

การบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก  
ในสถานะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่  
เจือด้วยซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

TREATMENT OF REACTIVE DYE WITH PHOTOCATALYTIC  
REACTION IN THE PRESENCE OF TITANIUM DIOXIDE AND  
TITANIUM DIOXIDE/ZINC OXIDE AS CATALYST



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาเคมีทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม  
คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ปีการศึกษา 2552  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**TREATMENT OF REACTIVE DYE WITH PHOTOCATALYTIC  
REACTION IN THE PRESENCE OF TITANIUM DIOXIDE AND  
TITANIUM DIOXIDE/ZINC OXIDE AS CATALYST**



**MISS BUSSABA PIPITWATTANAWONG  
MISS PATHUMPORN CHERDCHAY  
MISS SUPRANEE KHLDPRAKHON**

**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
IN ENVIRONMENTAL RESOURCE CHEMISTRY  
FACULTY OF SCIENCE**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY, LADKRABANG**



เอกสารนี้เป็นเอกสารผลงานวิจัยหรือการรายงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมให้คืนหรือจะยืมจะยืมกันการค้ำ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัด **ACADEMIC YEAR 2009** ำของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก  
 ในสภาวะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่  
 เจือด้วยซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา  
 Treatment of Reactive Dye with Photocatalytic Reaction in The  
 Presence of Titanium dioxide and Titanium dioxide/Zinc oxide as  
 Catalyst

ชื่อนักศึกษา นางสาวบุษบา พิพิธวัฒนวงศ์ 49050583  
 นางสาวปทุมพร เชิดฉาย 49050584  
 นางสาวสุปราณี โคลดประโคน 49050615

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต  
 สาขาวิชา เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม  
 อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์  
 อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.สามารถ คงทวีเลิศ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
 โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี  
 ทรัพยากรสิ่งแวดล้อมประจำปีการศึกษา 2552

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์	
ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์	
ผศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การบำบัดสีย้อมรีเอกทีฟด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก ในสภาวะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ เจือด้วยซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
นักศึกษา	นางสาวบุษบา พิพิธวัฒนวงศ์ นางสาวปทุมพร เชิดฉาย นางสาวสุปราณี โกลดประโคน
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา	2552
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.สามารถ กงทวีเลิศ

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ และสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสีย้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกในสภาวะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา รวมทั้งศึกษาการบำบัดสีย้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกในสภาวะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ (XRD) พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสมิระบบผลึกเป็นเตตระโกนอล (Tetragonal) และโครงสร้างผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 19.34 และ 39.71 นาโนเมตรตามลำดับ ไทเทเนียมไดออกไซด์ดูดกลืนแสงได้ดีในช่วงรังสียูวี ผลจากการศึกษาการบำบัดสีย้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกแสดงให้เห็นว่า สีย้อม Remazol Brilliant Blue R สามารถบำบัดได้โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสีย้อม Remazol Brilliant Blue R คือ ระยะเวลาการให้แสงยูวี 24 ชั่วโมง, ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ 1.0 กรัมต่อลิตร, พีเอช 3 และ ความเข้มข้นของสีย้อม 50 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้พบว่า การเจือไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยซิงค์ออกไซด์ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Remazol Brilliant Blue R ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก

**คำสำคัญ :** โฟโตแคตตาไลติก, ไทเทเนียมไดออกไซด์, สีย้อม, ซิงค์ออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Title</b>	TREATMENT OF REACTIVE DYE WITH PHOTOCATALYTIC REACTION IN THE PRESENCE OF TITANIUM DIOXIDE AND TITANIUM DIOXIDE/ZINC OXIDE AS CATALYST
<b>Students</b>	Miss Bussaba Pipitwattanawong Miss Pathumporn Cherdchay Miss Supranee Khlodprakhon
<b>Degree</b>	Bachelor of Science
<b>Program</b>	Environmental Resource Chemistry
<b>Academic Year</b>	2009
<b>Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Usarat Thawonchaiyasit
<b>Co-Advisors</b>	Dr. Samart Kongthaweeleart

### ABSTRACT

This special project studied possibility and optimal conditions for treatment of reactive dye by photocatalytic reaction using titanium dioxide and titanium dioxide/zinc oxide as a catalyst. Results from characterization of  $\text{TiO}_2$  and  $\text{ZnO}$  using X-ray diffraction (XRD) showed that  $\text{TiO}_2$  and  $\text{ZnO}$  is present in anatase tetagonal form and hexagonal form with particle sizes of 19.34 nm and 39.71 nm, respectively. Titanium dioxide absorbs light in UV region. Results from treatment of dyes with photocatalytic reactions showed that it is possible to treat Remazol Brilliant Blue R using titanium dioxide as a catalyst. Optimum conditions were UV irradiation of 24 hours, titanium dioxide dosage of 1.0 g/l, pH 3 and dye concentration 50 mg/L. In addition, it was found that doping  $\text{TiO}_2$  with  $\text{ZnO}$  increased photocatalytic treatment efficiency of Remazol Brilliant Blue R.

**Keywords :** Photocatalytic, Titanium Dioxide, Dye, Zinc Oxide

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเรื่องการบำบัดสีข้อมรีแอกทีฟด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกในสภาวะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาถูกจัดทำขึ้นมาโดยการตระหนักถึงปัญหาสภาพแวดล้อมในปัจจุบันที่มีปัญหาเกี่ยวกับมลพิษทางน้ำเป็นจำนวนมาก จึงได้จัดทำโครงการพิเศษฉบับนี้ขึ้น

โครงการพิเศษฉบับนี้จะลุล่วงไปได้ หากมิได้รับความช่วยเหลือจากผศ.ดร.อุสารัตน์ ดาวราชย์สิทธิ์ และดร.สามารถ กงทวีเลิศ ซึ่งคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งสำหรับคำปรึกษาและคำแนะนำอันมีค่าอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์ และผศ.ดร.ชโล จารุสุทธิรักษ์ สำหรับคำแนะนำและข้อเสนอแนะเรื่องความถูกต้องและความเป็นระเบียบในโครงการพิเศษฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมถึงเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการและเจ้าหน้าที่ทางภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ. พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย ที่ให้ความอนุเคราะห์สีข้อมตัวอย่าง ขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ทุกคนสำหรับคำแนะนำ กำลังใจและความห่วงใยที่มีให้แก่คณะผู้จัดทำเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณอย่างยิ่งสำหรับ พ่อแม่ ของคณะผู้จัดทำที่ได้ให้กำลังใจตลอดการศึกษา และการทำโครงการพิเศษฉบับนี้

นางสาวบุษบา พิพิธวัฒนวงศ์

นางสาวปทุมพร เจริญฉาย

นางสาวสุปราณี โคลดประโคน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	IX

<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	4
2.1 อุตสาหกรรมฟอกย้อม	4
2.2 สีย้อม	6
2.2.1 สัญลักษณ์ของสีและการตั้งชื่อ	6
2.2.2 องค์ประกอบของสีย้อม	9
2.2.3 การจำแนกประเภทของสีย้อม	9
2.2.4 สีย้อมรีแอกทีฟ (Reactive dyes)	14
2.2.5 ความเป็นพิษของสีย้อม	15
2.2.6 ชนิดของสีย้อมในกระบวนการฟอกย้อม	16
2.3 น้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม	16
2.3.1 ประเภทของสิ่งเจือปนในน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อม	18
2.3.2 สมบัติของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม	19
2.3.3 การกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากการย้อมผ้า	20
2.4 กระบวนการโฟโตแคตตาไลติก	23
2.4.1 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	24
2.4.2 พลังงานแสง	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.3 กลไกการบำบัดสารอินทรีย์	30
2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก	31
2.5.1 ความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยา	31
2.5.2 ค่าพีเอช (pH)	31
2.5.3 ระยะเวลาการให้แสงยูวี	31
2.5.4 อุณหภูมิ	31
2.5.5 ปริมาณออกซิเจนละลาย	32
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	32
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	36
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี	36
3.1.1 อุปกรณ์	36
3.1.2 สารเคมี	36
3.2 ศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์	37
3.2.1 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของผงละเอียดไทเทเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	37
3.2.2 การศึกษาขนาดอนุภาคของผงละเอียดไทเทเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์	37
3.2.3 การศึกษาสมบัติทางแสงของผงละเอียดไทเทเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง	37
3.3 การสแกนหาความยาวคลื่นสูงสุด ( $\lambda_{max}$ ) ของสารละลายสีข้อม Remazol Brilliant Blue R	38
3.4 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสารละลายสีข้อมด้วย ปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก	38
3.4.1 การศึกษาผลของระยะเวลาการให้แสงยูวี และผลของปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์	38
3.4.2 การศึกษาผลของพีเอชของสารละลาย	39
3.4.3 การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีข้อม	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 ศึกษาการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในการบำบัดสารละลายสีย้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก	40
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล</b>	42
4.1 ลักษณะทางกายภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์	42
4.2 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์	42
4.3 ขนาดอนุภาคของผงละเอียดไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์	44
4.4 สมบัติทางแสงของผงละเอียดไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง	44
4.5 ผลการสแกนหาความยาวคลื่นสูงสุด ( $\lambda_{max}$ ) ของสารละลายสีย้อม Remazol Brilliant Blue R	46
4.6 ผลของระยะเวลาการให้แสงยูวี และปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม	47
4.7 ผลของพีเอช ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม	50
4.8 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม	51
4.9 ผลของการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในการบำบัดสารละลายสีย้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก	52
<b>บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ</b>	54
5.1 สรุปผลการทดลอง	54
5.2 ข้อเสนอแนะ	54
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	56
<b>ภาคผนวก ก</b> ค่าการดูดกลืนและฟังก์ชันสมการเส้นตรงกราฟมาตรฐาน ของสารละลายมาตรฐานสีย้อม Remazol Brilliant Blue R	59
<b>ภาคผนวก ข</b> ข้อมูลที่เกี่ยวข้องในการศึกษาการบำบัดสีย้อม Remazol Brilliant Blue R	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สัญลักษณ์ของสี	7
2.2 สัญลักษณ์บอกคุณภาพของสี	7
2.3 สัญลักษณ์บอกธรรมชาติและสมบัติของสี	8
2.4 ประเภทของสีย้อมโดยจำแนกตามชนิดของเส้นใยที่นำไปย้อมสี	13
2.5 ชนิดผลของสีย้อมในกระบวนการฟอกย้อม	16
2.6 ลักษณะของน้ำทิ้งจากขั้นตอนการผลิตต่างๆของโรงงานฟอกย้อม	17
2.7 สมบัติของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมก่อนการบำบัดแบ่งตามผลิตภัณฑ์	20
2.8 สมบัติทางกายภาพที่สำคัญของไทเทเนียมไดออกไซด์	27
2.9 สมบัติเชิงปริมาตรของซิงค์ออกไซด์โครงสร้างผลึกเฮกซะโกนอล	28
4.1 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ และขนาดของอนุภาคที่คำนวณได้จากสมการของเชียร์เลอร์	46
ก-1 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุดเท่ากับ 592 nm ของสารละลายมาตรฐานสีย้อม Remazol Brilliant Blue R ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆและฟังก์ชันสมการเส้นตรงที่ใช้ในการศึกษาผลของระยะเวลาการให้แสงยูวี และปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์	60
ก-2 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุดเท่ากับ 592 nm ของสารละลายมาตรฐานสีย้อม Remazol Brilliant Blue R ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆและฟังก์ชันสมการเส้นตรงที่ใช้ในการศึกษาผลของพีเอช	60
ก-3 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุดเท่ากับ 592 nm ของสารละลายมาตรฐานสีย้อม Remazol Brilliant Blue R ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆและฟังก์ชันสมการเส้นตรงที่ใช้ในการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม	61
ก-4 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุดเท่ากับ 592 nm ของสารละลายมาตรฐานสีย้อม Remazol Brilliant Blue R ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆและฟังก์ชันสมการเส้นตรงที่ใช้ในการศึกษาผลของการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	61
ข-1 ผลของความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมที่ระยะเวลาการให้แสงยูวีต่างๆในปฏิกิริยาโฟโตแคทาไลติก	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า เสนอข้อมูลให้ท่านไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข-2 ผลของความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม ที่ระยะเวลาการให้แสงยูวีต่างๆในปฏิกิริยาโฟโตไลซิส	64
ข-3 ผลของความเข้มข้นผลของความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อประสิทธิภาพ การบำบัดสีย้อมที่ระยะเวลาการให้แสงยูวีต่างๆในชุดควบคุม	65
ข-4 ผลของพีเอชของสารละลายต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสารละลายสีย้อม เข้มข้น 50 mg/L ในปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก	66
ข-5 ผลของพีเอชของสารละลายต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสารละลายสีย้อม เข้มข้น 50 mg/L ในปฏิกิริยาโฟโตไลซิส	67
ข-6 ผลของพีเอชของสารละลายต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสารละลายสีย้อม เข้มข้น 50 mg/L ในชุดควบคุม	68
ข-7 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมต่อประสิทธิภาพในการบำบัดด้วย ปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก	69
ข-8 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมต่อประสิทธิภาพในการบำบัดด้วย ปฏิกิริยาโฟโตไลซิส	70
ข-9 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมต่อประสิทธิภาพในการบำบัด ในชุดควบคุม	71
ข-10 ผลของการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยซิงค์ออกไซด์ 2% w/w เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
2.1	โครงสร้างอุตสาหกรรมสิ่งทอไทย	4
2.2	แผนผังกระบวนการผลิตอุตสาหกรรมฟอกย้อม	5
2.3	โครงสร้างสีย้อม Remazol Brilliant Blue R	14
2.4	พลังงานของการเกิดออกซิเดชันของสารอินทรีย์	23
2.5	การเกิดโฮลและอิเล็กตรอนของTiO <sub>2</sub> เมื่อได้รับพลังงานแสง	25
2.6	กลไกของปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิสบนสารกึ่งตัวนำอย่างไทเทเนียมไดออกไซด์	25
2.7	โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์	26
2.8	โครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์	27
2.9	สเปกตรัมของรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	29
2.10	องค์ประกอบหลักของรังสียูวี	29
3.1	แผนภาพอย่างง่ายแสดงกลองที่บแสงต่อกับหลอดยูวีที่ใช้ในการศึกษา	39
4.1	ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการศึกษา	42
4.2	ผลของการพิสูจน์เอกลักษณ์ของผงละเอียดไทเทเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์	43
4.3	เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างกัน	45
4.4	ความยาวคลื่นสูงสุด ( $\lambda_{max}$ ) ของสารละลายสีย้อม Remazol Brilliant Blue R	46
4.5	ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมในชุดทดลองต่าง ๆ ที่ระยะเวลาและปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างกัน	47
4.6	ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม เมื่อสารละลายมีพีเอชต่างกัน	50
4.7	ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมต่างกัน	51
4.8	ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมเปรียบเทียบการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์และการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการบำบัดสารละลายสีย้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

อุตสาหกรรมเครื่องนุ่งห่มไทย เป็นอุตสาหกรรมที่มีบทบาทสำคัญต่อการสร้างงานและการสร้างรายได้ให้กับประเทศไทย เนื่องจากเสื้อผ้าเครื่องนุ่งห่มจัดเป็นปัจจัยสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ ทำให้อุตสาหกรรมนี้มีการขยายตัวสูงขึ้นเรื่อย ๆ ตามความต้องการของผู้บริโภค โดยในปี พ.ศ. 2549 อุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่มมีปริมาณการผลิตโดยรวมทั้งสิ้น 6,834.6 ล้านตัว และในปี พ.ศ. 2550 มีปริมาณการผลิตโดยรวมเท่ากับ 6,967.2 ล้านตัว (สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2552) อุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมประเภทที่มีการใช้น้ำและสารเคมีจำนวนมาก โดยเฉพาะแล้วในการผลิตผลิตภัณฑ์สิ่งทอน้ำหนัก 1 กิโลกรัม ต้องใช้น้ำในปริมาณสูงถึง 160-265 กิโลกรัม ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตและชนิดของผลิตภัณฑ์ น้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอที่เกิดขึ้นในเกือบทุกขั้นตอนการผลิต โดยเฉพาะอย่างยิ่งในขั้นตอนของกระบวนการฟอกย้อม พิมพ์ และการตกแต่งสำเร็จ ทั้งนี้เนื่องจากในกระบวนการฟอกย้อมเป็นกระบวนการที่ต้องใช้น้ำเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้เกิดน้ำเสียจำนวนมากที่ต้องปล่อยจากโรงงานสู่สิ่งแวดล้อม น้ำเสียที่ปล่อยออกมาประกอบด้วยสีย้อมเป็นหลัก นอกจากนี้ยังมีสารแขวนลอย ค่าความร้อน และสารอินทรีย์อื่น ๆ เป็นส่วนประกอบรวมด้วย หากน้ำเสียนั้นไม่ได้รับการบำบัดอย่างถูกวิธี ทำให้ไม่เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม ย่อมต้องก่อให้เกิดผลกระทบโดยตรงกับสิ่งแวดล้อม ผลเสียที่เกิดขึ้นจากสีย้อมที่ปนเปื้อนน้ำเสีย นอกจากจะทำให้แหล่งน้ำธรรมชาติขาดความสวยงามแล้ว ยังลดอัตราการถ่ายเทของออกซิเจนที่เข้าสู่ผิวหน้าของของแหล่งน้ำ และบดบังปริมาณแสงอาทิตย์ที่ตกลงสู่ผิวน้ำ ทำให้พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์ด้วยแสงได้ ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลง ส่งผลต่อการดำรงชีพของสัตว์น้ำที่ต้องอาศัยอยู่ในแหล่งน้ำได้

ลักษณะน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม โดยรวมจัดเป็นน้ำเสียที่ไม่เข้มข้นมาก มีค่าซีโอดีน้อยกว่า 1500 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่มีปริมาณสีอยู่สูง ซึ่งมักเป็นปัญหาต่อการบำบัด สีที่ใช้ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีหลายชนิด เช่น สีรีแอคทีฟ สีเอโซ สีเอซิด สีเบสิก สีไดเรกต์ สีแวลต์ สีดิสเพอร์ส เป็นต้น โดยในปัจจุบันเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมที่นิยมใช้ เช่น กระบวนการทางกายภาพและเคมีซึ่งบำบัดสีได้น้อย การดูดซับการตกตะกอนโดยสารเคมี ร่วมกับกระบวนการทางชีวภาพ เช่น ระบบตะกอนเร่งซึ่งกระบวนการดังกล่าวมีข้อจำกัดที่สำคัญหลายประการ เช่น มีค่าใช้จ่ายในการบำบัด มีตะกอนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการบำบัด (กรมโรงงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุตสาหกรรม, 2542) ดังนั้นการค้นคว้าหาแนวทางในการบำบัดสีข้อมในน้ำที่มีประสิทธิภาพ และมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดต่ำจึงเป็นเรื่องที่จำเป็น

กระบวนการโฟโตแคตตาไลติกเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันขั้นสูงที่ได้รับความสนใจ และสามารถนำมาใช้ในกระบวนการบำบัดสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำได้ เนื่องจากเป็นกระบวนการที่สามารถออกซิไดส์สารอินทรีย์เป็นมลพิษให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และไอออนลบของสารอินทรีย์ได้ ปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกนั้นเกี่ยวข้องกับการใช้สารกึ่งตัวนำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลที่เข้าทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ ก่อให้เกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำ การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกนั้นได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ราคาถูกและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ไม่สลายตัวด้วยแสงและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ กระบวนการโฟโตแคตตาไลติกในสถานะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ถูกนำมาใช้ในกระบวนการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำโดยเฉพาะสีข้อมอย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตามพบว่ากระบวนการบำบัดเกิดได้ดีในช่วงความยาวคลื่น 100-400 นาโนเมตร ซึ่งเป็นความยาวคลื่นของแสงยูวี นอกจากนี้ยังพบว่าซิงค์ออกไซด์สามารถที่จะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกได้ ข้อดีของซิงค์ออกไซด์คือดูดกลืนแสงในช่วง Visible ได้ ดังนั้นการนำซิงค์ออกไซด์มาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อมเกิดได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่าการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีข้อมโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยซิงค์ออกไซด์ยังมีงานวิจัยค่อนข้างจำกัด โครงการพิเศษนี้จึงจัดทำขึ้นเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกในสถานะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่ง โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีข้อมด้วยกระบวนการดังกล่าว นอกจากนี้ยังทำการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีข้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีข้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกในสถานะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
2. ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีข้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาลักษณะทางกายภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ โดยสมบัติทางกายภาพที่ศึกษา ได้แก่ การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของผงละเอียดไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับคนไข้เท่านั้น เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction; XRD) และศึกษาสมบัติทางแสงของผงละเอียดไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-Vis Spectrophotometer)

2. ศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดสารละลายสีข้อม และปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมในน้ำด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกในสภาวะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ระยะเวลาการให้แสงยูวี ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ ค่าพีเอชของสารละลาย และความเข้มข้นของสีข้อมเริ่มต้น

3. ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารละลายสีข้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

#### 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีข้อมด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกในสภาวะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
2. ทราบถึงผลของการเจือไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยซิงค์ออกไซด์ ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีข้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก
3. ได้วิธีการบำบัดสีข้อมในน้ำที่มีประสิทธิภาพสูง และไม่ก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม

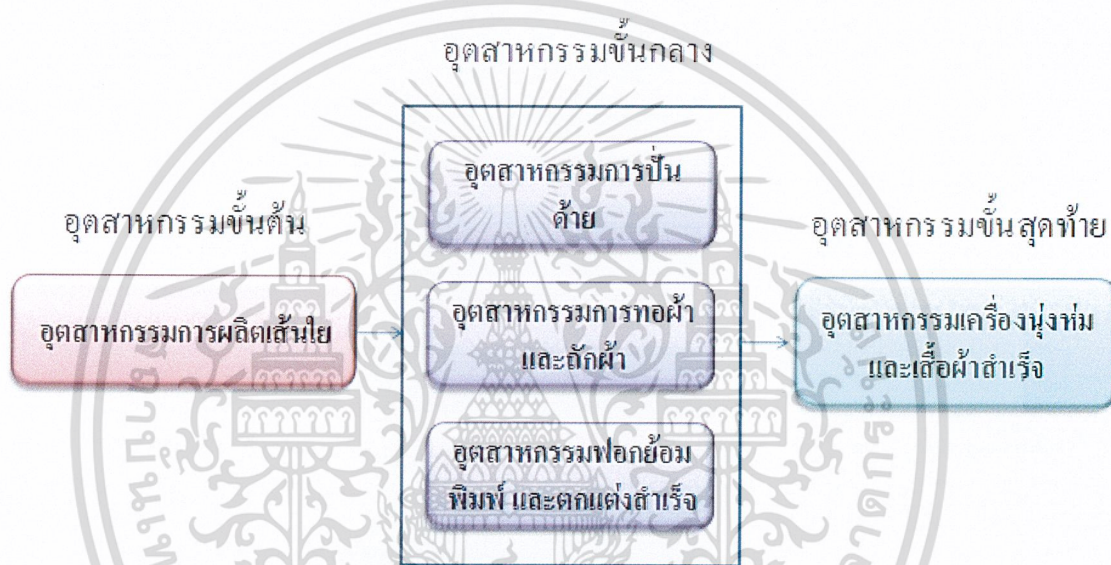
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 อุตสาหกรรมฟอกย้อม

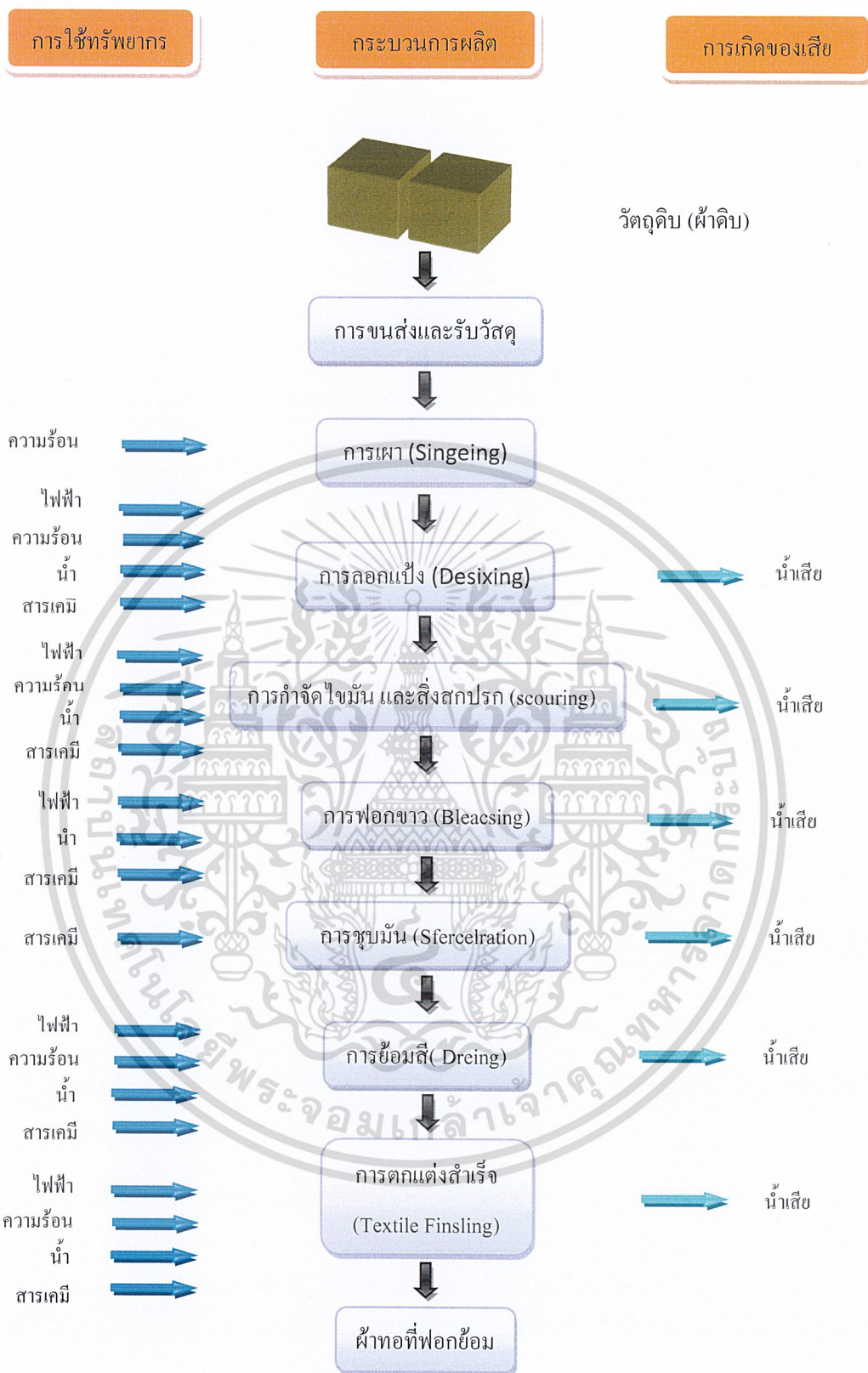
อุตสาหกรรมฟอกย้อมพิมพ์และตกแต่งสำเร็จ เป็นอุตสาหกรรมชั้นกลางที่เป็นส่วนหนึ่งของอุตสาหกรรมสิ่งทอ (รูปที่ 2.1) มีส่วนในการสร้างรายได้ให้กับประเทศอย่างมหาศาลโดยในปี พ.ศ. 2550 มีมูลค่าการส่งออกเท่ากับ 6967.2 ล้านดอลลาร์สหรัฐ และในปีพ.ศ. 2551 มีมูลค่าการส่งออกเพิ่มขึ้นเป็น 7303.4 ล้านดอลลาร์สหรัฐ



รูปที่ 2.1 โครงสร้างอุตสาหกรรมสิ่งทอไทย  
(<http://www.oie.go.th/industry/>)

อุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมที่รวมเอากระบวนการผลิตตั้งแต่การเตรียมการย้อมหรือพิมพ์ ไปจนถึงการตกแต่งสำเร็จ ซึ่งมีแผนผังกระบวนการผลิตดังแสดงในรูปที่ 2.2 อุตสาหกรรมประเภทนี้มีการใช้สารเคมีและน้ำเป็นจำนวนมาก โดยมีค่าดัชนีการใช้น้ำระหว่าง 200-251 m<sup>3</sup>/ตันผลิตภัณฑ์ (กรมควบคุมมลพิษ, มปป)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แผนผังกระบวนการผลิตอุตสาหกรรมฟอกย้อม

(กรมควบคุมมลพิษ, มปป)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 สีย้อม

**สีย้อม (dyestuffs)** คือ สีย้อมชนิดหนึ่งที่ใช้ในการย้อมเส้นใยของผ้า อาจจะเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ก็ได้ มีลักษณะเป็นผลึกหรือผงละเอียด สีย้อมบางชนิดละลายน้ำได้ บางชนิดจะไม่สามารถละลายน้ำแต่จะละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ได้ เมื่อนำสีย้อมไปใช้ในกระบวนการย้อมจะทำให้โมเลกุลของสีย้อมซึมผ่านเข้าไปในโมเลกุลของเส้นใย โดยจะทำลายโครงสร้างผลึกของวัตถุนั้นชั่วคราว ซึ่งอาจเกิดพันธะไอออนิก (ionic bond) หรือพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) กับวัตถุที่ต้องการย้อมโดยตรง สีที่เห็นจากสีย้อมนั้นเกิดจากอิเล็กตรอนในพันธะคู่ ซึ่งอยู่ในโมเลกุลของสีย้อมนั้นมีความสามารถดูดกลืนพลังงานในช่วงสเปกตรัมต่างกัน พลังงานแสงที่สายตามองเห็นจะมีความยาวคลื่นช่วง 400 – 700 นาโนเมตร สีย้อมที่มีโครงสร้างทางโมเลกุลต่างกันจะมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงความยาวคลื่นต่างๆกันไป ซึ่งสายตาสามารถรับภาพได้ จึงทำให้โมเลกุลสีย้อมต่างโทนสีกันแสดงสีให้เราเห็นด้วยสายตาดูออกมาเป็นต่างกันไป ทั้งนี้เราสามารถแบ่งสีย้อมออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1) **สีย้อมธรรมชาติ (natural dyestuffs)** เป็นสีย้อมที่มาจากแหล่งธรรมชาติ โดยเฉพาะพืชและสัตว์ สีย้อมที่มาจากส่วนประกอบพืชเช่น ส่วนลำต้น ส่วนดอก ส่วนที่เป็นเปลือก ส่วนที่เป็นใบ เป็นต้น ตัวอย่างเช่น สีดำจากลูกมะเกลือ สีน้ำเงินจากต้นคราม สีเหลืองจากเนื้อไม้ไผ่ สีแดงจากดอกกรรณิการิ สีแดงจากรากต้นเข็ม ส่วนสีย้อมที่มาจากสัตว์ เช่น สีม่วงแดงของครั่ง สีม่วงจากหอยสังข์หนาม เป็นต้น

2) **สีย้อมสังเคราะห์ (synthetic dyestuffs)** เป็นสีย้อมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการทางเคมี

### 2.2.1 สัญลักษณ์ของสีและการตั้งชื่อ

สีย้อมที่ผลิตขึ้นมาในท้องตลาดมีจำนวนมากและมักจะมีสีสันทึบใกล้เคียงกัน ยกต่อการจำแนก เช่น สีฟ้า อาจจะมีสีฟ้าอ่อนข้างไปทางแดง หรือฟ้าอ่อนไปทางเหลือง ดังนั้นจึงกำหนดให้มีสัญลักษณ์ของสี เพื่อความสะดวกต่อการจำแนกตามเฉดสีธรรมชาติ สมบัติของสีย้อมและคุณภาพของสีย้อม ดังแสดงในตารางที่ 2.1 - 2.3 (ราตรี และคณะ, 2543)

ตารางที่ 2.1 สัญลักษณ์ของสี (ราตรีและคณะ, 2543)

สัญลักษณ์	สี
บี (B)	ออกสีน้ำเงิน
จี (G)	ออกสีเขียวหรือเหลือง
เจ (J)	ออกสีเหลือง
เอ็ม (M)	ออกสีแดงคล้ำ
อาร์ (R)	ออกสีแดง
วี (V)	ออกสีม่วง
วาย (Y)	ออกสีเหลือง
เอ (A)	เข้มขึ้นมาก
อี (E)	เข้มขึ้นมากที่สุด (Excellent)
โอ (O)	เข้มขึ้นมาก
เอกซ์ (X)	เข้มขึ้นพิเศษ(Extra)
เค (K)	เข้มขึ้น(Kon)

ตารางที่ 2.2 สัญลักษณ์บอกคุณภาพของสี (ราตรีและคณะ, 2543)

สัญลักษณ์บอกคุณภาพ	ลักษณะ
ซีพี (CP = Chemical pure)	- มีความบริสุทธิ์สูง
เอฟแซด (FZ = Free from zinc)	- ไม่มีสังกะสีปน
แซดเอฟ (ZF = Zinc free)	- ไม่มีสังกะสีปน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 สัญลักษณ์บอกธรรมชาติและสมบัติของสี (ราตรีและคณะ, 2543)

สัญลักษณ์บอกธรรมชาติของสี	ลักษณะ
ซี (C = Chlorine)	- ทนต่อคลอรีน(ฟอกขาวด้วยไฮโปคลอไรต์) บางครั้งใช้สีแอส มีความหมายเช่นเดียวกัน
ดี (D = Discharge)	- สามารถลอกสีออกได้ดี
ดี (D = Disperse)	- สีชนิดกระจายตัวได้
เอฟ(F = Fast)	- ความคงทนสี สีไม่ตก (สัญลักษณ์ตัวนี้จะระบุก่อนอย่างอื่น)
เอฟ (F = Fine)	- ให้สีสด ไม่มีสิ่งอื่นปน (ระบุเป็นตัวสุดท้าย)
เอช(H = Haft wool)	- ใช้กับผ้าขนสัตว์ปั่นฝ้ายหรือปนเรยอนได้
เค (K = Kait)	- ใช้ย้อมเย็นได้
แอล (L = Light)	- ทนแสงได้ดี
เอน(N = Neutral)	- อาจย้อมในน้ำย้อมที่เป็นกลางได้
พี (P = Perion)	- เหมาะสำหรับใช้ย้อมไนลอน
เอส (S = Soluble)	- ละลายน้ำได้ดี
เอส (S = Silk)	- เหมาะสำหรับใช้ย้อมไหม
ที (T = Tannin)	- เหมาะสำหรับพิมพ์ลอคด้วยสีแทนนิน
ยู (U = Ultra)	- กระจายตัวได้ดีเป็นพิเศษ
ดับเบิลยู (W = Washing)	- ทนต่อการซักดี
ดับเบิลยู (W = Wool)	- สีไคเร็กซ์เหมาะสำหรับย้อมขนสัตว์

### การตั้งชื่อสี

สมาคมผู้ประกอบการย้อมสี American Association of Textile Chemists and Colorists ในประเทศสหรัฐอเมริกาและ Society of Dye and Colorists ในประเทศอังกฤษ ได้ร่วมกันจัดทำทะเบียนรายชื่อสีที่มีจำหน่ายในท้องตลาดขึ้นเรียกว่า Color Index โดยตั้งชื่อให้กับสีแต่ละตัวเรียกว่า C.I. Generic Name โดยมีองค์ประกอบดังนี้

C.I. + ชื่อประเภทของสี + เฉดสี + หมายเลขลำดับ

โดยที่ประเภทของสีแบ่งออกเป็น 15 ประเภทคือ Acid, Azoic, Direct, Disperse, Fluorescent brighteners, Food, Ingrain, Leather, Mordant, Oxidation, Pigment, Reactive, Solvent, Sulfur และ Vat ส่วนเฉดสีจะแบ่งออกเป็น 8 เฉดสี คือสีเหลือง (yellow), ส้ม (orange), แดง (red), ม่วง(violet), ฟ้า(blue), เขียว (green), น้ำตาล (brown), และ ดำ (black) (ราตรีและคณะ, 2543)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ตัวอย่างการเรียกชื่อสี เช่น C.I. Acid Yellow 1 หมายถึง สีแอซิดสีเหลืองหมายเลขหนึ่ง ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.2 องค์ประกอบของสีย้อม

สีย้อมประกอบด้วยส่วนประกอบ 2 ส่วนหลักคือ กลุ่มโครโมฟอร์ (chromophores group) และกลุ่มออกโซโครม (Auxochrome group) โดยกลุ่มโครโมฟอร์ตัวปกติ (Chromophores group) เป็นกลุ่มที่มีพันธะคู่สามารถให้สีได้โดยสามารถดูดกลืนรังสีในช่วงอัลตราไวโอเล็ต (UV range) และช่วงที่มองเห็นได้ (visible range ; VS) ตั้งแต่ 200-800 นาโนเมตร ตัวอย่างโครโมฟอร์ได้แก่ หมู่เอทิลีน (ethylene:  $-C=C-$ ) หมู่คาร์บอนิล (Carbonyl  $\text{--}\overset{\text{O}}{\parallel}\text{C--}$ ) หมู่ไนโตรโซ (nitroso:  $-N=O$ ) หมู่ไนโตร ( $-NO_2$ ) หมู่เอโซไนโตรโซ ( $-N=N-$ ) สำหรับกลุ่มออกโซโครมตัวปกติ (Auxochrome group) เป็นกลุ่มที่มีบทบาทต่อการเกาะติดของสีย้อมกับเส้นใย โดยทั่วไปหมายถึง หมู่ฟังก์ชันที่มีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว และไม่สามารถดูดกลืนรังสีที่มีความยาวคลื่นเกิน 200 นาโนเมตร แต่เมื่อไปเกาะในตำแหน่งที่ติดกับโครโมฟอร์ จะทำให้เกิด resonance interaction ทำให้โครโมฟอร์ดูดกลืนรังสีที่มีความยาวคลื่นมากขึ้น ตัวอย่างออกโซโครม ได้แก่ หมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl:  $-OH$ ) หมู่อะมิโน (amino:  $-NH_2$ ) หมู่คาร์บอกซิลิก (carboxylic:  $-COOH$ )

## 2.2.3 การจำแนกประเภทของสีย้อม

สีย้อมสามารถจำแนกออกได้เป็นลักษณะใหญ่ๆตาม การนำไปใช้ โครงสร้างเคมี และ ลักษณะทางกายภาพ ได้ดังนี้ (กรองกาญจน์, 2530)

### 1. จำแนกสีย้อมตามการนำไปใช้

การจำแนกสีย้อมตามการนำไปใช้เป็นที่นิยมนักมากที่สุด เพราะจะต้องมีความคงทนการซัก มีความคงทนต่อแสงและยังต้องมีความคงทนต่อความร้อน ซึ่งในกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมได้จำแนกสีย้อมตามวิธีใช้ออกเป็น 11 ประเภท คือ (1) สีเอซิด (2) สีไดเรกต์ (3) สีเบสิค (4) สีดิสเพอร์ส (5) สีรีแอคทีฟ (6) สีอะโซอิก (7) สีเร็ด (8) สีเมอร์แดนท์ (9) สีอินเกรน (10) สีออกซิเดชัน และ (11) สีซัลเฟอร์ โดยที่สีย้อมแต่ละประเภทจะมีสูตรโครงสร้างทางเคมี สมบัติของสีย้อม ตลอดจนวิธีใช้ที่แตกต่างกันไป ดังนั้นการเลือกใช้สีย้อมจึงมีความสำคัญอย่างมากในการย้อมสี เพราะวัตถุประสงค์ของการย้อมอาจสามารถย้อมด้วยสีย้อมเพียงชนิดเดียวหรือย้อมด้วยสีย้อมหลายชนิดที่ต่างชนิดกันได้ เช่น

เส้นใยเซลลูโลสส่วนใหญ่จะย้อมด้วยสีไดเรกต์ เป็นต้น

1) สีเอซิด (acid dye) สีชนิดนี้เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ มีประจุลบ ละลายน้ำได้ดี ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน กลไกในการติดสีเกิดเป็นพันธะไอออนิก ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรดเจือจาง สีเอซิดบางตัวสามารถนำไปใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่น ปอ ป่าน ไนลอน โยขนแกะ ไหม และอะคริลิกได้ดี วิธีการใช้จะนำสีย้อมที่เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ไปละลายน้ำย้อมที่เป็นกรดหรือเป็นกลาง สีเอซิดไม่ทนการซัก ไม่ทน

เอกสารนี้คือเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) **สีไดเรกต์ (direct dye)** หรืออาจเรียกว่าสีย้อมฝ้าย สีชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอะโซที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิคที่ทำให้ตัวสีสามารถละลายน้ำได้ มีประจุลบ นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส สีจะติดเส้นใยได้โดยโมเลกุลของสีจะจัดเรียงตัวแทรกอยู่ในระหว่างโมเลกุลเส้นใย และยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน สีไม่ทนต่อการซักน้ำ ตกง่าย ทนแสง

3) **สีเบสิก (basic or cationic dye)** สีย้อมชนิดนี้เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ (organic base) ให้ประจุลบ ละลายน้ำได้ นิยมใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ไนลอนและใยอะคริลิกได้ดี ในขณะที่ย้อมโมเลกุลของสีส่วนที่มีประจุลบจะยึดจับกับโมเลกุลของเส้นใย เป็นสีที่ติดทน ไม่ควรใช้ย้อมเส้นใยธรรมชาติเพราะจะไม่ทนการซักและแสง

4) **สีดิสเพอร์ส (disperse dye)** เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำแต่มีสมบัติกระจายได้ดี สามารถย้อมเส้นใยอะซิเตท เส้นใยโพลีเอสเตอร์ ไนลอน และอะคริลิกได้ดี การย้อมจะใช้สารพา (carrier) เพื่อช่วยเร่งอัตราการดูดซึมของสีเข้าไปในเส้นใยหรือย้อมโดยใช้อุณหภูมิ และความดันสูง สีดิสเพอร์สเป็นสีที่ทนแสงและการซักฟอกค่อนข้างดี แต่สีจะซีดถ้าถูกควันทหรือแก๊สบางชนิด เช่น แก๊สไนโตรซอกไซด์ สีดิสเพอร์สแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม โดยพิจารณากลุ่มเคมีในตัวสีย้อม ได้แก่ สีย้อมอะโซ (azo dyes) และสีย้อมแอมมิโน แอนทราควิโนน (amino anthraquinone) ซึ่งทั้ง 2 กลุ่มประกอบด้วยอนุพันธ์ของเอทราโนลามีน (ethanolamine;  $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$ ) หรืออนุพันธ์ที่คล้ายคลึงกัน

5) **สีรีแอกทีฟ (reactive dye)** เป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบ เมื่ออยู่ในน้ำจะมีสมบัติเป็นด่าง สีย้อมชนิดนี้เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด โมเลกุลของสีจะยึดจับกับหมู่ไฮดรอกไซด์ ( $\text{OH}$ ) ของเซลลูโลสและเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ในสภาวะที่เป็นด่าง กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส สีรีแอกทีฟมี 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง  $70-75^\circ\text{C}$  และกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิต่ำ สีรีแอกทีฟให้สีที่สดใส ทุกสีติดทนในทุกสภาวะ

6) **สีอะโซอิก (azoic dye)** สีย้อมชนิดนี้ไม่สามารถละลายน้ำได้ การที่สีจะก่อรูปเป็นเส้นใยได้ต้องย้อมด้วยสารประกอบฟีนอลซึ่งละลายน้ำได้ก่อน ซึ่งเป็นกระบวนการทำให้รวมตัวเป็นสี (coupling) แล้วย้อมทับด้วยสารไดอะโซคอมโพเนนท์ซึ่งจะเกิดเป็นสีได้ สีอะโซอิกใช้ย้อมเส้นใยได้ทั้งเซลลูโลส ไนลอน หรืออะซิเตท สีอะโซอิกเป็นสีที่ทนต่อการซัก แต่ไม่ทนต่อการขัดถู

7) **สีแว็ต (vat dye)** เป็นสีที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ เมื่อทำการย้อมต้องเตรียมน้ำย้อมให้สีแว็ต ละลายน้ำโดยให้ทำปฏิกิริยากับสารรีดิวซ์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ สีแว็ตจะถูกรีดิคส์ให้กลายเป็นเกลือจึงซึมเข้าไปในเส้นใยได้ เมื่อนำผ้าไปผึ่งในอากาศ สีในเส้นใยจะถูกออกซิไดส์เป็น สีแว็ต สีย้อมชนิดนี้มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญอยู่ 2 ชนิด คือ สีอินดิโก (indigoid) และสีแอนท

เอกซาร์ควิโนอยด์ (anthraquinoid) หรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8) สีมอร์แดนท์ หรือโครม (mordant or chrome dye) สีย้อมชนิดนี้ต้องใช้สารช่วยติดเข้าไปช่วยเพื่อให้เกิดการติดสีบนเส้นใย สารที่ช่วยติดที่ใช้คือ สารประกอบออกไซด์ของโลหะ เช่น โครเมียม ดิบุก เหล็ก อะลูมิเนียม เป็นต้น สีมอร์แดนท์เป็นสีที่มีโมเลกุลใหญ่ซึ่งเกิดจากสีย้อมแดนท์หลายโมเลกุลจับกับโลหะแล้วละลายน้ำได้จึงทำให้ย้อมได้ง่าย ซึ่งใช้ย้อมเส้นใย โปรตีนและเส้นใย พอลิเอไมด์ได้ดี

9) สีอินทรน เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ โดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยากับน้ำ สีย้อมชนิดนี้ใช้สำหรับย้อมฝ้าย

10) สีออกซิเดชัน (oxidation dye) เป็นสีที่มีละลายน้ำโดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยาในน้ำโดยสีจะติดแน่น อาศัยปฏิกิริยาการตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย ใช้สำหรับย้อมฝ้ายและขนสัตว์

11) สีซัลเฟอร์ (sulfur dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ เมื่อทำการย้อมต้องรีดิวซ์สีเพื่อให้โมเลกุลอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้ แต่สีซัลเฟอร์บางชนิดที่ผลิตออกมาจำหน่ายในรูปที่ถูกรีดิวซ์จะละลายน้ำได้ นิยมนำสีซัลเฟอร์มาย้อมฝ้าย สีจะติดทน และมีราคาถูก แต่สีที่อ่อนจะไม่ทนต่อการซัก

#### 2. จำแนกสีย้อมตามโครงสร้างทางเคมี

สีย้อมสามารถจำแนกโดยอาศัยโครงสร้างทางเคมีออกเป็น 15 ชนิด ดังนี้

1) สีไนโตรโซ (Nitroso dyes) โครงสร้างทางเคมีเป็นสารอะโรมาติก (Aromatic compounds) ที่มีหมู่ไนโตรโซ ( $-N=O$ ) และหมู่ไฮดรอกซิล ( $-OH$ ) ในตำแหน่งที่ติดกันในวงเบนซีน ซึ่งในการย้อมจะทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะต่างๆ เช่น เหล็ก โครเมียม โคบอลต์ และนิกเกิล

2) สีไนโตร (Nitro dyes) โครงสร้างทางเคมีเป็นสารอะโรมาติกที่มีหมู่ไนโตร ( $-NO_2$ ) และหมู่ไฮดรอกซิล ( $-OH$ ) หรือหมู่อะมิโน ( $-NH_2$ ) ในตำแหน่งที่ติดกัน หรือตรงข้ามในวงแหวนวงเบนซีน โครงสร้างของสารประกอบอะโรมาติกเป็นโครงสร้างควิโนนอยด์ (Quinonoid) แบ่งออกเป็นสีซัลโฟเนตเตดไนโตร (Sulfonated nitro dyes) ใช้สำหรับย้อมขนสัตว์ และสีอันซัลโฟเนตเตดไนโตร (Unulfonated nitro dyes) เป็นสี pigment

3) สีอะโซ (Azo dyes) เป็นสีที่มีหมู่อะโซ ( $-N=N-$ ) หนึ่งกลุ่มหรือมากกว่า ทำหน้าที่เป็นโครโมฟอร์ และมีหมู่ไฮดรอกซิล ( $-OH$ ) หรืออะมิโน ( $-NH_2$ ) เป็นออกโซโครม สารตัวกลางในปฏิกิริยา (intermediate) มี 2 ชนิด คือ ไดอะโซ (Diazo) และสารร่วมทำปฏิกิริยา (coupling) ซึ่งดำเนินปฏิกิริยาภายใต้สภาวะกรดหรือด่าง ไดอะโซเนียม (Diazonium) ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างอะริลลามีน (Arylamine) หรือเฮเทอโรไซคลิกอะมีน (Heterocyclic amine) กับสารร่วมปฏิกิริยา สีอะโซเป็นกลุ่มสีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรมเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งสีย้อมชนิดนี้ใช้ย้อมได้กับ

เอกสารเส้นใยทุกชนิด (อ้างคำ 2540) การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) สีย้อมอะโซอิก (Azoic dyes) เป็นสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำและตัวทำละลายต่าง ๆ ต้องเตรียมขึ้นบนเส้นใย มีโครโมฟอร์และออกโซโครมเหมือนสีย้อม

5) สีสติลบีเนอ (Stilbene dyes) โครงสร้างมีสติลบีเนอ ( $C_6H_5-CH=CH-C_6H_5$ ) และหมู่อะโซเป็นโครโมฟอร์

6) สีคาโรทีนอยด์ (Carotinoid dyes) โครงสร้างมีหมู่โซพอลิอิน (Polyene) ของคาร์บอนอย่างน้อย 18 อะตอมเป็นโครโมฟอร์ สีชนิดนี้เป็นสีทั่วไปที่พบในธรรมชาติ สำหรับสีคาโรทีนอยด์ที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อใช้เป็นสีผสมอาหาร เช่น เบตา-คาโรทีน ( $\beta$ -Carotene) เป็นต้น

7) สีไดฟีนิลมีเทน (Diphenylmethane dyes) โครงสร้างหลักเป็นไดฟีนิลมีเทน มีหมู่อิมิน ( $-C=NH$ ) เป็นโครโมฟอร์ และหมู่อะมิโนเป็นออกโซโครม ส่วนใหญ่ใช้ย้อมกระดาษ นอกจากนี้อาจใช้ย้อมขนสัตว์ ไหม หนัง ฝ้าย หรือเส้นใยอะคริลิก

8) สีแซนทีน (Xanthrene dyes) โครงสร้างหลักเป็นแซนทีน (Dibenzo-1,4-pyran) และมีหมู่อะมิโนหรือหมู่ไฮดรอกซิลเป็นออกโซโครม โครโมฟอร์เป็นโครงสร้างควิโนนอยด์ นิยมเรียกสีชนิดนี้ว่า สีย้อมมิโนแซนทีน (Aminoxanthrene dye) หรือสีไฮดรอกซิลแซนทีน (Hydroxyl xanthrene dye) สีย้อมกลุ่มนี้ให้สีที่สดใส เนื่องจากสารละลายให้ฟลูออเรสเซนซ์ ใช้ย้อมขนสัตว์และไหมได้ ใช้ย้อมผ้าฝ้ายโดยใช้แทนนินเป็นมอร์แดนท์

9) สีย้อมอะคริดีน (Acridine dyes) โครงสร้างหลักเป็นอะคริดีนและมีหมู่อะมิโนเป็นออกโซโครม มีโครโมฟอร์เป็นโครงสร้างควิโนนอยด์ สีชนิดนี้นิยมใช้ย้อมหนัง และใช้เป็นสีเบสสำหรับย้อมไหมและเซลลูโลส

10) สีย้อมควิโนลีน (Quinoline dyes) โครงสร้างหลักเป็นควิโนลีน สีกลุ่มนี้มีโครโมฟอร์คือ 2(2-Quinoly)-1, 3-indandiene สีพวกนี้นิยมใช้เป็นตัวทำละลายและสีเบสสำหรับย้อมกระดาษ

11) สีย้อมแอนทราควิโนน (Anthraquinone dyes) โครงสร้างหลักคือ แอนทราควิโนนเป็นโครโมฟอร์และหมู่อะมิโนหรือหมู่ไฮดรอกซิลเป็นออกโซโครม นิยมใช้เป็นสีวัต สีแอซิด สีมอร์แดนท์

12) สีย้อมอินดิโกออยด์ (Indigoid dyes) โครโมฟอร์คือ  $-CO-C=C-CO-$  และมีหมู่อะมิโนหรือซัลเฟอร์เป็นออกโซโครม ใช้เป็นสีวัตในการย้อมผ้า

13) สีย้อมไทอะโซล (Thiazole dyes) โครงสร้างหลักคือ วงแหวนไทอะโซลเป็นโครโมฟอร์ มีหมู่อะมิโนเป็นออกโซโครม สีชนิดนี้ใช้ย้อมผ้าได้โดยตรง

14) สีย้อมซัลเฟอร์ (Sulfur dyes) เป็นสีที่มีกำมะถัน (S) เป็นองค์ประกอบของโครงสร้างทางเคมี สีย้อมซัลเฟอร์นี้ไม่ละลายน้ำและสีไม่ติดเส้นใย ต้องเปลี่ยนให้อยู่ในรูปสารประกอบลิวโค (Leuco compound) โดยทำปฏิกิริยากับโซเดียมซัลไฟด์ (Sodium sulfide) หรือโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ (Sodium hydrosulfide) ก่อนทำให้สีเกาะติดเส้นใย นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส ผ้าไหม

15) สีย้อมฟทาโลไซยานิน (Phthalocyanin dyes) สีกลุ่มนี้มี Tetrabenzoporphyrine เป็นโครโมฟอร์ เป็นโครโมฟอร์ที่เสถียรที่สุด สีพวกนี้ใช้ย้อมผ้าไหมและเส้นใยสังเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารตัวอย่าง ไม่สามารถนำไปใช้

โมฟอร์ และ โครงสร้าง โมเลกุลที่สามารถจับ โลหะ มีสมบัติทนต่อแสง ความร้อน กรด และเบส ใช้สำหรับสีเคลือบผิว หมึกพิมพ์ พลาสติก เส้นใย ยาง เป็นต้น

### 3. จำแนกตามลักษณะทางกายภาพ

สีย้อมสามารถจำแนกตามลักษณะทางกายภาพ ได้เป็น 2 ชนิด คือ สีชนิดละลายน้ำได้และสีชนิดที่ไม่ละลายน้ำ

#### 1) สีชนิดที่ละลายน้ำได้

- สีแอซิด (Acid dyes)
- สีเบสิก (Basic dyes)
- สีไดเรกซ์ (Direct dyes)
- สีรีแอกทีฟ (Reactive dyes)

#### 2) สีชนิดที่ละลายน้ำไม่ได้

- สีอะโซ (Azo dyes)
- สีดีสเพอร์ส (Disperse dyes)
- สีแว็ต (Vat dyes)
- สีซัลเฟอร์ (Sulfur dyes)
- สีพิกเมนต์ (Pigment dyes)
- สีเมทัลคอมเพล็กซ์ (Metal complex dyes)

นอกจากนี้ ประเภทของสีย้อมยังสามารถจำแนกตามชนิดของเส้นใยที่นำไปย้อมสีดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ประเภทของสีย้อม โดยจำแนกตามชนิดของเส้นใยที่นำไปย้อมสี

(อุตสาหกรรมย้อมผ้า, 2537)

เส้นใย	ประเภทของสี
ฝ้าย	Direct, Sulfur, Azo, Vat, Reactive
ลินิน	Direct, Sulfur, Azo, Vat, Reactive
ขนสัตว์	Acid, Metal-complex, Mordant, Reactive
ไหม	Acid, Direct, Reactive, Basic
เรยอน	Direct, Reactive
อะซิเตท	Disperse
ไนลอน	Acid, Modified basic, Metal-complex
โพลีเอสเตอร์	Disperse
อะคริลิก	Modified basic, Modified acids

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.4 สีย้อมรีแอคทีฟ (Reactive dyes)

สีย้อมรีแอคทีฟเป็นสีที่ใช้มากในอุตสาหกรรมฟอกย้อม (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542) เป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อน ละลายน้ำได้ดี และย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ดี โดยจะมีคุณสมบัติเป็นอไอออนลบ เมื่ออยู่ในน้ำย้อมที่มีฤทธิ์เป็นด่าง ในขณะที่ย้อมโมเลกุลของสี จะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซี ( $\text{OH}^-$ ) ของเส้นใยเซลลูโลส แล้วเชื่อมโยงติดกันโดยพันธะโควาเลนต์แบบครอสลิงค์ (Cross link) กับเซลลูโลส ได้สารประกอบชนิดใหม่ ทำให้ได้สีที่มีความทนทานต่อการซักฟอก โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมรีแอคทีฟประกอบด้วย 4 กลุ่ม และสามารถเขียนได้เป็นสัญลักษณ์ของโครงสร้างอย่างง่ายคือ

S-D-T-X

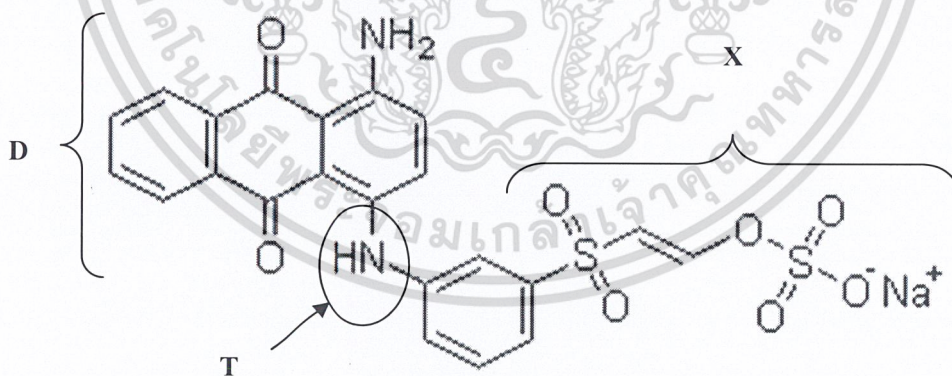
เมื่อ D = Chromophoric group เป็นกลุ่มที่ทำให้เกิดสี (Chromophore) และสร้างการยึดเกาะ (Substantivity) กับเส้นใยเซลลูโลส

X = Reactive system เป็นกลุ่มที่ทำให้สีย้อมเกิดปฏิกิริยากับกลุ่มไฮดรอกซี ( $\text{OH}$ ) ของเส้นใย

T = Bridging group เป็นกลุ่มที่ทำหน้าที่เชื่อมระหว่าง Reactive system กับ Chromophore ยกตัวอย่าง เช่น หมู่  $-\text{NH}$ ,  $-\text{NHCO}$ ,  $-\text{SO}_2$ ,  $-\text{NHSO}_3$  และ  $-\text{NCH}_3$  เป็นต้น

S = Solubilising group คือ กลุ่มที่มีความสามารถในการละลายน้ำสูง และเป็นกลุ่มที่ติดอยู่กับโครโมฟอร์ (Chromophoric group) โดยทั่วไปเป็นพวกกรดซัลโฟนิค ( $-\text{SO}_3\text{Na}$ ) ซึ่งอาจมีเพียงกลุ่มเดียวหรือมากกว่า 1 กลุ่ม

ตัวอย่าง สูตรโครงสร้างสีย้อม Remazol Brilliant Blue R แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างสีย้อม Remazol Brilliant Blue R

(Saqib and Muneer, 2002)

ในบางกรณีกลุ่มรีแอคทีฟอาจต่ออยู่กับโครโมฟอร์โดยตรง โดยที่ไม่มี bridging group ก็ได้ และกลุ่มรีแอคทีฟส่วนใหญ่จะเป็นสาร Heterocyclic ring

โครงสร้างเคมีที่เป็นองค์ประกอบของรีแอคทีฟมีได้ทุกประเภท ยกตัวอย่างเช่น แอนทราควิโนน (Anthraquinone) กลุ่มอะโซ (Azo) ฟาธาโลไซยานิน (Phthalocyanin) เป็นต้น

เอกสารอ้างอิงบางส่วนที่นำมาใช้เพื่อประกอบเนื้อหาข้างต้นนี้ไปจะยกมาให้ไว้เป็นประโยชน์ในการค้นคว้า ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.5 ความเป็นพิษของสี้อม

โดยทั่วไปสี้อมเป็นสารที่มีความเป็นพิษต่ำ จากประวัติที่มีการเก็บรวบรวมในต่างประเทศ ไม่พบว่าผู้ที่ทำงานในโรงงานฟอกย้อมพิมพ์มีอัตราการตายหรือการเจ็บป่วยสูงกว่าบุคคลในอาชีพอื่นแต่อย่างใด (นันทยา, 2537) แต่สี้อมบางชนิดอาจเปลี่ยนแปลงกลายเป็นสารพิษที่มีพิษได้ เช่น สี้อมที่มีโครงสร้างแบบอะโซ ซึ่งเป็สี้อมที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมฟอกย้อม โดยมีการใช้ถึง 60-70% ของสีที่ใช้กันอยู่ สีอะโซจะมีพันธะคู่ของไนโตรเจน (N=N) เป็นหมู่โครโมฟอร์ ซึ่งในสภาวะที่ไม่ใช้ออกซิเจน หมู่อะโซจะถูกทำลายโดยสารรีดิวซ์ (Reducing agent) พันธะอะโซจะแตกตัวออกได้เป็นสารอะโรมาติกเอมีน ซึ่งเป็นสารตัวกลาง (intermediate) ของสารก่อมะเร็ง และเป็นสารก่อมะเร็งในสัตว์ทดลองได้ แต่สารพิษนี้สามารถถูกออกซิไดซ์ต่อไปได้ในสภาวะที่ใช้ออกซิเจน ดังนั้นการบำบัดสี้อมโดยใช้จุลินทรีย์ในการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนเพียงอย่างเดียว ไม่สามารถใช้เป็นขั้นสุดท้ายในการกำจัดสี้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ต้องใช้กระบวนการบำบัดแบบใช้ออกซิเจนร่วมด้วยเพื่อให้เกิดการย่อยสลายสี้อมที่สมบูรณ์ (โกมล, 2541) อย่างไรก็ตาม สารอะโรมาติกเอมีนที่ใช้ในอุตสาหกรรมสีที่สามารถก่อให้เกิดมะเร็งเพียง 15 ชนิดเท่านั้น โดยทั่วไปแล้วสีอะโซจะไม่แตกตัวให้สารอะโรมาติกเอมีน แต่จะแตกตัวให้กรดอะโรมาติกเอมีโนซัลโฟนิค (Aromatic aminosulphonic acid) ซึ่งไม่ก่อให้เกิดมะเร็งหรือมีโอกาสที่จะก่อให้เกิดมะเร็งน้อยมาก (อังคณา, 2540) สี้อมอาจเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทาง คือ ทางการหายใจ ด้วยการสูดดมสีที่ฟุ้งกระจายอยู่ในอากาศ ทางการสัมผัสทางผิวหนัง และทางการปะปนเข้าไปกับการรับประทานอาหาร สำหรับผลกระทบของสี้อมต่อสิ่งแวดล้อม พบว่าสี้อมเป็นสารที่สลายตัวทางชีวภาพได้ยาก แต่มีความเป็นพิษต่อปลาค่อนข้างต่ำ ดังนั้นปัญหาสำคัญของสี้อมในน้ำที่ปัจจุบันจึงไม่ได้อยู่ที่ความเป็นพิษของสี้อม แต่อยู่ที่สีของน้ำที่สี้อมที่มีสีเข้มแม้จะมีสีอยู่ในแหล่งน้ำเพียงปริมาณเล็กน้อยก็ทำให้น้ำมีสีเป็นที่น่ารังเกียจต่อผู้พบเห็น โดยทั่วไปแล้วปริมาณของสีที่ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำแล้วสังเกตเห็นได้จะอยู่ในช่วง 0.1-1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร อย่างไรก็ตาม ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น ชนิดสี สภาพแสง และระดับความใสของน้ำ และจากการศึกษาของ Brown และ Hamburger (1987) พบว่าสี้อมที่ปล่อยออกมาจากโรงงานย้อมสิ่งทอมีความเข้มข้นประมาณ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่โรงงานจะต้องกำจัดสีจากน้ำทิ้งแม้ว่าสีจะมีความเป็นพิษต่ำก็ตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.6 ชนิดของสีย้อมในกระบวนการฟอกย้อม

ตารางที่ 2.5 ชนิดผลของสีย้อมในกระบวนการฟอกย้อม

กลุ่มสีย้อม	ชนิดของเส้นใย	ปริมาณสีย้อมในเส้นใย	ปริมาณสีในน้ำทิ้ง	ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้ง
แคทไอออนิก	อะคิลิก	~ 98 %	~2 %	กรดอ่อน
แอซิด	ขนสัตว์ ไหม ไนลอน	95-98 %	2-5 %	กรด อาจพบเกลือของโลหะหนัก
เมทัล คอมเพล็กซ์	ขนสัตว์ ไหม ไนลอน	95-98 %	2-5 %	กรด อาจพบเกลือของโลหะหนัก
ไดเรกต์	ฝ้าย เส้นใย เซลลูโลสชนิดอื่น ๆ เช่น วิสโคส เป็นต้น	~ 80 %	~20 %	-
ดิสเพอร์	โพลีเอสเตอร์ ไนลอน อะซิเตด	~ 90 %	~ 10 %	เป็นกลางและอาจพบ แครีเออร์
เว็ต	ฝ้าย เส้นใย เซลลูโลสชนิดอื่น ๆ เช่น วิสโคส เป็นต้น	~ 95 %	~ 5 %	เป็นด่าง และมีสารรีดิวซ์
ซัลเฟอร์	ฝ้าย เส้นใย เซลลูโลสชนิดอื่น ๆ เช่น วิสโคส เป็นต้น	~ 60 %	~ 40 %	เป็นด่าง มีความเข้มข้นเกลือสูง และสารประกอบซัลเฟอร์
รีแอคทีฟ	ฝ้าย เส้นใย เซลลูโลสชนิดอื่น ๆ เช่น วิสโคส เป็นต้น	~ 50-95 %	~ 5-50 %	เป็นด่างและมีความเข้มข้นเกลือสูง

## 2.3 น้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม

น้ำเสียส่วนใหญ่เกิดจากกระบวนการผลิต สามารถแบ่งลักษณะการเกิดน้ำเสียได้เป็น 2 สายหลักสายแรกเป็นน้ำเสียที่มีสีและสารเคมีมาจากขั้นตอนการฟอกย้อม และพิมพ์ผ้า ซึ่งน้ำเสียจากสายแรกมีค่าความเป็นกรดสูง สำหรับสายที่สองเป็นน้ำเสียที่ไม่มีสีแต่อาจมีสารเคมีปนบ้างเล็กน้อยมาจากขั้นตอนการเตรียมผ้าก่อนการนำไปย้อม รวมทั้งน้ำที่เกิดจากการล้างพื้นที่บริเวณ

ปฏิบัติงาน ล้างภาชนะอุปกรณ์ และล้างระบบและถังกรองน้ำเพื่อผลิตน้ำสำหรับเข้าหม้อไอน้ำ โดยไม่ผ่านการใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณน้ำเสียและค่ามลสารมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น รูปแบบเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิต สีย้อมและสารเคมีอื่นๆที่ใช้ เป็นต้น คุณลักษณะน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากแต่ละขั้นตอนการผลิต แสดงดังตารางที่ 2.6 ซึ่งระบบรวบรวมน้ำเสียที่เกิดขึ้นทั้งสองสายจากขั้นตอนต่างๆเป็นระบบรับน้ำเสียแยกกัน แต่ไหลลงไปสู่อุปกรณ์บำบัดน้ำเสียพร้อมกันก่อนถูกสูบต่อไปบำบัดน้ำเสียของโรงงาน ซึ่งระบบบำบัดอาจแตกต่างกันตามลักษณะความพร้อมในการลงทุน ลักษณะคุณภาพน้ำเสีย สภาพแวดล้อมของโรงงานและปัจจัยอื่นๆและจากระบบบำบัดนี้ น้ำที่ผ่านการบำบัดอาจถูกระบายออกไปยังแหล่งน้ำสาธารณะหรือถูกกักเก็บไว้ภายในพื้นที่โรงงาน

ตารางที่ 2.6 ลักษณะของน้ำทิ้งจากขั้นตอนการผลิตต่างๆของโรงงานฟอกย้อม

ขั้นตอน	มลสารในน้ำทิ้ง	ปริมาณน้ำทิ้ง	ลักษณะของน้ำทิ้ง
ลอกแป้ง	แป้ง กลูโคส ซีเอ็มซี พีวีซี เรซิน ไขมัน และ จีฟังก์ธรรมชาติหรือสังเคราะห์	ประมาณ 50 ลิตรต่อ 1 กิโลกรัมของผ้า	ค่าบีโอดีสูง ไม่ทำให้เกิดบีโอดีสูง
ขจัดสิ่งสกปรก	โซดาไฟ จีฟังก์ กรีน โซดาแอชโซเดียม ซิลิเกต เศษเส้นใย	10 ลิตรต่อ 1 กิโลกรัม	เป็นด่างแรง สีดำ และ บีโอดีสูง (30% ของทั้งหมด)
ฟอกขาว	ไฮโปคลอไรท์ คลอรีน โซดาไฟกรด ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	ส่วนใหญ่เป็นการซักล้าง	สารประกอบ พวกด่าง บีโอดีประมาณ 5%
ชุบมัน	โซดาไฟ	ปริมาณน้อยส่วนใหญ่เป็นการซักล้าง	ค่าด่างแรง บีโอดีต่ำ (น้อยกว่า 1% ของทั้งหมด)
ย้อมสี	สีย้อมชนิดต่างๆเกลือ และสารรีดิวซิ่ง เช่น ซัลไฟด์ เป็นต้น	ปริมาณมาก	สีเข้ม บีโอดีค่อนข้างสูงของแข็งละลายน้ำทั้งหมด ซีโอดีต่ำ และ เกิดฟอง
การพิมพ์	สี แป้งพิมพ์ กาวน้ำมัน สารให้เกิดสี กรดและเกลือ	ปริมาณน้อยมาก	สีเข้มบีโอดีค่อนข้างสูง มีน้ำมัน
การตกแต่งสำเร็จ	แป้งเล็กน้อย สารซักฟอกที่เหลือเกลือ	ปริมาณน้อยมาก	เป็นด่างเล็กน้อย บีโอดีต่ำ ซีโอดีสูง

เอกสารนี้จัดทำขึ้นเพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้เพื่อการตัดสินใจใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารนี้ การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมายและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารนี้

น้ำเสียในการย้อมผ้า เกิดจากกระบวนการต่างๆดังนี้

1. กระบวนการต้มเป้ง เป็นการกำจัดแป้งที่ติดมากับกระบวนการทอออก การต้มเป้งเป็นการทำให้แป้งสลายตัวเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้

2. กระบวนการทำความสะอาด เป็นการเอาสิ่งสกปรกที่ติดมากับเส้นใยออกก่อนที่จะนำไปทอเป็นผืนผ้า

3. กระบวนการฟอกขาว เป็นการกำจัดสีธรรมชาติของเส้นใยออก โดยใช้สารเคมีคือ โซเดียมไฮโปคลอไรท์ กระบวนการนี้จะทำก่อนการย้อมเพื่อให้สีติดดียิ่งขึ้นและสีไม่เปลี่ยน

4. กระบวนการชุบมัน เป็นการทำให้ผ้าเพิ่มความมัน และดูดสีได้มากขึ้น ทำให้ผ้านุ่มทำได้โดยการชุบผ้าลงน้ำยา โซดาที่อุณหภูมิต่ำ

5. กระบวนการย้อมสี และการตกแต่งพิเศษ

6. กระบวนการพิมพ์ผ้า

7. น้ำที่ใช้ในการล้างทำความสะอาดโรงงาน นอกจากนี้กระบวนการฟอกย้อมยังอาศัยไอน้ำจากหม้อไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อนแก่น้ำที่ใช้ในกระบวนการ ถ้าไอน้ำถูกปล่อยให้เย็นลงและกลั่นตัวในท่อไอน้ำจะได้น้ำที่สะอาดที่สามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้ แต่ถ้าไอน้ำถูกส่งไปให้ความร้อนแก่น้ำย้อมโดยตรง จะไปเพิ่มปริมาณของน้ำย้อมและถูกรวมเป็นน้ำเสีย ส่วนน้ำหล่อเย็นในกระบวนการย้อม ใช้เพื่อลดอุณหภูมิของน้ำย้อมลงในระยะเวลาอันสั้น ซึ่งส่วนใหญ่เป็นน้ำสะอาดสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

2.3.1 ประเภทของสิ่งเจือปนในน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อม

น้ำเสียที่ได้จากกระบวนการฟอกย้อมนั้นมีสิ่งสกปรกเจือปนอยู่มากมายหลายประเภทสามารถจำแนกออกเป็นประเภทที่สำคัญๆได้ดังนี้ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

1. สีย้อม (Dye) การย้อมเส้นใยจะมีการดูดซึมสีย้อมจากสารละลายสีย้อมเพียงบางส่วนเท่านั้น สีย้อมที่เหลือจะคงอยู่นานละลาย และจะถูกปล่อยออกมากับน้ำเสียในที่สุด ปริมาณสีย้อมที่ยังคงเหลืออยู่ในสารละลายสีย้อมจะแตกต่างกันไปตั้งแต่ร้อยละ 5-50 ขึ้นอยู่กับประเภทของสีย้อมที่ใช้

2. สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อม สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมรวมทั้งสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการตกแต่งสำเร็จแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม คือ

3. สารช่วยย้อม (Auxiliary chemicals) ได้แก่ สารช่วยขจัดสิ่งสกปรก (Scouring agent) สารช่วยเปียก (Wetting agent) และสารที่ช่วยในการย้อมสีให้ได้สีสม่ำเสมอ (Leveling agent)

4. สารเคมีพื้นฐาน (Basic chemicals) เป็นสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมโดยตรง ได้แก่ กรด ค่าง บัฟเฟอร์ เกลือ สารฟอกขาว และสารลอกแป้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. สารเคมีตกค้างสำเร็จ ได้แก่ สารที่ป้องกันการซึมของน้ำ สารกันเชื้อรา สารกันไฟ สารกันยับ เป็นต้น สารเคมีต่างๆที่กล่าวข้างต้นเมื่อนำมาใช้ในกระบวนการฟอกย้อม สารเคมีเหล่านี้ ส่วนใหญ่จะคงเหลืออยู่ในสารละลายสีย้อมหรือน้ำซักล้าง และถูกปล่อยปนออกมากับน้ำเสีย

6. **สิ่งสกปรกเจือปนในเส้นใย** วัสดุสิ่งทอที่ถูกนำมาผ่านกระบวนการฟอกย้อม ล้วนแต่มีสิ่งสกปรกเจือปนมาบ้างไม่มากก็น้อย โดยทั่วไปเส้นใยธรรมชาติจะมีสิ่งสกปรกเจือปนสูงกว่าเส้นใยสังเคราะห์ เพราะนอกจากจะมีสิ่งสกปรกเจือปนที่ติดมาในระหว่างกระบวนการผลิตแล้ว ยังมีสิ่งสกปรกเจือปนที่ติดมากับธรรมชาติซึ่งมีปริมาณค่อนข้างมากด้วย เช่น เส้นใยขนแกะมีสิ่งสกปรกเจือปนที่ติดมากับธรรมชาติที่ต้องกำจัดออกไปในขั้นตอนการเตรียมผ้าถึงร้อยละ 10 สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้มีทั้งที่เป็นสารจี๊sing ไขมัน โปรตีน ตลอดจนสารประกอบโลหะต่างๆ เช่น พวกสารหล่อลื่น และแป้งที่ใช้ในการลงแป้ง เส้นด้ายยีนส์ เป็นต้น สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้จะถูกกำจัดออกจากเส้นใยในขั้นตอนการเตรียมผ้าก่อนการฟอกย้อม และจะหลุดติดออกมาในน้ำเสีย

7. **เศษเส้นใย** ในน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมมีองค์ประกอบสิ่งหนึ่งที่จะหลีกเลี่ยงไม่ได้ คือ เศษเส้นใยที่หลุดออกมา เศษเส้นใยนี้หากมีปริมาณมากก็อาจทำให้เกิดปัญหาการอุดตันของน้ำเสียในเครื่องย้อมได้ นอกจากนี้ในกรณีของเส้นใยโพลีเอสเตอร์ (polyester) ยังมีสารโอลิโกเมอร์ (oligomer) ที่อาจหลุดออกมาจากเส้นใยและปะปนในน้ำเสียด้วย

8. **สิ่งสกปรกเจือปนอื่นๆ** นอกจากสิ่งสกปรกเจือปนต่างๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้ว น้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมยังอาจมีสิ่งสกปรกเจือปนชนิดอื่นๆอีก เช่น สารเคมีพิเศษที่ใช้ในการจัดรอยเประเปื้อนบนผ้า ซึ่งมักจะเป็นสารประกอบจำพวก Chlorinated benzene สารเคมีที่ใช้ในการล้างเครื่องจักร เป็นต้น ซึ่งสารเคมีบางตัวอาจส่งผลกระทบต่อลักษณะสมบัติของน้ำเสีย

### 2.3.2 สมบัติของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม

น้ำเสียที่มาจากโรงงานต่างๆจะมีลักษณะแตกต่างกันไปตามชนิดของเส้นใยที่นำมาย้อมและการใช้กระบวนการย้อมที่แตกต่างกัน

ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม มีลักษณะดังนี้

1) ปริมาณสารอินทรีย์สูง เนื่องจากมีค่า BOD, COD สูง ปริมาณสารอินทรีย์ที่ได้จากกระบวนการฟอกย้อม ได้แก่ แป้ง สีย้อม เส้นใย และด้ายที่ปนออกมาจากกระบวนการฟอกย้อมและตกแต่ง ไขมัน และตัวทำละลายต่างๆ

2) มีความเป็นด่างสูง สารที่ทำให้น้ำมีลักษณะเป็นด่างคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )

3) มีอุณหภูมิสูง

4) ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำสูง ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำมาจากเกลือโซเดียม และกรด

เอกสารต่างๆ เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ 5) มีสีเข้มมาก ซึ่งมาจากสีที่ใช้ในการย้อมผ้าอย่างองถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) มีโลหะเจือปน โลหะหนักนี้มาจากสีที่ใช้ย้อมผ้า โดยส่วนใหญ่จะเป็นโลหะพวก ทองแดง ตะกั่ว โครเมียม และสังกะสี

### 7) มีปริมาณ SS สูง

จากการสำรวจจากการเก็บตัวอย่างน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล จำนวน 100 ตัวอย่าง ซึ่งการเก็บตัวอย่างน้ำเสียได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำแบบจ้วงตัก (Grab sample) ที่จุดรวมน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสียโดยมีค่าการตรวจวัด ได้แก่ ความสกปรก ในรูปของค่า BOD, COD, SS, ฟิเอน และค่าปริมาณสี โดยใช้วิธีการเทียบสี (Platinum Cobalt Method) ซึ่งได้ผลสรุปค่าประเมินต่างๆแสดงดังตารางที่ 2.7 (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

ตารางที่ 2.7 สมบัติของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมก่อนการบำบัดแบ่งตามผลิตภัณฑ์

(กรมโรงงานอุตสาหกรรม , 2542)

ผลิตภัณฑ์ ที่ฟอกย้อม	ฟิเอน	BOD	COD	SS	สี (Pt Co)	จำนวน ข้อมูล
		(มิลลิกรัม ต่อลิตร)	(มิลลิกรัม ต่อลิตร)	(มิลลิกรัม ต่อลิตร)		
ฟอกย้อมด้าย	8.2	120	300	43	450	13
ฟอกย้อมผ้าถัก	9.0	110	370	50	570	16
ฟอกย้อมผ้าทอ	8.6	400	1200	140	670	41
ฟอกย้อมด้าย และผ้าอื่นๆ	9.1	230	713	65	400	30

### 2.3.3 การกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากการย้อมผ้า

สีย้อมในน้ำเสียจากกระบวนการย้อมผ้าสามารถถูกกำจัดไปบางส่วนจากการบำบัดน้ำเสียขั้นทุติยภูมิไม่ว่าจะเป็นกระบวนการบำบัดด้วยวิธีทางเคมีหรือทางชีวภาพ ความพยายามที่จะกำจัดสีย้อมที่เหลืออยู่ในน้ำทิ้งให้หมดไป หรือให้มีเหลืออยู่น้อยที่สุดได้มีการคิดค้นมาเป็นเวลานาน วิธีการบำบัดอาจใช้วิธีใดวิธีหนึ่งหรืออาจจะใช้หลายวิธีร่วมกันก็ได้ ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดขึ้นอยู่กับสารเคมีที่นำมาใช้ในการผลิตสี บางครั้งพบว่าวิธีการเดียวอาจไม่สามารถกำจัดสีย้อมได้อย่างเหมาะสมจึงจำเป็นต้องมีวิธีอื่นร่วมด้วย เนื่องจากโรงงานฟอกย้อมมีการใช้สีย้อมหลายประเภทด้วยกัน วิธีที่ใช้ในการบำบัดสีย้อมในน้ำทิ้งมีดังนี้

#### 1) โคนอกกูเลนชันด้วยสารเคมี (Chemical coagulation)

โคนอกกูเลนชันหรือการสร้างตะกอนเคมี ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนใหญ่ๆ คือ ขั้นตอนการเอกสารเคมีสารเคมีสร้างตะกอน (coagulant) ซึ่งได้แก่ สารส้ม ปูนขาว เกลือของเหล็ก สารโพตัสไอเล็กโทรค้ำไม่ว่าไลต์ (polyelectrolyte) เป็นต้น ผสมกับน้ำเสียที่มีตะกอนแขวนลอยเล็กๆ ขั้นตอนที่สอง คือ การใช้

กวนอย่างช้าๆ เพื่อให้เกิดสภาพรวมตะกอน (flocculation) ซึ่งได้มีการเกาะกันระหว่างตะกอนแขวนลอยเล็กๆกับสารสร้างตะกอน จนได้ตะกอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจนสามารถตกตะกอนได้ สาเหตุที่ต้องทำการกวนอย่างช้าๆเพราะไม่ให้สภาพการเกาะตัวกันเกิดการแตกหลุดจากกันของตะกอนเล็กๆเหล่านั้น การหาปริมาณสารเคมีที่ต้องการใช้ในการสร้างตะกอนจำเป็นต้องทำการทดลองที่เรียกว่า จาร์เทส (Jar test) โดยการทดลองจะมีทั้งการกวนเร็ว 100 รอบต่อวินาทีที่ประมาณ 1 นาที ตามด้วยการกวนช้า 20-70 รอบต่อนาที ประมาณ 20 นาที ในกระบวนการกำจัดสีข้อมด้วยโคแอกกูแลชันนั้นมีสารเคมีสร้างตะกอนให้เลือกชนิด การเลือกใช้สารสร้างตะกอนขึ้นอยู่กับความเหมาะสม โดยดูปัจจัยด้านประสิทธิภาพค่าใช้จ่าย วัสดุประสงค์ และอื่นๆ

## 2) การดูดติดผิว (Adsorption)

การดูดติดผิวเป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ ซึ่งอยู่ในรูปของเหลวหรือก๊าซให้มาเกาะจับ หรือติดบนผิวโมเลกุลหรือคอลลอยด์เรียกว่า สารถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับเรียกว่า สารดูดติด (adsorbent) และเรียกกลไกตั้งแต่โมเลกุลหรือคอลลอยด์เคลื่อนที่ไปเกาะติดกับพื้นผิวของสารอีกสารหนึ่งว่า การดูดติดผิว (adsorption) การเกาะจับโมเลกุลบนผิวของสาร อาจเกิดขึ้นด้วยแรงทางกายภาพ เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) หรือด้วยแรงทางเคมีหรือทั้งสองอย่างรวมกัน โดยทั่วไปการดูดติดผิวในกระบวนการกำจัดสี และกลิ่นในน้ำประปา และกระบวนการกำจัดสีในน้ำเสีย นิยมใช้แอกติเวตเต็ดคาร์บอนซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง จึงทำให้มีความสามารถในการดูดติดผิวสูง

## 3) คลอรีเนชัน (Chlorination)

คลอรีเนชันเป็นวิธีการกำจัดสีโดยใช้คลอรีนเป็นตัวออกซิไดซิงเอเจนต์ (Oxidizing agent) ซึ่งมีอำนาจออกซิไดซิงสูงไปทำปฏิกิริยากับสีที่อยู่ในน้ำทิ้ง ทำให้สีหายไปหรือลดปริมาณสีลง ปริมาณสีที่ลดลงขึ้นอยู่กับปริมาณและความเข้มข้นของคลอรีนที่ใช้ คลอรีนที่ใช้จะอยู่ในรูปของก๊าซคลอรีน สารประกอบไฮโปคลอไรท์ (Hypochlorite) และคลอรีนไดออกไซด์ (Chlorine dioxide)

## 4) โอโซนเนชัน (Ozonation)

โอโซนเนชันเป็นการกำจัดสีในน้ำเสียโดยใช้โอโซน ( $O_3$ ) เป็นตัวออกซิไดซิงเอเจนต์ไปทำปฏิกิริยากับสีที่อยู่ในน้ำทิ้งเช่นเดียวกับการใช้คลอรีน แต่โอโซนมีความสามารถในการออกซิไดซิงสูงกว่าคลอรีนเกือบ 1 เท่า การผลิตโอโซนทำได้โดยผ่านอากาศแห้ง หรือออกซิเจนบริสุทธิ์ไประหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ที่มีความต่างศักย์ประมาณ 15,000-20,000 โวลต์ อะตอมของออกซิเจนจะถูกบังคับให้จับตัวกันใหม่กลายเป็นโอโซน ( $O_3$ ) อากาศแห้ง 1 ลูกบาศก์เมตร สามารถผลิตโอโซนได้ไม่เกิน 30 กรัม หรือเท่ากับ 1.4 % โดยปริมาตร ถ้าใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์แทนอากาศแห้งอาจได้

เอกสารโอโซนเพิ่มเป็น 60-90 กรัม/ลูกบาศก์เมตร โอโซนสามารถทำให้เป็นของเหลวได้ แต่นิยมใช้ในรูปก๊าซมากกว่า โอโซนเป็นก๊าซพิษที่ก่อให้เกิดการระคายเคืองอย่างรุนแรงเมมนุษย์สามารถทนโอโซนได้

ได้ถึง 0.1 ppm โดยปริมาตร โดยไม่เป็นอันตราย แต่ถ้าให้มนุษย์ดมโอโซนเข้มข้นประมาณ 1% (ที่ผลิตได้โดยตรงจากเครื่อง) จะถึงแก่ความตายภายใน 1 นาที

### 5) เทคโนโลยีในการใช้แผ่นเมมเบรน (Membrane Technology)

เทคโนโลยีในการใช้แผ่นเมมเบรนประกอบด้วยวิธีอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration) และรีเวอร์ออสโมซิส (Reverse Osmosis) วิธีอัลตราฟิลเตรชันมีหลักการการทำงานของระบบคือ ใช้แผ่นเยื่อกระดาษ (membrane) แบบ porous พวกเซลลูโลสอะซิเตต (Cellulose acetate) หรือพอลิเมอร์สังเคราะห์ต่างๆและอัดน้ำเข้าไปด้วยแรงดันไม่เกิน 1,034 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร เยื่อกรองจะทำหน้าที่แยกสารปนเปื้อนทั้งแบบละลายน้ำ และตะกอนเล็กที่มีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 500-500,000 และขนาดตั้งแต่  $2 \times 10^{-6}$  ถึง  $1 \times 10^{-7}$  มิลลิเมตรได้ สำหรับวิธีรีเวอร์ออสโมซิสสามารถแยกสารปนเปื้อนที่มีขนาดตั้งแต่  $4 \times 10^{-7}$  ถึง  $6 \times 10^{-5}$  มิลลิเมตร ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าวิธีอัลตราฟิลเตรชัน นิยมใช้ในการแยกเกลือที่ละลายน้ำได้ด้วยการกรองผ่านเยื่อกรองแบบเยือกึ่งซึมผ่านได้ (semipermeable membrane) ณ ความดันตั้งแต่ความดันบรรยากาศจนถึง 6,900 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร ระบบนี้ประกอบด้วยแผ่นเยื่อกรอง ตัวถัง และเครื่องสูบน้ำที่ให้ความดันสูง พวกแผ่นเยื่อกรองที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่ เซลลูโลสอะซิเตต และไนลอน

ในปัจจุบันนี้ วิธีอัลตราฟิลเตรชันเป็นเทคโนโลยีในการนำวัสดุกลับมาใช้ใหม่ พบว่าสามารถนำ PVC (polyvinyl chloride) โซดาไฟ สีย้อมอินดิโก และน้ำกลับมาใช้ใหม่ได้ผลสำเร็จ แม้ว่าวิธีนี้สามารถกำจัดสีย้อมและสารที่เติมได้ทุกประเภท แต่ก็ยังไม่มีการนำมาใช้ในทางปฏิบัติ เนื่องจากความยุ่งยากในการแยกสีผสม

### 6) ไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Technique)

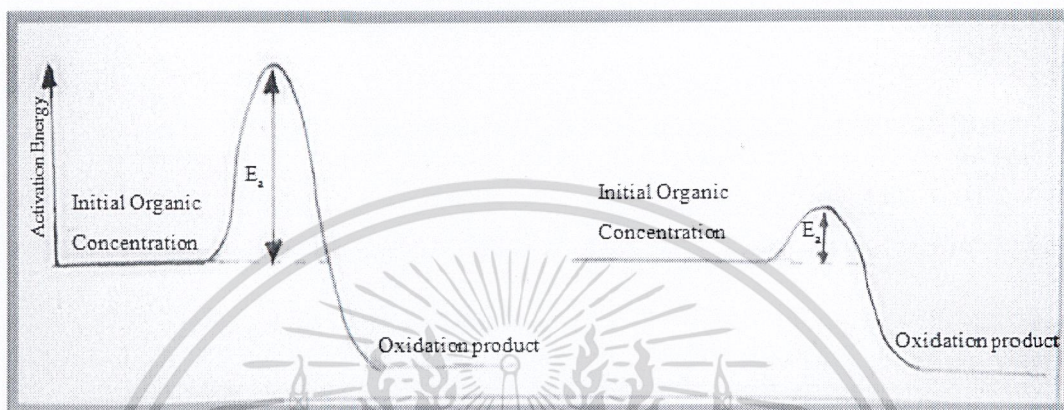
วิธีไฟฟ้าเคมีหรืออิเล็กโตรเคมีคัลเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพดีวิธีหนึ่ง แต่ใช้กันน้อยมากในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม วิธีนี้ใช้ในการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียอุตสาหกรรมต่อมาได้มีการปรับปรุงเพื่อนำมากำจัด BOD COD SS และสีในน้ำทิ้ง ลักษณะการทำงานมีองค์ประกอบหลักคือ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC power source) ขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้ว (electrode) และสารละลายนำไฟฟ้า (electrolyte solution) เมื่อทำการผ่านกระแสไฟฟ้าสู่เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ผ่านแผ่นเหล็ก (Fe) เป็นขั้วไฟฟ้า พบว่าที่ขั้วบวก (anode) จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของเหล็ก ซึ่งทำให้แผ่นเหล็กเกิดการสึกกร่อน และละลายออกมาในรูปของเฟอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ ) ที่ละลายอยู่ในน้ำ เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณของ  $Fe^{2+}$  จะเพิ่มปริมาณมากขึ้นในขณะเดียวกันที่ขั้วลบ (cathode) จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำ ซึ่งน้ำจะเกิดการแตกตัวให้ก๊าซไฮโดรเจน ( $H_2$ ) และไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) เมื่อเวลาผ่านไปน้ำจะมีสภาพเป็นด่าง และทำให้เกิดตกตะกอนของเฟอร์รัสไอออนและเฟอร์ริกไอออน ซึ่งจะดูดติดและช่วยตกตะกอนของโลหะหนักสีย้อม

หรือสิ่งปนเปื้อนต่างๆในน้ำเสีย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542) อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 กระบวนการโฟโตแคตตาไลติก

กระบวนการโฟโตแคตตาไลติกจัดเป็นกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงประเภทหนึ่ง (Advance Oxidation Process) ที่ทำให้สารตั้งต้นเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาหรือแคตตาลิสต์ ซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง ตัวเร่งปฏิกิริยานี้จะทำหน้าที่ลดพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยา (รูปที่ 2.4)



รูปที่ 2.4 พลังงานของการเกิดออกซิเดชันของสารอินทรีย์

(ที่มา: ฉลาด และฐลัทธ์, 2548)

จากรูปที่ 2.4 จะเห็นได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีบทบาทในการลดพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา ทำให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้น ปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิสมีองค์ประกอบที่สำคัญอยู่ 4 ส่วนหลักคือ ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) พลังงานแสงซึ่งมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับพลังงานโฟตอนของตัวแคตตาลิสต์ น้ำและก๊าซออกซิเจน กระบวนการนี้ยังแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทตามสถานะของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเมื่อใช้ตัวเร่งที่มีสถานะเดียวกับสารที่กำลังทำปฏิกิริยา (โดยทั่วไปจะเป็นของเหลว) เรียกปฏิกิริยานี้ว่า โฟโตแคตตาไลติกแบบสถานะเดียว (Homogeneous Photocatalytic) ถ้าใช้ตัวเร่งที่มีสถานะต่างจากสารที่กำลังทำปฏิกิริยา เรียกกระบวนการทางเคมีนี้ว่า โฟโตแคตตาไลติกแบบต่างสถานะ

(Heterogeneous Photocatalytic) โฟโตแคตตาไลซิส สามารถแยกได้ 2 ประเภท เมื่อพิจารณาจากสถานะของตัวแคตตาลิสต์ ดังนี้

1. โฟโตแคตตาไลซิสแบบสถานะเดียว (Homogeneous Photocatalysis) เป็นกระบวนการใช้ตัว catalyst ซึ่งมีสถานะเดียวกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด (โดยทั่วไปแล้วจะเป็นของเหลว) เช่น การย่อยสลาย 2, 4 Dinitrofluorene โดยใช้ UV/  $H_2O_2$

2. โฟโตแคตตาไลซิสแบบสถานะต่าง (Heterogeneous Photocatalysis) เป็นกระบวนการที่ใช้ตัว catalyst ซึ่งมีสถานะต่างกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด เช่น การย่อยสลาย 2-Chlorophenol

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารกึ่งตัวนำมีมากมายหลายชนิด หนึ่งในจำนวนสารกึ่งตัวนำหลายชนิดที่นิยมใช้กันในปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิส คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ มีราคาไม่แพง ไม่เป็นพิษ ความสามารถในการละลายต่ำ ความเสถียรสูง นอกจากนี้ได้มีการศึกษาเปรียบเทียบสารกึ่งตัวนำหลายๆชนิดที่นำมาใช้ในปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิส พบว่าการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบแขวนลอย สามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว แต่เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีแบนด์แก๊ปประมาณ 3.2 โวลต์ ซึ่งมากกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ โดยส่วนใหญ่ทำให้ต้องใช้พลังงานแสงในช่วงของแสงยูวี ( $\lambda \leq 400$  นาโนเมตร) ในแสงอาทิตย์ที่ส่องมาถึงพื้นโลกมีแสงยูวีน้อยกว่า 1% ทำให้ไม่สามารถใช้แสงธรรมชาติได้ จำเป็นต้องใช้แสงจากหลอดรังสียูวีเป็นแหล่งกำเนิดแสง (พลังงาน)

#### 2.4.1 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา

สารที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกมี 2 ประเภทหลัก คือ

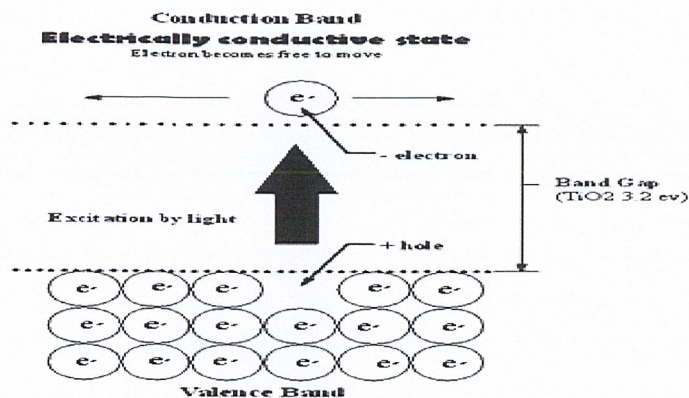
1. โลหะตัวนำ (Transition Metal) เช่น ทองแดง โคโรเมียม นิกเกิล เป็นต้น
2. สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS)

หรือสังกะสีออกไซด์ (ZnO) เป็นต้น

เนื่องจากในโครงการพิเศษนี้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะขอทบทวนความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับสารกึ่งตัวนำ

สารกึ่งตัวนำ ประกอบด้วยวาเลนซ์แบนด์ (Valence Band) และคอนดักชันแบนด์ (Conduction Band) ในโลหะตัวนำจะมีวาเลนซ์แบนด์ และคอนดักชันแบนด์ติดกัน แต่ในสารกึ่งตัวนำวาเลนซ์แบนด์และคอนดักชันแบนด์จะไม่ติดกัน (รูปที่ 2.5) โดยเกิดเป็นช่องว่าง ซึ่งเรียกว่าแบนด์แก๊ป (Band Gap) เมื่ออิเล็กตรอน (Electron,  $e^-$ ) ที่อยู่ในวาเลนซ์แบนด์ได้รับพลังงานโฟตอนจากแสง ( $h\nu$ ) อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังคอนดักชันแบนด์ ในขณะเดียวกันที่บริเวณวาเลนซ์แบนด์จะเกิดโฮล (Hole,  $h^+$ ) ซึ่งเป็นประจุบวกสามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระในวาเลนซ์แบนด์ ส่วนคอนดักชันแบนด์ อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่มาจากวาเลนซ์แบนด์เคลื่อนที่อย่างเป็นอิสระทั่วคอนดักชันแบนด์เช่นกัน ปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล (Electron- Hole Pairs,  $e^-/h^+$ )

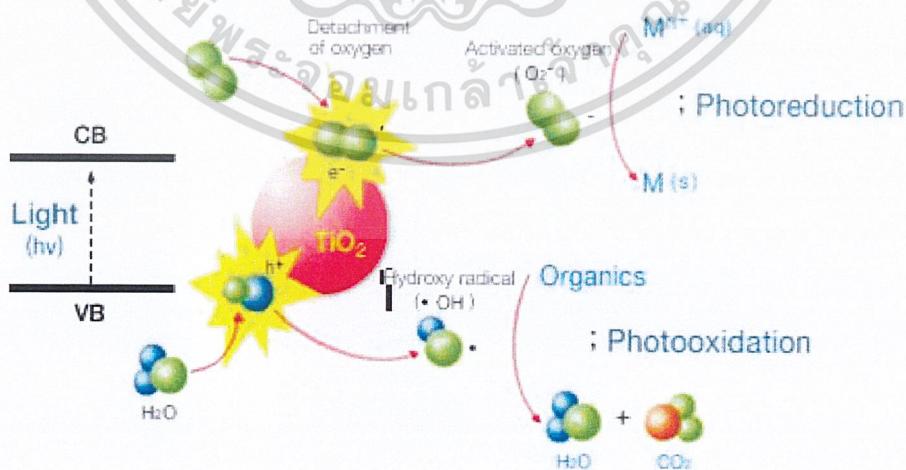
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 การเกิดโฮลและอิเล็กตรอนของTiO<sub>2</sub> เมื่อได้รับพลังงานแสง

(<http://www.envirocoat.com.au/application1.html>)

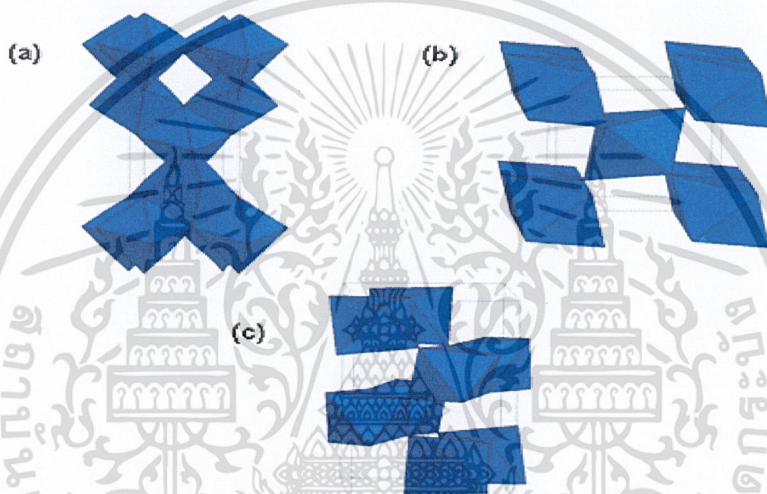
ปฏิกิริยาที่เกิดบนผิวคอนดักชันแบนด์และปฏิกิริยาที่เกิดในสารละลายเกิดขึ้นเป็นดังรูปที่ 2.5 อิเล็กตรอนจะเคลื่อนจากคอนดักชันแบนด์ไปยังตัวรับอิเล็กตรอน (Electron Acceptor) ในสารละลายจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ส่วนอีกด้านหนึ่ง คือ วาเลนซ์แบนด์ซึ่งมี h<sup>+</sup> จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) โดยตัวสารละลายทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน (Electron Donor) ในสภาวะปกติความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของอิเล็กตรอนที่คอนดักชันแบนด์ไม่มีศักยภาพพอที่จะบำบัดสารอินทรีย์ได้ แต่เนื่องจากในระบบบำบัดมีน้ำและออกซิเจนละลายน้ำอยู่ (O<sub>2</sub>) โมเลกุลของน้ำสามารถทำปฏิกิริยากับ h<sup>+</sup> เกิดไฮดรอกซิลแรดิคัล(OH<sup>•</sup>) ในขณะที่ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ได้เป็น Superoxide Radical (O<sub>2</sub><sup>•-</sup>) ซึ่งสารทั้งสองเป็นตัวออกซิเดนต์ที่แรงมาก สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ ได้ (รูปที่ 2.6)



รูปที่ 2.6 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิสบนสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นองญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า (<http://www.davidonindustries.com/page.php/id/151>) ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. ไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียม มีสูตรโมเลกุลคือ  $\text{TiO}_2$  มวลโมเลกุล 79.9 เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง ในธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์จะอยู่ในรูปของแร่ิลเมนไนต์ (Ilmenite) หรือแร่ลูโคซีน (Leucocene) ซึ่งเป็นแร่สีดาชนิดหนึ่งที่มีองค์ประกอบหลักเป็นไอออนไทเทเนต ( $\text{FeTiO}_3$ ) ไทเทเนียมไดออกไซด์มีโครงสร้างผลึกที่พบหลักๆ อยู่ 3 รูปคือ อนาเทส (Anatase) รูไทล์ (Rutile) และบรูคไคท์ (Brookite) โดยโครงสร้างแบบอนาเทสและรูไทล์มีระบบผลึกเป็นเตตระโกนอล (Tetragonal) ส่วนโครงสร้างแบบบรูคไคท์มีโครงสร้างเป็นแบบออร์โธโรมบิก(Orthorhombic)(รูปที่ 2.7)



รูปที่ 2.7 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียม (a) อนาเทส, (b) รูไทล์, (c) บรูคไคท์

(<http://ruby.colorado.edu/~smyth/min/tio2.html>)

โครงสร้างผลึกทั้ง 3 แบบของไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดจากการเชื่อมต่อนอกระหว่างอะตอมออกซิเจนของออกตรเซอไซด์ที่มีลักษณะบิดเบี้ยวของไทเทเนียมออกไซด์ ( $\text{TiO}_6^{2-}$ ) โดยไอออนของ  $\text{Ti}^{4+}$  ถูกล้อมรอบด้วย 6 ไอออนของ  $\text{O}^{2-}$  แต่การจัดเรียงตัวของสายโซ่ออกตรเซอไซด์ของแต่ละโครงสร้างจะต่างกัน โดยโครงสร้างแบบรูไทล์การเชื่อมต่อของออกตรเซอไซด์เกิดขึ้นที่บริเวณมุมและขอบ(รูปที่ 2.7b) โครงสร้างแบบอนาเทสเกิดจากการเชื่อมต่อกันของออกตรเซอไซด์เฉพาะที่บริเวณขอบ โดยที่แต่ละออกตรเซอไซด์จะถูกล้อมรอบด้วยออกตรเซอไซด์สี่ออกตรเซอไซด์และมีการใช้ขอบร่วมกัน (รูปที่ 2.7a) โครงสร้างแบบบรูคไคท์ที่มีแบบผลึกแบบออร์โธโรมบิกมีการเชื่อมต่อของออกตรเซอไซด์เกิดขึ้นที่บริเวณขอบและมุมดังแสดงในรูปที่ 2.7c สมบัติทางกายภาพที่สำคัญของโครงสร้างผลึกทั้ง 3 แบบ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.8

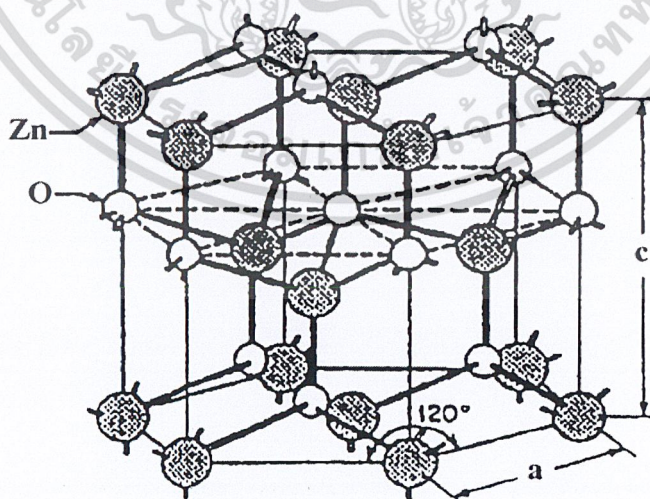
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.8 สมบัติทางกายภาพที่สำคัญของไทเทเนียมไดออกไซด์ (อุษา, 2551)

สมบัติที่ศึกษา	Rutile	Anatase	Brookite
โครงสร้างผลึก	Tetragonal	Tetragonal	Orthorhombic
ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	4.250	3.894	4.170
Hardness, Mohs scale	5.5 – 6.0	5.5 – 6.0	7.0 – 7.5
ดัชนีหักเหแสง	2.71	2.52	-
จุดหลอมเหลว	1858 °C	สามารถเปลี่ยนเป็นรูไทล์เมื่ออุณหภูมิสูง	-
ช่องว่างแถบพลังงาน	3.0 eV	3.2 eV	-

## 2. ซิงค์ออกไซด์

ซิงค์ออกไซด์ (ZnO: Zinc Oxide) เป็นสารกึ่งตัวนำซึ่งสามารถเตรียมให้มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบชนิดเอ็น (n-type) ได้อยู่ในกลุ่มที่มีช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังนั้นจัดเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง (direct band gap) โครงสร้างผลึกประกอบขึ้นจากโครงสร้างแบบ hcp (hexagonal closed-pack) สองโครงสร้างซ้อนกัน หรือเรียกว่าแบบ wurzite ค่าคงที่ผลึก  $a = 3.235 \text{ \AA}$  และ  $c = 5.213 \text{ \AA}$  ดังแสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 โครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า (สุรเชษฐ, 2545)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.9 สมบัติเชิงปริมาตรของซิงค์ออกไซด์โครงสร้างผลึกเฮกซะโกนอล (Norton et al., 2004)

สมบัติ	ค่า
ค่าคงที่โครงสร้างผลึก (Göpel et al 1982)	
$a_0$	3.253 Å
$c_0$	5.211 Å
$a_0/c_0$	1.602
ความหนาแน่น	5.606 g/cm <sup>3</sup>
เฟสเสถียรที่ 300 K	เฮกซะโกนอล
จุดหลอมเหลว	1975 °C
สัมประสิทธิ์ขยายตัวเชิงเส้น	$\alpha_0: 6.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , $\alpha_0: 3.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก(static dielectric constant)	8.656
ดัชนีหักเห	2.008, 2.029
ช่องว่างแถบพลังงาน	3.4 eV
ความหนาแน่นพาหะภายใน(intrinsic carrier concentration)	$\sim 10^6/\text{cm}^3$
พลังงานพันธะเอกซิคอน(exciton binding energy)	60 meV

#### 2.4.2 พลังงานแสง

การฉายแสงในกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกนั้นเป็นการให้พลังงานกับระบบในรูปของพลังงานโฟตอน (Photon Energy) โดยพลังงานที่ให้ต้องมีมากกว่าหรือเท่ากับพลังงานแบนด์แก๊ปปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิสของสารที่สนใจจึงจะสามารถเกิดขึ้นได้ ซึ่งการให้พลังงานดังกล่าวนี้เรียกว่า พลังงานกระตุ้น (Activation Energy) สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.1

$$E = h\nu = hc/\lambda \quad (2.1)$$

เมื่อ  $E$  คือ พลังงานควอนตัม (Quantum Energy), จูล

$h$  คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's Constant) =  $6.625 \times 10^{-34}$ , จูล-นาที่

$\nu$  คือ ความถี่ของคลื่นแสง, เฮิร์ต หรือ วินาที<sup>-1</sup>

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่นแสง, นาโนเมตร

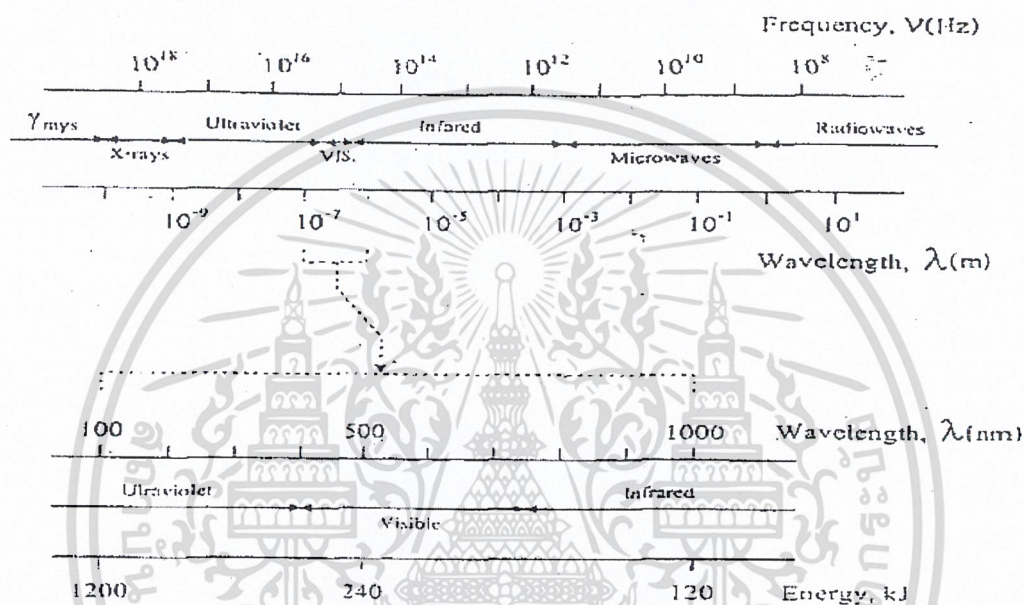
$c$  คือ ความเร็วของคลื่นแสง =  $2.997 \times 10^8$ , เมตร/วินาที

พลังงานแสงมีค่าแปรผกผันกับความยาวคลื่น (รูปที่ 2.9) โดยพลังงานของแสงเพิ่มขึ้น เมื่อความยาวคลื่นลดลง นอกจากนี้พบว่ารังสียูวีเป็นรังสีที่มีพลังงานมากที่สุด รูปที่ 2.10 แสดงสเปกตรัมของรังสียูวีซึ่งเป็นที่น่าสนใจในกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก ความยาวคลื่นของแสงเอกสารนี้เป็นเอกสารทงสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติเนาไปเซประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุลตราไวโอเล็ต (UV) อยู่ในช่วง 100-400 นาโนเมตร สำหรับความยาวคลื่นแสงที่คนมองเห็น (Visible หรือ แสงขาว) อยู่ในช่วง 380-750 นาโนเมตร รังสียูวีนี้ แบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง คือ

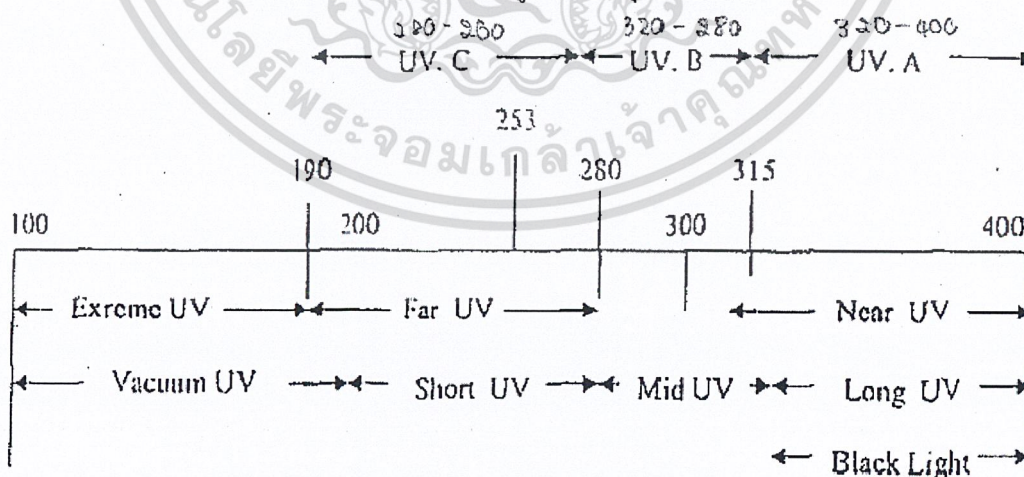
- 1) คลื่นยาว (Long Wave UV, UV-A) อยู่ในช่วง 400-320 นาโนเมตร
- 2) คลื่นกลาง (Middle Wave UV, UV-B) อยู่ในช่วง 320-280 นาโนเมตร
- 3) คลื่นสั้น (Short Wave UV, UV-C) อยู่ในช่วง 280-200 นาโนเมตร

ความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า 200 นาโนเมตร มีความสำคัญน้อยมาก เพราะรังสีอยู่ในช่วง Vacuum UV ซึ่งจะถูกลดคลื่นในอากาศจนหมดในช่วงระยะทางสั้นๆ ที่แสงเดินทาง



รูปที่ 2.9 สเปกตรัมของรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

(ที่มา: ฉลาด บรรเทา และ ชูสิทธิ์ ศรีสุทธิกมล, 2548)



รูปที่ 2.10 องค์ประกอบหลักของรังสียูวี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ (ที่มา: ฉลาด บรรเทา และ ชูสิทธิ์ ศรีสุทธิกมล, 2548) นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.3 กลไกการบำบัดสารอินทรีย์

ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสในการบำบัดสารอินทรีย์ แสดงดังสมการที่ (2.2) และสมการที่ (2.3)

การบำบัดสารอินทรีย์



การกระตุ้น



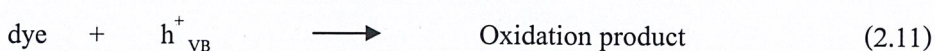
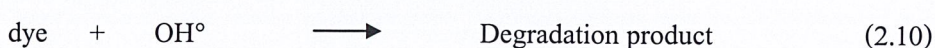
ซึ่งมีกลไกดังนี้ เมื่อสารกึ่งตัวนำได้รับพลังงานแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งมีพลังงานสูงกว่าช่องว่างแถบพลังงาน (Band gap energy) สารกึ่งตัวนำจะดูดกลืนพลังงานเท่ากับช่องว่างพลังงาน (Energy gap) ทำให้อิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์ (Valence band, VB) ถูกกระตุ้นขึ้นไปสู่แถบการนำ (Conduction band, CB) ส่งผลให้มีอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นในแถบการนำ ( $e^-_{CB}$ ) และเกิดสถานะการขาดอิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์หรือโฮล (hole,  $h^+_{VB}$ ) ดังสมการที่ (2.4) ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า เกิดเป็นคู่อิเล็กตรอน-โฮล ( $e^-/h^+$  pair) เมื่อบริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำในสถานะที่มีคู่อิเล็กตรอน-โฮลสัมผัสกับโมเลกุลของน้ำ หรือออกซิเจน ( $O_2$ ) ที่มีอยู่ในอากาศ จะทำให้เกิดเรดิคัล (Radical) ที่มีความว่องไวสูงบนผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำโดยโมเลกุลของน้ำจะถูกออกซิไดส์ด้วย  $h^+_{VB}$  เกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $OH^\circ$ ) ดังสมการที่ 2.5 ส่วนโมเลกุลของออกซิเจนจะถูกรีดิวซ์โดย  $e^-$  ที่อยู่ในแถบการนำพลังงานเกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลไอออน ( $O_2^{\circ-}$ ) ดังสมการที่ 2.6 และเกิดเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ดังสมการที่ 2.7 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้รับพลังงานแสงเกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลดังสมการที่ 2.8



ไฮดรอกซิลเรดิคัลที่เกิดขึ้นเป็นตัวออกซิไดส์ที่แรงสามารถย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ได้ดังสมการที่ 2.9



ในกรณีของสีย้อมเกิดการย่อยสลายดังสมการที่ 2.10 -2.12



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาระดับปริญญาตรีเท่านั้นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก

### 2.5.1 ความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยา

การเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกจะเกิดขึ้นที่ผิวอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น จะทำให้พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น และมีโอกาสเกิด  $e_{cb}^-$  และ  $h_{vb}^+$  มากขึ้น ซึ่งทำให้มีปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลตามด้วย ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันของสารอินทรีย์มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย (วุทธินันท์, 2544) แต่ถ้ามีปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มากเกินไป จะทำให้ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันลดลง เนื่องจากอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มาก จะไปบดบังแสงซึ่งกันและกัน (วุทธินันท์, 2544) ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาตกลง ซึ่งทำให้ปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลลดลงตามไปด้วย

### 2.5.2 ค่าพีเอช (pH)

ประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกขึ้นอยู่กับค่าพีเอชในสารละลาย เนื่องจากค่าพีเอชมีผลต่อการมีประจุไฟฟ้าที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา และส่งผลต่อความสามารถในการยึดเกาะของสารประกอบไอออนิกที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา Sun, Liu, และ Lee (2005) พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่า point of zero charge (pzc) หรือค่าพีเอชที่ทำให้ผิวของไทเทเนียมมีประจุเป็นกลางเท่ากับ 6.0-6.3 ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์จะถูกเหนี่ยวนำให้มีประจุบวกเมื่อพีเอชของน้ำมีค่าน้อยกว่า 4 แต่เมื่อพีเอชของน้ำมีค่ามากกว่า pzc ของไทเทเนียม ไดออกไซด์ ประจุบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์จะถูกเหนี่ยวนำให้เป็นประจุลบ ที่สภาวะนี้เองที่พบว่าจะมีปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลเกิดขึ้นได้ดี ดังนั้นกลไกในการบำบัดสารอินทรีย์ด้วยกระบวนการโฟโตออกซิเดชันจึงขึ้นอยู่กับพีเอชของน้ำ Tang และคณะ (1997) พบว่าสารอินทรีย์ถูกบำบัดด้วยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยตรงกับโฮล ( $h_{vb}^+$ ) เมื่อสารละลายมีค่าพีเอชน้อยกว่า 3 และเมื่อพีเอชของสารละลายมากกว่า 3 โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีค่าพีเอชเป็นด่าง การย่อยสลายสารอินทรีย์เกิดขึ้นด้วยการทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลเรดิคัลเป็นหลัก นอกจากนี้ค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงไป ยังทำให้ค่าช่องว่างพลังงาน  $E_g$  ของสารกึ่งตัวนำประเภทเมทัลออกไซด์ (Metal oxide) เปลี่ยนแปลงได้

### 2.5.3 ระยะเวลาการให้แสงยูวี

ระยะเวลาการให้แสงยูวีเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อการกำจัดสารอินทรีย์ในกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก หากให้ระยะเวลาการให้แสงยูวีนานขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์จะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของสารอินทรีย์มีโอกาสสัมผัสกับพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถสลายสารอินทรีย์ได้อย่างสมบูรณ์

### 2.5.4 อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาการสลายสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อัตราการกำจัดสารอินทรีย์ในสารละลายจะไม่มีค่าเพิ่มขึ้น โดยในการศึกษาของ Bing-Nan และคณะ (1999) พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดใช้

สารอินทรีย์ด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียสมีค่าเป็น 2 เท่าของประสิทธิภาพการกำจัดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ความถี่ในการชนกันของโมเลกุลมีมากขึ้น รวมถึงมีการลดลงของพลังงานกระตุ้นในการทำปฏิกิริยา นอกจากนี้ที่อุณหภูมิสูงขึ้น จะทำให้อัตราการทำปฏิกิริยาของ  $e_{cb}^-$  และ  $h_{vb}^+$  กับสารปนเปื้อนในสารละลายมีค่ามากกว่าอัตราการกลับมารวมตัวกันใหม่ของ  $e_{cb}^-$  และ  $h_{vb}^+$

### 2.5.5 ปริมาณออกซิเจนละลาย (Dissolved oxygen)

ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำจัดเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชัน เนื่องจากออกซิเจนสามารถทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนจาก  $e_{cb}^-$  ที่คอนดักชันแบนด์ทำให้เกิดซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล ซึ่งเป็นตัวออกซิไดส์ที่แรง และสามารถทำให้เกิดการสลายตัวสารอินทรีย์ได้ (ดวงชีวันและคณะ, 2549)

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สิริชัย ภิบาลจอมมี (2543) ศึกษาผลของปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกที่มีผลต่อการบำบัดน้ำเสียสีข้อมซึ่งเป็นสีที่ใช้ในโรงงานกระดาษ โดยทำการศึกษา 3 โทนสี ได้แก่ โทนสีน้ำเงิน โทนสีแดง โทนสีเหลือง น้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมโดยละลายผงสี กับน้ำกลั่น ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก 3 ปัจจัย คือ ออกซิเจนที่ละลายน้ำ ความเข้มข้นเริ่มต้นสีสังเคราะห์ และความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งควบคุมอุณหภูมิตลอดการทดลองเท่ากับ  $29 \pm 3$  องศาเซลเซียส โดยน้ำหล่อเย็น มีการเติมอากาศแก่สารละลายในปริมาณที่มากเกินพอ และใช้พลังงานแสงจากหลอดไฟ พรอทความดันสูงขนาด 400 วัตต์ ที่ให้ความเข้มแสง  $1,434,650$  ลักซ์/ม.<sup>2</sup> จากการทดลองพบว่า ออกซิเจนละลายเป็นปัจจัยที่สำคัญของปฏิกิริยา โดยเมื่อมีการเติมก๊าซไนโตรเจนแทนการเติมอากาศทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีลดลงจาก 100 % เป็น 85.6, 67.2 และ 45.3% ของโทนสีน้ำเงิน โทนสีแดง โทนสีเหลือง ตามลำดับ ส่วนการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นน้ำเสียสังเคราะห์มีผลทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นตาม L-H Model และเมื่อพิจารณาค่าคงที่ k และ K ที่ไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.5 กรัมต่อลิตร พบว่าโทนสีน้ำเงินมีค่าเท่ากับ 2.5846 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อนาที และ 0.0217 ลิตรต่อมิลลิกรัม ตามลำดับ โทนสีแดงมีค่าเท่ากับ 1.5706 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อนาที และ 0.0256 ลิตรต่อมิลลิกรัม ตามลำดับ และ โทนสีเหลืองมีค่าเท่ากับ 1.5218 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อนาที และ 0.0302 ลิตรต่อมิลลิกรัม ตามลำดับ เป็นต้น นอกจากนี้ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมสำหรับ โทนสีน้ำเงิน โทนสีแดง และ โทนสีเหลือง คือ 1.0, 3.0, 2.0 ตามลำดับ และจากการทดลองพบว่า โทนสีที่สามารถบำบัด สี ไซโอดี และทีโอซี ได้ง่ายที่สุดคือ โทนสีน้ำเงิน รองลงมาคือ โทนสีแดง และ โทนสีเหลืองตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ฉลาด บรรเทา และชูลิทธิ ศรีสุทธกมล (2548)** ทำการศึกษาการบำบัดสีในน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ โดยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก-ไทเทเนียมไดออกไซด์ ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ ระยะเวลาและปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมในการบำบัด น้ำเสียที่ใช้ทดสอบได้แก่น้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งมีปริมาณลิกนิน 10 มิลลิกรัมต่อลิตรและน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ จากการศึกษาพบว่าปริมาณลิกนินในน้ำเสียสังเคราะห์สามารถบำบัดได้ 100เปอร์เซ็นต์ ด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก-ไทเทเนียมไดออกไซด์ ภายในเวลา 8 ชั่วโมง เมื่อใช้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสม คือ 4.0 กรัมต่อลิตร อย่างไรก็ตามเมื่อใช้ระยะเวลาและปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์มาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจริงซึ่งมีปริมาณลิกนิน 27.4 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าสามารถกำจัดลิกนินได้เพียงร้อยละ 69.8

**ดวงชีวันและคณะ (2549)** ศึกษาการบำบัดสีย้อม Reactive red 141 ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกในสถานะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยศึกษาผลของพีเอช ระยะเวลาการให้แสงยูวี ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์และความเข้มข้นของสีย้อมต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก พบว่าระยะเวลาการให้แสงยูวี 30 นาที ประสิทธิภาพในการบำบัดสารสีย้อมคิดเป็นร้อยละ 20.09 เมื่อเพิ่มระยะเวลาการให้แสงเป็น 180 นาที พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสารสีย้อมคิดเป็นร้อยละ 46.80 เมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาการให้แสงยูวีแก่สีย้อมพบว่า ประสิทธิภาพของการบำบัดจะเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาการให้แสงยูวีเพิ่มขึ้นและพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เป็น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ถึงร้อยละ 85.88 ที่ค่าพีเอช 3 อัตราการบำบัดสีย้อมสูงขึ้น โดยมีปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้เท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

**Saqib and Muneer (2002)** ศึกษาการใช้สารกึ่งตัวนำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกในการย่อยสลายสีย้อมแอนทราควิโนน Remazol Brilliant Blue R ภายใต้แสงธรรมชาติและแหล่งกำเนิดแสงที่มีผลต่ออนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวัดจากการดูดกลืนแสงในสถานะต่างกัน ศึกษาปัจจัยในการย่อยสลายคือ พีเอช ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม ชนิดของไทเทเนียมไดออกไซด์ และปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) โพแทสเซียมโบรเมต ( $KBrO_3$ ) และ แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต( $(NH_4)_2S_2O_8$ ) เทียบกับออกซิเจนที่มีอยู่ในสารละลาย จากอัตราการย่อยสลายพบว่ามีผลมาจากปัจจัยทั้งหมดข้างต้น ในการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Degussa P 25 พบว่ามีประสิทธิภาพสูงภายใต้แสงยูวี ส่วน Hombikat UV100 มีประสิทธิภาพสูงกว่าภายใต้แสงธรรมชาติ เมื่อเปรียบเทียบกับชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น

**ผลึกพันธุ์และคณะ (2550)** ศึกษาการย่อยสลายสีย้อมเมทิลเรดด้วยเทคนิค GC-MS **Daneshvar et al. (2003)** ศึกษาการย่อยสลายสีเอซิดเรด 14 ด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกโดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็น

ตัวเร่ง ประสิทธิภาพการย่อยสลายด้วยแสงตามธรรมชาติค่อนข้างต่ำ เมื่อเกิด Photolysis ในสภาวะที่ไม่มีซิงค์ออกไซด์ และเมื่อไม่มีแสง UV การพล็อตกราฟ semilog ระหว่างความเข้มข้นของสีข้อมกับเวลาได้เป็นเส้นตรง แสดงว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ( $K = 0.05480 \text{ min}^{-1}$ ) ทำการศึกษาผลของปัจจัย ได้แก่ pH, ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา, ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และความเข้มข้นของเอทานอล การเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นการเพิ่มการเกิดปฏิกิริยา ในขณะที่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากเกินไปจะไประงับการสร้างไฮดรอกซิลเรดิคัล นอกจากนี้พบว่าเอทานอลไปยับยั้งการย่อยสลายสีข้อม โดยสรุปผลจากการที่เอทานอลไปยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนเรดิคัล ซึ่งมีบทบาทสำคัญในกระบวนการย่อยสลายด้วยแสงของสีข้อม

**Leung et al. (2006)** ศึกษาประสิทธิภาพในปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการโซลเจลเป็นแผ่นฟิล์มบางในการสลายแอนทราควิโนนในสีข้อม Acid Blue 80 ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์โดย DSC-TG, XRD, HRTEM, UV-vis spectra, SEM และ XPS จากการทดลองพบว่าแผ่นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูงแสดงถึงประสิทธิภาพในปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกภายใต้รังสียูวี นอกจากนี้ยังนำแผ่นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่รวมกับโครเมียมไอออนโดยศึกษาคุณสมบัติโดย UV-vis spectra พบว่ามีการดูดกลืนรังสียูวีในช่วงความยาวคลื่นที่กว้างขึ้น การประยุกต์ฟิล์มบางจะแสดงถึงการดูดกลืนแสงในช่วงแสงวิสิเบิลในกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกที่ใช้สลายสีข้อม จากการศึกษาทั้งหมดพบว่าแสงมีผลในกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกในการสลายสีข้อมของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยที่การใช้แผ่นฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์แทนอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกมีต้นทุนในกระบวนการกรองไทเทเนียมไดออกไซด์ออกจากน้ำที่ปล่อยออก **Nishio et al. (2006)** ศึกษาการย่อยสลายสีข้อมเอโซอเรนจ์ II ในน้ำเสียด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกโดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ ความเข้มของแสง ความเข้มข้นสีข้อมเริ่มต้น ปริมาณซิงค์ออกไซด์ และค่า pH จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพของการย่อยสลายสีข้อมเอโซอเรนจ์ II จะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีข้อมเอโซอเรนจ์ II ลดลง และความเข้มแสงเพิ่มขึ้น ค่าซิงค์ออกไซด์ที่เหมาะสมอยู่ที่ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่า pH ที่เหมาะสมอยู่ที่ 7.7 ซึ่งเป็นค่า pH ธรรมชาติของสีข้อม

**Akyol and Bayramoglu (2007)** ศึกษาการย่อยสลายสีข้อมเอโซ-รีแอกทีฟเท็กซ์ไทล์ ด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก Remazol Red F-3B มาทำการทดลองในถังปฏิกิริยาแบบที่ใช้ semiconductor ตัวเร่งปฏิกิริยากลายกับซิงค์ออกไซด์ และไทเทเนียมไดออกไซด์ และมีแหล่งกำเนิด UV 2 แหล่งปล่อยแสงที่ 254 และ 365 นาโนเมตร ในสภาวะที่ไม่มีแสงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีผล

ต่อการย่อยสลายสีข้อม pH เริ่มต้น, ค่าความเข้มข้นสีข้อม, ระดับแสง และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ตลอดจนประเภทของตัวเร่ง และช่วงความยาวคลื่น UV เป็นปัจจัยที่จะทำการศึกษาในกระบวนการนี้ ผลแสดงว่าประสิทธิภาพในการย่อยสลายและการบำบัด TOC ของซิงค์ออกไซด์สูงกว่าที่ความยาวคลื่นแสง UV 365 นาโนเมตร นอกจากนี้ทำการเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้พบว่า ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งที่ให้ประสิทธิภาพสูงกว่าใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความยาวคลื่นแสง UV 365 นาโนเมตร ในขณะที่การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งประสบความสำเร็จอย่างดีที่สุดที่ความยาวคลื่นแสง UV 254 นาโนเมตร นอกจากนี้การบำบัด TOC โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งโดยไม่คำนึงถึงความยาวคลื่นของแสง UV



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.1.1 อุปกรณ์

1. เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ รุ่น D8 Advance บริษัท Bruker A.G. Co.,Ltd
2. เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ (UV-Visible spectrophotometer) รุ่น T60 บริษัท PG

Instrument. Co.,Ltd

3. เครื่องพีเอชมิเตอร์ รุ่น 215 บริษัท Denver instrument Co., Ltd
4. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง รุ่น TC-254 บริษัท Denver instrument Co., Ltd
5. อุปกรณ์สำหรับกรองแบบลดความดัน
6. ครุชิลิเบรพูนสำหรับกรองขนาด 40 ไมโครเมตร
7. แท่งแม่เหล็ก
8. ขวดน้ำกลั่น
9. ซ้อนตักสาร
10. อะลูมิเนียมฟอยด์
11. หลอดยูวี 125 วัตต์
12. บริภัณฑ์เครื่องแก้วต่างๆ

##### 3.1.2 สารเคมี

1. ไทเทเนียมไดออกไซด์ เกรดวิเคราะห์ บริษัท Degussa Co., Ltd
2. ซิงค์ออกไซด์ เกรดวิเคราะห์ บริษัท Degussa Co., Ltd
3. สารช่วยในการกรอง (Calcined filter aid) บริษัท Italmar Co.,Ltd
4. สีย้อม Remazol Brilliant Blue R บริษัท Dystar Teutilforbon GmbH & Co. Deutschland

KG D-60007 Frantfurt Co.,Ltd

5. โซเดียมไฮดรอกไซด์ เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Co., Ltd
6. กรดซัลฟูริก เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Co., Ltd
7. น้ำปราศจากไอออน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 ศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์

#### 3.2.1 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของผงละเอียดไทเทเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction; XRD)

ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิค XRD เพื่อให้ทราบถึงชนิดและปริมาณของโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นในผงไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ ทำได้ด้วยการเตรียมตัวอย่างผงละเอียดที่ต้องการทดสอบ แล้วทำการเกลี่ยให้พื้นผิวเรียบ จากนั้นนำตัวอย่างที่เตรียมเรียบร้อยแล้วไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ โดยมีสถานะในการวิเคราะห์ดังนี้ คือ บันทึกข้อมูล 2.4 วินาทีต่อ 0.1 องศา ใช้มุม 2  $\theta$  10 ถึง 80 องศา ใช้เวลาวิเคราะห์ 28 นาที

#### 3.2.2 การศึกษาขนาดอนุภาคของผงละเอียดไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์

การศึกษขนาดอนุภาค (Particle size) ของผงละเอียดไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ ทำการศึกษาโดยใช้ข้อมูลจากผลการวิเคราะห์ XRD และสามารถคำนวณหาขนาดอนุภาคโดยใช้สมการเชียร์เลอร์ (Scherrer's equation) ดังสมการที่ 3.1

$$L = \frac{0.9 \lambda}{\beta \cos \theta} \quad (3.1)$$

เมื่อ L = ขนาดอนุภาค (nm)

$\lambda$  = ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ (0.154 nm)

$\beta$  = ความกว้างของพีคที่เป็นความสูงเป็นครึ่งหนึ่งของความสูงพีค (FWHM)

$\theta$  = มุมที่รังสีเอกซ์ตกกระทบและเลี้ยวเบนกลับระนาบของผลึก

ในงานวิจัยครั้งนี้ทำการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์สารตัวอย่างด้วยเทคนิค XRD ซึ่งมีสถานะในการวิเคราะห์ ดังนี้

2 $\theta$ เริ่มต้น – สิ้นสุด	20 – 80 องศา
Step size	0.100 องศา
Time/step	3 sec

#### 3.2.3 การศึกษาสมบัติทางแสงของผงละเอียดไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis spectrophotometer)

ทำได้โดยเตรียมสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์เข้มข้น 0.12 กรัมต่อลิตร 0.30 กรัมต่อลิตร และ 1.20 กรัมต่อลิตร จากนั้นนำสารละลายไปวัดเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis spectrophotometer) ในช่วงความยาวคลื่น 200 ถึง 700 นาโน

เอกสารนี้เผยแพร่เพื่อสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การสแกนหาความยาวคลื่นสูงสุด ( $\lambda_{\max}$ ) ของสารละลายสีย้อม Remazol Brilliant Blue R

นำสีย้อม Remazol Brilliant Blue R ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ไปสแกนหา  $\lambda_{\max}$  ด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer

### 3.4 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสารละลายสีย้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก

#### 3.4.1 การศึกษาผลของระยะเวลาการให้แสงยูวีและผลของปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์

1. ปิเปตสารละลายสีย้อม Remazol Brilliant Blue R ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 150 มิลลิลิตร เติมผงไทเทเนียมไดออกไซด์ลงในสารละลายสีย้อม กำหนดให้ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารละลายสีย้อมเท่ากับ 0.12 กรัมต่อลิตร

2. นำบีกเกอร์ใส่ในกล่องทึบแสงที่ต่อกับหลอดยูวี ดังรูปที่ 3.1 ทำการปั่นกวนเป็นเวลา 15 นาที โดยไม่ต้องให้แสงยูวี เมื่อครบตามระยะเวลาที่กำหนด เปิดสวิทช์เพื่อให้แสงจากหลอดยูวี พร้อมทั้งทำการปั่นกวนสารละลายเป็นเวลา 8 ชั่วโมง

3. เมื่อครบตามระยะเวลาที่กำหนด นำสารละลายที่ได้ไปปรับปริมาตรให้เป็น 50 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่นแล้วเติมสารช่วยกรอง 1 ซ้อนตักสารเล็ก นำไปปั่นกวนต่อเป็นเวลา 30 นาที

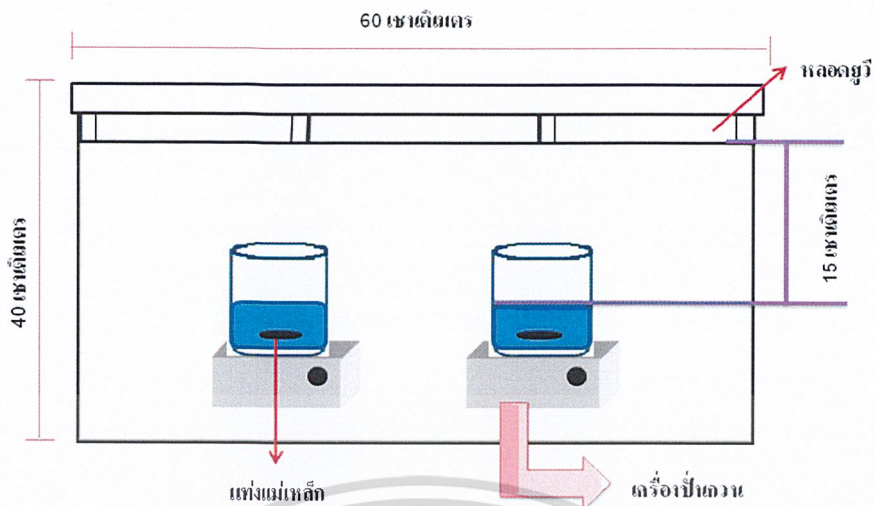
4. นำสารละลายที่ได้มากรองโดยใช้ครุชชีเบิลรูพรุนสำหรับกรองด้วยการกรองแบบลดความดัน

5. นำส่วนใสของสารละลายที่ได้ไปทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม โดยวิธีการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 592 นาโนเมตร

6. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-6 แต่เปลี่ยนระยะเวลาการให้แสงยูวีจาก 8 ชั่วโมงเป็น 16 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมงตามลำดับ รวมทั้งแปรค่าความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์จาก 0.12 กรัมต่อลิตร เป็น 0.30 กรัมต่อลิตร และ 1.0 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ

7. ในการทดลองแต่ละครั้งจะทำการศึกษาการสลายตัวของสีย้อมด้วยแสงหรือปฏิกิริยาโฟโตไลซิส โดยใช้สารละลายสีย้อมแต่ไม่ใส่ไทเทเนียมไดออกไซด์ในการทดสอบ และทำชุดควบคุม โดยใช้สารละลายสีย้อมที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ แต่เก็บไว้ในกล่องทึบแสงโดยไม่มีการให้แสงยูวี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แผนภาพอย่างง่ายแสดงกล่องทึบแสงต่อกับหลอดยูวีที่ใช้ในการศึกษา

### 3.4.2 การศึกษาผลของพีเอชของสารละลาย

1. ปิเปิดสารละลายสีข้อม Remazol Brilliant Blue R 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ ขนาด 150 มิลลิลิตร
2. ปรับพีเอชของสารละลายเป็น 3 ด้วย 1 M HCl หรือ 1 M NaOH
3. เติมหงไทเทเนียมไดออกไซด์ลงในบีกเกอร์ข้อ 2 ให้มีความเข้มข้น 1.0 กรัมต่อลิตร
4. นำบีกเกอร์ที่ใส่ไทเทเนียมไดออกไซด์ ใส่ในกล่องทึบแสงที่ต่อกับหลอดยูวี ดังรูปที่ 3.1 ทำการปั่นคววนเป็นเวลา 15 นาทีโดยไม่ต้องให้แสงยูวี เมื่อครบตามระยะเวลาที่กำหนด เปิดสวิตช์เพื่อให้แสงจากหลอดยูวี พร้อมทั้งทำการปั่นคววนสารละลายเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
5. เมื่อครบตามระยะเวลาที่กำหนด นำสารละลายที่ได้ไปปรับปริมาตรให้เป็น 50 มิลลิกรัม แล้วเติมสารช่วยกรอง 1 ซ้อนตักสารเล็ก นำไปปั่นคววนต่อเป็นเวลา 30 นาที
6. นำสารละลายที่ได้มากรองโดยใช้ครุชชีเบิลรูพรุนสำหรับกรองด้วยการกรองแบบลดความดัน
7. นำส่วนใสของสารละลายที่ได้จากการกรองไปทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารละลายสีข้อมโดยวิธีการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 592 นาโนเมตร
8. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-7 และทำการแปรค่าพีเอชเป็น 7 และ 11 ตามลำดับ
9. ในการทดลองแต่ละครั้งจะทำการศึกษาการสลายตัวของสีข้อมด้วยแสงหรือปฏิกิริยาโฟโตไลซิส โดยใช้สารละลายสีข้อมแต่ไม่ใส่ไทเทเนียมไดออกไซด์ในการทดสอบ และทำหาคความคุม โดยใช้สารละลายสีข้อมที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ แต่เก็บไว้ในกล่องทึบแสงโดยไม่มีการให้แสงยูวี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.3 การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม

1. ปิเปตสารละลายสีย้อม Remazol Brilliant Blue R ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 150 มิลลิลิตร
2. ปรับพีเอชของสารละลายให้เป็น 3 ด้วย 1 M HCl หรือ 1 M NaOH
3. เติมผงไทเทเนียมไดออกไซด์ลงในบีกเกอร์ข้อ 2 ให้มีความเข้มข้น 1.0 กรัมต่อลิตร
4. นำบีกเกอร์ที่ใส่ไทเทเนียมไดออกไซด์ ไปใส่ในกล่องทึบแสงที่ต่อกับหลอดยูวี ดังรูปที่ 3.1
- 3.1 ทำการปั่นกวนเป็นเวลา 15 นาทีโดยไม่ต้องให้แสงยูวี เมื่อครบตามระยะเวลาที่กำหนด เปิดสวิตช์เพื่อให้แสงจากหลอดยูวี พร้อมทั้งทำการปั่นกวนสารละลายเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
5. เมื่อครบตามระยะเวลาที่กำหนด นำสารละลายที่ได้ไปปรับปริมาตรให้เป็น 50 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่นแล้วเติมสารช่วยกรอง 1 ซ้อนตักสารเล็ก นำไปปั่นกวนต่อเป็นเวลา 30 นาที
6. นำสารละลายที่ได้มากรองโดยใช้ครุชชีเบิลรูพรุนสำหรับกรองด้วยการกรองแบบลดความดัน
7. นำส่วนใสของสารละลายที่ได้ไปทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม โดยวิธีการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 592 นาโนเมตร
8. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-7 แต่ทำการเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม เป็น 100, 200 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ
9. ในการทดลองแต่ละครั้งจะทำการศึกษาการสลายตัวของสีย้อมด้วยแสงหรือปฏิกิริยาโฟโตไลซิส โดยใช้สารละลายสีย้อมแต่ไม่ใส่ไทเทเนียมไดออกไซด์ในการทดสอบ และทำชุดควบคุม โดยใช้สารละลายสีย้อมที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ แต่เก็บไว้ในกล่องทึบแสงโดยไม่มี การให้แสงยูวี

### 3.5 ศึกษาการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการบำบัดสารละลายสีย้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก

1. ปิเปตสารละลายสีย้อม Remazol Brilliant Blue R ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 150 มิลลิลิตร
2. ปรับพีเอชของสารละลายให้เป็น 3 ด้วย 1 M HCl หรือ 1 M NaOH
3. เติมผงไทเทเนียมไดออกไซด์ลงในบีกเกอร์ข้อ 2 ให้มีความเข้มข้น 1.0 กรัมต่อลิตร
4. ชั่งซิงค์ออกไซด์ปริมาณ 2% w/w ของปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ ใส่ลงในบีกเกอร์ในข้อ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. นำบีกเกอร์ที่ใส่ไทเทเนียมไดออกไซด์ ไปใส่ในกล่องทึบแสงที่ต่อกับหลอดยูวี ดังรูปที่ 3.1 ทำการปั่นกวนเป็นเวลา 15 นาทีโดยไม่ต้องให้แสงยูวี เมื่อครบตามระยะเวลาที่กำหนด เปิดสวิตช์เพื่อให้แสงจากหลอดยูวี พร้อมทั้งทำการปั่นกวนสารละลายเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
6. เมื่อครบตามระยะเวลาที่กำหนด นำสารละลายที่ได้ไปปรับปริมาตรให้เป็น 50 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่นแล้วเติมสารช่วยกรอง 1 ซ้อนตักสารเล็ก นำไปปั่นกวนต่อเป็นเวลา 30 นาที
7. นำสารละลายที่ได้มากรองโดยใช้ครุฑเบิลรูนสำหรับกรองด้วยการกรองแบบลดความดัน
8. นำส่วนใสของสารละลายที่ได้ไปทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารละลายสีส้ม โดยวิธีการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 592 นาโนเมตร
9. ในการทดลองแต่ละครั้งจะทำการศึกษาการสลายตัวของสีส้มด้วยแสงหรือปฏิกิริยาโฟโตไลซิส โดยใช้สารละลายสีส้มแต่ไม่ใส่ไทเทเนียมไดออกไซด์ในการทดสอบ และทำชุดควบคุม โดยใช้สารละลายสีส้มที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ แต่เก็บไว้ในกล่องทึบแสงโดยไม่มี การให้แสงยูวี

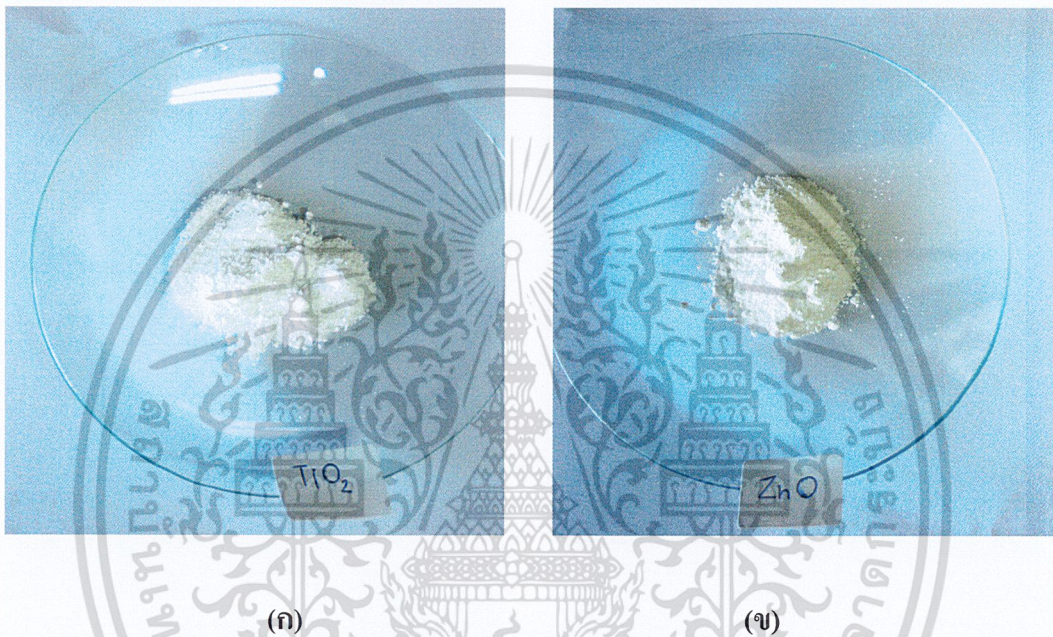
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

#### 4.1 ลักษณะทางกายภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์

ไทเทเนียม ไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็น โลหะออกไซด์ในทางการค้า โดยมีลักษณะทางกายภาพดังแสดงรูปที่ 4.1



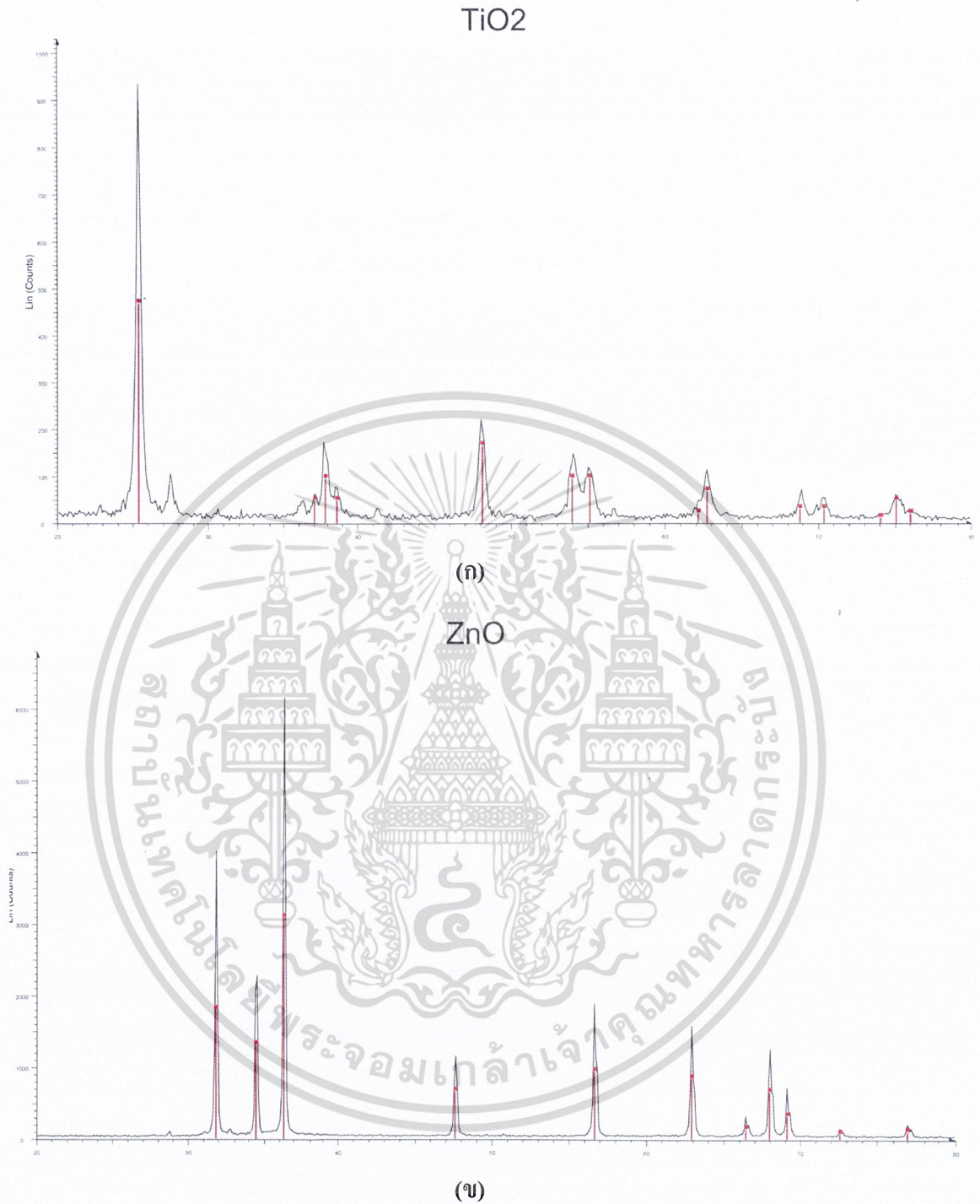
รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการศึกษา (ก) ไทเทเนียมไดออกไซด์ และ (ข) ซิงค์ออกไซด์

จากรูปที่ 4.1 พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์มีลักษณะทางกายภาพเป็นผงละเอียดสีขาวดังรูป 4.1 (ก) และ 4.1 (ข) ตามลำดับ

#### 4.2 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์

ผงละเอียดไทเทเนียม ไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ถูกสุ่มตัวอย่างและนำไปตรวจสอบโครงสร้างของผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction; XRD) ผลของการพิสูจน์เอกลักษณ์ของผงละเอียดไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ได้ผลดังรูปที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.2** ผลของการพิสูจน์เอกลักษณ์ของ (ก) ผงละเอียดไทเทเนียมไดออกไซด์ และ (ข) ซิงค์ออกไซด์ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction; XRD)

ในการพิสูจน์เอกลักษณ์ของ โครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์เทียบกับเส้นตรงอ้างอิง ซึ่งเป็นรูปการเลี้ยวเบนมาตรฐานของ โครงสร้างผลึกอนาเทส พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงละเอียดไทเทเนียมไดออกไซด์มีตำแหน่งของพีคที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนมาตรฐาน (JCPDS) หมายเลข [21-1272] ซึ่งแสดงโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสของไทเทเนียมไดออกไซด์ อย่างไรก็ตามมีเหตุที่ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (เส้นสีแดงในรูปที่ 4.2) แสดงให้เห็นว่าผงละเอียดไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในการทดลองมีโครงสร้างแบบอนาเทส มีระบบผลึกเป็นเตตระโกนอล (Tetragonal) ส่วนซิงค์ออกไซด์พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงละเอียดซิงค์ออกไซด์ที่ใช้ในการศึกษามีตำแหน่งของพีคที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนมาตรฐาน (JCPDS) หมายเลข [79 - 0206] ซึ่งแสดงโครงสร้างผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal)

### 4.3 ขนาดอนุภาคของผงละเอียดไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์

ขนาดอนุภาค (Particle size) ของผงละเอียดไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ทำการศึกษาโดยใช้ข้อมูลจากผลการวิเคราะห์ XRD และสามารถคำนวณหาขนาดอนุภาคโดยใช้สมการเชียร์เลอร์ (Scherrer's equation) ดังสมการที่ 4.1

$$L = \frac{0.9 \lambda}{\beta \cos \theta} \quad (4.1)$$

เมื่อ  $L$  = ขนาดอนุภาค (nm)

$\lambda$  = ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ (0.154 nm)

$\beta$  = ความกว้างของพีคที่เป็นความสูงเป็นครึ่งหนึ่งของความสูงพีค (FWHM)

$\theta$  = มุมที่รังสีเอกซ์ตกกระทบและเลี้ยวเบนกลับระนาบของผลึก

จากการวิเคราะห์ข้อมูลจากผลการวิเคราะห์ XRD ของไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องและขนาดของอนุภาคที่คำนวณได้แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ และขนาดของอนุภาคที่คำนวณได้จากสมการของเชียร์เลอร์

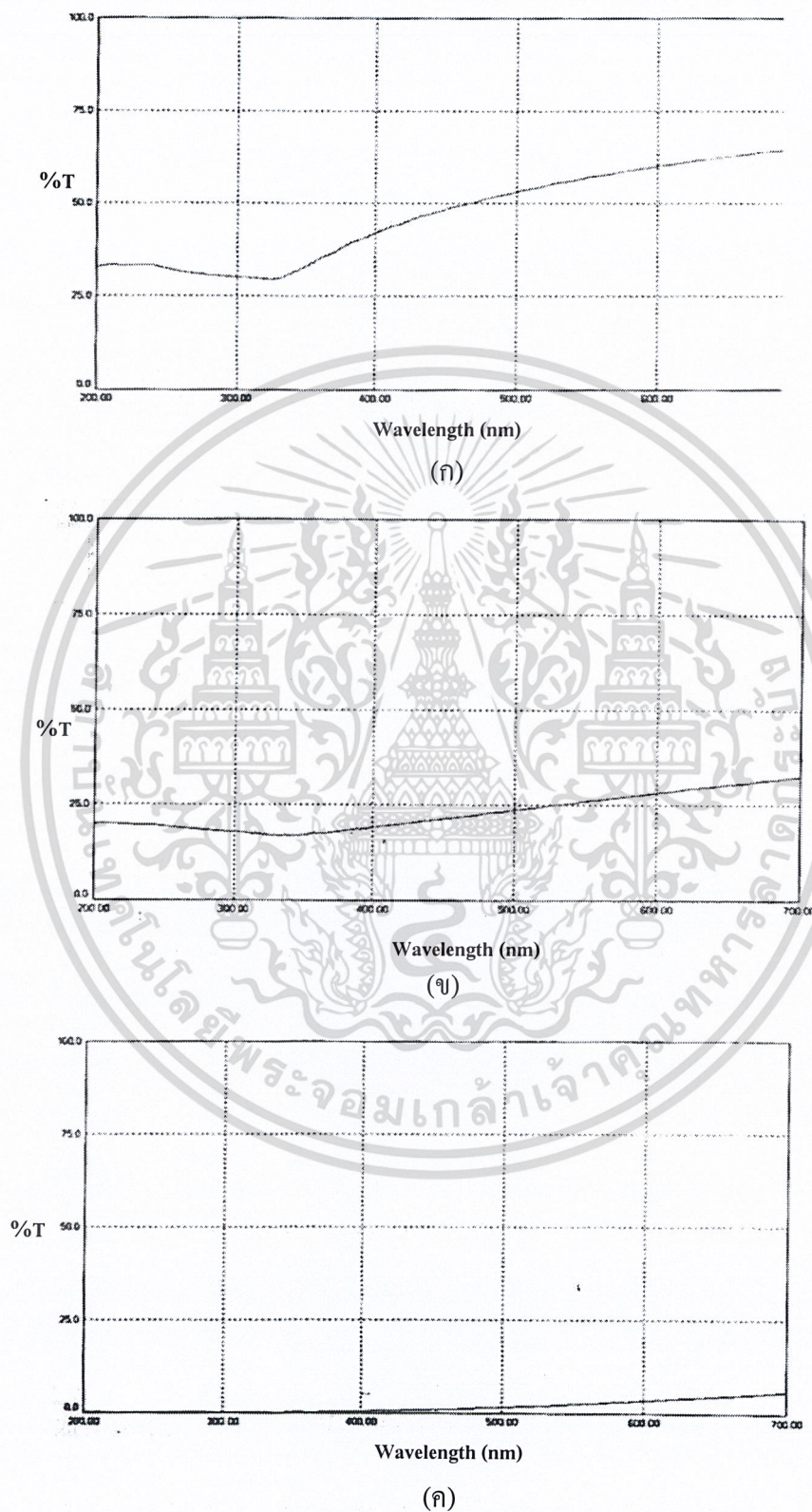
ชนิดของสาร	2 - Theta(2 $\theta$ )	$\beta$	ขนาดอนุภาค (nm)
TiO <sub>2</sub>	25.3	0.44	19.34
ZnO	36.2	0.22	39.71

จากตารางที่ 4.1 พบว่าผงไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่ใช้ในการศึกษารังนี้จัดเป็นวัสดุจำพวกนาโน โดยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 19.34 นาโนเมตร ในขณะที่ซิงค์ออกไซด์มีขนาดเท่ากับ 39.71 นาโนเมตร

### 4.4 สมบัติทางแสงของผงละเอียดไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis spectrophotometer)

ความสามารถในการดูดกลืนแสงของผงละเอียดไทเทเนียมไดออกไซด์ทำการศึกษาโดยนำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับว่าเห็นชอบหรือเห็นการคัดค้าน  
สารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์เข้มข้น 0.12, 0.30 และ 1.0 กรัมต่อลิตรไปวัดเปอร์เซ็นต์การส่อง  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่แบบลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากใครนำไปใช้

ผ่านของแสงในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 200-700 นาโนเมตรด้วย UV-Vis spectrophotometer ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.3 ก-ค

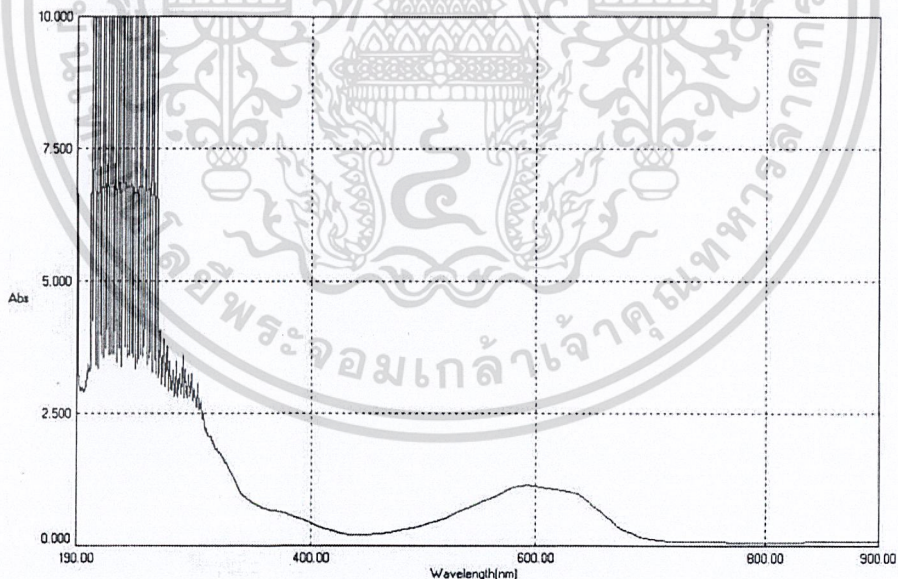


รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบการส่องผ่านแสงของสารละลายไทเทเนียม ไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่างกันที่  
 ไม่ว่าการณีใด (ก) 0.12 กรัมต่อลิตร, (ข) 0.30 กรัมต่อลิตร และ (ค) 1.0 กรัมต่อลิตร การทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 ก-ค พบว่าสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ในทุกความเข้มข้นที่ทำการทดสอบจะมีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงเกิดขึ้นได้ต่ำ เมื่อความยาวคลื่นน้อยกว่า 400 นาโนเมตร และเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวคลื่นมีค่าสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถดูดกลืนแสงได้ดีในช่วงความยาวคลื่นของรังสียูวี นอกจากนี้พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์จาก 0.12 กรัมต่อลิตรเป็น 0.30 และ 1.0 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ในช่วงความยาวคลื่นที่น้อยกว่า 400 นาโนเมตรมีค่าลดลงแสดงให้เห็นถึงการดูดกลืนแสงที่มากขึ้น โดยเมื่อไทเทเนียมไดออกไซด์มีการดูดกลืนแสงมากขึ้น จะเป็นการเพิ่มโอกาสในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก จึงได้นำความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ในช่วงความเข้มข้นดังกล่าวไปทำการศึกษาผลของปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อม

#### 4.5 ผลการสแกนหาความยาวคลื่นสูงสุด ( $\lambda_{max}$ ) ของสารละลายสีข้อม Remazol Brilliant Blue R

ความยาวคลื่นสูงสุด ( $\lambda_{max}$ ) ของสารละลายสีข้อม Remazol Brilliant Blue R สามารถหาได้โดยนำสารละลายสีข้อมเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรไปทำการสแกนด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.4



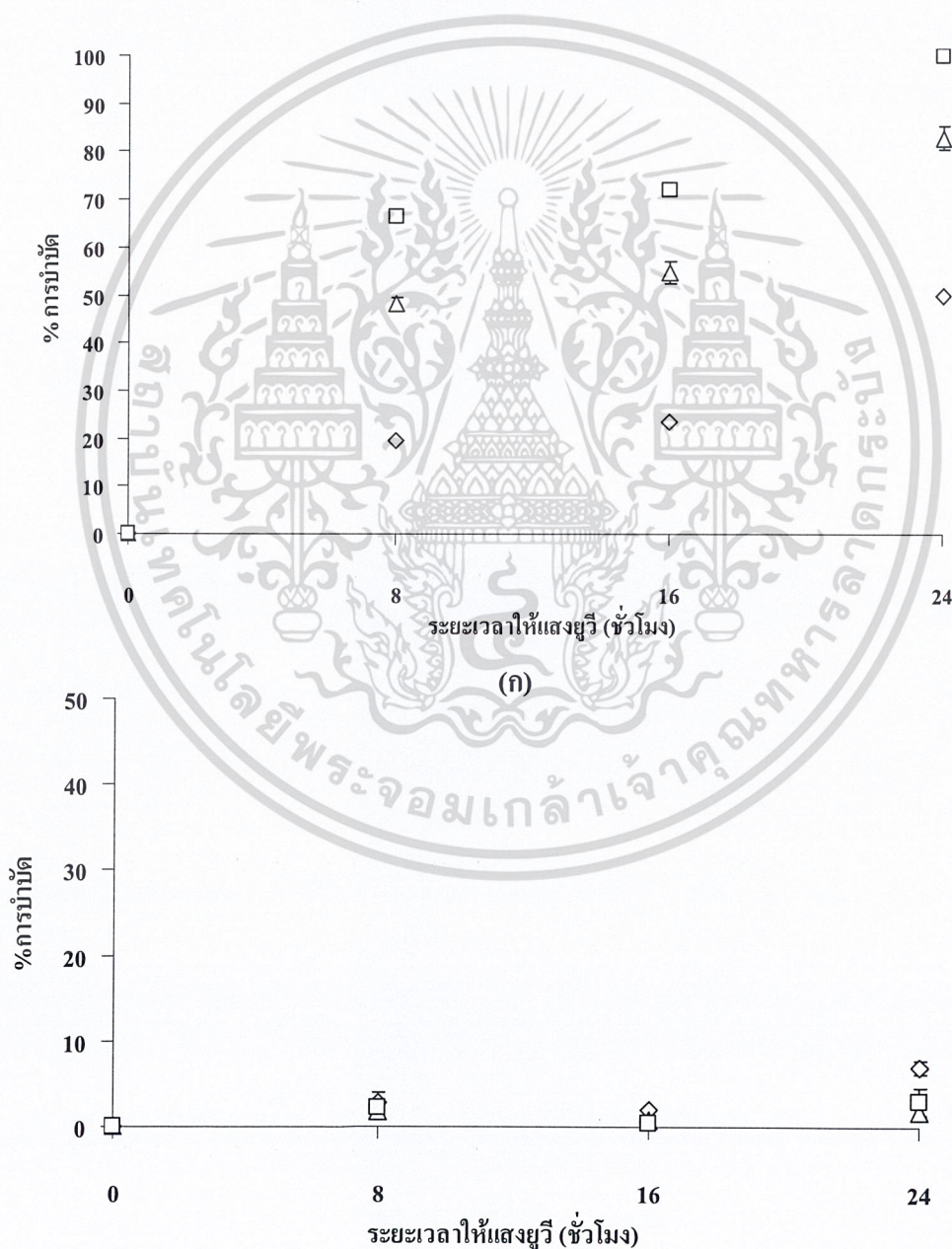
รูปที่ 4.4 ความยาวคลื่นสูงสุด ( $\lambda_{max}$ ) ของสารละลายสีข้อม Remazol Brilliant Blue R

จากรูปที่ 4.4 พบว่าความยาวคลื่นสูงสุด ( $\lambda_{max}$ ) ของสารละลายสีข้อม Remazol Brilliant Blue R มีค่าเท่ากับ 592 นาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Saquib and Muneer (2002)

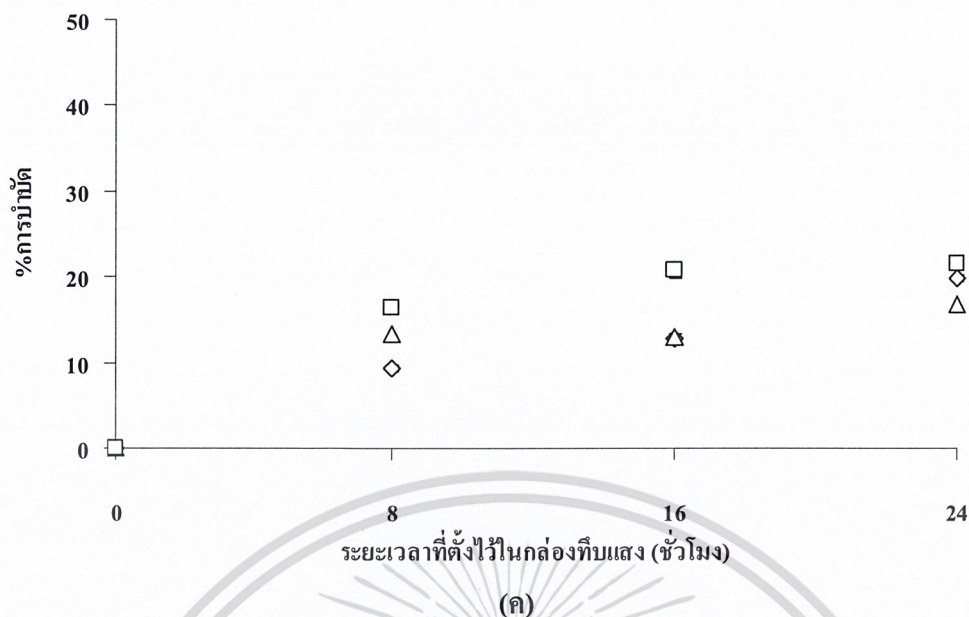
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6 ผลของระยะเวลาการให้แสงยูวี และปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อม

ในการศึกษาผลของระยะเวลาการให้แสงยูวี และปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารละลายสีข้อมจำพวก Remazol Brilliant Blue R ทำการศึกษาโดยกำหนดความเข้มข้นสีข้อมเริ่มต้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร แปรค่าปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เป็น 0.12, 0.30 และ 1.0 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ และแปรค่าระยะเวลาการให้แสงยูวีจาก 8 เป็น 16 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ จากนั้นวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสีข้อมที่เหลือในสารละลาย พร้อมกับหาประสิทธิภาพในการบำบัด ผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ก-ค



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
(ข)  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมในชุดทดลองต่าง ๆ (ก) ปฏิริยาโฟโตแคตตาไลติก

(ข) ปฏิริยาโฟโตไลซิส และ (ค) ชุดควบคุม ที่ระยะเวลาต่างกัน โดยที่ ◇ ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.12 กรัมต่อลิตร, △ ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.3 กรัมต่อลิตร, □ ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 1.0 กรัมต่อลิตร

จากรูปที่ 4.5 (ก) พบว่าระยะเวลาการให้แสงยูวีและปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Remazol Brilliant Blue R ด้วยปฏิริยาโฟโตแคตตาไลติกในสถานะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิริยา เมื่อใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เข้มข้น 0.12 กรัมต่อลิตรเป็นตัวเร่งปฏิริยาใช้ระยะเวลาการให้แสงยูวีนาน 8 ชั่วโมง พบว่าสีย้อมที่เหลือในสารละลายมีความเข้มข้นลดลงคิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัดเท่ากับ 20 % และเมื่อเพิ่มระยะเวลาการให้แสงยูวีให้นานขึ้นจาก 8 ชั่วโมง เป็น 16 และ 24 ชั่วโมง โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากันเป็นตัวเร่งปฏิริยา พบว่าการบำบัดสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกมีประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มขึ้นเป็น 24 % และ 50 % ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการบำบัดที่เพิ่มขึ้นนั้นเป็นผลเนื่องมาจากระยะเวลาการให้แสงยูวีที่นานขึ้น เพิ่มโอกาสในการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล (Electron- Hole Pairs,  $e^-/h^+$ ) ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $OH^\bullet$ ) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ในสารละลายสีย้อม ดังนั้นการสลายตัวสีย้อมจึงเกิดได้มากขึ้น เมื่อระยะเวลาในการให้แสงยูวีนานขึ้น นอกจากนี้พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เป็น 0.30 และ 1.0 กรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมด้วยปฏิริยาโฟโตแคตตาไลติกมีค่าสูงขึ้นไปด้วย (รูปที่ 4.5 ก) ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารละลาย ส่งผลให้การเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลมีแนวโน้มมากขึ้น ความสามารถในการบำบัดสีย้อมมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

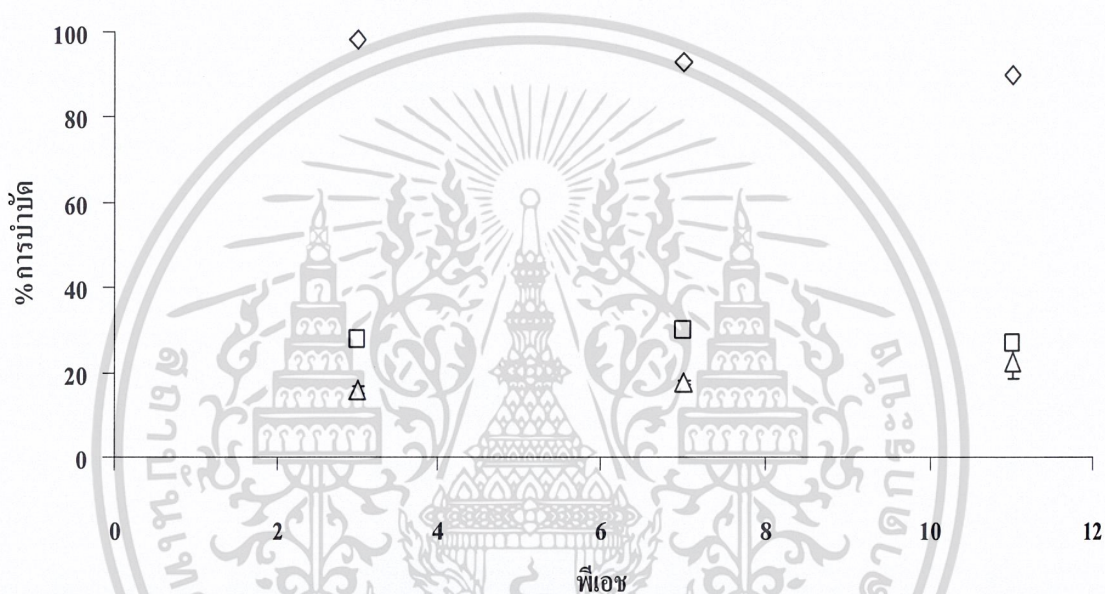
ไปด้วย โดยประสิทธิภาพในการบำบัดมีค่าสูงสุด เมื่อใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เข้มข้น 1.0 กรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาการให้แสงยูวี 24 ชั่วโมง อย่างไรก็ตามพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Remazol Brilliant Blue R ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้มีค่าต่ำมากเมื่อเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมชนิดเดียวกันที่รายงานไว้ในงานวิจัยของ Saquib and Muneer (2002) โดยในงานวิจัยดังกล่าวสามารถบำบัดสีย้อม Remazol Brilliant Blue R ได้สูงถึง 100 % ภายในระยะเวลาการให้แสงยูวีเพียง 2 ชั่วโมง เมื่อใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่เท่ากัน ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากความแตกต่างของรูปแบบโครงสร้างผลึกที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในงานศึกษาครั้งนี้มีรูปแบบโครงสร้างผลึกเป็นแบบอนาเทสทั้งหมด ในขณะที่โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในงานวิจัยของ Saquib and Muneer (2002) จะอยู่ในรูปผสมระหว่างรูไทล์และอนาเทส ซึ่งการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปผสมนี้มีข้อดีคือทำให้แถบช่องว่างพลังงานมีค่าลดลง เพิ่มโอกาสในการเกิดเป็นคู่อิเล็กตรอน-โฮล ( $e^-/h^+$ ) เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง (Paola et al., 2007) ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในงานวิจัยของ Saquib and Muneer (2002) จึงมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับการศึกษาครั้งนี้ นอกจากนี้ในงานวิจัยของ Saquib and Muneer (2002) ได้มีการเติมออกซิเจนในระหว่างการบำบัดด้วย ซึ่งปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำจัดเป็นปัจจัยหนึ่งที่พบว่าส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก เนื่องจากออกซิเจนสามารถทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนจาก  $e^-_{CB}$  ที่คอนดักชันแบนด์ทำให้เกิดซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลไอออน และเกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลซึ่งเป็นตัวออกซิไดส์ที่แรง และสามารถทำให้เกิดการสลายสีย้อมได้

เมื่อนำสารละลายสีย้อมเพียงอย่างเดียวไปให้แสงยูวีที่ระยะเวลาเท่ากับระยะเวลาที่ใช้ในการศึกษาการบำบัดสีย้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก พบว่าสีย้อม Remazol Brilliant Blue R สามารถสลายตัวได้ด้วยแสงยูวีหรือเกิดปฏิกิริยาโฟโตไลซิส (รูปที่ 4.5ข) อย่างไรก็ตามพบว่าประสิทธิภาพในการสลายตัวด้วยปฏิกิริยาโฟโตไลซิสเกิดขึ้นได้ค่อนข้างต่ำ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การบำบัดมีค่าระหว่าง 2-9 % ผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Saquib and Muneer (2002) ที่พบว่าปฏิกิริยาโฟโตไลซิสของสีย้อม Remazol Brilliant Blue R เกิดขึ้นได้เพียงเล็กน้อย

ในส่วนของคุณสมบัติซึ่งทำการทดลองโดยติดตามการเปลี่ยนแปลงของสีย้อมด้วยการใช้สารละลายสีย้อมที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์และนำไปไว้ในที่ที่บดแสงในระยะเวลาที่เท่ากับกับการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกของสีย้อม พบว่าความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือในสารละลายมีแนวโน้มลดลงในทุกความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ทำการทดสอบเมื่อสารละลายถูกตั้งทิ้งไว้นานขึ้น ดังจะเห็นได้จากประสิทธิภาพในการบำบัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อตั้งสารละลายสีย้อมไว้ในที่ที่บดแสงนานขึ้น (รูปที่ 4.5ค) แสดงให้เห็นว่าสีย้อมสามารถถูกกำจัดออกจากระบบด้วยกระบวนการอื่นๆ สันนิษฐานว่ากระบวนการดังกล่าวเป็นกระบวนการดูดซับเนื่องจากในงานวิจัยของ Ao et al. (2006) พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์นั้นสามารถดูดซับสีย้อมได้

#### 4.6 ผลของพีเอช ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม

ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารละลายสีย้อมจำพวก Remazol Brilliant Blue R ทำการศึกษาโดยกำหนดความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 1.0 กรัมต่อลิตร ระยะเวลาการให้แสงยูวีเท่ากับ 24 ชั่วโมง (ระยะเวลาที่ทิ้งไว้ในที่ที่บดแสงในกรณีของชุดควบคุม) ทำการแปรค่าพีเอชของสารละลายสีย้อมเป็น 3, 7 และ 11 ตามลำดับ และวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือในสารละลาย ผลการทดลองดังแสดงรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม เมื่อสารละลายมีพีเอชต่างกัน โดยที่ ◇ ปฏิกริยาโฟโตแคตตาไลติก, △ ปฏิกริยาโฟโตไลซิส, □ ชุดควบคุม

จากรูปที่ 4.6 พบว่าพีเอชของสารละลายมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Remazol Brilliant Blue R ด้วยปฏิกริยาโฟโตแคตตาไลติกในสถานะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกริยา ประสิทธิภาพในการบำบัดมีแนวโน้มลดลงจาก 98 % เป็น 92 % และ 90 % เมื่อพีเอชของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 3 เป็น 7 และ 11 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการบำบัดสีย้อมด้วยปฏิกริยาโฟโตแคตตาไลติกในสถานะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดได้ดีที่สุด เมื่อพีเอชของสารละลายมีค่าเป็นกรด เนื่องจากการเพิ่มความเป็นกรด ( $H^+$ ) ของสารละลายจะมีผลต่อความเสถียรของไฮดรอกซิล ( $h^+$ ) โดยการช่วยลดอัตราการรวมตัวกันของอิเล็กตรอน-ไฮดรอกซิล ( $e^- / h^+$ ) ลง จึงทำให้เกิดการยึดเกาะของสารประกอบไอออนิกกับไฮดรอกซิล ( $h^+$ ) ที่ผิวของตัวเร่งปฏิกริยา นอกจากนี้พบว่าพีเอชไม่ค่อยมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Remazol Brilliant Blue R ในปฏิกริยาโฟโตไลซิสและในชุดควบคุม ดังจะเห็นได้จากเปอร์เซ็นต์การบำบัดที่พีเอชทั้งสามค่าที่ทำการทดสอบนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ความคุ้มครอง ดังจะเห็นได้จากเปอร์เซ็นต์การบำบัดที่พีเอชทั้งสามค่าที่ทำการทดสอบนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม

ในการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม ทำการศึกษาโดยกำหนด ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 1.0 กรัมต่อลิตร ระยะเวลาการให้แสงยูวี (ระยะเวลาที่ทิ้งไว้ในที่ที่บดแสงในกรณีของชุดควบคุม) เท่ากับ 24 ชั่วโมง และพีเอชของสารละลายเท่ากับ 3 ทำการแปรค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม 50, 100, 200 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือในสารละลาย ผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมต่างกัน โดยที่ ◇ ปฏิกริยาโฟโตแคตตาไลติก, △ ปฏิกริยาโฟโตไลซิส, □ ชุดควบคุม

จากรูปที่ 4.7 พบว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมด้วยปฏิกริยาโฟโตแคตตาไลติกโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกริยา โดยประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมมีแนวโน้มลดลงจาก 98 % เป็น 61 % , 38 % และ 21 % เมื่อสารละลายสีย้อมมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจาก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 100, 200 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากเมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเพิ่มขึ้น มีผลทำให้การเคลื่อนที่ของโมเลกุลสีย้อมจากสารละลายเข้าไปทำปฏิกริยากับพื้นที่ผิวของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นไปได้ยาก เพราะโมเลกุลของสีย้อมมีจำนวนมากขึ้นและมีขนาดใหญ่มาก จึงทำให้เกิดการขัดขวางกันของโมเลกุลสีย้อมที่จะเข้าไปทำปฏิกริยากับพื้นที่ผิวของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ นอกจากนี้เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเพิ่มสูงขึ้น อาจทำให้ประสิทธิภาพในการแพร่กระจาย และการส่องผ่านของแสงยูวีในสารละลายมีค่าลดลง ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมมีค่าลดลงเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นของสีย้อมสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Akyol

and Bayramoglu (2007) ที่พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมมีแนวโน้มลดลง

เมื่อพิจารณาการบำบัดสีย้อมที่ระดับความเข้มข้นต่างกันด้วยปฏิกิริยาโฟโตไลซิส พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเพิ่มจาก 50 เป็น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากโมเลกุลสีย้อมที่มีจำนวนมากขึ้น จึงทำให้เกิดการสลายสีย้อมเพิ่มขึ้นด้วย แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นจาก 100 เป็น 200 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตรพบว่าปฏิกิริยาโฟโตไลซิสของสีย้อมเกิดขึ้นได้น้อยลงทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากจำนวนโมเลกุลของสีย้อมที่เพิ่มขึ้น อาจทำให้ประสิทธิภาพในการแพร่กระจาย และการส่องผ่านของแสงยูวีในสารละลายมีค่าลดลง ส่งผลต่อการสลายตัวของสีย้อมด้วยแสงยูวี ส่วนในชุดควบคุมพบว่า เปอร์เซ็นต์การบำบัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อสีย้อมมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการดูดซับของสีย้อมบนไทเทเนียมไดออกไซด์ลดลงเมื่อโมเลกุลของสีย้อมเพิ่มขึ้น

#### 4.8 ผลของการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการบำบัดสารละลายสีย้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก

ในการศึกษาผลของการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการบำบัดสารละลายสีย้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก ทำการศึกษาโดยกำหนดความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชของสารละลายมีค่าเท่ากับ 3 ระยะเวลาการให้แสงยูวี (หรือระยะเวลาที่ทิ้งไว้ในที่ที่บแสงในกรณีของชุดควบคุม) เท่ากับ 24 ชั่วโมง ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 1.0 กรัมต่อลิตร โดยเจือด้วยซิงค์ออกไซด์ 2 %w/w และวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือในสารละลาย ผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมเปรียบเทียบการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์และการใช้

ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการบำบัดสารละลายสีย้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก โดยที่  $\Delta$  ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยซิงค์ออกไซด์,  $\square$  ไทเทเนียมไดออกไซด์

จากรูปที่ 4.8 พบว่าการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยซิงค์ออกไซด์ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากซิงค์ออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่ดูดกลืนแสงช่วงความยาวคลื่นที่สูงกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ (Akyol and Bayramoglu, 2007) คือดูดกลืนแสงในช่วง Visible ได้ เมื่อเจือในไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้ช่วงความยาวคลื่นที่ถูกดูดกลืนแสงกว้างขึ้น โอกาสที่ไทเทเนียมไดออกไซด์จะถูกพลังงานกระตุ้นทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ( $e^-/h^+$ ) ได้สูงขึ้น นอกจากนี้ซิงค์ออกไซด์ยังอาจเพิ่มการกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์ โอกาสเกิดปฏิกิริยาบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์มีสูงขึ้น เปอร์เซ็นต์การบำบัดจึงเพิ่มสูงขึ้น ในส่วนปฏิกิริยาโฟโตไลซิส พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาในชุดควบคุมพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดไม่แตกต่างกัน เนื่องจากซิงค์ออกไซด์ที่เจือในไทเทเนียมไดออกไซด์มีปริมาณน้อยมากจึงไม่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

โครงการพิเศษนี้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการบำบัดสีย้อม Remazol Brilliant Blue R ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกในสถานะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกในสถานะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ และ ศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมในสถานะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในการศึกษามีโครงสร้างผลึกเป็นแบบอนาเทส มีระบบผลึกเป็นเตตระโกนอล (Tetragonal) มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 19.34 นาโนเมตร สามารถดูดกลืนแสงได้ดีในช่วงความยาวคลื่นน้อยกว่า 400 นาโนเมตร ซึ่งเป็นความยาวคลื่นของรังสียูวี ส่วนซิงค์ออกไซด์มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 39.71 นาโนเมตร

2. จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Remazol Brilliant Blue R โดยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก พบว่าสารละลายสีย้อมสามารถบำบัดได้ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้สภาวะที่ทำการทดลองพบว่าระยะเวลาการให้แสงยูวีที่นานขึ้น และปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้การบำบัดสีย้อมเกิดได้ดีขึ้น โดยในการศึกษานี้ต้องใช้เวลาในการให้แสงยูวีนาน 24 ชั่วโมงและปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เข้มข้น 1 กรัมต่อลิตรจึงจะสามารถบำบัดสารละลายสีย้อมเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ประสิทธิภาพดีที่สุด และการบำบัดสีย้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกจะเกิดขึ้นได้ดี เมื่อพีเอชของสารละลายเป็นกรด ทำให้ต้องมีการปรับสภาพของน้ำเสียที่มีสีย้อมทั้งก่อนที่จะนำมาบำบัดและภายหลังการบำบัด นอกจากนี้สีย้อม Remazol Brilliant Blue R ยังสามารถถูกบำบัดได้โดยกระบวนการดูดซับด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์

3. ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกมีค่าสูงขึ้นเมื่อใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาปัจจัยอื่นที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก เช่น ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ อุณหภูมิ และความเข้มของแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
2. ศึกษาการใช้สารกึ่งตัวนำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอื่น ๆ ในการบำบัดสีย้อม เช่น ซิงค์ออกไซด์คาร์บอนนาโนทิวส์ เปรียบเทียบกับการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ศึกษาการบำบัดสีย้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปแบบอื่นๆ เช่น การทำเป็นแผ่นฟิล์มบาง
4. ศึกษาการบำบัดสีย้อมในปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ขนาดอนุภาคอื่นๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ค่าการดูดกลืนและฟังก์ชันสมการเส้นตรงกราฟมาตรฐานของสารละลาย

มาตรฐานสีย้อม Remazol Brilliant Blue R



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-1 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุดเท่ากับ 592 nm ของสารละลายมาตรฐานสี  
ย้อม Remazol Brilliant Blue R ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆและฟังก์ชันสมการเส้นตรง  
ที่ใช้ในการศึกษาผลของระยะเวลาการให้แสงยูวี และปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์

ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นของสารละลายย้อมต่างๆ					ฟังก์ชันสมการเส้นตรงที่ได้
5 mg/L	20 mg/L	40 mg/L	60 mg/L	80 mg/L	
0.050	0.190	0.369	0.542	0.709	$y = 0.0089x + 0.0072$
0.047	0.186	0.368	0.541	0.708	$y = 0.0089x + 0.0051$
0.066	0.195	0.366	0.558	0.723	$y = 0.0090x + 0.0118$
0.045	0.188	0.367	0.548	0.72	$y = 0.0090x + 0.0029$
0.052	0.194	0.371	0.546	0.714	$y = 0.0089x + 0.0085$
0.053	0.194	0.37	0.544	0.71	$y = 0.0089x + 0.0093$
0.043	0.173	0.344	0.509	0.666	$y = 0.0084x + 0.0035$
0.043	0.174	0.343	0.508	0.664	$y = 0.0083x + 0.004$
0.047	0.187	0.358	0.517	0.701	$y = 0.0087x + 0.0053$

ตารางที่ ก-2 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุดเท่ากับ 592 nm ของสารละลายมาตรฐาน  
สีย้อม Remazol Brilliant Blue R ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆและฟังก์ชันสมการ  
เส้นตรงที่ใช้ในการศึกษาผลของพีเอช

ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นของสารละลายย้อมต่างๆ					ฟังก์ชันสมการเส้นตรงที่ได้
5 mg/L	20 mg/L	40 mg/L	60 mg/L	80 mg/L	
0.05	0.186	0.356	0.542	0.7	$y = 0.0087x + 0.0053$
0.041	0.168	0.345	0.509	0.668	$y = 0.0084x + 0.0013$
0.060	0.190	0.356	0.534	0.710	$y = 0.0088x + 0.0091$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-3 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุดเท่ากับ 592 nm ของสารละลายมาตรฐานสี  
 ย้อม Remazol Brilliant Blue R ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆและฟังก์ชันสมการเส้นตรง  
 ที่ใช้ในการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม

ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมต่างๆ					ฟังก์ชันสมการเส้นตรงที่ได้
5 mg/L	20 mg/L	40 mg/L	60 mg/L	80 mg/L	
0.053	0.195	0.374	0.548	0.723	$y = 0.0089x + 0.0081$
0.053	0.194	0.37	0.543	0.709	$y = 0.0088x + 0.0095$
0.046	0.179	0.347	0.534	0.701	$y = 0.0088x + 0.0013$

ตารางที่ ก-4 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุดเท่ากับ 592 nm ของสารละลายมาตรฐานสี  
 ย้อม Remazol Brilliant Blue R ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆและฟังก์ชันสมการเส้นตรง  
 ที่ใช้ในการศึกษาผลของการใช้ไทเทเนียม ไดออกไซด์ที่เจือด้วยซิงค์ออกไซด์เป็น  
 ตัวเร่งปฏิกิริยา

ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมต่างๆ					ฟังก์ชันสมการเส้นตรงที่ได้
5 mg/L	20 mg/L	40 mg/L	60 mg/L	80 mg/L	
0.043	0.174	0.346	0.508	0.668	$y = 0.0084x + 0.0038$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ข้อมูลที่เกี่ยวข้องในการศึกษาการบำบัดสีย้อม Remazol Brilliant Blue R



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-1 ผลของความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมที่ระยะเวลาการให้แสงยูวีต่างๆในปฏิกิริยาโฟโตแคทาไลติก

ความเข้มข้น ของไทเทเนียม ไดออกไซด์ (g/L)	ระยะ เวลาการให้ แสง ยูวี (ชั่วโมง)	ฟังก์ชันสมการเส้นตรง ของกราฟมาตรฐาน	ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น เท่ากับ 592 นาโนเมตร			ความเข้มข้นสีย้อม (mg/L)		
			เริ่มต้น	หลังบำบัด		เริ่มต้น	หลังบำบัด	
				จุดที่ 1	จุดที่ 2		จุดที่ 1	จุดที่ 2
0.12	0	$y=0.009x+0.0118$	0.471	ND	ND	51.02	ND	ND
	8	$y=0.0089x+0.0072$	0.460	0.376	0.365	50.88	41.49	40.20
	16	$y=0.0089x+0.0051$	0.456	0.355	0.345	50.66	39.31	38.19
	24	$y=0.009x+0.0118$	0.471	0.229	0.248	51.02	24.80	26.24
0.30	0	$y=0.0089x+0.0093$	0.460	ND	ND	50.64	ND	ND
	8	$y=0.009x+0.0029$	0.455	0.228	0.245	50.23	25.01	26.90
	16	$y=0.0089x+0.0085$	0.458	0.202	0.221	50.51	21.74	23.88
	24	$y=0.0089x+0.0093$	0.460	0.084	0.089	50.64	8.39	8.96
1.0	0	$y=0.0087x+0.0053$	0.445	ND	ND	50.54	ND	ND
	8	$y=0.0084x+0.0035$	0.435	0.143	0.152	51.37	16.61	17.68
	16	$y=0.0083x+0.004$	0.433	0.119	0.129	51.69	13.86	15.06
	24	$y=0.0087x+0.0053$	0.445	BDL	BDL	50.54	BDL	BDL

หมายเหตุ ; ND = Not Determine ไม่ได้วิเคราะห์เนื่องจากเป็นตัวอย่างเริ่มต้นของการทดลอง , BDL = below detection limit

ตารางที่ ข-2 ผลของความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมที่ระยะเวลาการให้แสงยูวีต่างๆในปฏิกิริยาโฟโตไลซิส

ความเข้มข้น ของไทเทเนียม ไดออกไซด์ (g/L)	ระยะเวลา การให้แสง ยูวี (ชั่วโมง)	ฟังก์ชันสมการเส้นตรง ของกราฟมาตรฐาน	ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาว คลื่นเท่ากับ 592 นาโนเมตร			ความเข้มข้นสีย้อม (mg/L)		
			เริ่มต้น	หลังบำบัด		เริ่มต้น	หลังบำบัด	
				จุดที่ 1	จุดที่ 2		จุดที่ 1	จุดที่ 2
0.12	0	$y=0.009x+0.0118$	0.471	ND	ND	51.02	ND	ND
	8	$y=0.0089x+0.0072$	0.460	0.468	0.432	50.88	49.40	47.73
	16	$y=0.0089x+0.0051$	0.456	0.455	0.457	50.66	48.88	49.07
	24	$y=0.009x+0.0118$	0.471	0.427	0.425	51.02	47.04	45.91
0.30	0	$y=0.0089x+0.0093$	0.460	ND	ND	50.64	ND	ND
	8	$y=0.009x+0.0029$	0.455	0.453	0.448	50.23	48.80	49.46
	16	$y=0.0089x+0.0085$	0.458	0.460	0.452	50.51	49.43	49.83
	24	$y=0.0089x+0.0093$	0.460	0.461	0.442	50.64	49.50	48.62
1.0	0	$y=0.0087x+0.0053$	0.445	ND	ND	50.54	ND	ND
	8	$y=0.0084x+0.0035$	0.435	0.418	0.411	51.37	49.35	48.51
	16	$y=0.0083x+0.004$	0.433	0.415	0.419	51.69	49.52	50.00
	24	$y=0.0087x+0.0053$	0.445	0.411	0.425	50.54	47.67	49.32

หมายเหตุ ; ND = Not Determine ไม่ได้วิเคราะห์เนื่องจากเป็นตัวอย่างเริ่มต้นของการทดลอง , BDL = below detection limit

ตารางที่ ข-3 ผลของความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมที่ระยะเวลาการให้แสงยูวีต่างๆในชุดควบคุม

ความเข้มข้น ของไทเทเนียม ไดออกไซด์ (g/L)	ระยะเวลา การให้แสง ยูวี (ชั่วโมง)	ฟังก์ชันสมการเส้นตรง ของกราฟมาตรฐาน	ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น เท่ากับ 592 นาโนเมตร			ความเข้มข้นสีย้อม (mg/L)		
			เริ่มต้น	หลังบำบัด		เริ่มต้น	หลังบำบัด	
				ชุดที่ 1	ชุดที่ 2		ชุดที่ 1	ชุดที่ 2
0.12	0	$y=0.009x+0.0118$	0.471	ND	ND	51.02	ND	ND
	8	$y=0.0089x+0.0072$	0.460	0.408	0.413	50.88	45.60	45.03
	16	$y=0.0089x+0.0051$	0.456	0.396	0.390	50.66	43.25	43.92
	24	$y=0.009x+0.0118$	0.471	0.472	0.248	51.02	39.85	40.36
0.30	0	$y=0.0089x+0.0093$	0.460	ND	ND	50.64	ND	ND
	8	$y=0.009x+0.0029$	0.455	0.391	0.398	50.23	43.12	43.90
	16	$y=0.0089x+0.0085$	0.458	0.397	0.395	50.51	43.65	43.43
	24	$y=0.0089x+0.0093$	0.460	0.385	0.375	50.64	42.21	41.01
1.0	0	$y=0.0087x+0.0053$	0.445	ND	ND	50.54	ND	ND
	8	$y=0.0084x+0.0035$	0.435	0.350	0.359	51.37	41.25	42.32
	16	$y=0.0083x+0.004$	0.433	0.328	0.338	51.69	39.04	40.24
	24	$y=0.0087x+0.0053$	0.445	0.334	0.344	50.54	39.79	38.61

หมายเหตุ ND = Not Determine ไม่ได้วิเคราะห์เนื่องจากเป็นตัวอย่างเริ่มต้นของการทดลอง , BDL = below detection limit

ตารางที่ ข-4 ผลของพีเอชของสารละลายต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสารละลายสีย้อมเข้มข้น 50 mg/L ในปฏิกิริยาโฟโตแคทาไลติก

พีเอช	ฟังก์ชันสมการ เส้นตรงของกราฟ มาตรฐาน	ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น เท่ากับ 592 นาโนเมตร			ความเข้มข้นสีย้อม (mg/L)		
		เริ่มต้น	หลังบำบัด		เริ่มต้น	หลังบำบัด	
			จุดที่ 1	จุดที่ 2		จุดที่ 1	จุดที่ 2
3	$y=0.0088x+0.0058$	0.449	0.014	0.013	50.36	0.93	0.82
7	$y=0.0084x+0.0013$	0.430	0.029	0.034	51.04	3.30	3.89
11	$y=0.0088x+0.0091$	0.449	0.047	0.053	49.99	4.31	4.99

ตารางที่ ข-5 ผลของพีเอชของสารละลายต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสารละลายสีย้อมเข้มข้น 50 mg/L ในปฏิกิริยาโฟโตไลซิส

พีเอช	ฟังก์ชันสมการ เส้นตรงของกราฟ มาตรฐาน	ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น เท่ากับ 592 นาโนเมตร			ความเข้มข้นสีย้อม (mg/L)		
		เริ่มต้น	หลังบำบัด		เริ่มต้น	หลังบำบัด	
			จุดที่ 1	จุดที่ 2		จุดที่ 1	จุดที่ 2
3	$y=0.0088x+0.0058$	0.449	0.387	0.376	50.36	43.32	42.07
7	$y=0.0084x+0.0013$	0.430	0.350	0.345	51.04	41.51	40.92
11	$y=0.0088x+0.0091$	0.449	0.325	0.375	49.99	35.90	41.58

ตารางที่ ข-6 ผลของพีเอชของสารละลายต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสารละลายสีย้อมเข้มข้น 50 mg/L ในชุดควบคุม

พีเอช	ฟังก์ชันสมการ เส้นตรงของกราฟ มาตรฐาน	ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น เท่ากับ 592 นาโนเมตร			ความเข้มข้นสีย้อม (mg/L)		
		เริ่มต้น	หลังบำบัด		เริ่มต้น	หลังบำบัด	
			ชุดที่ 1	ชุดที่ 2		ชุดที่ 1	ชุดที่ 2
3	$y=0.0088x+0.0058$	0.449	0.328	0.319	50.36	36.61	35.59
7	$y=0.0084x+0.0013$	0.430	0.294	0.296	51.04	34.85	35.08
11	$y=0.0088x+0.0091$	0.449	0.325	0.338	49.99	35.90	37.38

หมายเหตุ : สภาวะการทดลอง ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 1.0 g/L ให้แสงยูวีเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง

ตารางที่ ข-7 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายที่ย้อมต่อประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคทาไลติก

ความเข้มข้นสี ย้อม เริ่มต้น (mg/L)	ฟังก์ชันสมการ เส้นตรงของกราฟ มาตรฐาน	ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น เท่ากับ 592 นาโนเมตร			ความเข้มข้นสีย้อม (mg/L)		
		เริ่มต้น	หลังบำบัด		เริ่มต้น	หลังบำบัด	
			ชุดที่ 1	ชุดที่ 2		ชุดที่ 1	ชุดที่ 2
50	$y=0.0088x+0.0058$	0.449	0.014	0.013	50.36	0.93	0.82
100	$y=0.0089x+0.0081$	0.896	0.359	0.348	99.76	39.09	38.19
200	$y=0.0088x+0.0095$	1.775	1.155	1.058	200.63	130.17	119.15
300	$y=0.0088x+0.0013$	2.654	2.114	2.059	301.4	240.08	233.83

ตารางที่ ข-8 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีต่อประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยปฏิกิริยาโฟโตไลซิส

ความเข้มข้นสี ย้อม เริ่มต้น (mg/L)	ฟังก์ชันสมการ เส้นตรงของกราฟ มาตรฐาน	ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น เท่ากับ 592 นาโนเมตร			ความเข้มข้นสีย้อม (mg/L)		
		เริ่มต้น	หลังบำบัด		เริ่มต้น	หลังบำบัด	
			จุดที่ 1	จุดที่ 2		จุดที่ 1	จุดที่ 2
50	$y=0.0088x+0.0058$	0.449	0.387	0.376	50.36	43.32	42.07
100	$y=0.0089x+0.0081$	0.896	0.723	0.700	99.76	80.32	77.74
200	$y=0.0088x+0.0095$	1.775	1.378	1.423	200.63	155.51	160.63
300	$y=0.0088x+0.0013$	2.654	2.319	2.245	301.4	263.38	254.97

ตารางที่ ข-9 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายที่ย้อมต่อประสิทธิภาพในการบำบัดในชุดควบคุม

ความเข้มข้นสี ย้อม เริ่มต้น (mg/L)	ฟังก์ชันสมการเส้นตรง ของกราฟมาตรฐาน	ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น เท่ากับ 592 นาโนเมตร			ความเข้มข้นสีย้อม (mg/L)		
		เริ่มต้น	หลังบำบัด		เริ่มต้น	หลังบำบัด	
			ชุดที่ 1	ชุดที่ 2		ชุดที่ 1	ชุดที่ 2
50	$y=0.0088x+0.0058$	0.449	0.328	0.319	50.36	36.61	35.59
100	$y=0.0089x+0.0081$	0.896	0.668	0.650	99.76	74.15	72.12
200	$y=0.0088x+0.0095$	1.775	1.352	1.398	200.63	152.56	157.78
300	$y=0.0088x+0.0013$	2.654	2.474	2.334	301.4	280.99	265.08

หมายเหตุ : สภาวะการทดลอง ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 1.0 g/L ให้แสงยูวีเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง pH เท่ากับ 3

ตารางที่ ข-10 ผลของการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยซิงค์ออกไซด์ 2% w/w เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อม

สภาวะ	ฟังก์ชันสมการเส้นตรง ของกราฟมาตรฐาน	ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น เท่ากับ 592 นาโนเมตร			ความเข้มข้นสีข้อม (mg/L)		
		เริ่มต้น	หลังบำบัด		เริ่มต้น	หลังบำบัด	
			ชุดที่ 1	ชุดที่ 2		ชุดที่ 1	ชุดที่ 2
Photocatalytic	$y=0.0084x+0.0038$	0.845	0.244	0.228	100.1	28.59	26.69
Photolysis		0.845	0.687	0.712	100.1	81.33	84.31
Control		0.845	0.648	0.668	100.1	76.69	79.07

หมายเหตุ : สภาวะการทดลอง ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 1.0 g/L ปริมาณซิงค์ออกไซด์เท่ากับ 2% w/w ให้แสงยูวีเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง  
pH เท่ากับ 3