

การเตรียม การศึกษาคุณลักษณะเฉพาะ และสมบัติโฟโตคะตะไลติก  
ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ถ่านกำมันต์

PREPARATION, CHARACTERIZATION, AND PHOTOCATALYTIC  
PROPERTIES OF  $\text{TiO}_2$ -ACTIVATED CARBON COMPOSITE

RUBBER SHEETS



นายรัฐนนท์      พุฒิพัฒนเกียรติ  
นายवास      จุฑธิเดช  
นายวรพล      เตชางกูร

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาเคมีอุตสาหกรรม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

การเตรียม การศึกษาคุณลักษณะเฉพาะ และสมบัติโฟโตคะตะไลติก  
ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ถ่านกัมมันต์  
PREPARATION, CHARACTERIZATION, AND PHOTOCATALYTIC  
PROPERTIES OF TiO<sub>2</sub>-ACTIVATED CARBON COMPOSITE  
RUBBER SHEETS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาเคมีอุตสาหกรรม  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**PREPARATION, CHARACTERIZATION, AND PHOTOCATALYTIC  
PROPERTIES OF TiO<sub>2</sub>-ACTIVATED CARBON COMPOSITE  
RUBBER SHEETS**



**MR. RATTANON FUWATTHANAKIAT  
MR. WANUS RITDECH  
MR. WORAPOL TEJANGKURA**

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

**FACALTY OF SCIENCE**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNILOGY LADKRABANG**

**ACADEMIC YEAR 2013**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**หัวข้อโครงการพิเศษ** การเตรียม การศึกษาคุณลักษณะเฉพาะ และสมบัติโฟโตคะตะไลติกของ แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ถ่านกัมมันต์

Preparation, Characterization, and Photocatalytic Properties of TiO<sub>2</sub>-Activated Carbon Composite Rubber Sheets

**ชื่อนักศึกษา** นายรัฐนนท์ พุฒินเกียรติ รหัสนักศึกษา 53050317  
นายวินัส ฤทธิเดช รหัสนักศึกษา 53050328  
นายวรพล เตชางกูร รหัสนักศึกษา 53050332

**ปริญญา** วิทยาศาสตรบัณฑิต

**สาขาวิชา** เคมีอุตสาหกรรม

**ปีการศึกษา** 2556

**อาจารย์ที่ปรึกษา** ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี  
อุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.เอกรัฐ เดชศรี	
ดร.เชิดศักดิ์ มณีรัตนรุ่งโรจน์	
ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>หัวข้อโครงการพิเศษ</b>	การเตรียม การศึกษาคุณลักษณะเฉพาะ และสมบัติโฟโตคะตะไลติกของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ถ่านกัมมันต์		
<b>ชื่อนักศึกษา</b>	นายรัฐฉุนนท์	ฟูวัฒนเกียรติ	รหัสนักศึกษา 53050317
	นายวินัส	ฤทธิเดช	รหัสนักศึกษา 53050328
	นายวรพล	เดชาขจร	รหัสนักศึกษา 53050332
<b>ปริญญา</b>	วิทยาศาสตรบัณฑิต		
<b>สาขาวิชา</b>	เคมีอุตสาหกรรม		
<b>ปีการศึกษา</b>	2556		
<b>อาจารย์ที่ปรึกษา</b>	ดร.ชวาลย์	ศรีวงษ์	

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ ได้ทำการศึกษาวิจัยในเรื่องของ การเตรียม การศึกษาคุณลักษณะเฉพาะ และสมบัติทางด้านโฟโตคะตะไลติก ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ถ่านกัมมันต์ รวมไปถึงยังได้มีการศึกษาสมบัติทางด้านความแข็งแรงเชิงกล และประสิทธิภาพในการใช้งานซ้ำอีกด้วย ในส่วนของการเตรียมแผ่นยางผสม สามารถเตรียมด้วยวิธีง่ายๆ โดยการนำสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ น้ำยางธรรมชาติเข้มข้น (60% HA) และสารแขวนลอยถ่านกัมมันต์ในปริมาณที่แตกต่างกันมาผสมกันโดยตรง หลังจากทำการผสมเสร็จแล้วเทลงในแบบและตั้งทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง สูดท้ายเมื่อแกะออกจากแบบก็จะ ได้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ถ่านกัมมันต์ที่พร้อมใช้งาน สำหรับลักษณะรูปแบบ โครงสร้างผลึกและสัณฐานวิทยาของแผ่นยางผสมที่เตรียมขึ้น สามารถศึกษาและตรวจสอบเอกลักษณ์เฉพาะด้วยเทคนิคต่างๆ ดังนี้ คือ FT-IR XRD SEM และ EDS ผลปรากฏว่า รูปแบบ โครงสร้างผลึกและหมู่ฟังก์ชันของแผ่นยางผสมที่เตรียมขึ้นจะสอดคล้องกับฟีดเอกลักษณ์เฉพาะของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) และแผ่นยางธรรมชาติเริ่มต้น ในขณะที่ไม่พบฟีดเอกลักษณ์ของถ่านกัมมันต์ ผลจาก SEM และ EDS พบว่า ลักษณะที่พื้นผิวของแผ่นยางผสมจะถูกปกคลุมด้วยอนุภาคของถ่านกัมมันต์มากขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณการเติมถ่านกัมมันต์ลงไป จากผลการทดสอบแรงดึงพบว่า สมบัติเชิงกล (ค่า Young's Modulus) ของแผ่นยางผสมนี้จะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณการเติมถ่านกัมมันต์ ในส่วนของการทดสอบสมบัติโฟโตคะตะไลติก พบว่าแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ถ่านกัมมันต์ สามารถกำจัดสีข้อมทั้งเมทิลีนบลูและอินดิโกคาร์มีนภายใต้การฉายแสงอุลตราไวโอเลตได้ โดยเฉพาะสีข้อมเมทิลีนบลูถูกกำจัดได้รวดเร็วกว่าสีข้อมอินดิโกคาร์มีน นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาประสิทธิภาพการนำแผ่นยางผสมไทเทเนียม-ไดออกไซด์-ถ่านกัมมันต์มาใช้งานซ้ำ ผลแสดงให้เห็นว่า แผ่นยางผสมนี้สามารถนำมาใช้งานซ้ำได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามแม้ว่าแผ่นยางผสมนี้จะมีประสิทธิภาพลดลงเมื่อทำการใช้ซ้ำเป็นจำนวนหลายครั้ง แต่แผ่นยางผสมนี้ยังมีข้อดีบางอย่าง คือ ง่ายต่อการใช้งาน หลังจากใช้งานเสร็จแล้วสามารถเก็บคืนกลับมาได้ และสามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้อีกด้วย



**คำสำคัญ:** ไทเทเนียมไดออกไซด์ ถ่านกัมมันต์ ปฏิกริยาโฟโตคะตะไลติก เมทิลีนบลู อินดิโก-คาร์มีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Title</b>	Preparation, Characterization, and Photocatalytic Properties of TiO <sub>2</sub> -Activated Carbon Composite Rubber Sheets			
<b>Students</b>	MR. Rattanon	Fuwatanakiat	ID	53050317
	MR. Wanus	Ritdech	ID	53050328
	MR. Worapol	Tejangkura	ID	53050332
<b>Degree</b>	Bachelor of Chemistry			
<b>Major Program</b>	Industrial Chemistry			
<b>Academic Year</b>	2013			
<b>Advisor</b>	Dr. Chaval	Sriwong		

## ABSTRACT

In this special project, the preparation, characterization, and photocatalytic properties of TiO<sub>2</sub>-activated carbon composite rubber sheets were investigated, including the mechanical properties and recyclability of these sheets were also studied. In the preparation section, TiO<sub>2</sub>-activated carbon composite rubber sheets were easily prepared by directly mixing of TiO<sub>2</sub> suspension and concentrated rubber latex (60% HA) with varying different amounts of activated carbon suspension. After that the prepared mixture were poured into mold, left at room temperature to dried, and finally, the TiO<sub>2</sub>-activated carbon composite rubber sheets were obtained. The morphologies and crystalline phase features of these sheets were characterized by using FT-IR, XRD, SEM, and EDS techniques. The results showed that the crystalline phases and functional groups of TiO<sub>2</sub>-activated carbon composite rubber sheets are corresponding to pristine TiO<sub>2</sub> (Degussa P25) powder and natural rubber sheet, whereas all of the activated carbon characteristic peaks are not observed. From the SEM and EDS results, the morphologies of the sheets surface were increased covering with activated carbon particles when the increasing added amount of activated carbon. From the tensile test found that the mechanical property as young's modulus of the sheets were increased with the increasing amount of activated carbon. In the photocatalytic properties test showed that the prepared TiO<sub>2</sub>-activated carbon composite rubber sheets could be degrade both methylene blue (MB) and indigo carmine (IC) dyes under UV light irradiation. Especially, the former dye degraded faster than the later dye. In addition, the efficiencies of TiO<sub>2</sub>-activated carbon composite rubber sheet on the repeatedly used were also

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

studied. The results indicated that  $\text{TiO}_2$ -activated carbon composite rubber sheet could be repeatedly used on the photodegradation of MB dye solution under UV light irradiation. However, despite this composite rubber sheet showed that the decreased efficiencies on the repeatedly used when increasing the number of uses but the sheet has some advantages that it is easy to use, recoverable after use, and it can be reused as well.



**Keywords:** Titanium dioxide, Activated carbon, Photocatalytic, Methylene blue, Indigo carmine

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ความสำเร็จของโครงการพิเศษนี้จะไม่เกิดขึ้น หากไม่ได้รับความช่วยเหลือ คำแนะนำ การตัดเตือน และแนวทางการแก้ไขปัญหาต่างๆจากผู้มีอุปการคุณ ดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่คอยให้การสนับสนุนสำหรับโครงการพิเศษนี้มาโดยตลอด อีกทั้งยังคอยให้คำแนะนำและคอยตัดเตือนเพื่อไม่ให้เกิดข้อผิดพลาดและเพื่อให้โครงการพิเศษนี้เป็นไปตามเป้าหมาย

ขอขอบพระคุณ ดร.เอกรัฐ เดชศรี ดร.เชิดศักดิ์ มณีรัตน์รุ่งโรจน์ และ ดร.ปานไพลิน สีหาราช อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นคณะกรรมการสอบ ที่ให้คำแนะนำและแนวทางแก้ไขในจุดที่ผิดพลาด

ขอขอบพระคุณ นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการและเจ้าหน้าที่ปฏิบัติการประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านสถานที่ อุปกรณ์ และคำแนะนำในด้านเอกสาร

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์เฉพาะของชิ้นงานด้วยเทคนิคต่างๆ ด้วยความถูกต้องและรวดเร็ว

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ ครอบครัว รุ่งพี้มขัติ และเพื่อนๆอีกมากมาย ที่คอยส่งกำลังใจมาให้อย่างมิได้ขาดสาย นอกจากนี้ยังให้ความช่วยเหลือในขั้นตอนการปฏิบัติการ และให้คำแนะนำตลอดการทำโครงการพิเศษ เพื่อให้โครงการพิเศษครบถ้วนสมบูรณ์และสำเร็จไปได้ด้วยดี

รัฐนนท์	ฟูวัฒนเกียรติ
วนัส	ฤทธิเดช
วรพล	เตชางกูร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	III
กิตติกรรมประกาศ	V
สารบัญ	VI
สารบัญตาราง	X
สารบัญรูป	XI
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 ปฏิกริยาโฟโตคะตะไลซิส	
2.1.1 ความหมายของปฏิกริยาโฟโตคะตะไลซิส	4
2.1.2 หลักการของปฏิกริยาโฟโตคะตะไลซิส	4
2.1.3 กลไกการเกิดปฏิกริยาโฟโตคะตะไลซิส	6
2.1.4 ชนิดของโฟโตคะตะไลซิส	7
2.1.5 ชนิดของตัวคะตะลิสต์	8
2.1.6 ปัจจัยที่ส่งผลต่อปฏิกริยาโฟโตคะตะไลซิส	9
2.1.7 ผลงานแสง	10
2.2 ไทเทเนียมไดออกไซด์	
2.2.1 ข้อมูลเบื้องต้นของไทเทเนียมไดออกไซด์	11
2.2.2 สมบัติทางกายภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์	12
2.2.3 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์	13
2.2.4 สมบัติทางไฟฟ้าของไทเทเนียมไดออกไซด์	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.5	ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ของไทเทเนียมไดออกไซด์	15
2.2.6	ประโยชน์ของไทเทเนียมไดออกไซด์	17
2.3	ยางธรรมชาติ	
2.3.1	ข้อมูลเบื้องต้นของยางธรรมชาติ	19
2.3.2	โครงสร้างของยางธรรมชาติ	19
2.3.3	สมบัติของยางธรรมชาติ	20
2.3.4	ข้อดีของยางธรรมชาติ	20
2.3.4	ข้อดีและข้อเสียในด้านโฟโตคะตะไลซิส	21
2.4	ถ่านกัมมันต์	
2.4.1	ข้อมูลเบื้องต้นของถ่านกัมมันต์	22
2.4.2	ชนิดของถ่านกัมมันต์	22
2.4.3	การดูดซับของถ่านกัมมันต์	22
2.4.4	การผลิตถ่านกัมมันต์	23
2.4.5	การนำถ่านกัมมันต์กลับมาใช้ใหม่	25
2.4.6	ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์	25
2.5	สีข้อม	
2.5.1	ข้อมูลเบื้องต้นของสีข้อม	26
2.5.2	อินดิโกคาร์มีน	26
2.5.3	เมทิลินบลู	27
2.6	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	28
2.7	สรุปเนื้อหาสำคัญของโครงการพิเศษ	30
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>		
3.1	สารเคมี	31
3.2	อุปกรณ์และเครื่องมือ	31
3.3	การเตรียมถ่านกัมมันต์และทดสอบการย่อยสลายสีข้อม	
3.3.1	การปรับสภาพถ่านกัมมันต์	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.2 การทำให้ถ่านกัมมันต์อยู่ในรูปสารแขวนลอย	33
3.3.3 การหาความเข้มข้นของสารแขวนลอย	33
3.3.4 การขึ้นรูปแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์	34
3.4 การตรวจสอบเอกลักษณ์เฉพาะ	
3.4.1 การตรวจสอบเอกลักษณ์พื้นฐานของการสั่นใน โมเลกุล	35
3.4.2 การตรวจสอบลักษณะผลึกและอสัณฐาน	35
3.4.3 การตรวจสอบลักษณะสัณฐานของสารในระดับจุลภาค	36
3.4.4 การตรวจสอบเชิงธาตุ	36
3.4.5 การตรวจสอบการรับแรงดึงยืด	36
3.4.6 การตรวจสอบสมบัติการดูดกลืนแสง	36
3.5 การทดสอบการกำจัดสีข้อมและการนำกลับมาใช้ซ้ำ	37
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล</b>	
4.1 การหาความเข้มข้นของสารแขวนลอยถ่านกัมมันต์	38
4.2 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์พื้นฐานของการสั่นของ โมเลกุล	
4.2.1 ถ่านกัมมันต์ก่อนและหลังปรับสภาพ	39
4.2.2 แผ่นยางผสมไทเทเนียม ไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์	40
4.3 ผลการตรวจสอบลักษณะผลึกและอสัณฐาน	40
4.4 ผลการตรวจสอบลักษณะสัณฐานของสารในระดับจุลภาค	42
4.5 ผลการตรวจสอบเชิงธาตุ	45
4.6 ผลการตรวจสอบสมบัติเชิงกล	46
4.7 ผลการศึกษาความสามารถในด้านการกำจัดสีข้อม	
4.7.1 ความสามารถในการกำจัดสีข้อมเมทิลินบลู	47
4.7.2 ความสามารถในการกำจัดสีข้อมอินดิ โกลคาร์มีน	49
4.8 ผลการศึกษาความสามารถในการใช้ซ้ำ	50
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	
5.1 สรุปผลการปรับสภาพถ่านกัมมันต์และการเตรียมแผ่นยางผสม	52
5.2 สรุปผลการตรวจสอบเอกลักษณ์เฉพาะด้วยเทคนิคต่างๆ	
5.2.1 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์พื้นฐานของการสั่นของสาร	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2.2 ผลการตรวจสอบลักษณะผลิตภัณฑ์และอสังหาริมทรัพย์	53
5.2.3 ผลการตรวจสอบลักษณะอสังหาริมทรัพย์ของสารในระดับจุลภาค	53
5.2.4 ผลการตรวจสอบเชิงธาตุ	53
5.3 สรุปผลในด้านสมบัติเชิงกล	54
5.4 สรุปผลในด้านการกำจัดสีข้อม	54
5.5 สรุปผลในด้านการใช้งานซ้ำ	54
5.6 ข้อเสนอแนะ	55
เอกสารอ้างอิง	56
ภาคผนวก	59



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าความยาวคลื่นชนิดต่างๆ	11
2.2 ข้อมูลโดยทั่วไปของไทเทเนียมไดออกไซด์	12
2.3 เปรียบเทียบการกำจัดมลพิษของไทเทเนียมไดออกไซด์กับวิธีอื่นๆ	18
2.4 สมบัติต่างๆของเมทิลีนบลู	28
2.5 ประสิทธิภาพในการเกิดโฟโตคะตะไลซิส	29
4.1 เปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยสารตัวอย่าง 6 ชนิด	47
4.2 เปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มินด้วยสารตัวอย่าง 6 ชนิด	49
4.3 เปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู	50



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูปร่างภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ผู้คิดค้นปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส	4
2.2 พลังงานของการเกิดออกซิเดชันของสารอินทรีย์	5
2.3 การเปรียบเทียบโฟโตคะตะลิสต์กับคลอโรฟิลล์	5
2.4 กลไกของการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส	6
2.5 การเปรียบเทียบค่าช่องว่างของพลังงานของตัวกลางชนิดต่างๆที่ $\text{pH} = 1$	9
2.6 ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบผง	12
2.7 โครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้ง 3 ชนิด	13
2.8 แถบพลังงานของตัวนำไฟฟ้าชนิดต่างๆ	14
2.9 แถบพลังงานที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเจืออะตอมของธาตุหมู่อื่นลงไป	14
2.10 กลไกของการเร่งปฏิกิริยาค้ำแสงของสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์	16
2.11 ความสามารถของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่กำจัดมลพิษทั้งในน้ำและอากาศ	18
2.12 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ	20
2.13 ยางธรรมชาติที่ได้จากต้นยางพารา	21
2.14 ชนิดของถ่านกัมมันต์	22
2.15 กลไกการดูดซับและโครงสร้างภายในถ่านกัมมันต์	23
2.16 โครงสร้างของสี่เหลี่ยมอะตอมคาร์บอนชนิดต่างๆ	27
2.17 โครงสร้างของเมทิลีนบลู	27
4.1 กราฟ FT-IR เปรียบเทียบถ่านกัมมันต์ก่อนและหลังปรับสภาพ	39
4.2 กราฟ FT-IR เปรียบเทียบลักษณะของยางธรรมชาติ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และแผ่นยางตัวอย่าง	40
4.3 กราฟ XRD เปรียบเทียบผงถ่านกัมมันต์ก่อนและหลังปรับสภาพ	41
4.4 กราฟ XRD เปรียบเทียบตัวอย่างทั้ง 6 ความเข้มข้นกับมาตรฐาน	41
4.5 รูปถ่าย SEM ถ่านกัมมันต์ก่อนปรับสภาพ	42
4.6 รูปถ่าย SEM ถ่านกัมมันต์หลังปรับสภาพ	42
4.7 รูปถ่าย SEM จากแผ่นยางตัวอย่างทั้ง 6 ความเข้มข้น	44
4.8 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของแผ่นยางผสมทั้ง 6 ความเข้มข้น	46
4.9 เปรียบเทียบแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์ 10 มิลลิกรัม	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 ความสามารถในการกำจัดเมทิลลิโนบลูด้วยแผ่นยางผสมทั้ง 6 ความเข้มข้น	48
4.11 ความสามารถในการกำจัดเมทิลลิโนบลูด้วยแผ่นยางผสมทั้ง 6 ความเข้มข้น	48
4.12 ความสามารถในการกำจัดอินดิโกคาร์มีนด้วยแผ่นยางผสมทั้ง 6 ความเข้มข้น	49
4.13 ความสามารถในการกำจัดอินดิโกคาร์มีนด้วยแผ่นยางผสมทั้ง 6 ความเข้มข้น	50
4.14 ความสามารถในการใช้ซ้ำสำหรับการกำจัดสีย้อมเมทิลลิโนบลู	51



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ภัยจากสารเคมี ไม่ได้มีเพียงแต่ในรูปของก๊าซพิษที่ปล่อยออกสู่บรรยากาศจากโรงงานอุตสาหกรรมเท่านั้น แต่ยังมีในรูปการปล่อยสารเคมีในรูปของสารละลายลงสู่แหล่งน้ำต่างๆ ทำให้เกิดปัญหาน้ำเน่าเสีย ไม่สามารถนำน้ำนั้นมาใช้ในการบริโภค อุปโภค ระบบนิเวศน์ของสัตว์น้ำถูกทำลาย รวมถึงการส่งกลิ่นเหม็นรบกวน ซึ่งในปัจจุบันน้ำเสียจากชุมชน หรือจากกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ นั้นได้ปล่อยลงสู่ธรรมชาติมีสารปนเปื้อนมากมายหลายชนิด โดยเฉพาะในโรงงานอุตสาหกรรม การบำบัดน้ำเสียในปริมาณมากๆ นั้นอาจจะใช้ระยะเวลาในการบำบัดค่อนข้างนานจึงทำให้เสียเวลาและเสียงบประมาณเป็นจำนวนมาก อีกทั้งการบำบัดน้ำเสียที่ไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอจะส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งต่อโรงงานและชุมชน สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมมีการจัดการระบบบำบัดน้ำเสียต่างกันไปทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดพื้นที่ในการจัดการเรื่องระบบน้ำเสีย สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่มีการถ่ายเทน้ำเสียในปริมาณมากออกสู่สิ่งแวดล้อม เช่น โรงงานน้ำตาล โรงงานผลิตอาหารทางการเกษตร จะมีการจัดการเรื่องระบบบำบัดซึ่งต้องใช้พื้นที่ขนาดใหญ่

ไทเทเนียม ไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) เป็นสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ประเภท N-type ที่มีสมบัติฆ่าเชื้อโรคในรูปอนุภาคนาโน โดยกระบวนการใช้แสงยูวีฉายลงไปยังไทเทเนียม-ไดออกไซด์จะเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกที่สามารถใช้กำจัดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำหรืออากาศที่สัมผัสกับพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalytic) ได้ โดยสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalytic) เป็นสารที่เมื่อถูกแสงกระทบซึ่งอาจเป็นแสงจากดวงอาทิตย์หรือหลอดฟลูออเรสเซนต์ แสงจะเป็นตัวช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี โดยที่ตัวเองไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสารไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ก็เป็นหนึ่งในสารที่มีคุณสมบัติเป็นสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้ เมื่อสารไทเทเนียมไดออกไซด์ดูดซับรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) จากแสงอาทิตย์หรือจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันให้ Hydroxyl Radicals ( $\text{OH}^\cdot$ ) และ Superoxide Anion ( $\text{O}^{\cdot-}$ ) ซึ่งปฏิกิริยาออกซิเดชันนี้ ทำให้สารประกอบอินทรีย์ที่ระเหยได้ (Volatile Organic Compounds: VOCs) และสารอินทรีย์ที่เป็นพิษเปลี่ยนรูปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำที่อุณหภูมิห้องโดย Hydroxyl Radicals ( $\text{OH}^\cdot$ ) จะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจน ซึ่งเป็นส่วนประกอบของสารอินทรีย์ กลายเป็นน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ในขณะที่ Superoxide Anion จะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนในสารอินทรีย์กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) การทำงานของสารโฟโตคะตะไลติกจะคล้ายๆ กับการสังเคราะห์แสงของพืช โดยไทเทเนียม-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไดออกไซด์มีลักษณะเป็นผงสีขาว เป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำ มีโครงสร้างผลึกแตกต่างกัน 3 รูปแบบ คือ บรูไรต์ (Brookite) อนาเทส (Anatase) และรูไทล์ (Rutile) นิยมใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากสามารถเตรียมได้ง่าย มีราคาถูกและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ในปริมาณที่สูง

ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้น เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีพลังงานแบนด์แก๊ป (Band Gap) ประมาณ 3.2 eV ดังนั้นการให้พลังงานกับระบบจึงต้องให้พลังงานมากกว่าหรือเท่ากับแถบช่องว่างพลังงาน ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกจึงจะเกิดขึ้นได้ ซึ่งช่วงของแสงยูวีที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 400 นาโนเมตร จะให้ค่าพลังงานที่มากกว่าหรือเท่ากับแถบช่องว่างพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์ ในอดีตส่วนใหญ่จะนิยมใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบของผง ซึ่งการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบของผงนั้น ได้พบปัญหาหรือข้อเสียหลายอย่าง ทั้งปัญหาด้านการนำกลับมาใช้ใหม่ ต้องมีการแยกผงไทเทเนียมไดออกไซด์ออกจากน้ำหลังการบำบัด ในงานวิจัยนี้จึงได้มีการนำไทเทเนียมไดออกไซด์ไปผสมกับยางธรรมชาติและเติมผงถ่านกัมมันต์และนำมาขึ้นรูปในรูปแบบแผ่น ทำให้การนำกลับมาใช้ใหม่ได้ง่าย ไม่ต้องเสียเวลาและงบประมาณไปกลับกระบวนการกรองผงไทเทเนียมไดออกไซด์

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาวิธีการเตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์
2. เพื่อศึกษาความสามารถในการกำจัดสีของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์
3. เพื่อศึกษาความเข้มข้นของผงถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสม ในการเร่งปฏิกิริยาในการบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการโฟโตคะตะไลติก

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. นี้ทำการสังเคราะห์แผ่นยางคอมโพสิตของไทเทเนียมไดออกไซด์กับถ่านกัมมันต์ในปริมาณต่างๆ
2. ศึกษาสมบัติทางกายภาพและคุณลักษณะเฉพาะของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์โดยเทคนิคต่างๆ ได้แก่ FT-IR XRD SEM และ EDS รวมทั้งศึกษาสมบัติเชิงกลด้วยเทคนิค UTM
3. ศึกษาความสามารถของไทเทเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีของด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติก และการใช้งานซ้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ศึกษาความผลของการเติมถ่านกัมมันต์ที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ในการกำจัดสีข้อม
5. ศึกษาระยะเวลาที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ในการกำจัดสีข้อม

#### 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำแผ่นยางคอมโพลิตของไทเทเนียมไดออกไซด์กับถ่านกัมมันต์
2. ทราบถึงประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมของแผ่นยางคอมโพลิตของไทเทเนียมไดออกไซด์กับถ่านกัมมันต์
3. ทราบความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดสีข้อม
4. เป็นข้อมูลในการพัฒนาแผ่นยางคอมโพลิตของไทเทเนียมไดออกไซด์กับถ่านกัมมันต์ เพื่อมาใช้ในการกำจัดสีข้อมในโรงงานอุตสาหกรรมให้ดีขึ้น



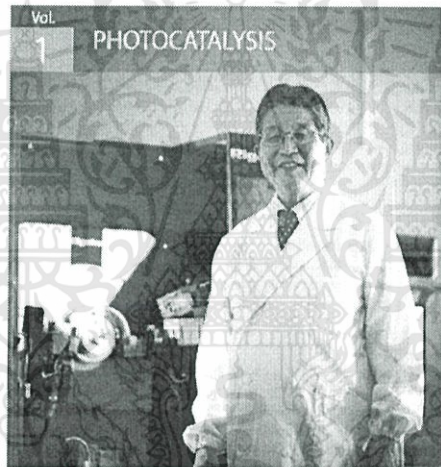
## บทที่ 2

# หลักการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก

#### 2.1.1 ความหมายของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก

คำว่า โฟโตคะตะไลสต์ (Photocatalytic) เป็นคำที่ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ “โฟโต (Photo)” ที่ใช้นำหน้าคำที่แสงมาเกี่ยวข้องด้วย และ “คะตะไลสต์ (Catalytic)” ที่เป็นกระบวนการที่อนุภาคของสารมีส่วนร่วมในการทำให้เกิด อัตราการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยที่ตัวเองไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อสิ้นสุดกระบวนการ และเรียกสารที่เพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีโดยการลดพลังงานกระตุ้น (The Activation- energy) ว่าสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalytic) ถูกค้นพบโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่น Fujishima ในปี ค.ศ. 1967



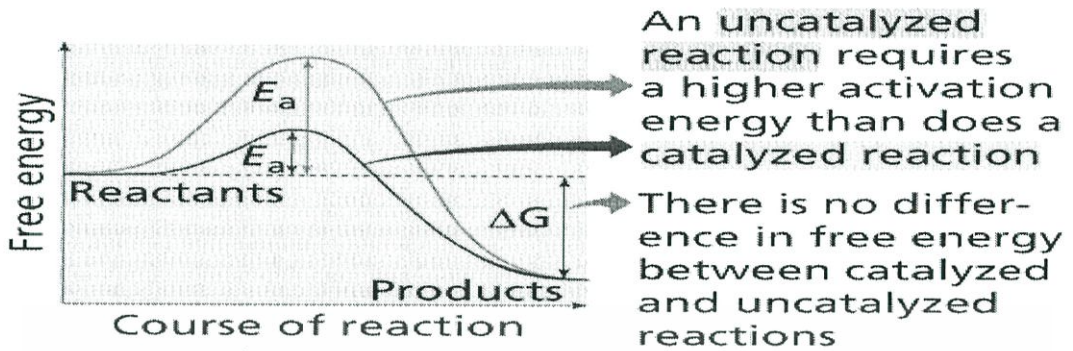
รูปที่ 2.1 ผู้ค้นพบ Photocatalytic [5]

#### 2.1.2 หลักการของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก

กระบวนการโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic Process) เป็นการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้คะตะไลสต์ ซึ่งสารสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ โดยการกระตุ้นด้วยแสง ตัวคะตะไลสต์นี้จะทำหน้าที่ลดพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยา รูปที่ 2.2 แสดงการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation) ของสารอินทรีย์ที่มีและไม่มีตัว Catalytic รูปที่ 2.2 (เส้นสีน้ำเงิน) แสดงพลังงานกระตุ้น (Activation Energy,  $E_a$ ) ของปฏิกิริยาที่ไม่มี Catalytic ซึ่งมีค่ามาก และพลังงานของผลิตภัณฑ์จะต่ำกว่าพลังงานของสารอินทรีย์ พลังงานกระตุ้นนี้จะลดลงในปฏิกิริยาที่มีตัว Catalytic ถึงแม้ว่าพลังงานของสารอินทรีย์ และผลิตภัณฑ์ยังคงเท่าเดิม ดังรูปที่ 2.2 (เส้นสีแดง) ตัว Catalytic นี้จะเพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยา โดยการลดพลังงานกระตุ้น อีกทั้งตัวมันเองยังตอบสนองต่อแสงดังกล่าว คือ จะเกิดการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระตุ้นได้โดยการถ่ายทอดพลังงานที่มีมากกว่าแถบช่องว่างพลังงาน (Band Gap) ซึ่งจะกล่าวอย่างละเอียดในหัวข้อต่อไป

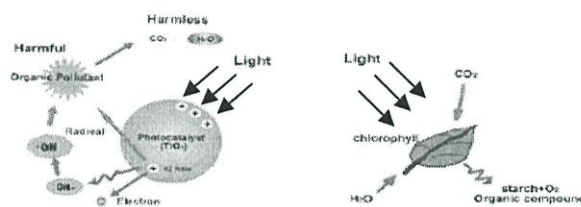


รูปที่ 2.2 พลังงานของการเกิดออกซิเดชันของสารอินทรีย์ [9]

ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกต้องมียุคประกอบ คือ

- ก. โฟโตคะตะลิสต์ เช่น สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เป็นต้น
- ข. พลังงานจากแสงที่มีค่าพลังงานสอดคล้องกับขนาดของช่องว่างพลังงาน
- ค. น้ำหรือสารละลาย (Electrolyte)

การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงคือปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการใช้แสงไปกระตุ้นสารที่เปลี่ยนแปลงอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีโดยที่ไม่เกี่ยวข้องกับตัวมันเองคลอโรฟิลล์ของพืชเป็นสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalytic) ในธรรมชาติแบบหนึ่ง ความแตกต่างระหว่างคลอโรฟิลล์กับนาโนโฟโตคะตะลิสต์ที่มนุษย์ประดิษฐ์ขึ้นซึ่งในที่นี้จะเป็นไทเทเนียมไดออกไซด์ กล่าวคือคลอโรฟิลล์จะจับแสงอาทิตย์ไปเปลี่ยนน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์เป็นออกซิเจนและกลูโคส แต่การฉายแสงอุลตราไวโอเลต (แสงยูวี) จากดวงอาทิตย์หรือจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ไปยังไทเทเนียมไดออกไซด์จะทำให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิล (Hydroxyl- radical) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) และประจุลบของซูเปอร์ออกไซด์ (Superoxide- anions) ซึ่งสารตระกูลออกซิเจนที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเหล่านี้สามารถทำลายโครงสร้างและยับยั้งชีวเคมีของแบคทีเรียและเซลล์ที่ติดเชื้อไวรัส การเกิดอนุมูลไฮดรอกซิลและโมเลกุลของออกซิเจนจะทำให้สารประกอบอินทรีย์ถูกทำเป็นออกไซด์จนในที่สุดจะกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ รวมทั้งจะเข้าไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชันสลายก๊าซพิษต่างๆ และสารก่อมะเร็ง เช่น Acetaldehyde, Benzene, Formaldehyde

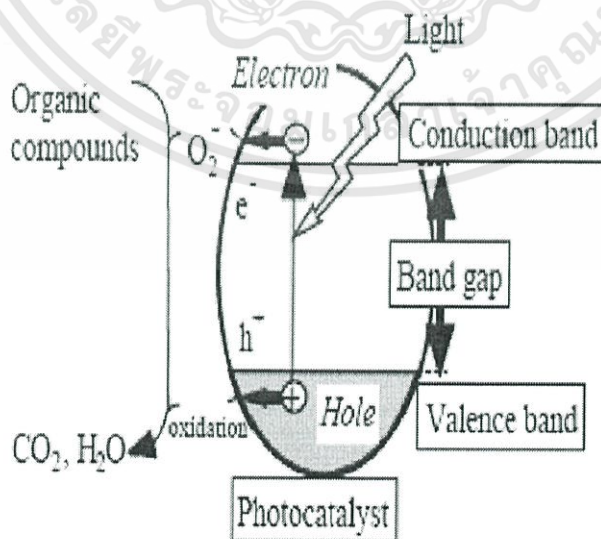


รูปที่ 2.3 การเปรียบเทียบโฟโตคะตะลิสต์กับคลอโรฟิลล์ [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก

สารตัวนำและกึ่งตัวนำจะมีแถบพลังงานอยู่ 2 แถบ คือ แถบเวเลนซ์ (Valence Band) และแถบการนำไฟฟ้า (Conduction Band) โดยสารทั้ง 2 ประเภท มีความแตกต่างกันคือ หากเป็นสารตัวนำ แถบทั้งสองจะอยู่ติดกัน แต่สารกึ่งตัวนำจะมีแถบช่องว่างพลังงาน คั่นอยู่ระหว่างแถบพลังงานทั้งสอง กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง เริ่มจากเมื่อสารกึ่งตัวนำได้รับพลังงาน เท่ากับหรือสูงกว่าแถบช่องว่างพลังงาน อิเล็กตรอนที่สถานะพื้นจะถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่ไปยังแถบกระตุ้น หรือแถบการนำ ไฟฟ้านั่นเอง และทิ้งช่องว่างอิเล็กตรอนที่แถบเวเลนซ์ไว้ เรียกว่า โฮล (Hole) ซึ่งมีประจุบวก ส่วนอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ไปยังแถบการนำไฟฟ้านั้นจะสามารถกลับมาอยู่ในสถานะเดิมได้อีก เรียกว่า ริกอมบิเนชัน (Recombination) โดยปกติระดับพลังงานที่ต่ำที่สุดของแถบการนำไฟฟ้าจะเป็นระดับของศักย์พลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันด้วยอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น (Excited Electron) ในทางกลับกันระดับพลังงานที่สูงที่สุดของแถบเวเลนซ์จะเป็นระดับศักย์พลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยโฮลที่เหลืออยู่ จากที่กล่าววาระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำต่างจากโลหะ เพราะมีช่องว่างของระดับพลังงานคั่นอยู่ทำให้ทั้งอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นและโฮลมีระยะเวลาเพียงพอในการเคลื่อนที่ผ่านไปยังพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและเกิดปฏิกิริยาในที่สุด เมื่อฉายแสงยูวีไปยังตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์ จะทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl Radical) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen Peroxide) ประจุลบของซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน (Superoxide Anion) ซึ่งสารตระกูลดังกล่าวเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรง สามารถทำลายโครงสร้างและยับยั้งชีวเคมีของแบคทีเรียและเซลล์ที่ติดเชื้อไวรัส หรือจะทำให้สารประกอบอินทรีย์ถูกออกซิไดซ์กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำในที่สุด



รูปที่ 2.4 กลไกของการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติก [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากไฮดรอกซิลเรดิคัลและ  $h^+$  ที่ผิวของตัวคะตะลิสต์มีสมบัติเป็นประจุบวก การออกซิไดซ์ของ  $h^+$  กับไฮดรอกไซด์ไอออน ได้ไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $OH^\bullet$ ) และขณะเดียวกัน  $h^+$  เกิดจากการออกซิไดซ์กับสารอินทรีย์ด้วย ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโฟโตคะตะไลติกจึงเกิดขึ้น ได้ทั้ง 2 ทาง คือ

1) การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ  $h^+$  กับไฮดรอกไซด์ไอออนหรือน้ำได้ไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $OH^\bullet$ ) และปฏิกิริยาของอิเล็กตรอนกับออกซิเจนหรือไฮโดรเจนไอออนได้ซูเปอร์ออกไซด์ไอออน เรดิคัลเปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล หรือไฮโดรเจนเรดิคัล ( $H^\bullet$ )

2) การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตรงของสารอินทรีย์ที่ดูดซับบนตัวคะตะลิสต์กับ  $h^+$  ซึ่งความสามารถของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์มีมากกว่า ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนไทเทเนียมไดออกไซด์หรือตัวคะตะลิสต์อื่น

Kwaguchi และ Matthews สรุปว่า การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์นั้น ตัวปฏิกิริยาหลักที่เกิด คือ ไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $OH^\bullet$ ) กับสารอินทรีย์ ส่วนการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง  $h^+$  กับสารอินทรีย์โดยตรง เป็นปฏิกิริยารอง ซึ่งเกิดได้น้อยกว่า ดังนั้นในโฟโตคะตะไลติก มีการเกิดปฏิกิริยาของไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $OH^\bullet$ ) และสารอินทรีย์จะเกิดได้ในตำแหน่งต่างๆ ดังต่อไปนี้

- ไฮดรอกซิลเรดิคัล อยู่ที่ผิวและสารอินทรีย์อยู่ที่ผิวตัวคะตะลิสต์
- ไฮดรอกซิลเรดิคัล ไม่อยู่ที่ผิว แต่สารอินทรีย์อยู่ที่ผิวตัวคะตะลิสต์
- ไฮดรอกซิลเรดิคัล อยู่ที่ผิว แต่สารอินทรีย์ไม่อยู่ที่ผิวตัวคะตะลิสต์
- ไฮดรอกซิลเรดิคัล ไม่อยู่ที่ผิว และสารอินทรีย์ไม่อยู่ที่ผิวตัวคะตะลิสต์

#### 2.1.4 ชนิดของโฟโตคะตะไลติก

ชนิดโฟโตคะตะไลติก สามารถแยกได้ 2 ประเภท เมื่อพิจารณาจากสถานะของตัวคะตะลิสต์ ดังนี้

- แบบสถานะเดียว (Homogeneous) สถานะของตัวโฟโตคะตะลิสต์กับสารที่จะนำมาทำปฏิกิริยานั้นอยู่ในสถานะเดียวกัน เช่นการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยใช้  $H_2O_2/UV$  เป็นต้น
- แบบต่างสถานะ (Heterogeneous) สถานะของตัวโฟโตคะตะลิสต์กับสารที่จะนำมาทำปฏิกิริยานั้นอยู่คนละสถานะกัน เช่น การย่อยสลายสารอินทรีย์โดยใช้ ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $TiO_2$ )/UV เป็นต้น

### 2.1.5 ชนิดของตัวคะตะลิสต์

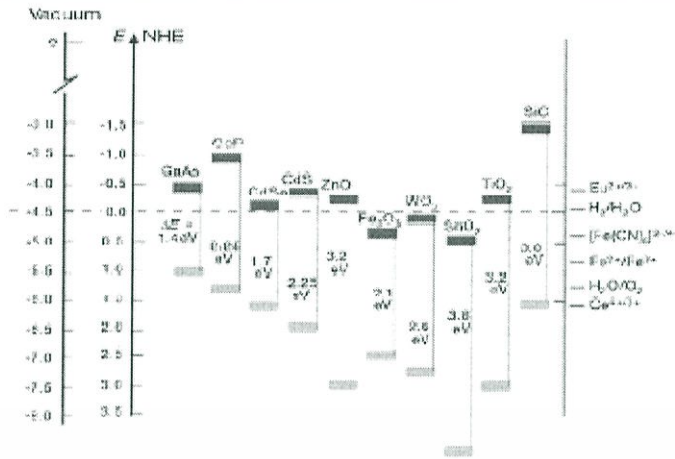
สาร 2 ชนิดที่ใช้เป็นตัวคะตะลิสต์ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกได้แก่

ก. โลหะตัวนำ (Transition Metal) เช่น ทองแดง โครเมียม นิกเกิล เป็นต้น

ข. สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) และสังกะสีออกไซด์ (ZnO) เป็นต้น

องค์ประกอบของโลหะตัวนำและสารกึ่งตัวนำประกอบด้วยแถบวาเลนซ์ และแถบการนำไฟฟ้า ในโลหะตัวนำแถบวาเลนซ์และแถบการนำจะอยู่ติดกันแต่ในสารกึ่งตัวนำแถบทั้งสองจะอยู่ห่างกันโดยถูกคั่นด้วยแถบช่องว่างพลังงาน เมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ได้รับพลังงานจากแสงที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับขนาดช่องว่างพลังงาน จะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังแถบการนำไฟฟ้า และขณะเดียวกันในแถบวาเลนซ์จะเกิด  $h^+$  ซึ่งมีประจุเป็นบวกและสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในแถบวาเลนซ์ ส่วนอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในแถบการนำเช่นกัน ปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น (Electron-Hole pairs,  $e^-/h^+$ ) ในโลหะตัวนำนั้นคู่อิเล็กตรอน-โฮลสามารถเคลื่อนที่ไปมาได้อย่างสะดวกในแถบการนำและแถบวาเลนซ์ตามลำดับ โดยไม่มีช่องว่างพลังงานมากนัก จึงเป็นสาเหตุให้คู่อิเล็กตรอน-โฮลกลับรวมตัวได้ง่ายในทางตรงกันข้ามการรวมตัวกันใหม่ของคู่อิเล็กตรอน-โฮลในสารกึ่งตัวนำเกิดได้ยากกว่าเพราะมีแถบช่องว่างพลังงานคั่นเอาไว้ทำให้อิเล็กตรอน-โฮลอยู่ได้นานกว่ากรณีของโลหะตัวนำ

ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกในน้ำประกอบด้วยแสงที่ส่องผ่านน้ำไปยังตัวคะตะลิสต์ ซึ่งมีพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ที่สูงกว่าแถบช่องว่างพลังงานของตัวคะตะลิสต์ ซึ่งอิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นจากแถบวาเลนส์แบนด์ ให้เคลื่อนที่ไปยังคอนดักชันแบนด์ ผลคือ ทำให้เกิด  $e^-/h^+$  ซึ่งจะวิ่งกระจายอยู่ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำรูปที่ 4 ปฏิกิริยาที่เกิดบนผิวคอนดักชันแบนด์และปฏิกิริยาที่เกิดในสารละลายเกิดขึ้นดังนี้ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนจากคอนดักชันแบนด์ไปยังตัวรับอิเล็กตรอน (Electron Acceptor) ในสารละลายจะเกิดปฏิกิริยรีดักชัน (Reduction) ส่วนอีกด้านหนึ่ง คือ แถบวาเลนส์แบนด์ซึ่งมี  $h^+$  จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) โดยตัวสารละลายทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน (Electron Donor) ในสภาวะปกติความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของอิเล็กตรอนที่คอนดักชันแบนด์ไม่มีศักยภาพพอที่จะบำบัดสารอินทรีย์ได้ แต่เนื่องจากในระบบบำบัด มีออกซิเจนละลายน้ำอยู่ ( $O_2$ ) ออกซิเจนนี้ จะเป็นตัวรับ  $e^-$  เกิดปฏิกิริยรีดักชัน ได้เป็น Superoxide Radical ( $O_2^+$ ) ซึ่งเป็นตัวออกซิเดนต์ที่แรงมาก สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ ได้ แต่ในทางตรงกันข้าม  $h^+$  ที่แถบวาเลนส์แบนด์เป็นตัวออกซิเดนต์ที่แรงมากเช่นกัน



รูปที่ 2.5 การเปรียบเทียบค่าช่องว่างของพลังงานของตัวกลางชนิดต่างๆที่ pH = 1 [3]

### 2.1.6 ปัจจัยที่ส่งผลต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก

1) ตัวเร่งปฏิกิริยา จะต้องมีคุณสมบัติเป็นโลหะตัวนำ หรือสารกึ่งตัวนำ ที่สามารถตอบสนองต่อแหล่งกำเนิดแสง เพื่อก่อให้เกิดปฏิกิริยาในการบำบัดมลพิษชนิดนั้นๆได้ โดยจะต้องมีพื้นที่มากเพียงพอ เนื่องจากต้องทำหน้าที่เป็นสารดูดซับมลพิษไว้บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเป็นหนึ่งในขั้นตอนสำคัญก่อนการเกิดปฏิกิริยาในการบำบัดมลพิษในขั้นตอนต่อไป ดังนั้นในการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้มีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

2) ความเข้มแสง จำเป็นต้องมีพลังงานโฟตอนที่มากเพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งการเพิ่มปริมาณความเข้มแสงจะเป็นการเพิ่มจำนวนโฟตอนให้มีมากขึ้น ซึ่งจะทำอัตราการเกิดปฏิกิริยามีโอกาสเพิ่มมากขึ้นด้วย

3) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารมลพิษ หากมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยส่วนใหญ่จะส่งผลให้ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกมักจะลดลง เนื่องจากในขณะที่เกิดปฏิกิริยาเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้นจะก่อให้เกิดสารอินเตอร์มีเดียตเพิ่มขึ้น ซึ่งจะไปยังยังปฏิกิริยาการย่อยสลายสารมลพิษ ทำให้เกิดอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้น้อยลงนอกจากนั้นพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถดูดซับสารได้ก็เป็นข้อจำกัดที่สำคัญอีกชนิดหนึ่ง ที่ก่อให้เกิดการย่อยสลายได้น้อยลงด้วย

4) วัสดุเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างมากในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ซึ่งการเลือกใช้ชนิดของวัสดุที่เหมาะสม จำเป็นต้องคำนึงถึงความสามารถในการทำงานร่วมกับแสงยูวี และมลพิษที่ใช้ในการบำบัด เพื่อป้องกันการเกิดสารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาซึ่งวัสดุที่แนะนำให้นำมาใช้สร้างถึงปฏิกรณ์ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกได้แก่ แก้ว และสแตนเลสสตีล (Stainless Steel) เป็นต้น

5) อุณหภูมิ เนื่องจากแหล่งกำเนิดแสงก่อให้เกิดความร้อนภายในระบบเพิ่มมากขึ้นมาก ซึ่งจะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาในการบำบัดมลพิษได้น้อย เนื่องจากโดยทั่วไปในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกไม่ต้องการให้เดินระบบที่อุณหภูมิสูงหรือต่ำจนเกินไป ซึ่งค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมโดยทั่วไปจะอยู่ระหว่าง 20-80 °C

6) ออกซิเจนและตัวรับอิเล็กตรอนตัวอื่นๆ ซึ่งจะมีหน้าที่จับตัวกับอิเล็กตรอน เพื่อป้องกันการเกิดการกลับมารวมตัวกันอีกครั้งของอิเล็กตรอนกับ  $h^+$  หรือปฏิกิริยารีดอกซ์อินทรีย์ ให้เป็นไปได้อย่างขึ้น ออกซิเจนจะรวมตัวกับอิเล็กตรอนจนเกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลแอนไอออน และสามารถที่จะทำปฏิกิริยาต่อไปได้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่รุนแรงอีกตัวหนึ่ง ซึ่งจะส่งผลให้เกิดอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพื่อการย่อยสลายมลพิษได้มากขึ้นด้วย

### 2.1.7 พลังงานแสง

รังสีหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแต่ละชนิดมีความยาวคลื่น หรือความถี่คลื่นแตกต่างกัน รังสีที่ประสาทตาสามารถรับรู้ได้ซึ่งเรียกว่า แสง นั้นมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง  $4 \times 10^{-7}$  ถึง  $7 \times 10^{-7}$  เมตร ส่วนรังสีที่มีความยาวคลื่นยาวกว่า หรือสั้นกว่าแสง ประสาทตาจะไม่สามารถรับรู้ได้ เรียกว่า รังสีที่มองไม่เห็น เมื่อจัดเรียงลำดับตามความยาวคลื่น และความถี่ของคลื่นเหล่านี้จะได้สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Spectrum) โดยรังสีที่มีความถี่สูงจะมีพลังงานสูงกว่ารังสีที่มีความถี่ต่ำ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ ในสเปกตรัม แม้มีแหล่งกำเนิดและการตรวจจับได้ที่แตกต่างกัน แต่ก็มีสมบัติที่สำคัญเหมือนกันคือ เคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วแสง ( $2.99 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที) และมีพลังงานส่งผ่านไปในรูปแบบของคลื่น โดยพลังงานแสงที่เลือกนำมาใช้ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกส่วนใหญ่ จะอยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ต และช่วงวิสิเบิล

รังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 100-400 นาโนเมตร มีคุณสมบัติไม่แตกตัว (Non-Ionizing) รังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นเส้นแบ่งของรังสีชนิดแตกตัวได้ และแตกตัวไม่ได้ สามารถแบ่งได้เป็น ยูวีเอ (UV-A) หรือรังสีอัลตราไวโอเล็ตคลื่นยาว (Long wave UVR หรือ Near UVR หรือ Black Light) ยูวีบี (UV-B) หรือรังสีอัลตราไวโอเล็ตคลื่นกลาง (Middle UVR หรือ Sunburn Radiation) และยูวีซี (UV-C) หรือรังสีอัลตราไวโอเล็ตคลื่นสั้น (Short Wave UVR หรือ Germicidal- Radiation) ความยาวคลื่นของรังสีในช่วงต่างๆ แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าความยาวคลื่นชนิดต่างๆ

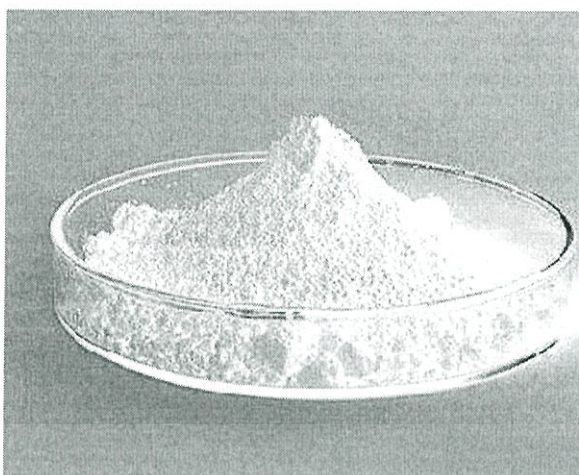
สเปกตรัมรังสี	ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)
Visible Radiation (Light)	400-760
Ultraviolet	100-400
UV-A	315-400
UV-B	280-315
UV-C	100-280

## 2.2 ไทเทเนียมไดออกไซด์

### 2.2.1 ข้อมูลเบื้องต้นของไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide:  $TiO_2$ ) เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-Type Semiconductor) เป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงอย่างแพร่หลาย ด้วยเหตุผลหลายประการ คือ สามารถดูดซับแสงในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ตได้ดี เป็นสารดูดซับสารอินทรีย์ที่ดี โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของไทเทเนียมไดออกไซด์เหมาะที่จะใช้ก่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์ และปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงที่มีความสามารถสูงในปฏิกิริยาหลายประเภท มีความเสถียรทางเคมี ทนต่อการกัดกร่อนของแสง เมื่อสัมผัสอยู่กับน้ำ มีราคาถูก และสามารถเตรียมในรูปผลึกขนาดเล็กได้ง่าย

ปัจจุบันไทเทเนียมไดออกไซด์ ถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย เช่น ในระบบบำบัดน้ำเสีย หรือระบบบำบัดอากาศเสีย เนื่องจากสารแอกทีฟ (Active Species :  $\cdot OH$ ,  $\cdot O$ ) ที่เกิดจากปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน (Oxygen reduction) โดยอิเล็กตรอน (Photoexcited Electron) และจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำ (Water Oxidation) โดยโฮล (Photoexcited hole) จะมีความสามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ได้ดี อีกทั้งมีการประยุกต์ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในสีทาบ้าน เนื่องจากความสามารถในการสะท้อนแสงที่ดี ซึ่งการนำไทเทเนียมไดออกไซด์ไปประยุกต์ใช้นั้น จำเป็นต้องคำนึงถึงสมบัติทางกายภาพของ ไทเทเนียมไดออกไซด์ เช่น โครงสร้าง (Phase Structure), ขนาดอนุภาค (Particle Size) และพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface Area) และอื่นๆ ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อกลไกการทำให้เกิดปฏิกิริยานั้นเอง



รูปที่ 2.6 ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบผง [5]

### 2.2.2 สมบัติทางกายภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมบริสุทธิ์มีเลขอะตอม คือ 22 ซึ่งมีการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอน คือ  $[\text{Ar}]3d^24s^2$  และมีน้ำหนักอะตอม คือ 47.867 ในส่วนของขนาดอะตอมไทเทเนียมมีรัศมีอะตอม 147 พิโกเมตร(pm) มีจุดหลอมเหลวและจุดเดือด คือ  $1667\text{ }^{\circ}\text{C}$  และ  $3285\text{ }^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ ในขณะที่ความหนาแน่นที่อุณหภูมิห้องคือ  $4.50\text{ gcm}^{-3}$  และมีสภาพต้านทานไฟฟ้า (Electrical Resistivity) ที่อุณหภูมิ  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  คือ  $42.0\text{ }\mu\Omega\text{-cm}$  ลักษณะพิเศษของไทเทเนียม คือ จะทำปฏิกิริยาได้ดีกับพวกสารที่ไม่ใช่โลหะ (Non-Metal) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ออกซิเจน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนที่อุณหภูมิสูง ซึ่งสถานะออกซิเดชัน (Oxidation State) ทางเคมีที่มักเกิดขึ้นมากที่สุด คือ  $4+$  ซึ่งสารประกอบที่จะมีโอกาสเกิดขึ้นมากก็คือ โมเลกุลจำพวกไดออกไซด์และเตตระคลอไรด์ เพราะมีสถานะออกซิเดชันเป็น  $4-$  ดังนั้น โครงสร้างที่จะเกิดขึ้นจะอยู่ในรูป  $\text{TiO}_2$  และ  $\text{TiCl}_4$

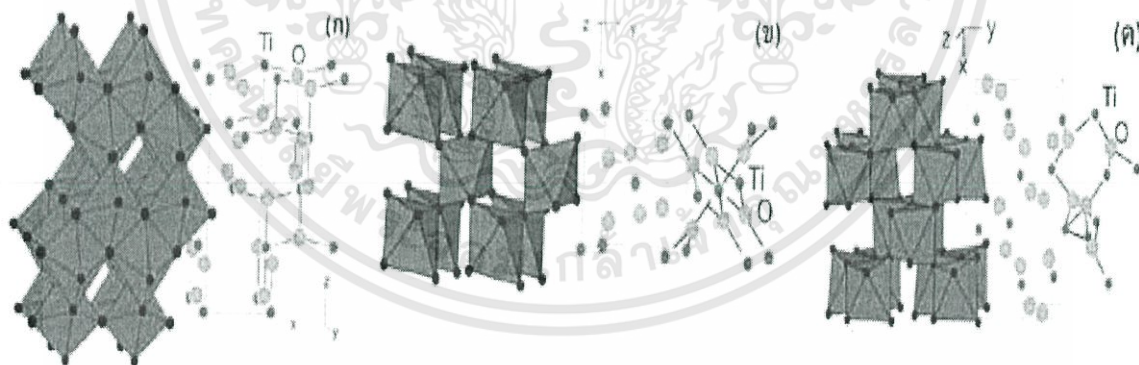
ตารางที่ 2 ข้อมูลโดยทั่วไปของไทเทเนียมไดออกไซด์ [3]

ชื่อและสูตรโมเลกุล	Titanium Dioxide	
น้ำหนักโมเลกุล ( $^{\circ}\text{C}$ )	79.9	
ลักษณะและสี	ผงของแข็ง มีสีขาว	
จุดเดือด ( $^{\circ}\text{C}$ )	2500	
จุดหลอมเหลว ( $^{\circ}\text{C}$ )	1830	
ดัชนีหักเห (Refractive Index)	อนาเทส 2.49	รูไทล์ 1.903
ความหนาแน่น ( $\text{gcm}^{-3}$ )	อนาเทส 3.84	รูไทล์ 4.26
แถบช่องว่างพลังงาน (eV)	อนาเทส 3.2	รูไทล์ 3.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.3 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์

โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์มีอยู่ด้วยกัน 3 แบบ คือ โครงสร้างแบบอนาเทส (Anatase) แบบรูไทล์ (Rutile) และแบบบรูคไคท์ (Brookite) โดยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบอนาเทสจะมีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกได้ดีกว่าโครงสร้างแบบรูไทล์ สาเหตุเนื่องมาจากการกลับมารวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนกับโฮลเกิดได้ยากกว่าโครงสร้างแบบรูไทล์ ในขณะที่โครงสร้างแบบรูไทล์มีค่ารีแฟรคทีฟอินเดกซ์ (Refractive Index) สูงกว่าโครงสร้างแบบอนาเทสและมีความเสถียรที่อุณหภูมิสูงจึงเหมาะที่จะใช้เป็นตัวเติมเพื่อสะท้อนแสงโดยทั่วไปแล้ว โครงสร้างผลึกแบบอนาเทสและ รูไทล์เป็นที่นิยมนำมาศึกษา สำหรับการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก โดยโครงสร้างผลึกอนาเทสให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกรูไทล์แต่อย่างไรก็ตามในบางปฏิกิริยาโครงสร้างผลึกรูไทล์หรือโครงสร้างผลึกผสมระหว่างแบบอนาเทสและแบบรูไทล์ (เช่น อนาเทส 70-80% และ รูไทล์ 30-20%) ถูกรายงานว่าให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกอนาเทสบริสุทธิ์ทั้งนี้มีตัวแปรหลายอย่างที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาของแต่ละ โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ ได้แก่ พื้นที่ผิว, การกระจายตัวของรูพรุน, ขนาดของอนุภาคผลึก, และที่สำคัญมากคือวิธีการที่ใช้ในการสังเคราะห์ผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ ส่วนโครงสร้างแบบบรูคไคท์ ยังไม่มีการศึกษากันมากนัก



รูปที่ 2.7 [3]

โครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้ง 3 ชนิด

(ก) อนาเทส มีโครงสร้างแบบเตตระโกนอล (Tetragonal)

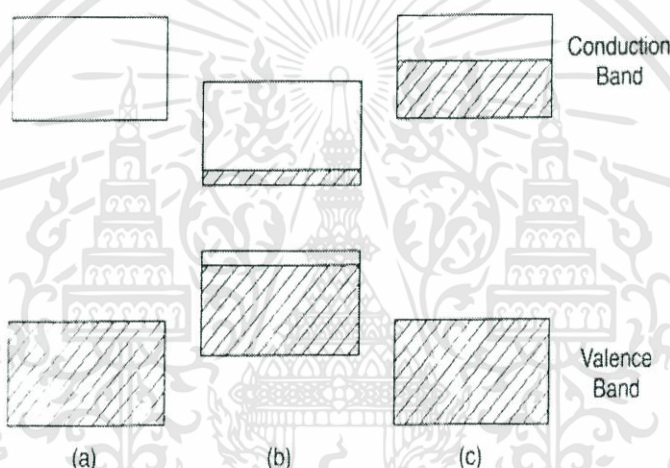
(ข) รูไทล์ มีโครงสร้างแบบเตตระโกนอล (Tetragonal)

(ค) บรูคไคท์ มีโครงสร้างแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic)

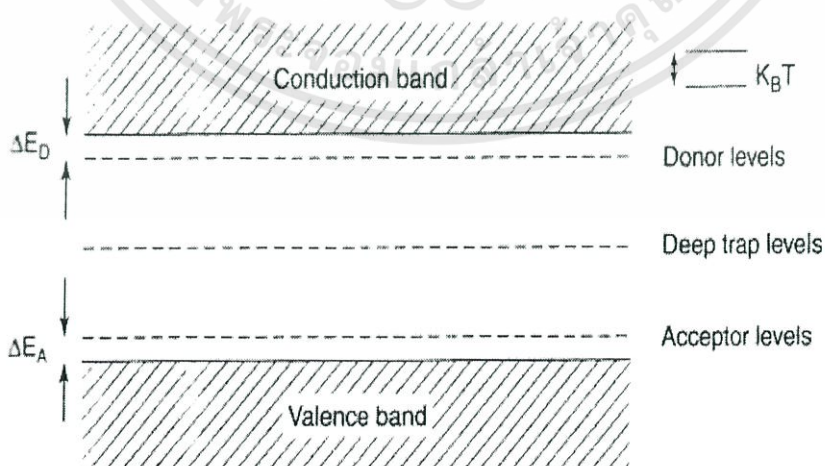
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.4 สมบัติทางไฟฟ้าของไทเทเนียมไดออกไซด์

เนื่องจากการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนในไทเทเนียมไดออกไซด์มีเพียงบางส่วนในแถบพลังงานที่นำไฟฟ้าได้ (Allowed Energy Band) ดังนั้นไทเทเนียมไดออกไซด์จึงมีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ซึ่งอธิบายระดับพลังงานได้ด้วยรูปที่ 2.8 โดยมีขนาดช่องว่างพลังงาน (Energy Gap) ประมาณ 3.0 และ 3.2 eV สำหรับเฟสรูไทล์และเฟสอนาเทสตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามขนาดของแถบพลังงานช่วงนี้ก็ยังคงจัดว่ามีค่าค่อนข้างมากสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานด้านแสง (Photocatalytic- Reaction) ซึ่งจะทำให้ได้ประสิทธิภาพค่อนข้างน้อย ดังนั้นจึงได้มีการปรับปรุงโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์โดยการเจืออะตอมของธาตุหมู่ 3-5 ลงไปเพื่อเพิ่มระดับพลังงานในช่องว่างพลังงาน ซึ่งจะเกิดลักษณะโครงสร้างดังรูป 2.9



รูปที่ 2.8 แถบพลังงานของ (a) ฉนวน, (b) สารกึ่งตัวนำ, และ(c) ตัวนำไฟฟ้า [9]



รูปที่ 2.9 แถบพลังงานที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเจืออะตอมของธาตุหมู่อื่นลงไป [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากระดับพลังงานที่เพิ่มขึ้นจากอะตอมหมู่ 3-5 ที่เจอลงไปแล้ว ก็ยังมีระดับพลังงานที่เพิ่มขึ้นมาจากตำแหน่งว่างของอะตอมออกซิเจน (Oxygen Vacancy Level) โดยจะมีระดับพลังงานอยู่ต่ำกว่าแถบการนำไฟฟ้า 0 ถึง 1 eV ซึ่งจากรายงานการทดลองพบว่า มีค่าประมาณ 2.21 และ 2.40 eV

### 2.2.5 ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์

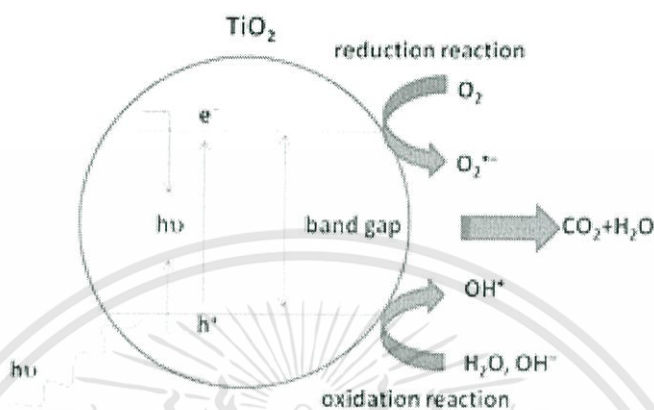
โครงสร้างผลึกอนาเทสจะให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกรูไทล์ เนื่องจากโครงสร้างผลึกอนาเทส เกิดการรวมตัวกันใหม่ของคู่อิเล็กตรอนและโฮล (electron-hole pair) ในอัตราที่ต่ำกว่าเพราะมีแถบช่องว่างพลังงานที่มากกว่ารูไทล์ ยิ่งไปกว่านั้น โครงสร้างผลึกอนาเทส สามารถเตรียมได้ที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้ที่พื้นผิวมีไฮดรอกไซด์ไอออนไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ ) มากกว่า ซึ่งจะสามารถผลิตไฮดรอกซิลไอออนเรดิคัล (hydroxyl radical,  $\text{OH}\cdot$ ) ได้มาก ซึ่งไฮดรอกซิลไอออนเรดิคัลเป็นตัวออกซิเจนหลัก ที่จะทำให้การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเกิดได้ดี สำหรับโครงสร้างอนาเทสและรูไทล์มีแถบช่องว่างพลังงาน 3.2 eV และ 3.0 eV ตามลำดับ โดยโครงสร้างผลึกอนาเทส สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 384 นาโนเมตร ในขณะที่โครงสร้างผลึกรูไทล์สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 410 นาโนเมตร ส่งผลกระทบโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง อีกทั้งโครงสร้างอนาเทสยังมีความสามารถในการดึงดูดติดผิวสูงกว่าโครงสร้างผลึกรูไทล์

อย่างไรก็ตามในบางปฏิกิริยา โครงสร้างผลึกผสมระหว่างอนาเทสและรูไทล์จะให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกอนาเทสอย่างเดียว เพราะว่าในระหว่างกระบวนการกระตุ้นด้วยแสงอิเล็กตรอนจะถูกส่งผ่านจากรูไทล์ไปยังอนาเทส จะเป็นการลดการรวมตัวกันใหม่ของคู่อิเล็กตรอนกับโฮล จากการสร้างประจุโดยพลังงานจากแสง เนื่องจากชั้นการนำไฟฟ้าของเฟสอนาเทสอยู่ในตำแหน่งที่มีพลังงานสูงกว่าชั้นการนำไฟฟ้าของเฟสรูไทล์ประมาณ 0.20 eV ความสามารถของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่นำมาใช้เป็นตัวเร่ง ปฏิกิริยาแบบใช้แสงนั้น เป็นผลมาจากปัจจัยหลายประการ เช่น โครงสร้างและขนาดของผลึก ความหนาแน่นของหมู่ไฮดรอกซิลที่พื้นผิว พื้นที่ผิวจำเพาะ ความพรุน และสมบัติอื่น ๆ ปัจจัยเหล่านี้จะมีผลต่อการผลิตคู่อิเล็กตรอน-โฮล การดูดซับบนพื้นผิว และกระบวนการรีดอกซ์

โดยทั่วไปแล้วหลักการและกลไกการย่อยสลายสารที่เป็นมลพิษชนิดต่าง ๆ ในน้ำ มีปัจจัยที่สำคัญที่จะทำให้กระบวนการการย่อยสลายเกิดขึ้นได้ดีนั้น ได้แก่ ความยาวคลื่นแสงที่มากกว่า หรือเท่ากับแถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยา ออกซิเจน น้ำ และตัวเร่งปฏิกิริยา โดยหลักการของการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของสารกึ่งตัวนำ คือ ถ้ามีแถบช่องว่างพลังงานที่เหมาะสมกับช่วงความยาวคลื่นที่ให้เข้าไปจะสามารถเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ได้ดี การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงจะเกิดขึ้นได้ เมื่อได้รับพลังงานแสงในรูปพลังงาน โฟตอนมากพอที่จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ ซึ่งพลังงานนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราเรียกว่า พลังงานกระตุ้น เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยานาโนถูกกระตุ้นด้วยแสงอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ ให้เคลื่อนที่ไปยังแถบการนำไฟฟ้า ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลซึ่งจะวิ่งกระจายอยู่ที่ผิวของสาร กิ่งตัวนำ ดังรูป



รูปที่ 2.10 กลไกของการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ [4]

ปฏิกิริยาที่แถบวาเลนซ์ ซึ่งมีโฮลอยู่นั้น อธิบายได้ว่า อิเล็กตรอนจากสารละลาย หรือเรียกว่า ตัวให้อิเล็กตรอน (Electron Donor) จะเคลื่อนที่ไปยังโฮลในแถบวาเลนซ์จะ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยที่โฮลจะทำปฏิกิริยากับน้ำ (H<sub>2</sub>O) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH<sup>-</sup>) เกิด เป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล (hydroxyl radical, OH<sup>•</sup>) ซึ่งเป็นตัวออกซิเดนต์ (Oxidant) ที่แรงใน กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ได้อีกทางด้านหนึ่ง ปฏิกิริยาที่เกิดที่แถบการนำไฟฟ้า คือ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนจากแถบการนำไฟฟ้าไปยัง ตัวรับอิเล็กตรอน (Electron Acceptor) ในปฏิกิริยารีดักชัน ออกซิเจน (O<sub>2</sub>) ที่ถูกดูดซับจะเป็น ตัวรับอิเล็กตรอน ซึ่งทำให้เกิดเป็นไอออนซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล (O<sub>2</sub><sup>•-</sup>) และเมื่อซูเปอร์ ออกไซด์เรดิคัลทำปฏิกิริยากับโฮลได้เป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล (HO<sub>2</sub><sup>•-</sup>) ในน้ำ ถ้า HO<sub>2</sub><sup>•-</sup> รวมกัน ผล ที่ได้คือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) และออกซิเจน (O<sub>2</sub>) ซึ่ง ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สามารถ รับอิเล็กตรอน จากแถบการนำ หรือจากซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล และกลายเป็น ไฮดรอกซิลเรดิ- คัลได้ ดังนั้นไฮดรอกซิลเรดิคัลอาจถูกสร้างขึ้นโดย ปฏิกิริยารีดักชัน ซึ่งสามารถย่อยสลาย สารประกอบอินทรีย์ในน้ำได้เช่นกัน และผลิตภัณฑ์สุดท้ายจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำ คือ คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ

## 2.2.6 ประโยชน์ของไทเทเนียมไดออกไซด์

ด้วยสมบัติของ ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ลักษณะเป็นผงเล็กระดับนาโน จะช่วยฟอกอากาศ กำจัดเชื้อแบคทีเรียและการป้องกันคราบยึกเกาะพื้นผิว อีกทั้งไม่เสื่อมสภาพหลังการใช้งาน ทำความสะอาดง่าย ไม่ทิ้งสารตกค้างที่เป็นอันตรายต่อชีวิตและสิ่งแวดล้อม ทำให้นาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

### 1.ความสามารถในการต้านแบคทีเรีย

ไทเทเนียมไดออกไซด์ ไม่เพียงแต่ฆ่าแบคทีเรียได้เท่านั้น แต่ยังช่วยในการย่อยสลายซาก จึงไม่เกิดสารพิษจากซากของมันด้วย มีประสิทธิภาพสูงกว่าสารต้านแบคทีเรียชนิดอื่นๆ ที่จะทำงานเมื่อมีเซลล์แบคทีเรียสัมผัสกับพื้นผิว และที่สำคัญไทเทเนียมไดออกไซด์จะไม่เกิดการเสื่อมประสิทธิภาพ หลังจากที่ทำลายเชื้อแบคทีเรีย ทำให้คงประสิทธิภาพการใช้งานที่ยาวนาน ไทเทเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพด้านยับยั้งหรือต่อต้านการติดเชื้อ มากกว่าคลอรีน 3 เท่า และมากกว่า ไอโซน 1.5 เท่า

### 2.ความสามารถด้านการกำจัดกลิ่น

ด้วยสมบัติของการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยการทำลายพันธะระหว่างโมเลกุลของสารให้แตกออกเป็น โมเลกุลเดี่ยว สามารถกำจัดโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ระเหยอยู่ในอากาศ (Volatile Organic Compounds หรือ VOCs) อันเป็นสาเหตุของกลิ่นไม่พึงประสงค์ เช่น กลิ่นบูหรี กลิ่นยาสูบ สารประเภทฟอร์มาลดีไฮด์ ยูรีน กลิ่นอุจจาระ น้ำมันเชื้อเพลิง ควัน เกสรดอกไม้ และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอีกหลายชนิดในอากาศ ฯลฯ การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ จึงเป็นการแก้ปัญหาที่ต้นเหตุ

### 3.ความสามารถในการฟอกอากาศ

ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกเร่งด้วยปฏิกิริยาแสง สามารถกำจัดสารที่ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศได้ เช่น สารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ควันบูหรี สารระเหยต่างๆ ที่ออกมาจากอาคาร รวมถึงช่วยกำจัดสารประเภททำลายชั้นบรรยากาศ เช่น ก๊าซคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFC) และก๊าซเรือนกระจกประเภทอื่น ทั้งทางตรงและทางอ้อม เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแสง แม้ในบริเวณที่มีมลภาวะสูง ไทเทเนียมไดออกไซด์ จึงช่วยลดสารก่อมลภาวะเหล่านี้ได้

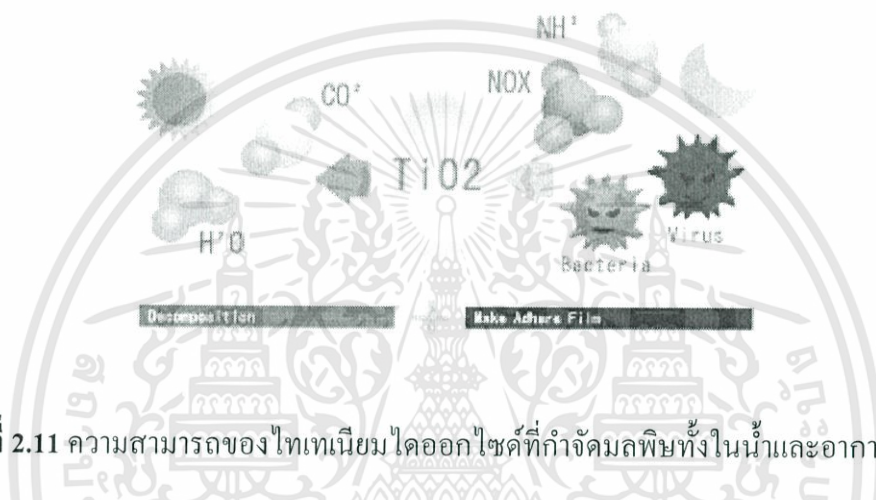
### 4.ความสามารถในการป้องกันการเกิดคราบและคุณสมบัติการทำความสะอาดตัวเอง

ด้วยสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ ในการทำความสะอาดตัวเองเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง เมื่อผนังด้านนอกของอาคารที่มักต้องเจอกับคราบเขม่าจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่มีส่วนประกอบเป็นน้ำมัน ได้รับการปกป้องด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ ไทเทเนียมไดออกไซด์จะ

ทำลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอน รวมทั้งฝุ่นผงต่างๆ ที่เกาะติดอยู่กับผนัง จึงถูกชะล้างออกจากผนังอย่างง่ายดายได้เมื่อฝนตกลงมา ทำให้ผนังตึกดูสะอาดและใหม่อยู่เสมอ

#### 5.ความสามารถในการทำน้ำสะอาด

สามารถกำจัดสารอินทรีย์ที่ก่อมลภาวะให้กลายเป็นสารที่ไม่เป็นอันตรายได้ เช่น ทำให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ โดยไทเทเนียมไดออกไซด์จะนำไปใช้ในขั้นตอนที่สองของการบำบัดน้ำเสีย โครงการต้นแบบในการบำบัดน้ำเสียแสดงให้เห็นว่า กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงนั้นมีประสิทธิภาพสูงในการฆ่าแบคทีเรีย *Escherichia coli* ซึ่งเป็นแบคทีเรียในอุจจาระที่ปนเปื้อนในน้ำได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 2.11 ความสามารถของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่กำจัดมลพิษทั้งในน้ำและอากาศ [1]

ตารางที่ 3 ตารางเปรียบเทียบการกำจัดมลพิษของไทเทเนียมไดออกไซด์กับวิธีอื่นๆ [16]

	Electrostatic	Ozone	UV	Ionizer	TiO2 Photocatalyst
Mold	Good	Good	Good	Poor	Excellent
Bacteria	Good	Good	Good	Poor	Excellent
Dust Mites	Poor	Poor	Good	Poor	Excellent
Gases	Poor	Good	Good	Poor	Excellent
Odors	Good	Good	Good	Good	Excellent
Smoke	Good	Good	Poor	Excellent	Good
VOCs	Poor	Good	Poor	Poor	Excellent
Pet Denders	Good	Good	Good	Good	Excellent

ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบผงมีข้อดีคือ สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ว่องไวเพราะมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เนื่องจากการใช้งานในการบำบัดทั้งในอากาศและน้ำ มีการใช้งานที่มากและบ่อยครั้ง ทำให้อาจต้องสิ้นเปลืองในการใช้ ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบผง เพราะไม่สามารถเก็บนำมาใช้ใหม่ได้ จึงได้พยายามทำใ้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุชนิดอื่นเพิ่มเข้าไปช่วยในการขึ้นรูปให้มีลักษณะเป็นแผ่น เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน จัดเก็บ ทำความสะอาด และที่สำคัญคือสามารถนำมาใช้ใหม่ได้อีก วัสดุชนิดนั้นก็คือ ยางธรรมชาติ

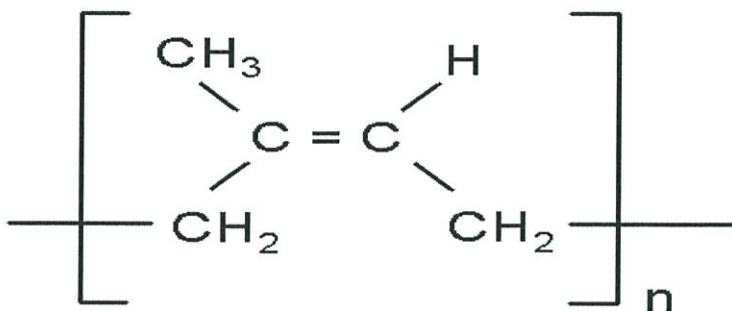
## 2.3 ยางธรรมชาติ

### 2.3.1 ข้อมูลเบื้องต้นของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติส่วนมากเป็นยางที่ได้มาจากต้นยาง *Hevea Brazilliensis* ซึ่งมีต้นกำเนิดจากกลุ่มแม่น้ำอะเมซอนในทวีปอเมริกาใต้น้ำยางสดที่กรีดยได้จากต้นยางมีลักษณะสีขาวขุ่น และมีเนื้อยางแห้ง (Dry-Rubber) ประมาณ 30 % แขนงลอยอยู่ในน้ำ ถ้านำน้ำยางที่ได้นี้ไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) จนกระทั่งได้น้ำยางที่มีปริมาณยางแห้งเพิ่มขึ้นเป็น 60 % เรียกว่า น้ำยางข้น (Concentrated Latex) การเติมสารแอมโมเนียลงไปจะช่วยรักษาสภาพของน้ำยางข้นให้เก็บไว้ได้นาน น้ำยางข้นส่วนหนึ่งจะถูกส่งออกสู่ตลาดต่างประเทศส่วนที่เหลือจะถูกนำไปใช้ เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมถุงมือยางและถุงยางอนามัย เป็นต้น แต่เมื่อนำน้ำยางสดที่กรีดยได้จากต้นยางมาเติมกรดเพื่อให้อนุภาคน้ำยางจับตัวกันเป็นของแข็งแยกตัวจากน้ำ จากนั้นก็รีดยางให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องรีด (Two-Roll Mill) และนำไปตากแดดเพื่อไล่ความชื้นก่อนจะนำไปอบรมควันที่อุณหภูมิประมาณ 60-70°C เป็นเวลา 3 วัน เราก็จะได้ยางแผ่นรมควัน นอกจากยางแผ่นรมควันแล้วอุตสาหกรรมส่วนใหญ่เริ่มเปลี่ยนมาใช้ยางแท่งหรือยางก้อนเป็นวัตถุดิบ ทั้งนี้เนื่องจากยางแท่งเป็นยางมีคุณภาพที่สม่ำเสมอกว่ายางแผ่นรมควันผ่านการทดสอบและจัดชั้นเพื่อรับรองคุณภาพตามหลักวิชาการ วัตถุดิบของการผลิตยางแท่ง ได้แก่ น้ำยางหรือยางแผ่นข้นอยู่กับเกรดของยางแท่งที่ต้องการผลิต เช่น ถ้าต้องการผลิตยางแท่งเกรด STR5L ซึ่งมีสีจางมาก จำเป็นต้องใช้น้ำยางเป็นวัตถุดิบ หรือถ้าต้องการผลิตยางแท่งเกรด STR20 ซึ่งเป็นเกรดที่มีสีเงาปนสูงและมีสีเข้ม ก็อาจใช้น้ำยางแผ่นหรือขี้ยางเป็นวัตถุดิบ เป็นต้น ส่วนกระบวนการผลิตยางแท่งค่อนข้างจะยุ่งยากต้องอาศัยเครื่องจักรที่มีราคาแพงและต้องมีการควบคุมคุณภาพอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นราคายางแท่งจึงสูงกว่ายางแผ่นรมควัน

### 2.3.2 โครงสร้างของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมี คือ cis-1,4-polyisoprene กล่าวคือ มี Isoprene ( $C_5 H_8$ ) โดยที่  $n$  มีค่าตั้งแต่ 15,000 -20,000 เนื่องจากส่วนประกอบของยางธรรมชาติเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นยางจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน เป็นต้น โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (amorphous)



รูปที่ 2.12 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ [11]

### 2.3.3 สมบัติของยางธรรมชาติ

ในบางสภาวะ โมเลกุลของยางจะสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่ อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยืด มันจึงสามารถเกิดผลึก (Crystallize) ขึ้นมาได้ โดยการเกิดผลึกเนื่องจาก อุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Crystallization) จะทำให้ยางแข็งมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น ยางก็ จะอ่อนลงและกลับสู่สภาพเดิม ในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (Strain Induced Crystallization) ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดี นั่นคือยางจะมีความทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) ความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear Resistance) และความทนทานต่อการขัดสี (Abrasion Resistance) สูง

ลักษณะเด่นอีกอย่างของธรรมชาติคือ ความยืดหยุ่น (Elasticity) ยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำกับมันหมดไป ยางก็จะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิม (หรือใกล้เคียง) อย่างรวดเร็ว ยางธรรมชาติยังมีสมบัติเชื่อมด้านการเหนียวติดกัน (Tack) ซึ่งเป็น สมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบ (Assemble) ชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางรถยนต์ เป็นต้น

### 2.3.4 ข้อดีของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติถูกนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ หรือวัสดุชิ้นส่วนมากมาย เนื่องจากยางธรรมชาติมีสมบัติดีเยี่ยมในด้านการทนต่อแรงดึง (Tensile Strength) แม้ไม่ได้เติมสาร เสริมแรงและมีความยืดหยุ่นสูงมากจึงเหมาะที่จะใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น ถุงมือยาง ถุงยางอนามัย ยางรัดของ เป็นต้น ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัตที่ดี (Dynamic Properties) มีความ ยืดหยุ่น (Elasticity) สูง ในขณะที่มีความร้อนภายใน (Heat Build-up) ที่เกิดขณะใช้งานต่ำ และมี สมบัติการเหนียวติดกัน (Tack) ที่ดี จึงเหมาะสำหรับการผลิตยางรถบรรทุก ยางล้อเครื่องบิน หรือ ใช้ผสมกับยางสังเคราะห์ในการผลิตยางรถยนต์ เป็นต้น

ยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อการฉีกขาดสูง (Tear Resistance) ทั้งที่อุณหภูมิต่ำ และที่อุณหภูมิสูง จึงเหมาะ สำหรับการผลิตยางกระเป๋าน้ำร้อน เพราะว่าการแกะชิ้นงานออกจากเบ้าในระหว่างกระบวนการผลิตจะต้องดึงชิ้นงานออกจากเบ้าพิมพ์ในขณะที่ร้อน ยางที่ใช้จึง ต้องมีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดขณะร้อนสูง

### 2.3.5 ข้อดีและข้อเสียของยางธรรมชาติในเรื่องโฟโตคะตะไลติก

**ข้อดี** เมื่อนำน้ำยางเข้าไปผสมกับผงไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้ จึงง่ายต่อการใช้งาน การจัดเก็บ และสามารถล้างทำความสะอาดแล้วนำไปใช้ในการดูดจับ สีย้อม โลหะหนัก หรือมลพิษต่างๆในน้ำได้ใหม่

**ข้อเสีย** เมื่อขึ้นรูปกลายเป็นแผ่นยางไทเทเนียมไดออกไซด์แล้วทำให้เกิดโฟโตคะ ตะไลติก เป็นไปได้น้อยลงเมื่อเทียบกับแบบชนิดผงไทเทเนียม เนื่องด้วยพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยา นั้นสามารถเกิดได้เพียงแค่บริเวณพื้นผิวรอบนอก (Surface) เท่านั้น อีกทั้งด้วยความที่เป็นยาง ธรรมชาติจึงเสื่อมสภาพเร็วภายใต้แสงแดด ออกซิเจน โอโซน และความชื้น เนื่องจากโมเลกุลของ ยางธรรมชาติมีพันธะคู่ (Double Bond) อยู่มาก ยางธรรมชาติจึงไวต่อการทำปฏิกิริยากับ ออกซิเจนและโอโซนโดยมีแสงแดดและความชื้นเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้อาจฉีกขาดได้หลังทำ การใช้งานเพราะฉะนั้นจึงได้มีการปรับปรุงข้อเสียที่กล่าวไปด้วยการเติมวัสดุเสริมแรงอย่าง ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)



รูปที่ 2.13 ยางธรรมชาติที่ได้จากต้นยางพารา [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

### 2.4.1 ข้อมูลเบื้องต้นของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์(Activated Carbon หรือ Activated Charcoal) หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำวัตถุดิบธรรมชาติหรืออินทรีย์วัตถุซึ่งมีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลักมาผ่านกรรมวิธีก่อกัมมันต์ (Activation Process) จนได้ผลิตภัณฑ์สีดำ มีโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรูพรุน มีพื้นที่ผิวสูงมีคุณสมบัติในการดูดซับสารต่างๆ ได้ดี วัตถุดิบที่ใช้ผลิตจะขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตอาจเป็นอินทรีย์วัตถุหรือถ่านก็ได้ซึ่งแบ่งได้ดังนี้

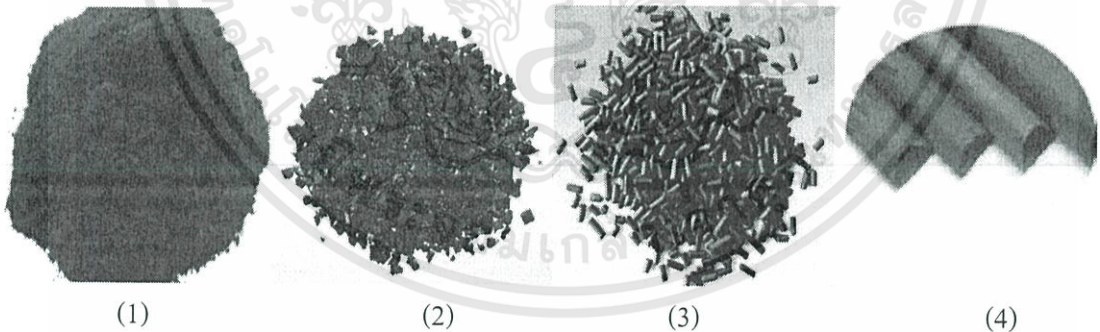
1. สารเซลล์ลูโลสที่มาจากพืช เช่น ไม้ยางพารา ไม้ไผ่ และเศษไม้เหลือทิ้ง
2. วัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร เช่น แกลบ กะลามะพร้าว ขี้เถ้า ชานอ้อย และขังข้าวโพด เป็นต้น

3. ถ่านหิน เช่น ลิกไนต์ (Lignite) พีท (Peat) บิทูมินัส (Bituminous) เป็นต้น

### 2.4.2 ชนิดของถ่านกัมมันต์

ชนิดของถ่านกัมมันต์แบ่งตามขนาดของตัวถ่าน ดังนี้

1. ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powder Activated Carbon : PAC) ขนาดเล็กกว่า 0.18 มม.
2. ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (Granular Activated Carbon : GAC) ขนาด 0.2 ถึง 5.0 มม.
3. ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Pelleted Activated Carbon) ขนาด 0.8 ถึง 5.0 มม.
4. ถ่านกัมมันต์ที่เป็นเส้นใย (Cloth and fibres activated carbon)



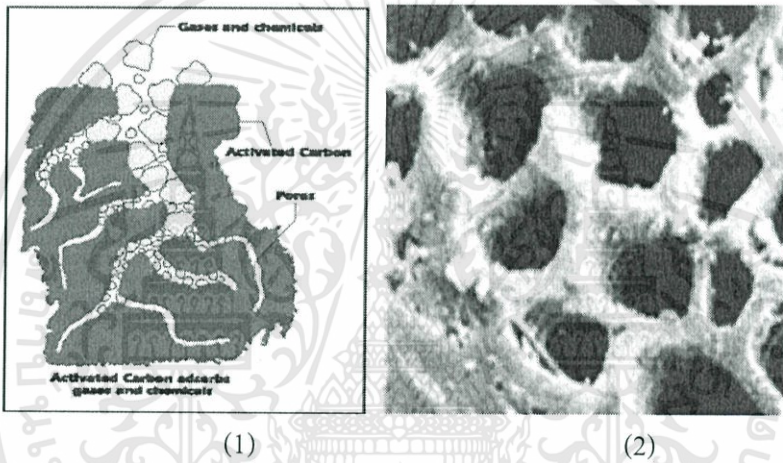
รูปที่ 2.14 ชนิดของถ่านกัมมันต์ [15]

### 2.4.3 การดูดซับของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่มีความสามารถในการดูดซับสูง เพราะมีรูพรุนขนาด 18-10,000 อังสตรอม เป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ตามผิวของรูพรุนยังมีอิเล็กตรอนอิสระที่พร้อมจะแลกเปลี่ยนประจุ และยึดเหนี่ยวโมเลกุลของสารต่างๆ ได้อย่างดี ถ่านกัมมันต์เมื่อใช้หมดแล้ว อาจทำให้กลับมามีความสามารถในการดูดซับ กลิ่น และก๊าซ และนำกลับมาใช้ได้ อีก โดยการ Regenerate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ่านกัมมันต์ กำจัดสารอินทรีย์ในน้ำโดยใช้หลักการดูดซับ (Adsorption) และดูดซึม (Absorption) การดูดซับจะเป็นการจับกันอย่างหลวมๆ ของสารอินทรีย์และคาร์บอน ที่ผิวนอกของถ่านกัมมันต์ โดยยึดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์เป็นชั้นๆ ส่วนกระบวนการดูดซึมนั้นจะอาศัยหลักการแพร่ของก๊าซ หรือสารประกอบเข้าไปในร่างแหรูพรุนภายในเม็ดถ่านซึ่งภายในจะเกิดปฏิกิริยาเคมี หรือเกิดการจับยึดโดยความเป็นร่างแหยึดเหนี่ยวไว้ ยกตัวอย่างการเกิดปฏิกิริยาเคมี เช่น โอโซนถูกดูดซึมเข้าไปและถูกคาร์บอนรีดิวซ์เป็นออกซิเจน ซึ่งตัวโอโซนหรือออกซิเจนไม่ได้ไปสร้างหรือถูกจับไว้โดยถ่านกัมมันต์แต่อย่างใด ส่วนกระบวนการดูดซึมอีกประเภทคือการถูกดูดซึมเข้าไปแล้วเกิดปฏิกิริยาที่ย้อนกลับไม่ได้ สร้างพันธะที่หนาแน่นกับคาร์บอนของถ่านกัมมันต์



รูปที่ 2.15 (1) กลไกการดูดซับของถ่านกัมมันต์ และ (2) โครงสร้างภายในที่แสดงควมมีรูพรุนของถ่านกัมมันต์ [15]

#### 2.4.4 การผลิตถ่านกัมมันต์

กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์โดยทั่วไป แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ

1. กระบวนการคาร์บอนไนซ์ (Carbonization) เป็นการไพโรไลซิสซึ่งเกิดขึ้นในที่อับอากาศ เพื่อเพิ่มสัดส่วนคาร์บอนของสารอินทรีย์ ขณะเดียวกันก็ได้ผลิตภัณฑ์อื่นที่เป็นของเหลว และแก๊สออกมาด้วย โครงสร้างวงอะโรมาติกหลักที่เหลือนกลายเป็น โครงสร้างของถ่านชาร์ ส่วนกลุ่มโครงสร้างโมเลกุลหรือหมู่ที่มีขนาดเล็กกว่าจะกลั่นสลายตัวออกมา เป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้แก่ น้ำแอมโมเนีย น้ำมันทาร์ และแก๊สต่างๆ หรือเรียกง่ายๆ ก็คือเป็นกระบวนการเผาวัตถุดิบให้เป็นถ่าน ซึ่งอุณหภูมิในการเผาประมาณ 200-400 °C

กระบวนการคาร์บอนไนเซชันสามารถแบ่งออกได้ 3 ขั้นตอน ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การสูญเสียน้ำออกจากโครงสร้างวัตถุคิบที่ช่วงอุณหภูมิ 27-197 °C
- การไพโรไลซิสโดยเกิดแก๊สและน้ำมันทาร์ในโครงสร้างที่ช่วงอุณหภูมิ 197-497 °C
- ช่วงที่มีการเกาะตัวกันของโครงสร้างถ่านชาร์โดยในช่วงนี้น้ำหนักของวัตถุคิบจะลดลงไปมาก ที่ช่วงอุณหภูมิ 497-847 °C

**2. กระบวนการกระตุ้น (Activation)** เป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพสำหรับคาร์บอน ด้วยการเพิ่มพื้นที่ผิวให้มากขึ้น โดยการทำให้มีรูพรุนมากขึ้น หรือเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสารอื่นๆ ของถ่านกัมมันต์ แบ่งได้เป็น 2 วิธีคือ การกระตุ้นทางเคมี และการกระตุ้นทางกายภาพ ดังนี้

2.1 การกระตุ้นทางเคมี (Chemical Activation) เป็นวิธีการเพิ่มปริมาตรรูพรุนและพื้นที่ผิวโดยปฏิกิริยากับสารเคมี ซึ่งการกระตุ้นชนิดนี้นิยมใช้กับวัตถุดิบที่เป็นไม้ อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นอยู่ในช่วง 150-900 องศาเซลเซียส และสารกระตุ้นที่นิยมใช้ทั่วไปในทางอุตสาหกรรม เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ซิงค์คลอไรด์ กรดฟอสฟอริก และ โพแทสเซียม ไฮดรอกไซด์ เป็นต้น ซึ่งสามารถแทรกซึมได้ทั่วถึง ทำให้ส่วนที่ไม่บริสุทธิ์ละลายหมดไปได้เร็วขึ้นจากนั้นนำไปเผาในถังที่มี ออกซิเจนเป็นเวลาหลายชั่วโมง แต่มีข้อเสียตรงที่ต้องล้างสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้น ซึ่งติดมากับถ่านกัมมันต์ออกให้หมดไม่ให้เกิดตกค้างอยู่เลย เพื่อความปลอดภัยในการนำไปใช้งาน

#### 2.1.1 การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก

กระบวนการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้กรดฟอสฟอริกเป็น สารกระตุ้นจะใช้อุณหภูมิในการ กระตุ้นที่ค่อนข้างต่ำคือ 400-500 °C ซึ่งการใช้กรดฟอสฟอริกนั้นสามารถผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ โดยยังได้กรดฟอสฟอริกที่มีความเข้มข้นสูง พบว่าวัตถุดิบที่เป็นไม้ สามารถผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพดีโดยวิธีนี้

2.2 การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical Activation) เป็นการกระตุ้นด้วยการใช้แก๊ส หรือไอน้ำ ซึ่งใช้อุณหภูมิในการเผากระตุ้นค่อนข้างสูงประมาณ 800-1000 °C เพราะไอน้ำที่ใช้จะต้องเป็นไอน้ำที่ร้อนยิ่งยวด (Superheated Steam) เพื่อทำให้สารอินทรีย์ต่างๆ สลายไป ทำให้โครงสร้างภายในมีลักษณะรูพรุน (Porous) อยู่ทั่วไป ขนาดของรูพรุนที่ได้จะมีขนาดเล็กกว่าการกระตุ้นทางเคมี ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยวิธีนี้มีข้อดีที่สามารถนำมาใช้งานได้เลย ทันทีโดยไม่ต้องล้างสารที่เหลือตกค้าง

#### 2.2.1 การกระตุ้นด้วยไอน้ำในเตาเผาที่หมุนได้ (Rotary Kiln)

เตาเผาจะอยู่ในแนวนอนและหมุนได้รอบตัวโดยใช้มอเตอร์ ซึ่งจะทำให้ถ่านคลุกเคล้ากับ ไอน้ำได้มากขึ้น ไอน้ำที่ออกมาจากเครื่องทำไอน้ำจะถูกทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น โดยผ่านเข้าไปในท่อทองแดงจนเกิดเป็น Super Heated Steam แล้วเข้าเตาเผาที่หมุน ซึ่งจะกระทำปฏิกิริยากับถ่านในที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.5 การทำ Regenerate ถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้ว

เมื่อความสามารถในการดูดซับน้อยลง และระยะเวลาการใช้งานมากขึ้น จะต้องเปลี่ยนถ่านใหม่ หรือนำถ่านเก่าไป Regenerate โดยวิธีการ Regenerate มีดังนี้

- วิธีใช้ไอน้ำ (Steam Regeneration) : ใช้กับถ่านที่เปื้อนจากสารระเหย (Volatile) เพียงเล็กน้อย
- วิธีใช้สารเคมี Chemical Regeneration : ใช้สารเคมีละลายสารต่างๆ ที่ถูกดูดซับ ส่วนใหญ่ จะทำ ณ อุณหภูมิ 100 °C ภายใต้สภาพ pH สูง
- วิธีใช้จุลินทรีย์ Biological Regeneration : ใช้จุลินทรีย์ ย่อยสลายสารต่างๆ ที่ถูกดูดซับ
- วิธีใช้อุณหภูมิ (Thermal Regeneration) : ใช้ความร้อน (800-950 °C ) เผาถ่านเพื่อให้สารอินทรีย์ที่ถูกดูดซับย่อยสลาย

#### 2.4.6 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ถูกนำไปใช้ในการกรองเอาสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ ที่ไม่ต้องการออกจากของเหลวหรือก๊าซ เช่น ในการเตรียมน้ำดื่มบริสุทธิ์ อุตสาหกรรมต่างๆ ที่ต้องใช้น้ำบริสุทธิ์ การบำบัดน้ำเสีย ใช้ในการฟอกสีของเหลวต่างๆ การทดลองวิจัยในการแยกและเตรียมสารเคมี ทางการแพทย์นำไปใช้ในการกำจัดพิษ การฟอกเลือด และอื่นๆ ใช้กรองกลิ่นและก๊าซที่ไม่ต้องการในหน้ากากกรองสารพิษ และเครื่องฟอกอากาศ

##### - ถ่านกัมมันต์กับปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก

หลังจากทำการผสมระหว่างผงไทเทเนียม ไดออกไซด์ และถ่านกัมมันต์ การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก ควรมีประสิทธิภาพสูงขึ้น เนื่องจากมีตัวถ่านกัมมันต์มาคอยช่วยดูดซับสีย้อม โลหะหนัก หรือมลพิษเพิ่มขึ้นอีกตัว ทำให้การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกดีและไวยิ่งขึ้น นอกจากนั้นถ่านกัมมันต์ที่มีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์บอน ยังช่วยเสริมความแข็งแรงให้แก่วัสดุผสมชิ้นนี้ ทำให้แผ่นยางมีความแข็งแรงมากขึ้น ทนต่อแรงดึงยึดได้ดี สามารถใช้ในดูดซับสีย้อม หรือบำบัดน้ำเสียได้เป็นเวลานานมากยิ่งขึ้น

## 2.5 สีย้อม

### 2.5.1 ข้อมูลเบื้องต้นของสีย้อม

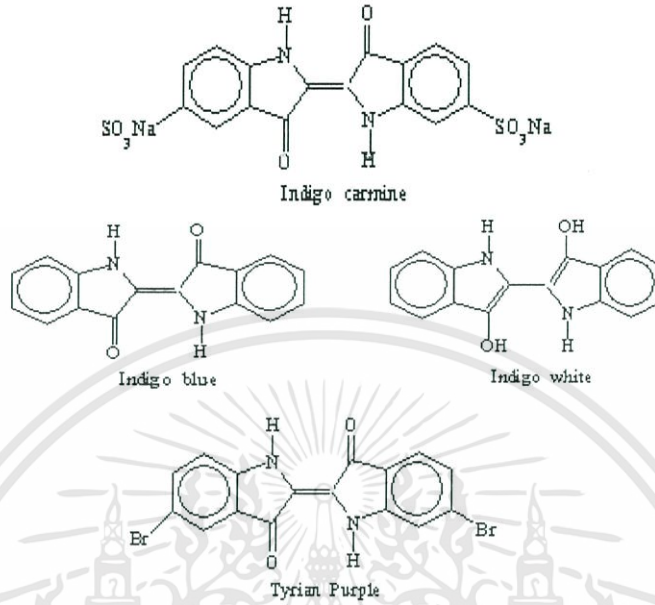
สีย้อมเป็นสารเคมีที่สกัดจากน้ำมันปิโตรเลียม หรือถ่านหินเมื่อถ่านหินปิโตรเลียม หรือถ่านหินผ่านการสกัดจะได้สารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว เช่น เบนซินไซคลินแอนทราซีน โทลูอิน แนพทาลิน และพาราฟินซึ่งสารไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้ จะถูกเปลี่ยนเป็นสีย้อมด้วยเทคนิคต่าง ๆ ซึ่งสีย้อมที่ผลิตขึ้นมาจะมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับ ความเหมาะสมกับเส้นใย และกระบวนการย้อมที่มี ลักษณะแตกต่างกันไป การที่จะนำสีย้อมใดๆ มาย้อมให้ได้ผลดีนั้น ขึ้นอยู่กับอำนาจการรวมตัวของ สีย้อมกับเส้นใย ซึ่งต้องมีอำนาจมากกว่าน้ำเรา จะสามารถทำให้เกิดสภาวะเช่นนี้ขึ้น ได้เมื่อโมเลกุลของ สีย้อม มีหมู่อะตอมซึ่งถูกจัดให้เรียงตัวกัน ในลักษณะที่จะทำให้เกิดการดูดติดเส้นใยได้เอง (Substantivity) กับเส้นใยแล้วเกิดพันธะ (Bond) ยึดกันแน่น อาจกล่าวได้อย่างกว้างๆ ว่าอิทธิพลเชิงเคมี 4 ชนิดที่ทำให้สีย้อมติดเส้นใย คือ พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bond) ,แรงแวนเดอวัลส์ (Van der Waals' force) , แรงไอออน (Ionic Force) และ พันธะโควาเลนต์ (Covalent Bond) กำลังแรงเหล่านี้มักไม่ทำหน้าที่เพียงลำพัง การดูดติดกันระหว่างโมเลกุลของสีย้อม กับโมเลกุลของเส้นใยอย่างน้อยต้องประกอบไปด้วย 2 ชนิดขึ้นไป บางครั้งก็อาจเกิดแรงทั้ง 4 ชนิดผสมผสานกัน สำหรับแรงยึดติดทางเคมีที่จะให้การยึดติดที่ดีที่สุด ได้แก่ พันธะโควาเลนต์ การเกิด สีย้อมของสีย้อม สีย้อมที่ปรากฏออกมาทำให้ตามนุษย์ปกติมองเห็นได้เกิดจากการเรียงตัวของกลุ่มอะตอม ประเภทหนึ่งภายใน โมเลกุลของสีย้อม กลุ่มอะตอมที่กล่าวนี้เรียกกันว่า “โครโมฟอร์” แต่สีย้อมที่สนใจเป็น โทนสีฟ้า-น้ำเงิน นั่นก็คือ Indigo Carmine และ Methylene Blue ที่มีการนิยมใช้อย่างแพร่หลาย

### 2.5.2 อินดิโกคาร์มีน (Indigo carmine)

สีคราม มีชื่อเคมี 2-(1,3- Dihydro-3-oxo-2H-indol-2-ylid-ene)-1,2-dihydro-3H-indol-3-one ชื่อทั่วไป Indigo Blue หรือ Indigotin เป็นผลึกรูปเข็มสีม่วงหรือสีน้ำเงินระเหิดที่ 107 °C มีสมบัติไม่ละลายในน้ำ แอลกอฮอล์ อีเทอร์ และกัญเจือจางแต่ละลายได้ดีมากใน สารละลายอะนิลีนและพิริดีนขณะเดือดละลายได้ดีพอควร ในกัญแอซิดิกแกลเซียสต้มเดือดถ้า ละลายในตัวทำละลายไม่มีขั้วจะปรากฏสีม่วงแดงแต่ถ้าละลายในตัวทำละลายมีขั้วจะปรากฏสีน้ำเงินถ้าให้ทำปฏิกิริยากับกัญซัลฟิวริกเย็นจะเกิดกัญ Disulphoinc ซึ่งทำให้อยู่ในรูปของเกลือโซเดียมได้ง่าย เรียกว่า Indigo Carmine มีสีน้ำเงินเข้มใช้ย้อมติดสีจัดเป็นสีแอซิด (acid dye) มีกระบวนการย้อมต่างจากการย้อมครามซึ่งเป็นสีแวนด์

Indigo Blue ถูกรีดิวซ์ในสารละลายต่างกลายเป็นสารไม่มีสีเรียกว่า Indigo White ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 405 นาโนเมตรตัวรีดิวซ์และต่างมีหลายคู่ได้แก่ไฮโดรซัลไฟท์กับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4/\text{NaOH}$ ) ผุ่นผงสังกะสีในน้ำปูนใสอุ่นไม่เกิน 60 °C ( $\text{Zn}/\text{Ca}(\text{OH})_2$  เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

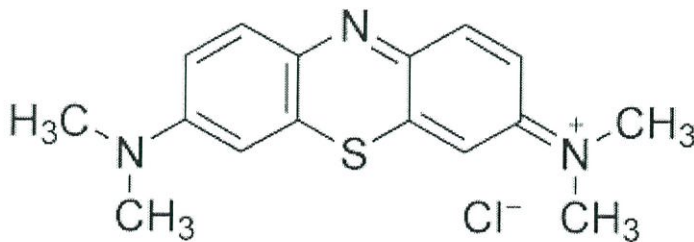
หรือน้ำจืดได้ในน้ำปูนใส(ภูมิปัญญาท้องถิ่น)ส่วน Indigo Writh ถูกออกซิไดซ์ได้ง่ายมากด้วย ออกซิเจนในอากาศกลับไปเป็น Indigo Blue



รูปที่ 16 โครงสร้างของสีย้อมตระกูล Indigo ชนิดต่างๆ [13]

### 2.5.3 เมทิลีนบลู (Methylene Blue)

สารประกอบเมทิลีนบลูเป็นสารอินทรีย์กลุ่มสารประกอบพวกเฮเทอโรไซคลิกอะโรมาติก (Heterocyclic aromatic) ที่ย่อยสลายยาก ซึ่งมีสูตรทางเคมี คือ  $C_{16}H_{18}N_3$  หรือเรียกชื่อตามระบบ IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) ว่า 3,7-bis-(Dimethylamino)-Phenazathionium Chloride หรือ Tetramethylthionine Chloride โดยมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 17 ลักษณะเป็นผลึกสีเขียวเข้ม และละลายน้ำจะเป็นสีน้ำเงิน โดยสมบัติต่างๆของเมทิลีนบลู แสดงดังตารางที่ 4



รูปที่ 17 แสดงสูตร โครงสร้างของเมทิลีนบลู [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4 สมบัติต่างๆของเมทิลีนบลู [2]

สมบัติทั่วไป	มวลโมเลกุล (go/mol)	319.85
สมบัติทางกายภาพและเคมี	ลักษณะ	ของแข็ง
	จุดหลอมเหลว (K)	463.15
	ความสามารถในการละลายน้ำ (g/100 cm <sup>3</sup> )	4
	ความสามารถในการละลายแอลกอฮอล์ (g/100 cm <sup>3</sup> )	1.54

### การนำเมทิลีนบลูมาใช้ประโยชน์

ในปัจจุบันเมทิลีนบลูถูกใช้เป็นสีย้อมในอุตสาหกรรมสีต่างๆ เนื่องจากเมทิลีนบลูเมื่อละลายน้ำแล้วให้สีน้ำเงิน และยังใช้เป็นอินดิเคเตอร์ในการทดสอบความเป็นกรด-ด่างของสารละลายได้อีกด้วย นอกจากนี้ เมทิลีนบลูยังถูกใช้เป็นยาฆ่าเชื้อในลำไส้ ยาฆ่าเชื้อทางเดินปัสสาวะ และยาฆ่าเชื้อมาเลเรีย

### 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชวาลย์ และคณะ ได้ศึกษาการใส่ไทเทเนียมไดออกไซด์ลงในแผ่นยางธรรมชาติ เพื่อทดสอบความสามารถในการโฟโตคะตะไลติกและสมบัติในการนำมาใช้ใหม่ ซึ่งใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เกรด Degussa P25 ในการวิจัย เมื่อทำการวิจัยพบว่าสิ่งที่ส่งผลต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม ความเข้มของแสงยูวี และค่า pH ในระบบ โดยพบว่า ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมยังมีปริมาณมากเท่าไร เวลาในการโฟโตคะตะไลติกก็จะยิ่งน้อยลง ส่วนความเข้มของแสงยูวียิ่งให้ความเข้มมากเท่าไร เวลาในการโฟโตคะตะไลติกก็จะยิ่งน้อยลง เพราะเหมือนเป็นการเพิ่มจำนวนอนุภาคบวก (โฟตอน) ในกระบวนการทำให้มีไฮดรอกซิลเรดิคัลเพิ่มมากขึ้น และค่า pH หากมีค่า pH น้อยลง เวลาในการโฟโตคะตะไลติกก็จะยิ่งน้อยลงเช่นกัน ในงานวิจัยนี้ศึกษาในช่วง pH 3 ถึง 8 พบว่า pH 3 ใช้เวลาในโฟโตคะตะไลติกน้อยที่สุด ส่วน pH 8 ใช้เวลาในการโฟโตคะตะไลติกมากที่สุด นอกจากนี้สมบัติในด้านการใช้ซ้ำพบว่า เมื่อนำมาทดสอบการกำจัดสีย้อมแล้วครั้งแรกมีประสิทธิภาพดีที่สุด ส่วนการนำมาใช้ใหม่ในครั้งที่ 2 และ 3 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมลดลงอย่างเห็นได้ชัด

**ชวาลย์ และคณะ** ได้ศึกษาการใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ในการกำจัดสีย้อม โดยทดสอบด้วยปริมาณน้ำยางธรรมชาติแตกต่างกัน คือ 5 wt% 10 wt% และ 15 wt% พบว่าปริมาณน้ำยางธรรมชาติที่ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมได้ดีที่สุดคือ 5 wt% เพราะที่บริเวณผิวของแผ่นยางผสมมีปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์มากที่สุด ส่วนน้ำยางธรรมชาติในปริมาณที่มากขึ้นพบว่าการกระจายตัวที่ลดลง ทำให้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่พื้นผิวน้อยลง ความสามารถในการเกิดโฟโตคะตะไลติกลดลง

**ชวาลย์ และคณะ** ได้ศึกษาชนิดของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในแผ่นยางผสมน้ำยางธรรมชาติ โดยสนใจศึกษาไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ชนิดได้แก่ ไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 และไทเทเนียมไดออกไซด์ Carlo Erba (Anatase grade) โดยผลที่ได้พบว่า P25 มีความสามารถในการโฟโตคะตะไลติกได้ดีกว่า Anatase เนื่องจาก P25 มีโครงสร้างแบบผสมคือมีทั้งโครงสร้างรูไทล์และอนาเทส ซึ่งส่งผลให้ต่อการเกิดโฟโตคะตะไลติกดีมากกว่า

**Mohd Rafatullah และคณะ** ได้ศึกษาการดูดซับสีย้อมเมทิลินบลูได้ด้วยดูดซับชนิดต่างๆ โดยถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับสูงมากมีค่าความจุในการดูดซับเท่ากับ 980 mg/g นอกจากนี้ยังมีพีต (การสะสมของซากพืชในน้ำ) ที่มีค่าความจุในการดูดซับ ประมาณ 324 mg/g และถ่านหินชนิดต่างๆที่มีค่าการดูดซับรองลงมา นอกเหนือจากนั้นงานวิจัยนี้ยังศึกษาตัวดูดซับที่มีราคาถูก หาได้ง่ายในธรรมชาติหรือเป็นกากจากการผ่านการใช้งาน เช่น กากกาแฟ เปลือกกล้วย เมล็ดพืชทอง เป็นต้น

**Ji-Chuan XU และคณะ** ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเจือโลหะที่อยู่ในรูป  $Zn^{2+}$  ลงบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่า ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วย  $Zn^{2+}$  (อยู่ในรูป  $ZnO$ ) เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกได้ดีกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ ทดสอบโดยดูการสลายตัวของ Methyl Orange ในน้ำภายใต้รังสี UV เป็นเวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง พบว่าการเจือ  $ZnO$  จะมี Methyl Orange ที่เหลืออยู่ในอัตราที่น้อยกว่าไทเทเนียมบริสุทธิ์ จากนั้นนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค FT-IR, XRD, AAS และ X-Ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) พบว่าเกิด  $ZnO$  บนพื้นผิวของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และพันธะไฮโดรเจนรอบบริเวณนั้น ซึ่ง  $ZnO$  บนพื้นผิวจะยับยั้งการกลับมารวมกันใหม่ของอิเล็กตรอน-โฮลเป็นเหมือนส่วนที่มีการแยกประจุ

**Seemah Singh และคณะ** ได้ศึกษาและรวบรวมข้อมูลในการนำไทเทเนียมไดออกไซด์มาผสมด้วยพอลิเมอร์ชนิดต่างๆในการขึ้นรูปเพื่อใช้ในการโฟโตคะตะไลติก ได้แก่

ตารางที่ 5 ประสิทธิภาพในการเกิดโฟโตคะตะไลติก

ชนิดของพอลิเมอร์	ตัวที่ต้องการกำจัด	ชนิดของแสงที่ใช้	ผลลัพธ์ที่ได้
PE (Polythene)	Paraquat (ยากำจัดวัชพืช)	UV light	กำจัดได้ทั้งหมด ภายในเวลา 6 ชั่วโมง

PTFE (Polytetrafluoroethylene)	Trichlorobenzene	UV light	กำจัดได้ทั้งหมด ภายในเวลา 2 ชั่วโมง
PDMS (Polydimethylsiloxane)	Methylene Blue	UV light	กำจัดได้เพียง 60 %
PHB (Polyhydroxybutyrate)	Methylene Blue	Sun light	กำจัดได้ทั้งหมด ภายในเวลา 1 ชั่วโมง
Rubber sheet	Methylene Blue	UV light	กำจัดได้ 90.67 % ภายในเวลา 3 ชั่วโมง

**Muhammad J. Iqbal** และคณะ ได้ศึกษาการดูดซับสีย้อมชนิดต่างๆด้วยถ่านกัมมันต์ ซึ่งในที่นี้สนใจสีย้อมเมทิลีนบลู และ สีย้อมอินดิโกคาร์มีน โดยปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการดูดซับได้แก่ ค่า pH ของสารละลาย และอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการ โดยค่า pH เมื่อเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากสีย้อมเมทิลีนบลูมีประจุเป็นบวก ซึ่งการเพิ่ม pH จะเป็นการเพิ่มไฮดรอกซิลไอออน(ประจุลบ) ที่พื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ทำให้ความสามารถในการดูดซับดีขึ้น ตรงกันข้ามสีย้อมอินดิโกคาร์มีนที่มีประจุเป็นลบ การดูดซับจึงแยกลงเมื่อเพิ่ม pH ส่วนอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการหากใช้อุณหภูมิมากขึ้นความสามารถในการดูดซับก็จะลดลงเพราะปฏิกิริยาการดูดซับเป็นปฏิกิริยาชนิดคายความร้อน

## 2.7 สรุปเนื้อหาสำคัญของโครงการพิเศษ

การนำไทเทเนียมไดออกไซด์แบบผงมาใช้มีประสิทธิภาพในการโฟโตคะตะไลติกได้สูงสุดเพราะมีพื้นที่ผิวสัมผัสในการเกิดปฏิกิริยาเป็นจำนวนมาก แต่มีข้อเสียหลายประการ เช่น การฟุ้งกระจายในอากาศซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพ การแยกออกจากระบบหลังจากการบำบัดเป็นไปได้ยากลำบาก การก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำเนื่องจากการสะสมเป็นจำนวนมาก และการนำกลับมาใช้ใหม่ก็ไม่สามารถทำได้ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของเศรษฐกิจ จึงนำมาทำเป็นคอมโพสิตกับน้ำยางธรรมชาติเข้มข้น เพื่อให้สามารถใช้งานและเก็บรักษาได้สะดวกยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อนำมาโฟโตคะตะไลติกพบว่าประสิทธิภาพแยกลง เนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสลดลง จึงได้ศึกษาหาตัวเพิ่มคุณสมบัติ ซึ่งในงานวิจัยนี้สนใจถ่านกัมมันต์ ที่มีโครงสร้างที่เป็นรูพรุนสูง จึงสามารถช่วยในการดูดซับ อีกทั้งยังมีความสามารถในการเสริมแรงเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงาน

## บทที่ 3

# วิธีการดำเนินงานวิจัย

### 3.1 สารเคมี

1. ผงถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon, DARGO Netherland)
2. ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25)
3. น้ำยางเข้มข้น (60 % HA)
4. กรดซัลฟูริกเข้มข้น (conc.  $H_2SO_4$ )
5. กรดไนตริกเข้มข้น (conc.  $HNO_3$ )
6. สารละลายเมทิลีนบลู
7. สารละลายอินดิโกคามีน

### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องแก้ว
2. เครื่องชั่งความละเอียด 4 ตำแหน่ง
3. เครื่องปั่นกวนแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)
4. เครื่องกรองแบบลดความดัน (Ultrafiltration)
5. กระดาษกรอง Whatman No.42
6. กระดาษลิตมัส
7. เตาอบ
8. เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge)
9. ตู้ฉายแสง UV
10. เครื่องวิเคราะห์สารด้วยระบบอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR)
11. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)
12. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)
13. เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-VIS Spectrophotometer)
14. เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM) ของบริษัท LLOYD Instruments จำกัด รุ่น LR5K

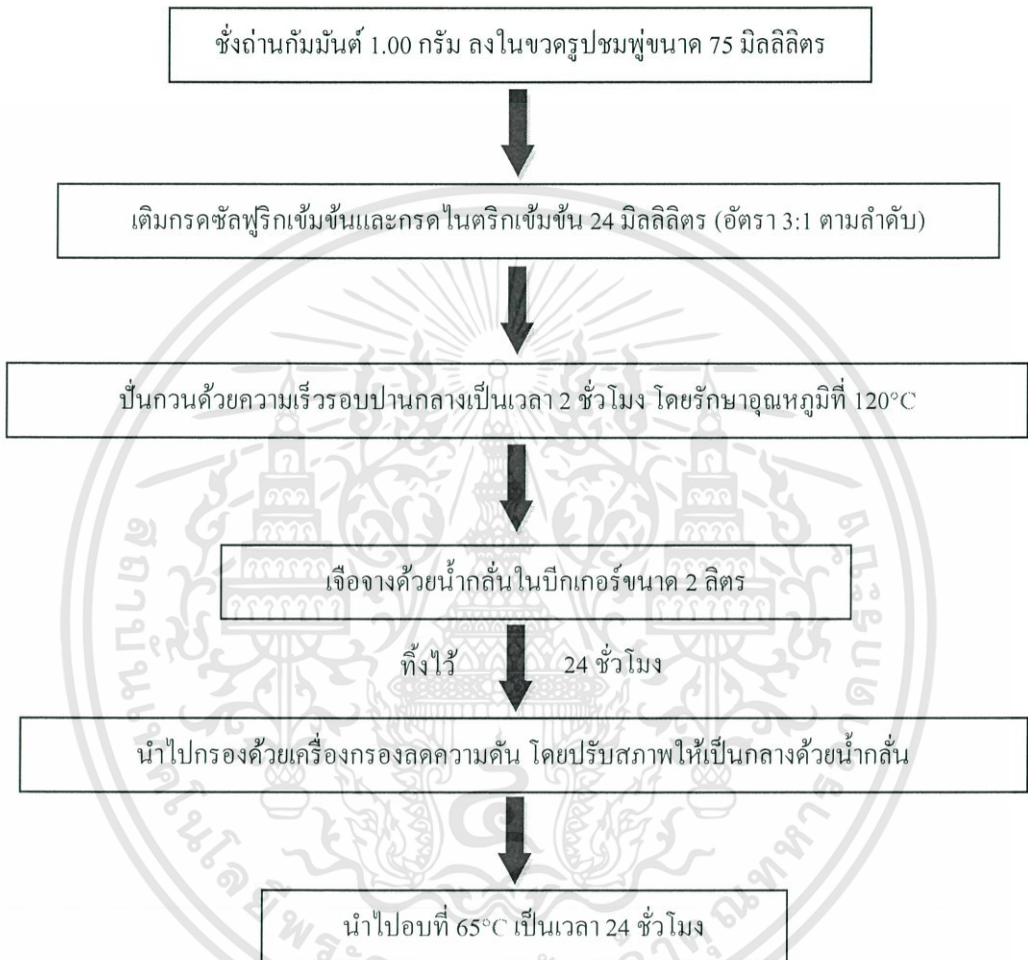
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การเตรียมถ่านกัมมันต์และทดสอบการย่อยสลายสีเขียว

#### 3.3.1 การปรับสภาพถ่านกัมมันต์

เพื่อให้ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการกระจายตัวเป็นสารแขวนลอยในน้ำได้ดีขึ้น จึงต้องมีการปรับสภาพ ซึ่งส่งผลทำให้มีหมู่คาร์บอนิลมากขึ้น

โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้



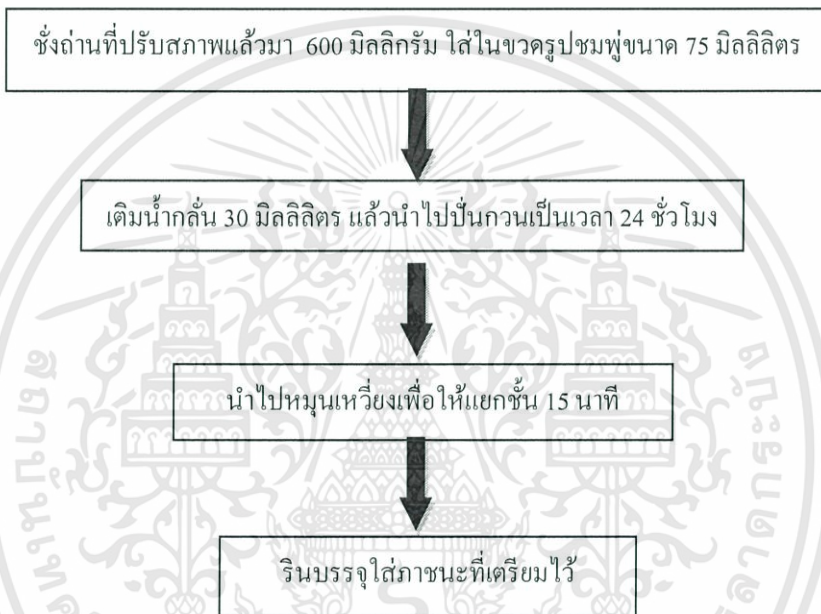
1. ชั่งถ่านกัมมันต์ 1.00 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 75 มิลลิลิตร
2. ปรับสภาพด้วยการเติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น และกรดโครมิกเข้มข้นปริมาตร 24 มิลลิลิตร (ปริมาณกรดซัลฟูริกและกรดโครมิก 16 และ 8 มิลลิลิตร ตามลำดับ)
3. ใส่แท่งแม่เหล็กและปิดฝอยล์ขวด จากนั้นนำไปปั่นกวนในชั้นที่ใส่น้ำมัน โดยใช้ ความเร็วรอบปานกลาง และให้ความร้อนประมาณ 120 °C
4. รักษาระดับอุณหภูมิให้คงที่ โดยใช้เวลาในการปั่นกวน 2 ชั่วโมง จากนั้นนำมาเจือจางด้วยน้ำกลั่นในบีกเกอร์ขนาด 2 ลิตร ให้เต็มบีกเกอร์ ทำการปิดฝอยล์และทิ้งให้แยกชั้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เมื่อสารแยกชั้นจนตกตะกอนของถ่านกัมมันต์ เทสารละลายออกโดยป้องกันไม่ให้เสียตะกอน จากนั้นนำไปกรองด้วยเครื่องกรองลดความดัน (ใช้กระดาษกรองเบอร์ 42)
6. ล้างด้วยน้ำกลั่นตลอดการกรองโดยใช้กระดาษลิตมัสทดสอบ จนมีสภาพเป็นกลาง จากนั้นนำสารที่กรองได้ใส่กระจกนาฬิกาแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 65 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

### 3.3.2 การทำให้อยู่ในรูปสารแขวนลอย

ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จาก 3.3.1 จะทำให้อยู่ในรูปสารแขวนลอยเพื่อสะดวกต่อการใช้งานต่างๆ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้



1. บดถ่านกัมมันต์หลังปรับสภาพให้ละเอียด จากนั้นชั่งมา 600 มิลลิกรัม ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 75 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่นลงไป 30 มิลลิลิตร
2. นำไปปั่นจนด้วยความเร็วรอบปานกลางเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. นำสารที่ได้จากการปั่นจนไปหมุนเหวี่ยง เพื่อให้เกิดการแยกชั้นของสารแขวนลอย โดยใช้ความเร็วรอบสูงเป็นเวลา 15 นาที
4. รินสารละลายที่แยกชั้นแล้วมาเก็บไว้ในขวดแก้วขนาดเล็ก (ระวังไม่ให้ตะกอนตกลงมา)

### 3.3.3 การหาความเข้มข้นของสารแขวนลอย

เพื่อให้ทราบปริมาณการกระจายตัวของถ่านกัมมันต์ในน้ำที่แน่นอนและสะดวกต่อการนำไปใช้ หลังจากการหมุนเหวี่ยงจึงได้ทำการหาความเข้มข้นของสารแขวนลอย โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



1. นำกระจกไสล้างให้สะอาด จากนั้นนำไปเข้าตู้อบเพื่อกำจัดความชื้นเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

2. นำกระจกไสที่ได้ไปชั่งน้ำหนักและบันทึกค่าที่ได้

3. ใช้ไมโครปิเปตดูดสารแขวนลอยถ่านกัมมันต์มา 1 มิลลิลิตร หยดลงบนกระจกไส จากนั้นนำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

4. จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนัก บันทึกค่าที่ได้แล้วนำไปคำนวณหาค่าความเข้มข้น

หมายเหตุ ทำ 2 ตัวอย่างเพื่อนำค่าที่ได้ไปเฉลี่ยหาความแน่นอน

### 3.3.4 การขึ้นรูปแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์

การขึ้นรูปให้เป็นแผ่นยางเพื่อเป็นการสะดวกในการใช้งานและเพื่อวัตถุประสงค์ในการใช้งานซ้ำได้ โดยพิจารณาปริมาณถ่านกัมมันต์ที่แตกต่างกัน ดังนี้ 0, 1, 5, 10, 20 และ 30 มิลลิกรัม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ไม่อนุญาติให้หาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ชั่งไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.03 กรัม ลงในบีกเกอร์ขนาด 25 มิลลิลิตร เติมสารละลายแอมโมเนีย 5 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปปั่นจน
2. เติมน้ำยารวมชาติ 5 มิลลิลิตร ลงไปในบีกเกอร์ ปั่นจนต่ออีกเป็นเวลา 5 นาที
3. จากนั้นเติมน้ำมันก๊าดในรูปสารแขวนลอยในปริมาณที่ต้องการทำการวิเคราะห์ แล้วปั่นจนต่อเป็นเวลาอีก 5 นาที
4. นำสารที่ปั่นจนแล้วเทลงในแบบ โดยทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาประมาณ 12-15 ชั่วโมง
5. แกะแผ่นยางผสมออกจากแบบ โดยนำด้านที่สัมผัสกับแบบขึ้นและด้านนี้ไปใช้

### 3.4 การตรวจสอบเอกลักษณ์เฉพาะ

#### 3.4.1 การตรวจสอบการตรวจสอบเอกลักษณ์พื้นฐานของการสั่นในโมเลกุลของสาร

วิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์วัสดุที่เป็นสารอินทรีย์และอินทรีย์ เทคนิคนี้เป็นวิธีการสเปกโตรสโกปี (spectroscopy) ชนิดหนึ่งที่ศึกษาการดูดกลืนแสงของสารในย่านความถี่ของแสง ซึ่งการวิเคราะห์โครงสร้างของสารจะอาศัย การดูดกลืนที่แตกต่างกันของแต่ละโมเลกุล ซึ่งแต่ละชนิดจะมีการดูดกลืนช่วงคลื่นอินฟราเรดที่แตกต่างกัน โดยช่วง wave number 1500-4000  $\text{cm}^{-1}$  จะเป็นช่วงที่บ่งบอกถึงหมู่ฟังก์ชันของโมเลกุล นอกจากนั้นยังเป็นช่วงย่านรอยพิมพ์นิ้วมือ ซึ่งจะมีลักษณะของสเปกตรัมที่เฉพาะเจาะจงของสารแต่ละตัว โดยวัดทั้งหมด 8 ตัวอย่าง ได้แก่ (1) ผงถ่านกัมมันต์ก่อนปรับสภาพ (2) ผงถ่านกัมมันต์หลังปรับสภาพ และ (3) ถึง (8) เป็นแผ่นยางผสมที่ปริมาณถ่านกัมมันต์ตั้งแต่ 0 ถึง 30 มิลลิกรัม

#### 3.4.2 การตรวจสอบลักษณะผลึกและอสัณฐาน

วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆกัน ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน เพื่อระบุวิฤภาคองค์ประกอบของสารตัวอย่าง ซึ่งเป็นการตรวจสอบเอกลักษณ์ที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง (Non-destructive) โดยวัดทั้งหมด 8 ตัวอย่าง ได้แก่ (1) ผงถ่านกัมมันต์ก่อนปรับสภาพ (2) ผงถ่านกัมมันต์หลังปรับสภาพ และ (3) ถึง (8) เป็นแผ่นยางผสมที่ปริมาณถ่านกัมมันต์ตั้งแต่ 0 ถึง 30 มิลลิกรัม

### 3.4.3 การตรวจสอบลักษณะพื้นฐานของสารในระดับจุลภาค

วิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM อาศัยลำแสงอิเล็กตรอนที่เกิดจากการให้ความร้อนที่ขั้วแคโทด ไปถึงยังพื้นที่ผิววัตถุ เมื่อลำแสงอิเล็กตรอนไปกระตุ้นให้วัตถุเกิดพลังงานมากขึ้น วัตถุจะคายพลังงานออกมาในลักษณะลำแสงอิเล็กตรอน Back Scatter Electron โดยวัดทั้งหมด 8 ตัวอย่าง ได้แก่ (1) ผงถ่านกัมมันต์ก่อนปรับสภาพ (2) ผงถ่านกัมมันต์หลังปรับสภาพ และ (3) ถึง (8) เป็นแผ่นยางผสมที่ปริมาณถ่านกัมมันต์ตั้งแต่ 0 ถึง 30 มิลลิกรัม

### 3.4.4 การตรวจสอบเชิงธาตุ

การวิเคราะห์เชิงธาตุด้วยเครื่อง EDS (Energy Dispersive X-ray Spectrometer) เป็นเครื่องมือประเภทไมโครนาโนเลติก ซึ่งสามารถกำหนดจุดในการวิเคราะห์ได้ตั้งแต่ระดับไมครอนจนถึงระดับนาโน โดยเทคนิคนี้ใช้งานได้สะดวก รวดเร็ว และสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยวัดทั้งหมด 8 ตัวอย่าง ได้แก่ (1) ผงถ่านกัมมันต์ก่อนปรับสภาพ (2) ผงถ่านกัมมันต์หลังปรับสภาพ และ (3) ถึง (8) เป็นแผ่นยางผสมที่ปริมาณถ่านกัมมันต์ตั้งแต่ 0 ถึง 30 มิลลิกรัม

### 3.4.5 การทดสอบการรับแรงดึงยืด

เนื่องจากคาร์บอนเป็นสารที่ใช้ในการเสริมความแข็งแรงและแต่ละความเข้มข้นมีปริมาณของคาร์บอนที่แตกต่างกัน จึงนำแผ่นยางผสมที่เตรียมไว้ไปทดสอบแรงดึง (Tensile Test) ด้วยเครื่องทดสอบ อเนกประสงค์ (Universal Testing Machine, UTM) ตามมาตรฐาน ASTM D882 โดยเตรียมชิ้นงานและกำหนดสภาวะเครื่องทดสอบดังนี้

ขนาดชิ้นงาน	10×80 mm <sup>2</sup>
ความเร็วในการดึง	500 mm/min
ความยาวเกจ (Gauge length)	25 mm
ค่าแรงสูงสุดที่เครื่องรับได้	100 N
จำนวนชิ้นงานที่ทดสอบ	2 ชิ้น / ความเข้มข้น

### 3.4.6 การตรวจสอบสมบัติการดูดกลืนแสง

วิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่วัดค่าการดูดกลืนแสงที่อยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิล ช่วงความยาวคลื่นประมาณ 190 – 800 นาโนเมตร การดูดกลืนแสงของสารต่างๆ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสาร จึงสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพและปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เตรียมสารละลายมาตรฐาน (Blank) และสารละลายเมทิลีนบลูที่ต้องการวิเคราะห์ได้แก่

- |                                   |                            |
|-----------------------------------|----------------------------|
| (1) สารละลายเมทิลีนบลูที่เริ่มต้น | (2) หลังจากฉายแสง 30 นาที  |
| (3) หลังจากฉายแสง 60 นาที         | (4) หลังจากฉายแสง 90 นาที  |
| (5) หลังจากฉายแสง 120 นาที        | (6) หลังจากฉายแสง 180 นาที |

2. ล้างเซลล์ใส่สารตัวอย่างด้วยน้ำกลั่น แล้วตามด้วยสารละลายที่เตรียมไว้สำหรับการวิเคราะห์ โดยวัดที่ค่าความยาวคลื่นสูงสุดของเมทิลีนบลูนั้นคือ 665 นาโนเมตร (สำหรับสีย้อมอินดิโกคามีนจะใช้ค่าความยาวคลื่นสูงสุดเท่ากับ 608 นาโนเมตร)

3. บันทึกค่าไว้ใช้สำหรับการสร้างกราฟเปรียบเทียบในเรื่องของ เวลา ความเข้มข้น และค่าการดูดกลืนแสง

### 3.5 การทดสอบการกำจัดสีย้อมและการนำกลับมาใช้ซ้ำ

การย่อยสลายสีย้อมในที่นี้คือการอาศัยสมบัติในด้านการโฟโตคะตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์ และสมบัติการดูดซับของถ่านกัมมันต์ ในที่นี้ศึกษาการย่อยสลายสีย้อม 2 ตัวได้แก่ เมทิลีนบลู และอินดิโกคามีน โดยเตรียมความเข้มข้นของสีย้อมที่  $3 \times 10^{-5}$  M

- นำแผ่นยางผสมมาใส่ในงานเพาะเชื้อ แล้วใส่สีย้อมให้ได้ปริมาณ 50 มิลลิลิตร วางแท่งแม่เหล็กไว้ในรูตรงกลางของแผ่นยางผสม
- นำไปเข้าสู่ฉายแสงยูวีที่เตรียมไว้ โดยปั่นกวนด้วยความเร็วรอบปานกลาง
- ดูดสีย้อมทุกๆ 30 นาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง (30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที)

เพื่อนำไปวัดการดูดกลืนแสง (UV-VIS Spectrophotometer)

**หมายเหตุ :** การวิเคราะห์วัดจากปริมาณถ่านกัมมันต์ 6 ความเข้มข้น ตั้งแต่ 0 จนถึง 30 มิลลิกรัม โดยทำความเข้มข้นละ 2 ตัวอย่าง เพื่อเป็นการหาค่าเฉลี่ยและการวิเคราะห์ใช้หลักการเดียวกันทั้ง 2 สีย้อม

การนำกลับมาใช้ซ้ำจะเลือกจาก แผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ที่สามารถทำการกำจัดสีย้อมได้ดีที่สุด โดยศึกษาการใช้ซ้ำทั้งหมด 5 ครั้ง ซึ่งใช้วิธีเดียวกันกับการทดสอบดังกล่าว

**หมายเหตุ :** หลังทำการกำจัดสีย้อมทุกครั้ง จะต้องทำความสะอาดแผ่นยางผสมด้วยน้ำกลั่น

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความสามารถในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูและอินดิโกคาร์มีน ภายใต้การฉายแสงยูวี โดยทั่วไปแล้วจะใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวทำหน้าที่โฟโตคะตะไลติก แต่งานวิจัยนี้มีการเติมผงถ่านกัมมันต์ที่มีคุณสมบัติความเป็นรูพรุนสูงจึงจะ ได้ความสามารถในด้านการดูดซับเพิ่มมากยิ่งขึ้น โดยการทดลองทำการเปรียบเทียบปริมาณถ่านกัมมันต์ที่แตกต่างกัน 6 ค่า ดังนี้ 0, 1, 5, 10, 20 และ 30 มิลลิกรัม ซึ่งจะทำการศึกษาในด้านการกำจัดสีย้อม และความสามารถในด้านการใช้ซ้ำ โดยใช้การวัดการดูดกลืนแสง (UV-Vis Spectroscopy) รวมถึงผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารที่นำไปวิเคราะห์ได้แก่ โครงสร้างและองค์ประกอบของโมเลกุลด้วยเครื่องตรวจวัดสสารระเหยอินทรีย์และอนินทรีย์ในบรรยากาศระบบอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR) โครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) และการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (Energy Dispersive X-ray Spectrometer) รวมทั้งการวิเคราะห์สมบัติในด้านความแข็งแรงดึงยืด (Tensile Test) โดยมีรายละเอียดตามลำดับดังต่อไปนี้

#### 4.1 การหาความเข้มข้นของสารแขวนลอยถ่านกัมมันต์

การหาความเข้มข้นของสารแขวนลอยในที่นี้ทำทั้งหมด 2 ตัวอย่างเพื่อหาค่าเฉลี่ย ได้ผลดังนี้

ตัวอย่าง	น้ำหนักก่อนหยด	น้ำหนักหลังหยด	ผลต่าง
แผ่นกระจกใส 1	6.3110 กรัม	6.3202 กรัม	0.0092 กรัม
แผ่นกระจกใส 2	4.7119 กรัม	4.7228 กรัม	0.0109 กรัม
		เฉลี่ย	0.0101 กรัม

จากค่าที่ได้พบว่าปริมาณถ่านกัมมันต์ในแผ่นกระจกใสที่ 1 เท่ากับ 0.0092 กรัม หรือ 9.2 มิลลิกรัม ส่วนในแผ่นกระจกใสที่ 2 เท่ากับ 0.0109 กรัม หรือ 10.9 มิลลิกรัม ซึ่งเฉลี่ยแล้วมีถ่านกัมมันต์ เท่ากับ 0.0101 กรัม หรือ 10.1 มิลลิกรัมต่อสารแขวนลอย 1 มิลลิลิตร

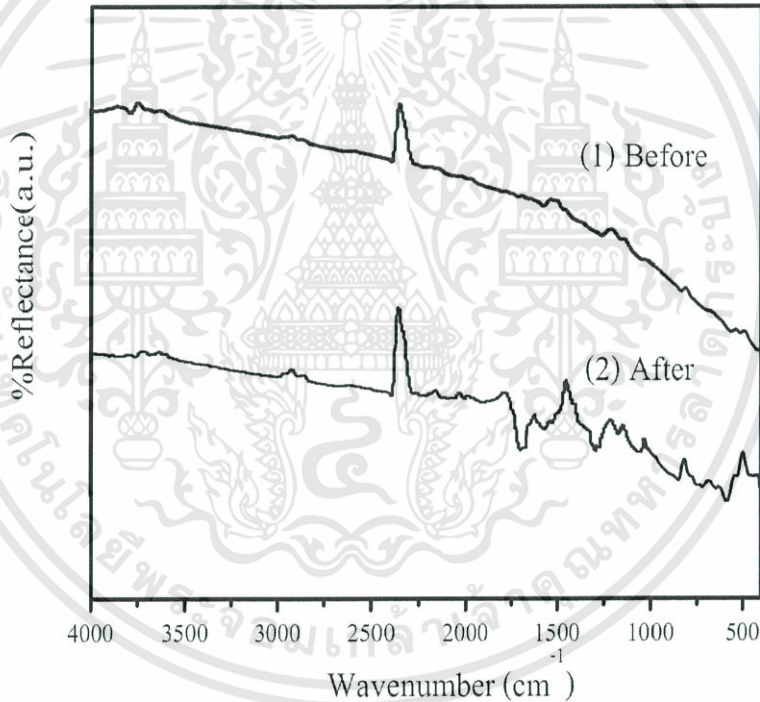
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์พื้นฐานของการสันของโมเลกุล (FT-IR)

การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชัน และวิเคราะห์โครงสร้าง หรือธาตุองค์ประกอบทางเคมีของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์ในปริมาณที่แตกต่างกันได้ผลดังนี้

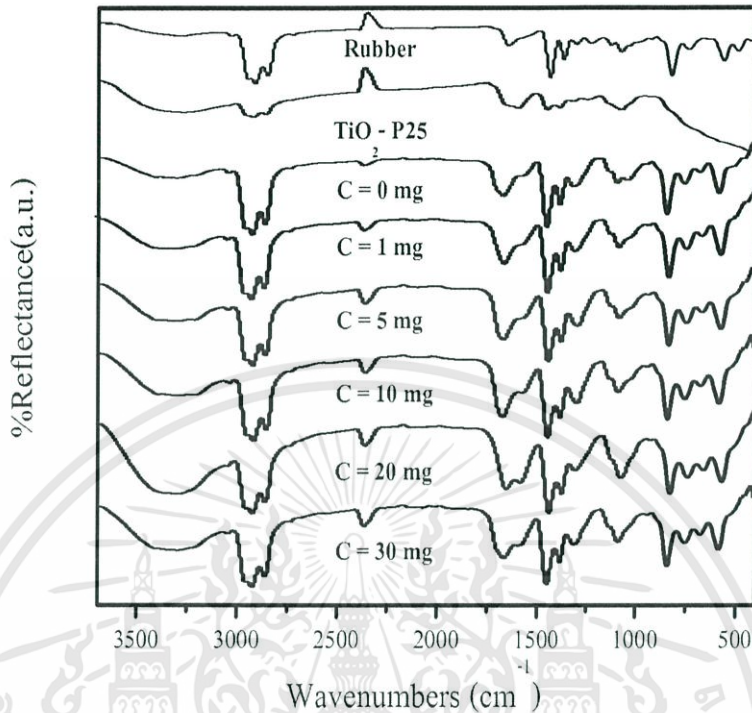
### 4.2.1 ผงถ่านกัมมันต์ทั้งก่อนและหลังปรับสภาพ

เมื่อนำผงถ่านกัมมันต์ทั้งก่อนปรับสภาพและหลังปรับสภาพด้วยกรด ไปตรวจสอบลักษณะการสันของสาร (FT-IR) พบว่า ตัวที่ทำการปรับสภาพแล้ว มีพีคบริเวณ  $1600-1700\text{ cm}^{-1}$  เกิดขึ้นมาอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเป็นช่วงการสันของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิล (C=O) นอกจากนี้ยังมีพีค บริเวณ  $1200-1300\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นช่วงการสันของคาร์บอนกับออกซิเจน (C-O) ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้เกิดจากการปรับสภาพด้วยกรดที่มีปริมาณออกซิเจนจำนวนมากอย่าง กรดซัลฟูริกและกรดไนตริก โดยแสดงให้เห็นดังภาพ



รูปที่ 4.1 กราฟ FT-IR: (1) ผงถ่านกัมมันต์ก่อนปรับสภาพ (2) ผงถ่านกัมมันต์หลังปรับสภาพ

#### 4.2.2 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และผงถ่านกัมมันต์

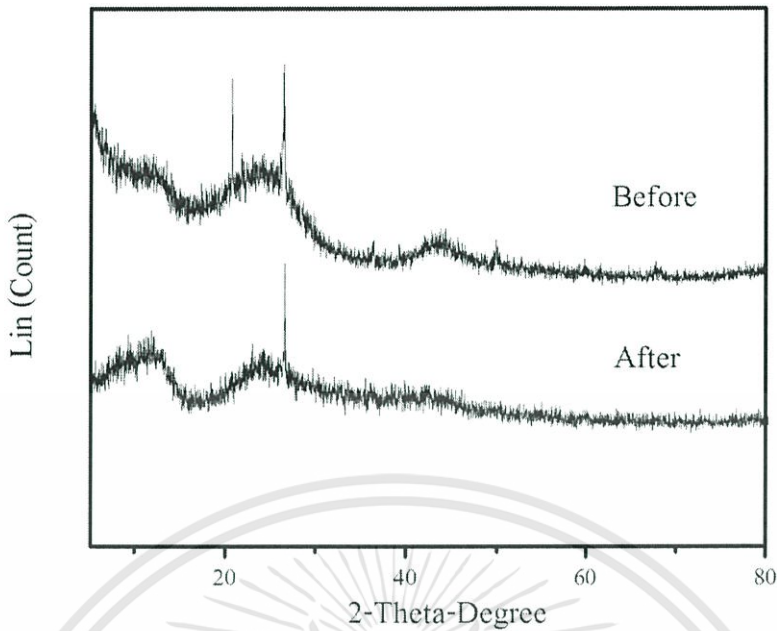


รูปที่ 4.2 กราฟ FT-IR: เปรียบเทียบลักษณะของยางธรรมชาติ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และแผ่นยางตัวอย่าง

จากกราฟพบว่าในทุกความเข้มข้นมีลักษณะกราฟมีทิศทางเดียวกัน โดยมีพีคที่สำคัญได้แก่ (1) บริเวณ  $3300-3400\text{ cm}^{-1}$  ที่เป็น O-H stretching (2) บริเวณ  $2900\text{ cm}^{-1}$  ที่เป็นลักษณะพีคเฉพาะของยางธรรมชาติ (3) บริเวณ  $1600-1700\text{ cm}^{-1}$  ที่เป็นหมู่ฟังก์ชัน ของคาร์บอนิล (C=O) และ (4) บริเวณ  $1200\text{ cm}^{-1}$  ที่เป็น C-O stretching

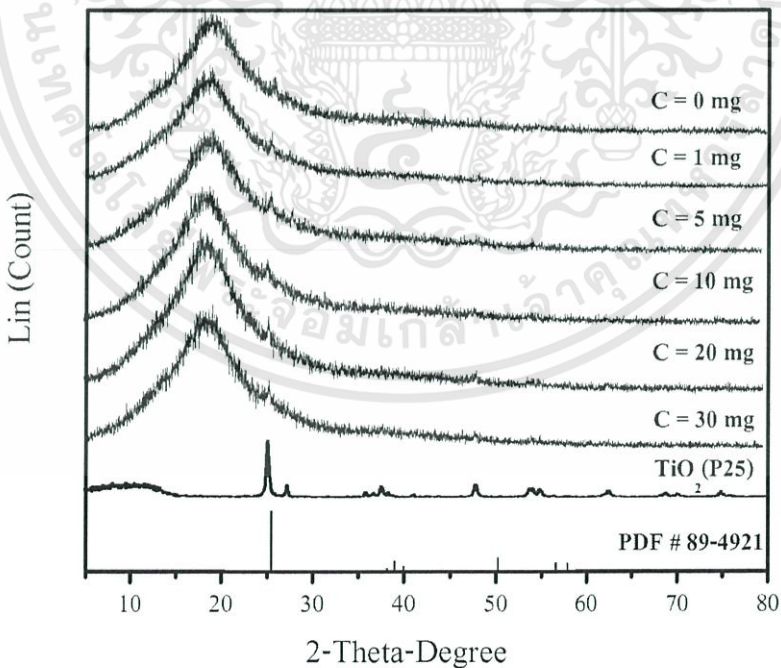
#### 4.3 การตรวจสอบลักษณะผลึกและออสัณฐานด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD)

เมื่อนำผงถ่านกัมมันต์ทั้งก่อนและหลังปรับสภาพไปตรวจวิเคราะห์พบว่า มีลักษณะข้อมูลใกล้เคียงกับข้อมูลมาตรฐานอย่างกราฟไฟต์ โดยเฉพาะตรงบริเวณที่การเลี้ยวเบนของ  $2\theta$  ที่ประมาณ  $27$  องศา ที่เป็นลักษณะพื้นฐานของคาร์บอนอสัณฐาน นอกจากนี้ยังพบการเลี้ยวเบนของ  $2\theta$  ที่  $12$  องศา ซึ่งเป็นลักษณะของการแทรกตัวระหว่างชั้นของกราฟไฟต์ ซึ่งมาจากการปรับสภาพ



รูปที่ 4.3 กราฟ XRD: เปรียบเทียบผงถ่านกัมมันต์ก่อนและหลังปรับสภาพ

เมื่อนำสารตัวอย่างทั้ง 6 ความเข้มข้นได้แก่ 0, 1, 5, 10, 20 และ 30 มิลลิกรัม มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD โดยใช้ Cu, K เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์ ตำแหน่งมุม  $2\theta$  จาก 20-90 ได้ผลดังรูป



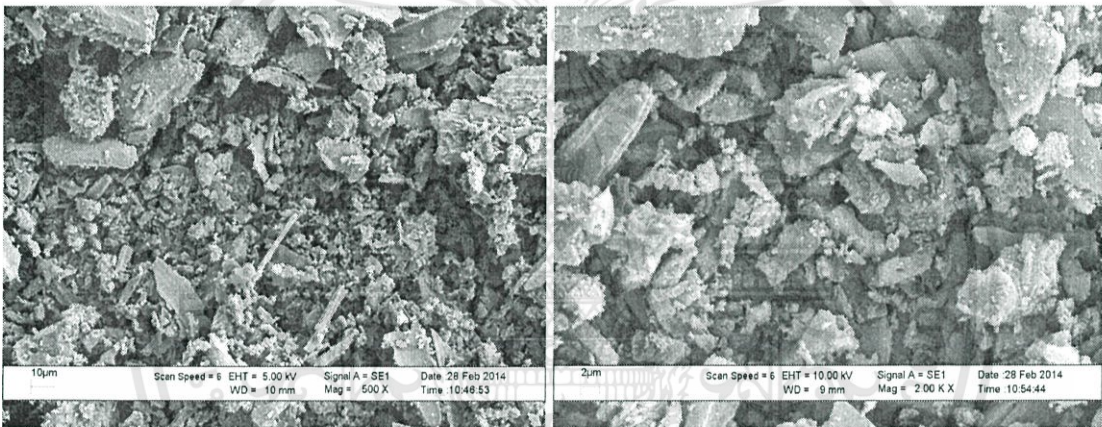
รูปที่ 4.4 กราฟ XRD: เปรียบเทียบตัวอย่างทั้ง 6 ความเข้มข้นกับมาตรฐาน PDF 894921

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปแบบ XRD ที่ได้พบว่ามุมที่มีการเลี้ยวเบนของ  $2\theta$  เท่ากับ 20 องศา เป็นมุมของยางธรรมชาติที่ใช้เป็นตัวขึ้นรูป ต่อมาพบว่ามีการเลี้ยวเบนของ  $2\theta$  ที่ 25 องศา ซึ่งเป็นมุมของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบอนาเทส และพบเล็กน้อยที่ 27.5 องศา ซึ่งเป็นมุมของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบรูไทล์ โดยข้อมูลที่ได้ตรงกับข้อมูลมาตรฐาน PDF # 89-4921

#### 4.4 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของสารในระดับจุลภาค

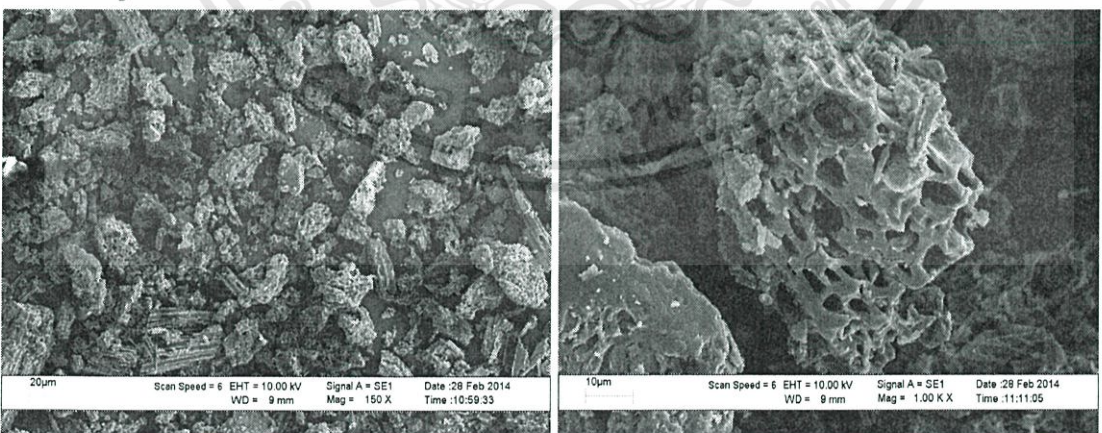
นำแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์ในปริมาณต่างๆ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยทำการตรวจสอบลักษณะของเกรนในแนวระนาบ โดยเริ่มจากถ่านกัมมันต์ทั้งก่อนปรับสภาพและหลังปรับสภาพ



(1)

(2)

รูปที่ 4.5 ถ่านกัมมันต์ก่อนปรับสภาพ (1) ภาพถ่ายกำลังขยาย 500 เท่า และ (2) 2000 เท่า



(3)

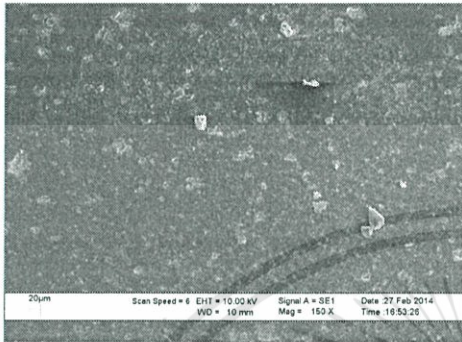
(4)

รูปที่ 4.6 ถ่านกัมมันต์หลังปรับสภาพ (1) ภาพถ่ายกำลังขยาย 150 เท่า และ (2) 1000 เท่า

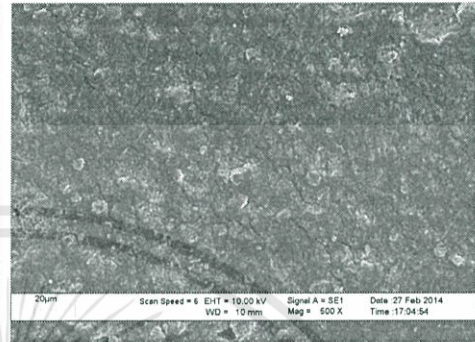
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าถ่านกัมมันต์ก่อนปรับสภาพมีลักษณะเป็นแผ่นๆ คล้ายกราฟไฟต์กระจาย กระจาย แต่เมื่อทำการปรับสภาพแล้ว ลักษณะของถ่านกัมมันต์เปลี่ยนไปโดยมีรูพรุนมากยิ่งขึ้น อย่างเป็นได้ชัด

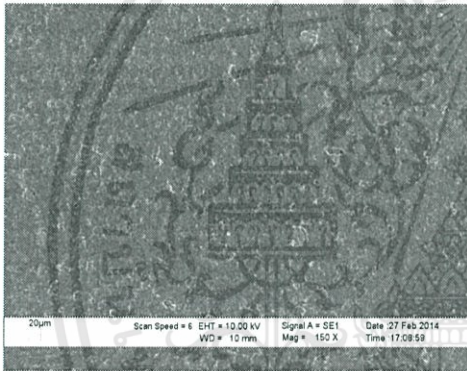
จากนั้นเมื่อนำสารตัวอย่างทั้ง 6 ความเข้มข้นมาทำการวิเคราะห์ก็ได้ผลดังนี้



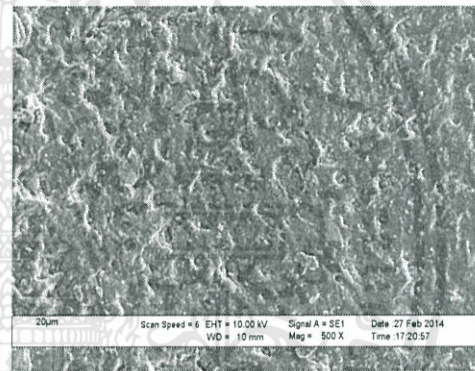
(1)



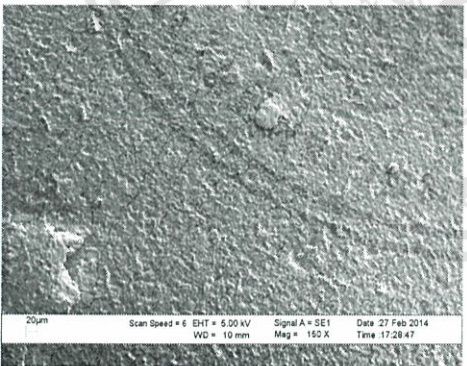
(2)



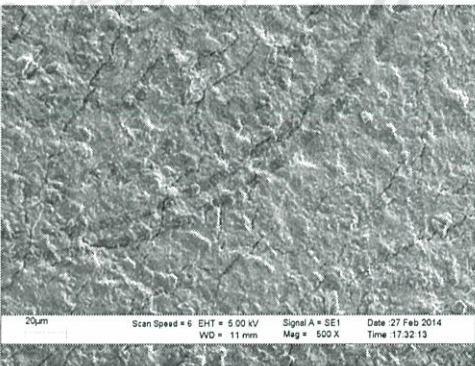
(3)



(4)

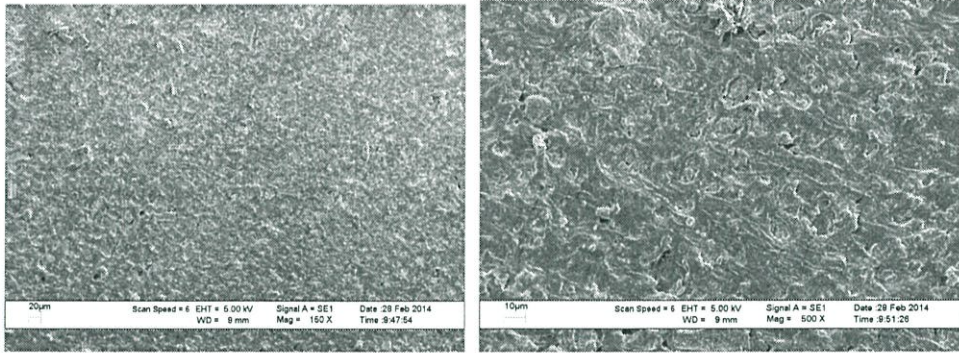


(5)



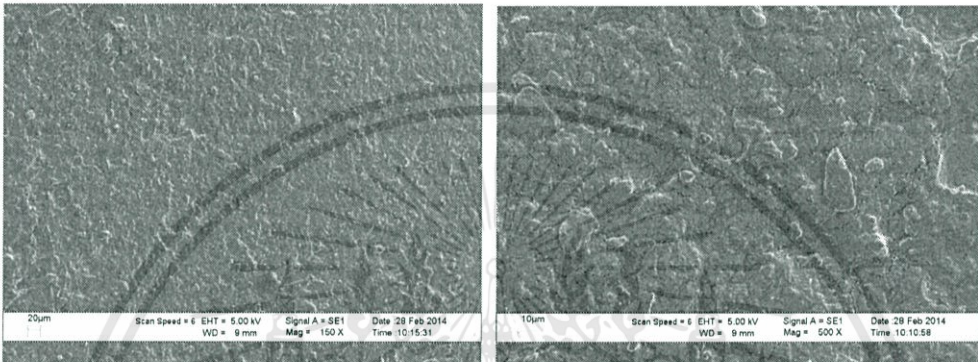
(6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



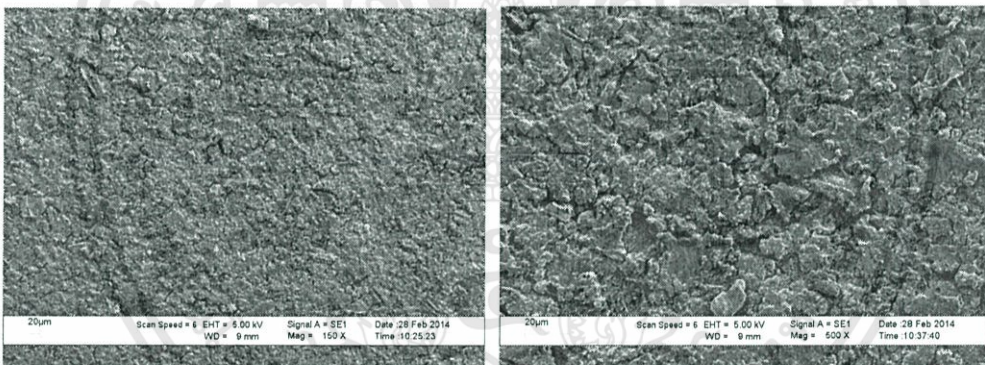
(7)

(8)



(9)

(10)



(11)

(12)

#### รูปที่ 4.7 รูปถ่าย SEM จากแผ่นยางตัวอย่างทั้ง 6 ความเข้มข้น

- (1) ถ่านกัมมันต์ 0 มิลลิกรัม กำลังขยาย 150 เท่า (2) ถ่านกัมมันต์ 0 มิลลิกรัม กำลังขยาย 500 เท่า  
 (3) ถ่านกัมมันต์ 1 มิลลิกรัม กำลังขยาย 150 เท่า (4) ถ่านกัมมันต์ 1 มิลลิกรัม กำลังขยาย 500 เท่า  
 (5) ถ่านกัมมันต์ 5 มิลลิกรัม กำลังขยาย 150 เท่า (6) ถ่านกัมมันต์ 5 มิลลิกรัม กำลังขยาย 500 เท่า  
 (7) ถ่านกัมมันต์ 10 มิลลิกรัม กำลังขยาย 150 เท่า (8) ถ่านกัมมันต์ 10 มิลลิกรัม กำลังขยาย 500 เท่า  
 (9) ถ่านกัมมันต์ 20 มิลลิกรัม กำลังขยาย 150 เท่า (10) ถ่านกัมมันต์ 20 มิลลิกรัม กำลังขยาย 500 เท่า  
 (11) ถ่านกัมมันต์ 30 มิลลิกรัม กำลังขยาย 150 เท่า (12) ถ่านกัมมันต์ 30 มิลลิกรัม กำลังขยาย 500 เท่า

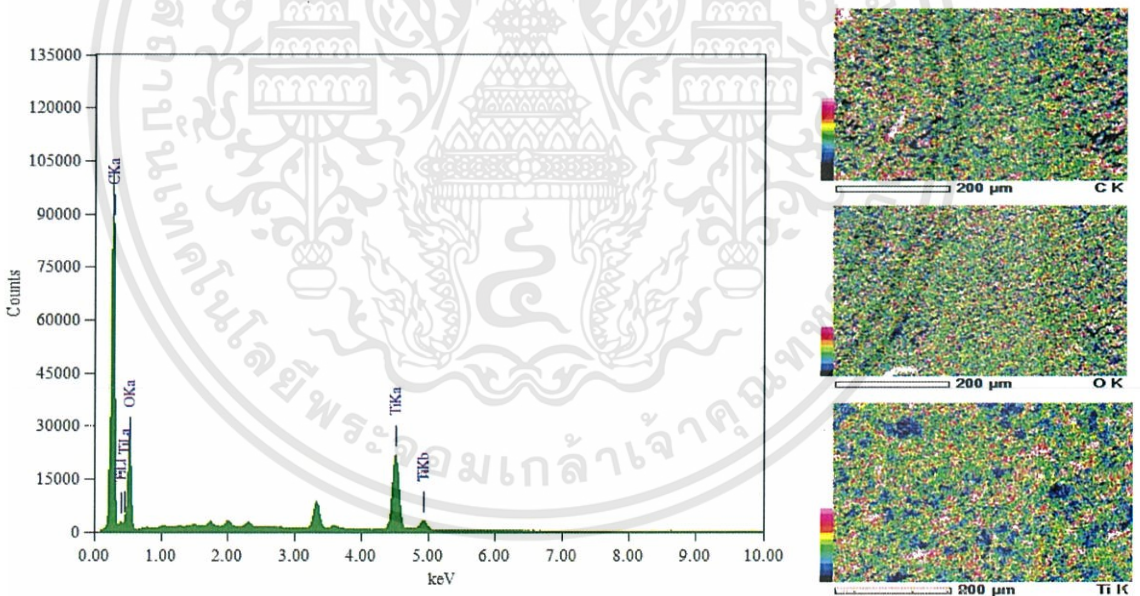
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการสังเกตจะพบว่าเห็นผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ชัดกว่าถ่านกัมมันต์ โดยผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์จะเป็นลักษณะจุดสีขาวๆ ที่มีอยู่ในทุกรูปถ่าย นอกจากนี้ลักษณะพื้นผิวของสารตัวอย่างทุกตัวมีความเป็นขรุขระ โดยเฉพาะตัวที่มีความเข้มข้นของถ่านกัมมันต์สูงๆ ก็จะมีขรุขระมากยิ่งขึ้น

#### 4.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบตรวจสอบหาธาตุองค์ประกอบภายในตัวอย่าง (Energy - Dispersive X-Ray Spectroscopy)

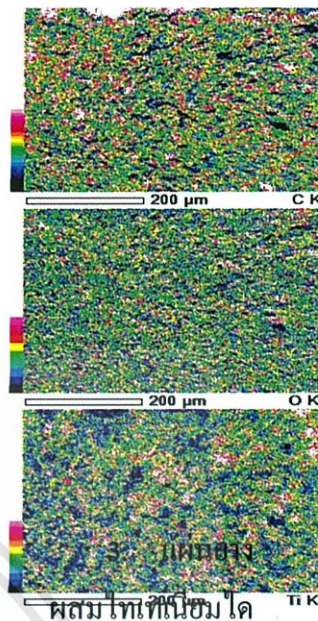
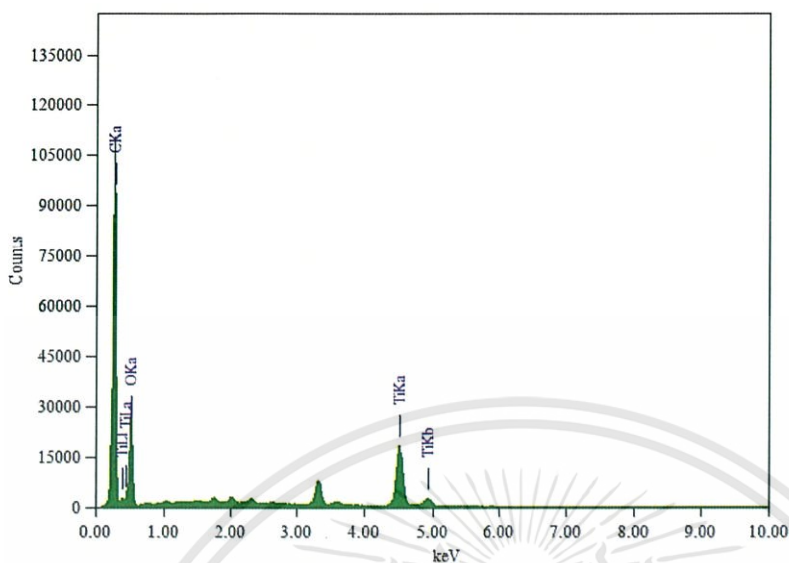
เทคนิคนี้เป็นการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ร่วมกับการใช้ EDS ซึ่งส่งผลให้สามารถวิเคราะห์ได้ในระดับที่มีความละเอียดมากยิ่งขึ้น โดยสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ โดยในที่นี้จะทำการวิเคราะห์ทั้งหมด 3 ตัวอย่างได้แก่ (1) แผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 1 มิลลิกรัม (2) แผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 10 มิลลิกรัม (3) แผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 30 มิลลิกรัม

##### 1. แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 1 มิลลิกรัม

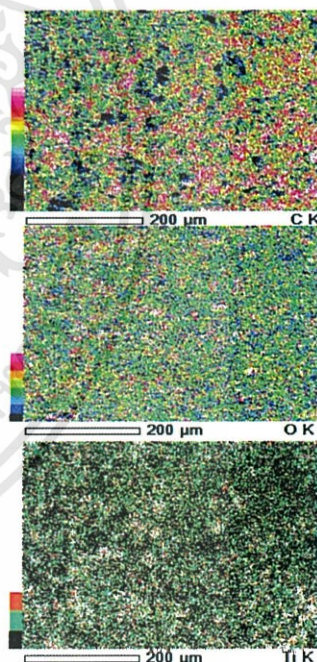
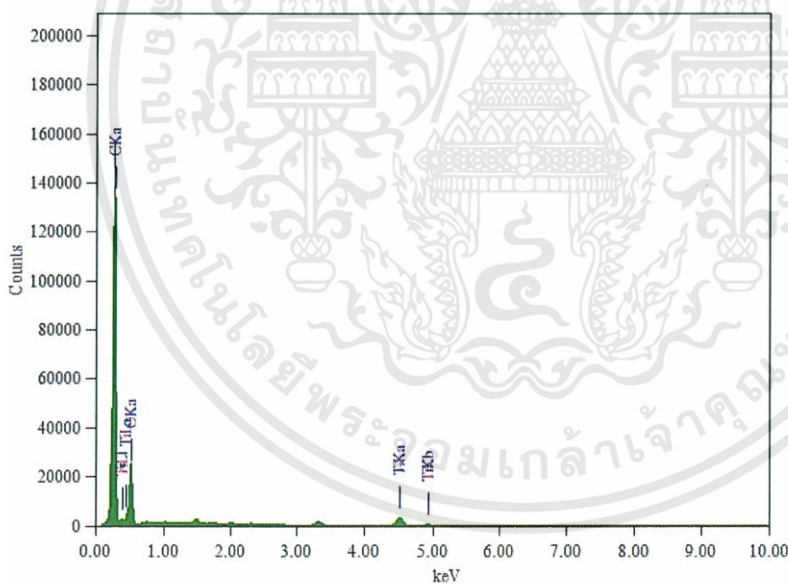


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 10 มิลลิกรัม



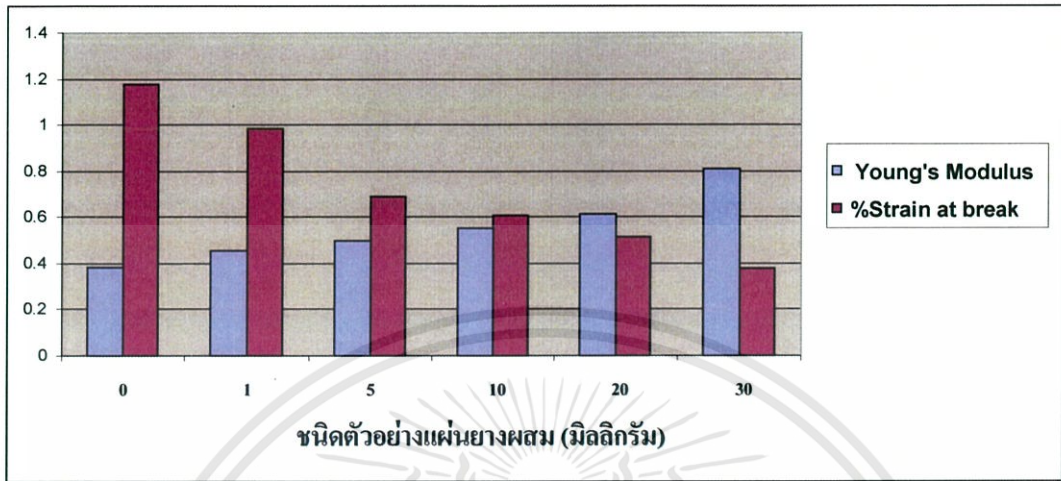
ออกไซด์ที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 30 มิลลิกรัม



จากกราฟทั้ง 3 ตัวอย่างมีพีคสำคัญขึ้นเหมือนกัน โดยเฉพาะที่ประมาณ 0.2 keV เป็นพีคที่มีความเข้มมากที่สุดของทั้ง 3 ตัวอย่าง ซึ่งเป็นพีคของคาร์บอน ที่มีมาจากน้ำยางธรรมชาติที่ใช้ขึ้นรูปและจากถ่านกัมมันต์ที่เติมลงไป โดยจะเห็นว่าตัวอย่างที่ 3 ที่มีการเติมผงถ่านกัมมันต์ปริมาณ 30 มิลลิกรัม มีความเข้มของพีคนี้มากที่สุด โดยตัวอย่างที่ 2 และตัวอย่างที่ 1 มีค่าน้อยลงตามปริมาณผงถ่านกัมมันต์ที่ลดลง

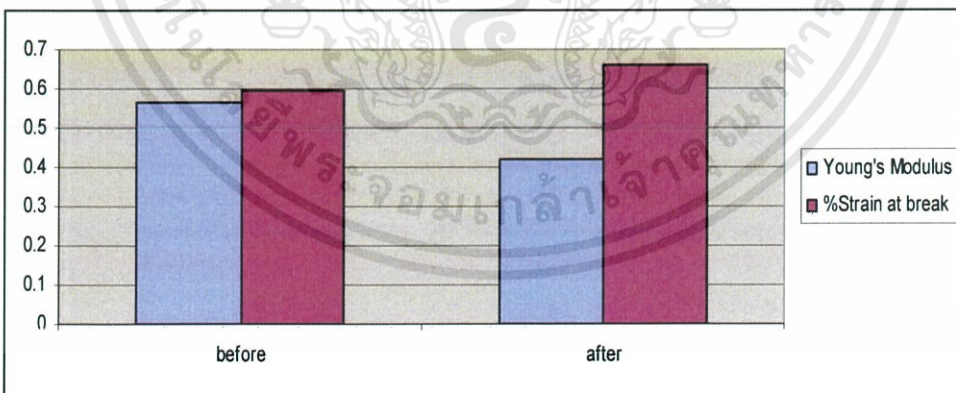
#### 4.6 การศึกษาสมบัติเชิงกล (Tensile Test)

ในงานวิจัยนี้ได้เตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาณที่แตกต่างกัน จึงได้นำมาทดสอบความแข็งแรงและความสามารถในการดึงยืด



รูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของแผ่นยางผสมทั้ง 6 ความเข้มข้น

โดยสารตัวอย่างเรียงตามปริมาณของถ่านกัมมันต์จาก 0, 1, 5, 10, 20 และ 30 มิลลิกรัม ซึ่งจะพบว่าค่า Young's Modulus มีแนวโน้มสูงขึ้น หรือก็คือมีความแข็งแรงมากขึ้นตามปริมาณผงถ่านกัมมันต์ที่มากขึ้น แต่ในทางกลับกันค่า Percentage Strain at Break กลับมามีแนวโน้มลดลง หรือก็คือความสามารถในการดึงยืดจะลดลง หากวัสดุนี้มีความแข็งแรงสูงๆ



รูปที่ 9 เปรียบเทียบแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์ 10 มิลลิกรัม

ทั้งก่อนนำมากำจัดสีข้อมเมทิลินบลู และหลังจากนำมาใช้ซ้ำทั้งหมด 5 ครั้ง

จะพบว่าหลังจากผ่านการใช้ซ้ำทั้งหมด 5 ครั้งแล้วสมบัติเชิงกลในด้านความแข็งแรงลดลงทั้งคู่ (ค่า Young's Modulus ลด) ในทางกลับกันความสามารถในการดึงยืดกลับเพิ่มขึ้น (Elongation at Break เพิ่มขึ้น) แต่เพิ่มขึ้นอย่างเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

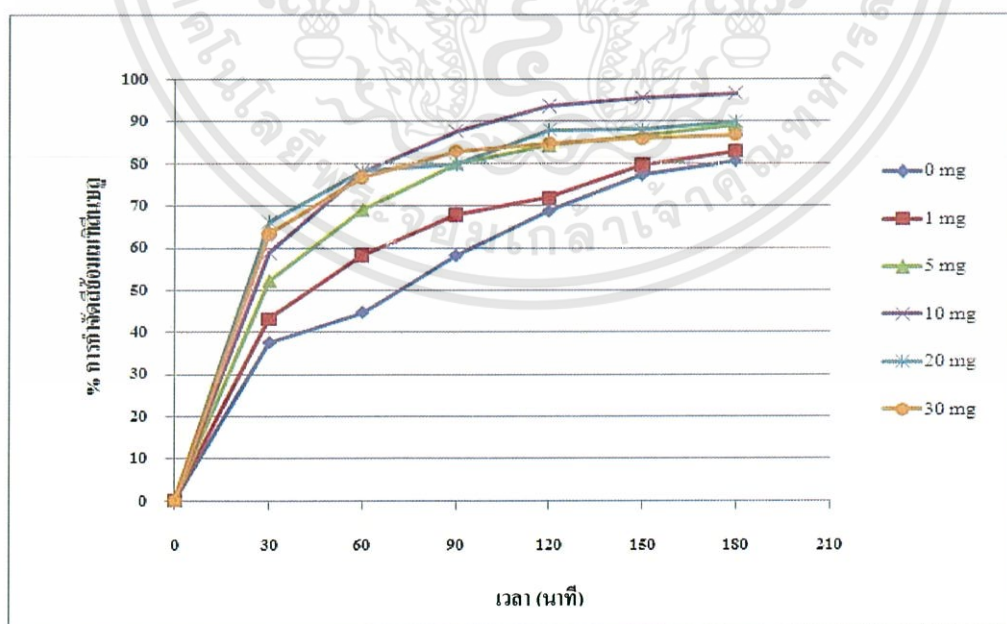
#### 4.7 การศึกษาความสามารถในด้านการกำจัดสีย้อม

เนื่องจากสีย้อมเมทิลีนบลูและสีย้อมอินดิโกคาร์มีนมีสูตร โครงสร้างและขั้วที่แตกต่างกัน ทำให้ความสามารถในการกำจัดจึงไม่เท่ากัน

##### 4.7.1 ความสามารถในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู

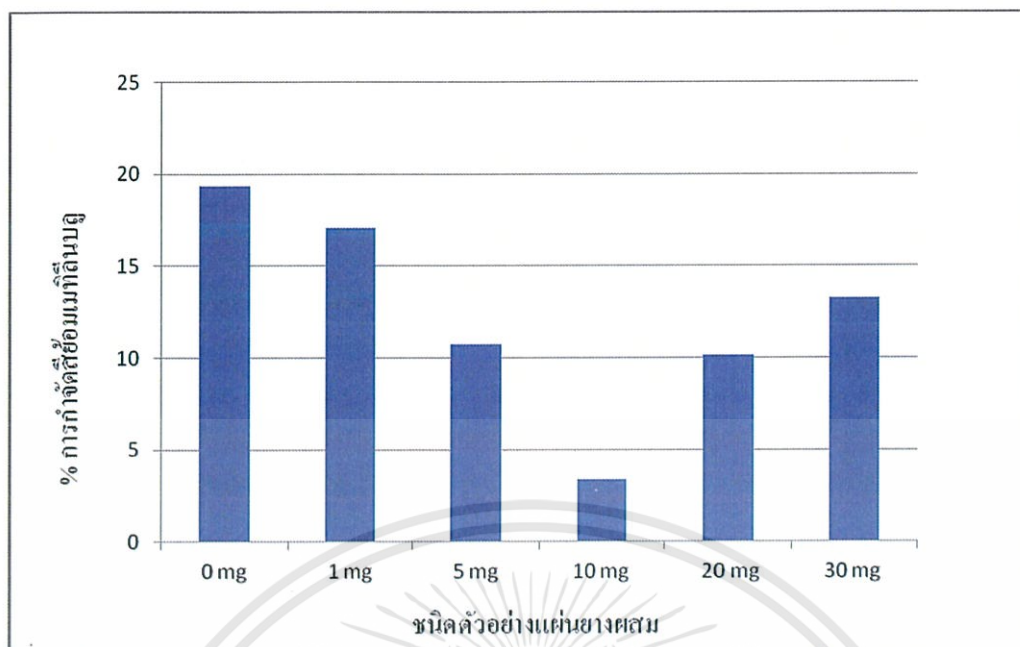
ตารางที่ 1 เปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยสารตัวอย่าง 6 ชนิด

เวลา (นาที)	% การกำจัดสีย้อม					
	0 mg	1 mg	5 mg	10 mg	20 mg	30 mg
0	0	0	0	0	0	0
30	37.52	43.22	52.17	58.93	66.26	63.41
60	44.66	58.29	69.03	78.15	78.23	76.77
90	58.16	67.81	80.09	87.7	79.9	82.91
120	68.69	71.86	84.27	93.62	88.02	84.68
150	77.27	79.66	86.65	95.69	88.16	85.86
180	80.63	82.93	89.26	96.63	89.88	86.74



รูปที่ 10 แสดงความสามารถในการกำจัดเมทิลีนบลูด้วยแผ่นยางผสมทั้ง 6 ความเข้มข้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 11 แสดงความสามารถในการกำจัดเมทิลินบลูด้วยแผ่นยางผสมทั้ง 6 ความเข้มข้น

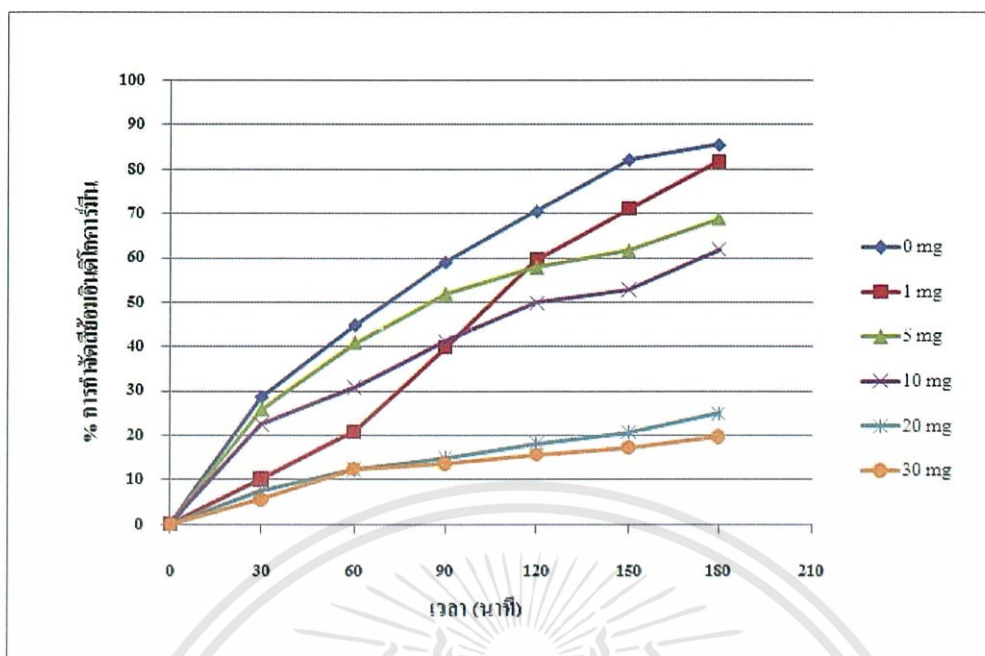
เมื่อทำการทดสอบสมบัติในการกำจัดสีของเมทิลินบลูในผู้ฉายแสงยูวี ด้วยสารตัวอย่างที่สนใจ 6 ความเข้มข้น (0, 1, 5, 10, 20 และ 30 มิลลิกรัม) โดยทดสอบความเข้มข้นละ 2 ตัวอย่าง เพื่อนำค่ามาเฉลี่ย พบว่าที่ความเข้มข้นของถ่านกัมมันต์เท่ากับ 1 มิลลิกรัม มีความสามารถในการกำจัดสีของเมทิลินบลูได้ดีที่สุด โดยสามารถกำจัดไปได้ถึง 96.63 % (เหลือความเข้มข้นของสีของเมทิลินบลู 3.37 %)

#### 4.7.2 ความสามารถในการกำจัดสีของอินดิโกคาร์มีน

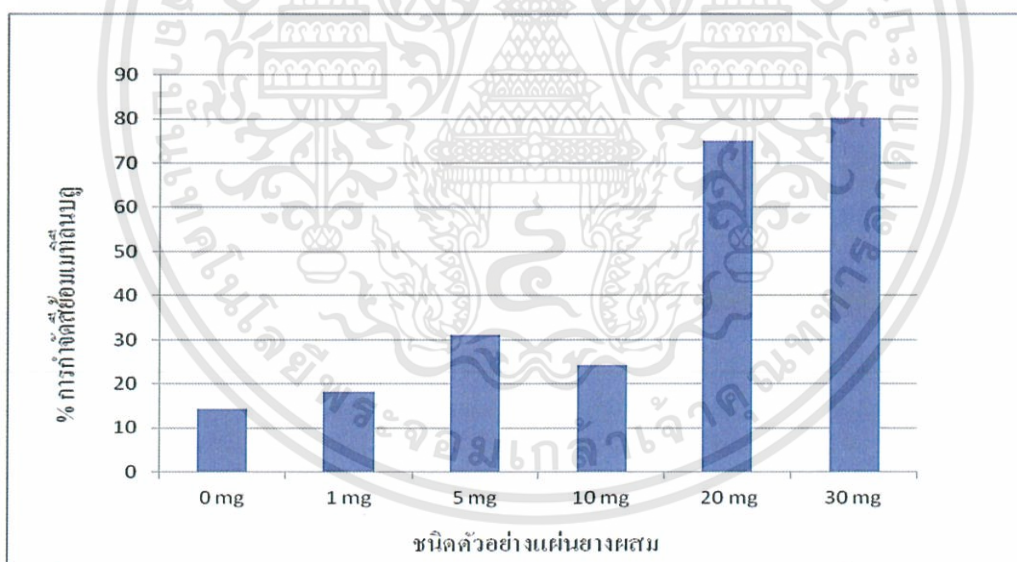
ตารางที่ 2 เปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดสีของอินดิโกคาร์มีนด้วยสารตัวอย่าง 6 ชนิด

เวลา (นาที)	% การกำจัดสีของ					
	0 mg	1 mg	5 mg	10 mg	20 mg	30 mg
0	0	0	0	0	0	0
30	28.64	10.15	25.85	22.58	7.6	5.54
60	44.87	20.85	40.82	30.86	12.36	12.46
90	59.07	39.86	51.85	41.26	14.88	13.64
120	70.55	59.6	57.87	49.83	18.23	15.65
150	82.23	71.13	61.66	52.8	20.78	17.25
180	85.62	81.74	68.88	61.89	24.98	19.73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 12 แสดงความสามารถในการกำจัดอินดิโกคาร์มินด้วยแผ่นยางผสมทั้ง 6 ความเข้มข้น



รูปที่ 13 แสดงความสามารถในการกำจัดอินดิโกคาร์มินด้วยแผ่นยางผสมทั้ง 6 ความเข้มข้น

เมื่อทำการทดสอบสมบัติในการกำจัดสีข้อมอินดิโกคาร์มินในผู้ฉายแสงยูวี ด้วยสารตัวอย่างที่สนใจ 6 ความเข้มข้น (0, 1, 5, 10, 20 และ 30 มิลลิกรัม) โดยทดสอบความเข้มข้นละ 2 ตัวอย่าง เพื่อนำค่ามาเฉลี่ย พบว่าที่ความเข้มข้นของถ่านกัมมันต์เท่ากับ 0.1 มิลลิตร มีความสามารถในการกำจัดสีข้อมอินดิโกคาร์มินได้ดีที่สุด โดยสามารถกำจัดไปได้ถึง 85.62 % (คงเหลือความเข้มข้นของสีข้อมอินดิโกคาร์มิน 14.38 %)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

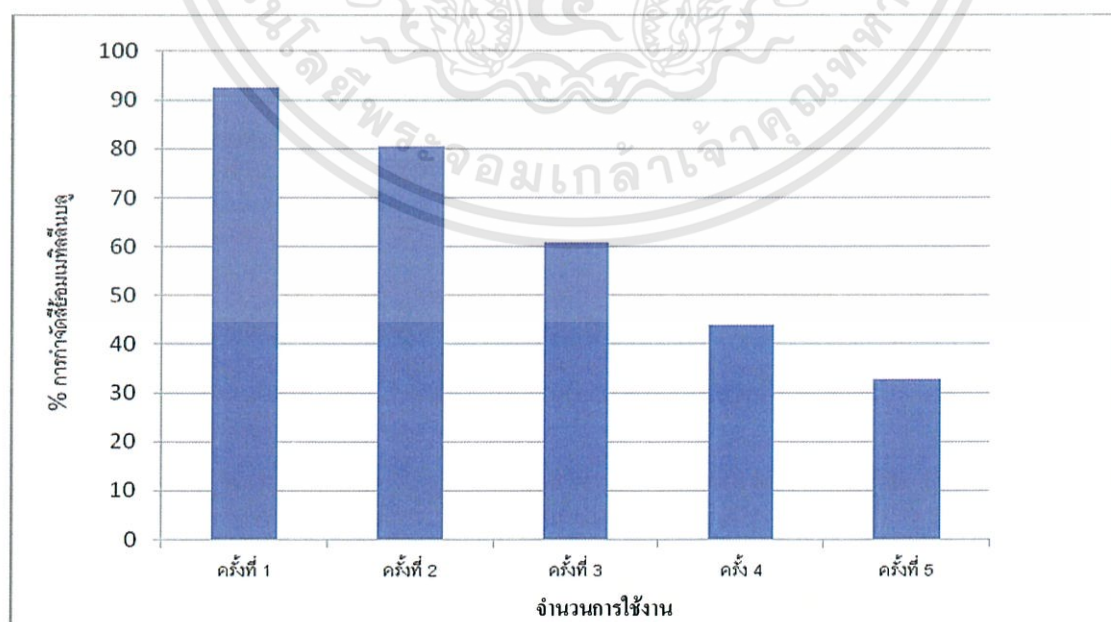
#### 4.8 การศึกษาความสามารถในด้านการใช้ซ้ำ

หลังจากศึกษาความสามารถในการกำจัดสีย้อมทั้ง 2 ชนิด จึงทำการศึกษาการใช้ซ้ำแคตสีย้อมเมทิลีนบลู เนื่องจากการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มีนไม่ได้ประสิทธิภาพตามที่ต้องการ

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู

เวลา (นาทีก)	% การกำจัดสีย้อม				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
0	100	100	100	100	100
30	28.85	57.4	66.34	71.79	78.27
60	23.46	40.82	58.14	69.21	76.78
90	15.42	37.13	50.75	62.2	75.27
120	12.21	29.84	46.65	60.85	73.11
150	10.52	23.2	43.18	59.15	70.7
180	7.47	19.45	39.15	56.03	67.13

จากการทดสอบความสามารถในการใช้ซ้ำพบว่า สีย้อมเมทิลีนบลู ในครั้งแรก สามารถกำจัดสีย้อมไปได้ถึง 92.53 % แต่เมื่อผ่านการใช้ซ้ำจนถึงครั้งที่ 5 พบว่า สามารถกำจัดสีย้อมไปได้เพียง 32.87 % ซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดมีแนวโน้มลดลงตามจำนวนครั้งที่ใช้ซ้ำ



รูปที่ 14 แสดงความสามารถในการใช้ซ้ำสำหรับการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการทดลองในการเตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์ในปริมาณต่างๆกัน เพื่อศึกษาผลในด้านการกำจัดสีข้อมว่าปริมาณเท่าใดจึงมีประสิทธิภาพในการกำจัดได้ดีที่สุด และนำข้อมูลที่ได้ไปศึกษาประสิทธิภาพในการใช้งานซ้ำว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร จากนั้นนำมาตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยเทคนิคต่างๆ นอกจากนี้ยังนำไปทดสอบความแข็งแรงเชิงกล ซึ่งได้ผลการทดลองโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 5.1 สรุปผลการปรับสภาพถ่านกัมมันต์และการเตรียมแผ่นยางผสม

จากการปรับสภาพถ่านกัมมันต์เพื่อให้มีหมู่คาร์บอนิลเพิ่มมากขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในด้านการกำจัดสีข้อม ในครั้งแรกของการปรับสภาพได้ทำการเจือจางหลังปรับสภาพด้วยกรดด้วยน้ำกลั่นเพียง 1 ลิตร แล้วจึงนำมากรองลดความดัน แต่ต้องใช้เวลาในการกรองและการปรับค่า pH ที่นานมาก ในครั้งต่อไปจึงทำการเจือจางด้วยน้ำกลั่น 2 ลิตร จากนั้นก็ทิ้งให้เกิดการแยกชั้นเป็นเวลา 1 วัน เมื่อนำมากรองและทำการปรับค่า pH ก็ใช้เวลาน้อยกว่าครั้งแรกอย่างมาก

ความเข้มข้นของสารแขวนลอยพบว่าเท่ากับ 10.1 มิลลิกรัมต่อ 1 มิลลิลิตร จากค่าความเข้มข้นที่ควรจะเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อ 1 มิลลิลิตร ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากการกระจายตัวในขั้นตอนการปั่นกวนและหมุนเหวี่ยง

เมื่อทราบปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมว่าต้องใช้ 0.03 มิลลิกรัม จึงทำการเตรียมแผ่นยางผสม โดยขั้นตอนการเทลงแบบหากเทเร็วเกินไปก็จะทำให้ได้แผ่นที่ไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังทำให้เกิดฟองอากาศขึ้นบนแผ่น ซึ่งส่งผลให้แผ่นเป็นรูหรือฉีกขาดได้ จากนั้นการทิ้งให้จับตัวเป็นแผ่นหากเร็วเกินไปก็จะมีบางส่วนติดอยู่กับแบบทำให้แผ่นยางผสมเสียหาย แต่หากทิ้งไว้นานเกินไปก็จะเหนียวติดกับแบบทำให้ดึงออกได้ลำบากเช่นกัน โดยเวลาที่เหมาะสมในการจับตัวคือ 1-2 วัน ซึ่งต้องหาตะกร้าหรือฝาครอบมาคลุมไว้เพื่อป้องกันไม่ให้ฝุ่นตกลงไปเจือปนในแผ่นยาง

## 5.2 สรุปผลการตรวจสอบเอกลักษณ์เฉพาะด้วยเทคนิคต่างๆ

### 5.2.1 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์พื้นฐานของการสั่นของสาร (FT-IR)

หลังจากนำผงถ่านกัมมันต์ทั้งก่อนและหลังปรับสภาพไปตรวจสอบ ก็พบว่าในช่วงการสั่นที่สังเกตได้ชัดในช่วงประมาณ  $1700\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งก็คือหมู่ฟังก์ชันของคาร์บอนิลที่มีมากขึ้น หลังจากทำการปรับสภาพด้วยกรด ซึ่งช่วงการสั่นนี้ก็พบในทุกตัวอย่างที่ทำการศึกษา แม้กระทั่งแผ่นยางผสมที่ไม่ได้เติมถ่านกัมมันต์ก็มีหมู่คาร์บอนิลจากน้ำยาธรรมชาติที่ใช้ แต่ช่วงการสั่นของไทเทเนียมไดออกไซด์กลับไม่ปรากฏในทั้ง 6 ตัวอย่าง ในลักษณะฟีกกว้างๆ ในรูปตัวยูบริเวณค่าการสั่น  $500\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งอาจเป็นเพราะใส่ไปในปริมาณที่น้อยเกินไปเมื่อเทียบกับสารชนิดอื่นๆ (0.03 มิลลิกรัม)

### 5.2.2 ผลการตรวจสอบลักษณะผลึกและออสัณฐาน (XRD)

กราฟ XRD ที่ได้จากการตรวจวิเคราะห์แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลมาตรฐาน PDF # 82-4921 ซึ่งมีฟีกของ  $2\theta$  ในช่วง 25 องศา ซึ่งตรงกับค่าไทเทเนียมไดออกไซด์ในโครงสร้างอนาเทส และในช่วง 27 องศา ซึ่งตรงกับค่าไทเทเนียมไดออกไซด์ในโครงสร้างรูไทล์

### 5.2.3 ผลการตรวจสอบลักษณะสัณฐานของสารในระดับจุลภาค

จากการวิเคราะห์ทางด้านสัณฐานวิทยาของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์มีลักษณะเป็นก้อนๆ กระจุกกระจายอยู่ทั่วแผ่น แต่ที่สังเกตไม่เห็นคือตัวถ่านกัมมันต์ซึ่งมีลักษณะอนุภาคเป็นทั้งแบบแผ่นกระจาย และแบบก้อนรูพรุน อาจเป็นเพราะตกตะกอนอยู่ด้านต่างจึงไม่สามารถสังเกตเห็นได้ โดยลักษณะแผ่นส่วนใหญ่จะมีลักษณะขรุขระโดยเฉพาะตัวที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์จำนวนมากอย่างแผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 3 มิลลิกรัมก็มีความขรุขระมากที่สุด

### 5.2.4 ผลการตรวจสอบหาธาตุองค์ประกอบภายในตัวอย่าง

โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ร่วมกับเทคนิค EDS ที่ทำให้สามารถตรวจดูได้ในระดับไมครอน เพื่อศึกษาหาธาตุองค์ประกอบและปริมาณของธาตุนั้นๆ โดยวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีผงถ่านกัมมันต์เท่ากับ 1, 10 และ 30 มิลลิกรัม เมื่อวัดแล้วกราฟที่ได้ปรากฏปริมาณเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ แต่แผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 30 มิลลิกรัม กลับแสดงปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์น้อยกว่าอีก 2 ตัวอย่าง นั่นเป็นเพราะปริมาณถ่านกัมมันต์ที่มากเกินไปจนปกคลุมไทเทเนียมไดออกไซด์ หรือปัญหาในด้านการกระจายตัวในขณะที่การขึ้นแผ่นยาง

### 5.3 สรุปผลในด้านคุณสมบัติเชิงกล

เมื่อนำมาทดสอบความแข็งแรงดึงยืด (Tensile Test) ผลที่ได้คือ แผ่นยางที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์มากก็จะยิ่งมีความแข็งแรงมากขึ้น ตามคุณสมบัติของคาร์บอนที่ช่วยในการเสริมแรง ซึ่งคุณสมบัตินี้จะไปทิศทางตรงกันข้ามกับความสามารถในการดึงยืด จากนั้นเมื่อนำแผ่นยางที่ผ่านการใช้ซ้ำมาวัด ก็พบว่ามีความแข็งแรงลดลงอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่ความสามารถในการดึงยืดก็เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งเป็นเพราะความเสื่อมสภาพหลังจากการดูดซับสีข้อมไปแล้วถึง 5 ครั้ง

### 5.4 สรุปผลในการกำจัดสีข้อม

เมื่อทำการทดสอบการกำจัดสีข้อมในตู้ฉายแสงยูวี ผลที่ได้คือ สีข้อมเมทิลีนบลู แผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 10 มิลลิกรัม มีความสามารถในการกำจัดสีข้อมได้มากที่สุด โดยเฉลี่ยแล้วสามารถกำจัดสีข้อมไปได้ถึง 96.63 % ในขณะที่สีข้อมอินดิโกคาร์มิน แผ่นยางที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 0.1 มิลลิกรัม มีประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยที่ดีที่สุดนั่นคือ 85.62 % โดยหากคิดเป็น% คงเหลือ ความเข้มข้นสุดท้ายของสีข้อมเมทิลีนบลูมีค่าน้อยกว่าสีข้อมอินดิโกคาร์มิน เพราะถ่านกัมมันต์หลังปรับสภาพแล้วมีขั้วเป็นลบจากหมู่คาร์บอนิลที่เพิ่มขึ้นมา เมื่อเจอสีข้อมเมทิลีนบลูที่มีสภาพขั้วเป็นบวก จึงมีประสิทธิภาพในการโฟโตคะตะไลติกและดูดซับได้ดีกว่า กลับกันกับสีข้อมอินดิโกคาร์มินที่มีสภาพขั้วเป็นลบประสิทธิภาพในการกำจัดจึงลดลง

### 5.5 สรุปผลในการใช้งานซ้ำ

เนื่องจากการโฟโตคะตะไลติกส่วนใหญ่นิยมใช้ไทเทเนียมแบบผงซึ่งมีประสิทธิภาพสูงกว่า แต่อาจมีอันตรายต่อร่างกายและสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้จึงได้ทำการขึ้นแผ่นเพื่อให้สามารถนำมาใช้งานซ้ำได้ โดยใช้แผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 10 มิลลิกรัมสำหรับการกำจัดสีข้อมเมทิลีนบลู ผลที่ได้คือ ประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมลดลงอย่างเห็นได้ชัด

โดยการกำจัดสีข้อมเมทิลีนบลูครั้งแรกสามารถกำจัดไปได้ถึง 92.53 % แต่ครั้งที่ 5 สามารถกำจัดไปได้แค่ 32.87 % เท่านั้น จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดมีแนวโน้มลดลงตามจำนวนครั้งที่ใช้ซ้ำ อันเป็นผลมาจากการเสื่อมสภาพของแผ่นยางผสม ซึ่งผลสอดคล้องกับความแข็งแรงเชิงกล จากการนำไปทดสอบพบว่าความแข็งแรงลดลงเมื่อทำการใช้ซ้ำ

## 5.6 ข้อเสนอแนะ

1. ผลการทดลองที่ได้ใช้ในปริมาณที่จำกัดและมีขนาดเล็ก จึงอาจจะยังไม่สามารถนำไปใช้กับการกำจัดสีข้อมในระดับใหญ่
2. ขั้นตอนในการกรองถ่านกัมมันต์หลังปรับสภาพ ควรใช้น้ำกลั่นในปริมาณมากๆ และควรทิ้งเวลาเพื่อให้เกิดการแยกชั้น เพื่อจะได้ทำการกรองและปรับสภาพให้เป็นกลางรวดเร็วยิ่งขึ้น
3. การขึ้นแผ่นยางผสมควรมีฝาครอบป้องกันฝุ่นหรือสารอื่นๆตกลงไปผสม นอกจากนี้หากวางไว้ใกล้แสงแดดก็จะจับตัวได้ดีกว่า โดยควรใช้เวลาที่เหมาะสม (1-2 วัน)
4. การทดสอบการกำจัดสีข้อมในตู้ยิว ควรทำประมาณ 2 ตัวอย่างขึ้นไปต่อ 1 ความเข้มข้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ทำความเข้มข้นละ 2 ตัวอย่าง ซึ่งสามารถนำค่ามาเฉลี่ยได้หากไม่เกิดการหกหรือรั่วของเพลท แต่หากมีเพลทไหนที่รั่วหรือระหว่างการบินกวนสารละลายสีข้อมหกออกมา ค่าที่วัดได้ก็จะผิดเพี้ยนไปได้
5. ศึกษาหาตัวผสมชนิดอื่นๆที่อาจมีประสิทธิภาพมากกว่า และต้องศึกษาในด้านเศรษฐศาสตร์เพื่อไม่ให้สิ้นเปลือง
6. ศึกษาสีข้อมชนิดอื่นๆ เพราะสีข้อมเมทิลีนบลูสามารถกำจัดได้ไม่ยาก หากใช้สีข้อมชนิดอื่น เพื่อนำผลมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยนี้
7. สีข้อมเมทิลีนบลูและสีข้อมอินดิโกคาร์มีนควรปิดฟอยล์ไว้รอบภาชนะที่บรรจุ เพื่อป้องกันไม่ให้โดนแสงยูวีในแสงแดด ที่จะทำให้ความเข้มข้นลดลง
8. ในขั้นตอนการปรับสภาพมีการใช้กรดที่เข้มข้นอย่างกรดซัลฟูริกและกรดไนตริก ควรใส่ถุงมือและทำในตู้ดูดอากาศเพื่อป้องกันไอระเหยของกรด

## เอกสารอ้างอิง

- [1] เสาวลักษณ์ บุญยอด “ปฏิกริยาโฟโตคะตะไลติกและพฤติกรรมการฆ่าเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์” สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 2554.
- [2] กัญยาพร ไชยวงศ์ และคณะ “การใช้กระบวนการ แสงอาทิตย์-โฟโตคะตะไลติก สำหรับปฏิกรณ์แบบชั้นบันไดในการบำบัดสารเมทิลีนบลูในน้ำเสีย” สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 2553.
- [3] นางสาวอานันท์ปภา ชื่นทรัพย์ “การบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ในปฏิกริยาโฟโตคะตะไลติก โดยใช้ทั้งสแตนไดรออกไซด์” สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 2555.
- [4] ดร.นัศดา เวชชากุล “การจัดสารอินทรีย์ในน้ำด้วยตัวเร่งปฏิกริยานาโนไทเทเนียมไดออกไซด์” ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 2555.
- [5] ชลดา ธีรการณวงศ์ “ไทเทเนียมไดออกไซด์: วัสดุฆ่าเชื้อแบคทีเรีย” สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ 2555.
- [6] ศุภรัตน์ นาคสิทธิพันธุ์ และ สุลาวัลย์ ขาวผ่อง “การสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีพลาสมา” สำนักวิจัยและส่งเสริมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ 2554.
- [7] ดร.วิรัช ทวีปรีดา และคณะ “แผ่นเยื่อบางคอมโพสิตไทเทเนียมไดออกไซด์ในยางธรรมชาติ” ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 2554.
- [8] สรรค์ จิตรไคร่ครวญ “การทำความสะอาดโดยตัวเร่งปฏิกริยาทางแสงด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์” วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ 2552.
- [9] อาจารย์ประจำสาขาวิชาเคมี “ความรู้เบื้องต้นของปฏิกริยาโฟโตคะตะไลติก โดยอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์” คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 2554.
- [10] นลดา บรรเทา และ ชูสิทธิ์ ศรีสุทธิกมล “กระบวนการโฟโตคะตะไลติก” สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรม มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ 2549.
- [11] ผศ.ดร.สุภาสินี ลีมปานุภาพ “ความรู้เบื้องต้นของพอลิเมอร์” ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 2550.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] ดร.อดิษฐ์ รุ่งวิชานิววัฒน์ “ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับน้ำยางและองค์ประกอบต่างๆในน้ำยาง” ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 2554.
- [13] พรสวรรค์ อัสวเสงรัตน์ และ วีระวัฒน์ คลอวุฒิมันตร์ “การดูดซับสีย้อมด้วยตัวดูดซับจากธรรมชาติ” สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2553.
- [14] กาญจนา ลือพงษ์ และ นงนุช ศศิธร “การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมด้วยเทคนิค โฟโตคะตะไลติกร่วมกับกระบวนการดูดซับ” คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอและออกแบบแฟชั่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร 2553.
- [15] นางสาวเกศแก้ว ปานสมุทร “การบำบัดสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วยกระบวนการทางเคมีและฟิสิกส์” สาขาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2555.
- [16] ยุทธศรี หล้ามณี “คุณสมบัติของแอมโมเนียและการรื้อซึม” บริษัทมายคอม (ประเทศไทย) จำกัด 2553.
- [17] Muhammad J. Iqbal, Muhammad N. Ashiq “Adsorption of dyes from aqueous solutions on activated charcoal” Journal of Hazardous Materials. Vol.139 pages 57-66 2006.
- [18] Mohammad Asadullah, Israt Jahan, Mohammad Boshir Ahmed “Preparation of microporous activated carbon and its modification for arsenic removal from water” Journal of Industrial and Engineering Chemistry. Vol.20 pages 887-896 2014.
- [19] Andrew K. Kercher, Dennis C. Nagle “Microstructural evolution during charcoal carbonization by X-ray diffraction analysis” Carbon. Vol.41 pages 15-27 2003
- [20] Zuy M. Magriotis, Paulo V.B. Leal, Priscila F. de Sales, Rísia M. Papini “A comparative study for the removal of mining wastewater by kaolinite, activated carbon and beta zeolite” Applied Clay science. Vol.91 pages 55-62 2014.
- [21] Boonchai Seentrakoon, Banja Junhasavasdikul, Warinthorn Chavasiri “Enhanced UV-protection and antibacterial properties of natural rubber / rutile-TiO<sub>2</sub> nanocomposites” Polymer Degradation and Stability. Vol.98 pages 566-578 2013.
- [22] Yue Xia, Fangfei Li, Yinshan Jiang\*, Maosheng Xia, Bing Xue, Yanjuan Li “Interface actions between TiO<sub>2</sub> and porous diatomite on the structure and photocatalytic activity of TiO<sub>2</sub>-Diatomite” Materials Science and Engineering. Jilin University 2010.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [23] T.T. Guaraldo, S.H. Pulcinelli, M.V.B. Zanoni **“Influence of particle size on the photoactivity of Ti/TiO<sub>2</sub> thin film electrodes, and enhanced photoelectrocatalytic degradation of indigo carmine dye”** Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry Vol.217 pages 259-266 2011.
- [24] Seema Singh, Hari Mahalingam, Pramod Kumar Singh **“Polymer-supported titanium dioxide photocatalysts for environmental remediation”** Applied Catalysis A: General. Vol.462 pages 178-195. 2013.
- [25] Chaval Sriwong, Sumpun Wongnawa, Orasa Patarapaiboolchai **“Rubber sheet strewn with TiO<sub>2</sub> particles: Photocatalytic activity and Recyclability”** Journal of Environmental Sciences Vol.24 (3) pages 464-472 2013.
- [26] Chaval Sriwong, Sumpun Wongnawa, Orasa Patarapaiboolchai **“Recyclable thin TiO<sub>2</sub>-embedded rubber sheet and dye degradation”** Chemical Engineering Journal Vol.191 pages 210-217 2012.
- [27] Chaval Sriwong, Sumpun Wongnawa, Orasa Patarapaiboolchai **“Photocatalytic activity of rubber sheet impregnated with TiO<sub>2</sub> particles and its recyclability”** Catalysis Communications Vol.9 pages 213-218 2008.
- [28] กรมควบคุมมลพิษ “ระบบดูดซับ” [online] Available: [http://www.pcd.go.th/info\\_serv/Datasmell/14adsorption.htm](http://www.pcd.go.th/info_serv/Datasmell/14adsorption.htm). 2549.
- [29] วิกีพีเดีย สารานุกรมเสรี “ถ่านกัมมันต์” [online] Available: <http://th.wikipedia.org/wiki/ถ่านกัมมันต์>. 2556.
- [30] บริษัทจำกัด ไอเชิร์ฟโซลูชัน “รู้จักไทเทเนียมไดออกไซด์” [online] Available: <http://www.nanoyothai.com/1293729/รู้จักไทเทเนียมไดออกไซด์>. 2010.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

### การเตรียมสารสำหรับการทดลอง

#### 1. การคำนวณความเข้มข้นของสารแขวนลอยถ่านกัมมันต์

ความเข้มข้นของสารละลายในทางทฤษฎี

$$\begin{aligned} \text{คำนวณจาก} \quad \text{ร้อยละความเข้มข้นของสารแขวนลอย} &= \frac{\text{ปริมาณถ่านกัมมันต์}}{\text{ปริมาณน้ำกลั่น}} \\ &= \frac{600 \text{ มิลลิกรัม}}{30 \text{ มิลลิลิตร}} \\ &= 20 \text{ มิลลิกรัม / มิลลิลิตร} \end{aligned}$$

ปริมาณถ่านกัมมันต์ต่อสารแขวนลอย 1 มิลลิลิตร เท่ากับ 20 มิลลิกรัม / มิลลิลิตร

ความเข้มข้นของสารแขวนลอยในงานวิจัย

$$\text{คำนวณจาก} \quad \text{การหาผลต่างของน้ำหนัก} = \text{น้ำหนักกระจกใสก่อนอบ} - \text{น้ำหนักกระจกใสหลังอบ}$$

ตาราง ก-1 แสดงผลต่างของน้ำหนักจากกระจกใสที่ 1 และ 2

ตัวอย่าง	น้ำหนักก่อนหยด	น้ำหนักหลังหยด	ผลต่าง
แผ่นกระจกใส 1	6.3110 กรัม	6.3202 กรัม	0.0092 กรัม
แผ่นกระจกใส 2	4.7119 กรัม	4.7228 กรัม	0.0109 กรัม
		เฉลี่ย	0.0101 กรัม

ปริมาณถ่านกัมมันต์ต่อสารแขวนลอย 1 มิลลิลิตร เท่ากับ 10.1 มิลลิกรัม / มิลลิลิตร

## 2. การเตรียมความเข้มข้นของสีย้อม

สูตร โครงสร้างและมวลโมเลกุล

เมทิลีนบลู ( $C_{16}H_{18}N_3Cl$ )                      มวลโมเลกุล 319.85

อินดิโกคาร์มีน ( $C_{16}H_8N_2Na_2O_8S_2$ )                      มวลโมเลกุล 466.36

สีย้อมเมทิลีนบลู

จาก    ความเข้มข้นของสารละลาย                      =                       $\frac{\text{ปริมาณตัวถูกละลาย}}{\text{ปริมาณตัวทำละลาย}}$

ต้องการเตรียมที่ความเข้มข้น  $3 \times 10^{-5}$  โมล ต่อ ลิตร

ดังนั้น

$$C_{MB} = \frac{g}{Mw_{MB} \times V}$$

$$3 \times 10^{-5} = \frac{g}{319.85 \times 1}$$

$$g = 0.0096$$

สีย้อมอินดิโกคาร์มีน

จาก    ความเข้มข้นของสารละลาย                      =                       $\frac{\text{ปริมาณตัวถูกละลาย}}{\text{ปริมาณตัวทำละลาย}}$

ต้องการเตรียมที่ความเข้มข้น  $3 \times 10^{-5}$  โมล ต่อ ลิตร

ดังนั้น

$$C_{IC} = \frac{g}{Mw_{IC} \times V}$$

$$3 \times 10^{-5} = \frac{g}{466.36 \times 1}$$

$$g = 0.0139$$

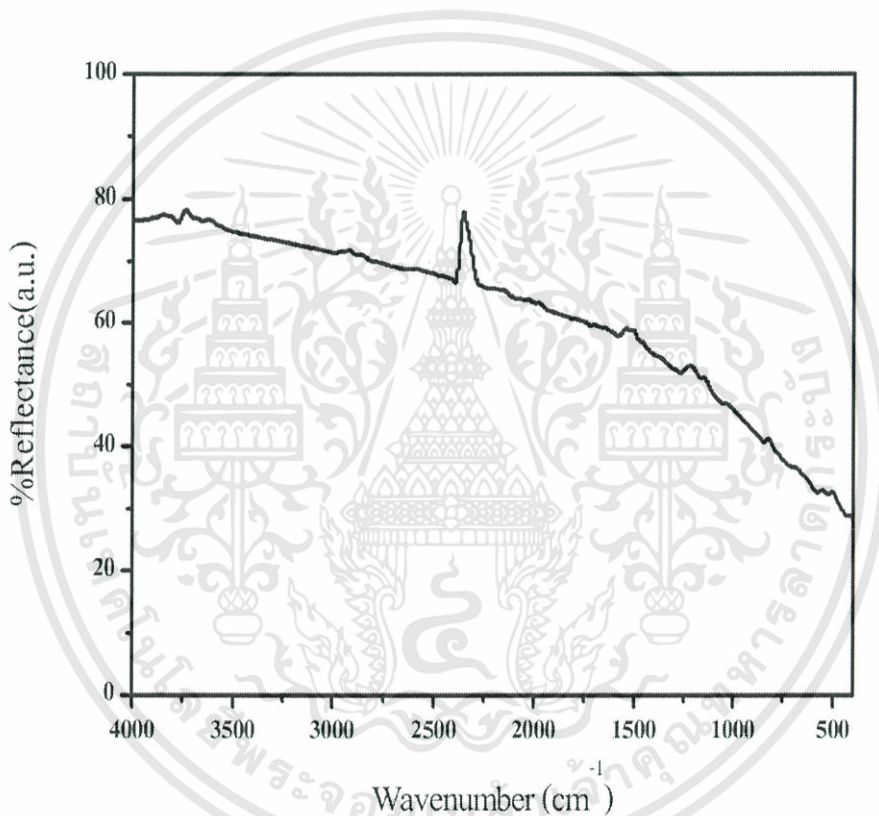
เพราะฉะนั้น เตรียมความเข้มข้นของสีย้อมทั้ง 2 ชนิด ด้วยปริมาณเมทิลีนบลู 0.0096 กรัม และอินดิโกคาร์มีน 0.0139 กรัม

## ภาคผนวก ข.

### การวิเคราะห์เอกลักษณ์เฉพาะ

#### 1. การวิเคราะห์การตรวจสอบเอกลักษณ์พื้นฐานของการสันโนโมเลกุลของสาร (FT-IR)

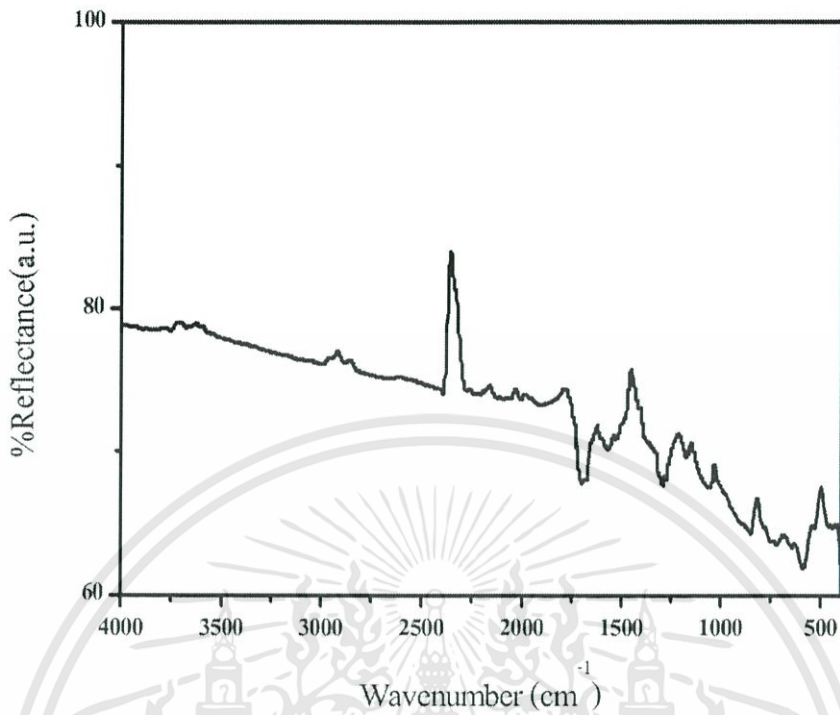
##### 1.1 ถ่านกัมมันต์ก่อนปรับสภาพ



รูปที่ ข-1 กราฟ FT-IR ของถ่านกัมมันต์ก่อนปรับสภาพ

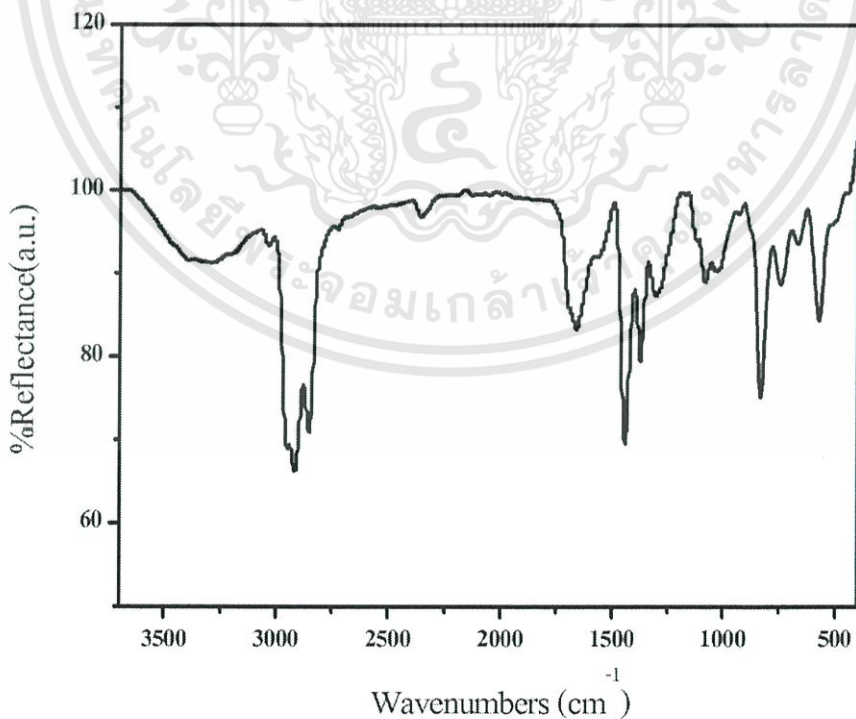
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.2 ถ่านกัมมันต์หลังปรับสภาพ



รูปที่ ข-2 กราฟ FT-IR ของถ่านกัมมันต์หลังปรับสภาพ

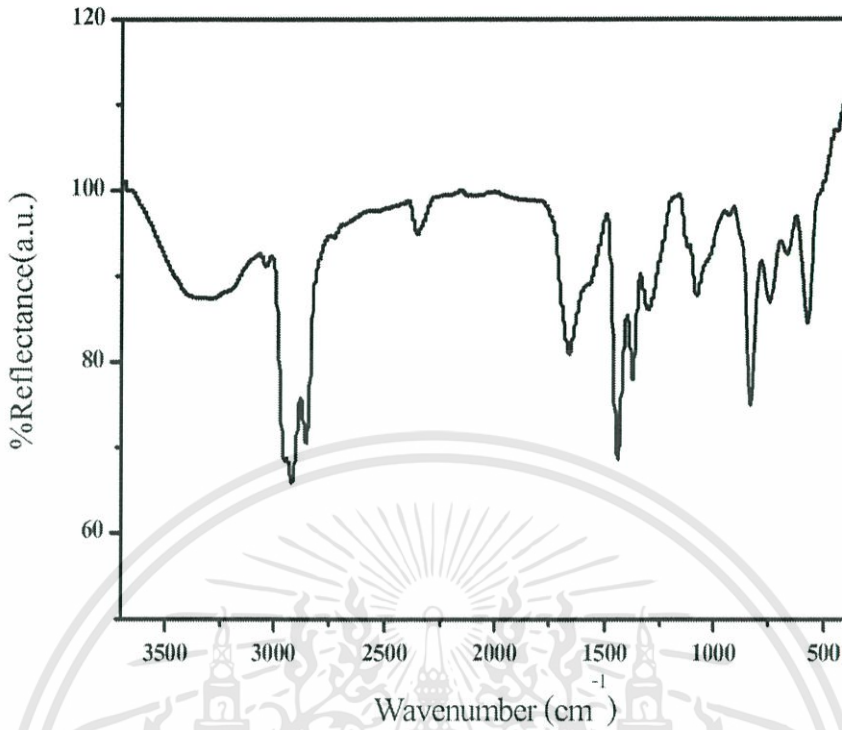
### 1.3 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์ 0 มิลลิกรัม



รูปที่ ข-3 กราฟ FT-IR ของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 0 มิลลิกรัม

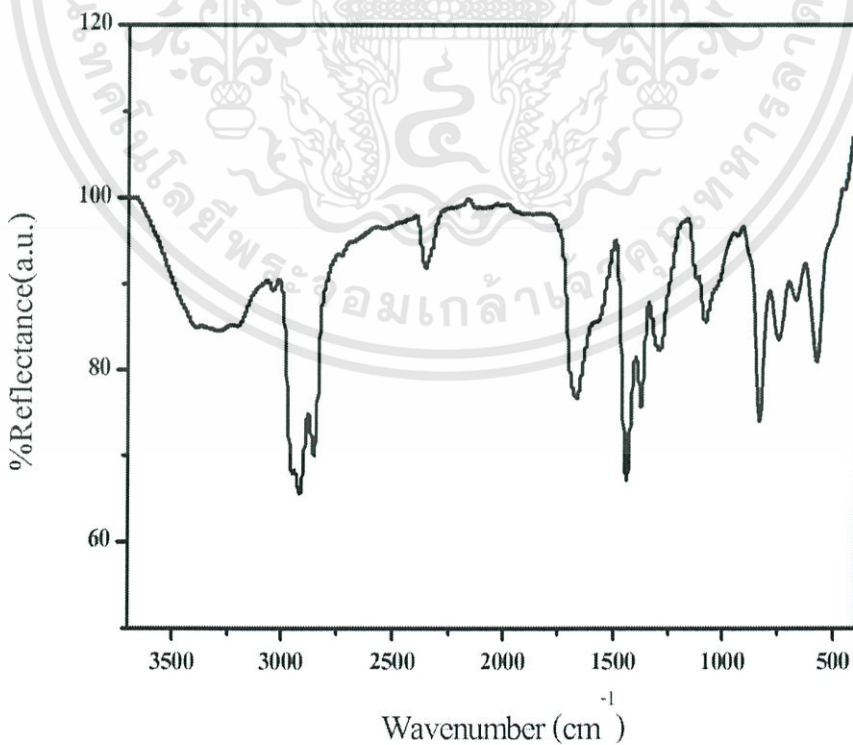
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์ 1 มิลลิกรัม



รูปที่ ข-4 กราฟ FT-IR ของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 1 มิลลิกรัม

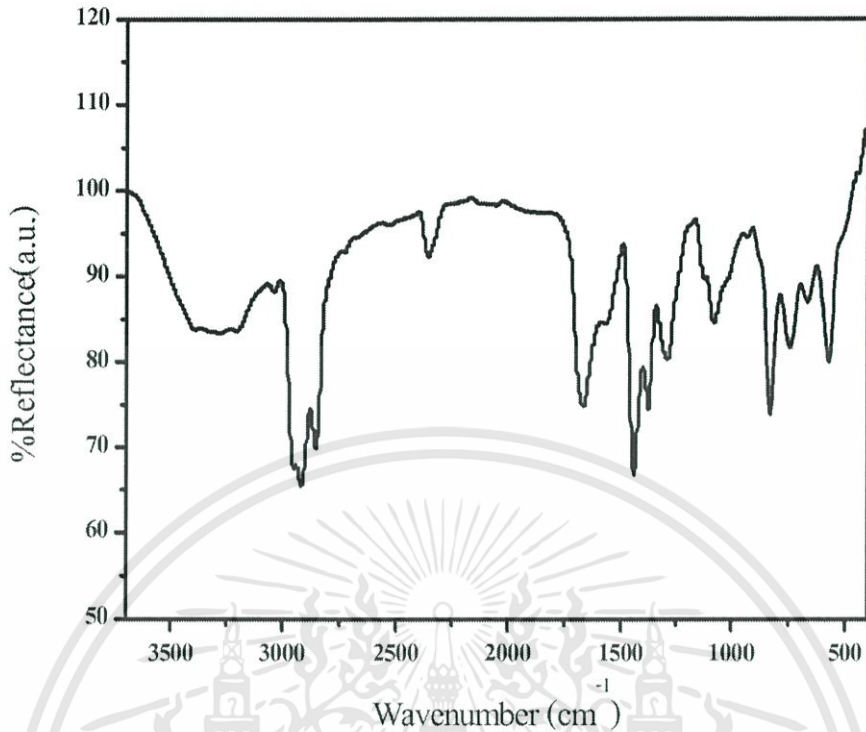
1.5 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์ 5 มิลลิกรัม



รูปที่ ข-5 กราฟ FT-IR ของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 5 มิลลิกรัม

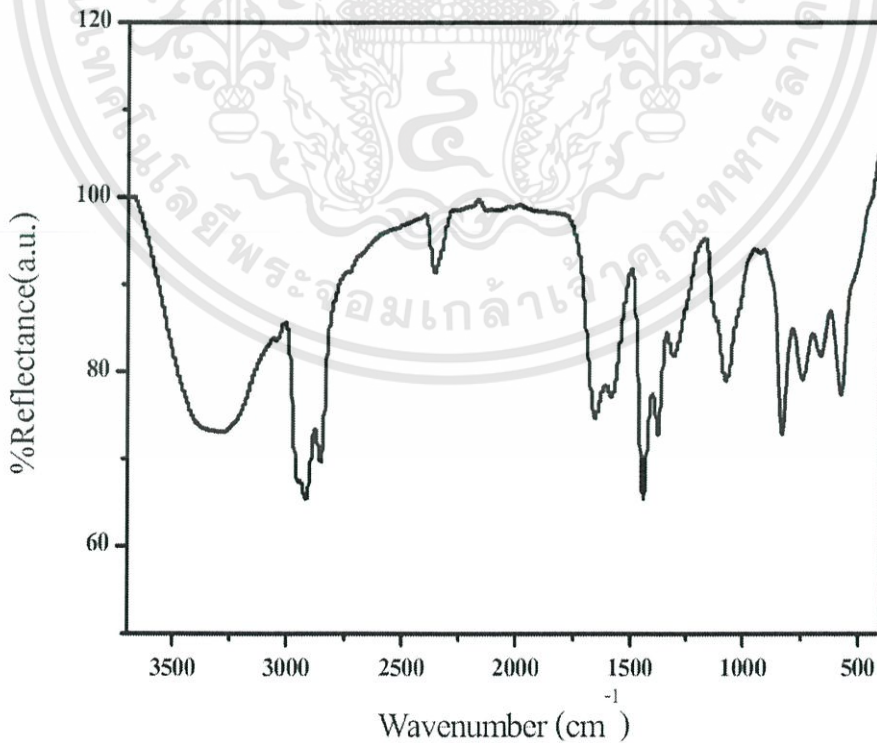
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์ 10 มิลลิกรัม



รูปที่ ข-6 กราฟ FT-IR ของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 10 มิลลิกรัม

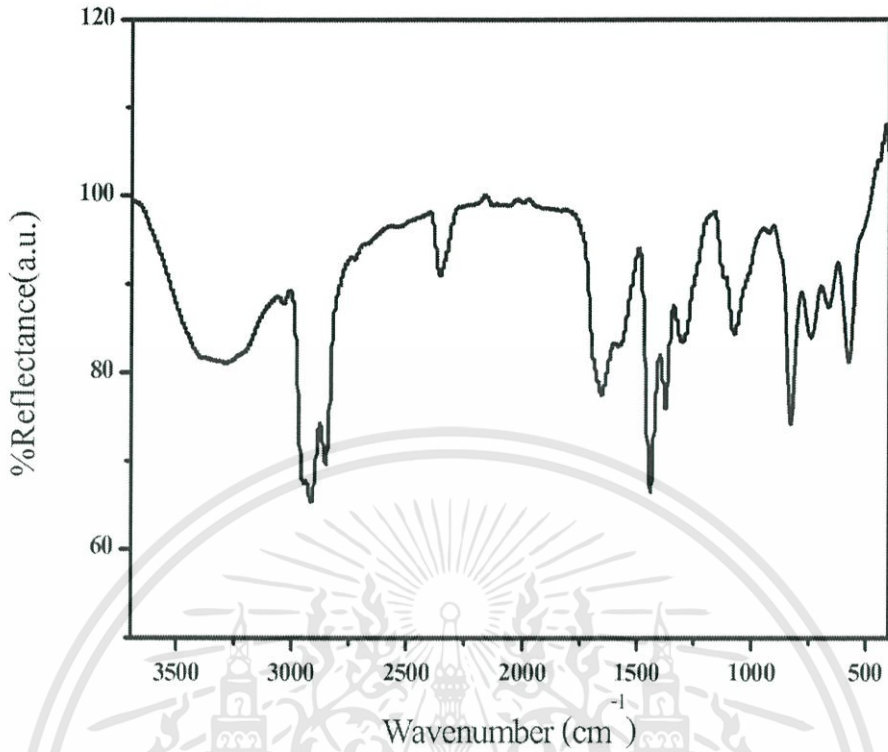
1.7 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์ 20 มิลลิกรัม



รูปที่ ข-7 กราฟ FT-IR ของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 20 มิลลิกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

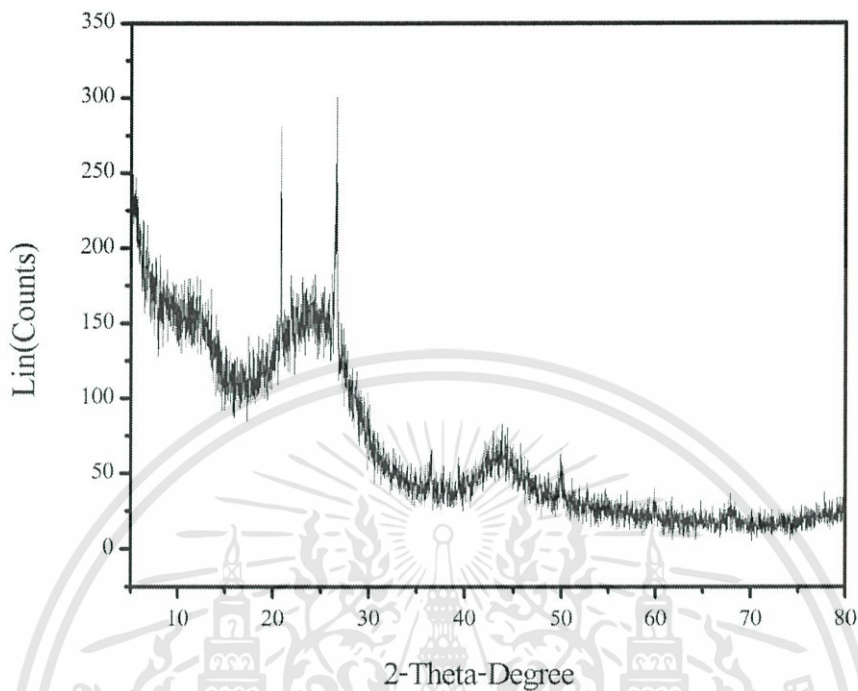
1.8 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์ 30 มิลลิกรัม



รูปที่ ข-8 กราฟ FT-IR ของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 30 มิลลิกรัม

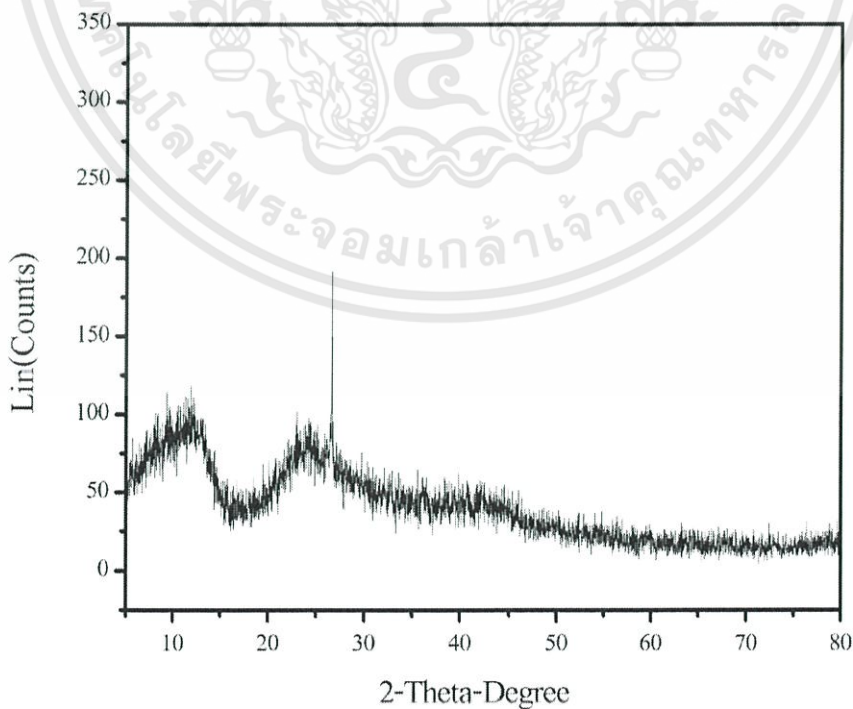
## 2. การวิเคราะห์ลักษณะผลึกและอสัณฐาน (XRD)

### 2.1 ถ่านกัมมันต์ก่อนปรับสภาพ



รูปที่ ข-9 กราฟ XRD ของถ่านกัมมันต์ก่อนปรับสภาพ

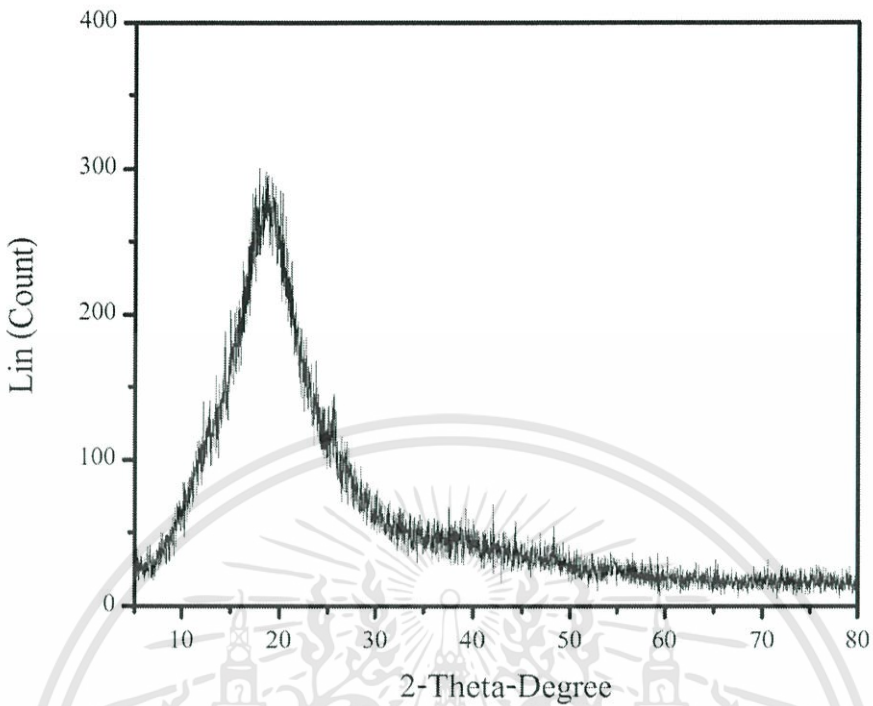
### 2.2 ถ่านกัมมันต์ก่อนหลังปรับสภาพ



รูปที่ ข-10 กราฟ XRD ของถ่านกัมมันต์หลังปรับสภาพ

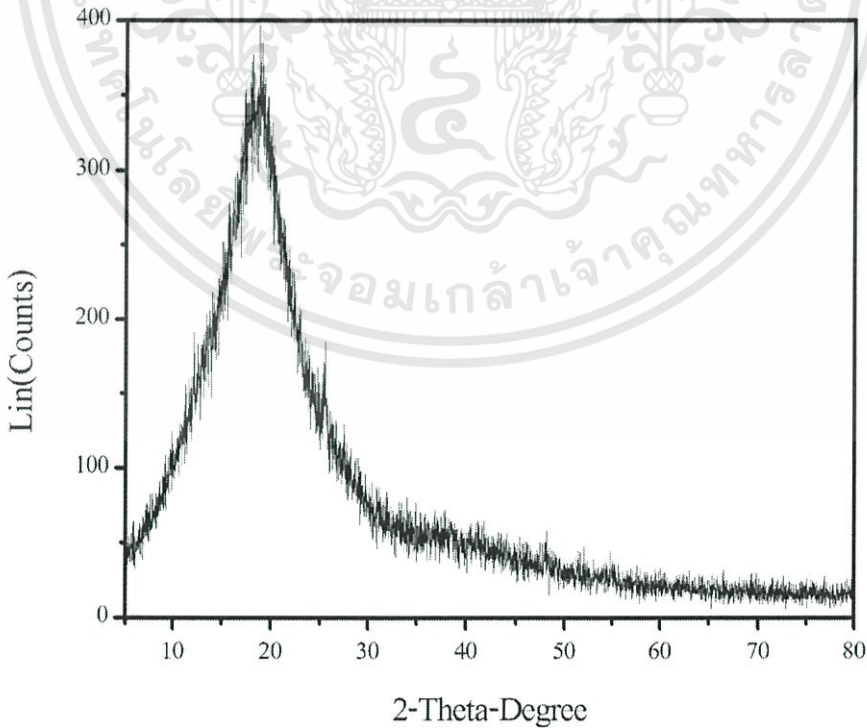
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์ 0 มิลลิกรัม



รูปที่ ข-11 กราฟ XRD ของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 0 มิลลิกรัม

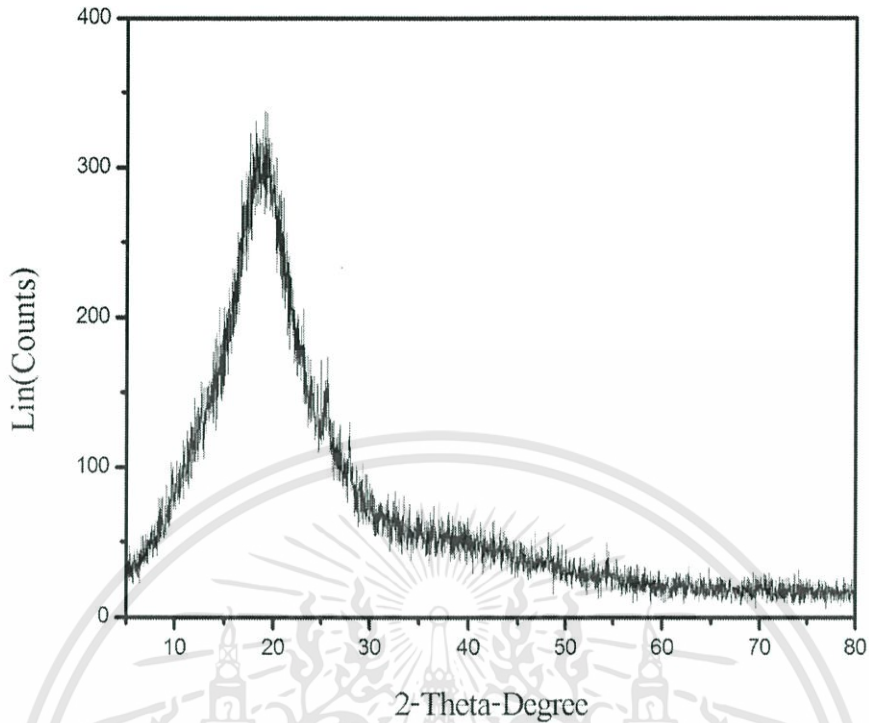
### 2.4 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์ 1 มิลลิกรัม



รูปที่ ข-12 กราฟ XRD ของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 1 มิลลิกรัม

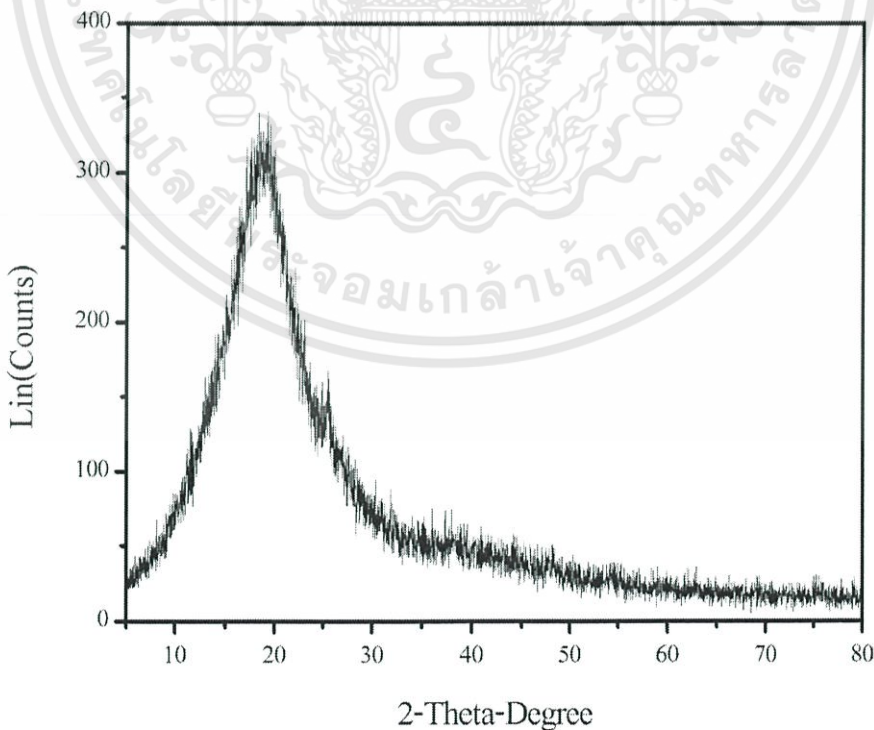
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์ 5 มิลลิกรัม



รูปที่ ข-13 กราฟ XRD ของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 5 มิลลิกรัม

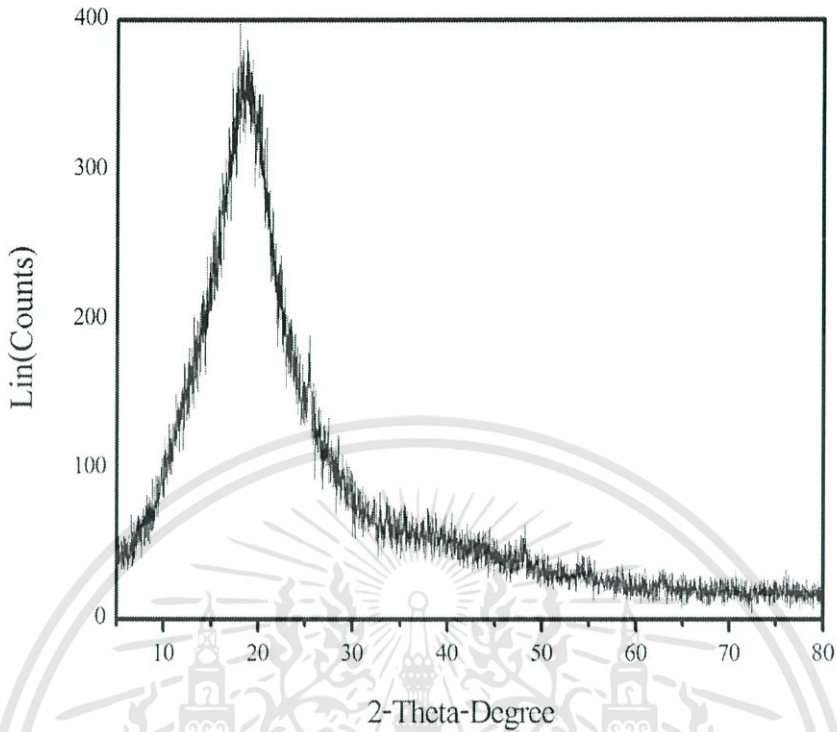
## 2.6 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์ 10 มิลลิกรัม



รูปที่ ข-14 กราฟ XRD ของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 10 มิลลิกรัม

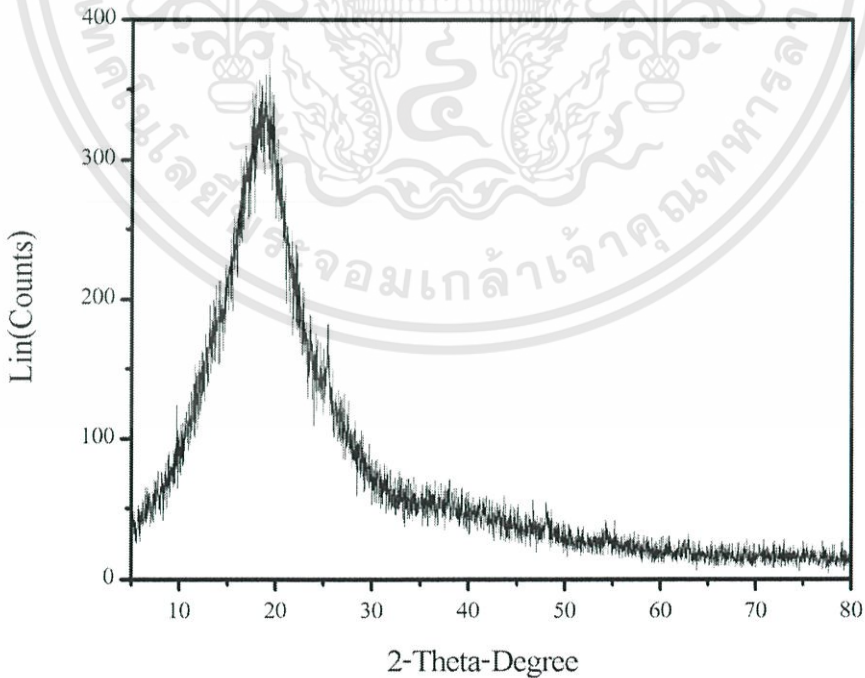
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์ 20 มิลลิกรัม



รูปที่ ข-15 กราฟ XRD ของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 20 มิลลิกรัม

## 2.8 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์ 30 มิลลิกรัม

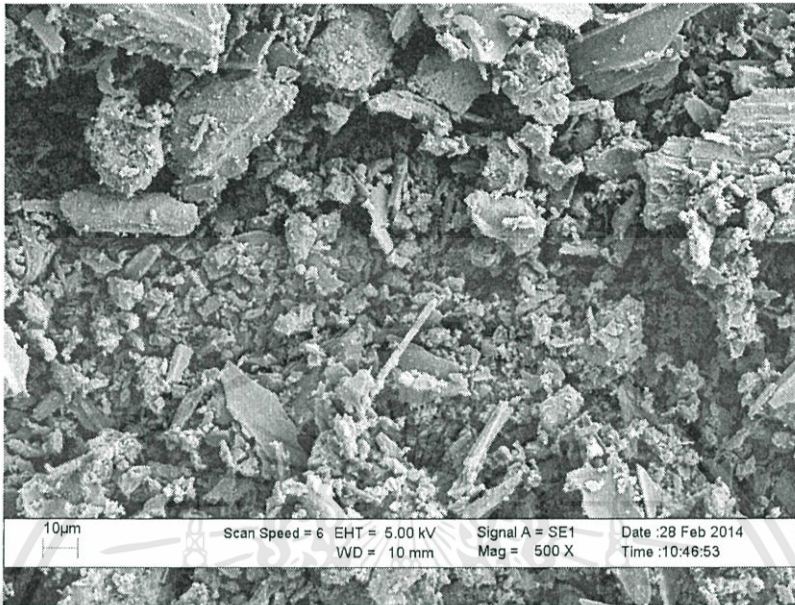


รูปที่ ข-16 กราฟ XRD ของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 30 มิลลิกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

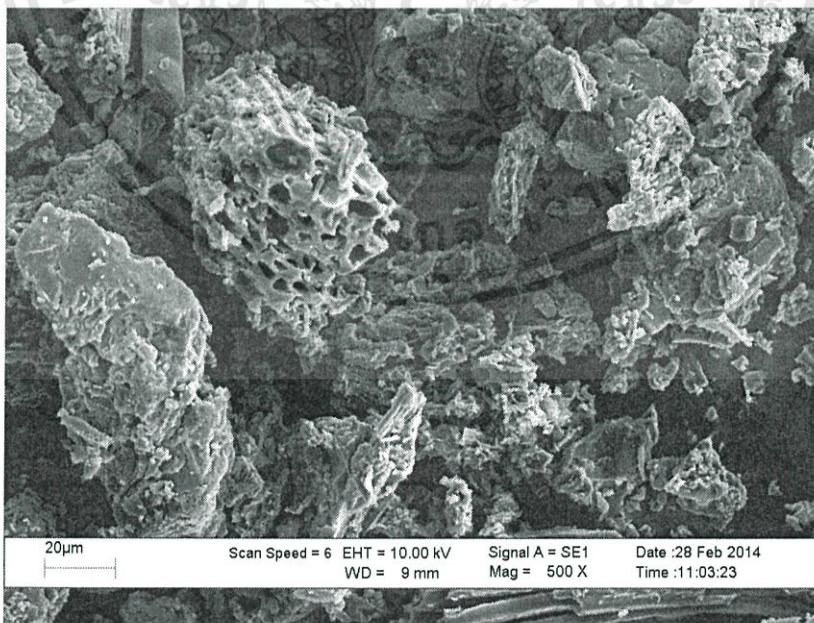
### 3. การวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของสารในระดับจุลภาค (SEM)

#### 3.1 ถ่านกัมมันต์ก่อนปรับสภาพ



รูปที่ ข-17 รูปถ่าย SEM กำลังขยาย 500 เท่า ของถ่านกัมมันต์ก่อนปรับสภาพ

#### 3.2 ถ่านกัมมันต์หลังปรับสภาพ



รูปที่ ข-18 รูปถ่าย SEM กำลังขยาย 500 เท่า ของถ่านกัมมันต์หลังปรับสภาพ

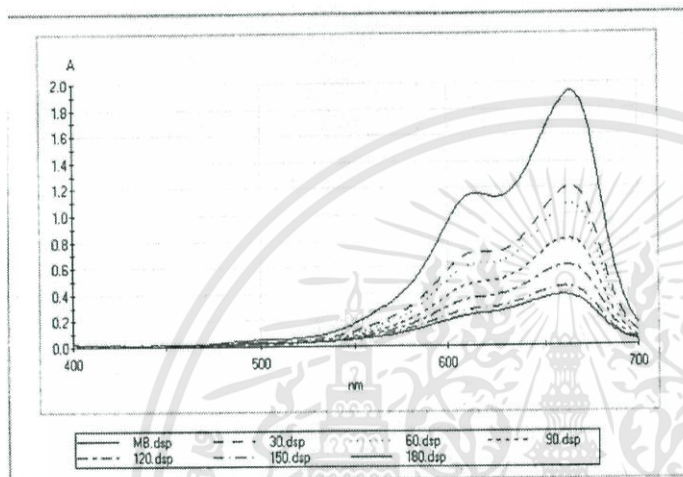
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

### การวิเคราะห์ความสามารถในการกำจัดสีด้วยเทคนิค UV-vis

#### 1. การกำจัดสีข้อมเมทิลินบลู

##### 1.1 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์ 0 มิลลิกรัม

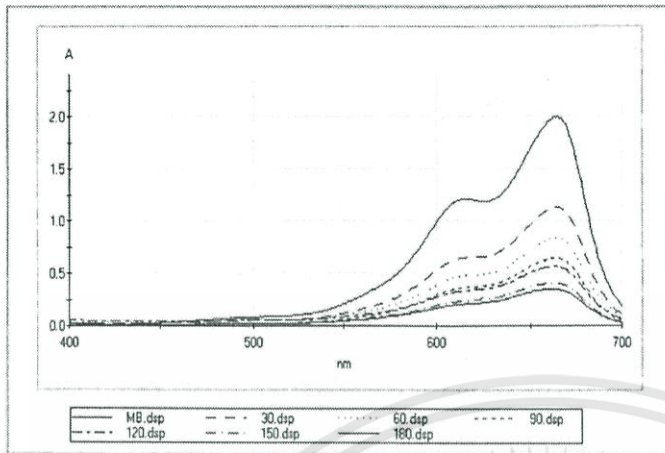


เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืน
0	1.935
30	1.209
60	1.071
90	0.809
120	0.606
150	0.404
180	0.375

รูปที่ ค-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีข้อมเมทิลินบลูของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 0 มิลลิกรัม

ตารางที่ ค-1 แสดงความสามารถในการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 665 นาโนเมตร ณ เวลาใดๆ ของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 0 มิลลิกรัม

### 1.2 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์ 1 มิลลิกรัม

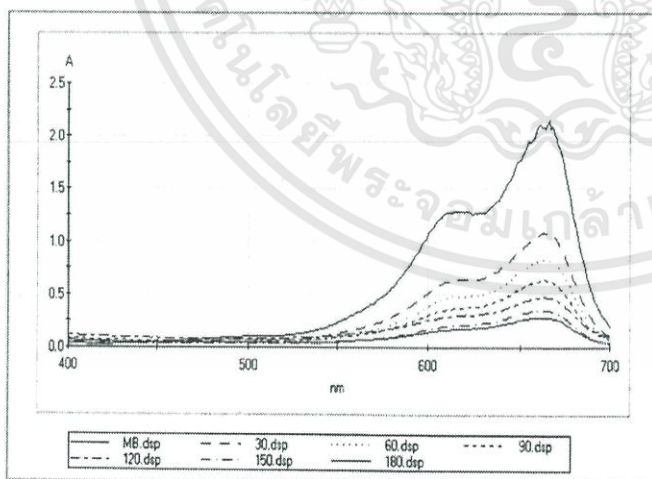


เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืน
0	1.997
30	1.134
60	0.833
90	0.643
120	0.562
150	0.400
180	0.341

รูปที่ ค-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีข้อมเมทีลีนบลูของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 1 มิลลิกรัม

ตารางที่ ค-2 แสดงความสามารถในการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 665 นาโนเมตร ณ เวลาใดๆ ของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 1 มิลลิกรัม

### 1.3 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์ 5 มิลลิกรัม



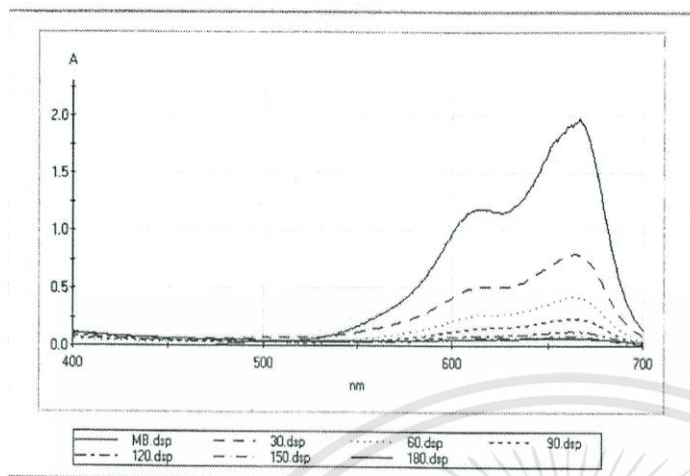
เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืน
0	2.117
30	1.074
60	0.826
90	0.628
120	0.468
150	0.350
180	0.280

รูปที่ ค-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีข้อมเมทีลีนบลูของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 5 มิลลิกรัม

ตารางที่ ค-3 แสดงความสามารถในการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 665 นาโนเมตร ณ เวลาใดๆ ของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 5 มิลลิกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์ 10 มิลลิกรัม

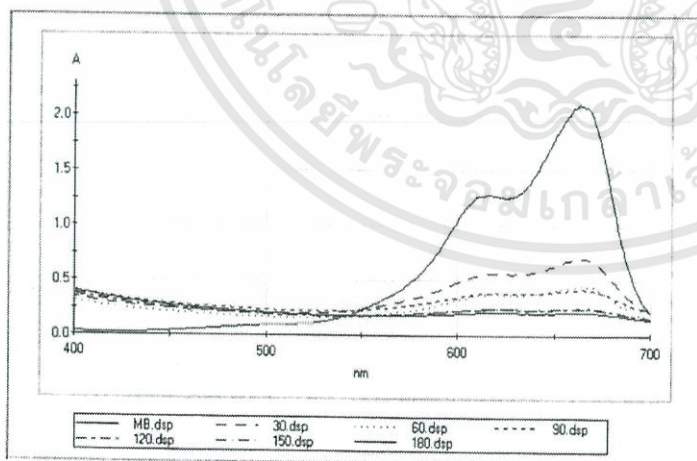


เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืน
0	1.926
30	0.791
60	0.421
90	0.239
120	0.123
150	0.083
180	0.065

รูปที่ ค-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีข้อมเมทีลีนบลูของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 10 มิลลิกรัม

ตารางที่ ค-4 แสดงความสามารถในการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 665 นาโนเมตร ณ เวลาใดๆ ของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 10 มิลลิกรัม

#### 1.5 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์ 20 มิลลิกรัม



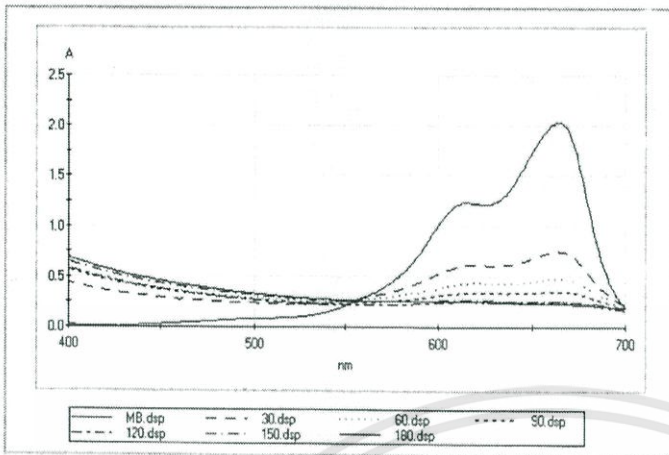
เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืน
0	2.094
30	0.707
60	0.456
90	0.421
120	0.251
150	0.248
180	0.212

รูปที่ ค-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีข้อมเมทีลีนบลูของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 20 มิลลิกรัม

ตารางที่ ค-5 แสดงความสามารถในการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 665 นาโนเมตร ณ เวลาใดๆ ของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 20 มิลลิกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.6 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์ 30 มิลลิกรัม



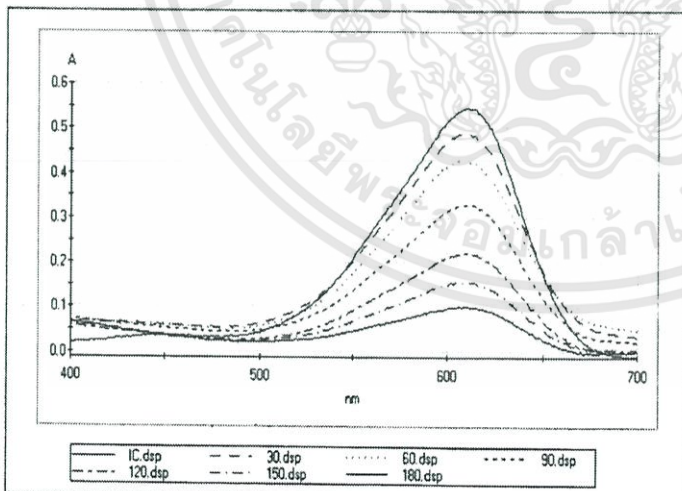
เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืน
0	2.036
30	0.745
60	0.473
90	0.348
120	0.252
150	0.246
180	0.228

รูปที่ 1-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 30 มิลลิกรัม

ตารางที่ 1-6 แสดงความสามารถในการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 665 นาโนเมตร ณ เวลาใดๆ ของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 30 มิลลิกรัม

## 2. การกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มีน

### 2.1 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์ 0 มิลลิกรัม



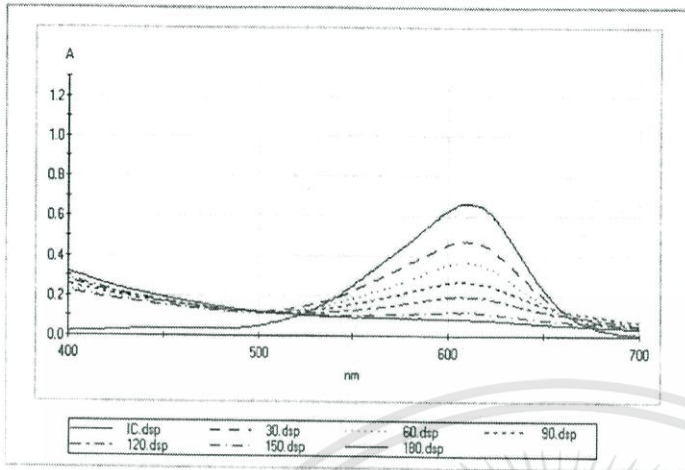
เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืน
0	0.542
30	0.489
60	0.429
90	0.326
120	0.214
150	0.156
180	0.099

รูปที่ 2-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มีนของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 0 มิลลิกรัม

ตารางที่ 2-1 แสดงความสามารถในการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 605 นาโนเมตร ณ เวลาใดๆ ของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 0 มิลลิกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์ 1 มิลลิกรัม

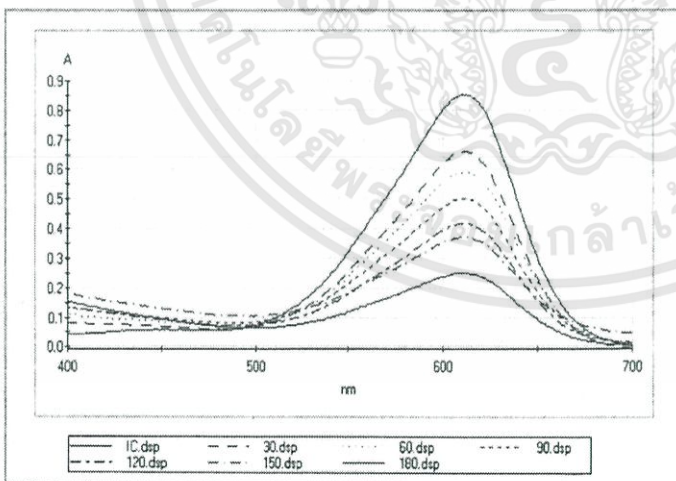


เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืน
0	0.662
30	0.474
60	0.365
90	0.271
120	0.195
150	0.117
180	0.082

รูปที่ ๘-8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีของอินดิโกคาร์มิน ของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 1 มิลลิกรัม

ตารางที่ ๘-8 แสดงความสามารถในการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 605 นาโนเมตร ณ เวลาใดๆ ของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 1 มิลลิกรัม

## 2.3 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์ 5 มิลลิกรัม



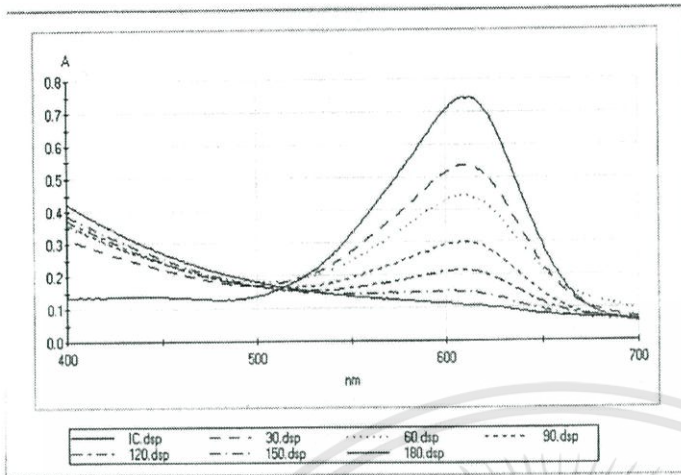
เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืน
0	0.742
30	0.537
60	0.443
90	0.301
120	0.215
150	0.148
180	0.110

รูปที่ ๘-9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีของอินดิโกคาร์มิน ของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 5 มิลลิกรัม

ตารางที่ ๘-9 แสดงความสามารถในการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 605 นาโนเมตร ณ เวลาใดๆ ของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 5 มิลลิกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์ 10 มิลลิกรัม

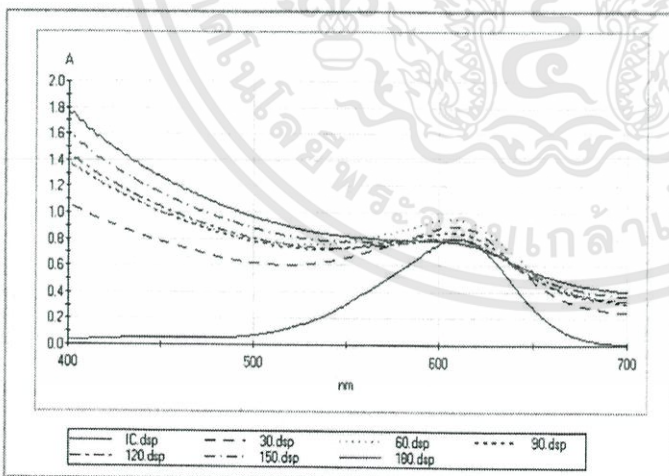


เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืน
0	0.846
30	0.655
60	0.585
90	0.497
120	0.416
150	0.368
180	0.248

รูปที่ ค-10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีข้อมอินดิโกคาร์มิน ของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 10 มิลลิกรัม

ตารางที่ ค-10 แสดงความสามารถในการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 605 นาโนเมตร ณ เวลาใดๆ ของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 10 มิลลิกรัม

## 2.5 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์ 20 มิลลิกรัม



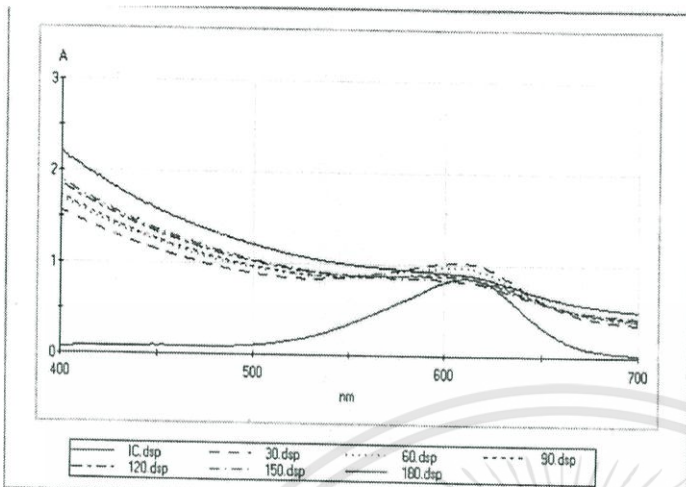
เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืน
0	0.956
30	0.899
60	0.852
90	0.822
120	0.803
150	0.802
180	0.717

รูปที่ ค-11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีข้อมอินดิโกคาร์มิน ของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 20 มิลลิกรัม

ตารางที่ ค-11 แสดงความสามารถในการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 605 นาโนเมตร ณ เวลาใดๆ ของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 20 มิลลิกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์ 30 มิลลิกรัม



เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืน
0	1.029
30	0.972
60	0.901
90	0.894
120	0.868
150	0.852
180	0.826

รูปที่ ค-12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีข้อมอินดิโกคาร์มิน ของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 30 มิลลิกรัม

ตารางที่ ค-12 แสดงความสามารถในการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 605 นาโนเมตร ณ เวลาใดๆ ของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 30 มิลลิกรัม

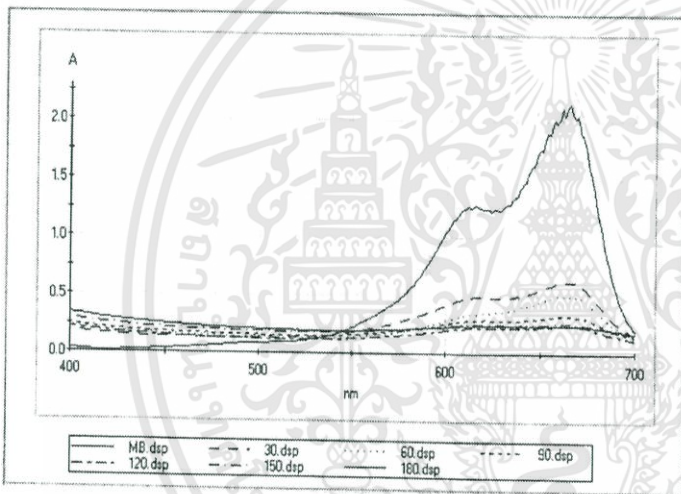
## ภาคผนวก ง

### ประสิทธิภาพในการใช้งานซ้ำ

จากผลที่ได้จึงทดสอบการใช้น้ำกับสีข้อมเมทิลีนบลูอย่างเดียว เนื่องจากถ่านกัมมันต์ไม่ได้เพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมของอินดิโกคาร์มีน

#### 1. การทดสอบการใช้น้ำในการกำจัดสีข้อมเมทิลีนบลู

##### 1.1 การใช้น้ำกำจัดสีข้อมครั้งที่ 1

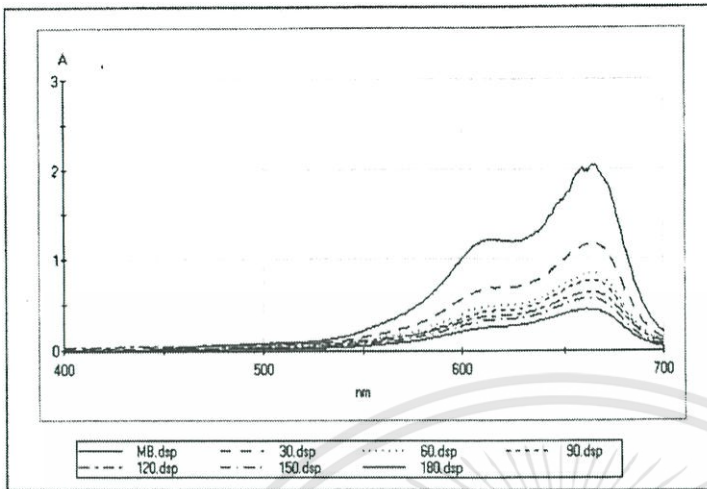


เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืน
0	2.152
30	0.621
60	0.505
90	0.332
120	0.248
150	0.263
180	0.244

รูปที่ ง-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีข้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 10 มิลลิกรัม ครั้งที่ 1

ตารางที่ ง-1 แสดงความสามารถในการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 665 นาโนเมตร ณ เวลาใดๆ ของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 10 มิลลิกรัม ครั้งที่ 1

## 1.2 การใช้กำจัดสีย้อมครั้งที่ 2

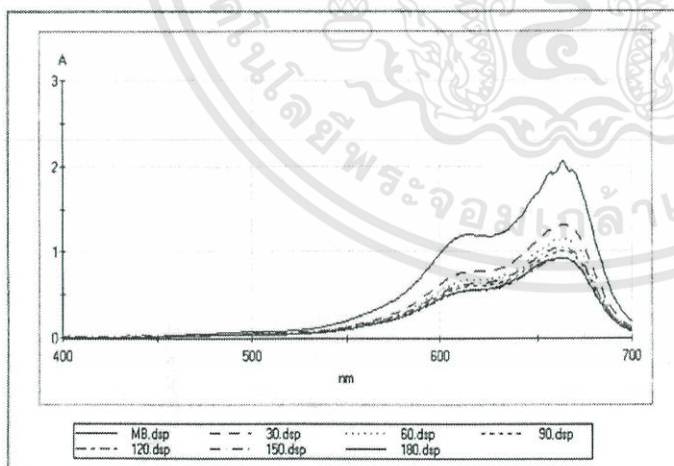


เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืน
0	2.033
30	1.167
60	0.830
90	0.755
120	0.627
150	0.553
180	0.432

รูปที่ ๑-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 10 มิลลิกรัม ครั้งที่ 2

ตารางที่ ๑-2 แสดงความสามารถในการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 665 นาโนเมตร ณ เวลาใดๆ ของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 10 มิลลิกรัม ครั้งที่ 2

## 1.3 การใช้กำจัดสีย้อมครั้งที่ 3



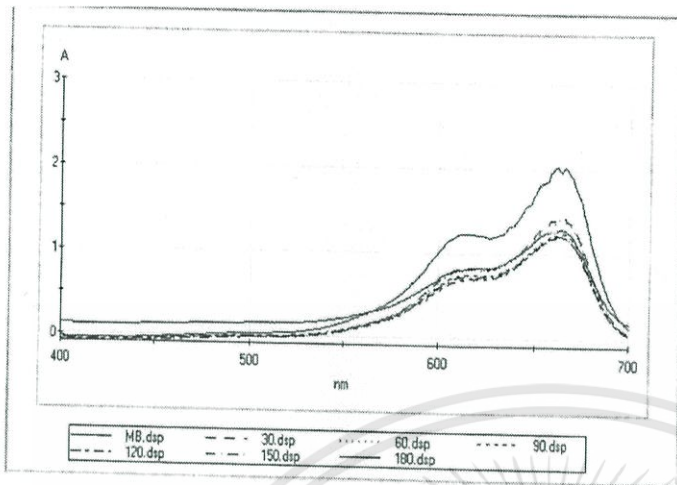
เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืน
0	1.976
30	1.311
60	1.144
90	1.047
120	1.003
150	0.932
180	0.921

รูปที่ ๑-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 10 มิลลิกรัม ครั้งที่ 3

ตารางที่ ๑-3 แสดงความสามารถในการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 665 นาโนเมตร ณ เวลาใดๆ ของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 10 มิลลิกรัม ครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4 การใช้กำจัดสีข้อมครั้งที่ 4



เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืน
0	2.004
30	1.441
60	1.334
90	1.244
120	1.217
150	1.207
180	1.203

รูปที่ ง-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีข้อมเมทีลินบลูของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 10 มิลลิกรัม ครั้งที่ 4

ตารางที่ ง-4 แสดงความสามารถในการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 665 นาโนเมตร ณ เวลาใดๆ ของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์ 10 มิลลิกรัม ครั้งที่ 4