

การเตรียม การศึกษาคุณลักษณะเฉพาะ และสมบัติโฟโตคะตะลิสต์ของ  
แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - ผลึกออสถฐานไทเทเนียมไดออกไซด์  
PREPARATION, CHARACTERIZATION, AND PHOTOCATALYST  
PROPERTIES OF TITANIUM DIOXIDE (DEGUSSA P25) - AMORPHOUS  
TITANIUM DIOXIDE COMPOSITE RUBBER SHEETS

นางสาวพันชนันท์	โกสินตระกูลชัย
นายวรท	ประสานเสียง
นายวิทยา	ยาทองซุน

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาเคมีอุตสาหกรรม  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2556

การเตรียม การศึกษาคุณลักษณะเฉพาะ และสมบัติโฟโตคะตะลิสต์ของ  
แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - ผลึกออสถฐานไทเทเนียมไดออกไซด์  
PREPARATION, CHARACTERIZATION, AND PHOTOCATALYST  
PROPERTIES OF TITANIUM DIOXIDE (DEGUSSA P25) - AMORPHOUS  
TITANIUM DIOXIDE COMPOSITE RUBBER SHEETS

นางสาวพันธนันท์	โกสินตระกูลชัย
นายวรท	ประสานเสียง
นายวิทยา	ยาทองชุน

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาเคมีอุตสาหกรรม  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2556

**PREPARATION, CHARACTERIZATION, AND PHOTOCATALYST  
PROPERTIES OF TITANIUM DIOXIDE (DEGUSSA P25) -AMORPHOUS  
TITANIUM DIOXIDE COMPOSITE RUBBER SHEETS**

**MISS PUNTHANUN KOSINTRAKULCHAI**

**MR. WAROT PRASANSEANG**

**MR. WITTAYA YATONGCHOON**

**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**

<b>หัวข้อโครงการพิเศษ</b>	การเตรียม การศึกษาคุณลักษณะเฉพาะ และสมบัติโฟโตคะตะลิสต์ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ Preparation, Characterization, and Photocatalyst Properties of Titanium Dioxide (Degussa P25) - Amorphous Titanium Dioxide Composite Rubber Sheets		
<b>ชื่อนักศึกษา</b>	นางสาวพันธนันท์ โกลสินตระกูลชัย	รหัสนักศึกษา	53050297
	นายวรท ประสานเสียง	รหัสนักศึกษา	53050331
	นายวิทยา ยาทองขุน	รหัสนักศึกษา	53050345
<b>ปริญญา</b>	วิทยาศาสตร์บัณฑิต		
<b>สาขาวิชา</b>	เคมีอุตสาหกรรม		
<b>ปีการศึกษา</b>	2556		
<b>อาจารย์ที่ปรึกษา</b>	ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์		

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.ปานไพลิน สีหาราช	
ดร.กิตติศักดิ์ ชูจันทร์	
ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

<b>หัวข้อโครงการพิเศษ</b>	การเตรียม การศึกษาคุณลักษณะเฉพาะ และสมบัติโฟโตคะตะลิสต์ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ – ผลึกออสถูฐานไทเทเนียมไดออกไซด์		
<b>ชื่อนักศึกษา</b>	นางสาวพันธนันท์ โกสินตระกูลชัย	รหัสนักศึกษา	53050297
	นายวรท	ประสานเสียง	รหัสนักศึกษา 53050331
	นายวิทยา	ยาทองขุน	รหัสนักศึกษา 53050345
<b>ปริญญา</b>	วิทยาศาสตร์บัณฑิต		
<b>สาขาวิชา</b>	เคมีอุตสาหกรรม		
<b>ปีการศึกษา</b>	2556		
<b>อาจารย์ที่ปรึกษา</b>	ดร. ชวาลย์ ศรีวงษ์		

### บทคัดย่อ

เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบผง และเพื่ออำนวยความสะดวกในการนำไปใช้งานสำหรับการกำจัดสีข้อมในน้ำ ดังนั้นโครงการพิเศษนี้จึงได้ศึกษาวิธีการเตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ขึ้น โดยกระบวนการนี้จะใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เชิงการค้า (Degussa P25) และน้ำยางชนิดเข้มข้น (60% HA) เป็นวัสดุตั้งต้นในส่วนของ การเตรียมจะเป็นการผสมโดยตรงของสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกันกับน้ำยางชนิดเข้มข้น หลังจากนั้นเทของผสมลงในแบบตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนแห้ง สุดท้ายจะได้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ออกมา สำหรับการศึกษาคุณลักษณะเฉพาะทางด้านสัญญาณวิทยาและลักษณะรูปแบบโครงสร้างผลึกสามารถศึกษาได้จากการใช้เทคนิค FT-IR XRD SEM และ EDS ผลปรากฏว่ารูปแบบโครงสร้างผลึกและหมู่ฟังก์ชันของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์สอดคล้องกับผงไทเทเนียมไดออกไซด์และแผ่นยางดั้งเดิม จากผลของ SEM และ EDS พบว่าลักษณะพื้นผิวของแผ่นยางผสมจะมีลักษณะพื้นผิวที่แตกต่างกันเมื่อมีการเพิ่มปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมลงไป ในส่วนของ การทดสอบปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ผลปรากฏว่าแผ่นยางผสมที่เตรียมขึ้นสามารถกำจัดสีข้อมอินดิโกคาร์มินภายใต้การฉายแสงยูวีได้ ซึ่งแผ่นยางผสมที่เตรียมโดยใช้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.1 กรัม แสดงความว่องไวต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ได้สูงที่สุด โดยลำดับเปอร์เซ็นต์ความว่องไวในการกำจัดสีข้อมด้วยแผ่นยางผสมมีค่าเท่ากับ 97% 96% 90% 86% และ 0% ซึ่งเป็นของแผ่นยางผสมที่เตรียมโดยใช้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.1 0.03 0.05 0.01 และ 0 กรัม ตามลำดับ และเพื่อเป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อม โครงการพิเศษนี้ยังได้ศึกษาผลของการเติมผลึกออสถูฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อเตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลึกออสถูฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ผลปรากฏว่าแผ่นยางผสมที่เตรียมขึ้นสามารถกำจัดสีข้อมทั้งเมทิลีนบลู และอินดิโกคาร์-

มีนได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสามารถกำจัดสีข้อมเมทีลินบลูได้เร็วกว่าอินดิโกคาร์มีน ซึ่งพบว่าแผ่นยางผสมจากการใช้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณเท่ากับ 0.03 กรัม ผสมกับผลิตภัณฑ์ฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.02 กรัม แสดงความว่องไวต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ได้ดีกว่าแผ่นยางผสมชนิดอื่น นอกจากนี้ยังได้ศึกษาประสิทธิภาพในการใช้งานซ้ำของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลิตภัณฑ์ฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ผลแสดงให้เห็นว่าแผ่นยางผสมนี้สามารถนำมาใช้งานซ้ำในการกำจัดสีข้อมเมทีลินบลูได้ อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าแผ่นยางผสมนี้จะมีประสิทธิภาพในการใช้งานซ้ำลดลงเมื่อจำนวนครั้งที่ใช้เพิ่มมากขึ้น แต่แผ่นยางผสมนี้ยังมีข้อดีบางอย่างคือ ง่ายต่อการนำมาใช้ ใช้เสร็จสามารถเก็บกลับคืน และสามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้อีกด้วย

คำสำคัญ : ผลิตภัณฑ์ฐานไทเทเนียมไดออกไซด์, ไทเทเนียมไดออกไซด์, โฟโตคะตะลิสต์, เมทีลินบลู, อินดิโกคาร์มีน

<b>Title</b>	Preparation, Characterization, and Photocatalyst Properties of Titanium Dioxide (Degussa P25) - Amorphous Titanium Dioxide Composite Rubber Sheets		
<b>Students</b>	Miss Punthanun	Kosintrakulchai	ID 53050297
	Mr. Warot	Prasanseang	ID 53050331
	Mr. Witthaya	Yatongchoon	ID 53050345
<b>Degree</b>	Bachelor of Science		
<b>Major</b>	Industrial Chemistry		
<b>Academic</b>	2013		
<b>Advisor</b>	Dr. Chaval Sriwong		

### ABSTRACT

To avoid the use of  $\text{TiO}_2$  in powder form and easy to use for the removal of dye in water, therefore, in this special project study the method to preparing of  $\text{TiO}_2$  composite rubber sheet. This method is base on the use of commercial  $\text{TiO}_2$  powder (Degussa P25) and concentrated rubber latex (60% HA) as starting materials. In this preparation, the varying different amounts of  $\text{TiO}_2$  suspension were directly mixing with the concentrated rubber latex. After that the prepared mixture were poured into mold, left at room temperature and finally, the  $\text{TiO}_2$  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  $\text{TiO}_2$  composite rubber sheets are corresponding to pristine  $\text{TiO}_2$  powder and rubber sheet. From the SEM and EDS results, the morphologies of the sheet surface shown the difference surface features when the increasing added amount of  $\text{TiO}_2$ . In the photocatalytic properties test showed that the prepared  $\text{TiO}_2$  composite rubber sheets could be degrade indigo carmine (IC) dye under UV light irradiation. The sheet prepared by using amount of 0.1 g  $\text{TiO}_2$  showed the highest photocatalytic activity than that the other sheets. The orders of %degradation activities of  $\text{TiO}_2$  composite rubber sheets as 0%, 86%,96%,90%,97% with the sheets prepared by using amounts of  $\text{TiO}_2$  are 0, 0.01, 0.03, 0.05, 0.1 g, respectively. And to improve the removal efficiency of dyes, this special project studies the effects of adding amorphous  $\text{TiO}_2$  to prepare the  $\text{TiO}_2$ -amorphous  $\text{TiO}_2$  ( $\text{TiO}_2$ -Am) composite rubber sheets. The results showed that these sheets could be remove both methylene blue (MB) and indigo carmine (IC) dyes under UV light irradiation. Especially, the former dye

degraded faster than the later dye. The sheet prepared by using amounts of 0.03 g  $\text{TiO}_2$  mixed with 0.02 g amorphous  $\text{TiO}_2$  showed the highest photocatalytic activity than that the other sheets. In addition, the efficiency of  $\text{TiO}_2$ -Am composite rubber sheet on the repeatedly used was also studied. The results indicated that  $\text{TiO}_2$ -Am composite rubber sheet could be repeatedly used on the removal of MB dye solution under UV light irradiation. However, despite this composite rubber sheet showed the decreasing efficiency on the repeatedly used when increased the number of uses on the removal of MB dye but the sheet has some advantages that it is easy to use, recoverable after use, and it can be reused as well.

**Keywords:** Amorphous  $\text{TiO}_2$ , Titanium dioxide photocatalyst, Methylene blue, Indigo carmine

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือ รวมถึงให้คำแนะนำและวิธีการแก้ไขจากผู้มีพระคุณหลายๆ ท่าน ดังนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ และเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำ รวมถึงให้คำปรึกษา และแนะแนวทางในการแก้ปัญหาในการทำโครงการพิเศษ

ขอขอบพระคุณ ดร.ปานไพลิน สีหาราช และ ดร.กิตติศักดิ์ ชูจันทร์ อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำ รวมถึงการแก้ไขโครงการพิเศษเล่มนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ห้องธุรการ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องการตรวจวิเคราะห์สารจนโครงการพิเศษสำเร็จไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ ครอบครัว และเพื่อน ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือ รวมถึงให้กำลังใจตลอดการทำโครงการพิเศษจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นางสาวพันธนันท์ โกสินตระกูลชัย  
นายวรท ประสานเสียง  
นายวิทยา ยาทองชุน

# สารบัญ

	- หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	III
กิตติกรรมประกาศ	V
สารบัญ	VI
สารบัญตาราง	IX
สารบัญรูป	XII
คำย่อและสัญลักษณ์	XIX
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	5
2.1 ปฏิกริยาโฟโตคะตะไลซิส	5
2.1.1 กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส	5
2.1.2 หลักการของปฏิกริยาโฟโตคะตะไลซิส	6
2.1.3 กลไกการเกิดปฏิกริยาโฟโตคะตะไลซิส	8
2.2 พลังงานแสง	9
2.3 ชนิดของโฟโตคะตะไลซิส	10
2.3.1 โฟโตคะตะไลซิสแบบเอกพันธ์	10
2.3.2 โฟโตคะตะไลซิสแบบวิวิธพันธ์	10
2.4 ชนิดของตัวคะตะลิสต์	10
2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการออกซิเดชันของปฏิกริยาโฟโตคะตะไลซิส	12
2.5.1 ชนิดของสารพิษ	12
2.5.2 ชนิดของตัวเร่งปฏิกริยา	12
2.5.3 ปริมาณตัวคะตะลิสต์	12
2.5.4 ความเข้มแสง	13

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.5 อุณหภูมิ	13
2.5.6 ปริมาณของออกซิเจนที่ละลายในน้ำ	13
2.5.7 ความเป็นกรด-ด่าง	13
2.6 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO <sub>2</sub> )	13
2.6.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide Degussa P25)	16
2.6.2 ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ (Amorphous titanium dioxide, Am-TiO <sub>2</sub> )	17
2.7 ประโยชน์ของไทเทเนียมไดออกไซด์	19
2.8 ประเภทของสิ่งสกปรกที่เจือปนในน้ำ	21
2.9 ลักษณะของสีสังเคราะห์	21
2.9.1 อินดิโกคาร์มีน (Indigo Carmine, IC)	23
- กลไกการสลายตัวของอินดิโกคาร์มีน	25
2.9.2 เมทิลีนบลู (Methylene Blue, MB)	26
- กลไกการสลายตัวของเมทิลีนบลู	27
2.10 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR)	28
2.10.1 น้ำยางข้น	29
2.10.2 กระบวนการเตรียมน้ำยางข้นจากน้ำยางสด	29
2.10.3 คุณสมบัติของยางธรรมชาติ	31
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	31
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	<b>35</b>
3.1 สารเคมี	35
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	35
3.3 วิธีการทดลอง	36
3.3.1 ตอนที่ 1	36
- การเตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์	36
3.3.2 ตอนที่ 2	38
- การเตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์	38

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 เทคนิคการวิเคราะห์พิกสสูงน้เอกลักษณะ	42
3.5 การทดสอบประสิทธิภาพ	44
3.6 การทดสอบความสามารถในการใช้งานซ้ำ	46
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล</b>	<b>47</b>
4.1 การศึกษาลักษณะเฉพาะ	48
- 4.1.1 เทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)	48
- 4.1.2 เทคนิค X-Ray Diffraction (XRD)	51
- 4.1.3 เทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM)	53
- 4.1.4 เทคนิค Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX)	58
4.2 การหาปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสม	64
4.3 การกำจัดสีสังเคราะห์อินดิโก้คามีนของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - ผลิตภัณฑ์ฐานไทเทเนียมไดออกไซด์	66
4.4 การกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - ผลิตภัณฑ์ฐานไทเทเนียมไดออกไซด์	68
4.5 ความสามารถในการใช้งานซ้ำ	70
<b>บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	<b>71</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย	71
5.2 ข้อเสนอแนะ	74
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>75</b>
<b>ภาคผนวก</b>	
ภาคผนวก ก	77
ภาคผนวก ข	85
ภาคผนวก ค	92
ภาคผนวก ง	99
ภาคผนวก จ	103
ภาคผนวก ฉ	109
ภาคผนวก ช	116

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติทางกายภาพที่สำคัญของไทเทเนียมไดออกไซด์	14
2.2 ตารางแสดงพื้นที่ผิวของผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์	17
2.3 แสดงความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดต่างๆ	18
2.4 การเปรียบเทียบผลการกำจัดมลพิษกับวิธีต่างๆ	20
3.1 แสดงอัตราส่วนการเตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์	36
3.2 แสดงอัตราส่วนการเตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์	39
4.1 แสดงเลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ	50
ง-1 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์อินดิโกคาร์มินของแผ่นยางเปล่า	100
ง-2 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์อินดิโกคาร์มินของแผ่นยางผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.01 กรัม	100
ง-3 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์อินดิโกคาร์มินของแผ่นยางผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03 กรัม	101
ง-4 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์อินดิโกคาร์มินของแผ่นยางผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.05 กรัม	101
ง-5 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์อินดิโกคาร์มินของแผ่นยางผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.10 กรัม	102
จ-1 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์อินดิโกคาร์มินของแผ่นยางผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.04 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.01 กรัม	103
จ-2 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์อินดิโกคาร์มินของแผ่นยางผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.02 กรัม	105
จ-3 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์อินดิโกคาร์มินของแผ่นยางผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.025 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.025 กรัม	106

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
จ-4 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์อินดิโก้คาร์มีนของแผ่นยางผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.01 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.04 กรัม	107
จ-5 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์อินดิโก้คาร์มีนของแผ่นยางผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.05 กรัม	108
ฉ-1 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลูของแผ่นยางผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.05 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0 กรัม	110
ฉ-2 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลูของแผ่นยางผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.04 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.01 กรัม	111
ฉ-3 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลูของแผ่นยางผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.2 กรัม	112
ฉ-4 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลูของแผ่นยางผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.025 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.025 กรัม	113
ฉ-5 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลูของแผ่นยางผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.01 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.04 กรัม	114
ฉ-6 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลูของแผ่นยางผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.05 กรัม	115
ช-1 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลูของแผ่นยางผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.02 กรัม ในการนำมาใช้งานครั้งที่ 1	117

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ช-2 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลินบลูของแผ่นยางผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.02 กรัม ในการนำมาใช้งานครั้งที่ 2	118
ช-3 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลินบลูของแผ่นยางผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03 กรัม - ผลึกอสัณฐาน ไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.02 กรัม ในการนำมาใช้งานครั้งที่ 3	119
ช-4 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลินบลูของแผ่นยางผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03 กรัม - ผลึกอสัณฐาน ไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.02 กรัม ในการนำมาใช้งานครั้งที่ 4	120
ช-5 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลินบลูของแผ่นยางผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03 กรัม - ผลึกอสัณฐาน ไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.02 กรัม ในการนำมาใช้งานครั้งที่ 5	121

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	5
2.2	6
2.3	12
2.4	13
2.5	14
2.6	16
2.7	17
2.8	18
2.9	24
2.10	24
2.11	25
2.12	26
2.13	27
2.14	27
2.15	28
2.16 (ก)	29
3.1	37
3.2	40
3.3	41
3.4	45

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 แสดงตัวอย่างแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ และแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - อัดฐานไทเทเนียมไดออกไซด์	47
4.2 กราฟ FT-IR ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์, แผ่นยางเปล่า และแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกัน	48
4.3 กราฟ FT-IR ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์, ผลึกอัดฐานไทเทเนียมไดออกไซด์, แผ่นยางเปล่า และแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - ผลึกอัดฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกัน	49
4.4 แสดงการเปรียบเทียบค่า Reflectance Spectra ของผลึกอัดฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ อนุภาค และไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25)	50
4.5 กราฟ XRD ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์, แผ่นยางเปล่า และแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกัน	51
4.6 กราฟ XRD ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์, แผ่นยางเปล่า, แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ และผลึกอัดฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกัน	52
4.7 ภาพแสดงลักษณะอัดฐานวิทยาของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์	53
4.8 ภาพแสดงลักษณะอัดฐานวิทยาของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - ผลึกอัดฐานไทเทเนียมไดออกไซด์	55
4.9 ภาพ EDS ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์	58
4.10 ภาพ EDS ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - ผลึกอัดฐานไทเทเนียมไดออกไซด์	62
4.11 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์อินทิลโก้คาร์บอน ที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ ในปริมาณที่แตกต่างกัน	64
4.12 แผนภูมิแท่งแสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์อินทิลโก้คาร์บอน ที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ ในปริมาณที่แตกต่างกัน	65
4.13 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์อินทิลโก้คาร์บอนของแผ่นยางผสม ที่มีปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ - ผลึกอัดฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ในปริมาณที่แตกต่างกัน	66

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 แผนภูมิแท่งแสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์อินดิโกคามีนของ แผ่นยางผสมที่มีปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียม ไดออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกัน	67
4.15 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลูของแผ่นยางผสม ที่มีปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ในปริมาณที่แตกต่างกัน	68
4.16 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลู ของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียม ไดออกไซด์ ในปริมาณที่แตกต่างกัน	69
4.17 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพในการใช้งานซ้ำ ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์	70
4.18 แสดงแผ่นยางผสมก่อนการใช้งาน หลังการใช้ครั้งที่ 2 และหลังการใช้งานครั้งที่ 5	70
ก-1 กราฟ FT-IR ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์	78
ก-2 กราฟ FT-IR ของผงผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์	79
ก-3 กราฟ FT-IR ของแผ่นยางเปล่า	79
ก-4 กราฟ FT-IR ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.01 กรัม	80
ก-5 กราฟ FT-IR ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03 กรัม	80
ก-6 กราฟ FT-IR ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.05 กรัม	81
ก-7 กราฟ FT-IR ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.10 กรัม	81
ก-8 กราฟ FT-IR ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.04 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.01 กรัม	82
ก-9 กราฟ FT-IR ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.02 กรัม	82
ก-10 กราฟ FT-IR ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.25 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.025 กรัม	83
ก-11 กราฟ FT-IR ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.01 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.04 กรัม	83

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก-12 กราฟ FT-IR ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.05 กรัม	84
ข-1 กราฟ XRD ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์	86
ข-2 กราฟ XRD ของแผ่นยางเปล่า	86
ข-3 กราฟ XRD ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.01 กรัม	87
ข-4 กราฟ XRD ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03 กรัม	87
ข-5 กราฟ XRD ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.05 กรัม	88
ข-6 กราฟ XRD ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.10 กรัม	88
ข-7 กราฟ XRD ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.04 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.01 กรัม	89
ข-8 กราฟ XRD ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.02 กรัม	89
ข-10 กราฟ XRD ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.025 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.025 กรัม	90
ข-11 กราฟ XRD ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.01 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.04 กรัม	90
ข-12 กราฟ XRD ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.05 กรัม	91
ค-1 ภาพ SEM ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์	93
ค-2 ภาพ SEM ของผงผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์	93
ค-3 ภาพ SEM ของแผ่นยางเปล่า	94
ค-4 ภาพ SEM ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.01 กรัม	94
ค-5 ภาพ SEM ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03 กรัม	95
ค-6 ภาพ SEM ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.05 กรัม	95
ค-7 ภาพ SEM ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.10 กรัม	96
ค-8 ภาพ SEM ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.04 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.01 กรัม	96

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก-9 ภาพ SEM ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.02 กรัม	97
ก-10 ภาพ SEM ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.025 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.025 กรัม	97
ก-11 ภาพ SEM ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.01 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.04 กรัม	98
ก-12 ภาพ SEM ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.05 กรัม	98
ง-1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีสังเคราะห์ อินดิโกคาร์มินของแผ่นยางเปล่า	100
ง-2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีสังเคราะห์ อินดิโกคาร์มินของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.01 กรัม	100
ง-3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีสังเคราะห์ อินดิโกคาร์มินของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03 กรัม	101
ง-4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีสังเคราะห์ อินดิโกคาร์มินของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.05 กรัม	101
ง-5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีสังเคราะห์ อินดิโกคาร์มินของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.10 กรัม	102
จ-1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีสังเคราะห์ อินดิโกคาร์มินของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.04 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.01 กรัม	104
จ-2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีสังเคราะห์ อินดิโกคาร์มินของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.02 กรัม และ	105
จ-3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีสังเคราะห์ อินดิโกคาร์มินของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.025 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.025 กรัม	106



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ช-2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.02 กรัม ในการนำมาใช้งานครั้งที่ 2	118
ช-3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.02 กรัม ในการนำมาใช้งานครั้งที่ 3	119
ช-4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.02 กรัม ในการนำมาใช้งานครั้งที่ 4	120
ช-5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.02 กรัม ในการนำมาใช้งานครั้งที่ 5	121

## คำย่อและสัญลักษณ์

E	คือ	พลังงานควอนตัม (Quantum Energy) , จูล
h	คือ	ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's Constant)
$\nu$	คือ	ความถี่ของคลื่นแสง, เฮิร์ตซ์ หรือ วินาที <sup>-1</sup>
$\lambda$	คือ	ความยาวคลื่นแสง, นาโนเมตร
c	คือ	ความเร็วของคลื่นแสง ( $2.9 \times 10^8$ m/s)
$h^+$	คือ	โฮลที่วาเลนซ์แบนด์ (Valence Band Hole)
$e^-$	คือ	อิเล็กตรอน (Electron)
$OH^-$	คือ	ไฮดรอกซิลไอออน (Hydroxyl Ion)
$OH^\bullet$	คือ	ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl Radical)
$H_2O$	คือ	น้ำ
$H^+$	คือ	ไฮโดรเจนไอออน (Hydrogen Ion)
$O_2$	คือ	ออกซิเจน
$O_2^{\bullet-}$	คือ	ซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนเรดิคัล (Superoxide Anion Radical)
$O_2H^\bullet$	คือ	เปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Perhydroxyl Radical)
$H_2O_2$	คือ	ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide)
$H^\bullet$	คือ	ไฮโดรเจนเรดิคัล (Hydrogen Radical)
$^\circ C$	คือ	องศาเซลเซียส
eV	คือ	หน่วยวัดพลังงาน โดยที่ 1 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) มีค่าเท่ากับ $1.6 \times 10^{-19}$ จูล (J)
$A_0$	คือ	ค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้น
$A_t$	คือ	ค่าการดูดกลืนแสงที่เวลาใดๆ

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันสีสังเคราะห์ (synthetic dyes) มากกว่า 10,000 ชนิดถูกสังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านอุตสาหกรรมต่างๆ อาทิเช่น อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมหมึกพิมพ์ อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมเครื่องหนัง อุตสาหกรรมเซรามิก และอุตสาหกรรมเครื่องแก้ว เป็นต้น ซึ่งอุตสาหกรรมต่างๆ เหล่านี้ล้วนแล้วแต่เป็นอุตสาหกรรมที่มีความจำเป็นและมีความสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจของแต่ละประเทศ โดยพบว่าสีสังเคราะห์ที่ถูกนำมาใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ทั่วโลกรวมกันจะมีปริมาณมากกว่า 700,000 เมตริกตันต่อปี เมื่อสีสังเคราะห์ถูกนำมาใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม พบว่าจะเกิดการสูญเสียขึ้นประมาณ 10 - 15% ในระหว่างกระบวนการที่มีการนำสีสังเคราะห์มาใช้ เช่น กระบวนการฟอกย้อม กระบวนการพิมพ์ และกระบวนการตกแต่งสำเร็จ เป็นต้น โดยสีสังเคราะห์จะถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งสีสังเคราะห์นั้นมีสารอินทรีย์ปนเปื้อนอยู่มากมายหลายชนิด ส่งผลให้แหล่งน้ำธรรมชาติเกิดการปนเปื้อนจากสีสังเคราะห์ และเป็นอันตรายโดยตรงต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำ ทำให้ระบบนิเวศขาดความสมดุลและเกิดความเสื่อมโทรม จนในที่สุดก็ก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำ (water pollution) ซึ่งนับได้ว่าเป็นปัญหาที่มีความรุนแรงและพบเห็นได้ตามเมืองใหญ่ ๆ ของแต่ละประเทศ การกำจัดสีสังเคราะห์นั้นอาจใช้เวลาในการบำบัดค่อนข้างนาน จึงทำให้เสียเวลาและเสียงบประมาณเป็นจำนวนมาก ถึงแม้ว่าทางด้านโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ จะมีวิธีการกำจัดสารปนเปื้อน หรือกระบวนการบำบัดน้ำเสียก่อนที่น้ำเสียนั้นจะถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำแล้วก็ตาม เช่น กระบวนการทางกายภาพ (physical process) กระบวนการทางเคมี (chemical process) กระบวนการทางชีววิทยา (biological process) และกระบวนการทางฟิสิกส์และเคมี (physical-chemical process) เป็นต้น แต่พบว่ากระบวนการต่าง ๆ เหล่านี้ยังมีประสิทธิภาพไม่ดีพอที่จะใช้ในการกำจัดสารพิษที่มีโครงสร้างซับซ้อนและมีเสถียรภาพสูงให้หมดสิ้นไปได้ ดังนั้นนักวิจัยจึงได้พยายามคิดค้นหากระบวนการอื่นที่มีประสิทธิภาพสูง และดีกว่ามาใช้ในการกำจัดสีสังเคราะห์ ที่ปนเปื้อนในน้ำ เพื่อใช้ในกระบวนการกำจัดสีสังเคราะห์ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide) เป็นสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ประเภท N-type มีความเสถียรทางเคมี มีประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในระดับสูง มีความเป็นพิษต่ำ สามารถเตรียมได้ง่าย สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ในปริมาณสูง ราคาถูก และยังมีคุณสมบัติฆ่าเชื้อโรคในรูปอนุภาคนาโน โดยกระบวนการใช้แสงยูวีฉายลงไปยังไทเทเนียมไดออกไซด์จะเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (photocatalysis process) ที่สามารถกำจัด

สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำหรืออากาศที่สัมผัสกับพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาค่อยแสงได้โดยไทเทเนียมไดออกไซด์มีลักษณะเป็นผงสีขาวและทึบแสง เป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำ มีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ คือ รูไทล์ (Rutile) อนาเทส (Anatase) และบรูคไคท์ (Brookite) ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้น เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีพลังงานแบนด์แก๊ป (band gap energy) ประมาณ 3.2 โวลต์ ดังนั้นการให้พลังงานกับระบบจึงต้องใช้พลังงานมากกว่าหรือเท่ากับแบนด์แก๊ป ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจึงจะเกิดขึ้นได้ เมื่อได้รับพลังงานจากแสงยูวี ไทเทเนียมไดออกไซด์จะสร้างสารที่มีความไวในการทำปฏิกิริยาสูงจากน้ำและออกซิเจนในอากาศ ได้แก่ อนุมูลไฮดรอกซิล และซูเปอร์แอนไอออน ซึ่งจะเข้าไปทำปฏิกิริยาทำลายแก๊สพิษต่าง ๆ อย่างไม่ทราบการนำไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบผงมาใช้งานนั้น พบว่าเป็นรูปแบบที่ไม่เหมาะสม เช่น อาจปลิวไปในอากาศได้ง่ายเมื่อโดนลมพัด ส่งผลให้เกิดอันตรายต่อระบบหายใจหรืออาจปนอยู่ในน้ำในรูปของสารแขวนลอย (suspension) แล้วไหลไปกับน้ำทำให้ยุ่งยากต่อการกำจัดและการแยกเอาผงของไทเทเนียมไดออกไซด์ออกไปจากระบบ จึงส่งผลเสียต่อระบบนิเวศ และท้ายที่สุดก็ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมขึ้น อีกทั้งในขั้นตอนการแยกเอาผงไทเทเนียมไดออกไซด์ออกไปจากระบบยังสิ้นเปลืองเวลาและค่าใช้จ่ายจำนวนมาก ดังนั้นนักวิจัยจึงได้พยายามคิดค้นหาวิธีการใหม่ๆ เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้งานไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบผง รวมทั้งเพื่อให้ได้ไทเทเนียมไดออกไซด์อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้กว้างขวางมากขึ้น โดยกระบวนการหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจมากเป็นพิเศษคือ กระบวนการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ลงบนซับสเตรท (substrates) ต่าง ๆ เช่น กระดาษ แก้ว ไม้ อะลูมิเนียม สแตนเลส พลาสติก และพอลิเมอร์ เป็นต้น ให้อยู่ในลักษณะของแผ่นฟิล์มบางเคลือบติดอยู่บนแผ่นซับสเตรท แต่พบว่ากระบวนการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ลงบนซับสเตรทนั้นต้องใช้กระบวนการที่มีความยุ่งยากซับซ้อน เครื่องมือที่มีเทคโนโลยีระดับสูงและราคาแพง ดังนั้นเพื่อให้ได้แผ่นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สามารถนำไปใช้งานได้จึงต้องลงทุนสูง นอกจากนี้ยังพบว่าซับสเตรทบางชนิดมีราคาแพงและนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างจำกัดทำให้ไม่คุ้มค่ากับการลงทุนที่สูงเกินไป

การเตรียมแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นการหลีกเลี่ยงการนำไทเทเนียมไดออกไซด์มาใช้ในรูปแบบผง และเป็นการหลีกเลี่ยงความสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายโดยไม่จำเป็น เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสในการสลายสารพิษต่าง ๆ ในสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการกำจัดสีสังเคราะห์และสิ่งปนเปื้อนต่าง ๆ ในแหล่งน้ำ ดังนั้นความสำคัญของงานวิจัยชิ้นนี้จึงได้คิดค้นวิธีการเตรียมแผ่นผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีการเตรียมที่ง่าย ๆ โดยใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ และน้ำยางชันเป็นวัสดุตั้งต้น เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสีสังเคราะห์ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดนี้ จึงได้ทำการผสมผลึกออสถูฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมลงไป สาเหตุที่ผู้วิจัยนำผลึกออสถูฐานไทเทเนียมไดออกไซด์มาใช้เป็นตัวดูดซับ

เนื่องจากผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์มีสมบัติที่โดดเด่นคือ มีความไม่เป็นระเบียบ ทำให้มีพื้นที่ผิวสูงและมีความเป็นรูพรุนที่สูง จึงสามารถดูดซับสารพิษต่างๆ เช่น กำจัดสีสังเคราะห์ในน้ำ แก๊สพิษ หรือโลหะหนักได้เป็นอย่างดี

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาวิธีการและหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ และไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์
2. เพื่อศึกษาปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมในการเตรียมแผ่น เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดสีสังเคราะห์ในน้ำ โดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส
3. เพื่อศึกษาและตรวจสอบคุณลักษณะเฉพาะของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้ โดยการใช้เทคนิคต่างๆ เช่น FT-IR, XRD, SEM, และ EDX เป็นต้น
4. เพื่อศึกษาสมบัติและประสิทธิภาพการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสในการกำจัดสีสังเคราะห์ด้วยเทคนิค UV-Visible Spectroscopy
5. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานซ้ำของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ค้นคว้าเอกสารและรวบรวมผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. เตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ และไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์
3. ศึกษาสมบัติทางกายภาพของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้ โดยใช้เทคนิค FT-IR, XRD, SEM, และ EDX เป็นต้น
4. ศึกษาสมบัติทางกายภาพของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้ โดยใช้เทคนิค FT-IR, XRD, SEM, และ EDX เป็นต้น
5. ทดสอบความสามารถในการเป็นคะตะลิสต์ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้งหมด และศึกษาประสิทธิภาพในการใช้งานซ้ำ
6. วิเคราะห์ผลการวิจัย อภิปรายผลการวิจัย และสรุปผลการวิจัย
7. เขียนรายงาน และนำเสนอผลงานวิจัย

## 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รับองค์ความรู้และมีความเข้าใจมากขึ้นในเรื่องของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่มีความเกี่ยวข้องกับการสลายสีสังเคราะห์ในน้ำ
2. สามารถนำแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ และแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่เตรียมได้ไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสในการกำจัดสีสังเคราะห์ในน้ำ
3. เป็นการลดต้นทุนและความยุ่งยากในการเตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อยู่ในรูปที่เหมาะสม และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในการกำจัดสีสังเคราะห์ในน้ำได้
4. ทราบถึงประสิทธิภาพของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ในการกำจัดสีสังเคราะห์ในน้ำ
5. เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อมาใช้ในการกำจัดสีสังเคราะห์ในน้ำจากโรงงานอุตสาหกรรมได้ดียิ่งขึ้น

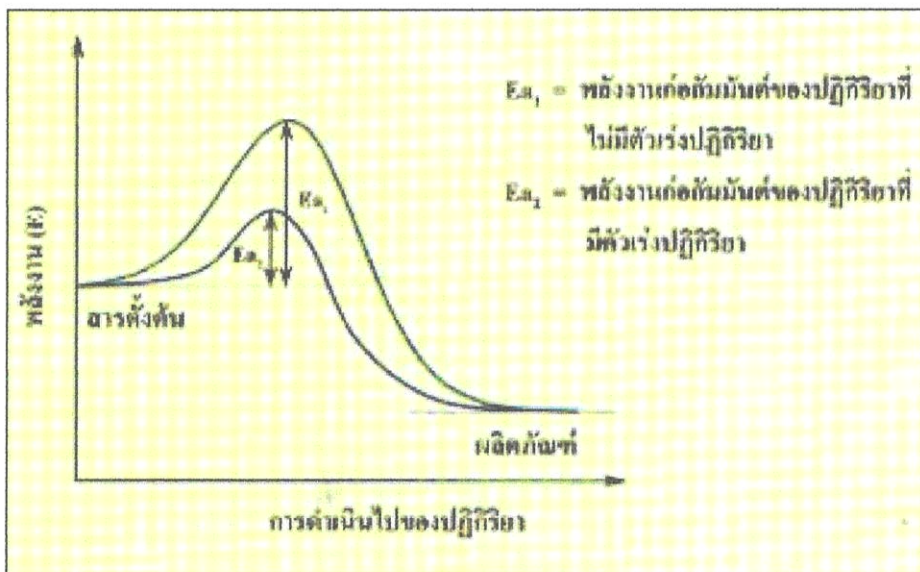
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

##### 2.1.1 กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis)

กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis Process) เป็นกระบวนการการเกิดปฏิกิริยาโดยใช้ตัวคะตะลิสต์ ซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ โดยการกระตุ้นด้วยแสง ตัวเร่งปฏิกิริยานี้ทำหน้าที่ลดพลังงานก่อกัมมันต์ของการเกิดปฏิกิริยา รูปที่ 2.1 แสดงการเกิดออกซิเดชัน (oxidation) ของสารอินทรีย์ที่มีและไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา และแสดงพลังงานกระตุ้น (Activation Energy,  $E_a$ ) ของปฏิกิริยาที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งมีค่ามากในปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา และพลังงานของผลิตภัณฑ์จะต่ำกว่าพลังงานของสารอินทรีย์ ตัวเร่งปฏิกิริยาจะเร่งอัตราเร็วของปฏิกิริยา โดยการลดพลังงานก่อกัมมันต์อีกทั้งตัวมันเองยังตอบสนองต่อแสง กล่าวคือจะเกิดการกระตุ้นได้โดยการถ่ายเทพลังงานที่มากกว่าพลังงานแบนด์แก๊ป (Band Gap Energy)

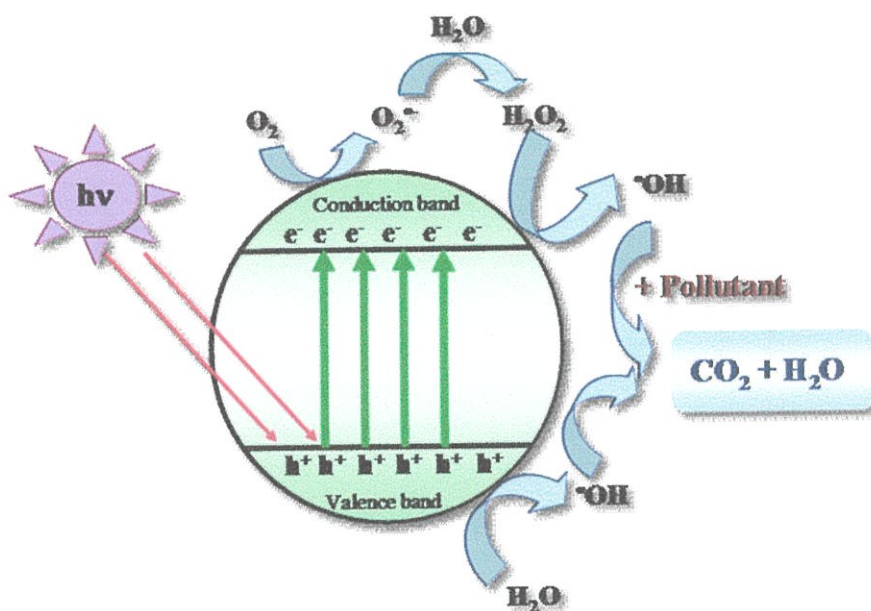


รูปที่ 2.1 พลังงานของการเกิดออกซิเดชันของสารอินทรีย์ที่มีคะตะลิสต์ และสารอินทรีย์ที่ไม่มีคะตะลิสต์

(ที่มา: <http://www.thaigoodview.com/library/studentshow/2549/nongkhai/kudbongphittayakarn/p04.htm>)

### 2.1.2 หลักการของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส (Fundamental of photocatalyst reaction)

หลักการของกระบวนการนี้ คือ การให้พลังงานแสงกับเซมิคอนดักเตอร์ (โฟโตคะตะลิสต์) มากกว่าหรือเท่ากับค่าพลังงานแบนด์แก๊ป (Band Gap Energy) เพื่อทำให้เกิดการกระตุ้นอิเล็กตรอนจากวาเลนซ์แบนด์ (Valence Band) ไปยัง คอนดักชันแบนด์ (Conduction Band) ทำให้เกิดเป็น  $e^-_{c.b.} - h^+_{v.b.}$  pair ขึ้น ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์และตัวรีดิวซ์ที่แรงโดยศักย์ไฟฟ้าที่  $h^+_{v.b.}$  มีค่า +1.0 ถึง +3.5 โวลต์ ส่วน  $e^-_{c.b.}$  มีค่า +0.5 ถึง -1.5 โวลต์ (Herrmann, et al., 1997) ทำให้สารพิษต่าง ๆ น้ำ และออกซิเจนเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่  $e^-_{c.b.} - h^+_{v.b.}$  pair และดูดซับที่ผิวของเซมิคอนดักเตอร์ หลังจากนั้นสารพิษต่าง ๆ ที่ดูดซับอยู่บนผิวของเซมิคอนดักเตอร์ก็จะเกิดปฏิกิริยากันทำให้สารพิษเกิดการสลายตัวได้ ดังรูปที่ 2.2

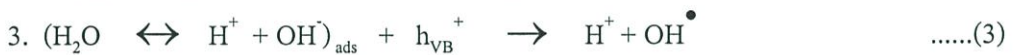
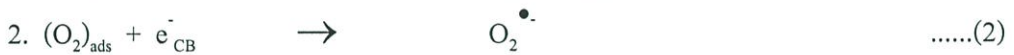


รูปที่ 2.2 แสดงกลไกกระบวนการเฮเทอโรจีเนียสโฟโตคะตะไลซิส

(ที่มา: Daneshvar, et al. 2004)

อย่างไรก็ตามในกระบวนการเฮเทอโรจีเนียสโฟโตคะตะลิสต์นิยมใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นโฟโตคะตะลิสต์ เพราะมีความเสถียรต่อปฏิกิริยาเคมีและทางชีวภาพ รวมทั้งทนต่อการกัดกร่อนต่อสารเคมีและพลังงานแสง นอกจากนี้ยังราคาไม่แพง และไม่เปื้อนพิษต่อสิ่งแวดล้อม ในขณะที่โลหะซัลไฟด์จะไม่ทนต่อการกัดกร่อน ส่วนเฟอร์ริกออกไซด์ ถึงแม้จะมีราคาไม่แพงแต่ก็ไม่ทนต่อการกัดกร่อนเช่นกัน นอกจากไทเทเนียมไดออกไซด์แล้ว ที่นิยมรองลงมาก็คือ ซิงค์ออกไซด์ แต่จะมีข้อเสีย คือ ไม่เสถียรต่อสารละลายเคมีบางชนิด และยังเกิด  $Zn(OH)_2$  ที่ผิวของซิงค์ออกไซด์ทำให้ความสามารถในการเป็นโฟโตคะตะลิสต์ลดลง (Wang, et al., 1998)

กระบวนการเฮเทอโรจีเนียสโฟโตคะตะลิสต์ของสารอินทรีย์ปกติจะเกิดผ่าน  $\text{OH}^\bullet$  ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของ  $h_{v,b}^+$  กับไฮดรอกไซด์ไอออนหรือน้ำ ซึ่ง  $\text{OH}^\bullet$  เป็นกลางและว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังสามารถเกิดปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ได้หลายตัว ดังนั้นจึงเป็น oxidizing agent ที่ดี สามารถที่จะเกิดปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่มากูดซับที่  $h_{v,b}^+$  ทำให้สารอินทรีย์เกิดการสลายตัวได้ ส่วนที่  $e_{c,b}^-$  จะมีออกซิเจนมาจับเกิดเป็น  $\text{O}_2^{\bullet-}$  หรือ  $\text{O}_2^-$  ซึ่งอาจจะไปทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์โดยตรงหรืออาจจะไปรับโปรตอนเกิดเป็น Hydroperoxide Radicals และ Hydroxyl radicals ซึ่งเป็นการป้องกันการเกิด Recombination ของ  $e_{c,b}^- - h_{v,b}^+$  pair ที่จะไปยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส (Semeiro, et al., 2004) ซึ่งกลไกในการสลายสารพิษแสดงดังสมการต่อไปนี้



(ที่มา: Houas, et al., 2001)

#### ข้อดีของกระบวนการเฮเทอโรจีเนียสโฟโตคะตะไลซิส

- ใช้อุณหภูมิต่ำและใช้เวลาสั้นเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่น
- เมื่อเปรียบเทียบกับในช่วงเวลาสั้นๆ วิธีนี้จะทำให้เกิดการสลายตัวสูง
- สามารถที่จะทำเป็นกระบวนการแบบต่อเนื่อง
- สามารถใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ได้

(ที่มา: Wang, et al., 1998)

### 2.1.3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในการกำจัดสารอินทรีย์ แสดงได้ดังนี้

การบำบัดสารอินทรีย์



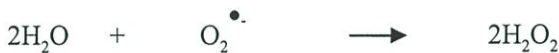
ซึ่งผิวของสารกึ่งตัวนำที่มีโฮลเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไฮดรอกซิลไอออน ( $\text{OH}^-$ ) และน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) เกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $\text{OH}^\bullet$ ) ดังสมการ



ส่วนที่ผิวของสารกึ่งตัวนำที่มีอิเล็กตรอน จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับออกซิเจนที่อยู่บนผิวของสารกึ่งตัวนำ เกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัลและเปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล ดังสมการ



และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แสดงดังสมการ



ในสภาวะที่มีออกซิเจนไม่เพียงพอ โฟตอนที่เกิดจากการแตกตัวของน้ำจะเข้ามารับอิเล็กตรอนแทน เกิดเป็นไฮโดรเจนเรดิคัล ดังสมการ



การรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮล (Electron-Hole Recombination)



ไฮดรอกซิลเรดิคัลเป็นสารออกซิไดซ์หลักในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพราะไวต่อปฏิกิริยารองจากฟลูออไรด์ไอออน ( $\text{F}^-$ ) แต่สูงกว่าคลอไรด์ไอออน ( $\text{Cl}^-$ ) และทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ได้ทุกชนิด

$\text{h}^+$  คือ โฮลที่วาเลนซ์แบนด์ (Valence Band Hole)

$\text{e}^-$  คือ อิเล็กตรอน (Electron)

$\text{OH}^\bullet$  คือ ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl Radical)

$\text{O}_2^{\bullet -}$  คือ ซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล (Superoxide Ion Radical)

$\text{HO}_2^\bullet$  คือ เปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Perhydroxyl Radical)

$\text{H}^\bullet$  คือ ไฮโดรเจนเรดิคัล (Hydrogen Radical)

เนื่องจากไฮดรอกซิลเรดิคัลและโซลที่ผิวของตัวคะตะลิสต์มีสมบัติเป็นประจุบวก การออกซิไดซ์ของโซลกับไฮดรอกไซด์ไอออนได้ไฮดรอกซิลเรดิคัลและขณะเดียวกัน โซลเกิดจากการออกซิไดซ์กับสารอินทรีย์ด้วย ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโฟโตคะตะไลซิสจึงเกิดขึ้นได้ทั้ง 2 ทาง คือ

1.) การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโซลกับไฮดรอกไซด์ไอออนหรือน้ำได้ไฮดรอกซิลเรดิคัลและปฏิกิริยาของอิเล็กตรอนกับออกซิเจนหรือไฮโดรเจนไอออนได้ซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัลเปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัลหรือไฮโดรเจนเรดิคัล

2.) การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตรงของสารอินทรีย์ที่ดูดติดบนตัวคะตะลิสต์กับโซล ซึ่งความสามารถของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์มีมากกว่าความสามารถของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนไทเทเนียมไดออกไซด์หรือตัวคะตะลิสต์อื่น

Kwaguchi และ Matthews สรุปว่า การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของไทเทเนียมไดออกไซด์นั้น ตัวปฏิกิริยาหลักที่เกิดคือ ไฮดรอกซิลเรดิคัลกับสารอินทรีย์ส่วนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโซลกับสารอินทรีย์โดยตรงเป็นปฏิกิริยาองซึ่งเกิดได้น้อยกว่าดังนั้นในโฟโตคะตะไลซิสมี การเกิดปฏิกิริยาของไฮดรอกซิลเรดิคัลและสารอินทรีย์จะเกิดได้ในตำแหน่งต่างๆ ดังต่อไปนี้

- ไฮดรอกซิลเรดิคัลอยู่ที่ผิวและสารอินทรีย์อยู่ที่ผิวตัวคะตะลิสต์
- ไฮดรอกซิลเรดิคัลไม่อยู่ที่ผิวแต่สารอินทรีย์อยู่ที่ผิวตัวคะตะลิสต์
- ไฮดรอกซิลเรดิคัลอยู่ที่ผิวแต่สารอินทรีย์ไม่อยู่ที่ผิวตัวคะตะลิสต์
- ไฮดรอกซิลเรดิคัลไม่อยู่ที่ผิวและสารอินทรีย์ไม่อยู่ที่ผิวตัวคะตะลิสต์

## 2.2 พลังงานแสง

การฉายแสงในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสนั้น เป็นการให้พลังงานกับระบบในรูปแบบพลังงานโฟตอน (Photon Energy) มากพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาขึ้นได้ ซึ่งพลังงานดังกล่าวนี้ เรียกว่า พลังงานควอนตัม สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้ (Goswami และคณะ, 2543 อ้างอิงในฉลาด และชูลิทธิ, 2648)

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

เมื่อ	E	คือ	พลังงานควอนตัม (Quantum Energy) , จูล
	h	คือ	ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's Constant) = $6.625 \times 10^{-34}$ , จูล/วินาที ( $\text{Js}^{-1}$ )
	$\nu$	คือ	ความถี่ของคลื่นแสง, เฮิร์ตซ์ (Hz) หรือวินาที <sup>-1</sup> ( $\text{s}^{-1}$ )
	$\lambda$	คือ	ความยาวคลื่นแสง, เมตร (m)
	c	คือ	ความเร็วของคลื่นแสง = $2.997 \times 10^8$ , เมตร/วินาที (m/s)

ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสที่ใช้สารไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวคะตะลิสต์นั้น เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีพลังงานแบนด์แก๊ปประมาณ 3.2 โวลต์ ดังนั้นการให้พลังงานกับระบบจึงต้องให้พลังงานมากกว่าหรือเท่ากับพลังงานแบนด์แก๊ป ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจึงจะเกิดขึ้นได้ ซึ่งช่วงของแสง UV ที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 400 นาโนเมตรจะให้ค่าพลังงานที่มากกว่าหรือเท่ากับพลังงานแบนด์แก๊ปของไทเทเนียมไดออกไซด์ แต่เนื่องจากแสงอาทิตย์ที่ส่งมายังพื้นผิวโลกมีช่วงแสงที่เป็น UV ในปริมาณน้อยมาก คือ เฉพาะช่วง 350-400 นาโนเมตรเท่านั้น ปัจจุบันจึงมีงานวิจัยที่มุ่งเน้นการปรับปรุงไทเทเนียมไดออกไซด์ให้มีความสามารถที่จะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงแสงอาทิตย์เพื่อลดการใช้หลอดไฟยูวีในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

## 2.3 ชนิดของโฟโตคะตะไลซิส

โฟโตคะตะไลซิสสามารถแยกได้ 2 ประเภท เมื่อพิจารณาจากสถานะของตัวคะตะลิสต์ ดังนี้

**2.3.1 โฟโตคะตะไลซิสแบบเอกพันธ์ (Homogeneous Photocatalysis)** เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวคะตะลิสต์ซึ่งมีสถานะเดียวกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด (โดยทั่วไปแล้วจะเป็นของเหลว) เช่นการย่อยสลาย 2,4-Dinitrofluorene โดยใช้ UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

**2.3.2 โฟโตคะตะไลซิสแบบวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous Photocatalysis)** เป็นกระบวนการที่เกี่ยวกับการกำจัดหรือสลายสารพิษต่างๆ ในสิ่งแวดล้อม เช่น สารอะโรมาติก แอลกอฮอล์ คลอโรฟอร์ม ยาฆ่าแมลง โลหะหนัก และสีสังเคราะห์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการใช้สารเซมิคอนดักเตอร์ (Semiconductor Material) เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เฟอริก-ออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และ เซอร์โคเนียมออกไซด์ (ZrO<sub>2</sub>) หรือโลหะซัลไฟด์ มาเป็นตัวคะตะลิสต์

### ข้อดีของกระบวนการเฮเทอโรจีเนียสโฟโตคะตะไลซิส

- ใช้อุณหภูมิต่ำและใช้เวลาน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่น
- เมื่อเปรียบเทียบในช่วงเวลาสั้นๆ วิธีนี้จะทำให้เกิดการสลายตัวสูง
- สามารถที่จะทำเป็นกระบวนการแบบต่อเนื่อง
- สามารถใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ได้

(ที่มา: Wang, et al., 1998)

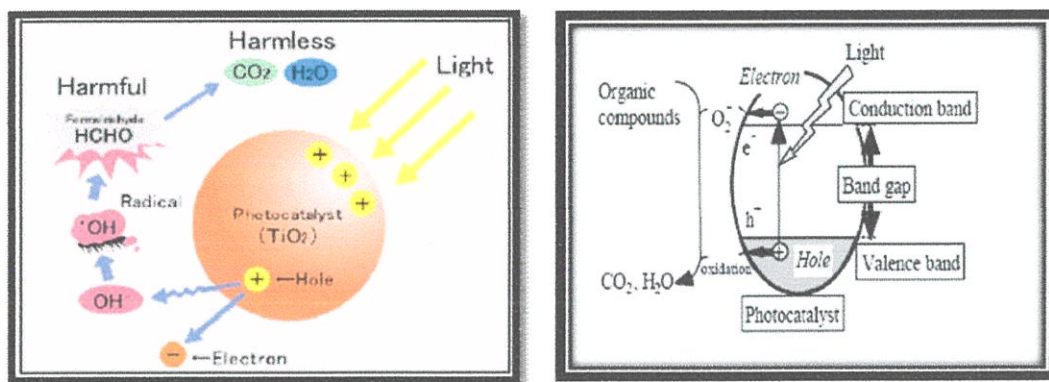
## 2.4 ชนิดของตัวคะตะลิสต์

สารที่ใช้เป็นตัวคะตะลิสต์ ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ได้แก่

- 1) โลหะทรานซิชัน (Transition Metal) เช่น ทองแดง โครเมียม นิกเกิล เป็นต้น
- 2) สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) สังกะสีออกไซด์ (ZnO) เป็นต้น

องค์ประกอบของโลหะตัวนำและสารกึ่งตัวนำประกอบด้วยวาเลนซ์แบนด์ (Valence Band) และคอนดักชันแบนด์ (Conduction Band) ในโลหะตัวนำจะมีวาเลนซ์แบนด์และคอนดักชันแบนด์ติดกัน แต่ในสารกึ่งตัวนำวาเลนซ์แบนด์และคอนดักชันแบนด์จะไม่ติดกัน โดยเกิดเป็นช่องว่างซึ่งเรียกว่าแบนด์แก๊ป (Band Gap) เมื่ออิเล็กตรอน (Electron,  $e^-$ ) ที่อยู่ในวาเลนซ์แบนด์ได้รับพลังงานโฟตอนจากแสง ( $h\nu$ ) อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังคอนดักชันแบนด์ ในขณะที่เดียวกันที่บริเวณวาเลนซ์แบนด์จะเกิดโฮล (Hole,  $h^+$ ) ซึ่งเป็นประจุบวก สามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระในวาเลนซ์แบนด์ ส่วนคอนดักชันแบนด์ อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่มาจากวาเลนซ์แบนด์เคลื่อนที่อย่างเป็นอิสระทั่วคอนดักชันแบนด์เช่นกัน ปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน - โฮล (Electron - Hole Pairs,  $e^-/h^+$ ) สามารถเคลื่อนที่ไปมาระหว่างวาเลนซ์แบนด์และคอนดักชันแบนด์ได้ง่าย และรวดเร็วเพราะว่าไม่มีแบนด์แก๊ปเหตุนี้จึงเป็นสาเหตุให้  $e^-/h^+$  รวมตัวกันใหม่ได้ง่ายสำหรับโลหะตัวนำ ในทางตรงกันข้ามการรวมตัวกันใหม่ของ  $e^-/h^+$  ในสารกึ่งตัวนำเกิดได้ยาก เพราะว่ามีแบนด์แก๊ปคั่นอยู่ทำให้  $e^-/h^+$  แยกจากกันได้นานขึ้น ข้อแตกต่างของพลังงานแบนด์แก๊ปของโลหะตัวนำสารกึ่งตัวนำและฉนวนแยกได้ยากขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายปัจจัยได้แก่ระดับพลังงานแบนด์แก๊ป ระดับพลังงานคอนดักชันแบนด์ และระดับพลังงานวาเลนซ์แบนด์

ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในน้ำประกอบด้วยแสงที่ส่องผ่านน้ำไปยังตัวคะตะลิสต์ ซึ่งมีพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ที่สูงกว่าพลังงานแบนด์แก๊ปของตัวคะตะลิสต์ ซึ่งอิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นจากวาเลนซ์แบนด์ให้เคลื่อนที่ไปยังคอนดักชันแบนด์ ผลคือทำให้เกิด  $e^-/h^+$  ซึ่งจะวิ่งกระจายอยู่ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำปฏิกิริยาที่เกิดบนผิวคอนดักชันแบนด์ และปฏิกิริยาที่เกิดในสารละลายเกิดขึ้น ดังนั้นอิเล็กตรอนจะเคลื่อนจากคอนดักชันแบนด์ไปยังตัวรับอิเล็กตรอน (Electron Acceptor) ในสารละลายจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ส่วนอีกด้านหนึ่งคือวาเลนซ์แบนด์ซึ่งมี  $h^+$  จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) โดยตัวสารละลายทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน (Electron Donor) ในสภาวะปกติความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของอิเล็กตรอนที่คอนดักชันแบนด์ไม่มีศักยภาพพอที่จะบำบัดสารอินทรีย์ได้ แต่เนื่องจากในระบบบำบัดมีออกซิเจนละลายน้ำอยู่ ( $O_2$ ) ออกซิเจนนี้จะเป็นตัวรับ  $e^-$  เกิดปฏิกิริยารีดักชันได้เป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล (Superoxide Radical,  $O_2^{\bullet-}$ ) ซึ่งเป็นตัวออกซิแทนซ์ที่แรงมาก สามารถเกิดปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ต่างๆได้ แต่ในทางตรงกันข้าม  $h^+$  ที่วาเลนซ์แบนด์เป็นตัวออกซิเดนต์ที่แรงมากเช่นกัน



รูปที่ 2.3 แสดงกลไกของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสบนสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์  
(ที่มา : ฉลาดและชูสิทธิ์, 2548)

## 2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการออกซิเดชันของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

### 2.5.1 ชนิดของสารพิษ (Type of Pollutants)

สารพิษแต่ละชนิดมีศักยภาพในการถูกสลายแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดและองค์ประกอบของสารพิษชนิดนั้นๆ อย่างเช่น Prairie et al. (2537) ได้ทำการทดสอบการกำจัดโลหะหนัก 6 ชนิด คือ เงิน แคลเมียม ทองแดง โปรท นิกเกิล และแพลทินัม พบว่ากระบวนการโฟโตคะตะไลซิสที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถกำจัดปรอทและทองแดงได้ ส่วนตัวอื่น ๆ นั้นต้องใช้กระบวนการที่ยุ่งยากเพื่อที่จะกำจัด

### 2.5.2 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา (Type of Catalyst)

สารกึ่งตัวนำที่นำมาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสมีหลายชนิด แต่ที่นิยมนำมาใช้คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ เพราะมีคุณสมบัติที่ดีคือ มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ ราคาถูก ไม่เป็นพิษ ทนต่อการกัดกร่อน มีพื้นที่ผิวมาก มีแบนแก๊พกว้าง จึงสามารถป้องกันการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนกับโฮลได้ดี นอกจากนี้ยังสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้หลายครั้ง

### 2.5.3 ปริมาณตัวคะตะลิสต์ (Catalyst Dosage)

ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสได้ ถ้าหากอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์มากเกินไป จะไปขัดขวางแสงยูวีที่ส่องลงไปในการสลายทำให้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกกระตุ้นด้วยแสง และปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคอลลดลง ซึ่งปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสส่วนใหญ่จะมีปริมาณความเข้มข้น 1-5 กรัมต่อลิตร

### 2.5.4 ความเข้มแสง (Light Intensity)

ปริมาณของความเข้มแสงต่อการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มแสงมากขึ้นจะทำให้เกิดอัตราการย่อยสลายเพิ่มขึ้น

### 2.5.5 อุณหภูมิ (Temperature)

การเพิ่มอุณหภูมิทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเกิดอิเล็กตรอนกับโฮลมีมากกว่าการรวมตัวกัน ทำให้โมเลกุลเกิดการชนกันบ่อยครั้งขึ้นและช่วยลดพลังงานการกระตุ้นของของปฏิกิริยา แต่การเพิ่มขึ้นของอัตราการเกิดปฏิกิริยาก็ไม่ได้เกิดขึ้นทุกช่วงของการเพิ่มอุณหภูมิ โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่อช่วงของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นไม่เกิน 21 องศาเซลเซียส ( $^{\circ}\text{C}$ )

### 2.5.6 ปริมาณของออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (Dissolved, DO)

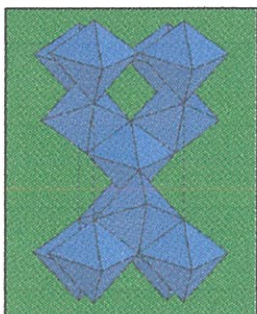
ออกซิเจนที่ละลายในน้ำและตัวรับอิเล็กตรอนอื่นๆ จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโต-คะตะไลซิสเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีโมเลกุลที่จะเข้าทำปฏิกิริยากับโฮลได้เป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลเพิ่มมากขึ้น และทำให้อิเล็กตรอนกับโฮลเกิดการรวมตัวกันได้ยากขึ้น

### 2.5.7 ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

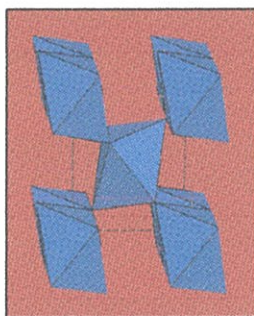
พีเอชมีผลต่อต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดสารอินทรีย์ โดยพบว่าในสภาวะที่เป็นด่างมีอัตราการย่อยสลายของสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น เพราะว่าเป็นการเพิ่มไฮดรอกไซด์ไอออน และเกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้น

## 2.6 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide, $\text{TiO}_2$ )

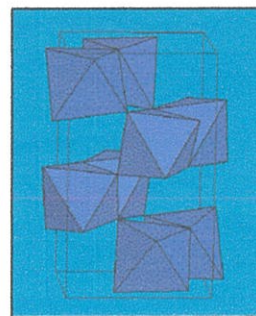
ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide) หรือ ไทเทเนีย (Titania) มีลักษณะเป็นผงสีขาว มีมวลโมเลกุล 79.9 กรัมต่อโมล เป็นสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ประเภท N-type มีคุณสมบัติเป็นสารเคมีที่เสถียรต่อปฏิกิริยาเคมีไม่เป็นพิษ และราคาไม่แพง ไทเทเนียมไดออกไซด์มีผลึก 3 แบบ คือ อนาเทส (Anatase) รูไทล์ (Rutile) และ บรูคไคท์ (Brookite) มีโครงสร้างดังแสดงในรูป 2.4



อนาเทส



รูไทล์



บรูคไคท์

รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์มีผลึก 3 แบบ คือ อนาเทส รูไทล์ บรูคไคท์

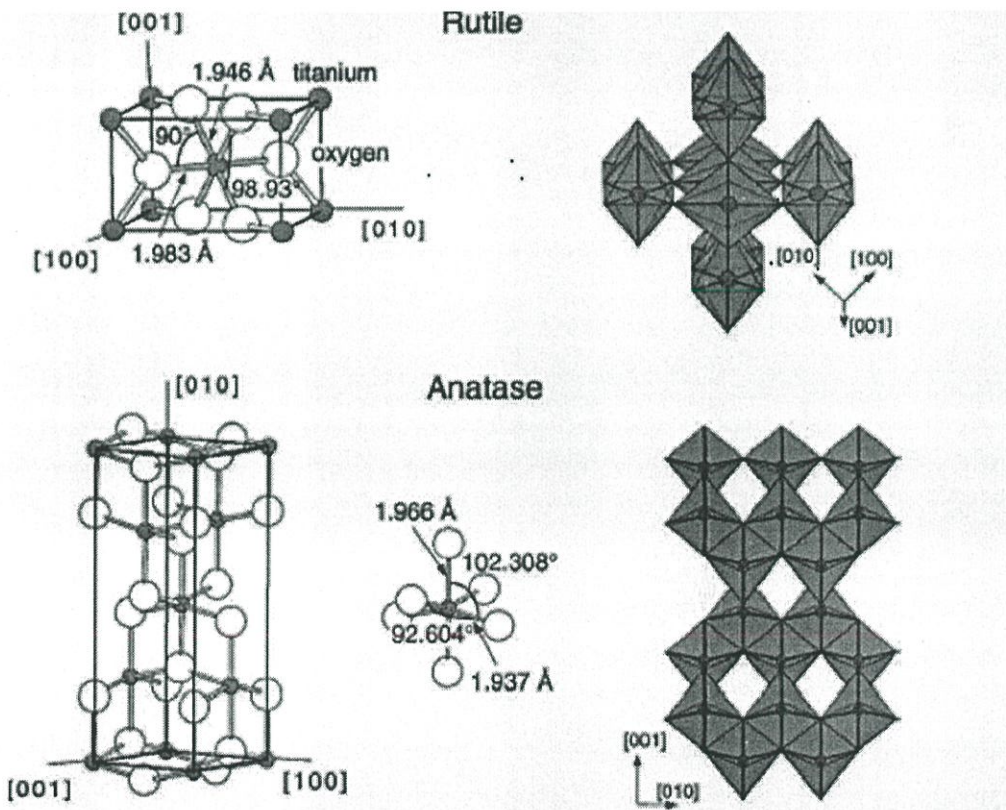
(ที่มา: <http://ruby.colorado.edu>)

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพที่สำคัญของไทเทเนียมไดออกไซด์

สมบัติที่ศึกษา	Rutile	Anatase	Brookite
โครงสร้างผลึก	Tetragonal	Tetragonal	Orthorhombic
ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	4.25	3.894	4.170
Hardness Mohs scale	5.5 - 6.0	5.5 - 6.0	7.0 - 7.5
ดัชนีหักเห	2.71	2.52	-
จุดหลอมเหลว	1858 °c	สามารถเปลี่ยนเป็นรูไทล์เมื่ออุณหภูมิสูง	-
ช่องว่างแถบพลังงาน	3.0 eV	3.2 eV	-

(ที่มา: อุษา สุขขา, 2551)

ขนาดมิติของรูปทรงของโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์  $a = b = 4.587 \text{ \AA}$  ,  $c = 9.502 \text{ \AA}$  ในโครงสร้างทั้งคู่เป็นรูปทรงแปดเหลี่ยมบิดเบี้ยวบาง ความยาวของพันธะและมุมของรูปทรงแปดเหลี่ยมที่ประสานกับอะตอมของ Ti ดังรูป (ด้านซ้าย) และโครงสร้างที่เป็นรูปทรงแปดหน้า ดังรูป (ด้านขวา)



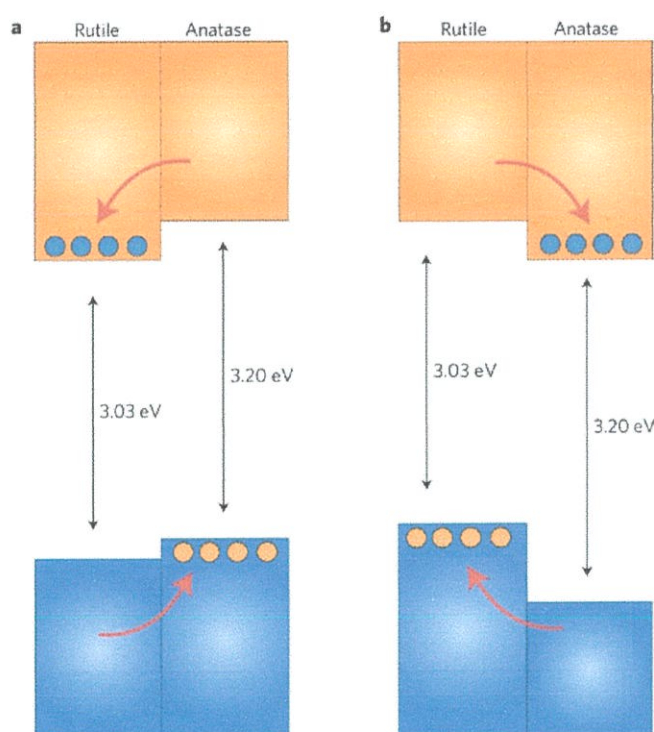
รูปที่ 2.5 แสดงมิติของรูปทรงของโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ และอนาเทส (ที่มา: Diebold (2003))

ผลึกแต่ละแบบของไทเทเนียมไดออกไซด์มีความสามารถในการเป็นโฟโตคะตะลิสต์แตกต่างกัน โดยอนาเทสมีความสามารถในการเป็นคะตะลิสต์ดีกว่ารูไทล์และบรูไนท์ ตามลำดับ (Zhang, et al., 2003) โดยโครงสร้างผลึกที่นำมาใช้สำหรับกำจัดสีสังเคราะห์ คือ โครงสร้างแบบอนาเทส และรูไทล์ มีการจัดเรียงตัวของอะตอมไทเทเนียมเป็นแบบ Orthorhombic และอะตอมออกซิเจนเข้าไปเติมเต็มในช่องว่างแบบ Octahedron โดยที่มุมระหว่างแกนของ Octahedron ในแบบของรูไทล์ มีค่าเท่ากับ 90 และ 81.21 องศา ในขณะที่มุมระหว่างแกนเท่ากับ 78.12 และ 92.43 องศา โดยโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส และแบบรูไทล์นั้น มีความแตกต่างกันทางด้านหักเหของแสง ความหนาแน่น และการทำปฏิกิริยาของแสง แบบรูไทล์มีรูปผลึกที่แน่นอน สามารถดูดกลืนแสงยูวีได้น้อยกว่าแบบอนาเทส และแบบรูไทล์ มีลักษณะค่อนข้างสี่เหลี่ยม สำหรับการนำไทเทเนียมไดออกไซด์ไปใช้กับแสงที่มีความเข้มสูง เพราะว่าดัชนีการหักเหสูง และการกระจายของแสงของผลึกแบบรูไทล์ มีผลกระทบในตัวกลางสารอินทรีย์มากกว่าแบบอนาเทส ประมาณ 20% นอกจากนี้จากการศึกษาการสลายสีสังเคราะห์ชนิดต่างๆโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นคะตะลิสต์ พบว่าการสลายของสีสังเคราะห์ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ชนิดของไทเทเนียมไดออกไซด์ ค่า pH ของสารละลายสีสังเคราะห์ ความเข้มข้นของคะตะลิสต์ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีสังเคราะห์ และความเข้มของแสง UV เป็นต้น (Muruganandham, et al., 2005; Toor et al., 2006; Faisal, et al., 2007)

จากการที่ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันนั้น ส่งผลทำให้มีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาทางด้านเทอร์โมไดนามิกส์ พบว่าพลังงานเสรีของกิบส์ (Gibbs Free Energy) ของการเกิดที่สภาวะมาตรฐาน สำหรับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส มีค่า -884.5 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งมากกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ที่มีค่า -889.5 กิโลจูลต่อโมล อีกทั้งความหนาแน่นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสมีค่าเท่ากับ 3.894 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร คุณสมบัติที่แตกต่างกันดังกล่าวจึงทำให้โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบอนาเทสนั้นมีพลังงานแบนด์แก๊ปเท่ากับ 3.23 โวลต์ ซึ่งสูงกว่าโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ที่ค่าเท่ากับ 3.02 โวลต์ จึงทำให้โครงสร้างผลึกแบบรูไทล์มีค่าวงไวในการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ โครงสร้างผลึกแบบรูไทล์จะเกิดการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮลได้ง่าย ทั้งยังมีความสามารถในการติดผิวต่ำกว่าโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส ในปัจจุบันจึงนิยมใช้โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบอนาเทสมากกว่าแบบอื่น โครงสร้างผลึก ขนาดอนุภาค ผิวหน้าผลึก ปริมาณการรวมเป็นผลึกและความบริสุทธิ์ของกระบวนการผลิตถูกควบคุมให้เหมาะสมกับการใช้งาน ไทเทเนียมไดออกไซด์มีลักษณะทางเคมี ที่ดีทำให้มีผลข้างเคียงน้อยมาก จึงปลอดภัยและใช้งานง่าย

### 2.6.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide Degussa P25)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 เป็นไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดหนึ่งที่มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ได้มากที่สุด มีเฟสที่เป็นผลึกอยู่ด้วยกัน 2 เฟส คือ อนาเทส (Anatase) และรูไทล์ (Rutile) โดยอัตราส่วนของสองเฟสนี้จะอยู่ที่ประมาณ 70 : 30 หรือ 80 : 20 ดังรูปที่ 2.5 และเนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 มีการเชื่อมต่อกันระหว่างสองเฟส จึงทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 มีระดับพลังงานกระตุ้นในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ที่สูง เนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮลเกิดการแยกออกจากกันได้ดี จึงเพิ่มความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ให้สูงขึ้นและลดการเกิดการรวมตัวกัน (Recombination) ทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงมีความสามารถในการสลายสีสังเคราะห์ได้ดีมากขึ้น

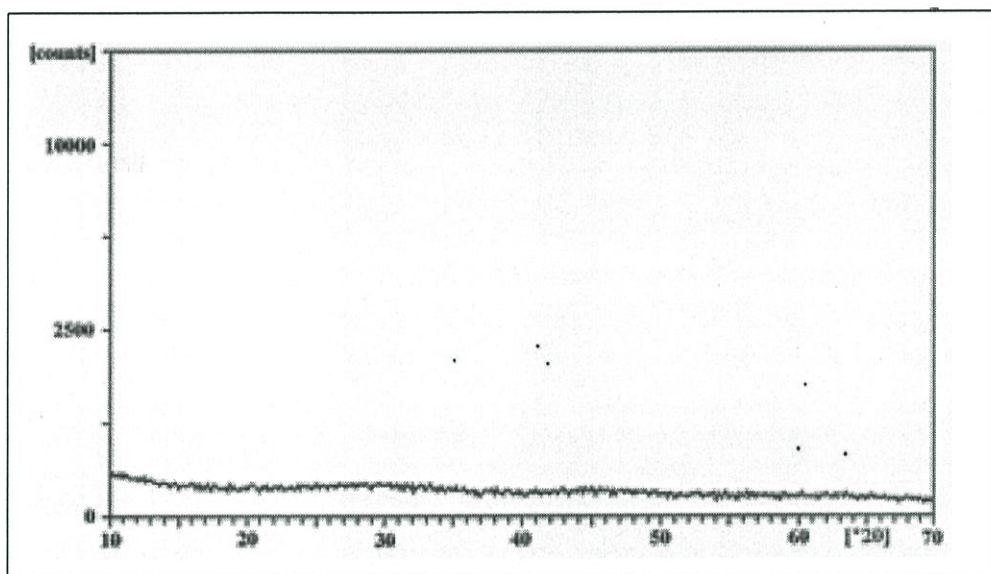


รูปที่ 2.6 แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ และแสดงอัตราส่วนของเฟสอนาเทส และรูไทล์ ในไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25)

(ที่มา: <http://www.nature.com/nmat/journal/v12/n9/abs/nmat3697.html>)

### 2.6.2 ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ (Amorphous Titanium Dioxide, Am-TiO<sub>2</sub>)

ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดที่ไม่มีผลึกหรือเป็นแบบอสัณฐาน สามารถเตรียมได้จากไทเทเนียมเตรดตะกอลไรต์ กับสารละลายแอมโมเนียเจือจาง โดยเติมสารละลายแอมโมเนียเจือจางลงในไทเทเนียมเตรดตะกอลไรต์อย่างช้าๆ แล้วรอตกตะกอนเป็นสีขาวแล้วล้างด้วยน้ำกลั่นจะได้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบอสัณฐานออกมา โดยความเป็นอสัณฐานสามารถยืนยันได้ด้วยกราฟ XRD ดังรูป



รูปที่ 2.7 รูปแบบ XRD spectrum ของผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์

(ที่มา: Adsorption behavior of some metal ions on hydrated amorphous titanium dioxide surface, 2005 / Miki Kanna และคณะ)

### ตารางที่ 2.2 แสดงพื้นที่ผิวของผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์

TiO <sub>2</sub>	Phase	Crystallinity (%)	BET surface area (m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> )	Absorption edge wavelength (nm)	Band gap energy (eV)
Amorphous TiO <sub>2</sub>	Amorphous	–	499.00	381	3.25
Degussa P25	A, R	80(A), 20(R)*	54.50	396	3.13
Anatase	A	100(A)	10.72	383	3.24

A anatase, R rutile

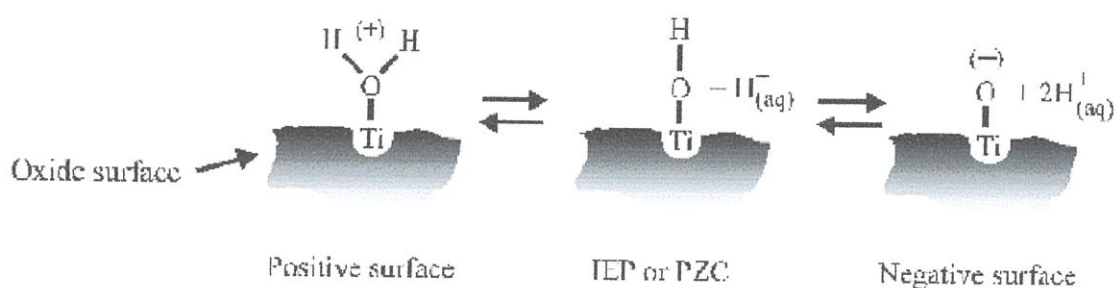
(ที่มา: Amorphous titanium dioxide: a recyclable dye remover for water treatment / Miki Kanna และคณะ)

จากกราฟ XRD จะเห็นว่าไม่มีพีคของผลึกเกิดขึ้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าเป็นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบอสัณฐานจริง ซึ่งจากการที่เป็นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบอสัณฐานนี้จึงทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบอสัณฐานมีพื้นที่ผิวค่อนข้างสูงถึง  $449 \text{ m}^2/\text{g}$  ทำให้มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักได้มากกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดอื่นๆ ซึ่งความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.3 แสดงความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดต่างๆ

Samples	Adsorption capacity (mg/g)				Refs.
	Mn(II)	Fe(III)	Cu(II)	Pb(II)	
ha-TiO <sub>2</sub>	24.92	14.85	84.79	618.79	this work
Anatase (syn) <sup>a</sup>	ca. 0	14.90	67.40	308.98	this work
Anatase (Carlo Erba)	ca. 0	14.90	71.15	194.28	this work
Degussa P25	ca. 0	14.90	63.63	219.41	this work
Rutile (TOA)	ca. 0	15.02	68.84	187.99	this work
T1(anatase, syn)	6.830	-	9.010	5.030	(Vassileva <i>et al.</i> , 1996) <sup>b</sup>
T2(anatase, Fluka)	-	-	0.270	0.220	(Vassileva <i>et al.</i> , 1996) <sup>b</sup>
Nanometer TiO <sub>2</sub>	2.14	-	6.86	-	(Liang <i>et al.</i> , 2001) <sup>c</sup>

จากตารางจะเห็นว่าผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักได้ดีกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากว่าไทเทเนียมไดออกไซด์แบบอสัณฐานมีความไม่เป็นผลึกและมีพื้นที่ผิวสูง ( $449 \text{ m}^2/\text{g}$ ) จึงทำให้เกิดการดูดซับโลหะหนักได้ดี โดยเฉพาะที่ pH เท่ากับ 7 ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบอสัณฐานจะมีประจุที่ผิวค่อนข้างเป็นลบ จึงทำให้มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุกับประจุบวกของพื้นผิวของโลหะหนักได้ดี ซึ่งพื้นผิวของโลหะออกไซด์เมื่อค่า pH ต่ำจะมีประจุเป็นบวกส่วนที่ค่า pH สูงจะมีประจุเป็นลบ ซึ่งพื้นผิวของโลหะออกไซด์ แสดงดังรูป



รูปที่ 2.8 แสดงพื้นผิวของโลหะออกไซด์

(ที่มา: Adsorption behavior of some metal ions on hydrated amorphous titanium dioxide surface,

## 2.7 ประโยชน์ของไทเทเนียมไดออกไซด์

### 1.) ความสามารถในการต้านแบคทีเรียและฆ่าเชื้อโรค

ไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่เพียงแต่ฆ่าเชื้อแบคทีเรียเท่านั้น แต่ยังช่วยในการย่อยสลายซากของแบคทีเรียด้วย ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นสารเร่งปฏิกิริยาคด้วยแสงนั้น มีประสิทธิภาพสูงกว่าสารต้านแบคทีเรียชนิดอื่นๆ เนื่องจากปฏิกิริยาจะทำงานเมื่อมีเซลล์แบคทีเรียสัมผัสกับพื้นผิว หรือเมื่อแบคทีเรียแพร่กระจายบนพื้นผิว นอกจากนี้สารพิษที่เกิดจากการตายเซลล์ก็จะถูกทำลายจากการเร่งปฏิกิริยาคด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วย และที่สำคัญไทเทเนียมไดออกไซด์จะไม่เกิดการเสื่อมประสิทธิภาพหลังจากที่ทำลายเชื้อแบคทีเรีย ทำให้มีประสิทธิภาพการใช้งานที่ยาวนาน โดยทั่วไปเมื่อก้าวถึงประสิทธิภาพด้านยับยั้งหรือต่อต้านการติดเชื้อ ไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีความสามารถมากกว่า คลอรีน ( $Cl_2$ ) 3 เท่า และมากกว่า โอโซน ( $O_3$ )

### 2.) ความสามารถด้านการกำจัดกลิ่น

ด้านการกำจัดกลิ่นนั้นมีอนุภาคไฮดรอกซิลไอออนที่เกิดจากไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถกำจัดโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ระเหยอยู่ในอากาศ (Volatile Organic Compound หรือ VOCs) อันเป็นสาเหตุของกลิ่นไม่พึงประสงค์ได้ โดยการทำลายพันธะระหว่างโมเลกุลของสารเหล่านี้ ด้วยวิธีการนี้จะทำให้สารอินทรีย์ที่ระเหยอยู่ในอากาศแตกตัวออกเป็น โมเลกุลเดี่ยวจึงไม่สามารถทำอันตราย หรือส่งผลกระทบต่อร่างกายของมนุษย์ได้ นอกจากนี้ยังมีประสิทธิภาพในการฟอกอากาศให้สะอาด โดยการกำจัดโมเลกุลของสารที่ทำให้เกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์ ตัวอย่างเช่น กลิ่นบูหรี กลิ่นยาสูบ สารประเภทฟอร์มัลดีไฮด์ ในโตรเจนไดออกไซด์ ยูเรีย กลิ่นอุจจาระ น้ำมันเชื้อเพลิง และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอีกหลายชนิดในอากาศ ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถทำให้อากาศสะอาดจากไวรัส เกสรดอกไม้ แบคทีเรีย และควัน รวมถึงแก๊สอันตราย ด้วยคุณสมบัติของการเร่งปฏิกิริยาคด้วยแสง

### 3.) ความสามารถในการฟอกอากาศ

ไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ถูกเร่งด้วยปฏิกิริยาคด้วยแสงจะสามารถกำจัดสารที่ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศได้ เช่น สารประกอบไนโตรเจน ควันบูหรี รวมถึงสารระเหยต่างๆ ที่ออกมาจากอาคาร รวมทั้งโครงสร้างของตึกได้ นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันเขม่า และคราบดำต่างๆ ที่จะเกาะผนังบ้าน รวมถึงช่วยกำจัดสารประเภทที่ทำลายชั้นบรรยากาศ เช่น ก๊าซคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFC) และก๊าซเรือนกระจกประเภทอื่น รวมถึงก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทั้งทางตรง และทางอ้อมเมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแสงในบริเวณที่มีมลภาวะสูง ไทเทเนียมไดออกไซด์จะช่วยลดสารก่อมลภาวะเหล่านี้ได้

### 4.) ความสามารถด้านการทำความสะอาดตัวอย่าง

ผนังด้านนอกของอาคารที่ถูกปกคลุมด้วยคราบเขม่าจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่มีส่วนประกอบเป็นน้ำมัน เมื่อผนังตึกถูกทาด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งมีสมบัติการเร่งปฏิกิริยา

ด้วยแสง จะทำให้ผนังมีคุณสมบัติในการทำความสะอาดตัวเอง โดยเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง ไทเทเนียมไดออกไซด์จะทำลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอน รวมทั้งฝุ่นผงต่างๆที่เกาะติดอยู่กับผนัง และจะถูกชะล้างออกจากผนังอย่างง่ายได้เมื่อฝนตกลงทำให้ผนังตึกสะอาดและใหม่อยู่เสมอ

#### 5.) ความสามารถในการทำน้ำสะอาด

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (สารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง) ร่วมกับรังสีอัลตราไวโอเล็ตสามารถกำจัดสารอินทรีย์ที่ก่อมลภาวะให้กลายเป็นสารที่ไม่อันตรายได้ เช่น ทำให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ รวมถึงมีคุณสมบัติในการต้านแบคทีเรีย เทคโนโลยีนี้มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารอินทรีย์อันตราย และช่วยฆ่าแบคทีเรียหลายชนิดรวมถึงไวรัส

#### 6.) ความสามารถด้านพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Cell)

ไทเทเนียมไดออกไซด์จัดเป็นสารที่อยู่ในกลุ่มของเซมิคอนดักเตอร์ มีการนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในโซลาร์เซลล์มากขึ้น เช่น นำไปเคลือบบนอิเล็กทรอนิกส์เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น ราคาของโซลาร์เซลล์ค่อนข้างแพง เพราะกระบวนการผลิตต้องใช้ต้นทุนสูง และให้ประสิทธิภาพต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ทำให้มีขีดจำกัดในการใช้งาน ดังนั้นจึงมีการวิจัยและพัฒนาการทำงานของโซลาร์เซลล์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น การนำเจอร์เมเนียม (Ge) ผสมลงไปไนไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อทำเป็น Quantum dot โซลาร์เซลล์ การนำซิลิกอนและไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบน Si โซลาร์เซลล์ เพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆให้ดีขึ้น นอกจากนี้การเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์ให้อยู่ในรูปของท่อนาโนที่ผลิตด้วย Rf sputtering สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของโซลาร์เซลล์ได้เช่นกัน โดยเพิ่ม Electron lifetime และประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้อย่างต่อเนื่อง

ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบผลการกำจัดมลพิษกับวิธีต่างๆ

	Electronic	Ozone	UV	Ionizer	TiO <sub>2</sub> 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

(ที่มา: บริษัท แอร์ ปิกนิก จำกัด, ม.ป.ป)

## 2.8 ประเภทของสิ่งสกปรกที่เจือปนในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อม

นันทยา ยานูเมศ (2534) ได้จำแนกสิ่งสกปรกที่เจือปนอยู่ในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมดังนี้

1. สีสังเคราะห์ ในการย้อมเส้นใยจะมีการดูดซึมสีย้อม จากสารละลายสีสังเคราะห์เพียงบางส่วนเท่านั้น สีสังเคราะห์ที่เหลือจะคงอยู่ในสารละลายสีย้อม และถูกปล่อยออกมากับน้ำเสียในที่สุด ปริมาณสีสังเคราะห์ที่ยังคงเหลืออยู่ในสารละลายสีสังเคราะห์จะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับประเภทของสีสังเคราะห์ที่ใช้

2. สารเคมีที่ช่วยในกระบวนการฟอกย้อมรวมทั้งสารเคมีที่ใช้ในการตกแต่งสำเร็จ สารเคมีเหล่านี้ส่วนใหญ่จะยังคงเหลืออยู่ในสารละลายสีสังเคราะห์หรือน้ำซักล้าง และจะถูกปล่อยปนออกมาในน้ำเสีย

3. สิ่งสกปรกเจือปนในเส้นใย โดยทั่วไปจะพบในเส้นใยธรรมชาติสูงกว่าเส้นใยสังเคราะห์ สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้มีทั้งที่เป็นสารจีฟี่นึ่ง ไบมัน โปรตีน ตลอดจนสารประกอบโลหะต่างๆ สิ่งสกปรกเหล่านี้จะถูกขจัดออกจากเส้นใยในขั้นตอนการเตรียมผ้าก่อนการฟอกย้อมและจะหลุดติดตามในน้ำเสีย

4. เศษเส้นใย

## 2.9 ลักษณะของสีสังเคราะห์

สีสังเคราะห์ (dyestuffs) คือ สีชนิดหนึ่งที่ใช้ในการย้อมเส้นใยของผ้า อาจจะเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ก็ได้ มีลักษณะเป็นผลึกหรือผงละเอียด สีสังเคราะห์บางชนิดละลายน้ำได้ บางชนิดไม่สามารถละลายน้ำ แต่จะละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ได้ เมื่อนำสีสังเคราะห์ไปใช้ในกระบวนการย้อมจะทำให้โมเลกุลของสีสังเคราะห์ซึมผ่านเข้าไปในโมเลกุลของเส้นใยโดยจะทำลายโครงสร้างผลึกของวัตถุนั้นชั่วคราว ซึ่งอาจเกิดพันธะไฮออนิกหรือพันธะโควาเลนต์กับวัตถุที่ต้องการย้อมโดยตรงที่เห็นจากสีสังเคราะห์นั้นเกิดจากอิเล็กตรอนในพันธะคู่ซึ่งอยู่ในโมเลกุลของสีสังเคราะห์ มีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานในช่วงสเปกตรัมต่างกัน พลังงานที่สายตามองเห็นจะมีความยาวคลื่นช่วง 400-700 นาโนเมตร สีสังเคราะห์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลต่างกันจะมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ต่างกัน ซึ่งสายตาสารภาพได้ จึงทำให้โมเลกุลสีสังเคราะห์ต่างกันแสดงสีที่เราเห็นด้วยสายตาสายตาออกมาต่างกันไป

สีสังเคราะห์ที่ใช้ย้อมเส้นใยมีหลายชนิด การย้อมที่จะให้ผลดีนั้นขึ้นอยู่กับความสามารถการรวมตัวของสีสังเคราะห์กับเส้นใยจะต้องมีมากกว่าความสามารถการรวมตัวของสีสังเคราะห์กับน้ำสีสังเคราะห์ส่วนใหญ่เป็นสารเคมีที่เป็นผลิตภัณฑ์มาจากน้ำมันปิโตรเลียม ซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนพวก aliphatic และ aromatic การจำแนกสีสังเคราะห์สามารถแบ่งประเภทสีสังเคราะห์ออกได้หลายวิธี แต่ที่นิยมใช้กันมากจะจำแนกตามลักษณะการนำไปใช้งาน เพราะสี

สังเคราะห์ที่ใช้จะต้องมีความคงทนต่อการซัก มีความคงทนต่อแสงแดดและยังต้องมีความคงทนต่อความร้อน ซึ่งในกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมได้จำแนกสีสังเคราะห์ตามวิธีใช้งานออกเป็น 11 ประเภท ดังนี้

1) สีเอซิด (acid dye) สีชนิดนี้เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ มีประจุลบ ละลายน้ำได้ดี ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถันกลไกในการติดสีเกิดเป็นพันธะไอออนิก ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนในน้ำสังเคราะห์ที่มีสภาพเป็นกรดเจือจาง สีเอซิดบางตัวสามารถนำกลับไปย้อมเส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่น ปอ ป่าน ไนลอน ไยขนแกะ ไหม และอะคริลิกได้ดี วิธีการใช้จะนำสีสังเคราะห์ที่เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ไปละลายน้ำย้อมที่เป็นกรดหรือเป็นกลาง สีเอซิดไม่ทนต่อการซัก ไม่ทนเหงื่อ

2) สีไดเรกต์ (direct dye) หรืออาจเรียกว่า สีย้อมฝ้าย สีสังเคราะห์ชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบเฮโซที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิคที่ทำให้ตัวสีสามารถละลายน้ำได้ มีประจุลบ นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส สีจะติดเส้นใยได้โดยโมเลกุลของสีจะจัดเรียงตัวแทรกอยู่ในระหว่างโมเลกุลเส้นใย และยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน สีไม่ทนต่อการซักน้ำ ตกง่าย ทนแสง

3) สีเบสิก (basic or cationic dye) สีสังเคราะห์ชนิดนี้เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ (organic base) ให้ประจุบวกละลายน้ำได้ นิยมใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนได้ดีแต่เกาะติดเส้นใยเซลลูโลสได้เล็กน้อยหรือไม่ติดเลย มีคุณสมบัติเด่นพิเศษคือมีความสดใสและความเข้มของสีดีมากแต่ไม่ทนแสง ใช้ย้อมเส้นใยอะคริลิกโดยเฉพาะ

4) สีดิสเพอร์ส (disperse dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำแต่มีสมบัติกระจายได้ดี สามารถย้อมเส้นใยอะซีเตท เส้นใยโพลีเอสเตอร์ ไนลอน และอะคริลิกได้ดี การย้อมจะใช้สารพาเพื่อช่วยเร่งอัตราการดูดซึมของสีเข้าไปในเส้นใย หรือย้อมโดยใช้อุณหภูมิและความดันสูง สีดิสเพอร์สเป็นสีที่ทนแสงและการซักฟอกค่อนข้างดี แต่สีจะซีดถ้าถูกควันทันหรือแก๊สบางชนิดเช่นแก๊สไนตรัสออกไซด์ สีดิสเพอร์ส แบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม โดยพิจารณาจากหมู่เคมีในสีย้อม ได้แก่ สีย้อมเอโซ (azo dyes) และสีย้อมอะมิโน แอนทราควิโนน (amino anthraquinone) ซึ่งทั้งสองกลุ่มประกอบด้วยอนุพันธ์ของเอทราโนลามีน (ethanolamine;  $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2$ ) หรืออนุพันธ์ที่คล้ายคลึงกัน

5) สีรีแอกทีฟ (reactive dye) เป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบ เมื่ออยู่ในน้ำจะมีสมบัติเป็นค่าง สีย้อมสังเคราะห์ชนิดนี้เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด โมเลกุลของสีจะยึดจับกับหมู่ ไฮดรอกซิล ( $\text{OH}$ ) ของเซลลูโลสและเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ในสภาวะที่เป็นค่างกลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส สีรีแอกทีฟมี 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง 70-75 °C และกลุ่มที่ติดย้อมที่อุณหภูมิต่ำ สีรีแอกทีฟให้สีที่สดใส ทุกสีติดทนในทุกสภาวะ

6) สีอะโซอิก (azoic dye) สีสังเคราะห์ชนิดนี้ไม่สามารถละลายน้ำได้ การที่สีจะก่อรูปเป็นเส้นใยได้ต้องย้อมด้วยสารประกอบฟีนอลซึ่งละลายน้ำได้ก่อน ซึ่งเป็นกระบวนการทำให้รวมตัว

เป็นสี (coupling) แล้วย้อมทับด้วยสาร ไคอะโซคอมโพแนนท์จึงจะเกิดเป็นสีได้ สีอะโซอิกใช้ย้อมเส้นใยได้ทั้งเซลลูโลส ไนลอน หรืออะซิเตทสีอะโซอิกเป็นมีที่ทนต่อการซัก แต่ไม่ทนต่อการขัดถู

7) สีแว็ต (vat dye) เป็นสีที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ เมื่อทำการย้อมต้องเตรียมน้ำย้อมให้สีแว็ตละลายน้ำโดยให้ทำปฏิกิริยากับสารรีดิวซ์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ สีแว็ตจะถูกรีดิวซ์ให้กลายเป็นเกลือ จึงซึมเข้าไปในเส้นใยได้ เมื่อนำผ้าไปผึ่งในอากาศ สีในเส้นใยจะถูกออกซิไดส์เป็นสีแว็ตสีสังเคราะห์ชนิดนี้มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญอยู่ 2 ชนิด คือ สีอินดิโก้คาร์มีน (indigo carmine) และสีแอนทราควินอยด์ (antraquinoid)

8) สีมอร์แดนท์ หรือ โครม (mordant or chrome dye) สีสังเคราะห์ชนิดนี้ต้องใช้สารช่วยติดเข้าไปช่วย เพื่อให้เกิดการติดสีบนเส้นใย สารที่ช่วยติดที่ใช้ คือ สารประกอบออกไซด์ของโลหะ เช่น โครเมียม ดิบุก เหล็ก อะลูมิเนียม เป็นต้น สีมอร์แดนท์ เป็นสีที่มีโมเลกุลใหญ่ซึ่งเกิดจากสีมอร์แดนท์หลายโมเลกุลจับกับโลหะ แล้วละลายน้ำได้จึงทำให้ย้อมได้ง่าย ซึ่งใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนและเส้นใยพอลิเอไมด์ได้ดี

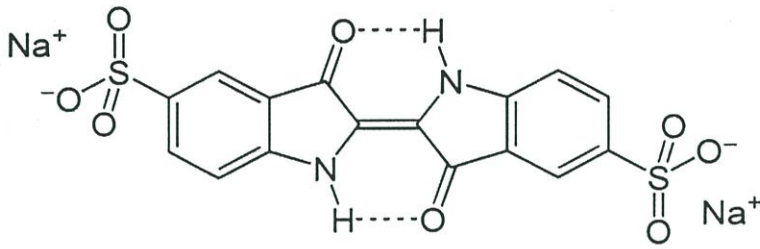
9) สีอินแกรนด์ (ingrand dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำโดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากปฏิกิริยากับน้ำ สีสังเคราะห์ชนิดนี้ใช้สำหรับย้อมผ้า

10) สีออกซิเดชัน (oxidation dye) เป็นสีที่ละลายน้ำโดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยาในน้ำโดยสีจะติดแน่นอาศัยปฏิกิริยาการตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย ใช้สำหรับย้อมผ้าและขนสัตว์

11) สีซัลเฟอร์ (sulfur dye) เป็นสีที่ไม่สามารถละลายน้ำ เมื่อทำการย้อมต้องรีดิวซ์สีเพื่อให้โมเลกุลอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้ แต่สีซัลเฟอร์บางชนิดที่ผลิดออกมาจำหน่ายในรูปที่ถูกรีดิวซ์จะละลายน้ำได้นิยมนำสีซัลเฟอร์มาย้อมผ้า สีจะติดทนนาน และเป็นสีที่มีราคาถูกลง แต่สีที่อ่อนจะไม่ทนต่อการซัก

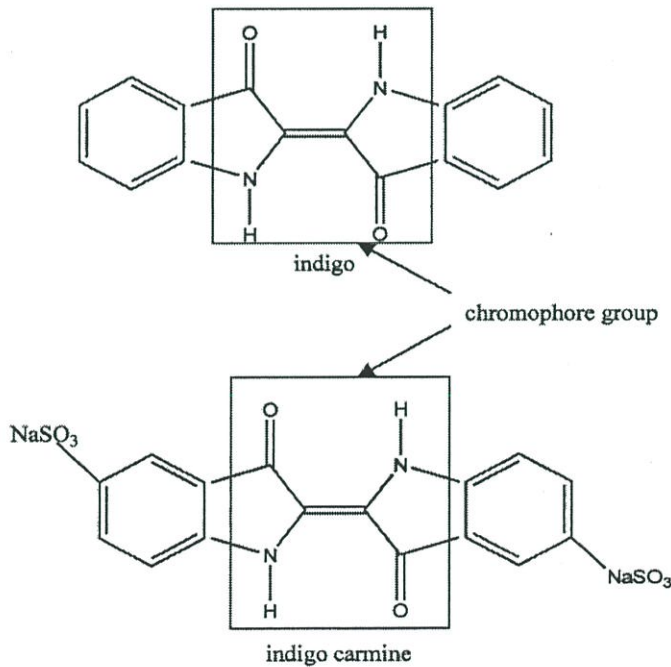
### 2.9.1 อินดิโก้คาร์มีน (Indigo Carmine, IC)

อินดิโก้คาร์มีน (Indigo Carmine, IC) หรือ 5,5-indigodisulfonic acid sodium salt โครงสร้างแสดงดังรูป 2.9 เป็นอินดิเคเตอร์ชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถสกัดได้จากพืชในธรรมชาติ ที่มีสูตรเคมี คือ  $C_{16}H_8N_2Na_2O_8S_2$  ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะนำไปใช้เป็นอินดิเคเตอร์เป็นสีน้ำเงิน เมื่อ pH เท่ากับ 11.4 และเปลี่ยนเป็นสีเหลือง เมื่อ pH เท่ากับ 13.0 และยังใช้เป็นอินดิเคเตอร์สำหรับปฏิกิริยารีดอกซ์ได้อีกด้วย โดยจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเมื่อเกิดปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังนิยมใช้เป็นสีสังเคราะห์ เรียกว่า Indigo dye ซึ่งมีสีน้ำเงินเป็นหลักนำไปย้อมสีของกางเกงยีน เป็นต้น



รูปที่ 2.9 สูตร โครงสร้างของอินดิโกคาร์มีน (Indigo Carmine)

อินดิโกคาร์มีนนั้นมีจุดหลอมเหลวที่สูงประมาณ 390 - 392 °C และมีความสามารถในการละลายน้อยมาก เนื่องจากโครงสร้างของอินดิโกคาร์มีน มีพันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมต่อกันระหว่างโมเลกุลอย่างแข็งแรง นอกจากนี้อินดิโกคาร์มีน ในสถานะของแข็งจะเกิดการรวมตัวเป็นพอลิเมอร์ โดยแต่ละโมเลกุลจะถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของอินดิโกคาร์มีน อีก 4 โมเลกุล ส่วนในสารละลายที่ไม่มีขั้ว อินดิโกคาร์มีนจะเกิดเป็นมอนอเมอร์เชื่อมต่อกันระหว่างโมเลกุล และสีของสารละลายจะเป็นสีน้ำเงิน โดยสีที่เกิดขึ้นเกิดจากโครงสร้างที่เป็น H-chromophore ประกอบด้วย C=C ที่ถูกแทนที่ด้วย NH ที่เป็น Donor Group และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เป็น Acceptor Group ดังรูป 2.10

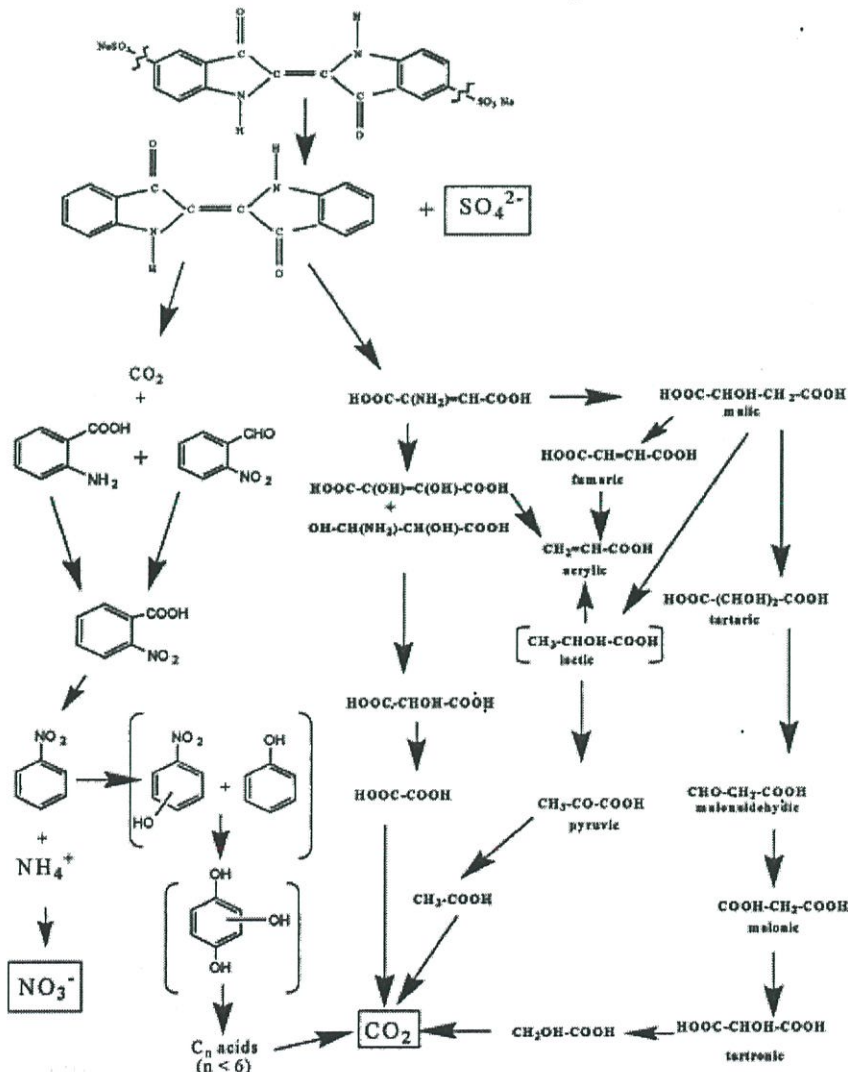


รูปที่ 2.10 โครงสร้างของอินดิโกคาร์มีน

เนื่องจากในปัจจุบันได้มีการใช้อินดิโกคาร์มีน เป็นสีสังเคราะห์ในอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมากตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ซึ่งการที่ปล่อยสีสังเคราะห์จากอุตสาหกรรมลงสู่แหล่งน้ำนั้นจะทำให้เกิดผลกระทบมากมายต่อสภาพแวดล้อม โดยเฉพาะทางน้ำส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศทำให้สัตว์

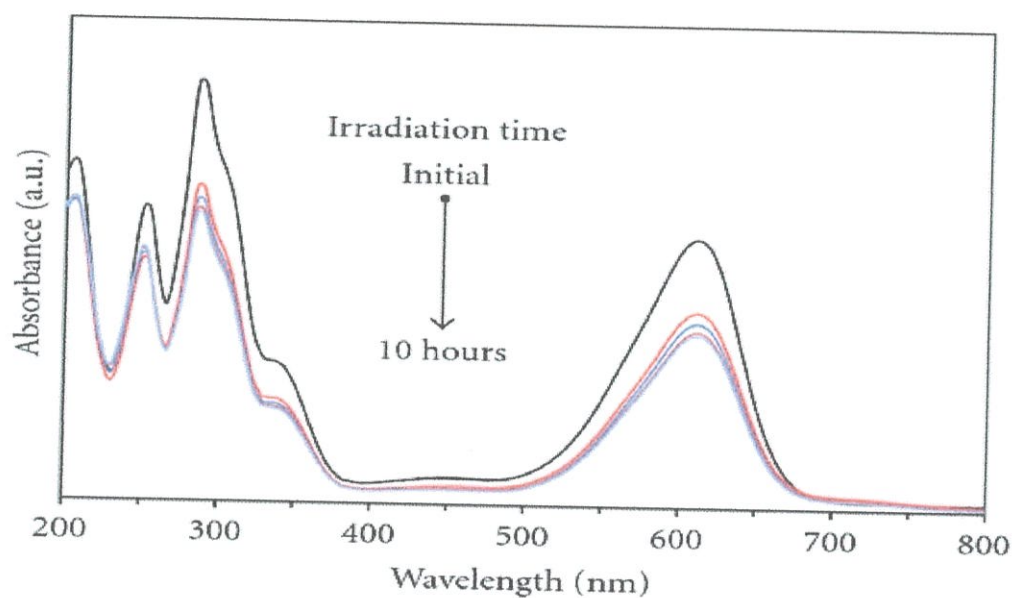
น้ำและพืชได้รับผลเสียเป็นจำนวนมาก นอกจากอินดิโกคาร์มีนจะถูกนำไปทำเป็นสีสังเคราะห์แล้ว ยังนำไปใช้เป็นสารเติมแต่งในแคปซูลยาและลูกกวาด ถึงแม้อินดิโกคาร์มีนจะถูกเผาผลาญในร่างกายได้ยาก แต่ก็สามารถถูกกรองได้ด้วยไตของมนุษย์ อินดิโกคาร์มีนถือว่าเป็นสีสังเคราะห์ที่เป็นพิษชนิดหนึ่ง อาจทำให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนังหรือดวงตา โดยเฉพาะเยื่อลูกตาหรือกระจกตา และร้ายแรงถึงเป็นขั้นทำให้เกิดเนื้องอกและเป็นสารก่อมะเร็งได้ จึงได้มีการทดสอบการกำจัดอินดิโกคาร์มีนในสัตว์ เช่น หนู หมู และค้นคว้าวิธีการกำจัดในทางต่างๆ เพื่อที่จะได้ไม่ให้เกิดผลเสียต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมต่อไป

ในปัจจุบันจึงได้มีการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับการกำจัดอินดิโกคาร์มีนในน้ำด้วยวิธีต่างๆ มากมาย โดยเฉพาะการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมเข้าไปในวัสดุต่างๆ ทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส แล้วไปกำจัดอินดิโกคาร์มีนในของเหลวหรือของแข็ง ซึ่งการวิจัยพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสกับแสง UV สามารถกำจัดสีสังเคราะห์ที่ถูกปล่อยจากโรงงานอุตสาหกรรมได้ โดยจะใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 ในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสแล้วทำให้อินดิโกคาร์มีนเกิดการสลายตัวได้ แสดงดังรูป



รูปที่ 2.11 แสดงกลไกการสลายตัวของอินดิโกคาร์มีน

เมื่อไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสแล้วจะให้ไฮดรอกซิล (OH) ออกมา ซึ่งไฮดรอกซิลนี้จะไปทำลายพันธะ C-N และ C-C ใน Chromophore Group วงอะโรมาติกพวก anthranilic acid, nitrobenzaldehyde, nitrobenzoic acid และ nitrobenzene เกิดอันตรกิริยากับไฮดรอกซิล ทำให้เกิดปฏิกิริยา Hydroxylation เกิดเป็น hydroxyl-hydroquinone ซึ่งเป็นอะโรมาติกโมเลกุลสุดท้ายก่อนที่จะเกิดการเปิดวงอะโรมาติก กระบวนการสลายตัวทั้งหมดจะเปลี่ยนสาร organic carbon ไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ส่วน nitrogen และ sulfate heteroatoms จะเปลี่ยนเป็น inorganic ion เช่น nitrate, ammonium และ sulfate ion ตามลำดับ

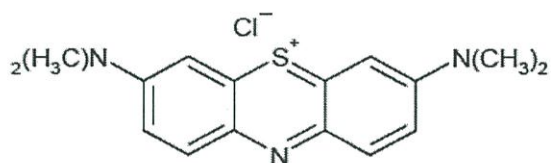


รูปที่ 2.12 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตของโครงสร้างต่างๆของอินดีโกคาร์มีน (ที่มา: <http://www.hindawi.com/journals/ijp/2012/939608/fig6/>)

### 2.9.2 เมทิลีนบลู (Methylene Blue, MB)

เมทิลีนบลูมีโครงสร้างเป็นแคทไอออนในส่วนประกอบที่ให้สี บางครั้งเรียกสีประเภทนี้ว่า สีแคทไอออนิก (Cationic Dye) เมื่อปนเปื้อนในน้ำเสียก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำ ดังนั้นจึงควรมีการกำจัดสีสังเคราะห์ในน้ำเสียก่อนทิ้งลงแหล่งน้ำธรรมชาติ

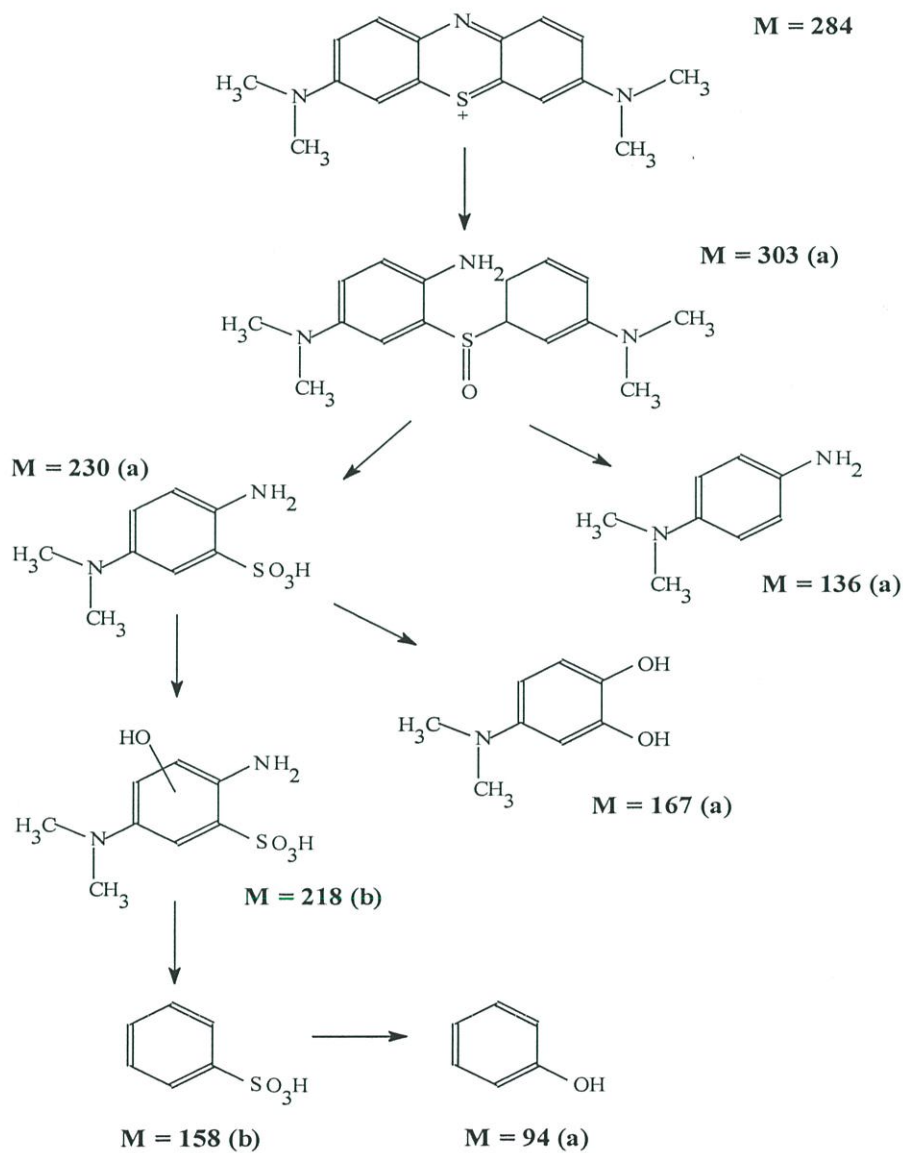
โครงสร้างของเมทิลีนบลู (C<sub>16</sub>H<sub>18</sub>N<sub>3</sub>SCl) ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเมทิลีนบลู โดยการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงซึ่งอาศัยไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งพบว่า การกำจัดสารละลายเมทิลีนบลูทำได้ภายใต้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง เกิดการเปลี่ยนแปลงวงเบนซีนในโครงสร้างของเมทิลีนบลูให้อยู่ในรูปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ซัลเฟตไอออน (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) แอมโมเนียมไอออน (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) และไนเตรตไอออน (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) ส่งผลทำให้สีของเมทิลีนบลูจางลง



MB

$$\lambda_{\max} = 665 \text{ nm}; \epsilon = 10^5 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$$

รูปที่ 2.13 สูตร โครงสร้างและความยาวคลื่นของเมทิลีนบลู (Methylene Blue)

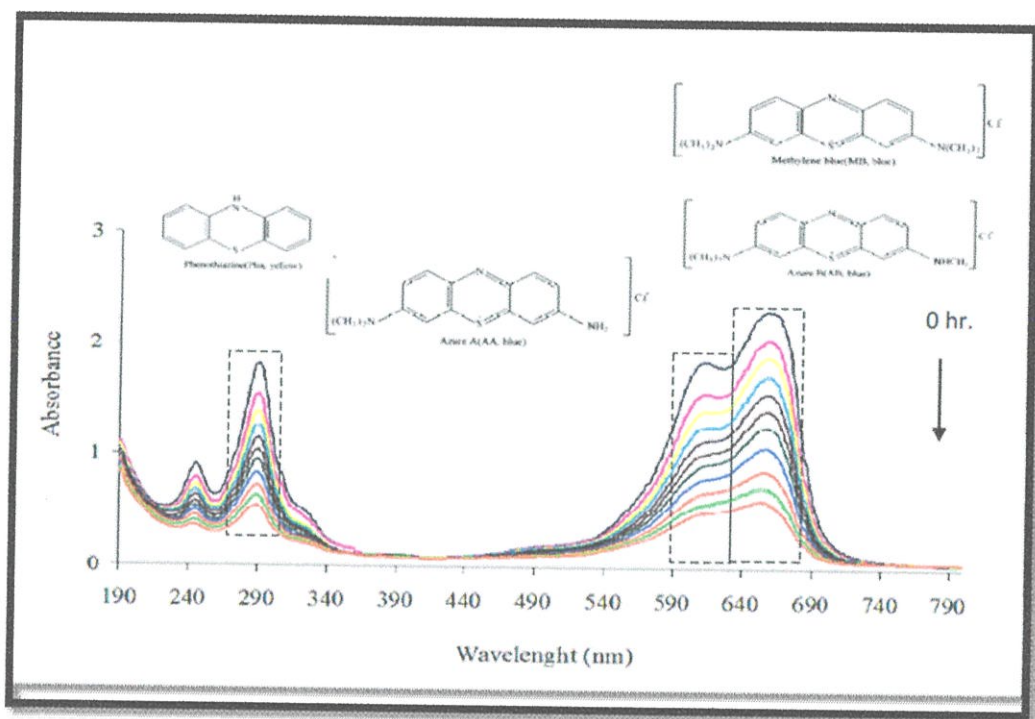


(a) detected by GC/MS (extraction of ions)

(b) detected by LC/MS

รูปที่ 2.14 กลไกการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของเมทิลีนบลู

(ที่มา: Photocatalytic degradation pathway of methylene blue, Houas, et al., 2001)



รูปที่ 2.15 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตของโครงสร้างต่างๆ ของสารละลายเมทิลีนบลู (ที่มา : Hathaisamit et al., 2010)

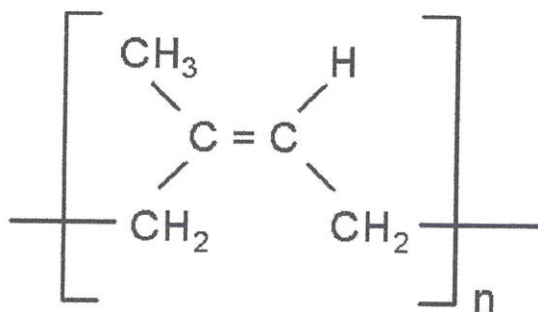
## 2.10 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR)

ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR) มีชื่อทางเคมี คือ ซีส-1,4-โพลีไอโซพรีน (cis-1,4-polyisoprene) เป็นพอลิเมอร์สายโซ่ตรง มีหน่วยซ้ำๆ กันคือไอโซพรีน ( $C_5H_8$ ) เป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ ซึ่งได้จากการกรีดจากต้นไม้ที่ชื่อว่า “ยางพารา” มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Hevea Braziliensis* ซึ่งมีต้นกำเนิดจากกลุ่มแม่น้ำอเมซอนในทวีปอเมริกาใต้ต่อมาได้นำมาปลูกในทวีปเอเชียและแอฟริกา ยางสามารถสามารถงอกงามได้ดีทางภาคใต้ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย

น้ำยางธรรมชาติ (Latex) ลักษณะของน้ำยางที่ได้เป็นสีขาวขุ่น มีความหนืดประมาณ 12-14 centipoise (น้ำบริสุทธิ์มีความหนืด 1 centipoise) มีความหนาแน่นประมาณ 0.975-0.980 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีความเป็นกรด-เบส (pH) ที่ 6.5-7.0 มีการกระจายตัวของอนุภาค cis-polyisoprene และอนุภาคที่ไม่ใช่เนื้อยางแขวนลอยอยู่ในน้ำเกิดรวมตัวกันเป็น cis-1,4-polyisoprene monomer ที่แสดงดังรูป ยางธรรมชาติประกอบด้วย polyisoprene rubber polymer ประมาณ 60-65% และส่วนที่ไม่ใช่เนื้อยางประมาณ 30-35% นอกจากนี้มีส่วนประกอบของสารต่างๆ ในปริมาณที่ไม่คงที่อย่างกว้างขวาง โดยขึ้นกับปัจจัยต่างๆ เช่น พันธุ์ยาง อายุยาง ฤดูกาล กรีดยาง และวิธีการกรีดยาง



(ก) น้ำยางข้น



(ข) cis-1-4-polyisoprene monomer

รูปที่ 2.16 (ก) น้ำยางข้น และสูตร โครงสร้างของยาง (ข) cis-1-4-polyisoprene monomer

โดยปกติมีการเติมแอมโมเนีย (Ammonia) ถูกเติมลงไปในน้ำยางธรรมชาติเป็นการช่วยรักษาสภาพของน้ำยางให้เก็บไว้ได้นาน และทำให้น้ำยางมีความเสถียรมากขึ้นการเติมแอมโมเนียลงไปทำให้น้ำยางธรรมชาติมีค่า pH เพิ่มขึ้น เชื่อจุลินทรีย์เกิดการเติบโตอย่างช้าลง เมื่อน้ำยางธรรมชาติมีความเสถียรแล้ว หลังจากนั้นจะส่งออกสู่ตลาดเพื่อนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ถุงมือยาง ถุงยางอนามัย ลูกโป่ง ลูกห้วนม เป็นต้น ส่วนยางแห้ง ได้จากการนำน้ำยางสดมาเติมกรด (กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก หรือกรดซัลฟูริก) ทำให้เกิดการจับตัวของน้ำยางเป็นก้อนแข็ง แยกตัวจากน้ำออกมา และนำไปอบรมควัน ยางที่ได้จากกระบวนการนี้ คือ ยางแผ่นรมควัน

### 2.10.1 น้ำยางข้น (concentrated rubber latex)

น้ำยางข้น หมายถึง น้ำยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการเพิ่มความเข้มข้น โดยน้ำยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการเพิ่มความเข้มข้นแล้วจะมีปริมาณเนื้อยางประมาณ 55-65% ซึ่งสูงกว่าน้ำยางสดที่มีปริมาณเนื้อยางประมาณ 25-30% ทำให้สามารถทำการขนส่งได้ง่ายขึ้นเป็นอย่างมาก

### 2.10.2 กระบวนการเตรียมน้ำยางข้นจากน้ำยางสด

โดยทั่วไปแล้วกระบวนการเตรียมน้ำยางข้นมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน แต่วิธีการที่นิยมใช้ในการเตรียมน้ำยางข้นมีอยู่ 3 วิธี คือ

#### 1. วิธีการระเหยน้ำ (evaporation)

น้ำยางธรรมชาติจากต้นก่อนการทำให้ข้นโดยวิธีการระเหยน้ำจะต้องเติมสารที่ทำให้น้ำยางคงตัว (Stabilization) เช่น Potassium soap เสียก่อนการระเหยน้ำออกจากน้ำยางจะเกิดขึ้นภายในถัง หรือภาชนะที่หมุนได้รอบๆ แกนตามแนวนอนและถังนี้จะถูกให้ความร้อนรอบๆถัง โดยวิธีการระเหยน้ำออกจากน้ำยางจะทำให้ได้น้ำยางข้นซึ่งมีส่วนประกอบโดยประมาณ คือส่วน

ของแข็งทั้งหมด 75% ปริมาณเนื้อยาง 60% caustic potash 1.5% และสารพวกช่วยทำให้น้ำยางคงตัวกับโปรตีนและสารอื่นๆอีก 13.5% น้ำยางชั้นที่ได้จากวิธีนี้มีความคงสภาพเป็นน้ำยางดีมาก จึงเหมาะสำหรับการที่จะต้องขนย้ายน้ำยางไปไกลๆ และเหมาะสำหรับการที่จะต้องขนย้ายน้ำยางไปไกลๆ และเหมาะกับการนำไปผลิตวัตถุสำเร็จรูปประเภทที่ต้องใส่สารเพิ่ม (filler) จำนวนมาก ตัวอย่างเช่น การผลิตกาว (Latex-cement) น้ำยางนี้เหมาะหรือใช้ได้ดีกรณีที่ต้องการนำไปทำกาวประเภทที่สารอื่นๆ ที่อยู่ในน้ำยางและคุณสมบัติความคงตัวของน้ำยางเป็นข้อได้เปรียบกับการทำกาวอื่นๆ

## 2. วิธีการทำครีม (Creaming method)

การทำน้ำยางชั้นโดยวิธีการทำครีมเป็นวิธีที่อาศัยหลักการที่อนุภาคของเม็ดยางเบากว่าน้ำ เป็นไปตามกฎของ Stokes การทำน้ำยางชั้นโดยวิธีการทำครีม ไม่ค่อยนิยมกันมากนัก เนื่องจากต้องใช้เวลาในการเตรียมสารและใช้เวลาทำค่อนข้างนาน สารทำครีม ได้แก่ gumbragacarth, sodium aginate, tragon seed gum, ammonium aginate, locust bean gum และ pectin สมบัติของสารทำครีม คือ เป็นคอลลอยด์ที่ชอบน้ำ และพองตัวเมื่อใส่น้ำมัน ขั้นตอนการทำครีม คือ

- ใส่สารทำครีม ปริมาณ 0.3% ในส่วนของน้ำ สงในน้ำยางสดที่เก็บรักษาโดยแอม โมเนีย
- กวนให้สารทำครีมละลาย ตั้งทิ้งไว้ 24-40 ชั่วโมง
- กรองเอาชั้นน้ำออกจากของผสม
- ปรับปริมาณเนื้อยางและความเข้มข้นของแอม โมเนียภายหลัง

ความเข้มข้นของเนื้อยางจะสูงประมาณ 55% ในช่วงระยะเวลา 18 ชั่วโมงในการทำน้ำยางชั้น โดยวิธีการทำครีมหากต้องการเนื้อยางสูงถึง 60% ต้องตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 4-5 วัน

## 3. วิธีการเซนตริฟิวจ์หรือการปั่นแยก (Centrifuge method)

การเตรียมน้ำยางโดยวิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมกันมากเนื่องจากน้ำยางประเภทนี้สามารถนำไปใช้ทำผลิตภัณฑ์ยางสำเร็จรูปได้เกือบทุกชนิด วิธีการผลิตน้ำยางชั้นประเภทนี้ทำได้โดยใช้เครื่องหมุนเหวี่ยงที่มีความเร็วรอบ ประมาณ 7,000-8,000 รอบต่อนาที หลังการหมุนเหวี่ยงด้วยเครื่องแล้วน้ำยางจะถูกแบ่งออกเป็นสองชั้นคือ ชั้นของน้ำยางชั้นและชั้นของหางน้ำยาง ซึ่งการเตรียมโดยวิธีนี้จะได้น้ำยางชั้นที่มีความเข้มข้นของเนื้อยางสูงถึง 60-65%

(ที่มา : บุญธรรม นิธิอุทัยและคณะ, 2540)

### 2.10.3 คุณสมบัติของยาง

- มีสมบัติที่ดีเยี่ยมในด้านการเหนียวติดกัน
  - มีค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงมากโดยไม่ต้องเติมสารเสริมแรง
  - มีความทนต่อการฉีกขาดสูงมากทั้งที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูง
  - มีความต้านทานต่อการล้าตัวสูง มีความต้านทานต่อการขูดสูง
  - มีความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูงมาก
  - เมื่อขึ้นรูปเป็นแผ่นยางแล้ว มีความยืดหยุ่นสูง
  - ยางดิบละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขี้ผึ้ง เช่น เบนซีน เฮกเซน และโทลูอีน เนื่องจากตัวยางดิบไม่มีขี้ผึ้ง
  - ไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียม แต่จะทนต่อของเหลวที่มีขี้ผึ้ง เช่น อะซิโตน หรือแอลกอฮอล์
  - มีความทนทานต่อกรดอ่อนและด่างอ่อน แต่จะไม่ทนทานต่อกรดเข้มข้นและด่างเข้มข้น
  - ไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน
  - ไม่ทนต่อโอโซน
  - การกระเด็งกระดอนสูง
  - อุณหภูมิการใช้งานตั้งแต่ -55 - 70 องศาเซลเซียส
  - ถ้าเก็บไว้นาน ทำให้ยางสูญเสียความยืดหยุ่น
- (ที่มา: <http://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%A2%E0%B8%B2%E0%B8%87>)

### 2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

**ขวาลย์ และคณะ (2551)** จากการศึกษาการเตรียมแผ่นยางที่ฉาบไว้ด้วยอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นวิธีการเตรียมที่ง่ายและค่าใช้จ่ายต่ำ โดยใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกับน้ำยางชั้น (60%HA) และน้ำกลั่น ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและความขรุขระของพื้นผิวของแผ่นยางผสมเพิ่มขึ้นตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นไว้ด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยผลึกอนาเทส (Imp-An) จะมีขนาดเกรนที่เล็ก เนื่องจากความหนาแน่นของโครงสร้างและมีความครอบคลุมบนพื้นผิวแผ่นมากกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ (Imp-P25) เราใช้สารอินทรีย์เมทิลีนบลูเป็นตัวประเมินกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์จะกำจัดสีเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงยูวีเปรียบเทียบตัวอย่างไทเทเนียมไดออกไซด์ (อนาเทส คาร์โลเออร์บา และเดกัสซ่า P25) ประสิทธิภาพในการกำจัดสีเมทิลีนบลูในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจะลดลงดังนี้ ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบผงมากกว่าผงไทเทเนียมไดออกไซด์อนาเทสมากกว่าแผ่นยางผสมอนาเทสและมากกว่าแผ่นยางผสมผงไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 อย่างไรก็ตามการใช้งานแบบแผ่นมีข้อดีกว่าแบบผงคือสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

**ขลลดา (2554)** จากการศึกษาปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสงโดยไทเทเนียม ไดออกไซด์ในการกำจัดสารมลพิษอินทรีย์ พบว่าประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารมลพิษอินทรีย์เมื่อใช้อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น โครงสร้างผลึก ลักษณะความเป็นรูพรุน ตำแหน่งที่ว่างไว และขนาดอนุภาค เป็นต้น ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีผลึกต่างกันซึ่งเกิดจากจัดเรียงตัวของออกตะฮีดรอลต่างกัน จะส่งผลให้แต่ละรูปผลึกมีคุณสมบัติบางประการแตกต่างกัน เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ และอนาเทสจะมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายด้วยแสงดีกว่าแบบบรูคไคท์ เพราะมีการรวมตัวกันระหว่างอิเล็กตรอนช่องว่างอิเล็กตรอนน้อย และยังพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส จะมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารมลพิษอินทรีย์ มากกว่าโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ เพราะคาดว่าโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์มีการสูญเสียพื้นที่ผิวที่ว่างไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเนื่องจากใช้อุณหภูมิขณะสังเคราะห์สูงกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบอนาเทส ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดอนุภาคขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวสูง ทำให้สามารถดูดซับสารอินทรีย์ได้มากกว่า เพราะตัวเร่งปฏิกิริยาสัมผัสกับสารมลพิษอินทรีย์ได้มาก ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีพื้นที่ผิวสูงจะมีตำแหน่งที่ว่างไวต่อการเกิดปฏิกิริยามาก เพราะมีหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งเป็นตัวออกซิไดส์สารมลพิษอินทรีย์มาก ทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดใหญ่กว่า ลักษณะรูพรุนเป็นปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารมลพิษอินทรีย์เพราะตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีรูพรุนสูงจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพิ่มขึ้น

**กาญจนา ลือพงษ์, นงนุช ศศิธร (2553)** การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมด้วยเทคนิคโฟโตคะตะไลซิสร่วมกับกระบวนการดูดซับ มีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมโดยศึกษาผลของกระบวนการบำบัดแบบผสมผสานระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์ น้ำย้อมที่ใช้ในการบำบัด ได้แก่ น้ำย้อมสีโคเร็กซ์ สีรีแอคทีฟ สีแอซิด สีดิสเพิร์ส และสีเบสิก ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำย้อม คือ 1% owf น้ำสีที่ใช้ในการบำบัดเป็นน้ำสีที่ผ่านกระบวนการย้อมบนวัสดุสิ่งทอตามกระบวนการที่สมบูรณ์สีย้อมที่ใช้ทั้งหมดมีโครงสร้างเอโซ (Azo) จากการศึกษาพบว่าสีโคเร็กซ์และสีรีแอคทีฟให้ผลการบำบัดในกระบวนการต่อเนื่องจากเทคนิคโฟโตคะตะไลซิสร่วมกับกระบวนการดูดซับได้ดี ส่วนสีดิสเพิร์สควรใช้กระบวนการดูดซับเพียงอย่างเดียว สำหรับสีแอซิดและสีเบสิกมีความเข้มข้นของน้ำเสียที่เหลือจากกระบวนการน้อยจึงไม่นำมาทดสอบ สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสีโคเร็กซ์คือใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 10 กรัมต่อลิตร เวลา 6 ชั่วโมง และถ่านกัมมันต์ 5 กรัมต่อลิตร เวลา 2 ชั่วโมง สีรีแอคทีฟใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 10 กรัมต่อลิตร เวลา 6 ชั่วโมง และถ่านกัมมันต์ 10 กรัมต่อลิตร เวลา 2 ชั่วโมง ส่วนสีดิสเพิร์สใช้ถ่านกัมมันต์ 15 กรัมต่อลิตร เวลา 4 ชั่วโมง ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าเทคนิคโฟโตคะตะไลซิสร่วมกับกระบวนการดูดซับสามารถใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมได้ ผลการบำบัดจะขึ้นอยู่กับประเภทสีเป็นหลัก

**ฉันทญา คุ่มทรัพย์ (2556)** ศึกษาการปรับปรุงความว่องไวในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกช่วงวิ  
ติ-เบิล จากผลการทบทวนงานวิจัย พบว่าการเจือด้วยโลหะสามารถช่วยให้ไทเทเนียมไดออกไซด์  
ดูดกลืนแสงในช่วงวิติเบิลได้ เพราะการลดลงของแถบช่องว่างพลังงานอัน เนื่องมาจากเกิดขึ้น  
พลังงานของสารเจือระหว่างแถบช่องว่างพลังงาน แต่ปัญหาหลักของการเจือโลหะในตัวเร่ง  
ปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์คือ มีความว่องไวในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสช่วงวิติเบิลน้อยกว่า  
ในช่วงยูวี ดังนั้นงานวิจัย ในปัจจุบันและอนาคตจึงมุ่งเน้นที่การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีความ  
ว่องไวในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกช่วงวิติเบิลด้วยวิธีการเจือแบบผสม

**กันยาพร ไชยวงศ์, ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์** ศึกษาการใช้กระบวนการแสงอาทิตย์-โฟโต  
คะตะไลซิส สำหรับปฏิกรณ์แบบชั้นบันไดในการบำบัดสารเมทิลีนบลูในน้ำเสีย งานวิจัยนี้ได้ทำ  
การศึกษาาระบบแสงอาทิตย์-โฟโตคะตะไลซิส เพื่อกำจัดสารเมทิลีนบลู จากปฏิกรณ์ไหลแบบ  
ชั้นบันไดที่มีการไหลเวียน ซึ่งมี Stainless จำนวน 6 แผ่น วางสลับกับช่องพักน้ำ วางทำมุมเอียง 5  
องศา กับแนวระดับ การศึกษาได้ดูผลจากการใช้แสงจากหลอดยูวี และการใช้แสงอาทิตย์ พบว่าค่า  
สภาพความเป็นกรดเป็นด่างที่เหมาะสมเท่ากับ 3 เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมทิลีนบลูเพิ่มขึ้น  
อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้น ทำให้ได้ค่าคงที่ของการสลายตัวของสารเมทิลีนบลู(k) และค่าคงที่  
ของการสลายตัว (K) มีค่าเท่ากับ 0.6281 ppm และ 0.0320 ppm เมื่อใช้แสงจากหลอดยูวี และ  
0.7500 ppm และ 0.0216 ppm เมื่อใช้แสงอาทิตย์ และเมื่ออัตราการไหลเวียนของสารเมทิลีนบลู  
อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นด้วยทำให้ได้ ค่า k และ K เท่ากับ 0.4243 ppm และ 4.256 ppm เมื่อใช้  
แสงจากหลอดยูวี และ 0.4169 ppm และ 3.135 ppm เมื่อใช้แสงอาทิตย์นอกจากนั้นเมื่อทำการศึกษา  
ถึงผลของความเข้มแสงที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาพบว่าเมื่อค่าความเข้มแสงเฉลี่ยสูงจะใช้เวลา  
ในการเกิดปฏิกิริยาลดลงและจากการคำนวณค่ารังสีแสงอาทิตย์ในจังหวัดเชียงใหม่ในช่วงเวลา 1 ปี  
พบว่าในช่วงเดือนกุมภาพันธ์จะใช้เวลาในการบำบัดสารเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการแสงอาทิตย์-โฟ  
โตคะ-ตะไลซิสคำนวณค่ารังสีแสงอาทิตย์ในจังหวัดเชียงใหม่ในช่วงเวลา 1 ปีพบว่าพบว่าเป็น  
กระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อุตสาหกรรมผลิตผ้า และสีย้อม ที่  
มีโรงงานจำนวนมากทางภาคเหนือของไทยที่มักจะปล่อยสารประเภทสารมีสีต่างๆ เช่น เมทิลีนบลู,  
เมทิลออเรนจ์ ปะปนมากับน้ำเสียจากกระบวนการผลิตการปล่อยสารสีเหล่านี้ลงสู่แม่น้ำโดยไม่ได้  
กำจัดก็จะทำให้บริเวณน้ำดังกล่าวเกิดความสกปรก เกิดความไม่น่าดูต่อผู้พบเห็น ดังนั้นในการกำจัด  
ต้องอาศัยเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียขั้นสูง เช่นการตกตะกอนด้วยสารเคมี หรือการดูดซับด้วย  
ถ่านกัมมันต์ ซึ่งต้องใช้พลังงานในกระบวนการมาก ค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง และยังพบอีกว่าหลังจาก  
กระบวนการกำจัดดังกล่าวจะต้องมีการกำจัดสารเคมีที่เหลือจากกระบวนการอีกด้วยดังนั้นจึง  
ได้มีการคิดค้นกระบวนการแสงอาทิตย์-โฟโตคะตะไลซิส เพื่อทดแทนวิธีการกำจัดดังกล่าว และ  
เพื่อลดต้นทุนการผลิต เพราะสามารถนำเอาพลังงานแสงจากธรรมชาติมาใช้ควบคู่กับ ตัวเร่ง  
ปฏิกิริยา หรือตัวแคตาไลสต์ ซึ่งมักเป็นสารกึ่งตัวนำประเภท ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) ซึ่ง

ภายหลังกระบวนการการกำจัดแล้วสามารถนำสารดังกล่าวกลับมาใช้ได้อีก ทำให้ไม่ต้องมีการกำจัดตะกอนหรือสารภายหลังการบำบัด

**Kanna, M., Wongnawa, S., Sherdshoopongse, P., and Boonsin, P.** จากการศึกษาพฤติกรรมของการดูดซับโลหะบนพื้นผิวของผลึกออสติเนียนไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยผลึกออสติเนียนไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกเตรียมขึ้นจากไทเทเนียมเตตราคลอไรด์และสารละลายแอมโมเนียเจือจางที่อุณหภูมิต่ำ และนำไปพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD, EDX, RF, TGA, DSC, และ FT-IR พบว่ามีสูตรโมเลกุลเป็น  $\text{TiO}_2 \cdot 1.6\text{H}_2\text{O}$  มีน้ำเป็นองค์ประกอบ โดยมีพื้นที่ผิวสูงถึง  $449 \text{ m}^2/\text{g}$  และนำผลึกออสติเนียนไทเทเนียมไดออกไซด์ไปทดสอบความสามารถในการดูดซับโลหะบนพื้นผิวซึ่งได้แก่ Mn(II), Fe(III), Cu(II), และ Pb(II) ซึ่งความเข้มข้นของโลหะนั้นวัดได้ด้วยเครื่อง atomic absorption spectrometer โดยค่า adsorption isotherms ของโลหะนั้นศึกษาที่  $\text{pH} = 7$  สรุปได้ว่าค่าการดูดซับของ Mn(II), Cu(II), และ Pb(II) เป็นไปตามค่าของ Langmuir isotherm และค่าการดูดซับของ Fe(III) เป็นไปตามทั้งค่า Langmuir และ Freundlich isotherms.

**Kwon, C. H.; Shin, H.; Kim, J. H.; Choi, W. S., and Yoon, K. H. 2004.** จากการศึกษาการกำจัดสีสังเคราะห์เมทาลินบลูด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสของไทเทเนียมไดออกไซด์ แผ่นฟิล์มบางผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ในระดับนาโนบนกระจก, โพลีคาร์บอนเนต, โพลีเมทิลเมทาคริเลต และอลูมิเนียม สามารถเตรียมได้ด้วยเทคนิค sol - gel โดยใช้แอลกอฮอล์ในปริมาณที่แตกต่างกัน ซึ่งทุกตัวอย่างมีระดับอนุภาคอยู่ในระดับนาโน โดยมีสองเฟสคือ อนุภาค และบรูคไคลต์ แต่จะมีเฟสของบรูคไคลต์ในปริมาณที่มากกว่ามาก ซึ่งสถานภาพของแผ่นฟิล์มบางนั้นขึ้นกับธรรมชาติของสารตั้งต้น ถ้าหากว่าแผ่นฟิล์มหนาเกินไปก็จะทำให้ความสามารถในการกำจัดสีสังเคราะห์เมทาลินบลูนั้นลดลง โดยสถานภาพและปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสของแผ่นฟิล์มนั้นสามารถทำให้เหมาะสมโดยการปรับอุณหภูมิ สรุปได้ว่าปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสในการกำจัดสีสังเคราะห์ของแผ่นฟิล์มบางนั้นจะมีประสิทธิภาพดีที่สุดที่อุณหภูมิ  $400 \text{ }^\circ\text{C}$

**Ji-Chuan XU และคณะ** จากการศึกษาการเจือโลหะที่อยู่ในรูป  $\text{Zn}^{2+}$  ลงบนพื้นผิวของ  $\text{TiO}_2$  พบว่า  $\text{TiO}_2$  ที่เจือด้วย  $\text{Zn}^{2+}$  (อยู่ในรูป ZnO) เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสได้ดีกว่า  $\text{TiO}_2$  บริสุทธิ์ ทดสอบโดยดูการสลายตัวของ Methyl Orange ในน้ำภายใต้รังสี UV เป็นเวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง พบว่า  $\text{TiO}_2$  ที่เจือ ZnO มี Methyl Orange ที่เหลืออยู่ในอัตราที่น้อยกว่าไทเทเนียมบริสุทธิ์ จากนั้นนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค FT-IR, XRD, AAS และ X-Ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) พบว่าเกิด ZnO บนพื้นผิวของอนุภาคนาโน  $\text{TiO}_2$  และพันธะไฮโดรเจนรอบบริเวณนั้น ซึ่ง ZnO บนพื้นผิวจะยับยั้งการกลับมารวมกันใหม่ของอิเล็กตรอน-โฮล เป็นเหมือนส่วนที่มีการแยกประจุ

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 สารเคมี

1. ผลิตออกไซด์ฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ (Amorphous Titanium Dioxide)
2. ไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25
3. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NH}_4\text{OH}$ )
4. น้ำกลั่น (Distill Water)
5. สีสั่งเคราะห์อินทิกัลคาร์มีน (Indigo Carmine, IC)
6. สีสั่งเคราะห์เมทิลีน บลู (Methylene Blue, MB)
7. น้ำยางข้น (60% HA)

#### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. อุปกรณ์เครื่องแก้วต่างๆ
2. ตู้ฉายแสงยูวีที่มีหลอดยูวีขนาดกำลังวัตต์ 20 วัตต์ จำนวน 5 หลอด
3. เครื่อง X-Ray Diffraction (XRD)
4. เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)
5. เครื่อง Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX/EDS)
6. เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)
7. เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer (UV-VIS)
8. เครื่องปั่นเหวี่ยง
9. แท่งแม่เหล็ก
10. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
11. ตู้ดูดควัน
12. กระดาษฟอย
13. กาวตราช่าง
14. จานเพาะเชื้อ (Petri dish) ขนาด 4 นิ้ว

### 3.3 วิธีการเตรียม

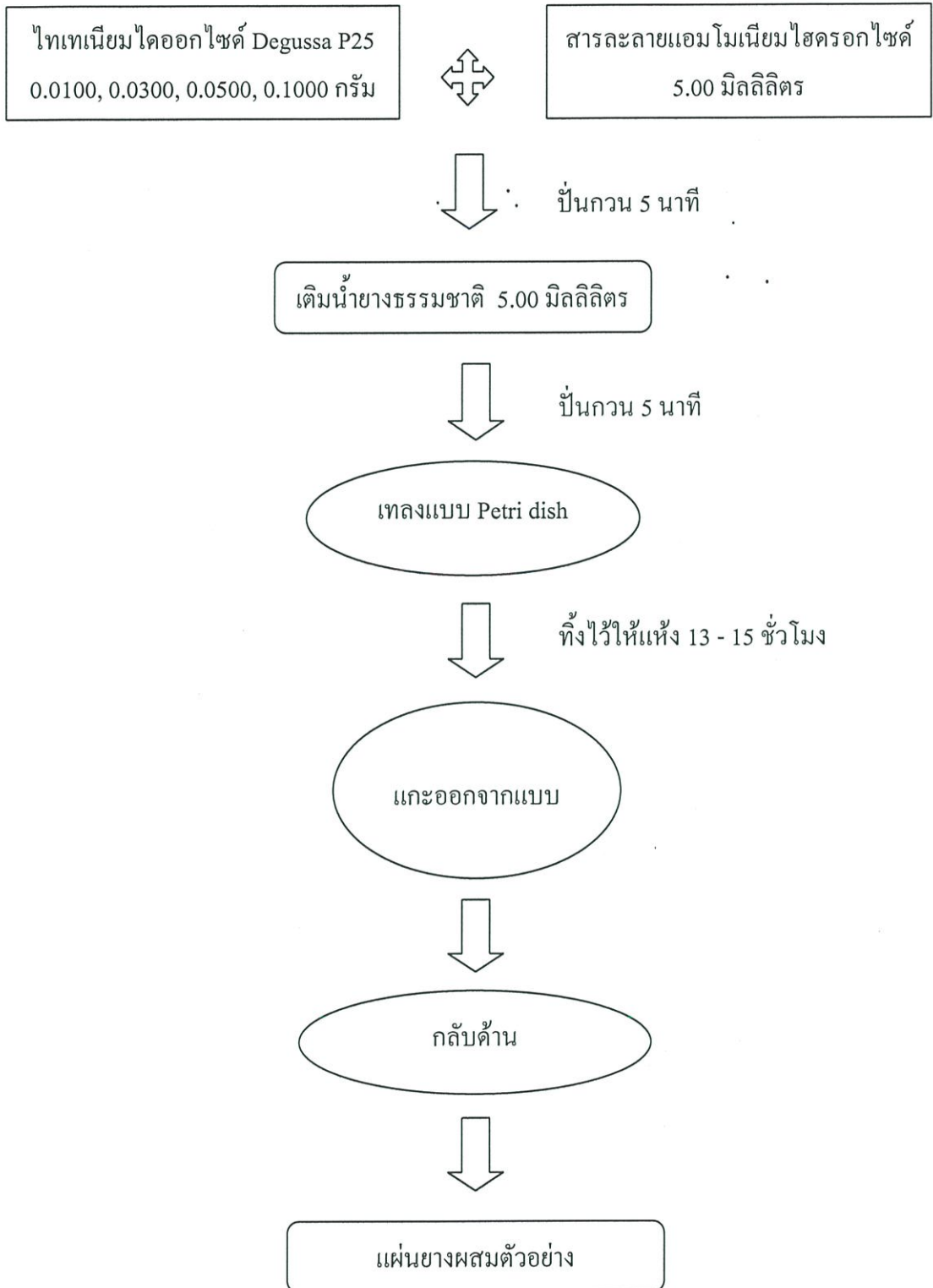
#### 3.3.1 ตอนที่ 1 การเตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25)

ในการเตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ในการทดลองนี้ เป็นการผสมระหว่าง (1) สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ), (2) ไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25, และ (3) น้ำยางชั้น (60% HA) ดังแสดงอัตราส่วนในตารางที่ 3.1 โดยมีการเตรียมแผ่นยางผสมดังนี้

1. ชั่งไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 ในปริมาณ 0.01, 0.03, 0.05, 0.10 กรัม ใส่ใน บีกเกอร์ขนาด 25 มิลลิลิตร ตามลำดับ
2. เติมสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ และปั่นกวนเป็นเวลา 5 นาที
3. เติมน้ำยางชั้น (60% HA) ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ และปั่นกวนเป็นเวลา 5 นาที
4. เทของผสมที่มีปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) 0.01, 0.03, 0.05, 0.10 กรัม ได้ลงใน petri dish ตามลำดับ
5. ทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 13-15 ชั่วโมง
6. แกะแผ่นยางผสมออกจากแบบ Petri dish แล้วกลับด้านที่สัมผัสกับแผ่นงานขึ้นด้านบน

ตารางที่ 3.1 แสดงอัตราส่วนการเตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25)

บีกเกอร์	น้ำยางชั้น (มิลลิลิตร)	สารละลายแอมโมเนียม ไฮดรอกไซด์ (มิลลิลิตร)	ไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 (กรัม)
1	5.00	5.00	0.0100
2	5.00	5.00	0.0300
3	5.00	5.00	0.0500
4	5.00	5.00	0.1000



รูปที่ 3.1 แผนภูมิแสดงการเตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์

### 3.3.2 ตอนที่ 2 การเตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ – ฟลิกอสัณฐานไทเทเนียม-ไดออกไซด์

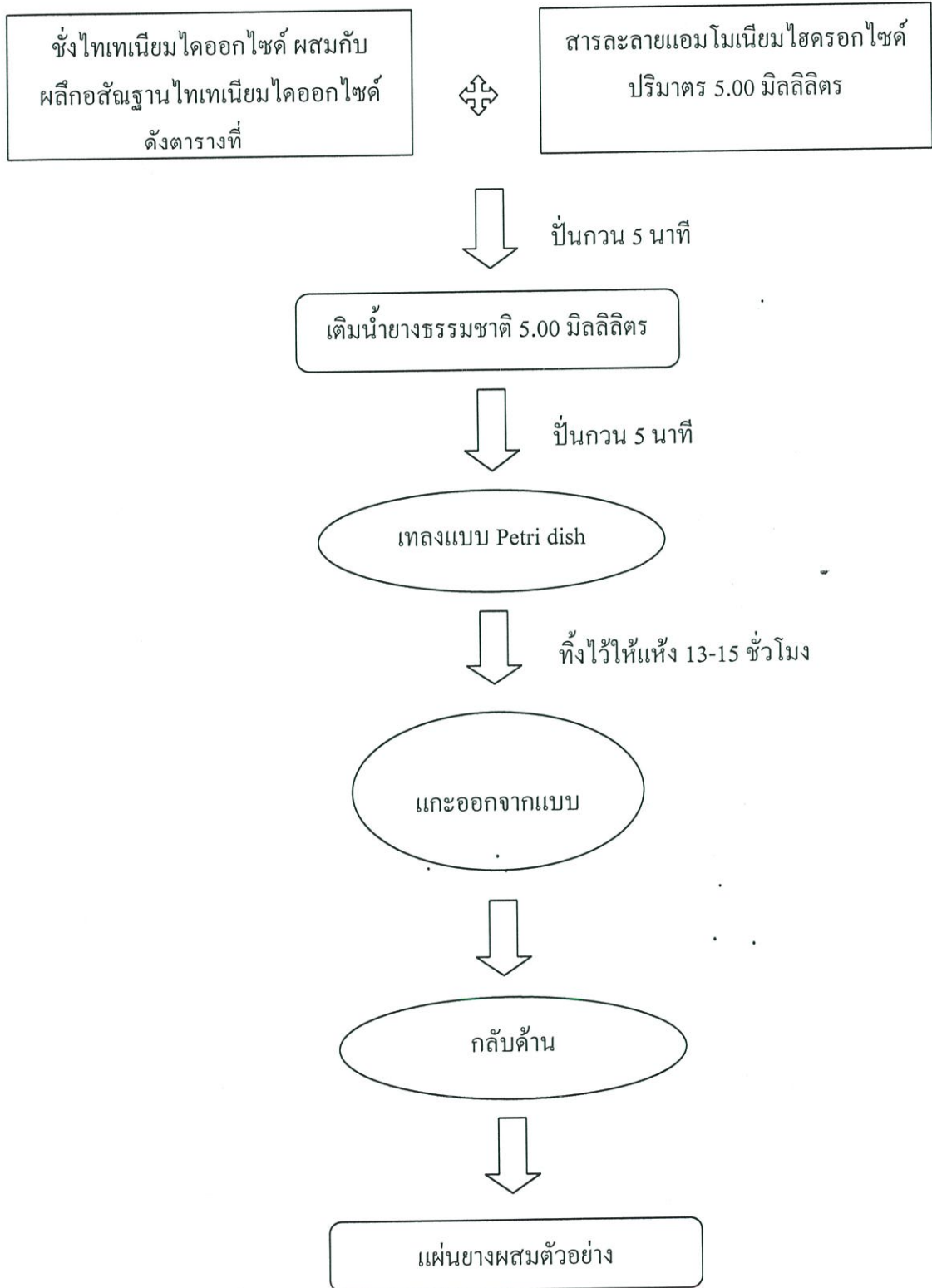
เป็นการผสมระหว่าง (1) สารละลายแอมโมเนีย ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ), (2) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25), (3) น้ำยางชั้น (60% HA), (4) ฟลิกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์

1. ทำการผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - ฟลิกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกันดังนี้
  - ไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.0500 กรัม-ฟลิกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ 0 กรัม
  - ไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.0100 กรัม-ฟลิกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.0400 กรัม
  - ไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.0200 กรัม-ฟลิกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.0300 กรัม
  - ไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.0250 กรัม-ฟลิกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.0250 กรัม
  - ไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.0400 กรัม-ฟลิกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.0100 กรัม
  - ไทเทเนียมไดออกไซด์ 0 กรัม - ฟลิกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.0500 กรัม
2. เติมสารละลายแอมโมเนีย ปริมาตร 5.00 มิลลิลิตร ในบีกเกอร์แต่ละใบ และปั่นกวนเป็นเวลา 5 นาที
3. เติมน้ำยางชั้นปริมาตร 5.00 มิลลิลิตร ในบีกเกอร์แต่ละใบ และปั่นกวนอีก 5 นาที
4. เทของผสมที่ได้ทั้งหมดลงใน petri dish
5. ทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 13-15 ชั่วโมง
6. แกะแผ่นยางผสมออกจากแบบ Petri dish

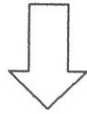
\*หมายเหตุ: ในการทดลองนี้ผู้วิจัยไม่ได้สังเคราะห์ผงฟลิกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์เอง แต่ได้รับความอนุเคราะห์จาก ดร.สุพัฒน์ บุตรดี อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัยราชภัฏ-นครศรีธรรมราช ซึ่งสามารถเตรียมได้ตามเอกสารนี้ Kanna, M., Wongnawa, S., Sherdshoopongse, P., and Boonsin, P. “Adsorption behavior of some metal ions on hydrated amorphous titanium dioxide surface”, 2005

ตารางที่ 3.2 แสดงอัตราส่วนการเตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - ผลึกอสัณฐาน  
ไทเทเนียมไดออกไซด์

บีกเกอร์	น้ำยางชั้น (มิลลิลิตร)	สารละลาย แอมโมเนียม ไฮดรอกไซด์ (มิลลิลิตร)	ไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 (กรัม)	ผลึกอสัณฐาน ไทเทเนียม ไดออกไซด์ (กรัม)
1	5.00	5.00	0.0400	0.0100
2	5.00	5.00	0.0300	0.0200
3	5.00	5.00	0.0250	0.0250
4	5.00	5.00	0.0100	0.0400
5	5.00	5.00	0.0000	0.0500

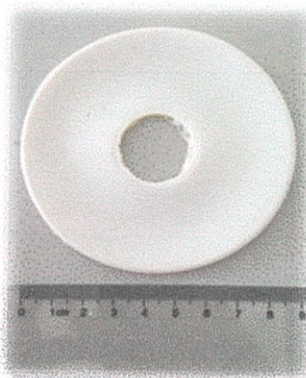
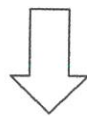
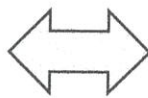


รูปที่ 3.2 แผนภูมิแสดงการเตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์



ปั่นกวน 5 นาที  
และเติมน้ำยารวมชาติ 5.00 ml

ปั่นกวนอีก 5 นาที



ทิ้งไว้ให้แห้ง 13-15 ชั่วโมง

รูปที่ 3.3 แสดงขั้นตอนการเตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ และแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์

### 3.4 เทคนิคการวิเคราะห์พิสูจน์เอกลักษณ์

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

เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์หาโครงสร้างของสารประกอบอินทรีย์ โดยใช้หลักการการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด เมื่อรังสีอินฟราเรดถูกดูดกลืนพลังงานนั้นจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานการหมุนและการสั่นของโมเลกุล โดยโมเลกุลของสารแต่ละชนิดจะให้สเปกตรัมที่เป็นเอกลักษณ์ของพันธะในโมเลกุลนั้น ๆ ซึ่งเป็นการพิสูจน์หาโครงสร้างของสารประกอบ



ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยต้องการวิเคราะห์หาโครงสร้างของสารประกอบอินทรีย์ (Cis-1,4 isoprene) และสารประกอบอินทรีย์ (Ti-O) ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์

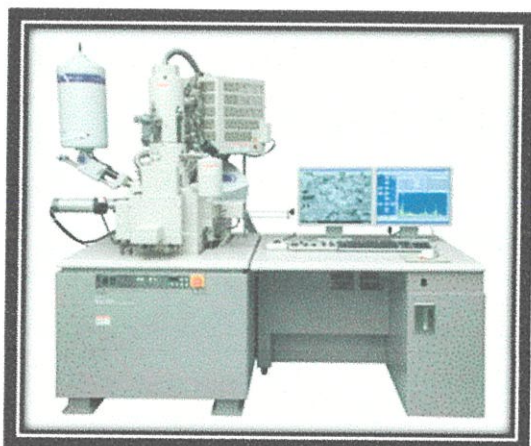
#### 2) X-Ray Diffraction (XRD)



เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง (Non-destructive method) โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆ ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐานโดยเทคนิคใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบ และระบุวิธภาคองค์ประกอบต่าง ๆ ของสารตัวอย่าง

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยต้องการยืนยันโครงสร้างวิเคราะห์โครงสร้างผลึก และระบุวิธภาคองค์ประกอบต่าง ๆ ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์

### 3) Scanning Electron Microscope (SEM)



กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร การเตรียมตัวอย่างเพื่อที่จะดูด้วยเครื่อง SEM นี้ไม่จำเป็นต้องที่ตัวอย่างจะต้องมีขนาดบางก็ได้ (เพราะไม่ได้ตรวจวัดจากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง) การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้เป็นภาพลักษณะ 3 มิติ

ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาต้นฐานวิทยาและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยต้องการศึกษาต้นฐานวิทยา และดูรายละเอียดพื้นผิวของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์

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



อุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวชิ้นงานตัวอย่าง การใช้กล้องจุลทรรศน์ SEM ร่วมกับเทคนิค EDX ทำให้การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานมีความละเอียด และได้ข้อมูลที่สมบูรณ์มากขึ้น

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยต้องการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวชิ้นงานของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งเทคนิค EDX แตกต่างจากเทคนิค SEM ตรงที่ EDX ให้ความละเอียด และให้ข้อมูลที่สมบูรณ์

### 3.5 การทดสอบประสิทธิภาพ

ในการทดสอบประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ จะทำการทดสอบตามขั้นตอนดังนี้

1) นำแผ่นยางที่เตรียมได้มาวางใน Petri dish ที่มีสีสังเคราะห์ปริมาตร 50.00 มิลลิลิตร (ความเข้มข้น เท่ากับ  $2.5 \times 10^{-5}$  โมลาร์) พร้อมกับวางแท่งแม่เหล็กปั่นกวนลงไป

2) เปิดหลอดไฟ UV พร้อมกับปั่นกวน

3) เก็บตัวอย่างสีสังเคราะห์ที่ใช้ทดสอบมา 3.00 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง ทุก 30 นาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

4) นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer ซึ่งเปอร์เซ็นต์การคำนวณได้จากสมการ

$$\% \text{ การกำจัดสี} = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100\%$$

เมื่อ  $A_0$  คือ ค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้น และ  $A_t$  คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่เวลาใดๆ

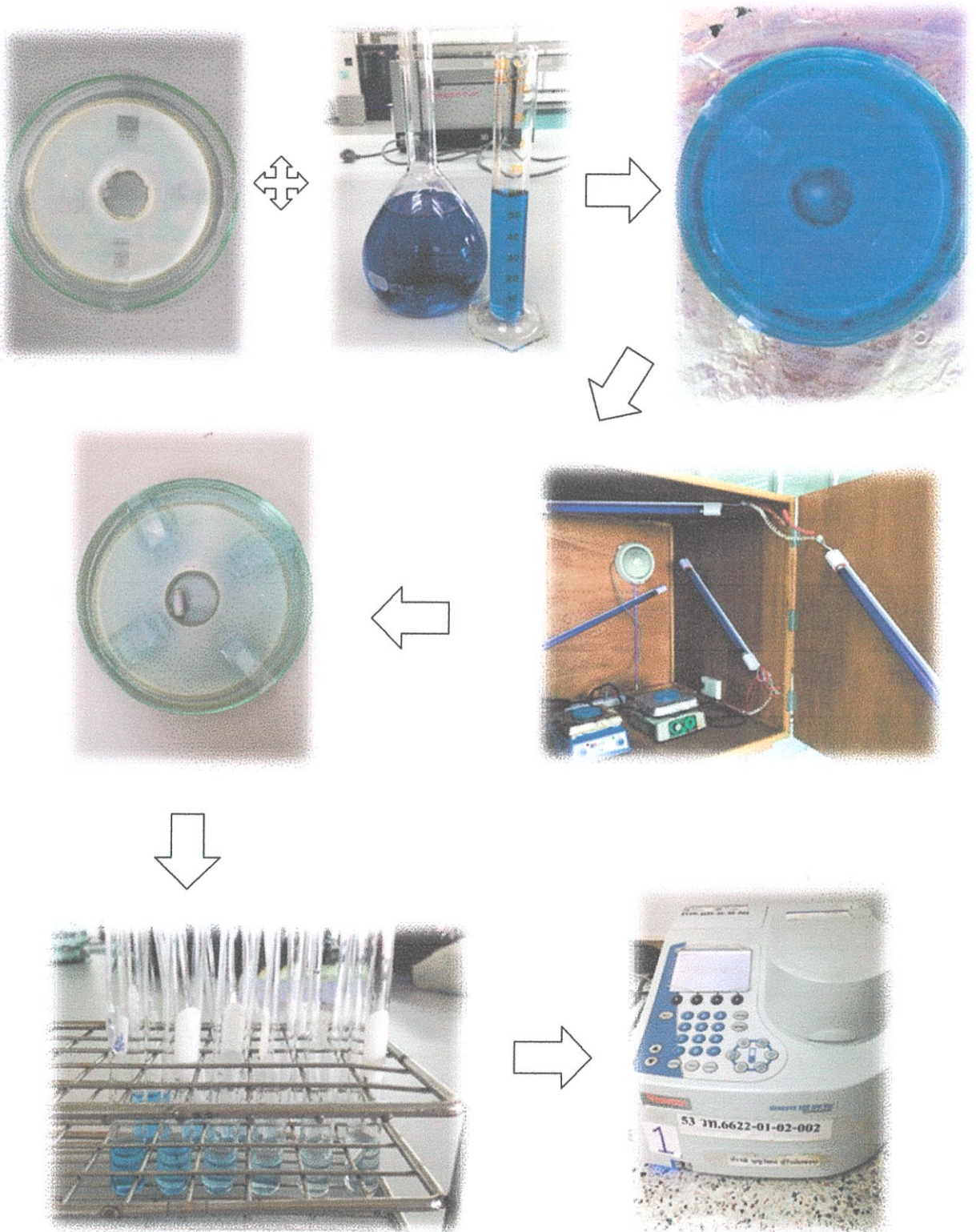
การทดสอบค่าการดูดกลืนสีด้วยเครื่อง UV - VIS Spectrophotometer



เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่าความเข้มของแสงในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืน โดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่างซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน และสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยต้องการใช้บ่งบอกปริมาณความเข้มข้นของสีตัวอย่างเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ในการกำจัดสีสังเคราะห์ และวัดค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์

ขั้นตอนการกำจัดสีสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส และการวัดค่าการดูดกลืนสีสังเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการกำจัดสีสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส และการวัดค่าการดูดกลืนสีสังเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer

### 3.6 การทดสอบประสิทธิภาพในการใช้งานซ้ำของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลิตภัณฑ์มาตรฐานไทเทเนียมไดออกไซด์

การทดสอบประสิทธิภาพในการใช้งานซ้ำของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลิตภัณฑ์มาตรฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ในการทดสอบทำเหมือนกับการทดสอบประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส โดยทำการทดสอบการใช้งานซ้ำจำนวน 5 ครั้ง ซึ่งแต่ละครั้งนั้นจะทำการวัดค่าการดูดกลืนสีสังเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer และคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์มาเปรียบเทียบกัน

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การศึกษาค่าเตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ และแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลึกออสัญฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ได้ทำการเตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ และแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลึกออสัญฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ขึ้นมา โดยเป็นการเตรียมแบบง่ายๆ โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ ผลึกออสัญฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ น้ำยางข้น และแอมโมเนีย ซึ่งลักษณะตัวอย่างของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ และแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - ผลึกออสัญฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ แสดงดังรูป



รูปที่ 4.1 แสดงตัวอย่างแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์

หรือแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - ออสัญฐานไทเทเนียมไดออกไซด์

ในการศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ และไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลึกออสัญฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ผู้วิจัยได้ทำการสุมัดแผ่นยางมาบางส่วนเพื่อใช้ในการวิเคราะห์

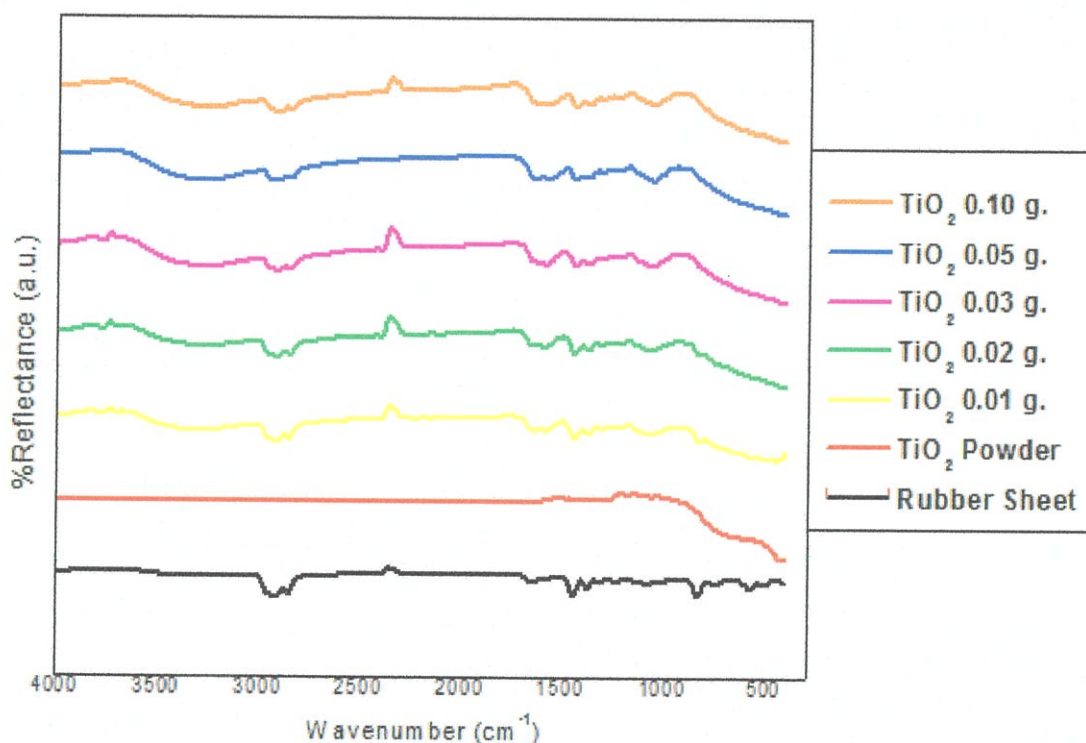
## 4.1 การศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ และไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกัน

### 4.1.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared

#### Spectroscopy

การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชัน และวิเคราะห์โครงสร้างธาตุองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่าง ได้แก่ ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ ผงผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ แผ่นยางเปล่า แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ และแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกัน

#### 1. การเตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25

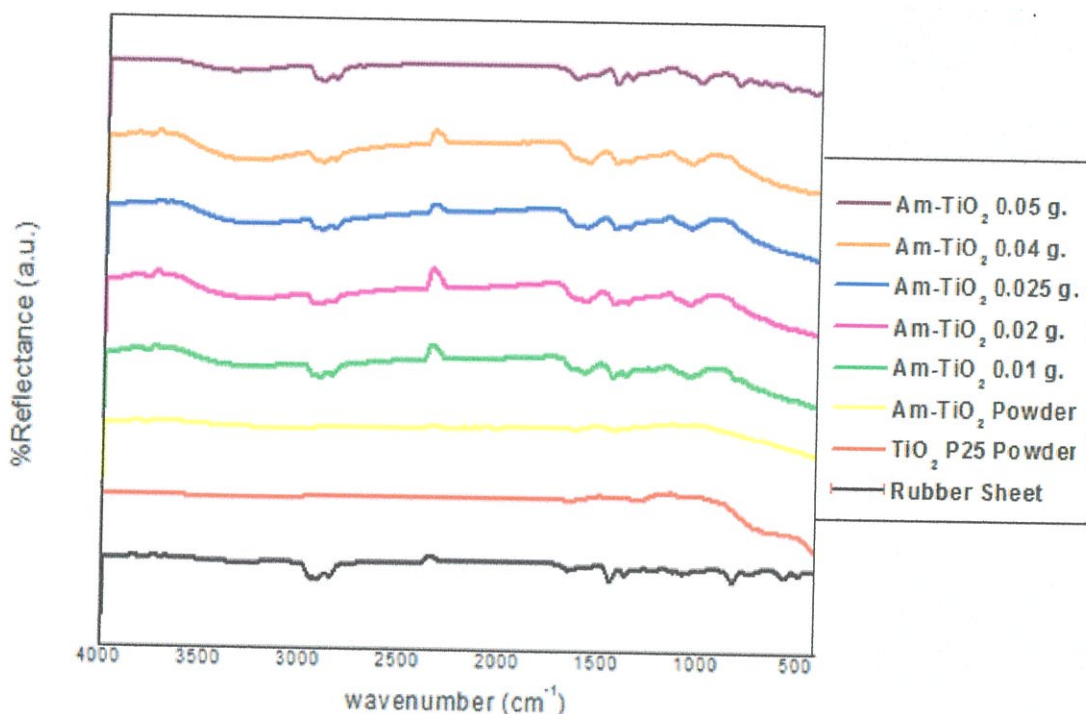


รูปที่ 4.2 กราฟ FT-IR ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ แผ่นยางเปล่า และแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy พบว่าแผ่นยางเปล่า(เส้นสีดำ) มีโครงสร้าง คือ cis-isoprene โดยมีแถบการสั่นของเลขคลื่นปรากฏที่ 2,960 cm<sup>-1</sup> ซึ่งมีลักษณะการสั่นแบบตรงของ C-H (C-H Stretching) และพบเลขคลื่นที่ 2,920 cm<sup>-1</sup> และ 2,855 cm<sup>-1</sup> ซึ่งมีลักษณะการสั่นแบบตรงของทั้ง CH<sub>3</sub> ที่สมมาตรและ CH<sub>3</sub> ที่ไม่สมมาตร (CH<sub>3</sub>

Stretching) ตามลำดับ และมีแถบการสั่นของเลขคลื่นปรากฏที่  $1,447\text{ cm}^{-1}$  และ  $1,376\text{ cm}^{-1}$  มีลักษณะการสั่นแบบโค้งงอของ  $\text{CH}_3$  ที่สมมาตรและ  $\text{CH}_3$  ที่ไม่สมมาตร ( $\text{CH}_3$  Bending) ซึ่งสอดคล้องกับตารางที่ 4.1 และเมื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ และแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่าแถบการสั่นของเลขคลื่นปรากฏที่  $1,000\text{ cm}^{-1}$  ถึง  $500\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นการสั่นของ Ti-O ซึ่งสอดคล้องกับการเปรียบเทียบ ดังรูปที่ 4.3

## 2. การเตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลิตภัณฑ์ฐานไทเทเนียมไดออกไซด์



รูปที่ 4.3 กราฟ FT-IR ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ ผงผลิตภัณฑ์ฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ แผ่นยางเปล่า และแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลิตภัณฑ์ฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกัน

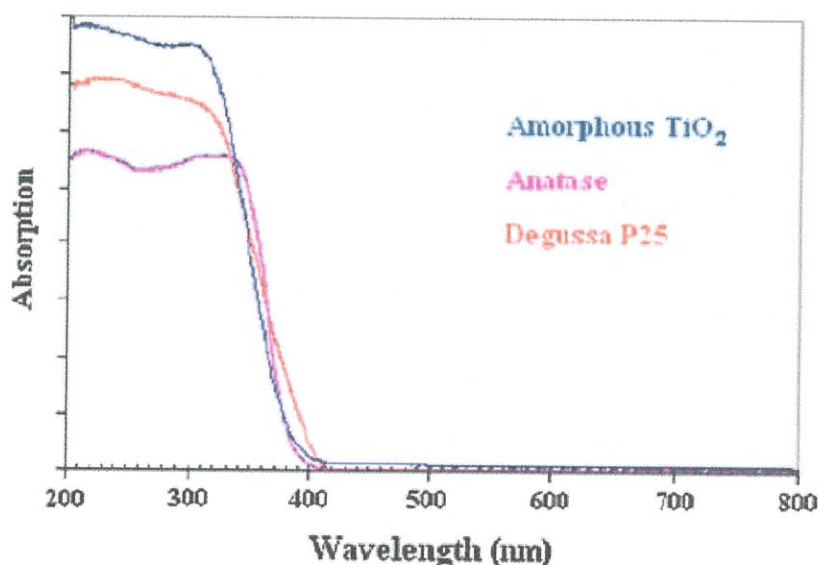
จากรูปที่ 4.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy พบว่าแผ่นยางเปล่า (เส้นสีดำ) มีโครงสร้าง คือ cis-isoprene โดยมีแถบการสั่นของเลขคลื่นปรากฏที่  $2,960\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งมีลักษณะการสั่นแบบตรงของ C-H (C-H Stretching) และพบเลขคลื่นที่  $2,920\text{ cm}^{-1}$  และ  $2,855\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งมีลักษณะการสั่นแบบตรงของทั้ง  $\text{CH}_3$  ที่สมมาตรและ  $\text{CH}_3$  ที่ไม่สมมาตร (C-H Stretching) ตามลำดับ และมีแถบการสั่นของเลขคลื่นปรากฏที่  $1,447\text{ cm}^{-1}$  และ  $1,376\text{ cm}^{-1}$  มีลักษณะการสั่นแบบโค้งงอของ  $\text{CH}_3$  ที่สมมาตรและ  $\text{CH}_3$  ที่ไม่สมมาตร ( $\text{CH}_3$  Bending) ซึ่งสอดคล้องกับตารางที่ 4.1 และเมื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ ผงผลิตภัณฑ์ฐานไทเทเนียม

ไดออกไซด์ และแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - ผลึกอสังฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่ามีแถบการสั่นของเลขคลื่นปรากฏที่  $1,000\text{ cm}^{-1}$  ถึง  $500\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นการสั่นของ Ti-O และ Am-Ti-O ซึ่งสอดคล้องกับการเปรียบเทียบของรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.1 แสดงเลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ

Assignment	K ( $\text{cm}^{-1}$ ) Pure NRL	K ( $\text{cm}^{-1}$ ) Heated NRL	K ( $\text{cm}^{-1}$ ) NRL-silver nanocomposite
O-H stretching	-	-	3100-3600
N-H stretching	-	-	3366
N-H stretching	-	-	3274
CH <sub>3</sub> stretching	2960	2960	2960
CH <sub>2</sub> asymmetry stretching	2920	2920	2920
CH <sub>2</sub> symmetry stretching	2855	2855	2855
C=O symmetric stretching	1667	1667	1620
CH <sub>2</sub> Bending	1447	1447	1380
C-H asymmetric bend	1376	1376	1318
CH <sub>2</sub> wagging	1126	1126	1126
C-CH <sub>2</sub> stretching	1086	1086	1086
C=C-H bending	838	838	818

(ที่มา: E.J. Guidelli et al. / Spectrochimica Acta Part A 82 (2011) 140-145)



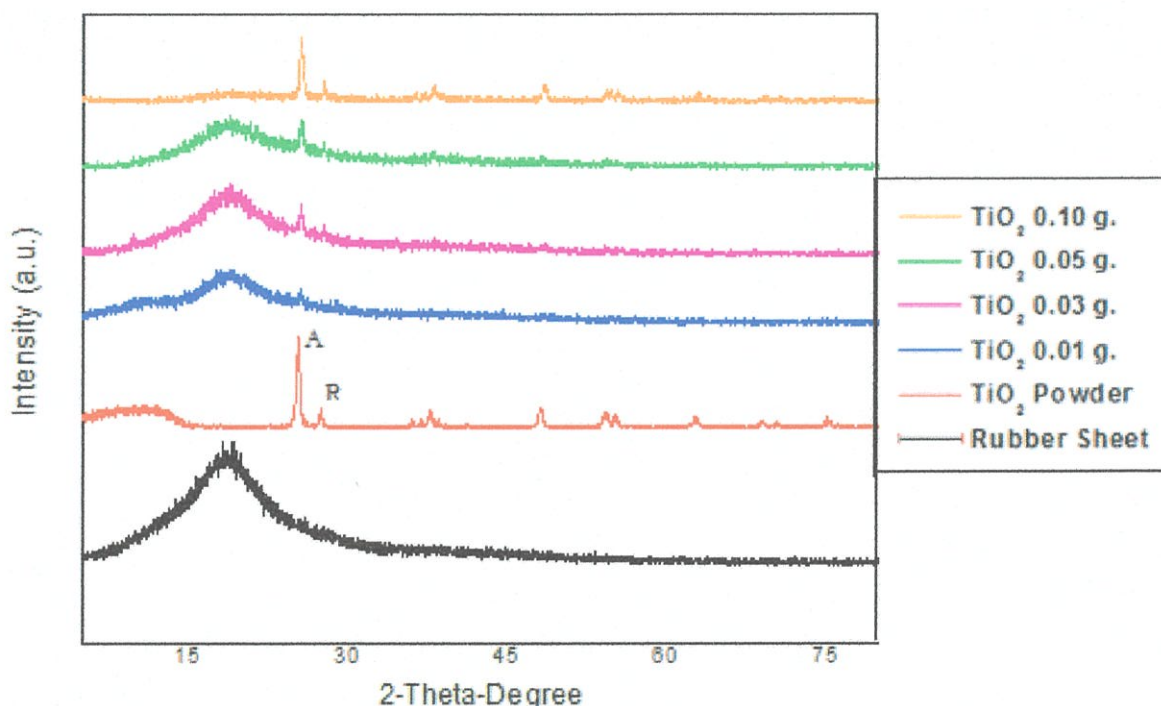
รูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบค่า Reflectance Spectra ของผลึกอสังฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ อนาตาส และไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25)

(ที่มา: Miki Kanna / J Sol-Gel Sci Technol (2010) 53:162-170)

#### 4.1.2 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction)

การวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างผลึกของสารประกอบ และระบุวิฤภาคองค์ประกอบต่างๆของตัวอย่าง ได้แก่ ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ ผงผลึกอสังฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ แผ่นยางเปล่าแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ และแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลึกอสังฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกัน

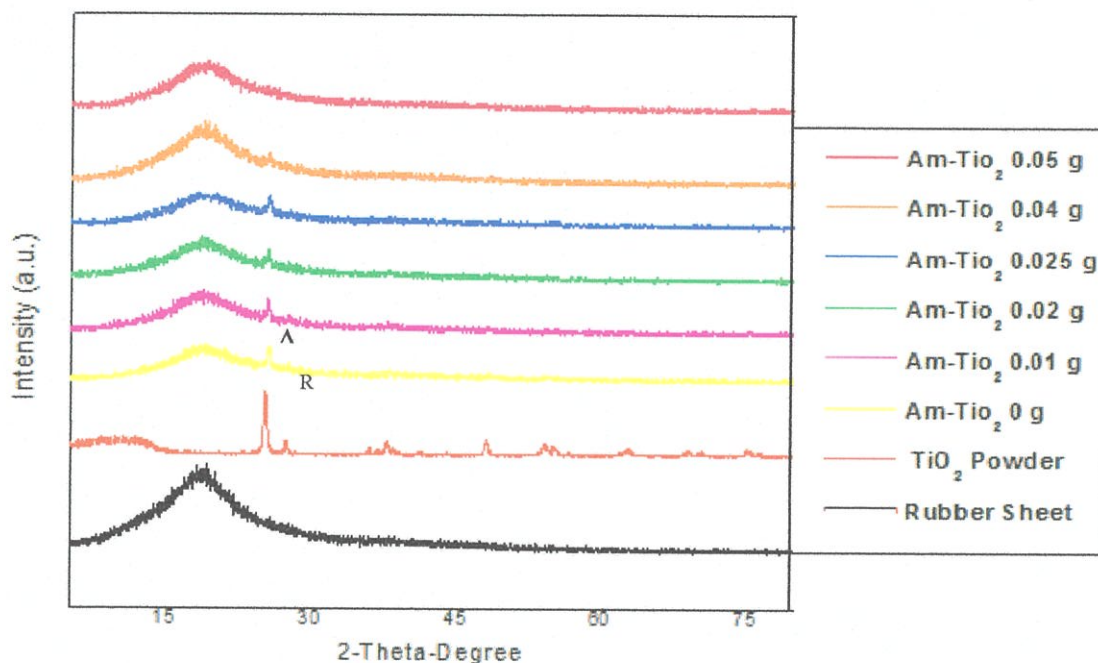
##### 1. การเตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25



รูปที่ 4.4 รูปแบบ XRD ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ แผ่นยางเปล่า และแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ในปริมาณที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.5 การศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction) พบว่าที่ตำแหน่งการเลี้ยวเบน 2-Theta เท่ากับ 20 องศา เป็นตำแหน่งการเลี้ยวเบนของยาง และตำแหน่งการเลี้ยวเบน 2-Theta เท่ากับ 25 องศา เป็นตำแหน่งการเลี้ยวเบนของโครงสร้างอนาเทส (101) และ 2-Theta เท่ากับ 27.50 องศา เป็นตำแหน่งการเลี้ยวเบนของโครงสร้าง รูไทล์ (110) ซึ่งทั้งสองโครงสร้างนี้เป็นตำแหน่งการเลี้ยวเบนของไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 โดยจากการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้าง พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์มากขึ้น ตำแหน่งการเลี้ยวเบนของโครงสร้างอนาเทสและโครงสร้างรูไทล์จะมากขึ้นเรื่อยๆ อย่างชัดเจน ตามลำดับ

## 2. การเตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์



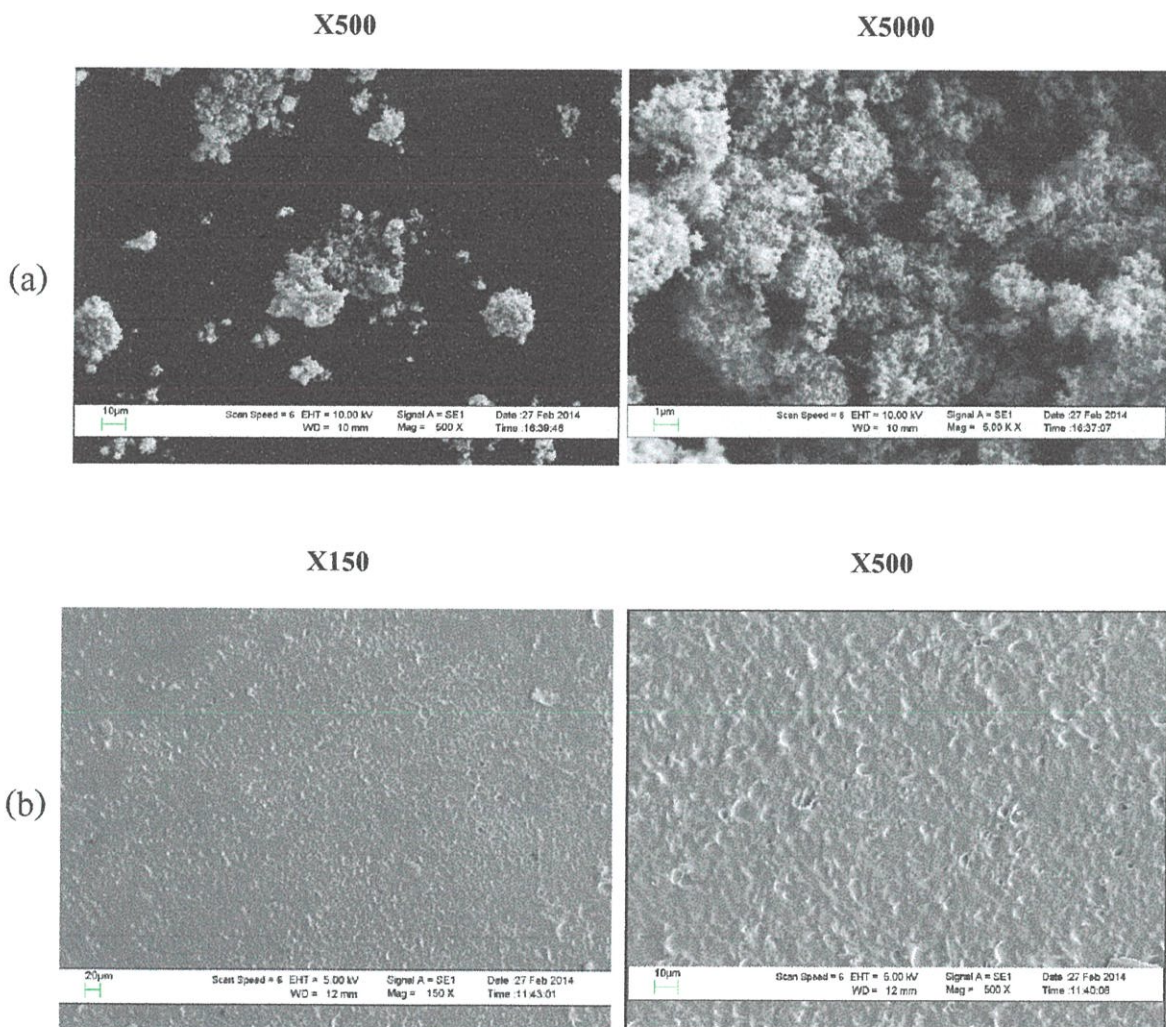
รูปที่ 4.6 รูปแบบ XRD ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ แผ่นยางเปล่า และแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกัน

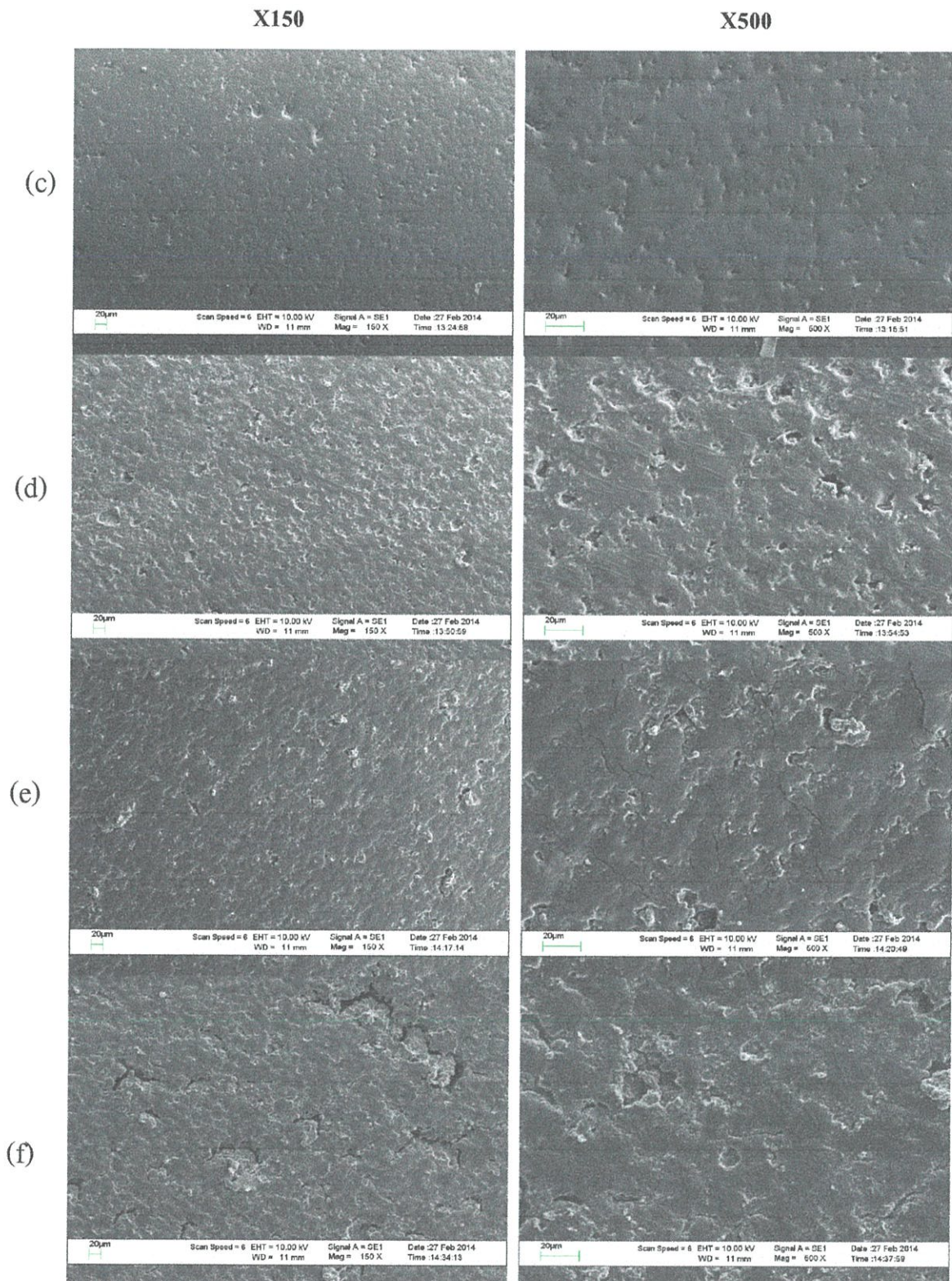
จากรูปที่ 4.6 การศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction) พบว่าที่ตำแหน่งการเลี้ยวเบน 2-Theta เท่ากับ 20 องศา เป็นตำแหน่งการเลี้ยวเบนของยาง และตำแหน่งการเลี้ยวเบน 2-Theta เท่ากับ 25 องศา เป็นตำแหน่งการเลี้ยวเบนของโครงสร้างอนาเทส (101) และ 2-Theta เท่ากับ 27.50 องศา เป็นตำแหน่งการเลี้ยวเบนของโครงสร้าง รูไทล์ (110) ซึ่งทั้งสองโครงสร้างนี้เป็นตำแหน่งการเลี้ยวเบนของไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 โดยจากการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้าง พบว่าเมื่อลดปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ และเพิ่มปริมาณผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ตำแหน่งการเลี้ยวเบนของโครงสร้างอนาเทส และโครงสร้างรูไทล์จะค่อย ๆ ลดลงอย่างชัดเจน ตามลำดับ เนื่องจากผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่ปรากฏตำแหน่งการเลี้ยวเบน

### 4.1.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)

การศึกษาสัณฐานวิทยา และรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง ได้แก่ ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ ผงผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ แผ่นยางเปล่า แผ่นยางผสมไทเทเนียมได-ออกไซด์ และแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกัน การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเทคนิค SEM แสดงได้ดังนี้

#### 1. การเตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25

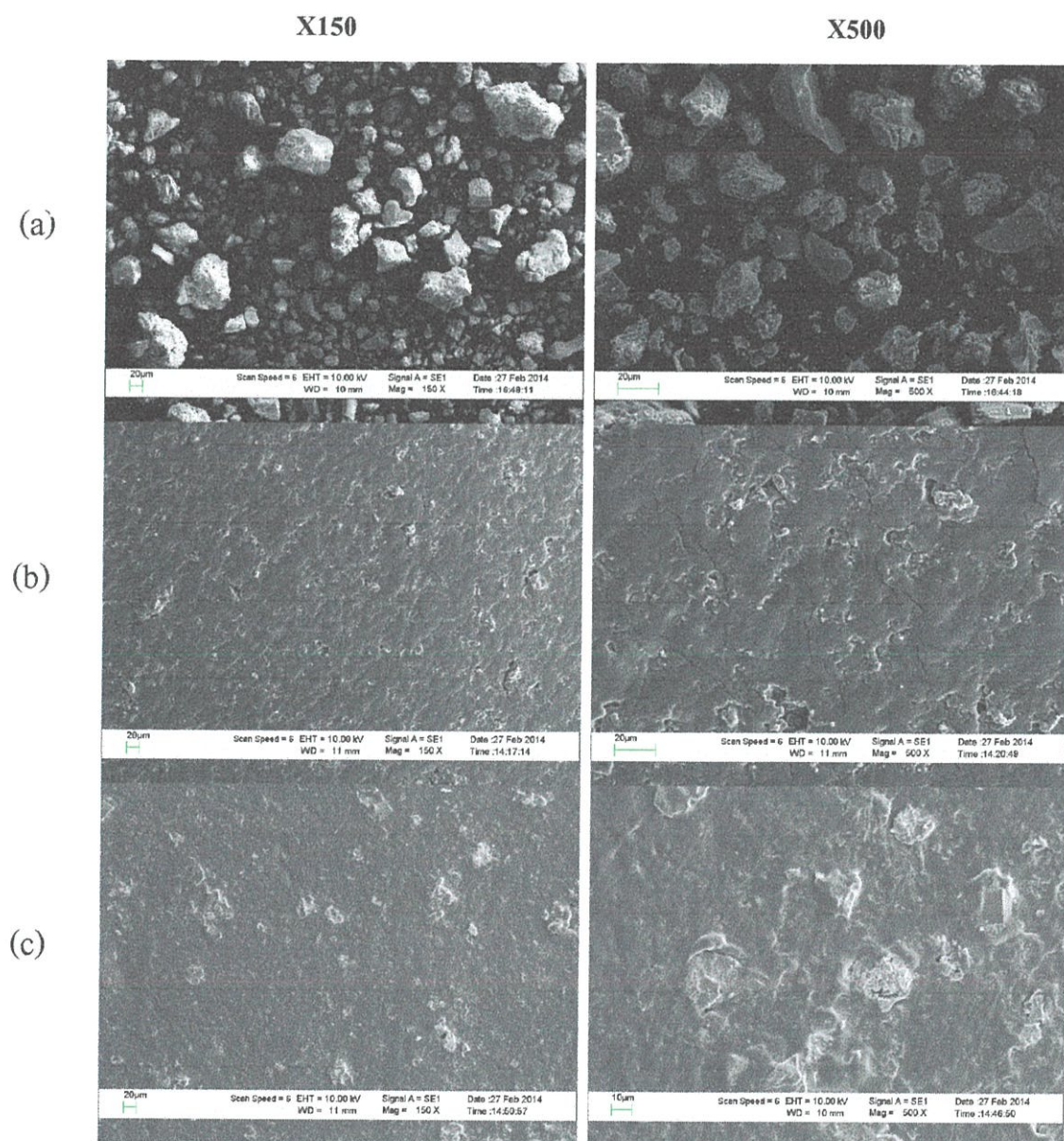




รูปที่ 4.7 ภาพแสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของ (a) พงไทเทเนียมไดออกไซด์, (b) แผ่นยางเปล่า, (c) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.01 กรัม, (d) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03 กรัม, (e) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.05 กรัม, (f) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.10 กรัม

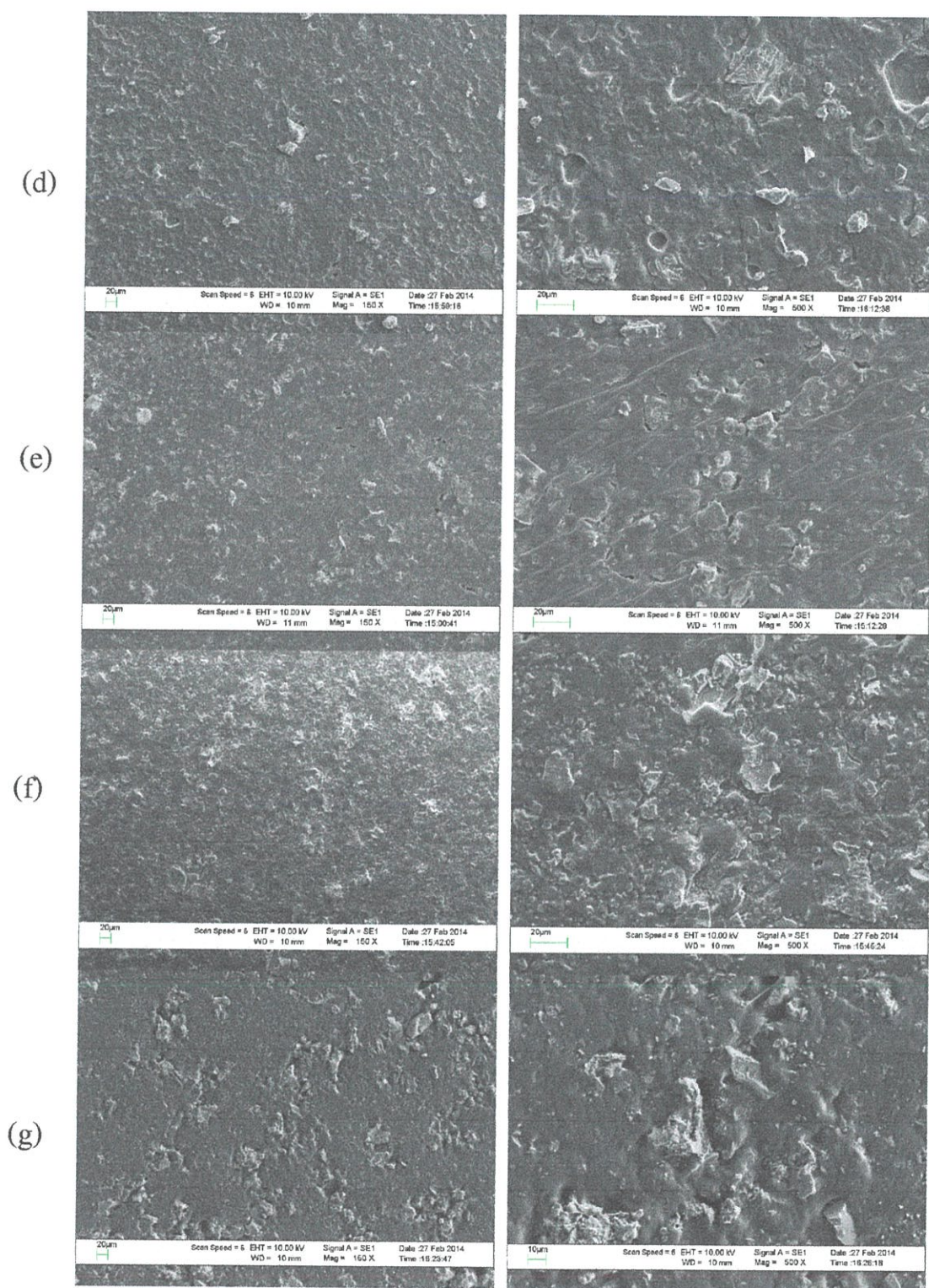
จากรูปที่ 4.7 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) ที่บริเวณพื้นผิวของแผ่นยางผสม จากการตรวจสอบแผ่นยางเปล่า พบว่าไม่มีการกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์ปรากฏอยู่ ซึ่งเมื่อตรวจสอบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่ามีลักษณะเกรนที่ค่อนข้างเล็ก และเมื่อเพิ่มปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ขึ้นเรื่อยๆ จะเห็นการกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์บริเวณพื้นผิวของแผ่นยางผสมตามการเพิ่มปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์

## 2. การเตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลิตภัณฑ์ฐานไทเทเนียมไดออกไซด์



X150

X500



รูปที่ 4.8 ภาพแสดงลักษณะสัณฐานวิทยา ของ (a) ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์

(b) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.05 - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0 กรัม

(c) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.04-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.01 กรัม

(d) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.02 กรัม

(e) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.025-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.025 กรัม

(f) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.01-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.04 กรัม

(g) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.01-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.05 กรัม

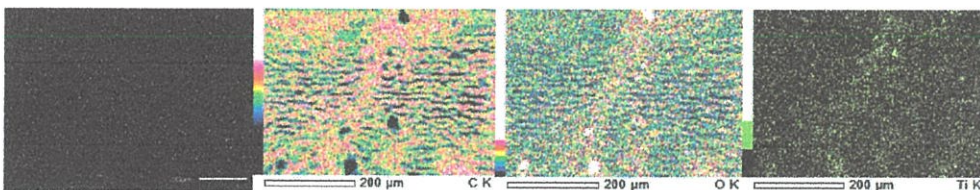
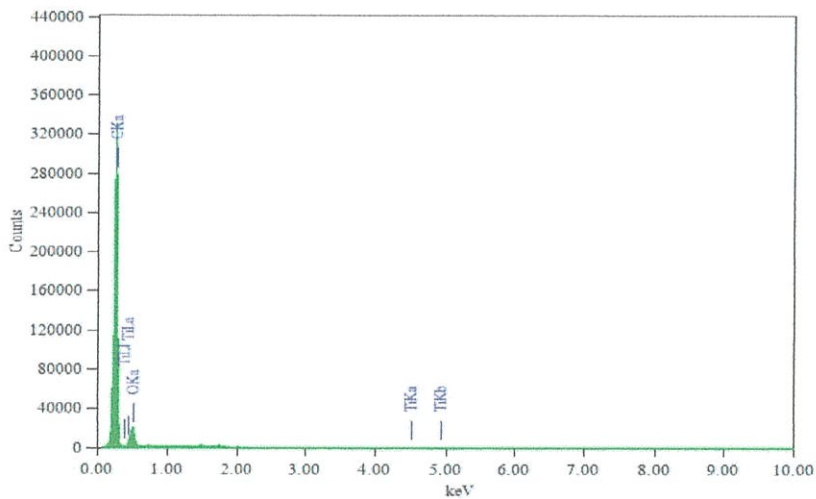
จากรูปที่ 4.8 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) ที่บริเวณพื้นผิวของแผ่นยางผสม จากการตรวจสอบพบว่าเมื่อลดปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ลง และเพิ่มปริมาณผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ขึ้น จะเห็นการกระจายของไทเทเนียมไดออกไซด์น้อยลง และเห็นลักษณะเกรนที่ใหญ่ขึ้นของผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีขนาดเกรนที่เล็กกว่าผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์

#### 4.1.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบภายในตัวอย่าง (Energy-Dispersive X-Ray Spectroscopy)

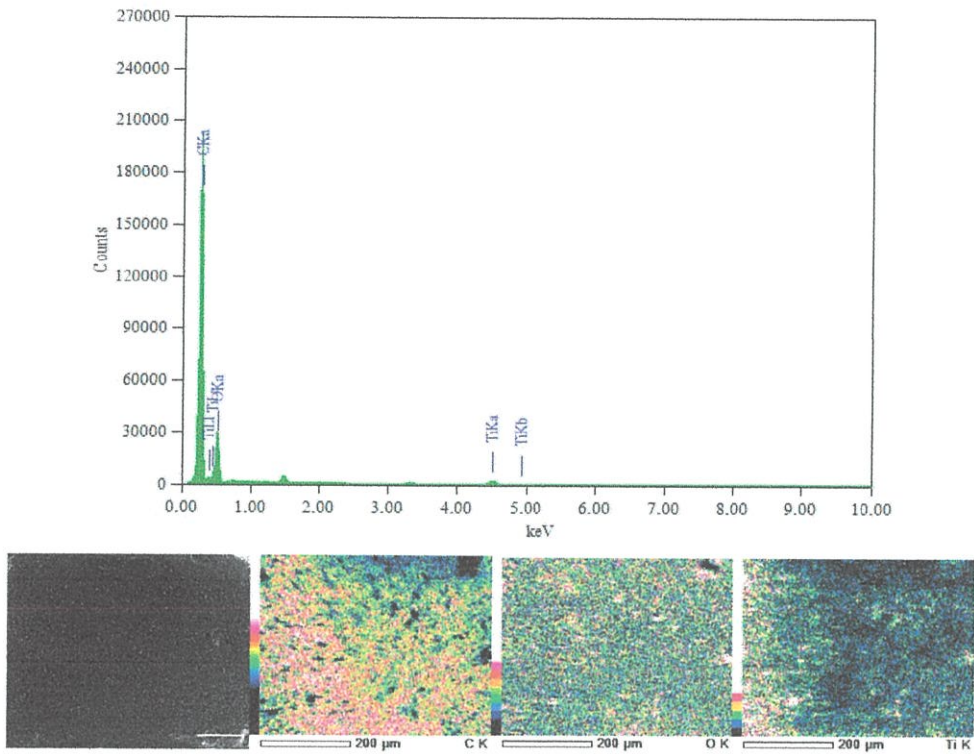
การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวของตัวอย่าง ได้แก่ ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ ผลึกกอสฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ แผ่นยางเปล่า แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ และแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลึกกอสฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกัน การใช้กล้องจุลทรรศน์ SEM ร่วมกับเทคนิค EDX ทำให้การวิเคราะห์ลักษณะบนพื้นผิวมีความละเอียด และได้ข้อมูลที่สมบูรณ์มากขึ้น

##### 1. การเตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25

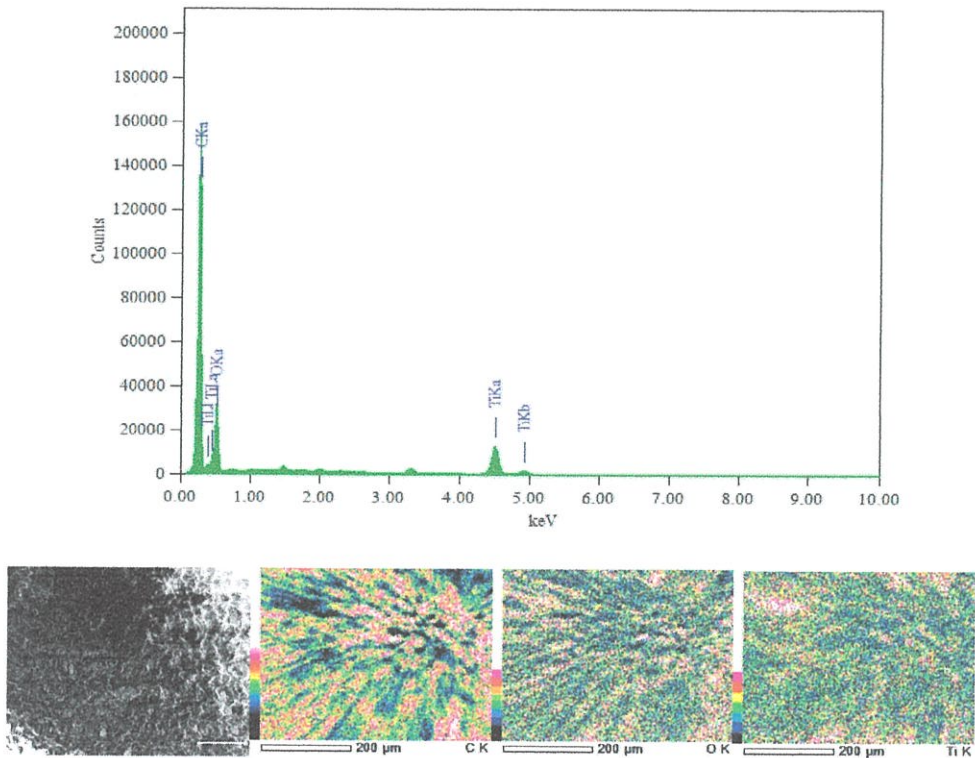
###### (a) แผ่นยางเปล่า



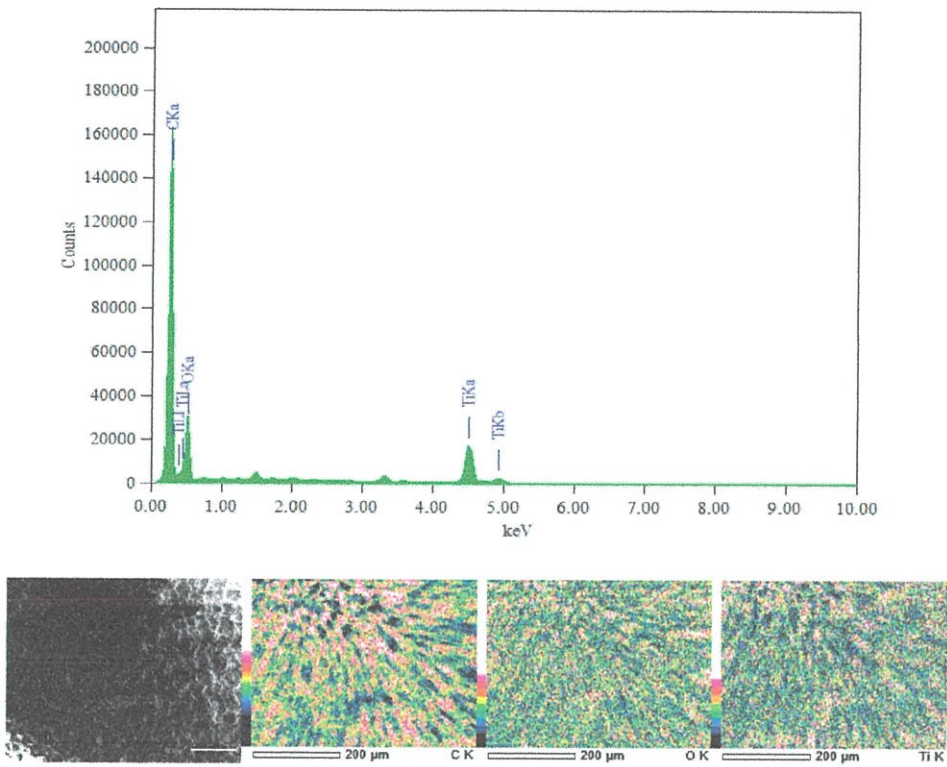
(b) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.01 กรัม



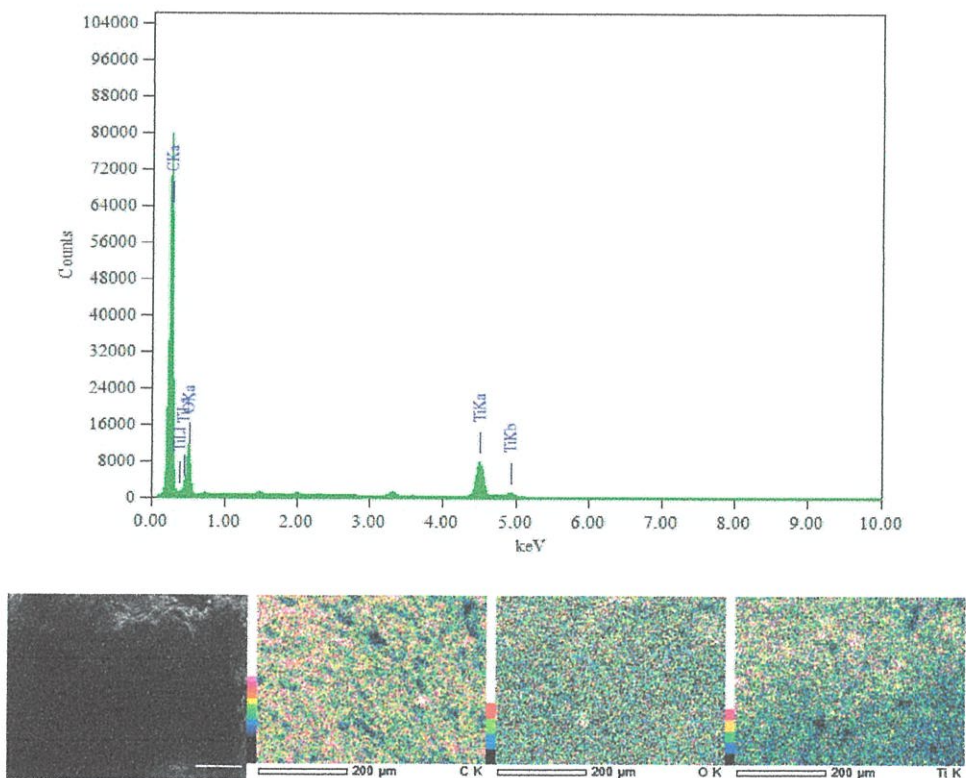
(c) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03 กรัม



(d) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.05 กรัม



(e) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.10 กรัม



**รูปที่ 4.9** ภาพ EDS ของ (a) แผ่นยางเปล่า

(b) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.01 กรัม

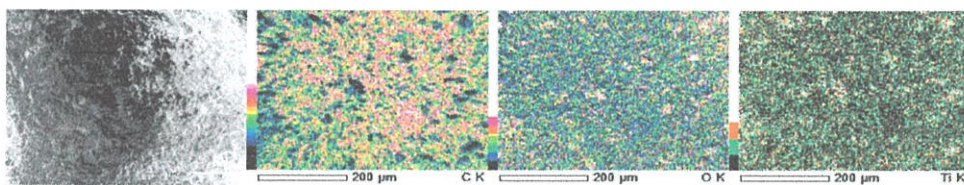
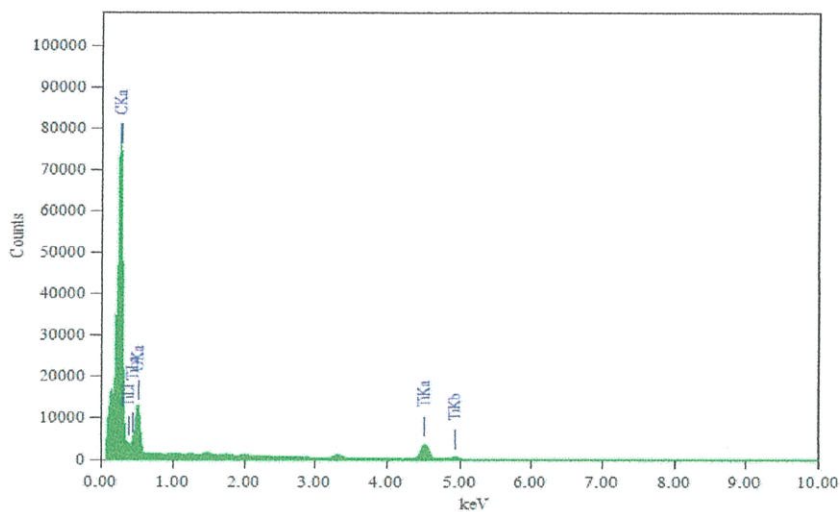
(c) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03 กรัม

(d) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.05 กรัม

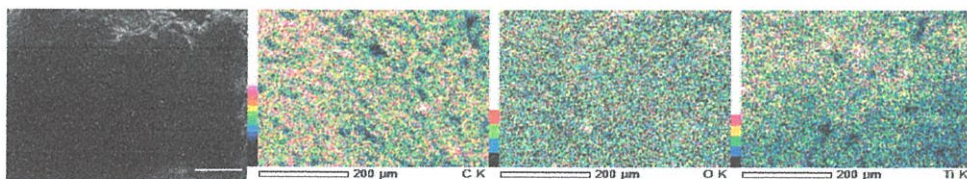
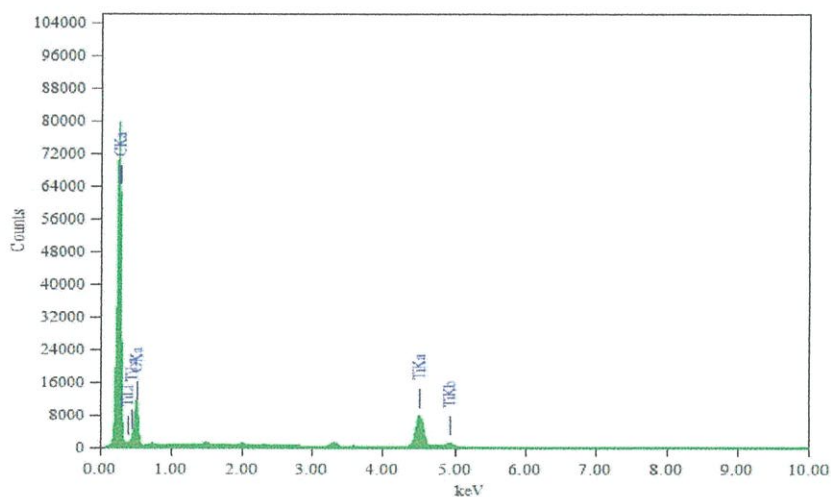
(e) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.10 กรัม

จากรูปที่ 4.9 เป็นการเตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ รูป (a) แผ่นยางเปล่า พบว่าพีคและการกระจายตัวของคาร์บอนสูงที่สุดอยู่ที่ 0.3 keV เนื่องจากแผ่นยางเปล่า คือ cis-polyisoprene ซึ่งมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ และพบออกซิเจนที่ 0.5 keV แต่จะไม่เห็นพีคของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ 4.5 และ 4.9 keV เนื่องจากไม่มีการเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ลงในแผ่นยาง รูป (b) เมื่อมีเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.01 กรัม ลงไปพบว่าพีคของไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้นมาที่ 4.5 keV และเห็นการกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์บนพื้นผิว และเมื่อเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นเป็น (c) 0.03 กรัม , (d) 0.05 กรัม และ (e) 0.10 กรัม พบว่าพีคของไทเทเนียมไดออกไซด์สูงมากขึ้น ตามลำดับ

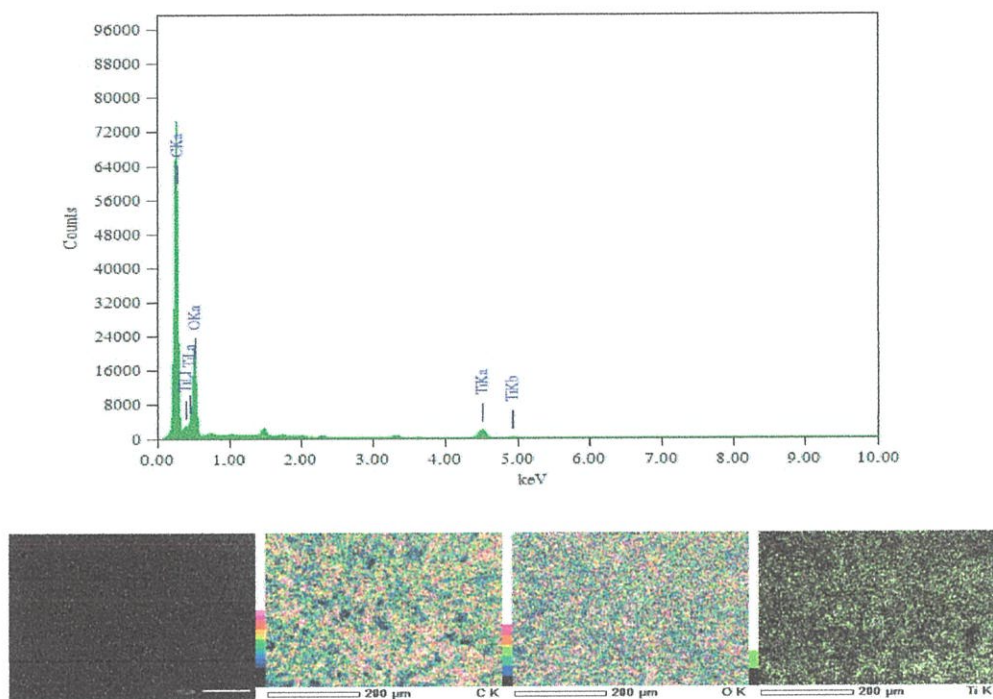
2. การเตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์
- (a) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.04 กรัม-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.01 กรัม



- (b) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03-กรัมผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.02 กรัม



(c) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0 กรัม-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.05 กรัม

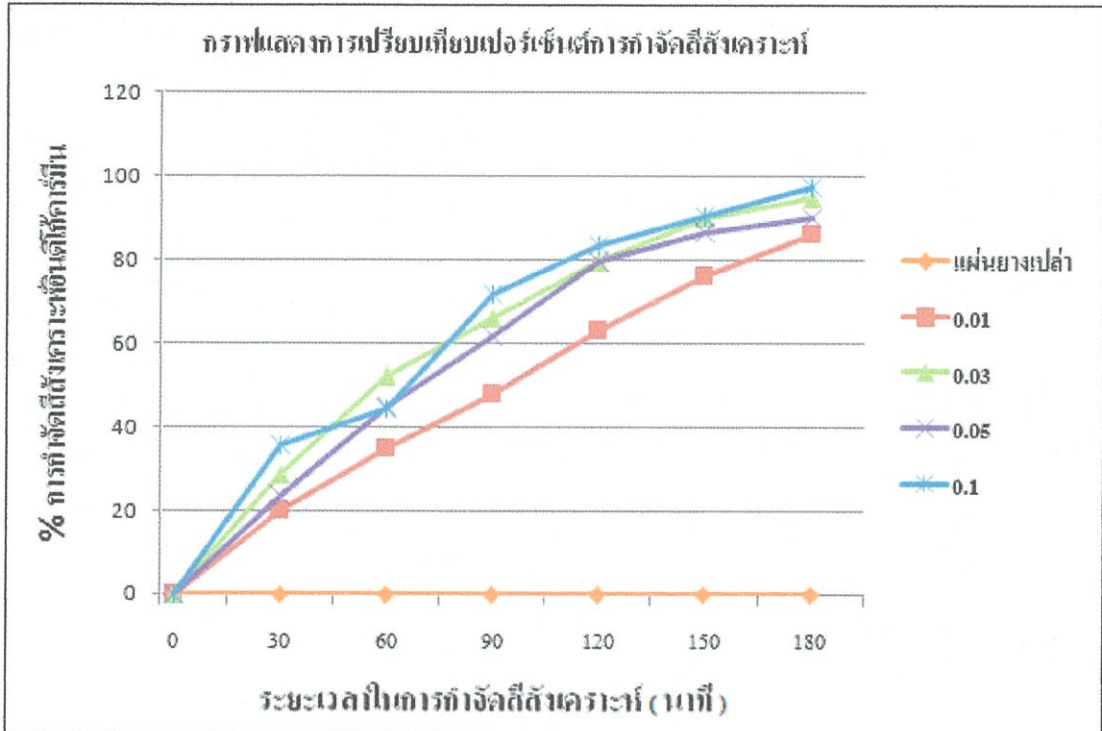


รูปที่ 4.10 ภาพ EDS ของ (a) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.04 กรัม-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.01 กรัม (b) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03 กรัม-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.02 กรัม (c) แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0 กรัม-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.05 กรัม

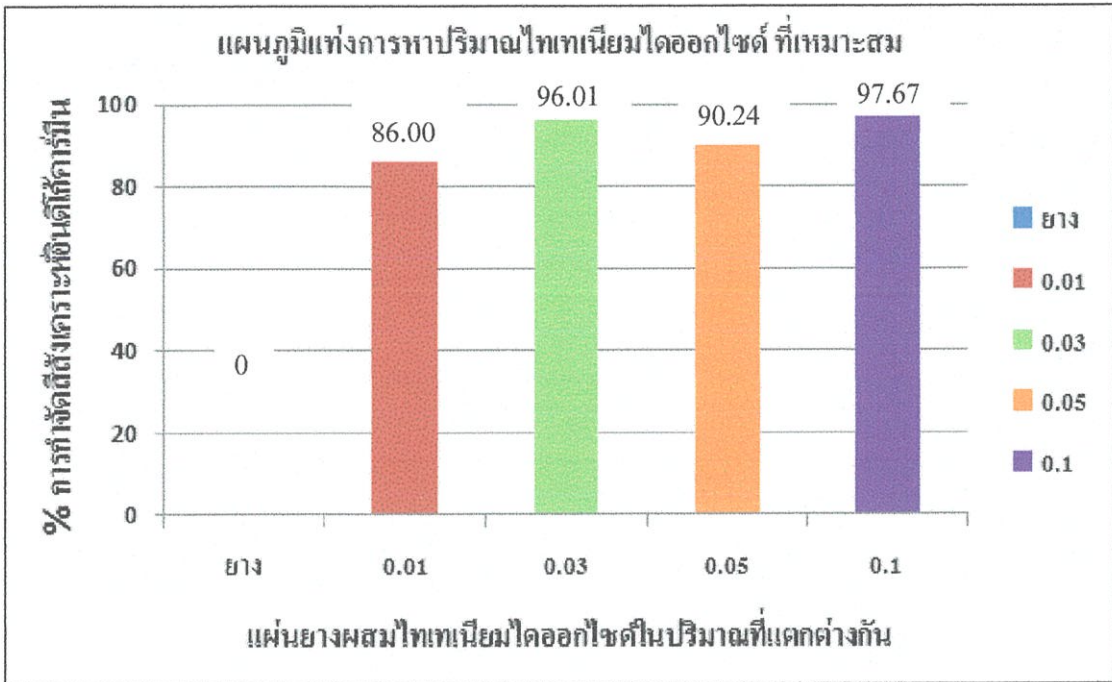
จากรูปที่ 4.10 เป็นการเตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อเติมผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ลงไป พบว่าที่ (a) ,(b) และ (c) มีสัญญาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ปรากฏที่ 4.5 และ 4.9 keV และเห็นการกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์บนพื้นผิว

## 4.2 การหาปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 ที่เหมาะสม

การศึกษานี้เป็นการกำจัดสีสังเคราะห์อินดิโกคาร์มินของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ 0, 0.01, 0.03, 0.05 และ 0.10 กรัม โดยใช้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในการกำจัดสีสังเคราะห์ จากนั้นเก็บตัวอย่างสีสังเคราะห์ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ทุกๆ 30 นาที จำนวน 6 ครั้ง และนำสีสังเคราะห์ที่เก็บมานั้นไปวัดค่าการดูดกลืนสีสังเคราะห์ โดยใช้เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์อินดิโกคาร์มินที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ ในปริมาณที่แตกต่างกัน

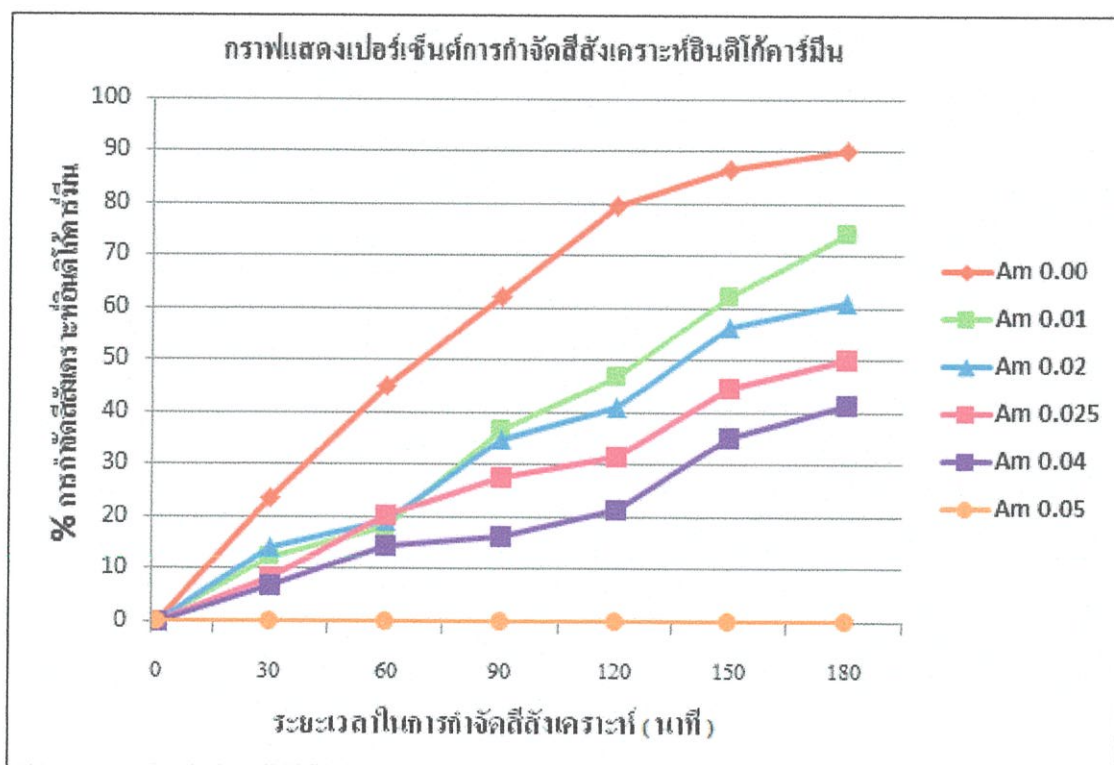


รูปที่ 4.12 แผนภูมิแท่งแสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์อินทรีย์คาร์บอนที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ ในปริมาณที่แตกต่างกัน เมื่อเวลาผ่านไป 180 นาที

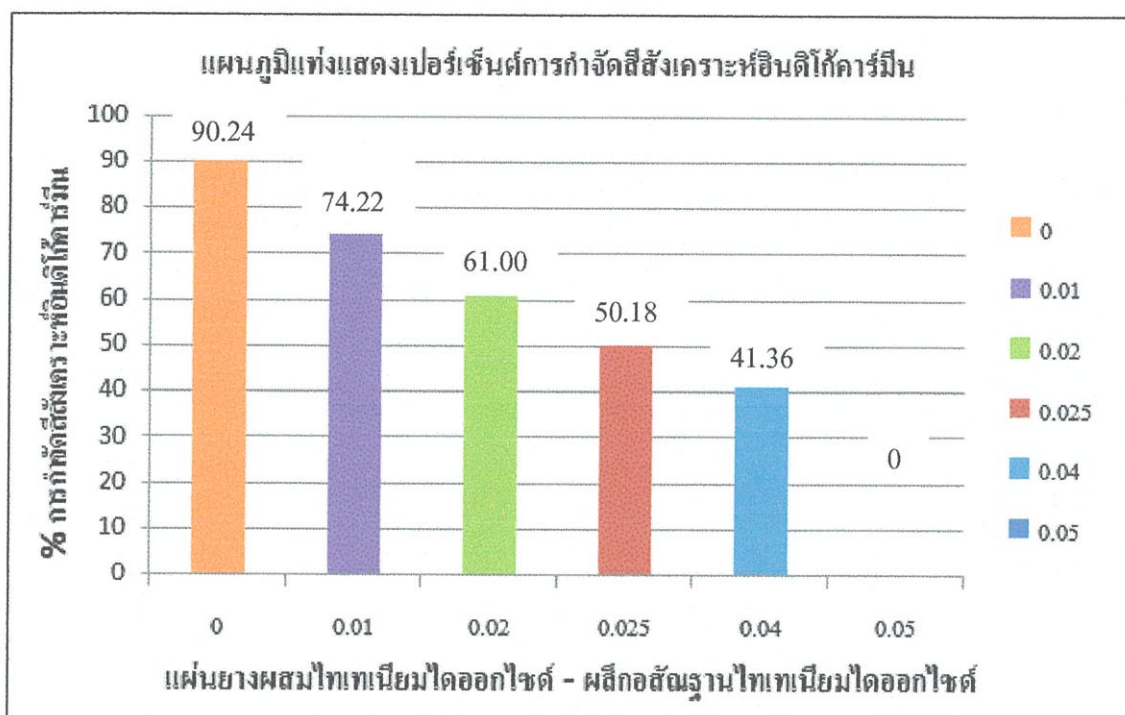
จากรูปที่ 4.11 และ 4.12 การทดลองอธิบายได้ว่าที่ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.10 กรัม มีเปอร์เซ็นต์ค่าการดูดกลืนก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้น อธิบายได้ว่ามีความสามารถในการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์อินทรีย์คาร์บอนดีที่สุด โดยมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ คือ 97.67% รองลงมาคือ ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.03, 0.05, 0.01 และ 0 กรัม โดยมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ คือ 96.01%, 90.24%, 86.00% และ 0 % ตามลำดับ

#### 4.3 การกำจัดสีสังเคราะห์อินดิโกคาร์มินของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์

การศึกษานี้เป็นการกำจัดสีสังเคราะห์อินดิโกคาร์มิน (IC) ซึ่งเป็นสีสังเคราะห์ประจุลบ (anionic dye) ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยแผ่นยางแต่ละแผ่นนั้นมีการเติมไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ลงไปในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยมีปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ คือ 0.05, 0.04, 0.025, 0.02, 0.01 และ 0 กรัม และมีปริมาณผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ คือ 0, 0.01, 0.02, 0.025, 0.04 และ 0.05 กรัม ตามลำดับ โดยใช้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในการกำจัดสีสังเคราะห์ จากนั้นเก็บตัวอย่างสีสังเคราะห์ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ทุกๆ 30 นาที จำนวน 6 ครั้ง และนำสีสังเคราะห์ที่เก็บมานั้นไปวัดค่าการดูดกลืนสีสังเคราะห์ โดยใช้เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์อินดิโกคาร์มินของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ในปริมาณที่แตกต่างกัน

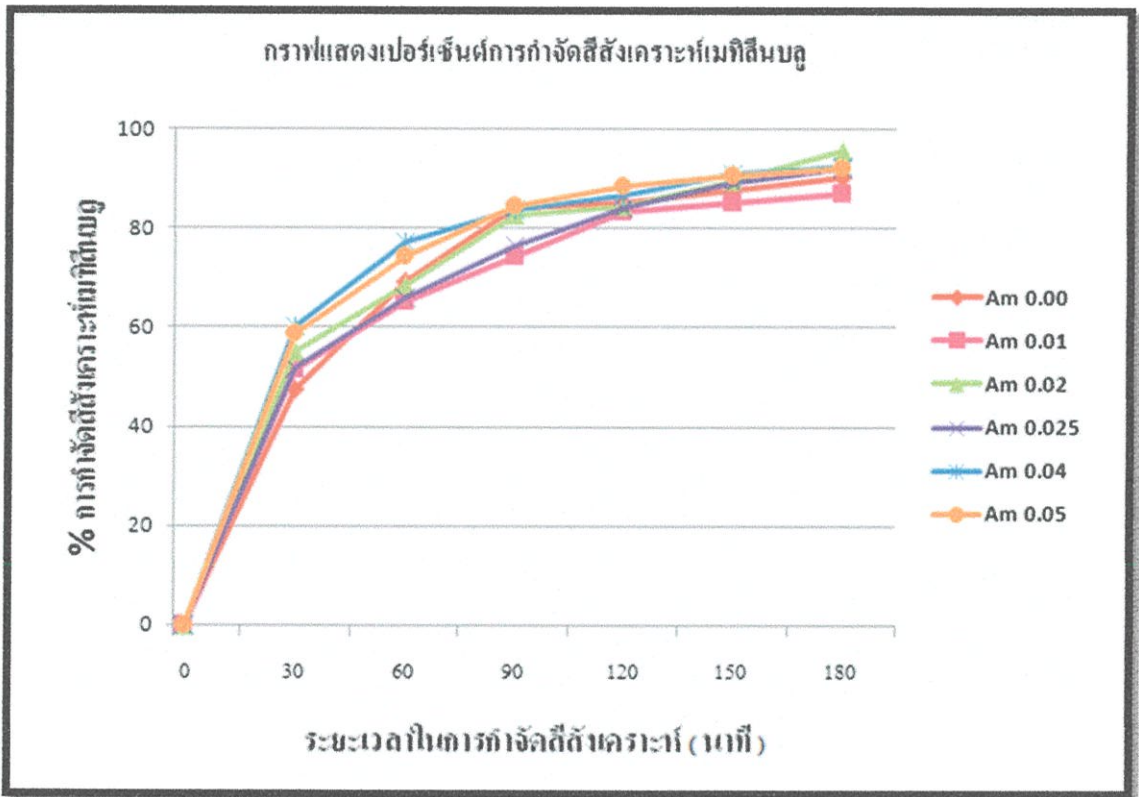


รูปที่ 4.14 แผนภูมิแท่งแสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์อินดิโกคาร์มินของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกัน เมื่อเวลาผ่านไป 180 นาที

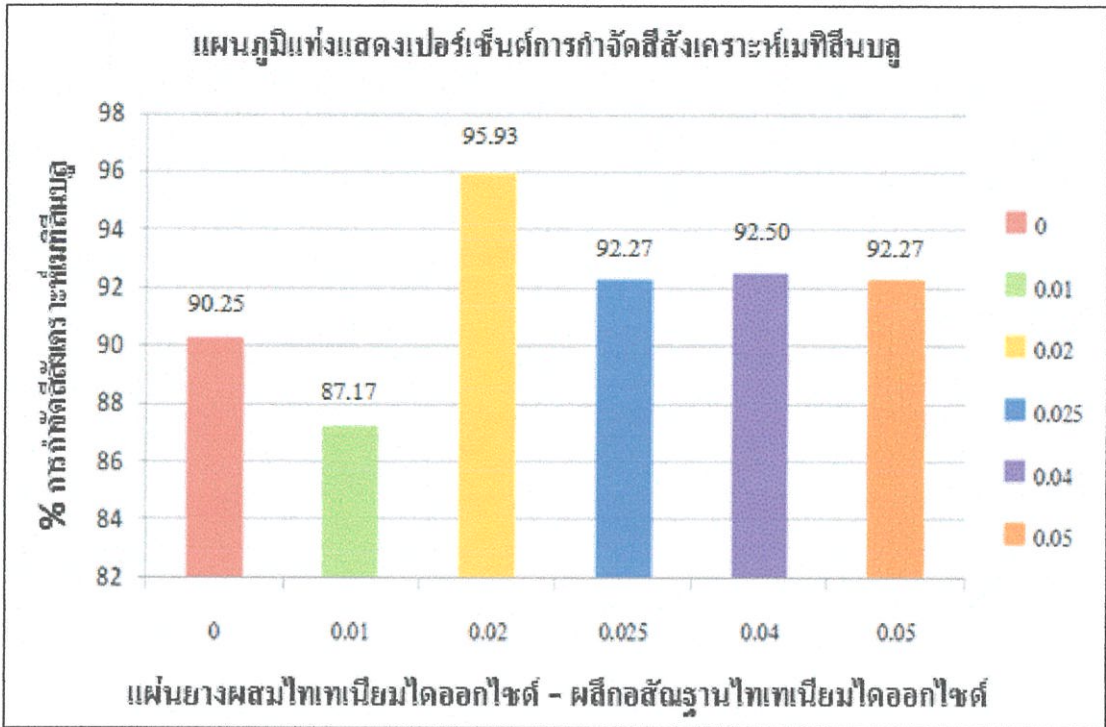
จากรูปที่ 4.13 และ 4.14 อธิบายได้ว่าแผ่นยางผสมที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.04 กรัม-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.01 กรัม มีความสามารถในการกำจัดสีสังเคราะห์อินดิโกคาร์มินดีที่สุด โดยมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์ คือ 74.22% รองลงมา คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03, 0.025, 0.02 กรัม-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.02, 0.025, 0.04 กรัม โดยมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์ที่ลดลงคือ 61.00%, 50.18%, 41.36 % ตามลำดับ และพบว่าปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 0 กรัม และปริมาณผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.05 กรัม ไม่มีความสามารถในการกำจัดสีสังเคราะห์

#### 4.4 การกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์

การศึกษานี้เป็นการกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลูมิน (MB) ซึ่งเป็นสีสังเคราะห์ประจุบวก (cationic dye) ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยแผ่นยางแต่ละแผ่นนั้นมีการเติมไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ลงไปในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยมีปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ คือ 0.05, 0.04, 0.025, 0.02 0.01 และ 0.01 กรัม และมีปริมาณผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ คือ 0, 0.01, 0.02, 0.025, 0.04 และ 0.05 กรัม ตามลำดับ โดยใช้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในการกำจัดสีสังเคราะห์ จากนั้นเก็บตัวอย่างสีสังเคราะห์ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ทุกๆ 30 นาที จำนวน 6 ครั้ง และนำสีสังเคราะห์ที่เก็บมานั้นไปวัดค่าการดูดกลืนสีสังเคราะห์ โดยใช้เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer



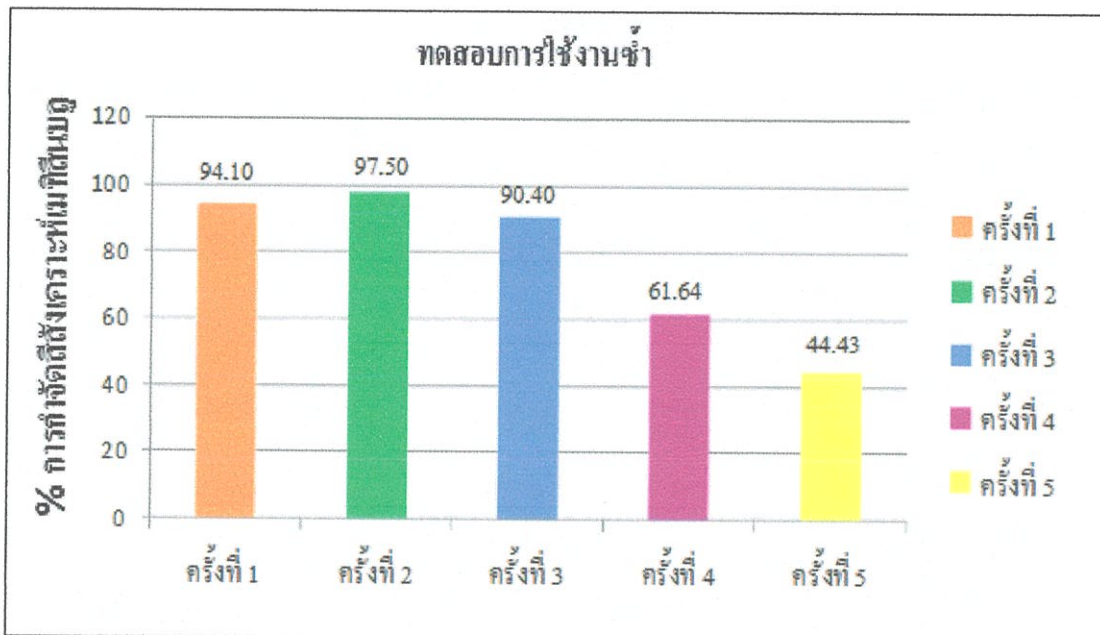
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ในปริมาณที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.16 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมที่มีปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลิตภัณฑ์ไทเทเนียมไดออกไซด์ ในปริมาณที่แตกต่างกัน เมื่อเวลาผ่านไป 180 นาที

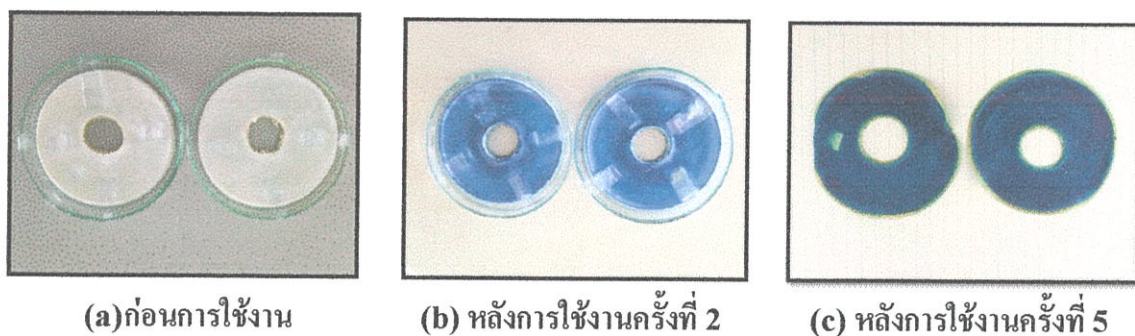
จากรูปที่ 4.15 และ 4.16 อธิบายได้ว่าแผ่นยางผสมที่มีปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.03 กรัม-ปริมาณผลิตภัณฑ์ไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.02 กรัม มีความสามารถในการกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลูดีที่สุด โดยมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์ คือ 95.93% รองลงมาคือ ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.01, 0.025, 0, 0.05, 0.04 กรัม-ปริมาณผลิตภัณฑ์ไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.04, 0.05, 0.025, 0, 0.01 กรัม โดยมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์ใกล้เคียงกัน คือ 92.50%, 92.27%, 92.27 %, 90.25%, 87.17% ตามลำดับ

#### 4.5 การทดสอบประสิทธิภาพในการใช้งานซ้ำของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03 กรัม-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.02 กรัม ในการกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลู



รูปที่ 4.17 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพในการใช้งานซ้ำของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อเวลาผ่านไป 180 นาที

จากรูปที่ 4.17 การศึกษานี้เป็นการทดสอบประสิทธิภาพในการนำกลับมาใช้งานซ้ำของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03 กรัม-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.02 กรัม ในการกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลู จากรูปที่ 4.17 พบว่า การใช้งานแผ่นยางผสมครั้งที่ 1 และ ครั้งที่ 2 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีสังเคราะห์ที่ดีที่สุด โดยมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์ คือ 94.10% และ 97.50% ตามลำดับ และประสิทธิภาพของแผ่นยางผสมในการกำจัดสีสังเคราะห์ลดน้อยลงในครั้งที่ 3, 4, 5 โดยมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์ คือ 90.40%, 61.64%, 44.43% ตามลำดับ



รูปที่ 4.18 แสดงแผ่นยางผสมก่อนการใช้งาน หลังการใช้ครั้งที่ 2 และหลังการใช้งานครั้งที่ 5

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

##### 5.1.1 การหาปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 ที่เหมาะสม

จากการทดสอบการหาปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมในการกำจัดสีสังเคราะห์ โดยใช้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส พบว่าแผ่นยางเปล่าไม่มีความสามารถในการกำจัดสีสังเคราะห์ เนื่องจากไม่มีตัวคะตะลิส คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์เติมลงไป และเมื่อเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.01 กรัม จะมีการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเกิดขึ้น ทำให้มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์ คือ 86% และเมื่อเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.03 กรัม พบว่ามีการกระจายตัวที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์มากทำให้มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์ คือ 96% แต่เมื่อเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.05 กรัม พบว่ามีการกระจายตัวน้อยกว่าที่ 0.03 กรัม เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์มีความหนืดมากขึ้น และมีการแข็งตัวก่อนที่จะตกลงมาที่ผิวหน้าของแผ่นยาง ทำให้มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์ คือ 90% และเมื่อเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณ 0.10 กรัม พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์มากที่สุดอยู่ที่ 97% เนื่องจากมีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์มากกว่าที่ 0.05 กรัม ถึง 2 เท่า ซึ่งในที่นี้เราได้เลือกไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณ 0.03 กรัม ให้กลุ่มวิจัยกลุ่มอื่นไปทำวิจัยต่อ เนื่องจากในการทำวิจัยต้องมีการเติมตัวคะตะลิสอื่นๆ เข้าไปด้วย ซึ่งถ้าเลือกใช้ที่ปริมาณ 0.10 กรัม จะมีปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์มากไปทำให้บดบังความสามารถในการคะตะลิสของตัวคะตะลิสที่เติมลงไปได้ และเป็นการสิ้นเปลืองปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.03 และ 0.10 กรัม มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีสังเคราะห์ได้ใกล้เคียงกัน คือ 96% และ 97% ผู้วิจัยจึงเลือกไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.03 กรัม ซึ่งใช้ในปริมาณที่น้อยกว่าถึง 3 เท่าให้กลุ่มวิจัยกลุ่มอื่นนำไปวิจัยต่อ

### 5.1.2 การกำจัดสีสังเคราะห์อินดิโกคาร์มินของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์

ในการกำจัดสีสังเคราะห์อินดิโกคาร์มินของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่าปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.04 กรัม-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.01 กรัม มีประสิทธิภาพในการกำจัดมากที่สุด คือ 65% และประสิทธิภาพค่อย ๆ ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ได้แก่ ไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03, 0.025, 0.02 กรัม-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.02, 0.025, 0.04 กรัม ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์ คือ 61%, 50% และ 41% ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากสีสังเคราะห์อินดิโกคาร์มินมีประจุของโครงสร้างเป็นลบ และไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะมีโครงสร้างประจุเป็นลบเช่นกัน ซึ่งยากต่อการดูดซับของผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0 กรัม-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.05 กรัม ไม่มีผลของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส เนื่องจากไม่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ จึงไม่เกิดการดูดซับจากผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์ คือ 0% เราจึงไม่เลือกสีสังเคราะห์อินดิโกคาร์มินมาใช้ในการทดลองซ้ำ เนื่องจากประสิทธิภาพในการกำจัดสีสังเคราะห์ลดลงเมื่อเติมผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ลงไป

### 5.1.3 การกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์

ในการกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่าแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.03 กรัม-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.02 กรัม มีความสามารถในการกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลูดีที่สุด โดยมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์ คือ 96% เนื่องจากสีสังเคราะห์เมทิลีนบลูมีประจุของโครงสร้างเป็นบวก และไทเทเนียมไดออกไซด์มีประจุของโครงสร้างเป็นลบ จึงเกิดการดูดซับของผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยเมื่อเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.01, 0.025, 0, 0.05, 0.04 กรัม-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.04, 0.05, 0.025, 0, 0.01 กรัม โดยมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์ คือ 92.50%, 92.27%, 92.27 %, 90.25%, 87.17% ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากเกิดการดูดซับจากผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ เราจึงเลือกสีสังเคราะห์เมทิลีนบลูมาใช้ในการทดลองซ้ำ เนื่องจากประสิทธิภาพในการกำจัดสีสังเคราะห์เพิ่มขึ้นเมื่อเติมผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ลงไป

#### 5.1.4 การทดสอบประสิทธิภาพในการนำกลับมาใช้งานใหม่ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03 กรัม-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.02 กรัม ในการกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลินบลู

การทดสอบประสิทธิภาพในการนำกลับมาใช้งานซ้ำของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03 กรัม-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.02 กรัม ในการกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลินบลู พบว่าประสิทธิภาพของการกำจัดสีสังเคราะห์เพิ่มมากขึ้นและมากที่สุดในการนำกลับมาใช้งานซ้ำครั้งที่ 2 และ ครั้งที่ 1 โดยมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์ คือ 97% และ 94% ตามลำดับ เนื่องจากการใช้งานครั้งที่ 1 แผ่นยางผสมมีสิ่งสกปรกหรือมีเยื่อบาง ๆ ของยางเกาะอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นยาง ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลินบลูต่ำกว่าครั้งที่ 2 เล็กน้อย และประสิทธิภาพของแผ่นยางผสมในการกำจัดสีสังเคราะห์ลดน้อยลงในครั้งที่ 3, 4, 5 โดยมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์ คือ 90%, 62%, 45% ตามลำดับ เนื่องจากเกิดการเกาะติดของสีสังเคราะห์เมทิลินบลูที่เกิดจากการดูดซับของผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นยางไปบดบังไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งส่งผลต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสได้น้อยลง

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ผลการวิจัยครั้งนี้ยังไม่สามารถนำมาใช้ในการกำจัดสีสังเคราะห์ปริมาณมากได้ เนื่องจากแผ่นยางผสมมีขนาดเล็ก อาจใช้เวลานานในการกำจัด
2. ศึกษาแนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับตัวดูดซับตัวอื่น ๆ เนื่องจากแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถกำจัดสีสังเคราะห์ประจุบวกได้ดีกว่าสีสังเคราะห์ประจุลบ
3. ศึกษาปริมาณที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ประยุกต์ใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มมากขึ้น
4. ศึกษาต้นทุนด้านเศรษฐศาสตร์ในการกำจัดสีสังเคราะห์ และมาคำนวณการลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดสีสังเคราะห์ในโรงงานอุตสาหกรรม
5. ศึกษาและพิสูจน์คุณสมบัติและลักษณะทางกายภาพของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ และไทเทเนียมไดออกไซด์-ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการใช้งานซ้ำแล้ว
6. ศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องเพิ่มเติม เช่น ความเข้มข้นของสีสังเคราะห์ในน้ำ ความเข้มข้นของแสงจากหลอดยูวีที่กำลังวัตต์ต่าง ๆ ในการกำจัดสีสังเคราะห์โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะไลซิส เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสีสังเคราะห์
7. สารเคมีที่ใช้ในการทดลองเป็นผงขนาดเล็ก สารระเหย มีกลิ่นแรง หรือมีฤทธิ์กัดกร่อน จึงควรสวมถุงมือและผ้าปิดจมูกทุกครั้ง และควรทำการทดลองในตู้ดูดควันเพื่อป้องกันอันตรายจากการเกิดปฏิกิริยา
8. ในการเตรียมแผ่นยางผสม อาจทำการเตรียมให้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์กระจายตัวอย่างทั่วถึงได้ยาก เนื่องจากแท่งแม่เหล็กปั่นเหวี่ยงไม่ทั่วถึง ทำให้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ติดที่ก้นของบีกเกอร์ ควรใช้เครื่องปั่นเหวี่ยงและแท่งแม่เหล็กที่ใช้งานได้ดี หรือแผ่นยางผสมมีความหนาบางไม่เท่ากัน เนื่องจากพื้นที่วางแผ่นยางผสมเป็นพื้นที่ต่างระดับ ควรหาพื้นที่ที่มีความสม่ำเสมอในการวางแผ่นยางผสม ควรหาพื้นที่ที่มีความสม่ำเสมอในการปล่อยแผ่นยางผสมไว้ให้แห้ง

## เอกสารอ้างอิง

ชลลดา ธีรการณวงศ์. 2554. ปฏิกริยาด้วยแสงโดยไทเทเนียมไดออกไซด์. *วารสารมหาวิทยาลัย-ราชภัฏ ยะลา*, 6(1), หน้า 62-73

ณัฐวดี เทียนผ่องใส, ปรางทิพย์ ทองอุดม และศิริรัตน์ โพธิ์พิมพ์. 2551. การบำบัดน้ำเสียที่มีฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยปฏิกริยาโฟโตคะตะลิสต์ในสภาวะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกริยา. *ปริญญาวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*

ทัศนีย์ ชำนาญจู้ย, ป.ปภัตรา พรหมอักษร, ศันสนีย์ โพธิ์น้อมแดง. 2555. การศึกษาความเป็นไปได้ในการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์. *ปริญญาวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*. หน้า 106

นันทยา ยานูเมศ. 2534. กระบวนการผลิตและลักษณะน้ำทิ้งในอุตสาหกรรมสิ่งทอ. รายงานสรุปผลการประชุมสัมมนาเรื่องการบริหารน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ, 26 มีนาคม 2534

บุญธรรม นิธิอุทัย, พรพรรณ นิธิอุทัย, และ ปรีชา ป້องภัย. 2540. เทคโนโลยีน้ำยางชั้น, ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์วิทยาเขตปัตตานี

พิมพ์ เรือนวัฒนา และ ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์. 2525. เคมีสถานะแวดล้อม. *สำนักพิมพ์โอเคียนสโตร์* ว่าที่เรอตรี ดร. เสรีย์ ตู๊ประกาย. *พื้นฐานกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส*. หน้า 1-11

สรรค์ จิตไคร์ครวญ. 2552. การทำความสะอาดโดยตัวเร่งปฏิกริยาทางแสงด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ *วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ*, 57(179), 21-24.

Chaval Sriwong, Sumpun Wongnawa, Orasa Patarapaiboolchai. 2007 “Photocatalytic activity of rubber sheet impregnated with TiO<sub>2</sub> particles and its recyclability”, *Catalysis Communications* 9 (2008):213–218.

Chaval Sriwong, Sumpun Wongnawa, Orasa Patarapaiboolchai. 2012 “Recyclable thin TiO<sub>2</sub>-embedded rubber sheet and dye degradation” *Chemical Engineering Journal* 191 (2012) 210–217.

Houas, A.; Lachheb, H.; Ksibi, M.; Elaloui, E.; Guillard, C., and Hermann, J. M. 2001.

**“Photocatalytic degradation pathway of methylene blue in water”,**

*Catalysis B: Environmental*, 13: 219-228.

Kanna, M., Wongnawa, S., Sherdshoopongse, P., and Boonsin, P. **“Adsorption behavior of some metal ions on hydrated amorphous titanium dioxide surface”,** 2005

Kanna, M., Wongnawa, S., Buddee, S., Dilokkhunakul, K., and Pinpithak P.,

**“Amorphous titanium dioxide: a recyclable dye remover for water treatment”**

*J Sol-Gel Sci Technol* (2010) 53:162–170

Kwon, C. H.; Shin, H.; Kim, J. H.; Choi, W. S., and Yoon, K. H. 2004. **“Degradation of**

**methylene blue via photocatalysis of titanium dioxide”,** *Mater. Chem. and Phys.*

86: 78-82.

M. Pelaez, N.T. Nolan, S.C. Pillai, M.K. Seery, P. Falaras, A.G. Kontos, P.S.M. Dunlop, J.W.J.

Hamilton, J.A. Byrne, K. O’Shea, M.H. Entezari and D.D. Dionysiou, **“A review on the visible light active titanium dioxide photocatalysts for environmental applications”,**

*Applied Catalysis B: Environmental*, (2012)125:331-349

Nagaveni, K.; Sivalingam, G. and Heged, M.S. 2004. **“Solar photocatalytic degradation of**

**dyes: high activity of combustion synthesized nano TiO<sub>2</sub>”,** *Appl. Cata. B: Envi.* 48:

83-93.

Wang, T.; Wang, H.; Xu, P.; Zhao, X.; Liu, Y., and Chao, S. 1998. **“The effect of properties of**

**semiconductor oxide thin films on photocatalytic decomposition of dyeing waste**

**water”,** *Thin Solid Films.* 334:103-108.

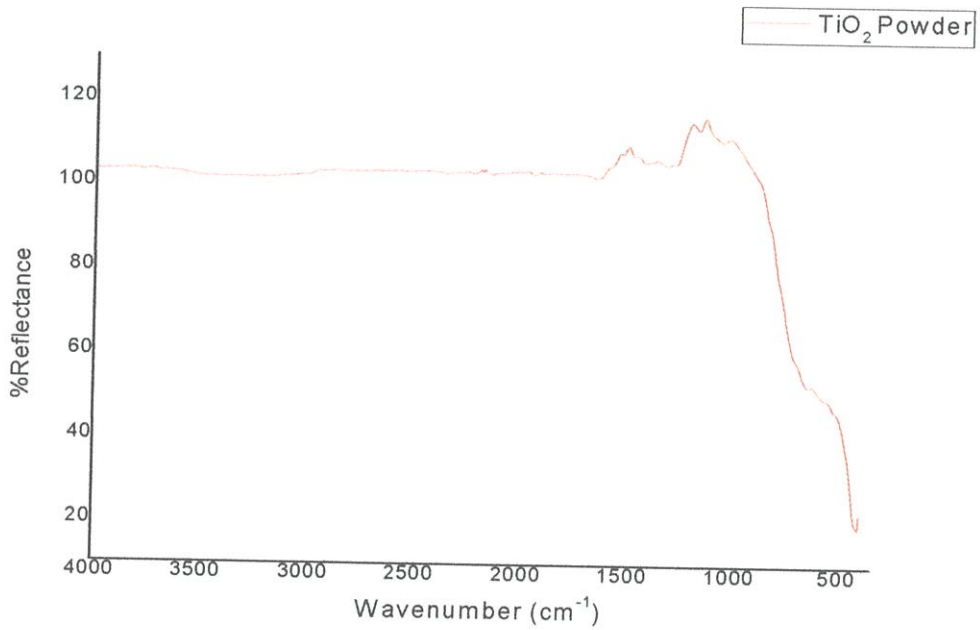
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

## การพิสูจน์เอกลักษณ์

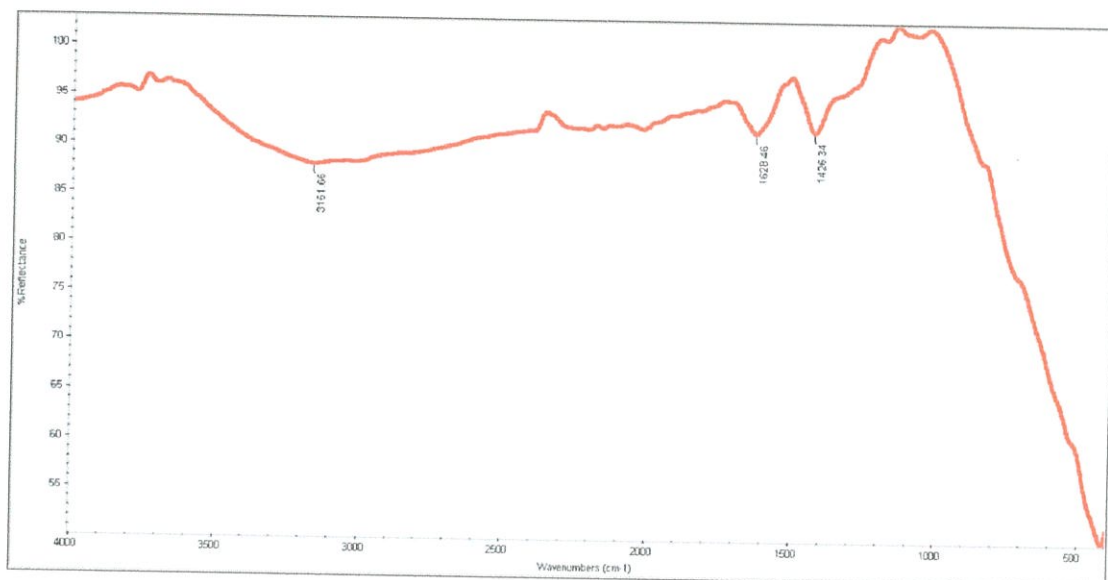
### กราฟ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)

ก-1 ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25)



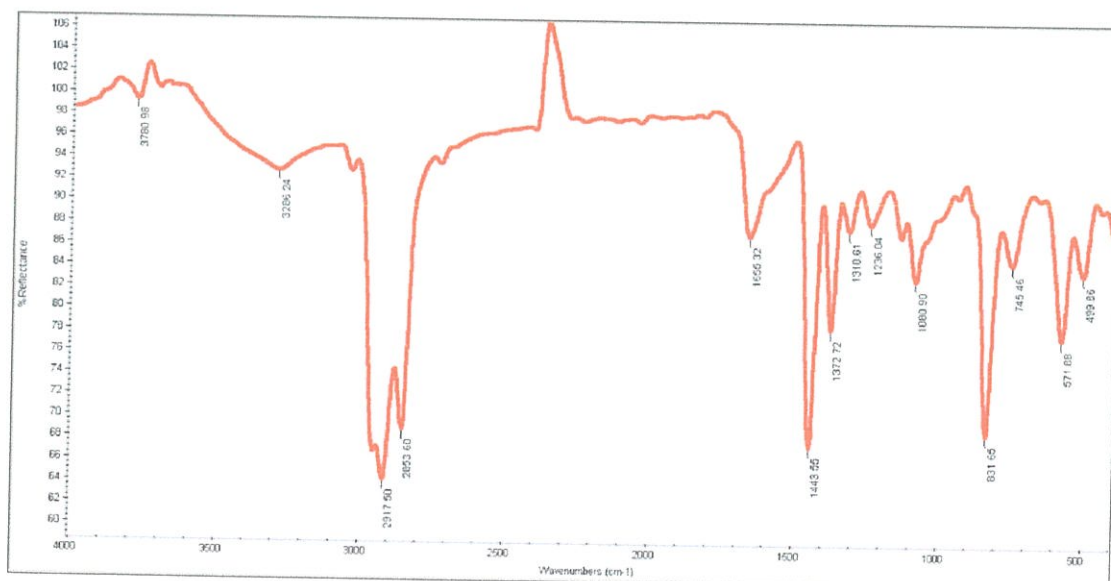
รูปที่ ก-1 กราฟ Fourier Transform Infrared Spectroscopy  
ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25)

### ก-2 ผงผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ (Amorphous Titanium dioxide)



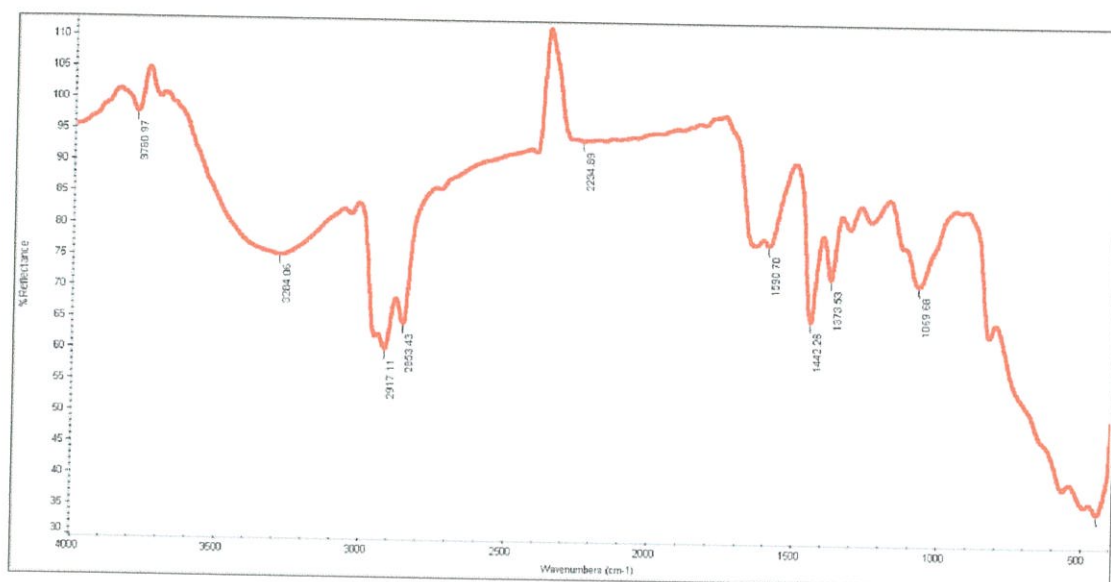
รูปที่ ก-2 กราฟ Fourier Transform Infrared Spectroscopy  
ของผงผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ (Amorphous Titanium dioxide)

### ก-3 แผ่นยางเปล่า



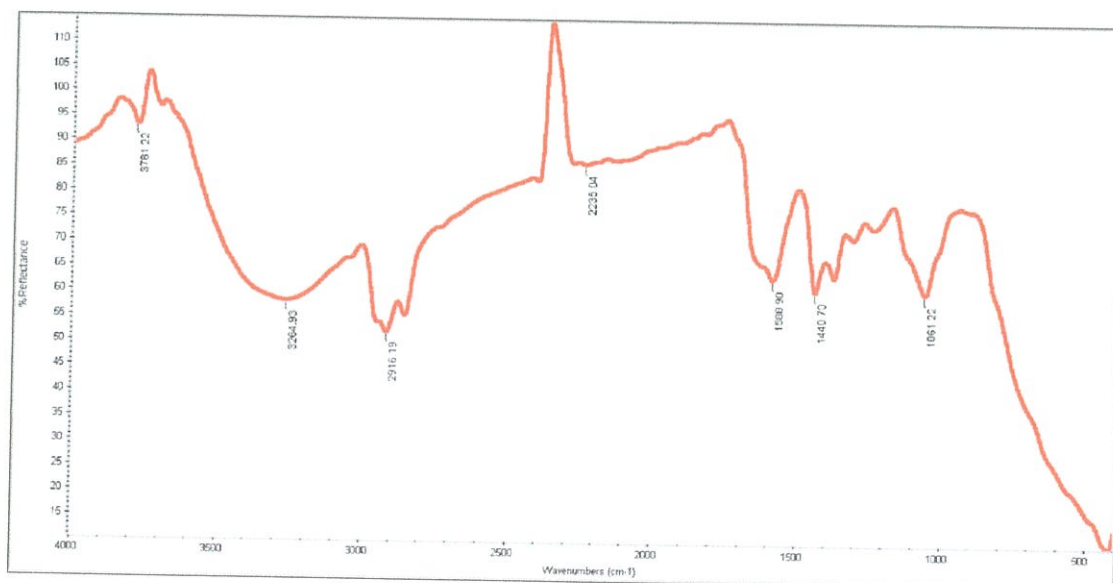
รูปที่ ก-3 กราฟ Fourier Transform Infrared Spectroscopy ของแผ่นยางเปล่า

ก-4 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.01 กรัม



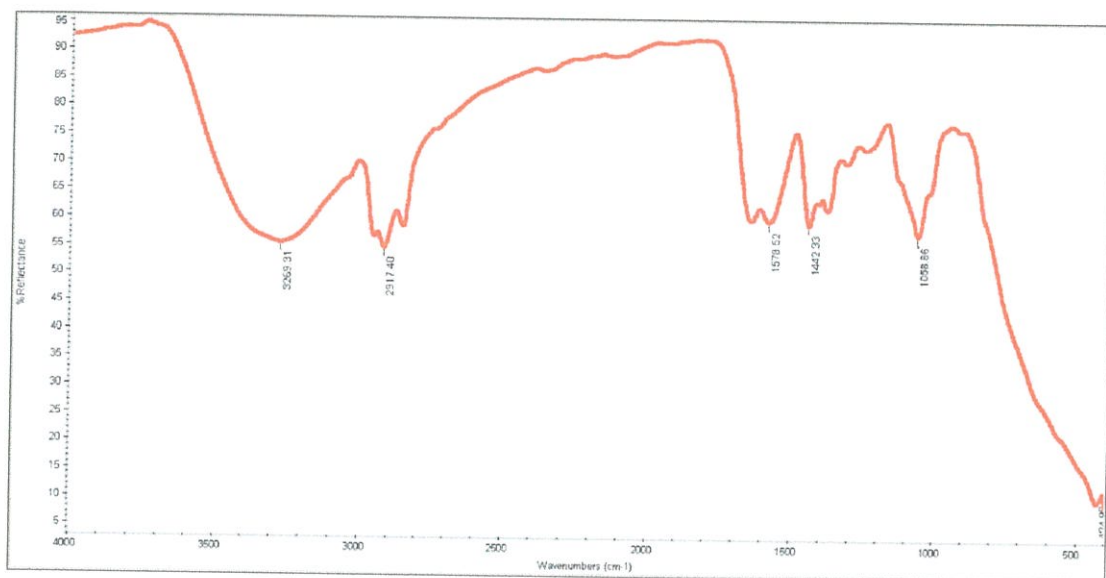
รูปที่ ก-4 กราฟ Fourier Transform Infrared Spectroscopy  
ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.01 กรัม

ก-5 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.03 กรัม



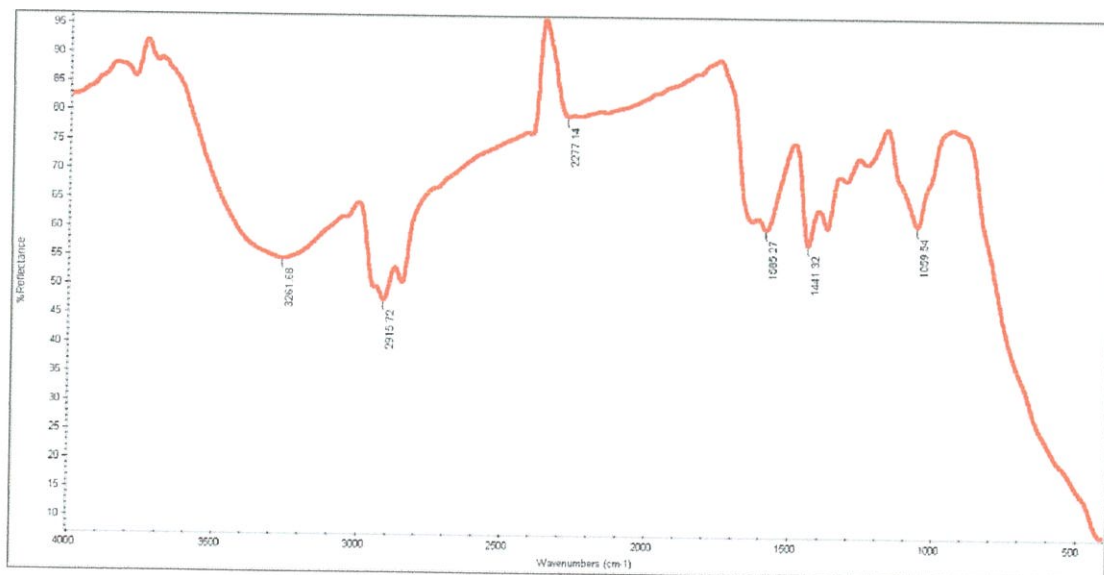
รูปที่ ก-5 กราฟ Fourier Transform Infrared Spectroscopy  
ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.03 กรัม

ก-6 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.05 กรัม



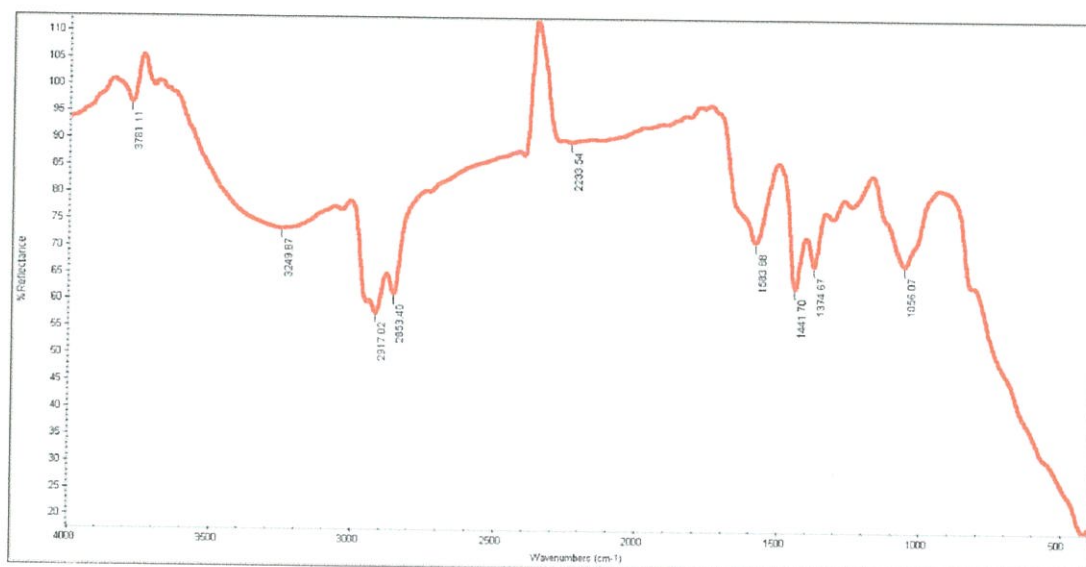
รูปที่ ก-6 กราฟ Fourier Transform Infrared Spectroscopy  
ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.05 กรัม

ก-7 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.10 กรัม



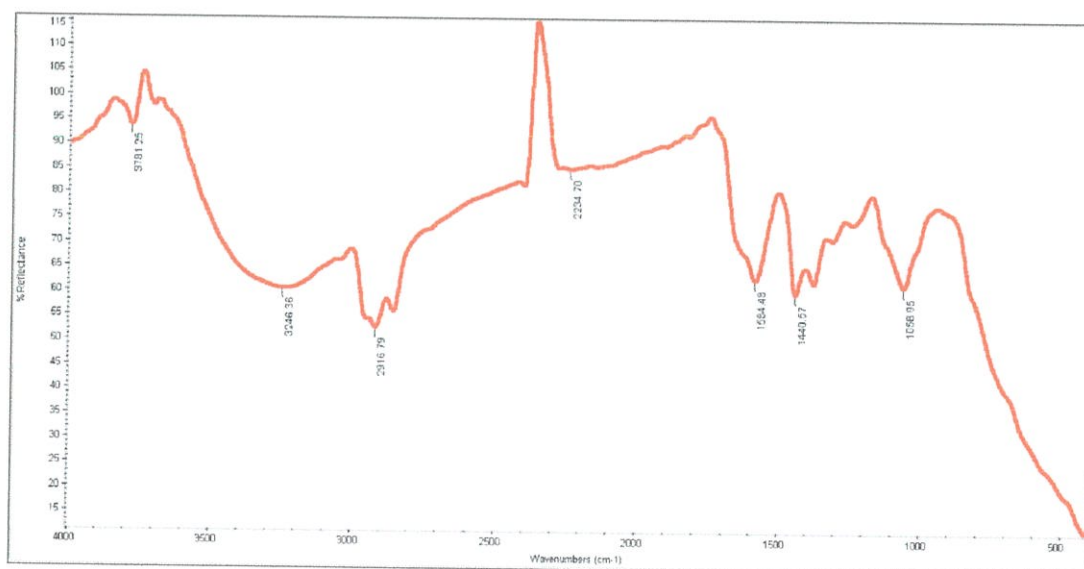
รูปที่ ก-7 กราฟ Fourier Transform Infrared Spectroscopy  
ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.10 กรัม

ก-8 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.04 กรัม - ผลึกอสัณฐาน  
ไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.01 กรัม



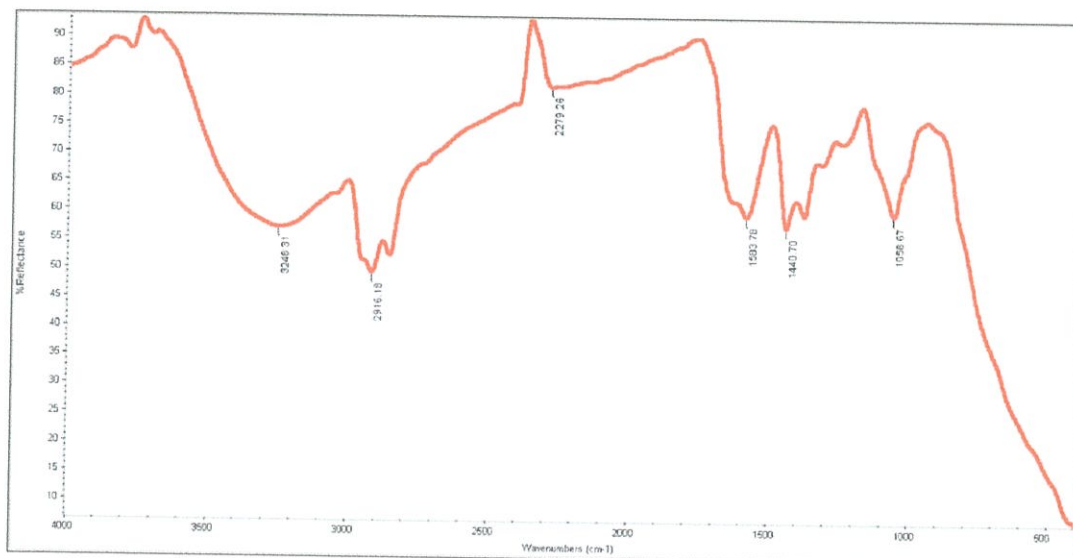
รูปที่ ก-8 กราฟ Fourier Transform Infrared Spectroscopy ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์  
(Degussa P25) ปริมาณ 0.04 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.01 กรัม

ก-9 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.03 กรัม - ผลึกอสัณฐาน  
ไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.02 กรัม



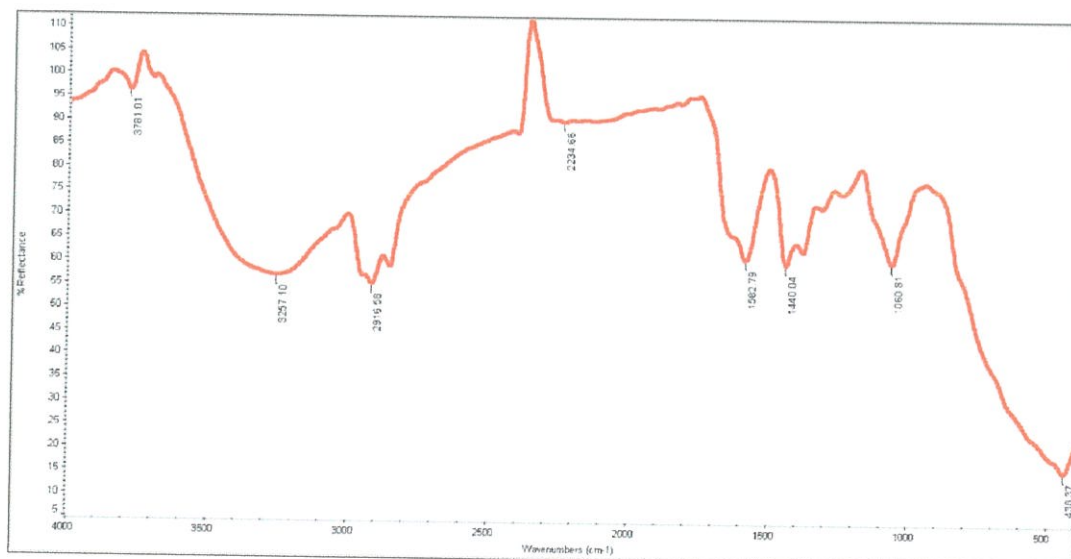
รูปที่ ก-9 กราฟ Fourier Transform Infrared Spectroscopy ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์  
(Degussa P25) ปริมาณ 0.03 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.02 กรัม

ก-10 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.025 กรัม - ผลึกอสังฐาน  
ไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.025 กรัม



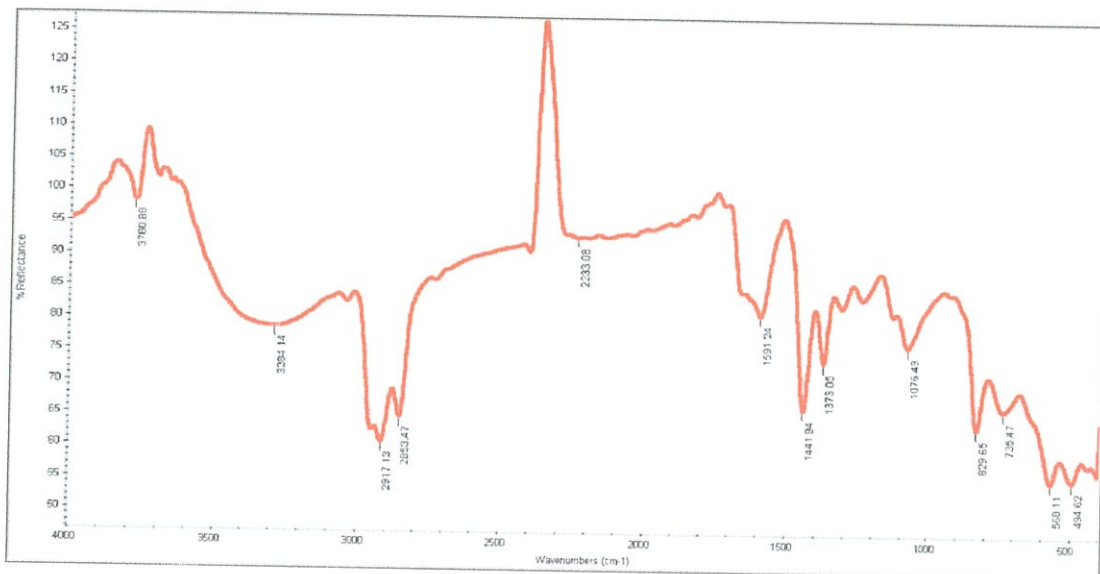
รูปที่ ก-10 กราฟ Fourier Transform Infrared Spectroscopy แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์  
(Degussa P25) ปริมาณ 0.025 กรัม - ผลึกอสังฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.025 กรัม

ก-11 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.01 กรัม - ผลึกอสังฐาน  
ไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.04 กรัม



รูปที่ ก-11 กราฟ Fourier Transform Infrared Spectroscopy ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมได-  
ออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.01 กรัม - ผลึกอสังฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.04  
กรัม

ก-12 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.05 กรัม

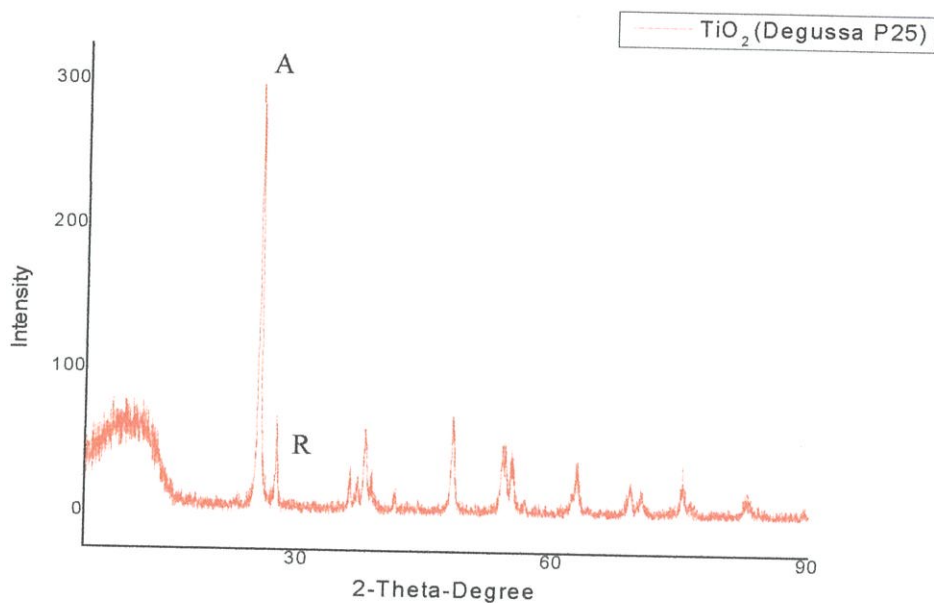


รูปที่ ก-12 กราฟ Fourier Transform Infrared Spectroscopy ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.05 กรัม

## ภาคผนวก ข

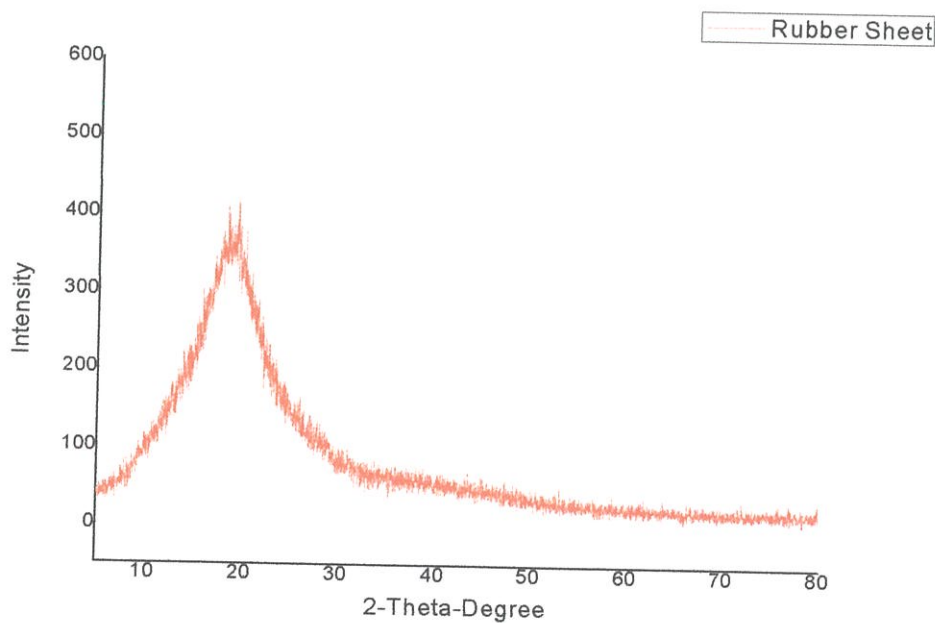
## การพิสูจน์เอกลักษณ์ กราฟ X-Ray Diffraction (XRD)

ข-1 ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25)



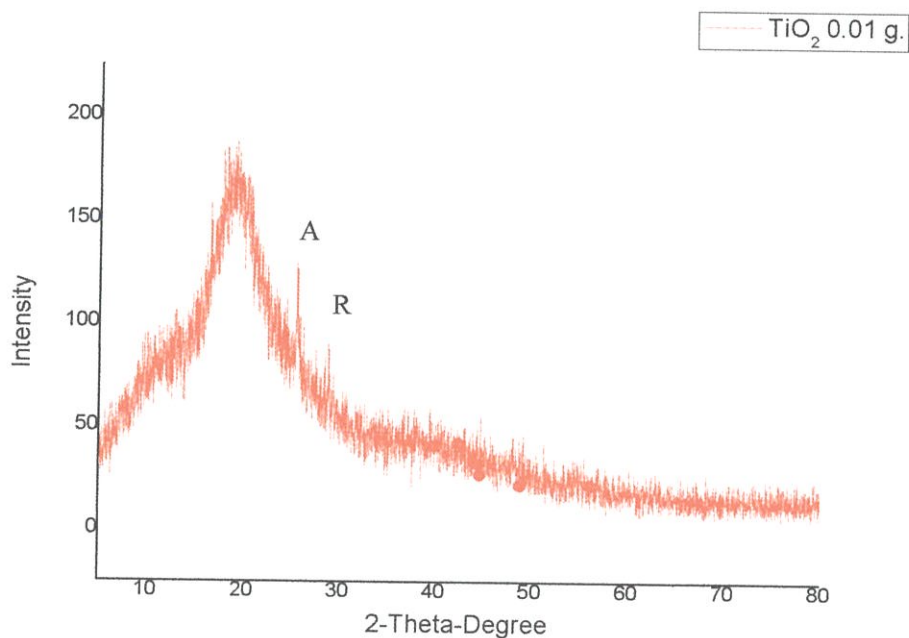
รูปที่ ข-1 กราฟ XRD ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25)

ข-2 แผ่นยางเปล้า



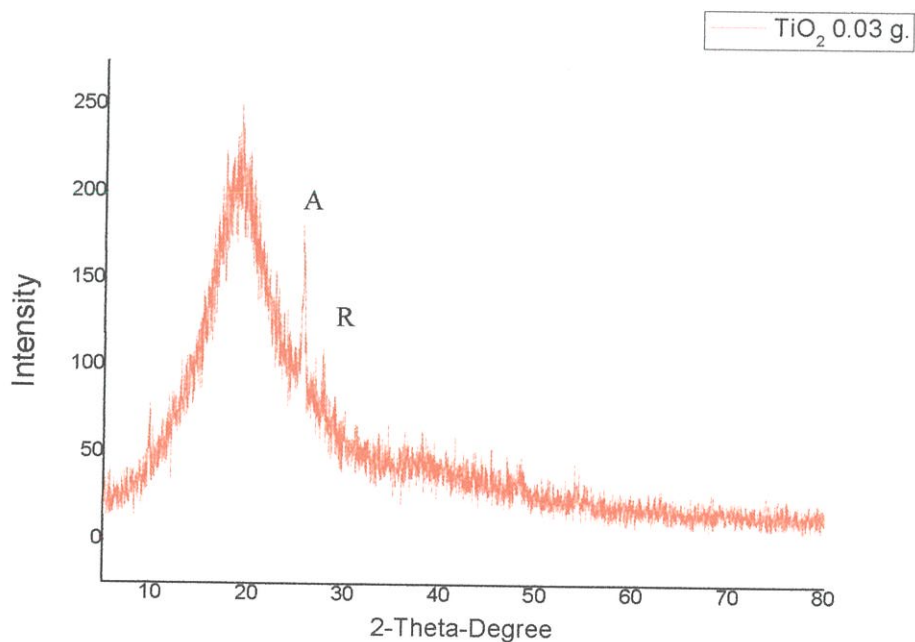
รูปที่ ข-2 กราฟ XRD ของแผ่นยางเปล้า

ข-3 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.01 กรัม



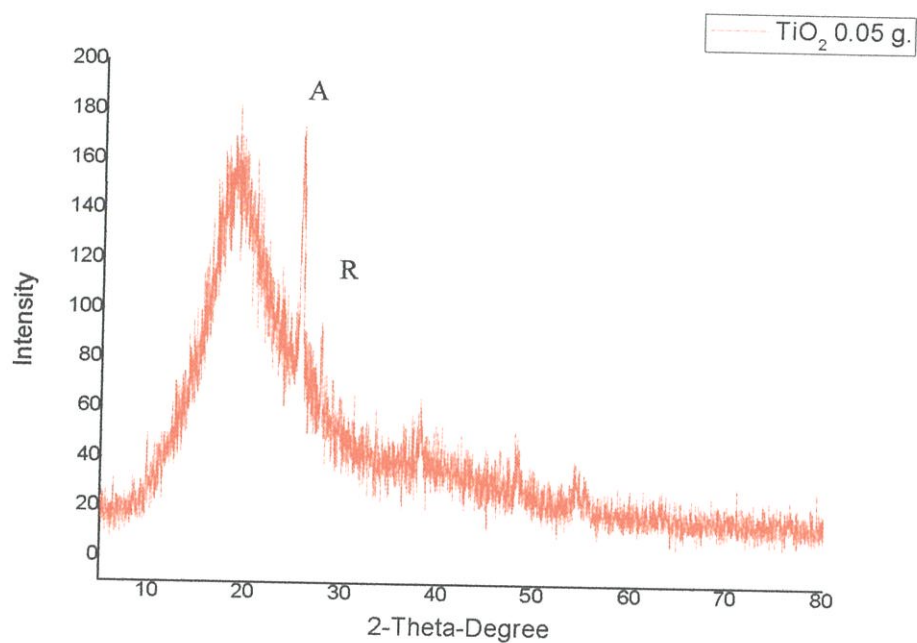
รูปที่ ข-3 กราฟ XRD ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.01 กรัม

ข-4 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.03 กรัม



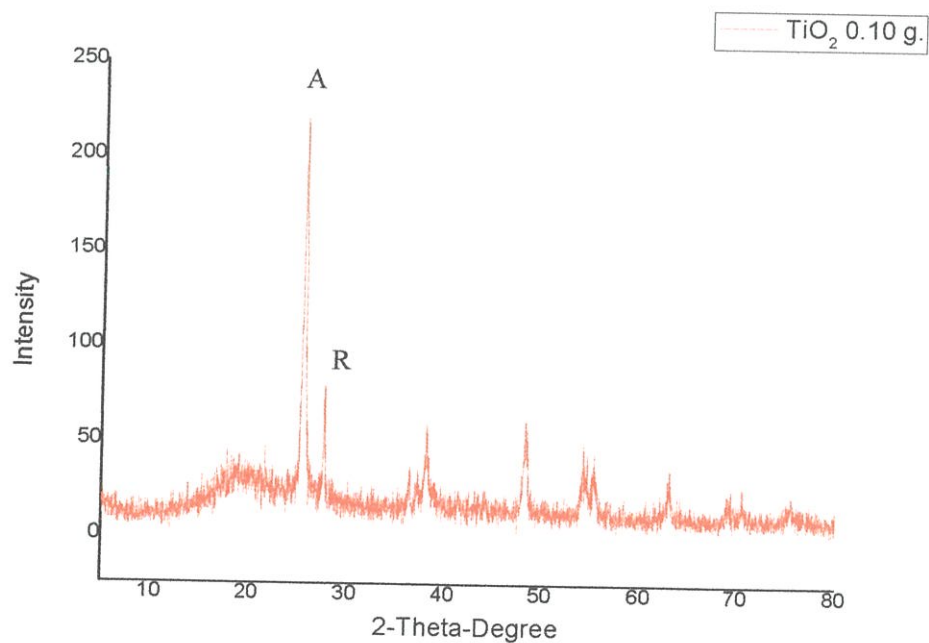
รูปที่ ข-4 กราฟ XRD ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.03 กรัม

ข-5 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.05 กรัม



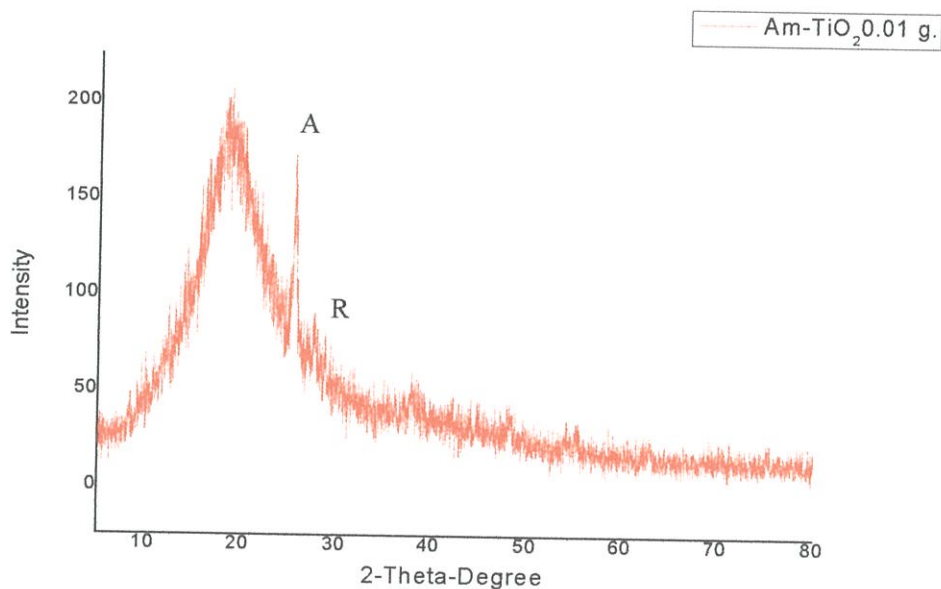
รูปที่ ข-5 กราฟ XRD ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.05 กรัม

ข-6 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.10 กรัม



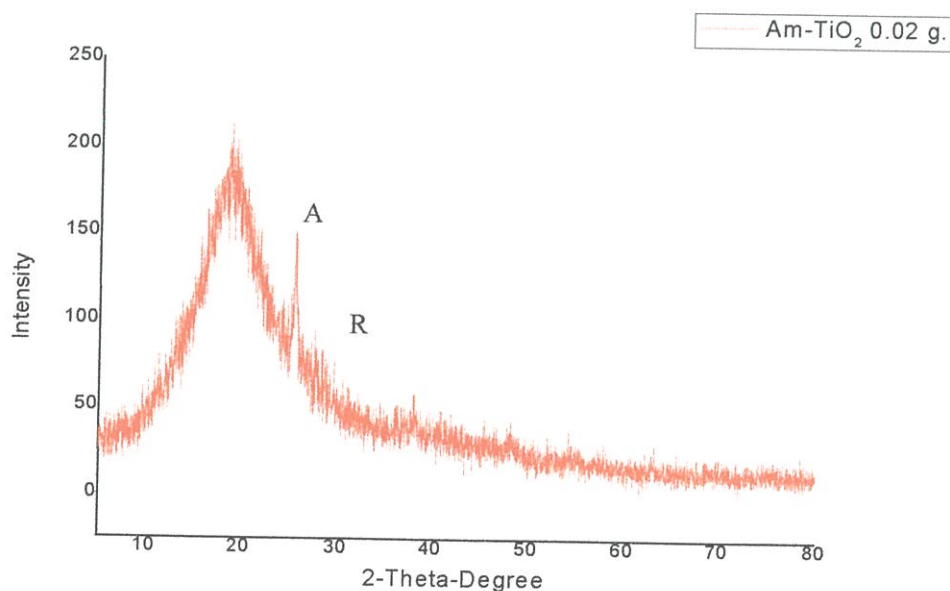
รูปที่ ข-6 กราฟ XRD ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.10 กรัม

ข-7 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.04 กรัม - ผลึกกอสัณฐาน  
ไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.01 กรัม



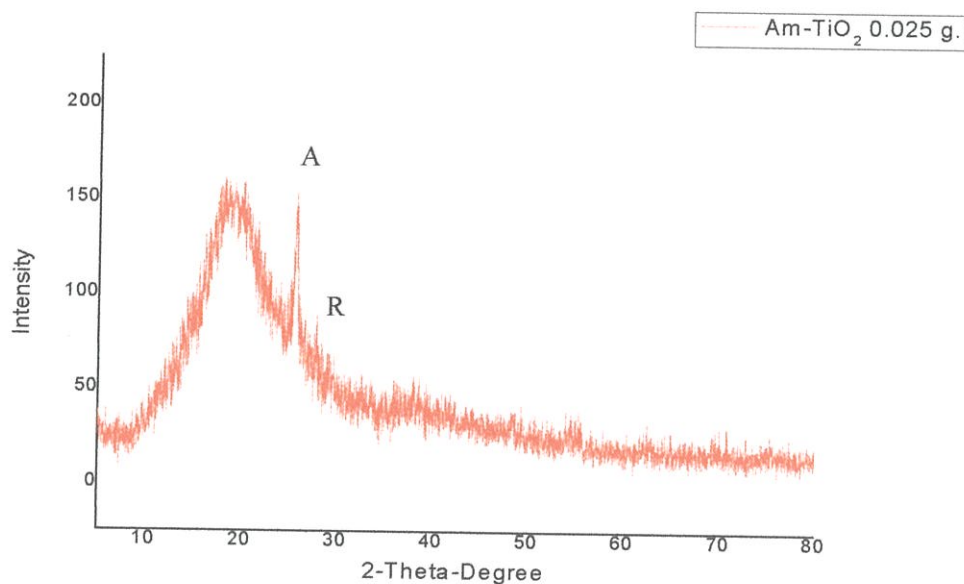
รูปที่ ข-7 กราฟ XRD ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25)  
ปริมาณ 0.04 กรัม - ผลึกกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.01 กรัม

ข-8 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.03 กรัม - ผลึกกอสัณฐาน  
ไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.02 กรัม



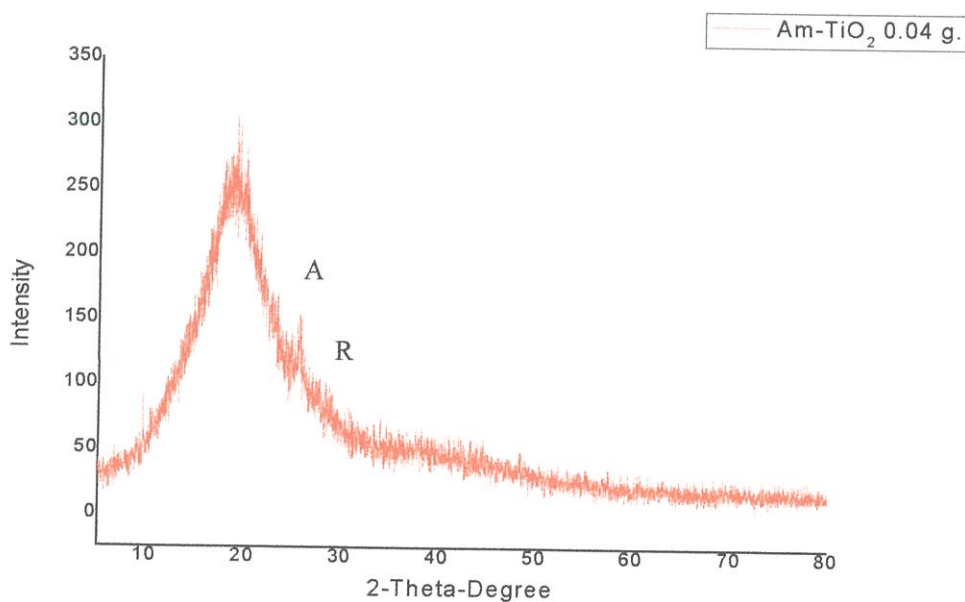
รูปที่ ข-8 กราฟ XRD ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25)  
ปริมาณ 0.03 กรัม - ผลึกกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.02 กรัม

ข-10 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.025 กรัม - ผลึกอสัณฐาน  
ไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.025 กรัม



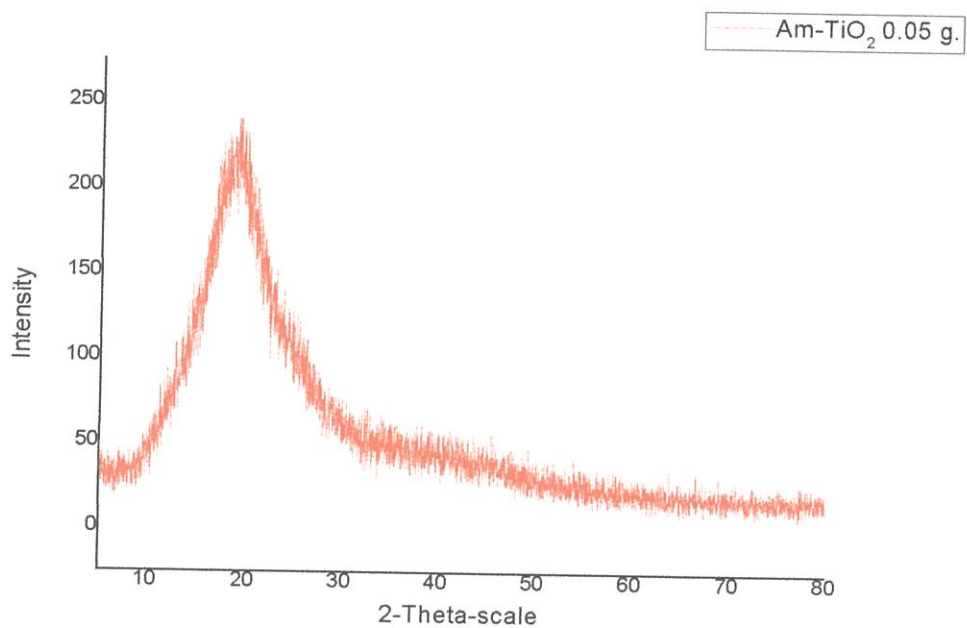
รูปที่ ข-10 กราฟ XRD ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25)  
ปริมาณ 0.025 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.025 กรัม

ข-11 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.01 กรัม - ผลึกอสัณฐาน  
ไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.04 กรัม



รูปที่ ข-11 กราฟ XRD ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25)  
ปริมาณ 0.01 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.04 กรัม

ข-12 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.05 กรัม



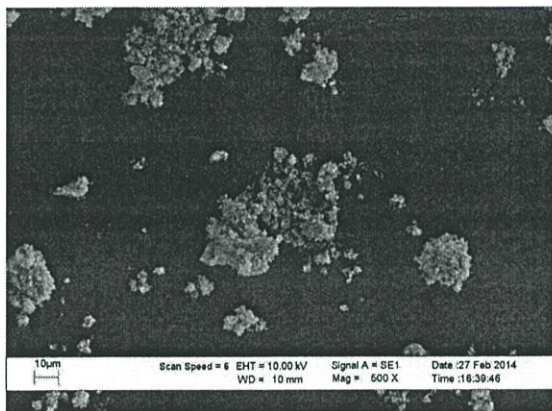
รูปที่ ข-12 กราฟ XRD ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.05 กรัม

## ภาคผนวก ค

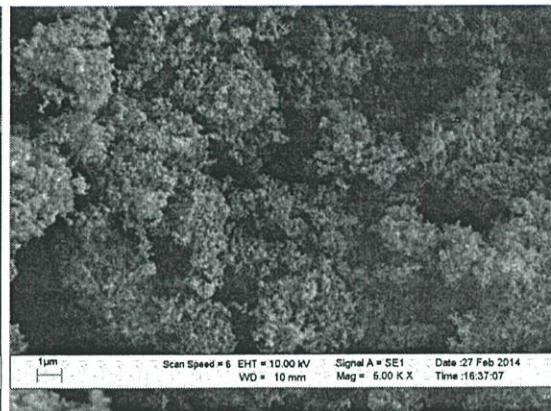
## การพิสูจน์เอกลักษณ์

### ภาพ Scanning Electron Microscope ( SEM )

ค-1 ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ ( Degussa P25 )



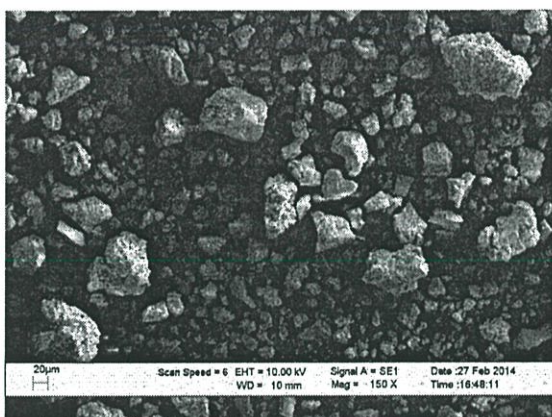
X150



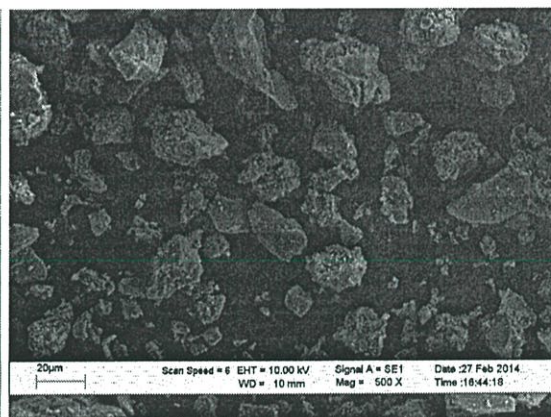
X5000

รูปที่ ค-1 ภาพ SEM ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ ( Degussa P25 )

ค-2 ผงผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ( Amorphous Titanium dioxide )



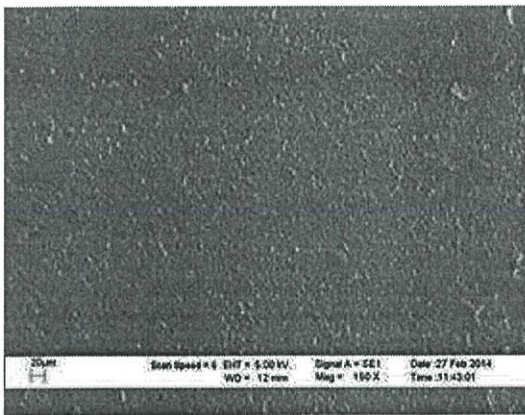
X150



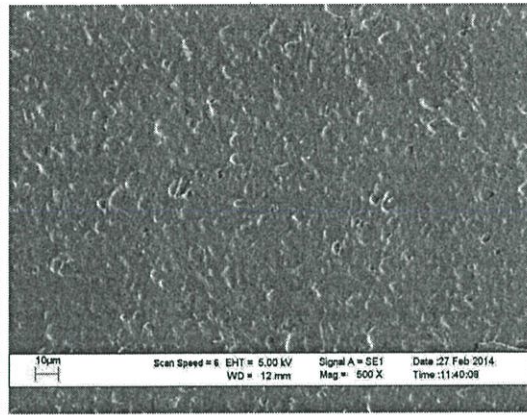
X5000

รูปที่ ค-2 ภาพ SEM ของผงผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ( Amorphous Titanium dioxide )

ค-3 แผ่นยางเปล่า



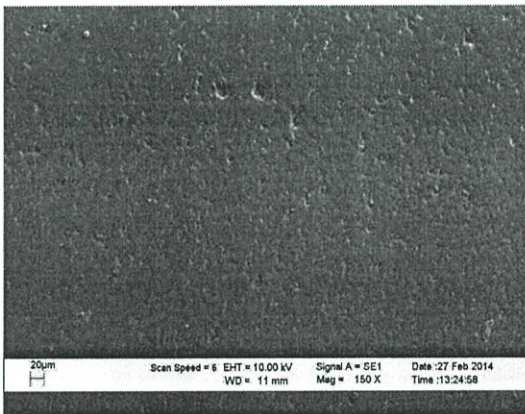
X150



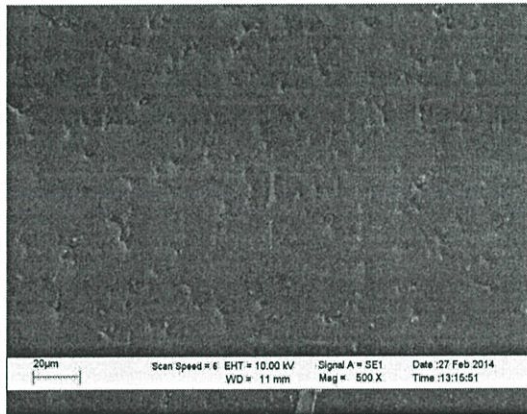
X5000

รูปที่ ค-3 ภาพ SEM ของแผ่นยางเปล่า

ค-4 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ( Degussa P25 ) ปริมาณ 0.01 กรัม



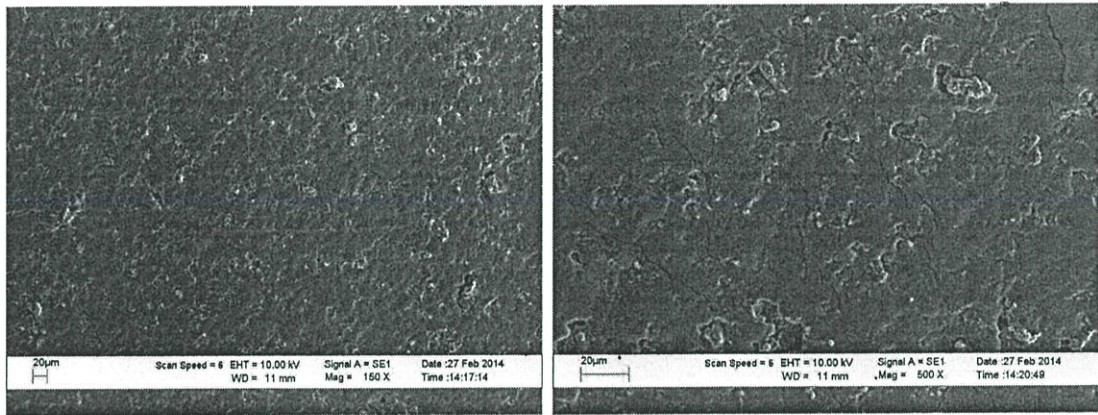
X150



X5000

รูปที่ ค-4 ภาพ SEM ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ( Degussa P25 ) ปริมาณ 0.01 กรัม

ค-5 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ( Degussa P25 ) ปริมาณ 0.03 กรัม

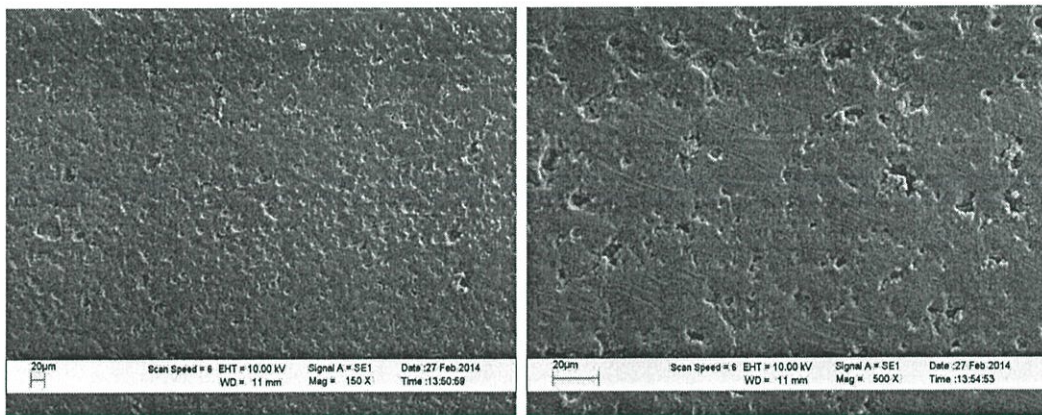


X150

X5000

รูปที่ ค-5 ภาพ SEM ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ( Degussa P25 ) ปริมาณ 0.03 กรัม

ค-6 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ( Degussa P25 ) ปริมาณ 0.05 กรัม

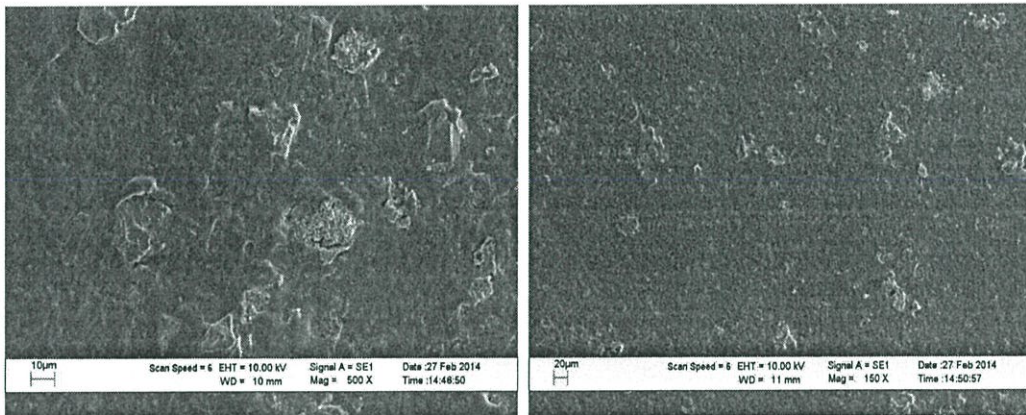


X150

X5000

รูปที่ ค-6 ภาพ SEM ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ( Degussa P25 ) ปริมาณ 0.05 กรัม

ค-7 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.10 กรัม

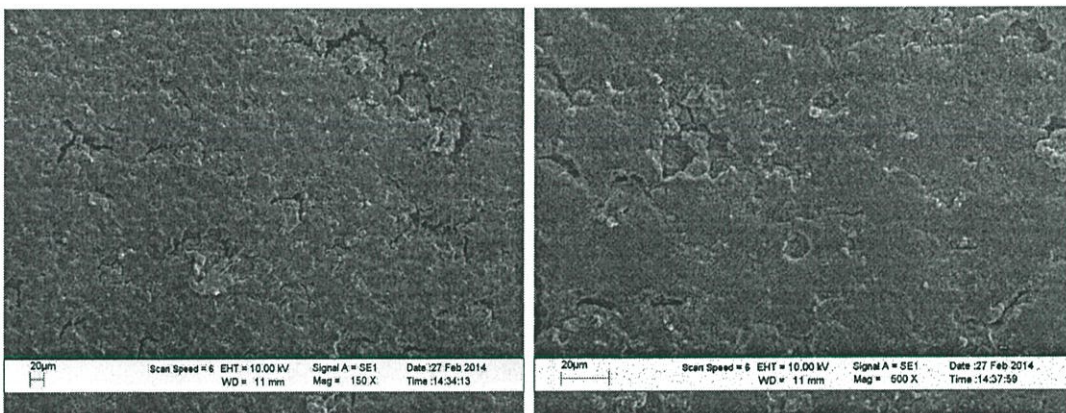


X150

X5000

รูปที่ ค-7 ภาพ SEM ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.10 กรัม

ค-8 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.04 กรัม - ผลึกอสังฐาน  
ไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.01 กรัม

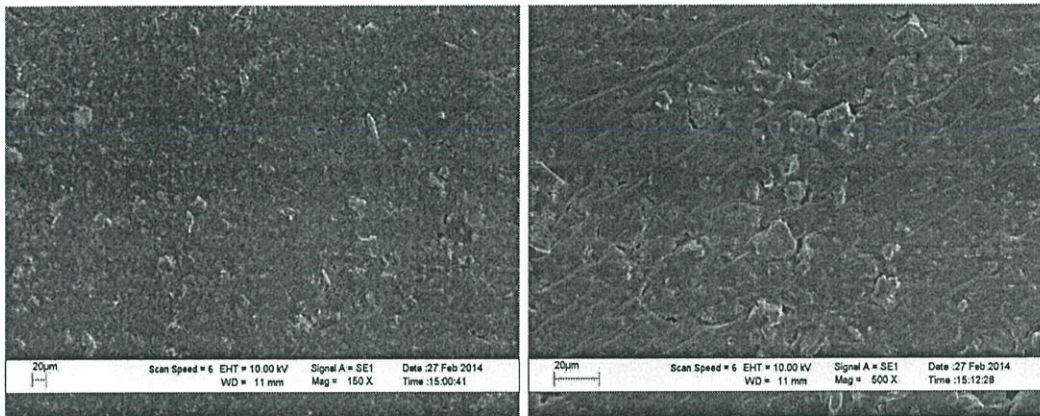


X150

X5000

รูปที่ ค-8 ภาพ SEM ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.04 กรัม  
และ ผลึกอสังฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.01 กรัม

ค-9 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ( Degussa P25 ) ปริมาณ 0.03 กรัม - ผลึกอสัณฐาน  
ไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.02 กรัม

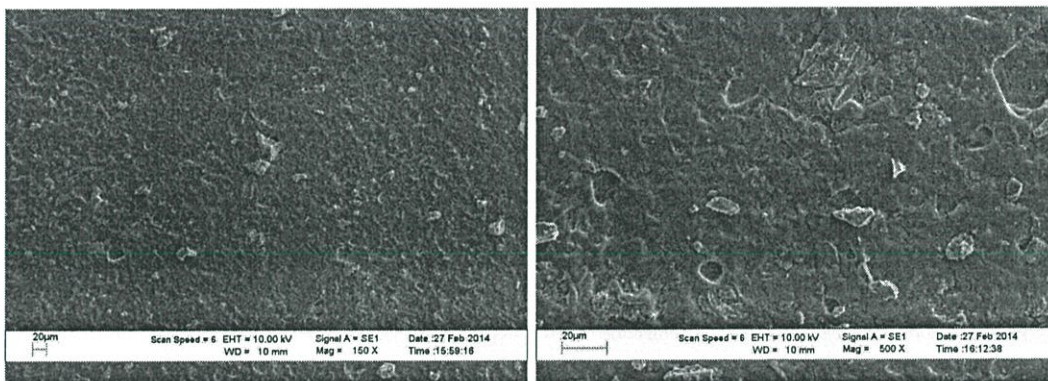


X150

X5000

รูปที่ ค-9 ภาพ SEM ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ( Degussa P25 ) ปริมาณ 0.03 กรัม  
และ ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.02 กรัม

ค-10 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ( Degussa P25 ) ปริมาณ 0.025 กรัม - ผลึกอสัณฐาน  
ไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.025 กรัม

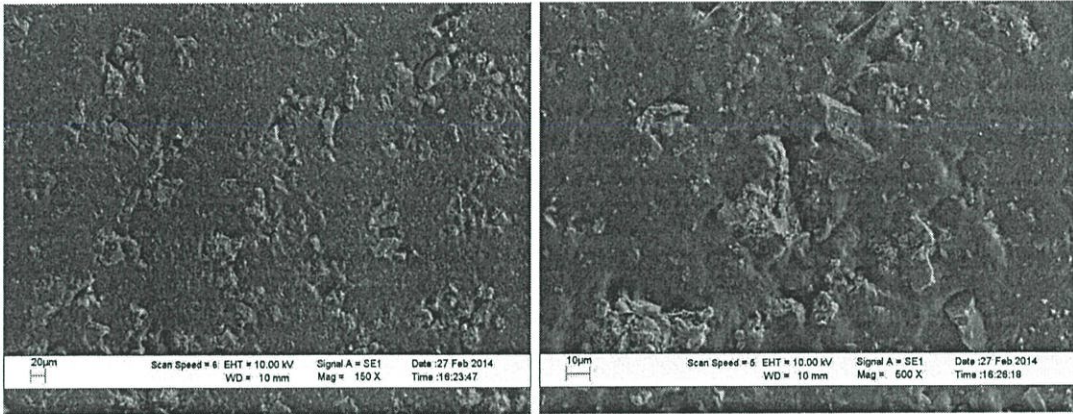


X150

X5000

รูปที่ ค-10 ภาพ SEM ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ( Degussa P25 ) ปริมาณ 0.025 กรัม  
และ ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.025 กรัม

ค-11 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.01 กรัม - ผลึกอสัณฐาน  
ไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.04 กรัม

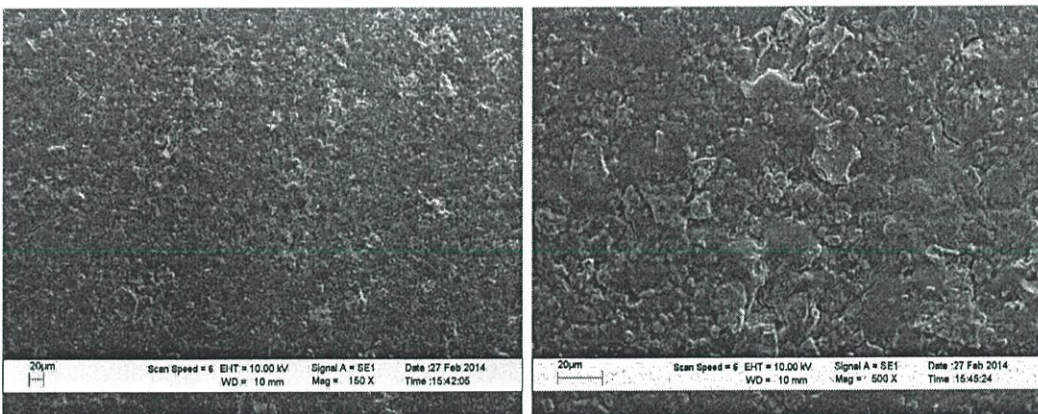


X150

X5000

รูปที่ ค-11 ภาพ SEM ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.01 กรัม  
และ ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.04 กรัม

ค-12 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0 กรัม - ผลึกอสัณฐาน  
ไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.05 กรัม



X150

X5000

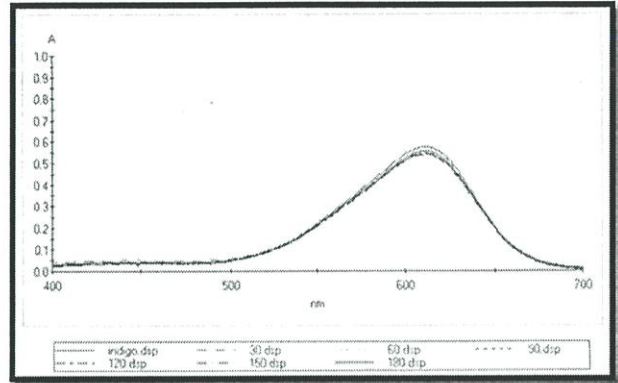
รูปที่ ค-12 ภาพ SEM ของแผ่นยางผสมผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.05 กรัม และ  
ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0 กรัม

ภาคผนวก ง

## เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

การหาปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ที่เหมาะสม

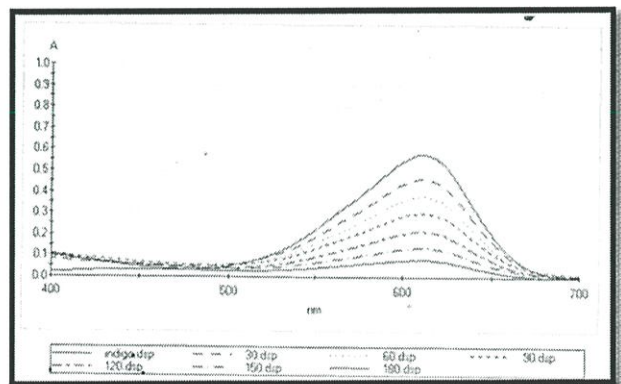
แผ่นยางเปล่า		
เวลา ( นาที )	Absorbance ( A )	เปอร์เซ็นต์ ( % )
0	0.575	0
30	0.542	N/A
60	0.546	N/A
90	0.547	N/A
120	0.545	N/A
150	0.538	N/A
180	0.555	N/A



ตารางที่ ง-1 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์อินดิโกคาร์มินของแผ่นยางเปล่า

รูปที่ ง-1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีสังเคราะห์อินดิโกคาร์มินของแผ่นยางเปล่า

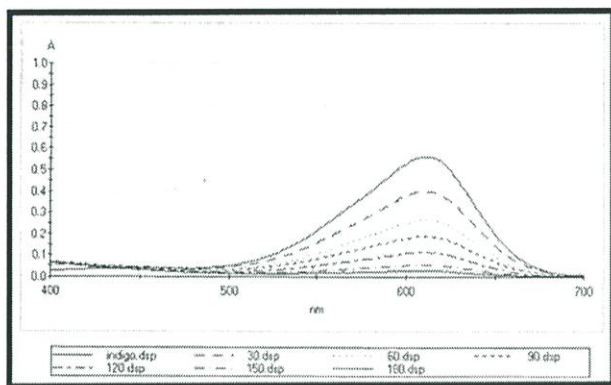
แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.01 กรัม		
เวลา ( นาที )	Absorbance ( A )	เปอร์เซ็นต์ ( % )
0	0.579	0
30	0.464	19.86
60	0.379	34.54
90	0.303	47.67
120	0.215	62.87
150	0.139	76
180	0.081	86



ตารางที่ ง-2 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์อินดิโกคาร์มินของแผ่นยางแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.01 กรัม

รูปที่ ง-2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีสังเคราะห์อินดิโกคาร์มินของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.01 กรัม

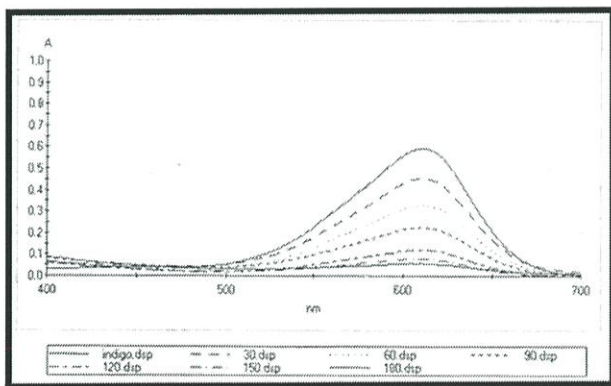
แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.03 กรัม		
เวลา ( นาที )	Absorbance ( A )	เปอร์เซ็นต์
0	0.561	0
30	0.401	28.52
60	0.268	52.23
90	0.190	66.13
120	0.115	79.5
150	0.055	90.2
180	0.028	95.01



ตารางที่ ง-3 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์อินดิโกคาร์มินของแผ่นยางแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03 กรัม

รูปที่ ง-3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีสังเคราะห์อินดิโกคาร์มินของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03 กรัม

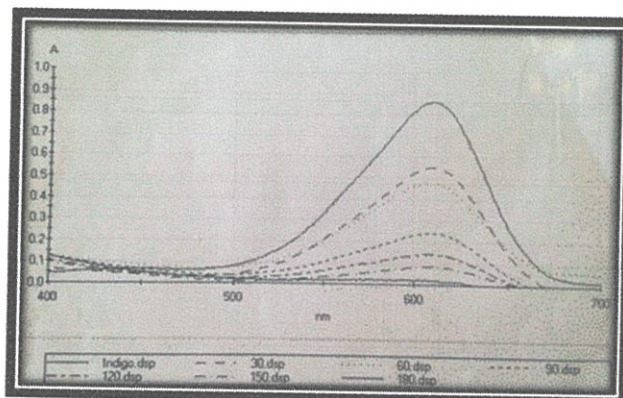
แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.05 กรัม		
เวลา ( นาที )	Absorbance ( A )	เปอร์เซ็นต์
0	0.594	0
30	0.454	23.57
60	0.327	44.95
90	0.226	61.95
120	0.122	79.46
150	0.08	86.53
180	0.058	90.24



ตารางที่ ง-4 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์อินดิโกคาร์มินของแผ่นยางแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.05 กรัม

รูปที่ ง-4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีสังเคราะห์อินดิโกคาร์มีนของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.05 กรัม

แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.10 กรัม		
เวลา ( นาที )	Absorbance ( A )	เปอร์เซ็นต์
0	0.858	0
30	0.551	35.78
60	0.479	44.17
90	0.242	71.8
120	0.142	83.45
150	0.082	90.44
180	0.02	97.67



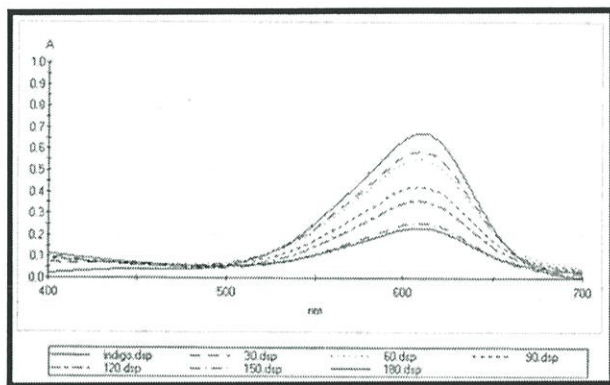
ตารางที่ ง-5 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์อินดิโกคาร์มีนของแผ่นยางแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.10 กรัม

รูปที่ ง-5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีสังเคราะห์อินดิโกคาร์มีนของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.10 กรัม

## ภาคผนวก จ

การกำจัดสีสังเคราะห์อินดิโกคาร์มินของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์- ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์

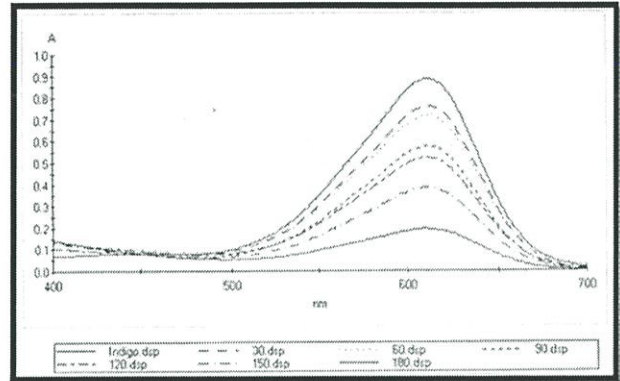
แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.04 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียม ไดออกไซด์ ปริมาณ 0.01 กรัม		
เวลา ( นาที )	Absorbance ( A )	เปอร์เซ็นต์
0	0.671	0
30	0.589	12.22
60	0.550	18.03
90	0.424	36.81
120	0.358	46.65
150	0.255	62.00
180	0.173	74.22



ตารางที่ จ-1 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์อินดิโกคาร์มินของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.04 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.01 กรัม

รูปที่ จ-1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีสังเคราะห์อินดิโกคาร์มินของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.04 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.01 กรัม

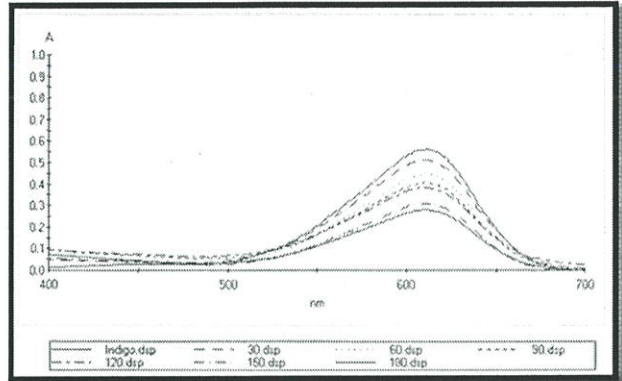
แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.03 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียม ไดออกไซด์ ปริมาณ 0.02 กรัม		
เวลา (นาทีก)	Absorbance (A)	เปอร์เซ็นต์
0	0.884	0
30	0.760	14
60	0.715	19.12
90	0.576	34.84
120	0.522	40.95
150	0.386	56.33
180	0.193	61



ตารางที่ จ-2 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์อินดิโกคาร์มินของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.02 กรัม

รูปที่ จ-2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีสังเคราะห์อินดิโกคาร์มินของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.02 กรัม

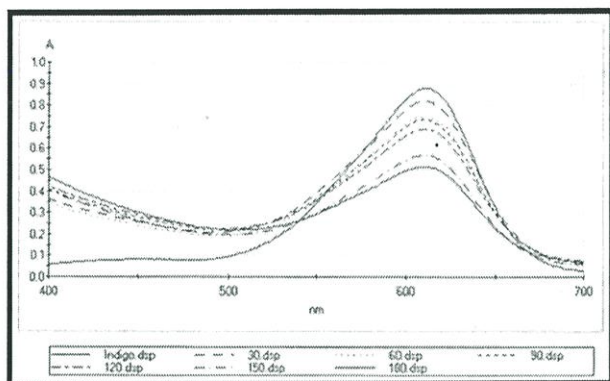
แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.025 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียม ไดออกไซด์ ปริมาณ 0.025 กรัม		
เวลา ( นาที )	Absorbance ( A )	เปอร์เซ็นต์
0	0.562	0
30	0.515	8.36
60	0.448	20.28
90	0.408	27.4
120	0.385	31.5
150	0.311	44.66
180	0.280	50.18



ตารางที่ จ-3 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์อินดิโกคาร์มินของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.025 กรัมผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.025 กรัม

รูปที่ จ-3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีสังเคราะห์อินดิโกคาร์มินของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.025 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.025 กรัม

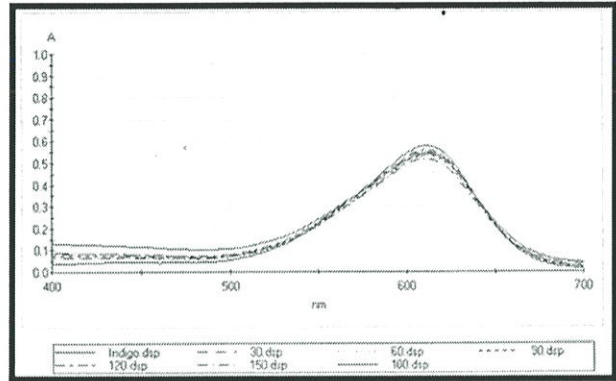
แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.01 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียม ไดออกไซด์ ปริมาณ 0.04 กรัม		
เวลา ( นาที )	Absorbance ( A )	เปอร์เซ็นต์
0	0.88	0
30	0.82	6.81
60	0.752	14.54
90	0.736	16.36
120	0.691	21.48
150	0.57	35.23
180	0.516	41.36



ตารางที่ จ-4 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์อินดิโกคาร์มินของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.01 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.04 กรัม

รูปที่ จ-4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีสังเคราะห์อินดิโกคาร์มินของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.01 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.04 กรัม

แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.05 กรัม		
เวลา ( นาที )	Absorbance ( A )	เปอร์เซ็นต์ ( % )
0	0.577	0
30	0.549	N/A
60	0.532	N/A
90	0.534	N/A
120	0.558	N/A
150	0.518	N/A
180	0.541	N/A



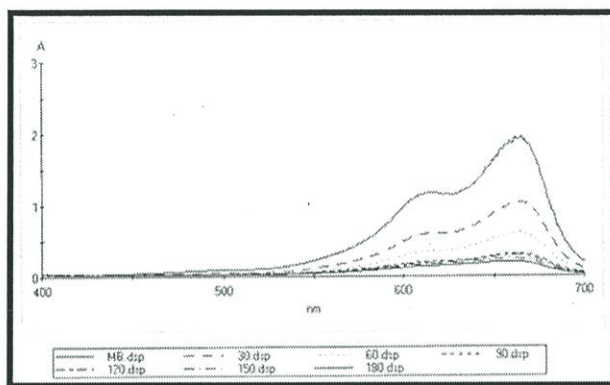
ตารางที่ จ-5 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์อินดิโกคาร์มินของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.05 กรัม

รูปที่ จ-5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีสังเคราะห์อินดิโกคาร์มินของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.05 กรัม

## ภาคผนวก ฉ

การกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - ผลึกอสัณฐาน  
ไทเทเนียมไดออกไซด์

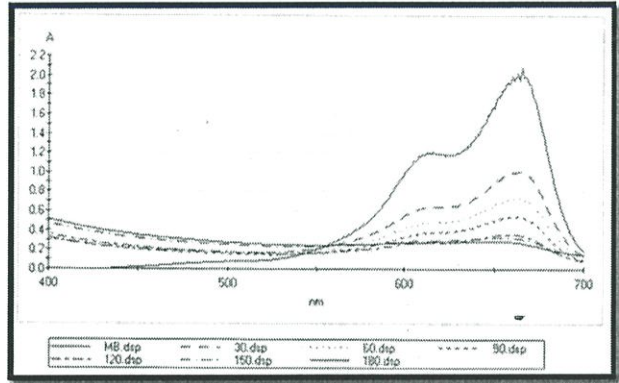
แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.05 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียม ไดออกไซด์ ปริมาณ 0 กรัม		
เวลา ( นาที )	Absorbance ( A )	เปอร์เซ็นต์
0	1.958	0
30	1.032	47.29
60	0.605	69.10
90	0.313	84.01
120	0.287	85.34
150	0.241	87.69
180	0.191	90.25



ตารางที่ ๑-1 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.05 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0 กรัม

รูปที่ ๑-1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.05 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0 กรัม

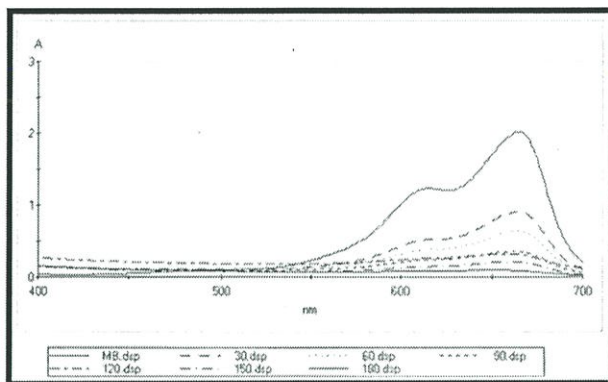
แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.04 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียม ไดออกไซด์ ปริมาณ 0.01 กรัม		
เวลา ( นาที )	Absorbance ( A )	เปอร์เซ็นต์
0	2.089	0
30	1.011	51.60
60	0.728	65.15
90	0.539	74.20
120	0.349	83.30
150	0.312	85.06
180	0.268	87.17



ตารางที่ ๓-2 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.04 กรัมผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.01 กรัม

รูปที่ ๓-2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.04 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.01 กรัม

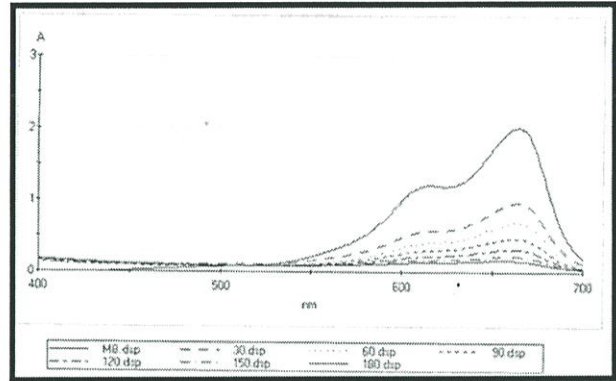
แผ่นยางผสมผลึกอสัณฐานไทเทเนียม ไดออกไซด์ ปริมาณ 0.02 กรัม และไทเทเนียมไดออกไซด์ ( Degussa P25 ) ปริมาณ 0.03 กรัม		
เวลา ( นาที )	Absorbance ( A )	เปอร์เซ็นต์
0	2.013	0
30	0.904	55.09
60	0.635	68.46
90	0.352	82.51
120	0.311	84.55
150	0.208	89.67
180	0.082	95.93



ตารางที่ ๓-3 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.02 กรัม

รูปที่ ๓-3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.02 กรัม

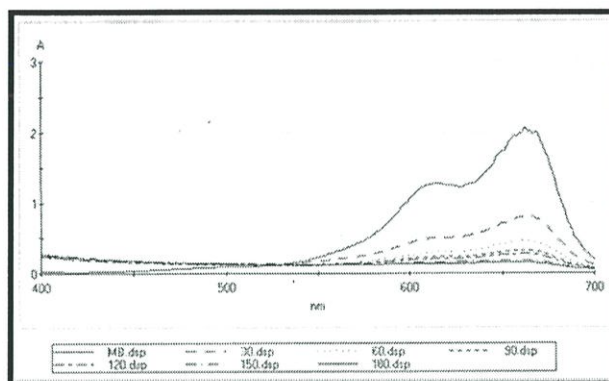
แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.025 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียม ไดออกไซด์ ปริมาณ 0.025 กรัม		
เวลา ( นาที )	Absorbance ( A )	เปอร์เซ็นต์ ( % )
0	2.019	0
30	0.969	52.00
60	0.690	65.82
90	0.474	76.52
120	0.319	84.20
150	0.216	89.30
180	0.156	92.27



ตารางที่ ๓-4 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.025 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.025 กรัม

รูปที่ ๓-4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.025 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.025 กรัม

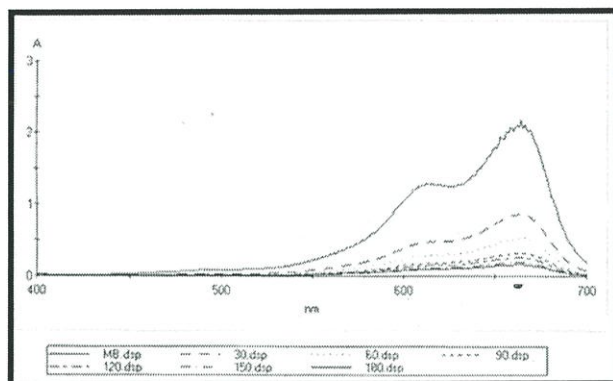
แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.01 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียม ไดออกไซด์ ปริมาณ 0.04 กรัม		
เวลา ( นาที )	Absorbance ( A )	เปอร์เซ็นต์
0	2.014	0
30	0.799	60.33
60	0.46	77.16
90	0.324	83.91
120	0.27	86.59
150	0.182	91.00
180	0.151	92.50



ตารางที่ ๓-5 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.01 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.04 กรัม

รูปที่ ๓-5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.01 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.04 กรัม

แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียม ไดออกไซด์ ปริมาณ 0.05 กรัม		
เวลา ( นาที )	Absorbance ( A )	เปอร์เซ็นต์
0	2.07	0
30	0.858	58.55
60	0.528	74.49
90	0.323	84.40
120	0.238	88.50
150	0.191	90.77
180	0.16	92.27



ตารางที่ ๖-๖ แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.05 กรัม

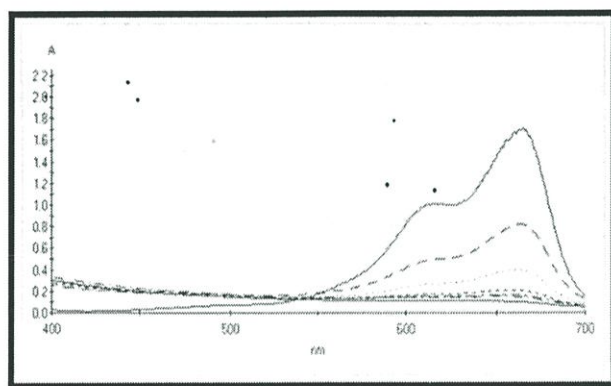
รูปที่ ๖-๖ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.05 กรัม

## ภาคผนวก ช

การทดสอบประสิทธิภาพในการนำกลับมาใช้ใหม่ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - ผลึก อัดฐานไทเทเนียมไดออกไซด์

ครั้งที่ 1

แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.03 กรัม - ผลึกอัดฐานไทเทเนียม ไดออกไซด์ ปริมาณ 0.02 กรัม		
เวลา ( นาที )	Absorbance ( A )	เปอร์เซ็นต์
0	1.709	0
30	0.820	52.00
60	0.396	76.83
90	0.206	88.00
120	0.160	90.64
150	0.145	91.52
180	0.101	94.10

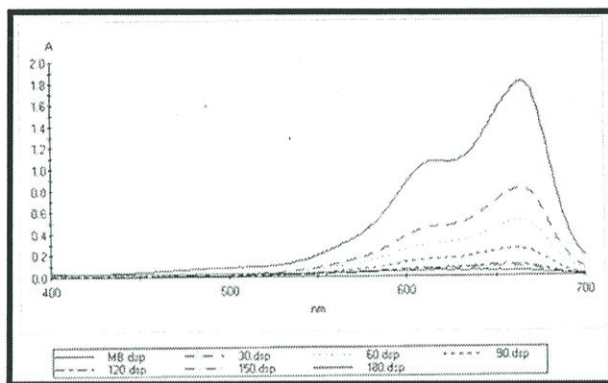


ตารางที่ ข-1 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03 กรัม - ผลึกอัดฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.02 กรัม ในการนำมาใช้งาน ครั้งที่ 1

รูปที่ ข-1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03 กรัม - ผลึกอัดฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.02 กรัม ในการนำมาใช้งาน ครั้งที่ 1

## ครั้งที่ 2

แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.03 กรัม ผลึกอสัณฐานไทเทเนียม ไดออกไซด์ ปริมาณ 0.02 กรัม		
เวลา ( นาที )	Absorbance ( A )	เปอร์เซ็นต์
0	1.801	0
30	0.804	55.36
60	0.507	71.85
90	0.344	80.90
120	0.192	89.34
150	0.084	95.34
180	0.045	97.50

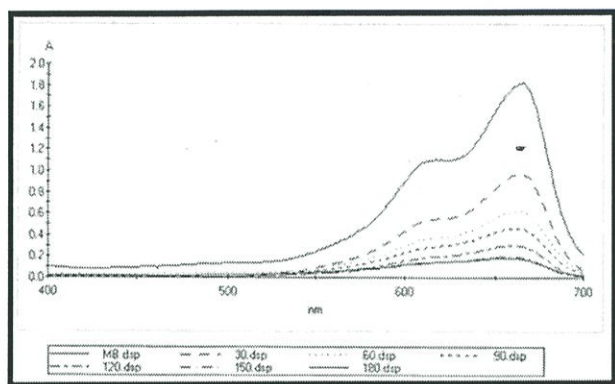


ตารางที่ ข-2 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.02 กรัม ในการนำมาใช้งาน ครั้งที่ 2

รูปที่ ข-2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.02 กรัม ในการนำมาใช้งาน ครั้งที่ 2

## ครั้งที่ 3

แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.03 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียม ไดออกไซด์ ปริมาณ 0.02 กรัม		
เวลา ( นาที )	Absorbance ( A )	เปอร์เซ็นต์
0	1.820	0
30	0.875	52.00
60	0.626	65.60
90	0.56	69.23
120	0.397	78.20
150	0.291	84.00
180	0.175	90.40

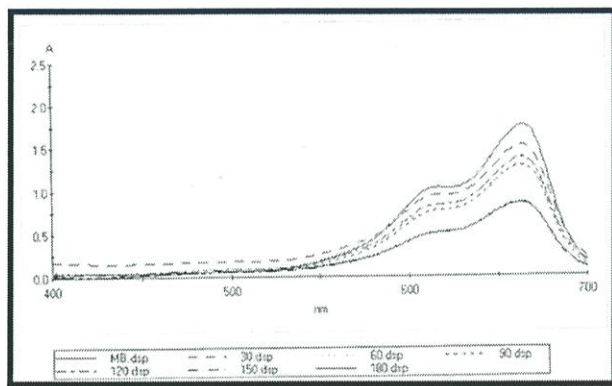


ตารางที่ ข-3 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.02 กรัม และ ในการนำมาใช้งาน ครั้งที่ 3

รูปที่ ข-3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.02 กรัม ในการนำมาใช้งาน ครั้งที่ 3

## ครั้งที่ 4

แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.03 กรัม ผลึกอสัณฐานไทเทเนียม ไดออกไซด์ ปริมาณ 0.02 กรัม		
เวลา (นาที)	Absorbance (A)	เปอร์เซ็นต์
0	1.752	0
30	1.371	21.74
60	1.120	36.00
90	1.017	42.00
120	0.987	43.66
150	0.848	51.60
180	0.672	61.64

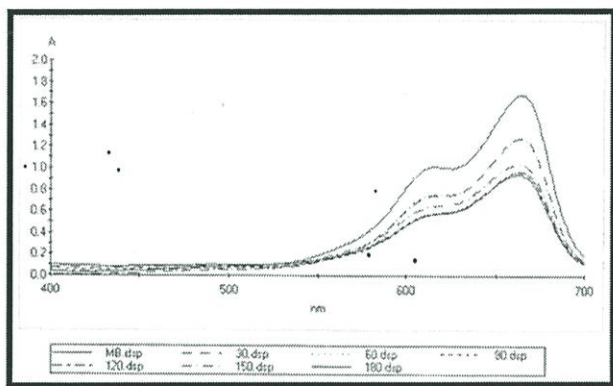


ตารางที่ ข-4 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.02 กรัม ในการนำมาใช้งาน ครั้งที่ 4

รูปที่ ข-4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.02 กรัม ในการนำมาใช้งาน ครั้งที่ 4

## ครั้งที่ 5

แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 0.03 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.02 กรัม		
เวลา ( นาที )	Absorbance ( A )	เปอร์เซ็นต์
0	1.679	0
30	1.284	23.52
60	1.28	23.76
90	1.032	38.53
120	0.965	42.53
150	0.964	42.58
180	0.933	44.43



ตารางที่ ข-5 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.02 กรัม ในการนำมาใช้งาน ครั้งที่ 5

รูปที่ ข-5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและเวลาในการกำจัดสีสังเคราะห์เมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.03 กรัม - ผลึกอสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.02 กรัม ในการนำมาใช้งาน ครั้งที่ 5