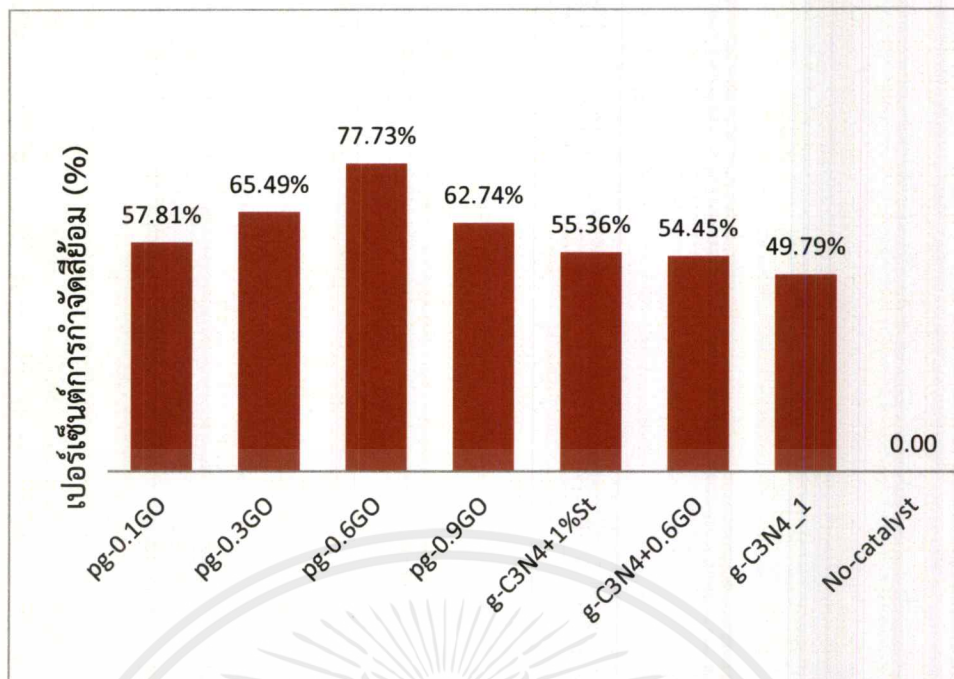
เพิ่มตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชันในกลุ่มออกซิเจนที่เป็นประจุลบ และจากผลของ BET พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกราฟีนออกไซด์จะเป็นการเพิ่มปริมาตรรูพรุน ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าสีของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน จึงเป็นหลักฐานว่ามีการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังรูปที่ ข-14

4.2.2 การศึกษาประสิทธิภาพกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล

การศึกษาประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของ $g-C_3N_4$, $g-C_3N_4+1\%St$, $g-C_3N_4+0.6GO$, $pg-0.1GO$, $pg-0.3GO$, $pg-0.6GO$ และ $pg-0.9GO$ ในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงวิสิเบิลสามารถทำได้โดยทำการปั่นกววนตัวเร่งปฏิกิริยากับสีย้อมเมทิลีนบลูความเข้มข้น 1.0×10^{-5} โมลาร์ ในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้เกิดการสมดุลของการดูดซับ จากนั้นทำการเปิดไฟเพื่อฉายแสงวิสิเบิลเป็นเวลา 150 นาที และทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 30 นาที

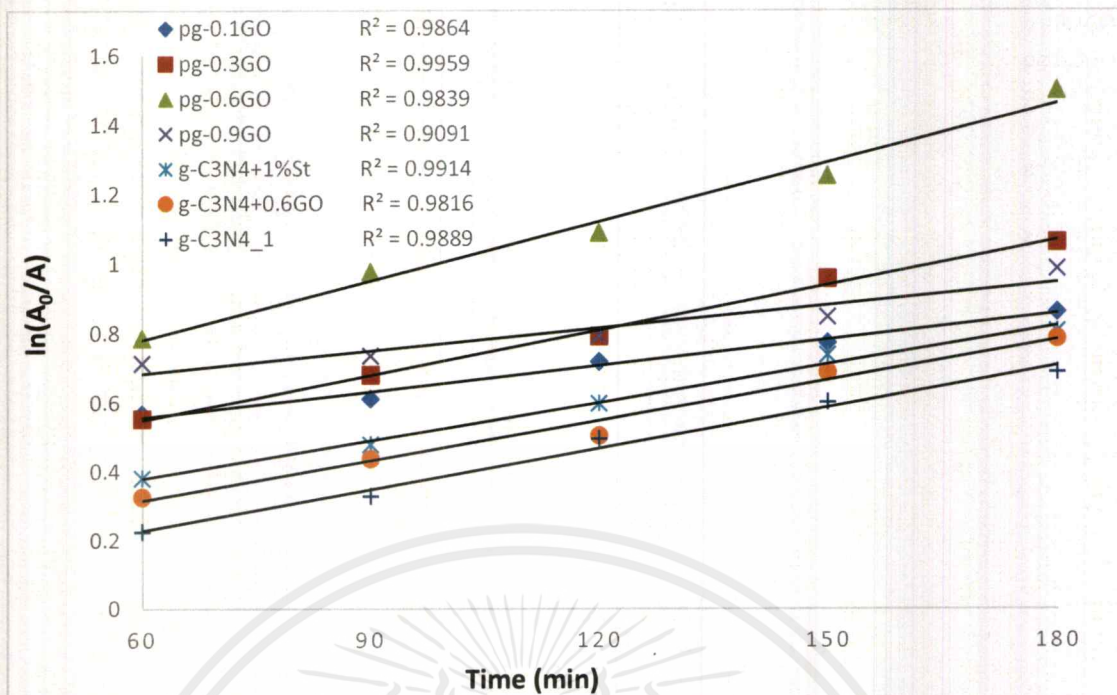


รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงเทียบกับเวลาของการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงประสิทธิภาพในการกำจัดฟอร์มัลดีไฮด์ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ ภายใต้การดูดซับในที่มืด 30 นาที และการฉายแสงวิสิเบิลเป็นเวลา 150 นาที

จากรูปที่ 4.19 แสดงค่าประสิทธิภาพในการกำจัดฟอร์มัลดีไฮด์ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ได้แก่ g-C₃N₄_1 g-C₃N₄+1%St g-C₃N₄+0.6GO pg-0.1GO pg-0.3GO pg-0.6GO และ pg-0.9GO จะมีค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดฟอร์มัลดีไฮด์เท่ากับ 49.79 55.36 54.45 57.81 65.49 77.73 และ 62.74 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกราฟีนออกไซด์จะทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดฟอร์มัลดีไฮด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากฟอร์มัลดีไฮด์เป็นสีย้อมที่เป็นประจุบวก และกราฟิติกคาร์บอน-ไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุนมีตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชันในกลุ่มออกซิเจนที่เป็นประจุลบ เมื่อเพิ่มปริมาณกราฟีนออกไซด์จะเป็นการเพิ่มตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชันในกลุ่มออกซิเจนที่เป็นประจุลบส่งผลให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุของตัวเร่งปฏิกิริยาและสีย้อมทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะไลติกลดลง [10]



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงอัตราเร็วของการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล

นอกจากการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูแล้ว ยังมีการศึกษาความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี โดยใช้แบบจำลองของแลงเมียร์ เป็นอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับที่หนึ่ง (pseudo-first order) ดังสมการต่อไปนี้

$$\ln\left(\frac{A_0}{A}\right) = k_{app}t$$

เมื่อนำมาพล็อตกราฟเพื่อหาค่าความชันหรือค่าคงที่อัตรา k_{app} ในการสลายสีย้อมอินดิโกคาร์มิน แสดงผลของกราฟแกน x คือ เวลา (นาที) และ แกน y คือ $\ln(A_0/A)$ โดยจะได้สมการเส้นตรง แสดงความสัมพันธ์ความชันของเส้นกราฟจะได้ค่าคงที่อัตรา (k_{app}) ซึ่งค่าคงที่อัตราจะแปรผันตรงกับอัตราการเกิดปฏิกิริยา (Rate reaction) ในที่นี้คืออัตราการสลายตัวของสีย้อมเมทิลีนบลู

แสดงว่า ค่าคงที่อัตราสูง ก็สามารถบ่งบอกได้ว่าสีย้อมเมทิลีนบลูมีการสลายตัวภายใต้กระบวนการโฟโตคะตะไลติกเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว

จากรูปที่ 4.20 แสดงอัตราเร็วของการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ได้แก่ g-C₃N₄_1 g-C₃N₄+1%St g-C₃N₄+0.6GO pg-0.1GO pg-0.3GO pg-0.6GO และ pg-0.9GO ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิลที่ช่วงเวลา 60 ถึง 180 นาที โดยสีย้อมเมทิลีนบลูมีความเข้มข้นเท่ากับ 1.0×10^{-5} โมลาร์ พบว่ามีค่าคงที่ในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูเท่ากับ 0.0040 0.0036 0.0031 0.0023 0.0044 0.0055 และ 0.0028 ต่อนาที ตามลำดับ ซึ่งทำให้ทราบว่า กราฟโฟติคคาร์บอนไนโตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุนที่มีการเติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณ 0.6 มิลลิกรัม มี

ค่าคงที่ในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูสูงที่สุด เนื่องจาก pg-0.6 มีค่าการดูดซับที่เหมาะสมทำให้เกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกได้ดีที่สุด

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าคงที่ในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูมินของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล

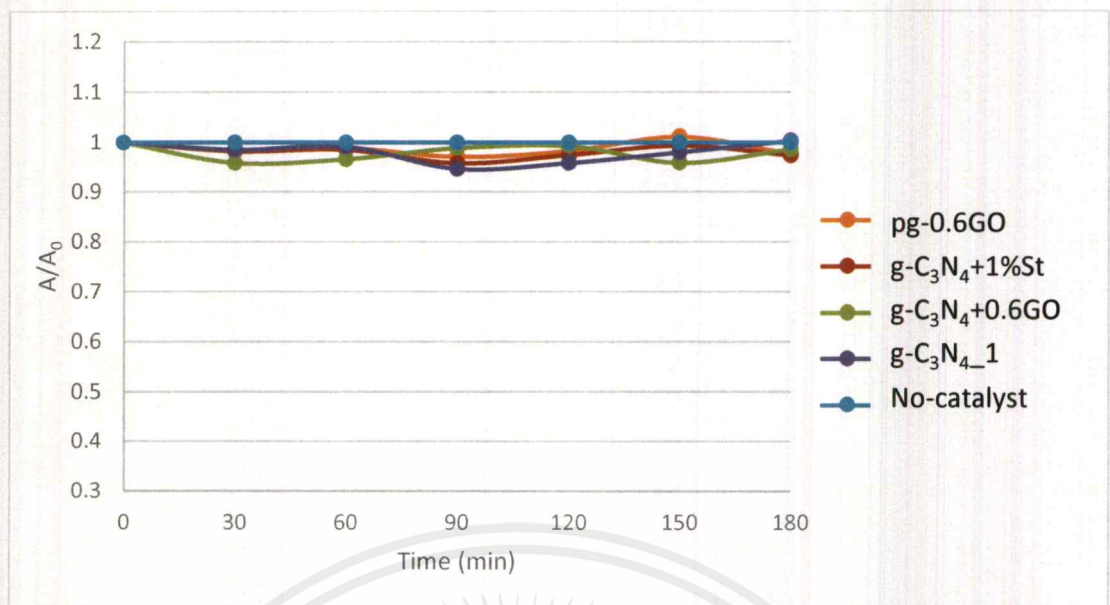
ตัวเร่งปฏิกิริยา	ค่าคงที่ในการสลายสีย้อม (k_{app}); min^{-1}
g-C ₃ N ₄ _1	0.0040
g-C ₃ N ₄ +1%St	0.0036
g-C ₃ N ₄ +0.6GO	0.0031
pg-0.1GO	0.0023
pg-0.3GO	0.0044
pg-0.6GO	0.0055
pg-0.9GO	0.0028

จากการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณกราฟีนออกไซด์ ส่งผลให้ค่าคงที่ในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู (k_{app}) มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อมีการเติมกราฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้น ซึ่งปริมาณการเติมกราฟีนออกไซด์ที่เหมาะสมที่สุดคือ 0.6 มิลลิกรัม

4.3 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มิน

4.3.1 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับในที่มืด

การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับในที่มืดของ g-C₃N₄_1 g-C₃N₄+1%St g-C₃N₄+0.6GO และ pg-0.6GO เพื่อทดสอบความสามารถในการดูดซับอินดิโกคาร์มินในที่มืด สามารถทำได้โดยทำการปั่นกวนตัวเร่งปฏิกิริยากับสีย้อมอินดิโกคาร์มินความเข้มข้น 1.0×10^{-5} โมลาร์ในที่มืดเป็นเวลา 180 นาที และทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 30 นาที

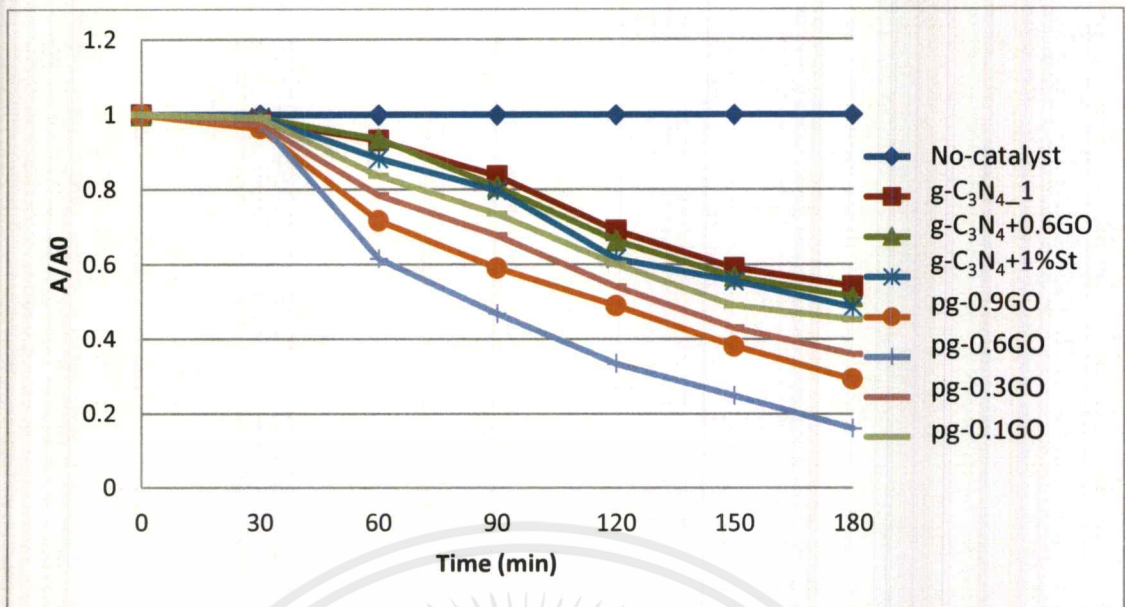


รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงเทียบกับเวลาของการดูดซับสีย้อมอินดิโกคาร์มินในที่มืดโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ

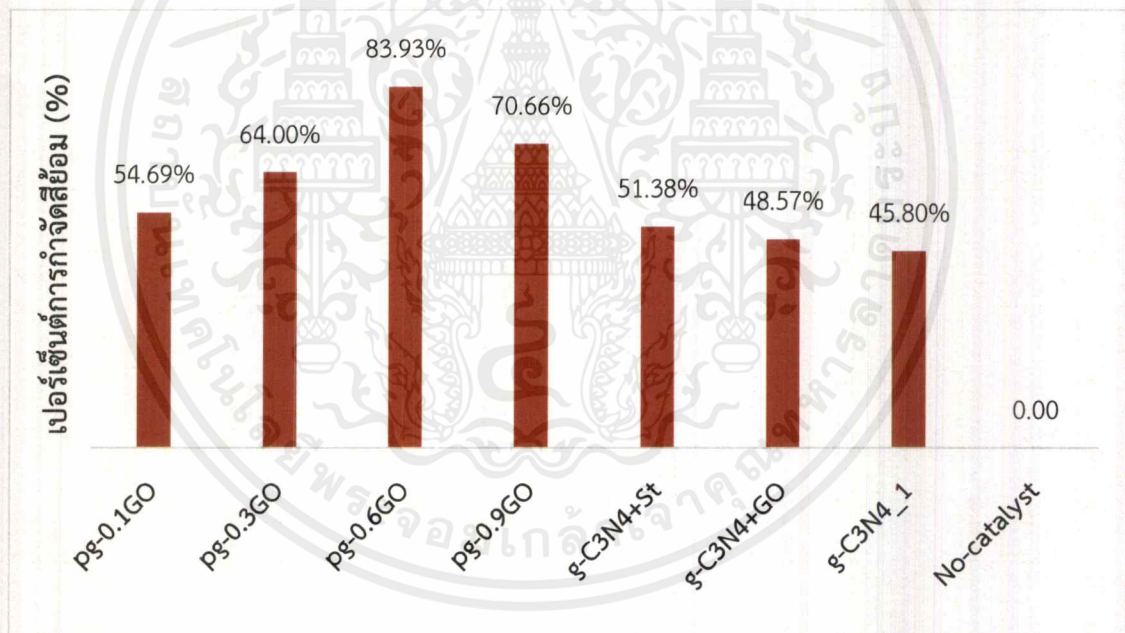
จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.21 แสดงค่าความสามารถการดูดกลืนแสงของการดูดซับสีย้อมอินดิโกคาร์มินในที่มืดโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง การดูดซับเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งพบว่าเมื่อเวลาผ่านไปจนถึง 180 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไม่มีการดูดซับสีย้อมอินดิโกคาร์มิน เนื่องจากอินดิโกคาร์มินเป็นสีย้อมที่เป็นประจุลบและตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นประจุลบจึงทำให้เกิดแรงผลักระหว่างประจุทำให้ไม่เกิดการดูดซับและสีของตัวเร่งก่อนและหลังการดูดซับสีย้อมอินดิโกคาร์มินไม่มีการเปลี่ยนสี จึงเป็นหลักฐานว่าตัวเร่งปฏิกิริยาไม่เกิดการดูดซับดังรูปที่ ข-15

4.3.2 การศึกษาประสิทธิภาพกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล

การศึกษาประสิทธิภาพในเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกภายใต้การฉายแสงวิสิเบิลของ g-C₃N₄ g-C₃N₄_1 g-C₃N₄+ 1% St g-C₃N₄+ 0.6GO pg-0.1GO pg-0.3GO pg-0.6GO และ pg-0.9GO สามารถทำได้โดยทำการปั่นกวนตัวเร่งปฏิกิริยากับสีย้อมอินดิโกคาร์มินความเข้มข้น 1.0×10^{-5} โมลาร์ ในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที เพื่อทำให้เกิดการสมดุลของการดูดซับ จากนั้นทำการเปิดไฟเพื่อฉายแสงวิสิเบิลเป็นเวลา 150 นาที และทำการเก็บตัวอย่างทุก 30 นาที



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงเทียบกับเวลาในการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มีนของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล

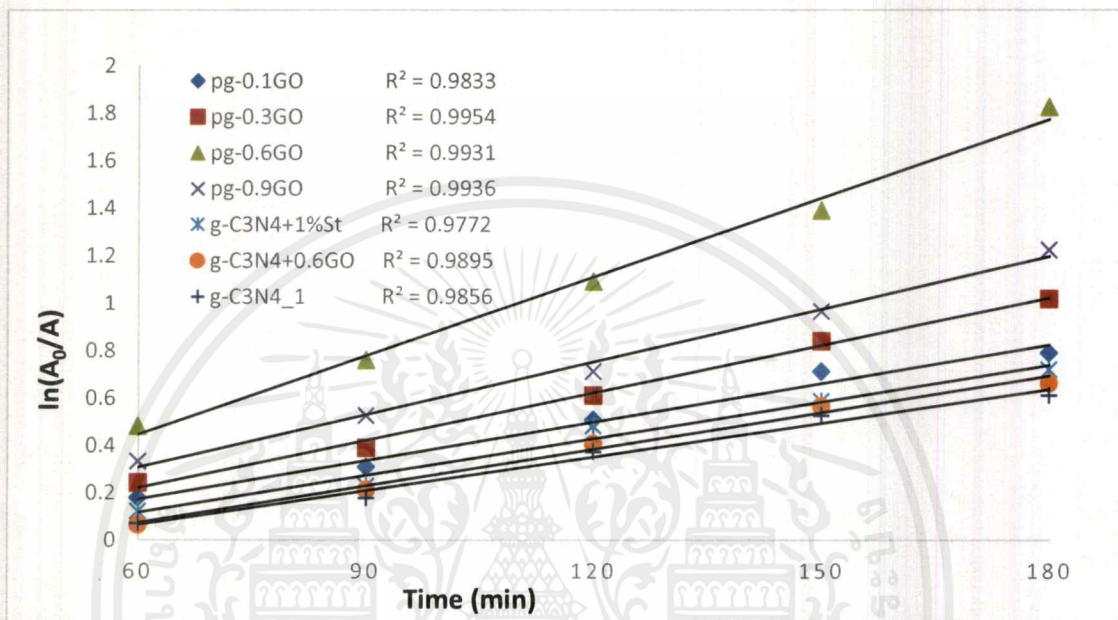


รูปที่ 4.23 กราฟแสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มีนของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ ภายใต้การดูดซับในที่มีด 30 นาที และการฉายแสงวิสิเบิลเป็นเวลา 150 นาที

จากรูปที่ 4.23 แสดงค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มีนของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ได้แก่ g-C₃N₄_1 g-C₃N₄+0.6GO g-C₃N₄+1%St pg-0.1GO pg-0.3GO pg-0.6GO และ pg-0.9GO จะมีค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมเท่ากับ 45.80 48.57 51.38 54.69 64.00 83.93 และ 70.66 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเพิ่มปริมาณกราฟีนจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกเพิ่มขึ้น และ pg-0.6GO มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มีนด้วยกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โฟโตคะจะไลติกภายใต้แสงวิสิเบิลสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับเทคนิค SEM แสดงว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกราฟีนออกไซด์จะทำให้ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามีความเป็นรูพรุนมากขึ้น จากเทคนิค BET เมื่อเพิ่มปริมาณกราฟีนออกไซด์ทำให้ปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้น และจากเทคนิคฟลูออโรสเปคโตรสโกปี พบว่า pg-0.6 มีอัตราการคายแสงน้อยที่สุด ทำให้ pg-0.6 มีประสิทธิภาพในการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้วิสิเบิลสูงสุด



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงอัตราเร็วของการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มินของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล

นอกจากการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มินแล้ว ยังมีการศึกษาความว่องไว ต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี โดยใช้แบบจำลองของแลงเมียร์ เป็นอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับที่หนึ่ง (pseudo-first order) ดังสมการต่อไปนี้

$$\ln\left(\frac{A_0}{A}\right) = k_{app}t$$

เมื่อนำมาพล็อตกราฟเพื่อหาค่าความชันหรือค่าคงที่อัตรา k_{app} ในการสลายสีย้อมอินดิโกคาร์มิน แสดงผลของกราฟแกน x คือ เวลา (นาที) และ แกน y คือ $\ln(A_0/A)$ โดยจะได้สมการเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ความชันของเส้นกราฟจะได้ค่าคงที่อัตรา (k_{app}) ซึ่งค่าคงที่อัตราจะแปรผันตรงกับอัตราการเกิดปฏิกิริยา (Rate reaction) ในที่นี้คืออัตราการสลายตัวของสีย้อมอินดิโกคาร์มิน

เมื่อ ค่าคงที่อัตราสูง อัตราการสลายตัวของสีย้อมอินดิโกคาร์มินภายใต้กระบวนการโฟโตคะตะไลติกก็มีค่าสูงเช่นกัน

จากรูปที่ 4.24 แสดงอัตราเร็วของการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มินของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ได้แก่ g-C₃N₄_1 g-C₃N₄+1%St g-C₃N₄+0.6GO pg-0.1GO pg-0.3GO pg-0.6GO และ pg-0.9GO

ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิลที่ช่วงเวลา 60 ถึง 180 นาที โดยอินดิโกคาร์มินมีความเข้มข้นเท่ากับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

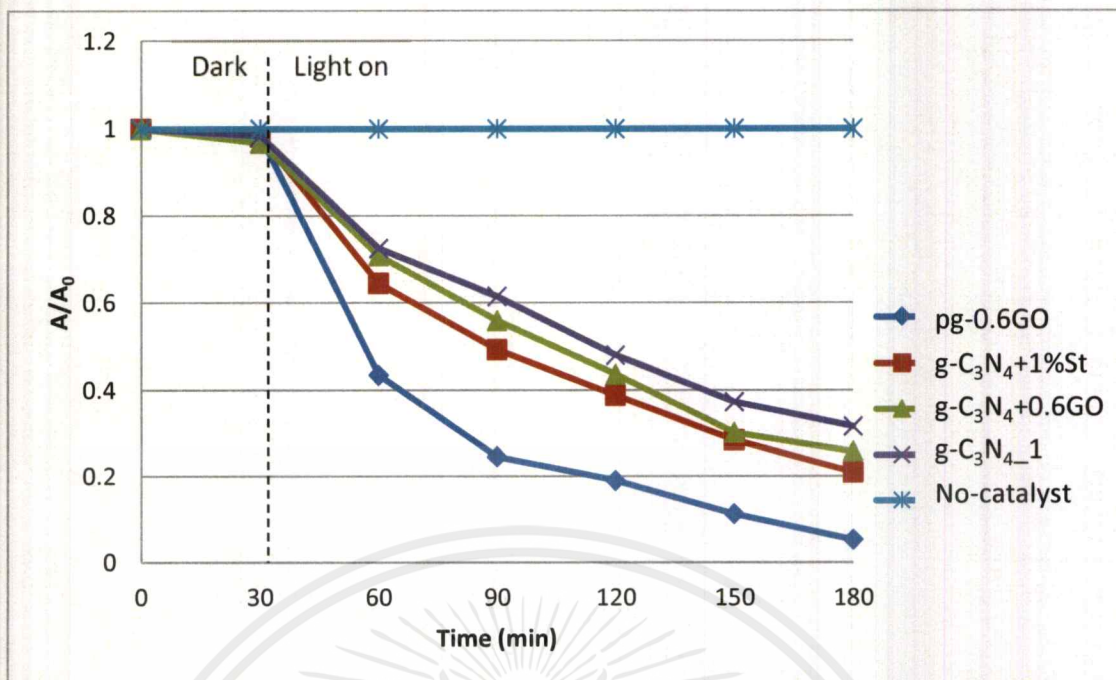
1.0×10^{-5} โมลาร์ พบว่ามีค่าคงที่ในการสลายสีย้อมอินดิโกคาร์มินเท่ากับ 0.0054 0.0047 0.0042 0.0059 0.0064 0.0112 และ 0.0073 ต่อนาที ตามลำดับ ซึ่งทำให้ทราบว่า pg-0.6 มีค่าคงที่ในการสลายสีย้อมอินดิโกคาร์มินสูงที่สุด

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าคงที่ในการสลายสีย้อมอินดิโกคาร์มินของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล

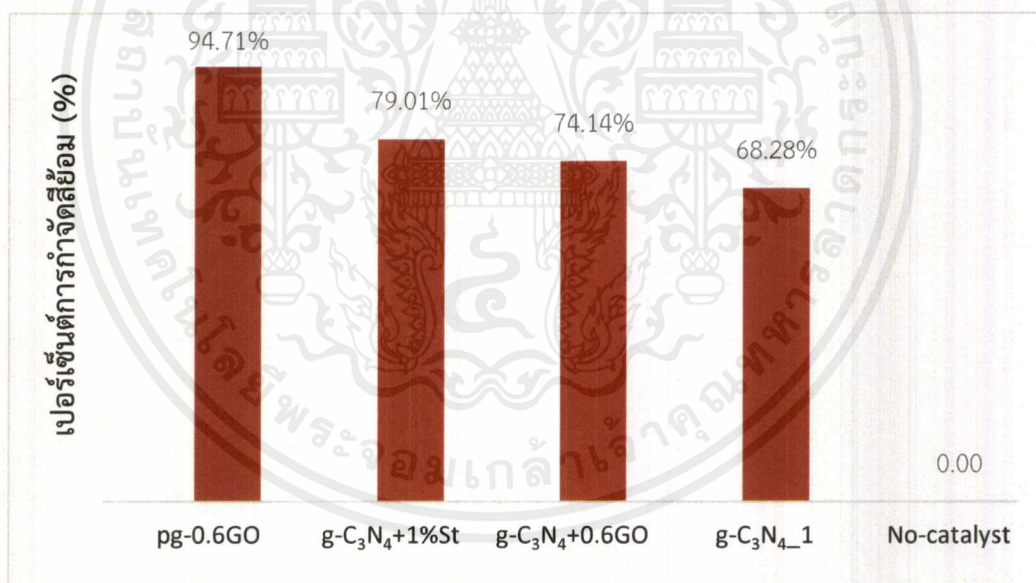
ตัวเร่งปฏิกิริยา	ค่าคงที่ในการสลายสีย้อม (k_{app}); min^{-1}
g-C ₃ N ₄ _1	0.0054
g-C ₃ N ₄ +1%St	0.0047
g-C ₃ N ₄ +0.6GO	0.0042
pg-0.1GO	0.0059
pg-0.3GO	0.0064
pg-0.6GO	0.0112
pg-0.9GO	0.0073

4.3.3 การศึกษาประสิทธิภาพการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสงยูวี

การศึกษาประสิทธิภาพในเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของ g-C₃N₄_1 g-C₃N₄+1% St g-C₃N₄+0.6GO และ pg-0.6GO ในการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มิน ภายใต้การฉายแสงยูวี สามารถทำได้โดยทำการปั่นกวนตัวเร่งปฏิกิริยากับสีย้อมอินดิโกคาร์มิน ความเข้มข้น 1.0×10^{-5} โมลาร์ ในที่มีดเป็นเวลา 30 นาที เพื่อทำให้เกิดการสมดุลของการดูดซับ จากนั้นทำการเปิดไฟเพื่อฉายแสงยูวีเป็นเวลา 150 นาที และทำการเก็บตัวอย่างทุก 30 นาที



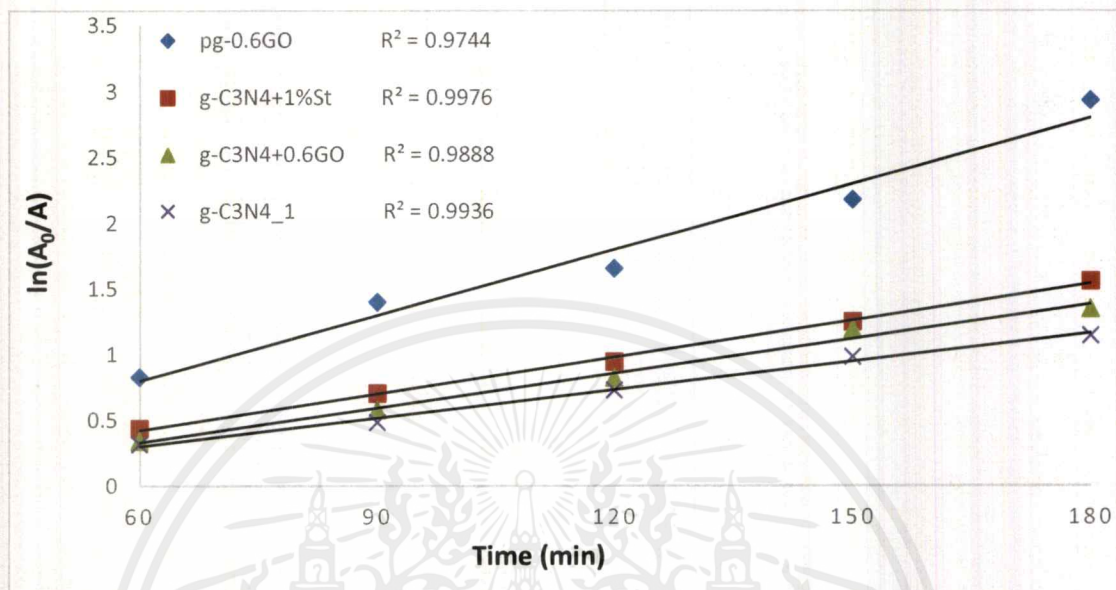
รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงเทียบกับเวลาในการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มินของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ ภายใต้การฉายแสงยูวี



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มินของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ ภายใต้การดูดซับในที่มืด 30 นาที และการฉายแสงยูวีเป็นเวลา 150 นาที

จากรูปที่ 4.26 แสดงค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มินของ g-C₃N₄_1 g-C₃N₄+1%St g-C₃N₄+0.6GO และ pg-0.6GO ภายใต้แสงยูวีจะมีค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมเท่ากับ 68.28 74.14 79.01 และ 94.71 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มินนั้นมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ตามลำดับเมื่อเพิ่มปริมาณกราฟีนจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับเทคนิค SEM ที่แสดงว่าผิวเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของ pg-0.6GO มีความเป็นรูพรุน จากเทคนิค BET พบว่าปริมาตรรูพรุนของ pg-0.6 มีค่าสูงสุด และ จากเทคนิคฟลูออโรสเปคโตรสโกปีพบว่า pg-0.6 มีอัตราการคายแสงน้อยที่สุด ทำให้ pg-0.6 มีประสิทธิภาพในการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้แสงยูวีสูงที่สุด



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงอัตราเร็วของการกำจัดสี้อมอินดิโกคาร์มินของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ ภายใต้การฉายแสงยูวี

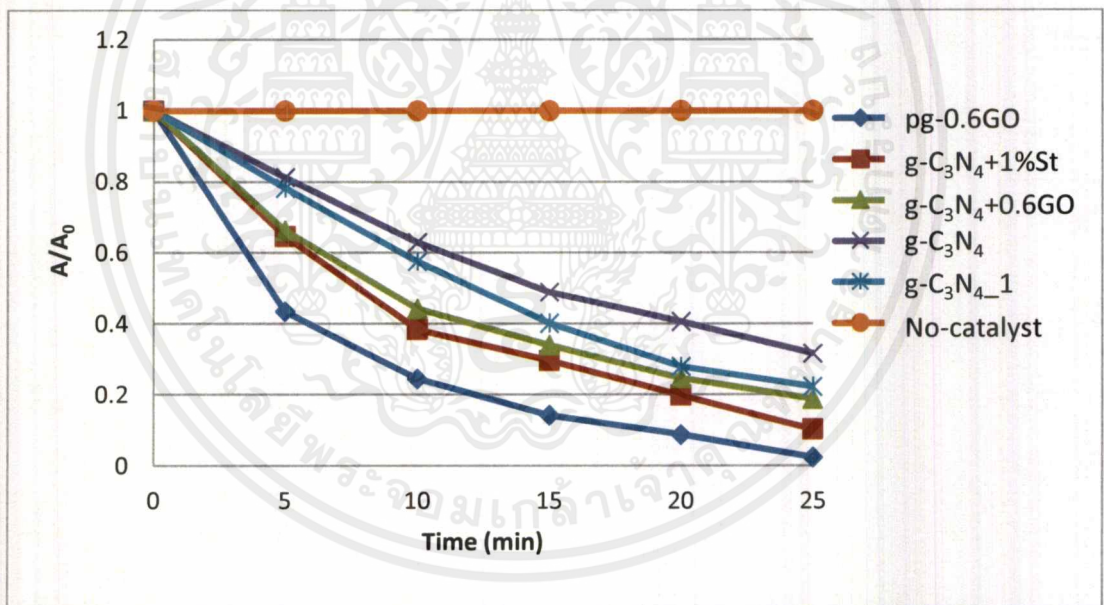
จากรูปที่ 4.27 แสดงอัตราเร็วของการกำจัดสี้อมอินดิโกคาร์มินของ $g-C_3N_4$, $g-C_3N_4+1\%St$, $g-C_3N_4+0.6GO$ และ $pg-0.6GO$ ภายใต้การฉายแสงยูวีที่ช่วงเวลา 60 ถึง 180 นาที โดยอินดิโกคาร์มินมีความเข้มข้นเท่ากับ 1.0×10^{-5} โมลาร์ แสดงผลของกราฟแกน x คือ เวลา (นาที) และ แกน y คือ $\ln(A_0/A)$ โดยจะได้สมการ เส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ความชันของเส้นกราฟจะได้ค่าคงที่อัตรา (k_{app}) ในการสลายสี้อมอินดิโกคาร์มิน ตามสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับที่หนึ่ง (pseudo-first order) พบว่ามีค่าคงที่ในการสลายสี้อมอินดิโกคาร์มินเท่ากับ 0.0073 0.0094 0.0082 และ 0.0165 ต่อนาที ตามลำดับซึ่งทำให้ทราบว่า pg-0.6 มีอัตราเร็วในการกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้แสงยูวีสูงที่สุด

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าคงที่ในการสลายสีของอินดิโกคาร์มินของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ ภายใต้การฉายแสงยูวี

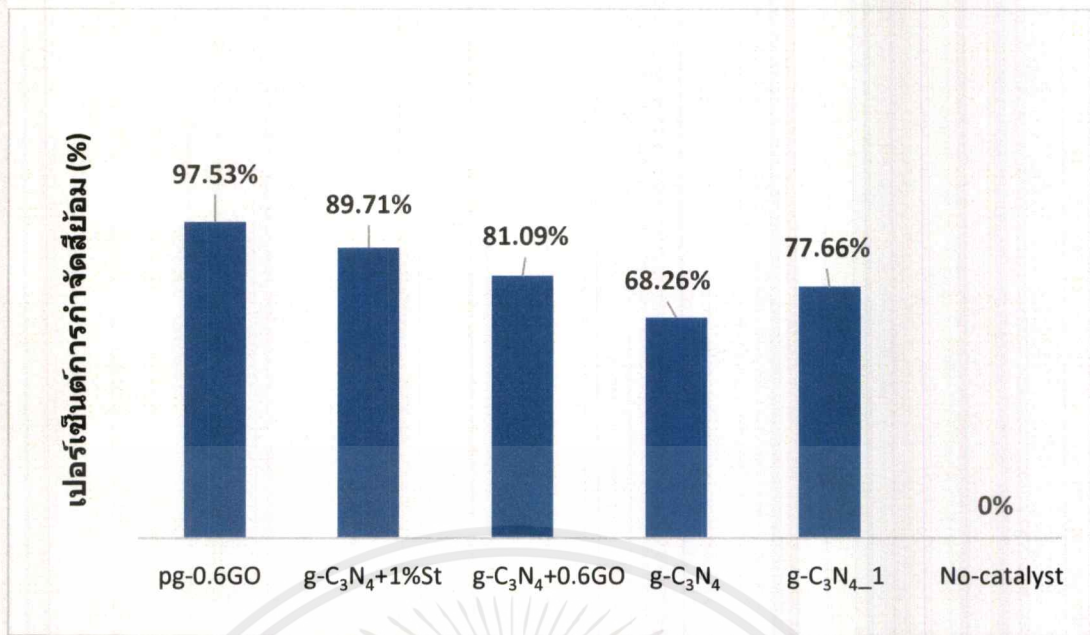
ตัวเร่งปฏิกิริยา	ค่าคงที่ในการสลายสี (k_{app}); min^{-1}
g-C ₃ N ₄ _1	0.0073
g-C ₃ N ₄ +1%St	0.0094
g-C ₃ N ₄ +0.6GO	0.0082
pg-0.6GO	0.0165

4.3.4 การศึกษาประสิทธิภาพการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้แสงอาทิตย์

การศึกษาประสิทธิภาพในเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของ g-C₃N₄ g-C₃N₄_1 g-C₃N₄+1%St g-C₃N₄+0.6GO และ pg-0.6GO ในการกำจัดสีของอินดิโกคาร์มิน ภายใต้แสงอาทิตย์ สามารถทำได้ โดยทำการปั่นกวณตัวเร่งปฏิกิริยากับสีของอินดิโกคาร์มิน ความเข้มข้น 1.0×10^{-5} โมลาร์ จากนั้นทำการฉายแสงจากดวงอาทิตย์ เป็นเวลา 25 นาที และทำการเก็บตัวอย่างทุก 5 นาที

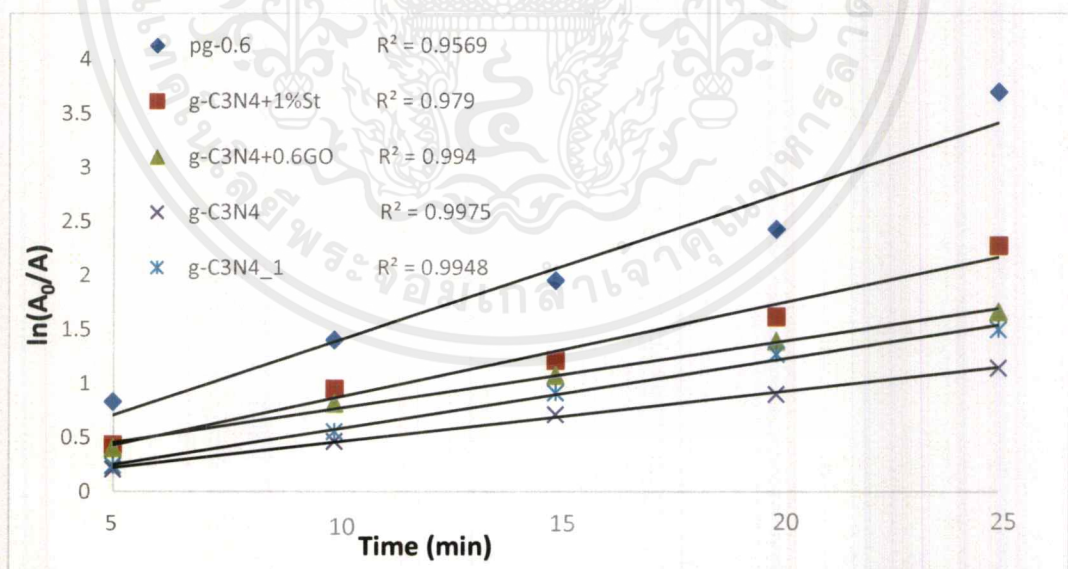


รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงเทียบกับเวลาของการสลายสีของอินดิโกคาร์มินโดยใช้ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ ภายใต้แสงอาทิตย์เป็นเวลา 25 นาที



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มินของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ ภายใต้แสงอาทิตย์เป็นเวลา 25 นาที

จากรูปที่ 4.29 แสดงค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มินของ g-C₃N₄ g-C₃N₄_1 g-C₃N₄+1%St g-C₃N₄+0.6GO และ pg-0.6GO ภายใต้แสงวิสิเบิล จะมีค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมเท่ากับ 68.26 77.66 81.09 89.71 และ 97.53 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงอัตราเร็วของการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มินของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ

จากรูปที่ 4.30 แสดงอัตราเร็วของการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มีนของ $g-C_3N_4$ $g-C_3N_4_1$ $g-C_3N_4+1\%St$ $g-C_3N_4+0.6GO$ และ $pg-0.6GO$ ภายใต้แสงอาทิตย์เป็นเวลา 25 นาที โดยอินดิโกคาร์มีนมีความเข้มข้นเท่ากับ 1.0×10^{-5} โมลาร์ แสดงผลของกราฟแกน x คือ เวลา (นาที) และแกน y คือ $\ln(A_0/A)$ โดยจะได้สมการเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ความชันของเส้นกราฟจะได้ค่าคงที่อัตรา (k_{app}) ในการสลายสีย้อมอินดิโกคาร์มีน ตามสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับที่หนึ่ง (pseudo-first order) พบว่ามีค่าคงที่ในการสลายสีย้อมอินดิโกคาร์มีนเท่ากับ 0.0466 0.0648 0.0864 0.0611 และ 0.1350 ต่อนาที ตามลำดับ ซึ่งทำให้ทราบว่า $pg-0.6GO$ มีค่าคงที่ในการสลายสีย้อมอินดิโกคาร์มีนสูงที่สุด

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าคงที่ในการสลายสีย้อมอินดิโกคาร์มีนของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ ภายใต้แสงอาทิตย์เป็นเวลา 25 นาที

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ค่าคงที่ในการสลายสีย้อม (k_{app}); min^{-1}
$g-C_3N_4$	0.0466
$g-C_3N_4_1$	0.0648
$g-C_3N_4+1\%St$	0.0864
$g-C_3N_4+0.6GO$	0.0611
$pg-0.6GO$	0.1350

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

การศึกษากระบวนการดูดซับและกระบวนการโฟโตคะตะไลติกของกราฟาไฟติกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุนด้วยกระบวนการควบแน่นด้วยความร้อน โดยใช้เมลามีนแปง และกราฟีนออกไซด์เป็นสารตั้งต้น ภายใต้การศึกษาผลของการเติมกราฟีนออกไซด์ตั้งต้นในปริมาณที่แตกต่างกัน ในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูและสีย้อมอินดิโกคาร์มิน สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. จากการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงด้วยเทคนิค FT-IR พบว่า $g-C_3N_4$, $g-C_3N_4$ _1 และ $g-C_3N_4 + St$ มีการสั่นของเลขคลื่นในช่วงที่ใกล้เคียงกัน ได้แก่ การสั่นของเลขคลื่นที่ 812 (triazine breathing) การสั่นของเลขคลื่นในช่วง 1646-1225 (C-N heterocycles stretching) การสั่นของเลขคลื่นที่ 3189 (N-H stretching) แสดงให้เห็นว่าเป็นเอมีนทุติยภูมิ เนื่องจากเกิดการควบแน่นเป็นการโฟโตคาร์บอนไนไตรด์ ซึ่งตรงตามโครงสร้างของกราฟาไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ ใน FT-IR spectra นอกจากนี้ในโครงสร้างของ $g-C_3N_4+0.6GO$, $pg-0.1GO$, $pg-0.3GO$, $pg-0.6GO$ และ $pg-0.9GO$ ยังพบการสั่นของเลขคลื่นที่ 1382 (C-O stretching) การสั่นของเลขคลื่นที่ 1027 (C-OH stretching) การสั่นของเลขคลื่นที่ 1231 (C-O-C) ซึ่งเป็นการ cross-link ของแผ่นกราฟาไฟติกคาร์บอนไนไตรด์และแผ่นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ และเป็นการยืนยันว่ามีรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์อยู่ในโครงสร้างของวัสดุคอมโพสิต

2. จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของกราฟาไฟติกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุน ด้วยเครื่อง SEM พบว่ายิ่งเติมกราฟีนออกไซด์มากขึ้นจะทำให้มีลักษณะสัณฐานวิทยาเป็นเกล็ดเล็กๆ บริเวณผิวของอนุภาคมีรอยเหี่ยวย่นและมีความเป็นรูพรุน เนื่องจากการซ้อนทับกันของแผ่นกราฟาไฟติกคาร์บอนไนไตรด์และแผ่นของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ และการสลายตัวของแปงและหมู่ฟังก์ชันที่มีคาร์บอนและออกซิเจนทำให้อนุภาคมีขนาดมีขนาดเล็กลง

3. การศึกษาการดูดกลืนแสงและการวิเคราะห์หาค่าแถบพลังงาน (Eg) ที่เปลี่ยนแปลงของกราฟาไฟติกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุน ด้วยเทคนิค DRS พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล และเมื่อเพิ่มปริมาณกราฟีนออกไซด์สีของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลที่เข้มข้นทำให้ค่าการดูดกลืนแสงมีการขยับไปที่ความยาวคลื่นสูงขึ้นและแถบพลังงานมีค่าลดลง

4. สเปกโตรฟลูออโรมิเตอร์เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดการเรืองแสงของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุน พบว่า pg-0.6GO ที่มีค่าการคายแสงน้อยที่สุด เนื่องจากกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์สามารถส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังแผ่นของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ได้ ส่งผลให้อัตราการเกิดกระบวนการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮลลดลง

5. จากการศึกษาประสิทธิภาพกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุนในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล 150 นาที รวมทั้งศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่เป็นรูพรุนเป็นเวลา 180 นาที พบว่ากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุนที่เติมกราฟีนออกไซด์ ปริมาตร 0.9 มิลลิลิตร มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มีมากที่สุด และกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุนที่เติมกราฟีนออกไซด์ปริมาตร 0.6 มิลลิลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้การฉายแสงวิสิเบิลมากที่สุด

6. จากการศึกษาประสิทธิภาพกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุนในการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มิน ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล 150 นาที รวมทั้งศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับในที่มีของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่เป็นรูพรุนเป็นเวลา 180 นาที พบว่ากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุนที่เติมกราฟีนออกไซด์ ปริมาตร 0.6 มิลลิลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มินด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้การฉายแสงวิสิเบิลมากที่สุด แต่ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมอินดิโกคาร์มินในที่มีของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงนั้นมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

7. จากการศึกษาปริมาณผลของการเติมกราฟีนออกไซด์ตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ที่แตกต่างกัน พบว่ากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุนที่เติมกราฟีนออกไซด์ ปริมาตร 0.6 มิลลิลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมมากที่สุด

8. จากการศึกษาผลของแหล่งกำเนิดแสงที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มินของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุนด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ได้แก่ แสงวิสิเบิล แสงยูวี และแสงจากดวงแสงอาทิตย์ เป็นต้น พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงสามารถทำงานภายใต้แสงจากดวงแสงอาทิตย์ได้มากกว่าแสงยูวีและแสงวิสิเบิล ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการดัดแปลงกราฟฟิติกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุนให้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่ง่ายต่อการใช้งาน เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่ได้จากการสังเคราะห์มีลักษณะเป็นผงขนาดเล็กจึงสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ค่อนข้างน้อย
2. ควรมีการศึกษาผลของการเตรียมกราฟฟิติกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุนด้วยกระบวนการควบแน่นด้วยความร้อน ภายใต้การเผาแบบอื่น เช่น เผาภายใต้บรรยากาศแก๊สเฉื่อย เพื่อให้เกิดกระบวนการรีดักชันด้วยความร้อนอย่างสมบูรณ์
3. ควรตรวจสอบและพิสูจน์เอกลักษณ์อย่างอื่น เช่น PL TEM เพื่อดูลักษณะแผ่นของกราฟฟิติกคาร์บอนไนไตรด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่มีรูพรุน เป็นต้น



เอกสารอ้างอิง

- [1] Piya Soranakom et al. 2016. "Development of TiO₂ CeO₂ CuO:Ag NPs composite for photoconversion of CO₂ to fuels." A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of The Requirement for The Degree of Bachelor of Science (Industrial Chemistry) Department of Chemistry, Faculty of Science King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang academic year.
- [2] Yu Zheng et al. 2017. "A comparison of graphitic carbon nitrides synthesized from different precursors through pyrolysis." Journal of Photochemistry and Photobiology A : Chemistry. 2017(332) : 32-44.
- [3] Panumas maochumsang et al. 2017. "Preparation, Characterization and Photocatalytic Properties of Graphitic Carbon Nitride (g-C₃N₄)." A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of The Requirement for The Degree of Bachelor of Science (Industrial Chemistry) Department of Chemistry, Faculty of Science King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang academic year.
- [4] Guoping Dong et al. 2014. "A Fantastic Graphitic carbon nitride material : Electronic structure photocatalysis and photoelectronic properties." Journal of Photochemistry and Photobiology. 2014(20) : 33-50.
- [5] Fengjuan Chen et al. 2019. "Effects of the synthesis conditions on the photocatalytic activities of sulfide-graphene oxide composites." Dyes and Pigments. 2019(162) : 177-188.
- [6] Waheed Iqbal et al. 2017. "One-step in situ green template mediated porous graphitic carbon nitride for efficient visible light photocatalytic activity." Journal of Environmental Chemical Engineering. 2017(5) : 3500-3507.
- [7] Lei Shi et al. 2019. "The preparation of spherical mesoporous g-C₃N₄ with highly improved photocatalytic performance for H₂ production and rhodamine B degradation." Materials Research Bulletin Volurie. 2019(113) : 115-121.
- [8] Ruiyang Zhang et al. 2018. "Multifunctional g-C₃N₄/Graphene oxide wrapped sponge monoliths as highly efficient adsorbent and photocatalyst." Applied Catalysis B: Environmental. 2018(235) : 17-25.

- [9] Long Sun et al. 2017. “Antibacterial Activity of Graphene Oxide/ $g\text{-C}_3\text{N}_4$ Composite through Photocatalytic Disinfection under Visible Light.” ACS Sustainable Chem. 2017(10) : 8693–8701.
- [10] Bing Ai et al. 2015 “Metal-free graphene-carbon nitride hybrids for photo-degradation of organic pollutants in water.” Catalysis Today. 2015(258) : 668-675.
- [11] นางสาววิสุตา บุญช่วย. 2557. เชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์และผลิตภัณฑ์ (Fossil Fuel and Products). [Online]. Available: <https://sites.google.com/site/wissuta45488/phawa-mlp-his-thi-keid-cak-kar-phlit-laea-kar-chi-phlitphanth-pitorkhem/mlphawa-thang-na-water-pollution>.
- [12] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2562. มลพิษทางน้ำ. [Online]. Available: <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%A1%E0%B8%A5%E0%B8%9E%E0%B8%B4%E0%B8%A9%E0%B8%97%E0%B8%B2%E0%B8%87%E0%B8%99%E0%B9%89%E0%B8%B3#/media/File:Nrborderborderentrythreecolorsmay05-1-.JPG>.
- [13] ดร.ภิญโญ พานิชพันธ์ และคณะ. 2558. การบำบัดน้ำเสีย. [Online]. Available: https://il.mahidol.ac.th/e-media/ecology/chapter3/chapter3_water13.htm.
- [14] Lux Royal (Thailand) Co., Ltd. สาเหตุหลักของปัญหาสิ่งแวดล้อม. [Online]. Available: https://www.lux.co.th/cpt_blog/cause-and-impact-of-water-pollution/.
- [15] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุปถัมภ์ นาครักษ์. 2559. “การกำจัดสารปนเปื้อนอินทรีย์ในน้ำ โดยกระบวนการ โฟโตคะตะไลซิส.” ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร (รหัสโครงการ R2558C139).
- [16] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2557. เมลามีน. [Online]. Available: <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%80%E0%B8%A1%E0%B8%A5%E0%B8%B2%E0%B8%A1%E0%B8%B5%E0%B8%99>.
- [17] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2557. ไฟล์:Melamine2. [Online]. Available: <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%80%E0%B8%A1%E0%B8%A5%E0%B8%B2%E0%B8%A1%E0%B8%B5%E0%B8%99#/media/%E0%B9%84%E0%B8%9F%E0%B8%A5%E0%B9%8C:Melamine2.svg>.
- [18] Hefei tnj อุตสาหกรรมเคมี co., ltd. เกรดอุตสาหกรรมจีนเมลามีนผง 99.8%. [Online]. Available: http://th.tnjchem.com/uploadfile/201609/14/b1f5c453bd5f8a0e3ff98be583ba2a87_medium.jpg.

- [19] LCAC – มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์. [Online]. Available: <http://lcac.sci.ku.ac.th/joomlaCMS/index.php/th/eng/52-graphitic-carbon-nitride-2>.
- [20] Wikipedia. 2014. **Graphitic carbon nitride**. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Graphitic_carbon_nitride#cite_note-Guo-4.
- [21] Xiu Liu et al. 2016. "Recent studies on the decomposition and strategies of smoke and toxicity suppression for polyurethane based materials." RSC Adv. 2016(6) : 74742.
- [22] Jariyaphon Maklam and Phannimittawadee Prommitr. 2014. "Application of yam (*Dioscorea alata*) starch for biodegradable plastic products." Research project proposed as part of the study Bachelor of Science Program Department of Natural Resources and Environment, May 2014. Copyright is Naresuan University.
- [23] เขาวนิพร ชิพประสพ และคณะ. 2558. "องค์ประกอบทางเคมีและปริมาณอะไมโลส ในข้าวพันธุ์พื้นเมือง จังหวัดพัทลุง" โปรแกรมวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา.
- [24] Virtual ChemBook. 2003. **Carbohydrates**. [Online]. Available: <http://chemistry.elmhurst.edu/vchembook/540carbohydrates.html>.
- [25] Virtual ChemBook. 2003. **Carbohydrates**. [Online]. Available: <http://chemistry.elmhurst.edu/vchembook/images/540combust.GIF>.
- [26] Onuma Sirasuntorn. 2012. "Preparation of metal oxide/layered silicate nano particles by heterocoagulation method and their photocatalytic properties." Central Library Silpakorn University Nakhon Pathom 2012-08-10.
- [27] Worapol Tejangkura. 2017. "Preparation, Characterization and Photocatalytic Properties of rGO/TiO₂/Natural Rubber Composite sheets." A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of The Requirement for The Degree of Bachelor of Science (Industrial Chemistry) Department of Chemistry, Faculty of Science King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang academic year 2017.
- [28] Hareema Saleem et al. (2018). "Synthesis route of reduced graphene oxide via thermal reduction of chemically exfoliated graphene oxide." Materials Chemistry and Physics. 2018(204) : 1-7.

- [29] Seung Hun Huh. 2008. "Thermal Reduction of Graphene Oxide" Nanotechnology Convergence Lab, Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology (KICET), South Korea.
- [30] ขนิษฐา. 2553. **สีย้อมในอุตสาหกรรมฟอกย้อม**. [Online]. Available: http://tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?bookID=370&pageid=1&read=true&count=true.
- [31] Wikipedia. 2019. **Methylene blue**. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Methylene_blue.
- [32] Wikipedia. 2019. **Methylene blue**. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Methylene_blue#/media/File:Methylene_blue-2d-skeletal.svg.
- [33] Pacharawan Ouengsirirawad and Dr. Chalerm Ruangviriyachai. 2016. "Adsorption of Methylene Blue Dye Using Dried Shell of Bamboo Shoots" The National and International Graduate Research Conference 2016.
- [34] Sudip Mondal et al. 2017. "Plasmon induced enhanced photocatalytic activity of gold loaded hydroxyapatite anoparticles for methylene blue degradation under visible light." RSC Advances. 2017(7) : 8633-8645.
- [35] Ji-Eun Lee et al. 2015. "Fabrication of Au/GO/ZnO composite nanostructures with excellent photocatalytic performance." Materials Chemistry and Physics 2015.
- [36] Wikipedia. 2019. **Indigo carmine**. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Indigo_carmine.
- [37] ผศ. ดร. พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และคณะ. 2019. **Indigo carmine**. [Online]. Available: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/5235/indigocarmine3%E0%B8%AD%E0%B8%B4%E0%B8%99%E0%B8%94%E0%B8%B4%E0%B9%82%E0%B8%81%E0%B8%84%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B9%8C%E0%B8%A1%E0%B8%B5%E0%B8%99>.
- [38] Amira Zaouak et al. 2018. "Gamma-radiation induced decolorization and degradation on aqueous solutions of Indigo Carmine dye." Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 317(1) : 37-44.
- [39] V. Loryuenyong et al. 2016. "Synergistic Effects of Graphene-Polyaniline Counter Electrode in Dye-Sensitized Solar Cells" Micro & Nano Letters, 2016(11) : 77-80.

- [40] Wee-Jun Ong. et al. 2015 “ Surface charge modification *via* protonation of graphitic carbon nitride ($g\text{-C}_3\text{N}_4$) for electrostatic self-assembly construction of 2D/ 2D reduced graphene oxide (rGO)/ $g\text{-C}_3\text{N}_4$ nanostructures to-ward enhanced photocatalytic reduction of carbon dioxide to methane.” *Nano Energy*. 2015(13) : 757-770.
- [41] Yibing Li. et al. 2013. “Cross-Linked $g\text{-C}_3\text{N}_4$ /rGO Nanocomposites with Tunable Band Structure and Enhanced Visible Light Photocatalytic Activity.” *Small*. 2013.





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การเตรียมสารละลายสื่อสังเคราะห์

1. การเตรียมสื่อเมทิลีนบลู ความเข้มข้น 1.0×10^{-5} โมลาร์

วิธีทำ

ชั่งผงเมทิลีนบลู 0.0033 กรัม ในปิเกตอร์ ละลายด้วยน้ำกลั่นแล้วเทลงขวดปรับปริมาตร ขนาด 1000 มิลลิลิตร ทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

2. การเตรียมสื่ออินดิโกคาร์มีน ความเข้มข้น 1.0×10^{-5} โมลาร์

วิธีทำ

ชั่งผงเมทิลีนบลู 0.0054 กรัม ในปิเกตอร์ ละลายด้วยน้ำกลั่นแล้วเทลงขวดปรับปริมาตร ขนาด 1000 มิลลิลิตร ทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น



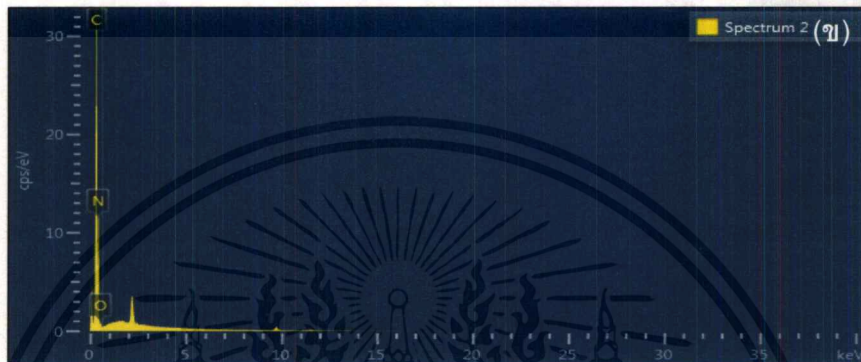
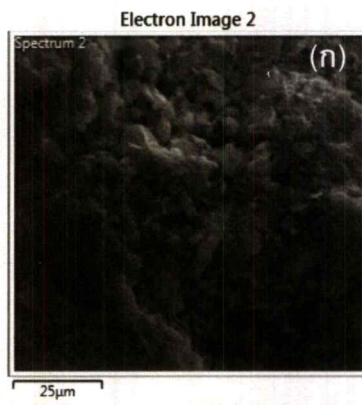
ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบและพิสูจน์เอกลักษณ์

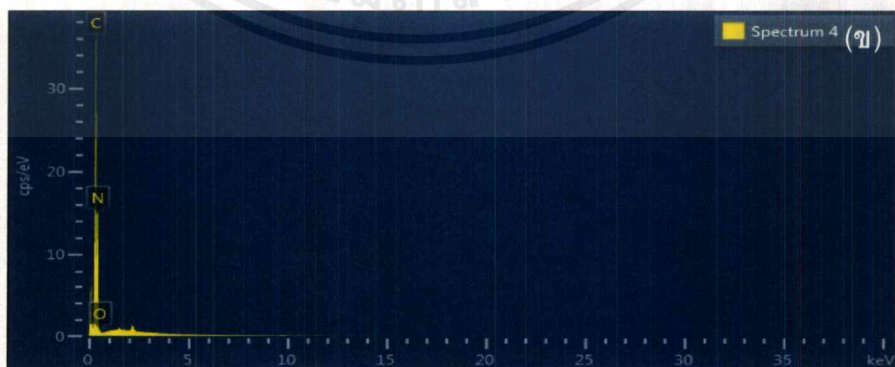
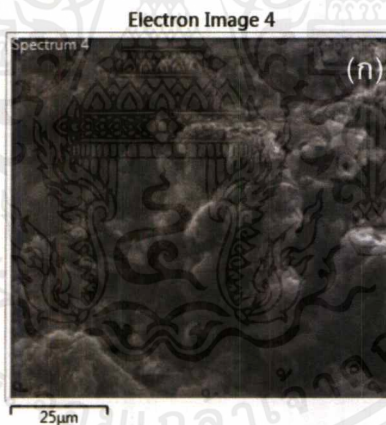
1. Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX)



รูปที่ ข-1 (ก) ภาพ SEM และ (ข) ผล EDX สเปกตรัมของ $g\text{-C}_3\text{N}_4\text{-1}$



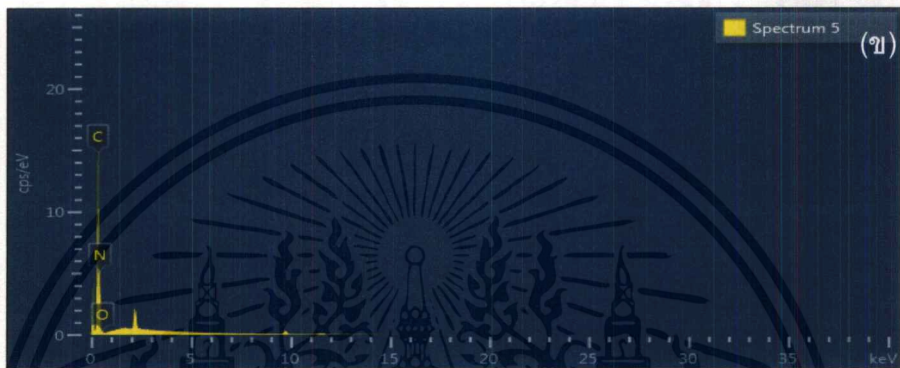
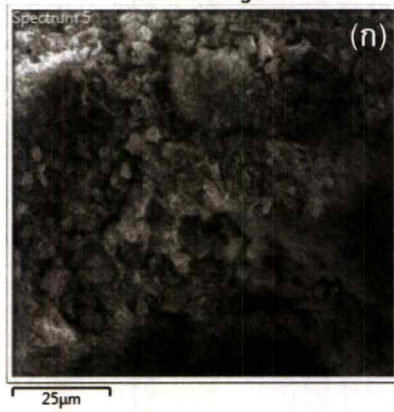
รูปที่ ข-2 (ก) ภาพ SEM และ (ข) ผล EDX สเปกตรัมของ $g\text{-C}_3\text{N}_4+1\%\text{St}$



รูปที่ ข-3 (ก) ภาพ SEM และ (ข) ผล EDX สเปกตรัมของ $g\text{-C}_3\text{N}_4+0.6\text{GO}$

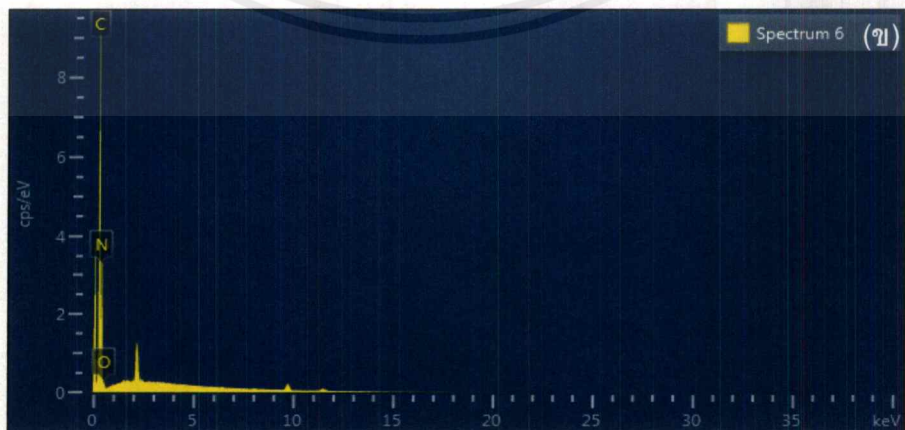
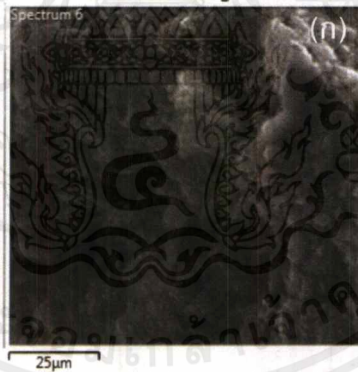
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Electron Image 5



รูปที่ ข-4 (ก) ภาพ SEM และ (ข) ผล EDX สเปกตรัมของ pg-0.3GO

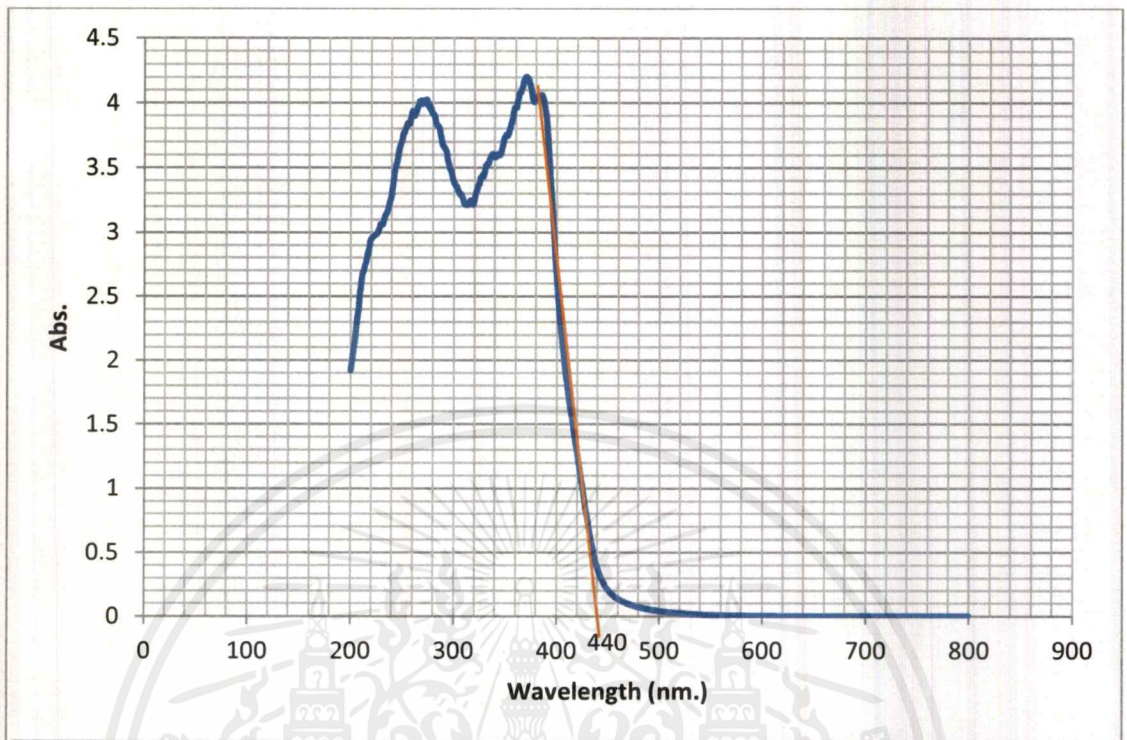
Electron Image 6



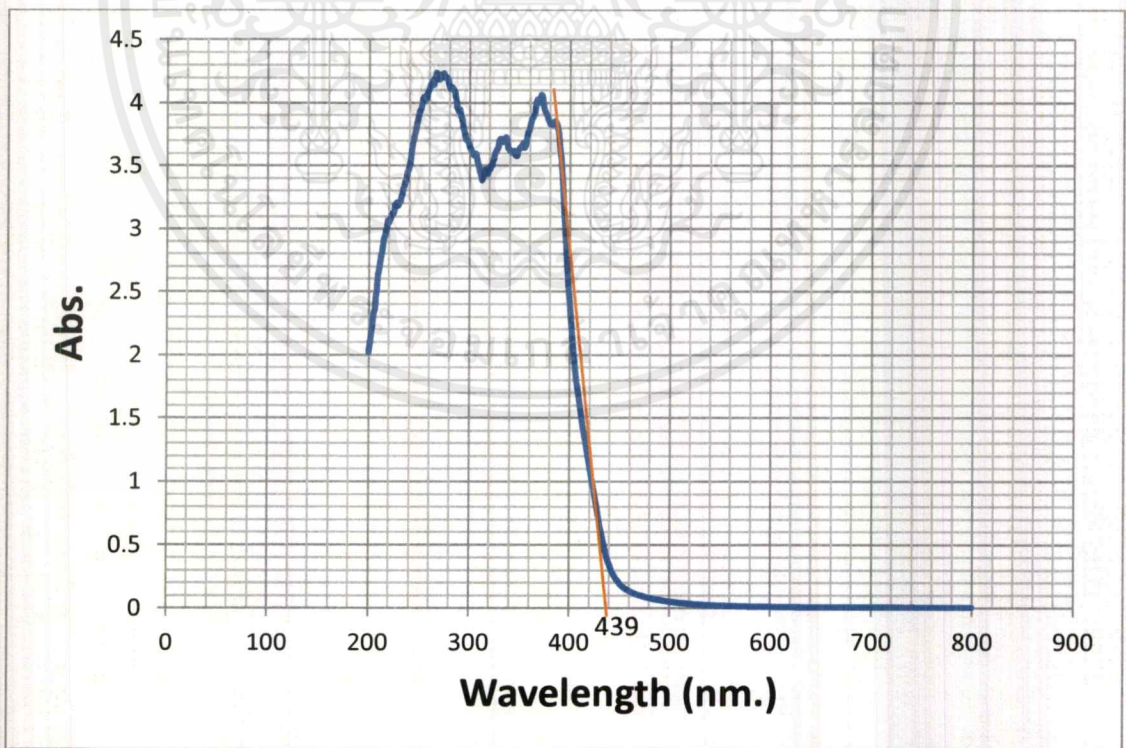
รูปที่ ข-5 (ก) ภาพ SEM และ (ข) ผล EDX สเปกตรัมของ pg-0.6GO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. UV-Visible Diffuse Reflectance spectroscopy (DRS)

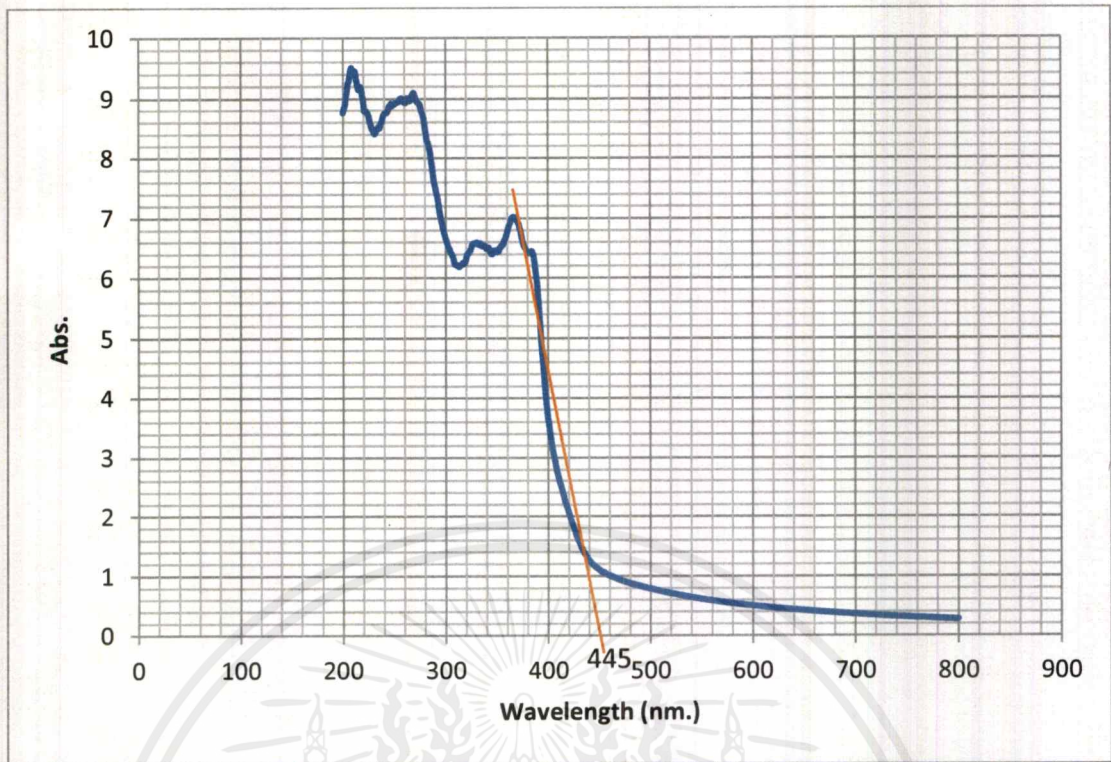


รูปที่ ข-6 แสดงการหาความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงของ $g\text{-C}_3\text{N}_4$

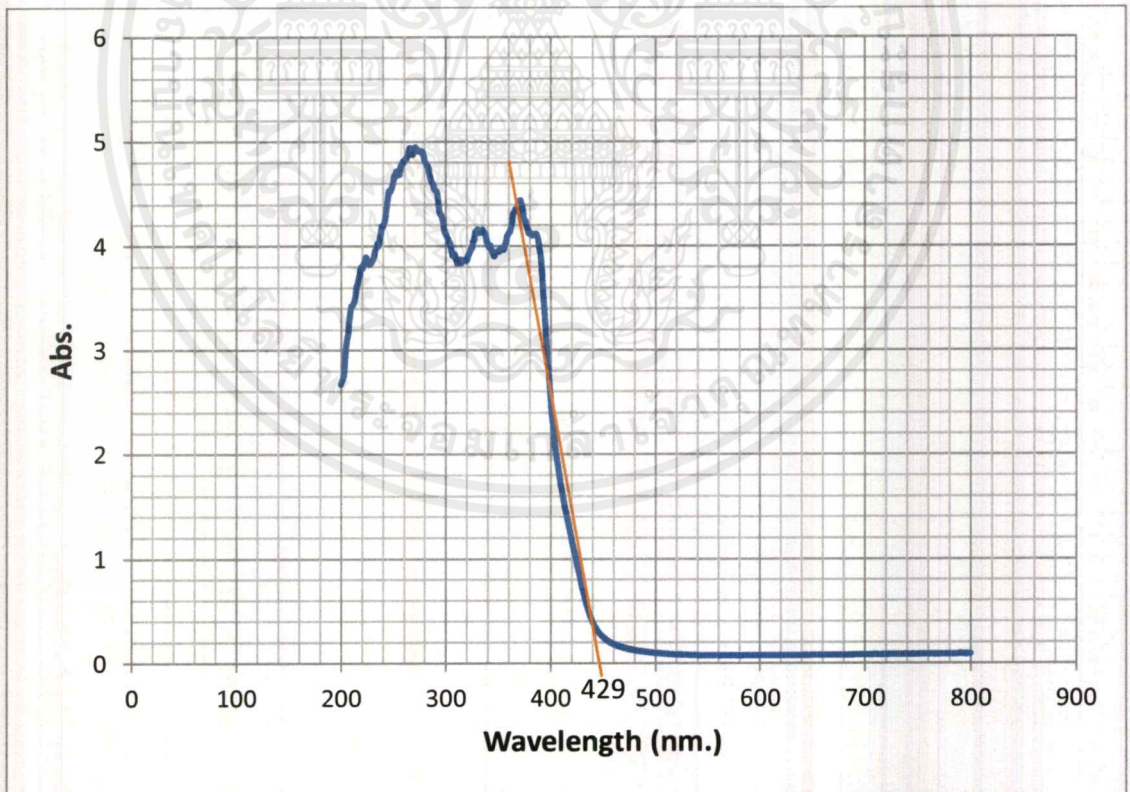


รูปที่ ข-7 แสดงการหาความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงของ $g\text{-C}_3\text{N}_4_1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

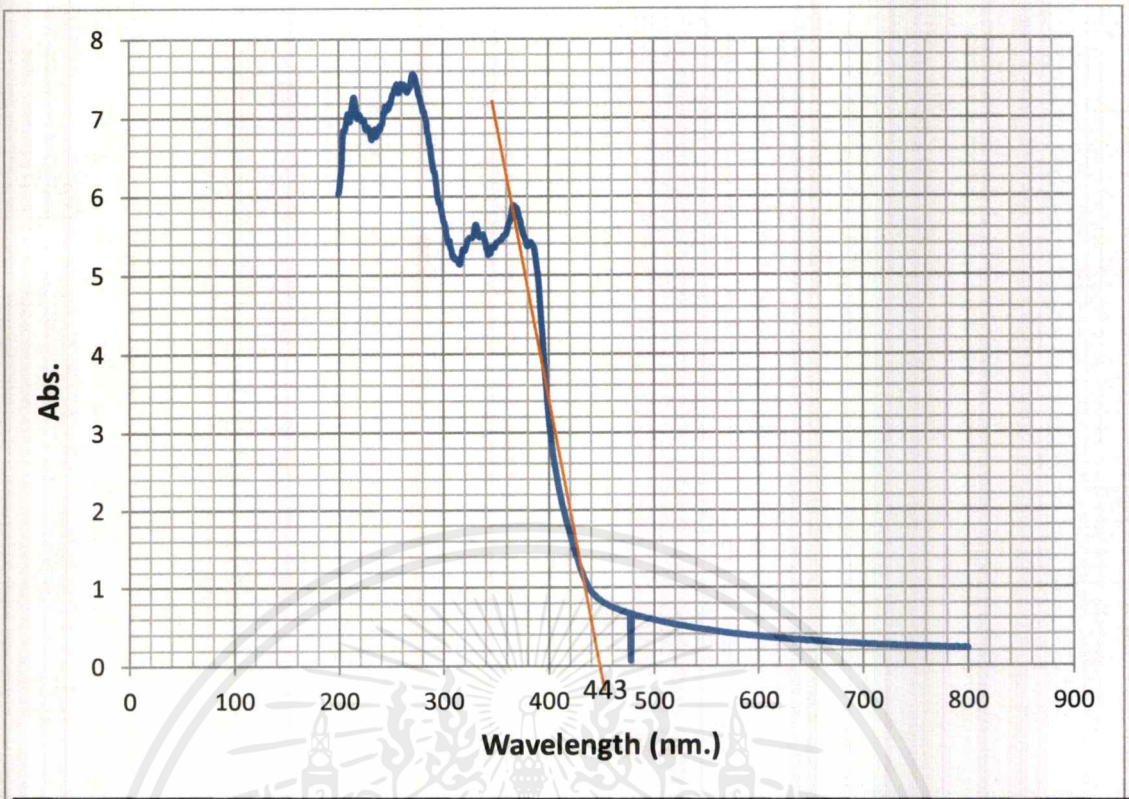


รูปที่ ข-8 แสดงการหาความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงของ $g\text{-C}_3\text{N}_4+1\%\text{St}$

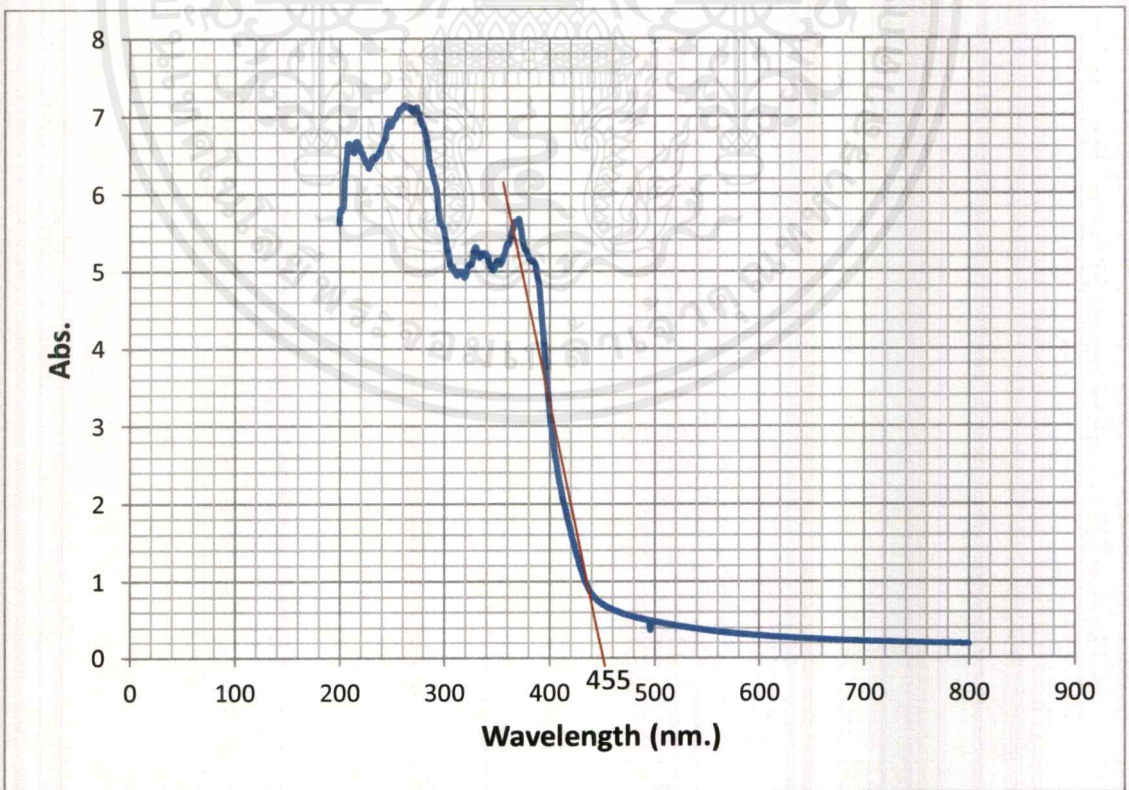


รูปที่ ข-9 แสดงการหาความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงของ $g\text{-C}_3\text{N}_4+0.6\text{GO}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

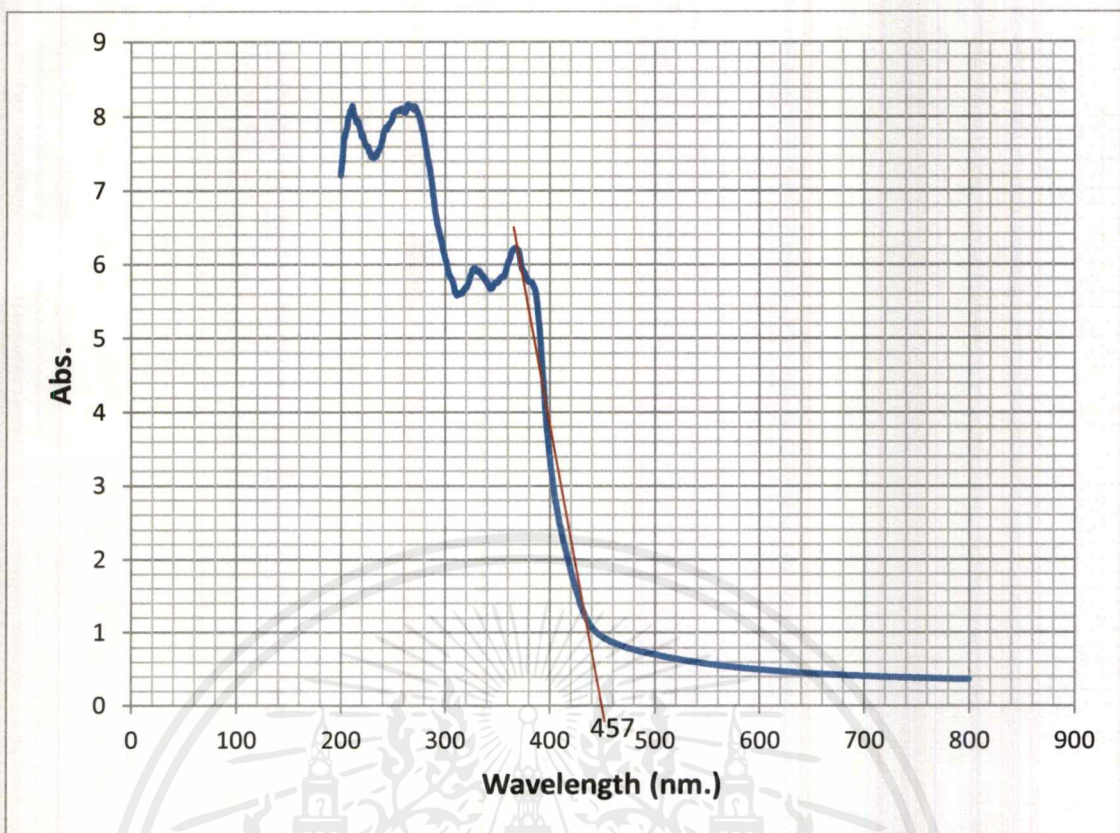


รูปที่ ข-10 แสดงการหาความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงของ pg-0.1GO

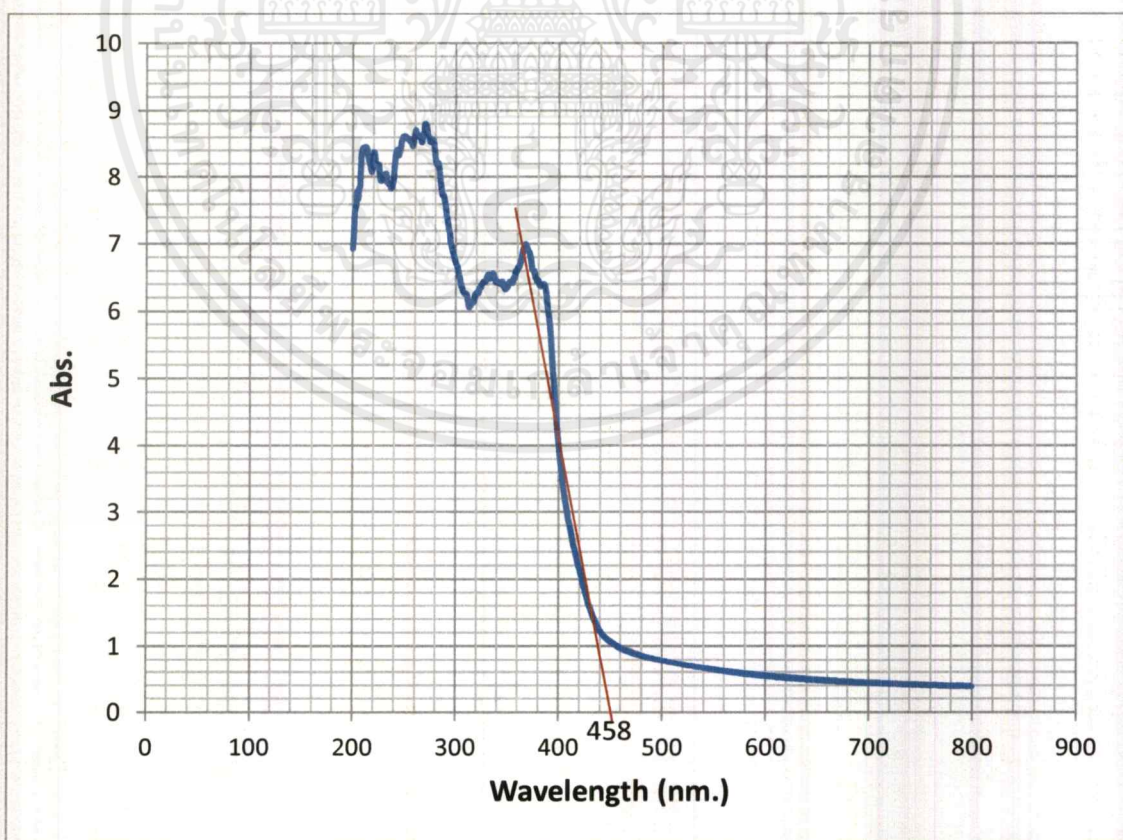


รูปที่ ข-11 แสดงการหาความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงของ pg-0.3GO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

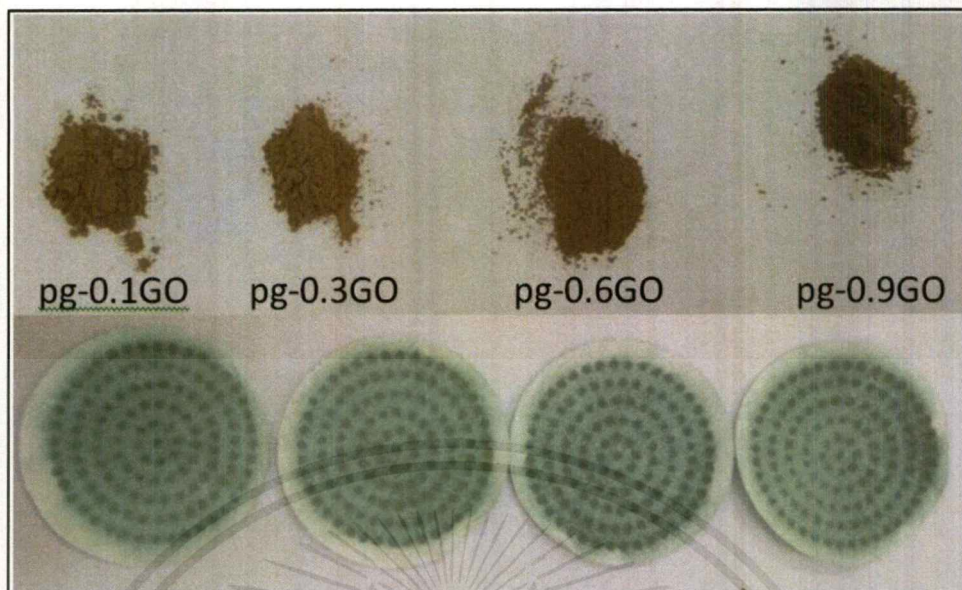


รูปที่ ข-12 แสดงการหาความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงของ pg-0.6GO



รูปที่ ข-13 แสดงการหาความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงของ pg-0.9GO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-14 สีของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มืด (บน) และสีของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังจากการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มืด (ล่าง)



รูปที่ ข-15 สีของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนการดูดซับสีย้อมอินดิโกคาร์มินในที่มืด (บน) และสีของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังจากการดูดซับสีย้อมอินดิโกคาร์มินในที่มืด (ล่าง)