

การเตรียมและการพิสูจน์เอกลักษณ์ของแผ่นยางธรรมชาติผสม  
ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์และประสิทธิภาพทางด้าน  
โฟโตคะตะไลติกของแผ่นยางผสม

PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF  $\text{TiO}_2$ /NATURAL  
RUBBER-GRAPHENE OXIDE COMPOSITE SHEETS AND THEIR  
PHOTOCATALYTIC EFFICIENCIES



นางสาวบุญนิศา ศรีโต  
นางสาวภทรพร ศรีเมสียงกุล  
นางสาวสุวิมล ชูอ่อน

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2557

การเตรียมและการพิสูจน์เอกลักษณ์ของแผ่นยางธรรมชาติผสม  
ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์และประสิทธิภาพทางด้าน  
โฟโตคะตะไลติกของแผ่นยางผสม

PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF  $TiO_2$ /NATURAL  
RUBBER-GRAPHENE OXIDE COMPOSITE SHEETS AND THEIR  
PHOTOCATALYTIC EFFICIENCIES



นางสาวบุญนิศา ศรีโต

นางสาวภทรพร ศรีเมลิองกุล

นางสาวสุวิมล ชูอ่อน

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF TiO<sub>2</sub>/NATURAL  
RUBBER-GRAPHENE OXIDE COMPOSITE SHEETS AND THEIR  
PHOTOCATALYTIC EFFICIENCIES



MISS BOONNISA

SRITOH

MISS PATHARAPORN

SRIMALUANGKUL

MISS SUWIMON

CHU-ON

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

DEPARTMENT OF CHEMISTRY

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การเตรียม และการพิสูจน์เอกลักษณ์ของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียม ไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์และประสิทธิภาพทางด้านโฟโตคะตะไลติกของ แผ่นยางผสม

Preparation and Characterization of  $\text{TiO}_2$ /Natural Rubber – Graphene Oxide Composite Sheets and Their Photocatalytic Efficiencies

ชื่อนักศึกษา นางสาวบุญนิศา ศรีโต รหัสนักศึกษา 54050120

นางสาวภทรพร ศรีเมลืองกุล รหัสนักศึกษา 54050237

นางสาวสุวิมล ชูอ่อน รหัสนักศึกษา 54050321

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา เคมี

ปีการศึกษา 2557

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมี  
อุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.เอกรัฐ เดชศรี ประธานกรรมการ	เอกวิญญู เดชศรี
ดร.เชิดศักดิ์ มณีรัตนรุ่งโรจน์ กรรมการ	เชิดศักดิ์ มณีรัตนรุ่งโรจน์
ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	ชวาลย์ ศรีวงษ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การเตรียม และการพิสูจน์เอกลักษณ์ของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ และประสิทธิภาพทางด้านโฟโตคะตะไลติกของแผ่นยางผสม	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวบุญนิศา ศรีโต	รหัสนักศึกษา 54050120
	นางสาวภทรพร ศรีเมลิองกุล	รหัสนักศึกษา 54050237
	นางสาวสุวิมล ชูอ่อน	รหัสนักศึกษา 54050321
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)	
ภาควิชา	เคมี	
ปีการศึกษา	2557	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์	

### บทคัดย่อ

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียม และพิสูจน์เอกลักษณ์ของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ รวมทั้งศึกษาประสิทธิภาพทางด้านโฟโตคะตะไลติกของแผ่นยางผสมในการกำจัดสีย้อม โดยเริ่มจากการเตรียมแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ ซึ่งสามารถเตรียมได้โดยการใช้ยางธรรมชาติเข้มข้น (60 %wt, HA) ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) และกราฟีนออกไซด์ เป็นสารตั้งต้น จากนั้นจึงนำแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ที่เตรียมได้มาศึกษาเอกลักษณ์เฉพาะด้วยเทคนิคต่างๆ ได้แก่ การตรวจสอบเอกลักษณ์โดยเครื่องฟูเรียรทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer; FT-IR) การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction; XRD) การศึกษาสัณฐานวิทยาและภาพตัดขวางโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy; SEM) อีกทั้งการศึกษาสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analysis; TGA) พบว่าสมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์จะมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่ายางธรรมชาติ จากการทดสอบสมบัติเชิงกลโดยใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) พบว่ายางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่ายางธรรมชาติ ผลจากการศึกษากระบวนการโฟโตคะตะไลติกของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ในการสลายสีย้อมเมทิลินบลู (MB) ภายใต้แสงยูวี และแสงยูวี-วิสิเบิล พบว่าเมื่อเพิ่มกราฟีนออกไซด์ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมจะลดลง รวมทั้งยังมีการทดสอบการใช้งานซ้ำพบว่ายิ่งใช้ซ้ำมากประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมยิ่งลดลง อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำสำคัญ : ไทเทเนียมไดออกไซด์ กราฟีนออกไซด์ กระบวนการโฟโตคะตะไลติก เมทิลินบลู

Title	Preparation and Characterization of TiO <sub>2</sub> /Natural Rubber – Graphene Oxide Composite Sheets and Their Photocatalytic Efficiencies		
Students	MissBoonnisa	Sritoh	ID54050120
	MissPatharaporn	Srimaluangkul	ID 54050237
	MissSuwimon	Chu-on	ID 54050321
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)		
Department	Chemistry		
Academic Year	2014		
Advisor	Dr.Chaval Sriwong		

### Abstract

In this special project, the preparation, characterization and photocatalytic efficiencies of the TiO<sub>2</sub>-graphene oxide natural rubber composite sheets were studied, including the mechanical and thermal properties of these composite sheets were also investigated. In this work, the composite sheets were easily prepared by using a commercial TiO<sub>2</sub> powder (Degussa P25), concentrated natural rubber (NR) latex (60% HA) and graphene oxide (GO) as starting materials. In the preparation, the TiO<sub>2</sub> suspensions were firstly mixed with NR latex and were stirred, after which the varying amount of GO aqueous suspension were added and then stirred. After that the homogenized mixtures were poured into a petri dish mold, dried at room temperature (RT) after which taken out from a mold, then were reversed and dried again at RT, finally the TiO<sub>2</sub>-graphene oxide natural rubber composite sheets were obtained and ready to use. Then, the as-prepared composite sheets were characterized by using SEM, XRD and FT-IR techniques. The photocatalytic efficiencies of each composite sheet were also evaluated by the photodegrading of methylene blue (MB) dye solution under UV and UV-Visible light irradiation. The results showed that the photocatalytic properties of all the composite sheets had lower efficiencies than the TiO<sub>2</sub>-rubber (without loading of GO) composite sheet. Moreover, the mechanical and thermal properties of the composite sheets were investigated using TGA and tensile test techniques. The results found that the TiO<sub>2</sub>-graphene oxide natural rubber composite sheets had higher the mechanical and thermal properties

than the  $\text{TiO}_2$ -rubber sheet with unloading of GO. This may be due to the fact that it is relatively with the effects of well-combined of natural rubber and GO, which the later material has high mechanical and thermal values, enhancing the both properties of the composite sheet.

**Keywords :** Titanium dioxide, Graphene oxide (GO), Photocatalytic process, Methylene blue



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ เป็นอย่างยิ่งที่กรุณาให้คำปรึกษา และขอแนะนำต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย อีกทั้งยังคงติดตามผลโครงการพิเศษนี้มาโดยตลอด จะสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ดร.เอกรัฐ เดชศรี และ ดร.เชิดศักดิ์ มณีรัตนรุ่งโรจน์ อาจารย์คณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษ ที่กรุณาให้คำแนะนำ และให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ อีกทั้งยังช่วยตรวจทาน และแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คุณปราณี บุญวัฒน์ นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการ ที่คอยให้คำแนะนำความรู้เกี่ยวกับการใช้เครื่องวัดต่างๆ รวมทั้งขอขอบคุณนักวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ในภาคเคมีทุกๆ ท่าน ที่คอยอำนวยความสะดวกและให้ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการใช้สารเคมี อุปกรณ์ และห้องปฏิบัติการในการทดลอง

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือ ร่วมแสดงความคิดเห็นและให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน จนสามารถทำโครงการพิเศษนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และบุคคลในครอบครัว ที่คอยสอบถามและคอยให้กำลังใจจนการทำโครงการพิเศษครั้งนี้สามารถสำเร็จมาได้ด้วยดี

นอกจากนี้ยังมีบุคคลอีกมากมายที่มีส่วนในการช่วยเหลือแต่อาจจะยังไม่ได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ ซึ่งคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

นางสาวบุญนิตา ศรีโต

นางสาวภทรพร ศรีเมลืองกุล

นางสาวสุวิมล ชูอ่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ข
กิตติกรรมประกาศ .....	ง
สารบัญ .....	จ
สารบัญตาราง .....	ฉ
สารบัญรูป .....	ฎ
คำย่อ/สัญลักษณ์ .....	ฅ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide).....	4
2.1.1 หลักการทำงานของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	7
2.1.2 คุณลักษณะของสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	7
สำหรับปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม	
2.2 ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis).....	9
2.2.1 หลักการของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส .....	9
(Fundamental of Photocatalysis Reaction)	
2.2.2 พลังงานแสง.....	9
2.2.3 ชนิดของโฟโตคะตะไลซิส.....	11
2.2.4 ชนิดของตัวแคตาลิสต์ .....	11
2.3 กราฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide).....	12
2.3.1 การสังเคราะห์กราฟีน .....	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกส่งต่อให้ผู้อื่น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 น้้ายางธรรมชาติ.....	15
2.4.1 การรักษาสภาพน้้ายางสด .....	16
2.4.2 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ .....	16
2.5 สีย้อม.....	17
2.6 เมทิลีนบลู (Methylene Blue, MB) .....	17
2.6.1 กลไกการสลายตัวของเมทิลีนบลูในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก .....	18
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	19
2.7.1 ปฏิกริยาโฟโตคะตะไลติกของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	19
และการนำไปใช้งานซ้ำ	
2.7.2 การศึกษาการเตรียม, ปฏิกริยาโฟโตคะตะไลติกและการใช้ซ้ำ .....	20
ของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์	
2.7.3 การนำแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	21
ขนาดบางมาใช้ซ้ำและการดูดซับสีย้อม	
2.7.4 สมบัติเชิงกลของกราฟีนออกไซด์/อีพอกซี .....	22
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....</b>	<b>24</b>
3.1 สารเคมี.....	24
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ .....	24
3.3 วิธีการทดลอง .....	25
3.3.1 การเตรียมกราฟไฟต์ออกไซด์ด้วยการปรับปรุงวิธีของ Hummers.....	25
3.3.2 การเตรียมกราฟีนออกไซด์ด้วยวิธีการใช้คลื่นความถี่สูง .....	25
3.3.3 การเตรียมแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ .....	26
3.3.4 การศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของแผ่นยางธรรมชาติ .....	27
ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์	
3.3.5 การทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นยางธรรมชาติ.....	28
ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์	
3.3.6 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมแผ่นยางธรรมชาติ.....	29
ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์	
3.3.7 ศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานซ้ำของแผ่นยางธรรมชาติ .....	30
ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์	

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	31
4.1 การศึกษาการตรวจสอบเอกลักษณ์โดยเครื่องฟูเรียทรานฟอร์มอินฟราเรด .....31	
สเปกโทรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer; FT-IR)	
4.2 การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction; XRD).....34	
4.3 การศึกษาสัณฐานวิทยาและภาพตัดขวางโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน .....37	
แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy; SEM)	
4.3.1 การศึกษาสัณฐานวิทยาของกราฟต์กราฟีนออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์37	
4.3.2 การศึกษาสัณฐานวิทยาของแผ่นยางธรรมชาติผสม .....38	
ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์	
4.3.3 การศึกษาภาพตัดขวางของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติผสม.....41	
ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 4 มิลลิกรัม	
4.4 การศึกษาการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางความร้อน.....42	
(Thermogravimetric analysis; TGA)	
4.5 การทดสอบความแข็งแรงดึงของแผ่นยางธรรมชาติ,แผ่นยางธรรมชาติผสม .....44	
ไทเทเนียมไดออกไซด์และการเติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณต่างกัน	
4.6 การศึกษาประสิทธิภาพการในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางธรรมชาติ .....46	
ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์	
4.6.1 ผลการทดลองการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นยางธรรมชาติผสม .....47	
ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณต่างกัน	
ภายใต้แสงยูวี	
4.6.2 ผลการทดลองการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นยางธรรมชาติผสม .....48	
ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณต่างกัน	
ภายใต้แสงยูวี-วิสิเบิล	
4.6.3 ผลการทดลองการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นยางธรรมชาติผสม .....49	
ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณต่างกันภายใต้แสงยูวี	
และแสงยูวี-วิสิเบิล	
4.6.4 ผลการทดลองการใช้ซ้ำของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ .....49	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เติมกราฟีนออกไซด์ 4 มิลลิกรัม ภายใต้แสงยูวี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่า บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....51

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	51
5.1.1 วิเคราะห์พิสูจน์เอกลักษณ์ของแผ่นยางธรรมชาติผสม.....	51
ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์	
5.1.2 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของแผ่นยางธรรมชาติผสม.....	51
ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์	
5.1.3 การทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นยางธรรมชาติผสม.....	52
ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์	
5.1.4 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีของแผ่นยางธรรมชาติผสม .....	52
ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์	
5.1.5 ศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานซ้ำของแผ่นยางธรรมชาติผสม .....	52
ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์	
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	52
เอกสารอ้างอิง.....	53
ภาคผนวก.....	56
ภาคผนวก ก.....	57
ภาคผนวก ข.....	58
ภาคผนวก ค.....	69
ภาคผนวก ง.....	62
ภาคผนวก จ.....	67
ภาคผนวก ฉ.....	71
ภาคผนวก ช.....	75
ภาคผนวก ซ.....	78
ภาคผนวก ฌ.....	89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงคุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	4
2.2 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ระหว่างรูไทล์และอนาเทส .....	6
2.3 ความยาวคลื่นในช่วงต่างๆ.....	10
2.4 แสดงสัดส่วนของส่วนประกอบของน้ำยางสด .....	15
2.5 อัตราส่วนประกอบของอีพอกซี เรซิน ตัวทำให้แข็ง และกราฟีนออกไซด์.....	22
3.1 *อัตราส่วนกราฟีนออกไซด์ : น้ำกลั่น .....	27
4.1 ตารางแสดงหมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติ.....	33
ซ-1 ค่าการดูดกลืนแสงยูวีและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ที่ไม่เติมกราฟีนออกไซด์ .....	78
ซ-2 ค่าการดูดกลืนแสงยูวีและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 2 มิลลิกรัม .....	79
ซ-3 ค่าการดูดกลืนแสงยูวีและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 4 มิลลิกรัม .....	80
ซ-4 ค่าการดูดกลืนแสงยูวีและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 6 มิลลิกรัม .....	81
ซ-5 ค่าการดูดกลืนแสงยูวีและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 8 มิลลิกรัม .....	82
ซ-6 ค่าการดูดกลืนแสงยูวีและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 10 มิลลิกรัม .....	83
ซ-7 ค่าการดูดกลืนแสงขาวและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 0 มิลลิกรัม .....	84
ซ-8 ค่าการดูดกลืนแสงขาวและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 4 มิลลิกรัม .....	84
ซ-9 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 4 มิลลิกรัม ใช้ซ้ำครั้งที่ 1 .....	85
ซ-10 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 4 มิลลิกรัม ใช้ซ้ำครั้งที่ 2 .....	86

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ซ-11 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีของเมทิลีนบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสม ..... 87 ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 4 มิลลิกรัม ใช้ซ้ำครั้งที่ 3	
ซ-12 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีของเมทิลีนบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสม ..... 88 ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 4 มิลลิกรัม ใช้ซ้ำครั้งที่ 4	
ณ-1 แสดงค่าการทดสอบการดึงแผ่นยางธรรมชาติ, แผ่นยางธรรมชาติผสม ..... 89 ไทเทเนียมไดออกไซด์ และแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติม กราฟีนปริมาณ 2, 4, 6, 8 และ 10 มิลลิกรัม	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงโครงสร้างไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด รูไทล์ และ อนาเทส.....	5
2.2 แสดงโครงสร้างไทเทเนียมไดออกไซด์แบบเตตระโกนอล.....	5
2.3 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	6
2.4 การเกิดปฏิกิริยาของไทเทเนียมไดออกไซด์กับแสง.....	7
2.5 กระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยแสง.....	8
2.6 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสบนสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์.....	12
2.7 ขั้นตอนการสังเคราะห์กราฟีน.....	13
2.8 แบบจำลองใหม่ของแกรไฟต์ออกไซด์ที่มีกลุ่มออกไซด์เกาะบนผิวและขอบ.....	13
2.9 โครงสร้างกราฟีนในแนวระนาบ 2 มิติ (2-dimension ; 2-D).....	14
2.10 สูตรโครงสร้างของยางธรรมชาติ (cis -1,4-polyisoprene, IR).....	15
2.11 โครงสร้างของเมทิลีนบลู.....	18
2.12 กลไกการสลายตัวของเมทิลีนบลู (Methylene Blue).....	18
2.13 แผ่นยางผสม Imp-An.....	19
2.14 รูปถ่ายของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์.....	20
2.15 กระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้แสงยูวีของแผ่นยางธรรมชาติและ แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์.....	21
2.16 แผ่นยางที่มีร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (a) แผ่นยางที่ยังไม่ได้ใช้งาน.....	22
(b) แผ่นยางที่ใช้งานแล้ว 5 ครั้ง (b) แผ่นยางที่ใช้งานแล้ว 10 ครั้ง	
2.17 ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบแรงดึงที่ร้อยละปริมาตรที่ต่างกันของกราฟีน.....	23
2.18 การทดสอบแรงดึง.....	23
4.1 แสดงสเปกตรัมของกราฟไฟต์และกราฟีนออกไซด์.....	31
4.2 แสดงสเปกตรัมของ $TiO_2$ และ NR.....	32
4.3 แสดงสเปกตรัมของ NR+ $TiO_2$ , NR+ $TiO_2$ +GO <sub>2</sub> , NR+ $TiO_2$ +GO <sub>4</sub> ,.....	33
NR+ $TiO_2$ +GO <sub>6</sub> , NR+ $TiO_2$ +GO <sub>8</sub> และ NR+ $TiO_2$ +GO <sub>10</sub>	
4.4 รูปแบบ XRD ของกราฟไฟต์และกราฟีนออกไซด์.....	34
4.5 รูปแบบ XRD ของ $TiO_2$ และ NR.....	35
4.6 รูปแบบ XRD ของ $TiO_2$ , NR, NR+ $TiO_2$ , NR+ $TiO_2$ +GO <sub>2</sub> , NR+ $TiO_2$ +GO <sub>4</sub> ,.....	36
NR+ $TiO_2$ +GO <sub>6</sub> , NR+ $TiO_2$ +GO <sub>8</sub> และ NR+ $TiO_2$ +GO <sub>10</sub>	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้เพื่อการพาณิชย์อื่น ๆ ได้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM กำลังขยาย 3000 เท่าของไฟต์, กราฟีนออกไซด์ .....37 และไทเทเนียมไดออกไซด์	
4.8 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM กำลังขยาย 150 เท่าของ NR, NR+TiO <sub>2</sub> , NR+TiO <sub>2</sub> +GO2,.....39 NR+TiO <sub>2</sub> +GO4, NR+TiO <sub>2</sub> +GO6, NR+TiO <sub>2</sub> +GO8 และ NR+TiO <sub>2</sub> +GO10	
4.9 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM กำลังขยาย 500 เท่าของ NR, NR+TiO <sub>2</sub> , NR+TiO <sub>2</sub> +GO2,.....40 NR+TiO <sub>2</sub> +GO4, NR+TiO <sub>2</sub> +GO6, NR+TiO <sub>2</sub> +GO8 และ NR+TiO <sub>2</sub> +GO10	
4.10 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM ของ NR กำลังขยาย 500 เท่า, NR กำลังขยาย 2000 เท่า, .....41 NR+TiO <sub>2</sub> +GO4 500 เท่า, NR+TiO <sub>2</sub> +GO4 2000 เท่า	
4.11 แสดงผลการวิเคราะห์จาก TGA ของ NR, NR+TiO <sub>2</sub> , NR+TiO <sub>2</sub> +GO8.....42	
4.12 แสดงผลการวิเคราะห์จาก TGA ของ NR, NR+TiO <sub>2</sub> , NR+TiO <sub>2</sub> +GO8.....42	
4.13 แสดงผลการวิเคราะห์จาก DTG ของ NR, NR+TiO <sub>2</sub> , NR+TiO <sub>2</sub> +GO8 .....43	
4.14 แสดงค่า stiffness .....44	
4.15 แสดงค่า Young's Modulus .....44	
4.16 แสดงค่า Load at Break.....45	
4.17 แสดงค่า Stress at Break .....45	
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีของเมทิลีนบลูกับกราฟีนออกไซด์ .....47 ในปริมาณต่างๆกัน	
4.19 ค่าร้อยละการกำจัดสีของเมทิลีนบลูกับแผ่นยางธรรมชาติผสม .....48 ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ปริมาณ 0 และ 4 มิลลิกรัม ภายใต้แสงยูวี-แสงขาว (Day Light)	
4.20 ค่าร้อยละการกำจัดสีของเมทิลีนบลูกับแผ่นยางธรรมชาติผสม .....49 ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ปริมาณ 0 และ 4 มิลลิกรัม ภายใต้แสงยูวี (Black Ligh)และแสงยูวี-แสงขาว(Day Light)	
4.21 ค่าร้อยละการกำจัดสีของเมทิลีนบลูกับแผ่นยางธรรมชาติผสม .....50 ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ที่มีปริมาณกราฟีนออกไซด์ 4 มิลลิกรัม ทำการซ้ำจำนวน 4 ครั้ง	
ค-1 แผ่นยางผสมธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 2 มิลลิกรัม..... 59	

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข-2 แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 4 มิลลิกรัม.....	59
ข-3 แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 6 มิลลิกรัม.....	60
ค-4 แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 8 มิลลิกรัม.....	60
ค-5 แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 10 มิลลิกรัม.....	61
ง-1 สเปกตรัมของ TiO <sub>2</sub> .....	62
ง-2 สเปกตรัมของ Graphite.....	62
ง-3 สเปกตรัมของ Graphite Oxide.....	63
ง-4 สเปกตรัมของ NR.....	63
ง-5 สเปกตรัมของ NR+TiO <sub>2</sub> .....	64
ง-6 สเปกตรัมของ NR+TiO <sub>2</sub> +GO 2 mg.....	64
ง-7 สเปกตรัมของ NR+TiO <sub>2</sub> +GO 4 mg.....	65
ง-8 สเปกตรัมของ NR+TiO <sub>2</sub> +GO 6 mg.....	65
ง-9 สเปกตรัมของ NR+TiO <sub>2</sub> +GO 8 mg.....	66
ง-10 สเปกตรัมของ NR+TiO <sub>2</sub> +GO 10 mg.....	66
จ-1 XRD patterns ของ TiO <sub>2</sub> powder (Degussa P25).....	67
จ-2 XRD patterns ของ NR.....	67
จ-3 XRD patterns ของ NR+TiO <sub>2</sub> .....	68
จ-4 XRD patterns ของ NR+TiO <sub>2</sub> +GO 2 mg.....	68
จ-5 XRD patterns ของ NR+TiO <sub>2</sub> +GO 4 mg.....	69
จ-6 XRD patterns ของ NR+TiO <sub>2</sub> +GO 6 mg.....	69
จ-7 XRD patterns ของ NR+TiO <sub>2</sub> +GO 8 mg.....	70
จ-8 XRD patterns ของ NR+TiO <sub>2</sub> +GO 8 10 mg.....	70
ฉ-1 NR.....	71
ฉ-2 NR+TiO <sub>2</sub> .....	71
ฉ-3 NR+TiO <sub>2</sub> +GO 2 mg.....	72
ฉ-4 NR+TiO <sub>2</sub> +GO 4 mg.....	72
ฉ-5 NR+TiO <sub>2</sub> +GO 6 mg.....	73
ฉ-6 NR+TiO <sub>2</sub> +GO 8 mg.....	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ฉ-7 NR+TiO <sub>2</sub> +GO 10 mg.....	74
ช-1 TGA ของ NR.....	75
ช-2 TGA ของ NR+TiO <sub>2</sub> .....	75
ช-3 TGA ของ NR+TiO <sub>2</sub> +GO 4 mg .....	76
ช-4 TGA ของ NR+TiO <sub>2</sub> +GO 8 mg .....	76
ช-5 TGA ของ NR+TiO <sub>2</sub> +GO 10 mg.....	77
ช-1 ค่าการดูดกลืนแสงยูวีและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ที่ไม่เติมกราฟีนออกไซด์.....	78
ช-2 ค่าการดูดกลืนแสงยูวีและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 2 มิลลิกรัม.....	79
ช-3 ค่าการดูดกลืนแสงยูวีและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 4 มิลลิกรัม.....	80
ช-4 ค่าการดูดกลืนแสงยูวีและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 6 มิลลิกรัม.....	81
ช-5 ค่าการดูดกลืนแสงยูวีและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 8 มิลลิกรัม.....	82
ช-6 ค่าการดูดกลืนแสงยูวีและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 10 มิลลิกรัม.....	83
ช-7 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 4 มิลลิกรัม ใช้ซ้ำครั้งที่ 1.....	85
ช-8 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 4 มิลลิกรัม ใช้ซ้ำครั้งที่ 2.....	86
ช-9 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 4 มิลลิกรัม ใช้ซ้ำครั้งที่ 3.....	87
ช-10 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 4 มิลลิกรัม ใช้ซ้ำครั้งที่ 4.....	88

## คำย่อ/คำสำคัญ

E	คือ พลังงานควอนตัม (Quantu Energy), จูล
h	คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's Contant)
$\nu$	คือ ความถี่ของคลื่นแสง, เฮิรตซ์ หรือ วินาที <sup>-1</sup>
$\lambda$	คือ ความยาวคลื่นแสง, นาโนเมตร
c	คือ ความเร็วของคลื่นแสง
e-	คือ อิเล็กตรอน (Electron)
h+	คือ โฮล (Hole)
$O_2^+$	คือ ซุปเปอร์ออกไซด์เรดิคัล (Superoxide Redical)
$C_{16}H_{18}N_3SCL$	คือ เมทิลีนบลู (Methylene blue; MB)
IC	คือ อินดิโกคาร์มีน (Indigo carmine)
$TiO_2$	คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์
NR	คือ ยางธรรมชาติ (Natural Rubber)
GO	คือ กราฟีนออกไซด์ (Graphene oxide)
$NR+TiO_2$	คือ แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์
$NR+TiO_2+GO$	คือ แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์
UV	คือ ความยาวคลื่นของแสงอัลตราไวโอเลต
mL	คือ มิลลิลิตร
mg	คือ มิลลิกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย เช่น ในระบบบำบัดน้ำเสีย หรือระบบบำบัดอากาศเสีย เนื่องจากสารแอคทีฟที่เกิดจากปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน (Oxygen reduction) โดยอิเล็กตรอน (Photoexcited electron) และจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำ (Water Oxidation) โดยโฮล (Photoexcited hole) จะมีความสามารถออกซิไดส์สารอินทรีย์ได้ดี อีกทั้งมีการประยุกต์ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในสีทาบ้าน เนื่องจากความสามารถในการสะท้อนแสงที่ดี ซึ่งการนำไทเทเนียมไดออกไซด์ไปประยุกต์ใช้นั้น จำเป็นต้องคำนึงถึงคุณสมบัติทางกายภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ เช่น โครงสร้าง (Phase structure), ขนาดอนุภาค (Particle size) และพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) และอื่นๆ ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อกลไกการทำให้เกิดปฏิกิริยา ขนาดอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ส่งผลต่อประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกโดยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดนาโน (Nano-sized) จะส่งผลให้อัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการกลับมารวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนกับโฮลภายในอนุภาค (Volume recombination) ลดลง ทำให้ประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกเพิ่มขึ้นอีกทั้งพื้นที่ผิวจำเพาะของไทเทเนียมไดออกไซด์ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ [1]

กระบวนการโฟโตคะตะไลติกเป็นปฏิกิริยาการย่อยสลายมลพิษ โดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับพลังงานแสง ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมนำมาใช้เป็นสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ทั้งสแตโนไดรออกไซด์ ( $\text{WO}_3$ ) ซิงค์ออกไซด์ ( $\text{ZnO}$ ) แต่ที่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากราคาไม่แพง ไม่เป็นพิษ มีความเสถียรสูง ไม่ละลายน้ำ ทนต่อการกัดกร่อน นอกจากนี้ยังมีสมบัติพิเศษด้านการดูดกลืนแสงได้ดีโดยมีการศึกษาเปรียบเทียบกับสารกึ่งตัวนำหลายๆ ชนิดที่นำมาใช้ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกพบว่าใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบแขวนลอย (Suspension) สามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วโดยทั่วไปแล้วการนำไทเทเนียมไดออกไซด์มาใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกส่วนใหญ่มักใช้ในลักษณะผง (Powder) ซึ่งการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบผงนั้นบ่อยครั้งพบว่าใช้งานค่อนข้างยุ่งยาก อีกทั้งก่อให้เกิดปัญหาที่ตามมา ทั้งนี้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบผงเป็นรูปแบบที่ไม่เหมาะสมกับการใช้งาน เช่น อาจปลิวไปในอากาศได้ง่ายเมื่อโดนลมพัด ส่งผลให้เกิดอันตรายต่อระบบหายใจ อาจปนอยู่ในน้ำในรูปแบบสารแขวนลอยแล้วไหลไปกับน้ำทำให้เกิดความยุ่งยากต่อการกำจัดและแยกเอาผงของไทเทเนียมไดออกไซด์ออกจากระบบ จึงส่งผลต่อระบบนิเวศตลอดจนเกิดมลพิษต่อ

สิ่งแวดล้อมอีกทั้งในขั้นตอนการแยกเอาผงไทเทเนียมไดออกไซด์ออกจากระบบยังสิ้นเปลืองเวลาและค่าใช้จ่าย ดังนั้นนักวิจัยจึงได้พยายามคิดค้นหาวิธีใหม่ๆ เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้งานไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบผงและทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้กว้างขวางมากขึ้น กระบวนการที่ได้รับความสนใจเป็นพิเศษคือ กระบวนการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ลงบนซับสเตรท (Substrates) ต่างๆ เช่น กระจก แก้ว อะลูมิเนียมสแตนเลส พลาสติก พอลิเมอร์ เป็นต้น เพื่อให้อยู่ในลักษณะของแผ่นฟิล์มเคลือบติดอยู่บนซับสเตรท เมื่อไม่นานมานี้ ดร.ชวาลย์และคณะได้นำน้ำยางธรรมชาติเข้มข้น (Concentrated Latex) มาเป็นวัสดุตั้งต้นในการเตรียมแผ่นซับสเตรท เพื่อใช้เป็นตัวยึดหรือตรึงอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ไว้บนแผ่นยางและสามารถนำไปใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกในการกำจัดสีย้อมได้ เนื่องจากยางธรรมชาติมีสมบัติการต้านทานต่อการสึกหรอและฉีกขาดดีมาก อีกทั้งยางธรรมชาติยังเป็นวัสดุที่หาง่ายและมีราคาถูก อย่างไรก็ตามพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมด้วยแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมตามวิธีของดร.ชวาลย์และคณะ ยังมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมต่ำกว่าแบบผงและใช้เวลาในการกำจัดสีย้อมนาน อีกทั้งยังพบว่าเมื่อใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ซ้ำหลายครั้งแผ่นยางผสมนั้นมีการเสถียรภาพไป ดังนั้นเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพและเสถียรภาพของแผ่นยางผสมตามวิธีของดร.ชวาลย์และคณะ ในงานวิจัยนี้จึงสนใจเติมสารเติมแต่ง (Additives) ลงไปโดยเฉพาะสารเติมแต่งจำพวกคาร์บอน เช่น ถ่านกัมมันต์ คาร์บอนแบล็ค ท่อนาโนคาร์บอน และกราฟีน เป็นต้น

กราฟีน (Graphene) เป็นรูปแบบหนึ่งของผลึกคาร์บอน เคียงข้างกับ เพชร, กราไฟท์, ท่อนาโนคาร์บอน อะตอมของคาร์บอนจะเรียงตัวในรูปแบบหกเหลี่ยมรังผึ้งทั่วไป เป็นชั้นหนาเพียงอะตอมเดียวของแร่แกรไฟท์ที่เป็นชั้นๆ กราฟีนมีคุณภาพสูง มีความแข็งแรงมาก ค่า Young's Modulus สูง น้ำหนักเบา เป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าที่ดี และมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง [1] ในโครงการพิเศษนี้จึงนำกราฟีนออกไซด์เพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกลในเรื่องความแข็งแรงให้กับแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้เตรียมแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ด้วยวิธีการที่ง่าย ๆ โดยการผสมน้ำยางธรรมชาติเข้มข้น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa, P25) และกราฟีนออกไซด์เป็นวัสดุตั้งต้น โดยจะทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ ศึกษาสมบัติเชิงความร้อน ศึกษาสมบัติเชิงกล ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม รวมทั้งศึกษาการใช้งานซ้ำของแผ่นยางผสมที่เตรียมขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของการเติมกราฟีนออกไซด์ต่อแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์
2. เพื่อศึกษาและพิสูจน์เอกลักษณ์ของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์
3. เพื่อศึกษาสมบัติเชิงความร้อนและสมบัติเชิงกลของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์
4. เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู รวมทั้งทดสอบการใช้งานซ้ำ

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการเตรียมแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์
2. เตรียมแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์
3. พิสูจน์เอกลักษณ์ของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ ด้วยเทคนิคต่างๆ ได้แก่ เทคนิคการวิเคราะห์สสารด้วยอินฟราเรด (FT-IR) เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
4. ศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA)
5. ศึกษาสมบัติเชิงกลของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ด้วยเทคนิคการทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile Strength)
6. ศึกษาทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู (Methylene blue) และทดสอบการใช้งานซ้ำ

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์มาใช้ในการกำจัดสีย้อมที่ปนเปื้อนในน้ำได้
2. สามารถเพิ่มมูลค่าให้กับน้ำยางธรรมชาติกลายเป็นแผ่นยางที่กำจัดสีย้อมได้
3. ได้รับความรู้และมีความเข้าใจมากขึ้นในการใช้เครื่องมือและเทคนิคต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

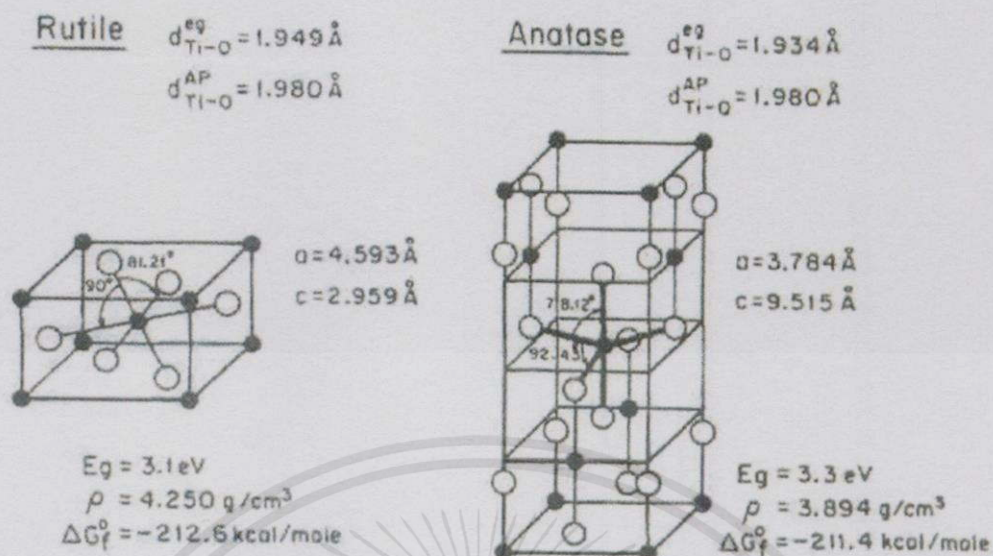
#### 2.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide)

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในกระบวนการบำบัดทางสิ่งแวดล้อมมักอยู่ในรูปออกไซด์และซัลไฟด์ มีหลายชนิดเช่น ซิงค์ออกไซด์(ZnO) ทังสเตนออกไซด์(WO<sub>3</sub>) แคดเมียมซัลไฟด์(CdS) ซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS) เป็นต้น ซึ่งรวมไปถึงไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) ซึ่งถูกพิสูจน์แล้วว่าเหมาะสมในการประยุกต์ใช้เพื่อการบำบัดทางสิ่งแวดล้อม โดยมีข้อดีในการนำมาใช้ประโยชน์ในแง่การบำบัดน้ำเสียคือ มีความคงตัวไม่เปลี่ยนรูปในเมื่อเกิดปฏิกิริยาและไม่เกิดการกัดกร่อน อีกทั้งไม่เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม ไททาเนียมไดออกไซด์ที่นำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียเมื่อแบ่งตามลักษณะโครงสร้างแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบ คือ อนาเทส (anatase) และรูไทล์ (rutile) [2] ซึ่งโครงสร้างผลึกทั้งสองชนิดนี้เป็นแบบเตตระโกนอล (Tetragonal) ส่วนบรูคไคท์จะมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) ชื่อที่ใช้ทางการค้า ได้แก่ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titaniumdioxide) หรือ ไททานิกแอนไฮไดรด์ (Titanic anhydried) โดยมีลักษณะสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์แสดงในตารางที่ 2.1และ2.2ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่นิยมใช้ที่ผลิตโดยบริษัทในเยอรมันคือ Degussa P-25 ซึ่งประกอบด้วย อนาเทส (anatase) 80 % และรูไทล์ (rutile) 20 % โดยมีโครงสร้างผลึกดังรูปที่ 2.1 และ 2.2 [2-3]

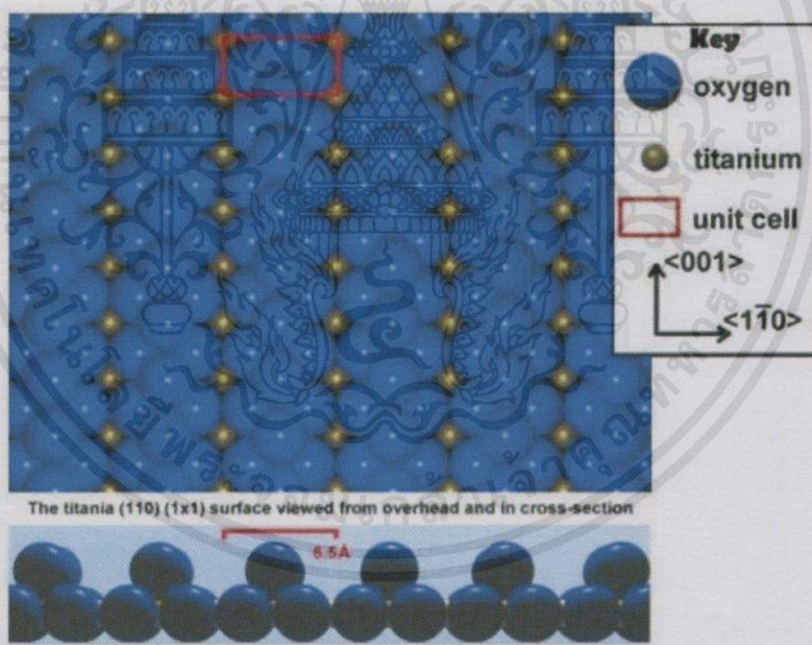
ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ [2]

คุณสมบัติ	ไทเทเนียมไดออกไซด์
สูตรทางเคมี	TiO <sub>2</sub>
ชื่อที่ใช้เรียก	1. Titanium dioxide 2. Titania
พื้นที่ผิว	50 ตารางเมตร/กรัม
ขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ย	20 นาโนเมตร
ความหนาแน่น	130 กรัม/ลิตร
มวลโมเลกุล	79.9 กรัม/โมล
ความถ่วงจำเพาะ	0.7 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด รูไทล์ และ อนาเทส [2]



รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างไทเทเนียมไดออกไซด์แบบเตตระโกนอล [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ระหว่างรูไทล์ และอนาเทส [3]

Property	Rutile	Anatase
Crystalline form	tetragonal	tetragonal
Band gap energy (eV)	3.020	3.200
Hardness (Mohs)	6.0-7.0	5.5-6.0
Density (g/cm <sup>3</sup> )	4.250	3.894
Gibbs free energy, $\Delta G_f^0$ (kcal/mole)	-212.60	-211.40
Lattice constant, a (Å)	4.593	3.784
Lattice constant, c (Å)	2.959	9.515
Melting point	1858 °C	Changes to rutile at high temperature ~ 800 °C



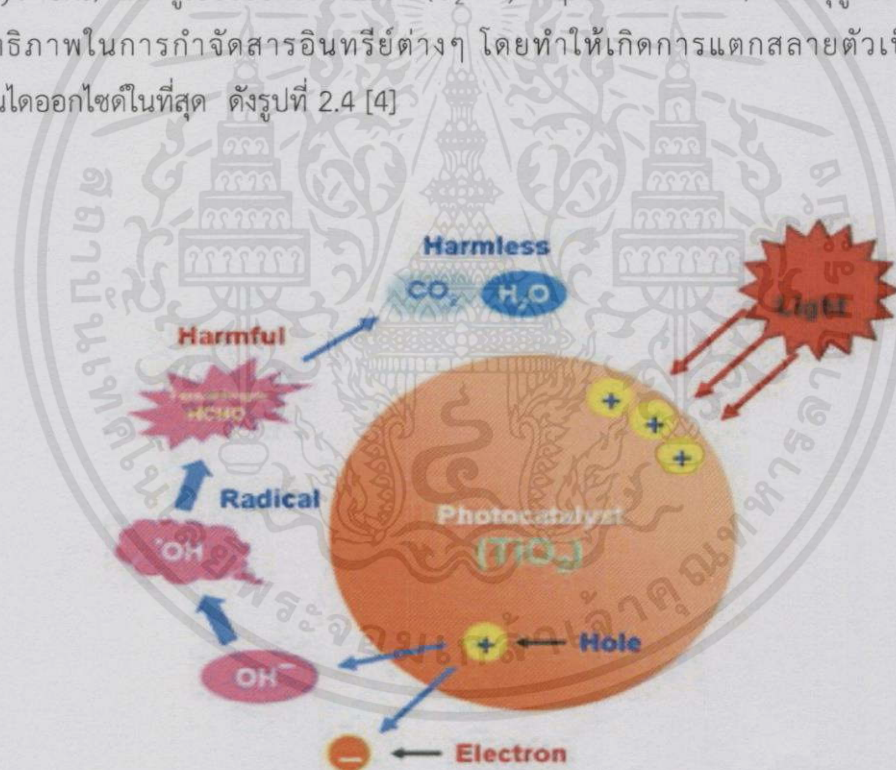
รูปที่ 2.3 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ (ก) อนาเทส (ข) รูไทล์ (ค) บรูคโคท [3]

ไทเทเนียมไดออกไซด์มีช่องว่างพลังงาน 3.2 eV สำหรับโครงสร้างผลึกอนาเทส, 3.0 eV สำหรับโครงสร้างผลึกรูไทล์และ ~3.2 eV สำหรับบรูคโคท โดยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบอนาเทสจะมีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสได้ดีกว่าโครงสร้างแบบรูไทล์ไม่ว่าจะเนื่องจากการกลับมารวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนกับโฮล เกิดได้ยากกว่าโครงสร้างแบบรูไทล์ ในขณะที่โครงสร้างแบบรูไทล์มีค่ารีแฟรคทีฟอินเดกซ์ (Refractive Index) สูงกว่าโครงสร้างแบบ

อนาเทส และมีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง จึงเหมาะที่จะใช้เป็นตัวเติมเพื่อสะท้อนแสง โดยทั่วไปแล้ว โครงสร้างผลึกแบบอนาเทสและรูไทล์เป็นที่นิยมนำมาศึกษาสำหรับการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ โดยโครงสร้างผลึกอนาเทสให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกรูไทล์ โดยทั้งนี้มีส่วนแปรหลายอย่างที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาของแต่ละโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ ได้แก่ พื้นที่ผิว การกระจายตัวของรูพรุน และขนาดของอนุภาคผลึก

### 2.1.1 หลักการทำงานของไทเทเนียมไดออกไซด์

หลักการพื้นฐานของเทคนิคโฟโตคะตะลิสต์ เริ่มจากการที่แสงอัลตราไวโอเล็ตใกล้ที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 390 นาโนเมตร ไปกระตุ้นอิเล็กตรอนที่แถบเวเลนซ์ (Valence - Band) ของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งเป็นสารประกอบกึ่งตัวนำ จึงสามารถทำปฏิกิริยากับโมเลกุลน้ำที่ผิว และเหนี่ยวนำให้เกิดเป็นสารอนุมูลอิสระที่มีพลังออกซิไดซ์สูงมาก เช่น ไฮดรอกซิลไอออน ( $\text{OH}^-$ , Hydroxyl Ions) และซูเปอร์ออกไซด์ไอออน ( $\text{O}_2^-$ , Superoxide Ions) ซึ่งอนุมูลอิสระเหล่านี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ โดยทำให้เกิดการแตกสลายตัวเป็นน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ในที่สุด ดังรูปที่ 2.4 [4]

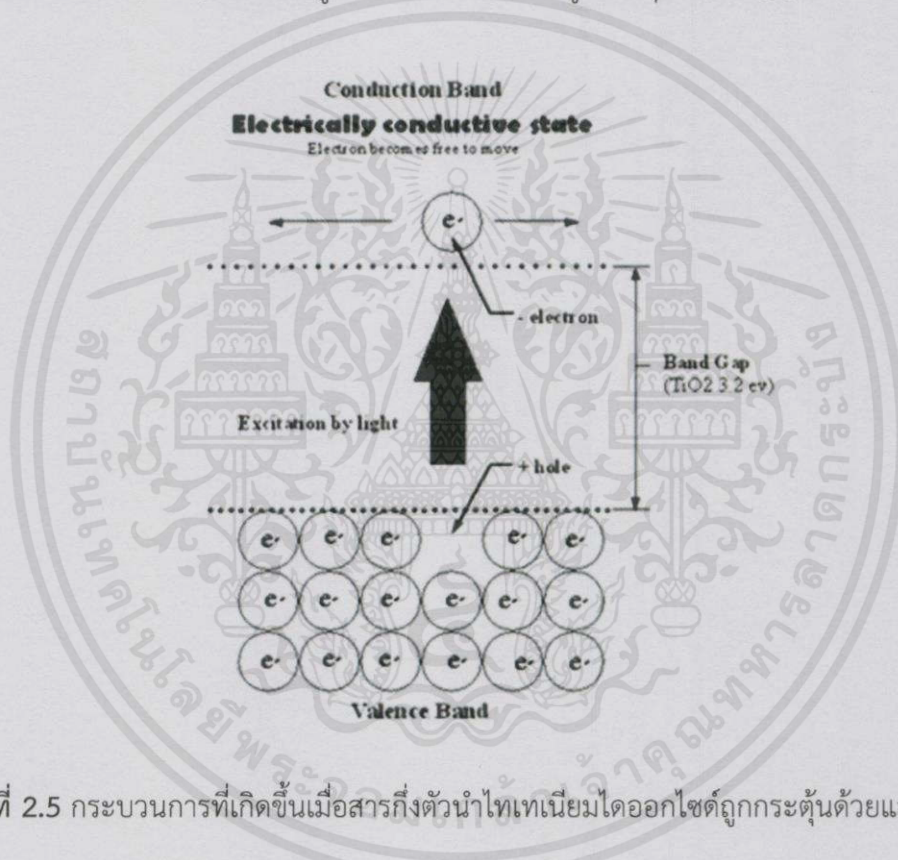


รูปที่ 2.4 การเกิดปฏิกิริยาของไทเทเนียมไดออกไซด์กับแสง [4]

### 2.1.2 คุณลักษณะของสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์สำหรับปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม

เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีตำแหน่งที่ว่างของออกซิเจนในโครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์จึงจัดได้ว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วมที่เป็นสารกึ่งตัวนำนั้นจะมีความสามารถในการดูดซับสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยา 2 ชนิดไป

พร้อมๆกัน ซึ่งสามารถก่อให้เกิดทั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation and reduction reactions) โดยการกระตุ้นด้วยการดูดกลืนโฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าค่าพลังงานแบนด์แกป (Band gap energy) ความสามารถของสารกึ่งตัวนำที่จะถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปยังสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาที่ถูกดูดซับไว้ นั้นขึ้นอยู่กับตำแหน่งของพลังงานแบนด์แกปของสารกึ่งตัวนำและตำแหน่งของศักย์พลังงานในการเกิดรีดอกซ์ (Redox) ของสารที่ถูกดูดซับ โดยปกติแล้วระดับของพลังงานที่ต่ำที่สุดของคอนดักชันแบนด์ (Conduction band) จะเป็นระดับของศักย์พลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันด้วยอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น (Excited electron) ในทางกลับกัน ระดับของพลังงานที่สูงที่สุดของวาเลนซ์แบนด์ (Valence band) จะเป็นระดับศักย์พลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยโฮล (Hole) ที่เหลืออยู่หลังจากที่อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นไปแล้ว [5]



รูปที่ 2.5 กระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยแสง [5]

สารกึ่งตัวนำแตกต่างจากโลหะคือ มีความไม่ต่อเนื่องของระดับพลังงาน ทำให้เกิดเป็นช่องว่างของระดับพลังงานหรือแบนด์แกป ซึ่งส่งผลให้เกิดการแยกจากกันของอิเล็กตรอนและโฮลหลังจากที่ถูกกระตุ้นด้วยแสง ทำให้ทั้งอิเล็กตรอนและโฮลมีระยะเวลาเพียงพอในการเคลื่อนที่ผ่านไปยังพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและก่อให้เกิดปฏิกิริยาในที่สุด ความแตกต่างของโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดอนาเทสและรูไทล์ทำให้เกิดความแตกต่างของความหนาแน่นและโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ ส่งผลให้มีค่าพลังงานแบนด์แกปแตกต่างกันคือ 3.20 eV สำหรับโครงสร้างผลึกอนาเทส และ 3.02 eV สำหรับโครงสร้างผลึกรูไทล์ ดังนั้นจึงทำให้ความสามารถในการดูดกลืนแสงเริ่มเกิดขึ้นในช่วงความยาวคลื่นของแสงที่แตกต่างกัน โดยโครงสร้างผลึกอนาเทสสามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 384 นาโนเมตร ในขณะที่โครงสร้างผลึกรูไทล์สามารถดูดกลืนแสงในช่วง

ความยาวคลื่นต่ำกว่า 410 นาโนเมตร ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม [6]

โดยทั่วไปแล้วการนำไทเทเนียมไดออกไซด์มาใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสส่วนใหญ่มักใช้ในรูปแบบผง (Powder) ซึ่งการนำไทเทเนียมไดออกไซด์ลักษณะผงมาใช้งานนั้นจะพบว่าค่อนข้างใช้งานยากอีกทั้งยังก่อให้เกิดปัญหาต่างๆตามมา

ดังนั้นในโครงการพิเศษนี้จึงได้ศึกษาหาวัสดุที่นำมาใช้เป็นซับสเตรทที่มีสมบัติดีกว่าการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบเป็นผง ผู้วิจัยสนใจในการนำน้ำยางธรรมชาติชนิดเข้มข้นเป็นวัสดุตั้งต้นในการเตรียมแผ่นซับสเตรทเพื่อใช้เป็นตัวยึดหรือตรึงอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ไว้บนแผ่นยางเนื่องจากยางธรรมชาติมีสมบัติต้านทานต่อแรงดึงสูง มีความเหนียวและความเครียด ณ จุดขาดสูงมาก มีความต้านทานต่อการสึกหรอและฉีกขาดดีมาก อีกทั้งยางธรรมชาติเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายและมีราคาถูก

## 2.2 ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis)

### 2.2.1 หลักการของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส (Fundamental of Photocatalysis Reaction)

กระบวนการโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic Process) เป็นการเร่งปฏิกิริยาโดยการใช้ตัวเร่ง (Catalyst) ซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการกระตุ้นด้วยแสง ตัวเร่งจะทำหน้าที่ลดพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยา หลักการทำงานของกระบวนการโฟโตคะตะไลติก คือ การให้พลังงานแสงเข้าไปในระบบเพื่อเอาชนะค่าแถบช่องว่างพลังงาน (Energy band gap) ซึ่งเป็นค่าความแตกต่างระหว่างพลังงานของแถบการนำไฟฟ้า (Conduction band) กับ แถบเวเลนซ์ (Valence band) เมื่อพลังงานที่ให้แก่ระบบมีค่ามากกว่าค่าแถบพลังงานจะมีการสร้างอิเล็กตรอนที่มีประจุ (Electron hole pairs) บนผิวของสารกึ่งตัวนำ สำหรับกระบวนการโฟโตคะตะไลติกแสงที่ให้ในระบบเป็นแสงอัลตราไวโอเล็ต [7]

องค์ประกอบของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสได้แก่ ตัวเร่ง (Catalyst) พลังงานแสงซึ่งมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับพลังงานโฟตอนของตัวเร่ง น้ำ และออกซิเจนหรือตัวออกซิแดนท์ (Oxidants) อื่นๆ

### 2.2.2 พลังงานแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า การฉายแสงในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกนั้น เป็นการให้พลังงานกับระบบในรูปแบบของพลังงานโฟตอน (Photon Energy) มากพอที่จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ ซึ่งพลังงานดังกล่าวนี้เรียกว่า พลังงานกระตุ้น (Activation Energy) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$E = h\nu = hc/\lambda$$

เมื่อ	E	คือ	พลังงานควอนตัม (Quantum Energy) , จูล
	h	คือ	ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's Contant) = $6.625 \times 10^{-34}$ , จูล-วินาที
	$\nu$	คือ	ความถี่ของคลื่นแสง, เฮิรตซ์ หรือ วินาที <sup>-1</sup>
	$\lambda$	คือ	ความยาวคลื่นแสง, นาโนเมตร
	c	คือ	ความเร็วของคลื่นแสง = $2.997 \times 10^8$ , เมตร/วินาที

ตารางที่ 2.3 ความยาวคลื่นในช่วงต่างๆ [7]

สเปกตรัม	ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)
Visible Radiation (Light)	380-750
Ultraviolet	100-400
UV-A	315-400
UV-B	280-315
UV-C	100-280

ตารางที่ 2.3 เป็นตารางที่แสดงสเปกตรัมของรังสียูวี สำหรับในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก นั้นจะเป็นที่สนใจอย่างมาก ความยาวคลื่นของแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) อยู่ในช่วง 100- 400 นาโนเมตร สำหรับความยาวคลื่นแสงที่คนมองเห็น (Visible หรือ แสงขาว) อยู่ในช่วง 380-750 นาโนเมตร รังสียูวีนี้ แบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง คือ

- 1) คลื่นยาว (Long Wave UV, UV-A) อยู่ในช่วง 400 – 315 นาโนเมตร
- 2) คลื่นกลาง (Middle Wave UV, UV-B) อยู่ในช่วง 315 – 280 นาโนเมตร
- 3) คลื่นสั้น (Short Wave UV, UV-C) อยู่ในช่วง 280 – 100 นาโนเมตร

ความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า 200 นาโนเมตร มีความสำคัญน้อยมาก เพราะรังสีอยู่ในช่วง Vacuum UV ซึ่งจะถูกลดทอนในอากาศจนหมดในช่วงระยะทางสั้นๆ ที่แสงเดินทาง

ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่ใช้สารไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวแคตาลิสต์นั้นเนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีพลังงานแบนด์แกปประมาณ 3.2 โวลต์ ดังนั้นการให้พลังงานภายในระบบจึงต้องให้พลังงานมากกว่าหรือเท่ากับพลังงานแบนด์แกป ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจึงจะเกิดขึ้นได้ ซึ่งช่วงของแสง UV ที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 400 นาโนเมตร จะให้ค่าพลังงานที่มากกว่าหรือเท่ากับพลังงานแบนด์แกปของไทเทเนียมไดออกไซด์ แต่เนื่องจากแสงอาทิตย์ที่ส่งมายังพื้นผิวโลกมีช่วงแสงที่เป็น UV ในปริมาณน้อยมาก คือ เฉพาะช่วง 350 –400 นาโนเมตรเท่านั้น ปัจจุบันจึงมีงานวิจัยที่

มุ่งเน้นการปรับปรุงไทเทเนียมไดออกไซด์ให้มีความสามารถที่จะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงแสงอาทิตย์ เพื่อลดการใช้หลอดไฟ UV ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก

### 2.2.3 ชนิดของโฟโตคะตะไลซิส

โฟโตคะตะไลซิส สามารถแยกได้ 2 ประเภท เมื่อพิจารณาจากสถานะของตัวแคตตาลิสต์ ดังนี้

1) โฟโตคะตะไลซิสแบบสถานะเดียว (Homogeneous Photocatalysis) เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวแคตตาลิสต์ ซึ่งมีสถานะเดียวกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด (โดยทั่วไปแล้วจะเป็นของเหลว) เช่น การย่อยสลาย 2,4 Dinitrofluorene โดยใช้ UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

2) โฟโตคะตะไลซิสแบบสถานะต่าง (Heterogeneous Photocatalysis) เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวแคตตาลิสต์ซึ่งมีสถานะต่างกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัดเช่น การย่อยสลาย 2-Chlorophenol โดยใช้ UV/TiO<sub>2</sub>

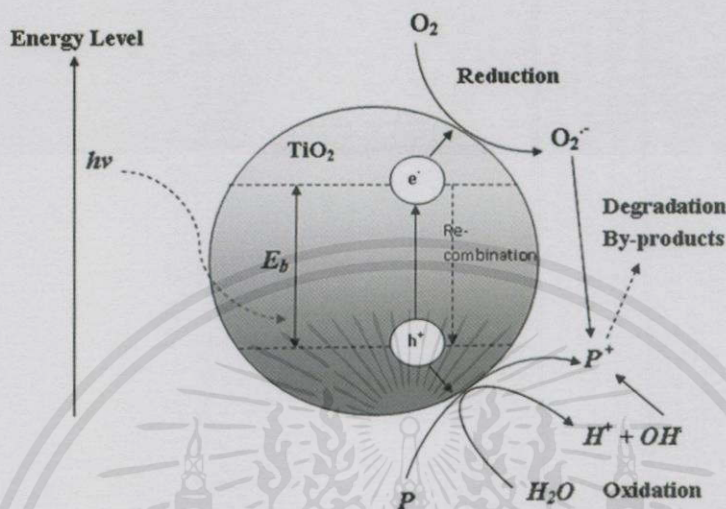
### 2.2.4 ชนิดของตัวแคตตาลิสต์

สารที่ใช้เป็นตัวแคตตาลิสต์ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ได้แก่

- 1) โลหะตัวนำ (Transition Metal) เช่น ทองแดง โคโรเนียม นิกเกิล เป็นต้น
- 2) สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) สังกะสีออกไซด์ (ZnO) เป็นต้น

องค์ประกอบของโลหะตัวนำและสารกึ่งตัวนำ ประกอบด้วยวาเลนซ์แบนด์ (Valence Band) และคอนดักชันแบนด์ (Conduction Band) ในโลหะตัวนำจะมีวาเลนซ์แบนด์และคอนดักชันแบนด์ติดกัน แต่ในสารกึ่งตัวนำวาเลนซ์แบนด์และคอนดักชันแบนด์จะไม่ติดกัน โดยเกิดเป็นช่องว่างซึ่งเรียกว่าแบนด์แกป (Band Gap) เมื่ออิเล็กตรอน (Electron, e<sup>-</sup>) ที่อยู่ในวาเลนซ์แบนด์ได้รับพลังงานโฟตอนจากแสง (hν) อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังคอนดักชันแบนด์ ในขณะที่วงวาเลนซ์แบนด์จะเกิดโฮล (Hole, h<sup>+</sup>) ซึ่งเป็นประจุบวกสามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระในวาเลนซ์แบนด์ ส่วนคอนดักชันแบนด์ อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่มาจากวาเลนซ์แบนด์เคลื่อนที่อย่างเป็นอิสระทั่วคอนดักชันแบนด์เช่นกัน ปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน - โฮล (Electron - Hole Pairs, e<sup>-</sup>/h<sup>+</sup>) สามารถเคลื่อนที่ไปมาระหว่างวาเลนซ์แบนด์และคอนดักชันแบนด์ได้ง่ายและรวดเร็ว เพราะไม่มีแบนด์แกป เหตุนี้จึงเป็นสาเหตุให้ e<sup>-</sup>/h<sup>+</sup> รวมตัวกันใหม่ได้ง่าย สำหรับโลหะตัวนำ ในทางตรงกันข้ามนั้นการรวมตัวกันใหม่ของ e<sup>-</sup>/h<sup>+</sup> ในสารกึ่งตัวนำเกิดได้ยาก เพราะว่ามีแบนด์แกปคั่นอยู่ ทำให้คู่อิเล็กตรอน e<sup>-</sup>/h<sup>+</sup> แยกจากกันได้นาน ข้อแตกต่างของพลังงานแบนด์แกปของโลหะตัวนำ สารกึ่งตัวนำและฉนวนแยกได้ยาก ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายปัจจัย ได้แก่ ระดับพลังงานแบนด์แกป ระดับพลังงานคอนดักชันแบนด์ และระดับพลังงานวาเลนซ์แบนด์

ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสในน้ำประกอบด้วยแสงที่ส่องผ่านน้ำไปยังตัวแคตาไลสต์ซึ่งมีพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ที่สูงกว่าพลังงานแบนด์แกปของตัวแคตาไลสต์ ซึ่งอิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นจากวาเลนส์แบนด์ ให้เคลื่อนที่ไปยังคอนดักชันแบนด์ ผลคือ ทำให้เกิด  $e^-/h^+$  ซึ่งจะวิ่งกระจายอยู่ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.6 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสบนสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ [8]

ปฏิกิริยาที่เกิดบนผิวคอนดักชันแบนด์และปฏิกิริยาที่เกิดในสารละลายจะเกิดขึ้นดังนี้ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนจากคอนดักชันแบนด์ไปยังตัวรับอิเล็กตรอน (Electron Acceptor) ในสารละลายจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ส่วนอีกด้านหนึ่ง คือ วาเลนส์แบนด์ซึ่งมี  $h^+$  จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) โดยตัวสารละลายทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน (Electron Donor) ในสภาวะปกติความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของอิเล็กตรอนที่คอนดักชันแบนด์ไม่มีศักยภาพพอที่จะบำบัดสารอินทรีย์ได้ แต่เนื่องจากในระบบบำบัด มีออกซิเจนละลายน้ำอยู่ ( $\text{O}_2$ ) ออกซิเจนนี้จะเป็นตัวรับ  $e^-$  เกิดปฏิกิริยารีดักชัน ได้เป็น Superoxide Radical ( $\text{O}_2^{\cdot-}$ ) ซึ่งเป็นตัวออกซิแดนซ์ที่แรงมาก สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆได้ แต่ในทางตรงกันข้าม  $h^+$  ที่วาเลนส์แบนด์เป็นตัวออกซิแดนซ์ที่แรงมากเช่นกัน [8]

## 2.3 กราฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide)

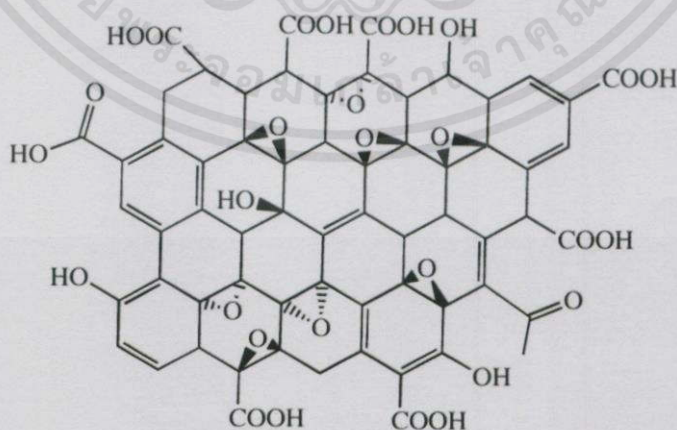
แกรฟีน หรือ กราฟีน เป็นรูปแบบหนึ่งของผลึกคาร์บอน เคียงข้างกับ เพชร, กราไฟต์, ท่อนาโนคาร์บอนและฟูลเลอร์รีน โดยที่อะตอมของคาร์บอนจะเรียงตัวในรูปแบบหกเหลี่ยมรั้งฝั่งทั่วไป กราฟีนมีลักษณะเป็นชั้นหนาเพียงอะตอมเดียวของแร่แกรไฟต์ที่เป็นชั้นๆ กราฟีนที่มีคุณภาพสูง มีความแข็งแรงมาก น้ำหนักเบา (แกรฟีนขนาด 1 ตารางเมตรมีน้ำหนักเพียง 0.77 มิลลิกรัมเท่านั้น) เกือบโปร่งใส และเป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าที่ดี [9]

### 2.3.1 การสังเคราะห์กราฟีน

กราฟีนถูกสังเคราะห์ขึ้นครั้งแรกด้วยวิธี Micromechanical exfoliation หรือการลอกชั้นบางๆ ของกราฟีนออกจากแกรไฟต์ วิธีนี้จะได้กราฟีนในปริมาณน้อย หลักการในการสังเคราะห์ กราฟีนด้วยวิธีทางเคมี เริ่มต้นด้วยการใช้กรดแก่หรือตัวออกซิเดนต์มาออกซิไดส์แกรไฟต์ได้เป็น แกรไฟต์ออกไซด์ ซึ่งกลุ่มของออกไซด์, ไฮดรอกซิล, คาร์บอกซิลิกและคาร์บอนิลจะเข้าไปแทรกและเกาะเต็มระนาบพื้นผิวในแต่ละชั้นของแกรไฟต์ ทำให้แต่ละชั้นของแกรไฟต์กว้างขึ้นและลดแรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างชั้น หากแกรไฟต์ออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยแรงเพียงชนิดเดียวเช่นด้วยการใช้คลื่นความถี่สูง (Sonication) ก็สามารถหลุดลอกออกเป็น “กราฟีนออกไซด์” (Graphene oxide) ซึ่งมีสมบัติเป็นไฮโดรฟิลิก ละลายได้ดีในน้ำ แต่ไม่นำไฟฟ้า และสามารถรีดิวซ์ด้วยสารรีดักแทนซ์เช่นไฮดราซีนไฮเดรต ได้เป็น “รีดิวซ์กราฟีน” (Reduced Graphene oxide) ซึ่งสามารถรองและกระจายตัวได้ดีบนวัสดุสารรองรับ



รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการสังเคราะห์กราฟีน (1) ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันได้แกรไฟต์ออกไซด์ (2) การใช้คลื่นความถี่สูง (Sonication) ในน้ำทำให้ชั้นของแกรไฟต์ออกไซด์หลุดลอกได้กราฟีนออกไซด์ [10]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.8 แบบจำลองใหม่ของแกรไฟต์ออกไซด์ที่มีกลุ่มออกไซด์เกาะบนผิวและขอบ [10]

ถ้านำกราไฟต์ (Graphite) มาลอกออกเป็นชั้นๆ จนเหลือความหนาเพียง 1 อะตอม เราจะได้อะตอมคาร์บอน นอกนั้นก็ค้นพบว่าโครงสร้างทางคาร์บอนที่ได้มีการค้นพบก่อนหน้านี้ ล้วนมีพื้นฐานมาจากกราไฟต์ทั้งนั้น ไม่ว่าจะเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon nanotube, CNT) หรือบั๊กกี้บอล (Bucky ball) [11]

- ถ้าเราเอากราไฟต์มาห่อให้เป็นลูกกลมๆ เราจะได้บั๊กกี้บอล (Bucky ball)
- ถ้าเราเอากราไฟต์มาม้วนเป็นแท่งกลมๆ เราจะได้ท่อคาร์บอนนาโน (Carbon nanotube, CNT)
- ถ้าเราเอากราไฟต์มาซ้อนกันเป็นชั้นๆ เราจะได้กราไฟต์ (Graphite) ซึ่งเป็นวัสดุในถ่านหรือไส้ดินสอ



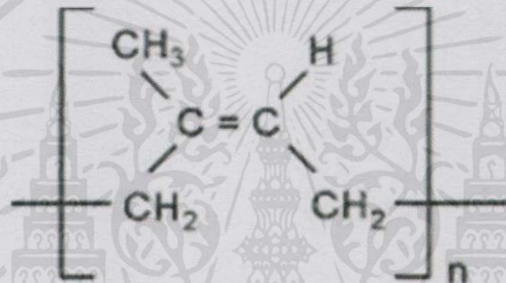
รูปที่ 2.9 โครงสร้างกราไฟต์ในแนวระนาบ 2 มิติ (2 dimension ; 2-D) [11]

ปัจจุบันได้มีการนำกราไฟต์มาใช้ประโยชน์กันอย่างกว้างขวางเพราะความสามารถทางการนำไฟฟ้า (เนื่องจากโครงสร้างมีอิเล็กตรอนบนพื้นผิวมาก โดยคาร์บอนที่ต่อระหว่างวงจับกับคาร์บอนอะตอมอื่นแค่ 3 แขนเท่านั้น จึงทำให้เหลือ Valent Electron อีกหนึ่งตัวซึ่งจะเคลื่อนที่ไปมาได้) ซึ่งมีความหนาแน่นมากกว่าหลอดคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบวงเดี่ยวมากกว่าสองเท่า ดังนั้นจึงมีการนำ กราไฟต์มาประยุกต์ใช้กับงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์หลายด้าน อาทิเช่น ทรานซิสเตอร์ (Transistor) อุปกรณ์บันทึกความจำ (Memory device) เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) และเซนเซอร์ทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical sensor) เป็นต้น [11]

## 2.4 น้ำยางธรรมชาติ

น้ำยาง (Latex) คือวัสดุพอลิเมอร์ที่มีต้นกำเนิดจากของเหลวของพืชบางชนิด ซึ่งมีลักษณะเป็นของเหลวสีขาว คล้ายน้ำมัน มีสมบัติเป็นคอลลอยด์ อนุภาคเล็ก มีตัวกลางเป็นน้ำ ส่วนประกอบของน้ำยางสด แบ่งได้เป็น 2 ส่วนหลักคือ

1. ส่วนที่เป็นยาง (Dry Rubber Content, DRC) เป็นอนุภาคยางของไอโซพรีนที่เชื่อมต่อกัน ประมาณ 2000 - 5000 หน่วยต่อ 1 โมเลกุล
2. ส่วนที่ไม่ใช่ยาง (Non Rubber Content) เป็นส่วนประกอบอื่นๆ ทั้งหมดที่ไม่ใช่ยาง มีสารประกอบต่างๆ หลายชนิดเช่น น้ำตาล โปรตีน ไขมัน คาโรทีนอยด์ เกลือแร่ เอนไซม์และสารประกอบ ไนโตรเจน เป็นต้น สัดส่วนของส่วนประกอบของน้ำยางสด แสดงในตารางที่ 2.4 [12]



รูปที่ 2.10 สูตรโครงสร้างของยางธรรมชาติ (cis -1,4-polyisoprene, IR) [13]

ตารางที่ 2.4 แสดงสัดส่วนของส่วนประกอบของน้ำยางสด [13]

ส่วนประกอบ	สัดส่วน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
ปริมาณของแข็งทั้งหมด (ส่วนที่เป็นเนือยางและไม่ใช่นี้อยาง)	86
โปรตีน	1
สารพวกลิพิด ไขมัน	3
พวกโลหะ เช่น แมกนีเซียม ฟอสฟอรัส คอปเปอร์	0.5
น้ำ	10

ปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำยางสด จะมีส่วนที่เป็นเนือยางแห้ง (dry rubber) ประมาณ 33% กับ ส่วนที่ไม่ใช่ยาง (non rubber) 3%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.1 การรักษาสภาพน้ำยางสด [15]

น้ำยางสดสามารถคงสภาพการเป็นของเหลวได้เนื่องจากปัจจัย 2 ประการ คือ

1. ส่วนประกอบของโปรตีนที่ดูดซับอยู่รอบๆ ผิวของอนุภาคยางหรือ โปรตีนเป็นชั้นห่อหุ้ม (hydrated protein envelop) อนุภาคยางไว้จึงมีความสำคัญต่อสถานะความคงตัวของเหลวของน้ำยาง เพราะโปรตีนจะป้องกันการรวมตัวกันของอนุภาคยาง ถ้ามีการสูญเสียน้ำ (dehydrated) ในชั้นของโปรตีนที่ห่ออนุภาคยาง ซึ่งอาจเกิดจากการเติมแอลกอฮอล์หรือสารบางอย่างลงในน้ำยาง ทำให้อนุภาคยางมา รวมตัวกันเป็นก้อนยาง (coagulum) น้ำยางก็จะสูญเสียความคงตัว ไม่เป็นของเหลว
2. ประจุลบที่อยู่รอบๆ อนุภาคยาง ซึ่งก่อให้เกิดการผลักกันระหว่างอนุภาคยาง ก็ช่วยรักษาสถานะการกระจายตัวของอนุภาคยางด้วย ทำให้น้ำยางยังเป็นของเหลวอยู่ ถ้าทำให้ประจุลบลดลง อนุภาคจะรวมตัวกันทำให้มีขนาดใหญ่ ทำให้การกระจายตัวของอนุภาคยางค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งเกิดเป็นก้อนยาง (coagulum)

### 2.4.2 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ [16]

1. ความยืดหยุ่น (elasticity) ยางธรรมชาติที่คงรูปแล้วจะมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกมากกระทำกับยางหมดไป ยางจะกลับคืนสู่สภาพและขนาดเดิม ได้อย่างรวดเร็ว
2. ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีความเป็นระเบียบสูงจึงทำใหยางธรรมชาติสามารถแตกผลึกได้ง่ายเมื่อถูกยืด ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นจะช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับยาง
3. ความทนทานต่อการฉีกขาด (tear strength) เนื่องจากยางธรรมชาติสามารถแตกผลึกได้เมื่อถูกยืด ดังนั้นยางธรรมชาติจึงมีความทนทานต่อการฉีกขาดสูงมากทั้งที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูง การเติมสารตัวเติมเสริมแรงลงไปจะทำให้ค่าความทนทานต่อการฉีกขาดของยางสูงขึ้น
4. ความเสียดทาน (friction) และความต้านทานต่อการขัดถู (abrasion resistance) ความเสียดทานและการสึกหรอเป็นสิ่งที่สัมพันธ์กันเนื่องจากการสึกหรอเป็นกระบวนการสูญเสียเนื้อวัสดุไปในระหว่างการเกิดความเสียดทานหรือการขัดถู ถ้าไม่มีความเสียดทานเกิดขึ้น ความสึกหรอก็จะไม่เกิด
5. ความทนทานต่อของเหลวและสารเคมี (liquid and chemical resistance) เนื่องจากองค์ประกอบของยางธรรมชาติเป็นสารไฮโดรคาร์บอนไม่มีขั้ว ดังนั้นยางดิบจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วเช่น เบนซีน เฮกเซน และโทลูอีน เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นให้เพื่อเป็นสื่อกลางเผยแพร่ข้อมูลเชิงวิชาการเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้

ความสามารถในการละลายจะลดลงเมื่อเกิดการคงรูปเนื่องจากการเชื่อมโยงทางเคมีของโมเลกุลเกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ ในยางคงรูปจะไปขัดขวางกระบวนการละลายของยาง ยางคงรูปจึงเกิดการบวมตัวในสารละลายเท่านั้น อย่างไรก็ตามการบวมตัวของยางจะทำให้สมบัติเชิงกลด้อยลง ด้วยเหตุนี้ยางธรรมชาติจึงไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมหรือตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วอื่นๆ แต่ยางจะทนทานต่อของเหลวที่มีขั้วเช่น อะซิโตนหรือแอลกอฮอล์ นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังทนต่อต่างและกรดเจือจางได้ดี แต่ไม่ทนต่อกรดไนตริกและกรดกำมะถันเข้มข้น

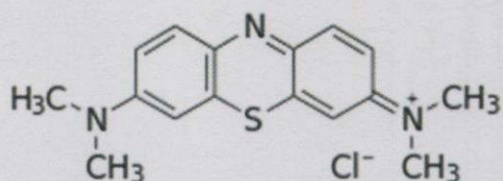
6. การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน โอโซนและแสงแดด (aging properties) เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่มาก ทำให้ยางว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (ปฏิกิริยาออกซิเดชัน) โดยมีแสงแดดหรือความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นยางธรรมชาติจึงถูกออกซิไดส์ได้ง่าย ด้วยเหตุนี้ในระหว่างการผลิตผลิตภัณฑ์จึงต้องมีการเติมสารเคมีบางชนิด (สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (anti-degradant) และไข (wax)) ลงไปเพื่อยืดการใช้งานยางธรรมชาติ

## 2.5 สีย้อม

ปัจจุบันสีอินทรีย์สังเคราะห์ ถูกใช้อย่างแพร่หลายในกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมสารเคมีที่เกี่ยวกับสี รวมทั้งกระบวนการผลิตสีย้อม โดยกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมได้จำแนกสีย้อมตามวิธีใช้ออกเป็น 11 ประเภท ซึ่งสีย้อมแต่ละประเภทจะมีสูตรโครงสร้างทางเคมีสมบัติของสีย้อม ตลอดจนวิธีใช้ต่างกันและจากกระบวนการผลิต พบว่า ประมาณ 10-15% ของสีย้อมจะถูกปล่อยไปสู่สิ่งแวดล้อมในระหว่างกระบวนการย้อมสีสารตั้งต้นต่างๆ เช่น เส้นใยสิ่งทอที่ได้จากธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ พลาสติก หนัง กระดาษ น้ำมันถ่านหิน ขี้ผึ้ง และที่สำคัญคืออาหารและเครื่องสำอาง สีย้อมบางชนิดพบว่าเป็นสารพิษ หรือสารก่อมะเร็ง เป็นต้นเหตุของโรคมะเร็ง และเมื่อได้รับสะสมไปเป็นเวลานานจะก่อให้เกิดโรคมะเร็ง [17-18]

## 2.6 เมทิลีนบลู (Methylene Blue, MB)

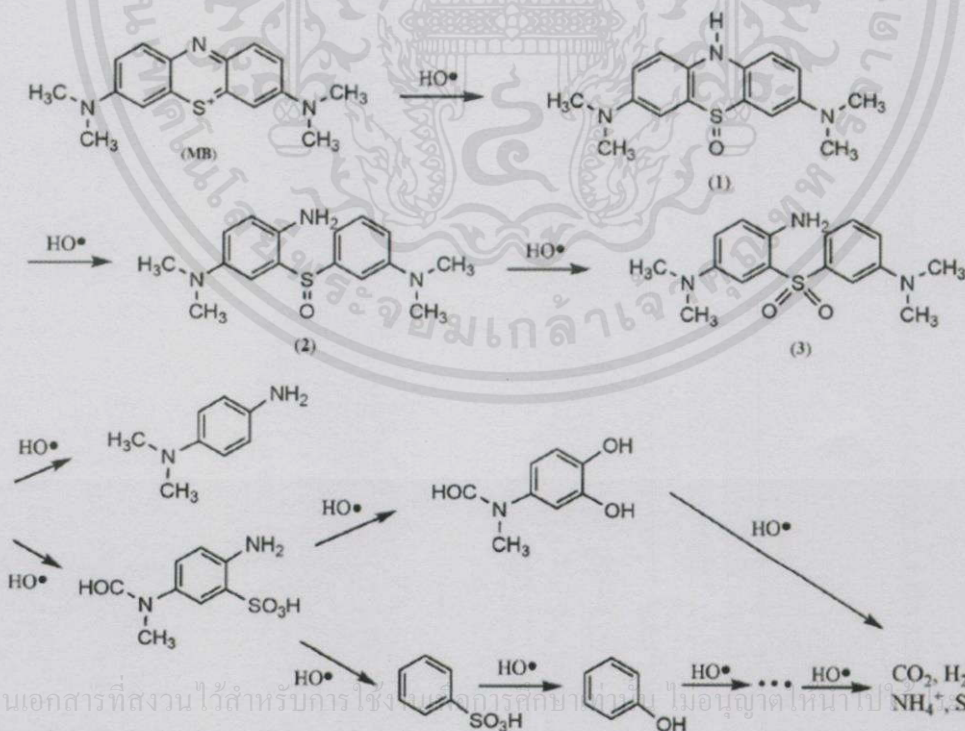
เมทิลีนบลูจัดอยู่ในสารประกอบประเภทเฮเทอโรไซคลิก อะโรมาติก สูตรโมเลกุลคือ  $C_{16}H_{18}N_3S$  ถูกนำมาใช้งานทั้งทางชีววิทยาและทางเคมี ที่อุณหภูมิห้องจะมีสถานะเป็นของแข็ง มีลักษณะเป็นผงสีเขียวเข้ม เมื่อนำมาละลายในน้ำจะเป็นสีฟ้า ในโครงสร้างจะประกอบด้วยผลึกน้ำ 3 โมเลกุลต่อโมล เมทิลีนบลูใช้เป็นส่วนผสมในสีย้อมผ้า ถ้ามนุษย์ได้รับเมทิลีนบลูเข้าสู่ร่างกายมากเกินไปจะมีอาการแสบร้อนในปากหรือท้อง คลื่นไส้ อาเจียน เจ็บหน้าอก แน่นหน้าอก หายใจเร็ว เกิดอาการวิตกกังวลและระคายเคืองต่อระบบทางเดินปัสสาวะ[19-20] โครงสร้างของสีย้อมเมทิลีนบลูดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของเมทิลีนบลู [21]

### 2.6.1 กลไกการสลายตัวของเมทิลีนบลูในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก

เมื่อไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกแล้วจะได้ไฮดรอกซิลแรดิคัล ( $\text{OH}^\bullet$ ) โดยไฮดรอกซิลแรดิคัลจะเข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของเมทิลีนบลูได้เป็นซัลฟอกไซด์ (Sulfoxide) (1) และจะเกิดการเปิดวงที่ตำแหน่ง N heteroatom แล้วได้เป็นอนิลีน (Aniline) (2) จากนั้นไฮดรอกซิลแรดิคัลเข้าทำปฏิกิริยาเข้าไปเรื่อยๆ ได้เป็นซัลโฟน (Sulfone) (3) จากการเข้าทำปฏิกิริยากันอย่างรุนแรงของไฮดรอกซิลแรดิคัลจะทำให้วงเบนซีนิก (Benzenic rings) แยกออกเป็น 2 วง เกิดเป็นกรดซัลโฟนิก (Sulfonic acid) (4) และสารประกอบฟีนอลิก (Phenolic compound) (5) ในที่สุดสารประกอบเหล่านี้ซึ่งเกิดจากกระบวนการสลายตัวของสารอินทรีย์จะถูกออกซิไดส์ออกมาเป็นโมเลกุลเล็กๆ เช่น น้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ และสารประกอบจำพวกไอออนิกต่างๆ เช่น ซัลเฟต ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) และ แอมโมเนียม ( $\text{NH}_4^+$ ) ดังรูปที่ 2.12 [22]



รูปที่ 2.12 กลไกการสลายตัวของเมทิลีนบลู (Methylene Blue) [22]

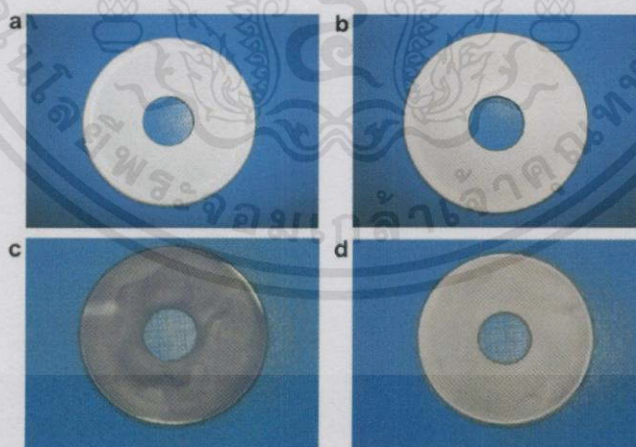
## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.7.1 ปฏิกริยาโฟโตคะตะไลติกของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และการนำไปใช้งานซ้ำ

งานวิจัยของ Chaval Sriwong และคณะ [23] ได้ศึกษาการเตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ชนิด คือ Imp-An เตรียมโดยผงไทเทเนียมไดออกไซด์อนาเทส 0.1 กรัมลงในน้ำกลั่น 3 มิลลิลิตร บั่นกวนเป็นเวลา 3 นาที ใส่ตัวอย่างจำนวน 5 มิลลิลิตร บั่นกวนเป็นเวลา 5 นาที แล้วนำของผสมเทลงในจานเพาะเชื้อ ทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง 15 ชั่วโมง นำแผ่นยางผสมไทเทเนียมออกจากจานเพาะเชื้อและทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง 2 ชั่วโมง Imp-P25 เตรียมโดยใช้วิธีเดียวกันกับการเตรียม Imp-An แต่เปลี่ยนผงไทเทเนียมไดออกไซด์เป็น P25

การศึกษาปฏิกริยาโฟโตคะตะไลติกโดยนำแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้ง 2 ชนิดวางบนจานเพาะเชื้อ ใส่เมทิลีนบลูลงในจานเพาะเชื้อ 60 มิลลิลิตร แล้วจึงบั่นกวน 1 ชั่วโมงในตู้มืด เก็บตัวอย่างจำนวน 4 มิลลิลิตร ทุกๆ 1 ชั่วโมง ค่าการดูดซับสูงสุดคือ 665 นาโนเมตร

ผลการทดลองการนำแผ่นยางผสม Imp-An มาใช้งานซ้ำในการดูดซับเมทิลีนบลูกระบวนการโฟโตคะตะไลติก หลังจากนำมาใช้งานซ้ำ 2 ครั้ง พื้นผิวของแผ่นยางผสมสกปรกและเห็นเป็นสีน้ำเงินติดอยู่บนพื้นผิวเนื่องจากโมเลกุลของเมทิลีนบลูและปฏิกริยาโฟโตคะตะไลติกลดลง อย่างไรก็ตามพื้นผิวของแผ่นยางผสมที่สกปรกสามารถนำมาทำให้สะอาดได้โดยการนำแผ่นยางไปแช่น้ำและฉายแสงยูวี 10 ชั่วโมง หลังจากทำความสะอาดแล้วแผ่นพื้นผิวของแผ่นยางก็จะกลับมาขาวปราศจากสีน้ำเงินแต่จะไม่ขาวมากเหมือนแผ่นยางแผ่นใหม่ รูปแสดงการใช้งานซ้ำครั้งที่ 2 และการนำมาทำความสะอาด ดังรูปที่ 3c และ d

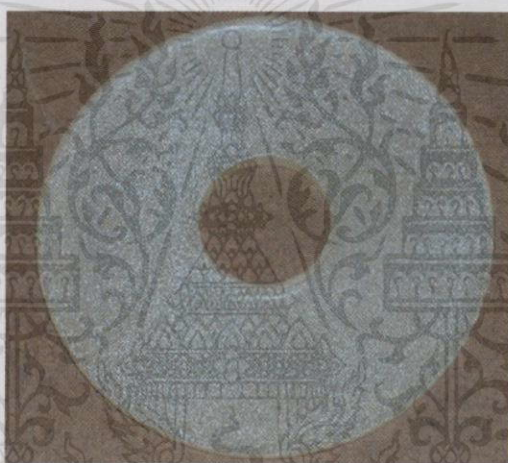


รูปที่ 2.13 แผ่นยางผสม Imp-An : (a) แผ่นยางใหม่, (b) ก่อนใช้ครั้งที่ 2, (c) หลังใช้ครั้งที่ 2 และ (d) จาก (c) หลังทำความสะอาด [23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7.2 การศึกษาการเตรียม, ปฏิกริยาโฟโตคะตะไลติกและการใช้ซ้ำของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์

งานวิจัยของ Chaval Sriwong และคณะ [24] ได้ทำการศึกษาการเตรียมปฏิกริยาโฟโตคะตะไลติกและการนำมาใช้ซ้ำ ของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ เตรียมได้จากผงไทเทเนียมไดออกไซด์ P25และน้ำยาง เริ่มจากการเตรียมน้ำยาง 10 มิลลิลิตร เทลงในแม่แบบที่เป็นจานเพาะเชื้อ (เส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 นิ้ว) และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 0.07 กรัม ลงบนพื้นผิวของน้ำยางในแม่แบบและปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6 ชั่วโมง หลังจากนั้นแกะยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ออกจากแม่แบบและทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นจึงล้างแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยน้ำกลั่น นำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที แล้วจึงนำมาใช้งาน ดังรูปที่ 2.14

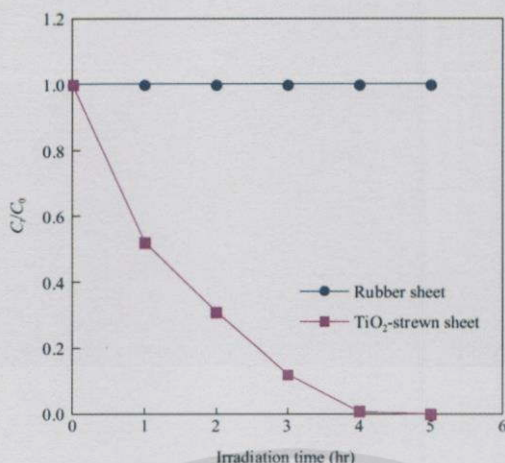


รูปที่ 2.14 รูปถ่ายของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ [24]

การศึกษากระบวนการโฟโตคะตะไลติกของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ นำแผ่นยางธรรมชาติผสมวางลงในจานเพาะเชื้อ (เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว) แล้วจึงเทสีย้อมอินดิโกคาร์มิน (IC) ปริมาณ 60 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปวางไว้บนเครื่องกวนสารและปั่นกวนในตู้มืดเป็นเวลา 15 นาที แล้วจึงเปิดไฟใช้หลอดไฟแสงสีดํา เก็บตัวอย่างทุกๆ 1 ชั่วโมง จำนวน 3 มิลลิลิตร นำไปทดสอบค่าการดูดซับสีย้อมโดยใช้เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer

ผลการทดสอบกระบวนการโฟโตคะตะไลติกจากการดูดซับสีย้อมอินดิโกคาร์มินของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ภายใต้แสงยูวี แสดงดังรูปที่ 2.15 พบว่าแผ่นยางธรรมชาติไม่มีการดูดซับสีย้อม แต่แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์มีการดูดซับสีย้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 กระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้แสงยูวีของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ [24]

### 2.7.3 การนำแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดบางมาใช้ซ้ำและการดูดซับสีย้อม

งานวิจัยของ Chaval Sriwong และคณะ [25] ได้ทำการศึกษาการเตรียมแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดบางมากเพื่อนำมาทดสอบสมบัติในการดูดซับสีย้อมอินดิโกคาร์มิน (IC) โดยเริ่มจากนำน้ำยางธรรมชาติ 0.84 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำกลั่น 9.16 มิลลิลิตร เพื่อให้ปริมาตรรวมเท่ากับ 10 มิลลิลิตร นำไปปั่นจนเป็นเวลา 15 นาที เตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารละลายแอมโมเนียโดยการนำผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.5 กรัม ผสมกับสารละลายแอมโมเนีย 5 มิลลิลิตร ปั่นจน 15 นาที เตรียมน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร เพื่อนำไปผสมกับน้ำยางที่เตรียมไว้แล้วจึงปั่นจนเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำไปเผาซินเตอร์อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 3 ชั่วโมง เพื่อกำจัดน้ำและก๊าซแอมโมเนีย หลังจากนั้นให้น้ำออกมาจากเตาอบแล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 1 คืน โดยให้เปอร์เซ็นต์ของยางในแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมเท่ากับ 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

การศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกโดยการวางแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมลงในจานเพาะเชื้อ แล้วจึงเทสีย้อมอินดิโกคาร์มินปริมาตร  $2.5 \times 10^{-5}$  ลงไปจำนวน 60 มิลลิลิตร ปั่นจนในตู้มืด 15 นาที แล้วจึงเปิดไฟโดยใช้หลอดไปแสงสีดําเก็บตัวอย่างทุกๆ 1 ชั่วโมง จำนวน 3 มิลลิลิตร นำไปทดสอบค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่องยูวี (UV-Visible Spectrophotometer)

ผลการทดสอบการใช้งานซ้ำของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังรูปที่ 2.15 จะสังเกตเห็นว่าแผ่นยางที่ใช้งานซ้ำจะมีลักษณะเป็นสีเหลืองอ่อน แผ่นยางที่ใช้งานซ้ำ 10 ครั้ง ดังรูปที่ 2.15 ประสิทธิภาพของการใช้งานซ้ำครั้งแรกจะลดลงเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวน ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 แผ่นยางที่มีร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (a) แผ่นยางที่ยังไม่ได้ใช้งาน (b) แผ่นยางที่ใช้งานแล้ว 5 ครั้ง (c) แผ่นยางที่ใช้งานแล้ว 10 ครั้ง [25]

#### 2.7.4 สมบัติเชิงกลของกราฟีนออกไซด์/อีพอกซี คอมโพสิต

งานวิจัยของ Shivan Ismael Abdullah และคณะ [26] ได้ศึกษาผลของกราฟีนออกไซด์ (GO) บนคอมโพสิตของอีพอกซีเรซิน ที่ถูกเพิ่มเข้าไปในอีพอกซีเรซิน การเตรียมคอมโพสิตกราฟีนออกไซด์/อีพอกซี โดยเตรียมได้จากความแตกต่างร้อยละโดยปริมาตรของกราฟีนออกไซด์ (0, 1.5, 3, 4.5, 6) ใช้เพื่อผสมอีพอกซีที่มีอัตราส่วน 70:30 คอมโพสิตจะถูกผสมเป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส วางตัวอย่างในเตาอบ 40 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 3.5 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้นที่อาจดูดซับบนพื้นผิว เมื่อครบ 48 ชั่วโมง กราฟีนออกไซด์ทำปฏิกิริยากับคอมโพสิตเสร็จสมบูรณ์ ดังตารางที่ 2.5

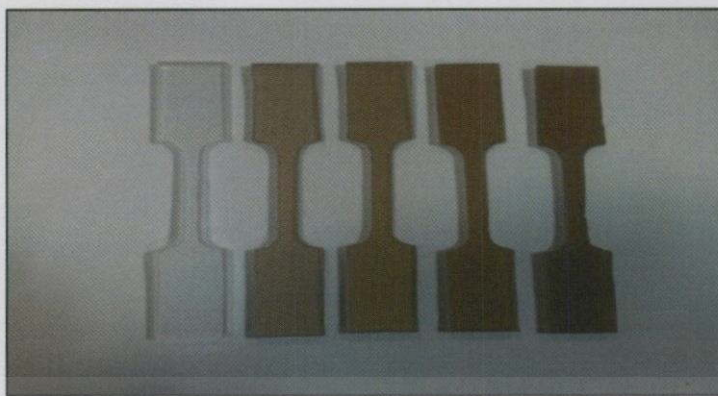
ตารางที่ 2.5 อัตราส่วนประกอบของอีพอกซี เรซิน ตัวทำให้แข็ง และกราฟีนออกไซด์ [26]

Table 1 Composition ratio of epoxy resin, hardener and (GO).

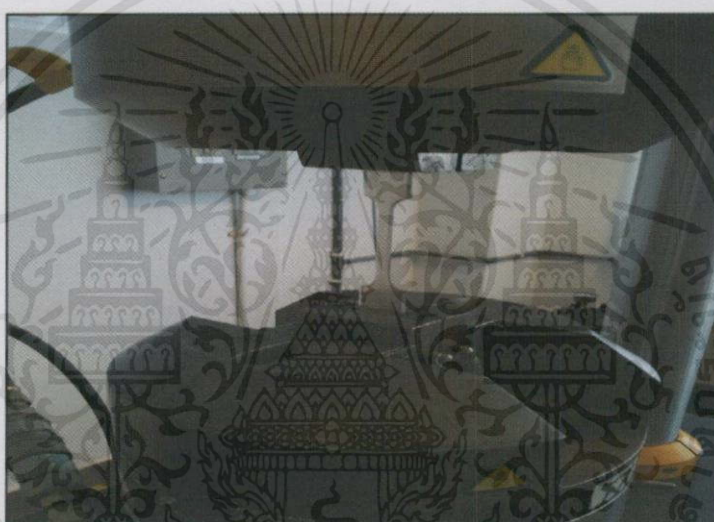
Epoxy/GO composite	Content of GO (vol.%)	Epoxy	
		Resin (vol.%)	Hardener (vol.%)
Pure epoxy	0.0	70	30
EP + 1.5 vol.%	1.5	68.95	29.55
EP + 3.0 vol.%	3.0	67.9	29.1
EP + 4.5 vol.%	4.5	66.85	28.65
EP + 6.0 vol.%	6.0	65.8	28.2

การทดสอบแรงดึง ใช้เครื่องกัดซีเอ็นซี (CNC milling machine) ในการสร้างตัวอย่างในการทดสอบแรงดึง ดังรูปที่ 2.17 และใช้เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal testing machine) ค่าคงที่ของอัตราการเปลี่ยนแปลงคือ 1 มิลลิเมตรต่อนาทีและอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 2.18 ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบมีความหนา 3 มิลลิเมตรและยาว 32 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวน วิชาสำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบแรงดึงที่ร้อยละปริมาณที่ต่างกันของกราฟีน [26]



รูปที่ 2.18 การทดสอบแรงดึง [26]

ผลจากการทดสอบแรงดึงพบว่าการเติมกราฟีนออกไซด์จะทำให้ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ค่าแรงดึง ณ จุดขาด (Load at break) ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) และค่าการยืดตัว (Elongation) เพิ่มขึ้น

สรุปได้ว่ากราฟีนออกไซด์มีศักยภาพดีเนื่องจากมีสมบัติเชิงกลที่ดี จากงานวิจัยนี้เมื่อเติมกราฟีนออกไซด์ลงในแผ่นคอมโพสิตจะทำให้ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสของยังเพิ่มขึ้นซึ่งตรงข้ามกับแผ่นคอมโพสิตที่ไม่เติมกราฟีนออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 สารเคมี

1. ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide); Dagussa P25
2. น้ำยางเข้มข้น (Natural rubber latex) 60 %wt HA บริษัท Chana Latex สงขลา ประเทศไทย
3. เมทิลีนบลู (Methylene blue,  $C_{16}H_{18}N_3SCL$ )
4. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide,  $NH_4OH$ )
5. กราฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide)

#### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. อุปกรณ์เครื่องแก้ว
2. ตู้ปฏิบัติการโฟโตคะตะไลติก ขนาด 1m x1m x1m
3. หลอดฟลูออเรสเซนต์ 5 หลอด (Black light, 18 วัตต์)
4. หลอดฟลูออเรสเซนต์ 5 หลอด (Day light, 18 วัตต์)
5. UV - VIS Spectrophotometer, รุ่น Genesys10s บริษัท Thermo Scientifc
6. X - ray diffraction (XRD) D8 Advance Bruker AXS บริษัท Gmbh ประเทศเยอรมนี
7. Scaning Electron Microscopy (SEM) 1455 VP บริษัท LEO ประเทศอังกฤษ
8. Fourier TransformInfrared Spectroscopy (ATR-FTIR) Nicolet 6700 บริษัท Thermo Scientifc ประเทศสหรัฐอเมริกา
9. Thermogravimetric analysis (TGA-DTA)
10. เครื่องทดสอบบอเนกประสงค์ Universal testing machine (UTM) บริษัท LLOYD Instrument จำกัด รุ่น LR 5K
11. เครื่องชั่งแบบดิจิตอลความละเอียด 4 ตำแหน่ง รุ่น ML 204/01 ยี่ห้อ Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
12. เครื่องปั่นกวนแบบให้ความร้อน (Hot plate)

เอกสารนี้เป็นเอกสาร  
 13. แท่งแม่เหล็ก (Magnetic Bar) ารศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น 14. ไมโครปิเปตต์ (Micropipette) จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 วิธีการการทดลอง

#### 3.3.1 การเตรียมกราไฟต์ออกไซด์ด้วยวิธีการปรับปรุงวิธีของฮัมเมอร์ (Hummer's method)

1. ชั่งผงกราไฟต์มา 2 กรัม และโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนท ( $\text{KMnO}_4$ ) 6 กรัม
2. เกลบในขวดก้นกลม พร้อมกับทำการปั่นกวนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน
3. นำขวดก้นกลมไปวางไว้ในถังน้ำแข็งที่มีอุณหภูมิ 0-3 องศาเซลเซียส
4. ค่อยๆ เติมสารละลายกรด (ซัลฟิวริก 3 ส่วน: ไนตริก 1 ส่วน) 48 มิลลิลิตร ภายใต้การปั่นกวนเบาๆ เป็นเวลา 20 นาที (ได้สารที่มีลักษณะเป็นโคลนสีน้ำตาลดำ)
5. ยกขวดก้นกลมออกจากถังน้ำแข็ง จากนั้นทำการปั่นกวนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
6. นำขวดก้นกลมไปตั้งไว้ในถังน้ำแข็งอีกครั้ง จากนั้นค่อยๆ เติมน้ำกลั่นลงไปในช่วงก้นกลมจำนวน 192 มิลลิลิตร ภายใต้การปั่นกวน แล้วทำการปั่นกวนทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
7. ทำการล้างตะกอนด้วยวิธีการหมุนเหวี่ยง ทั้งสารละลาย และเติมน้ำกลั่น ซ้ำไปเรื่อยๆ จนเมื่อตรวจสอบสารละลายที่ได้มี pH เท่ากับ 7
8. ทำการกรองตะกอน ล้างตะกอนด้วยอะซิโตนจำนวน 5 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
9. ทำการบดตะกอนให้ละเอียด ก็จะได้ผงกราไฟต์ออกไซด์

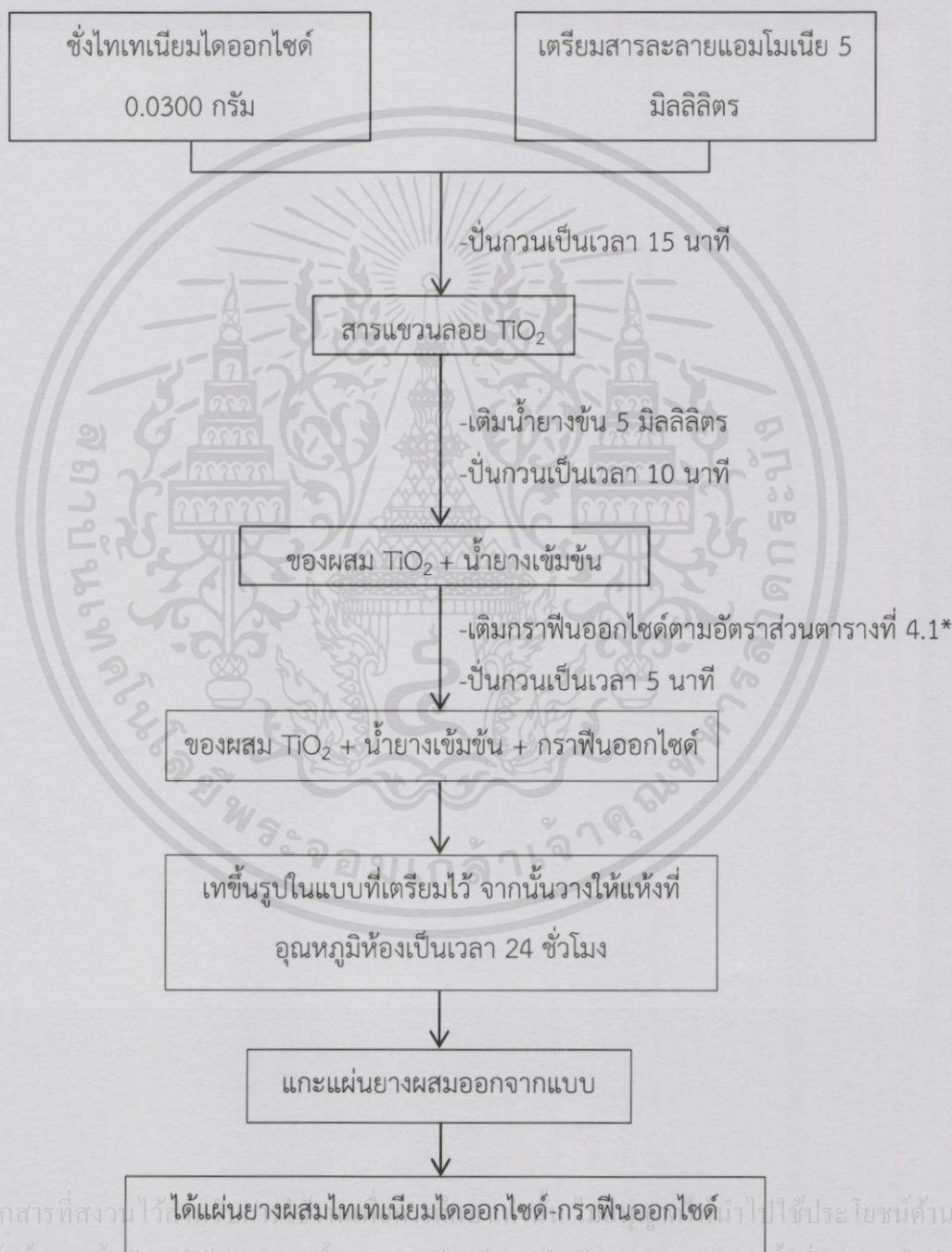
#### 3.3.2 การเตรียมกราฟีนออกไซด์ด้วยวิธีการใช้คลื่นความถี่สูง (Ultrasonic method)

1. ชั่งผงกราไฟต์ออกไซด์มา 300 มิลลิกรัม จากนั้นเทลงในหลอดเซนตริฟิวส์ขนาด 50 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำกลั่นลงไป 30 มิลลิลิตร แล้วนำไปวางไว้ในตู้อัลตราโซนิก ทำการ sonicated เป็นเวลา 1.30 ชั่วโมง
3. นำสารแขวนลอยที่ได้ไปทำการหมุนเหวี่ยง เพื่อแยกสารละลายออกจากผงกราไฟต์ที่ยังเหลืออยู่เป็นเวลา 30 นาที
4. รินสารละลายออกจากหลอดเซนตริฟิวส์ ก็จะได้สารละลายกราฟีนออกไซด์ ซึ่งมีสีน้ำตาลเข้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.3 การเตรียมแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์

ในการเตรียมแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ จะทำการเตรียมได้โดยการใช้ น้ำยางธรรมชาติชนิดเข้มข้น ไทเทเนียมไดออกไซด์ และกราฟีนออกไซด์ ซึ่งในการทดลองนี้จะไม่เปลี่ยนแปลงปริมาณของน้ำยางธรรมชาติชนิดเข้มข้น และไทเทเนียมไดออกไซด์ แต่จะทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณของกราฟีนออกไซด์ซึ่งขั้นตอนการเตรียมจะมีลักษณะดังต่อไปนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ได้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์มาใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตาราง 3.1 \*อัตราส่วนกราฟีนออกไซด์ : น้ำกลั่น

จากความเข้มข้นเริ่มต้นของกราฟีนออกไซด์เท่ากับ 6 mg/ml ซึ่งสามารถเตรียมให้มีปริมาณเท่ากับ 0 mg, 2 mg, 4 mg, 6 mg, 8 mg และ 10 mg ได้ดังตารางต่อไปนี้

ปริมาณกราฟีนออกไซด์ (mg)	ปริมาณกราฟีนออกไซด์ (ml)	ปริมาณน้ำกลั่น (ml)
0	0.00	5.00
2	0.33	4.67
4	0.67	4.33
6	1.00	4.00
8	1.33	3.67
10	1.67	3.33

### 3.3.4 การศึกษาคุณลักษณะแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์

#### 1. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (ATR-FTIR)

เทคนิค Infrared (IR) Spectroscopy เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ตรวจสอบเกี่ยวกับหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลของสารประกอบต่างๆ โดยอาศัยหลักการเกี่ยวกับการสั่น (vibration) ของโมเลกุล แสงอินฟราเรดช่วงกลาง (2.5 - 25  $\mu\text{m}$ ) มีความถี่ตรงกับความถี่ของการสั่นของพันธะโคเวเลนต์ในโมเลกุลของสาร เมื่อสารตัวอย่างได้รับพลังงานจากคลื่นรังสีอินฟราเรดที่พอเหมาะ จะเกิดการสั่นของโมเลกุลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนต์ขั้วคู่ (dipole moment) ของโมเลกุลทำให้โมเลกุลเกิดการดูดกลืนแสง แล้ววัดแสงที่ส่งผ่านออกมาแสดงผล เป็นความสัมพันธ์ของความถี่หรือ Wave Number กับค่าการส่งผ่านของแสงเรียกว่า IR Spectrum ซึ่งลักษณะสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติเฉพาะโมเลกุลของสารจึงสามารถดูดกลืนแสงอินฟราเรดได้ที่ความถี่ต่างกันขึ้นอยู่กับ ความแข็งแรงของพันธะ และน้ำหนักของอะตอม ของ Functional Groups ในโมเลกุล

#### 2. X - ray diffraction (XRD)

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ หรือ X-ray Diffractometer (XRD) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ และยืนยันโครงสร้างผลึกของสารประกอบต่างๆ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้ ในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิดจะมีขนาดของ Unit Cell ที่ไม่เท่ากัน ทำให้ Pattern ของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ออกมาไม่เท่ากัน ทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่างๆ กับ Pattern การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้ ซึ่งจะช่วยให้ทราบว่า ในตัวอย่างนั้นๆ มีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ของ XRD จะสามารถหา

องค์ประกอบของตัวอย่างได้แล้วนั้น ยังสามารถคำนวณหา ปริมาณองค์ประกอบต่างๆ ที่อยู่ในตัวอย่าง, คำนวณหาขนาดอนุภาคของแต่ละ Unit cell, ความเครียดของตัวอย่าง, ค่าความเป็นผลึกของตัวอย่างได้อีกด้วย

### 3. Scanning Electron Microscopy (SEM)

ภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น โดยในที่นี้จะใช้ SEM ในการศึกษาพื้นผิวและภาพตัดขวางของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - กราฟีนออกไซด์

### 4. Thermogravimetric Analysis (TGA)

เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุโดยเฉพาะพอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อนโดยการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง เทคนิคนี้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสภาพของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับแก๊สหรือระเหยของน้ำ การตกผลึก (crystallization) อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนเฟส การแตกตัวของวัสดุ (decomposition) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน หรือ ปริมาณสารสัมพันธ์ (stoichiometry) ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง ตัวอย่างจะถูกวางบนจานขนาดเล็ก ซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องชั่งละเอียดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง โดยที่ทั้งหมดจะอยู่ในเตาที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและบรรยากาศได้ บรรยากาศภายในอาจจะเป็นแก๊สเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน หรือแก๊สที่มีความว่องไว เช่น อากาศ หรือ ออกซิเจน โดยน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเฉพาะของสารแต่ละชนิด โดยน้ำหนักที่หายไปนั้นเกิดมาจากการระเหย การย่อยสลาย หรือการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ โดยในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่อง TGA ในการหาเสถียรภาพทางความร้อนของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์

#### 3.3.5 การทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์

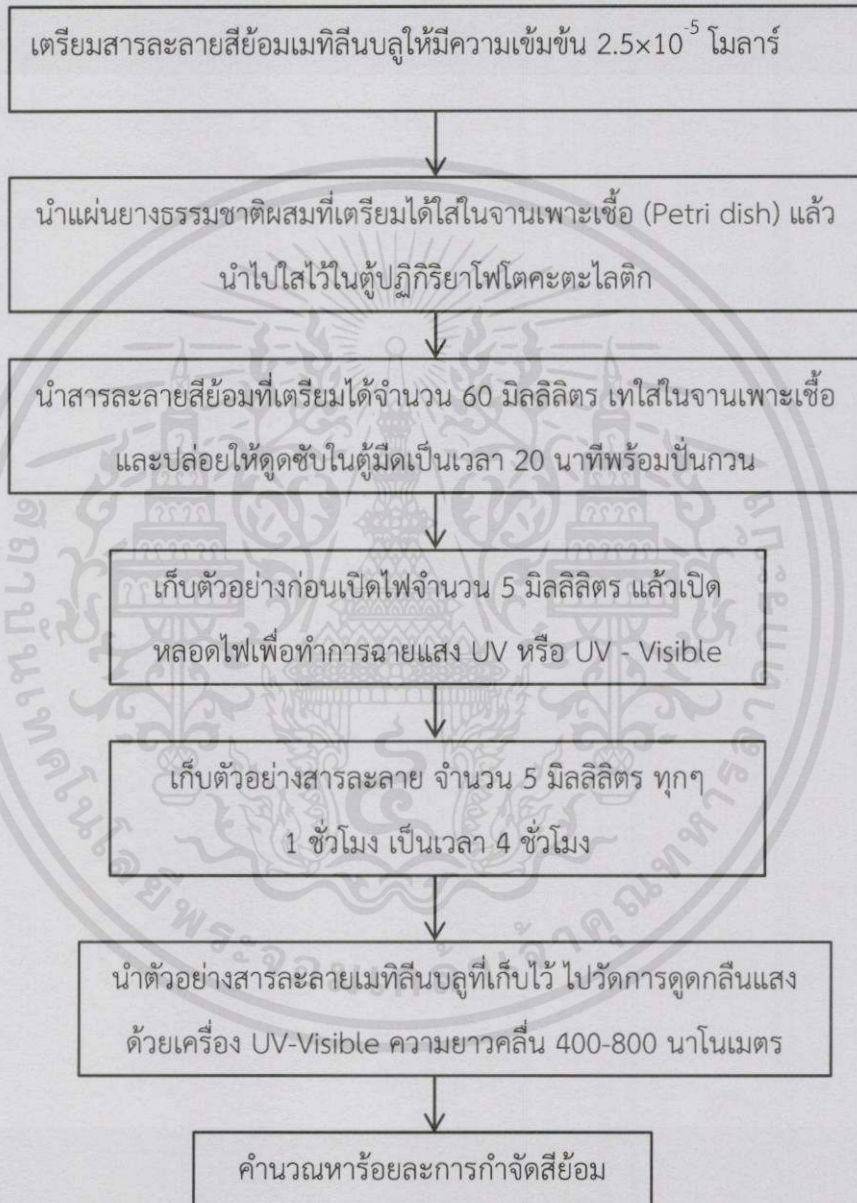
ทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile testing) เพื่อวัดคุณสมบัติความต้านทานแรงดึงของวัสดุ ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine)

ขนาดชิ้นงาน	1cm x 6cm
ความเร็วในการดึง	550 mm/min
ความยาวเกจ (Gauge length)	25 mm
ค่าแรงสูงสุดที่เครื่องรับได้	100 N
จำนวนชิ้นงานที่ทดสอบ	2 ชิ้น/ความเข้มข้นของกราฟีนออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ที่เครื่องรับได้เพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งจำนวนชิ้นงานที่ทดสอบ 2 ชิ้น/ความเข้มข้นของกราฟีนออกไซด์

### 3.3.6 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ ภายใต้แสงยูวี และแสงยูวี-วิสิเบิล

ในการศึกษานี้ได้ทำการศึกษาภายใต้การฉายแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์โดยแสงยูวีได้จากหลอด Black Light และภายใต้แสงยูวี-วิสิเบิลจากหลอด Day Light ซึ่งทำการศึกษาได้ดังวิธีต่อไปนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.7 ศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานซ้ำของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์

ผู้วิจัยเลือกเงื่อนไขที่เติมกราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณ 4 มิลลิกรัม จากนั้นนำไปทดลองซ้ำภายใต้แสง UV จากหลอด Black Light ซึ่งทำการศึกษาด้วยวิธีเดียวกันกับวิธีที่ 3.3.6 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

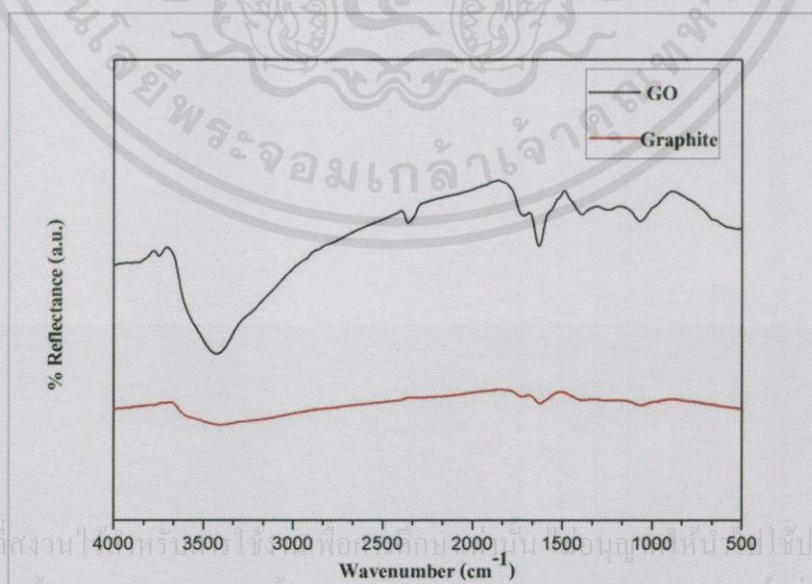
## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในบทนี้ได้กล่าวถึงผลการทดลองจากการเตรียมแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ ซึ่งจะแสดงผลต่าง ๆ ดังนี้ คือ ผลของการศึกษาการตรวจสอบเอกลักษณ์โดยเครื่องฟูเรียทรานฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer; FT-IR) ผลของการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction; XRD) ผลของการศึกษาสัญญาณวิทยาและภาพตัดขวางโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy; SEM) ผลของการศึกษาการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางความร้อน (Thermogravimetric analysis; TGA) ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลโดยใช้เครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal Testing Machine; UTM) และผลของการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์โดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer) ตามลำดับ พร้อมทั้งอภิปรายผลการทดสอบที่ได้

#### 4.1 การศึกษาการตรวจสอบเอกลักษณ์โดยเครื่องฟูเรียทรานฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer; FT-IR)

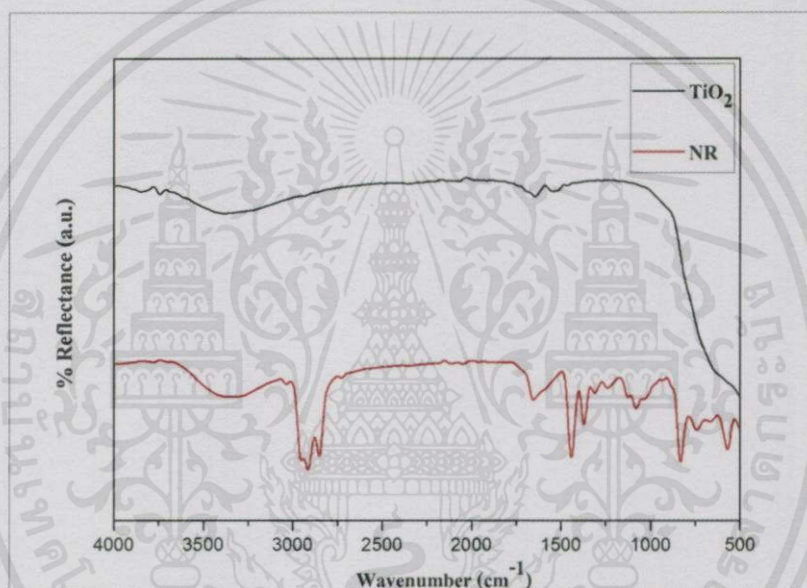
ผลจากการวิเคราะห์สูตรโครงสร้างโมเลกุลด้วยเครื่องฟูเรียทรานฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรมิเตอร์ของกราฟไฟต์และกราฟีนออกไซด์ ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงสเปกตรัมของกราฟไฟต์ (Graphite) และกราฟีนออกไซด์ (GO)

ผลการทดลองจากรูปที่ 4.1 แสดงสเปกตรัมของกราฟไฟต์และกราฟีนออกไซด์ เปรียบเทียบระหว่างกราฟไฟต์และกราฟีนออกไซด์หลังจากผ่านกระบวนการ Hummer จะพบว่ากราฟีนออกไซด์พบแถบการสั่นของพันธะ O-H stretching ที่เลขคลื่น  $3500\text{ cm}^{-1}$  พบแถบการสั่นของพันธะ C=O stretching ที่เลขคลื่น  $1731\text{ cm}^{-1}$  พบแถบการสั่นของพันธะ C=C stretching ที่เลขคลื่น  $1624\text{ cm}^{-1}$  จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับกราฟไฟต์ เนื่องมาจากการออกซิไดส์กราฟไฟต์ให้เป็นกราฟีนออกไซด์จึงทำให้มีหมู่ฟังก์ชันสารประกอบคาร์บอนิล คาร์บอกซิลิก และอีพอกซีเข้าไปแทรกตัวอยู่อยู่บนระนาบของกราฟไฟต์ ซึ่งยืนยันได้จากลักษณะโครงสร้างของกราฟีนออกไซด์ [27]

ผลจากการวิเคราะห์สูตรโครงสร้างโมเลกุลด้วยเครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ของไทเทเนียมไดออกไซด์และแผ่นยางธรรมชาติ ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงสเปกตรัมของ  $\text{TiO}_2$  และ Natural Rubber (NR)

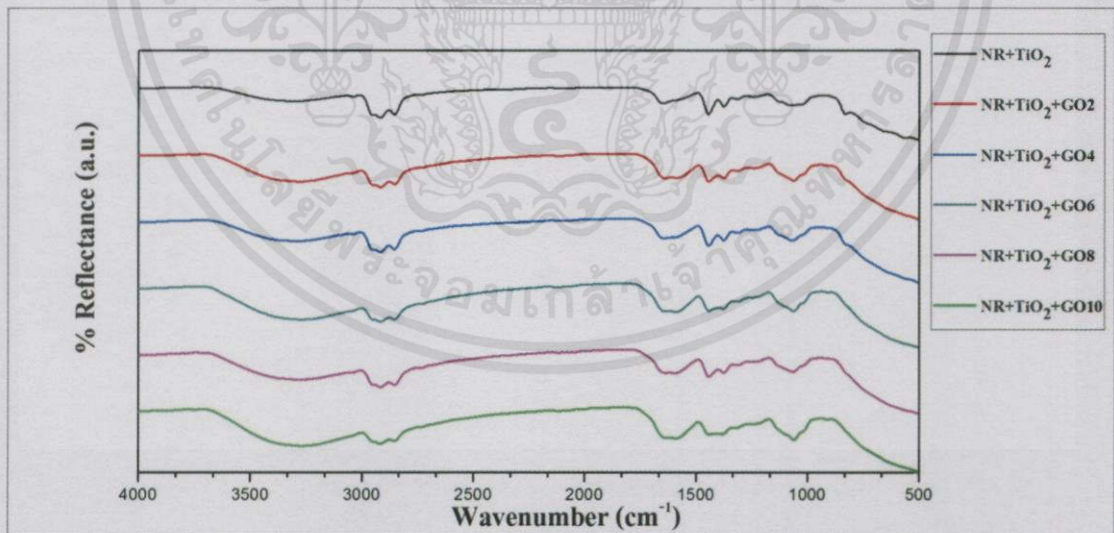
จากรูปที่ 4.2 แสดงสเปกตรัมของ  $\text{TiO}_2$  และ NR พิค  $\text{TiO}_2$  พบแถบการสั่นของพันธะ Ti-O stretching ที่เลขคลื่นต่ำกว่า  $800\text{ cm}^{-1}$  ส่วนพิกของ NR พบหมู่ฟังก์ชันดังตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงหมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติ (NR)	
ความยาวคลื่น ( $\text{cm}^{-1}$ )	หมู่ฟังก์ชัน
3500-3100	N-H และ O-H stretching
3028	=C-H stretching
2950	-CH <sub>3</sub> stretching
2918 และ 2850	-CH <sub>2</sub> stretching
1641	C=C stretching
1440	-CH <sub>2</sub> deformation
1373	-CH <sub>3</sub> deformation
829	=C-H out of plane bending
569	C-C-C main chain

ผลจากการวิเคราะห์สเปกตรัมโครงสร้างโมเลกุลด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.3

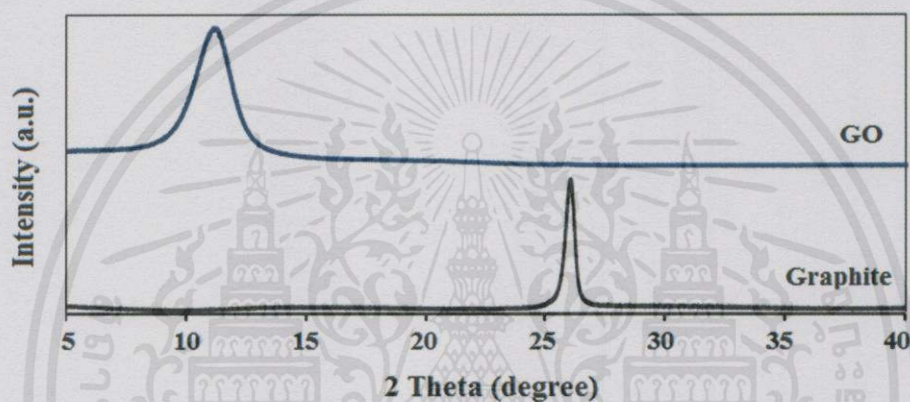


รูปที่ 4.3 แสดงสเปกตรัมของ NR+TiO<sub>2</sub>, NR+TiO<sub>2</sub>+GO<sub>2</sub>, NR+TiO<sub>2</sub>+GO<sub>4</sub>, NR+TiO<sub>2</sub>+GO<sub>6</sub>, NR+TiO<sub>2</sub>+GO<sub>8</sub> และ NR+TiO<sub>2</sub>+GO<sub>10</sub>  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองจากรูปที่ 4.3 จะปรากฏพีคเอกลักษณ์ของTiO<sub>2</sub> และยางธรรมชาติ โดยที่แถบการสั่นเลขคลื่นต่ำกว่า 800 จะเป็นพีคเอกลักษณ์ของTiO<sub>2</sub> ในขณะที่เดียวกันหลังจากเติมกราฟีนออกไซด์ลงไปแล้ว จะไม่พบแถบการสั่นของพันธะ O-H stretching C=O stretching และ C=C stretching ซึ่งพีคที่ได้จะมีลักษณะคล้ายกับพีคของผสม NR+TiO<sub>2</sub> เพราะว่ากราฟีนออกไซด์ที่เติมลงไปนั้นมีปริมาณที่น้อยเมื่อเทียบกับสัดส่วนของยางธรรมชาติและไทเทเนียมไดออกไซด์

## 4.2 การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction; XRD)

การวิเคราะห์ลักษณะผลึกและอณูฐานด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของกราฟไฟต์และกราฟีนออกไซด์ ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของกราฟไฟต์ (Graphite) และกราฟีนออกไซด์ (GO)

ผลการทดลองจากรูปที่ 4.4 รูปแบบ XRD ของกราฟีนออกไซด์และกราฟไฟต์ จะพบพีคของกราฟไฟต์ที่มีมุมการเลี้ยวเบนที่  $2\theta = 26.5^\circ$  (002) ซึ่งมีระยะห่างระหว่างระนาบเท่ากับ 0.34 นาโนเมตร และ พีคของกราฟีนออกไซด์ที่มีมุมการเลี้ยวเบนที่  $2\theta = 11.63^\circ$  (001) ซึ่งมีระยะห่างระหว่างระนาบเท่ากับ 0.76 นาโนเมตร ระยะห่างระหว่างระนาบที่เปลี่ยนแปลงไป บ่งบอกถึงการมีหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนเกาะอยู่บนแผ่นของกราฟีนออกไซด์ [28]

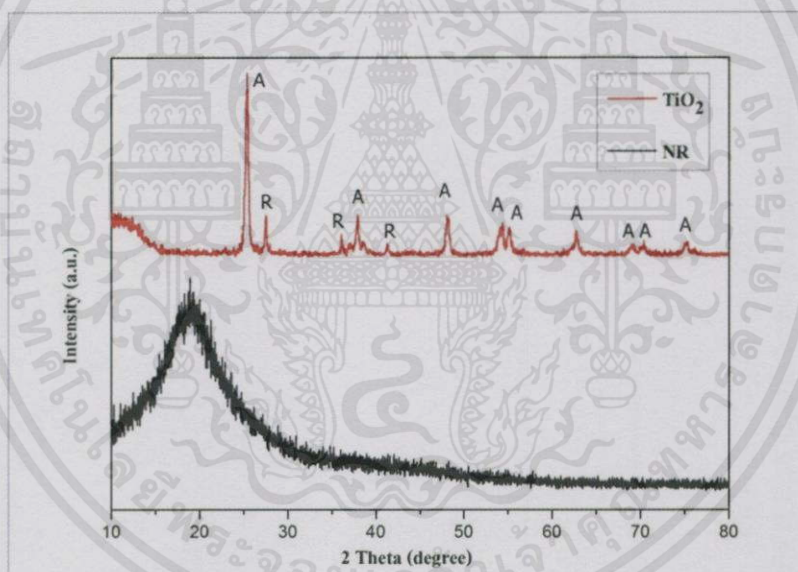
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าระยะห่างระหว่างระนาบสามารถคำนวณค่าได้จากสมการของแบรกก์ (Bragg's equation) [29]

$$n\lambda = 2d\sin\theta$$

เมื่อ	n	คือ	อันดับการเลี้ยวเบนซึ่งเป็นเลขจำนวนเต็ม
	$\lambda$	คือ	ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ โดยทั่วไปจะใช้รังสีเอกซ์ของ Cu K $\alpha$ (ความยาวคลื่น 0.154 nm)
	d	คือ	ระยะห่างระหว่างระนาบในผลึก
	$\theta$	คือ	มุมตกกระทบระหว่างรังสีเอกซ์และระนาบในผลึก

การวิเคราะห์ลักษณะผลึกและออสัณฐานด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์และแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ ดังรูปที่ 4.5

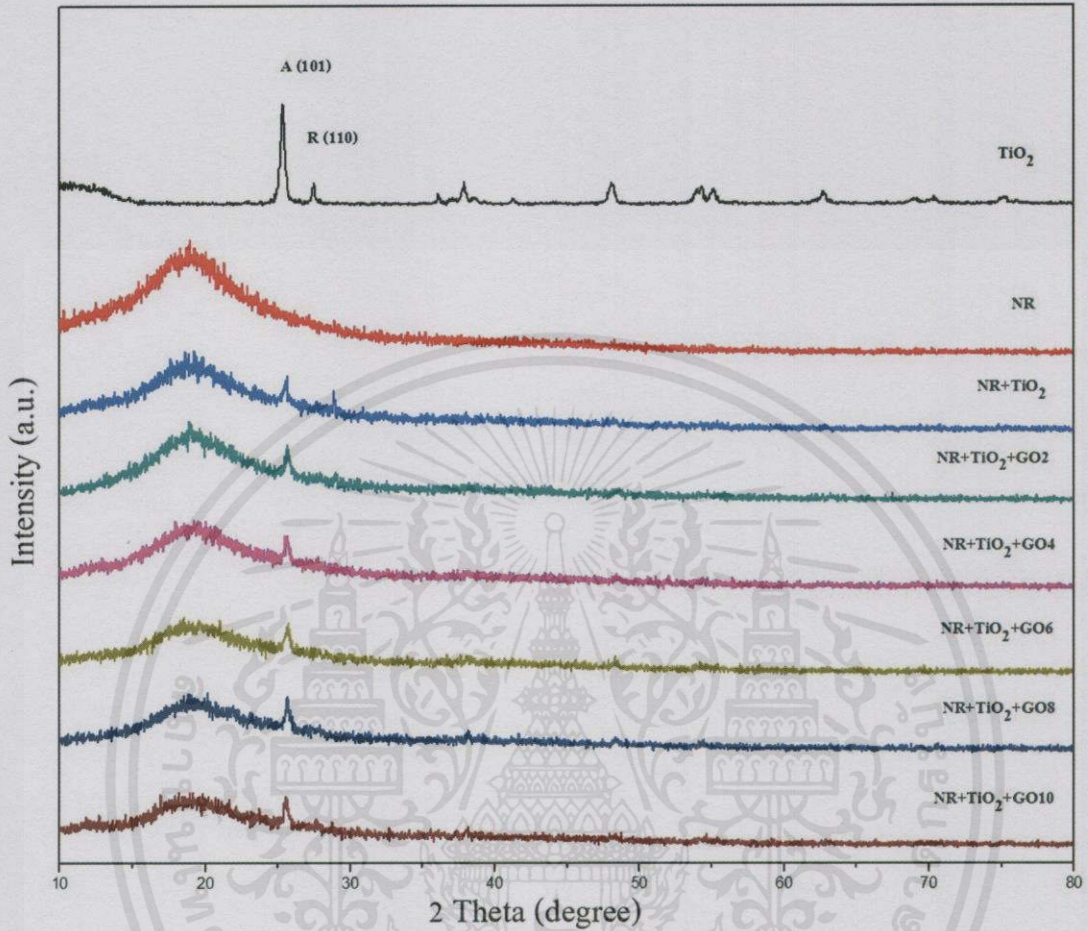


รูปที่ 4.5 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ  $\text{TiO}_2$  และ NR

ผลการทดลองจากรูปที่ 4.5 จะพบโครงสร้างเฟสชนิดอนาเทสและรูไทล์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ มีมุมการเลี้ยวเบนที่  $2\theta = 25.5^\circ$  (101, anatase) และ  $2\theta = 28.84^\circ$  (110, rutile) ในส่วนของยางธรรมชาติปรากฏพีคเอกลักษณ์ที่  $2\theta = 18.96^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ลักษณะผลึกและอัสฐานด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 รูปแบบ XRD ของ TiO<sub>2</sub>, NR, NR+TiO<sub>2</sub>, NR+TiO<sub>2</sub>+GO 2 mg, NR+TiO<sub>2</sub>+GO 4 mg, NR+TiO<sub>2</sub>+GO 6 mg, NR+TiO<sub>2</sub>+GO 8 mg และ NR+TiO<sub>2</sub>+GO 10 mg

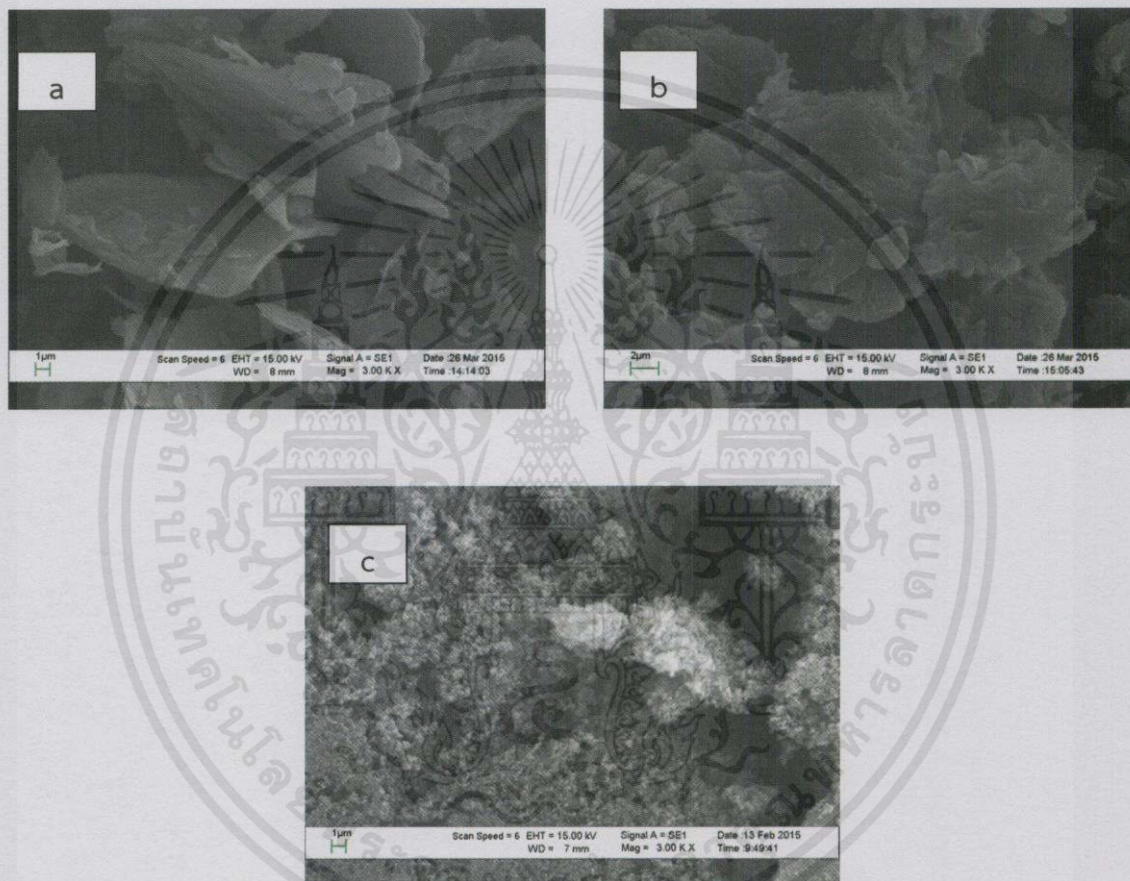
จากผลการทดลองพบว่าแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์จะปรากฏพีคเอกลักษณ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ และยางธรรมชาติ แต่ไม่สามารถสังเกตเห็นพีคเอกลักษณ์ของกราฟีนออกไซด์ ( $2\theta = 11.63^\circ$ ) ในตัวอย่างของแผ่นยางผสม ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่ากราฟีนออกไซด์ที่เติมลงไปมีปริมาณน้อยรวมทั้งมีความปั่นผลึกต่ำด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.3 การศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยาและภาพตัดขวางโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy; SEM)

### 4.3.1 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของกราฟไฟต์ กราฟีนออกไซด์ และไทเทเนียมไดออกไซด์

ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของกราฟไฟต์ กราฟีนออกไซด์ และไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งมีผลดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM กำลังขยาย 3000 เท่า (a) กราฟไฟต์, (b) กราฟีนออกไซด์ และ (c) ไทเทเนียมไดออกไซด์

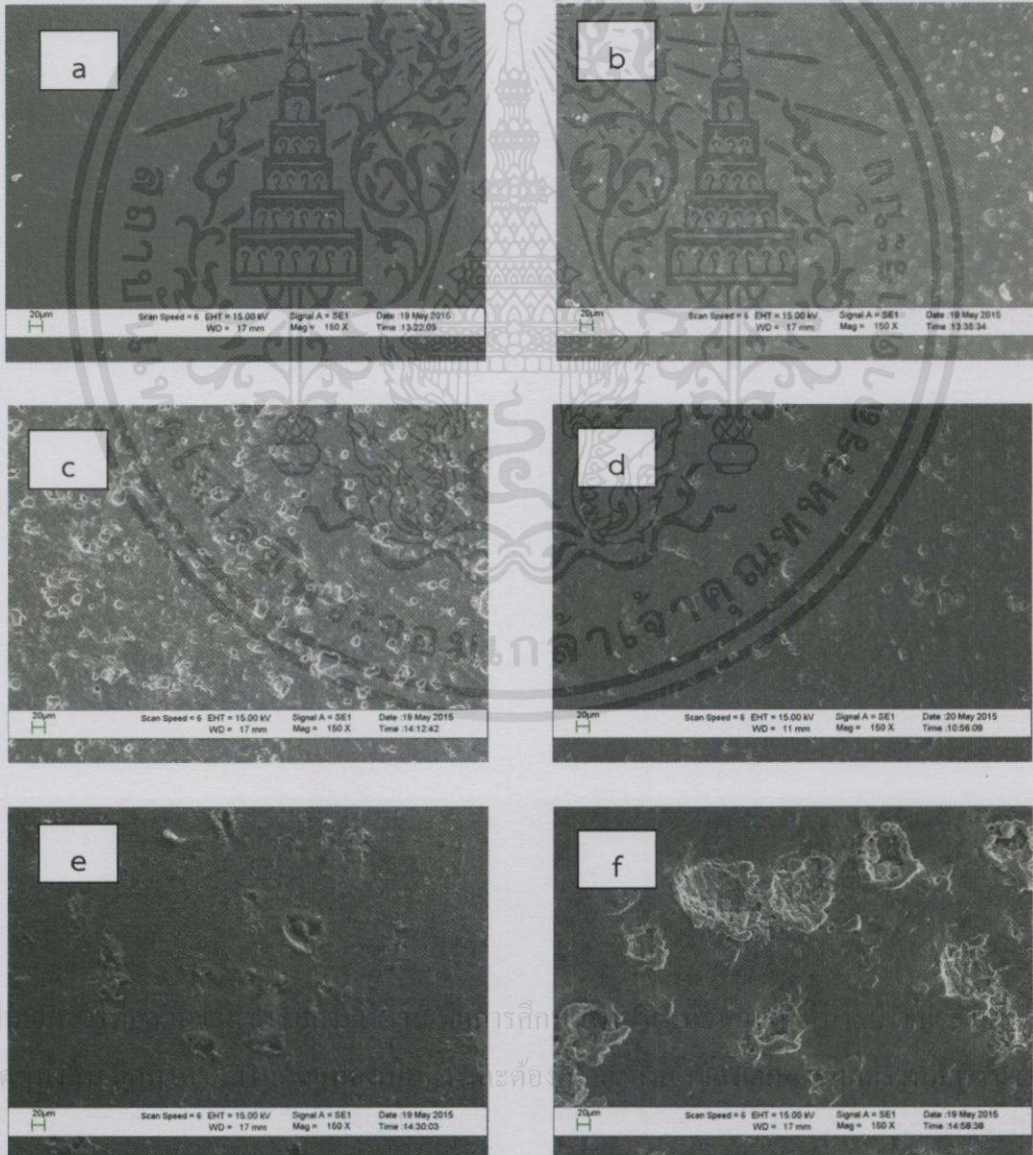
จากการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 3000 เท่า พบว่ากราฟไฟต์จะมีลักษณะเป็นแผ่นขนาดใหญ่วางซ้อนทับกัน ส่วนกราฟีนออกไซด์จะมีเกรนขนาดเล็กและแยกออกจากกันเป็นแผ่นเล็กๆเมื่อเทียบกับกราฟไฟต์เริ่มต้น ในขณะที่ไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีลักษณะเป็นอนุภาคผลึกขนาดเล็กเกาะตัวกันอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.2 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์

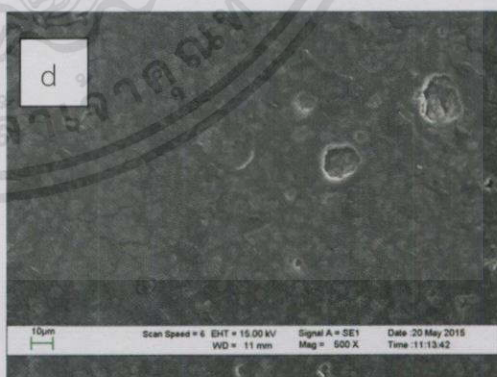
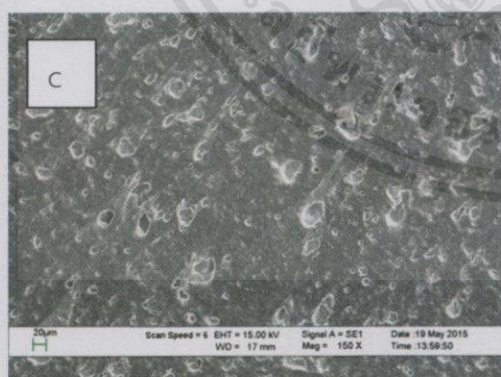
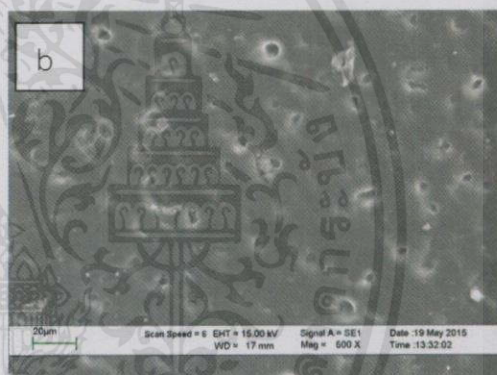
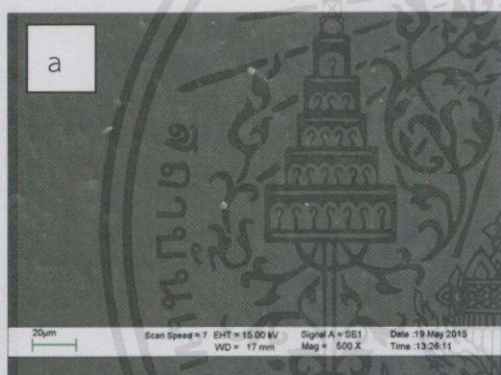
ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของยางธรรมชาติ ยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ และยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ ซึ่งมีผลดังต่อไปนี้

ที่กำลังขยาย 150 เท่า ได้ทำการศึกษาจำนวน 7 ตัวอย่าง คือ แผ่นยางธรรมชาติ แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 2 มิลลิกรัม แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 4 มิลลิกรัม แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 6 มิลลิกรัม แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 8 มิลลิกรัม แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 10 มิลลิกรัม

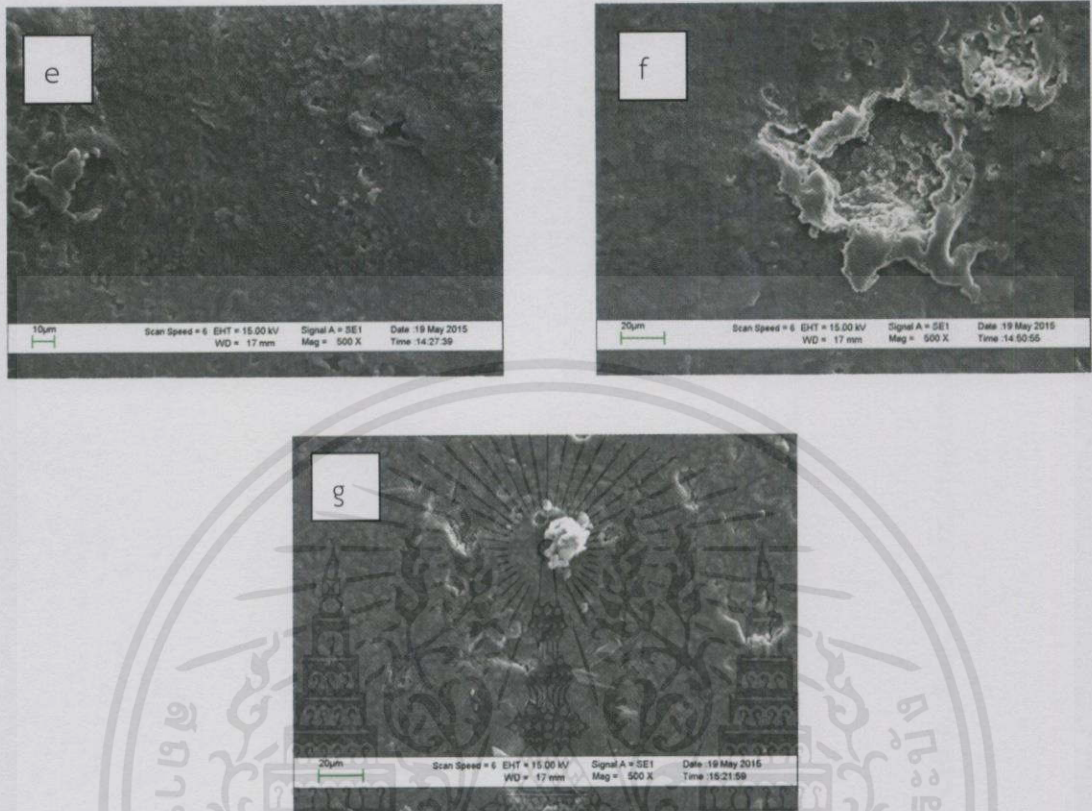




รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM กำลังขยาย 150 เท่า (a) NR, (b) NR+TiO<sub>2</sub>, (c) NR+TiO<sub>2</sub>+GO 2 mg, (d) NR+TiO<sub>2</sub>+GO4 mg, (e) NR+TiO<sub>2</sub>+GO6 mg, (f) NR+TiO<sub>2</sub>+GO8 mg และ (g) NR+TiO<sub>2</sub>+GO10 mg



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



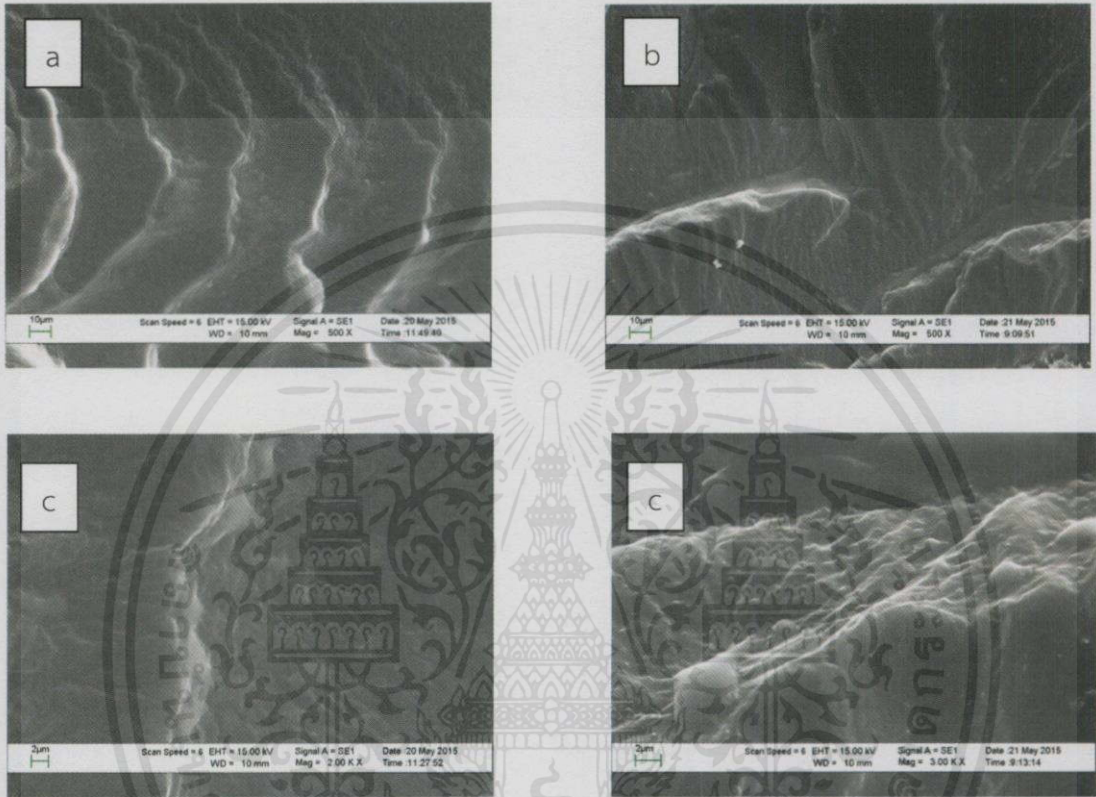
รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM กำลังขยาย 500 เท่า (a) NR (b) NR+TiO<sub>2</sub> (c) NR+TiO<sub>2</sub>+GO 2 mg (d) NR+TiO<sub>2</sub>+GO4 mg (e) NR+TiO<sub>2</sub>+GO6 mg (f) NR+TiO<sub>2</sub>+GO8 mg และ (g) NR+TiO<sub>2</sub>+GO10 mg

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 150 เท่า พบว่ายางธรรมชาติจะมีลักษณะพื้นผิวค่อนข้างเรียบ ในขณะที่แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์มีความขรุขระเนื่องจากอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ และเมื่อเติมกราฟีนออกไซด์ลงไป พบว่ากราฟีนออกไซด์มาเคลือบบริเวณพื้นผิวของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ยิ่งเติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่มากขึ้นจากภาพจะยังมีสีดำ ซึ่งจะบ่งบอกถึงปริมาณของกราฟีนออกไซด์ที่ปกคลุมพื้นผิวของแผ่นยางผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.3 การศึกษาภาพตัดขวางของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 4 มิลลิกรัม

ภาพตัดขวางที่กำลังขยาย 500 และ 2000 เท่า คือ แผ่นยางธรรมชาติ แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์เติมกราฟีนออกไซด์ 4 มิลลิกรัม



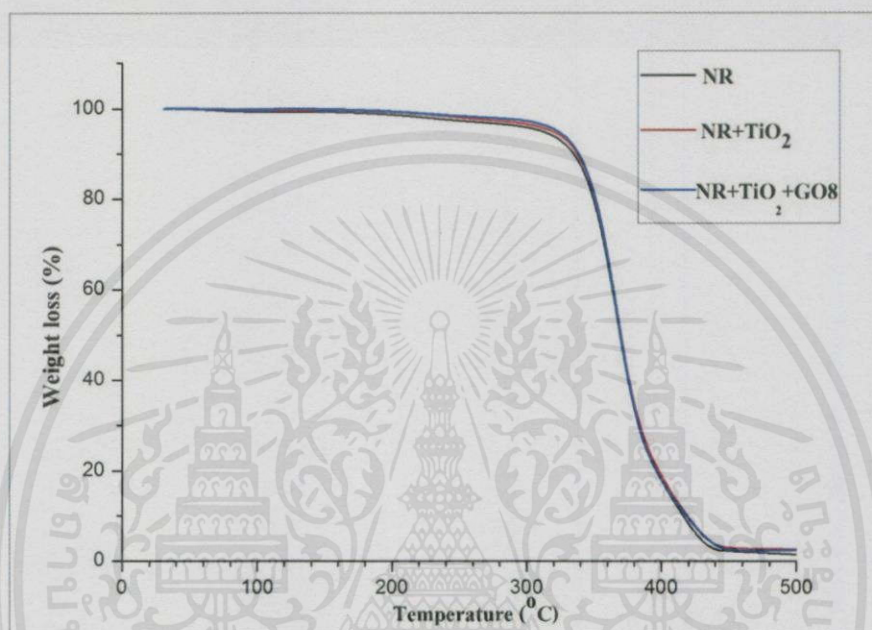
รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM ของ (a) NR (กำลังขยาย 500 เท่า), (b) NR+TiO<sub>2</sub>+GO 4 mg (กำลังขยาย 500 เท่า), (c) NR (กำลังขยาย 2000 เท่า) และ (d) NR+TiO<sub>2</sub>+GO 4 mg (กำลังขยาย 2000 เท่า)

จากภาพตัดขวางพบว่าแผ่นยางธรรมชาติมีลักษณะเรียบ ส่วนแผ่นยางที่ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 4 มิลลิกรัม มีลักษณะขรุขระเนื่องจากอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่กระจายตัวอยู่บนเนื้อธรรมชาติ

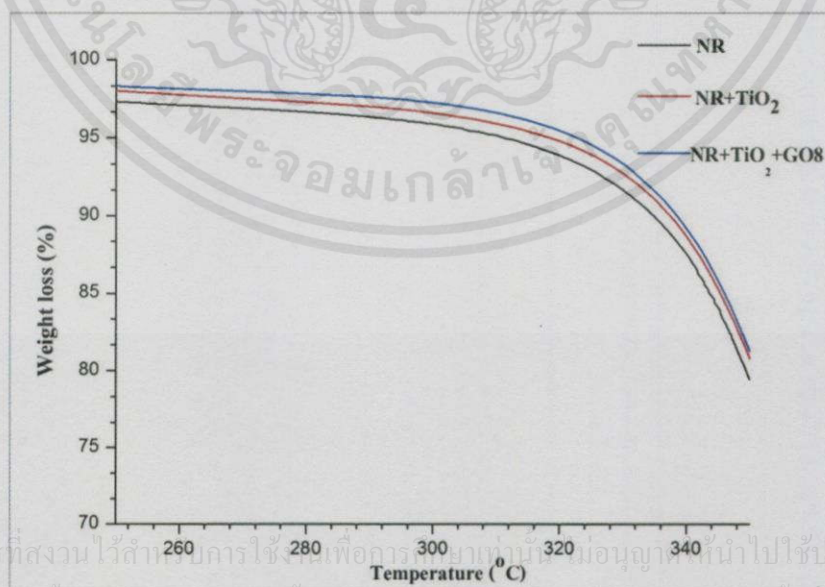
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การศึกษาการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางความร้อน (Thermogravimetric analysis; TGA)

การศึกษาด้วยเทคนิคทางความร้อนของแผ่นยางธรรมชาติ แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ และแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 8 มิลลิกรัม ดังรูปที่ 4.11

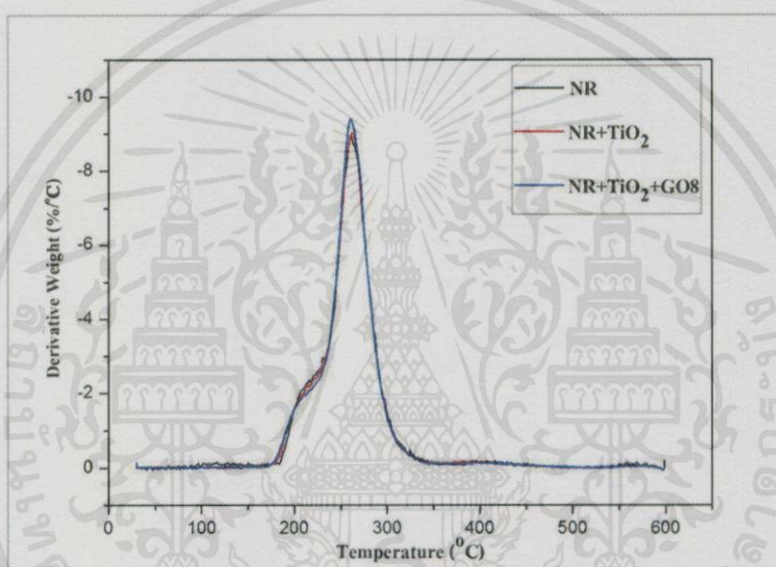


รูปที่ 4.11 แสดงผลการวิเคราะห์จาก TGA ของ NR, NR+TiO<sub>2</sub>, NR+TiO<sub>2</sub>+GO 8 mg



รูปที่ 4.12 แสดงภาพขยายผลการวิเคราะห์จาก TGA ของ NR, NR+TiO<sub>2</sub>, NR+TiO<sub>2</sub>+GO 8 mg

ผลการทดลองจากเทคนิค TGA จะเห็นได้ว่า ยางธรรมชาติมีการสลายตัวปรากฏอยู่หนึ่งตำแหน่งคือที่อุณหภูมิ 341.6 องศาเซลเซียส โดยมีร้อยละน้ำหนักเท่ากับ 86.54 ยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์มีการสลายตัวปรากฏอยู่หนึ่งตำแหน่งคือ ที่อุณหภูมิ 342.4 องศาเซลเซียส โดยมีร้อยละน้ำหนักเท่ากับ 87.64 ยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 8 มิลลิกรัม มีการสลายตัวปรากฏอยู่หนึ่งตำแหน่งคือที่อุณหภูมิ 342.8 องศาเซลเซียส โดยมีร้อยละน้ำหนักเท่ากับ 88.29 จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่ายางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ จะมีเสถียรภาพทางความร้อนดีกว่ายางธรรมชาติ เพราะว่ากราฟีนออกไซด์ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อน เนื่องจากกราฟีนออกไซด์ทนต่อความร้อนสูง และค่าการนำความร้อนสูง จึงช่วยเสริมให้ยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ทนต่อความร้อนสูงขึ้น



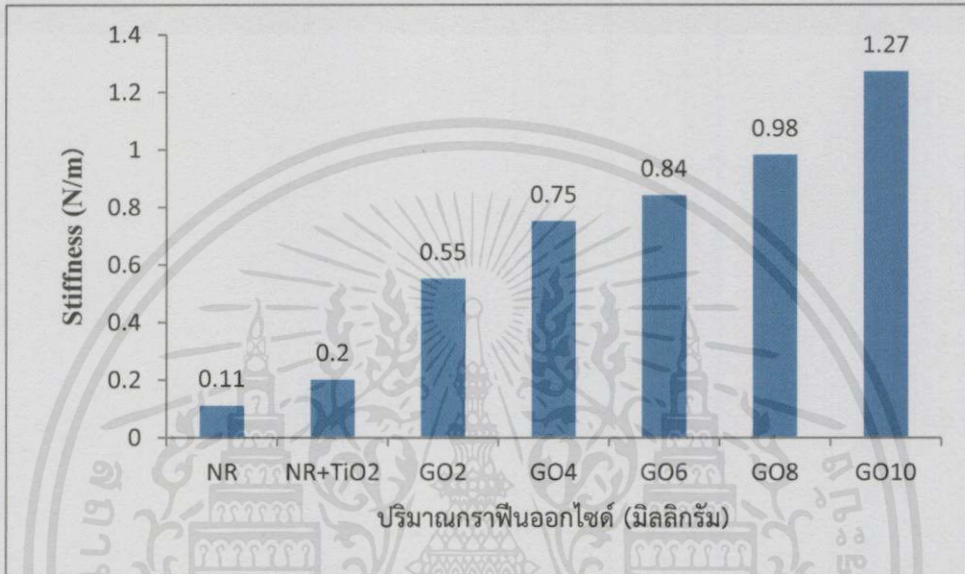
รูปที่ 4.13 แสดงผลการวิเคราะห์จาก DTG ของ NR, NR+TiO<sub>2</sub> และ NR+TiO<sub>2</sub>+GO 8 mg

จากการวิเคราะห์อัตราการสลายตัวเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป (DTG) พบว่ายางธรรมชาติมีอุณหภูมิเริ่มต้นสลายตัวที่ 211.31 องศาเซลเซียส อุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดที่ 254.40 องศาเซลเซียส อุณหภูมิการสลายตัวสิ้นสุดที่ 323.91 องศาเซลเซียส ยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์มีอุณหภูมิเริ่มต้นสลายตัวที่ 212.27 องศาเซลเซียส อุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดที่ 255.01 องศาเซลเซียส อุณหภูมิการสลายตัวสิ้นสุดที่ 324.50 องศาเซลเซียส ยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์มีอุณหภูมิเริ่มต้นสลายตัวที่ 213.45 องศาเซลเซียส อุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดที่ 257.39 องศาเซลเซียส อุณหภูมิการสลายตัวสิ้นสุดที่ 325.21 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิในการสลายตัวของยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ มีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ และยางธรรมชาติ ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลของ TGA

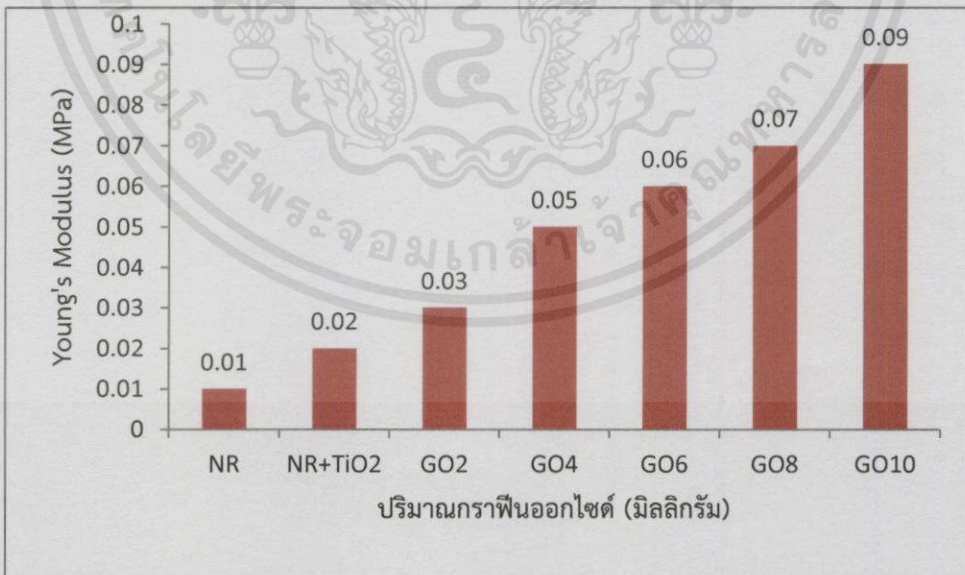
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 การทดสอบความแข็งแรงดึงของแผ่นยางธรรมชาติ,แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และการเติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณต่างกัน (Tensile Test)

เป็นการศึกษาสมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรงดึงและความยืดหยุ่นของแผ่นยางธรรมชาติ (NR), แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติม กราฟีนปริมาณ 2, 4, 6, 8 และ 10 มิลลิกรัม ผลที่ได้แสดงไว้ดังรูปต่อไปนี้

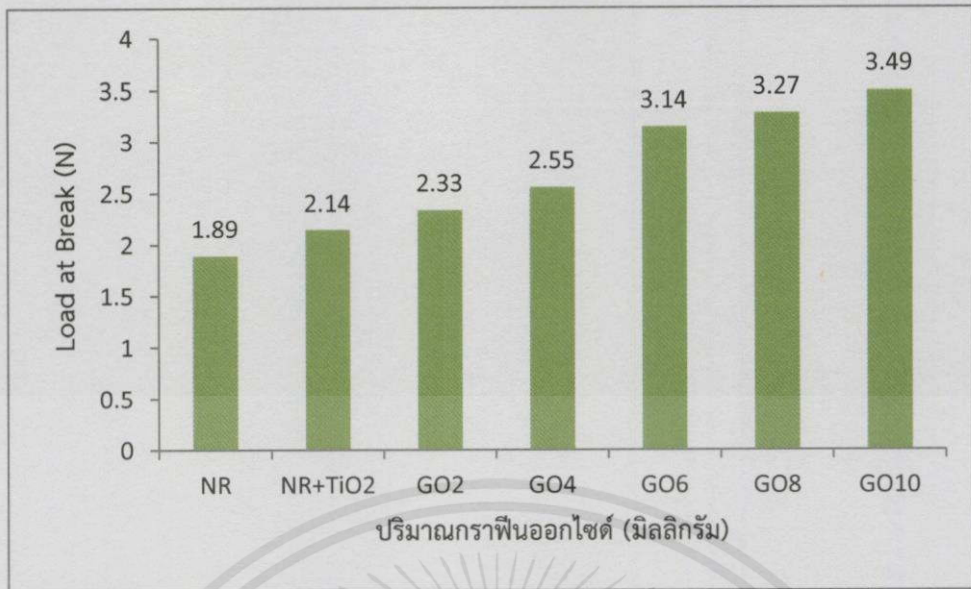


รูปที่ 4.14 แสดงค่า stiffness

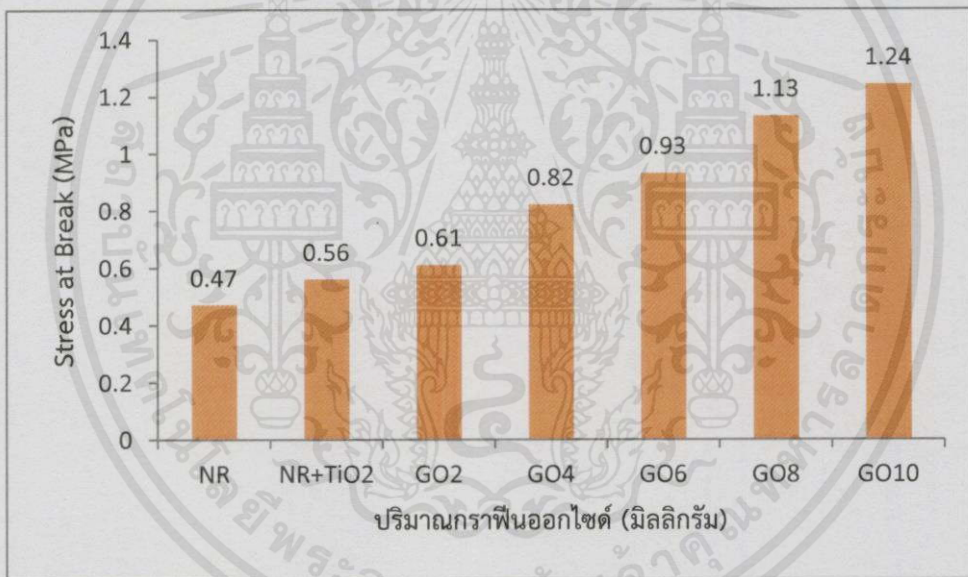


รูปที่ 4.15 แสดงค่า Young's Modulus

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับดูใช้แบบเพื่อการศึกษานำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 แสดงค่า Load at Break



รูปที่ 4.17 แสดงค่า Stress at Break

ผลการทดลอง พบว่าเมื่อทำการเติมกราฟีนออกไซด์ลงไปในพื้นที่ผสมยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ จะทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงและทนทานต่อแรงดึงได้มากขึ้น

เมื่อพิจารณาค่า Young's modulus และค่าความแข็งแรง (Stiffness) ของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุที่ต้องการทดสอบ พบว่าแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 10 มิลลิกรัม มีค่าสูงสุดคือ 0.0687 MPa

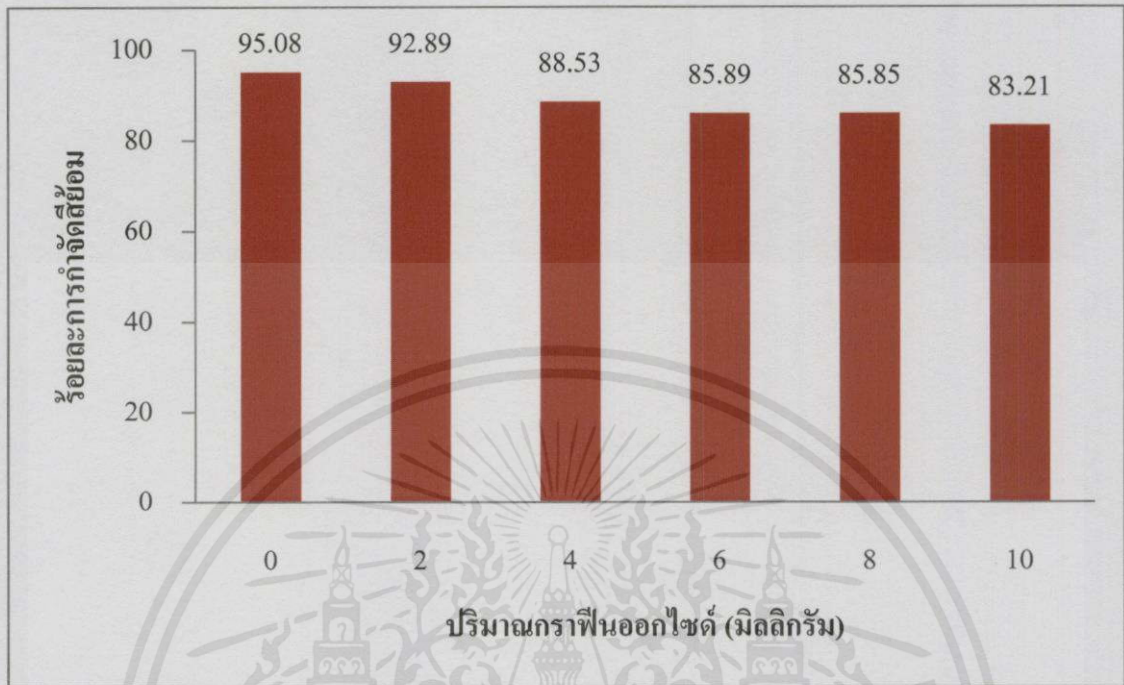
และ 1.2653 N/m ตามลำดับ และยังพบว่าค่าแรงดึง ณ จุดขาด (Load at break) และค่าความเค้น ณ จุดขาด (Stress at break) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณกราฟีนออกไซด์อันเป็นผลมาจากกราฟีนออกไซด์เป็นสารเติมแต่งที่สามารถเสริมแรงได้

#### 4.6 การศึกษาประสิทธิภาพการในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์

ผลการทดลองการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู (Methylene Blue; MB) ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติก โดยการเตรียมแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และเติมกราฟีนลงไป ปริมาณ 0, 2, 4, 6, 8 และ 10 มิลลิกรัม แล้วจึงนำไปวางในจานเพาะเชื้อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร เติมสีย้อมเมทิลีนบลูเข้มข้น  $2.5 \times 10^{-5}$  M จำนวน 60 มิลลิลิตร วางลงบนเครื่องปั่นกวนในตู้โฟโต (Photocatalytic apparatus) ที่ยังไม่เปิดไฟ จากนั้นเก็บตัวอย่างเมื่อครบ 20 นาทีแล้วจึงเปิดไฟโดยใช้แสงยูวีและแสงขาว (visible light) เมื่อครบ 1 ชั่วโมงจึงเก็บตัวอย่างปริมาณ 5 มิลลิลิตร เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วจึงนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่องยูวี (UV-Visible Spectrophotometer) เพื่อหาปริมาณการเติมกราฟีนที่เหมาะสม ผลการทดลองมีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6.1 ผลการทดลองการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณต่างกันภายใต้แสงยูวี



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูกับกราฟีนออกไซด์ในปริมาณต่างๆกัน

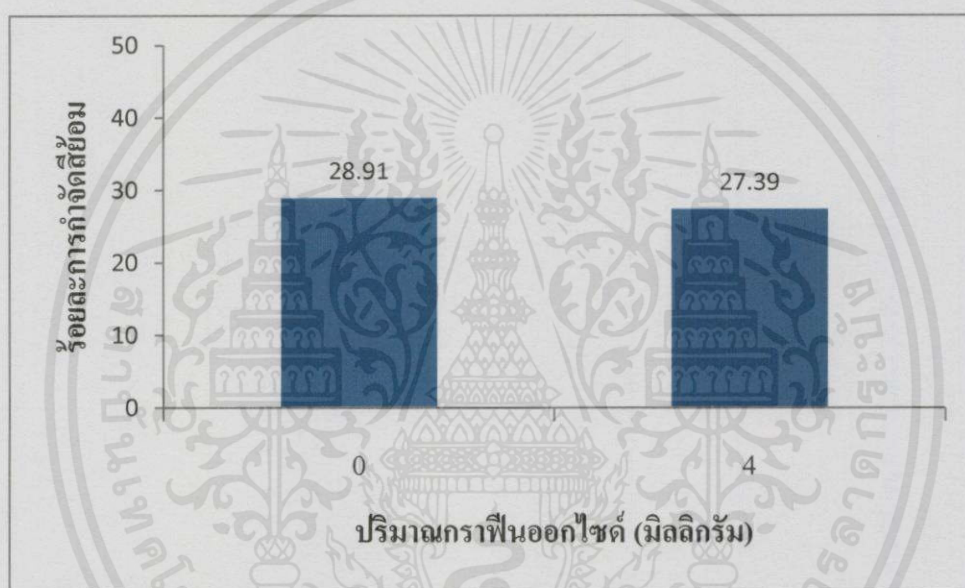
จากผลการทดลองการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์โดยกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ได้ค่าร้อยละของการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูสูงสุดเมื่อเติมกราฟีนออกไซด์ลงไปปริมาณ 0, 2, 4, 6, 8 และ 10 มิลลิกรัม ในนาที่ที่ 240 เท่ากับ 95.08, 92.89, 88.53, 85.89, 85.85 และ 83.21 ตามลำดับ

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า การเติมกราฟีนออกไซด์ลงในแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ ส่งผลให้ค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูลดลง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากกราฟีนออกไซด์เข้าไปขัดขวางการทำงานของไทเทเนียมไดออกไซด์ในการทำปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกกับแสงยูวี ดังนั้นแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่เติมกราฟีนออกไซด์มีการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูได้มากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6.2 ผลการทดลองการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณต่างกันภายใต้แสงยูวี-วิสิเบิล

จากการทดลองการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู (Methylene Blue; MB) ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติก โดยใช้แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และเติมกราฟีนลงไปปริมาณ 0 และ 4 มิลลิกรัม แล้วจึงนำไปวางในจานเพาะเชื้อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร เติมสีย้อมเมทิลีนบลูเข้มข้น  $2.5 \times 10^{-5}$  M จำนวน 60 มิลลิลิตร วางลงบนเครื่องปั่นกวนในตัวโฟโต (Photocatalytic apparatus) ที่ยังไม่เปิดไฟ จากนั้นเก็บตัวอย่างเมื่อครบ 20 นาทีแล้วจึงเปิดไฟโดยใช้แสงยูวี-วิสิเบิล เมื่อครบ 1 ชั่วโมงจึงเก็บตัวอย่างปริมาณ 5 มิลลิลิตร เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วจึงนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่องยูวี (UV-Visible Spectrophotometer)

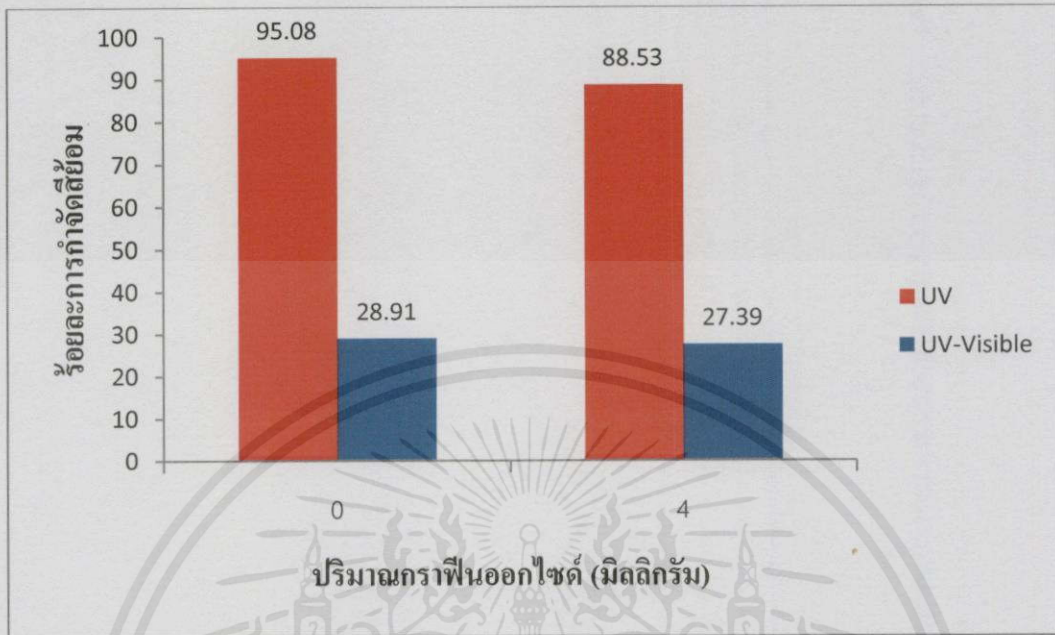


รูปที่ 4.19 ค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูกับแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ปริมาณ 0 และ 4 มิลลิกรัม ภายใต้แสงยูวี-วิสิเบิล

จากผลการทดลองการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ โดยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้แสงยูวี-วิสิเบิล พบว่าปริมาณกราฟีน 0 และ 4 มิลลิกรัมมีค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูเท่ากับ 28.91% และ 27.93% ดังนั้นเมื่อเติมกราฟีนออกไซด์ลงในแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์พบว่าอาจมีแนวโน้มค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6.3 ผลการทดลองการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณต่างกันภายใต้แสงยูวีและแสงยูวี-วิสิเบิล



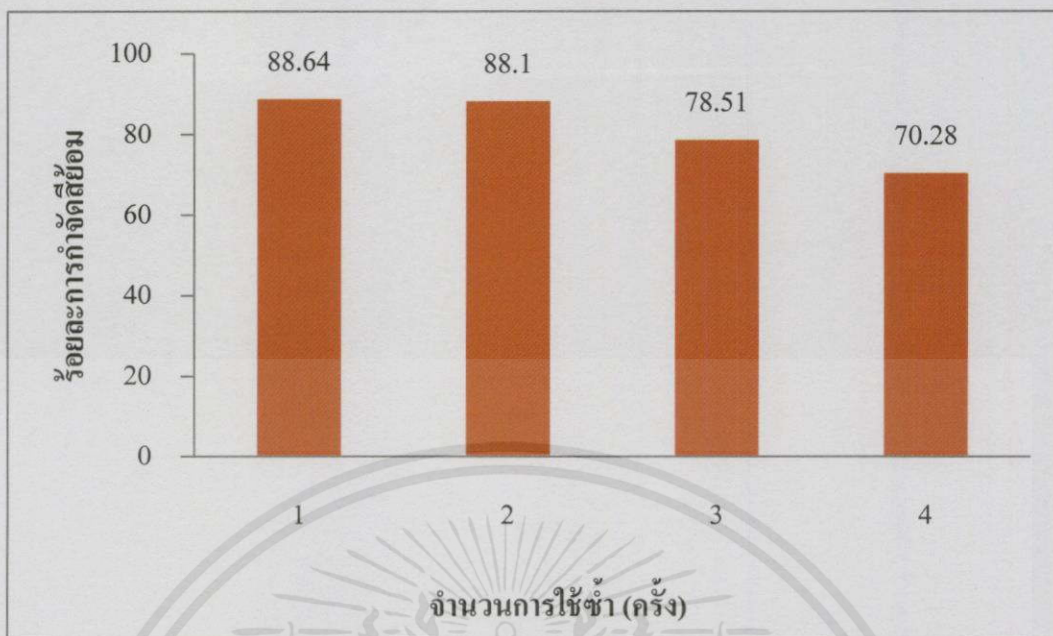
รูปที่ 4.20 ค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูกับแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ปริมาณ 0 และ 4 มิลลิกรัม ภายใต้แสงยูวี และแสงยูวี-วิสิเบิล

จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมภายใต้แสงยูวีดีกว่าแสงยูวี-วิสิเบิล ทั้งแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ ที่ 0 และ 4 มิลลิกรัม เพราะว่าแสงยูวี-วิสิเบิล มีแสงยูวีน้อยทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมต่ำ

#### 4.6.4 ผลการทดลองการใช้ซ้ำของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ 4 มิลลิกรัมภายใต้แสงยูวี

การทดลองนี้เป็นการเลือกแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ปริมาณ 4 มิลลิกรัม นำมาทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานซ้ำ โดยผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้แสงยูวีและเก็บตัวอย่างทุกๆ 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปทดสอบค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่องUV-Visible Spectrophotometer โดยทำซ้ำจำนวน 5 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 ค่าร้อยละการกำจัดสยามเมทิลีนบลูกับแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ที่มีปริมาณกราฟีนออกไซด์ 4 มิลลิกรัม ทำการซ้ำจำนวน 4 ครั้ง

จากผลการทดลองการใช้งานซ้ำของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ปริมาณ 4 มิลลิกรัม พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสยามเมทิลีนบลูครั้งที่ 1 มีร้อยละการกำจัดสยามเมทิลีนบลูสูงที่สุดเท่ากับ 88.64% การใช้งานซ้ำครั้งที่ 2, 3 และ 4 มีประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดสยามลดลงเท่ากับ 88.1%, 78.51% และ 70.28% ตามลำดับ ดังนั้นยิ่งใช้งานซ้ำในการกำจัดสยามจะทำให้ประสิทธิภาพการใช้งานซ้ำลดลง เพราะว่าการใช้งานซ้ำไปเรื่อยๆ สยามจะมาทำการเกาะบนพื้นผิวของแผ่นยางทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

#### 5.1.1 วิเคราะห์พิกัดเอกลักษณะของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิค ATR-FTIR ของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ พบว่าหลังจากเติมกราฟีนออกไซด์ ลงไปในแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์จะพบว่าไม่ปรากฏพิกัดเอกลักษณะของกราฟีนออกไซด์ ซึ่งพิกัดที่ได้จะมีลักษณะคล้ายกับยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ เพราะว่ากราฟีนออกไซด์ที่เติมลงไปนั้นมีปริมาณที่น้อยเมื่อเทียบกับสัดส่วนของยางธรรมชาติและไทเทเนียมไดออกไซด์

จากการตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD ของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ พบว่าหลังจากเติมกราฟีนออกไซด์ ลงไปในแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่ปรากฏพิกัดเอกลักษณะของกราฟีนออกไซด์ เพราะกราฟีนออกไซด์ที่เติมลงไปมีปริมาณน้อยซึ่งจะปรากฏพิกัดเอกลักษณะของไทเทเนียมไดออกไซด์ และยางธรรมชาติ

จากการศึกษาพื้นผิวและภาคตัดขวางของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ จะพบว่ายางธรรมชาติจะมีลักษณะพื้นผิวค่อนข้างเรียบ และเมื่อเติมกราฟีนออกไซด์ ลงไป คล้ายกับมีกราฟีนออกไซด์มาเคลือบบริเวณพื้นผิวเพราะยังเติมในปริมาณที่มากขึ้นจากภาพจะยิ่งมีสีดำมากขึ้นส่งผลให้ไปบดบังลักษณะของไทเทเนียมไดออกไซด์ และจากภาพตัดขวางพบว่าแผ่นยางเปล่ามีลักษณะเรียบ ส่วนแผ่นยางที่ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ เห็นชั้นของกราฟีนออกไซด์และมีอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์แทรกอยู่ในชั้นของยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์

#### 5.1.2 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์

จากการหาร้อยละของน้ำหนักที่หายไปของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่ายางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ จะมีเสถียรภาพทางความร้อนดีกว่ายางธรรมชาติ เพราะว่ากราฟีนออกไซด์ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อน เนื่องจากกราฟีนออกไซด์ทนต่อความร้อนสูง และค่าการนำความร้อนสูง จึงช่วยเสริมให้ยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ทนต่อความร้อนสูงขึ้นและจะ

เห็นได้ว่าอุณหภูมิในการสลายตัวของยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ มีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ และยางธรรมชาติ ตามลำดับ

### 5.1.3 การทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์

พบว่าเมื่อทำการเติมกราฟีนออกไซด์ลงในแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ จะทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงและทนทานต่อแรงดึงได้มากขึ้น

### 5.1.4 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์

ภายใต้แสงยูวี พบว่าการเติมกราฟีนออกไซด์ลงในแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ ส่งผลให้ค่าร้อยละการกำจัดสีของเมทิลีนบลูลดลง

ภายใต้ยูวี-วิสิเบิล พบว่าแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ที่ไม่เติมกราฟีนออกไซด์มีค่าร้อยละการกำจัดสีของเมทิลีนบลูมากที่สุด

จากการทดลองการกำจัดสีของเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณต่างกันภายใต้แสงยูวี พบว่าและภายใต้แสงยูวี-วิสิเบิล พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีของภายใต้แสงยูวีดีกว่าภายใต้แสงยูวี-วิสิเบิล

### 5.1.5 ศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานซ้ำของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์

พบว่ายังใช้งานซ้ำในการกำจัดสีจะทำให้ประสิทธิภาพการใช้งานซ้ำลดลงเนื่องจากสีของเมทิลีนบลูไปเคลือบติดอยู่บนพื้นผิวของแผ่นยาง

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีของน้ำทิ้งในโรงงานอุตสาหกรรมโดยตรง โดยใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลติก
2. ควรศึกษารีดิวซ์กราฟีนควบคู่กับกราฟีนออกไซด์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีของและสมบัติเชิงกล
3. ควรศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานซ้ำของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ กับแผ่นยางธรรมชาติ
4. ควรศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องเพิ่มเติม เช่น ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ ความเข้มข้นของแสงจาก

เอกสารที่ส่งต่อยูวีที่กำลังวัดต่าง ๆ และอุณหภูมิ เป็นต้น ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากร 5. ควรขึ้นรูปแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียม-กราฟีนออกไซด์ให้เป็นไปตามมาตรฐานที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Retrieved April 21, 2015, from  
<http://th.wikipedia.org/wiki/ไทเทเนียม>
- [2] กฤษณาพร สีสโต. “โฟโตเพนต์และ  $\text{TiO}_2$  – โฟโตคะตะไลติกเดคระเดชันของสีรีแอคทีฟเรด.”  
 วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์  
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2546
- [3] อภิชน วัชรินทร์วงศ์. “การกำจัดโครเมียมออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ผงไททาเนียมได  
 ออกไซด์ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร  
 มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี  
 พระจอมเกล้าธนบุรี, 2546
- [4] Retrieved April 22, 2015, from  
[http://www.rsu.ac.th/engineer/che/news/News%20Dataเรื่องน้ำรั่วสารไทเทเนียมได  
 ออกไซด์.pdf](http://www.rsu.ac.th/engineer/che/news/News%20Dataเรื่องน้ำรั่วสารไทเทเนียมไดออกไซด์.pdf)
- [5] Retrieved April 24, 2015, from  
<http://www.vcharkarn.com/varticle/27809>
- [6] Retrieved April 26, 2015, from  
<http://www.siamchemi.com/ไททาเนียมไดออกไซด์>
- [7] Retrieved April 26, 2015, from  
<http://sichon.wu.ac.th/file/envi-shh-20090110-112240-pwrqR.pdf>
- [8] กาญจนา ลือพงษ์ และ นงนุช ศศิธร. “การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมด้วย  
 เทคนิคโฟโตแคตะไลติกคร่วมกับกระบวนการดูดซับ.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตร  
 มหาบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์  
 มหาวิทยาลัย, 2548
- [9] Retrieved April 21, 2015, from  
<http://th.wikipedia.org/wiki/กราฟีนออกไซด์>
- [10] Retrieved April 21, 2015, from  
[http://thep-center.org/src/article\\_edu\\_t.php?article\\_edu\\_id=57](http://thep-center.org/src/article_edu_t.php?article_edu_id=57)
- [11] นิตยา สอาด. “การสังเคราะห์กราฟีน/โพลีเอทิลีนออกไซด์เพื่อตรวจวัดก๊าซแอมโมเนียที่  
 อุณหภูมิห้อง.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม สถาบัน

เอกสารนี้เป็นเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2556 นี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] Shivan Ismael Abdullah, M.N.M. Ansari. “Mechanical properties of graphene oxide (GO)/epoxy composites”. Production and hosting by Elsevier (2014) 1687-4048
- [13] Retrieved April 22, 2015, from <http://th.wikipedia.org/wiki/น้ำยาง>.
- [14] Retrieved April 22, 2015, from <http://www.rubberthai.com/book/file/98.pdf>.
- [15] นายณัฐพล ภูตระกูล และ นางสาวกนกพร บุญนวน. “การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติเสริมแรงด้วยซิลิกาจากแกลบเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมหล่อยาง.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์, 2550
- [16] Retrieved March 8, 2015, from <http://th.wikipedia.org/wiki/ยาง>
- [17] Retrieved April 25, 2015, from <http://comptox.sci.ku.ac.th/dyes.php>.
- [18] พงนิย โสมรัตน์. “การกำจัดสีย้อมและโลหะหนักในน้ำเสียจากการย้อมไหมโดยก้อนเห็ดเหลือทิ้ง Pleurotus ostreatus.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2549
- [19] สุภาพร พงศ์ธรพฤกษ์. “การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีและปริมาณโลหะหนักในน้ำทิ้งสีย้อมผ้าโดยใช้วัสดุเหลือใช้จากธรรมชาติ.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์, 2547
- [20] Retrieved April 25, 2015, from [www.scisoc.or.th/sciweek/model/1203-02.docx](http://www.scisoc.or.th/sciweek/model/1203-02.docx).
- [21] จีร์วิทย์ ปูผ้า. “กระบวนการบำบัดขั้นต้นโดยใช้ UV / H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> สำหรับการซักล้าง.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2544
- [22] Zhe-Qi Li, Hui-Long Wang, Long-Yun Zi, Jian-Jun Zhang, Yao-Shan Zhang. “Preparation and photocatalytic performance of magnetic TiO<sub>2</sub>-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/graphene (RGO) composites under VIS-light irradiation”. Ceramics International 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่นับผูกขาดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คิดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [23] Chaval Sriwong, Sumpun Wongnawa, Orasa Patarapaiboolchai. “**Photocatalytic activity of rubber sheet impregnated with TiO<sub>2</sub> particles and its recyclability**”. *Catalysis Communications* 9 (2008) 213–218.
- [24] Chaval Sriwong, Sumpun Wongnawa, Orasa Patarapaiboolchai. “**Rubber sheet strewn with TiO<sub>2</sub> particles: Photocatalytic activity and recyclability**”. *Journal of Environmental Sciences* 2012, 24(3) 464–472.
- [25] Chaval Sriwong, Sumpun Wongnawa, Orasa Patarapaiboolchai. “**Recyclable thin TiO<sub>2</sub>-embedded rubber sheet and dye degradation**”. *Chemical Engineering Journal* 191 (2012) 210– 217
- [26] Shivan Ismael Abdullah, M.N.M. Ansari. “**Mechanical properties of graphene oxide (GO)/epoxy composites**”. Production and hosting by Elsevier (2014) 1687-4048.
- [27] Bingqing Lu, Ni Ma, Yaping Wang, Yiwei Qiu, Haihua Hu, Jiahuan Zhao, Dayu Liang, Sheng Xu, Xiaoyun Li, Zhiyan Zhu, Can Cui. “**Visible-light-driven TiO<sub>2</sub>/Ag<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>/GO heterostructure photocatalyst with dual-channel for photo-generated charges separation**”. *Journal of Alloys and Compounds* 630 (2015) 163–171.
- [28] Ju Hu, Hansheng Li, Qin Wu, Yun Zhao, Qingze Jiao. “**Synthesis of TiO<sub>2</sub> nanowire/reduced graphene oxide nanocomposites and their photocatalytic performances**”. *Chemical Engineering Journal* 263 (2015) 144–150
- [29] Retrieved April 29, 2015, from <http://www.tu.ac.th/org/science/chemistry/data/Event/solid/topiceleven.html>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### การเตรียมสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู

1. การเตรียมสีย้อมเมทิลีนบลู ( Methylene Blue ; MB )

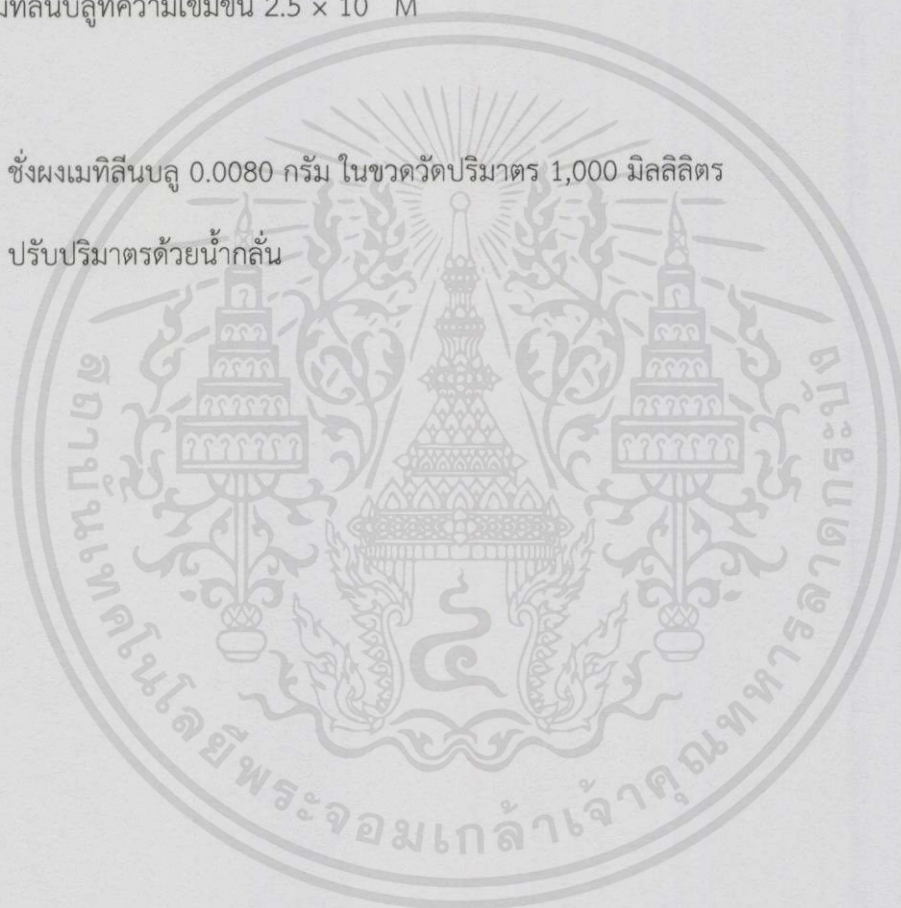
สูตรโมเลกุล ( Molecular formula ) คือ  $C_{16}H_{18}N_3SCl$

มวลโมเลกุล ( Molecular Weight ) คือ 319.85 g/mol

เตรียมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น  $2.5 \times 10^{-5}$  M

วิธีทำ

- ชั่งผงเมทิลีนบลู 0.0080 กรัม ในขวดวัดปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร
- ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### การคำนวณจากสมการของแบรกก์ (Bragg's equation)

สมการของแบรกก์ (Bragg's equation) [29]

$$n\lambda = 2d\sin\theta$$

เมื่อ	$n$	คือ	อันดับการเลี้ยวเบนซึ่งเป็นเลขจำนวนเต็ม
	$\lambda$	คือ	ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ โดยทั่วไปจะใช้รังสีเอกซ์ของ Cu K $\alpha$ (ความยาวคลื่น 1.5406 อังสตรอม)
	$d$	คือ	ระยะห่างระหว่างระนาบในผลึก
	$\theta$	คือ	มุมตกกระทบระหว่างรังสีเอกซ์และระนาบในผลึก

ตัวอย่างการคำนวณ กราไฟต์ ( $2\theta = 26.5^\circ$ )

จากสูตร

$$n\lambda = 2d\sin\theta$$

แทนค่า

$$1 \times 1.5406 = 2 \times d \times \sin 13.25$$

$$d = 3.36 \text{ อังสตรอม}$$

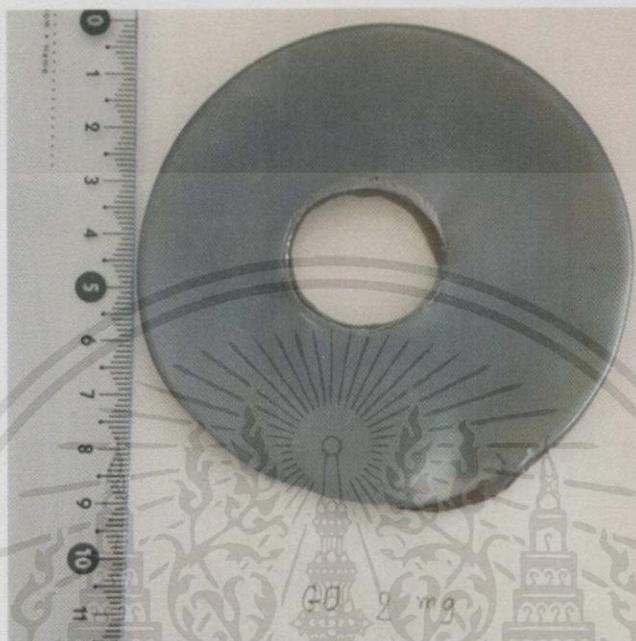
$$d \approx 0.34 \text{ นาโนเมตร}$$

- ค่าระยะห่างระหว่างระนาบของกราไฟต์มีค่าเท่ากับ 0.34 นาโนเมตร
- ค่าระยะห่างระหว่างระนาบของกราฟีนออกไซด์มีค่าเท่ากับ 0.76 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

ลักษณะของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์

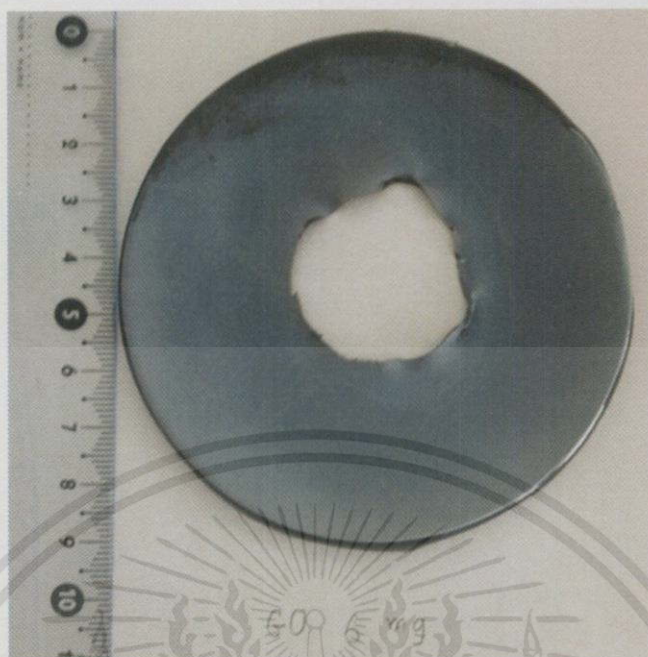


รูปที่ ค-1 แผ่นยางผสมธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 2 มิลลิกรัม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ค-2 แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 4 มิลลิกรัม



รูปที่ ค-3 แผ่นยาธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 6 มิลลิกรัม



รูปที่ ค-4 แผ่นยาธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 8 มิลลิกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



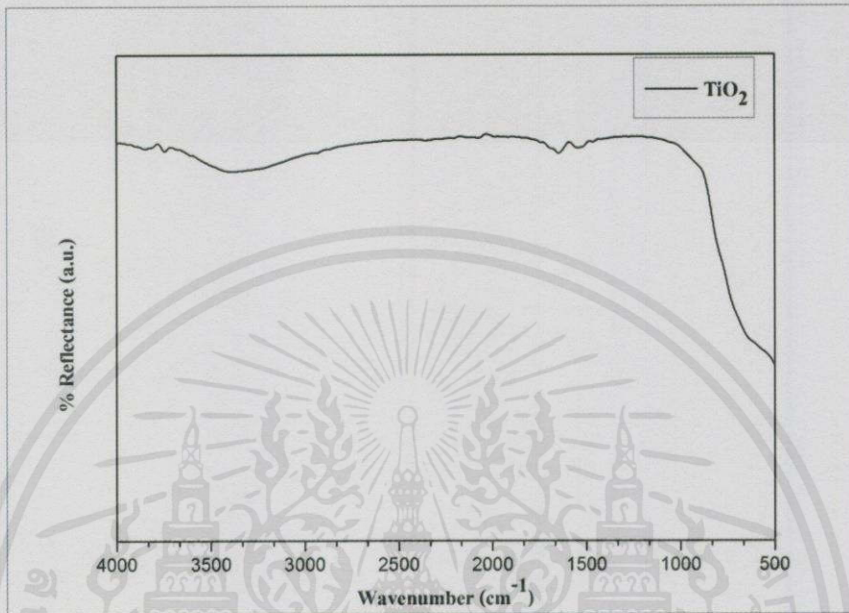
รูปที่ ค-5 แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 10 มิลลิกรัม



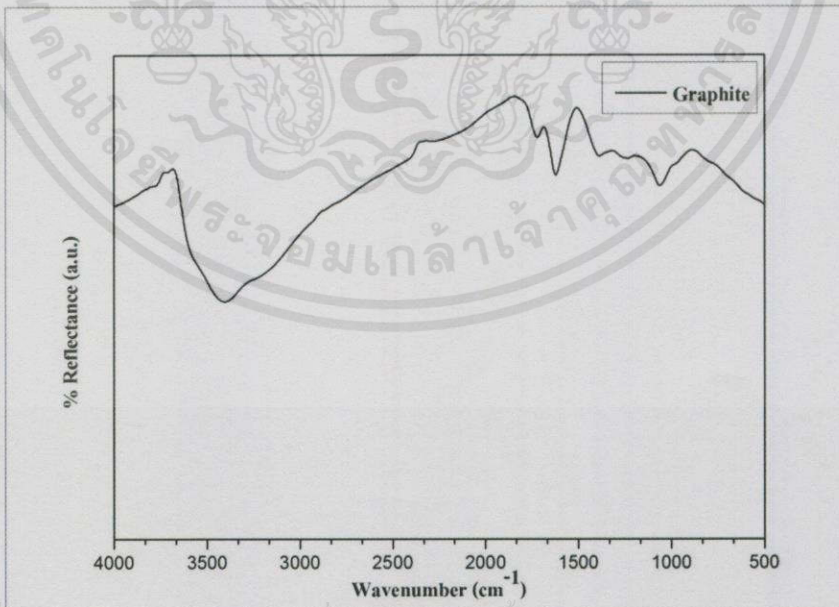
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ATR-FTIR

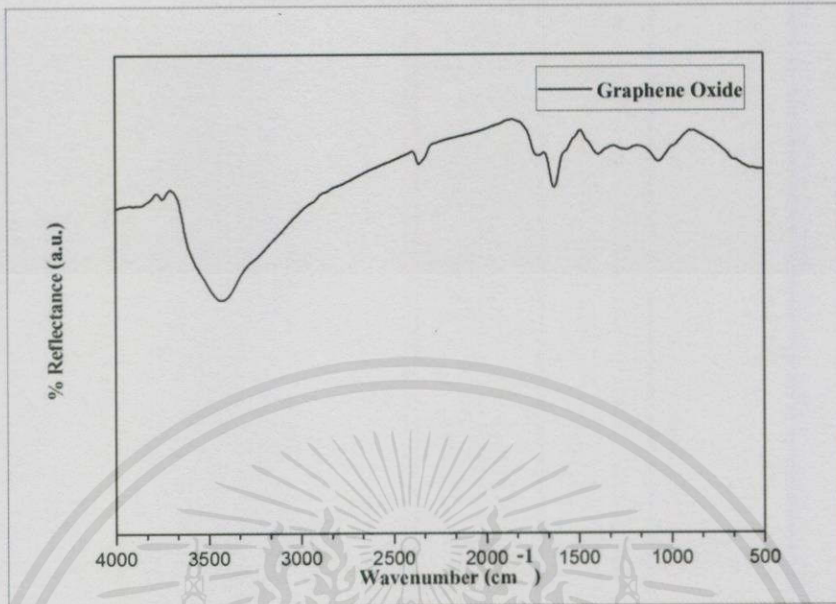


รูปที่ ง-1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR ของ TiO<sub>2</sub>

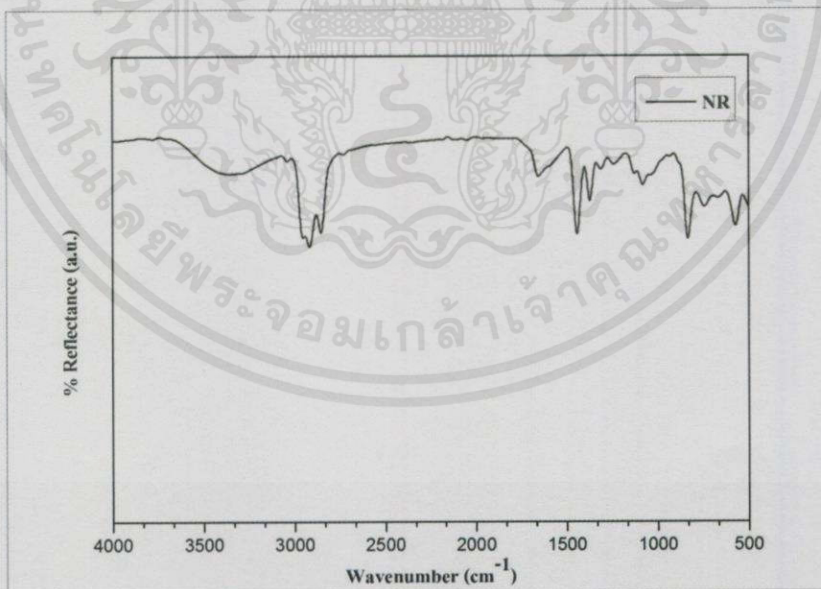


รูปที่ ง-2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR ของ Graphite

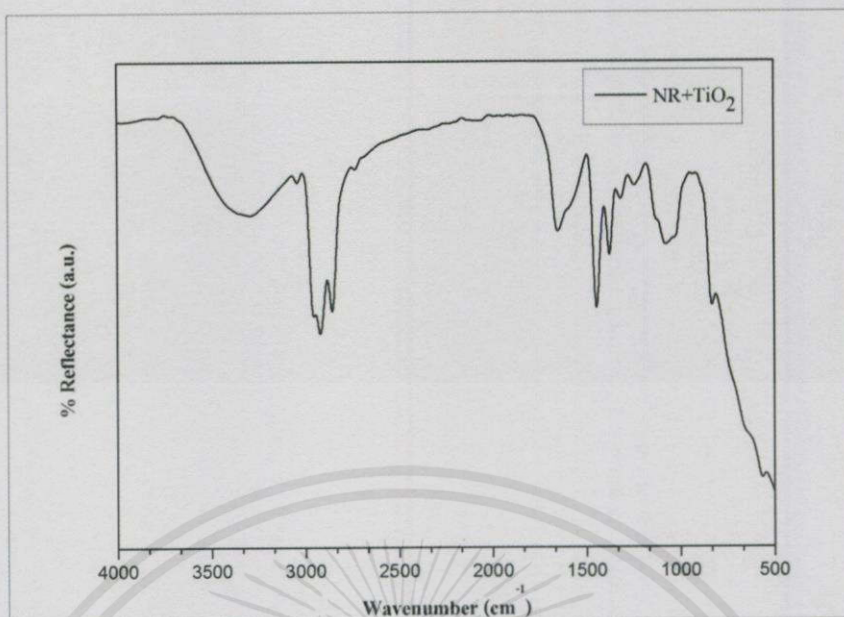
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



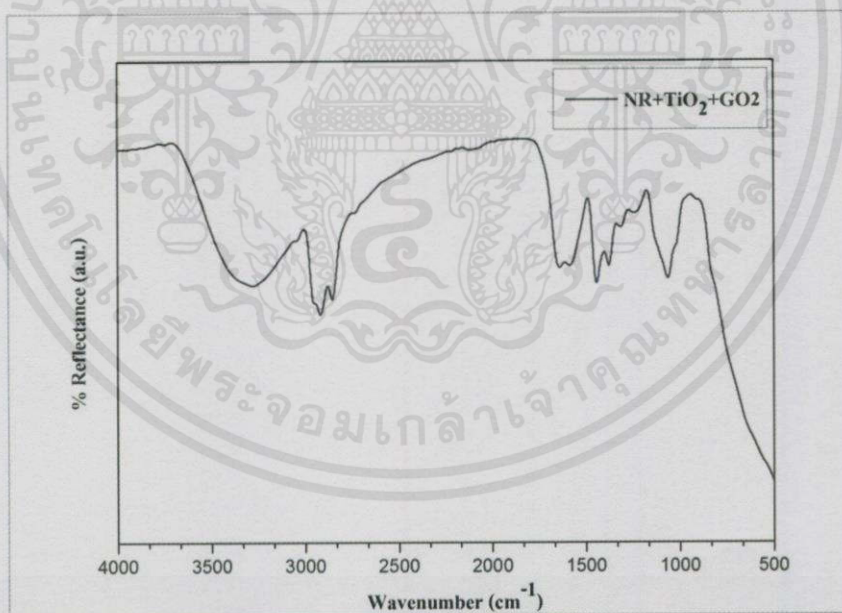
รูปที่ ง-3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR ของ Graphite Oxide



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ ง-4 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR ของ NR นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

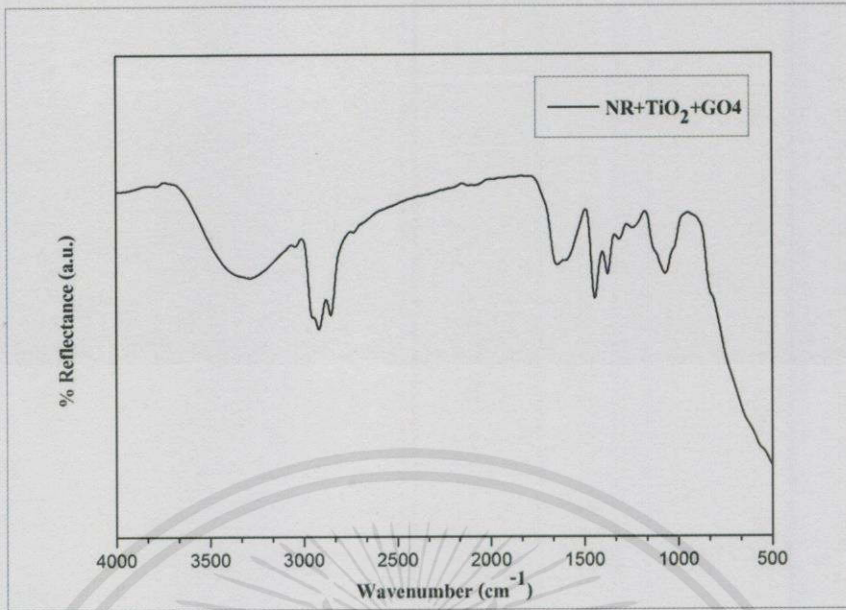


รูปที่ ง-5 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR ของ NR+TiO<sub>2</sub>

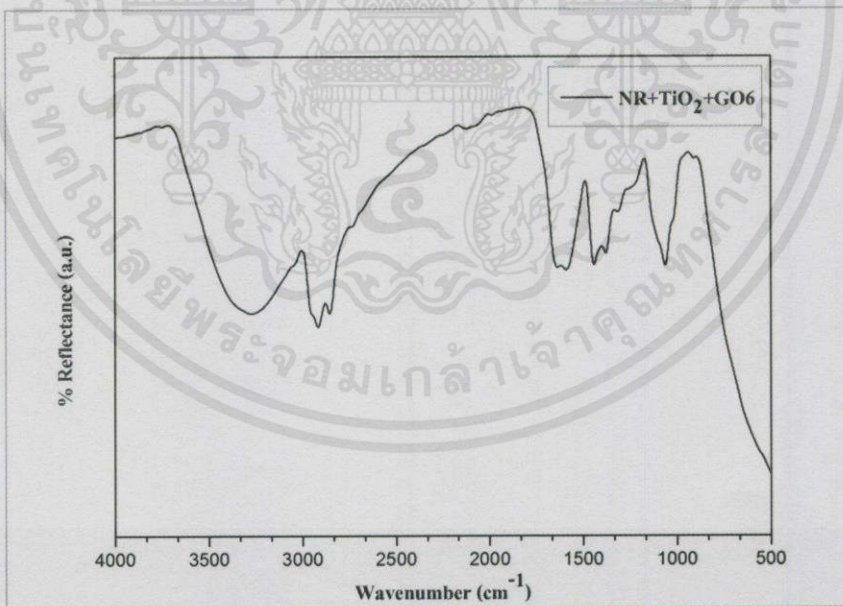


รูปที่ ง-6 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR ของ NR+TiO<sub>2</sub>+GO 2 mg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

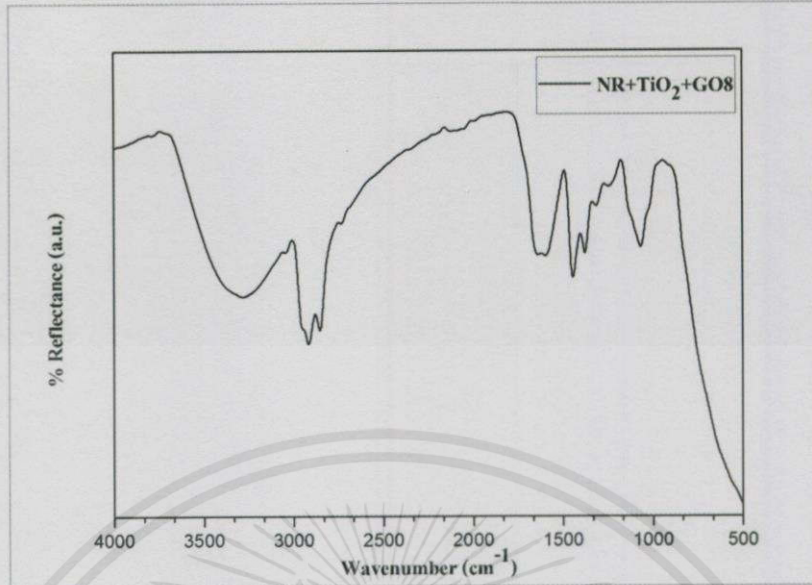


รูปที่ ง-7 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR ของ NR+TiO<sub>2</sub>+GO 4 mg

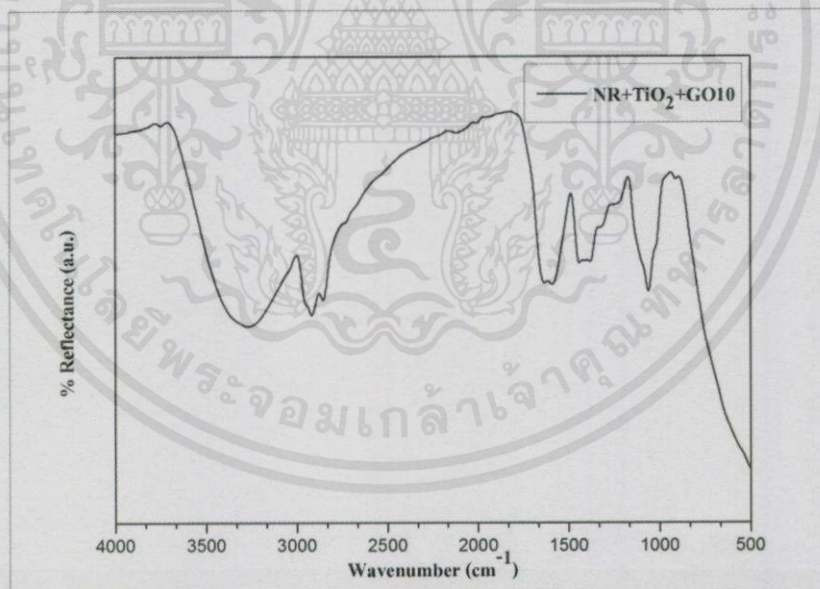


รูปที่ ง-8 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR ของ NR+TiO<sub>2</sub>+GO 6 mg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๙-9 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR ของ NR+TiO<sub>2</sub>+GO 8 mg

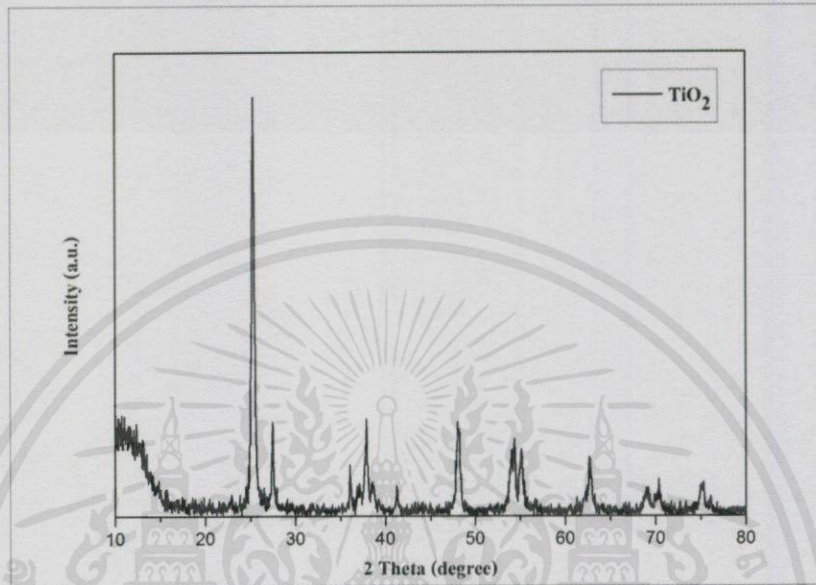


รูปที่ ๙-10 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR ของ NR+TiO<sub>2</sub>+GO 10 mg

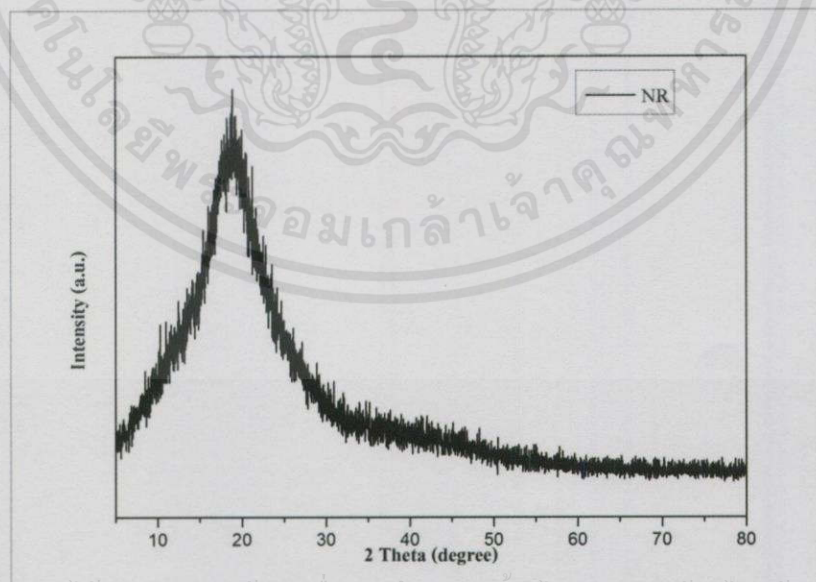
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก จ

ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD

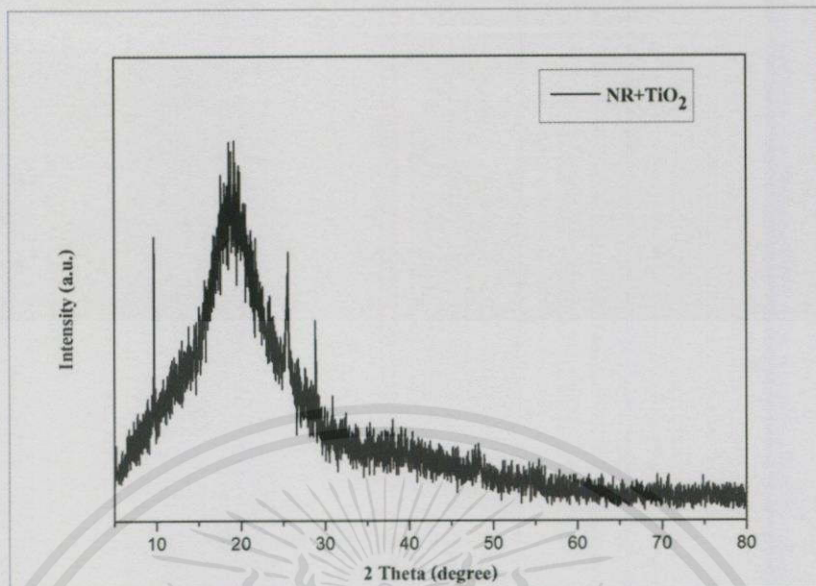


รูปที่ จ-1 XRD patterns ของ TiO<sub>2</sub>

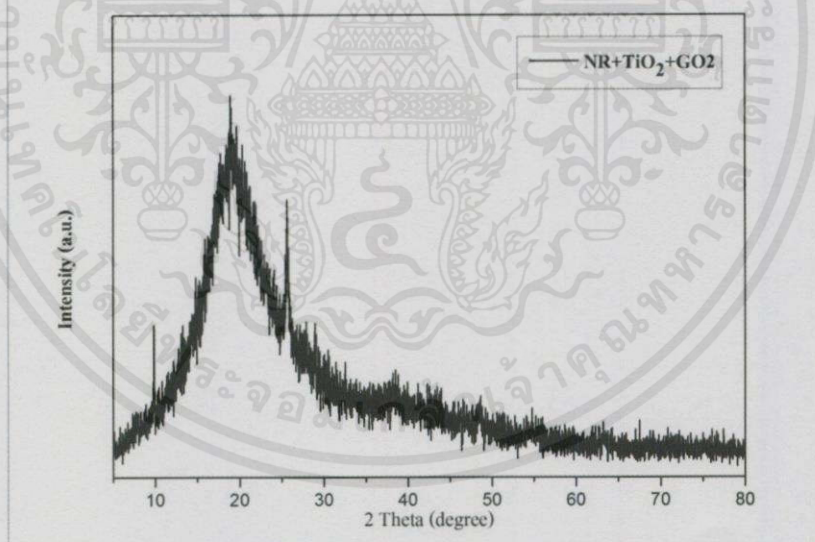


รูปที่ จ-2 XRD patterns ของ NR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

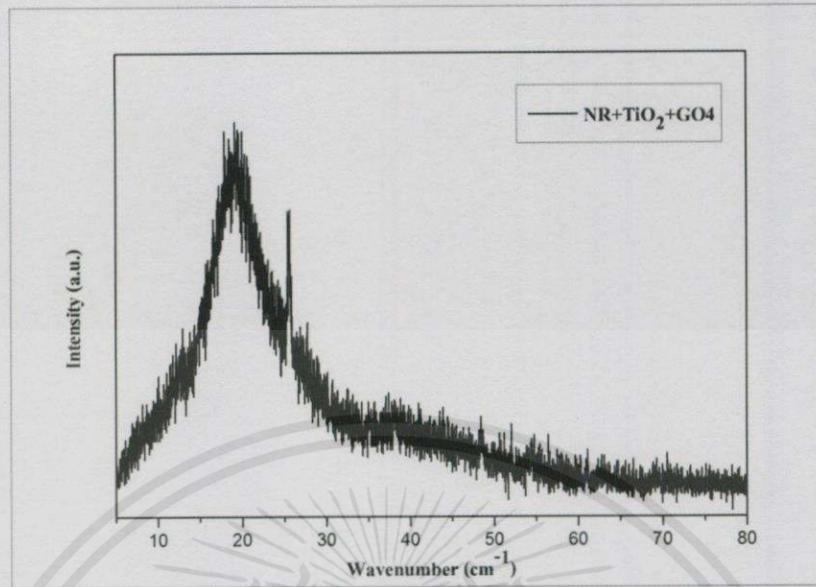


รูปที่ จ-3 XRD patterns ของ NR+TiO<sub>2</sub>

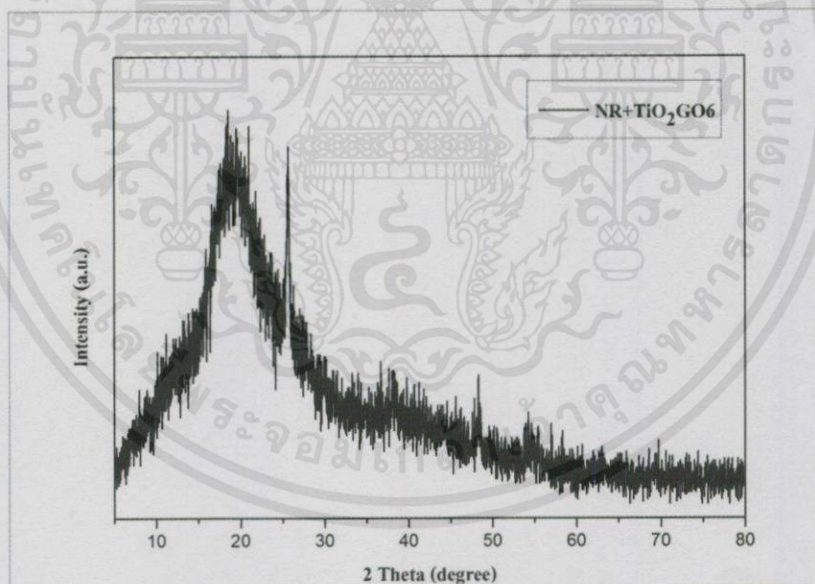


รูปที่ จ-4 XRD patterns ของ NR+TiO<sub>2</sub>+GO 2 mg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

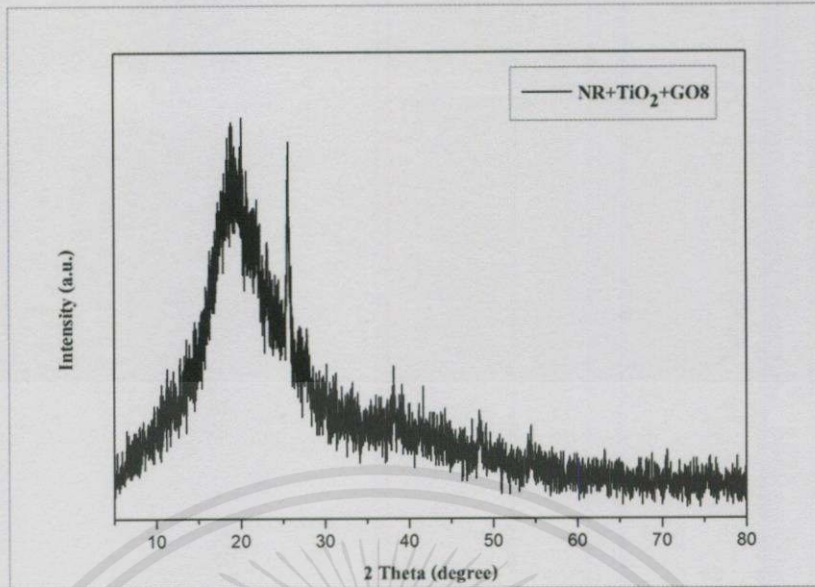


รูปที่ จ-5 XRD patterns ของ NR+TiO<sub>2</sub>+GO 4 mg

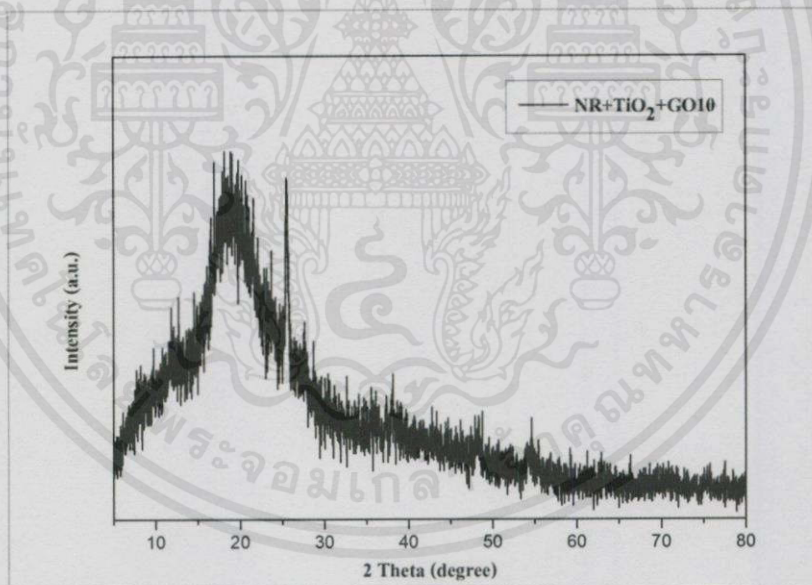


รูปที่ จ-6 XRD patterns ของ NR+TiO<sub>2</sub>+GO 6 mg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ จ-7 XRD patterns ของ NR+TiO<sub>2</sub>+GO 8 mg

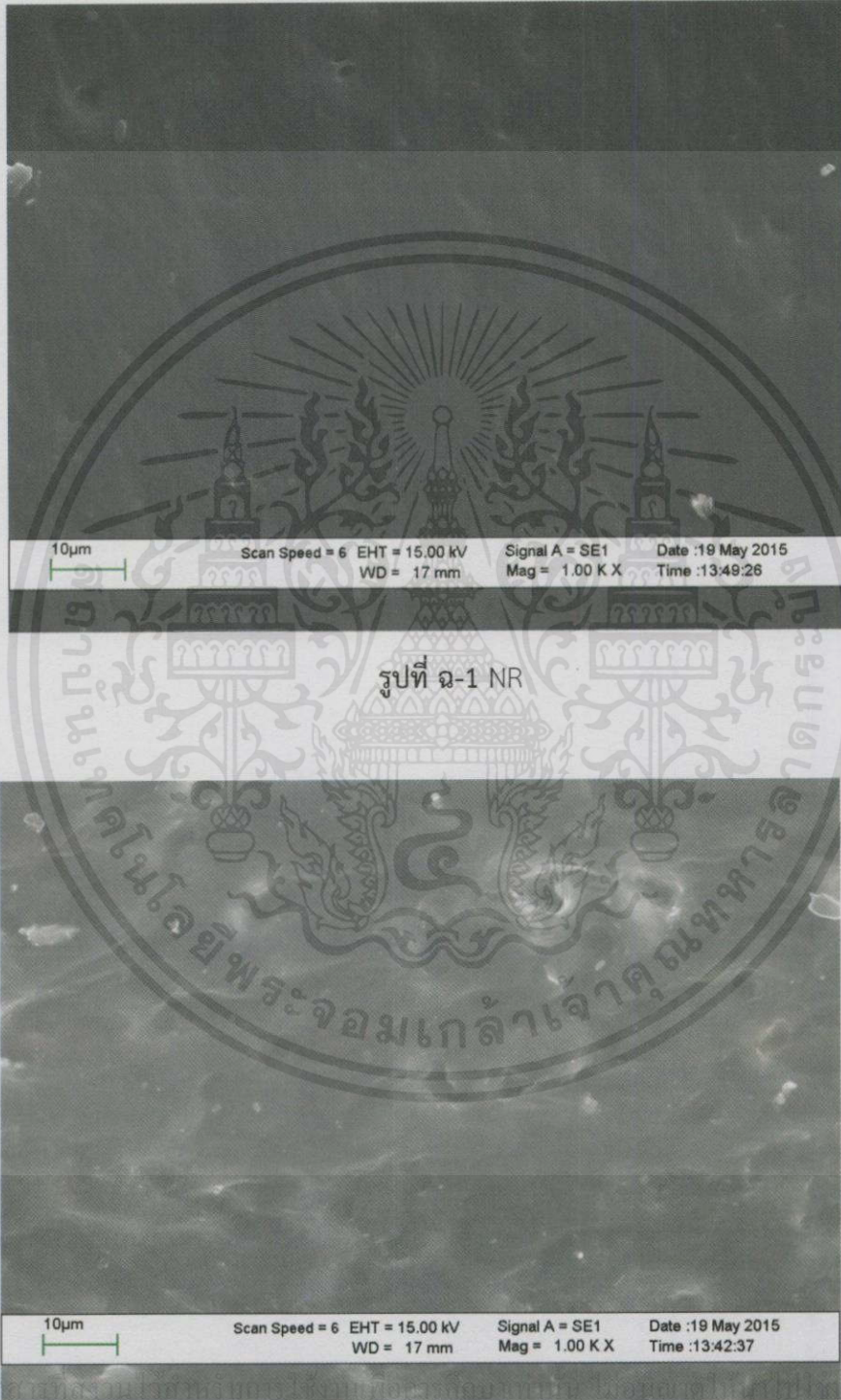


รูปที่ จ-8 XRD patterns ของ NR+TiO<sub>2</sub>+GO 10 mg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ฉ

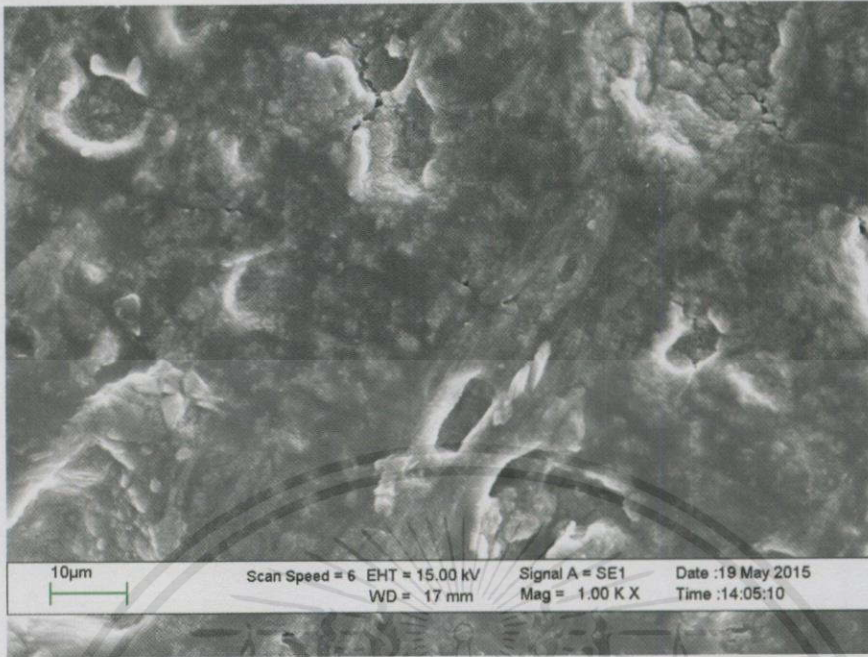
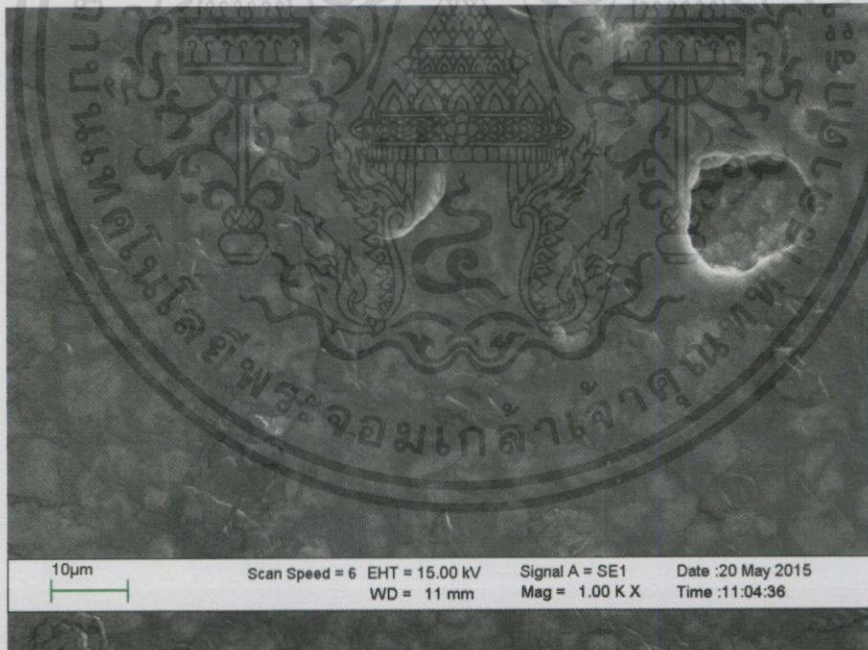
ภาพถ่ายทางสัณฐานวิทยาของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์  
ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



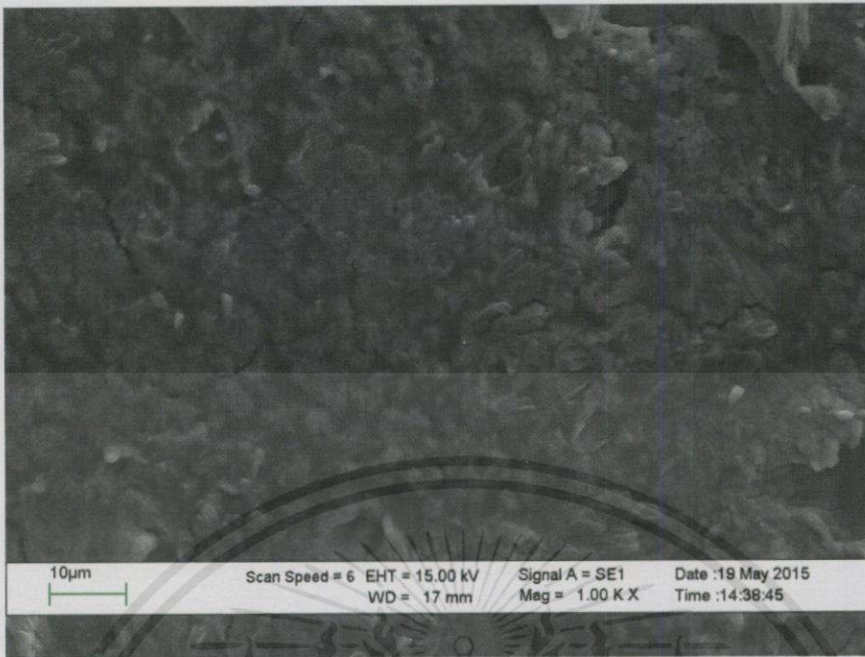
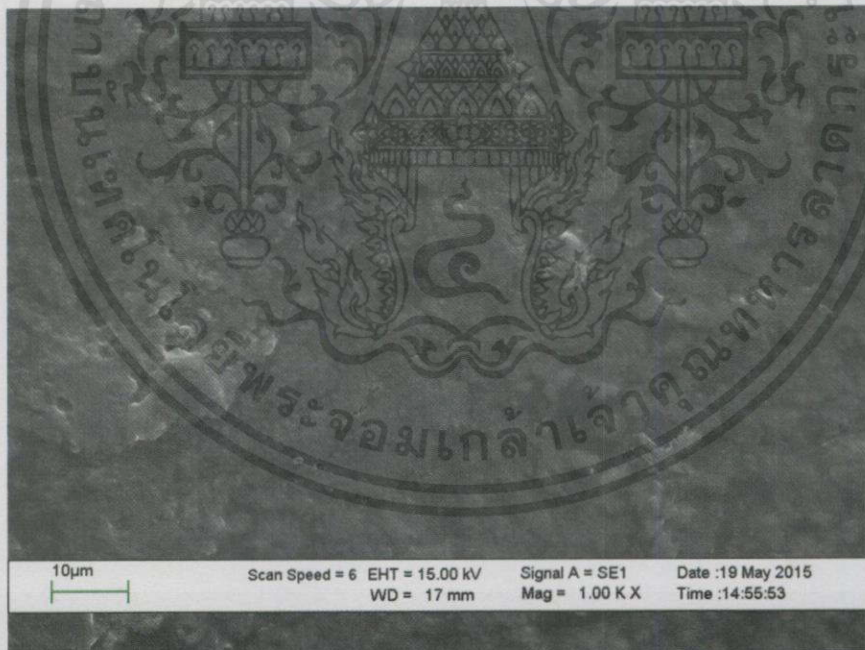
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับกรรมการในวงประชุมที่คณะกรรมาธิการฯ ไม่ควรเผยแพร่ไปยังประชาชนโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

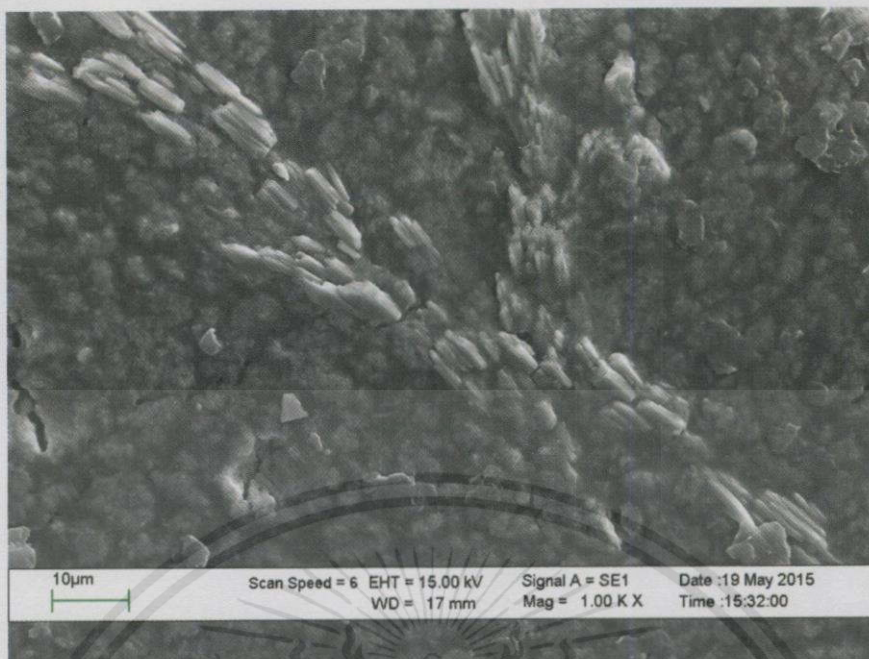
รูปที่ ฉ-2 NR+TiO<sub>2</sub>

รูปที่ ๓-3 NR+TiO<sub>2</sub>+GO 2 mgรูปที่ ๓-4 NR+TiO<sub>2</sub>+GO 4 mg

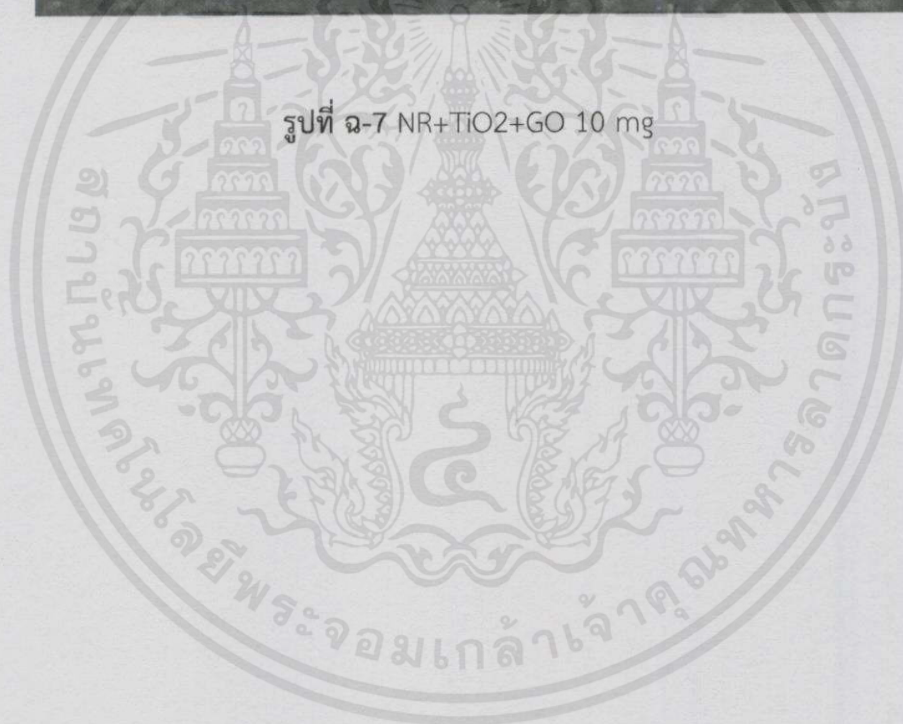
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ๕-5 NR+TiO<sub>2</sub>+GO 6 mgรูปที่ ๕-6 NR+TiO<sub>2</sub>+GO 8 mg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



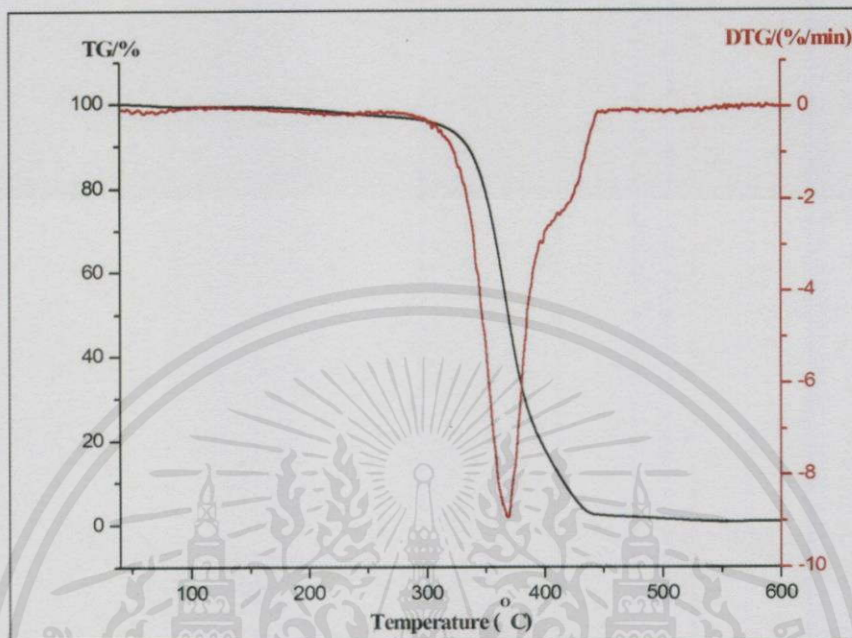
รูปที่ ๑-7 NR+TiO<sub>2</sub>+GO 10 mg



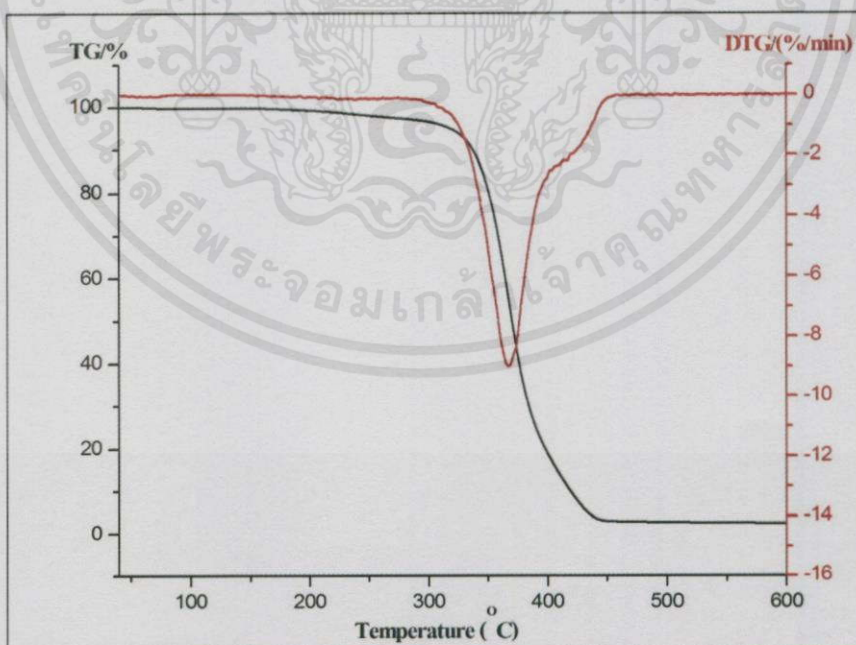
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางความร้อน (Thermogravimetric analysis; TGA)

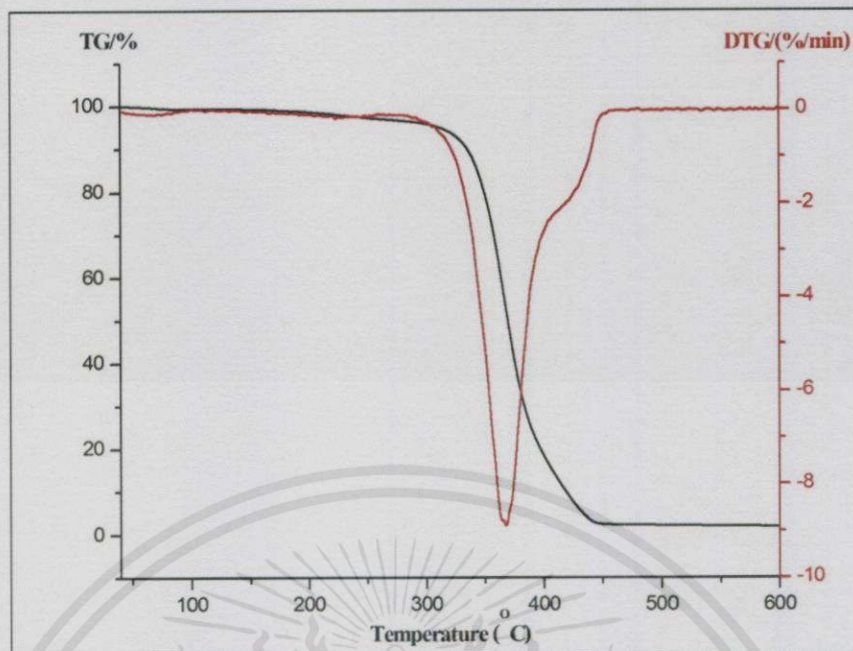


รูปที่ ข-1 TGA ของ NR

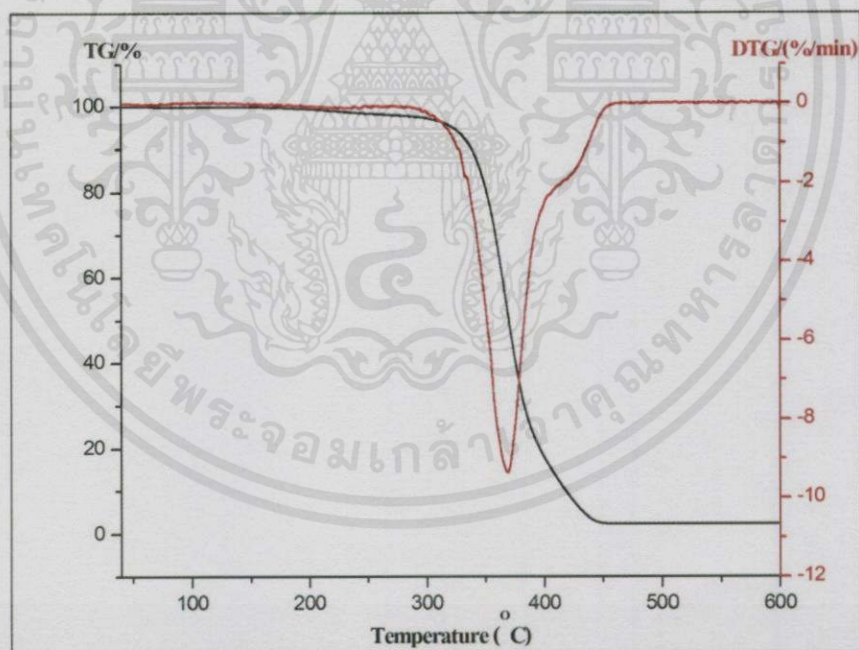


รูปที่ ข-2 TGA ของ NR+TiO<sub>2</sub>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

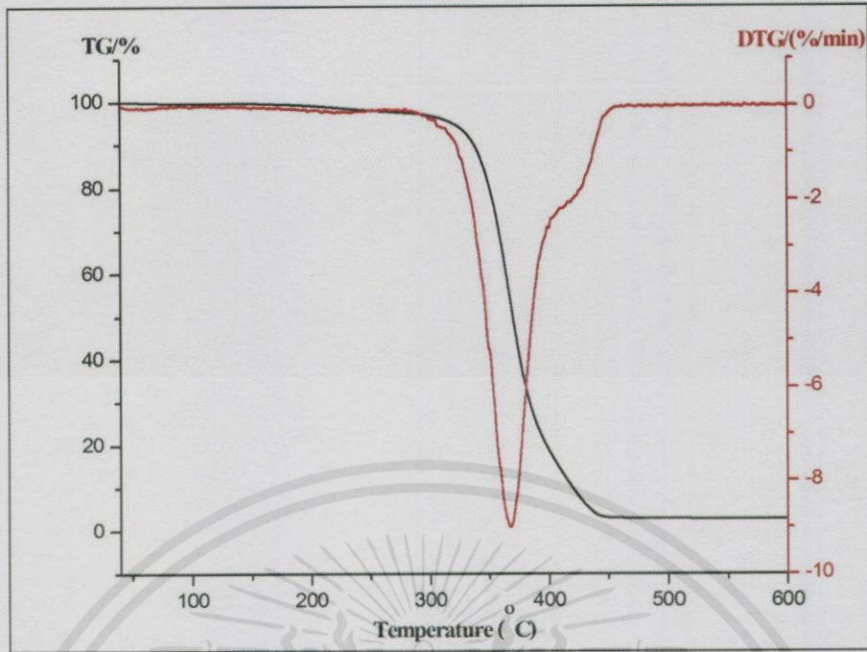


รูปที่ ข-3 TGA ของ NR+TiO<sub>2</sub>+GO 4 mg



รูปที่ ข-4 TGA ของ NR+TiO<sub>2</sub>+GO 8 mg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-5 TGA ของ NR+TiO<sub>2</sub>+GO 10 mg

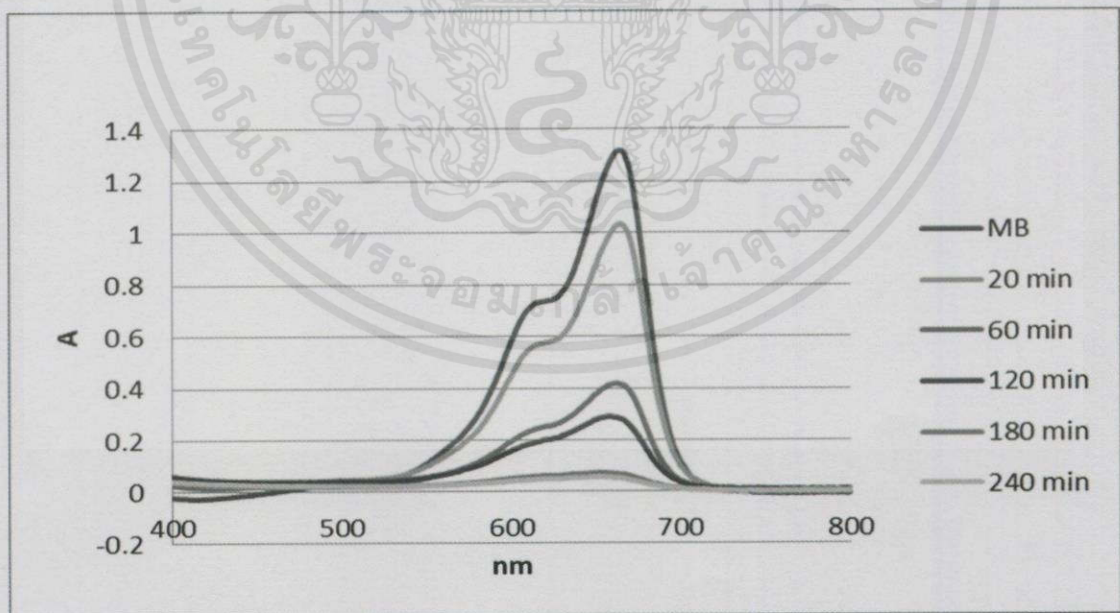
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ซ

ผลการวัดค่าการดูดกลืนแสงหลังผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติกด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer

ตารางที่ ซ-1 ค่าการดูดกลืนแสงยูวีและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ที่ไม่เติมกราฟีนออกไซด์

เวลา (นาท)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		เฉลี่ย
	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ร้อยละการ กำจัดสีย้อม	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ร้อยละการกำจัด สีย้อม	
0	1.3167	0	1.3167	0	0
20	1.0323	21.59	0.8487	35.54	28.56
60	0.4149	68.48	0.4316	67.22	67.85
120	0.2814	78.62	0.2814	78.62	78.62
180	0.0674	94.88	0.1177	92.97	92.97
240	0.0519	96.06	0.0773	95.08	95.08

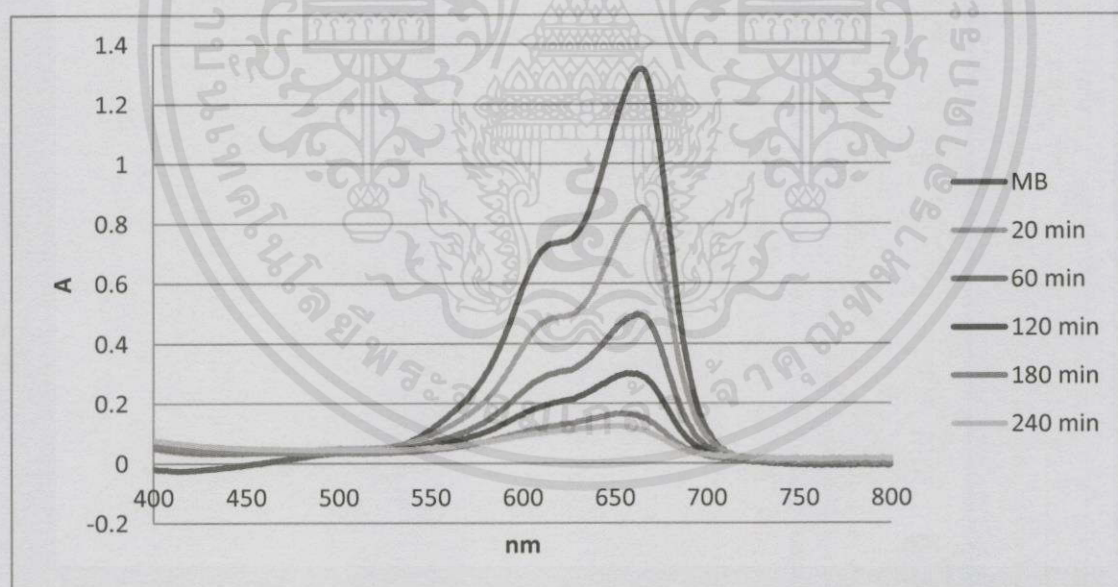


รูปที่ ซ-1 ค่าการดูดกลืนแสงยูวีและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ที่ไม่เติมกราฟีนออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับนำไปใช้งานเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ซ-2 ค่าการดูดกลืนแสงยูวีและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 2 มิลลิกรัม

เวลา (นาทึ)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		เฉลี่ย
	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ร้อยละการ กำจัดสีย้อม	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ร้อยละการ กำจัดสีย้อม	
0	1.3167	0	1.3167	0	0
20	0.8528	35.23	0.8487	35.54	35.38
60	0.4911	62.7	0.4316	67.22	64.96
120	0.2898	77.99	0.2814	78.62	78.3
180	0.1532	88.36	0.1177	91.06	89.71
240	0.1096	91.67	0.0773	94.12	92.89

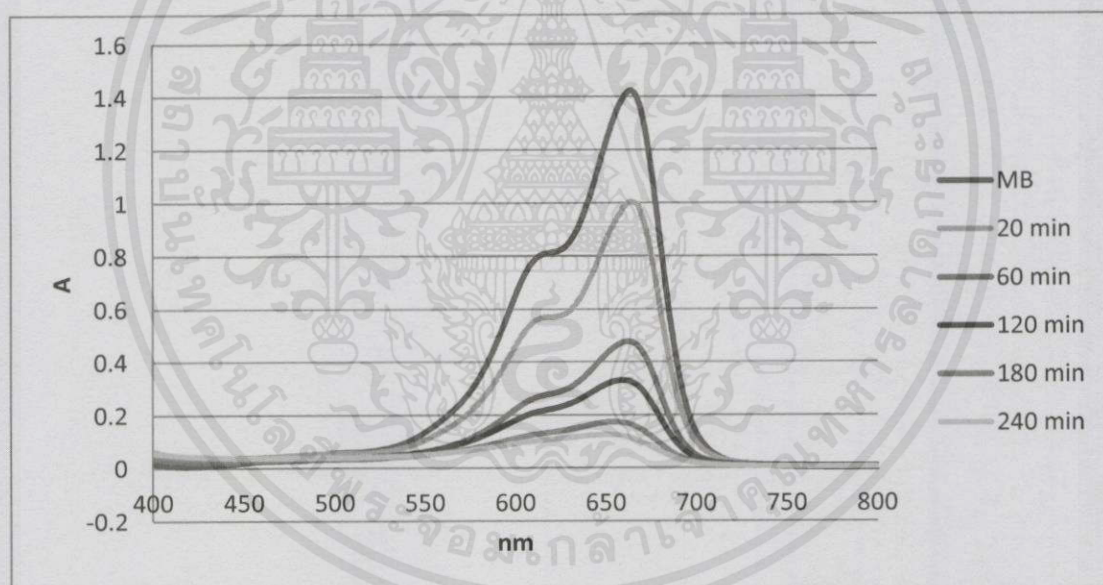


รูปที่ ซ-2 ค่าการดูดกลืนแสงยูวีและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 2 มิลลิกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ห้ามสงวนลิขสิทธิ์และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ซ-3 ค่าการดูดกลืนแสงยูวีและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 4 มิลลิกรัม

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		เฉลี่ย
	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ร้อยละการ กำจัดสีย้อม	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ร้อยละการ กำจัดสีย้อม	
0	1.4197	0	1.4197	0	0
20	1.0022	29.4	1.0022	29.41	29.4
60	0.4729	66.69	0.4953	65.11	65.9
120	0.3221	77.31	0.3299	76.76	77.03
180	0.16	88.73	0.2483	82.51	85.62
240	0.1102	92.25	0.1731	87.81	88.53

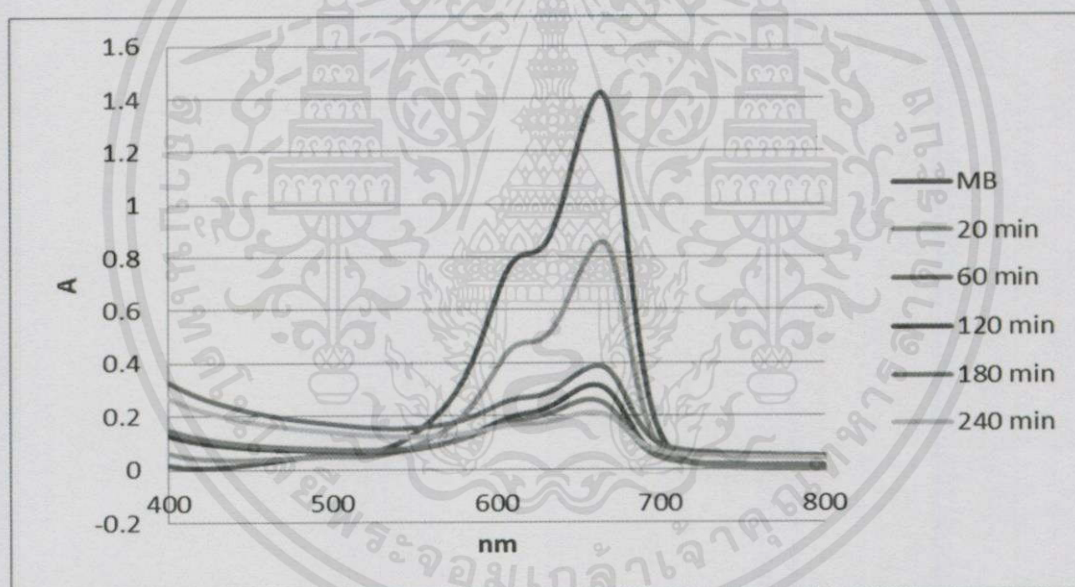


รูปที่ ซ-3 ค่าการดูดกลืนแสงยูวีและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 4 มิลลิกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ซ-4 ค่าการดูดกลืนแสงยูวีและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 6 มิลลิกรัม

เวลา (นาท)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		เฉลี่ย
	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ร้อยละการ กำจัดสีย้อม	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ร้อยละการ กำจัดสีย้อม	
0	1.4197	0	1.4197	0	0
20	0.8576	39.59	0.8576	39.59	39.59
60	0.3537	75.09	0.3854	72.85	73.97
120	0.248	82.53	0.3083	78.28	80.4
180	0.2101	85.2	0.2493	82.44	83.82
240	0.1937	86.36	0.2069	85.43	85.89

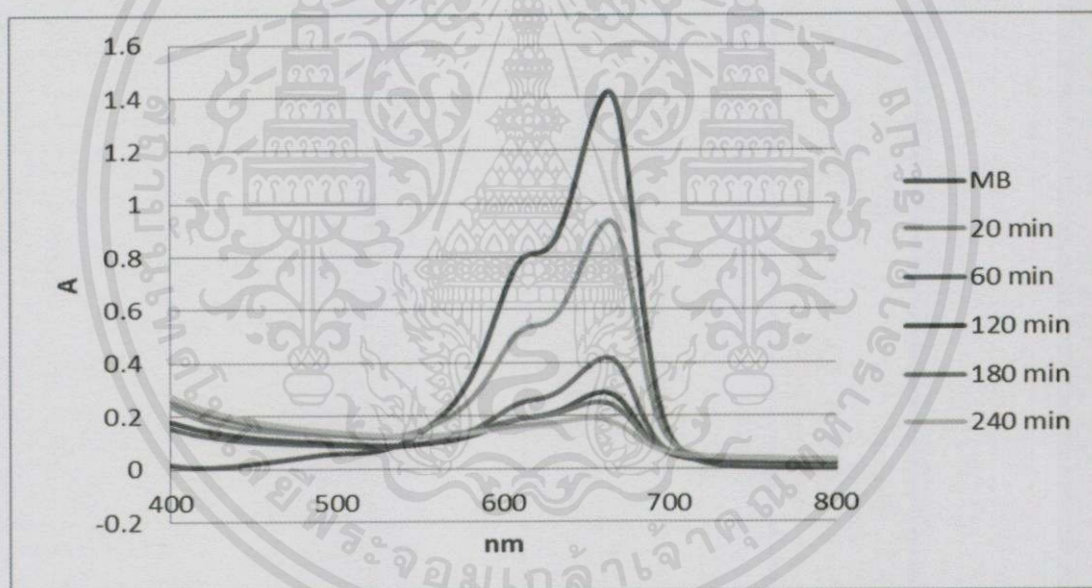


รูปที่ ซ-4 ค่าการดูดกลืนแสงยูวีและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 6 มิลลิกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ซ-5 ค่าการดูดกลืนแสงยูวีและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 8 มิลลิกรัม

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		เฉลี่ย
	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ร้อยละการ กำจัดสีย้อม	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ร้อยละการ กำจัดสีย้อม	
0	1.4197	0	1.4197	0	0
20	0.9341	34.2	0.9341	34.2	34.2
60	0.4061	71.4	0.4155	70.73	71.06
120	0.3267	77	0.2835	80.03	78.51
180	0.2397	83.12	0.2426	82.91	83.01
240	0.2241	84.21	0.1774	87.5	85.85

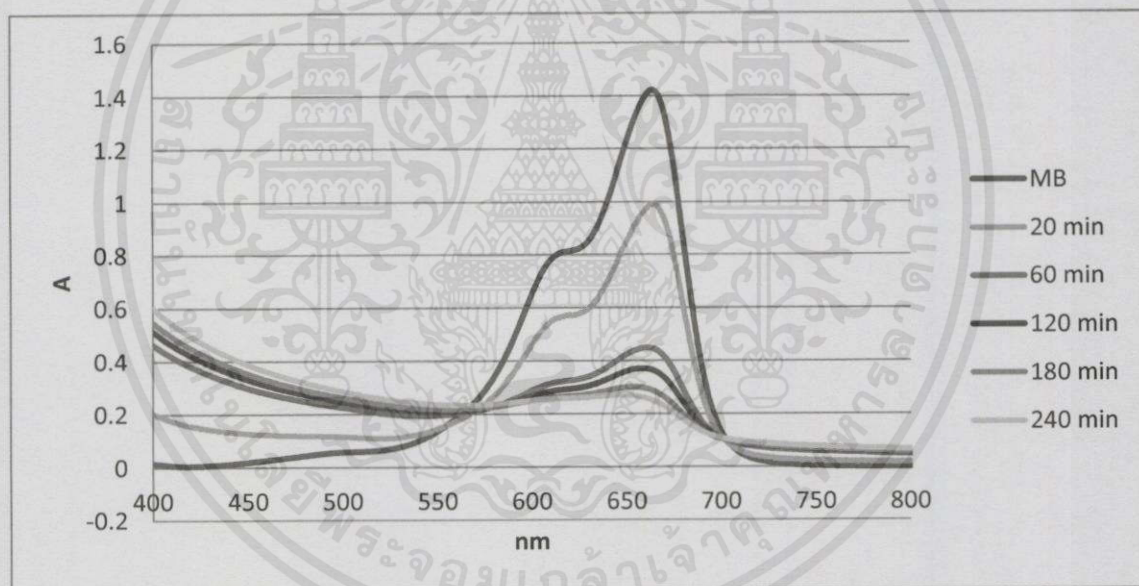


รูปที่ ซ-5 ค่าการดูดกลืนแสงยูวีและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 8 มิลลิกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ซ-6 ค่าการดูดกลืนแสงยูวีและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 10 มิลลิกรัม

เวลา (นาท)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		เฉลี่ย
	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ร้อยละการ กำจัดสีย้อม	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ร้อยละการ กำจัดสีย้อม	
0	1.4197	0	1.4197	0	0
20	0.9909	30.2	0.9909	30.2	30.2
60	0.3547	75.02	0.4431	68.79	71.9
120	0.3265	77	0.3602	74.63	75.81
180	0.2238	84.24	0.2836	80.02	82.13
240	0.2296	83.83	0.2463	82.65	83.21



รูปที่ ซ-6 ค่าการดูดกลืนแสงยูวีและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 10 มิลลิกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ซ-7 ค่าการดูดกลืนแสงขาวและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 0 มิลลิกรัม

เวลา (นาท)	ครั้งที่ 1	
	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ร้อยละการกำจัดสีย้อม
0	1.4702	0
20	1.0463	28.83
60	0.6882	53.19
120	0.421	71.36
180	0.2932	80.06
240	0.2134	85.48

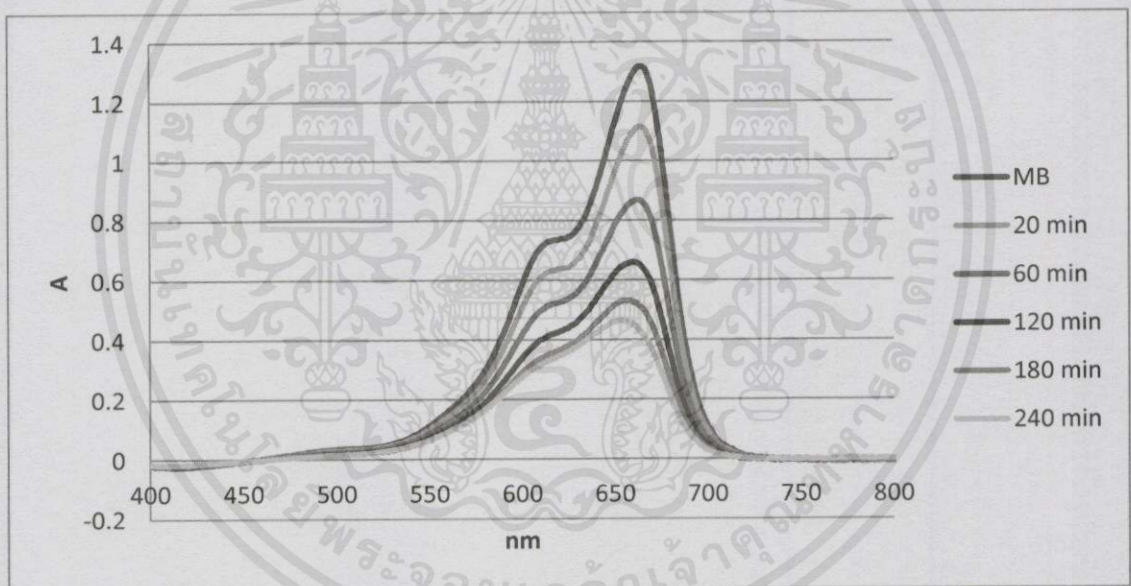
ตารางที่ ซ-8 ค่าการดูดกลืนแสงขาวและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 4 มิลลิกรัม

เวลา (นาท)	ครั้งที่ 1	
	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ร้อยละการกำจัดสีย้อม
0	1.4702	0
20	0.951	35.31
60	0.6488	55.87
120	0.4605	68.68
180	0.3009	79.53
240	0.2228	84.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-9 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 4 มิลลิกรัม ใช้ซ้ำครั้งที่ 1

เวลา (นาท)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		เฉลี่ย
	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ร้อยละการ กำจัดสีย้อม	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ร้อยละการ กำจัดสีย้อม	
0	1.3167	0	1.3167	0	0
20	1.0006	24.01	1.0474	20.45	22.23
60	0.6607	49.82	0.7313	44.46	47.14
120	0.4075	69.05	0.4261	67.64	68.35
180	0.2594	80.3	0.2759	79.05	79.68
240	0.1485	88.72	0.1506	88.56	88.64

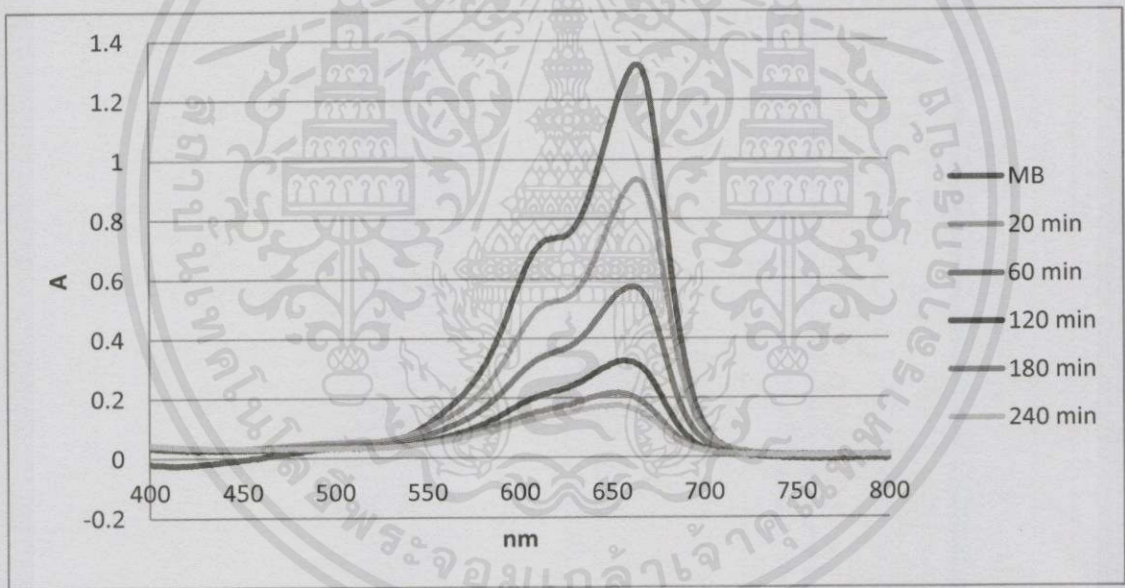


รูปที่ ข-7 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 4 มิลลิกรัม ใช้ซ้ำครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ซ-10 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 4 มิลลิกรัม ใช้ซ้ำครั้งที่ 2

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		เฉลี่ย
	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ร้อยละการกำจัดสีย้อม	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ร้อยละการกำจัดสีย้อม	
0	1.3167	0	1.3167	0	0
20	0.9298	29.38	0.9042	31.33	30.36
60	0.5665	56.98	0.4612	64.97	60.98
120	0.3087	76.56	0.256	80.56	78.56
180	0.191	85.49	0.1451	88.98	87.24
240	0.155	88.23	0.1584	87.97	88.1

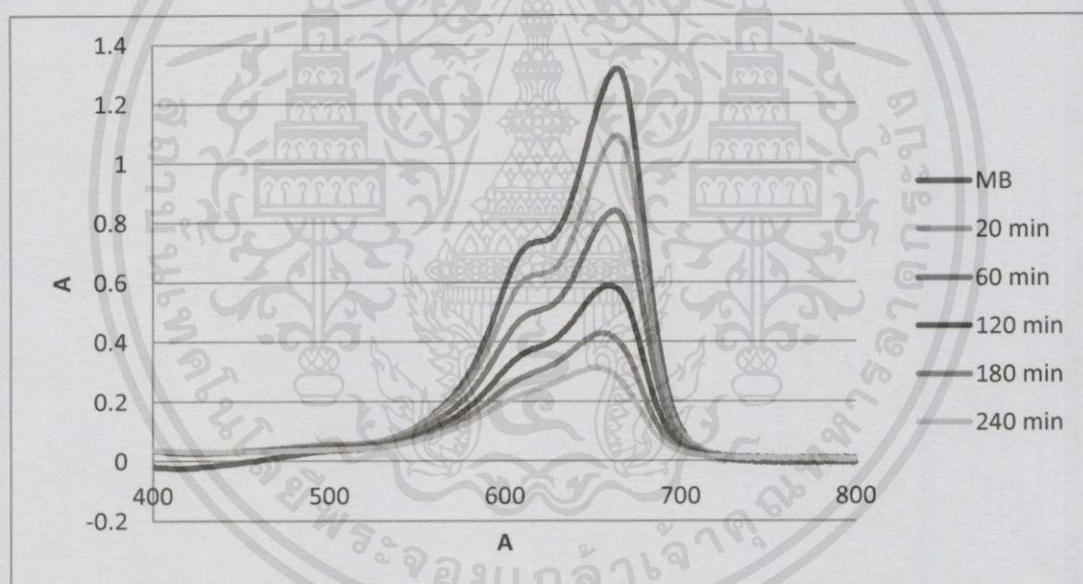


รูปที่ ซ-8 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 4 มิลลิกรัม ใช้ซ้ำครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ซ-11 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 4 มิลลิกรัม ใช้ซ้ำครั้งที่ 3

เวลา (นาท)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		เฉลี่ย
	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ร้อยละการ กำจัดสีย้อม	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ร้อยละการ กำจัดสีย้อม	
0	1.3167	0	1.3167	0	0
20	1.0912	17.13	1.1142	15.38	16.26
60	0.8352	36.57	0.7796	40.79	38.68
120	0.5749	56.34	0.5461	58.53	57.44
180	0.3976	69.8	0.4086	68.97	69.39
240	0.2747	79.14	0.2912	77.88	78.51

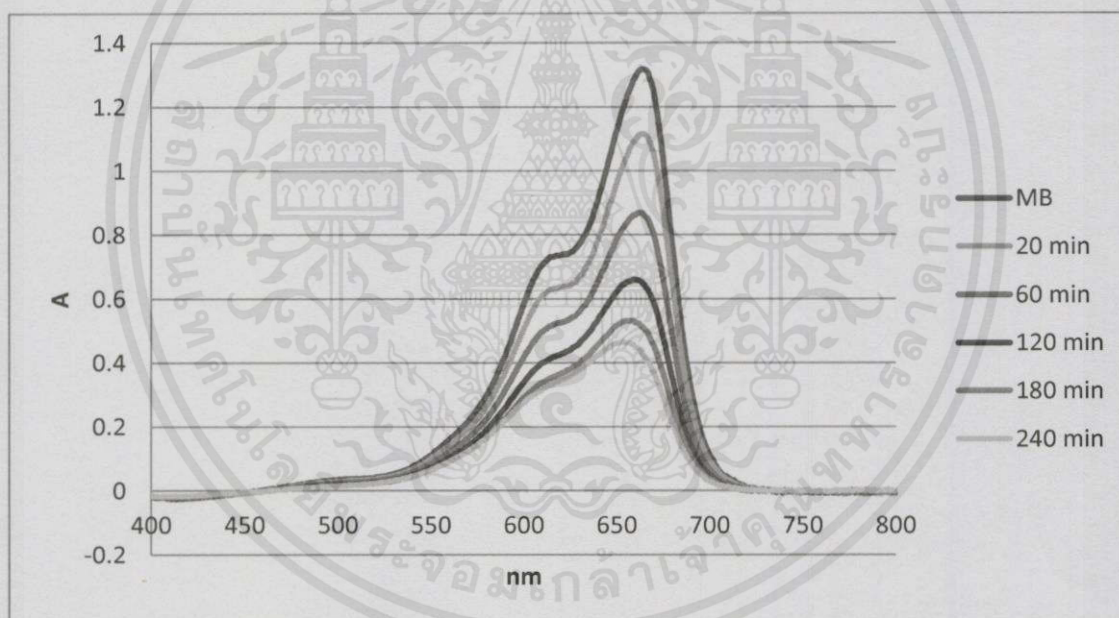


รูปที่ ซ-9 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 4 มิลลิกรัม ใช้ซ้ำครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ซ-12 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 4 มิลลิกรัม ใช้ซ้ำครั้งที่ 4

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		เฉลี่ย
	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ร้อยละการกำจัดสีย้อม	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ร้อยละการกำจัดสีย้อม	
0	1.3167	0	1.3167	0	0
20	1.0962	16.75	1.1137	15.42	16.09
60	0.8852	32.77	0.8596	34.72	33.75
120	0.6077	53.85	0.6425	51.2	52.53
180	0.4484	65.95	0.503	61.8	63.88
240	0.3645	72.32	0.4182	68.24	70.28



รูปที่ ซ-10 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ 4 มิลลิกรัม ใช้ซ้ำครั้งที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ฅ

### ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์

ตารางที่ ฅ-1 แสดงค่าการทดสอบการดึงแผ่นยางธรรมชาติ, แผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และแผ่นยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติม กราฟีนปริมาณ 2, 4, 6, 8 และ 10 มิลลิกรัม

ปริมาณ Graphene oxide ที่เติม	stiffness (N/m)			Young's Modulus (MPa)		
	1	2	เฉลี่ย	1	2	เฉลี่ย
NR	0.1077	0.1155	0.11	0.0101	0.0143	0.01
0 mg	0.3019	0.1045	0.20	0.0146	0.0169	0.02
2 mg	0.5096	0.5965	0.55	0.0255	0.0265	0.03
4 mg	0.7673	0.7425	0.75	0.0469	0.0523	0.05
6 mg	0.8221	0.85523	0.84	0.0537	0.0674	0.06
8 mg	0.9923	0.9768	0.98	0.0652	0.0781	0.07
10 mg	1.2964	1.2342	1.27	0.0951	0.0843	0.09

ปริมาณ Graphene oxide ที่เติม	Load at Break (N)			Stress at Break (MPa)		
	1	2	เฉลี่ย	1	2	เฉลี่ย
NR	1.856	1.9243	1.89	0.4537	0.4537	0.47
0 mg	2.1364	2.1432	2.14	0.536	0.5912	0.56
2 mg	2.3253	2.3342	2.33	0.6235	0.6021	0.61
4 mg	2.544	2.5643	2.55	0.8243	0.8146	0.82
6 mg	3.1382	3.1432	3.14	0.9223	0.9324	0.93
8 mg	3.283	3.2648	3.27	1.102	1.1538	1.13
10 mg	3.4852	3.493	3.49	1.2322	1.2453	1.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้