

การเตรียม การศึกษาคุณลักษณะเฉพาะ และสมบัติโฟโตคะตะไลติกของ
แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น

PREPARATION, CHARACTERIZATION, AND PHOTOCATALYTIC
PROPERTIES OF TiO_2 -MULTIWALLED CARBON-NANOTUBES
COMPOSITE RUBBER SHEETS



โครงการพิเศษสนับสนุนหนึ่งของการศึกษาคณะศึกษาศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม

คณะศึกษาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

การเตรียม การศึกษาคุณลักษณะเฉพาะ และสมบัติโฟโตคะตะไลติกของ
แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ - ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น

PREPARATION, CHARACTERIZATION, AND PHOTOCATALYTIC
PROPERTIES OF TiO_2 - MULTIWALLED CARBON NANOTUBES
COMPOSITE RUBBER SHEETS



นางสาวกิตติยา เลอะดี
นางสาวกัทธิดา ไชยสัตย์
นางสาวโสภากย์ลิริ ศิลาวงษ์

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**PREPARATION, CHARACTERIZATION, AND PHOTOCATALYTIC
PROPERTIES OF TiO₂- MULTIWALLED CARBON NANOTUBES
COMPOSITE RUBBER SHEETS**



**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN INDUSTRIAL CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2013**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การเตรียม การศึกษาคุณลักษณะเฉพาะ และสมบัติโฟโตคะตะไลติกของ แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น
Preparation, Characterization, and Photocatalytic Properties of
TiO₂- Multiwalled Carbon Nanotubes Composite Rubber Sheets

ชื่อนักศึกษา นางสาวกิตติยา เลาะลี รหัสนักศึกษา 53050170
นางสาวกัทธิดา ไชยสัตย์ รหัสนักศึกษา 53050181
นางสาวโสภากย์สิริ ศีลาวงษ์ รหัสนักศึกษา 53050196

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.เอกรัฐ เดชศรี

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมี
อุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2556

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

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การเตรียม การศึกษาคุณลักษณะเฉพาะ และสมบัติโฟโตคะตะไลติกของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวกิตติยา	เลาะลี	รหัสนักศึกษา 53050170
	นางสาวคัทลียา	ไชยสัตย์	รหัสนักศึกษา 53050181
	นางสาวโสภากย์สิริ	ศิลาวงษ์	รหัสนักศึกษา 53050196
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต		
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์		
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.เอกรัฐ เดชศรี		

บทคัดย่อ

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาการเตรียม การศึกษาคุณลักษณะเฉพาะ และสมบัติโฟโตคะตะไลติกของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น รวมทั้งยังศึกษาสมบัติเชิงกลและการใช้งานซ้ำของแผ่นยางผสม ในส่วนการเตรียมแผ่นยางผสมสามารถเตรียมด้วยวิธีการง่ายๆ โดยการผสมสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ น้ำยางชั้น (60% HA) และเติมสารแขวนลอยท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นในปริมาณที่แตกต่างกัน จากนั้นเทลงแม่แบบแล้ววางทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง ก็จะได้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอน สำหรับลักษณะสัณฐานวิทยาและลักษณะโครงสร้างผลึกของแผ่นยางผสมสามารถศึกษาโดยใช้เทคนิค FT-IR XRD SEM และEDS ผลจากการวิเคราะห์พบว่าโครงสร้างผลึกและหมู่ฟังก์ชันของแผ่นยางผสมสอดคล้องกับ โครงสร้างผลึกของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) และแผ่นยางธรรมชาติเริ่มต้น ในขณะที่ฟิสิกส์เอกลักษณ์ของท่อนาโนคาร์บอนไม่สามารถสังเกตได้ ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM และEDS แสดงให้เห็นถึงลักษณะสัณฐานวิทยาของแผ่นยางผสมพบว่าการเติมท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้อนุภาคท่อนาโนคาร์บอนปกคลุมบนพื้นผิวของแผ่นยางผสมมากขึ้นด้วย ผลจากการทดสอบแรงดึงพบว่าสมบัติเชิงกล เช่น ค่า Young's Modulus และค่า Stiffness ของแผ่นยางผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณการเติมท่อนาโนคาร์บอนลงไป ส่วนในการทดสอบสมบัติโฟโตคะตะไลติกแสดงให้เห็นว่าแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนที่เตรียมขึ้นสามารถกำจัดสีย้อมได้ทั้งเมทิลีนบลูและอินดิโกคาร์มีนภายใต้การฉายแสงยูวี โดยเฉพาะอย่างยิ่งสามารถกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูได้เร็วกว่าสีย้อมอินดิโกคาร์มีน นอกจากนี้ผลการศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานซ้ำ

ของแผ่นยางผสมพบว่าแผ่นยางผสมสามารถนำมาใช้งานซ้ำในการกำจัดสีข้อมเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงยูวีได้ ถึงแม้ว่าเมื่อเพิ่มจำนวนครั้งในการใช้งานซ้ำของแผ่นยางผสมหลายครั้งจะมีประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมลดลง แต่อย่างไรก็ตามแผ่นยางผสมนี้ยังมีข้อดีบางประการ เช่น นำมาใช้งานง่าย หลังจากการใช้งานเสร็จสามารถเก็บกลับคืนและนำมาใช้งานใหม่ได้



คำสำคัญ : โทเทเนียมไดออกไซด์ ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น กระบวนโฟโตคะตะไลติก เมทิลีนบลู อินดิโกคาร์มีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Preparation, Characterization, and Photocatalytic Properties of TiO ₂ - Multiwalled Carbon Nanotubes Composite Rubber Sheets		
Students	MissKittiya Lohlee	ID 53050170	
	MissKataleeya Chaiyasat	ID 53050181	
	MissSopaksiri Silawong	ID 53050196	
Degree	Bachelor of Science		
Major Program	Industrial Chemistry		
Academic Year	2013		
Advisor	Dr.Chaval Sriwong		
Co-advisor	Dr.Ekarat Detsri		

ABSTRACT

In this special project, the preparation, characterization, and photocatalytic properties of TiO₂-multiwalled carbon nanotubes (TiO₂-MWCNTs) composite rubber sheets were investigated, including the mechanical properties and recyclability of these sheets were also studied. In the preparation section, TiO₂-MWCNTs composite rubber sheets were easily prepared by directly mixing of TiO₂ suspension and concentrated rubber latex (60% HA) with varying different amounts of MWCNTs suspension. After that the prepared mixture were poured into mold, left at room temperature to dried, and finally, the TiO₂-MWCNTs 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 TiO₂-MWCNTs composite rubber sheets are corresponding to pristine TiO₂ (Degussa P25) powder and natural rubber sheet, whereas all of the MWCNTs characteristic peaks are not observed. From the SEM and EDS results, the morphologies of the sheet surface were increased covering with MWCNTs particles when the increasing added amount of MWCNTs. From the tensile test found that the mechanical properties like young' modulus and stiffness of the sheets were increased with the increasing amount of MWCNTs. In the photocatalytic properties test showed that the prepared TiO₂-MWCNTs composite rubber sheets could be degrade both methylene blue (MB) and indigo carmine (IC) dyes under UV light irradiation. Especially, the former dye degraded faster than the later dye. In addition, the efficiencies of

TiO₂-MWCNTs composite rubber sheet on the repeatedly used were also studied. The results indicated that TiO₂-MWCNTs composite rubber sheet could be repeatedly used on the photodegradation of MB dye solution under UV light irradiation. However, despite this composite rubber sheet showed that the decreased efficiencies on the repeatedly used when increasing the number of uses but the sheet has some advantages that it is easy to use, recoverable after use, and it can be reused as well.



Keywords : Titanium dioxide, MWCNTs, Photocatalytic, Methylene blue, Indigo carmine

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ และดร.เอกรัฐ เดชศรี อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมเป็นอย่างยิ่งที่กรุณาให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะต่างๆ เกี่ยวกับงานวิจัย และติดตามผลโครงการพิเศษมาโดยตลอด จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ดร.เอกรัฐ เดชศรี และดร.เชิดศักดิ์ มณีรัตน์รุ่งโรจน์ อาจารย์คณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษ ที่กรุณาให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะต่างๆ ซึ่งเป็นประโยชน์ ช่วยตรวจทาน และแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คุณปราณี บุญวัฒน์ นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการ ที่คอยให้คำแนะนำและความรู้เกี่ยวกับการใช้เครื่องวัด UV-Visible Spectrophotometer รวมทั้งขอขอบคุณนักวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ภาคเคมีทุกๆ ท่านที่ให้ความรู้และคอยอำนวยความสะดวกในการใช้สารเคมี อุปกรณ์ และห้องปฏิบัติการในการทดลอง

ขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่คอยให้กำลังใจ และให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้านจนทำให้โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และบุคคลในครอบครัว ที่คอยไต่ถามและเป็นกำลังใจสำคัญในการทำโครงการพิเศษครั้งนี้ให้สำเร็จไปได้ด้วยดี

นอกจากนี้ยังมีบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลืออีกมากมายที่ยังมิได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ ซึ่งคณะผู้จัดทำต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

กิตติยา เลาะลี

กัทลียา ไชยสัตย์

โสภากย์สิริ ศีลาวงษ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	III
กิตติกรรมประกาศ	V
สารบัญ	VI
สารบัญตาราง	X
สารบัญรูป	XII
คำย่อและสัญลักษณ์	XV
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ปฏิริยาโฟโตคะตะไลซิส	5
2.1.1 หลักการพื้นฐานของปฏิริยาโฟโตคะตะไลซิส (Fundamental of Photocatalysis Reaction)	5
2.1.2 ชนิดของตัวเร่ง (Type of Catalyst)	6
2.1.3 แหล่งกำเนิดพลังงานแสง (UV Light Sources)	7
2.2 ชนิดของปฏิริยาโฟโตคะตะไลซิส	9
2.3 กลไกของปฏิริยาโฟโตคะตะไลซิส (Mechanism of Photocatalysis)	10
2.4 สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)	13
2.5 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide)	14
2.5.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์	14
2.5.2 ลักษณะของสารกึ่งตัวนำชนิดไทเทเนียมไดออกไซด์สำหรับปฏิริยา แบบใช้แสงร่วม	16
2.6 ประโยชน์ของไทเทเนียมไดออกไซด์	17
2.7 นวัตกรรมชาติ	19

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.7.1 น้ำยางธรรมชาติ (Natural Rubbers, NR)	20
2.7.1.1 ส่วนประกอบของน้ำยาง	22
2.7.1.2 เสถียรภาพของน้ำยาง	23
2.7.1.3 การเสถียรภาพของน้ำยาง	23
2.7.1.4 การรักษาสภาพน้ำยาง	23
2.7.2 สมบัติทั่วไปของยางพารา	24
2.7.3 น้ำยางข้น (Concentrated latex)	26
2.7.3.1 กระบวนการเตรียมน้ำยางข้นจากน้ำยางสด	26
2.8 ท่อนานาโนคาร์บอน	27
2.8.1 ท่อนานาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว (Single-walled Carbon Nanotubes; SWNTs)	28
2.8.2 ท่อนานาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น (Multi-walled Carbon Nanotubes; MWNTs)	29
2.8.3 สมบัติของท่อนานาโนคาร์บอน	29
2.9 การดูดซับ (Adsorption)	32
2.10 สีย้อม	32
2.10.1 เมทิลีนบลู (Methylene blue)	34
2.10.2 อินดิโกคาร์มีน (Indigo carmine)	35
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 สารเคมี	38
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	38
3.3 วิธีการทดลอง	40
3.3.1 การเตรียมน้ำแขวนลอย (Suspension) ของท่อนานาโนคาร์บอน แบบผนังหลายชั้น	40
3.3.2 การเตรียมน้ำแขวนลอยผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ท่อนานาโนคาร์บอน	41
3.3.3 ศึกษาคุณลักษณะแผ่นยางผสม	41
3.3.4 ทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นยางผสม	42

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3.5 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีของแผ่นยางผสม	43
3.3.6 ศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานซ้ำของแผ่นยางผสม	43
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	
4.1 ผลการเตรียมสารแขวนลอยของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น	44
4.1.1 Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR)	45
4.1.2 X-ray diffraction (XRD)	46
4.1.3 Scanning Electron Microscopy (SEM)	47
4.2 การศึกษาเอกลักษณ์ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และการเติมท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณที่แตกต่างกัน	50
4.2.1 Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR)	50
4.2.2 X-ray diffraction (XRD)	51
4.2.3 Scanning Electron Microscopy (SEM)	52
4.2.4 Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)	56
4.3 การทดสอบการดึงของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (Tensile Test)	59
4.4 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีโดยใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลติกของแผ่นยางผสม	60
4.4.1 ผลการทดลองการกำจัดสีของเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นผสมที่เติมท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณต่างๆ	61
4.4.2 ผลการทดลองการกำจัดสีของอินดิโกคาร์มีนโดยใช้แผ่นผสมที่เติมท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณต่างๆ	62
4.4.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสีของเมทิลีนบลูโดยไม่เปิดไฟ	63
4.4.4 ผลการทดลองใช้ซ้ำของแผ่นยางผสมที่เติมท่อนาโนคาร์บอน	64
2 มิลลิกรัม	

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	65
5.1.1 วิเคราะห์พิกศุจน์เอกลักษณ์ของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น	65
5.1.2 วิเคราะห์พิกศุจน์เอกลักษณ์ของแผ่นยางไทเทเนียมไดออกไซด์ ผสมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น	65
5.1.3 การทดสอบความแข็งแรงดึงของแผ่นยางไทเทเนียมไดออกไซด์ ผสมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น	66
5.1.4 ประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมินดิโกคาร์มินของแผ่นยางผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) และท่อนาโนคาร์บอน	66
5.1.5 ประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมเมทิลินบลูของแผ่นยางผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) และท่อนาโนคาร์บอน	66
5.1.6 การประสิทธิภาพในการนำไปใช้งานใหม่ของแผ่นยางผสม ไทเทเนียม ไดออกไซด์ (Degussa P25) ที่มีการเติมท่อนาโนคาร์บอน แบบผนังหลายชั้น 2 มิลลิกรัม ในการกำจัดสีข้อมเมทิลินบลู	67
5.2 ข้อเสนอแนะ	67
เอกสารอ้างอิง	68
ภาคผนวก	71
ภาคผนวก ก	72
ภาคผนวก ข	74
ภาคผนวก ค	76
ภาคผนวก ง	78
ภาคผนวก จ	96
ภาคผนวก ฉ	98

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ความยาวคลื่นในช่วงต่างๆ	8
ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพที่สำคัญของไทเทเนียมไดออกไซด์	15
ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบผลการกำจัดมลพิษกับวิธีต่างๆ	19
ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างส่วนประกอบและปริมาณของสารต่างๆ ในน้ำยางธรรมชาติ	21
ตารางที่ 2.5 ส่วนประกอบของเม็ดยาง	21
ตารางที่ 2.6 สมบัติของท่อนาโนคาร์บอน	31
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าการทดสอบการดึงแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นที่ปริมาณต่างๆ	59
ตารางที่ ง-1 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีของเมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (ไม่เติมท่อนาโนคาร์บอน)	79
ตารางที่ ง-2 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีของเมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) 1 มิลลิกรัม	80
ตารางที่ ง-3 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีของเมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) 2 มิลลิกรัม	81
ตารางที่ ง-4 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีของเมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) 3 มิลลิกรัม	82
ตารางที่ ง-5 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีของเมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) 5 มิลลิกรัม	83
ตารางที่ ง-6 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีของอินดิโกคาร์มินของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (ไม่เติมท่อนาโนคาร์บอน)	84
ตารางที่ ง-7 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีของอินดิโกคาร์มินของแผ่นยางผสมที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) 1 มิลลิกรัม	85
ตารางที่ ง-8 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีของอินดิโกคาร์มินของแผ่นยางผสมที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) 2 มิลลิกรัม	86
ตารางที่ ง-9 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีของอินดิโกคาร์มินของแผ่นยางผสมที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) 3 มิลลิกรัม	87
ตารางที่ ง-10 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีของอินดิโกคาร์มินของแผ่นยางผสมที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) 5 มิลลิกรัม	88

สารบัญตาราง(ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ ง-11 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีของเมทิลีนบลูของแผ่นยางผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์โดยไม่เปิดไฟ	89
ตารางที่ ง-12 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีของเมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมที่เติม ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) 5 มิลลิกรัม ในตู้ฉายรังสีโดยไม่ เปิดไฟ	90
ตารางที่ ง-13 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีของเมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมที่เติม ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) ซ้ำครั้งที่ 1	91
ตารางที่ ง-14 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีของเมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมที่เติม ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) ซ้ำครั้งที่ 2	92
ตารางที่ ง-15 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีของเมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมที่เติม ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) ซ้ำครั้งที่ 3	93
ตารางที่ ง-16 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีของเมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมที่เติม ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) ซ้ำครั้งที่ 4	94
ตารางที่ ง-17 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีของเมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมที่เติม ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) ซ้ำครั้งที่ 5	95

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส และปฏิกิริยาโฟโตเคมี	6
รูปที่ 2.2 ผังแถบพลังงานของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์พร้อมความสามารถของการรีดออกซ์	7
รูปที่ 2.3 กระบวนการที่เกิดขึ้นที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ	11
รูปที่ 2.4 ผังแสดงการเกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลจากกระบวนการโฟโตคะตะไลติกใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ช่วยทางเคมีอิเล็กตรอน	12
รูปที่ 2.5 แสดงการเจือธาตุดันลงไปนในสารกึ่งตัวนำ ชนิด n Type และ p Type	13
รูปที่ 2.6 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์	15
รูปที่ 2.7 กระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยแสง	17
รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ ซิส - 1,4 พอลิไอโซพรีน	20
รูปที่ 2.9 ภาพวาดแสดงโครงสร้างของอนุภาคยางในน้ำยางธรรมชาติ	21
รูปที่ 2.10 ลักษณะพื้นฐานของท่อนาโนคาร์บอน	27
รูปที่ 2.11 รูปแสดงชนิดของท่อนาโนคาร์บอน	27
รูปที่ 2.12 รูปแบบโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน	28
รูปที่ 2.13 คำนีบ่งบอกรูปแบบการจัดเรียงตัวของอะตอมบนท่อนาโนคาร์บอน	28
รูปที่ 2.14 ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวในรูปแบบต่างๆ	29
รูปที่ 2.15 ภาพของท่อนาโนคาร์บอนที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	29
รูปที่ 2.16 โครงสร้างของเมทิลีนบลู (Methylene blue)	34
รูปที่ 2.17 โครงสร้างของอินดิโกคาร์มีน (Indigo carmine)	35
รูปที่ 2.18 โครงสร้างของอินดิโกคาร์มีน	35
รูปที่ 2.19 กลไกการสลายตัวของอินดิโกคาร์มีน	37
รูปที่ 4.1 ท่อนาโนคาร์บอนที่มีการสร้างหมู่ฟังก์ชันแสดงการยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของน้ำและท่อนาโนคาร์บอนที่มีหมู่คาร์บอกซิลมาเกาะ	44
รูปที่ 4.2 กราฟ FT-IR spectra ของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น	45
รูปที่ 4.3 รูปแบบ XRD ของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น	46
รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM ของท่อนาโนคาร์บอนกำลังขยาย 150 เท่า	47

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM ของท่อนาโนคาร์บอนกำลังขยาย 500 เท่า	48
รูปที่ 4.6 ภาพ SEM ของท่อนาโนคาร์บอน กำลังขยาย 5,000 และ 10,000 เท่า	49
รูปที่ 4.7 กราฟ FT-IR ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมท่อนาโนคาร์บอน	50
รูปที่ 4.8 รูปแบบ XRD ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมท่อนาโนคาร์บอน	51
รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM ของแผ่นยางผสมกำลังขยาย 150 เท่า	53
รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM ของแผ่นยางผสมกำลังขยาย 500 เท่า	55
รูปที่ 4.11 แสดงสเปกตรัมองค์ประกอบธาตุแบบพื้นที่ของแผ่นยางธรรมชาติ	56
รูปที่ 4.12 แสดงสเปกตรัมองค์ประกอบธาตุแบบพื้นที่ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นในปริมาณ 1mg	57
รูปที่ 4.13 แสดงสเปกตรัมองค์ประกอบธาตุแบบพื้นที่ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นในปริมาณ 2 mg	57
รูปที่ 4.14 แสดงสเปกตรัมองค์ประกอบธาตุแบบพื้นที่ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นในปริมาณ 5 mg	58
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีย้อม MB กับ MWCNTs ที่ปริมาณต่างๆ	61
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีย้อม IC กับ MWCNTs ที่ปริมาณต่างๆ	62
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมสีย้อมกับเวลา โดยไม่เปิดไฟ	63
รูปที่ 4.18 ค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูทำการซ้ำจำนวน 5 ครั้ง	64
รูปที่ ข-1 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์	75
รูปที่ ข-2 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมท่อนาโนคาร์บอน 1 มิลลิกรัม	75
รูปที่ ข-3 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมท่อนาโนคาร์บอน 2 มิลลิกรัม	75
รูปที่ ข-4 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมท่อนาโนคาร์บอน 3 มิลลิกรัม	75
รูปที่ ข-5 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมท่อนาโนคาร์บอน 5 มิลลิกรัม	75
รูปที่ ง-1 ค่าการดูดกลืนของสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์	79
รูปที่ ง-2 ค่าการดูดกลืนของสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นยางผสมที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) 1 มิลลิกรัม	80
รูปที่ ง-3 ค่าการดูดกลืนของสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นยางผสมที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) 2 มิลลิกรัม	81

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ ง-4 ค่าการดูดกลืนของสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นยางผสมที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) 3 มิลลิกรัม	82
รูปที่ ง-5 ค่าการดูดกลืนของสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นยางผสมที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) 5 มิลลิกรัม	83
รูปที่ ง-6 ค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมอินดิโกคาร์มีนโดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์	84
รูปที่ ง-7 ค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมอินดิโกคาร์มีนโดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียม-ไดออกไซด์ ที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) 1 มิลลิกรัม	85
รูปที่ ง-8 ค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมอินดิโกคาร์มีนโดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียม-ไดออกไซด์ ที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) 2 มิลลิกรัม	86
รูปที่ ง-9 ค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมอินดิโกคาร์มีนโดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียม-ไดออกไซด์ ที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) 3 มิลลิกรัม	87
รูปที่ ง-10 ค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมอินดิโกคาร์มีนโดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียม-ไดออกไซด์ ที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) 5 มิลลิกรัม	88
รูปที่ ง-11 ค่าการดูดกลืนแสงสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมโดยไม่เปิดไฟ	89
รูปที่ ง-12 ค่าการดูดกลืนแสงสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) 5 มิลลิกรัม ในตู้ฉายรังสีโดยไม่เปิดไฟ	90
รูปที่ ง-13 กราฟการดูดกลืนแสง ซ้ำครั้งที่ 1	91
รูปที่ ง-14 กราฟการดูดกลืนแสง ซ้ำครั้งที่ 2	92
รูปที่ ง-15 กราฟการดูดกลืนแสง ซ้ำครั้งที่ 3	93
รูปที่ ง-16 กราฟการดูดกลืนแสง ซ้ำครั้งที่ 4	94
รูปที่ ง-17 กราฟการดูดกลืนแสง ซ้ำครั้งที่ 5	95
รูปที่ จ-1 สารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู	97
รูปที่ จ-2 สารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มีน	97

คำย่อและสัญลักษณ์

E	คือ พลังงานควอนตัม (Quantum Energy) , จูล
h	คือ ค่าคงที่พลังค์ (Planck's Constant)
V	คือ ความถี่ของแสง, เฮิรตซ์ (Hz) หรือวินาที ⁻¹ (S ⁻¹)
λ	คือ ความยาวคลื่นแสง, นาโนเมตร (nm)
C	คือ ความเร็วของคลื่นแสง
h^+	คือ โฮลที่วาเลนซ์แบนด์ (Valence Band Hole)
e^-	คือ อิเล็กตรอน (Electron)
OH^-	คือ ไฮดรอกซิลไอออน (Hydroxyl Ion)
OH^\bullet	คือ ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl Radical)
H^+	คือ ไฮโดรเจนไอออน (Hydrogen Ion)
H^\bullet	คือ ไฮโดรเจนเรดิคัล (Hydrogen Radical)
O_2	คือ โมเลกุลของออกซิเจนในอากาศ
$O_2^{\bullet-}$	คือ ซุปเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล (Superoxide Ion Radical)
OH_2^\bullet	คือ เปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Perhydroxyl Radical)
H_2O_2	คือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogenperoxide)
$^{\circ}C$	คือ องศาเซลเซียส
UV	คือ ความยาวคลื่นของแสงอัลตราไวโอเล็ต
ml	คือ หน่วยวัดปริมาตรมิลลิลิตร
mg	คือ หน่วยวัดความเข้มข้นมิลลิกรัม

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันอุตสาหกรรมในประเทศไทยมีการเจริญเติบโตอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะโรงงานอุตสาหกรรมผลิตสิ่งทอ อุตสาหกรรมการฟอกหนัง อุตสาหกรรมผลิตกระดาษ หมึกพิมพ์ อุตสาหกรรมเซรามิก และอุตสาหกรรมพลาสติก ซึ่งอุตสาหกรรมเหล่านี้ได้นำสีย้อมมาใช้ในขั้นตอนกระบวนการผลิตที่ปล่อยสีย้อมออกมาในรูปแบบน้ำเสียปนเปื้อนด้วยสารเคมีที่มีพิษ และเป็นอันตรายต่อระบบนิเวศ ทำให้ระบบนิเวศขาดความสมดุล แหล่งน้ำเกิดความเสื่อมโทรมซึ่งไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในน้ำ [1] ดังนั้นจึงได้มีการกำหนดข้อบังคับเกี่ยวกับการปล่อยน้ำเสียซึ่งเป็นที่ยอมรับในหลายๆ ประเทศ เช่น การดูจากปริมาณที่สิ่งมีชีวิตรับได้ สมบัติทางเคมีของน้ำทิ้ง ระดับของสีในน้ำทิ้ง เป็นต้น น้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำต้องมีกระบวนการกำจัดหรือบำบัดน้ำเสียก่อนเพื่อลดปริมาณสารเคมีหรือสีย้อม อาจใช้วิธีการสร้างตะกอนและการรวมตะกอนโดยใช้สารส้มหรือปูนขาวถือเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง แต่พบปัญหาของกากตะกอนที่เกิดขึ้นปริมาณมากซึ่งยุ่งยากในการนำไปใช้ วิธีการออกซิไดซ์ด้วยโอโซนเป็นเทคนิคที่นำมาใช้เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมากจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบในน้ำทิ้งอย่างรวดเร็วแต่จะทำให้เกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่ที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารเริ่มต้นเดิม เห็นได้ว่าวิธีการเหล่านี้แม้จะสามารถใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมได้แต่ก็ยังพบปัญหาอยู่ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นอีกทั้งบางกระบวนการยังไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน [2]

กระบวนการโฟโตคะตะไลติกเป็นปฏิกิริยาการย่อยสลายมลพิษ โดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับพลังงานแสง ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมนำมาใช้เป็นสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ทังสเตนไดรอกไซด์ (WO_3) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) แต่ที่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก คือไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากมีราคาไม่แพง ไม่เป็นพิษ มีความเสถียรสูง ไม่ละลายน้ำ ทนต่อการกัดกร่อน นอกจากนี้ยังมีสมบัติพิเศษด้านการดูดกลืนแสงและการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนได้ดี โดยมีการศึกษาเปรียบเทียบสารกึ่งตัวนำหลายๆ ชนิดที่นำมาใช้ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสพบว่าการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบแขวนลอย (Suspension) สามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว

โดยทั่วไปแล้วการนำไทเทเนียมไดออกไซด์มาใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกส่วนใหญ่มักใช้ในลักษณะเป็นผง (Powder) ซึ่งการใช้งานไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบผงนั้นบ่อยครั้งพบว่าการใช้งานค่อนข้างยุ่งยากอีกทั้งยังก่อให้เกิดปัญหาตามมา ทั้งนี้เนื่องจากไทเทเนียม

ไดออกไซด์ในรูปแบบผงเป็นรูปแบบที่ไม่เหมาะสมกับการใช้งาน เช่น อาจปลิวไปในอากาศได้ง่าย เมื่อโดนลมพัด ส่งผลให้เกิดอันตรายต่อระบบหายใจ อาจปนอยู่ในน้ำในรูปแบบของสารแขวนลอย แล้วไหลไปกับน้ำทำให้เกิดความยุ่งยากต่อการกำจัดและการแยกเอาผงของไทเทเนียมไดออกไซด์ ออกจากระบบ จึงส่งผลเสียต่อระบบนิเวศตลอดจนเกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมอีกทั้งในขั้นตอนการแยกเอาผงไทเทเนียมไดออกไซด์ออกไปจากระบบยังสิ้นเปลืองเวลาและค่าใช้จ่าย ดังนั้นนักวิจัยจึงได้พยายามคิดค้นหาวิธีใหม่ๆ เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้งานไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบผงและทำให้ได้ไทเทเนียมไดออกไซด์อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้กว้างขวางมากขึ้น กระบวนการที่ได้รับความนิยมและเป็นพิเศษคือ กระบวนการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ลงบนซับสเตรท (Substrates) ต่างๆ เช่น กระจก แก้ว อะลูมิเนียม สแตนเลส พลาสติก พอลิเมอร์ เป็นต้น เพื่อให้อยู่ในลักษณะของแผ่นฟิล์มเคลือบติดอยู่บนซับสเตรท เมื่อไม่นานมานี้ชาวาลย์และคณะได้นำน้ำยางธรรมชาติชนิดเข้มข้น (Concentrated Latex) เป็นวัสดุตั้งต้นในการเตรียมแผ่นซับสเตรท เพื่อใช้เป็นตัวยึดหรือตรึงอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ไว้บนแผ่นยางและสามารถนำไปใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกในการกำจัดสีย้อมได้ เนื่องจากยางธรรมชาติมีสมบัติการต้านทานต่อแรงสูง มีความเหนียวและความเครียด ณ จุดขาดสูงมาก มีความต้านทานต่อการสึกหรอและฉีกขาดดีมาก อีกทั้งยางธรรมชาติยังเป็นวัสดุที่หาง่ายและมีราคาถูก [3] อย่างไรก็ตามพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมด้วยแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมตามวิธีการทดลองของชาวาลย์และคณะยังมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมต่ำกว่าแบบผงและใช้เวลาในการกำจัดสีย้อมนาน อีกทั้งยังพบว่าเมื่อใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ซ้ำหลายครั้งแผ่นยางผสมนั้นมีการเสียดสภาพไป ดังนั้นเพื่อเป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพและเสถียรภาพของแผ่นยางผสมตามวิธีการของชาวาลย์และคณะ ในงานวิจัยนี้จึงสนใจเติมสารเติมแต่ง (Additives) ลงไปโดยเฉพาะสารเติมแต่งจำพวกคาร์บอน เช่น ถ่านกัมมันต์ คาร์บอนแบล็ก กราไฟต์ และท่อนาโนคาร์บอน เป็นต้น

ท่อนาโนคาร์บอนมีลักษณะรูปทรงเป็นท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับนาโนเมตร ผนังท่ออาจมีเพียงชั้นเดียว (Single-walled) หรือหลายชั้น (Multi-walled) สมบัติของท่อนาโนคาร์บอน ได้แก่ สามารถนำไฟฟ้าได้ดี มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงในโครงงานพิเศษนี้จึงได้นำท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นใช้เพื่อดูดซับ (Adsorption) ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยพบว่าท่อนาโนคาร์บอนสามารถเป็นตัวดูดซับสารพิษต่างๆ เช่น โลหะหนัก สีย้อมสังเคราะห์ได้เป็นอย่างดี [4]

ในโครงงานพิเศษนี้ผู้วิจัยสนใจศึกษากระบวนการทำงานร่วมกัน (Synergetic Effect) ระหว่างกระบวนการโฟโตคะตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์และการดูดซับของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม อีกทั้งท่อนาโนคาร์บอนยังช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลในเรื่องความแข็งแรง ดังนั้นในงานวิจัยจึงได้เตรียมแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์กับท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นด้วยวิธีการที่ง่ายๆ โดยใช้ยางชั้น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa, P25) และท่อนาโนคาร์บอนเป็นวัสดุตั้งต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาวิธีการปรับสภาพท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น
2. เพื่อศึกษาวิธีการเตรียมแผ่นยางไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น
3. เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพของแผ่นยางไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นด้วยเทคนิคต่างๆ ได้แก่ เทคนิคการวิเคราะห์สสารด้วยอินฟราเรด (FT-IR) เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) การทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDS)
4. เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของแผ่นยางไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น ด้วยเทคนิคการทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile Strength)
5. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของแผ่นยางไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น โดยใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลติกในการกำจัดสีย้อม
6. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานซ้ำของแผ่นยางไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการเตรียมแผ่นยางไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น
2. เตรียมแผ่นยางไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น
3. ศึกษาสมบัติทางกายภาพของแผ่นยางไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นด้วยเทคนิคต่างๆ ได้แก่ เทคนิคการวิเคราะห์สสารด้วยอินฟราเรด (FT-IR) เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) การทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDS)
4. ศึกษาสมบัติเชิงกลของแผ่นยางไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นด้วยเทคนิคการทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile Strength)
5. ศึกษาทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู (Methylene blue) และสีย้อมอินดิโกคาร์มีน (Indigo carmine) และทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานซ้ำของแผ่นยางผสม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รับองค์ความรู้และมีความเข้าใจในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกมากขึ้น
2. สามารถนำแผ่นยางไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นที่เตรียมได้ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกร่วมกับกระบวนการดูดซับในการกำจัดสีย้อมได้
3. ได้วิธีการบำบัดสีย้อมในน้ำที่มีประสิทธิภาพสูง และไม่ก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม
4. สามารถลดทั้งต้นทุนและความยุ่งยากในการเตรียมฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสม สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ นอกเหนือจากการใช้กำจัดสีย้อม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

2.1.1 หลักการพื้นฐานของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส (Fundamental of Photocatalysis-Reaction)

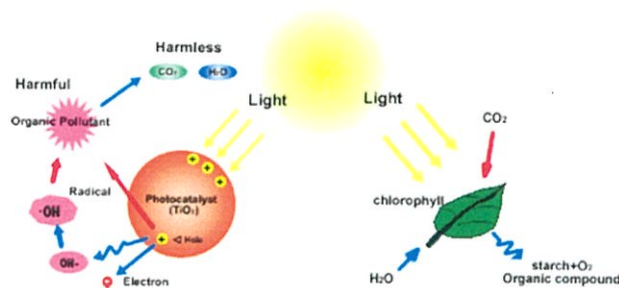
กระบวนการโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic Process) เป็นการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่ง (Catalyst) ซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการกระตุ้นด้วยแสง ตัวเร่งทำหน้าที่ลดพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยา หลักการทำงานของกระบวนการโฟโตคะตะไลติก คือการให้พลังงานแสงเข้าไปในระบบเพื่อเอาชนะค่าแถบช่องว่างพลังงาน (Energy band gap) ซึ่งเป็นค่าความแตกต่างระหว่างพลังงานของแถบนำไฟฟ้า (Conduction band) กับแถบเวเลนซ์ (Valence band) เมื่อพลังงานแสงที่ให้แก่ระบบมากกว่าค่าแถบพลังงานจะมีการสร้างอิเล็กตรอนที่มีประจุ (Electron hole pairs) บนผิวของสารกึ่งตัวนำ สำหรับกระบวนการโฟโตคะตะไลติก แสงที่ให้แก่ระบบเป็นแสงอัลตราไวโอเล็ต [5]

ปฏิกิริยาโฟโตเคมี (Photochemistry) เป็นปฏิกิริยาที่ใช้แสงเป็นตัวกระตุ้น โมเลกุลของสารและถ้ามีการกระตุ้นร่วมกับตัวเร่งแล้ว เรียกปฏิกิริยาดังกล่าวว่าปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis) โดยปกติแล้วปฏิกิริยาดังกล่าวจะต้องประกอบด้วย (แสดงดังรูปที่ 2.1)

- 1) ตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)
- 2) พลังงานแสง ซึ่งมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับพลังงานโฟตอนของตัวเร่ง

การฉายแสงในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก เป็นการให้พลังงานกับระบบในรูปของพลังงานโฟตอน (Photon energy) มากพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาขึ้นได้ ซึ่งพลังงานดังกล่าวนี้เรียกว่า พลังงานกระตุ้น (Activation energy) “โฟตอน” คือ แสงอัลตราไวโอเล็ตที่แผ่พลังงานไม่ต่อเนื่อง เป็นกลุ่มก้อน

- 3) น้ำ
- 4) แก๊สออกซิเจน หรือตัวออกซิไดซ์ (Oxidants) อื่นๆ



รูปที่ 2.1 แสดงปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส และปฏิกิริยาโฟโตเคมี [6]

2.1.2 ชนิดของตัวเร่ง (Type of Catalyst)

สารที่ใช้เป็นตัวเร่ง (Catalyst) ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ได้แก่

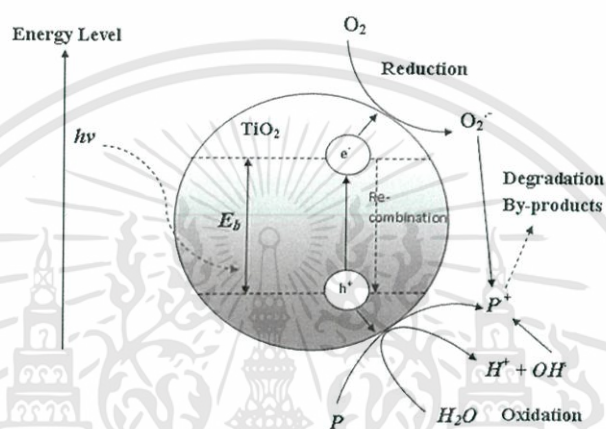
- 1) โลหะตัวนำ (Transition metal) เช่น ทองแดง (Cu) โครเมียม (Cr) นิกเกิล (Ni) เป็นต้น
- 2) สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) สังกะสีออกไซด์ (ZnO) เป็นต้น

องค์ประกอบของโลหะตัวนำและสารกึ่งตัวนำ ประกอบด้วยแถบเวเลนซ์และแถบนำไฟฟ้า ในโลหะตัวนำจะมีแถบเวเลนซ์และแถบนำไฟฟ้าติดกัน ส่วนในสภาวะกึ่งตัวนำแถบเวเลนซ์และแถบนำไฟฟ้าไม่ติดกันโดยเกิดเป็นช่องว่างเรียกว่าแถบพลังงาน (Band gap) กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส เมื่ออิเล็กตรอน (Electron, e^-) ที่อยู่ในแถบเวเลนซ์ได้รับพลังงานโฟตอนจากแสง ($h\nu$) อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังแถบนำไฟฟ้า ในขณะที่บริเวณแถบเวเลนซ์จะเกิดโฮล (Hole, h^+) ซึ่งเป็นประจุบวกสามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระในแถบเวเลนซ์ ส่วนแถบนำไฟฟ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่มาจากแถบเวเลนซ์จะเคลื่อนที่ได้เป็นอย่างดีเป็นอิสระทั่วแถบนำไฟฟ้าได้เช่นกัน ปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล (Electron-hole pairs, e^-/h^+) สามารถเคลื่อนที่ไปมาระหว่างแถบเวเลนซ์และแถบนำไฟฟ้าได้ง่ายและรวดเร็วเพราะว่าไม่มีแถบช่องว่างพลังงาน เหตุนี้จึงเป็นสาเหตุให้อิเล็กตรอน-โฮลรวมตัวกันใหม่ได้ง่ายสำหรับโลหะตัวนำ ในทางตรงกันข้ามนั้นการรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอน-โฮล ในสารกึ่งตัวนำเกิดได้ยากเพราะว่ามีแถบช่องว่างพลังงานคั่นอยู่ทำให้อิเล็กตรอน-โฮลแยกจากกันได้นาน ข้อแตกต่างของแถบพลังงานระหว่างโลหะตัวนำ สารกึ่งตัวนำ และฉนวนแยกได้ยากโดยขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายปัจจัย ได้แก่ ระดับช่องว่างแถบพลังงาน ระดับพลังงานแถบนำไฟฟ้า และระดับพลังงานแถบเวเลนซ์ [7]

ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในน้ำประกอบด้วยแสงที่ส่องผ่านน้ำไปยังตัวเร่งซึ่งมีพลังงานโฟตอนที่สูงกว่าพลังงานแถบช่องว่างของตัวเร่ง อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นจากแถบเวเลนซ์ให้เคลื่อนที่ไปยังแถบนำไฟฟ้าผลคือทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลซึ่งจะวิ่งกระจายอยู่ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ

ปฏิกิริยาบนผิวแถบนำไฟฟ้าและปฏิกิริยาในสารละลายเกิดขึ้นดังนี้ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากแถบนำไฟฟ้าไปยังตัวรับอิเล็กตรอน (Electron acceptor) ในสารละลาย เกิดปฏิกิริยารีดักชัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Reduction) ส่วนอีกด้านหนึ่ง คือแถบเวเลนซ์โฮลจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) โดยตัวสารละลายทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน (Electron doner) ในสภาวะปกติความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของอิเล็กตรอนที่แถบนำไฟฟ้าไม่มีศักยภาพพอที่จะบำบัดสารอินทรีย์ได้ แต่เนื่องจากระบบบำบัดมีออกซิเจน(O_2)ละลายน้ำอยู่ออกซิเจนจะเป็นตัวรับอิเล็กตรอนเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้เป็น Superoxide radical ($O_2^{\cdot-}$) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมากสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ ได้ แต่ในทางตรงกันข้ามโฮลที่แถบเวเลนซ์เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมากเช่นกัน (แสดงดังรูปที่ 2.2)



รูปที่ 2.2 พังแถบพลังงานของอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ พร้อมความสามารถของการรีดักซ์

2.1.3 แหล่งกำเนิดพลังงานแสง (UV Light Sources)

รังสีหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแต่ละชนิดมีความยาวคลื่นหรือความถี่คลื่นแตกต่างกัน รังสีที่ประสาทตาสามารถรับรู้ได้ซึ่งเรียกว่า แสง นั้นมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 4×10^{-7} ถึง 7×10^{-7} เมตร ส่วนรังสีที่มีความยาวคลื่นยาวกว่าหรือสั้นกว่าแสงประสาทจะไม่สามารถรับรู้ได้เรียกว่า รังสีที่มองไม่เห็น เมื่อจัดเรียงลำดับตามความยาวคลื่นและความถี่ของคลื่นเหล่านี้จะได้สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Spectrum) โดยรังสีที่มีความถี่สูงจะมีพลังงานสูงกว่ารังสีที่มีความถี่ต่ำ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านิคมต่างๆ ในสเปกตรัม แม้มีแหล่งกำเนิดและการตรวจจับได้ที่แตกต่างกัน แต่ก็มีสมบัติที่สำคัญเหมือนกันคือ เคลื่อนที่ไปได้ด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วแสง (2.99×10^8 เมตรต่อวินาที) และมีพลังงานส่งผ่านไปในรูปแบบของคลื่น โดยพลังงานแสงที่เลือกนำมาใช้ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและช่วงวิสิเบิล

รังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 100-400 นาโนเมตรมีสมบัติไม่แตกตัว (Non-ionizing) รังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นเส้นแบ่งของรังสีชนิดแตกตัวได้และแตกตัวไม่ได้ สามารถแบ่งได้เป็น ยูวีเอ (UV-A) หรือรังสีอัลตราไวโอเล็ตคลื่นยาว (Low wave UVR หรือ Near UVR หรือ Black Light) ยูวีบี (UV-B) หรือรังสีอัลตราไวโอเล็ตคลื่นกลาง (Middle wave UVR หรือ Sunburn Radiation) และยูวีซี (UV-C) หรือรังสีอัลตราไวโอเล็ตคลื่นสั้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Short wave UVR หรือ Germicidal Radiation) ความยาวคลื่นของรังสีในช่วงต่างๆ (แสดงดังตารางที่ 2.1)

ตารางที่ 2.1 ความยาวคลื่นในช่วงต่างๆ

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

การฉายแสงในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก เป็นการให้พลังงานกับระบบในรูปของพลังงานโฟตอน (Photon energy) ที่มากพอจะทำให้เกิดปฏิกิริยาขึ้นได้ สามารถคำนวณได้ด้วยดังสมการ

$$E = hv = \frac{hc}{\lambda}$$

เมื่อ	E	คือ ค่าพลังงาน โฟตอน (จูล)
	h	คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (4.135×10^{-15} อิเล็กตรอน โวลต์ต่อวินาที)
	v	คือ ค่าความถี่ (ต่อวินาที)
	c	คือ ค่าความเร็วแสง (2.99×10^8 เมตรต่อวินาที)
	λ	คือ ค่าความยาวคลื่น (นาโนเมตร)

แหล่งกำเนิดที่สำคัญของรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้แก่ การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ (Solar Radiation) และแหล่งกำเนิดที่มนุษย์สร้างขึ้น (Artificial Source)

- 1) การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ เนื่องจากดวงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดที่สำคัญในการปล่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รังสีออกมาหลายความยาวคลื่น โดยรังสีอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลที่เดินทางมายังโลกจะถูกดูดซึมไว้โดยชั้นบรรยากาศ ทำให้ความเข้มของรังสีลดลงอย่างรวดเร็วเพราะถูกโอโซนที่ชั้นสตราโตสเฟียร์ดูดซึมไว้ก่อนมาถึงพื้นโลก

2) แหล่งกำเนิดที่มนุษย์สร้างขึ้น วัสดุทุกชนิดที่ถูกทำให้ร้อนจนมีอุณหภูมิสูงกว่า 2,500 เคลวิน จะสามารถปล่อยรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ วัตถุประสงค์หลักที่มนุษย์นำรังสีนี้มาใช้ก็เพื่อประโยชน์ต่อสิ่งมีชีวิต สามารถทำได้จากอุปกรณ์สร้างประกายไฟฟ้า (Gas discharge arcs) หรือหลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent lamp) หรือแหล่งกำเนิดของแสงที่สามารถปล่อยความยาวคลื่นช่วงที่ต่ำกว่า 260 นาโนเมตรได้ และสามารถทำให้เกิดโอโซนที่ใช้ประโยชน์ในการฆ่าเชื้อโรค [8]

2.2 ชนิดของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส (Type of Photocatalysis)

ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีออกซิเดชันขั้นสูงมีหลักการเบื้องต้นคือเมื่อมีการกระตุ้นปฏิกิริยาโดยการฉายแสงไปที่ตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปของสารจากที่มีความเป็นพิษให้เกิดเป็นสารใหม่ที่มีความเป็นพิษน้อยลงหรือไม่มีความเป็นพิษเลย โดยสามารถนำหลักการนี้มาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์เกี่ยวกับงานด้านการบำบัด หรือทำให้น้ำและอากาศบริสุทธิ์สามารถจำแนกตามสถานะของสารที่ทำปฏิกิริยาร่วมกันได้ 2 ประเภท ดังนี้ [9]

1) ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสแบบสถานะเดียว (Homogeneous Photocatalysis) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา มีสถานะเดียวกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด (โดยทั่วไปแล้วจะเป็นของเหลว) เช่น การย่อยสลาย 2,4 Dinitrofluorene โดยใช้ UV/H₂O₂

2) ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสแบบสถานะต่าง (Heterogeneous Photocatalysis) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา มีสถานะต่างกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด เช่น การย่อยสลาย 2-Chlorophenol โดยใช้ UV/TiO₂

โดยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกประกอบด้วย 2 ขั้นตอนคือ การดูดติดผิว (Adsorption) และการฉายแสง (Irradiation Process)

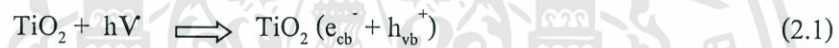
1) การดูดติดผิว คือการที่โมเลกุลหรือคอลลอยด์ซึ่งเรียกว่า ตัวถูกดูดซับที่อยู่ในรูปของเหลวหรือก๊าซจะถูกดึงให้มาเกาะจับหรือติดบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายจากของเหลวหรือก๊าซมายังพื้นที่ผิวของของแข็งเรียกว่าตัวดูดซับ การเกาะจับของโมเลกุลบนสารอาจเกิดขึ้นด้วยแรงทางกายภาพและแรงทางเคมีหรือทั้งสองแรงรวมกัน ซึ่งในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกการดูดซับจะเกิดจากแรงทางเคมีเป็นหลัก

2) การฉายแสง คือกระบวนการที่อนุภาคของสารกึ่งตัวนำได้รับพลังงานจากแสงซึ่งต้องมีพลังงานสูงกว่าหรือเท่ากับช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำนั้นๆ ซึ่งจะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่

ในแถบเวเลนซ์ถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่ไปยังแถบนำไฟฟ้า ทำให้เกิดสภาวะขาดแคลนอิเล็กตรอนที่แถบเวเลนซ์หรือช่องว่างอิเล็กตรอนเรียกว่าโฮล ส่วนอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นไปยังแถบนำไฟฟ้า ทำให้เกิดอิเล็กตรอนและโฮลวิ่งกระจายอยู่ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ โฮลที่เกิดขึ้นในแถบเวเลนซ์จะเป็นตัวออกซิไดส์หรือตัวรับอิเล็กตรอนที่ดี (Strong oxidant) และอิเล็กตรอนในแถบนำไฟฟ้าจะเป็นตัวรีดิวซ์หรือตัวให้อิเล็กตรอนที่ดี

2.3 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส (Mechanism of Photocatalysis)

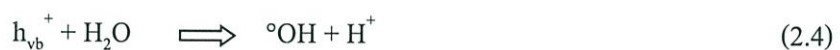
พื้นฐานของกระบวนการโฟโตคะตะไลติกประกอบด้วย การปล่อยอิเล็กตรอนจากแถบเวเลนซ์ไปยังแถบนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ และการสร้างโฮลในแถบเวเลนซ์เพราะรังสีอัลตราไวโอเลตมีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับแถบช่องว่างพลังงาน กระบวนการนี้จึงสามารถใช้ทำลายมลสารได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับปรากฏการณ์ของกระบวนการที่ส่องแสงลงบนสารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิดค่าอิเล็กตรอนและโฮล (e^-h^+) โดยประจุที่เกิดขึ้นนี้มีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันในสารละลายเหมาะสมของปฏิกิริยารีดอกซ์ [10]

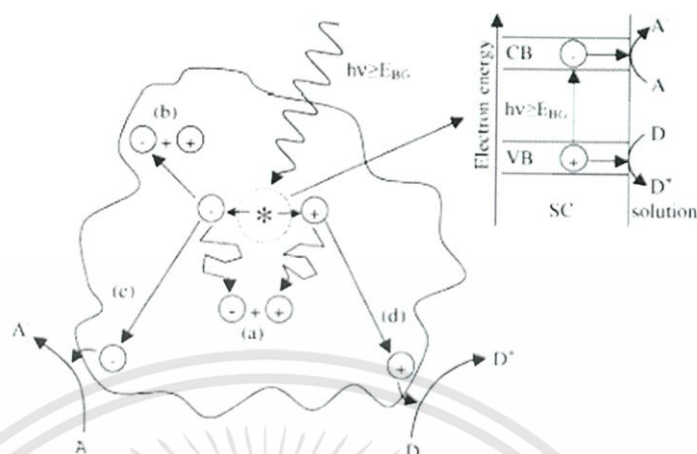


อิเล็กตรอน(e_{cb}^-) สามารถลดรูปอะตอมที่ผิวของไทเทเนียมดังแสดงในสมการที่ (2.2) และยังสามารถลดรูปออกซิเจนที่สัมผัส หรืออิเล็กตรอนทั่วไปที่อยู่รอบๆ ไทเทเนียม (Electron scavenger) ในกรณีเบื้องต้นอะตอมของไทเทเนียมสามารถถูกออกซิไดส์กลับคืนได้ด้วยโฮล (h_{vb}^+) ดังแสดงในสมการ (2.3) ซึ่งเสมือนการรวมตัวกลับเป็นรูปเดิม



สมการต่อไปนี้เป็นสมการที่แสดงถึงการเกิดของอนุมูลอิสระ ($^{\circ}\text{OH}$) ที่มีผลต่อปฏิกิริยาบนพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ และ/หรือ เข้าทำปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตรงต่อมลพิษ(R) ดังแสดงในสมการที่ (2.4) ถึง (2.6)



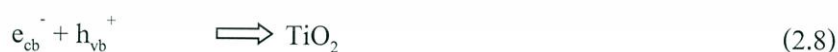


รูปที่ 2.3 กระบวนการที่เกิดขึ้นที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ (SC) ดูดซับโฟตอนจากแสง UV ที่มีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับ แถบพลังงาน ($h\nu \geq E_g$) ทำให้เกิดโฮลในแถบเวเลนซ์ (VB) และอิเล็กตรอนในแถบตัวนำ (CB) ทำให้เป็นคู่อิเล็กตรอน-โฮล (e^-h^+) สามารถกระจายไปบริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำ (a) เป็นการรวมตัวกันของคู่อิเล็กตรอน-โฮล (b) กระบวนการรวมตัวที่บริเวณผิว (c) ตัวรับอิเล็กตรอน A ที่มาดูดซับบนผิวในปฏิกิริยารีดักชัน (d) ตัวให้อิเล็กตรอน D ที่มาเกาะติดผิวในปฏิกิริยาออกซิเดชัน ที่บริเวณโฮล

อิเล็กตรอนถูกปล่อยออกมาทำปฏิกิริยากับตัวรวมอิเล็กตรอน เช่น ออกซิเจนดูดซับ หรือถูกละลายในน้ำ อนุมูลอิสระ $^{\circ}\text{OH}$ อาจจะเปลี่ยนรูปไปเป็น H_2O_2 จากไอออนของอนุมูลอิสระออกซิเจน ($\text{O}_2^{\cdot-}$) โดยที่ออกซิเจนเป็นตัวที่เข้าแย่งรับอิเล็กตรอนจากอนุภาคสารกึ่งตัวนำ ดังสมการที่ (2.7)



ดังนั้น อิเล็กตรอนและโฮลจะมารวมตัวกันโดยปราศจากผู้ให้หรือผู้รับอิเล็กตรอน ดังแสดงในสมการ (2.8) และปรากฏการณ์แสดงดังรูปที่ 2.3



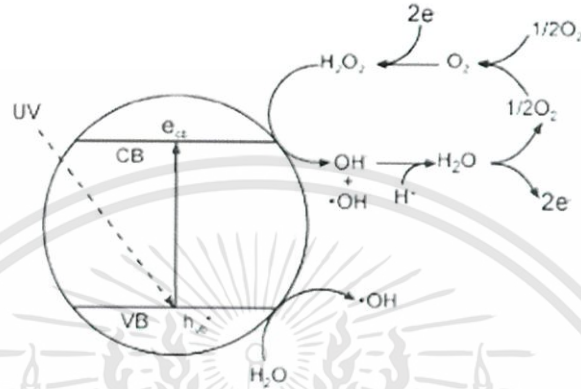
H_2O_2 สามารถเกิดได้จากการทำปฏิกิริยาของ $\text{O}_2^{\cdot-}$ ดังสมการ (2.9)-(2.12)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การยึดเกาะของ H_2O_2 เพื่อเข้าทำปฏิกิริยาทำให้ได้อนุมูลอิสระ $^{\circ}\text{OH}$ และมีการหมุนเวียนในการเข้าทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาดังที่แสดงในรูปที่ 2.4 และสมการที่ (2.13)-(2.15)



รูปที่ 2.4 พังแสดงการเกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลจากกระบวนการโฟโตคะตะไลติกใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ช่วยทางเคมีอิเล็กตรอน



ข้อดีของกระบวนการเฮเทอโรจีเนียสโฟโตคะตะไลซิส

- ใช้อุณหภูมิต่ำ
- ใช้เวลาน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่น
- เมื่อเปรียบเทียบในช่วงเวลาสั้นๆ วิธีนี้ทำให้เกิดการสลายตัวสูง
- สามารถที่จะทำเป็นกระบวนการต่อเนื่องได้
- สามารถใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ได้

(Wang et al, 1998)

2.4 สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)

ประเภทของ สารกึ่งตัวนำแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

- 1) สารกึ่งตัวนำที่มีความบริสุทธิ์ (Intrinsic semiconductor)
- 2) สารกึ่งตัวนำที่ไม่มีความบริสุทธิ์ (Extrinsic semiconductor)

2.4.1) สารกึ่งตัวนำที่มีความบริสุทธิ์

เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีความบริสุทธิ์ ได้แก่ ธาตุบริสุทธิ์ในหมู่ 4A คือ ซิลิกอน(Si) เจอมาเนียม (Ge) มีโครงสร้างผลึกแบบDiamond Cubic มีพันธะโควาเลนต์ ในสภาวะปกติพันธะโควาเลนต์มีความแข็งแรงทำให้ไม่สามารถนำไฟฟ้าได้ แต่ถ้าหากได้รับพลังงานกระตุ้นที่สูงพอจนทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาและเคลื่อนที่ได้จึงสามารถนำไฟฟ้าได้ทำหน้าที่เป็นประจุลบและบริเวณที่อิเล็กตรอนหลุดออกมาจะเกิดเป็น โฮลที่ทำหน้าที่เป็นประจุบวก

2.4.2) สารกึ่งตัวนำที่ไม่มีความบริสุทธิ์

เป็นสารกึ่งตัวนำที่เป็นสารละลายของแข็งแบบเจือจางมีตัวถูกละลายซึ่งมีค่า Valence electron แตกต่างจากตัวทำละลาย การทำให้สารบริสุทธิ์เป็นสารละลายของแข็งโดยการ “Doping” ที่อุณหภูมิต่ำสารกึ่งตัวนำที่ไม่มีความบริสุทธิ์จะมีค่านำไฟฟ้ามากกว่าสารกึ่งตัวนำที่มีความบริสุทธิ์

สมบัติทาง ไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์สามารถเปลี่ยนแปลงได้ด้วยการเจือสารที่ไม่บริสุทธิ์ลงไป ซึ่งเราเรียกว่าการเจือ การเจือสารเจือปนเพียงเล็กน้อยจะเปลี่ยนแปลง โครงสร้างของแถบพลังงานเป็นอย่างมาก [11]

โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ สารกึ่งตัวนำชนิด N และสารกึ่งตัวนำชนิด P



รูปที่ 2.5 แสดงการเจือธาตุอื่นลงไปในสารกึ่งตัวนำ ชนิด N และ P

1) สารกึ่งตัวนำชนิด N (N-type Semiconductor)

สารกึ่งตัวนำชนิด N ได้จากการเจือสารที่เป็นธาตุหมู่ 5 ซึ่งมีเวเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัว ได้แก่ แอนติโมนี (Sb) อาร์เซนิก (As) ฟอสฟอรัส (P) เป็นต้น ลงใน Ge หรือ Si บริสุทธิ์

2) สารกึ่งตัวนำชนิด P (P-type Semiconductor)

ส่วนสารกึ่งตัวนำชนิด P ได้จากการเจือสารที่เป็นธาตุหมู่ 3 ซึ่งมีเวเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัว ได้แก่ โบรอน (B) แกลเลียม (Ga) อินเดียม (In) เป็นต้น ลงใน Ge หรือ Si บริสุทธิ์

สารกึ่งตัวนำมีมากมายหลายชนิด หนึ่งในจำนวนสารกึ่งตัวนำหลายๆชนิดที่นิยมใช้กันในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสคือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีราคาไม่แพง ไม่มีความเป็นพิษ มีความเสถียรสูง นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเปรียบเทียบสารกึ่งตัวนำหลายๆชนิดที่นำมาใช้ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส พบว่าการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบแขวนลอยสามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ

2.5 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide)

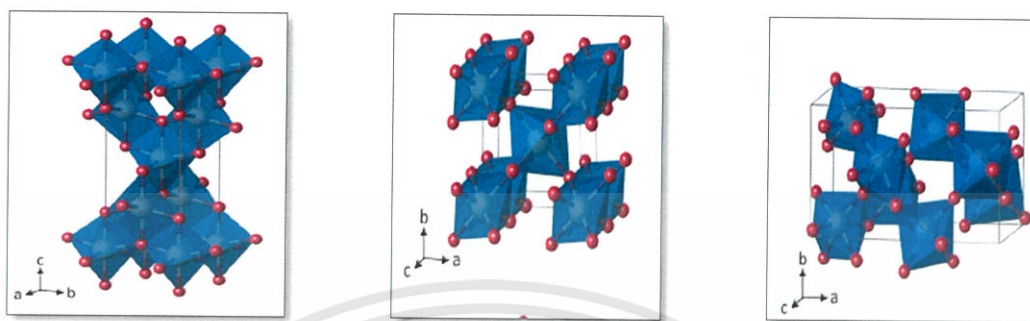
ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียมซึ่งอยู่ในกลุ่มโลหะทรานซิชันแถวแรกของตารางธาตุ ไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในการนำมาประยุกต์สำหรับการใช้งานด้านต่างๆ เนื่องจากมีความเสถียรต่อสารเคมี ทนต่อการกัดกร่อนสูง ไม่เป็นสารไวไฟ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานรูปอื่น เช่น เปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) และเปลี่ยนเป็นพลังงานเคมีในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม (Photocatalytic)

นอกจากไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีประสิทธิภาพสูง ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วมแล้วยังสามารถนำไปใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบปกติ (ไม่ใช่แสงร่วม) ได้ดีอีกด้วย โดยสามารถใช้เป็นทั้งตัวเพิ่มความสามารถในการทำปฏิกิริยา (Promoter) และตัวรับรอง (Support)

2.5.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมไดออกไซด์มีลักษณะเป็นผงสีขาว มวลโมเลกุล 79.9 กรัมต่อโมล โดยไทเทเนียมไดออกไซด์มีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ คือ บรูคไคต์ รูไทล์ และอะนาเทส แสดงดังรูปที่ 2.6 โดยโครงสร้างผลึกที่นิยมนำมาใช้สำหรับบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียด้วยวิธีการกระตุ้นด้วยแสง คือ โครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ และแบบอะนาเทส มีการจัดเรียงอะตอมไทเทเนียมเป็นแบบเตตระโกนอล (Tetragonal) และอะตอมออกซิเจนเข้าไปเติมเต็มในช่องว่างแบบออกตะฮีดรอล (Octahedron) ที่มุมระหว่างแกนของออกตะฮีดรอล ในแบบรูไทล์มีค่าเท่ากับ 90 และ 81.21 องศา ในขณะที่แบบอะนาเทส มีมุมระหว่างแกนเท่ากับ 78.12 และ 92.43 องศา โดยโครงสร้างทั้งสองนี้มีความแตกต่างกันทั้งด้านการหักเหของแสง ความหนาแน่น และการทำปฏิกิริยาของแสงซึ่งไทเทเนียมไดออกไซด์และประจุบวกของออกซิเจนอยู่ในโครงสร้างตาข่ายที่มากมายหลายรูปแบบ รูไทล์มีรูปผลึกที่แน่นอน สามารถดูดกลืนแสงยูวีได้น้อยกว่าแบบอะนาเทส สำหรับการนำ

ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบรูไทล์ไปใช้กับแสงที่มีความเข้มสูง พบว่าดัชนีการหักเหสูงมีผลกระทบต่อตัวกลางสารอินทรีย์มากกว่าแบบอะนาเทสประมาณร้อยละ 20 [12]



(ก) อะนาเทส

(ข) รูไทล์

(ค) บรูคไคต์

รูปที่ 2.6 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ (ก) อะนาเทส (ข) รูไทล์ (ค) บรูคไคต์

ตาราง 2.2 สมบัติทางกายภาพที่สำคัญของไทเทเนียมไดออกไซด์ [13]

สมบัติที่ศึกษา	รูไทล์	อะนาเทส	บรูคไคต์
โครงสร้างผลึก	เตตระโกนอล	เตตระโกนอล	ออร์โธโรมบิก
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	1,858 °C	สามารถเปลี่ยนเป็นรูไทล์เมื่ออุณหภูมิสูง	-
ช่องว่างแถบพลังงาน	3.02 eV	3.22 eV	-

จากการที่ไทเทเนียมไดออกไซด์มีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันนั้น ส่งผลให้มีสมบัติที่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาทางด้านเทอร์โมไดนามิกส์พบว่าพลังงานเสรีของกิบส์ (Gibbs free energy) ของการเกิดที่สภาวะมาตรฐาน สำหรับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบอะนาเทสมีค่า -884.5 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งมากกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างแบบรูไทล์ที่มีค่า -889.5 กิโลจูลต่อโมล อีกทั้งความหนาแน่นของโครงสร้างแบบอะนาเทสมีค่าเท่ากับ 3.894 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ในขณะที่โครงสร้างแบบรูไทล์มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 4.250 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

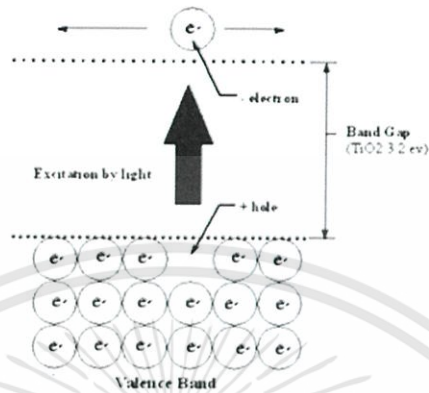
สมบัติที่แตกต่างกันดังกล่าวจึงทำให้โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมแบบอะนาเทสนั้นมีแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 3.22 โวลต์ ซึ่งมากกว่าโครงสร้างผลึกของรูไทล์มีค่าเท่ากับ 3.02 โวลต์ จึงทำให้โครงสร้างผลึกแบบอะนาเทสมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสสูง โครงสร้างผลึกแบบรูไทล์เพราะอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นของผลึกรูไทล์ โครงสร้างผลึกแบบรูไทล์จะเกิดการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮลได้ง่ายกว่ากรณีของอะนาเทส จึงทำให้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ และมีประสิทธิภาพต่ำ นอกจากนี้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อยู่ในรูปอะนาเทสยังมีความเป็นผลึกสูงและพื้นที่ผิวมากที่สุด เมื่อเทียบกับเฟสอื่นๆ ซึ่งสมบัติเหล่านี้ส่งผลต่อการเป็นโฟโตคะตะไลสต์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ อัตราส่วนพื้นที่ผิวสำหรับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลจะเกิดปฏิกิริยาได้ดีมากขึ้น เมื่อใช้วัสดุที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำเป็นคู่กันระหว่างอะนาเทสและรูไทล์

ถึงแม้ว่าโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์มีอยู่หลายชนิด ตามที่ได้กล่าวมาแล้วแต่อะนาเทสและรูไทล์เป็นโครงสร้างผลึกที่พบเป็นส่วนใหญ่โดยปกติแล้วโครงสร้างผลึกอะนาเทสสามารถเปลี่ยนโครงสร้างเป็นผลึกรูไทล์ได้ที่อุณหภูมิมากกว่า 600 องศาเซลเซียส นับจนถึงปัจจุบันได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกของอะนาเทสเป็นรูไทล์เป็นอย่างมาก เนื่องจากโครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวแปรที่สำคัญมากตัวแปรหนึ่งที่จะกำหนดประสิทธิภาพในการประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ นอกจากอุณหภูมิแล้วยังมีอีกหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกดังกล่าว ได้แก่ ความดัน ปริมาณผลึก ความไม่สมบูรณ์ของผลึก และขนาดของผลึก แต่อย่างไรก็ตามพบว่าโครงสร้างผลึกผสมระหว่างอะนาเทสและรูไทล์ (เช่น อะนาเทส 70-75% และรูไทล์ 30-25%) มีรายงานว่าให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกอะนาเทส โดยตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาของแต่ละโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ ได้แก่ พื้นที่ผิว การกระจายตัวของรูพรุน ขนาดของอนุภาคผลึก และที่สำคัญมากคือวิธีการที่ใช้ในการสังเคราะห์ผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์

2.5.2 ลักษณะของสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์สำหรับปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม

เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีตำแหน่งที่ว่างของออกซิเจนในโครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์จึงจัดได้ว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วมที่เป็นสารกึ่งตัวนำนั้นจะมีความสามารถในการดูดซับสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยา 2 ชนิดไปพร้อมๆ กัน ซึ่งสามารถก่อให้เกิดทั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน โดยการกระตุ้นด้วยการดูดกลืนโฟตอนที่มิพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับค่าแถบช่องว่างพลังงานความสามารถของสารกึ่งตัวนำที่จะถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปยังสารตั้งต้น ในการเกิดปฏิกิริยาที่ถูกดูดซับไว้นั้น ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของแถบช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำและตำแหน่งของศักย์พลังงานในการเกิดรีดอกซ์ของสารที่ถูกดูดซับ โดยปกติแล้วระดับพลังงานที่ต่ำที่สุดของแถบนำไฟฟ้า จะเป็นระดับของศักย์พลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยา

รีดักชันด้วยอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น ในทางกลับกันระดับพลังงานที่สูงสุดของแถบเวเลนซ์จะเป็นระดับศักย์พลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยโฮลที่เหลืออยู่หลังจากอิเล็กตรอนถูกกระตุ้นไปแล้ว (แสดงดังรูปที่ 2.7)



รูปที่ 2.7 กระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยแสง

สารกึ่งตัวนำแตกต่างจากโลหะ คือมีความไม่ต่อเนื่องของระดับพลังงาน ทำให้เกิดเป็นช่องว่างของระดับพลังงานซึ่งส่งผลให้เกิดการแยกกันของอิเล็กตรอนและโฮล หลังจากที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงทำให้ทั้งอิเล็กตรอนและโฮลมีระยะเวลาเพียงพอในการเคลื่อนที่ผ่านไปยังพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและก่อให้เกิดปฏิกิริยาในที่สุด ความแตกต่างของโครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดอะนาทาสและรูไทล์ทำให้เกิดความแตกต่างของความหนาแน่นและโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ ส่งผลให้มีค่าแถบช่องว่างพลังงานแตกต่างกันคือ 3.22 eV สำหรับโครงสร้างผลึกอะนาทาส และ 3.02 eV สำหรับโครงสร้างผลึกรูไทล์ ดังนั้นจึงทำให้ความสามารถในการดูดกลืนแสงเริ่มเกิดขึ้นในช่วงความยาวคลื่นของแสงที่แตกต่างกัน โดยโครงสร้างผลึกอะนาทาสสามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 384 นาโนเมตร ในขณะที่โครงสร้างผลึกรูไทล์สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 410 นาโนเมตร ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม

2.6 ประโยชน์ของไทเทเนียมไดออกไซด์

1. ความสามารถในการต้านแบคทีเรีย

ไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่เพียงแต่ฆ่าแบคทีเรียได้เท่านั้นแต่ยังช่วยในการย่อยสลายซากจึงไม่เกิดสารพิษจากซากของมันด้วย มีประสิทธิภาพสูงกว่าสารต้านแบคทีเรียชนิดอื่นๆ ที่จะทำงานเมื่อมีเซลล์แบคทีเรียสัมผัสกับพื้นผิว และที่สำคัญไทเทเนียมไดออกไซด์จะไม่เกิดการเสื่อมประสิทธิภาพหลังจากที่ทำลายเชื้อแบคทีเรียทำให้คงประสิทธิภาพการใช้งานที่ยาวนาน ไทเทเนียม

ไดออกไซด์มีประสิทธิภาพด้านยับยั้งหรือต่อต้านการติดเชื้อมากกว่าคลอรีน 3 เท่า และมากกว่า โอโซน 1.5 เท่า

2. ความสามารถด้านการกำจัดกลิ่น

สมบัติของการเร่งปฏิกิริยาคำยแสง โดยการทำลายพันธะระหว่างโมเลกุลของสารให้แตก ออกเป็นโมเลกุลเดี่ยว สามารถกำจัดโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ระเหยอยู่ในอากาศ (Volatile organic compounds หรือ VOCs) อันเป็นสาเหตุของกลิ่นไม่พึงประสงค์ เช่น กลิ่นนุหรี ยูรีน กลิ่นอุจจาระ น้ำมันเชื้อเพลิง กวาน์ เกสรดอกไม้ และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอีกหลายชนิดในอากาศ ฯลฯ การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์จึงเป็นการแก้ปัญหาที่ต้นเหตุ

3. ความสามารถในการฟอกอากาศ

ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกเร่งด้วยปฏิกิริยาแสงสามารถกำจัดสารที่ก่อให้เกิดมลภาวะทาง อากาศได้ เช่น สารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ควินนุหรี สารระเหยต่างๆ ที่ ออกมาจากอาคาร รวมถึงช่วยกำจัดสารประเภทที่ทำลายชั้นบรรยากาศ เช่น ก๊าซคลอโรฟลูออโร คาร์บอน (CFC) และก๊าซเรือนกระจกประเภทอื่นทั้งทางตรงและทางอ้อม เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วย แสงแม้ในบริเวณที่มีมลภาวะสูง ไทเทเนียมไดออกไซด์จะช่วยลดสารก่อมลภาวะเหล่านี้ได้

4. ความสามารถในการป้องกันการเกิดคราบ และคุณสมบัติการทำความสะอาดตัวเอง

สมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ ในการทำความสะอาดตัวเองเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง เมื่อ ผนังด้านนอกของอาคารที่มักต้องเจอกับคราบเขม่าจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่มีส่วนประกอบ เป็นน้ำมัน ได้รับการปกป้องด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ ไทเทเนียมไดออกไซด์จะทำลาย สารประกอบไฮโดรคาร์บอนรวมทั้งฝุ่นผงต่างๆ ที่เกาะติดอยู่กับผนังจึงถูกชะล้างอย่างง่ายดายได้ เมื่อฝนตกลงมาทำให้ผนังตึกสะอาดและใหม่อยู่เสมอ

5. ความสามารถในการทำน้ำสะอาด

สามารถกำจัดสารอินทรีย์ที่ก่อมลภาวะให้กลายเป็นสารที่ไม่เป็นอันตรายได้ เช่น ทำให้ กลายเป็นก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์และน้ำ โดยไทเทเนียมไดออกไซด์จะนำไปใช้ในขั้นตอนที่สอง ของการบำบัดน้ำเสีย โครงการต้นแบบในการบำบัดน้ำเสียแสดงให้เห็นว่ากระบวนการเร่งปฏิกิริยา ด้วยแสงนั้นมีประสิทธิภาพสูงในการฆ่าแบคทีเรีย *Escherichia coli* ซึ่งเป็นแบคทีเรียในอุจจาระที่ ปนเปื้อนในน้ำได้เป็นอย่างดี [14]

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบผลการกำจัดมลพิษกับวิธีต่างๆ

	Electrostatic	Ozone	UV	Ionizer	TiO ₂ 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 Dendres	Good	Good	Good	Good	Excellent

โดยทั่วไปแล้วการนำไทเทเนียมไดออกไซด์มาใช้ในกระบวนการเซเทอโรจีเนซิสโฟโตคะตะไลซิสส่วนใหญ่มักมาใช้ในการลักษณะเป็นผง (Powder) ซึ่งการนำไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบผงมาใช้งานนั้นบ่อยครั้งจะพบว่าการนำมาใช้งานค่อนข้างยุ่งยาก อีกทั้งยังก่อให้เกิดปัญหาตามมา

ดังนั้นในโครงการพิเศษนี้จึงได้ศึกษาหาวัสดุที่นำมาใช้เป็นชั้นสเตรทที่มีสมบัติดีกว่าการใช้ไทเทเนียมแบบผง ผู้วิจัยสนใจในการนำน้ำยางธรรมชาติชนิดเข้มข้นเป็นวัสดุตั้งต้นในการเตรียมแผ่นชั้นสเตรทเพื่อใช้เป็นตัวยึดหรือตรึงอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ไว้บนแผ่นยาง เนื่องจากยางธรรมชาติมีคุณสมบัติการต้านทานต่อแรงสูง มีความเค้นและความเครียด ณ จุดขาดสูงมาก มีความต้านทานต่อการสึกหรอและฉีกขาดดีมาก อีกทั้งยางธรรมชาติยังเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายและมีราคาถูก

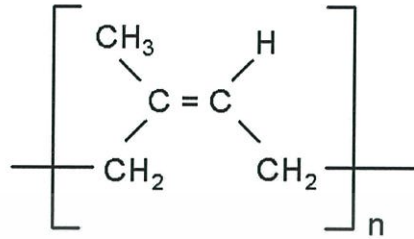
2.7 น้ำยางธรรมชาติ

ยาง (Rubbers) หรืออีลาสโตเมอร์ (Elastomer) คือวัสดุพอลิเมอร์ (Polymer) ประเภทหนึ่ง ส่วนใหญ่โครงสร้างโมเลกุลของยางมีองค์ประกอบหลักเป็นสายโซ่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) กล่าวคือ มีองค์ประกอบหลักเป็นโมเลกุลที่มีธาตุคาร์บอน (Carbon, C) และไฮโดรเจน (Hydrogen, H) เป็นส่วนใหญ่เหมือนกับพอลิเมอร์อื่นๆ แต่ยางมีสมบัติที่แตกต่างจากพอลิเมอร์ชนิดอื่น คือยางสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือขนาด ยืดหรือหดได้หลายเท่า

ยางธรรมชาติ (Natural Rubbers, NR) หรือที่รู้จักในนาม “ยางพารา” (Para rubbers) มีชื่อทางเคมีคือ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (cis-1,4 Polyisoprene, PI) เป็นพอลิเมอร์สายโซ่ตรงและยาว มีหน่วยซ้ำๆ กันคือไอโซพรีน (C₅H₈) โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.8 เป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ คือต้นยางพาราที่มีชื่อวิทยาศาสตร์คือ “ซีเวีย-บราซิเลียนซิส”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(*Hevea Brasiliensis*) บางครั้งเรียกยางธรรมชาติว่า “ยางฮีเวีย” (*Hevea latex*) หรือยางพาราเป็นต้นไม้ยืนต้น สูงใหญ่ อายุยืน มีมากมายหลายพันธุ์ ซึ่งให้ปริมาณและองค์ประกอบของน้ำยางที่แตกต่างกัน

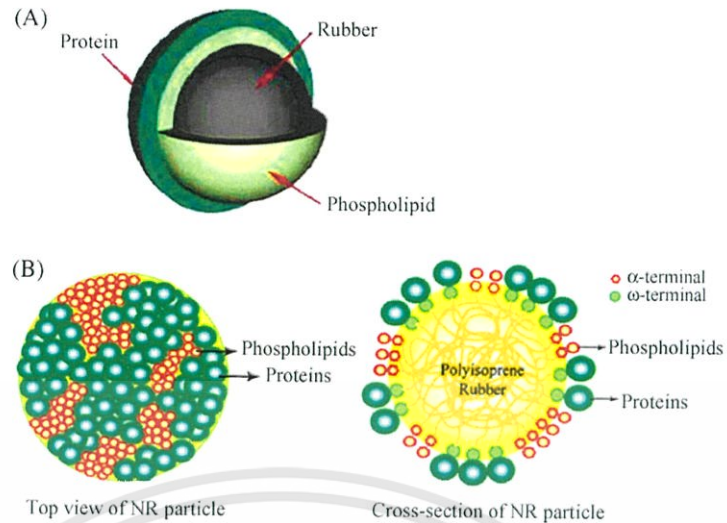


รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ ซิส-1, 4 พอลิไอโซพรีน

ต้นยางธรรมชาติหรือยางพารามีต้นกำเนิดที่ประเทศบราซิลทวีปอเมริกาใต้ลุ่มน้ำอะเมซอน ต่อมาได้มีผู้นำมาปลูกที่ทวีปยุโรปและเอเชียเนื่องจากต้นยางพาราชอบอากาศร้อนชื้น ดินทราย ร่วนระบายน้ำดี จึงนิยมปลูกมากแถวเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ต้นยางขึ้นได้ดีในบริเวณที่ฝนตกชุก (ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยมากกว่า 80 นิ้วต่อปี) อุณหภูมิประมาณ 25-30 องศาเซลเซียส และชอบขึ้นในบริเวณที่มีความสูงของพื้นดินไม่สูงมาก มากกว่า 80%ของการปลูกยางธรรมชาติอยู่ที่ประเทศไทย มาเลเซีย และอินโดนีเซีย ปัจจุบัน “ประเทศไทย” ผลิตยางธรรมชาติได้มากที่สุดในโลก คือ ประมาณ 3.1 ล้านตันต่อปี มีพื้นที่ปลูกยางพารามากกว่า 16.7 ล้านไร่ (ตัวเลขในปี พ.ศ. 2552)

2.7.1 น้ำยางธรรมชาติ

น้ำยางธรรมชาติ (Latex) จากต้นยางพารามีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวขุ่นคล้ายน้ำมันเป็นสารแขวนลอยหรือคอลลอยด์ (Colloids) ประกอบด้วยน้ำเป็นองค์ประกอบหลัก เรียกว่า “เซรัม” (Serum) และมีอนุภาคยางพอลิไอโซพรีนประมาณ 30-45% ขนาด 20-2,000 นาโนเมตร แขวนลอยกระจายอยู่ในของเหลวเซรัมในลักษณะไมเซลล์ (Micelles) นอกจากนี้ยังประกอบด้วยสารอื่นๆ ที่ไม่ใช่ยาง (Non-rubber substances) เช่น โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต และสารอินทรีย์อื่นๆ เช่น แมกนีเซียม แคลเซียม เหล็ก สังกะสี ทองแดง แมงกานีส เป็นต้น ส่วนประกอบต่างๆ ของน้ำยางแสดงได้ดังตารางที่ 2.4 แสดงดังรูปที่ 2.9 โดยทั่วไปน้ำยางธรรมชาติมี pH ประมาณ 6.5-7.0 มีความหนาแน่นประมาณ 0.97-0.98 g/cm³ และมีความหนืด (Viscosity) ไม่แน่นอน โดยแต่ละอนุภาคอยู่รอบนอกทำให้เกิดแรงผลักระหว่างอนุภาคยาง ซึ่งมีผลให้น้ำยางสามารถคงสภาพเป็นของเหลวได้ ดังนั้นเมื่อมีการทำลายเยื่อหุ้มอนุภาคหรือมีการสะเทินอนุภาคจะทำให้อนุภาคยางที่แขวนลอยอยู่ในตัวกลางเกิดการรวมตัวจับกันเป็นก้อน เมื่อนำอนุภาคของเม็ดยางมาวิเคราะห์พบว่ามีส่วนประกอบโดยประมาณดังตารางที่ 2.5 [16]



รูปที่ 2.9 ภาพแสดงโครงสร้างของอนุภาคยางในน้ำยางธรรมชาติ

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างส่วนประกอบและปริมาณของสารต่างๆ ในน้ำยางธรรมชาติ

ส่วนประกอบ	ปริมาณร้อยละ
สารที่เป็นของแข็งทั้งหมด	36
เนื้อยางแห้ง	33
โปรตีน	1-1.5
เรซิน	1-2.5
เถ้า	จนถึง 1
น้ำตาล	1
น้ำ (ในปริมาณที่รวมกับสารอื่นๆ)	100

ตารางที่ 2.5 ส่วนประกอบของเม็ดยาง

ส่วนประกอบ	ปริมาณร้อยละ
เนื้อยางไฮโดรคาร์บอน	86
น้ำที่เจือติดเข้าไปในอนุภาค	10
สารโปรตีน	1
สารพวก Lipid ไขมัน	3
พวกโลหะ เช่น แมกนีเซียม จะปนไปกับอนุภาคเม็ดยางด้วย	ไม่เกิน 0.05

2.7.1.1 ส่วนประกอบของน้ำยาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) เนื้อยางมีส่วนประกอบหลักๆ ดังนี้คือ

- อนุภาคยาง อนุภาคยางถูกหุ้มด้วยสารจำพวกโปรตีนและไขมัน โดยโปรตีนนี้จะอยู่ชั้นนอกและอาจมีโลหะบางชนิด เช่น แมกนีเซียม โปแตสเซียม และเหล็ก ปะปนอยู่เล็กน้อย ประมาณ 0.5% โดยปกติอนุภาคยางจะแขวนลอยอยู่ในน้ำประกอบด้วยสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอนลักษณะอนุภาคยางเป็นรูปทรงค่อนข้างกลมมีขนาดแตกต่างกันมาก คืออยู่ระหว่าง 0.04 ถึง 4 ไมครอน อนุภาคส่วนใหญ่มีขนาดเกิน 0.4 ไมครอน และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 1.2 ไมครอน เมื่อนำน้ำยางสดมาปั่นด้วยความเร็วสูงพบว่าอนุภาคยางที่มีขนาดใหญ่จะแยกตัวออกจากชั้นน้ำขึ้นมายู่ชั้นบนซึ่งสามารถแยกเป็นน้ำยางชั้น ส่วนอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะปนอยู่กับหางน้ำยาง (Skim latex)

2) ส่วนที่ไม่ใช่ยาง ซึ่งมีส่วนประกอบหลักๆ ดังนี้

- โปรตีน (Protein) โปรตีนทั้งหมดที่มีอยู่ในน้ำยาง จะแบ่งเป็น 3 ส่วนด้วยกัน คือส่วนที่ห่อหุ้มอยู่ตรงผิวรอบนอกของอนุภาคยางซึ่งมีประมาณ 25 % ส่วนที่อยู่ในชั้นน้ำซึ่งมีประมาณ 50% และส่วนของสารลูทอยด์ซึ่งมีประมาณ 25% โปรตีนหลักๆ ที่มีอยู่ในน้ำยางมีอยู่ 2 ประเภท คือประเภทแรกเรียกว่า แอลฟา-โกลบูลิน (α -globulin) โปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงประมาณ 200,000 ซึ่งเป็นโปรตีนที่มีสมบัติเป็น Surface active จะอยู่บนรอยต่อระหว่างน้ำกับอากาศและน้ำมันกับน้ำ ไม่ละลายในน้ำกลั่นแต่ละลายในน้ำกรด ด่าง และเกลือ ที่มีค่าจุดไอโซอิเล็กทริก (Isoelectric point) ที่ pH 4.8 ส่วนโปรตีนอีกประเภทหนึ่งเรียกว่าฮิวิน เป็นโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำประมาณ 10,000 โปรตีนชนิดนี้จะอยู่ที่อนุภาคของเนื้อยาง และละลายอยู่ในชั้นน้ำที่มีค่าจุดไอโซอิเล็กทริกที่ pH 4.5 ส่วนประกอบของฮิวินมีกำมะถันประมาณ 5% และเป็นประเภท Crystalline disulphide linkage เวลาปั่นน้ำยางบดแล้ว โปรตีนส่วนนี้จะสลายตัวเป็นสารพวกไฮโดรเจนซัลไฟด์ และสารเมอร์แคปแทนซึ่งทำให้มีกลิ่นเหม็นได้ ฮิวินมีทั้งประจุบวกและประจุลบ อยู่ในโมเลกุลขึ้นอยู่กับค่า pH ของตัวกลาง โปรตีนชนิดนี้จัดเป็นสารลดความตึงผิว (Surfactant) ชนิด Amphoteric stabilizer ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงประจุของโปรตีนตามสภาวะแวดล้อม

- ไขมัน (Lipid) ไขมันที่มีอยู่กับอนุภาคของเม็ดยางส่วนใหญ่เป็นพวกฟอสโฟไลปิด Eicosyl alcohol พวกสเตียรอลและเอสเทอร์ของสเตียรอล ฟอสโฟไลปิดนี้จะอยู่ระหว่างชั้นของโปรตีนและอนุภาคยางโดยตัวมันเองทำหน้าที่ยึดโปรตีนให้เกาะติดอยู่กับอนุภาคของเม็ดยางฟอสโฟไลปิดที่สำคัญของน้ำยางเป็นชนิดเลซิทีน (Lecithin)

- น้ำหรือเซรัม เซรัมของน้ำยางมีความหนาแน่นประมาณ 1.02 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ประกอบด้วยสารชนิดต่างๆ คือ คาร์โบไฮเดรตซึ่งเป็นสารจำพวกแป้งและน้ำตาลที่มีอยู่ในน้ำยางประมาณ 1% น้ำตาลส่วนใหญ่เป็นชนิดคิวบาชิทอล (Quebarchitol) ส่วนของลูทอยด์และสารอื่นๆ ลูทอยด์เป็นอนุภาคค่อนข้างกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.5-3.0 ไมครอน หุ้มด้วยเนื้อเยื่อ

ชั้นเดียวสามารถเกิดการออสโมซิสได้ง่าย ดังนั้นการเติมน้ำลงไปใต้น้ำอย่างสดจะทำให้ลู่ทยอยคืบวมและแตกง่าย

2.7.1.2 เสถียรภาพของน้ำยาง

การที่น้ำยางมีสถานะเป็นของเหลวแขวนลอยและก้อนอนุภาคยางลอยตัวอยู่ในน้ำตัวกลาง (เซอรุ่ม) ได้เนื่องจากก้อนอนุภาคยางถูกห่อหุ้มด้วยชั้น โปรตีน ซึ่งมีประจุลบ (Negative charges) ล้อมรอบชั้น โปรตีนนี้จะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้แต่ละอนุภาคยางรวมตัวกันเป็นก้อนยางแข็งตกตะกอนที่เรียกว่าโคแอกกูลัม (Coagulum) เนื่องจากประจุลบรอบอนุภาคยางจะผลักรันกันทำให้อนุภาคยางไม่จับตัวรวมกันเป็นก้อนยังสามารถลอยตัวกระจายอยู่ในตัวกลางน้ำได้ [15]

2.7.1.3 การเสถียรภาพของน้ำยาง

เมื่อน้ำยางธรรมชาติไหลออกจากต้นยางไม่กี่ชั่วโมงก็เกิดการตกตะกอนเสถียรภาพระยะเวลาการตกตะกอนขึ้นกับอุณหภูมิแวดล้อมและเสถียรภาพของน้ำยางเอง โดยจะเกิดการจับตัวเป็นก้อนแยกส่วนกับน้ำเซอรุ่มใสและในที่สุดจะเกิดการเน่าเสีย (Putrefaction) ให้กลิ่นเหม็น ดังนั้นชาวสวนยางต้องทำการใส่ “สารรักษาสภาพยาง” หรือพรีเซอเวทีฟ (Preservatives) เพื่อป้องกันการเสถียรภาพของน้ำยาง การเสถียรภาพของน้ำยางสามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะคือ

1. การเสถียรภาพหรือการตกตะกอนตามธรรมชาติ (Natural coagulation หรือ Spontaneous coagulation) เมื่อน้ำยางไหลออกจากต้นยางจะมีจุลินทรีย์ เช่นแบคทีเรียในอากาศและในสิ่งแวดล้อมปะปนอยู่ในน้ำยาง เมื่อเวลาผ่านไปจุลินทรีย์จะทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบที่ไม่ใช่ยาง ได้แก่ โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และน้ำตาล เกิดเป็นกรดไขมันที่ระเหยได้ (Volatile fatty acid, VFA) เช่นกรดฟอร์มิก กรดอะซิติก เป็นต้น สถานะความเป็นกรดจะทำลายชั้น โปรตีนที่ห่อหุ้มอนุภาคยางที่มีประจุลบเป็นผลให้อนุภาคยางเกิดการรวมตัวกันเป็นก้อนของแข็ง (Coagulum) ขนาดเล็ก ซึ่งจะมีขนาดก้อนยางแข็งและปริมาณมากขึ้นเรื่อยๆ รวมทั้งมีกลิ่นเหม็นบูดอันเนื่องจากการสลายตัวของโปรตีน

2. การแข็งตัวเนื่องจากกรด (Acid coagulation) เนื่องจากจับตัวเป็นก้อนตามธรรมชาติของยางใช้เวลานาน (มากกว่า 36 ชั่วโมง) และมีกลิ่นเหม็น ดังนั้นในกระบวนการผลิตยางแห้งจึงมีการใช้สารตกตะกอน ได้แก่สารเคมีที่ช่วยให้น้ำยางจับตัวเป็นของแข็ง ในกรณีของน้ำยางธรรมชาติ นิยมใช้ กรดฟอร์มิก กรดอะซิติก และกรดซัลฟิวริกเจือจาง (ประมาณ 2% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร)

2.7.1.4 การรักษาสภาพน้ำยาง

เพื่อป้องกันการเสถียรภาพของน้ำยางชาวสวนยางต้องทำการใส่ “สารรักษาสภาพน้ำยาง” ซึ่งมีหน้าที่คือ

- มีความสามารถในการทำลาย กีดขวาง หรือระงับการทำงานของจุลินทรีย์ต่างๆ เช่นแบคทีเรียและเอนไซม์ที่จะทำให้ยางเสถียรภาพ

- ช่วยเพิ่มเสถียรภาพการเป็นสารแขวนลอยของน้ำยาง โดยการเพิ่มประจุลบของอนุภาคยาง และเพิ่มพลังงานยึดเกาะระหว่างอนุภาคยางและตัวกลางน้ำ ทำให้สามารถลอยตัวกระจายไม่รวมตัว เป็นก้อนของแข็งแยกสถานะ สารรักษาสภาพน้ำยางควรมีสมบัติเป็นด่าง เนื่องจากชั้นโปรตีนหุ้มอนุภาคยางมีประจุลบมีสมบัติเป็นด่าง ดังนั้นสารรักษาสภาพน้ำยางควรเพิ่ม pH หรือเพิ่มความเป็นด่างให้กับน้ำยาง

- ช่วยป้องกันหรือยับยั้งปฏิกิริยาอนุมูลของโลหะ โดยเฉพาะไอออนของโลหะหนักที่อาจทำปฏิกิริยาเกิดเป็นตะกอนเกลือของโลหะที่ไม่ละลายน้ำ เช่น แคลเซียม (Ca) และ แมกนีเซียม (Mg) อนุมูลของโลหะยังเป็นตัวช่วยในการเจริญเติบโตและมีจุลินทรีย์ต่างๆ อันเป็นสาเหตุสำคัญของการเสียสภาพของน้ำยาง

สารรักษาสภาพน้ำยางที่สำคัญได้แก่ แอมโมเนีย โซเดียมซัลไฟต์ พอร์มาลดีไฮด์ เป็นต้น สารรักษาสภาพที่ดีควรมีลักษณะดังนี้

- ต้องไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และต้นยางพารา
- ไม่เปลี่ยนสีน้ำยางหรือให้กลิ่นรุนแรง
- ไม่เกิดปฏิกิริยาขุ่นขาวหรือมีผลใดๆ ต่อกระบวนการแปรรูปยาง
- ควรมีราคาถูกและอยู่ในรูปที่ใช้งานง่าย

การเติมแอมโมเนีย เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำยางจับตัว ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ชนิดหลักๆ ได้แก่

- 1.) น้ำยางชั้นชนิดแอมโมเนียสูง (High ammonia, HA) จะใช้แอมโมเนีย 0.7 % โดยน้ำหนัก
- 2.) น้ำยางชั้นชนิดแอมโมเนียต่ำ (Low ammonia, HA) จะใช้แอมโมเนีย 0.2 % โดยน้ำหนัก

การเลือกใช้ชนิดของสารรักษาสภาพน้ำยางขึ้นกับลักษณะของยางที่ต้องการผลิตเป็นหลัก เช่นยางแห้ง หรือน้ำยางข้น ปริมาณการใช้ขึ้นกับระยะเวลาของการเก็บรักษาน้ำยางก่อนการแปรรูป บางครั้งอาจเรียกสารรักษาสภาพน้ำยางระยะสั้นว่า “แอนตี้โคแอกกูแลนต์” (Anticoagulants)

2.7.2 สมบัติทั่วไปของยางพารา

1. ความยืดหยุ่น (Elasticity) เป็นลักษณะเด่นอีกประการหนึ่งของยางธรรมชาติกล่าวคือยางธรรมชาติที่คงรูปแล้วจะมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำกับยางหมดไปยางจะกลับสู่รูปร่างและขนาดเดิม (หรือใกล้เคียง) ได้อย่างรวดเร็ว

2. ความเหนียวติดกัน (Tack) ยางธรรมชาติ (ในสภาพที่ยังไม่คงรูป) มีสมบัติดีเยี่ยมในด้านความเหนียวติดกันซึ่งเป็นสมบัติของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่างๆเข้าด้วยกัน เช่น ยางล้อรถยนต์ เป็นต้น

3. ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) และความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear strength) เนื่องจาก โมเลกุลของยางธรรมชาติมีความเป็นระเบียบสูงจึงทำให้ยางสามารถตกผลึกได้ง่ายเมื่อถูกยืด ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นจะช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับยาง ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงมีค่าความ

ทนทานต่อแรงดึงสูงมาก โดยที่ไม่ต้องใช้สารตัวเติมเสริมแรงเข้าช่วย และมีความทนทานต่อการฉีกขาดสูงมากทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูง

4. สมบัติเชิงพลวัต (Dynamic properties) ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัตที่ดีมีการสูญเสียพลังงานในรูปความร้อนต่ำในระหว่างการใช้งานและมีความต้านทานต่อการล้าตัว (Fatigue resistance) ที่สูงมาก

5. ความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) ยางธรรมชาติมีค่าความต้านทานต่อการขัดถูสูง

6. ความเป็นฉนวน (Insulation) ยางธรรมชาติมีค่าความเป็นฉนวนมากเช่นเดียวโดยมีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (Specific resistivity) สูงถึง 10^{15} - 10^{16} ohm.cm

7. ความทนทานต่อของเหลวและสารเคมี (Liquid and chemical resistance) เนื่องจากองค์ประกอบของยางธรรมชาติเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นยางดิบจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน และโทลูอีน ยางธรรมชาติจึงไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมหรือตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วต่างๆ แต่ยางจะทนทานต่อของเหลวที่มีขั้ว เช่น อะซีโตน หรือแอลกอฮอล์ นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังทนต่อการกรดและด่างเจือจางได้ดี แต่ไม่ทนต่อการกรดในตริกและกรดกำมะถันเข้มข้น

8. การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน โอโซน และแสงแดด (Aging properties) เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่มากทำให้ยางว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน โดยมีแสงแดดหรือความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดังนั้นยางธรรมชาติจึงถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย

9. การหักงอที่อุณหภูมิต่ำ (Low temperature flexibility) ยางธรรมชาติยังคงรักษาสมบัติความยืดหยุ่นหรือความสามารถในการหักงอได้แม้ที่อุณหภูมิต่ำมาก

10. การเสีรูปหลังการกด (Compression set) ยางธรรมชาติมีการเสีรูปหลังการกดค่อนข้างต่ำทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูงปานกลาง อย่างไรก็ตามการเสีรูปหลังการกดที่อุณหภูมิต่ำของยางธรรมชาติจะสูงขึ้น เนื่องจากยางอาจเกิดการตกผลึกทำให้ความยืดหยุ่นของยางเริ่มสูญเสียไป ในขณะที่ค่าการเสีรูปหลังการกดที่อุณหภูมิสูงของยางธรรมชาติจะมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากยางธรรมชาติไม่ทนต่อความร้อนจึงเกิดการเสื่อมสภาพ ซึ่งส่งผลทำให้สมบัติการเสีรูปหลังการกดค่อยลดลง

11. การกระเด็นกระดอน (Rebound resilience) ยางธรรมชาติมีสมบัติการกระเด็นกระดอนสูงและในระหว่างการเปลี่ยนแปลงรูปร่างยางจะสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนน้อย ยางธรรมชาติจึงมีความร้อนสะสมต่ำเมื่อถูกใช้งานในเชิงพลวัต

12. อุณหภูมิของการใช้งาน (Service temperature) ยางธรรมชาติสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิตั้งแต่ -55°C ถึง 70°C หากเก็บยางไว้ที่อุณหภูมิต่ำนานๆ ยางอาจเกิดการตกผลึก ซึ่งจะทำได้

ยางแข็งขึ้นและเสียความยืดหยุ่น แต่เมื่ออุณหภูมิการใช้งานสูงเกินไปสมบัติเชิงกลต่างๆ ก็จะค่อยลง เนื่องจากความร้อนจะให้อย่างเกิดการเสื่อมสภาพ [18]

2.7.3 นํ้ายางข้น (Concentrated latex)

นํ้ายางข้น หมายถึง นํ้ายางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการเพิ่มความเข้มข้น โดยนํ้ายางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการเพิ่มความเข้มข้นแล้วจะมีปริมาณเนื้อยางประมาณร้อยละ 55-65 ซึ่งสูงกว่านํ้ายางสดที่มีปริมาณเนื้อยางประมาณร้อยละ 25-30 ทำให้สามารถทำการขนส่งได้ง่ายขึ้นเป็นอย่างมาก [17]

2.7.3.1 กระบวนการเตรียมนํ้ายางข้นจากนํ้ายางสด

โดยทั่วไปแล้วกระบวนการเตรียมนํ้ายางข้นมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน แต่วิธีการที่นิยมใช้ในการเตรียมนํ้ายางข้นมีอยู่ 2 วิธี คือ

1. การทำครีม (Creaming method)

การทำนํ้ายางข้นโดยวิธีการทำครีมเป็นวิธีที่อาศัยหลักการที่อนุภาคของเม็ดยางเบากว่าน้ำเป็นไปตามกฎของ Stokes การทำนํ้ายางข้นโดยวิธีการทำครีมไม่ค่อยนิยมกันมากนัก เนื่องจากต้องใช้เวลานานในการเตรียมนํ้ายางและใช้เวลาทำค่อนข้างนาน สารทำครีมได้แก่ Gum bragacarth, Sodium aginate, Tragon seed gum, Ammonium aginate, Locust bean gum และ Pectin สมบัติของสารทำครีมคือ เป็นคอลลอยด์ที่ชอบน้ำและจะพองตัวเมื่อใส่ในน้ำมัน ขั้นตอนการทำครีมค่อนข้างง่าย คือ

- ใส่สารทำครีม ปริมาณ 0.3% ในส่วนของน้ำ ลงในนํ้ายางสดที่เก็บรักษาโดยแอมโมเนีย
- กวนให้สารทำครีมละลาย ตั้งทิ้งไว้ 24-40 ชั่วโมง
- กรองเอาชั้นนํ้าออกจากของผสม
- ปรับปริมาณเนื้อยางและความเข้มข้นของแอมโมเนียภายหลัง

ความเข้มข้นของเนื้อยางจะสูงประมาณ 55% ในช่วงระยะเวลา 18 ชั่วโมง ในการทำนํ้ายางข้นโดยวิธีการทำครีม หากต้องการเนื้อยางสูงถึง 60% ต้องตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 4-5 วัน

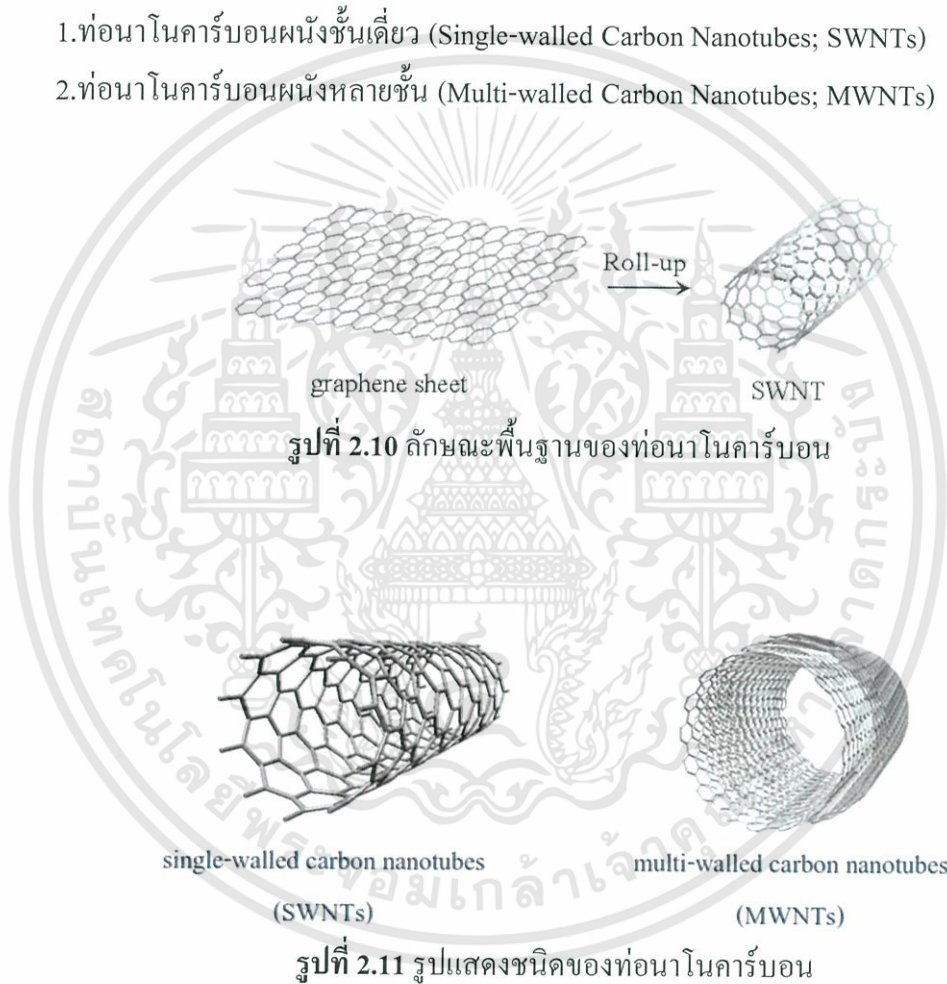
2. การเซนตริฟิวส์หรือการปั่นแยก (Centifuge method)

การเตรียมนํ้ายางโดยวิธีนี้เป็นที่นิยมกันมากเนื่องจากนํ้ายางประเภทนี้สามารถนำไปทำผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปได้เกือบทุกชนิด วิธีผลิตนํ้ายางประเภทนี้ทำได้โดยใช้เครื่องหมุนเหวี่ยงที่มีความเร็วรอบประมาณ 7,000-8,000 รอบต่อนาที หลังการหมุนเหวี่ยงด้วยเครื่องแล้วนํ้ายางจะถูกแบ่งออกเป็นสองชั้นคือ ชั้นของนํ้ายางข้นและชั้นของหางนํ้ายาง ซึ่งการเตรียมโดยวิธีนี้จะได้นํ้ายางข้นที่มีความเข้มข้นของเนื้อยางสูงถึง 60-65%

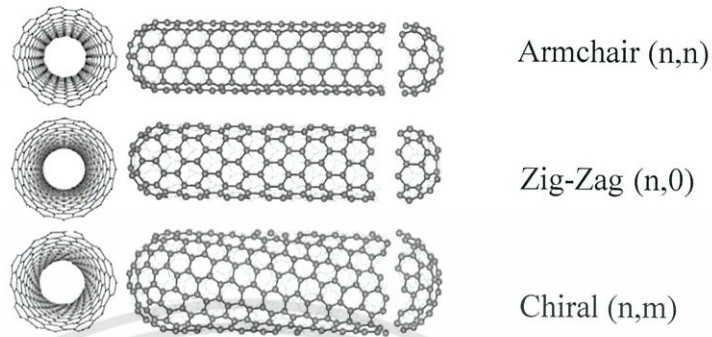
2.8 ท่อนาโนคาร์บอน

ท่อนาโนคาร์บอนประกอบด้วยหน่วยย่อยเล็กๆ (โครงสร้างของอะตอมคาร์บอนจำนวน 6 อะตอมมาจัดเรียงตัวกันเป็นวงแหวนรูปหกเหลี่ยม) จำนวนมากมายมาจัดเรียงตัวกันเป็นผนังท่อถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1991 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่นชื่อ สุมิโอะ อิจิมะ (Sumio Iijima) ซึ่งท่อนาโนคาร์บอนนั้นมีลักษณะเหมือนกับแผ่นกราฟิตที่มีม้วนเป็นท่อแสดงดังรูป 2.10 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 นาโนเมตรจนถึงหลายสิบนาโนเมตร โดยอะตอมคาร์บอนเหล่านี้ต่างเชื่อมต่อกันแบบ sp^2 และสามารถแบ่งท่อนาโนคาร์บอนออกเป็น 2 ชนิด คือ [19]

1. ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว (Single-walled Carbon Nanotubes; SWNTs)
2. ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น (Multi-walled Carbon Nanotubes; MWNTs)



2.8.1 ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว (Single-walled Carbon Nanotubes; SWNTs) มีอยู่ด้วยกันทั้งหมด 3 รูปแบบ ดังแสดงในรูป 2.12



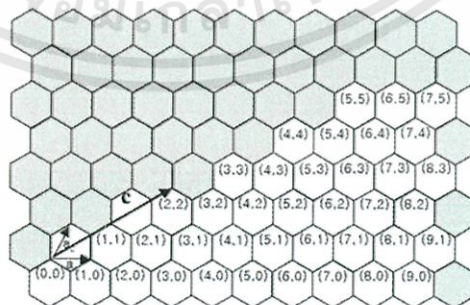
รูป 2.12 รูปแบบโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน

โดยมีดัชนี (n,m) เป็นตัวบ่งบอกรูปแบบการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนบนท่อนาโนคาร์บอน โดยกำหนดให้เวกเตอร์ผลลัพ์ของผลรวมเวกเตอร์ $n+m$ คือ เส้นรอบวงของท่อนาโนคาร์บอน ดังแสดงในรูป 2.13

ถ้า $m=n$ จะได้ ท่อนาโนคาร์บอนที่มีการจัดเรียงอะตอมแบบ Armchair (n,n) ซึ่งแบบจำลองเกิดจากการม้วนให้ตำแหน่ง $(0,0)$ ไปพบกับตำแหน่ง (n,n) มีขนาดมุม θ เท่ากับ 30 องศา ดังแสดงในรูป 2.13

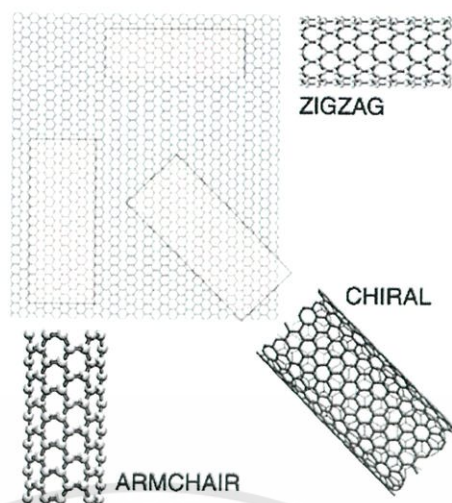
ถ้า $m=0$ จะได้ ท่อนาโนคาร์บอนที่มีการจัดเรียงอะตอมแบบ Zig-Zag $(n,0)$ ซึ่งแบบจำลองเกิดจากการม้วนให้ตำแหน่ง $(0,0)$ ไปพบกับตำแหน่ง $(n,0)$ มีขนาดมุม θ เท่ากับ 0 องศา ดังแสดงในรูป 2.13

ถ้า $m \neq 0$ จะได้ ท่อนาโนคาร์บอนที่มีการจัดเรียงอะตอมแบบ Chiral (n,m) ซึ่งแบบจำลองเกิดจากการม้วนให้ตำแหน่ง $(0,0)$ ไปพบกับตำแหน่ง (n,m) มีขนาดมุม θ เท่ากับ 0-30 องศา ดังแสดงในรูป 2.13



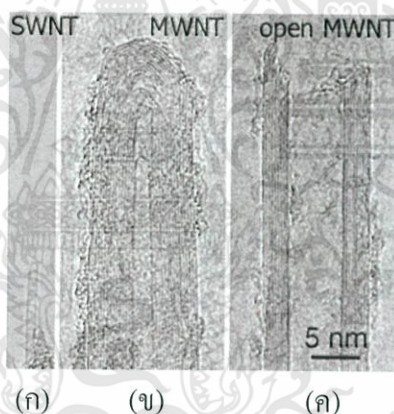
รูปที่ 2.13 ดัชนีบ่งบอกรูปแบบการจัดเรียงตัวของอะตอมบนท่อนาโนคาร์บอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวในรูปแบบต่างๆ

2.8.2 ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น (Multi-walled Carbon Nanotubes; MWNTs) คือ ท่อนาโนคาร์บอนที่มีผนังซ้อนกันหลายชั้น ดังแสดงในรูป 2.15



รูป 2.15 ภาพของท่อนาโนคาร์บอนที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

(ก) ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว (ข) ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นแบบท่อปลายปิด และ (ค) ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นแบบท่อปลายเปิด

2.8.3 สมบัติของท่อนาโนคาร์บอน

ในส่วนผสมของท่อนาโนคาร์บอนไม่ว่าจะเป็นทางด้านไฟฟ้า กลศาสตร์ หรือทางเคมีนั้น ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของท่อ เช่น ชนิด เส้นผ่านศูนย์กลาง และลักษณะการม้วนของท่อ เป็นต้น มีดังต่อไปนี้ และสรุปสมบัติของท่อนาโนคาร์บอนเปรียบเทียบกับวัสดุต่างๆ ได้ตารางที่ 2.6 [16]

1) สมบัติทางกายภาพ

ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยวมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 0.7 และ 2 นาโนเมตร และล่าสุดในปี 2004 ที่ผ่านมามีนักวิทยาศาสตร์รายงานว่าสามารถสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยวได้เล็กที่สุดถึง 3 อังสตรอม ส่วนท่อนาโนคาร์บอนชนิดหลายผนังมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่อยู่ในช่วง 10-300 นาโนเมตรและมีช่องว่างระหว่างชั้นของแต่ละท่อประมาณ 0.34-0.36 นาโนเมตร ความยาวของท่อนาโนคาร์บอนทั่วไปอยู่ในระดับไมโครเมตรแต่สามารถทำให้ยาวถึง 20 เซนติเมตรได้ และล่าสุดในปี 2004 มีรายงานว่านักวิทยาศาสตร์ในกลุ่มของลิ (Li) สามารถสร้างท่อนาโนคาร์บอนที่มีความยาว 100 เมตรได้สำเร็จ ทำให้ท่อนาโนคาร์บอนมีอัตราความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางสูงมาก ซึ่งเป็นสมบัติที่ดีของวัสดุที่ใช้เป็นวัสดุเสริมแรงหรือการนำท่อนาโนคาร์บอนไปใช้งานบางอย่างได้โดยตรง

ท่อนาโนคาร์บอนมีน้ำหนักเบาโดยมีค่าความหนาแน่นเพียง 1.33-1.4 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับอะลูมิเนียมที่มีความหนาแน่น 2.7 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร นอกจากนี้ท่อนาโนคาร์บอนยังเป็นโมเลกุลคาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวมากถึง 1,250 ตารางเซนติเมตร/กรัม ซึ่งมากกว่าคาร์บอนที่ว่องไวปฏิกิริยา (Action carbon) ถึง 2 เท่า

2) สมบัติเชิงกล

เนื่องจากโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนและพันธะของคาร์บอนที่ยาว 0.14 นาโนเมตรเท่านั้น ทำให้ท่อนาโนคาร์บอนมีความแข็งแรงมากกว่าเพชรและแกรไฟต์ กล่าวคือมีค่าความยืดหยุ่นหรือค่ามอดูลัสของยังสูงถึง 1 เทอราปาสคาล (TPa) และมีความทนทานต่อแรงดึงสูงถึง 150 จิกกะปาสคาล (GPa) ซึ่งมีค่าสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าอัลลอยที่มีค่าเพียง 2 จิกกะปาสคาลเท่านั้น นอกจากนี้ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวยังสามารถถูกดึงยืดได้ถึง 10-13 เปอร์เซ็นต์ ก่อนที่จะขาดอีกด้วย

3) สมบัติทางไฟฟ้า

ท่อนาโนคาร์บอนสามารถนำไฟฟ้าได้ดีกว่าตัวนำไฟฟ้าทุกชนิดและมีสมบัติเป็นตัวนำยิ่งยวดในบางสถานะได้ด้วย ซึ่งท่อนาโนคาร์บอนชนิด สามารถนำไฟฟ้าได้ถึง 10^9 แอมแปร์/ตารางเซนติเมตร ขณะที่ทองแดงสามารถนำไฟฟ้าได้สูงสุดเพียง 10^6 แอมแปร์/ตารางเซนติเมตร นอกจากนี้ท่อนาโนคาร์บอนจะแสดงสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าแล้วยังสามารถเป็นสารกึ่งตัวนำเหมือนซิลิกอนได้ด้วย ซึ่งขึ้นอยู่กับโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ เช่น การที่ท่อนาโนคาร์บอนมีผลเฉลยของผนังที่แตกต่างกันทำให้การนำไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนต่างกัน โดยโครงสร้างท่อแบบ Armchair จะแสดงสมบัติทางไฟฟ้าเหมือนตัวนำไฟฟ้า ขณะที่โครงสร้าง Zigzag แสดงสมบัติทางไฟฟ้าเหมือนกึ่งตัวนำไฟฟ้า ส่วนโครงสร้างแบบ Chiral จะมีสมบัติอยู่ระหว่างสองแบบแรก นอกจากนี้การบิดท่อนาโนคาร์บอนไม่ให้เกิดการจัดเรียง โครงสร้างแบบแนวตรงก็สามารถเปลี่ยนท่อนาโนคาร์บอนให้มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำไฟฟ้าได้ด้วย

4) สมบัติทางความร้อน

การนำความร้อนของท่อนาโนคาร์บอนมีค่าสูงประมาณ 200 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน(W/m.K) และบางรายงานกล่าวว่ามีการนำความร้อนสูงถึง 6,000 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน ซึ่งมากกว่าเพชรและแกรไฟต์ ซึ่งมีค่าประมาณ 2,000 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน หลายเท่า นอกจากนี้ท่อนาโนคาร์บอนยังทนต่ออุณหภูมิได้ถึง 750 องศาเซลเซียส ในสภาวะปกติ และ 2,800 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะสุญญากาศด้วย

ตารางที่ 2.6 สมบัติของท่อนาโนคาร์บอน

สมบัติ	ท่อนาโนคาร์บอน	เปรียบเทียบสมบัติกับวัสดุอื่นๆ
สมบัติทางกายภาพ	<ul style="list-style-type: none"> -ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง SWNT = 0.7-2 นาโนเมตร MWNT = 10-300 นาโนเมตร -ความยาวเฉลี่ย : อยู่ในช่วง 100 ไมโครเมตร -พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface) มาก 1250 ตารางเมตร/กรัม -ความหนาแน่นต่ำ : 1.33-1.40 g/cm³ 	<ul style="list-style-type: none"> -พื้นที่ผิวมากกว่าคาร์บอนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา (Active carbon : 600 ตารางเมตร/กรัม) -ความหนาแน่นต่ำมากเมื่อเทียบกับอะลูมิเนียม (2.7 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)
สมบัติเชิงกล	<ul style="list-style-type: none"> -การทนทานต่อแรงดึง : 150 GPa -ค่ามอดูลัสของยัง : 1 TPa 	<ul style="list-style-type: none"> -การทนต่อแรงดึงสูงเป็น 300 เท่าของโลหะทั่วไป -ค่ามอดูลัสของยังสูงเป็น 6 เท่าของโลหะ -ค่ามอดูลัสของยังสูงเป็น 2 เท่าของเส้นใยคาร์บอน
สมบัติทางไฟฟ้า	<ul style="list-style-type: none"> -ค่าการนำไฟฟ้า : 10⁻⁴ วัตต์ เซนติเมตร -ค่าความหนาแน่นกระแสสูงสุด : 10⁶ แอมแปร์/ตารางเซนติเมตร -มีสมบัติเป็นได้ทั้งตัวนำไฟฟ้าหรือกึ่งตัวนำไฟฟ้า -สมบัติกึ่งโลหะ (Semi-Metallic) : 0 อิเล็กตรอน โวลต์ 	<ul style="list-style-type: none"> -สมบัติทางไฟฟ้าเหมือนกับทองแดงแต่สามารถนำไฟฟ้าได้ดีกว่าประมาณพันเท่า -สมบัติทางไฟฟ้าดีกว่าสารตัวนำไฟฟ้าทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	-สมบัติกึ่งตัวนำ (Semi-Conductor): 0.5 อิเล็กตรอน โวลต์	
สมบัติทางความร้อน	-ค่าการนำความร้อน : มากกว่า 3,000 วัตต์/เมตรเคลวิน	-วัสดุทั่วไปมีค่าการนำความร้อนเท่ากับ 3,000 กรัม/เมตรเคลวิน

2.9 การดูดซับ (Adsorption)

กระบวนการดูดซับนิยมใช้อย่างแพร่หลายสามารถใช้กำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยพบว่าขนาดของตัวดูดซับส่งผลต่อกระบวนการดูดซับ จากการทดลองที่ใช้ปริมาณตัวดูดซับที่เท่ากันแต่มีขนาดต่างกันพบว่าตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กกว่าสามารถดูดซับปริมาณสีย้อมได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับสารละลายมาก การดูดซับจึงเกิดได้ดี [20] ซึ่งในโครงการพิเศษได้ใช้การดูดซับบนท่อนาโนคาร์บอนถือว่าเป็นตัวดูดซับที่มีขนาดเล็ก การเติมท่อนาโนคาร์บอนยังช่วยเพิ่มความแข็งแรงด้วยการกระจายตัวของอนุภาค ในคอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาคประเภทนี้อนุภาคที่กระจายตัวอยู่จะมีขนาดเล็กกว่าคอมโพสิตที่มีอนุภาคขนาดใหญ่อยู่มาก โดยทั่วไปแล้วอนุภาคจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10-100 นาโนเมตร อันตรกิริยาระหว่างอนุภาคกับเมทริกซ์ (Particle-matrix interaction) จะเป็นตัวช่วยเพิ่มความแข็งแรงในระดับอะตอมหรือโมเลกุล

2.10 สีย้อม

สีย้อม (Dyestuffs) คือสีชนิดหนึ่งที่ใช้ในการย้อมเส้นใยของผ้าอาจจะเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ก็ได้มีลักษณะเป็นผลึกหรือผงละเอียด สีย้อมบางชนิดละลายน้ำได้ บางชนิดจะไม่สามารถละลายน้ำแต่จะละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ได้ เมื่อนำสีย้อมไปใช้ในกระบวนการย้อมจะทำให้โมเลกุลของสีย้อมซึมผ่านเข้าไปในโมเลกุลของเส้นใยโดยจะทำลายโครงสร้างผลึกของวัตถุนั้นชั่วคราว ซึ่งอาจเกิดพันธะไอออนิก (Ionic bond) หรือพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) กับวัตถุที่ต้องการย้อมโดยตรง สีที่เห็นจากสีย้อมนั้นเกิดจากอิเล็กตรอนในพันธะคู่ซึ่งอยู่ในโมเลกุลของสีย้อมนั้นมีความสามารถดูดกลืนพลังงานในช่วงสเปกตรัมต่างกัน พลังงานแสงที่สายตามองเห็นจะมีความยาวคลื่นช่วง 400-700 นาโนเมตร สีย้อมที่มีโครงสร้างทางโมเลกุลต่างกันจะมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ กันไป ซึ่งสายตาสามารถรับภาพได้จึงทำให้โมเลกุลสีย้อมต่างโทนสีกันแสดงสีให้เราเห็นด้วยสายตาออกมาเป็นต่างกันไป [21]

การจำแนกสีย้อมที่นิยมกันมากที่สุด คือการจำแนกสีย้อมตามการนำไปใช้เพราะจะต้องมีความคงทนการซัก มีความคงทนต่อแสง และยังคงต้องมีความคงทนต่อความร้อน โดยที่สีย้อมแต่ละ

ประเภทจะมีสูตรโครงสร้างทางเคมี สมบัติของสีย้อมตลอดจนวิธีใช้ที่แตกต่างกัน ไปซึ่งในกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมได้จำแนกสีย้อมตามวิธีใช้ออกเป็น 11 ประเภท ดังนี้

1) สีเอซิด (Acid dye) สีชนิดนี้เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ มีประจุลบ ละลายน้ำได้ดี ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน กลไกในการติดสีเกิดเป็นพันธะไอออนิกใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรดเจือจาง สีเอซิดบางตัวสามารถนำไปใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่น ปอ ไนลอน ไยขนแกะ ไหม และอะคริลิกได้วิธีการใช้จะนำสีย้อมที่เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ไปละลายน้ำย้อมที่เป็นกรดหรือเป็นกลาง สีเอซิดไม่ทนการซัก ไม่ทนเหงื่อ

2) สีไดเรกต์ (Direct dye) หรืออาจเรียกว่าสีย้อมฝ้าย สีชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอะโซที่มีย่านักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิคที่ทำให้ตัวสีสามารถละลายน้ำได้ มีประจุลบ นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส สีจะติดเส้นใยได้โดยโมเลกุลของสีจะจัดเรียงตัวแทรกอยู่ในระหว่างโมเลกุลเส้นใย และยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน สีไม่ทนต่อการซักน้ำ ตกง่าย ทนแสง

3) สีเบสิก (Basic or Cationic dye) สีย้อมชนิดนี้เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ (Organic base) ให้ประจุลบ ละลายน้ำได้ นิยมใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ไนลอน และใยอะคริลิกได้ดี ในขณะที่ย้อมโมเลกุลของสีส่วนที่มีประจุลบจะยึดจับกับ โมเลกุลของเส้นใยเป็นสีที่ติดทนไม่ควรใช้ย้อมเส้นใยธรรมชาติเพราะจะไม่ทนการซักและแสง

4) สีดิสเพอร์ส (Disperse dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำแต่มีสมบัติกระจายได้ดีสามารถย้อมเส้นใยอะซิเตท เส้นใยโพลีเอสเตอร์ ไนลอน และอะคริลิกได้ดี การย้อมจะใช้สารพา (Carrier) เพื่อช่วยเร่งอัตราการดูดซึมของสีเข้าไปในเส้นใยหรือย้อม

5) สีรีแอกทีฟ (Reactive dye) เป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบ เมื่ออยู่ในน้ำจะมีสมบัติเป็นด่าง สีย้อมชนิดนี้เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด โมเลกุลของสีจะยึดจับกับหมู่ไฮดรอกไซด์ (OH) ของเซลลูโลสและเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ในสภาวะที่เป็นด่าง กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับ

6) สีอะโซอิก (Azoic dye) สีย้อมชนิดนี้ไม่สามารถละลายน้ำได้ การที่สีจะก่อรูปเป็นเส้นใยได้ต้องย้อมด้วยสารประกอบฟีนอลซึ่งละลายน้ำได้ก่อนซึ่งเป็นกระบวนการทำให้รวมตัวเป็นสี (Coupling) แล้วย้อมทับด้วยสารไดอะโซคอมโพเนนท์ซึ่งจะเกิดเป็นสีได้ สีอะโซอิกใช้ย้อมเส้นใยได้ทั้งเซลลูโลส ไนลอน หรืออะซิเตท สีอะโซอิกเป็นสีที่ทนต่อการซักแต่ไม่ทนต่อการขัดถู

7) สีแว็ต (Vat dye) เป็นสีที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ เมื่อทำการย้อมต้องเตรียมน้ำย้อมให้สีแว็ต ละลายน้ำโดยให้ทำปฏิกิริยากับสารรีดิวซ์และโซเดียมไฮดรอกไซด์สีแว็ตจะถูกรีดิวซ์ให้กลายเป็นเกลือจึงซึมเข้าไปในเส้นใยได้ เมื่อนำผ้าไปผึ่งในอากาศสีในเส้นใยจะถูกออกซิไดส์เป็นสีแว็ตสีย้อมชนิดนี้มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญอยู่ 2 ชนิด คือ สีอินดิโก (Indigoid) และสีแอนทราควินอยด์ (Antraquinoid)

8) สีมอร์แดนท์ หรือ โครม (Mordant or Chrome dye) สีย้อมชนิดนี้ต้องใช้สารช่วยติดเข้าไปช่วยเพื่อให้เกิดการติดสีบนเส้นใยสารที่ช่วยติดที่ใช้ คือสารประกอบออกไซด์ของโลหะ เช่น โครเมียม ดีบุก เหล็ก อะลูมิเนียม เป็นต้น สีมอร์แดนท์เป็นสีที่มีโมเลกุลใหญ่ซึ่งเกิดจากสีมอร์แดนท์หลายโมเลกุลจับกับโลหะแล้วละลายน้ำได้จึงทำให้ย้อมได้ง่าย ซึ่งใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนและเส้นใยพอลิเอไมด์ได้ดี

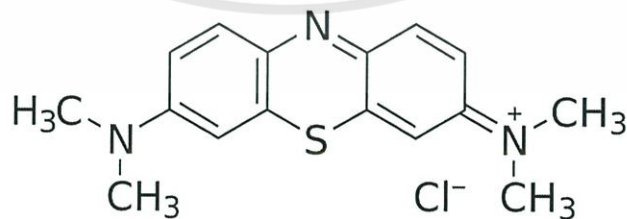
9) สีอินเกรน เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ โดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยากับน้ำสีย้อมชนิดนี้ใช้สำหรับย้อมฝ้าย

10) สีออกซิเดชัน (Oxidation dye) เป็นสีที่มีละลายน้ำโดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยาในน้ำโดยสีจะติดแน่น อาศัยปฏิกิริยาการตกตะกอนผลึกภายในเส้นใยใช้สำหรับย้อมฝ้ายและขนสัตว์

11) สีซัลเฟอร์ (Sulfer dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ เมื่อทำการย้อมต้องรีดิวส์สีเพื่อให้โมเลกุลอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้ แต่สีซัลเฟอร์บางชนิดที่ผลิตออกมาจำหน่ายในรูปที่ถูกรีดิวส์จะละลายน้ำได้ นิยมนำสีซัลเฟอร์มาย้อมฝ้ายสีจะติดทน และยังเป็นสีที่มีราคาถูกแต่สีที่อ่อนจะไม่ทนต่อการซัก

2.10.1 เมทิลีนบลู (Methylene blue, MB)

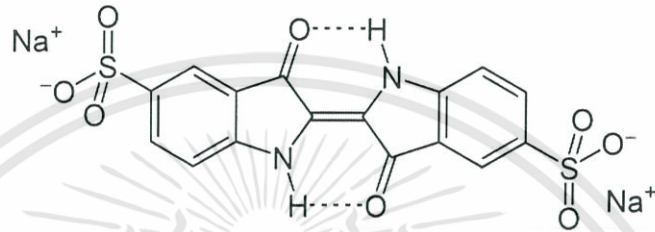
เมทิลีนบลู มีโครงสร้างเป็นแคทไอออนในสภาวะที่ให้อิออนบางส่วนประกอบที่ให้อิออน บางครั้งเรียกสีประเภทนี้ว่า สีแคทไอออนิก (Cationic dyes) มีสูตรเคมีคือ $C_{16}H_{18}N_3SCl$ เมื่อมีการปนเปื้อนในน้ำเสียจะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศดังนั้นจึงควรมีการกำจัดสีในน้ำเสียก่อนทิ้ง ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเมทิลีนบลู โดยการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงซึ่งอาศัยไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งพบว่าการกำจัดสารละลายเมทิลีนบลูทำได้ภายใต้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสง เกิดการเปลี่ยนแปลงวงเบนซีนในโครงสร้างของเมทิลีนบลูอยู่ในรูปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) แอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) และไนเตรตไอออน (NO_3^-) ส่งผลให้สีของเมทิลีนบลูจางลง



รูปที่ 2.16 โครงสร้างของเมทิลีนบลู (Methylene blue, MB)

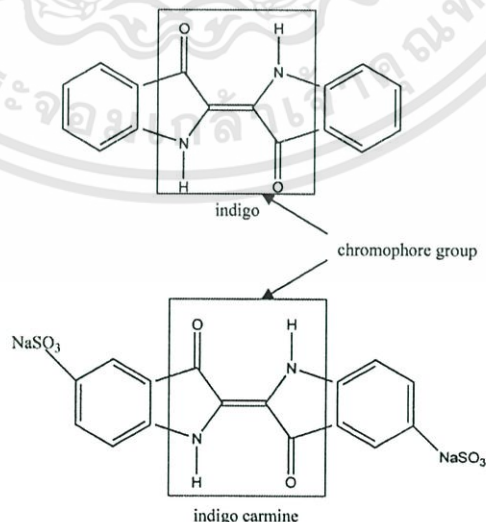
2.10.2 อินดิโกคาร์มีน (Indigo carmine, IC)

อินดิโกคาร์มีน หรือ 5,5-indigodisulfonic acid sodium salt มีโครงสร้างเป็นแอนไอออนที่มีสูตรเคมีเป็น $C_{16}H_8N_2Na_2O_8S_2$ เป็นอินดิเคเตอร์ชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถสกัดได้จากพืชในธรรมชาติ ซึ่งโดยทั่วไปจะนำไปใช้เป็นฟิเออซอินดิเคเตอร์จะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินเมื่อฟิเออซเท่ากับ 11.4 และเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเมื่อ pH เท่ากับ 13.0 และยังใช้เป็นอินดิเคเตอร์สำหรับปฏิกิริยารีดอกซ์ได้อีกด้วย โดยจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเมื่อเกิดปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังนิยมใช้เป็นสีย้อมเรียกว่า Indigo dye ซึ่งมีสีน้ำเงินเป็นหลักนำไปย้อมสีของกางเกงยีน เป็นต้น



รูปที่ 2.17 สูตรโครงสร้างของอินดิโกคาร์มีน (Indigo carmine, IC)

อินดิโกคาร์มีนนั้นมีจุดหลอมเหลวที่สูงประมาณ 390- 392 °C และมีความสามารถในการละลายน้อยมากเนื่องจากโครงสร้างของอินดิโกคาร์มีน มีพันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมต่อระหว่างโมเลกุลอย่างแข็งแรง นอกจากนี้อินดิโกคาร์มีนในสถานะของแข็งจะเกิดการรวมตัวเป็นพอลิเมอร์ โดยแต่ละโมเลกุลจะถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของอินดิโกคาร์มีนอีก 4 โมเลกุล ส่วนในสารละลายที่ไม่มีขั้วอินดิโกคาร์มีนจะเกิดเป็นมอนอเมอร์เชื่อมต่อกันระหว่างโมเลกุล และสีของสารละลายจะเป็นสีน้ำเงิน โดยสีที่เกิดขึ้นเกิดจากโครงสร้างที่เป็น H-Chromophore ประกอบด้วย C=C ที่ถูกแทนที่ด้วย NH ที่เป็น Donor group และ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เป็น Acceptor Group ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 โครงสร้างของอินดิโกคาร์มีน (Indigo carmine)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากในปัจจุบันได้มีการใช้อินดิโกคาร์มีน สีสังเคราะห์ในอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมากตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ซึ่งการที่ปล่อยสีสังเคราะห์จากอุตสาหกรรมลงสู่แหล่งน้ำนั้นจะทำให้เกิดผลกระทบมากมายต่อสภาพแวดล้อม โดยเฉพาะทางน้ำจะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศทำให้สัตว์น้ำ และพืชได้รับผลเสียเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้อินดิโกคาร์มีนจะถูกนำไปทำเป็นสีย้อมแล้วยังนำไปใช้เป็นสารเติมแต่งในแคปซูลยาและลูกกวาดที่ใส่สี โดยสามารถใช้สีของอินดิโกคาร์มีนในการวินิจฉัยบริเวณที่เซลล์เกิดความผิดปกติได้อีกด้วยถึงแม้อินดิโกคาร์มีนจะถูกเผาผลาญในร่างกายได้ยากแต่ก็สามารถถูกกรองได้ด้วยไตของมนุษย์ อินดิโกคาร์มีนถือว่าเป็นสีย้อมที่เป็นพิษชนิดหนึ่งอาจทำให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนังหรือดวงตาโดยเฉพาะเมื่อสูดดมหรือกระจกตาและร้ายแรงถึงเป็นขั้นทำให้เกิดเนื้องอกและเป็นสารก่อมะเร็งได้จึงได้มีการทดสอบการกำจัดอินดิโกคาร์มีนในสัตว์ เช่น หนู หมู และค้นคว้าวิธีการกำจัดในทางต่างๆ เพื่อที่จะได้ไม่ให้เกิดผลเสียต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมต่อไป

ในปัจจุบันจึงได้มีการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับการกำจัดอินดิโกคาร์มีนในน้ำด้วยวิธีต่างๆ มากมาย โดยเฉพาะการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมเข้าไปในวัสดุต่างๆ ทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสแล้วไปกำจัดอินดิโกคาร์มีนในของเหลวหรือของแข็ง ซึ่งการวิจัยพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสกับแสง UV สามารถกำจัดสีสังเคราะห์ที่ถูกปล่อยจากโรงงานอุตสาหกรรมได้ โดยโครงการวิจัยนี้ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสแล้วทำให้อินดิโกคาร์มีนเกิดการสลายตัวได้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide) Dagassa P25 เกรดทางการค้า
2. น้ำยางข้น (Natural rubber latex) 60 % HA บริษัท Chana Latex สงขลา ประเทศไทย
3. อินดิโกคาร์มีน (Indigo carmine, $C_{16}H_8N_2Na_2O_8S_2$) บริษัท Fluka ประเทศสหรัฐอเมริกา
4. เมทิลีนบลู (Methylene blue, $C_{16}H_{18}N_3S$) ประเทศเยอรมนี
5. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide, NH_4OH) บริษัท J.T. Baker ประเทศสหรัฐอเมริกา
6. ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (Multi-walled Carbon nanotubes) Baytube105 บริษัท Bayer ประเทศไทย
7. กรดไนตริก (Nitric acid, HNO_3) บริษัท LOBA Chemie ประเทศอินเดีย
8. กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid, H_2SO_4) บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. อุปกรณ์เครื่องแก้วต่างๆ
2. ตู้ฉายแสงยูวี (Photocatalytic apparatus)
3. (UV-Visible Spectrophotometer), SPECORD S100, บริษัท Analytik Jena GmbH ประเทศเยอรมนี
4. (X-ray Diffraction, XRD) D8 Advance Bruker AXS บริษัท Gmbh ประเทศเยอรมนี
5. (Scanning electron microscope, SEM) 1455 VP บริษัท LEO ประเทศอังกฤษ
6. (Energy Dispersive X-ray Spectrometer, EDS)
7. (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR) Nicolet 6700 บริษัท Thermo Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา
8. เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal testing machine, UTM) บริษัท LLOYD Instrument จำกัด รุ่น LR 5K
9. เครื่องชั่งแบบดิจิตอลความละเอียด 4 ตำแหน่ง รุ่น ML 204/01 ยี่ห้อ METTLER TOLEDO ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
10. ตู้ดูดควัน (Hood)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

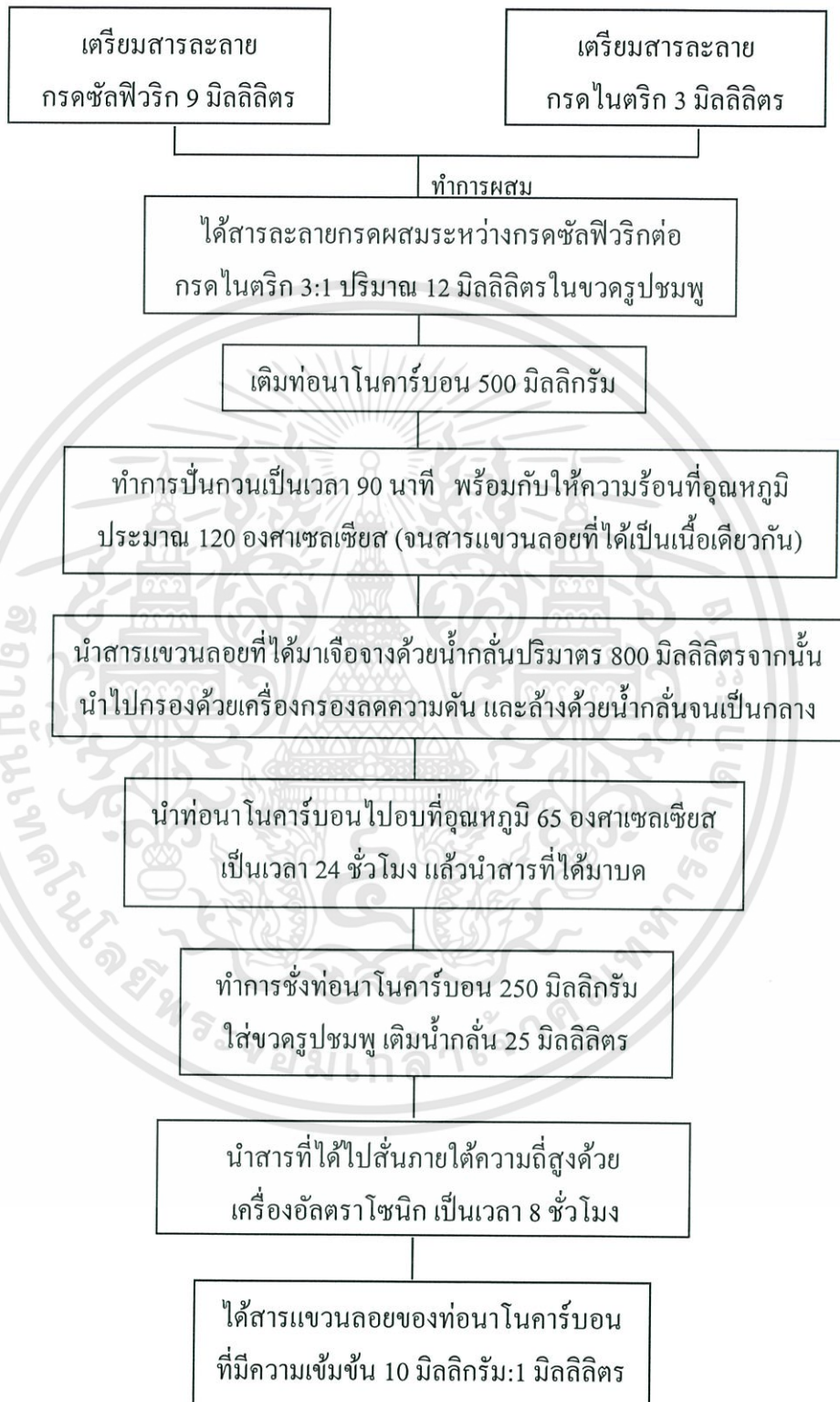
11. เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic bath)
12. เครื่องหมุนเหวี่ยง
13. เครื่องปั่นกวนแบบให้ความร้อน
14. แท่งแม่เหล็ก
15. ไมโครปิเปต
16. เตาอบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

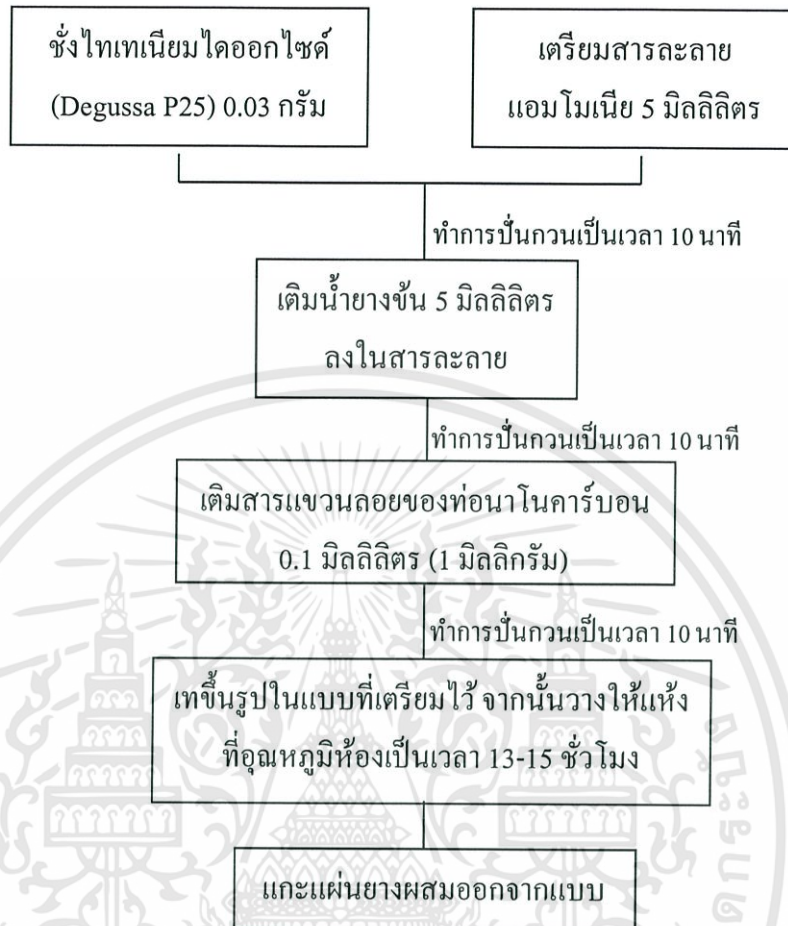
3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมสารแขวนลอย (Suspension) ของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2. การเตรียมแผ่นยางไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น



ในส่วนของการเติมสารแขวนลอยท่อนาโนคาร์บอน ให้ปรับปริมาณการเติมท่อนาโนคาร์บอนเป็น 0.2, 0.3, 0.5 มิลลิลิตร ซึ่งมีปริมาณท่อนาโนคาร์บอนเท่ากับ 2, 3, 5 มิลลิกรัม แล้วทำการทดลองด้วยวิธีเดียวกัน ก็จะได้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น

3.3.3 ศึกษาคุณลักษณะแผ่นยางไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น

1. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)

การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR เป็นหนึ่งในเทคนิคทางด้าน Infrared Spectroscopic ที่มีประสิทธิภาพในการจำแนกประเภทของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และพันธะเคมีในโมเลกุล รวมทั้งสามารถบอกถึงปริมาณองค์ประกอบที่มีอยู่ในโมเลกุลของสารผสมตัวอย่างที่ไม่ทราบชนิด สามารถวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน และหาสารที่ปนเปื้อนอยู่ในสารตัวอย่างว่ามีอะไรบ้างโดยอาศัยการดูดกลืนคลื่นอินฟราเรดที่แตกต่างกัน ซึ่งแต่ละชนิดจะมีการดูดกลืนคลื่นอินฟราเรดในช่วงความยาว

คลื่น 4000 ถึง 400 cm^{-1} เทคนิค FT-IR นี้มีความไวสูง ใช้ระยะเวลาในการตรวจสอบน้อยกว่าเทคนิคอื่นๆ

2. X-ray Diffraction (XRD)

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยสามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณหาปริมาณขององค์ประกอบต่างๆ ที่อยู่ในตัวอย่าง คำนวณหาขนาดอนุภาคของแต่ละหน่วยเซลล์ ความเครียดของสารตัวอย่าง และหาค่าความเป็นผลึกของสารตัวอย่างได้อีกด้วย

3. Scanning Electron Microscope (SEM)

วิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM ใช้ในการศึกษาสัณฐานวิทยาและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น ซึ่ง SEM เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร การสร้างภาพของเครื่อง SEM ทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จะเป็นภาพลักษณะเป็น 3 มิติ

4. Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDS)

วิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDS ใช้ในการศึกษาการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ Qualitative Analysis คือการวิเคราะห์หาว่าตัวอย่างที่เราวิเคราะห์มีธาตุอะไรบ้าง สามารถวิเคราะห์ได้ตั้งแต่ธาตุ B โบรอน - U ยูเรเนียม การวิเคราะห์เชิงปริมาณ Quantitative Analysis คือการวิเคราะห์หาว่าตัวอย่างที่เราวิเคราะห์มี ร้อยละธาตุอยู่ปริมาณเท่าไร โดยสามารถวิเคราะห์หา ร้อยละออกมาได้

3.3.4 ทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นยางไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมท่อนาโนคาร์บอนแบบผงหลายชั้น

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

3.3.5 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมแผ่นยางไททาเนียมไดออกไซด์ผสมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น

เตรียมสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มีนให้มีความเข้มข้น 2.0×10^{-5} โมลาร์

เตรียมสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูให้มีความเข้มข้น 2.5×10^{-5} โมลาร์

นำแผ่นยางผสมที่เตรียมได้จากการทดลอง 3.3.3 ไปใส่ในงานเพาะเชื้อ (Petri dish)
จากนั้นนำไปใส่ในตู้ไฟโคกะตะลิสต์

นำสารละลายสีย้อมที่เตรียมได้ 60 มิลลิลิตร เทใส่ในงานเพาะเชื้อ
เปิดไฟเพื่อฉายแสงในตู้เพื่อเร่งปฏิกิริยา

เก็บตัวอย่างสารละลายสีย้อม จำนวน 3 มิลลิลิตร
ทุกๆ 30 นาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

นำสารละลายตัวอย่างสีย้อมที่เก็บไป
วัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible

คำนวณหา ร้อยละการกำจัดสีย้อม

3.3.6 ศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานซ้ำของแผ่นยางไททาเนียมไดออกไซด์ผสมท่อนาโนคาร์บอน

ผู้วิจัยเลือกเงื่อนไขที่เติมท่อนาโนคาร์บอนปริมาณ 2 มิลลิกรัม จากนั้นจะนำไปทดลองซ้ำเพื่อดูประสิทธิภาพของการกำจัดสีย้อมรวมทั้งสมบัติเชิงกลของแผ่นยางไททาเนียมไดออกไซด์ผสมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น

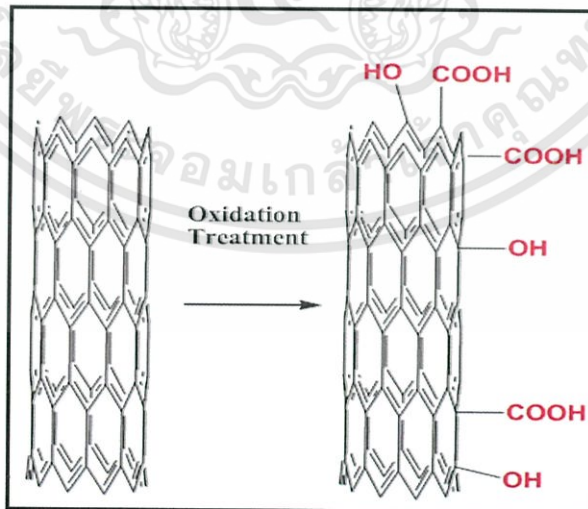
บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

ศึกษาการเตรียมแผ่นไทเทเนียม ไดออกไซด์ (TiO_2) บนชั้นสเตรททางธรรมชาติร่วมกับการเติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (WMCNTs) เพื่อวิเคราะห์พิกัดลักษณะและประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมสังเคราะห์ โดยการเปรียบเทียบปริมาณท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นที่เติมในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ 0, 1, 2, 3 และ 5 มิลลิกรัม ซึ่งในบทนี้ได้นำเสนอผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการเตรียมแผ่นไทเทเนียม ไดออกไซด์ที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น ได้แก่ 1.การตรวจสอบการสั่นของโมเลกุล (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) 2.เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction) 3.การทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) 4.การวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-ray Spectrometer) ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลโดยใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Tensile Test) และผลการศึกษาการกำจัดสีย้อม 2 ชนิด ได้แก่ สีย้อมเมทิลีนบลู (Methylene blue) และสีย้อมอินดิโกคาร์มีน (Indigo carmine) โดยมีรายละเอียดตามลำดับดังต่อไปนี้

4.1 ผลการเตรียมสารแขวนลอยของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น

การทดลองปรับสภาพท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นด้วยวิธี Acid treatment โดยใช้กรดผสมระหว่างกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) และกรดไนตริก (HNO_3) ในสัดส่วน 3:1

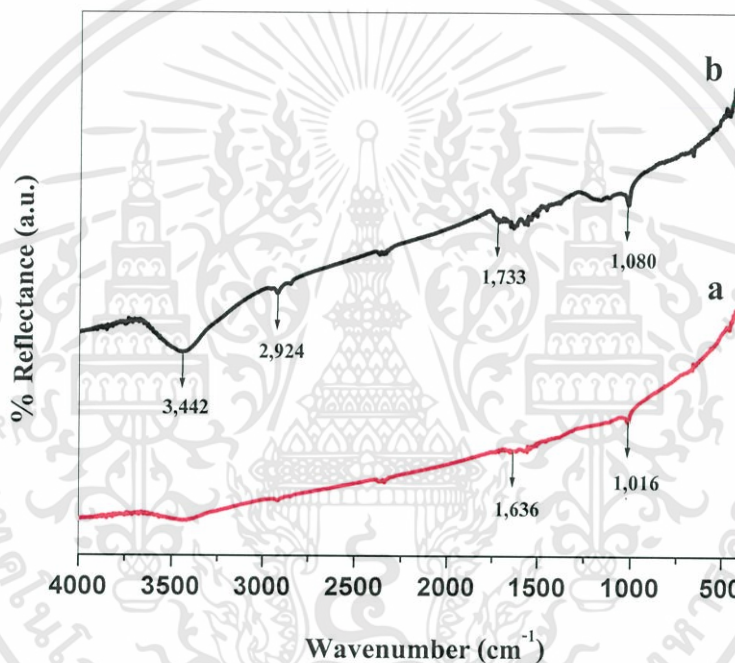


รูปที่ 4.1 ท่อนาโนคาร์บอนที่มีการสร้างหมู่ฟังก์ชันแสดงการยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของน้ำและท่อนาโนคาร์บอนที่มีหมู่คาร์บอกซิลมาเกาะ[22]

เมื่อนำท่อานาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นก่อนและหลังปรับสภาพไปทดสอบการกระจายตัวในน้ำ พบว่าท่อานาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นหลังการปรับสภาพสามารถกระจายตัวในน้ำได้ดี เนื่องจากมีหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) หมู่คาร์บอนิล (-CO) และหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ซึ่งหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวมีโมเลกุลที่มีสภาพขั้ว โมเลกุลสูงจึงทำให้ท่อานาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นหลังการปรับสภาพสามารถละลายน้ำได้

4.1.1 Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR)

การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันและวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของท่อานาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นก่อนและหลังการปรับสภาพด้วยวิธี Acid treatment



รูปที่ 4.2 กราฟ FT-IR spectra ของท่อานาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (a) ก่อนปรับสภาพ (b) หลังปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) และกรดไนตริก (HNO_3) ในสัดส่วน 3:1

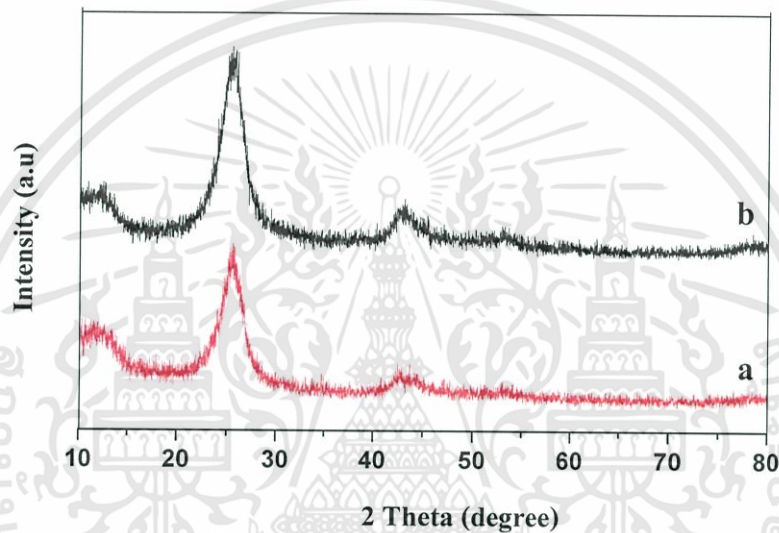
จากรูปที่ 4.2 แสดงการสั่นของท่อานาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นหลังผ่านการปรับสภาพด้วยวิธี Acid treatment พบรูปแบบการสั่นที่เลขคลื่น $1,733\text{ cm}^{-1}$ และ $1,400\text{ cm}^{-1}$ ของพันธะ C=O ของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิล แถบการสั่นที่เลขคลื่น $3,442\text{ cm}^{-1}$ ของพันธะ O-H หมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล ซึ่งจะเห็นพีกที่มีลักษณะที่กว้างกว่าท่อานาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นก่อนการปรับสภาพ นอกจากนี้ยังพบแถบการสั่นของที่เลขคลื่น $1,080\text{ cm}^{-1}$ และ $1,300\text{ cm}^{-1}$ ของพันธะ C-O ส่วนพันธะ C-C พบได้ทั้งในท่อานาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นก่อนการปรับสภาพและหลังปรับสภาพ จากผลดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่าท่อานาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นหลังการปรับสภาพพบโมเลกุลที่มีสภาพขั้วโมเลกุลสูงได้แก่ หมู่คาร์บอกซิล (-COOH) หมู่คาร์บอนิล (-CO) และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) จึงส่งผลให้ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นหลังการปรับสภาพมีความสามารถในกระจายตัวในน้ำได้ดี ซึ่งเป็นผลจากการมีหมู่มาเกาะจำพวกหมู่ที่ชอบน้ำมากขึ้น [23]

4.1.2 X-ray diffraction (XRD)

การวิเคราะห์ลักษณะผลึกและออสัญฐานด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction technique) เป็นเทคนิคที่อาศัยการเลี้ยวเบน และการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ภายในเนื้อวัสดุโดยการวิเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นทั้งก่อนและหลังการปรับสภาพ

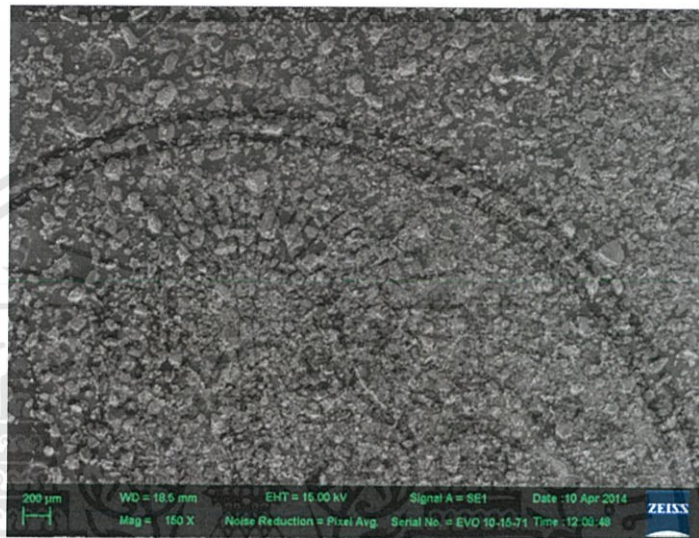


รูปที่ 4.3 รูปแบบ XRD ของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (a) ก่อนการปรับสภาพ (b) หลังปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) และกรดไนตริก (HNO_3) ในสัดส่วน 3:1

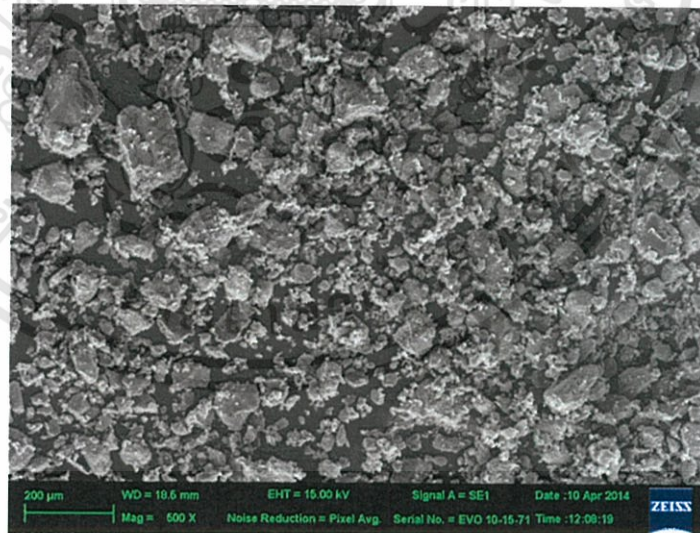
จากรูปที่ 4.3 รูปแบบ XRD ของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นทั้งก่อนและหลังปรับสภาพพบพิกัดหลัก (2θ) เท่ากันทั้ง 2 กรณีคือ $26.47^\circ(002)$ และ $42.58^\circ(100)$ ซึ่งเป็นมุมการเลี้ยวเบนของท่อนาโนคาร์บอน จึงพิจารณาได้ว่าการปรับสภาพด้วยวิธี Acid treatment โดยใช้กรดผสมระหว่างกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) และกรดไนตริก (HNO_3) ในสัดส่วน 3:1 เป็นเพียงการสร้างหมู่ฟังก์ชันให้แก่ท่อนาโนคาร์บอนแต่ไม่ได้ทำลายความเป็นผลึกของคาร์บอน ซึ่งผลดังกล่าวนี้ตรงกับข้อมูลมาตรฐาน [22]

4.1.3 Scanning Electron Microscopy (SEM)

การทดสอบด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy เพื่อศึกษาวิเคราะห์ลักษณะ
 สัณฐานของท่อนาโนคาร์บอนระดับจุลภาคโดยการวิเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น
 ทั้งก่อนและหลังการปรับสภาพ ซึ่งมีผลดังต่อไปนี้ ก่อนการปรับสภาพที่กำลังขยาย 150 เท่า รูปที่
 4.4 (a1), กำลังขยาย 500 เท่า รูปที่ 4.4(a2)



(a1)



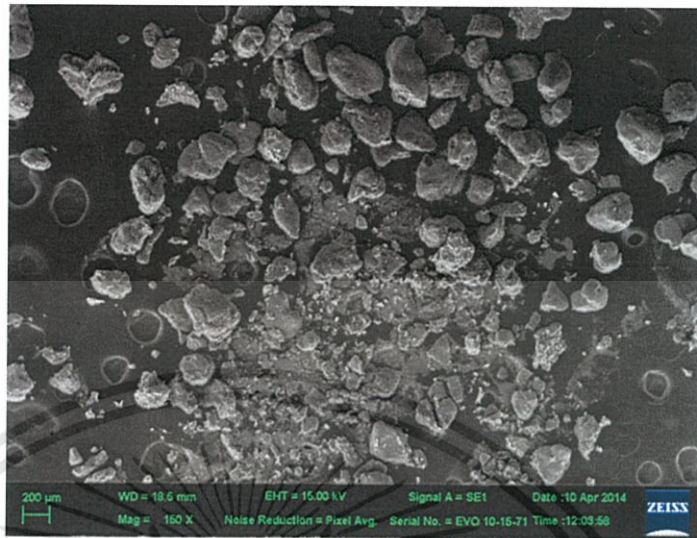
(a2)

รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM ของท่อนาโนคาร์บอนก่อนการปรับสภาพ

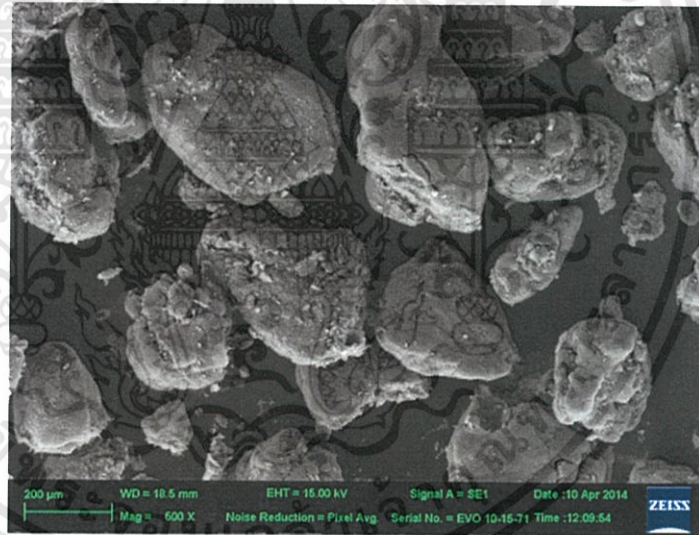
(a1) top view กำลังขยาย 150 เท่า (a2) top view กำลังขยาย 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพSEM หลังการปรับสภาพที่กำลังขยาย 150 เท่า รูปที่ 4.5 (b1) กำลังขยาย 500 เท่า รูปที่ 4.5 (b2)



(b1)



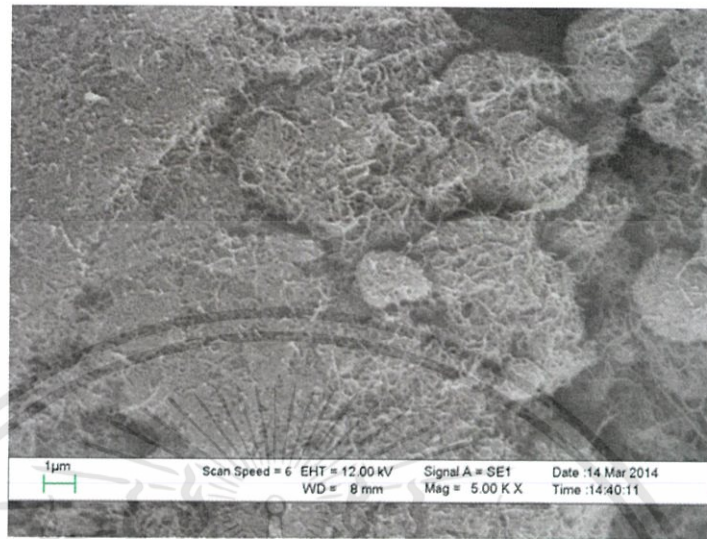
(b2)

รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM ของท่อนาโนคาร์บอนหลังการปรับสภาพ

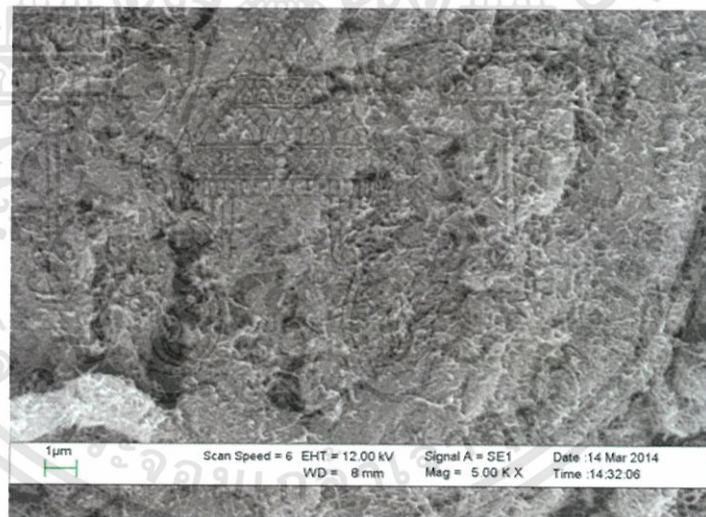
(b1) top view กำลังขยาย 150 เท่า (b2) top view กำลังขยาย 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และภาพ SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า ก่อนการปรับสภาพ รูปที่ 4.6 (a3) และหลังการปรับสภาพ รูปที่ 4.6 (b3) ตามลำดับ



(a3)



(b3)

รูปที่ 4.6 ภาพ SEM ของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น

(a3) ก่อนปรับสภาพ กำลังขยาย 5,000 เท่า (b3) หลังปรับสภาพ กำลังขยาย 5,000 เท่า

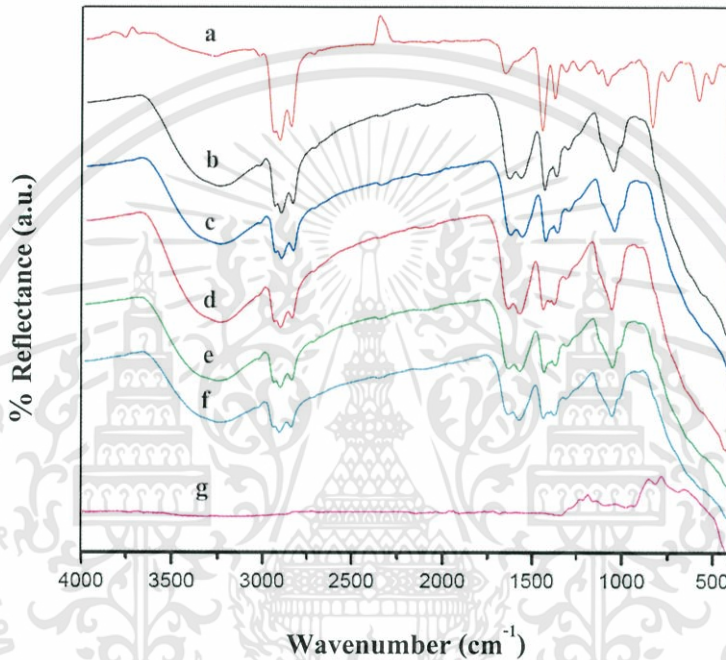
จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ดังรูป 4.6 จะเห็นว่าท่อนาโนคาร์บอนหลังการปรับสภาพนั้นจะทำให้ท่อนาโนคาร์บอนเกิดการกระจายตัวมากขึ้น โดยที่โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนไม่ถูกทำลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การศึกษาเอกลักษณ์ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และการเติมท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณที่แตกต่างกัน

4.2.1 Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR)

การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันและวิเคราะห์โครงสร้างประกอบทางเคมีของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และการเติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นหลังการปรับสภาพด้วยวิธี Acid-treatment ในปริมาณต่างๆ ดังรูปต่อไปนี้

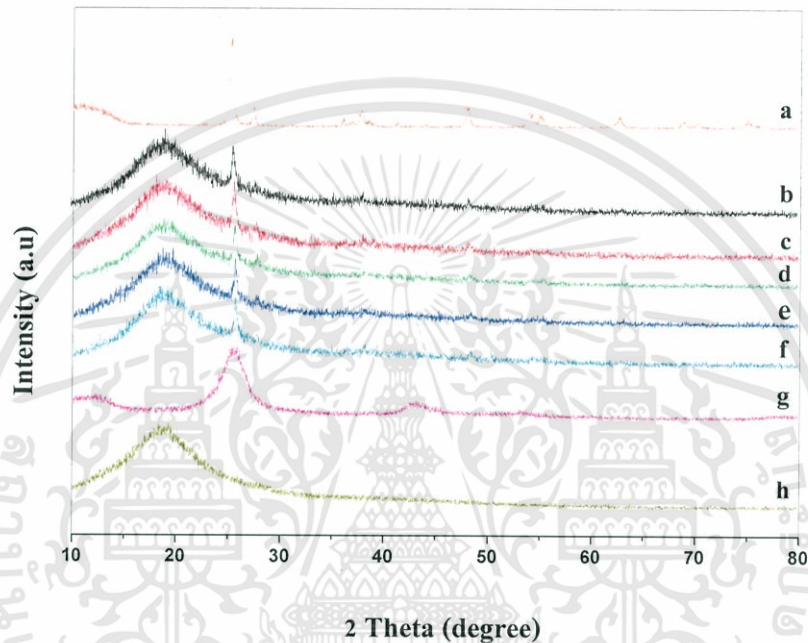


รูปที่ 4.7 กราฟ FT-IR spectra ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (a) ยางเปล่า (b) แผ่นยางผสม TiO_2 (c) แผ่นยางผสม TiO_2 -MWCNTs 1 mg (d) แผ่นยางผสม TiO_2 -MWCNTs 2 mg (e) แผ่นยางผสม TiO_2 -MWCNTs 3 mg (f) แผ่นยางผสม TiO_2 -MWCNTs 5 mg (g) TiO_2 -P25 Powder

จากรูปที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR พบแถบการสั่นของเลขคลื่นที่ $3,200 \text{ cm}^{-1}$ และ $1,600 \text{ cm}^{-1}$ ที่มีลักษณะการสั่นแบบโค้งงอ (Bending) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงของพันธะ O-H ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ในระหว่างการเตรียมแผ่นยาง พบแถบการสั่นของเลขคลื่นที่ $1,000 \text{ cm}^{-1}$ ถึง 500 cm^{-1} ของ Ti-O และพบที่แถบการสั่นที่เลขคลื่น $1,300 \text{ cm}^{-1}$ ถึง $1,700 \text{ cm}^{-1}$ ของ TiO_2 -MWCNTs [24]

4.2.2 X-ray diffraction (XRD)

การวิเคราะห์ลักษณะผลึกและออสัณฐานด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction technique) เป็นเทคนิคที่อาศัยการเลี้ยวเบน และการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ภายในเนื้อวัสดุ โดยการวิเคราะห์แผ่นยางไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมท่อนาโนคาร์บอน



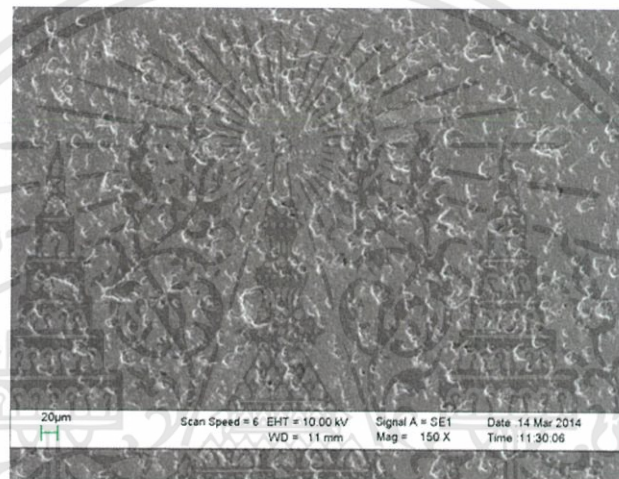
รูปที่ 4.8 รูปแบบ XRD ของ (a)TiO₂-P25 Powder (b)แผ่นยางผสม TiO₂ (c)แผ่นยางผสมTiO₂-MWCNTs 1 mg (d)แผ่นยางผสมTiO₂-MWCNTs 2 mg (e)แผ่นยางผสมTiO₂-MWCNTs 3 mg (f)แผ่นยางผสม TiO₂-MWCNTs 5 mg (g) MWCNTs ที่ผ่านการปรับสภาพ และ (h)ยางเปล่า

จากรูปที่ 4.8 ผลการศึกษาลักษณะ โครงสร้างของแผ่นยางผสมด้วย XRD พบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มุมการเลี้ยวเบน $2\theta = 25^\circ$ (101) (anatase) และ $2\theta = 27.5^\circ$ (110) (rutile) ซึ่งเป็นมุมเลี้ยวเบนของTiO₂และพบการเลี้ยวเบนที่ $2\theta = 26^\circ$ (002) PPF#894921, Wavelength = 1.54060(A) เป็นการเลี้ยวเบนของ MWCNTs แต่เนื่องจากมีค่าการเลี้ยวเบนระหว่าง TiO₂ และMWCNTs ใกล้เคียงกันจึงทำให้เห็นพีคอาจเกิดการซ้อนทับกัน และที่มุมการเลี้ยวเบนที่ ช่วง $2\theta = 19^\circ$ [25] เป็นค่าการเลี้ยวเบนของยางผสมจากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวอธิบายได้ว่าเมื่อทำการผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และท่อนาโนคาร์บอนลงในน้ำยางชั้นที่เป็นชั้นเตรทเพื่อนำมาขึ้นรูปเป็นแผ่นยางแล้วเมื่อนำแผ่นยางชั้นเตรทมาทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD นั้นพบค่าความเป็นผลึกของทั้งไทเทเนียมไดออกไซด์ และท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น

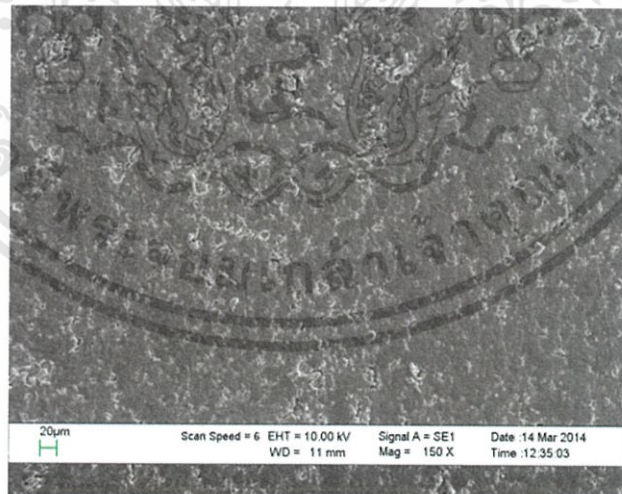
4.2.3 Scanning Electron Microscopy (SEM)

การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่นยางไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมท่อนาโนคาร์บอนระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด Scanning Electron Microscopy โดยทำการวัดที่กำลังขยาย 150 และ 500 เท่า ซึ่งมีผลดังต่อไปนี้

ที่กำลังขยาย 150 เท่า ทำการศึกษาจำนวน 5 ตัวอย่าง คือ แผ่นยางผสมที่ไม่เติมท่อนาโนคาร์บอน รูปที่ 4.9(a), แผ่นยางผสมTiO₂-MWCNTs 1 มิลลิกรัม รูปที่ 4.9(b), แผ่นยางผสมTiO₂-MWCNTs 2 มิลลิกรัม รูปที่ 4.9(c), แผ่นยางผสม TiO₂-MWCNTs 3 มิลลิกรัม รูปที่ 4.9(d) และแผ่นยางผสมTiO₂-MWCNTs 5 มิลลิกรัม รูปที่ 4.9(e)

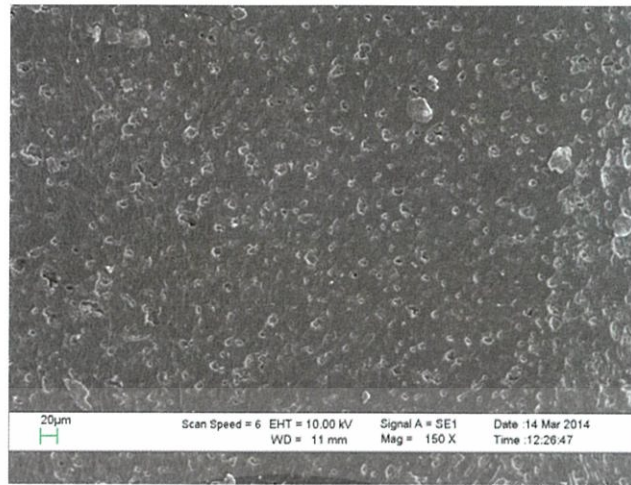


(a)

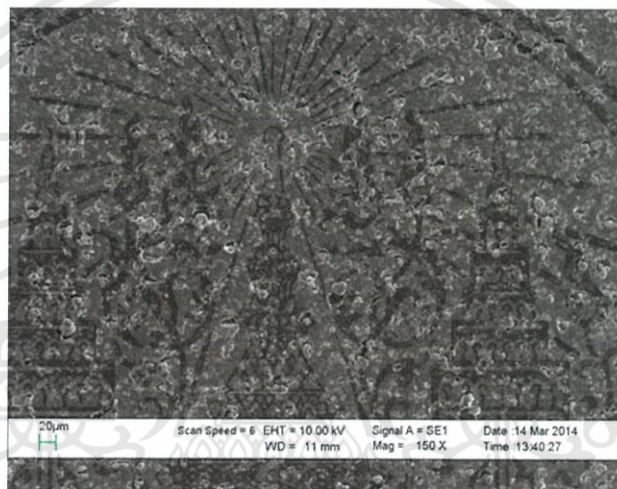


(b)

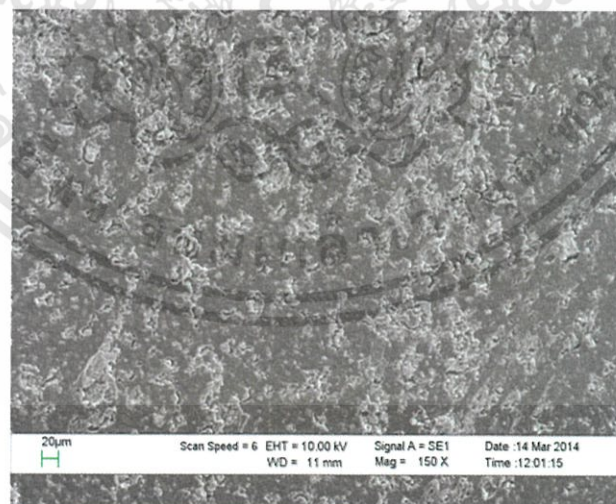
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c)



(d)

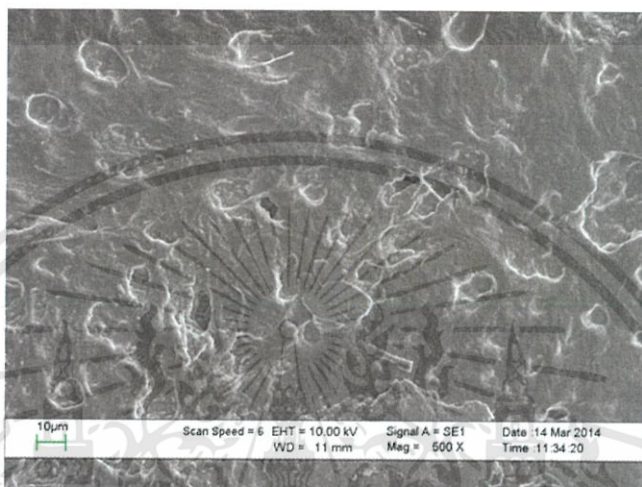


(e)

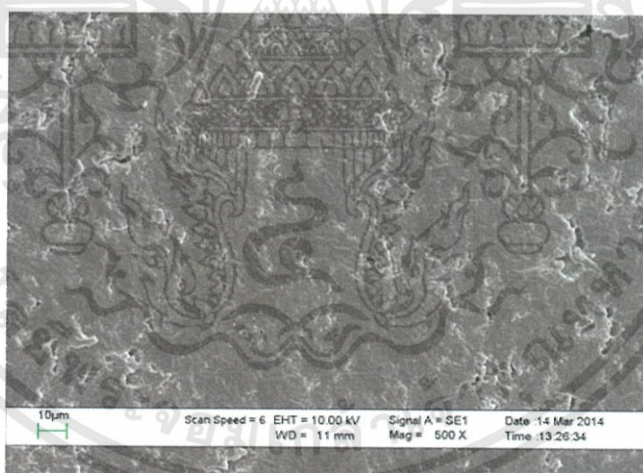
รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM กำลังขยาย 150 เท่า (a) แผ่นยางผสมที่ไม่เติมท่อนาโนคาร์บอน (b) แผ่นยางผสมTiO₂-MWCNTs 1 mg (c) แผ่นยางผสมTiO₂-MWCNTs 2 mg (d) แผ่นยางผสมTiO₂-MWCNTs 3 mg (e) แผ่นยางผสมTiO₂-MWCNTs 5 mg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า ทำการศึกษาจำนวน 5 ตัวอย่าง คือ แผ่นยางผสมที่ไม่เติม ท่อนาโนคาร์บอน รูปที่ 4.10(a), แผ่นยางผสมTiO₂-MWCNTs 1 มิลลิกรัม รูปที่ 4.10 (b), แผ่นยางผสมTiO₂-MWCNTs 2 มิลลิกรัม รูปที่ 4.10 (c), แผ่นยางผสมTiO₂-MWCNTs 3 มิลลิกรัม รูปที่ 4.10(d) และแผ่นยางผสมTiO₂-MWCNTs 5 มิลลิกรัมรูปที่ 4.10(e)

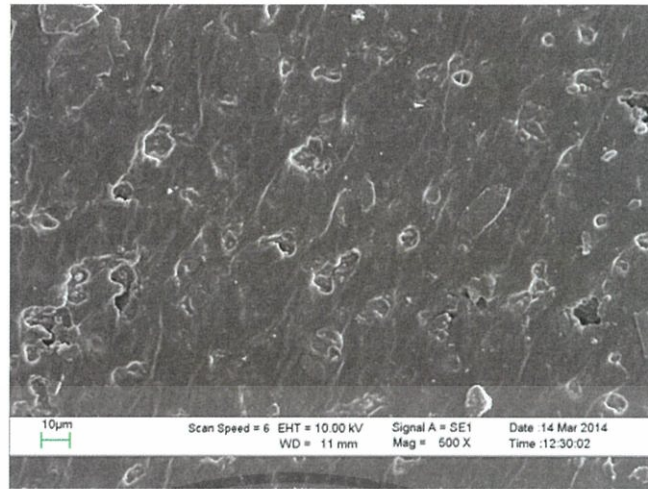


(a)



(b)

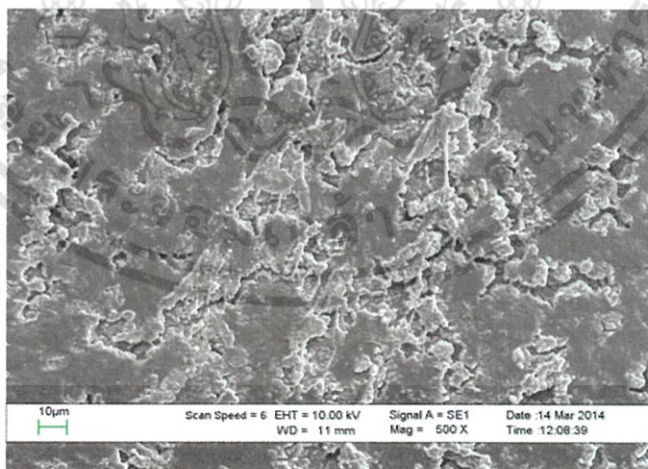
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c)



(d)



(e)

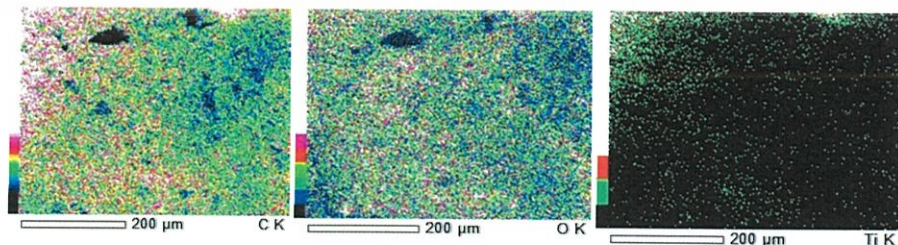
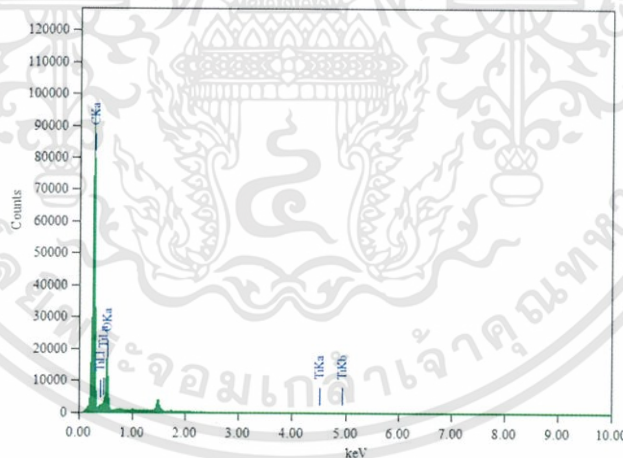
รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM กำลังขยาย 500 เท่า (a) แผ่นยางผสมที่ไม่เติมท่อนาโนคาร์บอน (b) แผ่นยางผสมTiO₂-MWCNTs 1 mg (c) แผ่นยางผสมTiO₂-MWCNTs 2 mg (d) แผ่นยางผสมTiO₂-MWCNTs 3 mg (e) แผ่นยางผสมTiO₂-MWCNTs 5 mg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อศึกษาลักษณะของแผ่นยางไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมท่อนาโนคาร์บอน จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าแผ่นยางโดยทั่วไปมีความขรุขระ ซึ่งมีท่อนาโนคาร์บอนและไทเทเนียมไดออกไซด์มีการกระจายตัวในทางธรรมชาติ เกรนของไทเทเนียมไดออกไซด์มีลักษณะเป็นเม็ดที่มีขนาดไม่แน่นอน ในขณะที่เกรนของท่อนาโนคาร์บอนที่กำลังขยาย 5,000 เท่า จะมีลักษณะเป็นเส้นเล็กฝอย ดังรูป 4.6 และพบว่าเมื่อผสมท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณมากเกินไปจะทำให้จับกลุ่มกัน ทำให้ท่อนาโนคาร์บอนบดบังอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการจัดสีย้อมลดลงได้

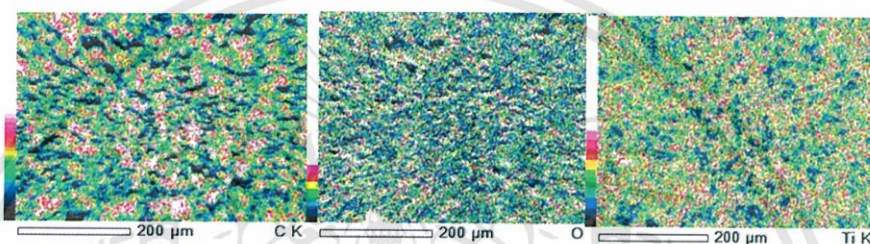
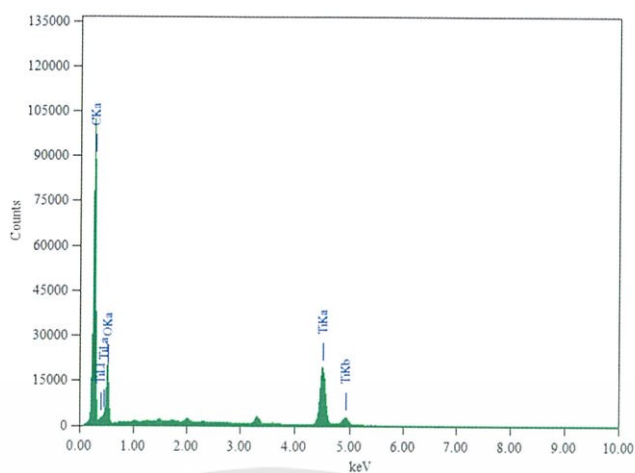
4.2.4 Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)

ในการศึกษาองค์ประกอบของธาตุทางเคมีของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นในปริมาณ 1, 2 และ 5 มิลลิกรัม รวมทั้งแผ่นยางเปล่า จะวิเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโทรสโกปีพลังงานกระจาย (Energy Dispersive Spectroscopy) ซึ่งมีผลดังต่อไปนี้ การแสดงสเปกตรัมองค์ประกอบธาตุแบบพื้นที่ของแผ่นยางธรรมชาติ รูปที่ 4.11, การแสดงสเปกตรัมองค์ประกอบธาตุแบบพื้นที่ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นในปริมาณ 1, 2, และ 5 มิลลิกรัม แสดงในรูปที่ 4.12, 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ

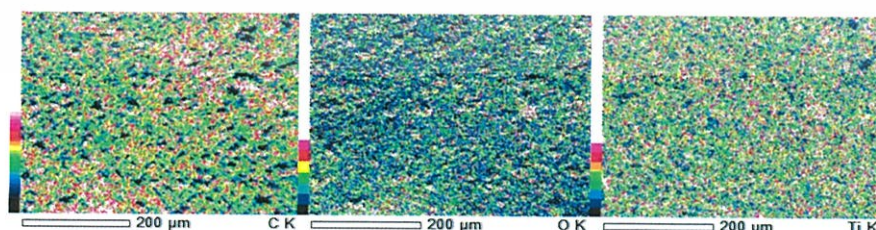
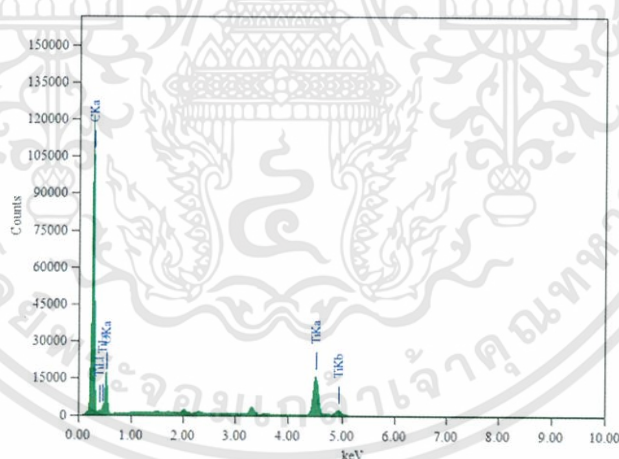


รูปที่ 4.11 แสดงสเปกตรัมองค์ประกอบธาตุแบบพื้นที่ของแผ่นยางธรรมชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

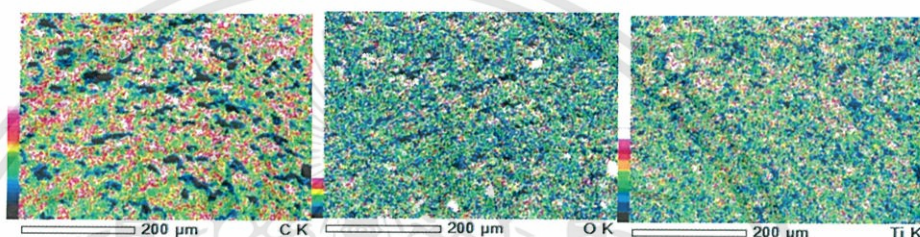
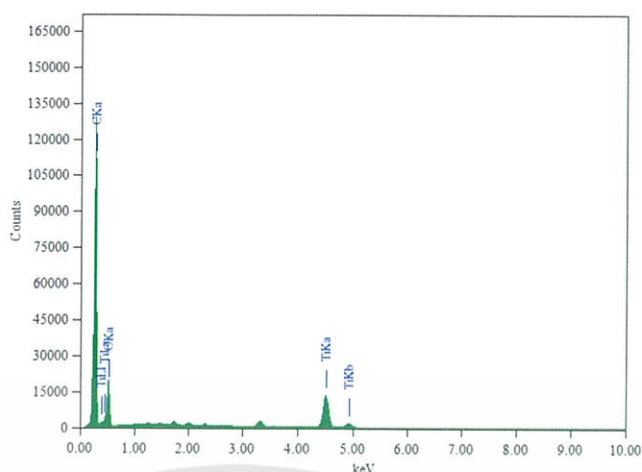


รูปที่ 4.12 แสดงสเปกตรัมองค์ประกอบธาตุแบบพื้นที่ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นในปริมาณ 1 mg



รูปที่ 4.13 แสดงสเปกตรัมองค์ประกอบธาตุแบบพื้นที่ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นในปริมาณ 2 mg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 แสดงสเปกตรัมองค์ประกอบธาตุแบบพื้นผิวของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นในปริมาณ 5 mg

จากรูปที่ 4.11- 4.14 แสดงสเปกตรัมการกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์ (EDS) ของแผ่นยางไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นในปริมาณ 1, 2 และ 5 มิลลิกรัม รวมทั้งแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งพบธาตุไทเทเนียม(Ti) ออกซิเจน(O) และพบธาตุคาร์บอน(C) ซึ่งการปรากฏของธาตุคาร์บอนเป็นของยางธรรมชาติที่มีคาร์บอนอยู่ในโครงสร้าง รวมทั้งการเติมท่อนาโนคาร์บอนลงไปด้วยกล่าวคือเมื่อเปรียบเทียบปริมาณท่อนาโนคาร์บอนที่เติมลงไปพบว่าฟีดของไทเทเนียมไดออกไซด์ลดลงตามการเพิ่มของปริมาณท่อนาโนคาร์บอนเนื่องจากคาร์บอนกระจายตัวหนาแน่นทำให้ไปปกคลุมหรือเคลือบไทเทเนียมอยู่ซึ่งทำให้เห็นบริเวณเป็นพื้นที่สีดำ เมื่อเพิ่มปริมาณท่อนาโนคาร์บอนมากซึ่งสอดคล้องกับ FT-IR spectra

4.3 การทดสอบความแข็งแรงดึงของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และการเติมท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณที่แตกต่างกัน (Tensile Test)

เป็นการศึกษาความแข็งแรงและความยืดหยุ่นของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น และหาความสัมพันธ์ของสมบัติเชิงกลกับแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น โดยปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนที่เติมคือ 1, 2, 3 และ 5 มิลลิกรัม ซึ่งมีผลดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าการทดสอบการดึงแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นที่ปริมาณต่างๆ

ปริมาณ MWCNTs ที่เติม	Stiffness (N/m)			Young's Modulus (MPa)		
	1	2	เฉลี่ย	1	2	เฉลี่ย
0 mg	48.982	48.715	48.849	0.458	0.491	0.475
1 mg	50.045	51.397	50.721	0.563	0.344	0.504
2 mg	68.616	71.458	70.037	0.717	0.721	0.719
2 mg (ซ้ำ 5 ครั้ง)	79.894	81.972	80.933	1.792	1.716	1.704
3 mg	70.202	71.547	70.784	0.889	0.821	0.855
5 mg	79.972	76.846	78.409	0.998	0.987	0.992

ปริมาณ MWCNTs ที่เติม	Load at Break (N)			Stress at Break (MPa)		
	1	2	เฉลี่ย	1	2	เฉลี่ย
0 mg	1.482	1.411	1.447	0.634	0.683	0.66
1 mg	2.549	2.721	2.635	0.868	0.904	1.32
2 mg	5.019	5.022	5.021	1.325	1.284	1.30
2 mg (ซ้ำ 5 ครั้ง)	6.483	6.380	6.432	1.572	1.594	1.58
3 mg	5.073	5.114	5.143	1.447	1.460	1.45
5 mg	5.057	5.028	5.042	1.310	1.349	1.33

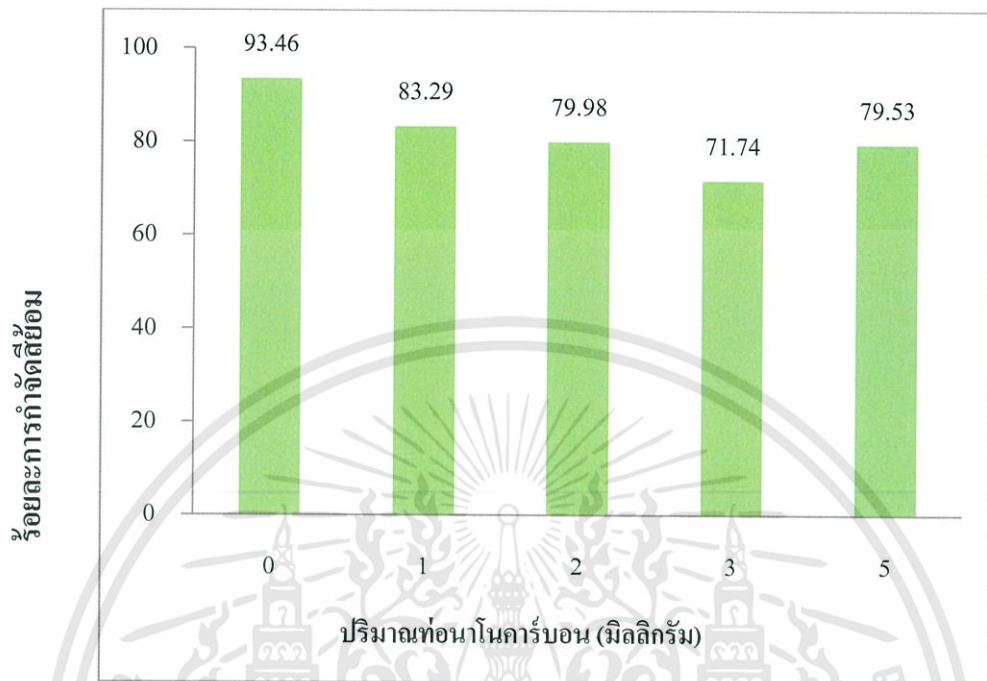
จากตารางที่ 4.1 พบว่าเมื่อเติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นในแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ทนต่อแรงดึงมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นยางผสมไทเทเนียมที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นในปริมาณที่น้อยกว่า (1, 2, 3 มิลลิกรัม) เพราะเมื่อมีการเติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นมากขึ้นมากจนเกินไปจะส่งผลให้ท่อนาโนคาร์บอนกระจายไม่ดีเกิดการจับกลุ่มเป็นก้อน ซึ่งจะเห็นได้จากภาพ SEM

เมื่อพิจารณาค่ายังโมดูลัส (Young's modulus) และค่าความแข็งแรง (Stiffness) ของแผ่นยางผสมซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุที่ต้องการทดสอบ พบว่าแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นในปริมาณ 5 มิลลิกรัม มีค่าสูงสุด คือ 0.992 MPa และ 78.409 N/m ตามลำดับ และยังพบว่าค่าแรงดึง ณ จุดขาด (Load at break) และค่าความเค้น ณ จุดขาด (Stress at break) มีค่าสอดคล้องกัน [26] ซึ่งเมื่อเติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นจะทำให้มีค่ายังโมดูลัสเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการเติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นในปริมาณที่มากเกินไปจะเกิดการจับกันเป็นกลุ่มก้อนและเกิดการเคลื่อนที่ไปมาได้ง่าย เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนมาอยู่ใกล้กันจะมีแรงกระทำต่อกันเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์จึงส่งผลทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงลดลง

4.4 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมโดยใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลติกของแผ่นยางไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมท่อนาโนคาร์บอน

การทดลองนี้เป็นการกำจัดสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกโดยทำการกำจัดสีย้อม 2 ชนิดคือ สีย้อมเมทิลีนบลู (Methylene blue, MB) และสีย้อมอินดิโกคาร์มีน (Indigo carmine, IC) ทำการทดลองเตรียมแผ่นยางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณ 1, 2, 3 และ 5 มิลลิกรัม และวางแผ่นยางผสมบนจานเพาะเชื้อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร เติมสีย้อมประมาณ 60 มิลลิลิตรนำเข้าตู้โฟโต (Photocatalytic apparatus) และทำการเก็บตัวอย่างสีย้อมปริมาณ 3 มิลลิลิตรทุกๆ 30 นาทีเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำสีย้อมมาทำการวัดค่าดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer เพื่อหาปริมาณการเติมท่อนาโนคาร์บอนที่เหมาะสมซึ่งผลการทดลองมีดังนี้

4.4.1 ผลการทดลองการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นยางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณต่างๆ

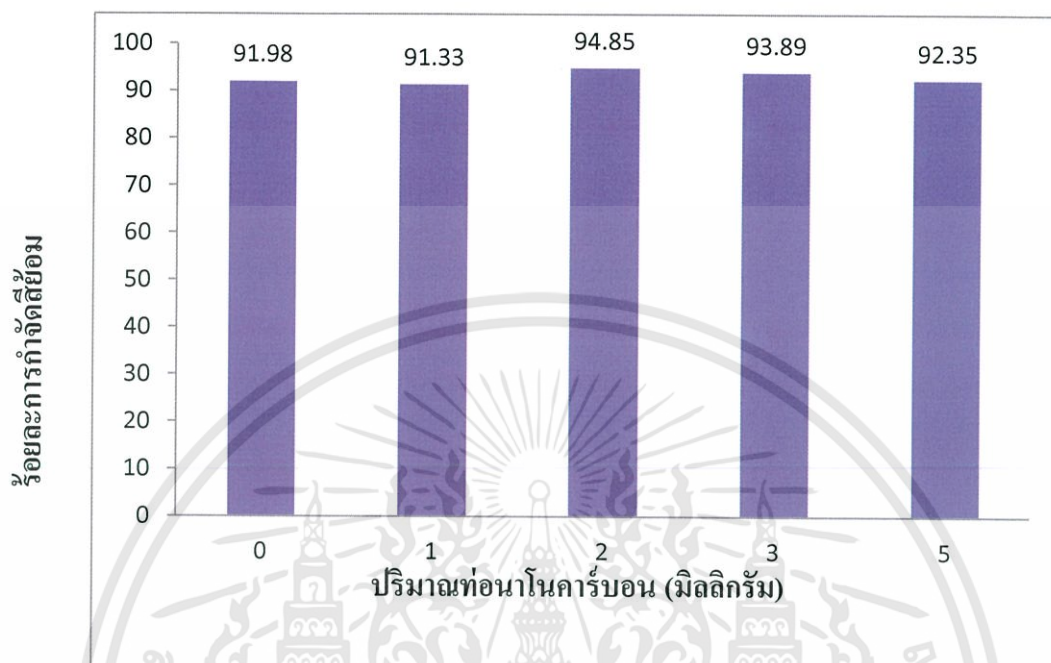


รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีย้อม MB กับ MWCNTs ที่ปริมาณต่างๆ

รูปที่ 4.15 อธิบายได้ว่าการทดลองกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูโดยกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ได้ค่าร้อยละของการกำจัดสีย้อมสูงสุดเมื่อเติมปริมาณท่อนาโนคาร์บอน 0, 1, 2, 5 และ 3 มิลลิกรัม ในนาที่ที่ 180 โดยมีค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูเท่ากับ 93.46, 83.29, 79.9, 79.53 และ 71.74 ตามลำดับ

จากผลการทดลองดังกล่าวสรุปได้ว่า การเติมท่อนาโนคาร์บอนลงในแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ส่งผลให้ค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูมีค่าน้อยลง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่ MWCNTs เข้าไปบดบังการทำงานของไทเทเนียมไดออกไซด์แต่หากเปรียบเทียบเฉพาะแผ่นที่มีการเติม MWCNTs พบว่าการเติม MWCNTs 1 มิลลิกรัมมีค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมมากที่สุด

4.4.2 ผลการทดลองการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มินโดยใช้แผ่นยางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณต่างๆ

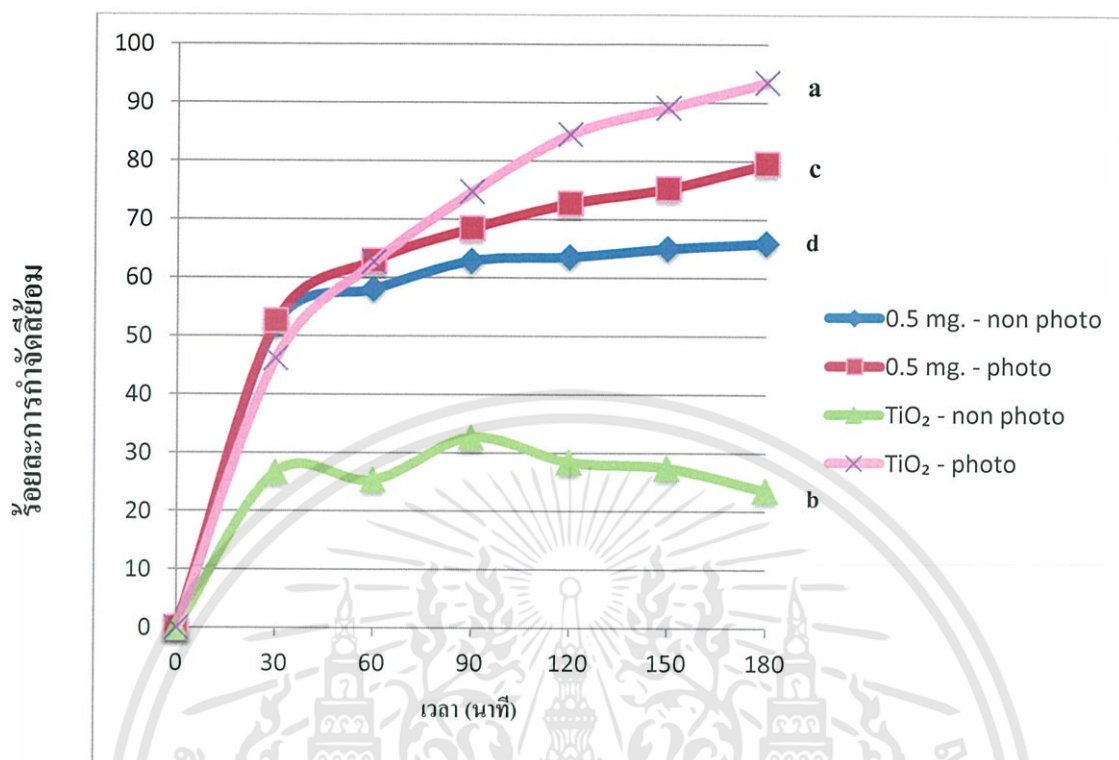


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีย้อม IC กับ MWCNTs ที่ปริมาณต่างๆ

รูปที่ 4.16 อธิบายได้ว่าการทดลองกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มินโดยใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลติกได้ค่าร้อยละของการกำจัดสีย้อมสูงสุดเมื่อเติมปริมาณท่อนาโนคาร์บอน 2, 3, 5, 0 และ 1 มิลลิกรัมในนาที่ที่ 180 โดยมีค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มินเท่ากับ 94.85, 93.89, 92.35, 91.98 และ 91.33 ตามลำดับ

จากผลดังกล่าวสรุปได้ว่า การเติมท่อนาโนคาร์บอนลงในแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์นั้น ส่งผลให้ค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มินมีค่าต่างจากกรณีที่ไม่เติมท่อนาโนคาร์บอนเพียงเล็กน้อย เนื่องจากโครงสร้างของสีย้อมอินดิโกคาร์มินนั้นมีประจุโครงสร้างเป็นลบท่อนาโนคาร์บอนจึงไม่แสดงการดูดซับ

4.4.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสีของเมทิลีนบลูโดยไม่เปิดไฟ

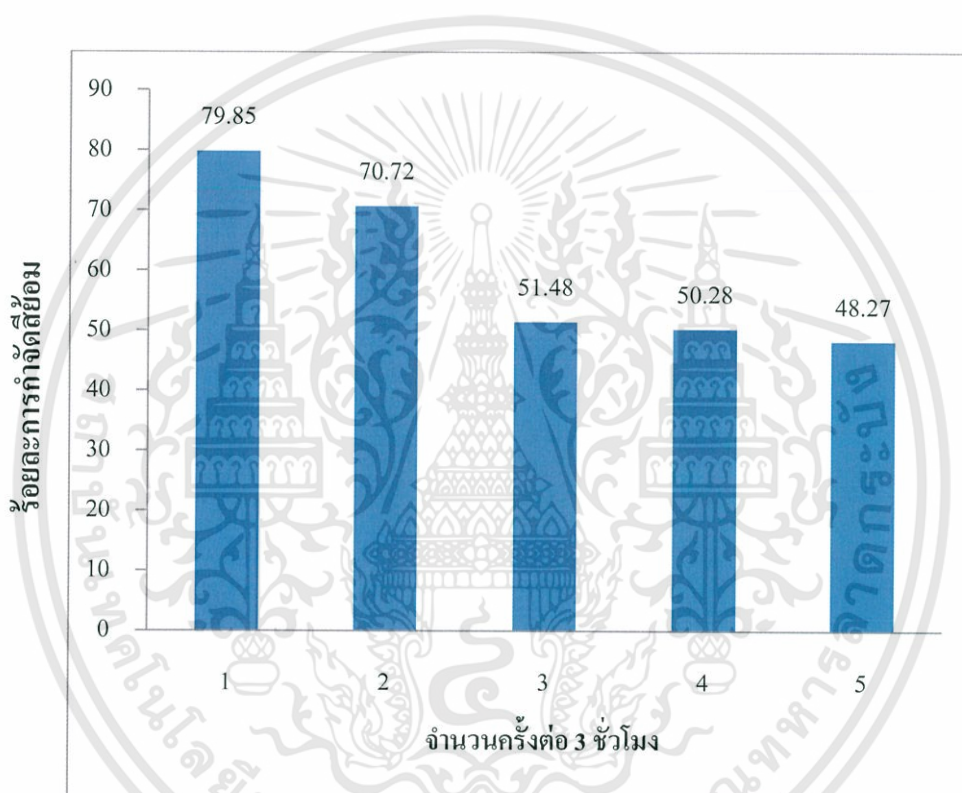


รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการกำจัดสีกับเวลา (a)แผ่นยางผสมTiO₂แบบเปิดไฟ (b)แผ่นยางผสมTiO₂แบบไม่เปิดไฟ (c)แผ่นยางผสมTiO₂-MWCNTs 5 mg แบบเปิดไฟ (d)แผ่นยางผสมTiO₂-MWCNTs 5 mg แบบไม่เปิดไฟ

จากรูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่าแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมท่อานาโนคาร์บอน 5 มิลลิกรัม เมื่อทำการเปิดไฟและไม่เปิดไฟมีค่าร้อยละการกำจัดสีต่างกันไม่มาก แสดงให้เห็นถึงการดูดซับสีของเมทิลีนบลูของท่อานาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น

4.4.4 ผลการทดลองใช้ซ้ำของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมท่อนาโนคาร์บอน 2 มิลลิกรัม

การทดลองนี้เป็นการเลือกแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมท่อนาโนคาร์บอน ปริมาณ 2 มิลลิกรัม นำมาทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานซ้ำ ผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ในตู้โฟโต ทำการเก็บตัวอย่างสีย้อมเมทิลีนบลูทุกๆ 30 นาทีเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำสีย้อมไปตรวจวัดด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer เพื่อหาค่าการดูดกลืนแสงโดยทำซ้ำจำนวน 5 ครั้ง ซึ่งได้ผลร้อยละการกำจัดสีย้อมดังนี้



รูปที่ 4.18 ค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูทำการซ้ำจำนวน 5 ครั้ง

จากรูปที่ 4.18 อธิบายได้ว่าผลการทดลองการใช้งานซ้ำของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมท่อนาโนคาร์บอน 2 มิลลิกรัม พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดเมทิลีนบลูครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 มีร้อยละการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูสูงเท่ากับ 79.85% และ 70.72% จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมลดลงในครั้งที่ 3, 4 และ 5 ซึ่งมีร้อยละการกำจัดสีย้อม 51.48%, 50.28% และ 48.27% ตามลำดับ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 วิเคราะห์พิสูจน์เอกลักษณ์ของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น

จากการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันและวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเคมีด้วย FT-IR spectrum พบว่าท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นหลังการปรับสภาพ พบโมเลกุลที่มีสภาพขั้วโมเลกุลสูง ได้แก่ หมู่คาร์บอกซิล (-COOH) หมู่คาร์บอนิล (-CO) และหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) บริเวณผนังของท่อนาโนคาร์บอนจึงส่งผลให้ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นหลังการปรับสภาพมีความสามารถในการกระจายตัวในน้ำได้

จากการวิเคราะห์ลักษณะผลึกและออสติฐานด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ มุมการเลี้ยวเบนของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นทั้งก่อนและหลังปรับสภาพพบพีคหลักที่ (20) เท่ากัน คือ 26.47° (002) และ 42.58° (100) แสดงว่าการปรับสภาพด้วยกรดผสมระหว่างกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) และกรดไนตริก (HNO_3) สามารถสร้างหมู่ฟังก์ชันให้แก่ท่อนาโนคาร์บอนแต่ไม่ได้ทำลายความเป็นผลึกของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น

จากการตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาจากภาพถ่าย SEM พบว่าทำให้ท่อนาโนคาร์บอนเกิดการกระจายตัวมากขึ้น โดยที่โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนไม่ถูกทำลาย

5.1.2 วิเคราะห์พิสูจน์เอกลักษณ์ของแผ่นยางไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ผสมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น

จากการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันและวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเคมีด้วย FT-IR spectrum พบแถบการสั่นของหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (-OH) ที่ $3,200\text{ cm}^{-1}$ และ $1,600\text{ cm}^{-1}$ แถบการสั่นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่ $1,000\text{ cm}^{-1}$ ถึง 500 cm^{-1} และแถบการสั่นของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นที่ผ่านการปรับสภาพแล้วที่ $1,300\text{ cm}^{-1}$ ถึง $1,700\text{ cm}^{-1}$

จากการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างด้วย SEM และ EDS พบว่าท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นกระจายตัวในแผ่นยางไทเทเนียมไดออกไซด์ แต่เมื่อผสมท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณมากเกินไป โดยเติมปริมาณ 3 และ 5 มิลลิกรัม พบว่าเกิดการจับกันเป็นกลุ่มก้อนของท่อนาโนคาร์บอน

5.1.3 การทดสอบความแข็งแรงดึงของแผ่นยางไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (Tensile Test)

การทดสอบการความแข็งแรงดึงของแผ่นยางไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น พบว่าแผ่นยางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมท่อนาโนคาร์บอนมีค่ายังโมดูลัสเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเติมท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้ค่ายังโมดูลัสลดลงและส่งผลให้มีค่าความทนต่อแรงดึงลดลง เพราะเกิดการจับกันเป็นกลุ่มก้อนและเกิดการเลื่อนของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น

5.1.4 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มีนของแผ่นยางไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ผสมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น

ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มีน โดยใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลติกในการทดลองได้ทำการผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ลงในชั้นสเตรท คือน้ำยางชั้นและมีการเติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น ในปริมาณที่แตกต่างคือ 0, 1, 2, 3 และ 5 มิลลิกรัม แล้วทำการฉายแสงยูวีเป็นเวลา 3 ชั่วโมงและเก็บตัวอย่างทุกๆ 30 นาที

จากผลการทดลองพบว่าแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการเติมท่อนาโนคาร์บอน 0, 1, 2, 3 และ 5 มิลลิกรัม มีค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มีนคือ 98.98%, 91.33%, 94.85%, 93.89% และ 92.35% ตามลำดับ จากผลดังกล่าวสรุปได้ว่า การเติมท่อนาโนคาร์บอนลงในแผ่นยางผสมไทเทเนียมนั้น ส่งผลให้ค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มีนมีค่าแตกต่างจากตัวอย่างที่ไม่เติมท่อนาโนคาร์บอนเพียงเล็กน้อย เนื่องจากสีย้อมอินดิโกคาร์มีนมีโครงสร้างประจุเป็นลบ ท่อนาโนคาร์บอนจึงไม่แสดงการดูดซับ แต่ในการทดลองพบว่าแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมท่อนาโนคาร์บอนมีค่าการกำจัดสีย้อมที่มากกว่าแผ่นยางผสมที่ไม่เติมท่อนาโนคาร์บอน

5.1.5 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) - ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น

ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู โดยใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลติกในการทดลองได้ทำการผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ลงในชั้นสเตรท คือน้ำยางชั้นและมีการเติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น ในปริมาณที่แตกต่างคือ 0, 1, 2, 3 และ 5 มิลลิกรัม แล้วทำการฉายแสงยูวีเป็นเวลา 3 ชั่วโมงและเก็บตัวอย่างทุกๆ 30 นาที

จากผลการทดลองพบว่าแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการเติมท่อนาโนคาร์บอน 0, 1, 2, 3 และ 5 มิลลิกรัม มีค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูคือ 93.46%, 83.29%, 79.98%, 71.74% และ 79.53% ตามลำดับ โดยพบว่าร้อยละการกำจัดสีย้อมของแผ่นยางผสมที่ไม่เติมท่อนาโนคาร์บอนมีประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมสูงสุดคือ 93.46% ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมรองลงมาคือแผ่นยางผสมที่เติมท่อนาโนคาร์บอน 1 มิลลิกรัม มีค่ากำจัดสีย้อม เท่ากับ 83.29%

จึงเลือกนำแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมท่อนาโนคาร์บอน 2 มิลลิกรัมมาทำการทดลองใช้งานซ้ำ เนื่องจากแผ่นยางผสมที่เติมท่อนาโนคาร์บอน 2 มิลลิกรัมมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมสูงและมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีการเติมท่อนาโนคาร์บอน

5.1.6 การประสิทธิภาพในการนำไปใช้งานใหม่ของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ที่มีการเติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น 2 มิลลิกรัม ในการกำจัดสีข้อมเมทิลีนบลู

การทดสอบประสิทธิภาพในการนำกลับมาใช้งานซ้ำของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการเติมท่อนาโนคาร์บอน 2 มิลลิกรัม เราเลือกสีข้อมเมทิลีนบลูมาใช้ในการทดลอง เนื่องจากสีข้อมเมทิลีนบลูมีประจุโครงสร้างเป็นบวกจึงเกิดการดูดซับท่อนาโนคาร์บอน

จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมเมทิลีนบลู ครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 มีค่าร้อยละการกำจัดสีข้อมสูงเท่ากับ 79.85% และ 70.72% จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมของแผ่นยางผสมลดลงในครั้งที่ 3, 4, 5 มีค่าร้อยละการกำจัดสีข้อมเท่ากับ 51.48%, 50.28% และ 48.27% ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากสีข้อมเมทิลีนบลูไปยึดเกาะที่แผ่นยางผสมทำให้บดบังอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์จึงส่งผลทำให้เกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกได้น้อยลง

5.2 ข้อเสนอแนะ

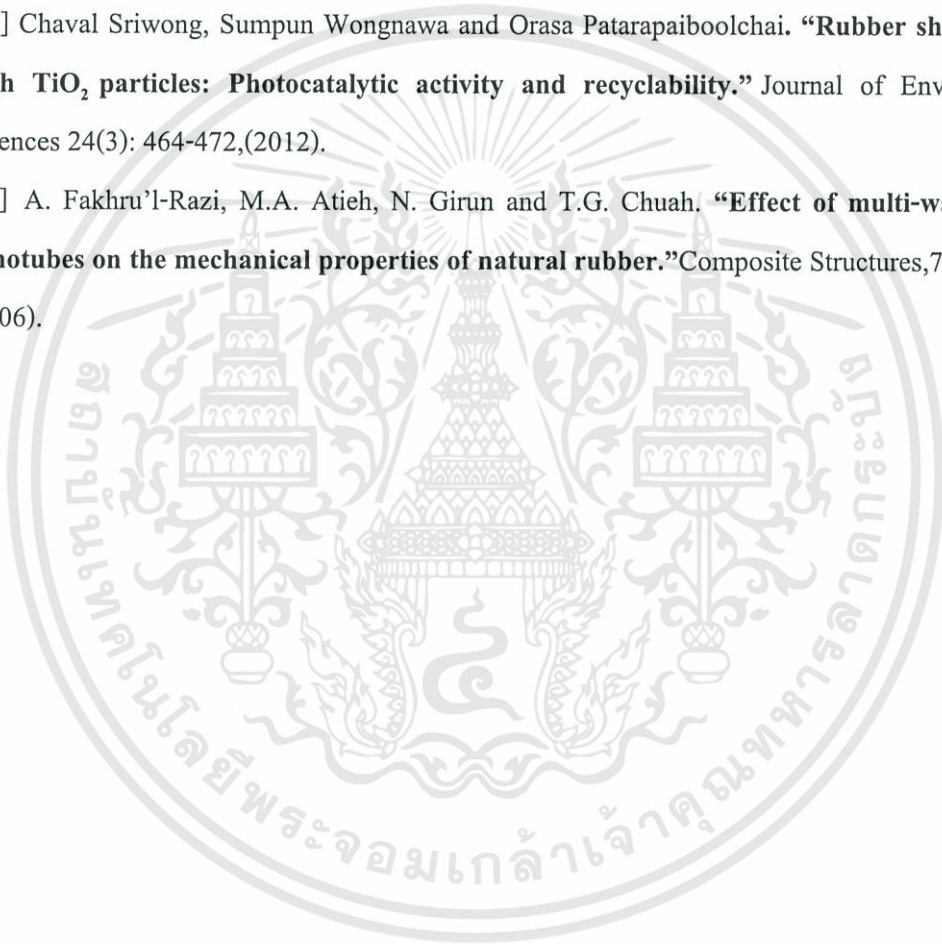
1. ผลการวิจัยครั้งนี้ยังไม่สามารถนำมาใช้ในการกำจัดสีข้อมในปริมาณที่มากได้ เนื่องจากแผ่นยางผสมไทเทเนียมมีขนาดเล็ก
2. ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมจากน้ำทิ้งในโรงงานอุตสาหกรรมโดยตรง โดยใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลติก
3. ศึกษาลักษณะเฉพาะทางกายภาพของแผ่นยางแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้งที่เติมและไม่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น
4. ในการเตรียมแผ่นยางผสม อาจทำให้ผงไทเทเนียมและท่อนาโนคาร์บอนกระจายตัวไม่ทั่วถึง เนื่องจากแท่งแม่เหล็กปั่นเหวี่ยงควรใช้เครื่องปั่นกวนและแท่งแม่เหล็กที่ใช้งานได้ดี
5. ศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องเพิ่มเติม เช่น ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ ความเข้มข้นของแสงจากหลอดยูวีที่กัลังวัตต์ต่างๆ และอุณหภูมิเป็นต้น
6. ศึกษาการใช้งานซ้ำของแผ่นยางไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมท่อนาโนคาร์บอนซ้ำ โดยการเปรียบเทียบกับแผ่นยางเปล่า
7. ศึกษาวิธีการนำแผ่นยางไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมท่อนาโนคาร์บอนกลับมาใช้ใหม่ด้วยวิธีการล้างด้วยกรด

เอกสารอ้างอิง

- [1] วนิตา ชูอักษร.(2551). “เทคโนโลยีการกำจัดสีในน้ำเสียอุตสาหกรรม.” วิทยาศาสตร์บูรพา, 17(1),181-191.
- [2] เกศแก้ว ปานสมุทร และ อ.ดร. อัจฉริยา สุริยะวงค์. “การบำบัดสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วยกระบวนการทางเคมีและฟิสิกส์.” สิ่งแวดล้อม,15(3),35-39
- [3] Chaval Sriwong, Sumpun Wongnawa, Orasa Patarapaiboolchai. “Photocatalytic activity of Rubber sheet impregnated with TiO₂ particles and its recyclability.” Catalysis communications 9 (2008) 213-218
- [4] พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์ และ วีระวัฒน์ กลอวุฒิมันตร์.(2553) “การดูดซับสีย้อมด้วยตัวดูดซับจากธรรมชาติ”. วิศวกรรมลาดกระบัง,27(4), 61-66.
- [5] กาญจนา ลือพงษ์ และ นงนุช ศศิธร. “การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมด้วยเทคนิคโฟโตคะตะไลติกร่วมกับกระบวนการดูดซับ.” 2553. [Online]. Available http://repository.rmutp.ac.th/bitstream/handle/123456789/953/itfd_54_05.pdf?sequence=1
- [6] กุสิต ปุกมณี และจิราภรณ์ กิติกุล “การสลายตัวของสารประกอบคลอโรฟีนอลในแหล่งน้ำธรรมชาติจากกิจกรรมทางภาคเกษตรกรรม โดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกส์ของผงบิสมัทวานาเดตที่เตรียมผ่านวิธีทางเคมี.”แบบเสนอโครงการวิจัย (research project)ประกอบการเสนอของบประมาณ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2553 ตามมติคณะรัฐมนตรี [Online].Available <http://www.google.co.th/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=9 &cad=rja&uact=8 &ved=0CHgQFjAI&url>
- [7] ฉลาด บรรเทา และ ชูสิทธิ์ ศรีสุทธิกมล. “ กระบวนการ Photocatalytic.” 2548,5-6. [Online].Available <http://sichon.wu.ac.th/file/envi-shh-20090110-112240-pwrqR.pdf>
- [8] อานันท์ปภา ชื่นทรัพย์. “การบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้ทั้งสแตนไดรออกไซด์.” วิทยานิพนธ์นี้วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.2555.
- [9] [Online].Available http://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2551/phys0751py_ch2.pdf
- [10] เสรีย์ ตู้ประกาย. “ กระบวนการพื้นฐานโฟโตคะตะไลติก.”,1-11. [Online].Available <http://www.eng.ru.ac.th/envi/aj/EVE410/photocatalytic.pdf>

- [11] “สารกึ่งตัวนำและไดโอด” [Online].Available
<http://www.google.co.th/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&cad=rja&uact=8&ved=0CEcQFjAD&url=http%3A%2F%2Fwebstaff.kmutt.ac.th%2F~ekapon.siw>
- [12] เสาวลักษณ์ บุญยอด. “ปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกและพฤติกรรมการณ์นำเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนพอลิเมอร์.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2554.
- [13] ทศนีย์ ชำนาญชัย ป.ภัสรา พรหมอักษร และศันสนีย์ โพธิ์น้อมแดง. “การศึกษาความเป็นไปได้ในการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียด้วยไททาเนียมไดออกไซด์.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2555.
- [14] ประโยชน์ของนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ [Online].Available
<http://www.nanoyothai.com/1294190/%E0%B8%9B%E0%B8%A3%E0%B8%B0%E0%B9%82%E0%B8%A2%E0%B8%8A%E0%B8%99%E0%B9%8C%E0%B8%>
- [15] อธิพิณ แจ่มชัด. “เอกสารประกอบการสอน วิชาเทคโนโลยีการยาง.” กรุงเทพฯ: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2556.
- [16] วีระชัย แสงฉาย “สมบัติของยางธรรมชาติที่ผสมท่อนาโนคาร์บอนและนาโนเคลย์.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2554.
- [17] บุญธรรม นิธิอุทัย และคณะ “กระบวนการเตรียมน้ำยางชั้นจากน้ำยางสด.” 2540
- [18] พัชรี เพิ่มพูน. “วัสดุผสมระหว่างยางผสม (ยางธรรมชาติ-ยางสไตรีนบิวทาไดอิน) และท่อนาโนคาร์บอน.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2553.
- [19] สุพรรณษา มุสิกะเจริญ “นาโนคอมโพสิตของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นและลวดนาโนซิลิคอนคาร์ไบด์กับยางธรรมชาติ.” วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2552.
- [20] (Mehmet Dogan, Harum Abak, and Mahir Alkan, J. Hazard. Mater., V ol. 164, pp. 172-181, 2009.)
- [21] สีย้อมสังเคราะห์ [Online].Available <http://www.tpa.or.th/writer/read>
- [22] Vinod K. Gupta and Tawfik A. Saleh “Synthesis of Carbon Nanotube-Metal Oxides Composites Adsorption and Photo-degradation.” 2011.

- [23] Chia-Chen Li, Jen-Lien lin, Shu-Jiuan Huang, Jyh-Tsung Lee and Ci-Huei Chen. **“A new and acid-exclusive method for dispersing carbon multi-walled nanotubes in aqueous suspensions.”** Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects 297(2007).
- [24] Veljko R. Djokic, Aleksandar D. Marinkovic, Miodrag Mitric, Petar S. Uskokovic, Rada D. petrovic, Velimir R. Radmilovic and Djordje T. Janackovic. **“Preparation of TiO₂/carbon nanotubes photocatalysts: The influence of the method of oxidation of the carbon nanotubes on the photocatalytic activity of the nanocomposites.”** Ceramics International 38: 6123-6129,(2012).
- [25] Chaval Sriwong, Sumpun Wongnawa and Orasa Patarapaiboolchai. **“Rubber sheet strewn with TiO₂ particles: Photocatalytic activity and recyclability.”** Journal of Environmental Sciences 24(3): 464-472,(2012).
- [26] A. Fakhru'l-Razi, M.A. Atieh, N. Girun and T.G. Chuah. **“Effect of multi-wall carbon nanotubes on the mechanical properties of natural rubber.”** Composite Structures,75:496-500, (2006).



ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเตรียมสารละลายย้อม

1. การเตรียมสีย้อมเมทิลีนบลู (Methylene Blue ; MB)

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

มวลโมเลกุล (Molecular Weight) คือ 319.85 g/mol

เตรียมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 2.5×10^{-5} M

วิธีทำ

- ชั่งผงเมทิลีนบลู 0.0093 กรัม ในขวดวัดปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร
- ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

2. การเตรียมสีย้อมอินดิโกคาร์มีน (Indigo carmine ; IC)

สูตรโมเลกุล (Molecular formula) คือ $C_{16}H_8N_2Na_2O_8S_2$

มวลโมเลกุล (Molecular Weight) คือ 466.35 g/mol

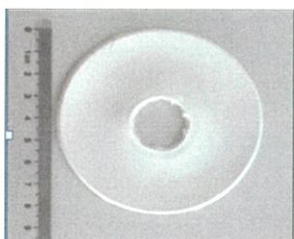
เตรียมอินดิโกคาร์มีนที่ความเข้มข้น 2.0×10^{-5} M

วิธีทำ

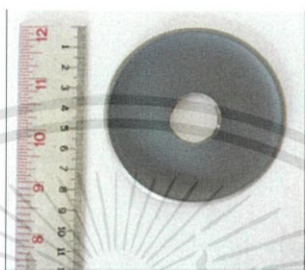
- ชั่งผงอินดิโกคาร์มีน 0.0080 กรัม ในขวดวัดปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร
- ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-1 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์



รูปที่ ข-2 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมท่อนาโนคาร์บอน 1 มิลลิกรัม



รูปที่ ข-3 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมท่อนาโนคาร์บอน 2 มิลลิกรัม



รูปที่ ข-4 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมท่อนาโนคาร์บอน 3 มิลลิกรัม



รูปที่ ข-5 แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมท่อนาโนคาร์บอน 5 มิลลิกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค

การคำนวณค่าร้อยละการกำจัดเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณค่าร้อยละการกำจัดสีข้อม

การคำนวณค่าร้อยละการกำจัดสีข้อม

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

A_0 : ค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้น

A_t : ค่าการดูดกลืนแสงที่เวลาใดๆ

ตัวอย่างการคำนวณร้อยละการกำจัดสีข้อม

$$\begin{aligned} \text{การกำจัดสีข้อม} &= \frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100 \% \\ &= \frac{1.667 - 0.884}{1.667} \times 100 \% \end{aligned}$$

$$\% \text{ การกำจัดสีข้อม} = 46.97$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

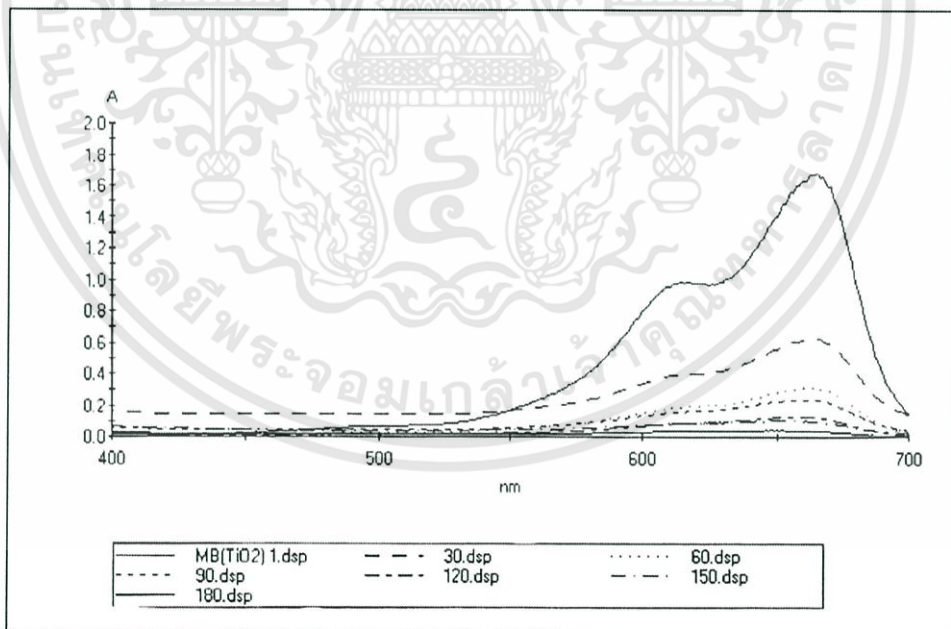


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวัดค่าการดูดกลืนแสงหลังผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติกด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer สีย้อมเมทิลีนบลู

ตารางที่ ง-1 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (ไม่เติมท่อนาโนคาร์บอน)

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		เฉลี่ย
	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ร้อยละ การกำจัดสีย้อม	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ร้อยละ การกำจัดสีย้อม	
0	1.428	0	1.432	0	0
30	0.773	45.87	0.768	46.37	46.12
60	0.548	61.62	0.520	63.68	62.65
90	0.366	74.37	0.358	75.00	74.68
120	0.225	84.24	0.217	84.84	84.54
150	0.161	88.73	0.150	89.52	89.125
180	0.095	93.35	0.092	93.58	93.46

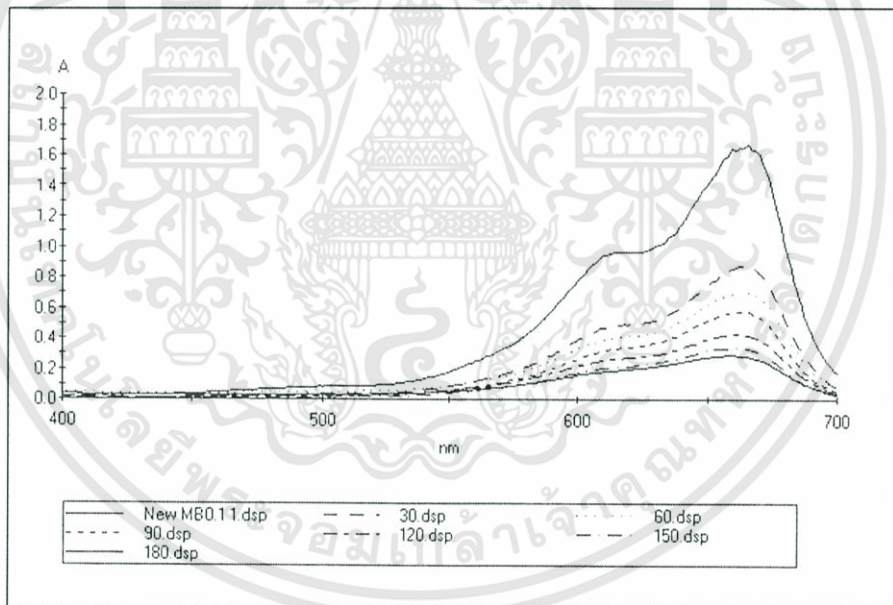


รูปที่ ง-1 ค่าการดูดกลืนของสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-2 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีของเมทิลีนบลูของแผ่นยางผสม
ที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) 1 มิลลิกรัม

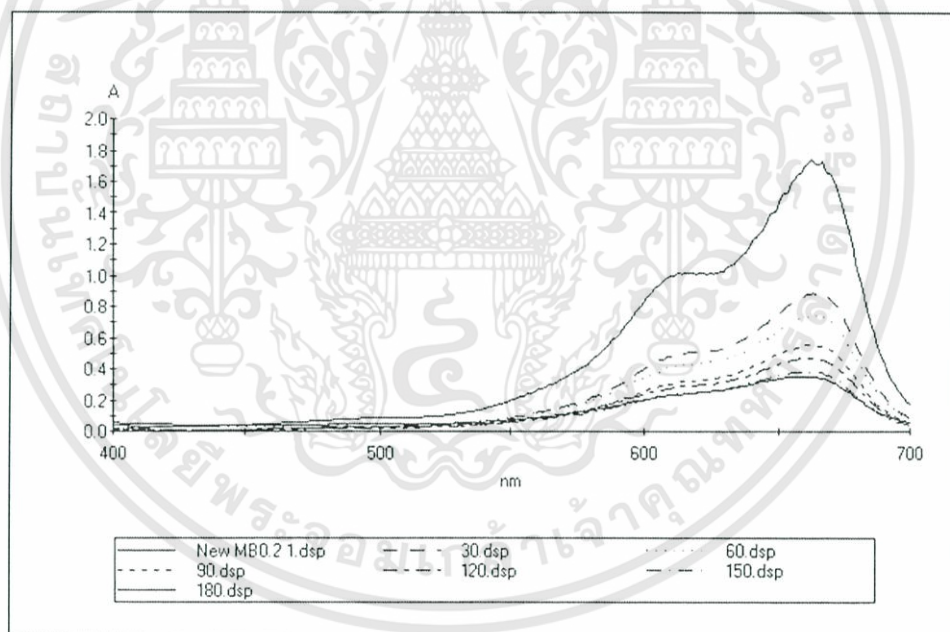
เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		เฉลี่ย
	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ร้อยละ การกำจัดสี	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ร้อยละ การกำจัดสี	
0	1.682	0	1.676	0	0
30	0.877	47.86	0.861	48.62	48.24
60	0.705	58.09	0.701	58.18	58.14
90	0.576	65.76	0.562	66.47	66.12
120	0.420	75.02	0.411	75.47	75.25
150	0.332	80.26	0.325	80.60	80.43
180	0.283	83.17	0.278	83.41	83.29



รูปที่ ง-2 ค่าการดูดกลืนของสีของเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นยางผสมที่เติมท่อนาโนคาร์บอน
แบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) 1 มิลลิกรัม

ตารางที่ ง-3 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีของเมทิลีนบลูของแผ่นยางผสม
ที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) 2 มิลลิกรัม

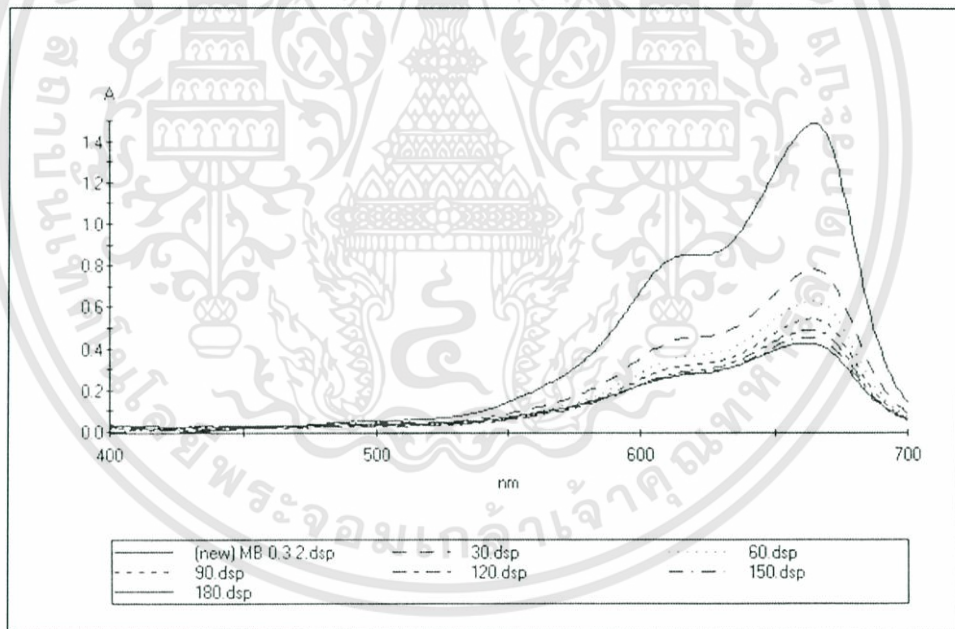
เวลา (นาท)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		เฉลี่ย
	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ร้อยละ การกำจัดสี	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ร้อยละ การกำจัดสี	
0	1.707	0	1.694	0	0
30	0.883	48.27	0.872	48.52	48.39
60	0.740	56.65	0.730	56.90	56.77
90	0.549	67.83	0.521	69.24	68.54
120	0.464	72.82	0.458	72.96	72.89
150	0.378	77.85	0.361	78.68	78.27
180	0.344	79.85	0.337	80.11	79.98



รูปที่ ง-3 ค่าการดูดกลืนของสีของเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นยางผสมที่เติมท่อนาโนคาร์บอน
แบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) 2 มิลลิกรัม

ตารางที่ ง-4 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีของเมทิลีนบลูของแผ่นยางผสม
ที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) 3 มิลลิกรัม

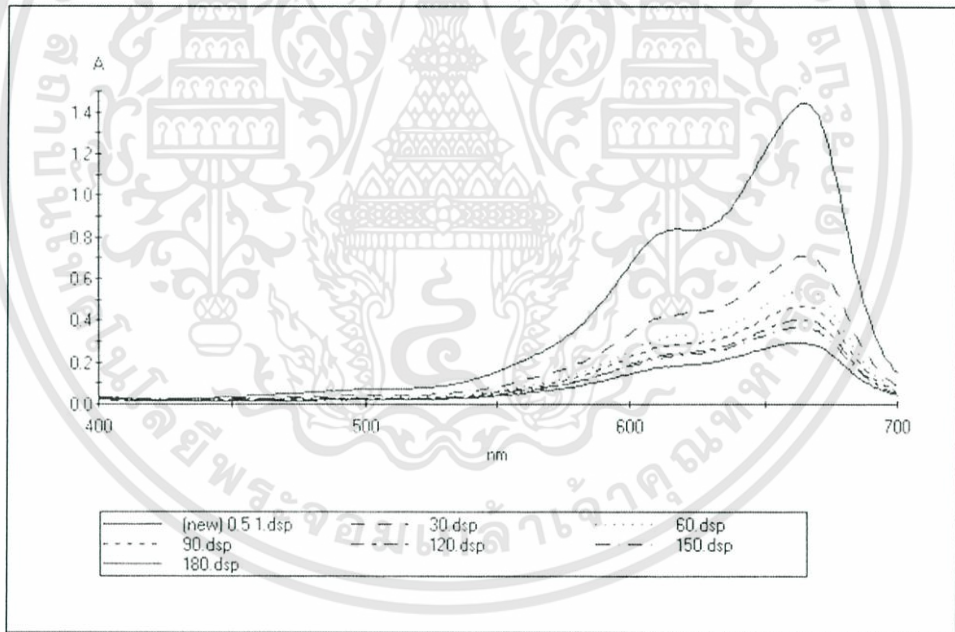
เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		เฉลี่ย
	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ร้อยละ การกำจัดสี	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ร้อยละ การกำจัดสี	
0	1.523	0	1.531	0	0
30	0.760	50.09	0.776	49.31	49.71
60	0.645	57.65	0.626	59.11	58.38
90	0.486	68.02	0.511	66.62	67.32
120	0.465	69.47	0.478	68.78	69.13
150	0.452	70.32	0.441	71.19	70.76
180	0.435	71.44	0.428	72.04	71.74



รูปที่ ง-4 ค่าการดูดกลืนของสีของเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นยางผสมที่เติมท่อนาโนคาร์บอน
แบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) 3 มิลลิกรัม

ตารางที่ ง-5 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีของเมทิลินบลูของแผ่นยางผสม
ที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) 5 มิลลิกรัม

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		เฉลี่ย
	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ร้อยละ การกำจัดสี	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ร้อยละ การกำจัดสี	
0	1.500	0	1.514	0	0
30	0.711	52.60	0.726	52.45	52.53
60	0.547	63.33	0.568	62.48	62.91
90	0.470	68.66	0.481	68.23	68.45
120	0.406	72.93	0.416	72.52	72.73
150	0.368	75.46	0.377	75.09	75.28
180	0.306	79.60	0.311	79.45	79.53

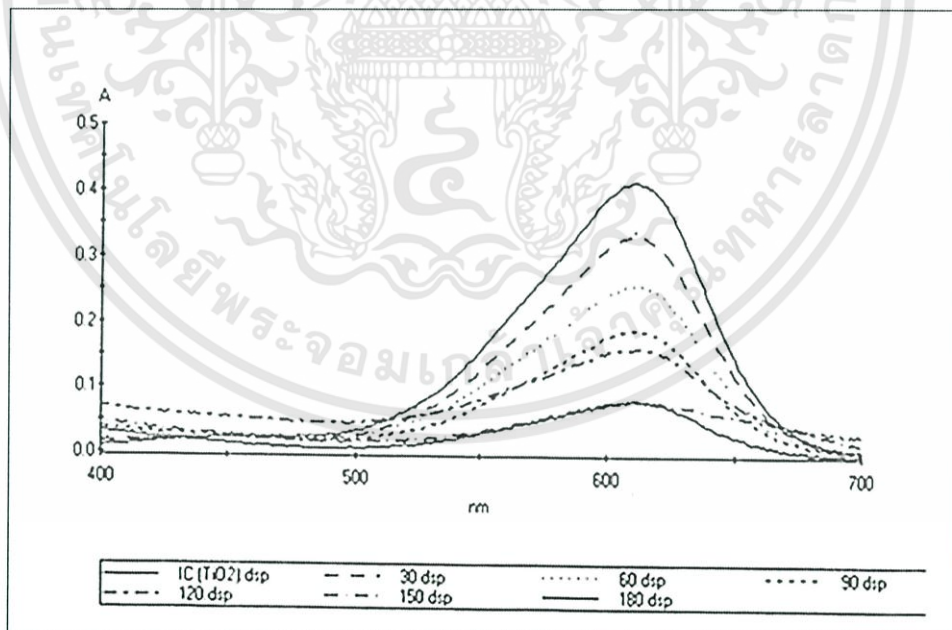


รูปที่ ง-5 ค่าการดูดกลืนของสีของเมทิลินบลูโดยใช้แผ่นยางผสมที่เติมท่อนาโนคาร์บอน
แบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) 5 มิลลิกรัม

ผลการวัดค่าการดูดกลืนแสงหลังผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลติกด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer สีย้อมอินดิโกคาร์มีน

ตารางที่ ง-6 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มีนของแผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (ไม่เติมท่อนานาโนคาร์บอน)

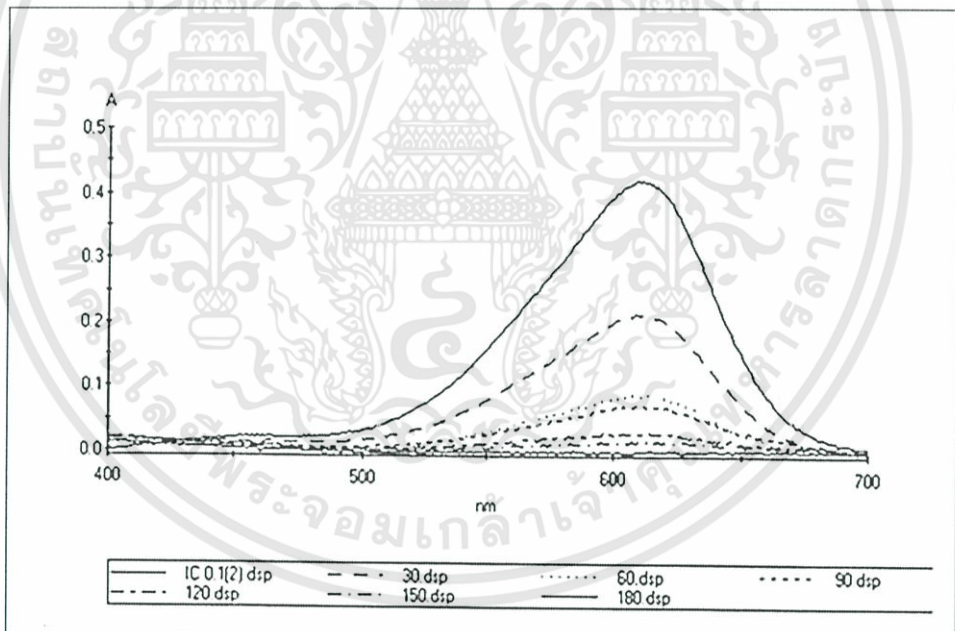
เวลา (นาทึ)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		เฉลี่ย
	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ร้อยละ การกำจัดสีย้อม	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ร้อยละ การกำจัดสีย้อม	
0	0.415	0	0.420	0	0
30	0.292	29.64	0.298	29.04	29.34
60	0.195	53.01	0.200	52.38	52.69
90	0.212	70.08	0.132	68.57	69.33
120	0.061	85.30	0.058	86.19	85.75
150	0.050	87.95	0.047	88.81	88.38
180	0.035	91.57	0.030	91.98	91.98



รูปที่ ง-6 ค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมอินดิโกคาร์มีน โดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์

ตารางที่ ง-7 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีของอินดิโกคาร์มินของแผ่นยางผสม
ที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) 1 มิลลิกรัม

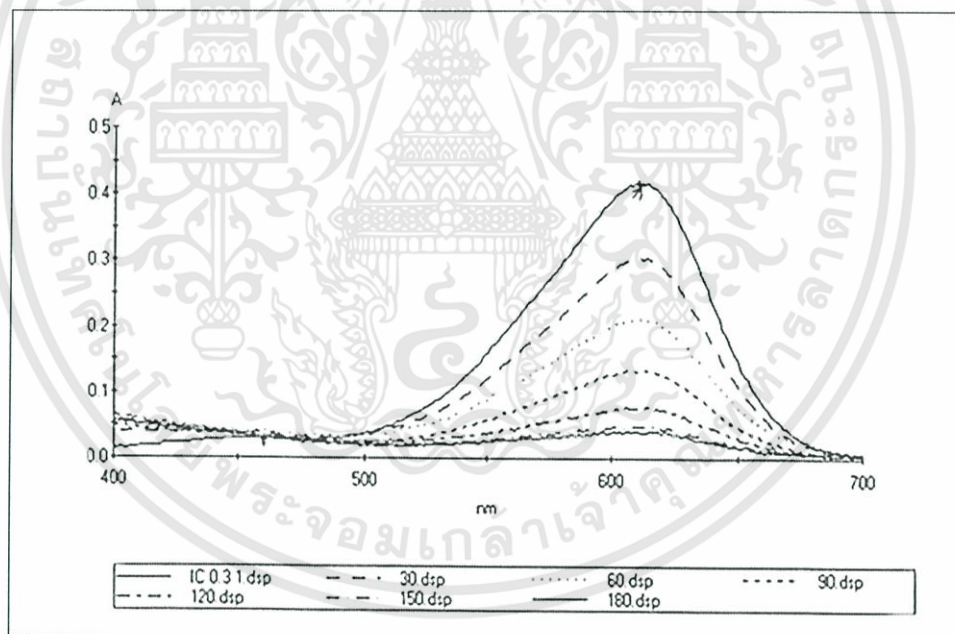
เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		เฉลี่ย
	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ร้อยละ การกำจัดสี	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ร้อยละ การกำจัดสี	
0	0.454	0	0.446	0	0
30	0.340	25.11	0.336	24.67	24.89
60	0.225	50.44	0.210	52.91	51.68
90	0.160	64.76	0.155	65.25	65.00
120	0.099	78.19	0.098	78.03	78.11
150	0.059	87.00	0.056	87.44	87.22
180	0.040	91.18	0.038	91.48	91.33



รูปที่ ง-7 ค่าการดูดกลืนแสงของสีของอินดิโกคาร์มินโดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมได-
ออกไซด์ ที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) 1 มิลลิกรัม

ตารางที่ ง-8 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีของอินดิโกคาร์มีนของแผ่นยางผสม
ที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) 2 มิลลิกรัม

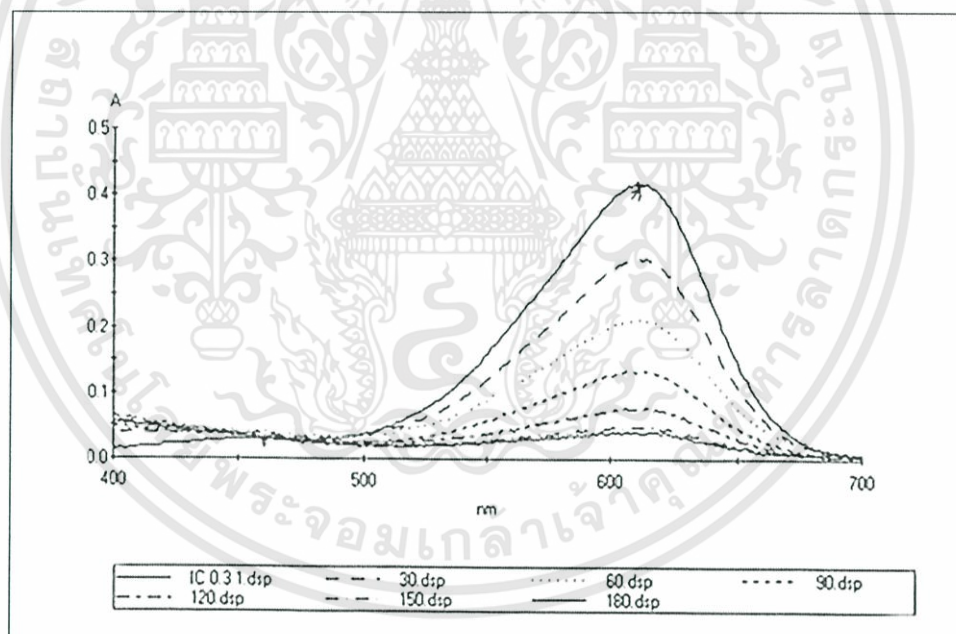
เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		เฉลี่ย
	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ร้อยละ การกำจัดสี	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ร้อยละ การกำจัดสี	
0	0.417	0	0.418	0	0
30	0.313	22.91	0.310	25.84	24.02
60	0.225	46.04	0.220	47.37	46.70
90	0.153	63.34	0.161	61.48	62.39
120	0.076	81.77	0.073	82.54	82.16
150	0.036	91.37	0.033	92.11	91.74
180	0.018	95.68	0.021	94.02	94.85



รูปที่ ง-8 ค่าการดูดกลืนแสงของสีของอินดิโกคาร์มีน โดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียม-
ไดออกไซด์ ที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) 2 มิลลิกรัม

ตารางที่ ง-9 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีของอินดิโกคาร์มีนของแผ่นยางผสม
ที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) 3 มิลลิกรัม

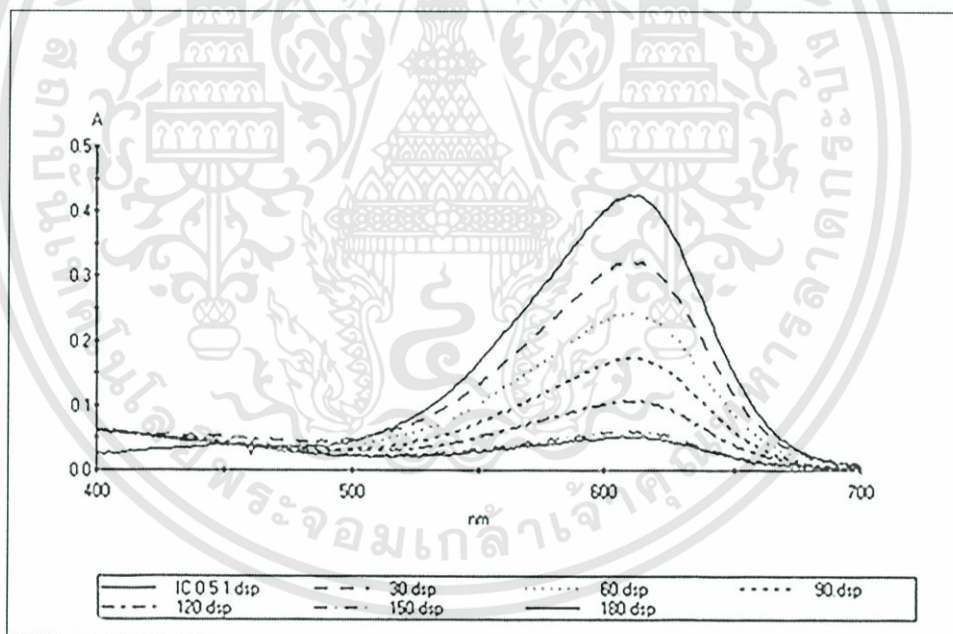
เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		เฉลี่ย
	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ร้อยละ การกำจัดสี	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ร้อยละ การกำจัดสี	
0	0.434	0	0.421	0	0
30	0.333	23.27	0.314	25.42	24.35
60	0.231	46.77	0.225	46.55	46.67
90	0.132	69.59	0.126	70.97	70.28
120	0.084	80.65	0.078	82.03	81.34
150	0.033	92.39	0.032	92.63	92.51
180	0.027	93.76	0.026	94.01	93.89



รูปที่ ง-9 ค่าการดูดกลืนแสงของสีของอินดิโกคาร์มีน โดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่
เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) 3 มิลลิกรัม

ตารางที่ ง-10 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีของอินดิโกคาร์มินของแผ่นยางผสม
ที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) 5 มิลลิกรัม

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		เฉลี่ย
	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ร้อยละ การกำจัดสี	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ร้อยละ การกำจัดสี	
0	0.441	0	0.447	0	0
30	0.287	34.92	0.295	34.00	34.46
60	0.240	45.58	0.242	45.86	45.72
90	0.145	67.12	0.143	68.00	67.56
120	0.101	77.069	0.107	76.06	76.58
150	0.058	86.85	0.061	86.35	86.60
180	0.033	92.52	0.035	92.17	92.35

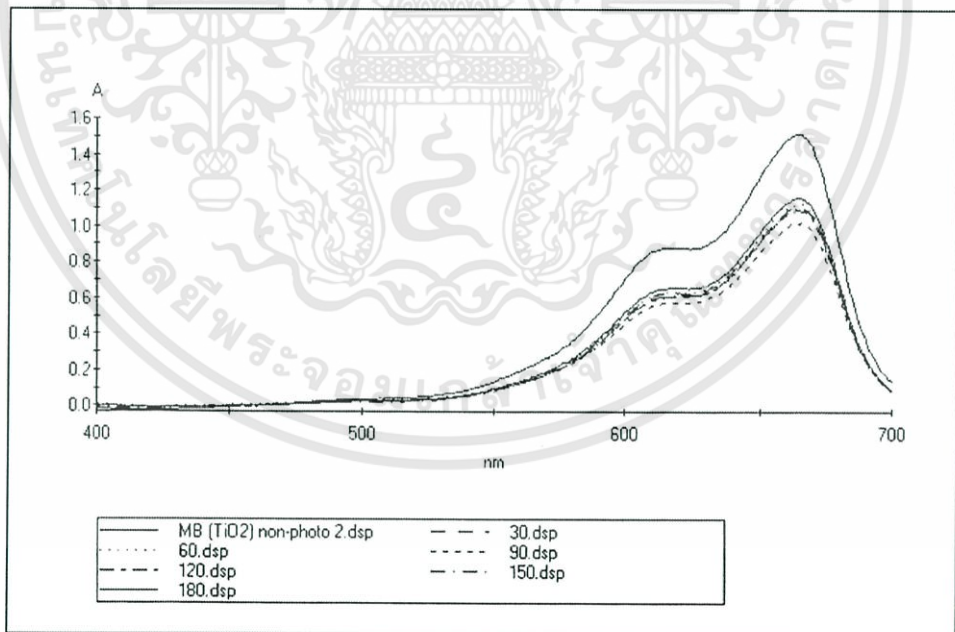


รูปที่ ง-10 ค่าการดูดกลืนแสงของสีอินดิโกคาร์มิน โดยใช้แผ่นยางผสมไทเทเนียม-
ไดออกไซด์ ที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) 5 มิลลิกรัม

การใช้งานกระบวนการโฟโตคะตะไลติกของแผ่นยางไทเทเนียมไดออกไซด์และท่อนาโนคาร์บอน โดยไม่เปิดไฟ

ตารางที่ ง-11 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์โดยไม่เปิดไฟ

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		เฉลี่ย
	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ร้อยละ การกำจัดสีย้อม	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ร้อยละ การกำจัดสีย้อม	
0	1.517	0	1.531	0	0
30	1.112	26.69	1.124	26.58	26.64
60	1.125	25.84	1.151	24.82	25.33
90	1.018	32.89	1.036	32.33	32.61
120	1.087	28.35	1.095	28.41	28.41
150	1.100	27.48	1.112	27.42	27.42
180	1.156	23.79	1.182	23.29	23.29

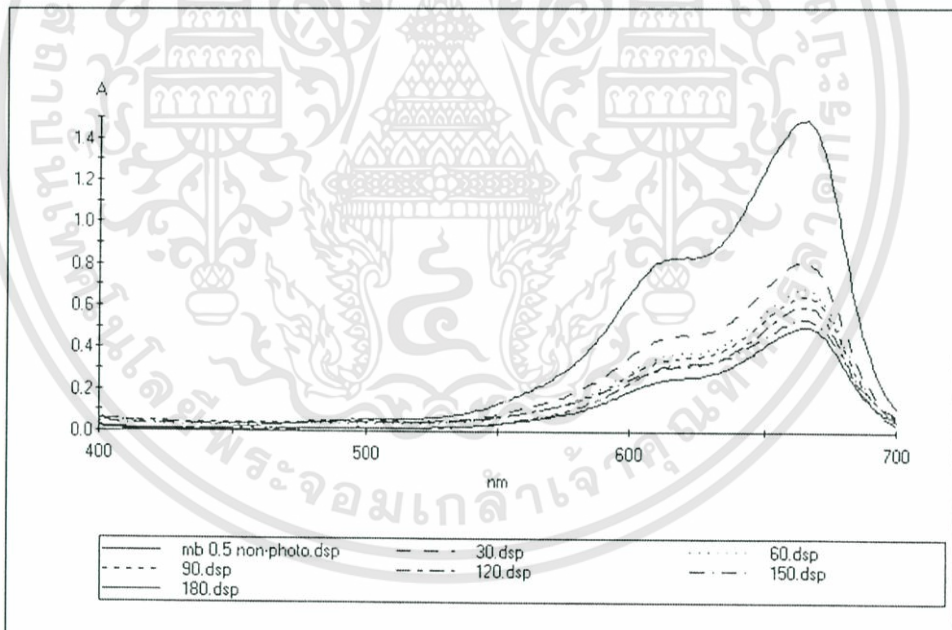


รูปที่ ง-11 ค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมโดยไม่เปิดไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-12 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีของเมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) 5 มิลลิกรัม ในตู้ฉายรังสีโดยไม่เปิดไฟ

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		เฉลี่ย
	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ร้อยละ การกำจัดสี	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ร้อยละ การกำจัดสี	
0	1.534	0	15.21	0	0
30	0.713	53.52	0.756	50.29	51.90
60	0.632	58.80	0.652	57.97	57.97
90	0.572	62.71	0.563	62.85	62.85
120	0.560	63.49	0.553	63.57	63.57
150	0.526	65.71	0.544	64.23	64.97
180	0.514	66.42	0.526	65.92	65.92

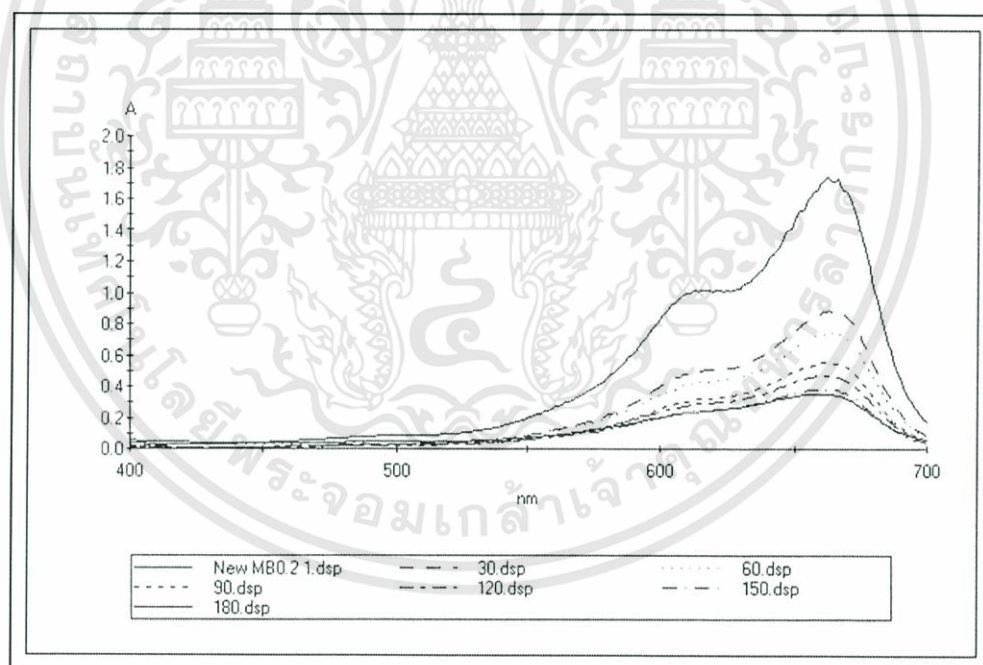


รูปที่ ง-12 ค่าการดูดกลืนแสงของสีของเมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) 5 มิลลิกรัม ในตู้ฉายรังสีโดยไม่เปิดไฟ

การใช้งานซ้ำของแผ่นยางผสมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) 2 มิลลิกรัม

ตารางที่ ง-13 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมที่เติม
ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) ซ้ำครั้งที่ 1

เวลา (นาทื)	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	% ค่าการกำจัดสีย้อม
0	1.707	0
30	0.883	48.27
60	0.740	56.65
90	0.549	67.83
120	0.464	72.82
150	0.378	77.85
180	0.344	79.85

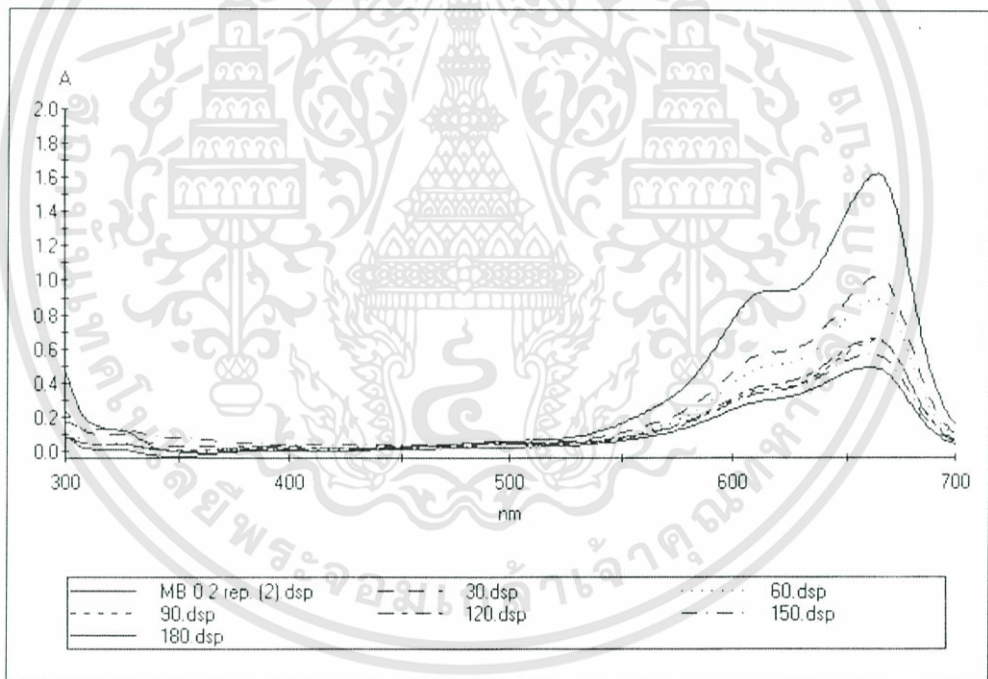


รูปที่ ง-13 กราฟการดูดกลืนแสง ซ้ำครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-14 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีของเมทิลีนบลูของแผ่นยางผสมที่เติม
ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) ซ้ำครั้งที่ 2

เวลา (นาท)	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	% ค่าการกำจัดสี
0	1.622	0
30	1.017	37.29
60	0.886	45.38
90	0.643	60.36
120	0.649	59.98
150	0.555	65.78
180	0.475	70.72

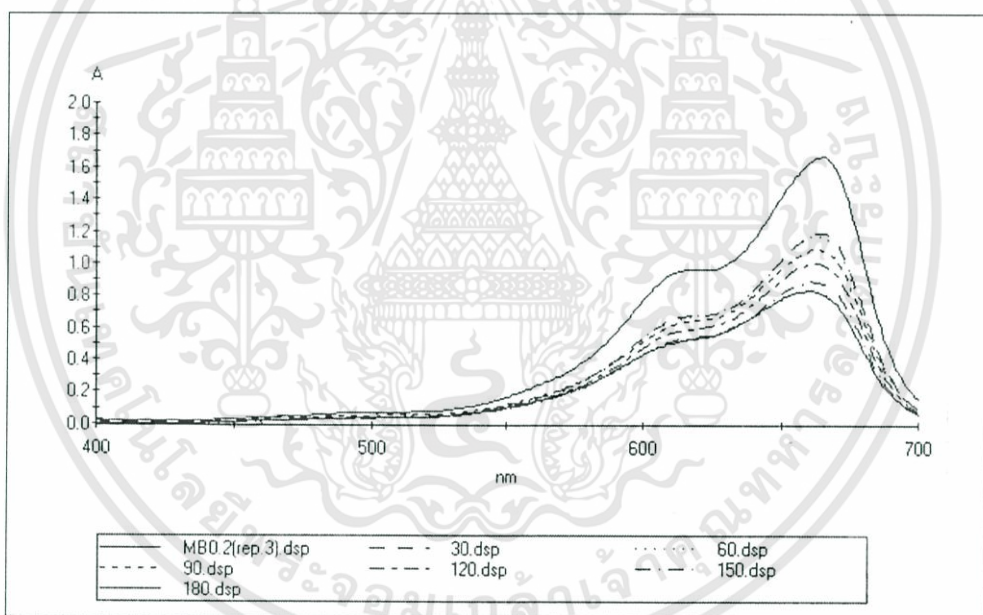


รูปที่ ง-14 กราฟการดูดกลืนแสง ซ้ำครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-15 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีเขียวเมทีลินบลูของแผ่นยางผสมที่เติม
ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) ซ้ำครั้งที่ 3

เวลา (นาทื)	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	% ค่าการกำจัดสีเขียว
0	1.663	0
30	1.187	28.62
60	1.167	29.83
90	1.079	35.12
120	0.990	40.47
150	0.874	47.44
180	0.807	51.48

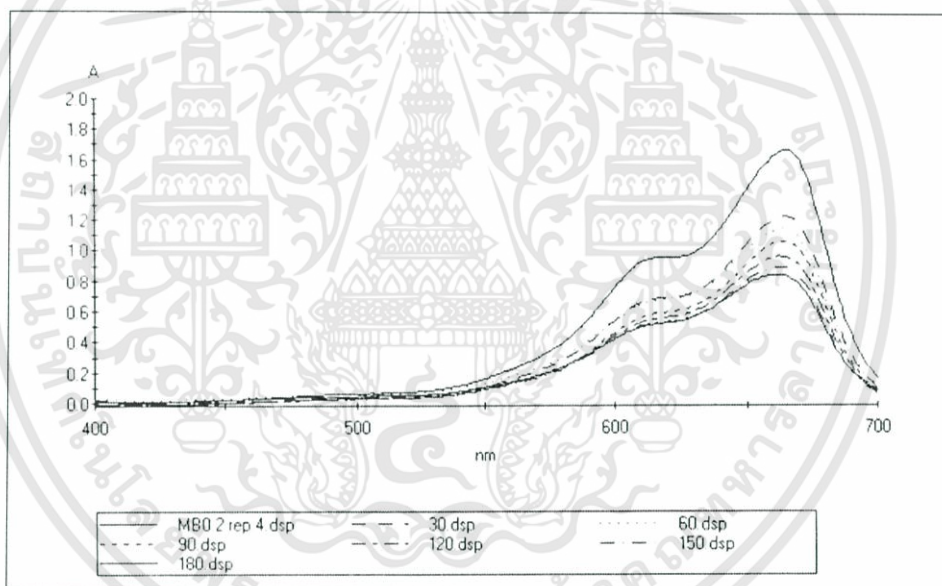


รูปที่ ง-15 กราฟการดูดกลืนแสง ซ้ำครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-16 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีของแผ่นยางผสมที่เติม
ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) ซ้ำครั้งที่ 4

เวลา (นาทื)	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	% ค่าการกำจัดสี
0	1.649	0
30	1.211	26.56
60	1.127	31.66
90	1.048	36.49
120	0.944	42.75
150	0.872	47.12
180	0.820	50.28

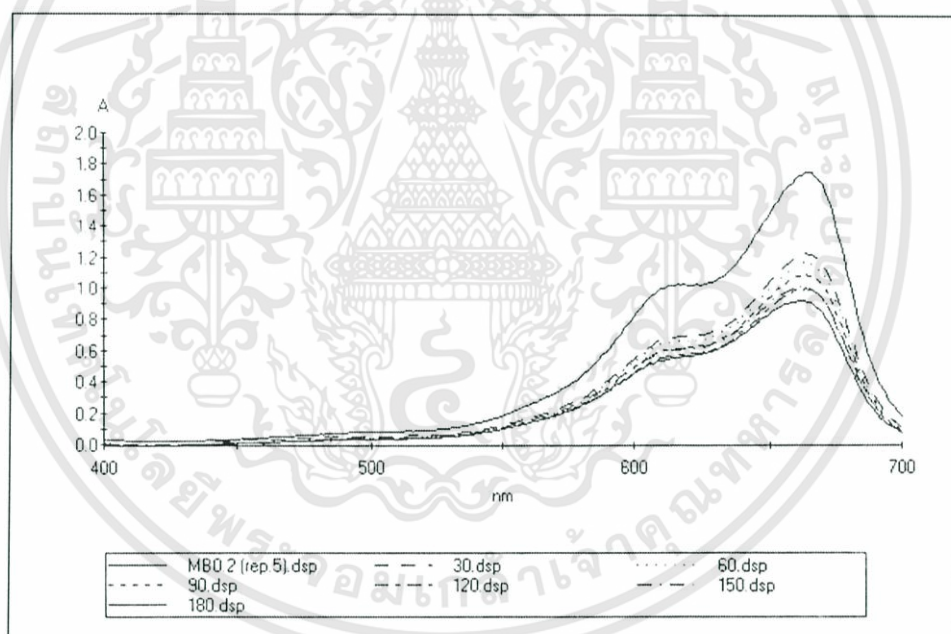


รูปที่ ง-16 กราฟการดูดกลืนแสง ซ้ำครั้งที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-17 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการกำจัดสีของแผ่นยางผสมที่เติม
ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) ซ้ำครั้งที่ 5

เวลา (นาทื)	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	% ค่าการกำจัดสี
0	1.738	0
30	1.205	30.67
60	1.149	33.89
90	1.073	38.26
120	0.979	43.67
150	0.992	42.92
180	0.899	48.27



รูปที่ ง-17 กราฟการดูดกลืนแสง ซ้ำครั้งที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดสอบการดูดซับของสีย้อม

วิธีการทดลอง

1. ชั่งท่อนาโนคาร์บอนที่ทำการปรับสภาพด้วยกรดแล้วปริมาณ 0.05 กรัม ลงในบีกเกอร์ 2 อัน
2. ใส่สารละลายสีย้อมสังเคราะห์ ทั้งเมทิลินบลูและอินดิโกคาร์มีนปริมาณ 20 มิลลิกรัม อย่างละ 1 บีกเกอร์ แล้วทำการสังเกตสี
3. ทำการปั่นกวนเป็นเวลา 30 นาที
4. นำเข้าเครื่อง ปั่นเหวี่ยงเป็นเวลา 20 นาที สังเกตสี

ผลการทดลอง



รูปที่ จ-1 สารละลายสีย้อมเมทิลินบลู

รูปที่ จ-2 สารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มีน

สารละลายสีย้อมเมทิลินบลู หลังการปั่นกวน 30 นาที สังเกตได้ว่า มีสีที่อ่อนลงซึ่งแสดงถึงการดูดซับสีได้ดี สารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มีน หลังการปั่นกวน 30 นาที สังเกตได้ว่า มีสีที่อ่อนลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับสีย้อมเมทิลินบลูซึ่งแสดงถึงการดูดซับสีได้ดีกว่า



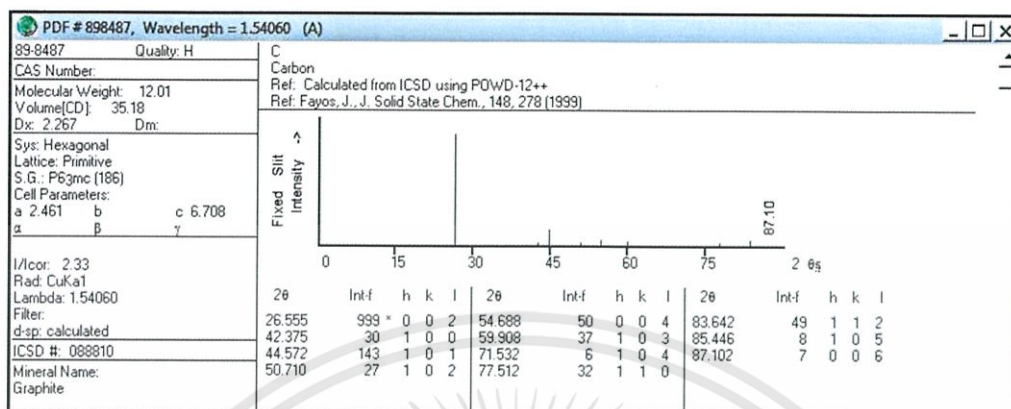
ภาคผนวก จ

ข้อมูลมาตรฐานรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จาก JCPDS

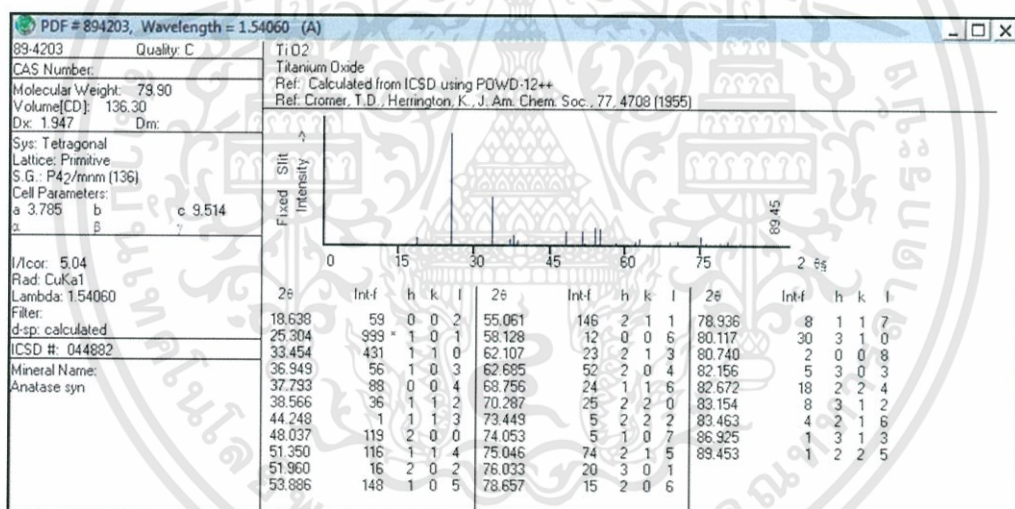
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลมาตรฐานรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จาก JCPDS

1. ข้อมูลมาตรฐานรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จาก JCPDS ของ C



2. ข้อมูลมาตรฐานรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จาก JCPDS ของ TiO₂



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้