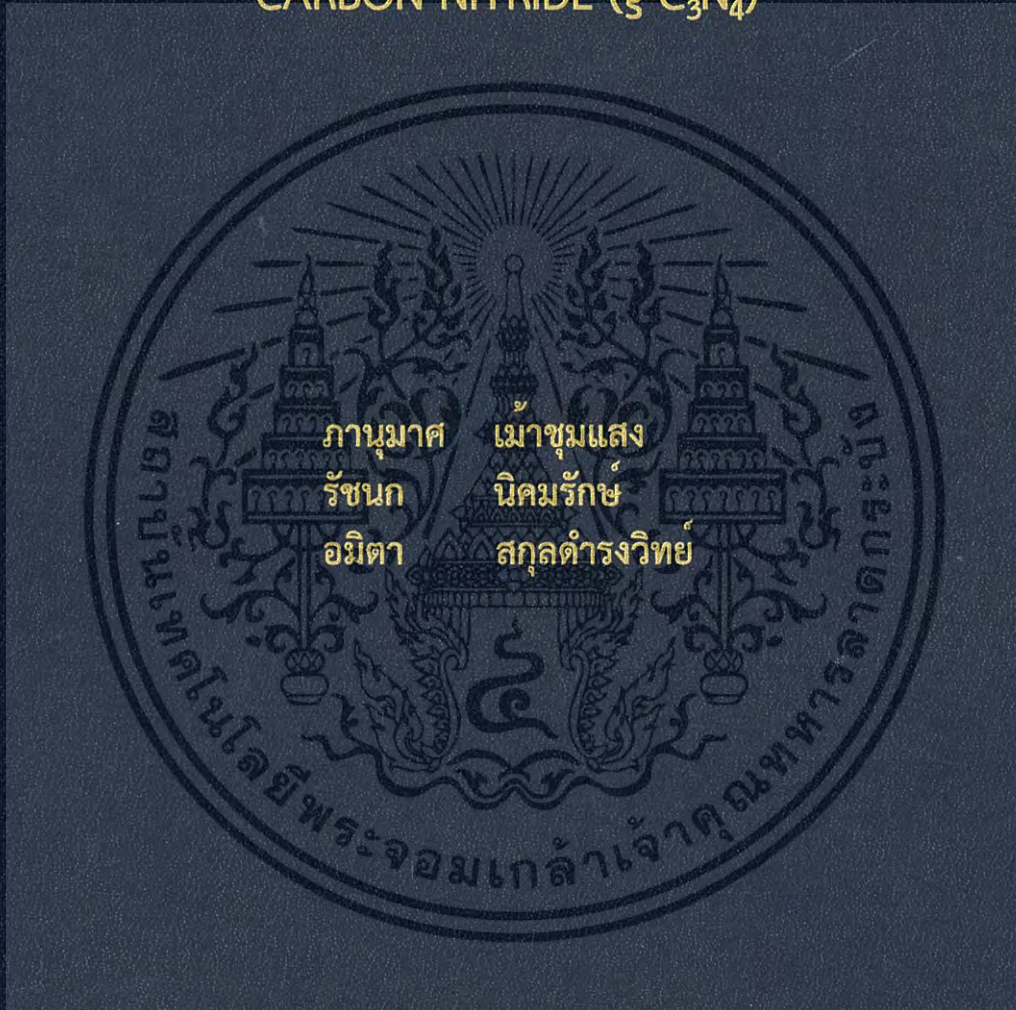


การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์และสมบัติโฟโตคะตะไลติกของ  
กราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์

PREPARATION, CHARACTERIZATION AND  
PHOTOCATALYTIC PROPERTIES OF GRAPHITIC  
CARBON NITRIDE ( $g\text{-C}_3\text{N}_4$ )



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2560

การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์และสมบัติโฟโตคะตะไลติกของ  
กราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์

PREPARATION, CHARACTERIZATION AND  
PHOTOCATALYTIC PROPERTIES OF GRAPHITIC  
CARBON NITRIDE (g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PREPARATION, CHARACTERIZATION AND  
PHOTOCATALYTIC PROPERTIES OF GRAPHITIC  
CARBON NITRIDE ( $g\text{-C}_3\text{N}_4$ )



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 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์และสมบัติโฟโตคะตะไลติกของกราฟิก-คาร์บอนไนไตรด์

Preparation, Characterization and Photocatalytic Properties of Graphitic Carbon Nitride (g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)

ชื่อนักศึกษา นางสาวภานุมาศ เม้าชุมแสง รหัสนักศึกษา 57050483

นางสาวรัชชก นิคมรักษ์ รหัสนักศึกษา 57050495

นางสาวอมิตา สกุลดำรงวิทย์ รหัสนักศึกษา 57050554

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา เคมี

คณะ วิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)

ปีการศึกษา 2560

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2560

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

ลิขสิทธิของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์และสมบัติโฟโตคะตะไลติกของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวภานุมาศ	เม้าซุมแสง	รหัสนักศึกษา 57050483
	นางสาวรัชชก	นิคมรักษ์	รหัสนักศึกษา 57050495
	นางสาวอมิตา	สกุลดำรงวิทย์	รหัสนักศึกษา 57050554
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)		
ภาควิชา	เคมี		
คณะ	วิทยาศาสตร์		
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)		
ปีการศึกษา	2560		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์		

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ทำการศึกษากการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยากราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์โดยใช้เมลามีนเป็นสารตั้งต้นผ่านกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งได้ทำการศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ได้แก่ 450 500 550 600 และ 650 องศาเซลเซียสตามลำดับ จากการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคต่างๆ ได้แก่ XRD FT-IR SEM EDS DRS BET และ TGA เป็นต้น จากผลของเทคนิค XRD และ FT-IR พบว่าการเกิดกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์อย่างสมบูรณ์จะเกิดขึ้นเมื่อสารตั้งต้นผ่านกระบวนการไพโรไลซิสที่ใช้อุณหภูมิในการเผาที่ 500 องศาเซลเซียส จากภาพ SEM แสดงให้เห็นว่าลักษณะของอนุภาคราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์จะมีลักษณะคล้ายแผ่นมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการเผาสูงขึ้น ในขณะที่ผลการทดสอบจาก BET พบว่าพื้นที่ผิวของสารตัวอย่างเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในการเผาที่สูงขึ้น ผลการทดสอบจาก DRS แสดงให้เห็นว่าค่าความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงโดยเคลื่อนไปในช่วงแสงวิสิเบิลเมื่ออุณหภูมิในการเผาสูงขึ้นยกเว้นที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ในการศึกษาประสิทธิภาพกระบวนการโฟโตคะตะไลติกของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ทำการศึกษาได้จากประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล พบว่ากระบวนการโฟโตคะตะไลติกจะมีประสิทธิภาพสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการเผาสูงขึ้น และกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิในการเผา 600 องศาเซลเซียสจะมีประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูสูงที่สุด นอกจากนี้ยังมีการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู ปริมาณการเติมกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ ประสิทธิภาพโฟโตคะตะไลติกภายใต้การฉายแสงยูวี และประสิทธิภาพในการนำมาใช้ซ้ำ ผลการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดลองแสดงให้เห็นว่ากราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้หลายครั้งและยังสามารถเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกได้ภายใต้แสงยูวี ดังนั้นข้อมูลจากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่ากราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่สังเคราะห์ได้นี้อาจจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในเรื่องการบำบัดน้ำได้

**คำสำคัญ :** กราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ กระบวนการโฟโตคะตะไลติก เมลามีน กระบวนการโฟโรไลซิส สีย้อมเมทิลีนบลู



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Title</b>	Preparation, Characterization and Photocatalytic Performances of Graphitic carbon nitride		
<b>Students</b>	Miss Panumas	Maochumsang	Student ID 57050483
	Miss Ratchanok	Nikomruk	Student ID 57050495
	Miss Amita	Sakundamrongwit	Student ID 57050554
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)		
<b>Department</b>	Chemistry		
<b>Faculty</b>	Science		
<b>University</b>	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
<b>Academic Year</b>	2017		
<b>Advisor</b>	Dr. Chaval Sriwong		

### Abstract

This special project studied the preparation of graphitic carbon nitride ( $g\text{-C}_3\text{N}_4$ ) photocatalyst through a pyrolysis method of melamine precursor at the different temperatures (450 °C, 500 °C, 550 °C, 600 °C and 650 °C). The obtained photocatalyst samples were characterized and confirmed by several techniques, such as, X-ray diffraction (XRD), Fourier-transformed infrared spectroscopy (FT-IR), scanning electron microscope (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  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  photocatalysts were completely prepared via the pyrolysis method at calcination temperature of 500 °C. SEM images showed that the morphologies of the  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  samples had more flake-like structure upon the increasing of calcination temperatures. While BET results showed the surface areas of the samples were also increased upon the increasing of calcination temperatures. DRS results indicated that the absorption band edges of the obtained  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  samples shifted to visible-light region with increasing of calcination

temperatures, except at the temperature of 650 °C (g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>\_650). The photocatalytic properties of the obtained g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> catalyst samples were evaluated by degrading of methylene blue (MB) dye solution under visible light irradiation. The results revealed that the photocatalytic activities of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> samples were increased upon the increasing of calcination temperatures, and which the g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> photocatalyst prepared at calcination temperature of 600 °C (g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>\_600) has the highest efficiency for the degradation of MB dye. Moreover, the effects of initial concentrations of MB dye solution, amount of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> loading, UV-light irradiation and reusability were also investigated. The results showed that the g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> sample can be reused many times, and it can be also used as photocatalyst for UV-light region. Thus, these results make g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> photocatalytic materials for water purification applications.

**Keywords :** Graphitic carbon nitride, Photocatalysis, Melamine, Pyrolysis method, Methylene blue (MB) dye



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจาก ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษที่ได้กรุณาให้คำชี้แนะ และแนวทางแก้ปัญหาทำให้โครงการพิเศษฉบับนี้เป็นไปตามเป้าหมาย

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ปานไพลิน สีหาราช และดร.กิตติศักดิ์ ชูจันทร์ อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เป็นกรรมการในการสอบโครงการพิเศษนี้ที่ให้คำแนะนำและแนวทางการแก้ไขปัญหาให้โครงการนี้สมบูรณ์มากขึ้น

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดามารดา รุ่นพี่บัณฑิต และเพื่อนๆ ที่คอยให้คำปรึกษาและกำลังใจตลอดมาจนทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จและลุล่วงผ่านไปด้วยดี



ภานุมาศ    เม้าชุมแสง  
 รัชนก      นิคมรักษ์  
 อมิตา     สกุลดำรงวิทย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป.....	ญ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ท
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 ปฏิกริยาโฟโตคะตะไลติก.....	4
2.1.1 ชนิดของโฟโตคะตะไลติก.....	4
2.1.2 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	4
2.1.3 พลังงานแสง.....	5
2.1.4 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก.....	6
2.1.5 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลติก.....	8
2.2 เมลามีน.....	8
2.2.1 ข้อมูลเบื้องต้นของเมลามีน.....	8
2.2.2 การสังเคราะห์เมลามีน.....	10
2.3 กราไฟติกคาร์บอนไนไตรต์ (graphitic carbon nitrite: g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ).....	11
2.3.1 ข้อมูลเบื้องต้นของกราฟิกคาร์บอนไนไตรต์.....	11
2.3.2 การสังเคราะห์กราฟิกคาร์บอนไนไตรต์.....	13
2.3.3 ประโยชน์ของกราฟิกคาร์บอนไนไตรต์.....	13
2.4 เมทิลีนบลู (Methylene blue).....	13
2.4.1 ข้อมูลเบื้องต้นของเมทิลีนบลู.....	13
2.4.2 กลไกการสลายสีย้อมของเมทิลีนบลู.....	14
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b> .....	17
3.1 สารเคมี .....	17
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	17
3.3 วิธีการทดลอง.....	17
3.3.1 การเตรียมกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์.....	17
3.3.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม.....	18
3.4 การตรวจสอบและการพิสูจน์เอกลักษณ์ .....	19
3.4.1 X-Ray Diffraction (XRD) .....	19
3.4.2 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR).....	20
3.4.3 Diffused Reflectance UV-Vis Spectroscopy (DRS).....	20
3.4.4 Scanning Electron Microscope (SEM).....	20
3.4.5 Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX).....	20
3.4.6 Brunauer Emmett-Teller (BET).....	20
3.4.7 Thermal Gravity Analysis (TGA).....	20
3.4.8 UV-Vis Spectrophotometer.....	21
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล</b> .....	22
4.1 การวิเคราะห์พิสูจน์เอกลักษณ์.....	23
4.1.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ X-Ray Diffractometer (XRD).....	23
4.1.2 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) ).....	24
4.1.3 การศึกษาการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible Diffuse Reflectance spectroscopy (DRS).....	25
4.1.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) .....	26
4.1.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบภายในตัวอย่าง (Energy-dispersive X-ray spectroscopy, EDX).....	28
4.1.6 การศึกษาและวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุนด้วยเครื่องวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว (Surface area and porosity analyzer, BET) .....	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.7 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analysis (TGA).....	30
4.1.8 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับในที่มีด.....	32
4.1.9 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล.....	34
4.1.10 ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู.....	39
4.1.11 ศึกษาปริมาณกราฟิติกคาร์บอนไนโตรด.....	42
4.1.12 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมระหว่างการฉายแสงวิสิเบิลและยูวี.....	46
4.1.13 การศึกษาประสิทธิภาพในการใช้งานซ้ำ.....	48
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>50</b>
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	50
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	50
เอกสารอ้างอิง.....	52
ภาคผนวก.....	56
ภาคผนวก ก.....	57
ภาคผนวก ข.....	58
คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ.....	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ.....	24
4.2 แสดงค่าการดูดกลืนแสงและแถบช่องว่างพลังงานของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิต่างกัน.....	26
4.3 แสดงพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์.....	30
4.4 แสดงอุณหภูมิเริ่มต้น-สิ้นสุดการสลายตัว และอุณหภูมิการสลายตัวของ $g-C_3N_4$ ที่ใช้ อุณหภูมิในการสังเคราะห์แตกต่างกัน.....	32
4.5 แสดงค่าคงที่ในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิต่างกัน.....	38
4.6 แสดงค่าคงที่ในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างกัน.....	42
4.7 แสดงค่าคงที่ในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้ปริมาณเริ่มต้นต่างกัน.....	45
4.8 แสดงค่าคงที่ในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิต่างกันในการสังเคราะห์ 600 องศาเซลเซียส ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิลและแสงยูวี.....	47
ข-1 ค่าความสามารถการดูดกลืนแสงของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ในที่มีด.....	61
ข-2 แสดงค่าความสามารถการดูดกลืนแสงของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิต่างกันในการสังเคราะห์ต่างกัน ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล.....	61
ข-3 แสดงค่าความสามารถการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างกันของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิต่างกันในการสังเคราะห์ 600 องศาเซลเซียส.....	62
ข-4 แสดงค่าความสามารถการดูดกลืนแสงในที่มีปริมาณต่างกันของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิต่างกันในการสังเคราะห์ 600 องศาเซลเซียส.....	62
ข-5 แสดงค่าความสามารถการดูดกลืนแสงของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิต่างกันในการสังเคราะห์ 600 องศาเซลเซียส ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิลและแสงยูวี.....	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ความยาวคลื่นของแสงจากดวงอาทิตย์.....	5
2.2 การดูดกลืนและการกระเจิงของแสงในชั้นบรรยากาศ.....	6
2.3 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกบนสารกึ่งตัวนำ.....	7
2.4 สูตรโครงสร้างของเมลามีน.....	9
2.5 ปฏิกิริยาการควบแน่นระหว่างยูเรียกับฟอร์มัลดีไฮด์.....	11
2.6 ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันระหว่างเมลามีนกับฟอร์มัลดีไฮด์.....	11
2.7 กระบวนการโฟโตคะตะไลติกของกราฟาไฟติกคาร์บอนไนโตรด.....	12
2.8 โครงสร้างของ s-triazine และ s-heptazine.....	12
2.9 กลไกการเกิดกราฟาไฟติกคาร์บอนไนโตรด.....	13
2.10 โครงสร้างของเมทิลีนบลู.....	14
2.11 ภาพแสดงกลไกการสลายตัวของสีย้อมเมทิลีนบลู.....	14
3.1 ผลึกกราฟาไฟติกคาร์บอนไนโตรดตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้.....	18
3.2 ฉายแสงวิสิเบิล.....	19
3.3 สีย้อมเมทิลีนบลูหลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติก.....	19
4.1 ตัวอย่างผงกราฟาไฟติกคาร์บอนไนโตรดที่ใช้คุณสมบัติในการสังเคราะห์ที่ต่างกัน.....	22
4.2 XRD pattern ของเมลามีนและกราฟาไฟติกคาร์บอนไนโตรดที่อุณหภูมิต่างๆ.....	23
4.3 แสดง FT-IR spectra ของกราฟาไฟติกคาร์บอนไนโตรดที่ใช้คุณสมบัติในการสังเคราะห์ที่ต่างกัน.....	25
4.4 กราฟ UV-Vis diffuse reflectance spectra (DRS) ของกราฟาไฟติกคาร์บอนไนโตรดที่ใช้คุณสมบัติในการสังเคราะห์ที่ต่างกัน.....	26
4.5 ภาพแสดงลักษณะสัณฐานวิทยาจากเทคนิค SEM และ TEM ของกราฟาไฟติกคาร์บอนไนโตรดที่ใช้คุณสมบัติในการสังเคราะห์ที่ต่างกัน.....	27
4.6 ผล EDX สเปกตรัมของกราฟาไฟติกคาร์บอนไนโตรดที่ใช้คุณสมบัติในการสังเคราะห์ 450 °C.....	28
4.7 ภาพ SEM ของกราฟาไฟติกคาร์บอนไนโตรดที่ใช้คุณสมบัติในการสังเคราะห์ 450 °C และการกระจายตัวของธาตุคาร์บอน และการกระจายตัวของธาตุนิโตรเจน.....	28
4.8 ผล EDX สเปกตรัมของกราฟาไฟติกคาร์บอนไนโตรดที่ใช้คุณสมบัติในการสังเคราะห์ 600 °C.....	29
4.9 ภาพ SEM ของกราฟาไฟติกคาร์บอนไนโตรดที่ใช้คุณสมบัติในการสังเคราะห์ 600 °C และการกระจายตัวของธาตุคาร์บอน และการกระจายตัวของธาตุนิโตรเจน.....	29
4.10 แสดง SEM ของกราฟาไฟติกคาร์บอนไนโตรดนาโนซีทที่ใช้คุณสมบัติในการสังเคราะห์ที่ต่างกัน จากงานวิจัยของ Le Thi Mai Oanh และคณะ.....	30
4.11 TGA แสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของ g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ที่ใช้คุณสมบัติในการสังเคราะห์ที่ต่างกัน.....	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 DTG แสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของ $g-C_3N_4$ ที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่างกัน.....	32
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงเทียบกับเวลาของการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มีดของกราฟิติกคาร์บอนไนโตรดที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่างกัน.....	33
4.14 กราฟแสดงประสิทธิภาพการดูดซับในที่มีดของกราฟิติกคาร์บอนไนโตรดที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่างกัน.....	33
4.15 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของกราฟิติกคาร์บอนไนโตรดที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่างกัน.....	34
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงเทียบกับเวลาของการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้กราฟิติกคาร์บอนไนโตรดที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่างกันภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล.....	35
4.17 กราฟแสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของกราฟิติกคาร์บอนไนโตรดที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่างกัน ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล.....	36
4.18 กราฟแสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของกราฟิติกคาร์บอนไนโตรดที่อุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่างกัน ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิลเป็นเวลา 150 นาที.....	36
4.19 กราฟแสดงอัตราเร็วของการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของกราฟิติกคาร์บอนไนโตรดที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่างกัน ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล.....	37
4.20 กราฟแสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของกราฟิติกคาร์บอนไนโตรดที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่างกัน ภายใต้การดูดซับในที่มีด และฉายแสงเป็นเวลา 150 นาที.....	39
4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงเทียบกับเวลาของการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้กราฟิติกคาร์บอนไนโตรดที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 600 องศาเซลเซียส ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นเมทิลีนบลูต่างกัน.....	40
4.22 กราฟแสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของกราฟิติกคาร์บอนไนโตรดที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 600 องศาเซลเซียส โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของเมทิลีนบลูที่แตกต่างกัน.....	40
4.23 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสง-วิสิเบิล เป็นเวลา 150 นาที.....	41
4.24 กราฟแสดงอัตราเร็วของการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นแตกต่างกันภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล เป็นเวลา 120 นาที.....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงเทียบกับเวลาของการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู โดยใช้กราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 600 องศาเซลเซียส ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล โดยใช้ปริมาณกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ต่างกัน.....	43
4.26 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงวิสิเบิลของกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ปริมาณต่างกัน.....	43
4.27 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล เป็นเวลา 150 นาที.....	44
4.28 กราฟแสดงอัตราเร็วของการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล เป็นเวลา 120 นาที.....	45
4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงเทียบกับเวลาของการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้กราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 600 องศาเซลเซียส ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิลและแสงยูวีเป็นเวลา 150 นาที.....	46
4.30 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 600 องศาเซลเซียส ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิลและแสงยูวี เป็นเวลา 150 นาที.....	46
4.31 กราฟแสดงอัตราเร็วในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 600 องศาเซลเซียส ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิลและแสงยูวี.....	47
4.32 กราฟแสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูการใช้งานซ้ำของกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 600 องศาเซลเซียส ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล.....	48
4.33 กราฟแสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูการใช้งานซ้ำของกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 600 องศาเซลเซียส ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล.....	49
ข-1 แสดงการหาความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงของกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส.....	58
ข-2 แสดงการหาความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงของกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส.....	58
ข-3 แสดงการหาความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงของกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส.....	59
ข-4 แสดงการหาความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงของกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส.....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข-5 แสดงการหาความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงของกราฟาไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส.....	60
ข-6 Isotherm ของกราฟาไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส.....	60



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
$g\text{-C}_3\text{N}_4$	กราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ (Graphitic carbon nitride)
$E_g$	แถบช่องว่างพลังงาน (Energy Gap)
$e^-$	อิเล็กตรอน (Electron)
$h^+$	ช่องว่าง (Hole)
$\text{O}_2^\cdot$	ซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล (Superoxide radical)
$\text{OH}^\cdot$	ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl radical)
$\text{CO}_2$	คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide)
$\text{H}_2\text{O}$	น้ำ
VB	แถบเวเลนซ์ (Valence band)
CB	แถบชั้นตัวนำไฟฟ้า (Conduction band)
$\text{O}_2$	ออกซิเจน (Oxygen)
$\text{H}_2\text{O}_2$	ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการวิจัย

ปัญหาน้ำเสียเป็นผลมาจากการใช้น้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคของมนุษย์จากภาคอุตสาหกรรมและเกษตรกรรม ส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำรวมถึงมนุษย์เรา ด้วยการบำบัดน้ำเสียจากแหล่งต่าง ๆ โดยทั่วไปประกอบด้วย 4 ขั้นตอนซึ่งใช้วิธีในการบำบัดต่าง ๆ กัน เริ่มจากกระบวนการทางกายภาพ เช่น การคัดแยก การตัดย่อย การกวาด และการลอยต่อด้วยการตกตะกอน แล้วผ่านกระบวนการทางชีวภาพ โดยใช้แบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจน หรือไม่ใช้ออกซิเจน และการตกตะกอนก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ กรณีต้องการฆ่าเชื้อโรคเพื่อการอุปโภคบริโภคก็ผ่านกระบวนการทางกายภาพ-เคมี โดยกระบวนการการดูดซับด้วยถ่าน หรือการแลกเปลี่ยนไอออน กระบวนการทางเคมีนั้นไม่เป็นที่นิยม เนื่องจากต้นทุนสูงและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และกระบวนการทางชีวภาพมีข้อจำกัดที่ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม ดังนั้นกระบวนการโฟโตคะตะไลติกจึงสามารถทดแทนหรือส่งเสริมกระบวนการทางเคมีและชีวภาพในกระบวนการบำบัดน้ำเสียได้ [1]

กระบวนการโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic process) คือ กระบวนการที่ต้องใช้แสงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสามารถใช้ได้ทั้งในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV light) ช่วงแสงวิสิเบิล (Visible - light) และแสงอาทิตย์ (sun light) นิยมใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย หรือในกระบวนการกำจัดสารอินทรีย์ในสิ่งแวดล้อม [2] ในการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) จะต้องดูดกลืนพลังงานแสงเท่ากับหรือมากกว่าช่องว่างแถบพลังงาน (Band gap energy) อิเล็กตรอนจึงถูกกระตุ้นจากแถบวาเลนซ์ (Valence band) ไปยังแถบชั้นตัวนำ (Conduction band) ทำให้แถบวาเลนซ์เกิดช่องว่าง (Hole,  $h^+$ ) และแถบชั้นตัวนำเกิดอิเล็กตรอน (Electron,  $e^-$ ) จากนั้น  $h^+$  และ  $e^-$  จะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของออกซิเจนและน้ำในระบบ ก่อให้เกิดซูเปอร์ออกไซด์แรดิคัล (Superoxide radical,  $O_2^{\cdot-}$ ) และไฮดรอกซิลแรดิคัล (Hydroxyl radical,  $OH^{\cdot}$ ) ตามลำดับ ไฮดรอกซิลแรดิคัลที่เกิดขึ้นทำหน้าที่หลักในการทำลายโมเลกุลของสารอินทรีย์ให้เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) และน้ำ ( $H_2O$ ) ซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม [3]

โดยทั่วไปสารกึ่งตัวนำที่นิยมนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง (Photocatalyst) มักจะเป็นสารประกอบโลหะออกไซด์หรือซัลไฟด์ เช่น  $TiO_2$   $ZnO$   $WO_3$   $CeO$   $CdS$   $CuS$  และ  $Fe_2O_3$  เป็นต้น อย่างไรก็ตามการนำสารประกอบของโลหะเหล่านี้มาใช้งานอาจก่อให้เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมก็เป็นได้ เนื่องจากโลหะประกอบเหล่านี้บางตัวประกอบด้วยโลหะที่มีความเป็นพิษสูง ดังนั้นเพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงข้อเสียดังกล่าว การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงที่ปราศจากโลหะจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ อีกทั้งตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านั้นจะต้องเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกได้ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล (Visible light) หรือ แสงอาทิตย์ (Sunlight) ก็จะเป็นทางเลือกที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก [3]

กราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ (Graphitic carbon nitride :  $g-C_3N_4$ ) มีลักษณะเป็นแผ่นประกอบด้วยอะตอมของธาตุไนโตรเจนและคาร์บอนเป็นหลัก มีความเสถียรภาพทางเคมีที่ดี ทนความร้อนสูง [4] มีความต้านทานต่อสารที่เป็นกรดและเบส ไม่ละลายในตัวทำละลายทั่วไป [3] อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพในการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้แสงวิสิเบิลได้ดี [5] เมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น เนื่องจากมีค่าแถบการดูดกลืนเท่ากับ 2.7 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) โดยประมาณ จึงเหมาะสมกับแสงในช่วงดังกล่าว โดยทั่วไปการสังเคราะห์นั้นทำได้หลายวิธี เช่น ปฏิกิริยาสถานะ

เอกสารเป็นเอกสารที่สวนวสาหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของแข็ง โพลีเมอร์มอล การตกเคลือบด้วยไอเคมี และกระบวนการไพโรไลซิส เป็นต้น [3] ซึ่งสารตั้งต้นที่นำมาใช้ในการสังเคราะห์ ได้แก่ เมลามีน ยูเรีย และไทโอยูเรีย เนื่องจากเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ [6] นอกจากนี้กราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ยังสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น สารย่อยสลายจุลินทรีย์ ตัวเก็บประจุยิ่งยวด ตัวดูดซับ [3] เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง เซนเซอร์ทางเคมี (Chemosensors) และภาพถ่ายทางชีวภาพ (Biological imaging) เป็นต้น [7]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการสังเคราะห์กราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ โดยใช้เมลามีนเป็นสารตั้งต้นด้วยกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis process) เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและไม่ซับซ้อน [6] เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงวิสิเบิล ซึ่งในการสังเคราะห์จะศึกษาอุณหภูมิในการเผาที่แตกต่างกันคือ 450 500 550 600 และ 650 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และทำการพิสูจน์เอกลักษณ์โดยใช้เทคนิคต่างๆ ได้แก่ XRD FTIR SEM BET DRS และ TGA เป็นต้น นอกจากนี้ยังศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการไพโรไลซิส ได้แก่ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ ผลของความเข้มข้นของเมทิลีนบลู และประสิทธิภาพในการใช้งานซ้ำ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาและเตรียมกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยใช้เมลามีนเป็นสารตั้งต้น
2. เพื่อศึกษาและพิสูจน์เอกลักษณ์ของคาร์บอนไนไตรด์ที่เตรียมได้ด้วยเทคนิคต่าง ๆ
3. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของคาร์บอนไนไตรด์ในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการไพโรไลซิสภายใต้แสงวิสิเบิล
4. เพื่อศึกษาผลของปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพกระบวนการไพโรไลซิสในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ โดยใช้เมลามีนเป็นสารตั้งต้น
2. เตรียมกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ โดยใช้กระบวนการไพโรไลซิส ได้ทำการศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ได้แก่ 450 500 550 600 และ 650 องศาเซลเซียส ตามลำดับ
3. พิสูจน์เอกลักษณ์ของกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ ด้วยเทคนิคต่างๆ ได้แก่ XRD FT-IR SEM BET DRS และ TGA เป็นต้น
4. ศึกษาประสิทธิภาพของกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการไพโรไลซิสภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล รวมทั้งศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่สังเคราะห์ได้
5. ศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมของกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ ได้แก่ ปริมาณกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้ ความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลู และประสิทธิภาพการใช้งานซ้ำ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รับองค์ความรู้เกี่ยวกับเทคนิคการเตรียมกราไฟติกคาร์บอนไนโตรต์
2. ได้รับองค์ความรู้เกี่ยวกับการพิสูจน์เอกลักษณ์ของกราไฟติกคาร์บอนไนโตรต์
3. ได้รับองค์ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการโฟโตคะตะไลติกของกราไฟติกคาร์บอนไนโตรต์
4. สามารถนำกราไฟติกคาร์บอนไนโตรต์ที่เตรียมได้ไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก เพื่อกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูได้
5. ทราบถึงประสิทธิภาพของกราไฟติกคาร์บอนไนโตรต์ในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก [8]

โฟโตเคมี (Photochemistry) เป็นปฏิกิริยาที่ใช้แสงเป็นตัวกระตุ้นโมเลกุลของสาร และหากการกระตุ้นด้วยแสงอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการจะเรียกว่าโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic) โดยโฟโตคะตะไลติกนี้จะเกิดขึ้นได้จำเป็นต้องมีองค์ประกอบ 4 ปัจจัย คือ

1. ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เป็นต้น
2. พลังงานแสง ซึ่งมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับพลังงานโฟตอนของตัวแคตาลีสต์
3. น้ำ
4. ออกซิเจนหรือตัวออกซิแดนซ์อื่นๆ

นอกจากนี้โฟโตคะตะไลติกจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อได้รับแสงหรือพลังงานโฟตอน (Photon energy) ที่มากพอที่จะทำให้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกเกิดขึ้นได้ โดยจะเรียกพลังงานตัวนี้ว่า พลังงานกระตุ้น (Activation energy) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.1)

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

เมื่อ E คือ พลังงานของโฟตอน (Photon energy) (จูล)  
h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant) =  $6.625 \times 10^{-34}$  จูล-วินาที  
v คือ ความถี่ (เฮิรตซ์ หรือวินาที<sup>-1</sup>)  
c คือ ความเร็วของคลื่นแสง =  $2.997 \times 10^8$  (เมตร/วินาที)  
 $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นแสง (นาโนเมตร)

##### 2.1.1 ชนิดของโฟโตคะตะไลติก

เมื่อพิจารณาจากสถานะของตัวเร่งปฏิกิริยาจะสามารถแบ่งประเภทของปฏิกิริยาได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

2.1.1.1 โฟโตคะตะไลติกแบบสถานะเดียวหรือแบบเนื้อเดียวกัน (Homogeneous photocatalytic) เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสถานะเดียวกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด (โดยทั่วไปแล้วจะเป็นของเหลว) เช่น การย่อยสลาย 2, 4-Dinitrobenzene โดยใช้ UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

2.1.1.2 โฟโตคะตะไลติกแบบสถานะต่างหรือแบบเนื้อผสม (Heterogeneous photocatalytic) เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในสถานะที่ต่างกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด เช่น ย่อยสลาย 2-Chlorophenol โดยใช้ UV/TiO<sub>2</sub>

##### 2.1.2 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา

สารที่นิยมนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกมีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิด ได้แก่

2.1.2.1 โลหะทรานซิชัน (Transition Metal) เช่น ทองแดง โคโรเนียม นิกเกิล เป็นต้น

2.1.2.2 สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่น ไททาเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) แคดเมียมซัลไฟด์ ( $\text{CdS}$ ) สังกะสีออกไซด์ ( $\text{ZnO}$ ) ไอรอนออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ทังสเตนออกไซด์ ( $\text{WO}_3$ ) โมลิบดีนัมซัลไฟด์ ( $\text{MoS}_2$ ) เป็นต้น

สำหรับโลหะทรานซิชันนั้นเมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอนจะทำให้อิเล็กตรอนขึ้นไปอยู่ในสถานะกระตุ้น (Excited state) และอิเล็กตรอนจะกลับสู่สถานะพื้น (Ground state) ได้ง่ายและรวดเร็วกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดสารกึ่งตัวนำ เพราะในโลหะทรานซิชันนั้นจะไม่มีแถบพลังงานระหว่างแถบคอนดักชัน (Conduction band) และแถบวาเลนซ์ (Valance band) ซึ่งจะส่งผลให้อัตราการรวมตัวกันระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลนั้นมีค่าสูง จึงทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดโลหะทรานซิชันไม่เป็นที่นิยมในการนำมาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก ในทางกลับกันตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดสารกึ่งตัวนำได้รับความนิยมน้อยอย่างแพร่หลาย

### 2.1.3 พลังงานแสง [9]

โดยทั่วไปพลังงานแสงที่เรารู้จักกันดีคือ พลังงานแสงจากดวงอาทิตย์ (Solar energy) โดยแสงอาทิตย์ที่ส่องลงมายังโลกนั้นจะประกอบไปด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) และแสงขาว (Visible) ซึ่งจะมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 100 – 400 และ 380 - 750 นาโนเมตร ตามลำดับ ในทางทฤษฎี รังสียูวี(UV) สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง ดังนี้

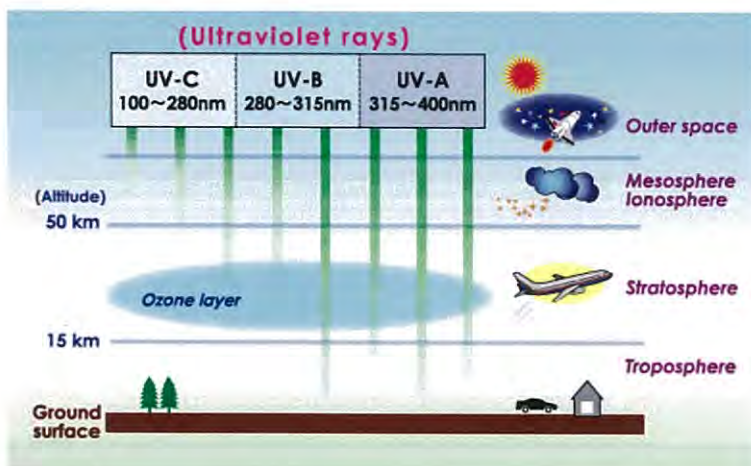
- 2.1.3.1 คลื่นยาว (Long Wave UV, UV-A) อยู่ในช่วง 400 - 320 นาโนเมตร
- 2.1.3.2 คลื่นกลาง (Middle Wave UV, UV-B) อยู่ในช่วง 320 - 280 นาโนเมตร
- 2.1.3.3 คลื่นสั้น (Short Wave UV, UV-C) อยู่ในช่วง 280 - 200 นาโนเมตร



รูปที่ 2.1 ความยาวคลื่นของแสงจากดวงอาทิตย์ [10]

ถึงแม้พลังงานแสงจากดวงอาทิตย์จะมีช่วงความยาวคลื่นที่กว้างมาก แต่ความเข้มของแสงยูวีและแสงขาวที่ส่องลงมายังพื้นผิวโลกจะมีค่าลดลง เนื่องจากการถูกดูดกลืนและการกระเจิงของแสงในชั้นบรรยากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4 จากรูปพบว่ารังสีที่มีความยาวคลื่นมากจะสามารถเคลื่อนที่ได้ไกลกว่าจึงมีเพียงรังสี UV-A และ UV-B บางส่วนเท่านั้นที่ส่องผ่านมายังผิวโลกได้ ส่วนของรังสีที่มีความยาวคลื่นสั้น (UV-C) จะถูกดูดกลืนจากชั้นโอโซนและออกซิเจนในอากาศจนหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

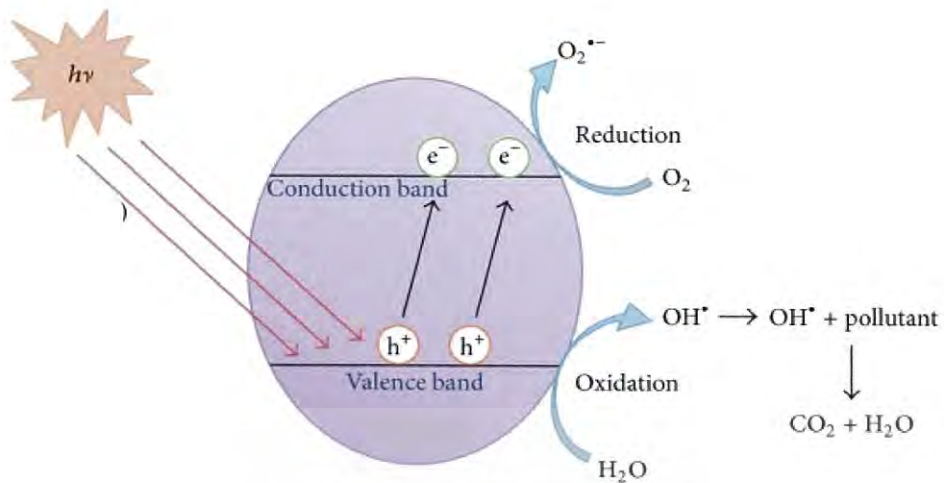


รูปที่ 2.2 การถูกดูดกลืนและการกระเจิงของแสงในชั้นบรรยากาศ [9]

#### 2.1.4 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก

โลหะทรานซิชันและสารกึ่งตัวนำ ประกอบด้วยแถบวาเลนซ์และแถบคอนดักชัน ซึ่งในโลหะทรานซิชันนั้นจะมีแถบวาเลนซ์และแถบคอนดักชันที่ติดกัน แต่ในสารกึ่งตัวนำนั้น แถบวาเลนซ์และแถบคอนดักชันจะไม่ติดกันโดยจะถูกคั่นด้วยระดับชั้นพลังงาน เมื่ออิเล็กตรอน (Electron,  $e^-$ ) ที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ได้รับพลังงานโดยการฉายแสงด้วยพลังงานแสงที่มีพลังงานมากกว่าแถบพลังงานของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำจะถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่ไปยังแถบคอนดักชันทำให้เกิดโฮล (Hole,  $h^+$ ) ในบริเวณแถบวาเลนซ์ โดยที่โฮลซึ่งมีประจุเป็นบวกจะสามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระในแถบวาเลนซ์ ส่วนแถบคอนดักชันอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่มาจากแถบวาเลนซ์ก็จะเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระทั่วแถบคอนดักชันเช่นกัน ปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนกับโฮล (Electron-hole,  $e^-/h^+$  pairs) ซึ่งการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำนี้สามารถเกิดขึ้นได้ 2 แบบคือ อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากแถบคอนดักชันไปยังตัวรับอิเล็กตรอนในสารละลาย เกิดเป็นปฏิกิริยารีดักชัน และอีกวิธีหนึ่งคืออิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากตัวให้อิเล็กตรอนในสารละลายไปยังแถบวาเลนซ์เกิดเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน ในกระบวนการปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกนั้นจะเน้นความสำคัญไปยังการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในแถบวาเลนซ์มากกว่าปฏิกิริยาที่เกิดให้แถบคอนดักชัน โดยการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนกับโฮลจะสามารถเกิดขึ้นได้ง่ายและรวดเร็วจนทำให้กลายเป็นตัวขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพของกปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกนั้นจะลดต่ำลง ในตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะทรานซิชันนั้นการรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนกับโฮลจะสามารถเกิดขึ้นได้ง่ายและรวดเร็ว เพราะไม่มีแถบพลังงานและไม่มีช่องว่างระหว่างระดับชั้นพลังงานคั่นเหมือนกับสารกึ่งตัวนำส่งผลให้คู่อิเล็กตรอนกับโฮลแยกจากกันได้ไม่นาน ข้อแตกต่างของพลังงานช่องว่างระหว่างระดับชั้นพลังงานของ โลหะตัวนำ สารกึ่งตัวนำ และฉนวนแยกได้ยากโดยจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายปัจจัย ได้แก่ ระดับพลังงาน ช่องว่างระหว่างระดับชั้นพลังงาน ระดับพลังงานในแถบคอนดักชัน และระดับพลังงานในแถบวาเลนซ์ เมื่อเกิดคู่อิเล็กตรอนกับโฮลขึ้น โฮลจะเคลื่อนที่ไปอยู่บริเวณผิวของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 2.3 และจะกลายเป็นตัวออกซิแดนซ์ที่รุนแรงซึ่งสามารถทำการออกซิแดนซ์สารอินทรีย์ได้โดยตรงหรือทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไฮดรอกไซด์ไอออนจนเกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl-radical,  $OH^\bullet$ ) โดยไฮดรอกซิลเรดิคัลที่ได้นี้จะไปทำการออกซิไดซ์กับสารอินทรีย์อีกครั้งซึ่งถือเป็นปฏิกิริยาที่สำคัญ [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

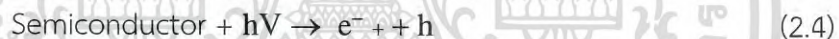


รูปที่ 2.3 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกบนสารกึ่งตัวนำ [11]

• การบำบัดสารอินทรีย์



• การกระตุ้น



• การเกิดเรดิคอลลจาก  $e^- / h^+$



• การรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮล (Electron - Hole recombination)



เมื่อ

$h^+$  คือ โฮลที่แถบวาเลนส (Valence band hole)

$e^-$  คือ อิเล็กตรอน (Electron)

$OH^\bullet$  คือ ไฮดรอกซิลเรดิคอล (Hydroxyl radical)

$O_2^{\bullet -}$  คือ ซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคอล (Superoxide ion radical)

$OH_2^\bullet$  คือ เปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคอล (Perhydroxyl radical)

$H^\bullet$  คือ ไฮโดรเจนเรดิคอล (Hydrogen radical)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.5 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลติก

ประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะไลติกขึ้นอยู่กับปัจจัยภายนอกและภายในต่างๆ กล่าวคือตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยภายนอก (Extrinsic parameter) เช่น ความเข้มแสง ความยาวคลื่นแสง ค่าพีเอชของสารละลาย ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิ เป็นต้น ในส่วนของปัจจัยภายใน (Intrinsic parameter) จะเกี่ยวข้องกับสมบัติเฉพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ โครงสร้างผลึก ขนาดอนุภาค พื้นที่ผิว ที่มีผลต่อความสามารถในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก

โดยปัจจัยภายนอกและภายในสามารถอธิบายได้ ดังนี้

#### 2.1.5.1 ปัจจัยภายนอก (Extrinsic parameter) ได้แก่

- ความเข้มแสงและความยาวคลื่นแสง ที่ใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกจะสัมพันธ์กับแถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาในการกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ความเข้มแสงที่เหมาะสมในการกระตุ้นอาจอยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ตหรือช่วงแสงที่มองเห็น ขึ้นกับแถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยา

- อุณหภูมิของปฏิกิริยา อัตราการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกสามารถเกิดในอัตราที่ต่ำหากอุณหภูมิในปฏิกิริยาสูงหรือต่ำเกินไป เนื่องจากอัตราการรวมตัวใหม่ของคู่อิเล็กตรอน-โฮล จะเกิดได้อย่างรวดเร็วกลายเป็นความร้อน และการดูดซับ บริเวณพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง

- ค่าพีเอชของสารละลาย มีผลต่อการเปลี่ยนค่าประจุบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งค่าประจุบนพื้นผิวมีผลต่อการดูดซับสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ ค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงไปสามารถเพิ่มหรือลดปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนที่พื้นผิวซึ่งมีผลต่อการเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล นอกจากนี้แล้วค่าพีเอชยังมีอิทธิพลต่อค่าความเสถียรในการกระจายตัวของสารละลายผสมระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาและสารประกอบอินทรีย์

- ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา หากมีมากเกินไปจะทำให้แสงที่ส่องผ่านไปยังตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงเนื่องจากมีความทึบแสงมากทำให้ความสามารถในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกลดลง

#### 2.1.5.2 ปัจจัยภายใน (Intrinsic parameter) ได้แก่

ขนาดอนุภาค และพื้นที่ผิวเป็นส่วนสำคัญในการเพิ่มความสามารถของกระบวนการโฟโตคะตะไลติก โดยขนาดอนุภาคเล็กในระดับนาโนเมตรจะมีพื้นที่ผิวมาก ซึ่งเป็นข้อดีในการนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากสารประกอบอินทรีย์ที่เป็นมลพิษทางน้ำจะสามารถดูดซับบริเวณพื้นผิวได้ในปริมาณมากทำให้เกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้ดีกว่าอนุภาคที่มีพื้นที่ผิวน้อย [12]

## 2.2 เมลามีน (Melamine)

### 2.2.1 ข้อมูลเบื้องต้นของเมลามีน [13]

เมลามีนเป็นเบสอินทรีย์มีสูตรโมเลกุลคือ  $C_3H_6N_6$  และสูตรเอมพิริกัลคือ  $CH_2N_2$  มีมวลโมเลกุลหรือมวลต่อหนึ่งโมลเท่ากับ 126.12 กรัมต่อโมล

ลักษณะทางกายภาพเป็นของแข็งสีขาว

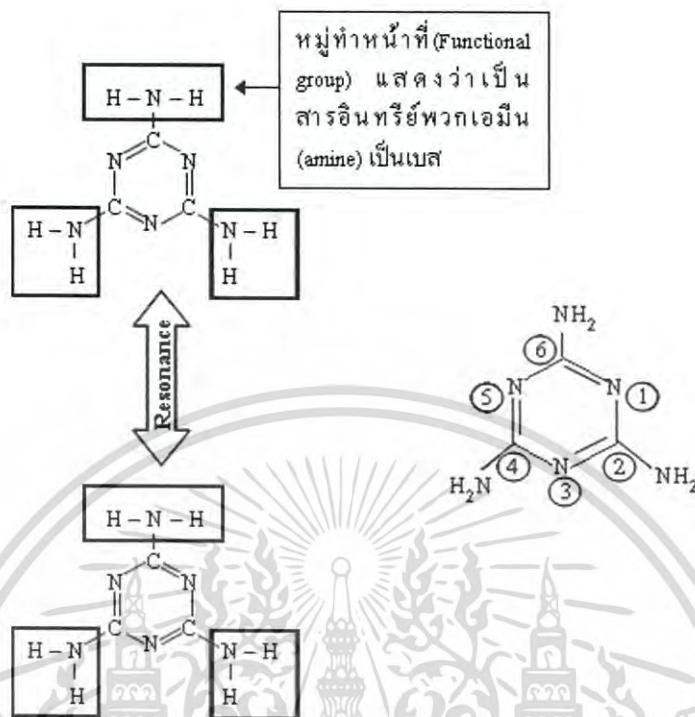
ความหนาแน่น :  $1574 \text{ kg.m}^{-3}$

จุดหลอมเหลว :  $350 \text{ }^\circ\text{C}$  ,  $623 \text{ K}$  ,  $662 \text{ }^\circ\text{F}$

จุดเดือด : ระเหิด (sublimes)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสามารถในการละลายน้ำ : 3.1 กรัมต่อลิตร ที่ 20 °C ดังนั้นเมลามีนจึงเป็นสารที่ละลายน้ำได้เพียงเล็กน้อย



รูปที่ 2.4 สูตรโครงสร้างของเมลามีน [14]

เมลามีน มีชื่อสากลตามระบบ IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) คือ 1,3,5-Triazine-2,4,6-triamine นอกจากนี้ยังมีชื่ออื่น คือ 2,4,6-Triamino-s-triazine, Cyanurotriamide, Cyanurotriamine และ Cyanuramide

เมลามีนเป็นไตรเมอร์ (Trimer หรือ สารประกอบที่เกิดจากโมเลกุล 3 โมเลกุลที่เหมือนกันแตกเป็นสามขา) ของไซยานาไมด์ (Cyanamide) เช่นเดียวกับไซยานาไมด์ เมลามีนประกอบด้วยไนโตรเจนร้อยละ 66 โดยมวล เป็นสารที่มีสมบัติทนไฟเมื่ออยู่ในรูปของเรซิน (Resin) ด้วยการปลดปล่อยไนโตรเจนออกมาเมื่อถูกไหม้หรือถูกเผา และมีการนำเอา Dicyandiamide หรือ Cyanoguanidine ที่เป็นไดเมอร์ (Dimer) ของไซยานาไมด์มาใช้เป็นสารทนไฟเช่นกัน นอกจากนี้เมลามีนเป็นสารในกระบวนการสร้าง และสลาย (Metabolism) ของไซโลมาซีน (Cyromazine) ซึ่งเป็นยาฆ่าแมลงชนิดหนึ่งเป็นสารที่เกิดขึ้นในตัวของสัตว์เลือดอุ่นที่ย่อยไซโลมาซีน และมีรายงานเช่นกันว่าไซโลมาซีนเปลี่ยนเป็นเมลามีนในพืช หรืออาจกล่าวได้ว่าเมลามีนเป็นพลาสติกชนิดหนึ่งที่มีการใช้ร่วมกับฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde) หรือ ชื่อ IUPAC คือ เมทานาล (Methanal) สูตรเคมีคือ HCOH เพื่อผลิตเมลามีนเรซิน (Melamine resin) ซึ่งเป็นพลาสติกชนิดหุ้มด้วยความร้อนหรือ พลาสติกเทอร์โมเซต (Thermosetting plastic) ที่ทนทานมากชนิดหนึ่ง ส่วนใหญ่เมลามีนจะถูกนำมาผลิตพลาสติก งานเมลามีน กระจกพลาสติก พลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.2 การสังเคราะห์เมลามีน

เมลามีนถูกสังเคราะห์ขึ้นครั้งแรกใน ค.ศ. 1834 (พ.ศ. 2377) โดยนักเคมีชาวเยอรมัน ชื่อ Justus Von Liebig ได้ผลิตเมลามีนอย่างง่าย ๆ โดยการเปลี่ยนแคลเซียมไซยานาไมด์ ( $\text{CaCN}_2$ ) ให้เป็นเมลามีนด้วยวิธีการให้ความร้อนสูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลว (จุดหลอมเหลว) ของ  $\text{CaCN}_2$  ซึ่งแคลเซียมไซยานาไมด์เป็นสารประกอบของแคลเซียมที่ใช้ทำปุ๋ยถูกสังเคราะห์ขึ้นครั้งแรกใน ค.ศ. 1898 (พ.ศ. 2441) โดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อ Adolph Frank และ Nikodem Caro โดยนำแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide) มาทำปฏิกิริยากับไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ) ดังสมการ



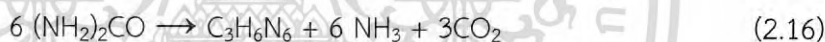
ประโยชน์ของ  $\text{CaCN}_2$  ใช้ในการเกษตรคือ ทำปุ๋ย โดยให้ทำปฏิกิริยากับน้ำจะได้แก๊สแอมโมเนีย ดังสมการ



นอกจากนี้ยังใช้ผลิตโซเดียมไซยาไนด์ ( $\text{NaCN}$ ) ดังสมการ



อย่างไรก็ตามในปัจจุบันการผลิตเมลามีนในโรงงานอุตสาหกรรม ส่วนมากผลิตจากยูเรีย ( $\text{NH}_2\text{-CO-NH}_2$  หรือ  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ ) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ประเภทเอไมด์ (Amide สูตรทั่วไปคือ  $\text{R-CO-NH}_2$ ) ปฏิกิริยาการผลิตเมลามีนจากยูเรีย เป็นตามสมการ ดังนี้



ปฏิกิริยาการผลิตเมลามีนจากยูเรียมี 2 ขั้นตอน ดังนี้  
ขั้นที่ 1 ยูเรียจะสลายตัวให้กรดไซยานิก ( $\text{HCNO}$ ) และแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน (Endothermic reaction) ดังสมการ

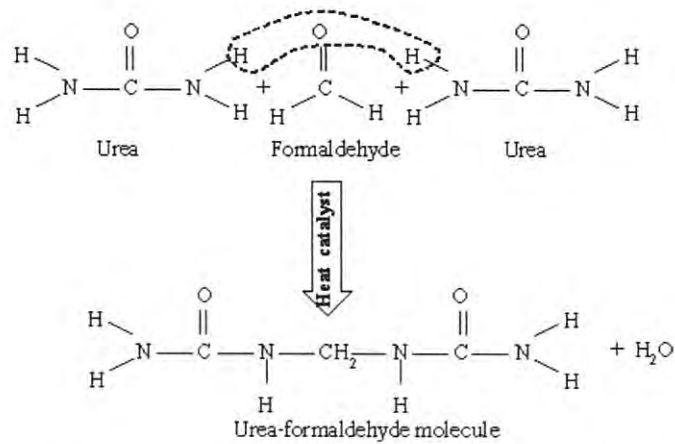


ขั้นที่ 2 พอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) กรดไซยานิกจะได้ เมลามีน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการ



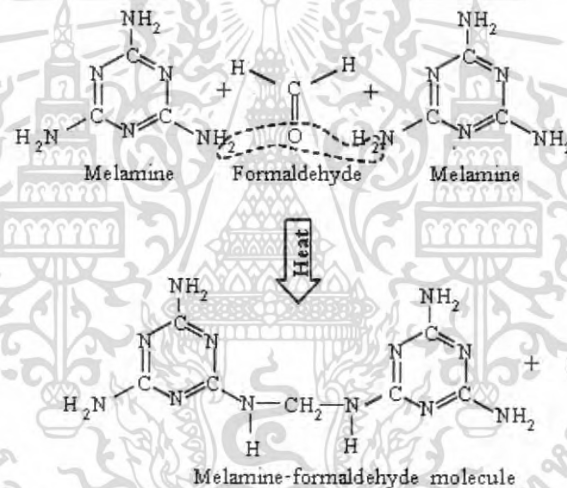
ปฏิกิริยาในขั้นที่ 2 นี้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction) แต่ปฏิกิริยารวม (ขั้นที่ 1 + 2) จะเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน

ยูเรียและเมลามีนสามารถทำปฏิกิริยากับฟอร์มัลดีไฮด์ โดยเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น (Condensation polymerization) ได้ยูเรีย-ฟอร์มัลดีไฮด์ (Urea-formaldehyde) และน้ำเป็นผลพลอยได้ ซึ่งปฏิกิริยาการควบแน่นระหว่างยูเรียกับฟอร์มัลดีไฮด์ เป็นดังนี้



รูปที่ 2.5 ปฏิกริยาการควบแน่นระหว่างยูเรียกับฟอร์มัลดีไฮด์ [14]

นอกจากนี้เมลามีนสามารถทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันกับฟอร์มัลดีไฮด์ โดยเกิดการควบแน่นได้เป็นเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์และน้ำ ดังนี้



รูปที่ 2.6 ปฏิกริยาพอลิเมอไรเซชันระหว่างเมลามีนกับฟอร์มัลดีไฮด์ [14]

## 2.3 กราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ (graphitic carbon nitride: g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)

### 2.3.1 ข้อมูลเบื้องต้นของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ [14]

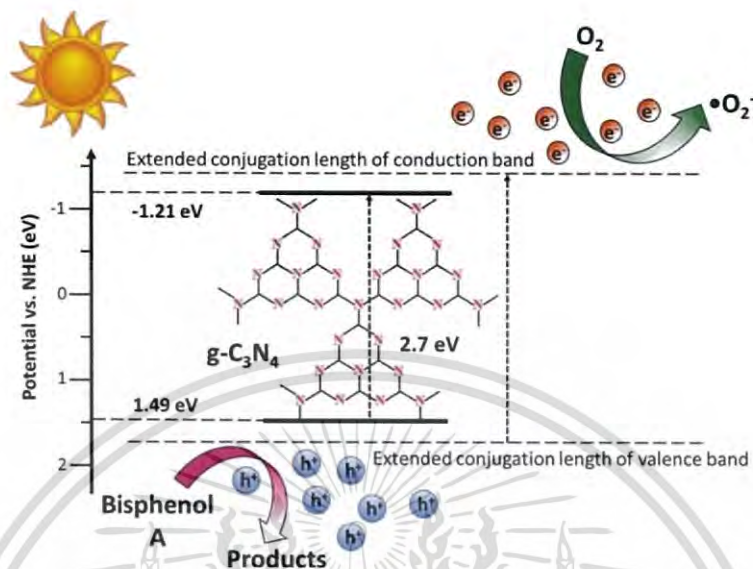
กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์คือสารกึ่งตัวนำในรูปสารประกอบอินทรีย์ประเภทพี (p-type) มีความเสถียรสูง ทนทานต่อความร้อนและมีความต้านทานต่อสารเคมี จากการวิเคราะห์ด้วย TGA พบว่า กราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์สามารถทนความร้อนได้ถึง 600 องศาเซลเซียส และจะเริ่มสลายตัวเมื่ออุณหภูมิสูงเกิน 700 องศาเซลเซียส ในส่วนของความต้านทานต่อสารเคมีนั้น กราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์จะไม่ละลายในน้ำ เอทานอล โทลูอีน และอีเธอร์เอธิลีน

กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์มีค่าช่องว่างแถบพลังงานอยู่ที่ประมาณ 2.7 อิเล็กตรอนโวล จากการที่สีของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์เป็นสีเหลืองทำให้ช่วงการดูดกลืนแสงอยู่ที่ประมาณ 460 นาโนเมตร จึงเป็นวัสดุที่สามารถนำมาใช้กับพลังงานแสงอาทิตย์ ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่

ได้รับความนิยมมากที่สุด เนื่องจากมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา มีความเสถียรภาพทางเคมีสูง

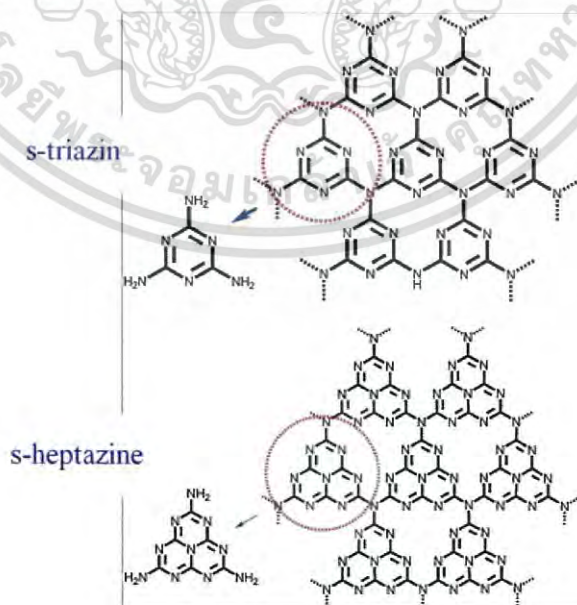
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่จะเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกภายใต้แสงยูวีเท่านั้น ทำให้กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ได้รับความสนใจอย่างแพร่หลายในการเป็นสารกึ่งตัวนำที่สามารถทำให้เกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้แสงที่มองเห็นได้



รูปที่ 2.7 กระบวนการโฟโตคะตะไลติกของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ [15]

โครงสร้างของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์มีลักษณะคล้ายคลึงกับแผ่นกราฟินแต่กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์จะมีอะตอมของไนโตรเจนสลับกับอะตอมของคาร์บอนเรียงตัวเป็นรูปหกเหลี่ยม ชั้นโครงสร้างของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์นั้นจะมีการจัดเรียงเป็น 2 รูปแบบด้วยกัน คือ แบบ s-triazine และ s-heptazine อย่างไรก็ตามกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์มักจะอยู่ในรูปของ s-heptazine เนื่องจากเป็นโครงสร้างที่มีความเสถียรมากกว่า

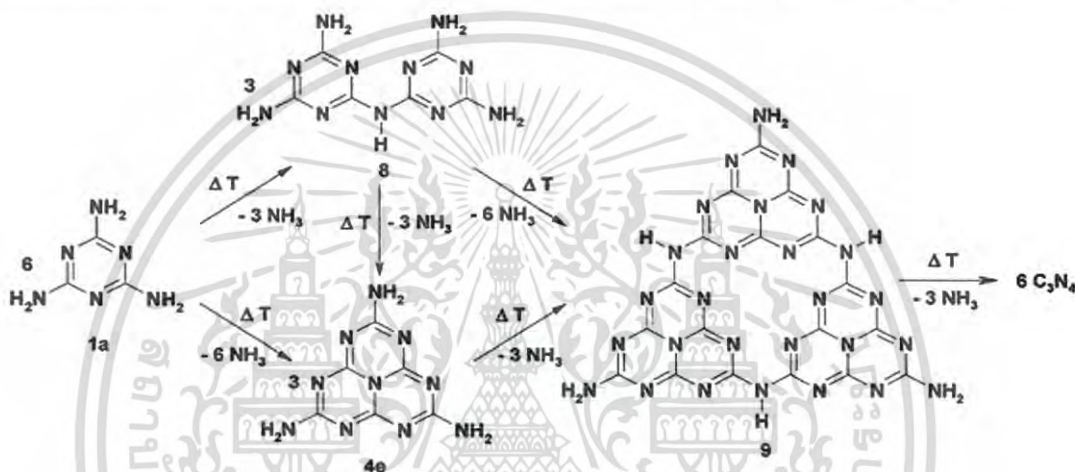


รูปที่ 2.8 โครงสร้างของ s-triazine และ s-heptazine [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2 การสังเคราะห์กราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์

การสังเคราะห์กราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์มีด้วยกันหลายวิธี เช่น การตกตะกอนของไอสาร (PVD) การเคลือบผิวด้วยไอเคมี (CVD) โซลโวลเทอร์มอล ไพโรไลซิส ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง และ thermal nitridation สารตั้งต้นที่นำมาใช้ในการสังเคราะห์จะเป็นสารที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น เมลามีน ยูเรีย ไซยานาไมด์ ไทโอยูเรีย กัวนิติน เป็นต้น ในงานวิจัยส่วนใหญ่จะใช้เมลามีน (1a) เป็นสารตั้งต้น โดยจะให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 297-390 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการควบแน่น และการระเหิดของแอมโมเนียทำให้เกิดโครงสร้างเป็น melam (8) และ melem (4e) จากนั้นเมื่อให้ความร้อนเพิ่มขึ้นที่ 545-630 องศาเซลเซียสจะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน และการสูญเสียยูเรียทำให้เกิดโครงสร้างเป็นกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส melam (8) จะเปลี่ยนโครงสร้างเป็น melem (4e) เนื่องจากเป็นโครงสร้างที่มีเสถียรภาพมากกว่า



รูปที่ 2.9 กลไกการเกิดกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ [14]

### 2.3.3 ประโยชน์ของกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์

กระบวนการโฟโตคะตะไลติกของกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย อาทิ เซนเซอร์ ตัวเก็บประจุยิ่งยวด การดูดซับ การสังเคราะห์สารอินทรีย์ การแยกโมเลกุลน้ำเพื่อผลิตไฮโดรเจน การย่อยสลายจุลินทรีย์ การกำจัดมลพิษจำพวกสารอินทรีย์ และอนินทรีย์ แบตเตอรี่ลิเทียม เป็นต้น

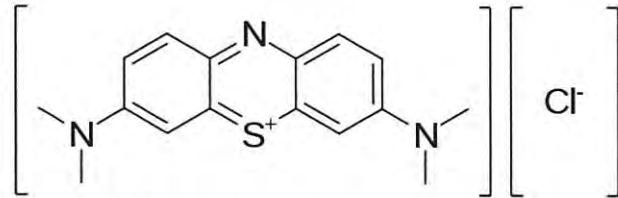
## 2.4 เมทิลีนบลู (Methylene blue) [16]

### 2.4.1 ข้อมูลเบื้องต้นของเมทิลีนบลู

เมทิลีนบลูเป็นสีย้อมที่เป็นด่าง (Basic dye) ซึ่งมีไอออนบวกเป็นตัวให้สี เมื่อนำไปย้อมรวมกับส่วนประกอบของเซลล์ที่อยู่บนผิวหรือภายในเซลล์ ไอออนบวกของสีจะจับกับไอออนลบของกรดนิวคลีอิก โดยจับกันด้วยพันธะหลายชนิด เช่น พันธะไอออนิก พันธะไฮโดรเจน และแรงแวนเดอร์วาลส์ เมทิลีนบลูมี CAS Number: 61-73-4 สามารถใช้เป็นสีย้อมสีในการศึกษาทางแบคทีเรียเป็นรีเอเจนท์ ตัวย้อมยังกระบวนการสร้างโพลีเมอร์และสีย้อมผสมชนิดไม่ถาวร ใช้เป็นสีย้อมกระดาษสิ่งทอและหนัง เป็นต้น ที่อุณหภูมิห้องจะมีลักษณะเป็นของแข็งผงสีเขียวเข้มไม่มีกลิ่น และเปลี่ยนเป็นสีฟ้าเมื่อละลายน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

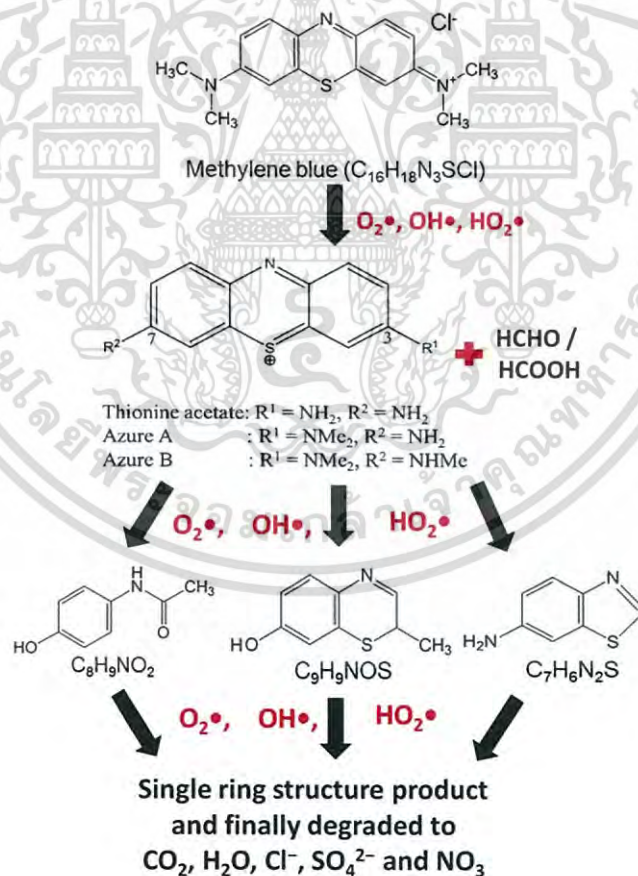
เมทิลีนบลูเป็นสีย้อมที่มีประจุบวกที่มีการดูดซับสูงสุดที่ความยาวคลื่น 670 นาโนเมตร ซึ่งความสามารถในการดูดซับขึ้นอยู่กับปัจจัยการแตกตัวเป็นประจุบวก ชนิดของวัสดุดูดซับ ความเข้มข้น และปฏิกิริยาเคมีอื่น ๆ เป็นต้น



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของเมทิลีนบลู [17]

#### 2.4.2 กลไกการสลายสีย้อมของเมทิลีนบลู [18]

เมทิลีนบลูเมื่อละลายน้ำไอออนของคลอไรด์จะแยกตัวออกจากโครงสร้าง จากนั้น  $\text{OH}^\bullet$  และ  $\text{O}_2^\bullet$  ที่เกิดจากกระบวนการโฟโตคะตะไลติกจะทำลายพันธะระหว่าง N และ  $\text{CH}_3$  และ  $\text{CH}_3$  จะถูกออกซิไดซ์เป็น  $\text{HCHO}$  หรือ  $\text{HCOOH}$  ต่อมา  $\text{OH}^\bullet$  และ  $\text{O}_2^\bullet$  จะทำลายพันธะ C-S และ C-N เพื่อทำให้อาร์อินทรีย์มีขนาดโมเลกุลเล็กลง ปฏิกิริยาออกซิเดชันนี้จะยังคงดำเนินต่อไปจนกว่าเมทิลีนบลูจะถูกย่อยสลายเป็นโมเลกุลอนินทรีย์ขนาดเล็ก เช่น  $\text{H}_2\text{O}$   $\text{Cl}^-$   $\text{CO}_2$   $\text{SO}_4^{2-}$  และ  $\text{NO}_3$



รูปที่ 2.11 ภาพแสดงกลไกการสลายตัวของสีย้อมเมทิลีนบลู [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Mehdi Alzamani และคณะ (2013) ได้ทำการสังเคราะห์แผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ผ่านกระบวนการโซล-เจล โดยทำการศึกษาชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการโซล-เจลต่อคุณสมบัติของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก ผลการศึกษาพบว่าชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อลักษณะของผลึกที่แสดงออกในตัวอย่าง โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรดและด่างมีผลต่อการสร้างอนุภาคและรูโหล์ ตามลำดับ ดังนั้นตัวอย่างที่ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรดจะแสดงความสามารถในการเกิดโฟโตคะตะไลติกที่ดีกว่า เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรดทำให้เกิดผลึกอนุภาคในปริมาณที่มากกว่า [19]

Supat Buddee และคณะ (2011) ได้ทำการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการเจือโครเมียมและเหล็ก เพื่อใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู ภายใต้แสงยูวีและแสงวิสิเบิล จากการทดลองภายใต้แสงยูวีพบว่าสารตัวอย่างสามารถกำจัดสีย้อมได้เช่นเดียวกับไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างอนุภาค นอกจากนี้เมื่อทำการทดลองภายใต้แสงวิสิเบิลจะเห็นได้ว่าสารตัวอย่างยังคงมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม ในขณะที่ไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างอนุภาคมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการเจือโครเมียมและเหล็กมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมภายใต้แสงวิสิเบิล และสามารถใช้งานซ้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ [20]

Rishu Katwal และคณะ (2015) ได้ทำการสังเคราะห์คอปเปอร์ (I) ออกไซด์ขนาดนาโนด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมี เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกและป้องกันจุลชีพ ซึ่งในการสังเคราะห์นั้นจะศึกษาผลของอิเล็กโทรไลต์ ตัวทำละลาย กระแสไฟฟ้า และเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อขนาด รูปร่าง และปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจากการตรวจสอบด้วย TEM พบว่า เมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยา ขนาดและปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาจะเพิ่มมากขึ้น และเมื่อนำไปใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก โดยวัดการสลายตัวของเมทิลีนบลู เมทิลเรด และคองโกเรดภายใต้แสงอาทิตย์ พบว่า สามารถย่อยสลายเมทิลีนบลูได้ถึง 93% นอกจากนี้การศึกษาประสิทธิภาพการป้องกันจุลชีพด้วยวิธีวัดการเจริญเติบโต (growth curve method) พบว่า ความเข้มข้นของคอปเปอร์ (I) ออกไซด์ขนาดนาโนส่งผลต่อประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลชีพ [21]

R. Sankar Ganesh และคณะ (2017) ได้ทำการสังเคราะห์แคดเมียมซัลไฟด์นาโนไวร์ (CdS nanowire) ผ่านกระบวนการโซลโวลเทอร์มอล โดยทำการศึกษาอุณหภูมิในการสังเคราะห์ เพื่อใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้แสงวิสิเบิล ผลจากการทดสอบพบว่าสามารถย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้ถึงร้อยละ 97 และย่อยสลายสีย้อมโรห์ตามีน บีได้ถึงร้อยละ 90 ภายในเวลา 180 นาที นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบกับโครงสร้างแคดเมียมซัลไฟด์แบบอื่น แสดงให้เห็นว่านาโนไวร์เป็นโครงสร้างที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้แสงวิสิเบิล [22]

N. Chidhambaram และคณะ (2017) ได้ทำการเตรียมวัสดุนาโนแผ่นบางของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแบบขั้นตอนเดียว โดยใช้ยูเรียเป็นสารตั้งต้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี มีลักษณะเป็นแผ่นนาโน (nanoflakes) หลายชั้น และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และเมื่อนำไปใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมส่งผลให้การเกิดโฟโตคะตะไลติกมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น [23]

Le Thi Mai Oanh และคณะ (2018) ได้ทำการสังเคราะห์กราไฟติกคาร์บอนไนโตรด์นาโนซีทจากยูเรีย โดยใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ที่แตกต่างกันภายใต้บรรยากาศอาร์กอนเพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพและประสิทธิภาพในการเกิดโฟโตคะตะไลติก จากการศึกษาประสิทธิภาพในการเกิดโฟโตคะตะไลติก พบว่า สารที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 550 องศาเซลเซียส สามารถย่อยสลายสีย้อมโรห์ตามีน บี ภายใต้รังสีซินอนได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดเนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง [7]

Chechia Hu และคณะ (2017) ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์กราไฟติกคาร์บอนไนโตรด์จากเมลามีนด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง โซลโวเทอร์มอลและโซลโวเทอร์มอล โดยใช้คลื่นไมโครเวฟผลการทดสอบด้วย BET พบว่าโครงสร้างของกราไฟติกคาร์บอนไนโตรด์ด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็งและโซลโวเทอร์มอลมีลักษณะเป็นแผ่นคล้ายกัน ในขณะที่การสังเคราะห์ด้วยวิธีโซลโวเทอร์มอล โดยใช้คลื่นไมโครเวฟโครงสร้างที่ได้มีลักษณะเป็นทรงกลมทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกได้ดี นอกจากนี้วิธีการดังกล่าวยังใช้เวลาและอุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่ำ [24]

Yu Zheng และคณะ (2017) ได้ทำการเตรียมกราไฟติกคาร์บอนไนโตรด์จากเมลามีนและยูเรีย ผ่านกระบวนการให้ความร้อน (ไพโรไลซิส) ผลจากการตรวจสอบด้วย BET พบว่า อุณหภูมิที่ใช้สูงขึ้นทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะของสารเพิ่มขึ้นจึงมีคุณสมบัติในการดูดซับดีขึ้น นอกจากนี้ยังมีผลทำให้กระบวนการโฟโตคะตะไลติกมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อม โรห์ตามีน บี ดีขึ้น [25]

Xiwang Jiang และคณะ (2017) ได้ทำการเตรียมกราไฟติกคาร์บอนไนโตรด์จากเมลามีนไฮโดรคลอไรด์ เพื่อใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกในการกำจัดสีย้อมแอสิตออเรนจ์ 7 ภายใต้แสงวิสิเบิล โดยการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวจะใช้อุณหภูมิการเผาที่แตกต่างกัน เนื่องจากต้องการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อโครงสร้างและประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อนำไปใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้อุณหภูมิในการเผาสูง จะมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมได้ดียิ่งขึ้น [26]

Jiuqing Wen และคณะ (2017) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการเกิดโฟโตคะตะไลติกของกราไฟติกคาร์บอนไนโตรด์ โดยการสังเคราะห์นั้นจะใช้วิธีการให้ความร้อนผ่านการควบแน่นสารตั้งต้นที่ใช้ คือ ยูเรีย ไทโอยูเรีย เมลามีน ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ โดยในงานวิจัยได้ศึกษาสมบัติ โครงสร้างผลึกสารเคมี ลักษณะพื้นผิวของสาร พบว่าสามารถผลิตได้ง่าย และไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม ส่งผลให้กระบวนการเกิดโฟโตคะตะไลติกมีประสิทธิภาพ และเสถียรภาพสูงมากยิ่งขึ้น [6]

## 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)

### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-visible Spectrophotometer) รุ่น Evolution 201, Thermo Scientific, USA
2. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) รุ่น XRD-6100, Shimadzu, Japan
3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น JEOL-JSM5800LV, Japan
4. เครื่องวัดธาตุเชิงพลังงาน (Energy-dispersive X-ray Spectroscopy, EDS) รุ่น Oxford ISIS 300, England
5. เครื่องวัดวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR) รุ่น Nicolet iS50, Thermo Fisher Scientific Inc, USA
6. เครื่องวัดพื้นที่ผิวและรูพรุนโดยวิธี (Brunauer Emmett Teller, BET) รุ่น autosorb 1, Quantachrome
7. เครื่องวัดการดูดกลืนแสงของแข็ง (Diffused Reflectance UV-Vis Spectroscopy, UV/DRS) UV-2401, Shimadzu, Japan
8. เครื่องมือวิเคราะห์เชิงความร้อน (Thermogravimetric Analysis, TGA) รุ่น Pyris TGA, USA
9. อุปกรณ์เครื่องแก้วต่าง ๆ เช่น ปีกเกอร์ กระบอกตวง หลอดหยด
10. ตู้ปฏิบัติการโฟโตคะตะไลติก ขนาด 0.4x0.6x0.8 เมตร
11. หลอดไฟยูวี (Black light) 18 วัตต์ จำนวน 4 หลอด
12. หลอดไฟวิสิเบิล 18 วัตต์ 4 หลอด
13. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 การเตรียมกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์

3.3.1.1 ชั่งเมลามีนประมาณ 10 กรัม ลงในคูชิเบล

3.3.1.2 นำไปเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ได้แก่ 450 500 550 600 และ 650 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน โดยให้อัตราความร้อนที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้องประมาณ 30 องศาเซลเซียส

3.3.1.3 บดสารให้เป็นผงละเอียดจะได้กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ตัวอย่าง ดังรูปที่

#### 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ผงผลิตภัณฑ์ไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้

### 3.3.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม

#### 3.3.2.1 การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับในที่มืดของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์

1) ชั่งกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ประมาณ 0.0500 กรัม  
 2) เติมสีย้อมเมทิลีนบลูความเข้มข้น  $1.25 \times 10^{-5}$  โมลาร์ จำนวน 60 มิลลิลิตร จากนั้นทำการปั่นจนโดยไม่เปิดหลอดไฟ (ในที่มืด) เป็นเวลา 180 นาที โดยเก็บตัวอย่างสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูจำนวน 3 มิลลิลิตร ทุกๆ 30 นาที นำไปปั่นเหวี่ยงและนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงเพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับด้วยเทคนิค UV-Vis spectrophotometer

3) บันทึกข้อมูลทำการทดลองซ้ำเพื่อหาค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการดูดซับ

4) ทำการคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม จากสมการ (3.1)

คำนวณประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม

$$\% \text{ การกำจัดสีย้อม} = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100 \% \quad (3.1)$$

เมื่อ  $A_0$  = ค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้น

$A_t$  = ค่าการดูดกลืนแสงที่เวลาต่าง ๆ

#### 3.3.2.2 การทดสอบประสิทธิภาพกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้การฉายแสง-

วิธีเบิล

1) ชั่งผงตัวอย่างกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่เตรียมได้ประมาณ 0.0500 กรัม  
 2) เติมสีย้อมเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้น  $1.25 \times 10^{-5}$  โมลาร์ จำนวน 60 มิลลิลิตร จากนั้นทำการปั่นจนโดยไม่เปิดหลอดไฟ (ในที่มืด) เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นดูดสีย้อมเมทิลีนบลูจำนวน 3 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดเซนตริฟิวจ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ฉายแสงวิสิเบิลต่อเป็นเวลา 150 นาที โดยทำการเก็บสีย้อมเมทิลีนบลู ทุกๆ 30 นาที และทำการเซนตริฟิวจ์ เพื่อนำไปหาค่าความสามารถในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยเทคนิค UV-Vis spectrophotometer

4) บันทึกข้อมูล ทำการทดลองซ้ำเพื่อหาค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู



รูปที่ 3.2 ฉายแสงวิสิเบิล



รูปที่ 3.3 สีย้อมเมทิลีนบลู หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติก

3.3.2.3 ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู (ทำการทดลองได้เช่นเดียวกันกับการทดลองในข้อ 3.3.2.2) แต่เปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเมทิลีนบลูเป็น  $1.0 \times 10^{-5}$   $1.25 \times 10^{-5}$  และ  $1.5 \times 10^{-5}$  โมลาร์ ตามลำดับ

3.3.2.4 ศึกษาปริมาณกราฟาไฟติกคาร์บอนไนโตรดที่ใช้ (ทำการทดลองได้เช่นเดียวกันกับการทดลองในข้อ 3.3.2.2) แต่เปลี่ยนแปลงปริมาณกราฟาไฟติกคาร์บอนไนโตรดเป็น 0.03 0.05 และ 0.07 กรัม ตามลำดับ

3.3.2.5 ศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานซ้ำ (ทำการทดลองได้เช่นเดียวกันกับการทดลองในข้อ 3.3.2.2) แต่ใช้กราฟาไฟติกคาร์บอนไนโตรดซ้ำ 4 ครั้ง เมื่อใช้งานครั้งที่ 1 นำไปกรองเพื่อแยกตัวเร่งปฏิกิริยากับสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู จากนั้นเติมน้ำกลั่นเพื่อล้างตัวเร่งปฏิกิริยาและนำไปเซนตริฟิวจ์ เมื่อล้างตัวเร่งปฏิกิริยาจนสะอาดจึงเติมสารละลายสีย้อมลงไป

### 3.4 การตรวจสอบและพิสูจน์เอกลักษณ์

#### 3.4.1 X-Ray Diffraction (XRD)

เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง ผลการวิเคราะห์สามารถหาลักษณะของโครงสร้างผลึกได้ อีกทั้งยังคำนวณหาปริมาณขององค์ประกอบต่างๆ ที่อยู่ในตัวอย่าง ดังนั้นงานวิจัยนี้ต้องการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกและองค์ประกอบของกราฟาไฟติกคาร์บอนไนโตรดที่ใช้คุณสมบัติในการเผาที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.2 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)

เครื่องมือสำหรับวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณสาร โดยการวัดการดูดกลืนแสงของสารในช่วงอินฟราเรด (Infrared light) ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ เป็นเทคนิคที่ใช้บอกหมู่ฟังก์ชันของสาร ซึ่งสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้ง ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ใช้ในการวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างของสาร ดังนั้นงานวิจัยนี้ต้องการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันโครงสร้างของกราไฟติกคาร์บอนไนโตรด

### 3.4.3 Diffused Reflectance UV-Vis Spectroscopy (DRS)

เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่าการดูดกลืนแสงในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงวิสิเบิลที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืน โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารตัวอย่าง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนและสารอนินทรีย์ ใช้ในการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของสารต่าง ๆ ที่มีอยู่ในตัวอย่างได้ ตัวอย่างที่จะนำมาวิเคราะห์จะอยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ โดยส่วนใหญ่เป็นสารละลาย ดังนั้นงานวิจัยนี้ต้องการตรวจวัดปริมาณแสงและค่าความเข้มของแสงในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงวิสิเบิลที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนของ กราไฟติกคาร์บอนไนโตรด

### 3.4.4 Scanning Electron Microscope (SEM)

เครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะสัณฐานของวัสดุในระดับจุลภาค โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร ใช้ในการการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่าง การศึกษาสัณฐานและลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง ภาพโครงสร้างที่ได้จากเครื่องเป็นภาพลักษณะ 3 มิติ สามารถทำการวิเคราะห์ทดสอบตัวอย่างได้ทั้งของแข็งและผง ดังนั้นงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาสัณฐานวิทยาและดูรายละเอียดพื้นผิวของกราไฟติกคาร์บอนไนโตรด

### 3.4.5 Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX)

เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวของตัวอย่าง การใช้กล้องจุลทรรศน์ SEM ร่วมกับเทคนิค EDS หรือ EDX ทำให้การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานมีความละเอียดและได้ข้อมูลที่สมบูรณ์มากขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้ผู้วิจัยต้องการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวของกราไฟติกคาร์บอนไนโตรด

### 3.4.6 Brunauer Emmett-Teller (BET)

เครื่องมือวิเคราะห์พื้นผิวและการกระจายของรูพรุน ปริมาตรของรูพรุน ด้วยวิธีให้ตัวอย่างมีการดูดซับหรือคายก๊าซ เพื่อวิเคราะห์หาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน พื้นที่ผิวของผงตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการของ Volumetric gas adsorption method เช่น  $N_2$   $Ar_2$   $CO_2$   $H_2$  และก๊าซไม่กัดกร่อนอื่น ๆ (ซึ่งในการวิเคราะห์นี้ใช้ก๊าซไนโตรเจน)

### 3.4.7 Thermal Gravity Analysis (TGA)

เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร โดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนของวัสดุต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิด้วยเครื่องซึ่งที่มีความไวสูง ศึกษาสมบัติของตัวอย่างได้หลากหลายชนิด ทั้งตัวอย่างในกลุ่มเซรามิก พอลิเมอร์ หรือสารอินทรีย์ ใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวมนิวสำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุ จุดหลอมเหลว การสูญเสียน้ำหนัก สารเจือปนในตัวอย่าง รวมไปถึงการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเฟสของตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อน

### 3.4.8 UV-Vis Spectrophotometer

เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดปริมาณแสงและค่าความเข้มของแสงในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงวิสิเบิลที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่างซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน และสารอินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านั้นได้ ในงานวิจัยนี้ต้องการตรวจวัดปริมาณแสงและค่าความเข้มของแสงในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงวิสิเบิลที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนของกราฟไตติกคาร์บอนไนโตรดที่ใช้อุณหภูมิจากการสังเคราะห์ต่างกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมกราฟาไฟติกคาร์บอนไนไตรด์จากเมลามีนบริสุทธิ์ซึ่งใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 450 500 550 600 และ 650 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าสีของผงกราฟาไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียสมีลักษณะเป็นผงผลึกสีเหลืองซีด จากนั้นจะค่อยๆ เปลี่ยนไปเป็นสีเหลืองเข้มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการสังเคราะห์สูงขึ้น จนอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ 650 องศาเซลเซียส ผงกราฟาไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ตัวอย่างจะมีสีส้มเหลือง ซึ่งอาจจะทำให้สรุปได้เบื้องต้นว่ากราฟาไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ มีความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงแสงวิสิเบิลได้แตกต่างกัน



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างผงกราฟาไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ที่แตกต่างกัน

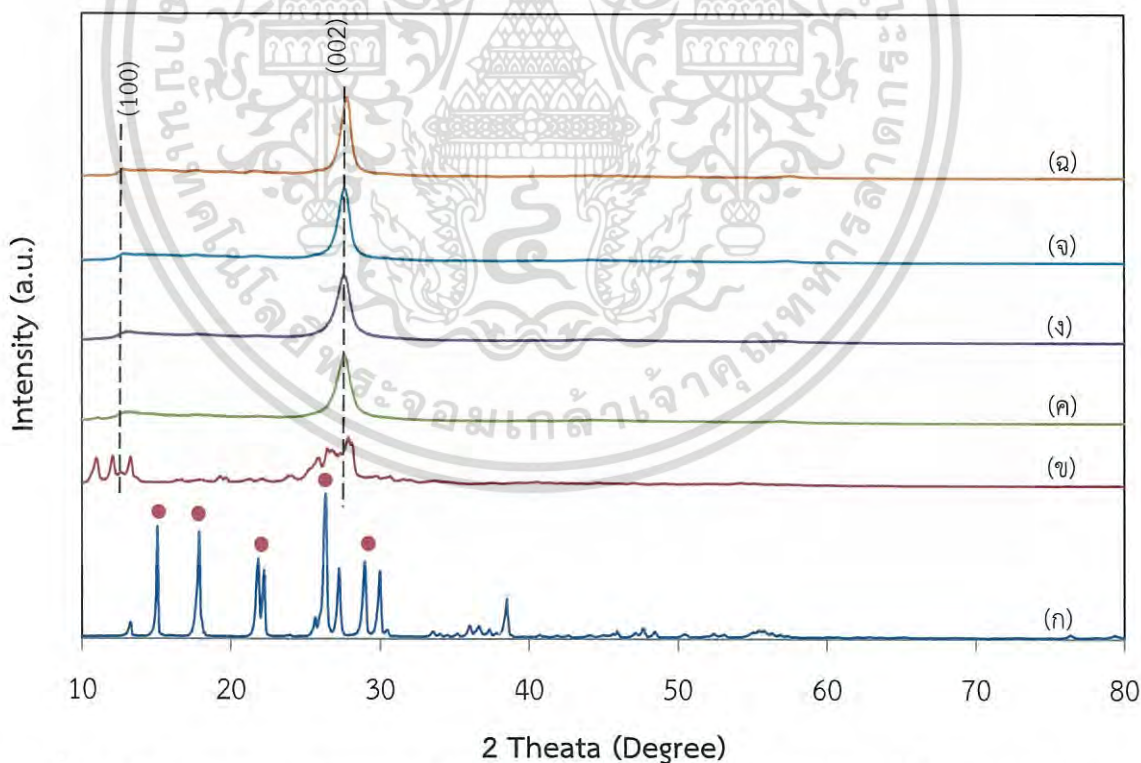
โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากาการพิสูจน์เอกลักษณ์และศึกษาประสิทธิภาพโฟโตคะตะไลติกในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงวิสิเบิลของกราฟาไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ซึ่งใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู ได้แก่ ปริมาณกราฟาไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลู และประสิทธิภาพการใช้งานซ้ำ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.1 การวิเคราะห์พิกัดเอกลักษณะ

### 4.1.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer; XRD)

การศึกษาโครงสร้างผลึกของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่อุณหภูมิ 450 500 550 600 และ 650 องศาเซลเซียส เพื่อพิกัดเอกลักษณะศึกษาโดยใช้เทคนิค X-Ray Diffraction (XRD) โดยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสารต่าง ๆ แสดงไว้ดังรูปที่ 4.2 จากรูปพบว่าเมลามีนตั้งต้น (รูป 4.2 (ก) ) จะมีพิกัดเอกลักษณะปรากฏอยู่ที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $15.06^\circ$   $17.84^\circ$   $21.8^\circ$   $26.32^\circ$  และ  $28.94^\circ$  ตามลำดับ ส่วนกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์จะพบพิกัดเอกลักษณะเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $13.0^\circ$  แสดงเอกลักษณะของ s-heptazine และ  $27.4^\circ$  แสดงเอกลักษณะของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ตรงกับการเลี้ยวเบนของระนาบ (100) และ (002) ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ค) - (ฉ) ในขณะที่อุณหภูมิในการเผา 450 องศาเซลเซียส ( ดังแสดงในรูป 4.2 (ข) ) พบว่าลักษณะของพิกัดมีส่วนที่คล้ายกับพิกัดของเมลามีน แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิในการเผา 450 องศาเซลเซียส ยังคงมีผลึกของเมลามีนตั้งต้นอยู่นั้นแสดงให้เห็นว่าการเผาที่อุณหภูมินี้ยังเกิดกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ไม่สมบูรณ์ แต่เมื่ออุณหภูมิที่ใช้สูงขึ้นเริ่มตั้งแต่ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าพิกัดความเด่นชัดมากขึ้น ซึ่งบ่งชี้ให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้เปลี่ยนเป็นกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์อย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้ intensity ของพิกัดสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการสังเคราะห์เพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างมีความเป็นผลึกมากขึ้น [27]



รูปที่ 4.2 XRD pattern ของเมลามีนและกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่อุณหภูมิต่างๆ (ก) เมลามีนตั้งต้น (ข)  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ \_450 (ค)  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ \_500 (ง)  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ \_550 (จ)  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ \_600 และ (ฉ)  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  650 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

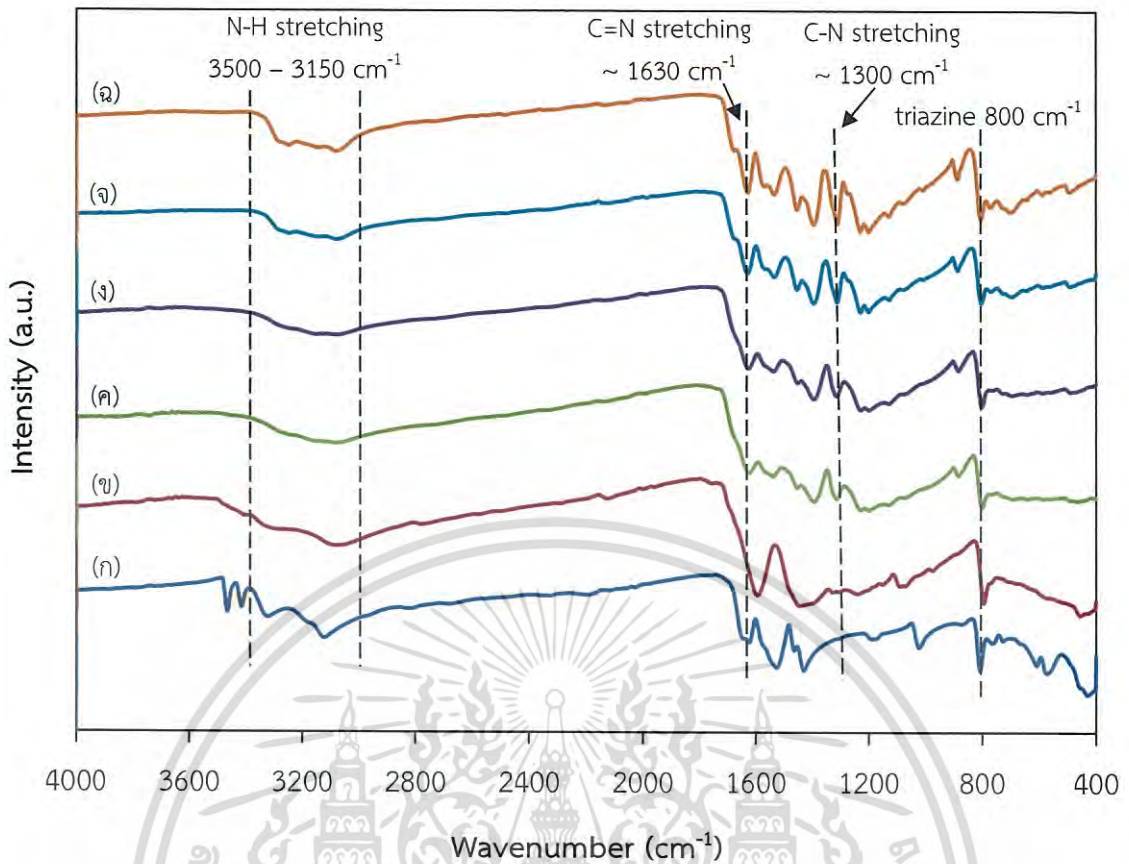
#### 4.1.2 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer; FT-IR)

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของกราฟไพลิกคาร์บอนไนไตรด์ ( $g\text{-C}_3\text{N}_4$ ) สามารถทำการศึกษาดูด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) จากโครงสร้างของเมลามีนและกราฟไพลิกคาร์บอนไนไตรด์สามารถคาดคะเนการสั่นของเลขคลื่นได้ดังตารางที่ 4.1 จากผลการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 4.3 พบว่า เมลามีน (ก) และกราฟไพลิกคาร์บอนไนไตรด์ (ข) (ค) (ง) (จ) และ (ฉ) คือ  $g\text{-C}_3\text{N}_4_{450}$   $g\text{-C}_3\text{N}_4_{500}$   $g\text{-C}_3\text{N}_4_{550}$   $g\text{-C}_3\text{N}_4_{600}$  และ  $g\text{-C}_3\text{N}_4_{650}$  องศาเซลเซียส ตามลำดับ มีการสั่นของเลขคลื่นในช่วงที่ใกล้เคียงกัน ได้แก่ การสั่นของเลขคลื่นที่ 812 (triazine breathing) การสั่นของเลขคลื่นในช่วง 1646-1225 (C-N heterocycles stretching) สำหรับที่  $g\text{-C}_3\text{N}_4_{450}$  พบพีกที่เด่นชัดที่เลขคลื่น 1571 และ 1630 แสดงการสั่นของ melem [28] เมื่ออุณหภูมิในการสังเคราะห์สูงขึ้นตั้งแต่ 500 องศาเซลเซียส การสั่นของเลขคลื่นที่ 1300 1402 และ 1460 จะมีความคมชัดขึ้น นอกจากนี้พีกดังกล่าวยังมีแนวโน้มที่ความเข้มของพีกสูงขึ้นด้วยเช่นกัน แสดงให้เห็นว่ามีการเกิดพอลิคอนเดนเซชัน (polycondensation) ของแผ่นกราฟไพลิกคาร์บอนไนไตรด์ได้มากขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิในการเผา ซึ่งผลที่ได้จากเทคนิคนี้ยังสอดคล้องกับผล XRD ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการที่กราฟไพลิกคาร์บอนไนไตรด์มีความเป็นผลึกสูงขึ้น นอกจากนี้ยังเกิดการสั่นของเลขคลื่นที่ 3189 (N-H stretching) และ ในส่วนของ N-H stretching พบว่าเมลามีนปรากฏพีก 2 แถบชัดเจนแสดงให้เห็นว่าเป็น เอมีนปฐมภูมิเมื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้นพีกดังกล่าวได้หายไปอันเนื่องมาจาก  $-\text{NH}_2$  ได้สลายไปเกิดการควบแน่นเกิดเป็นกราฟไพลิกคาร์บอนไนไตรด์ [29]

ตารางที่ 4.1 ความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ [29]

หมู่ฟังก์ชัน	ความถี่ ( $\text{cm}^{-1}$ )
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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



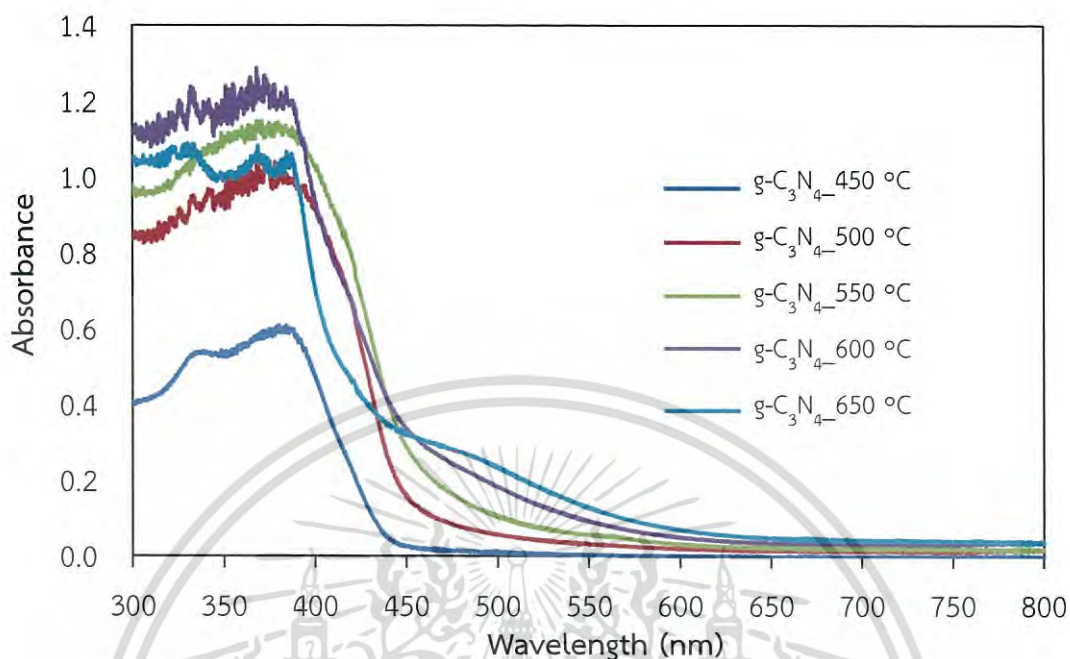
รูปที่ 4.3 แสดง FT-IR spectra ของกราฟิติกคาร์บอนนาโนไทรด์ที่ใช้ปริมาณในการสังเคราะห์ต่างกัน (ก) เมลามีน (ข)  $g-C_3N_4_{450}$  (ค)  $g-C_3N_4_{500}$  (ง)  $g-C_3N_4_{550}$  (จ)  $g-C_3N_4_{600}$  และ (ฉ)  $g-C_3N_4_{650}$  งามาเซลเซียส

#### 4.1.3 การศึกษาการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง (UV-Visible Diffuse Reflectance spectroscopy; DRS)

การศึกษาการดูดกลืนแสงและการวิเคราะห์หาค่าแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ที่เปลี่ยนแปลงของกราฟิติกคาร์บอนนาโนไทรด์ที่ใช้ปริมาณในการสังเคราะห์แตกต่างกันด้วยเทคนิค DRS จากผลการทดลอง ดังรูป 4.4 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณในการสังเคราะห์จาก 450 เป็น 500 550 และ 600 งามาเซลเซียส จะเห็นว่าค่าความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงเพิ่มมากขึ้น โดยขยับไปในช่วงแสงสี-แดง (Red-shift) ส่งผลให้แถบพลังงานมีค่าลดลง [7] ดังแสดงในตารางที่ 4.2 (คำนวณโดยใช้สูตร  $\frac{1240}{\lambda} = eV$ ) โดยค่าความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงที่เพิ่มขึ้นนั้นเป็นผลมาจากสีของสารตัวอย่าง เนื่องจากเมื่อใช้ปริมาณในการสังเคราะห์สูงขึ้นสารตัวอย่างจะเปลี่ยนสีจากเหลืองซีดเป็นเหลืองเข้มไปจนถึงส้มเหลืองทำให้สารตัวอย่างดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่เพิ่มมากขึ้น [6] ทั้งนี้เนื่องจากการใช้ปริมาณในการสังเคราะห์ส่งผลให้แผ่นโครงสร้างของกราฟิติกคาร์บอนนาโนไทรด์เกิดการเชื่อมต่อกันเป็นแผ่นที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจึงเกิดเรโซแนนซ์ได้ง่าย ดังนั้น จึงดูดกลืนแสงในช่วงแสงวิสิเบิลที่มีความยาวคลื่นเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณในการสังเคราะห์เป็น 650 งามาเซลเซียส ค่าความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงมีค่าลดลงเป็น 455 นาโนเมตร โดยปริมาณที่เพิ่มขึ้นนี้ส่งผลทำให้สารเกิดการสลายตัวจึงดูดกลืนแสงในช่วงวิสิเบิลได้น้อยลงและแถบพลังงานมีค่าสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์มีผลต่อสีของสารตัวอย่างที่ได้ โดยทำให้สารตัวอย่างดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นแตกต่างกัน



รูปที่ 4.4 กราฟ UV-Vis diffuse reflectance spectra (DRS) ของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้ อุณหภูมิในการสังเคราะห์ที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าการดูดกลืนแสงและแถบช่องว่างพลังงานของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้ อุณหภูมิในการสังเคราะห์แตกต่างกัน

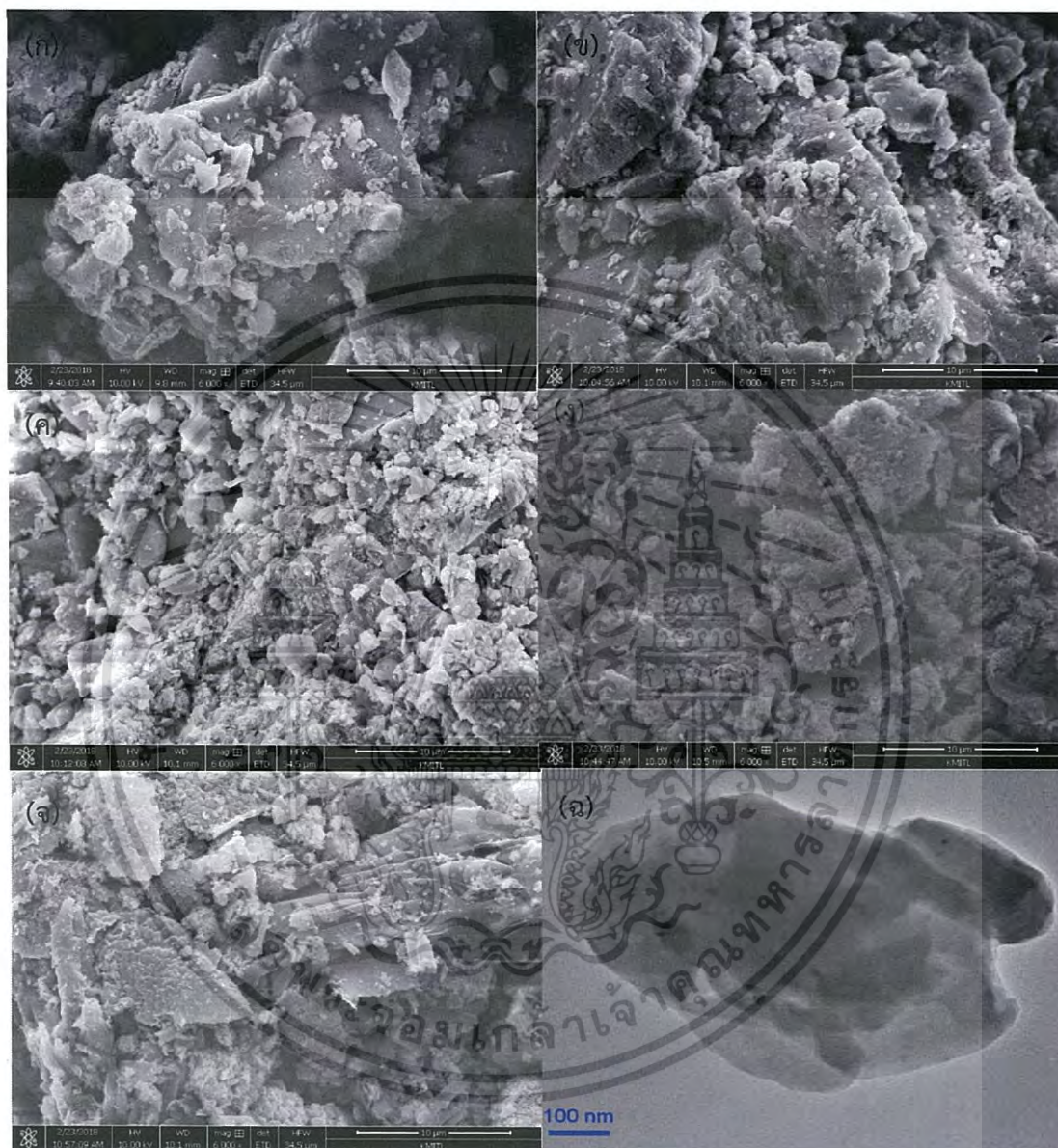
สารตัวอย่าง	ความยาวคลื่นการดูดกลืนแสง (nm)	แถบช่องว่างพลังงาน (eV)
g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> _450 °C	445	2.79
g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> _500 °C	458	2.71
g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> _550 °C	468	2.65
g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> _600 °C	475	2.61
g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> _650 °C	455	2.73

#### 4.1.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

ผลการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่อุณหภูมิ 450 500 550 600 และ 650 องศาเซลเซียส สามารถศึกษาได้โดยใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ซึ่งผลการทดลองแสดงไว้ดังรูปที่ 4.5 พบว่าที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส มีลักษณะเป็นอนุภาคเกาะกลุ่มกันอย่างหนาแน่น เมื่ออุณหภูมิในการเผาสูงขึ้นขนาดของแผ่นจะมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีการซ้อนทับของแผ่น g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> เพิ่มสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ (ข) (ค) (ง) และ (จ) ตามลำดับ

จะเห็นว่าการเปลี่ยนไปทางสัณฐานวิทยาจากอนุภาคที่เกาะกลุ่มกันแน่นไปจนถึงการเกิดเป็นแผ่น ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซ้อนทับกันนั้นเกิดขึ้นพร้อมกับกระบวนการควบแน่นทางความร้อน อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะช่วยทำให้เกิดการควบแน่น นำไปสู่การเติบโตของแผ่นกราฟาไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ [28] ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่ายจาก TEM ดังรูปที่ 4.5 (ฉ) ของกราฟาไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นชั้นได้เด่นชัดมากขึ้น [27]



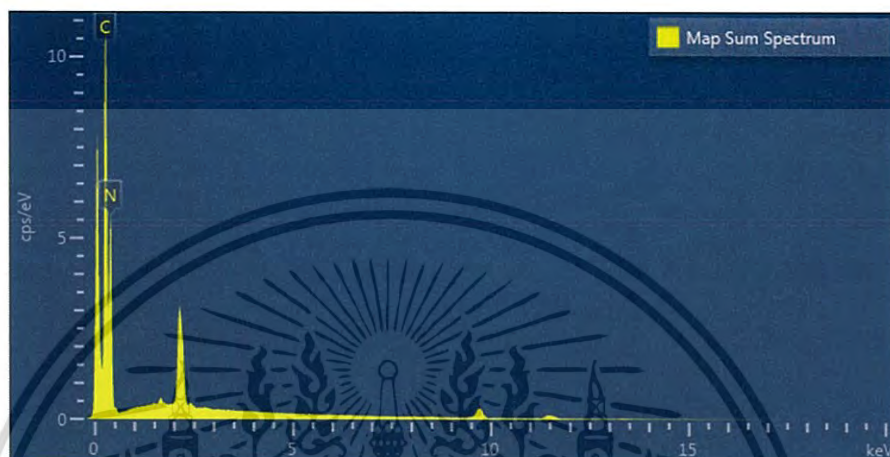
รูปที่ 4.5 ภาพแสดงลักษณะสัณฐานวิทยาจากเทคนิค SEM (ก)  $g-C_3N_4_{450}$  (ข)  $g-C_3N_4_{500}$  (ค)  $g-C_3N_4_{550}$  (ง)  $g-C_3N_4_{600}$  (จ)  $g-C_3N_4_{650}$  องศาเซลเซียส และ (ฉ) TEM ของกราฟาไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส [30]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

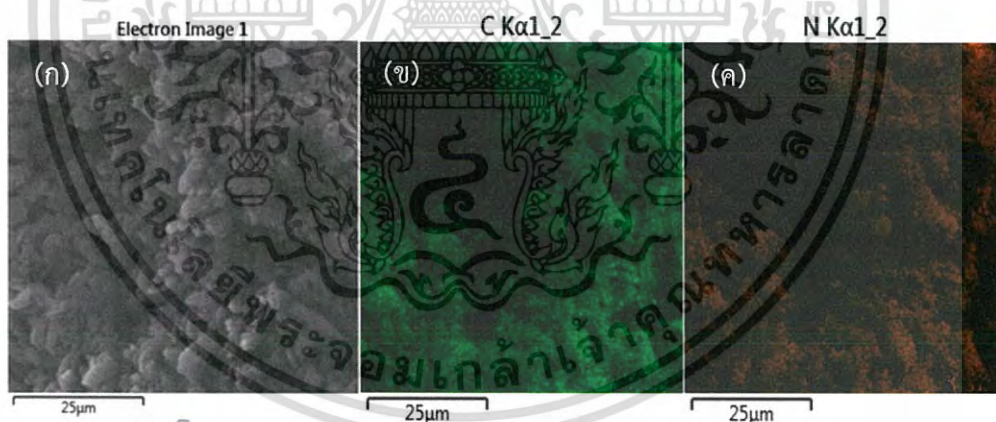
#### 4.1.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบภายในตัวอย่าง (Energy-dispersive X-ray spectroscopy, EDX)

การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวของกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ในปริมาณที่ต่างกัน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ SEM ร่วมกับ EDX ทำให้การวิเคราะห์ลักษณะบนพื้นผิวมีความละเอียดและได้ข้อมูลที่สมบูรณ์มากขึ้น

##### 4.1.5.1 กราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 450 องศาเซลเซียส



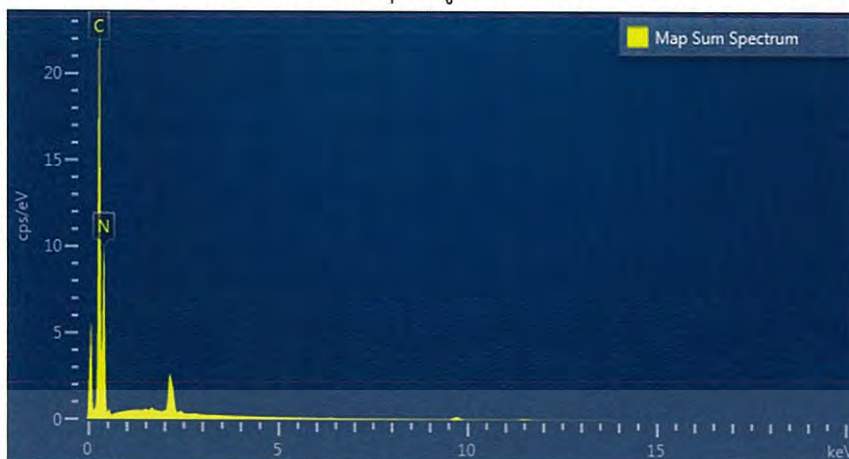
รูปที่ 4.6 ผล EDX สเปกตรัมของกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 450 องศาเซลเซียส



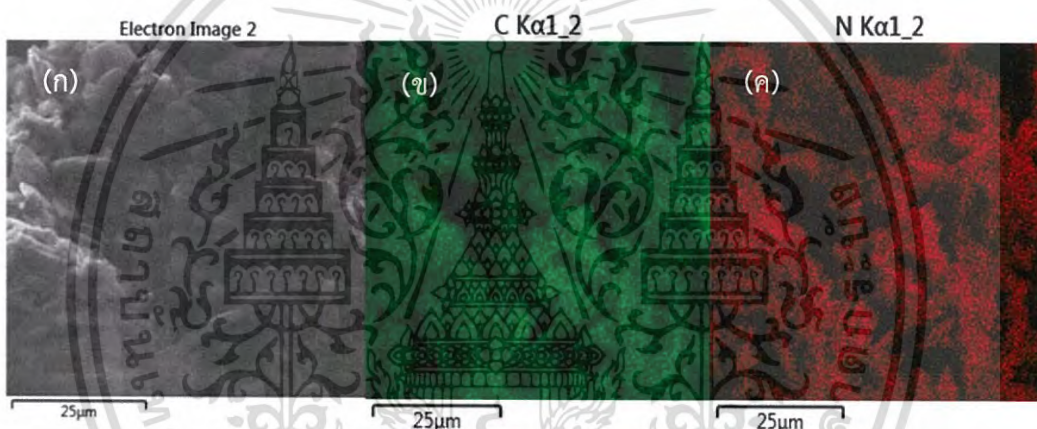
รูปที่ 4.7 (ก) ภาพ SEM ของกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 450 องศาเซลเซียส (ข) การกระจายตัวของธาตุคาร์บอน (ค) การกระจายตัวของธาตุไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.5.2 กราฟไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิจนในการสังเคราะห์ 600 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.8 ผล EDX สเปกตรัมของกราฟไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิจนในการสังเคราะห์ 600 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.9 (ก) ภาพ SEM ของกราฟไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิจนในการสังเคราะห์ 600 องศาเซลเซียส (ข) การกระจายตัวของธาตุคาร์บอน (ค) การกระจายตัวของธาตุไนโตรเจน

จาก EDX สเปกตรัมของกราฟไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิจนในการสังเคราะห์ 450 และ 600 องศาเซลเซียส ในรูปที่ 4.6 และ 4.8 ตามลำดับ จะเห็นว่าสารตัวอย่างที่สังเคราะห์จะประกอบด้วยธาตุคาร์บอน (C) และธาตุไนโตรเจน (N) เป็นหลัก นอกจากนี้การกระจายตัวของธาตุคาร์บอน (C) และไนโตรเจน (N) กระจายตัวได้เป็นอย่างดีซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างทางเคมีของกราฟไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ประกอบด้วยธาตุคาร์บอน (C) และไนโตรเจน (N) แสดงดังรูปที่ 4.7 และ 4.9 ตามลำดับ

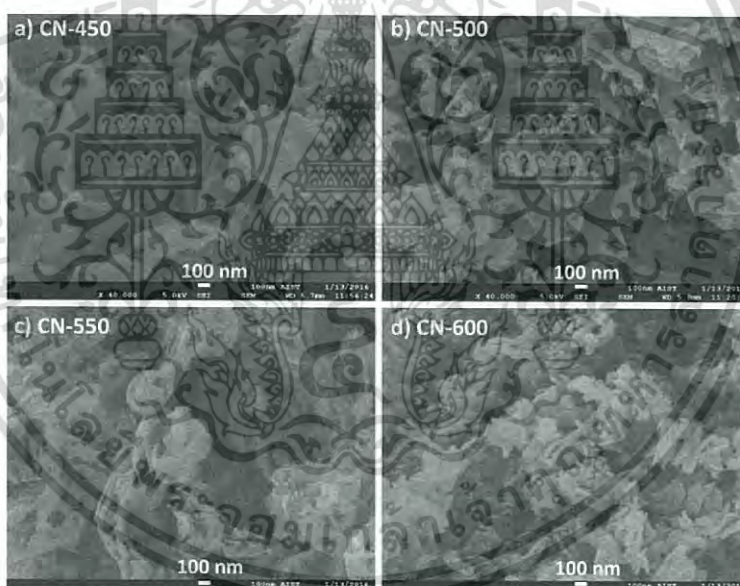
#### 4.1.6 การศึกษาและวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุนด้วยเครื่องวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว (Surface area and porosity analyzer, BET)

ผลจากการศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุน (Pore size) ของกราฟไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิจนในการสังเคราะห์ต่างกันด้วยเทคนิค BET พบว่า พื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนแปรผันตรงกับอุณหภูมิจนในการสังเคราะห์ จากเทคนิค SEM จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนในการสังเคราะห์เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สังเคราะห์ ส่งผลให้สารตัวอย่างเกิดการควบแน่นและเชื่อมต่อกันเป็นแผ่นขนาดใหญ่ ทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะมีค่าเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนที่สูงมีส่วนช่วยให้สามารถดูดซับสีย้อมเมทิลินบลูได้ดียิ่งขึ้น โดยงานวิจัยของ Le Thi Mai Oanh และคณะ [7] ให้ผลการทดลองเป็นไปในทิศทางเดียวกัน แต่เมื่อศึกษาเปรียบเทียบกัน พบว่า สารตัวอย่างที่ Le Thi Mai Oanh และคณะสังเคราะห์ได้นั้นมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าถึง 2 เท่า เนื่องจากใช้ยูเรียเป็นสารตั้งต้นและสังเคราะห์ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน ทำให้ไม่เกิดการเผาไหม้ (Combustion) ทำให้สารตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้มีขนาดเล็ก ดังรูปที่ 4.10

ตารางที่ 4.3 แสดงพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์

สารตัวอย่าง	พื้นที่ผิวจำเพาะ ( $m^2/g$ )	ขนาดรูพรุน (nm)
g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> _450 °C	24.81	7.66
g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> _550 °C	30.77	12.84
g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> _600 °C	35.14	22.69
g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> _650 °C	43.67	36.87

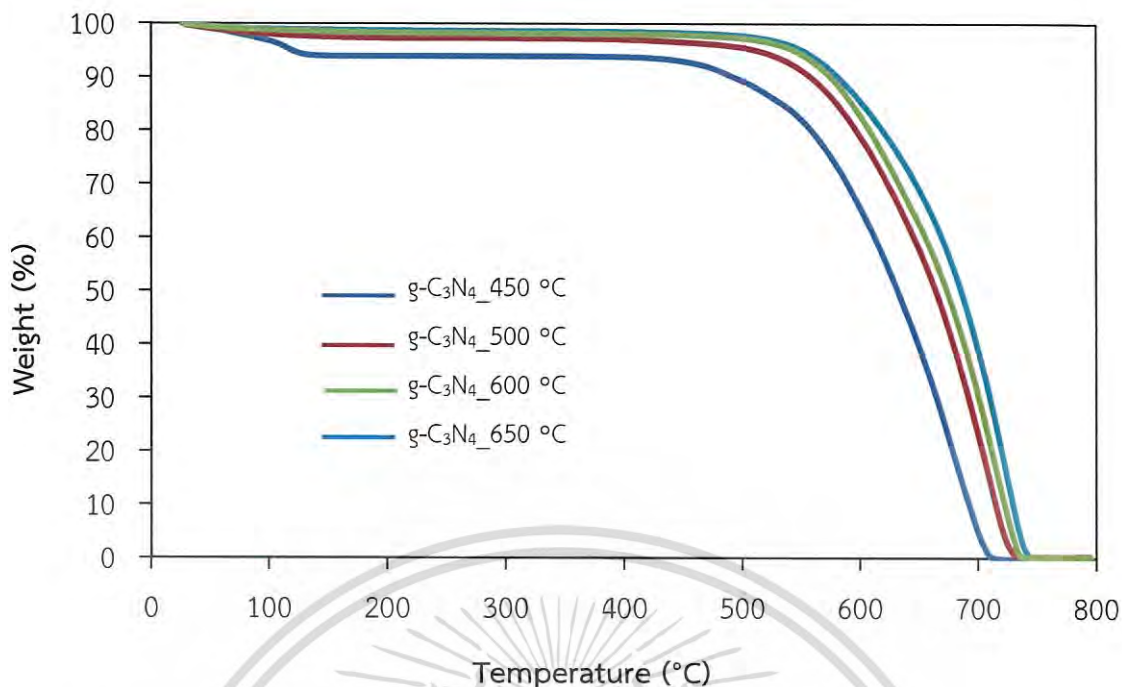


รูปที่ 4.10 แสดง SEM ของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์นาโนชีทที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่างกัน จากงานวิจัยของ Le Thi Mai Oanh และคณะ [7]

#### 4.1.7 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analysis (TGA)

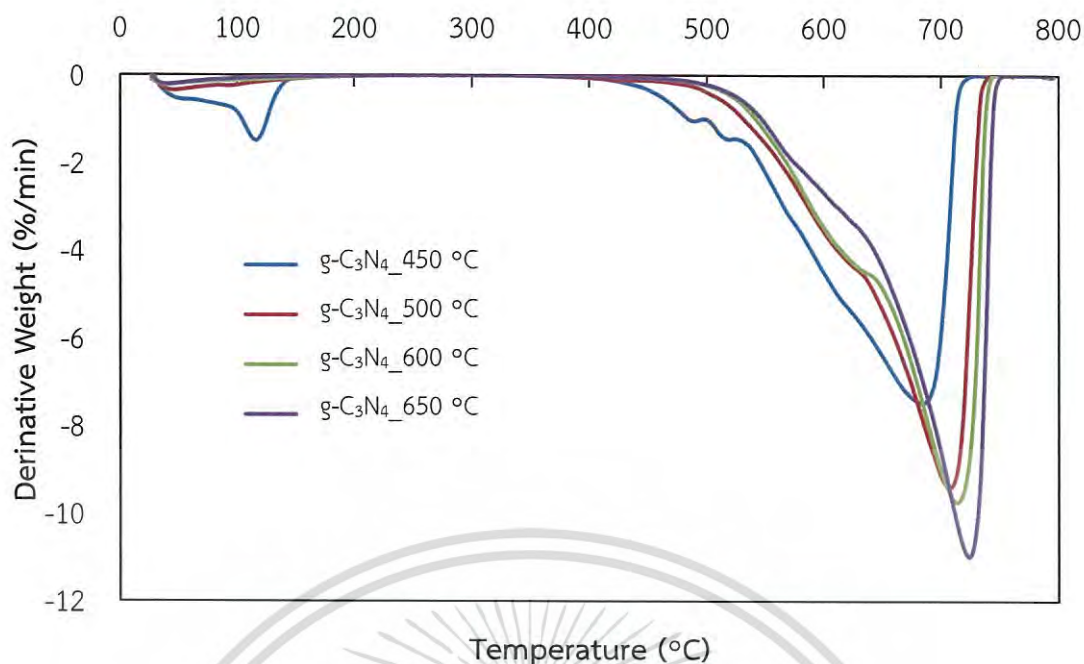
การศึกษาน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ โดยอาศัยสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric Analysis : TGA) ทำให้ทราบถึงเสถียรภาพของวัสดุซึ่งดูได้จากช่วงอุณหภูมิที่สารเริ่มเกิดปฏิกิริยาหรือเกิดการสลายตัว (decomposition) จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.10 จะเห็นว่าอุณหภูมิในการวิเคราะห์อยู่ในช่วง 0-800 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 TGA แสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของ g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่างกัน

จากรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่า g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 650 องศาเซลเซียส มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลจากเทคนิค SEM เนื่องจากเมื่อใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์สูงขึ้นทำให้โครงสร้างของสารตัวอย่างเกิดการควบแน่นและเชื่อมต่อกันเป็นแผ่นขนาดใหญ่จึงทำให้สารตัวอย่างมีเสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้การวิเคราะห์ด้วย Derivative Thermogravimetric analysis (DTG) แสดงในรูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าสารตัวอย่างที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 450 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักอยู่ 2 ช่วง โดยช่วงที่ 1 คือ ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 88.88-120 องศาเซลเซียส ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของโมเลกุลของน้ำ และช่วงที่ 2 คือ ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 575.74-720 องศาเซลเซียส ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของโครงสร้างกราฟาไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ [30] แต่สารตัวอย่างที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 500 600 และ 650 องศาเซลเซียส เกิดการสลายตัวเพียงช่วงเดียวคือการสลายตัวของโครงสร้างกราฟาไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ ซึ่งสอดคล้องกับผลจาก XRD และ FT-IR ที่แสดงให้เห็นว่าสารตัวอย่างที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ยังมีเมลามีนหลงเหลืออยู่ในโครงสร้างซึ่งสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ดีส่งผลให้การวิเคราะห์ทางความร้อนพบการสลายตัวของโมเลกุลน้ำ จึงทำให้อุณหภูมิการสลายตัวมีค่าต่ำ เพราะสารตัวอย่างยังเกิดเป็นกราฟาไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ไม่สมบูรณ์ โดยอุณหภูมิเริ่มต้นไปจนถึงสิ้นสุดการสลายตัว และอุณหภูมิการสลายตัวของสารตัวอย่างแสดงในตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.12 DTG แสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของ  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  ที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่างกัน

ตารางที่ 4.4 แสดงอุณหภูมิเริ่มต้น-สิ้นสุดการสลายตัว และอุณหภูมิการสลายตัวของ  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  ที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์แตกต่างกัน

สารตัวอย่าง	อุณหภูมิเริ่มต้น-สิ้นสุดการสลายตัว (°C)		อุณหภูมิการสลายตัว (°C)	
	ช่วงที่ 1	ช่วงที่ 2	ช่วงที่ 1	ช่วงที่ 2
$g\text{-C}_3\text{N}_4$ 450 °C	88.88-120	575.74-720	115.89	683.97
$g\text{-C}_3\text{N}_4$ 500 °C		620.91-730		707.33
$g\text{-C}_3\text{N}_4$ 600 °C		626.31-740		714.11
$g\text{-C}_3\text{N}_4$ 650 °C		646.17-750		723.90

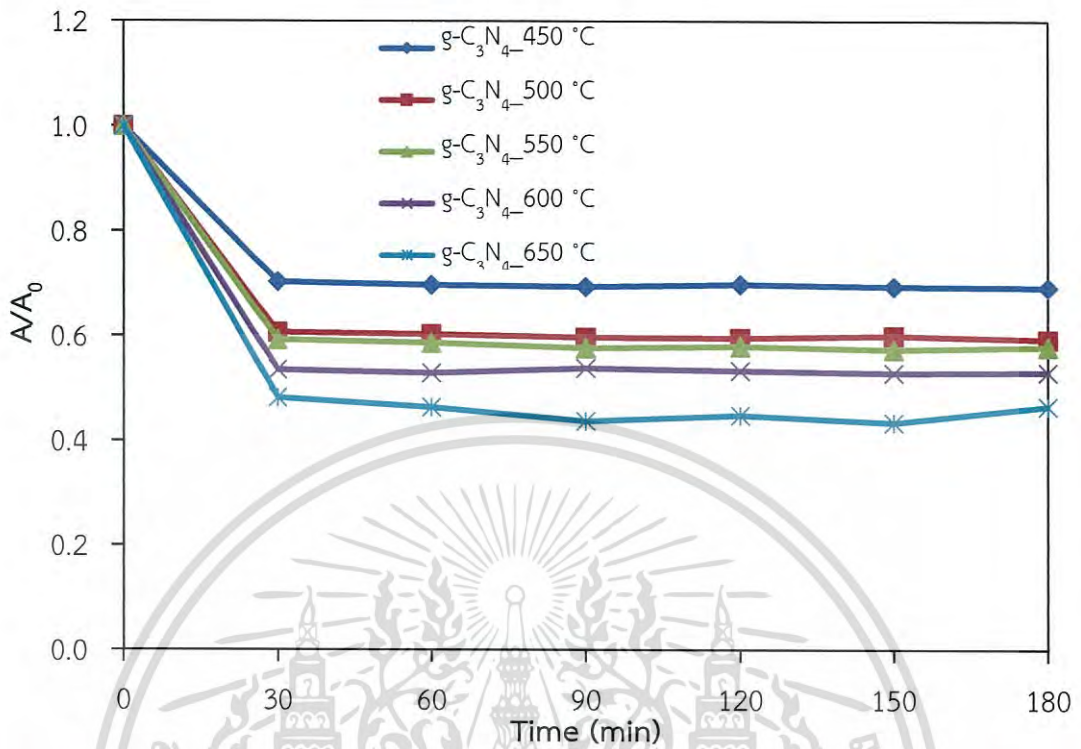
#### 4.1.8 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับในที่มืด

การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับในที่มืดของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 450 500 550 600 และ 650 องศาเซลเซียส เพื่อทดสอบความสามารถในการดูดซับสี้อมเมทิลีนบลูในที่มืด โดยทำการปั่นกวนตัวเร่งปฏิกิริยากับสี้อมเมทิลีนบลูในที่มืดแล้วทำการเก็บตัวอย่างสี้อมทุกๆ 30 นาที เป็นเวลา 180 นาที

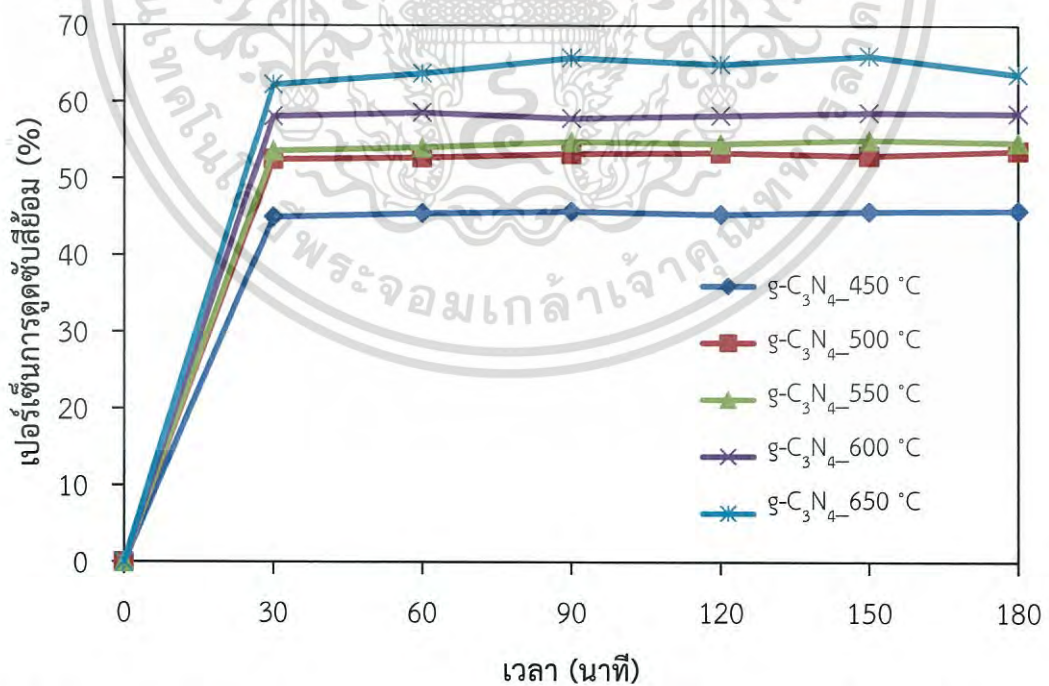
จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.13 แสดงค่าความสามารถการดูดกลืนแสงในที่มืดของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 450 500 550 600 และ 650 องศาเซลเซียส การดูดซับเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แสดงให้เห็นว่าการดูดซับเข้าสู่สมดุลโดยใช้เวลาเพียง 30 นาที ซึ่งพบว่าในช่วง 30 นาทีแรกมีการดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อเวลาผ่านไปจนถึง 150 นาที เนื่องจากการดูดซับเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสารหรือความเข้มข้นของสารที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณพื้นผิวหรือระหว่างผิวหน้า (Interface) การดูดซับที่เพิ่มขึ้นกับพื้นที่ผิว (Surface area) และขนาดของอนุภาค (Particle size)



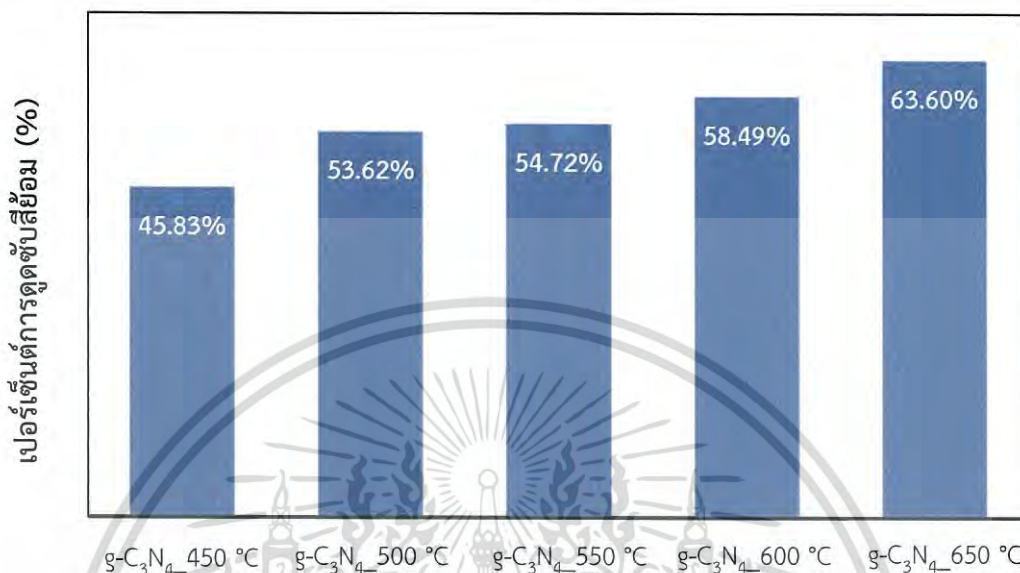
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงเทียบกับเวลาของการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มีดของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่างกัน



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงประสิทธิภาพการดูดซับในที่มีดของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.14 แสดงค่าประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูในที่มีดของกราฟไตติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์มีค่าต่างกัน พบว่ากราฟไตติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 650 องศาเซลเซียสมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับสูงสุด ทั้งนี้เนื่องจากการมีขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงจึงเพิ่มความสามารถในการดูดซับมากขึ้น [7]



สารตัวอย่างสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่างๆ

รูปที่ 4.15 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของกราฟไตติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่างกัน

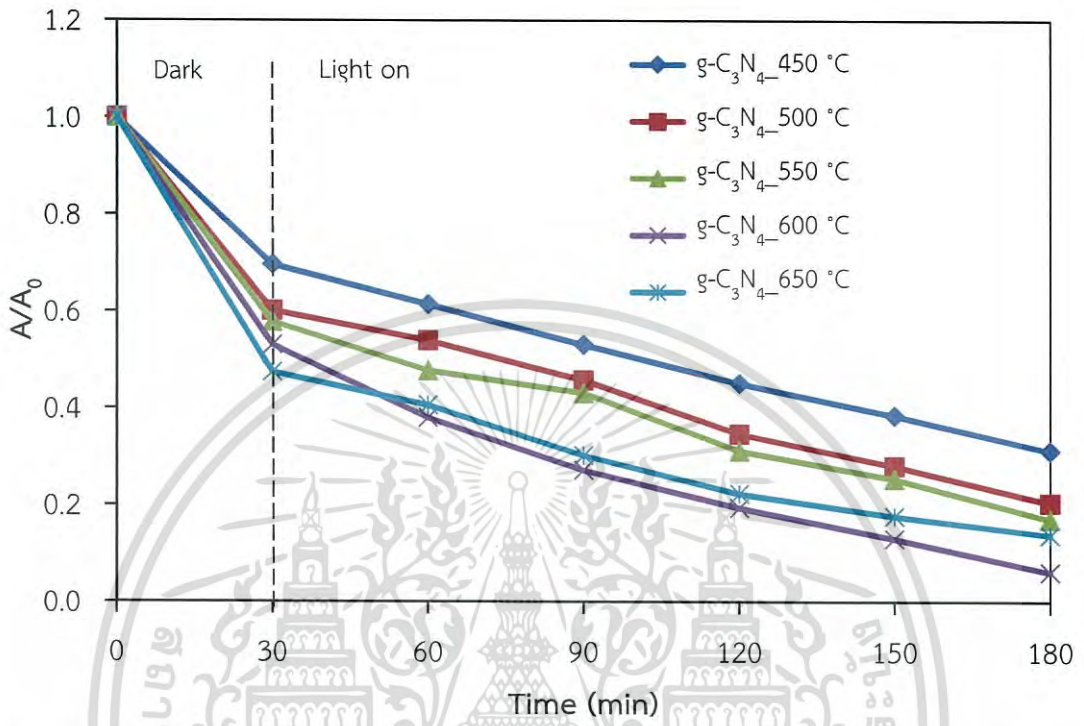
จากรูปที่ 4.15 แสดงค่าประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของกราฟไตติกคาร์บอนไนไตรด์ที่อุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่างกัน ภายใต้แสงวิสิเบิลจะมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมเท่ากับ 45.83 53.62 54.72 58.49 และ 63.60 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากลักษณะทางกายภาพและทางเคมี 2 ปัจจัย ได้แก่ (1) การเกิดการดูดซับ เนื่องจากแรงกระทำของพันธะไพ (π) แรงแยัดเหนียว (π-π stacking) ระหว่างโครงสร้างของสีย้อมเมทิลีนบลูที่มีโครงสร้างเป็นวงอะโรมาติกกับวงอะโรมาติก (CN-hetero cycles) นั่นคือ π อิเล็กตรอนของวงแหวนอะโรมาติกของสีย้อมเมทิลีนบลูยึดเหนี่ยวกับ π อิเล็กตรอนของวงแหวนอะโรมาติกบนพื้นผิวของกราฟไตติกคาร์บอนไนไตรด์ [33] (2) ผลการดูดซับจากการมีพื้นที่ผิวที่สูงขึ้น ทำให้ขนาดรูพรุนที่ใหญ่ขึ้น และความเป็นรูพรุนมีผลจากการดูดซับ ซึ่งจากเทคนิค BET ของพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดของรูพรุนที่เพิ่มขึ้นนั้นจะเกิดอันตรกิริยาบนพื้นที่ผิวได้มากขึ้น การดูดซับจึงสูงขึ้น ส่งผลทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูได้ดี

#### 4.1.9 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล (Visible light)

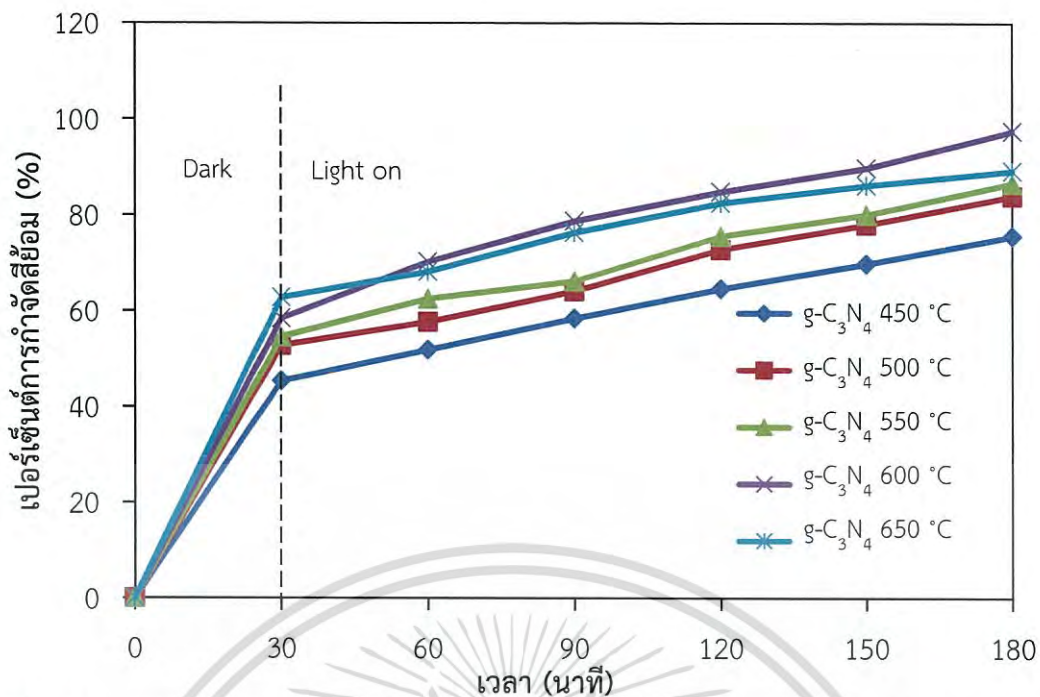
การศึกษาประสิทธิภาพในเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของกราฟไตติกคาร์บอนไนไตรด์ใช้ อุณหภูมิในการสังเคราะห์ที่ 450 500 550 600 และ 650 องศาเซลเซียส ในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงวิสิเบิลสามารถทำได้โดยทำการปั่นกวาดตัวเร่งปฏิกิริยากับสีย้อมเมทิลีนบลู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

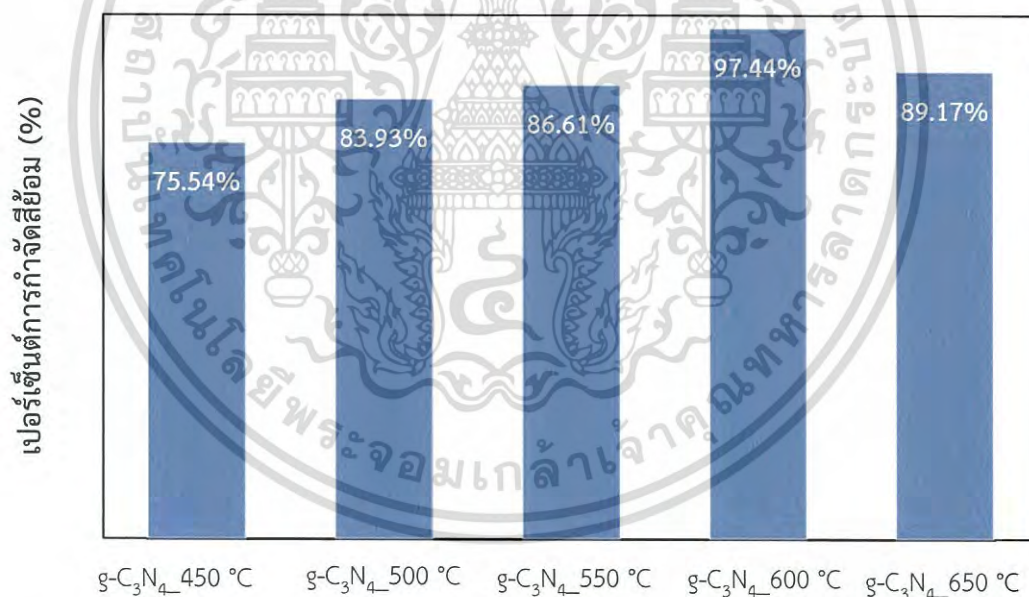
ความเข้มข้น  $1.25 \times 10^{-5}$  M ในที่มืด เป็นเวลา 30 นาที เพื่อทำให้เกิดการสมดุลของการดูดซับ จากนั้นทำการเปิดไฟเพื่อฉายแสงวิสิเบิลเป็นเวลา 150 นาที และทำการเก็บตัวอย่างทุก 30 นาที ซึ่งประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงเทียบกับเวลาของการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้กราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่างกัน ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของกราฟไตคคาร์บอนไนโตรดที่ใช้ อุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่างกัน ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล

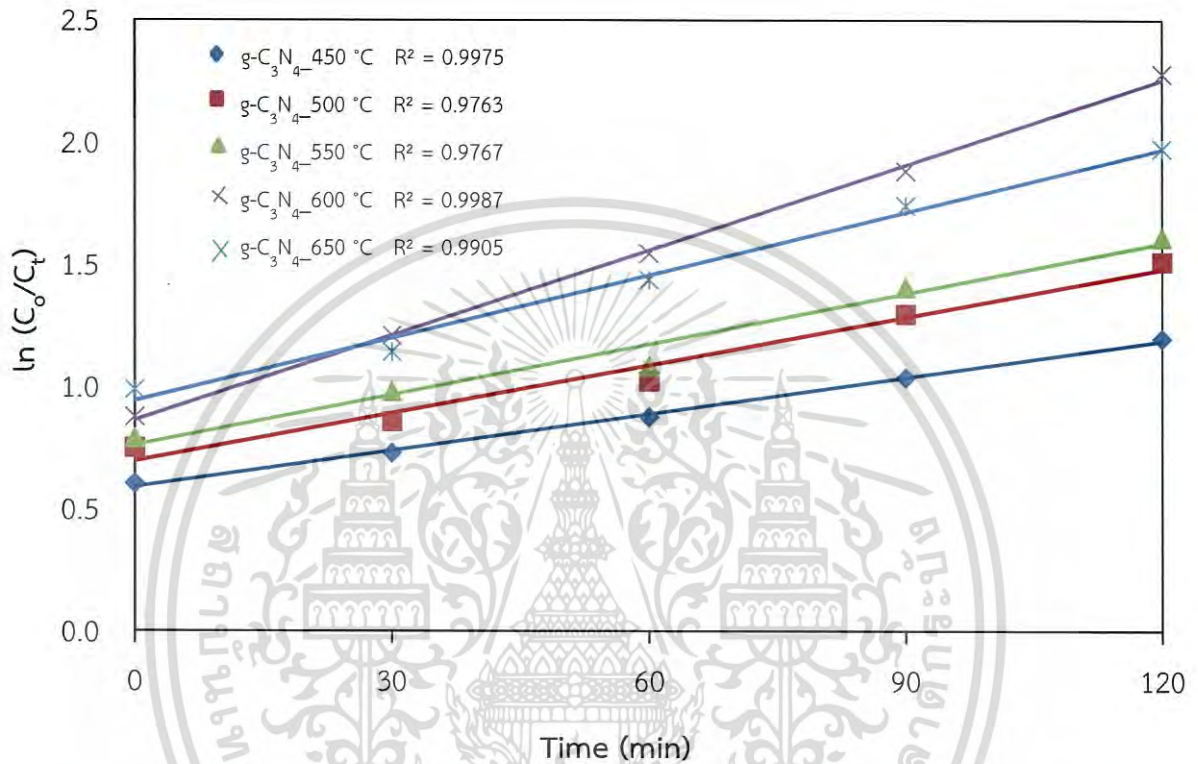


รูปที่ 4.18 กราฟแสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของกราฟไตคคาร์บอนไนโตรดที่ใช้ อุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่างกัน ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิลเป็นเวลา 150 นาที

จากรูปที่ 4.18 แสดงค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของกราฟไตคคาร์บอนไนโตรดที่อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 450 500 550 600 และ 650 องศาเซลเซียส ภายใต้แสงวิสิเบิลจะมีค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมเท่ากับ 75.54 83.93 86.61 97.44 และ 89.17 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จะเห็นว่าประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จากผลของ BET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนที่เพิ่มขึ้น ทำให้การทำงานของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกเกิดได้ดี กราฟติดคาร์บอนไนไตรด์ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ที่ 600 องศาเซลเซียสมีประสิทธิภาพในการกำจัดสียอมที่ดีที่สุด แต่เมื่ออุณหภูมิในการสังเคราะห์ที่ 650 องศาเซลเซียส ค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสียอมลดลง เพราะรูพรุนขนาดใหญ่ รวมถึงการมีพื้นที่ผิวที่สูง ทำให้มีการดูดซับมากเกินไป ส่งผลทำให้การทำงานของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกเกิดได้ไม่ดี จึงส่งผลให้มีประสิทธิภาพลดลง [31]



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงอัตราเร็วของการกำจัดสียอมเมทิลีนบลูของกราฟติดคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้ อุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่างกัน ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล

นอกจากการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสียอมเมทิลีนบลูแล้ว ยังมีการศึกษาความไว้วาง ต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี โดยใช้แบบจำลองของแลงเมียร์ เป็นอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับที่หนึ่ง (pseudo-first order) ที่มีสมการดังแสดง

$$\ln\left(\frac{C_0}{C_t}\right) = k_{app}t$$

เมื่อนำมาพล็อตกราฟเพื่อหาค่าความชันหรือค่าคงที่อัตรา ( $k_{app}$ ) ในการสลายสียอม เมทิลีนบลู แสดงผลของกราฟแกน x คือ เวลา (นาที) และ แกน y คือ  $\ln(C_0/C_t)$  โดยจะได้สมการ เส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ความชันของเส้นกราฟจะได้ค่าคงที่อัตรา ( $k_{app}$ ) ซึ่งค่าคงที่อัตราจะแปรผัน ตรงกับอัตราการเกิดปฏิกิริยา (Rate reaction) ในที่นี้คืออัตราการสลายตัวของสียอมเมทิลีนบลู

ดังนั้น ถ้าค่าคงที่อัตราสูง สามารถบ่งบอกได้ว่าเมทิลีนบลูมีการสลายตัวภายใต้ กระบวนการโฟโตคะตะไลติกเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว

จากรูปที่ 4.19 แสดงอัตราเร็วของการกำจัดสียอมเมทิลีนบลูของกราฟติดคาร์บอนไนไตรด์ ที่ใช้ อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 450 500 550 600 และ 650 องศาเซลเซียส ภายใต้การฉายแสง

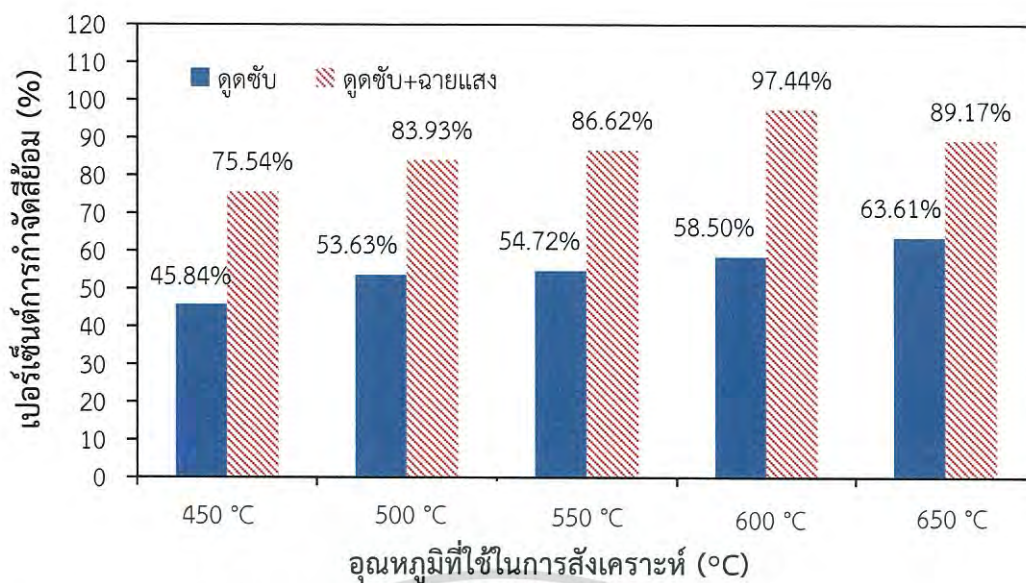
เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีเปิดในช่วงเวลา 60 ถึง 180 นาที โดยเมทิลีนบลูมีความเข้มข้นเท่ากับ  $1.25 \times 10^{-5}$  โมลาร์ พบว่า กราฟฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิจนในการสังเคราะห์ 450 500 550 600 และ 650 องศาเซลเซียส มีค่าคงที่ในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูเท่ากับ 0.0050 0.0066 0.0069 0.0116 และ 0.0086 ต่ออนาที ตามลำดับ ซึ่งทำให้ทราบว่ากราฟฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิจนในการสังเคราะห์ 600 องศาเซลเซียสนั้นมีค่าคงที่ในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูสูงที่สุด เนื่องมาจากการเกิดการดูดซับและการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกร่วมกันเหมาะสมที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับเทคนิค BET ที่มีความเป็นรูพรุนและพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น ซึ่งทำให้พบว่ากราฟฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิจนในการสังเคราะห์ที่ 450 องศาเซลเซียสมีค่าคงที่อัตรา ( $k_{app}$ ) การสลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่น้อยที่สุด แสดงว่าจะมีอัตราการสลายตัวที่น้อยที่สุดเช่นกัน นอกจากนี้ยังพบว่า กราฟฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิจนในการสังเคราะห์ที่ 600 องศาเซลเซียส มีค่าประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูสูงที่สุด เนื่องจากเกิดการดูดซับและการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกร่วมกันที่เหมาะสม

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าคงที่ในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูของกราฟฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิจนในการสังเคราะห์ต่างกัน

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าคงที่ในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู ( $k_{app}$ ) ; $\text{min}^{-1}$
450	0.0050
500	0.0066
550	0.0069
600	0.0116
650	0.0086

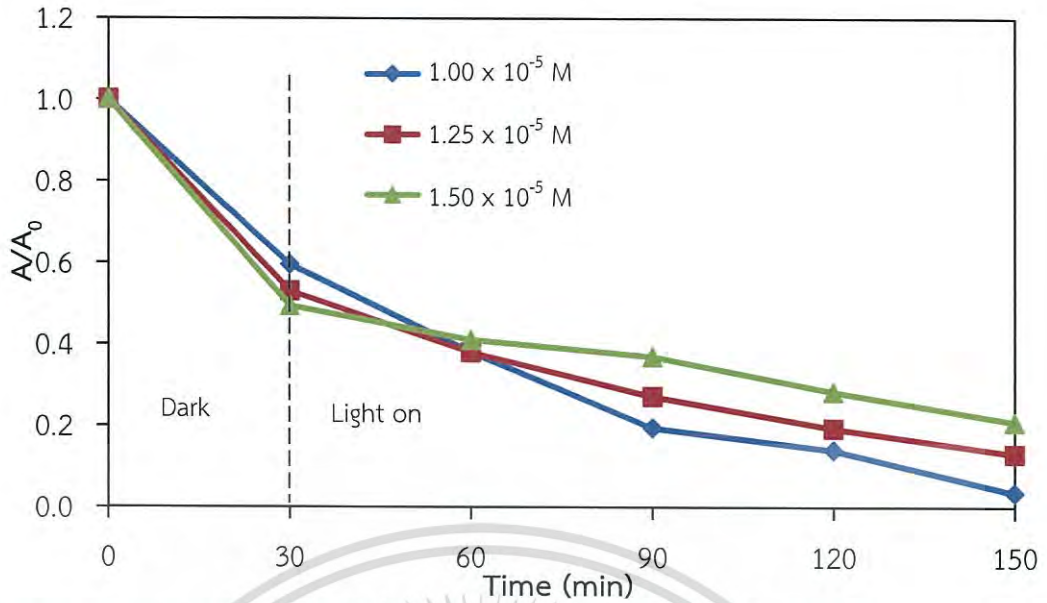
จากการศึกษาพบว่า ค่าคงที่ในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู ( $k_{app}$ ) เพิ่มขึ้น เมื่อใช้อุณหภูมิจนในการสังเคราะห์เพิ่มขึ้น



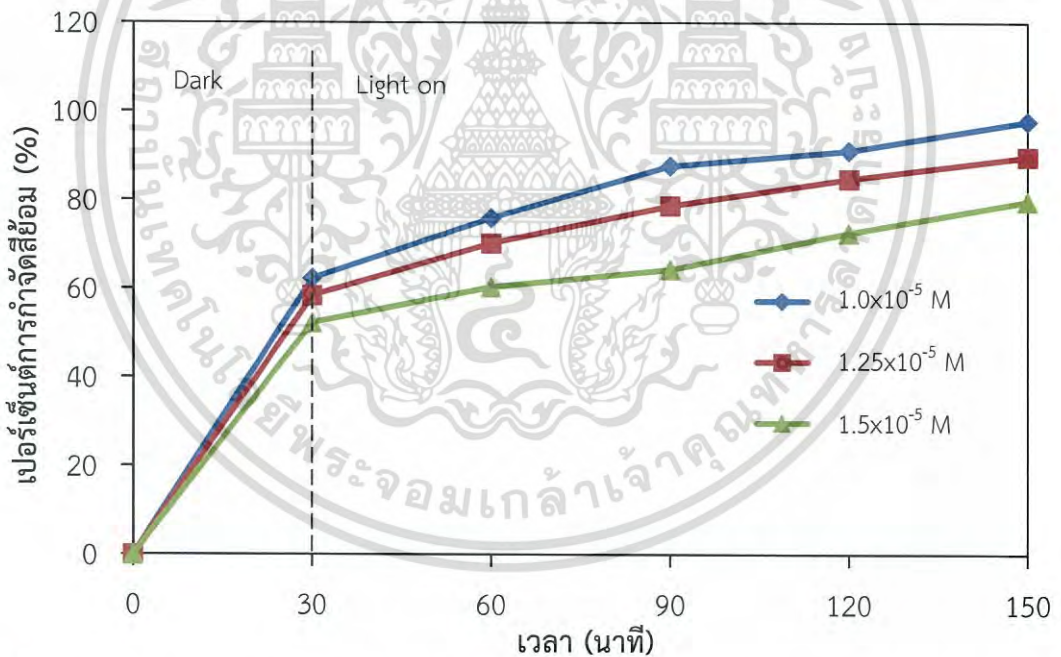
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของกราฟิตคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้ อุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่างกัน ภายใต้การดูดซับในที่มีด 30 นาทีและการฉายแสงวิธี-เบิลเป็นเวลา 150 นาที

#### 4.1.10 ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู

การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูของกราฟิตคาร์บอน-ไนไตรด์ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ที่ 600 องศาเซลเซียสในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู ภายใต้การฉายแสงวิธีเบิลสามารถทำการปั่นกววนตัวเร่งปฏิกิริยากับสีย้อมเมทิลีนบลู โดยเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น  $1.0 \times 10^{-5}$   $1.25 \times 10^{-5}$  และ  $1.5 \times 10^{-5}$  โมลาร์ ตามลำดับ ในตุ้มวัดเป็นเวลา 30 นาที เพื่อทำให้เกิดการสมดุลของการดูดซับ จากนั้นทำการเปิดไฟเพื่อฉายแสงยูวีเป็นเวลา 150 นาที และทำการเก็บตัวอย่างทุก ๆ 30 นาที



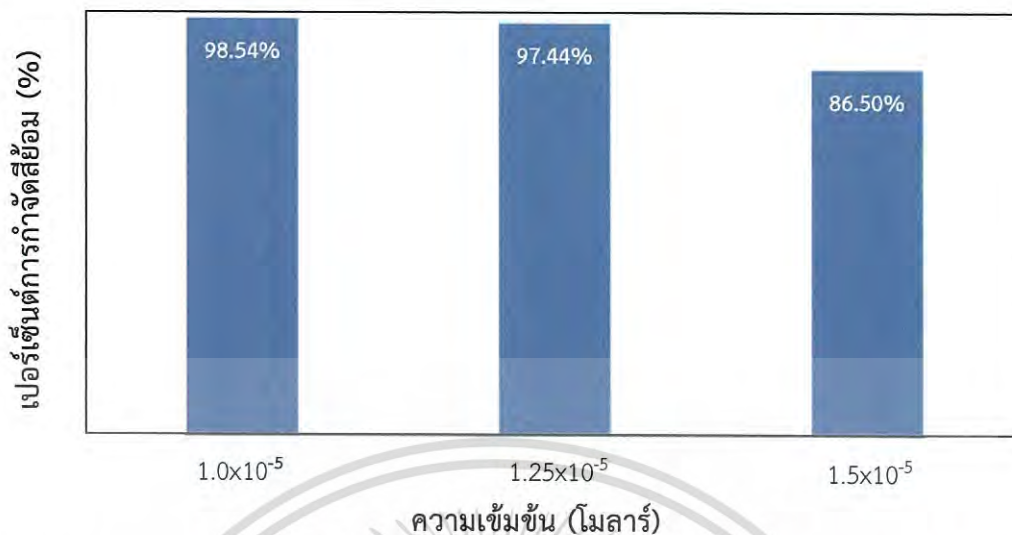
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงเทียบกับเวลาของการสลายสีของเมทิลีนบลูโดยใช้กราฟฟิตติกคาร์บอนไนโตรดที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 600 องศาเซลเซียส ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นเมทิลีนบลูต่างกัน



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีของเมทิลีนบลูของกราฟฟิตติกคาร์บอนไนโตรดที่ใช้ อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 600 องศาเซลเซียส โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของเมทิลีนบลูที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.21 และ 4.22 แสดงให้เห็นว่ากราฟฟิตติกคาร์บอนไนโตรดที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 600 องศาเซลเซียส เมื่อใช้งานภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล พบว่ากราฟฟิตติกคาร์บอน-

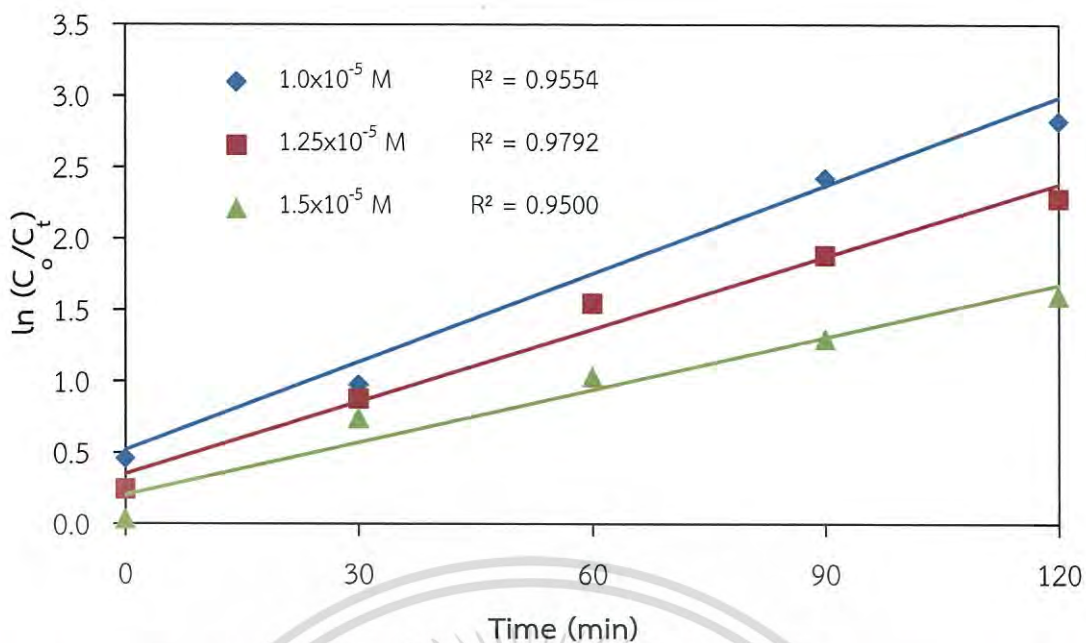
ไนไตรด์ที่ความเข้มข้น  $1.0 \times 10^{-5}$  โมลาร์ จะแสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมเมทิลินบลูที่สูง



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลู ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล เป็นเวลา 150 นาที

จากรูปที่ 4.23 แสดงค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลูของกราฟไดคคาร์บอนไนไตรด์ที่ความเข้มข้น  $1.0 \times 10^{-5}$   $1.25 \times 10^{-5}$  และ  $1.5 \times 10^{-5}$  โมลาร์ ตามลำดับ โดยใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 600 องศาเซลเซียส ภายใต้แสงวิสิเบิลจะมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมเท่ากับ 98.54 97.44 และ 86.50 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากการศึกษาความเข้มข้นสีย้อมตั้งต้น พบว่าถ้าสีย้อมตั้งต้นมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลูลดลงเป็นผลมาจากความเข้มข้นที่มากมีปริมาณโมเลกุลสีย้อมที่มาก ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยารว่องไว เนื่องจากสีย้อมเมทิลินบลูเกิดการดูดกลืนแสงหรือบดบังแสงที่ตกกระทบบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ดูดซับบนพื้นผิวได้มาก ดังนั้นการดูดซับบนพื้นผิวมากจะไปขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก ซึ่งแสงจะตกกระทบบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาได้ยาก ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดได้ช้าในกรณีที่ความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลินบลูสูงขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลินบลูที่ลดลงนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดได้รวดเร็วและการสลายตัวของสีย้อมเมทิลินบลูที่ดีกว่า ซึ่งสอดคล้องตามอัตราการเกิดปฏิกิริยาของจลนพลศาสตร์ จึงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงอัตราเร็วของการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นแตกต่างกันภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล เป็นเวลา 120 นาที

จากรูปที่ 4.24 แสดงอัตราเร็วของการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของกราฟไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ต่างกัน ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิลในช่วงเวลา 60 ถึง 150 นาที โดยสีย้อมเมทิลีนบลูมีความเข้มข้นเท่ากับ  $1.0 \times 10^{-5}$   $1.25 \times 10^{-5}$  และ  $1.5 \times 10^{-5}$  โมลาร์ ตามลำดับ แสดงผลของกราฟแกน x คือ เวลา (นาที) และ แกน y คือ  $\ln(C_0/C_t)$  เมื่อนำมาพล็อตกราฟเพื่อหาค่าความชันหรือค่าคงที่ในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู ( $k_{app}$ ) ตามอันดับปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง พบว่ากราฟไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างกันมีค่าคงที่ในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูเท่ากับ 0.0206 0.0169 และ 0.0123 ต่อนาที ตามลำดับ

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าคงที่ในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูของกราฟไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างกัน

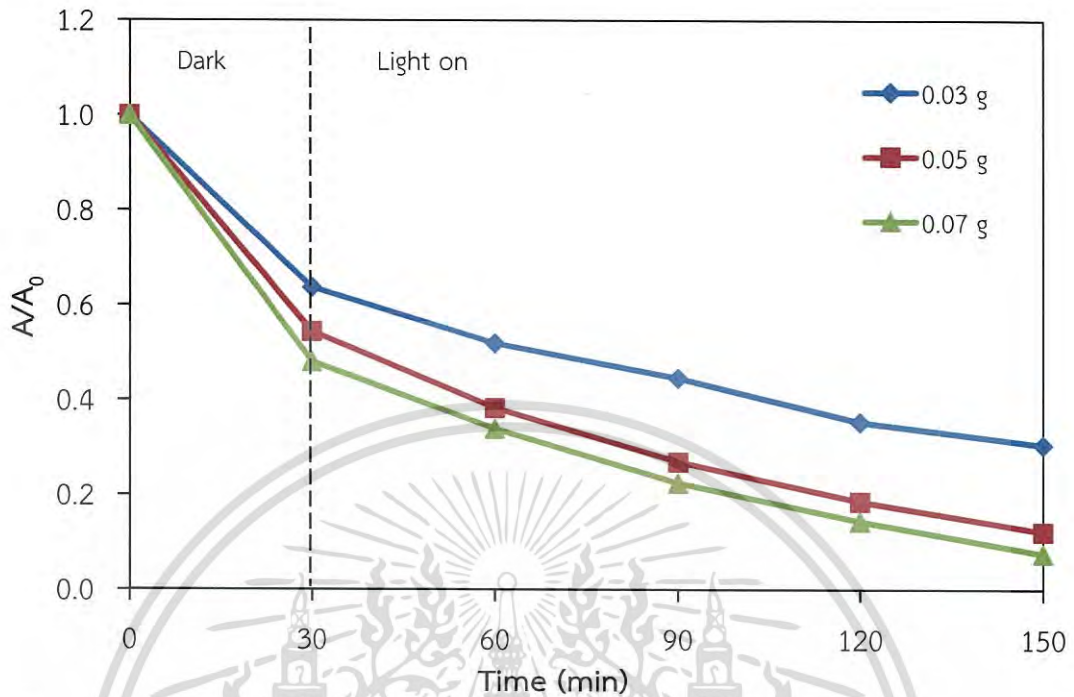
ความเข้มข้น (โมลาร์)	ค่าคงที่ในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู ( $k_{app}$ ); $\text{min}^{-1}$
$1.00 \times 10^{-5}$	0.0206
$1.25 \times 10^{-5}$	0.0169
$1.50 \times 10^{-5}$	0.0123

#### 4.1.11 ศึกษาปริมาณกราฟไฟติกคาร์บอนไนไตรด์

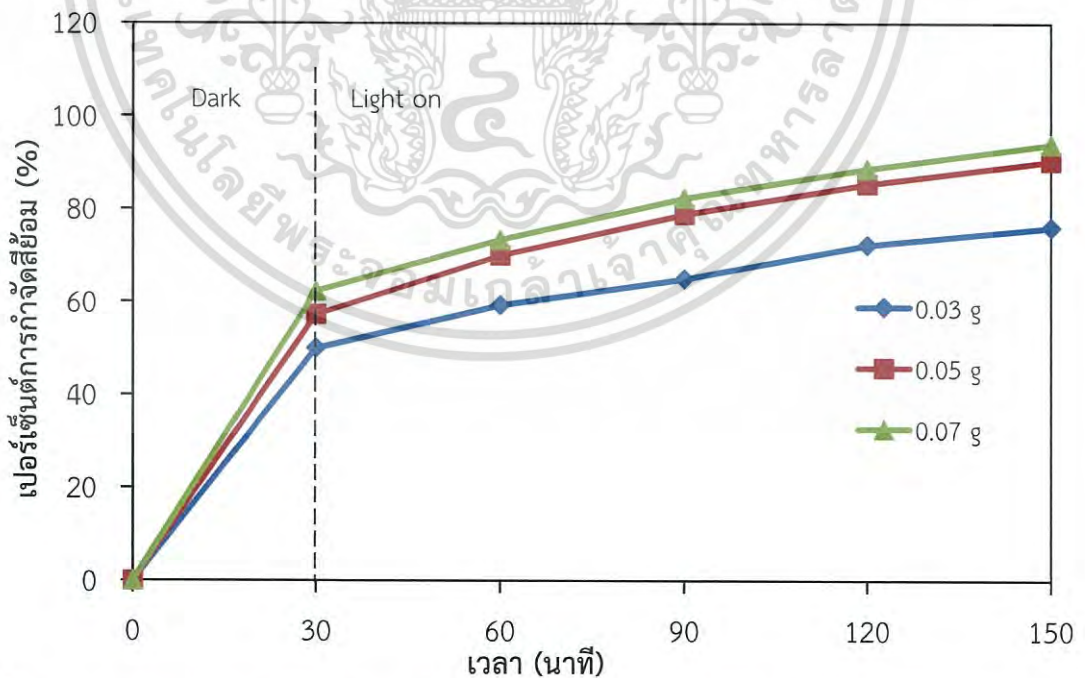
การศึกษาปริมาณกราฟไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 600 องศาเซลเซียส ในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิลสามารถทำการป่นกวนตัวเร่งปฏิกิริยากับสีย้อมเมทิลีนบลู โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณกราฟไฟติกคาร์บอนไนไตรด์เป็น 0.03 0.05 และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.07 กรัม ตามลำดับ ในที่มีมืดเป็นเวลา 30 นาที เพื่อทำให้เกิดการสมดุลของการดูดซับ จากนั้นทำการเปิดไฟเพื่อฉายแสงยูวีเป็นเวลา 150 นาที และทำการเก็บตัวอย่างทุก ๆ 30 นาที



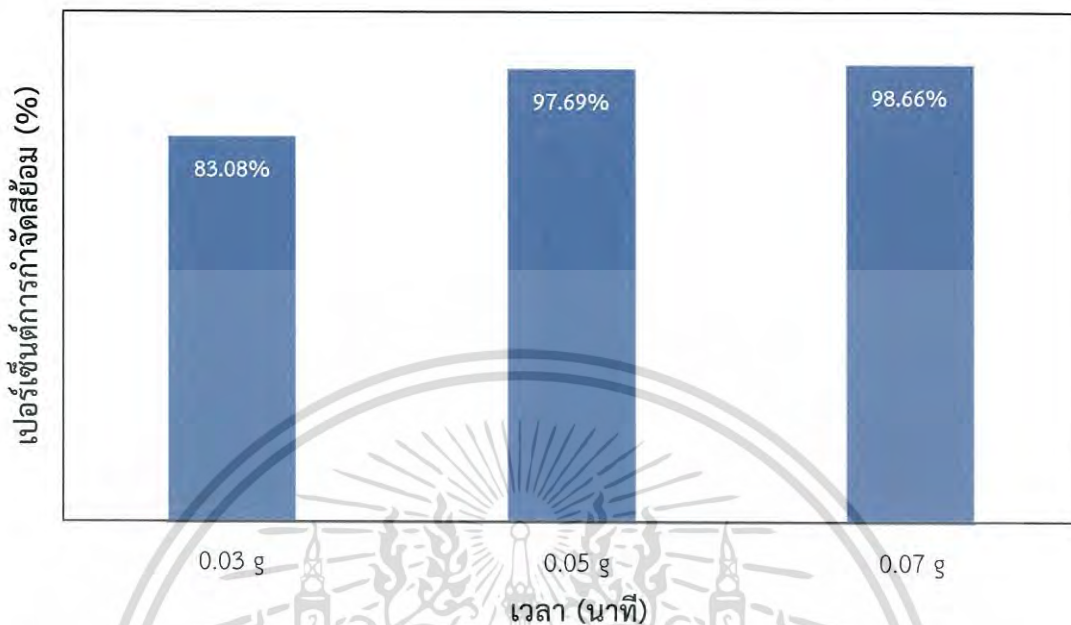
รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงเทียบกับเวลาของการสลายสีของเมทิลีนบลู โดยใช้กราฟาไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้คุณสมบัติในการสังเคราะห์ 600 องศาเซลเซียส ภายใต้การฉายแสงยูวี โดยที่ใช้ปริมาณกราฟาไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ต่างกัน



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีของเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงยูวีของกราฟาไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่มีปริมาณต่างกัน

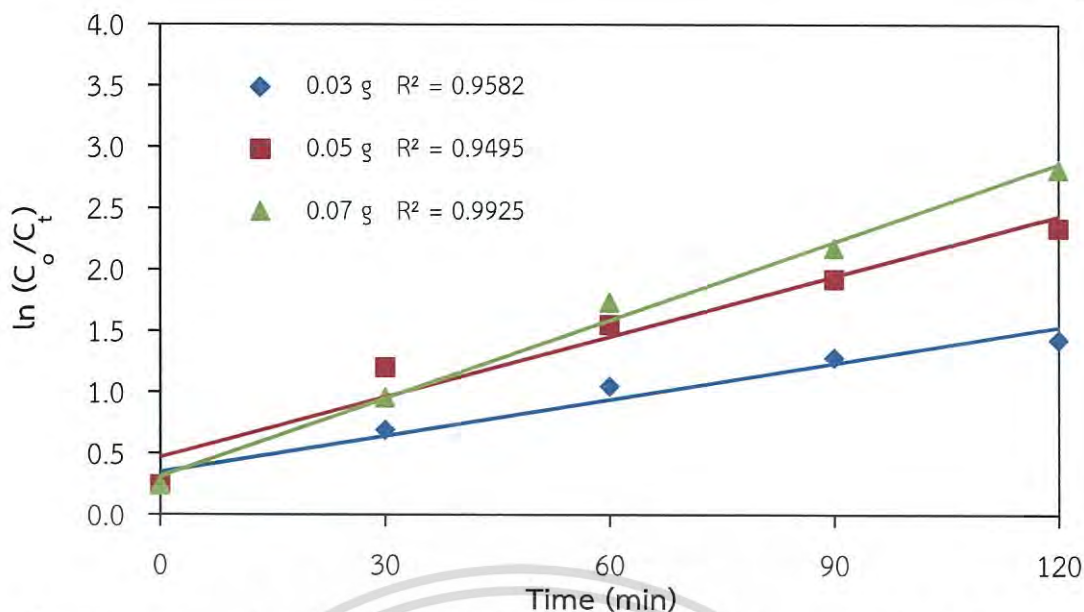
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.25 และ 4.26 แสดงให้เห็นว่ากราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 600 องศาเซลเซียส เมื่อใช้งานภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต พบว่ากราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ปริมาณ 0.07 กรัม จะแสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสียอมเมทิลีนบลูที่สูงที่สุด



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสียอมเมทิลีนบลู ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต เป็นเวลา 150 นาที

จากรูปที่ 4.27 แสดงค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสียอมเมทิลีนบลูของกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ปริมาณ 0.03 0.05 และ 0.07 กรัม ตามลำดับ โดยใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 600 องศาเซลเซียส ภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ตจะมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับสียอมเมทิลีนบลูเท่ากับ 83.08 97.69 และ 98.66 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสียอมเมทิลีนบลูนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกาะกันมากของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้พื้นที่ผิวทำปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกลดลง แต่เมื่อใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.07 กรัม พบว่าไม่ส่งผลกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากเกาะกันมาก แนวโน้มมีการเพิ่มขึ้น ซึ่งปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาว่างไว สอดคล้องกับงานวิจัยของนางสาวสุนีย์ บรรพจน์พิทักษ์ ที่ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น จะทำให้พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น การดูดซับโมเลกุลสารอินทรีย์มากตามด้วย จึงทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นแต่ถ้ามีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากเกินไป มีผลทำให้การกระจายของแสงที่จะไปกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาในสารละลายลดลง เพราะอนุภาคที่มากเกินไปจะไปบดบังแสงซึ่งกันและกัน [34]



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงอัตราเร็วของการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล เป็นเวลา 120 นาที

จากรูปที่ 4.28 แสดงอัตราเร็วของการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของกราฟไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ต่างกัน ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิลเป็นเวลา 120 นาที โดยกราฟไฟติกคาร์บอนไนไตรด์มีปริมาณเท่ากับ 0.03 0.05 และ 0.07 กรัม ตามลำดับ แสดงผลของกราฟแกน x คือ เวลา (นาที) และ แกน y คือ  $\ln(C_0/C_t)$  พบว่ากราฟไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้ปริมาณเริ่มต้น 0.07 กรัม มีค่าคงที่ในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูสูงที่สุด แต่กราฟไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ปริมาณเริ่มต้น 0.03 กรัม มีอัตราการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่น้อยที่สุด เนื่องจากในการเพิ่มปริมาณเริ่มต้นจะทำให้มีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย [7]

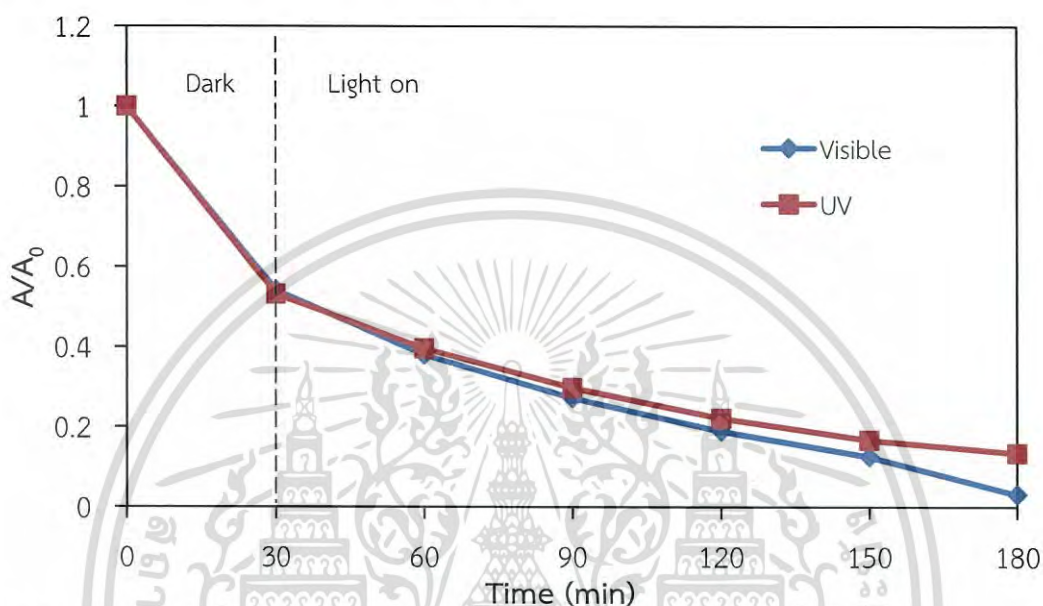
เมื่อนำมาพล็อตกราฟเพื่อหาค่าความชันหรือค่าคงที่อัตรา ( $k_{app}$ ) ในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูตามอันดับปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง พบว่ากราฟไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้ปริมาณเริ่มต้นต่างกันมีค่าคงที่อัตรา ( $k_{app}$ ) ในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูเท่ากับ 0.0099 0.0164 และ 0.0213 ต่อนาที ตามลำดับ

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าคงที่ในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูของกราฟไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้ปริมาณเริ่มต้นต่างกัน

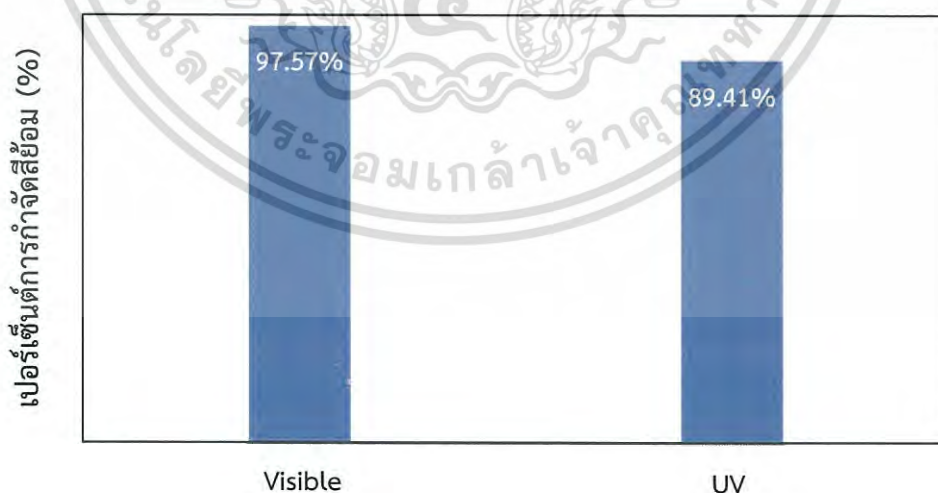
ปริมาณกราฟไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ (กรัม)	ค่าคงที่ในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู ( $k_{app}$ ) ; $\text{min}^{-1}$
0.03	0.0099
0.05	0.0164
0.07	0.0213

#### 4.1.12 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมระหว่างการฉายแสงวิสิเบิลและยูวี

การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของกราฟาไฟติกคาร์บอนไนโตรดที่ใช้ อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 600 องศาเซลเซียส ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิลและแสงยูวีสามารถทำได้ โดยทำการปั่นกวตั่วเร่งปฏิกิริยากับสีย้อมเมทิลีนบลูความเข้มข้น  $1.25 \times 10^{-5}$  โมลาร์ ในตุ้มมีดเป็นเวลา 30 นาที เพื่อทำให้เกิดการสมดุขของการดูดซับ จากนั้นทำการเปิดไฟเพื่อฉายแสงวิสิเบิลและยูวี เป็นเวลา 150 นาที ทำการเก็บตัวอย่างทุก ๆ 30 นาที



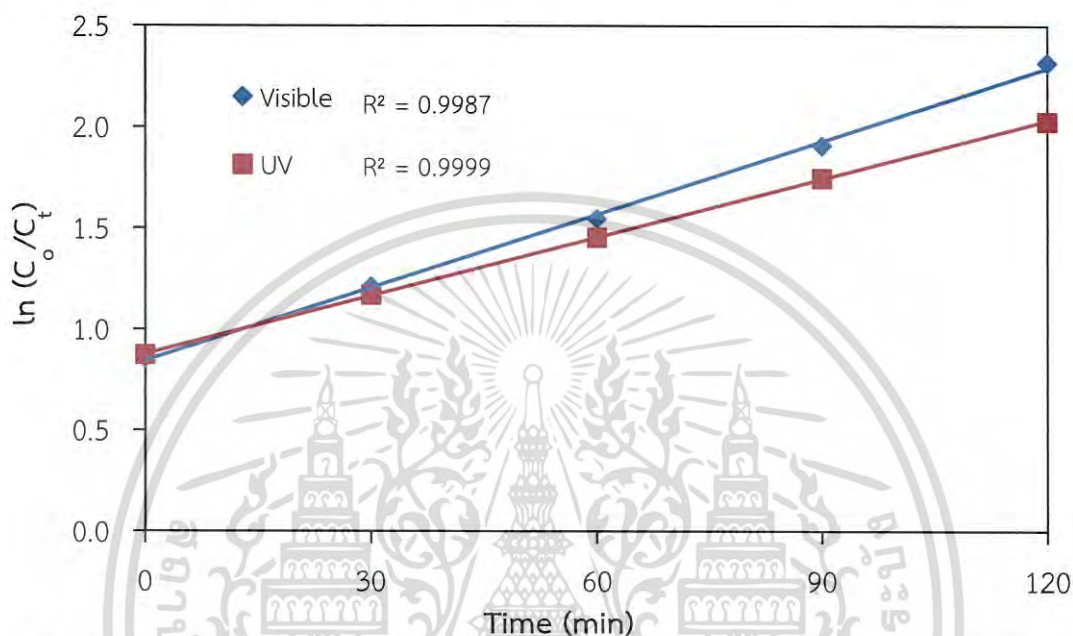
รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงเทียบกับเวลาของการสลายสีย้อม เมทิลีนบลูโดยใช้กราฟาไฟติกคาร์บอนไนโตรดที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 600 องศาเซลเซียส ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิลและแสงยูวีเป็นเวลา 150 นาที



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของกราฟาไฟติกคาร์บอนไนโตรดที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 600 องศาเซลเซียส ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิลและแสงยูวีเป็นเวลา 150 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.30 แสดงให้เห็นว่ากราฟฟิตติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิจนในการสังเคราะห์ 600 องศาเซลเซียส เมื่อใช้งานภายใต้การฉายแสงวิสิเบิลและยูวี พบว่ากราฟฟิตติกคาร์บอนไนไตรด์สามารถใช้งานได้ทั้งช่วงแสงวิสิเบิลและยูวี โดยประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูเท่ากับ 97.57 และ 89.41 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่ากราฟฟิตติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้งานภายใต้แสงวิสิเบิลมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูได้ดีกว่าการใช้งานภายใต้แสงยูวี เนื่องจากแสงยูวีมีพลังงานสูง แลบช่องว่างพลังงานที่แคบทำให้เกิดการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮลได้ง่าย



รูปที่ 4.31 กราฟแสดงอัตราเร็วในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของกราฟฟิตติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้ อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 600 องศาเซลเซียส ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิลและแสงยูวี

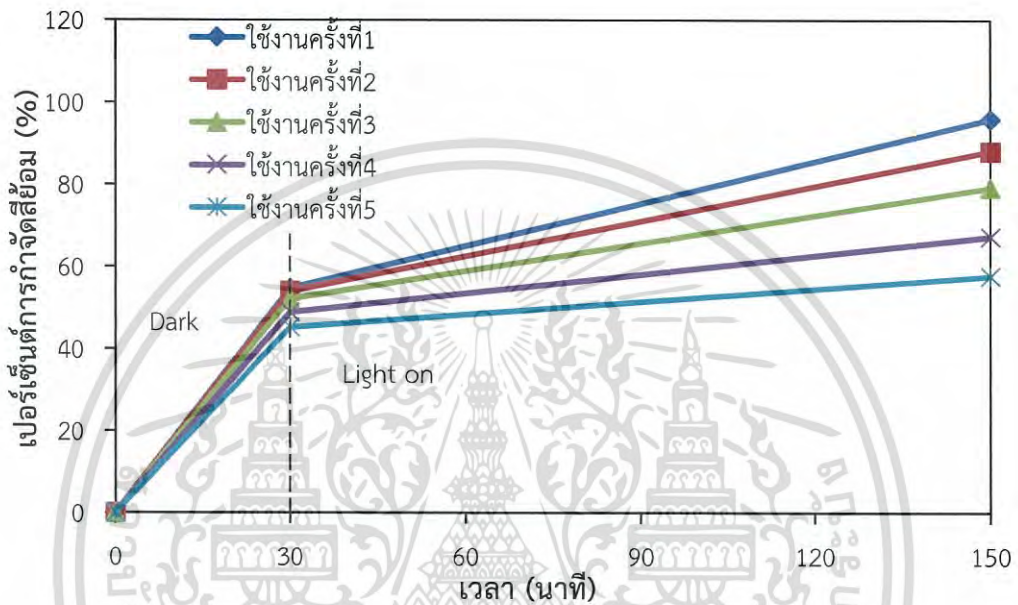
จากรูปที่ 4.31 แสดงอัตราการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของกราฟฟิตติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้ อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 600 องศาเซลเซียส ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิลและแสงยูวี โดยเมทิลีนบลูมี ความเข้มข้นเท่ากับ  $1.25 \times 10^{-5}$  โมลาร์ แสดงผลของกราฟแกน x คือ เวลา (นาที) และ แกน y คือ  $\ln(C_0/C_t)$  เมื่อนำมาพล็อตกราฟเพื่อหาค่าความชันหรือค่าคงที่อัตรา ( $k_{app}$ ) ในการสลายสีย้อม เมทิลีนบลู ตามสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับที่หนึ่ง (pseudo-first order) พบว่ากราฟฟิตติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ฉายแสงวิสิเบิลเท่ากับ 0.0121 ต่อนาที และกราฟฟิตติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ฉายแสง ยูวี มีค่าคงที่ในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูเท่ากับ 0.0096 ต่อนาที ตามลำดับ

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าคงที่ในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูของกราฟฟิตติกคาร์บอนไนไตรด์ เมื่อใช้ แหล่งแสงต่างกัน

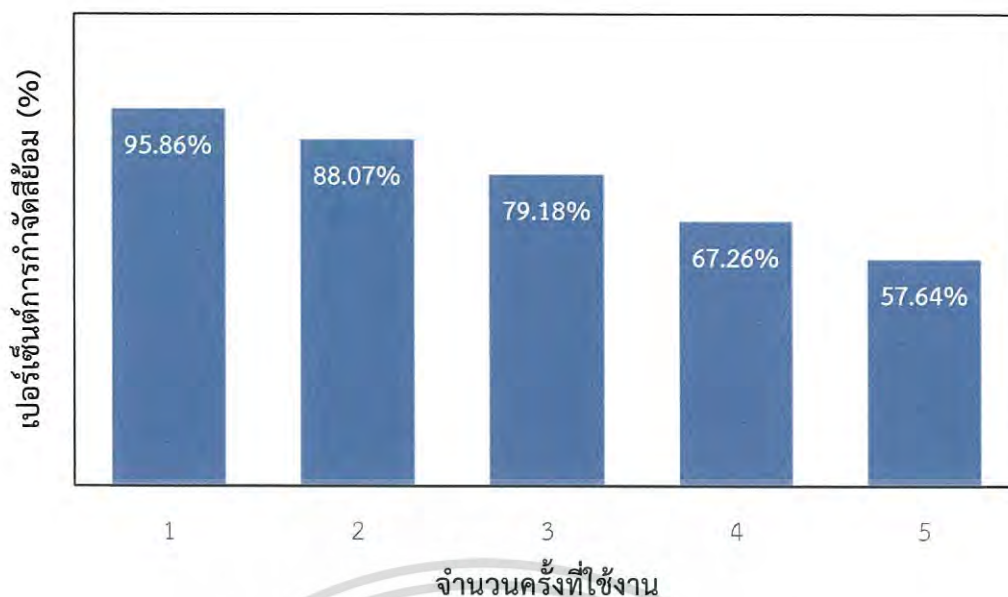
แหล่งแสง	ค่าคงที่ในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู ( $k_{app}$ ) ; $\text{min}^{-1}$
วิสิเบิล	0.0121
ยูวี	0.0096

#### 4.1.13 การศึกษาประสิทธิภาพในการใช้งานซ้ำ

จากการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของกราฟิติการ์บอนไนไตรด์ที่ใช้ อุณหภูมิในการสังเคราะห์ที่ 450 500 550 600 และ 650 องศาเซลเซียส โดยเมทิลีนบลูมีความเข้มข้นเท่ากับ  $1.25 \times 10^{-5}$  โมลาร์ ผลที่ได้คือ กราฟิติการ์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 600 องศาเซลเซียสมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมที่ดีที่สุด จึงทดสอบประสิทธิภาพในการนำมาใช้งานซ้ำ โดยทดสอบปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล เป็นเวลา 150 นาที จำนวน 5 ครั้ง



รูปที่ 4.32 กราฟแสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูการใช้งานซ้ำของกราฟิติการ์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 600 องศาเซลเซียส ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล



รูปที่ 4.33 กราฟแสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสียอมเมทิลีนบลูการใช้งานซ้ำของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 600 องศาเซลเซียส ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลา 150 นาที

จากผลการทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานซ้ำ ดังรูปที่ 4.33 จะเห็นว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับสียอมครั้งที่ 1 มีค่าเท่ากับ 95.86 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำไปทดสอบครั้งที่ 2 ประสิทธิภาพการดูดซับสียอมลดลงเล็กน้อย ซึ่งมีค่าเท่ากับ 88.07 เปอร์เซ็นต์ นำไปทดสอบต่อเป็นครั้งที่ 3 จะได้ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับสียอมเมทิลีนบลูลดลงเหลือ 79.19 เปอร์เซ็นต์ และนำไปทดสอบต่อครั้งที่ 4 และ 5 จะได้เปอร์เซ็นต์การดูดซับสียอมเมทิลีนบลู ลดลงเหลือเพียง 67.26 และ 67.26 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อนำไปใช้งานซ้ำหลาย ๆ ครั้ง ประสิทธิภาพในการดูดซับสียอมเมทิลีนบลูของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ลดลง เนื่องจากเมื่อทำการใช้งานกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ไปหลายครั้งจะทำให้เมทิลีนบลูเข้าไปเกาะบริเวณโครงสร้างของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ ส่งผลทำให้การทำงานของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกลดลงเพราะการดูดซับในครั้งถัดไปจะน้อยลงเรื่อยๆ จึงส่งผลให้มีประสิทธิภาพลดลง [32] ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองใช้ซ้ำจำนวน 5 ครั้งนั้นก็เพียงพอ ทำให้เห็นถึงแนวโน้มว่ามีการลดลงเรื่อยๆ เมื่อการใช้ครั้งที่ 5 หรือการใช้ซ้ำครั้งที่ 4 นั้นเกิดประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง ซึ่งถ้าการใช้ซ้ำครั้งที่ 6 ประสิทธิภาพในการดูดซับอาจลดลงมากก็ได้ เนื่องจากในการทดลองการใช้งานซ้ำนั้น สารในระหว่างการทดลองได้สูญหายไปขณะที่ทำการล้างเพื่อแยกตัวเร่งปฏิกิริยากับสารละลายสียอมเมทิลีนบลูออกจากกันได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

การศึกษากระบวนการโฟโตคะตะไลติกของกราฟาไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ โดยใช้อุณหภูมิจากการสังเคราะห์ต่างกัน คือ 450 500 550 600 และ 650 องศาเซลเซียส ในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. จากการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของกราฟาไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ด้วยเทคนิค FT-IR พบว่าประกอบด้วยพีคเอกลักษณ์ของหมู่ N-H stretching C-N heterocycles stretching และ triazine breathing ซึ่งตรงตามโครงสร้างของกราฟาไฟติกคาร์บอนไนไตรด์

2. จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของกราฟาไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ด้วยเครื่อง SEM พบว่าอุณหภูมิต่ำจะช่วยให้เกิดการควบแน่น นำไปสู่การเติบโตของแผ่นกราฟาไฟติกคาร์บอนไนไตรด์

3. ในการทดสอบประสิทธิภาพของการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู พบว่ากราฟาไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิจากการสังเคราะห์ 600 องศาเซลเซียส สามารถกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงวิสิเบิลอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

4. ในการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของกราฟาไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิจากการสังเคราะห์ 600 องศาเซลเซียส ภายใต้การฉายแสงยูวีและแสงวิสิเบิล พบว่าสารทำงานภายใต้แสงวิสิเบิลได้ดีกว่าแสงยูวี โดยแสงยูวีสามารถกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูได้ 89 เปอร์เซ็นต์ ส่วนแสงวิสิเบิลสามารถกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูได้ถึง 98 เปอร์เซ็นต์

5. จากการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงวิสิเบิล พบว่า เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลูเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมลดลง ในทางตรงกันข้ามหากเพิ่มปริมาณกราฟาไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมมีค่าเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าประสิทธิภาพการใช้งานซ้ำของกราฟาไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมลดลง

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาและพัฒนาต่อไป โดยน่าจะทำการสังเคราะห์กราฟาไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ผสมกับสารกึ่งตัวนำหรือโลหะชนิดอื่น เช่น  $TiO_2$  เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับกราฟาไฟติกคาร์บอนไนไตรด์

2. ผลการวิจัยครั้งนี้สามารถกำจัดสีย้อมได้จริง และมีประสิทธิภาพสูง แต่อาจจะมีข้อเสียคือไม่สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมได้โดยตรง เนื่องจากสารตัวอย่างที่ได้จากการสังเคราะห์เป็นผงละเอียดต้องผ่านกรรมวิธีดัดแปลงให้เป็นวัสดุที่ง่ายต่อการใช้งาน เช่น การเคลือบบนผิววัสดุ

3. สารที่ใช้ในการทดลอง เช่น ผงกราฟาไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ ผงเมทิลีนบลู มีลักษณะเป็นผงขนาดเล็ก ควรทำการศึกษาดูด้วยความระมัดระวังและสวมใส่เสื้อกาวน์ทุกครั้งที่ทำกรทดลอง

4. ควรมีการศึกษาผลของวิธีการเตรียมกราฟิติการ์บอนไนไตรด์แบบอื่น นอกเหนือจากการเตรียมแบบไพโรไลซิส ว่ามีผลต่อสมบัติทางกายภาพและทางเคมีแตกต่างกันอย่างไรบ้าง เช่น การเตรียมโดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] กองจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม. น้ำเสียชุมชนและระบบบำบัดน้ำเสีย
- [2] วรพล เตชางกูร. 2559. “การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์และสมบัติโฟโตคะตะไลติกของแผ่นของผสมยางธรรมชาติ/ไทเทเนียมไดออกไซด์ / ริดิวซ์กราฟีนออกไซด์.” ปริญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [3] G. Mamba, A.K. Mishra. “Graphitic carbon nitride ( $g\text{-C}_3\text{N}_4$ ) nanocomposite: A new and exciting generation of visible light driven photocatalysts for environmental pollution remediation.” *Applied Catalysis B: Environmental*. 198 (2016) 347-377.
- [4] Han Zou , Xuehua Yan, Jie Ren, Xiao Wu, Yu Dai, Dawei Sha, Jianmei Pan, Jun Liu. “Photocatalytic activity enhancement of modified  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  by ionothermal copolymerization.” *J Materiomics*. 1 (2015) 340-347.
- [5] Sheng Ye, Rong Wang, Ming-Zai Wu, Yu-Peng Yuan. “A review on  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  for photocatalytic water splitting and  $\text{CO}_2$  reduction.” *Applied Surface Science*. 358 (2015) 15-27.
- [6] Jiuqing Wen, Jun Xie, Xiaobo Chen, Xin Li. “A review on  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ -based photocatalysis.” *Applied Surface Science*. 391 (2017) 72-123.
- [7] Le Thi Mai Oanh, Lam Thi Hang, Ngoc Diep Lai, Nguyen Thi Phuong, Dao Viet Thang, Nguyen Manh Hung, Do Danh Bich, Nguyen Van Minh. “Influence of annealing temperature on physical properties and photocatalytic ability of  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  nanosheets synthesized through urea polymerization in Ar atmosphere.” *Physica B*. 532 (2018) 48-53.
- [8] ผศ.ดร.อุปลักษณ์ นาครักษ์. 2558. “การกำจัดสารปนเปื้อนอินทรีย์ในน้ำโดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.” ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- [9] ผศ.ดร.พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล และนายรัฐพล เจียวิริยะบุญญา. มาทำความรู้จักกับแ่งมมต่างๆ ของ กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง . [Online]. Available: <http://geppower.com/images/pdf-article/3-RECOAL-article.pdf>.
- [10] Ongon kosonsakdasakul. กลไกการสะท้อนแสงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และการปล่อยคลื่นอินฟราเรดของโลก . [Online]. Available: [http://testremtesensing.blogspot.com/2015/11/ blog-post\\_10.html](http://testremtesensing.blogspot.com/2015/11/ blog-post_10.html).
- [11] General mechanism of the photocatalysis [Online] . Available: <https://www.hindawi.com/journals/ijp/2014/563879/fig1/>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] ดร.นัตตา เวชชากุล. 2555. “ไทเทเนียมไดออกไซด์กับการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ในน้ำ.” ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ , มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [13] สุชน เสถียรยานนท์. 2551 “เมลามีน (MELAMINE).” ก้าวทันโลกวิทยาศาสตร์. 8(2), 57-64.
- [14] Guoping Dong, Yuanhao Zhang, Qiwen Pan, Jianrong Qiu. “A fantastic graphitic carbon nitride ( $g\text{-C}_3\text{N}_4$ ) material: Electronic structure, photocatalytic and photoelectronic properties.” Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews. 20 (2014) 33-50.
- [15] Kah Hon Leong, Ping Feng Lim, Lan Ching Sim, Varun Punia, Saravanan Pichiah. “Improved solar light stimulated charge separation of  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  through self-altering acidic treatment.” Applied Surface Science. 430 (2018) 355-361.
- [16] ดร.ศิริประภา ชัยเนตร ภัทรา วงษ์พันธ์กุล และครรชิต คงคาเงิน 2556. “การดูดซับเมทิลีนบลูในน้ำเสียโดยใช้เปลือกไข่.” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาควิชาฟิสิกส์ เชียงใหม่.
- [17] Wikipedia. Methylene blue [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Methylene\\_blue](https://en.wikipedia.org/wiki/Methylene_blue).
- [18] Sudip Mondal, Ma. E. De Anda Reyes, Umapada Pal. “Plasmon induced enhanced photocatalytic activity of gold loaded hydroxyapatite nanoparticles for methylene blue degradation under visible light.” RSC Advances. 7(2017) 8633-8645.
- [19] Mehdi Alzamani, Ali Shokuhfar, Ebrahim Eghdam, Sadegh Mastali. “Sol-gel fabrication and enhanced optical properties, photocatalysis, and surface wettability of nanostructured titanium dioxide films”. Materials Science in Semiconductor Processing Volume 16, Issue 4, August 2013, Pages 1063-1069
- [20] Supat Buddee, Sumpun Wongnawa, Uraivan Sirimahachai, Walailak Puetpaibool. “Recyclable UV and visible light photocatalytically active amorphous  $\text{TiO}_2$  doped with M (III) ions (M = Cr and Fe)”. Materials Chemistry and Physics 126 (2011) 167-177.
- [21] Rishu Katwal, Harpreet Kaur, Gaurav Sharma, Mu. Naushad, Deepak Pathania. “Electrochemical synthesized copper oxide nanoparticles for enhanced photocatalytic and antimicrobial activity”. Journal of Industrial and Engineering Chemistry 31 (2015) 173-184.
- [22] R. Sankar Ganesh, E. Durgadevi, M. Navganeethan, Sanjeev K. Sharma, H.S. Binitha, S. Ponnusamy, C.Muuthanmizhchelvan, Y. Hayakawa. “Visible light induced photocatalytic degradation of methylene blue and rhodamine B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- from the catalyst of CdS nanowire”. Chemical Physics Letters 684 (2017) 126-134.
- [23] N. Chidhambaram, K. Ravichandran. “Single step transformation of urea into metal-free g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> nanoflakes for visible light photocatalytic applications”. Materials Letters 207 (2017) 44–48.
- [24] Chechia Hu, Yi-Ching Chu, Mao-Sheng Wang, Xiao-Han Wu. “Rapid synthesis of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> spheres using microwave-assisted solvothermal method for enhanced photocatalytic activity” Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry 348 (2017) 8-17.
- [25] Yu Zheng, Zisheng Zhang and Chunhu Lia. “A comparison of graphitic carbon nitrides synthesized from different precursors through pyrolysis” Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry 332 (2017) 32-44.
- [26] Xiwang Jiang, Jun Li, Jia Fang, Long Gao, Wenxuan Cai, Xiaoxia Li, Aihua Xu, Xinchao Ruan. “The photocatalytic performance of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> from melamine hydrochloride for dyes degradation with peroxymonosulfate”. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry 336 (2017) 54-62.
- [27] Yuanhao Zhang, Qiwen Pan, Guanqi Chai, Minru Liang, Guoping Dong, Qinyuan Zhang , Jianrong Qiu. “Synthesis and luminescence mechanism of multicolor-emitting g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> nanopowders by low temperature thermal condensation of melamine.” Scientific Reports. 3 (2013).

- [28] I.Papailias, T.Giannakopoulou, N.Todorova, D.Demotikali, T.Vaimakis, C.Trapalis. "Effect of processing temperature on structure and photocatalytic properties of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>." Applied Surface Science. 358 (2015) 278-286.
- [29] Minsik Kim, Sohee Hwang and Jong-Sung Yu. "Novel ordered nanoporous graphitic carbon nitride with C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> stoichiometry as a support for Pt-Ru anode catalyst in DMFC". Journal of Materials Chemistry. 17(2017) 1656-1659.
- [30] Vorrada Loryuenyong, Krit Totepvimarn, Passakorn Eimburanaprat, Wanchai Boonchompoo, and achanai Buasri. "Preparation and Characterization of Reduced Graphene Oxide Sheets via Water-Based Exfoliation and Reduction Methods". Advances in Mater Science and Engineering Volume 2013, article ID 923403, 5 pages.
- [31] C. Yea, M.H. Nay, R.M. Abdul, N. Yusoff, R.M. Muhamad, H. Ian, N.L. Hong and H.L. Chin Hu. 2012. "Facile hydrothermal preparation of titanium dioxide decorated reduced graphene oxide nanocomposite." International Journal of Nanomedicine 80 : 7.
- [32] D. Kaituo, H. Jiandong, L. Junxue, L. Fengting, Y. Lianqing, Z. Yaping, Z. Xiaoyan and M. Hongzhang. 2016. "Photocatalytic performance of Cu<sub>2</sub>O-loaded TiO<sub>2</sub>/rGO nano heterojunctions obtained by UV reduction." Journal Material Science 52 : 6754–6766.
- [33] จักรกฤษณ์ อัมพูช. 2560. "การดูดซับสีย้อมรีแอ็คทีฟแบล็ค 5 บนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากผักตบชวา." ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- [34] นางสาวสวณีย์ บรรพจน์พิทักษ์. "การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลมโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา." ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### การเตรียมสารละลายสีย้อมสังเคราะห์ และการคำนวณค่าร้อยละการกำจัดสีย้อม

การเตรียมเมทิลีนบลู (Methylene Blue, MB) สูตรโครงสร้าง คือ  $C_{16}H_{18}N_3SCl$   
เตรียมสีย้อมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น  $1.25 \times 10^{-5}$  M

#### วิธีทำ

- ชั่งผงเมทิลีนบลู 0.0039 กรัม ในปิเกตอร์แล้วเติมน้ำกลั่น คนให้ละลาย
- เทลงในขวดปรับปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

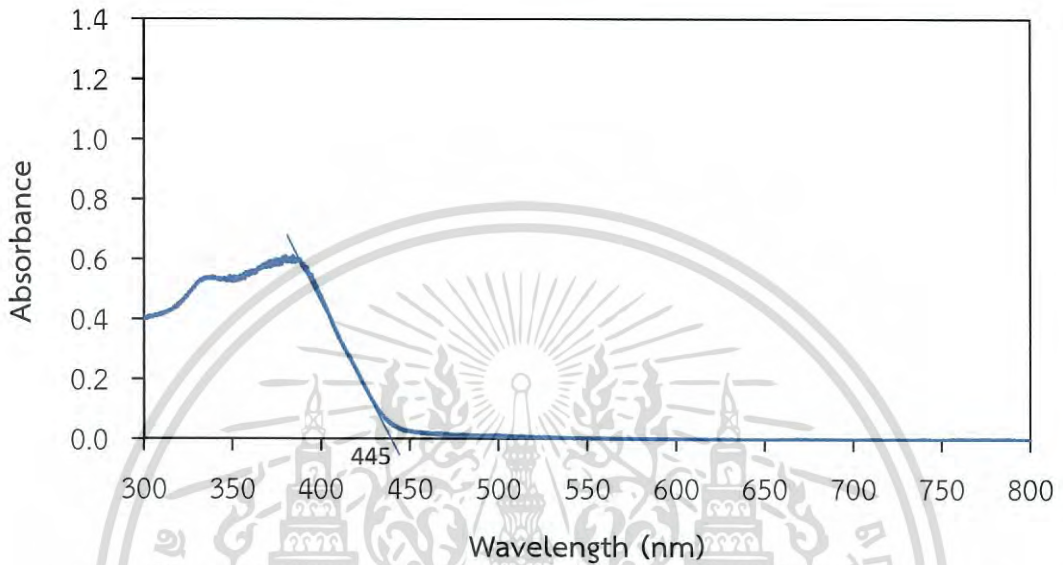


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

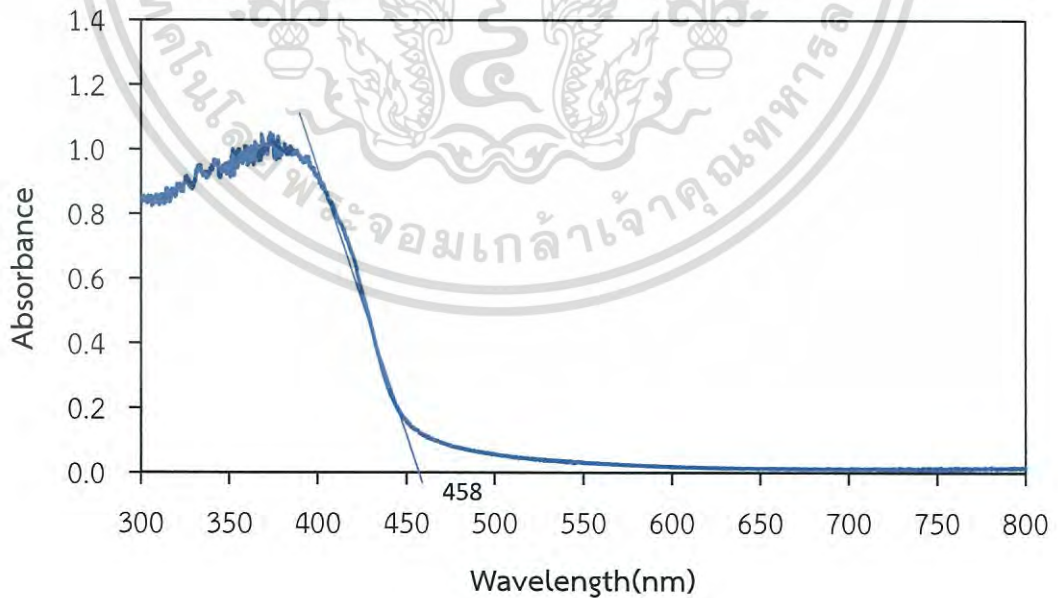
## ภาคผนวก ข

### ผลการทดสอบและพิสูจน์เอกลักษณ์

#### 1. UV-Visible Diffuse Reflectance Spectroscopy

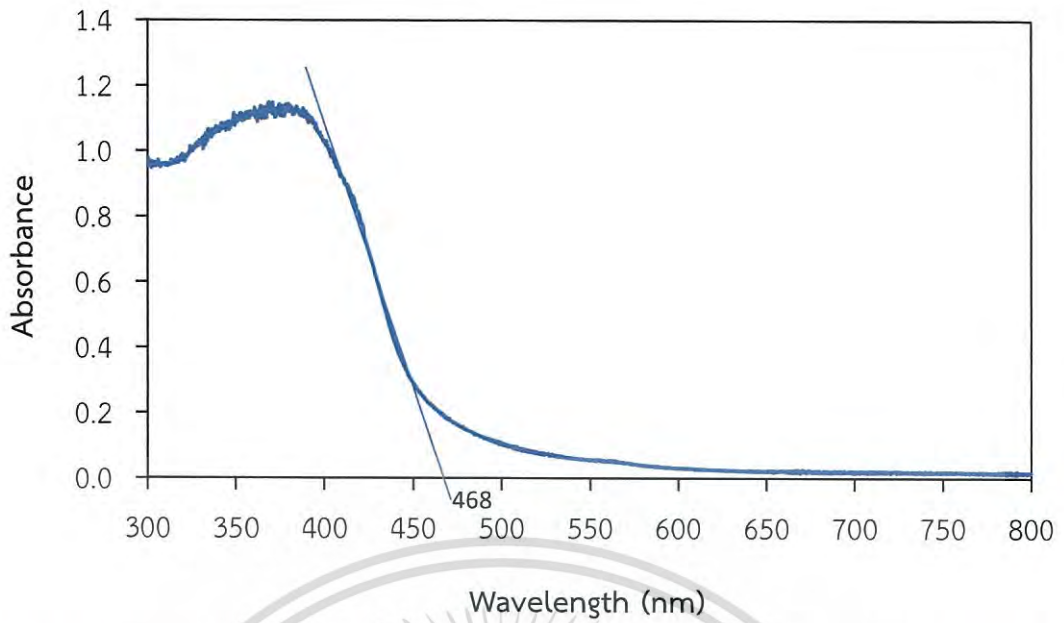


รูปที่ ข-1 แสดงการหาความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงของกราฟฟิติกคาร์บอนไนโตรด์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส

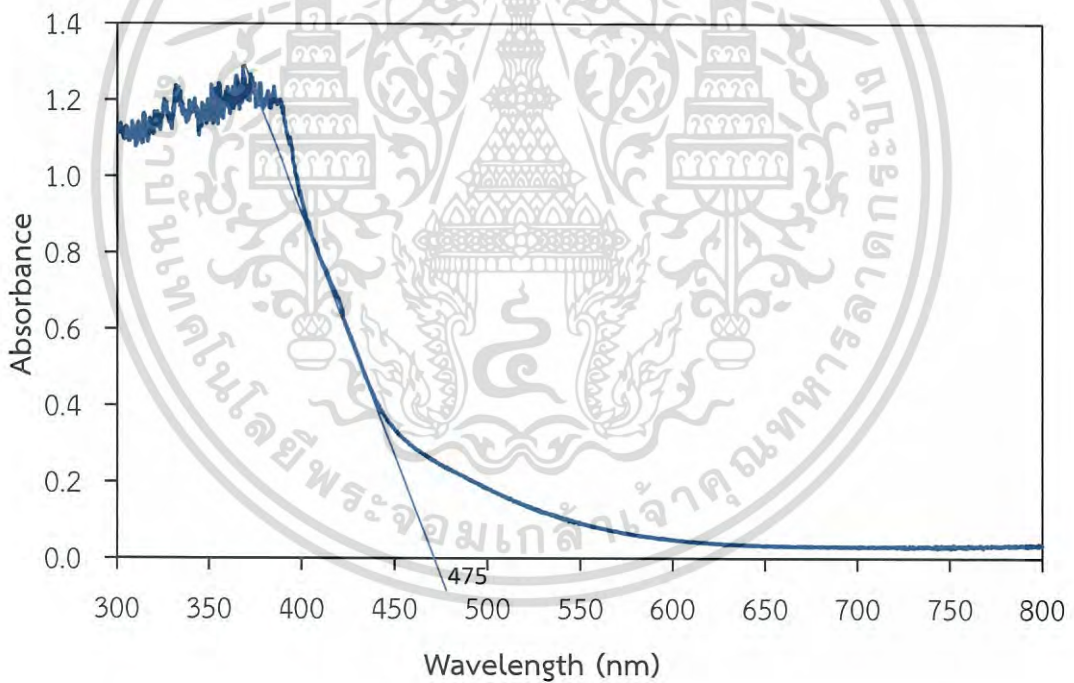


รูปที่ ข-2 แสดงการหาความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงของกราฟฟิติกคาร์บอนไนโตรด์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

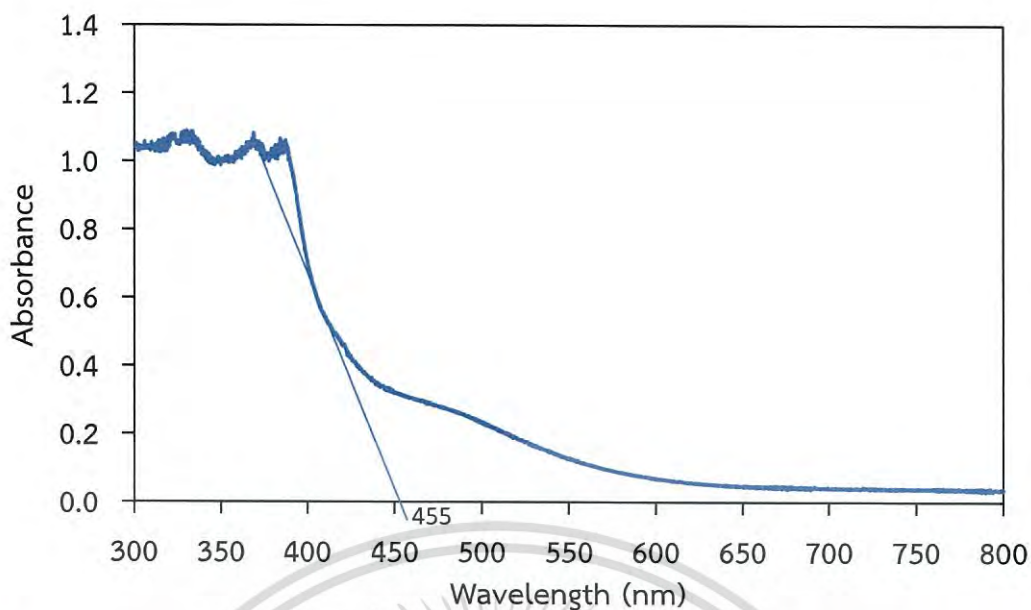


รูปที่ ข-3 แสดงการหาความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงของกราฟิติกคาร์บอนไนโตรด์ที่สังเคราะห์ที่ อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส



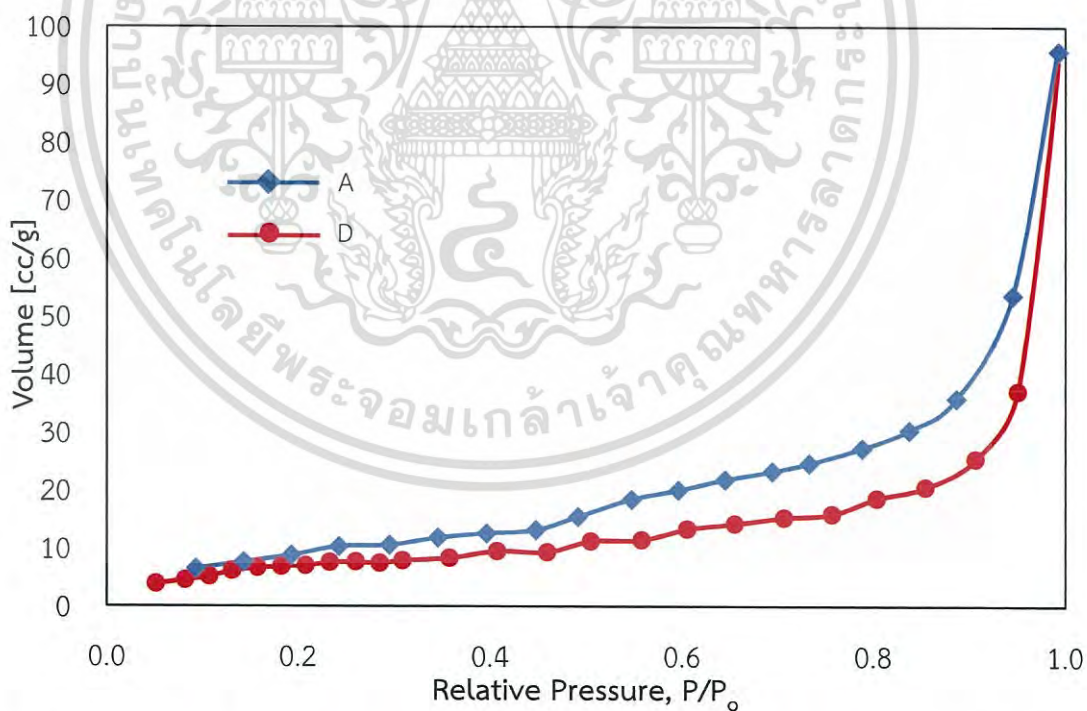
รูปที่ ข-4 แสดงการหาความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงของกราฟิติกคาร์บอนไนโตรด์ที่สังเคราะห์ที่ อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-5 แสดงการหาความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส

## 2. Isotherm



รูปที่ ข-6 Isotherm ของกราฟิติกคาร์บอนไนไตรด์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. ตารางแสดงความสามารถการดูดกลืนแสงของกราฟาไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่สภาวะต่างๆ

ตารางที่ ข-1 ค่าความสามารถการดูดกลืนแสงของกราฟาไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ในที่มีด

สารตัวอย่าง	ค่าความสามารถการดูดกลืนแสง						
	เริ่มต้น	30 นาที (ดูดซับใน ที่มีด)	60 นาที	90 นาที	120 นาที	150 นาที	180 นาที
g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> _450 °C	0.643	0.452	0.448	0.446	0.449	0.446	0.445
g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> _500 °C	0.643	0.39	0.388	0.384	0.383	0.386	0.381
g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> _550 °C	0.643	0.381	0.377	0.371	0.373	0.369	0.372
g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> _600 °C	0.643	0.344	0.34	0.346	0.343	0.34	0.341
g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> _650 °C	0.643	0.31	0.298	0.281	0.288	0.279	0.299

ตารางที่ ข-2 แสดงค่าความสามารถการดูดกลืนแสงของกราฟาไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่างกัน ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล

สารตัวอย่าง	ค่าความสามารถการดูดกลืนแสง						
	เริ่มต้น	30 นาที (ดูดซับ ในที่มีด)	60 นาที	90 นาที	120 นาที	150 นาที	180 นาที
g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> _450 °C	0.645	0.449	0.396	0.342	0.291	0.248	0.201
g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> _500 °C	0.645	0.388	0.348	0.295	0.224	0.181	0.132
g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> _550 °C	0.645	0.373	0.308	0.278	0.201	0.164	0.11
g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> _600 °C	0.645	0.342	0.245	0.175	0.125	0.084	0.021
g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> _650 °C	0.645	0.306	0.262	0.195	0.144	0.114	0.089

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3 แสดงค่าความสามารถการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างกันของกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 600 องศาเซลเซียส

ความเข้มข้น (โมลาร์)	ค่าความสามารถการดูดกลืนแสง					
	เริ่มต้น	30 นาที (ดูดซับ ในที่มืด)	60 นาที	90 นาที	120 นาที	150 นาที
$1.0 \times 10^{-5}$	0.521	0.31	0.198	0.101	0.073	0.018
$1.25 \times 10^{-5}$	0.645	0.342	0.245	0.175	0.125	0.084
$1.5 \times 10^{-5}$	0.794	0.392	0.326	0.293	0.225	0.166

ตารางที่ ข-4 แสดงค่าความสามารถการดูดกลืนแสงในทีปริมาณต่างกันของกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 600 องศาเซลเซียส

ปริมาณ กราไฟติก- คาร์บอนไน ไตรด์ (กรัม)	ค่าความสามารถการดูดกลืนแสง						
	เริ่มต้น	30 นาที (ดูดซับ ในที่มืด)	60 นาที	90 นาที	120 นาที	150 นาที	180 นาที
0.03	0.645	0.411	0.335	0.288	0.228	0.197	0.139
0.05	0.645	0.351	0.247	0.174	0.120	0.079	0.019
0.07	0.645	0.310	0.219	0.145	0.093	0.049	0.011

ตารางที่ ข-5 แสดงค่าความสามารถการดูดกลืนแสงของกราไฟติกคาร์บอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 600 องศาเซลเซียส ภายใต้การฉายแสงวิธีเปิดและแสงยูวี

แหล่งแสง	ค่าความสามารถการดูดกลืนแสง						
	เริ่มต้น	30 นาที (ดูดซับ ในที่มืด)	60 นาที	90 นาที	120 นาที	150 นาที	180 นาที
วิธีเปิด	0.645	0.349	0.245	0.175	0.122	0.081	0.02
ยูวี	0.645	0.343	0.255	0.192	0.143	0.108	0.087

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



งานทะเบียนคณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ

วันที่ 9 เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2561

ข้าพเจ้า นางสาวภานุมาศ	เม้าชুমแสง	รหัสประจำตัว 57050483
นางสาวรัชชก	นิคมรักษ์	รหัสประจำตัว 57050495
นางสาวอมิตา	สกุลดำรงวิทย์	รหัสประจำตัว 57050554

นักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชา เคมี

ขอรับรองว่าโครงการ เรื่อง

ชื่อภาษาไทย การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์และสมบัติโฟโตคะตะไลติกของกราฟิกคาร์บอนไนไตรด์

ชื่อภาษาอังกฤษ Preparation, Characterization and Photocatalytic Properties of Graphitic Carbon Nitride (g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)

ปีการศึกษา 2560

เป็นผลงานวิจัยที่ได้คัดลอกหรือละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นและได้ผ่านการตรวจสอบความซ้ำซ้อนเรียบร้อยแล้ว และได้แนบเอกสารการตรวจสอบการลอกเลียนงานวรรณกรรมที่ตรวจสอบจากเล่มโครงการพิเศษฉบับสมบูรณ์แล้ว  
โปรแกรมอักขราวิสุทธิ์ 1.62 %

ลงชื่อ.....*ภานุมาศ*.....

(นางสาวภานุมาศ เม้าชুমแสง)

นักศึกษา

ลงชื่อ.....*รัชชก*.....

(นางสาวรัชชก นิคมรักษ์)

นักศึกษา

ลงชื่อ.....*อมิตา*.....

(นางสาวอมิตา สกุลดำรงวิทย์)

นักศึกษา

ข้าพเจ้า ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ได้ตรวจสอบโครงการพิเศษของนักศึกษาข้างต้นแล้ว ขอรับรองว่าเป็นผลงานวิจัยของนักศึกษาจริงและมีเนื้อหาสมบูรณ์ จึงลงชื่อไว้เป็นหลักฐาน

ลงชื่อ.....*ชวาลย์ ศรีวงษ์*.....

(ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้