



การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมด้วย  
เทคนิคโฟโตแคตตาไลติคร่วมกับกระบวนการดูดซับ



กาญจนา ลือพงษ์

นนุช ศศิธร

งานวิจัยนี้ได้รับเงินสนับสนุนจากเงินงบประมาณเงินผลประโยชน์ประจำปีงบประมาณ ๒๕๕๓  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอและออกแบบแฟชั่น



Dye Effluent Treatment with Photocatalytic Technique  
and Adsorption Process

Kanchana Luepong

Nongnut Sasithorn



This Report is Funded by Rajamangala University of Technology Phra Nakhon,  
Fiscal Year 2010

ชื่อเรื่อง : การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมด้วยเทคนิคโฟโตแคตตา  
ไลติคร่วมกับกระบวนการดูดซับ  
ผู้วิจัย : กาญจนา ลีพงษ์  
นนุช ศศิธร  
พ.ศ. ๒๕๕๓

### บทคัดย่อ

การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมด้วยเทคนิคโฟโตแคตตาไลติคร่วมกับกระบวนการดูดซับมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมโดยศึกษาผลของกระบวนการบำบัดแบบผสมผสานระหว่างไททาเนียมไดออกไซด์ และถ่านกัมมันต์ น้ำย้อมที่ใช้ในการบำบัดได้แก่ น้ำย้อมสีไคเร็กซ์ สีรีแอคทีฟ สีแอซิด สีดิสเพิร์ส และสีเบสิก ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำย้อม คือ 1 % owf น้ำสีที่ใช้ในการบำบัดเป็นน้ำสีที่ผ่านกระบวนการย้อมบนวัสดุสิ่งทอตามกระบวนการที่สมบูรณ์สีย้อมที่ใช้ทั้งหมดมีโครงสร้างอะโซ (Azo)

จากการศึกษาพบว่าสีไคเร็กซ์และสีรีแอคทีฟให้ผลการบำบัดในกระบวนการต่อเนื่องจากเทคนิคโฟโตแคตตาไลติคร่วมกับกระบวนการดูดซับได้ดี ส่วนสีดิสเพิร์สควรใช้กระบวนการดูดซับเพียงอย่างเดียว สำหรับสีแอซิดและสีเบสิกมีความเข้มข้นของน้ำเสียที่เหลือจากกระบวนการน้อยจึงไม่นำมาทดสอบ สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสีไคเร็กซ์คือใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 10 กรัมต่อลิตร เวลา 6 ชั่วโมง และถ่านกัมมันต์ 5 กรัมต่อลิตร เวลา 2 ชั่วโมง สีรีแอคทีฟใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 10 กรัมต่อลิตร เวลา 6 ชั่วโมง และถ่านกัมมันต์ 10 กรัมต่อลิตร เวลา 2 ชั่วโมง ส่วนสีดิสเพิร์สใช้ถ่านกัมมันต์ 15 กรัมต่อลิตร เวลา 4 ชั่วโมง ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าเทคนิคโฟโตแคตตาไลติคร่วมกับกระบวนการดูดซับสามารถใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมได้ ผลการบำบัดจะขึ้นอยู่กับประเภทสีเป็นหลัก

คำสำคัญ : เทคนิคโฟโตแคตตาไลติค, กระบวนการดูดซับ, ไททาเนียมไดออกไซด์,  
ถ่านกัมมันต์

Title : Dye Effluent Treatment with Photocatalytic Technique  
and Adsorption Process  
Researcher : Kanchana Luepong  
Nongnut Sasithorn  
Year : 2010

### Abstract

Dye effluent treatment with photocatalytic technique and adsorption process had an objective for studying the combination process between Titanium dioxide and activated carbon from dye effluent. The dye effluents were prepared from the direct dye, reactive dye, acid dye, disperse dye, and basic dye. The effluent dyes from the completely dyeing process at 1 % owf initially. All of dye structures were azo.

From the study, direct dye and reactive were successfully using combination process between photocatalytic technique and adsorption process whereas disperse dye favored in adsorption process. However, acid dye and basic were ignored in this experiment cause of they were a bit of dye concentration in their effluent. The optimum condition for direct dye was 10g/l Titanium dioxide for 6 hours and 5 g/l activated carbon for 6 hours continuously. Reactive dye was performed in continuous condition as 10g/l Titanium dioxide for 6 hours and 10 g/l activated carbon for 6 hours. Disperse dye was the particular process in adsorption by activated carbon 15 g/l for 4 hours. It was summarized that the treatment of photocatalytic technique and adsorption process were upon on the type of dye.

**Keywords** : Photocatalytic technique, Adsorption process, Titanium dioxide, activated carbon

## สารบัญ

บทคัดย่อ	ค
Abstract	ง
สารบัญ	จ
สารบัญรูป	ช
สารบัญตาราง	ซ
กิตติกรรมประกาศ	ณ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของแผนงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์	2
1.6 ระยะเวลาทำการวิจัย และแผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย	3
1.7 ผลสำเร็จและความคุ้มค่าของการวิจัย	3
1.8 งบประมาณของโครงการวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.2 ไททาเนียมไดออกไซด์	8
2.3 กระบวนการโซล-เจล	10
2.4 เทคนิคโฟโตแคตตาไลติก (Photocatalytic process)	12
2.5 การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์	20
2.6 สีย้อม	23
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	29
3.1 วัสดุและสารเคมี	29
3.2 การทดลอง	30
3.3 การขึ้นรูปตัวกรองจากวัสดุธรรมชาติและถ่านกัมมันต์ในการบำบัดน้ำเสีย	37
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์	38
4.1 การสร้างกราฟมาตรฐาน (Calibration curve)	38
4.2 การประเมินผลการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคโฟโตแคตตาไลติก	44

สารบัญ (ต่อ)

4.3 การประเมินผลการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการดูดซับ	49
4.4 ผลการบำบัดน้ำเสียจากตัวกรองธรรมชาติและถ่านกัมมันต์	53
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	55
บรรณานุกรม	56
ภาคผนวก	59



## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์แบ่งตามรูปผลึก	9
2.2 ปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก	18
3.1 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย	30
3.2 การเตรียม $\text{TiO}_2$ ด้วยเทคนิคโซล- เจล	31
3.3 การเตรียมน้ำสีไดเร็กต์ แอซิด และเบสิค	32
3.4 การเตรียมน้ำสีรีแอคทีฟ	33
3.5 การเตรียมน้ำสีดิสเพิร์ส	34
4.1 กราฟมาตรฐาน C.I. Direct Red 23	39
4.2 กราฟมาตรฐาน C.I. Reactive Red 21	40
4.3 กราฟมาตรฐาน C.I. Acid Red 131	41
4.4 กราฟมาตรฐาน C.I. Disperse Red 167	42
4.5 กราฟมาตรฐาน C.I. Basic Red 18	43



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การประยุกต์ใช้เทคนิคโฟโตแคตตาไลติกในการบำบัด	19
2.2 มวลสารที่สามารถบำบัดด้วยเทคนิคโฟโตแคตตาไลติก	20
4.1 ค่าการดูดกลืนคลื่นแสงของสารละลายมาตรฐานสีไตรีท์	39
4.2 ค่าการดูดกลืนคลื่นแสงของสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟ	40
4.3 ค่าการดูดกลืนคลื่นแสงของสารละลายมาตรฐานสีแอซิด	41
4.4 ค่าการดูดกลืนคลื่นแสงของสารละลายมาตรฐานสีดิสเพิร์ส	42
4.5 ค่าการดูดกลืนคลื่นแสงของสารละลายมาตรฐานสีเบสิก	43
4.6 ความเข้มข้นสีไตรีท์เมื่อบำบัดด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ในปริมาณ และเวลาต่างๆ กัน	44
4.7 ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟเมื่อบำบัดด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ในปริมาณ และเวลาต่างๆ กัน	46
4.8 ความเข้มข้นสีดิสเพิร์สเมื่อบำบัดด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ในปริมาณ และเวลาต่างๆ กัน	47
4.9 สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัด $TiO_2$ 10 กรัมต่อลิตรเป็นเวลา 6 ชั่วโมง	48
4.10 การหาสภาวะในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการดูดซับของสี ไตรีท์	49
4.11 การหาสภาวะในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการดูดซับของสี รีแอกทีฟ	50
4.12 การหาสภาวะในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการดูดซับของสี ดิสเพิร์ส	51
4.13 ผลสรุปการบำบัดน้ำเสียเทคนิคโฟโตแคตตาไลติคร่วมกับ กระบวนการดูดซับ	52



## กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินการวิจัย เรื่อง การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมด้วยเทคนิคโฟโตแคตตาไลติคร่วมกับกระบวนการดูดซับครั้งนี้สำเร็จ ลุล่วงไปด้วยดี โดยได้รับความอนุเคราะห์ในด้านต่างๆ มากมาย ผู้วิจัยขอขอบคุณทุกท่านดังรายนามต่อไปนี้

1. คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอและออกแบบแฟชั่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล พระนคร สนับสนุนทุนวิจัย
2. นักศึกษาสาขาวิชาเทคโนโลยีเคมีสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอและออกแบบ แฟชั่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ผู้ช่วยดำเนินการวิจัย
3. บิดา มารดา และบุคคลอีกหลายท่านที่มีส่วนช่วยผลักดันให้โครงการนี้สำเร็จ ทั้งด้านกำลังใจ และแง่คิดดีๆ ในการทำงาน

กาญจนา ลือพงษ์  
นนุช ศศิธร



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

อุตสาหกรรมการฟอกย้อมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมที่มีความจำเป็นต้องใช้สารเคมี และสีย้อมชนิดต่างๆ ในกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมาก เนื่องจากต้องทำให้ผลิตภัณฑ์มีความน่าสมยอมอยู่เสมอ ดังนั้นน้ำทิ้งจากโรงงานเหล่านี้ จึงมีปริมาณสารปนเปื้อนและสีย้อมสูง หากไม่มีการลดสีก่อนจะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระบบนิเวศวิทยาและเกิดสภาพไม่นาดู อุตสาหกรรมการย้อมสีสิ่งทอ ในปัจจุบันได้มีการนำวิธีการบำบัดน้ำสีที่ทิ้งจากกระบวนการย้อม ที่เป็นทั้งสีเบสิก ไตเร็กท์ รีแอคทีฟ และดิสเพิร์ส หลากหลายวิธีมีการบำบัดทางกายภาพ ทางเคมี ทางชีวภาพ การกำจัดสีในน้ำทิ้งเป็นการกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำทิ้ง เนื่องจากการย้อมผ้าในโรงงานฟอกย้อมส่วนใหญ่จะเป็นสีย้อมและสารเคมี ซึ่งเป็นส่วนที่เสียดกค้างในน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตและจะถูกปล่อยลงแหล่งน้ำทิ้ง แม้จะมีการโต้เถียงกันว่าสีย้อมไม่ควรถูกจัดให้เป็นสารก่อมลภาวะในน้ำ แต่เนื่องจากสภาพความมีสีทำให้เกิดความรู้สึกน่ารังเกียจต่อคนทั่วไปตามความในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมปี 2539 กำหนดให้สีในน้ำทิ้งไม่เป็นที่น่ารังเกียจ ดังนั้นน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมก่อนปล่อยออกจากโรงงานต้องผ่านระบบน้ำเสียเพื่อทำการกำจัดสารต่างๆ รวมทั้งสีที่ตกค้างก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ

กระบวนการโฟโตแคตาไลติก (Photocatalytic Oxidation) เป็นกระบวนการทำลายสารโดยใช้แสงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หลักการทำงานของกระบวนการ Photocatalytic Oxidation คือ การให้พลังงานแสงเข้าไปในระบบเพื่อเอาชนะค่าแถบพลังงาน (Energy band gap) ซึ่งเป็นค่าของความแตกต่างระหว่างพลังงานของแถบนำไฟฟ้า (Conduction Band) กับแถบพลังงานที่เต็มแล้ว (Valence Band) ซึ่งเมื่อพลังงานแสงที่ให้แก่ระบบมากกว่าค่าแถบพลังงาน แล้วมีการสร้าง Electron Hole Pairs กับ Adsorbed Species (Reactant) ที่ผิวของ Semiconductor สารเคมีที่สามารถเกิดปรากฏการณ์นี้ ได้แก่ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide) สารนี้เป็นสารตั้งต้นที่เหมาะสมสามารถใช้เป็นคะตะลิสต์ในกระบวนการแสงอาทิตย์โฟโตแคตาไลติก เพราะทำปฏิกิริยาได้ดีในพลังงานแสงอาทิตย์ มีสมบัติในบำบัดน้ำและให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยสูง วิธีการสังเคราะห์สารได้แก่ เทคนิค Sol-gel ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย สะดวก สามารถทำได้ที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ เทคนิค

โฟโต-แคตาไลติกสำหรับการบำบัดน้ำเสียที่อาจทำให้ลดต้นทุนการผลิตระบบบำบัดน้ำลง เนื่องจากประเทศเรามีพลังงานแสงอาทิตย์เพียงพอ ดังนั้นจึงได้มีการนำสารไททาเนียมไดออกไซด์ โดยอาศัยกระบวนการแสงอาทิตย์โฟโตแคตาไลติก ใช้ในการบำบัดน้ำย้อมที่เหลือจากกระบวนการฟอกย้อมและเพื่อให้นักวิจัยสมบูรณ์ได้มีการนำการบำบัดทางกายภาพโดยการใช้วัสดุธรรมชาติและถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) มาทำการขึ้นรูปเป็นตัวกรอง เพื่อช่วยในการบำบัดน้ำเสียให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของแผนงานวิจัย

1. เพื่อทำการบำบัดน้ำสีจากรกระบวนการฟอกย้อมด้วยไททาเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์
2. เพื่อศึกษาผลของกระบวนการบำบัดแบบผสมผสานระหว่างไททาเนียมไดออกไซด์ และถ่านกัมมันต์
3. เพื่อศึกษาการขึ้นรูปตัวกรองจากวัสดุธรรมชาติและถ่านกัมมันต์ในการบำบัดน้ำเสีย

## 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. น้ำย้อมที่ใช้ในการบำบัดได้แก่ น้ำย้อมสีไตรเร็กท์ รีแอกทีฟ แอซิด ดิสเพิร์ส และ สีเบสิค
2. ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำย้อม คือ 1 % owf
3. สีย้อมโครงสร้างอะโซ (Azo)

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำด้วยกระบวนการกระบวนการโฟโตแคตาไลติก
2. ทราบภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำด้วยตัวกรองจากวัสดุธรรมชาติและถ่านกัมมันต์
3. ลดน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการฟอกย้อม

## 1.5 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

- สาขาวิชาเทคโนโลยีเคมีสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอและออกแบบแฟชั่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
- โรงงานฟอกย้อมที่มีการย้อมสีตามที่ได้ทำการวิจัย

- สถาบันการศึกษาอื่นที่มีการเรียนการสอนในการย่อมสีตามที่ได้ทำการวิจัย ได้แก่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ แผนกวิชาเคมีสิ่งทอ คณะคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

#### 1.6 ระยะเวลาทำการวิจัย และแผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย

กิจกรรม/ขั้นตอนการดำเนินงาน	ปีงบประมาณ 2553												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1. ศึกษาและเตรียมข้อมูลเบื้องต้น													
2. ดำเนินการจัดซื้อวัสดุเพื่อทำการทดลอง													
3. ดำเนินการทดลอง													
4. ทดสอบและประเมินผลการทดลอง													
5. สรุปผลการวิจัย และจัดทำรูปเล่มรายงาน													

#### 1.7 ผลสำเร็จและความคุ้มค่าของการวิจัย

ในการวิจัยนี้เป็นการใช้เทคนิคโฟโตแคตตาไลติค ร่วมกับการดูดซับด้วยตัวกรองจากวัสดุธรรมชาติผสมถ่านกัมมันต์ เป็นการเพิ่มทางเลือกในการบำบัดน้ำเสีย และเป็นการนำวัสดุธรรมชาติมาเพิ่มมูลค่า ผลสำเร็จของงานวิจัยนี้เป็นผลสำเร็จเบื้องต้น (P) และการประยุกต์ใช้งานตัวกรองเป็นตัวดูดซับเป็นผลสำเร็จระดับกลาง (I)

## 1.8 งบประมาณของโครงการวิจัย

รายละเอียดงบประมาณการวิจัยของข้อเสนอการวิจัย จำแนกตามงบประมาณ  
ต่างๆ (ปีงบประมาณ 53)

รายการ	จำนวนเงิน (บาท)
<b>งบดำเนินการ</b>	
<b>ค่าตอบแทน ใช้สอย และวัสดุ</b>	
<b>1) ค่าตอบแทน</b>	<b>33,000</b>
- ค่าตอบแทนนักวิจัย	7,000
- ค่าตอบแทนผู้ช่วยวิจัยเหมาจ่ายรายเดือน (1 คน x 4 เดือน x 6,500 บาท)	26,000
<b>2) ค่าใช้สอย</b>	<b>10,000</b>
- ค่าวิเคราะห์ตัวอย่าง	10,000
<b>3) ค่าวัสดุ</b>	<b>23,500</b>
- ค่าถ่ายเอกสารและเข้าเล่มรายงาน	5,500
- ค่าวัสดุติดและค่าสารเคมี	15,000
- ค่าจ้างพิมพ์เอกสาร	3,000
<b>3) ค่าสาธารณูปโภค</b>	<b>3,500</b>
<b>รวม</b>	<b>70,000</b> (เจ็ดหมื่นบาทถ้วน)

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พ.ศ. 2541 ขจรศักดิ์ โสภากาจารย์ ศึกษาการกำจัดฟีนอลโดยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกที่อาศัยไททาเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) เป็นแคตาไลสต์แบบแขวนลอย โดยอาศัยปฏิกรณ์ในรูปแบบ Semi-batch reactor ซึ่งมีลักษณะเป็นรางลาดเอียงที่ใช้หลอดไฟชนิด Black light จำนวน 3 หลอด แต่ละหลอดมีกำลังไฟ 36 วัตต์ เป็นแหล่งพลังงานแสง วางอยู่เหนือรางเป็นระยะ 15 เซนติเมตร การทดลองจะใช้สารละลายฟีนอลไหลหมุนเวียนระหว่างรางปฏิกรณ์และถักพักสาร ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอลโดยการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ และอัตราการไหลวนของสารละลายในระบบซึ่งจากการทดลองพบว่าเวลาที่ใช้จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลเพิ่มขึ้น เมื่อใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกันคือ 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 กรัมต่อลิตร ให้ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 0.0368, 0.0486, 0.0590 และ 0.0741 นาที ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มลักษณะเป็นเส้นตรง และเมื่อมีการเพิ่มอัตราการไหลวนของสารมีค่าต่างๆ กันคือ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 ลิตรต่อชั่วโมง ให้ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 0.0527, 0.0743, 0.0849 และ 0.0933 นาที แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลอัตราการกำจัดฟีนอลก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

พ.ศ.2546 จุฑามาศ ลีประเสริฐ และ ณิชกมล นิธิมัย ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา การเตรียมไททาเนียมไดออกไซด์ โดยเทคนิคโซล-เจล เพื่อใช้กำจัด VOCs ออกจากอากาศเสีย พบว่า การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไททาเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) โดยเทคนิคโซล-เจลที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ ได้สภาวะที่เหมาะสมคือ สัดส่วนโดยโมลของสารตั้งต้นต่อตัวทำละลายคือ 1:40 อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาคือ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้ได้ผลึกสีขาวที่มีโครงสร้างอนาเทส (Anatase) 100 เปอร์เซ็นต์ ระยะเวลาที่เหมาะสมในการเคลือบปฏิกรณ์ คือ 60 วินาที ที่ทำให้ผลึกขนาดเล็กเกาะติดบนปฏิกรณ์อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งสามารถนำมาเคลือบปฏิกรณ์เพื่อใช้ในโฟโตแคตตาไลติกออกซิเดชัน

พ.ศ.2547 Lakshmi et al. ทำการทดลองการกำจัดสารเมทิลีนบลูในน้ำ โดยอาศัยกระบวนการโฟโตแคตาไลติก ใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตัวแคตาลิสต์ โดยศึกษาจาก Brunauer Emmett-Teller (BET) มีพื้นที่ผิว 50 ตารางเมตรต่อกรัม ขนาดท่อภายในโดยเฉลี่ย 30 มิลลิเมตร ภายในบรรจุหลอดไฟชนิดหลอดปรอท ความเข้มแสง 125 วัตต์ สารเมทิลีนบลูถูกใช้ศึกษาเปรียบเทียบการกำจัดสารกับสาร NaOH และ HClO<sub>4</sub> ทำการผสมสารละลายเมทิลีนบลูในหลอด Polymerization มีการเพิ่มก๊าซออกซิเจน โดยการกวนสารละลายสม่ำเสมอ ควบคุมความเป็นกรดเป็นด่างด้วย pH-meter พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมทิลีนบลู จาก  $6.6 \times 10^{-6}$  เป็น  $3.6 \times 10^{-5}$  โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตรใช้สารไททาเนียมไดออกไซด์ 0.05 กรัม ควบคุมความเป็นกรดเป็นด่างที่ 3 ค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่คำนวณได้เท่ากับ  $1.79 \times 10^4$  โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นพบไอออนของสารพวกคาร์บอนไดออกไซด์, ไนเตรต และ แอมโมเนีย เมื่อเพิ่มปริมาณแคตาลิสต์จาก 0.003 เป็น 0.05 กรัม ต่อสารละลาย 75 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของเมทิลีนบลู  $1.0 \times 10^{-5}$  โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแคตาลิสต์ และจะเริ่มคงที่เมื่อเพิ่มปริมาณ แคตาลิสต์ถึง 0.1 กรัม

พ.ศ. 2548 Ammar et al. ทำการทดลองเพื่อศึกษาการกำจัดสารเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตแคตาไลติกซึ่งอาศัยไททาเนียมไดออกไซด์เป็นสารแคตาลิสต์ ปริมาณ 2.5 กรัมต่อลิตร โดยศึกษาจากการเปลี่ยนไปของโครงสร้างของสารเมทิลีนบลูหลังเกิดปฏิกิริยา ปฏิกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาค้นนี้เป็นลักษณะ Pyrex reactor ซึ่งมีรูปร่างแบบทรงกระบอกขนาด 90 มิลลิลิตรพื้นที่หน้าตัด 11 ตารางเซนติเมตร ใช้หลอดไฟชนิด High pressure mercury ขนาด 125 วัตต์ มีน้ำหล่อเย็นช่วยลดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิโดยตรงจากหลอดไฟ การวิเคราะห์ผลทำได้โดยวัดค่าความเข้มข้นของสารเมทิลีนบลู จากเครื่อง UV/Vis Spectrometer ทำนายการดูดซับของแคตาลิสต์จาก Beer-Lambert diagram หาสาร ตัวกลาง (Intermedient) ด้วย การวิเคราะห์จากเครื่อง HPLC รวมทั้งหาค่า TOD (Chemical oxygen demand) และอัตราการหายไปของเคมีอินทรีย์ (TOC) ค่าพลังงานแสงที่เหมาะสมต่อปฏิกิริยา ถูกควบคุมให้เหมาะสมที่  $6.94 \times 10^{-7}$  mol of protons/second อุณหภูมิถูกควบคุมที่ 293 เคลวิน จากการศึกษาพบว่าสารเมทิลีนบลูสามารถถูกกำจัดได้ด้วยกระบวนการดังกล่าวที่อุณหภูมิบรรยากาศ ผลจากการดูดซับของตัวแคตาลิสต์ทำให้สามารถหาค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา  $6.25 \times 10^3$  ลิตรต่อโมล และเมื่อควบคุมค่าความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลายให้เพิ่มขึ้นจาก 3 ไปเป็น 9 ค่าการดูดซับของแคตาลิสต์ในสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น สารที่พบในสารละลาย ตัวอย่างที่ต้องการกำจัดนั้นจะอยู่ในรูป CO<sub>2</sub>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> และ NO<sub>3</sub><sup>-</sup> โครงสร้างที่เปลี่ยนไปของสารเมทิลีนบลูในน้ำเสียตัวอย่างเกิดจากการเปลี่ยนโครงสร้างภายในวงเบนซีนของสาร

พ.ศ. 2549 Zhang et al. ทดสอบการกำจัดสารเมทิลีนบลู โดยใช้แสงอาทิตย์โฟโตแคตาไลติกเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรดเป็นด่าง TOC ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของเมทิลีนบลูและความเข้มแสงอาทิตย์ โดยดูค่า TOC ที่ได้พบว่า ค่าความเป็นกรดเป็นด่างที่เหมาะสมมีค่าประมาณ 4 ค่า TOC ที่ได้จากระบบค่อนข้างต่ำ ค่า TOC ที่ศึกษาจากผลของความเข้มแสงในแต่ละค่าที่ต่างกันค่อนข้างใกล้เคียงกัน

พ.ศ. 2549 สิริชัย ภิบาลจอมมี ศึกษาการกำจัดสีของน้ำเสียสี้อมด้วยกระบวนการโฟโตแคตาไลติกโดยใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นแคตาลิสต์ น้ำเสียสี้อมตัวอย่างได้จากการผสมผงสีกับน้ำกลั่นซึ่งสีที่ใช้ได้มาจากสีที่ใช้ในโรงงานผลิตกระดาษ ทำการศึกษา 3 โทนสี คือ สีแดงสีน้ำเงินและสีเหลือง การศึกษาอาศัยถังปฏิกรณ์ที่ทำจากแก้วไพเรกซ์ (Pyrex glass) ที่มีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วนคือ หลอดแก้วทรงกระบอกภายนอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 เซนติเมตร ระหว่างช่องว่างเป็นช่องทางไหลผ่านและภายในจะบรรจุหลอดทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 6 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4 เซนติเมตร ภายในบรรจุหลอดไฟขนาด 400 วัตต์ ความเข้มแสง 1,434,650 ลักซ์ต่อตารางเมตร เป็นแหล่งพลังงานแสง ช่องว่างระหว่างท่อทรงกระบอกทั้งสองมีน้ำไหลผ่านเพื่อป้องกันการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของสารละลายจากหลอดไฟโดยตรง นอกจากนี้มีท่อเติมก๊าซขนาด 0.4 เซนติเมตร จำนวน 2 ท่อเพื่อเติมอากาศหรือก๊าซไนโตรเจนแก่สารละลาย ปัจจัยที่ทดสอบในการทดลองคือ การละลายของออกซิเจนในสารละลายสีตัวอย่าง ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีตัวอย่างและความเข้มข้นของไททาเนียมไดออกไซด์ การทดลองมีการควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ  $29 \pm 3$  องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่า การละลายของออกซิเจนเป็นปัจจัยสำคัญที่สำคัญของปฏิกิริยาโดยเมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนแทนการเติมอากาศพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสีลดลงจาก 100 เปอร์เซ็นต์ เป็น 85.6, 67.2 และ 43.3 เปอร์เซ็นต์ ของโทนสีน้ำเงิน แดง และเหลืองตามลำดับ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตัวอย่างขึ้น ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นด้วย ปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาของสารสี โทนสี น้ำเงิน แดง และเหลืองคือ 1.0, 3.0 และ 2.0 กรัมต่อลิตรตามลำดับ สำหรับอัตราการกำจัดอินทรีย์สารในสารละลาย (TOC) ของโทนสีน้ำเงินจะดีกว่าโทนสี แดง และเหลืองตามลำดับ

พ.ศ. 2550 Hydroxybnzoic Siham et al. ศึกษากระบวนการแสงอาทิตย์-โฟโตแคตาไลติกเพื่อกำจัดสารประเภทเมทิลออเรนจ์โดยอาศัยสารไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตัวแคตาลิสต์ การศึกษาอาศัยแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงาน และพิจารณาการหายไปของสารเมทิลออเรนจ์โดยศึกษาจากลักษณะการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสาร จากการศึกษา ทัศนความยาวคลื่นแสง 270 และ 465 นาโนเมตร และที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมทิลออเรนจ์



$2 \times 10^{-1}$  และ  $1 \times 10^{-5}$  โมล ใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 5 ชั่วโมง พบว่าเราไม่สามารถกำจัดสารเมทิลออเรนจ์ได้ในกรณีที่กระบวนการเกิดในที่มืด และกรณีกระบวนการเกิดในที่ที่มีแสงอาทิตย์ แต่ไม่ได้ใช้สารไททาเนียมไดออกไซด์ในการทดลองที่ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการก็พบว่า ณ การทดลองที่ใช้ ไททาเนียมไดออกไซด์ 0.04 เปอร์เซ็นต์ ให้ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา คือ 0.619 ชั่วโมง ใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของ เมทิลออเรนจ์  $4 \times 10^{-5}$  โมล ให้ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา คือ 0.639 ชั่วโมง เมื่อใช้ค่าความเป็นกรด/เบสที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 3 ให้ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา คือ 2.6683 ชั่วโมง และเมื่อเพิ่มค่าความเป็นเบสมากขึ้น ให้ค่าเท่ากับ 9 คิดเป็นค่าคงที่ของปฏิกิริยาเท่ากับ 0.7585 ชั่วโมง นอกจากนั้นแล้วยังพบอีกว่า เมื่อมีการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมทิลออเรนจ์แล้วอัตราการกำจัดสารจะมีแนวโน้มลดลง

พ.ศ. 2552 ธีรยุทธ นุชเนียม และ ทิพวัลย์ ตุ่มทอง การบำบัดน้ำย้อมด้วยกระบวนการผสมผสานระหว่างไททาเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์ โดยใช้เทคนิคโฟโตแคตตาไลติกและกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์มีวัตถุประสงค์หลักในการลดความเข้มข้นของน้ำสีไคเร็กซ์ สีรีแอคทีฟ สีดีสเพิร์ส และ สีเบสลิค ที่เหลือจากกระบวนการย้อมซึ่งจะทำการศึกษาดัวแปรหลัก 4 ตัว ในการบำบัดน้ำสีย้อมแบบผสมผสานระหว่างไททาเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์ โดยทำการศึกษาจากปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ตั้งแต่ 0 5 10 และ 15 กรัมต่อลิตร เวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ตั้งแต่ 2 4 6 และ 8 ชั่วโมง ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็น 5 10 และ 15 กรัมต่อลิตรและเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยถ่านกัมมันต์ตั้งแต่ 1 2 3 และ 4 ชั่วโมงตามลำดับ ผลการศึกษาที่ได้นำมาเปรียบเทียบความเข้มข้นด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำสีคือปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ 10 กรัมต่อลิตร ใช้ระยะเวลาในการบำบัด 6 ชั่วโมง และปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ 5 กรัมต่อลิตร ใช้ระยะเวลา 2 ชั่วโมง น้ำสีย้อมหลังการบำบัดจะมีความเข้มข้นลดลงจากความเข้มข้นก่อนการบำบัด

## 2.2 ไททาเนียมไดออกไซด์

### 2.2.1 ลักษณะเฉพาะของสารไททาเนียมไดออกไซด์

ไททาเนียม (Ti) เป็นโลหะสีเทา มีมวลอะตอมเท่ากับ 47.9 ทนต่อการกัดกร่อนสูงไม่เป็นสารไวไฟ มีเลขออกซิเดชัน +4, +3, +2 แต่สภาพที่พบทั่วไปเป็น +4 ไททาเนียมไดออกไซด์จะเป็นผงสีขาว มวลโมเลกุล 79.9 เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง ซึ่งมีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบคือ รูไทล์ (Rutile) อนาเทส (Anatase) และ บรูไคท์ (Brookite) โดยที่ โครงสร้างผลึก ที่นิยมนำมาใช้สำหรับกระบวนการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำ โดยวิธีกระตุ้นด้วยแสงคือ โครงสร้างผลึกแบบ อนาเทสและรูไทล์ ซึ่งมีการจัดเรียงตัวของอะตอมไททาเนียมเป็นแบบออร์ทอโรฮอมบิก (Orthorhombic)

จากการที่ไทเทเนียมไดออกไซด์มีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันนั้น ส่งผลให้โครงสร้างผลึกแต่ละโครงสร้างมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันสำหรับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นแบบอนาเทส นั้น มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 3.894 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในขณะที่ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์นั้นมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 4.250 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

คุณสมบัติที่ต่างกันดังกล่าว จึงทำให้ผลึกของโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส มีค่าเท่ากับ 3.23 โวลต์ ในขณะที่รูไทล์มีค่าเท่ากับ 3.02 โวลต์ จึงทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ และโครงสร้างผลึกแบบ บรูไคท์ การทำให้บริสุทธิ์นั้นทำได้ยาก ส่วนโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ จะเกิดการรวมตัวใหม่ของ  $e^-$  และ  $h^+$  ได้ง่าย ทั้งยังมีความสามารถในการดูดติดผิวต่ำกว่าโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส ในปัจจุบันจึงเป็นที่นิยมใช้โครงสร้างผลึกแบบอนาเทสมากกว่าแบบอื่น



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์แบ่งตามรูปผลึก

ที่มา : <http://www.vcharkarn.com/varticle/27809, 2553>

รูไทล์ มีรูปผลึกที่แน่นอน สามารถดูดกลืนรังสีเหนือม่วง (Ultra violet) ได้น้อยกว่าอนาเทส และรูไทล์มีลักษณะของสีค่อนข้างเหลือง อย่างไรก็ตาม การนำสารไทเทเนียมไดออกไซด์ไปใช้กับแสงที่มีความเข้มสูง จะต้องคำนึงถึงดัชนีการหักเหแสงสูง และการกระจายของแสงของผลึกชนิดรูไทล์ เพราะจะมีผลกระทบในตัวยกกลางจัสสารอินทรีย์มากกว่าแบบอนาเทส ประมาณ 20%

ไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นสารที่ต้องใช้แสงยูวี ในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน กับสารประกอบอินทรีย์ ผิวหน้าผลึกของรูไทล์ ประมาณ 10 เท่า ต่อการเกิดปฏิกิริยานั้นๆ และอนาเทส จะมีการลดลง 10% ของปฏิกิริยาครึ่งชีวิตของรูไทล์ ดังนั้นสำหรับการใช้งาน ภายนอกต้องให้ความสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของผลึกรูไทล์ และปริมาณ 1% ของรังสี x-ray จะไม่สามารถส่องผ่านผลึกของสารชนิดนี้ อีกทั้งสารชนิดนี้สามารถทำให้บริสุทธิ์ได้โดยปฏิกิริยา คลอไรด์ ที่สามารถเกิดขึ้นเองได้ตามธรรมชาติ

### 2.3 กระบวนการโซล-เจล

กระบวนการโซล-เจล เป็นกระบวนการทางเคมีที่อาศัยการเกิดพันธะทางเคมีหรือการเกาะตัวกันของสารตั้งต้นในระดับโมโนเมอร์ เทคนิคนี้เป็นที่รู้จักครั้งแรกในปี 1800[8] เทคโนโลยีโซล-เจลเริ่มใช้สารอัลคอกไซด์ในปี 1846 เป็นเวลาร้อยกว่าปีแล้วที่ได้มีความสนใจการเคลือบชั้นออกไซด์และการเตรียมสารแขวนลอยในรูปของโซล-เจล อย่างไรก็ตาม การพัฒนาเทคนิคโซล-เจล ก็เพิ่งเริ่มสนใจพัฒนาอย่างรวดเร็วไม่กี่สิบปีมานี้ โดยเฉพาะการเตรียมสารละลายไอออนโลหะเช่น อัลคอกไซด์, เกลือในรูปของสารอนินทรีย์ (Inorganic salts), เกลือของโลหะอินทรีย์ (Metallo-organic salts) ไนแอลกอฮอล์ที่เป็นตัวทำ ละลายที่เหมาะสม ที่กล่าวมานี้เพื่อทำ ให้ได้สารตั้งต้นที่เรียกว่า “โซล” (Sol) ตามมาด้วยขั้นตอนของการเกิดเจล (Gellation step) โดยโซลจะถูกกำจัดของเหลวออกไปทำให้ได้ของแข็งที่มีของเหลวภายในที่เรียกว่า “เจล” (Gel) โซล (Sol) คือ อนุภาคคอลลอยด์ (ขนาด 1-200 นาโนเมตร) ที่แขวนลอยในของเหลวเจล (Gel) คือ โซลที่ผ่านกระบวนการความร้อนทำให้ของเหลวระเหยออกไปบางส่วน เกิดของแข็งระดับแมโครโมเลกุล (Macromolecule) อยู่ร่วมกับของเหลว

โดยทั่วไปกระบวนการโซล-เจลเป็นกระบวนการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวที่เรียกว่า “โซล” ซึ่งส่วนมากอยู่ในรูปของสารแขวนลอยที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.1-1 ไมครอนให้เป็นของแข็งที่เรียกว่า “เจล” ปฏิกิริยาที่สำคัญในกระบวนการโซล-เจลมี 3 ปฏิกิริยา คือ Hydrolysis, Water condensation และ Alcohol condensation มีปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ pH ตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโมลของน้ำและโลหะ และ อุณหภูมิ ดังนั้นการควบคุมปัจจัยเหล่านี้ ในสภาวะที่ต่างกันจะทำให้โซลและเจลที่ได้มีสมบัติ โครงสร้างต่างกัน

โดยวิธีโซล-เจลจะประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนหลัก ๆ คือการเตรียมเจล (Preparation of gel), การทำให้เกิดเจล (Aging of gel) และการทำเจลให้แห้ง (Drying of gel) ซึ่งลักษณะเจลจะประกอบ ไปด้วย ซีโรเจล (Xerogel), แอโรเจล (Aerogel), ไครโอเจล (Cryogel) และ แอมบิเจล (Ambigel)

### 2.3.1 กระบวนการโซล-เจล แบ่งตามลักษณะสารตั้งต้นที่ใช้

#### 1. Colloidal Sol-gel

สารตั้งต้นพวก Hydrus/anhydrous metal oxides หรือ Metal salt solution อนุภาคมีขนาดในระดับคอลลอยด์

#### 2. Polymeric Sol-gel

สารตั้งต้นที่ใช้เป็นพวกโลหะอินทรีย์เช่นโลหะอัลคอกไซด์ (Metal alkoxides) หรือ  $M(OR)_n$  โดย  $Mn^+$  แทนที่ หมู่โลหะ (Metal cation) OR แทนหมู่ Alkoxide เช่น เซอร์โคเนียมโปรพอกไซด์  $[Zr(C_3H_7O)_4]$

#### การเกิดเจล (Gel Formation) มี 2 แบบ

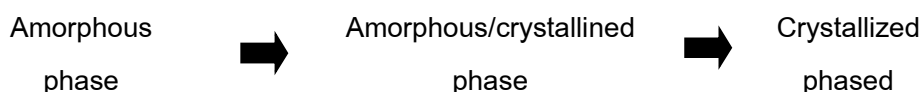
1. **Colloidal gels** สามารถอธิบายโดยใช้ทฤษฎีของ DLVD (Derjagnin, Landan, Verway and Overbeek) กล่าวว่าคุณภาคในของเหลวมีพื้นที่ผิวและขนาดไม่เท่ากันทำให้ความหนาแน่นของประจุที่พื้นผิวไม่เท่ากัน ทำให้เกิดแรงทางไฟฟ้า (Electrostatic) เช่น วาล์เดออร์วาล์ทำให้อนุภาคเกาะตัวกัน เชื่อมโยงกันเพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดเจลในตัวยางที่เป็นของเหลว

2. **Polymeric gels** เกิดจากสารตั้งต้นมีโลหะอัลคอกไซด์เป็นองค์ประกอบ สารประกอบนี้ประกอบด้วยแคทไอออน (Cation) สร้างพันธะกับหมู่อัลคิล (Alkyl groups) และอะตอมของออกซิเจน

### 2.3.2 กระบวนการเปลี่ยนเจลเป็นเซรามิกซ์ (gel to ceramic conversion)

เกิดขึ้นภายใต้กระบวนการความร้อน คือ

1. การทำให้แห้ง (Drying) และการไล่สารอินทรีย์ (Pyrolysis) โดยทั่วไปในช่วงอุณหภูมิ 300-400 องศาเซลเซียส
2. การเรียงตัวของโครงสร้างภายในสารและการเพิ่มความหนาแน่น (Structural rearrangement and densification)
3. การเกิดผลึก (Crystallization) ซึ่งกระบวนการเกิดเฟสสามารถทำได้โดยการควบคุมกระบวนการให้ความร้อนในช่วง 600-1100 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนเฟสของเจลเริ่มจากช่วง



สารตั้งต้นที่นิยมใช้ในกระบวนการโซล-เจลเป็นสารประกอบโลหะและกึ่งโลหะที่ล้อมรอบด้วยลิแกนด์ที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา เช่น Metal alkoxide ในกระบวนการผลิตทั้งจากสถานะที่เป็น Sol และ Gel เมื่อเข้าสู่กระบวนการทำให้แห้งจะได้ผลิตภัณฑ์ในรูปแบบต่างๆ เช่น เส้นใย, ผง, และ แผ่นฟิล์ม การนำเทคโนโลยีโซล-เจล (Sol-gel technology) มาใช้ประโยชน์สามารถทำได้หลายรูปแบบ เช่น อยู่ในรูปของผงละเอียดฟิล์มบาง เส้นใย และ วัสดุก้อน เป็นต้น ซึ่งเป็นสารตั้งต้นสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ แนวโน้มการนำเทคโนโลยีดังกล่าวมาใช้ในเชิงพาณิชย์มีความเป็นไปได้สูงเนื่องจากกระบวนการโซล-เจลเป็นเทคโนโลยีการผลิตที่ทำได้ที่อุณหภูมิห้อง สามารถทำได้ตั้งแต่ระดับห้องปฏิบัติการจนถึงระดับอุตสาหกรรม

## 2.4 เทคนิคโฟโตแคตตาไลติก (Photocatalytic process)

เทคนิคโฟโตแคตตาไลติก (Photocatalytic process) เป็นการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ตัวแคตตาลิสต์ ซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ โดยการกระตุ้นด้วยแสง ตัวแคตตาลิสต์นี้จะทำหน้าที่ลดพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยา หลักการทำงานของกระบวนการ Photocatalytic oxidation คือ การให้พลังงานแสงเข้าไปในระบบเพื่อเอาชนะค่าแถบพลังงาน (Energy band gap) ซึ่งเป็นค่าของความแตกต่างระหว่างพลังงานของแถบนำไฟฟ้า (Conduction band) กับแถบพลังงานที่เต็มแล้ว (Valence band) ซึ่งเมื่อพลังงานแสงที่ให้แก่ระบบมากกว่าค่าค่าแถบพลังงาน (Energy band gap) แล้วจะมีการสร้างอิเล็กตรอนที่มีประจุ (Electron hole pairs) ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ซึ่งกระบวนการนี้เรียกว่ากระบวนการ Photo-oxidation สำหรับกระบวนการ Photocatalytic oxidation แสงที่ให้แก่ระบบมักเป็นแสงอัลตราไวโอเล็ต

พื้นฐานของกระบวนการโฟโตแคตตาไลซิสประกอบด้วย การปล่อยอิเล็กตรอนจากแถบวาเลน (VB) ไปยังแถบนำไฟฟ้า (CB) ของสารกึ่งตัวนำ ( $\text{TiO}_2$ ) และการสร้างโฮล ( $h^+$ ) ในแถบวาเลน (Robert and malato, 2002) เพราะวรั้งสีอัลตราไวโอเล็ต มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าแถบพลังงาน (Band gap  $> 3.2$  eV) กระบวนการนี้จึงสามารถถูกใช้ในการทำลายมวลสารได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับปรากฏการณ์ของกระบวนการที่เกิดขึ้นจากการที่มีการส่องแสงลงบนสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดค่าอิเล็กตรอน และ โฮล ( $e^-h^+$ ) โดยประจุที่เกิดขึ้นนี้มีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และรีดักชันในสารละลายในความสามารถที่เหมาะสมของปฏิกิริยารีดอกซ์ (Khalil et al.1998)

ปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกต้องมียังองค์ประกอบ คือ

- 1) แคตตาลิสต์ เช่น สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)
- 2) พลังงานแสง ซึ่งมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับพลังงานโฟตอนของตัวแคตตาลิสต์

- 3) น้ำ
- 4) ออกซิเจน หรือ ตัวออกซิแดนท์ อื่นๆ

รังสียูวี แบ่งช่วงความยาวคลื่นออกได้เป็น 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 เพราะรังสีอยู่ในช่วงสตราทอสเฟสซึ่งจะถูกดูดกลืนในอากาศจนหมดในช่วงระยะทางสั้นๆ ที่แสงเดินทาง แสงอาทิตย์มีช่วงความยาวคลื่นที่กว้างมาก ความเข้มของแสงอัลตราไวโอเล็ตและแสงขาวที่ส่งลงมายังพื้นผิวโลกจะถูกทำให้ลดลงอย่างมากในชั้นบรรยากาศจากการถูกดูดกลืนและการกระเจิงของแสง ที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 320 นาโนเมตร ความเข้มของแสงจะลดลงอย่างรวดเร็ว

เนื่องจากการถูกดูดกลืนโดยโอโซนในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ (สูงจากพื้นผิวโลกในช่วงประมาณ 10 – 35 ไมล์) และที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 288 นาโนเมตร มีรังสีที่แผ่มาถึงพื้นโลกน้อย ดังนั้นแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ส่งมายังพื้นโลกจึงมีขีดจำกัดในกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกที่ใช้สารไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นตัวแคตตาลิสต์นั้น เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ มีพลังงานแบนด์แก๊ป ประมาณ 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังนั้นการให้พลังงานกับระบบจึงต้องให้พลังงานมากกว่าหรือเท่ากับพลังงานแบนด์แก๊ป ปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิสจึงจะเกิดขึ้นได้ ซึ่งช่วงของแสงอัลตราไวโอเล็ต ที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 400 นาโนเมตรจะให้ค่าพลังงานที่มากกว่าหรือเท่ากับพลังงานแบนด์แก๊ปของไทเทเนียมไดออกไซด์ แต่เนื่องจากแสงอาทิตย์ที่ส่งมายังพื้นผิวโลกมีช่วงแสงที่เป็นอัลตราไวโอเล็ต ในปริมาณน้อยมากคือ เฉพาะช่วง 350 – 400 นาโนเมตรเท่านั้น ปัจจุบันจึงมีงานวิจัยที่มุ่งเน้นการปรับปรุงไทเทเนียมไดออกไซด์ให้มีความสามารถที่จะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงแสงอาทิตย์ เพื่อลดการใช้หลอดไฟ UV ในกระบวนการ โฟโตแคตตาไลติก

#### 2.4.1 ชนิดของโฟโตแคตตาไลติก

โฟโตแคตตาไลติกสามารถแยกได้ 2 ประเภท เมื่อพิจารณาจากสถานะของตัวแคตตาลิสต์ ดังนี้

- 1) โฟโตแคตตาไลติกแบบสถานะเดียว (Homogeneous photocatalysis) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ซึ่งมีสถานะเดียวกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด (โดยทั่วไปแล้วจะเป็นของเหลว) เช่นการย่อยสลาย 2,4 Dinitrofluorene โดยใช้  $UV/H_2O_2$

2) โฟโตแคตตาไลติกแบบสถานะต่าง (Heterogeneous photocatalysis) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ซึ่งมีสถานะต่างกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด เช่น การย่อยสลาย 2 – Chlorophenol โดยใช้ UV/TiO<sub>2</sub>

สารกึ่งตัวนำมีมากมายหลายชนิด หนึ่งในจำนวนสารกึ่งตัวนำหลายๆ ชนิดที่นิยมใช้กันในปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกคือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ มีราคาไม่แพง ไม่เป็นพิษ ความสามารถในการละลายต่ำ ความเสถียรสูง นอกจากนี้ได้มีการศึกษาเปรียบเทียบสารกึ่งตัวนำหลายๆ ชนิดที่นำมาใช้ในปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกพบว่าการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบแขวนลอย สามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว แต่เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ มี แบนด์แกป (Band gap) ประมาณ 3.2 โวลต์ ซึ่งมากกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ โดยส่วนใหญ่ทำให้ต้องใช้พลังงานแสงในช่วงของแสงยูวี (ความยาวคลื่นน้อยกว่า 400 นาโนเมตร) ในแสงอาทิตย์ที่ส่องมาถึงพื้นโลกมีแสงยูวีน้อยกว่า 1% ทำให้ไม่สามารถใช้แสงธรรมชาติได้ จำเป็นต้องใช้แสงจากหลอดรังสียูวีเป็นแหล่งกำเนิดแสง (พลังงาน)

#### 2.4.2 ชนิดของตัวแคตตาลิสต์

สารที่ใช้เป็นตัว Catalyst ในปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก ได้แก่

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

องค์ประกอบของโลหะตัวนำและสารกึ่งตัวนำ ประกอบด้วยวาเลนซ์แบนด์ (Valence band) และคอนดักชันแบนด์ (Conduction band) ในโลหะตัวนำจะมีวาเลนซ์แบนด์และคอนดักชันแบนด์ติดกัน แต่ในสารกึ่งตัวนำวาเลนซ์แบนด์และคอนดักชันแบนด์จะไม่ติดกัน โดยเกิดเป็นช่องว่าง ซึ่งเรียกว่าแบนด์แกป (Band gap) เมื่ออิเล็กตรอน (Electron, e<sup>-</sup>) ที่อยู่ในวาเลนซ์แบนด์ได้รับพลังงานโฟตอนจากแสง (h) อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังคอนดักชันแบนด์ ในขณะที่เดียวกันที่บริเวณวาเลนซ์แบนด์จะเกิดโฮล (Hole, h<sup>+</sup>) ซึ่งเป็นประจุบวกสามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระในวาเลนซ์แบนด์ ส่วนคอนดักชันแบนด์ อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่มาจากวาเลนซ์แบนด์เคลื่อนที่อย่างเป็นอิสระทั่วคอนดักชันแบนด์เช่นกัน ปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน – โฮล (e<sup>-</sup> / h<sup>+</sup>) สามารถเคลื่อนที่ไปมาระหว่างวาเลนซ์แบนด์และ คอนดักชันแบนด์ได้ง่ายและรวดเร็ว เพราะไม่มีแบนด์แกป เหตุนี้จึงเป็นสาเหตุให้ e<sup>-</sup> / h<sup>+</sup> รวมตัวกันใหม่ได้ง่าย สำหรับโลหะตัวนำ ในทางตรงกันข้ามนั้นการรวมตัวกันใหม่ของ e<sup>-</sup> / h<sup>+</sup> ในสารกึ่งตัวนำเกิดได้ยาก เพราะว่ามีแบนด์แกปคั่นอยู่ ทำให้คู่อิเล็กตรอน / โฮล แยกจากกันได้นาน ข้อแตกต่างของพลังงานแบนด์

แกปของโลหะตัวนำ สารกึ่งตัวนำ และฉนวนแยกได้ยาก ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายปัจจัย ได้แก่ ระดับพลังงานแบนด์แกป ระดับพลังงานคอนดักชันแบนด์ และระดับพลังงานวาเลนส์แบนด์

การนำสารกึ่งตัวนำมาใช้ในเทคนิคโฟโตแคตตาไลติกแบบต่างสถานะสามารถพิจารณาออกได้เป็น 2 แบบ ดังนี้

- **แบบแขวนลอย (Slurry)** เป็นการนำสารกึ่งตัวนำมาผสมกับสารละลายอินทรีย์ โดยสารกึ่งตัวนำจะแขวนลอยอยู่ในสารละลาย แบบนี้จะประสบปัญหาในการแยกสารกึ่งตัวนำ ออกจากน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วซึ่งปัจจุบันยังไม่มีวิธีที่จะแยกสารกึ่งตัวนำแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ ได้อย่างมีประสิทธิภาพเท่าที่ควร

- **แบบเคลือบผิว (Immobilize)** เป็นกระบวนการนำสารกึ่งตัวนำไปเคลือบบนตัวกลาง (Media) หรือที่ผิวของถึงปฏิกิริยาแบบเคลือบผิวนี้จะสะดวกกว่าในแบบแขวนลอย เนื่องจากไม่ต้องแยกสารกึ่งตัวนำออกจากน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว แต่การการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ชนิดอนาเทสแบบเคลือบผิวให้ประสิทธิภาพต่ำกว่าแบบแขวนลอย ภายใต้สภาวะเดียวกัน

### 2.4.3 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ เทคนิคโฟโตแคตตาไลติก

✓ **ความเข้มของแสง (Light intensity)** การเพิ่มความเข้มแสงจะเป็นการเพิ่มจำนวนโฟตอนให้มากขึ้นจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยามากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาระบุอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิสจะขึ้นอยู่กับความเข้มแสงด้วย

✓ **ปริมาณตัวแคตตาลิสต์ (Catalyst dosage)** เนื่องจากตัวแคตตาลิสต์ทำหน้าที่เป็นสารดูดซับซึ่งทำให้ปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกเกิดขึ้นที่ผิวของแคตตาลิสต์ ดังนั้นในการเพิ่มปริมาณแคตตาลิสต์ก็จะทำให้พื้นที่ผิวของการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเทคนิคโฟโตแคตตาไลติกเพิ่มขึ้น

✓ **ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย (Initial substrate concentration)** ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายที่มีผลต่อปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกซึ่งพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นเพิ่มขึ้นพบว่าปฏิกิริยา โฟโตแคตตาไลติกมักจะลดลงทั้งนี้อาจสามารถสรุปได้ในหลายเหตุผล นั่นคือ ขณะที่มีการเกิดปฏิกิริยาเมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นเพิ่มขึ้นจะเกิดสารอินเตอร์มีเดียตเพิ่มขึ้นซึ่งสารพวกนี้จะเข้าไปยับยั้งการย่อยสลายสารอินทรีย์ทำให้



ปฏิกิริยาเกิดได้น้อยลง รวมทั้งเมื่อความเข้มข้นมากขึ้นความหนาแน่นของสารภายในสารละลายเพิ่มขึ้นทำให้การส่องผ่านของแสงไปยังสารละลายไม่ทั่วถึงทำให้ปฏิกิริยาเกิดลดลงอีกด้วย

✓ ออกซิเจนและตัวรับอิเล็กตรอนตัวอื่นๆจะจับตัวกับอิเล็กตรอนทำให้การกลับมารวมตัวกันอีกครั้งของอิเล็กตรอนกับโฮลเป็นไปได้ยากขึ้น ออกซิเจนจะรวมตัวกับอิเล็กตรอนเกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ตัวหนึ่งซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลนี้อาจทำปฏิกิริยาต่อกับไฮโดรเจนอ็อกไซด์เกิดเป็นเปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล ซึ่งก็เป็นตัวออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่รุนแรงตัวหนึ่งตามปกติแล้วออกซิเจนมีความจำเป็นสำหรับการย่อยสลายสารอินทรีย์อย่างสมบูรณ์แบบและไม่ปรากฏว่าออกซิเจนจะเข้าไปแย่งพื้นที่ของสารอินทรีย์ในการดูดซับบนผิวของตัวแคตาลิสต์ มีนักวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาการเกิดโฟโตแคตตาไลติกออกซิเดชันของสารอินทรีย์ในสภาพที่มีและไม่มีออกซิเจนจนได้บทสรุปว่าประสิทธิภาพของการย่อยสลายสารอินทรีย์ขึ้นกับปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในสารละลายเป็นอย่างมาก

✓ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่ผ่านมามีการศึกษาถึงการลดลงของ pH ในปฏิกิริยาอย่างมาก และสามารถอธิบายสาเหตุของปรากฏการณ์นี้ได้ 3 สาเหตุ คือ

1. การลดลงของไฮดรอกไซด์อ็อกไซด์ เนื่องจากการทำปฏิกิริยากับโฮลเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล
2. ปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนอ็อกไซด์ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิส
3. ผลลัพธ์สุดท้ายของปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกออกซิเดชันแต่ก็เป็นการยากที่จะสรุปรวมว่า pH มีผลต่อปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกอย่างเห็นได้ชัดแต่บางสารประกอบก็มีผลน้อยมาก

✓ อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) นอกจากสารประกอบอินทรีย์แล้วอ็อกไซด์บางตัวก็อาจจะถูกดูดซับบนผิวแคตาลิสต์ได้ ในทำนองเดียวกันอ็อกไซด์เหล่านี้จึงถือเป็นตัวยับยั้งปฏิกิริยา ดังนั้นอ็อกไซด์เหล่านี้จึงมีอิทธิพลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาและจลศาสตร์โดยรวมของปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิส

#### 2.4.4 กลไกการเกิดปฏิกิริยา (Reaction mechanism)

การเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิสภายในสารกึ่งตัวนำเกิดได้จากภายในสารกึ่งตัวนำจะประกอบด้วย วาเลนซ์แบนด์ (Valence band) และคอนดักชันแบนด์ (Conduction band) โดยมี Band gap ขึ้นอยู่ระหว่างแบนด์ทั้งสอง เมื่อสารกึ่งตัวนำหนึ่งได้รับพลังงานแสงที่

มากกว่า Band gap อิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำจะถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่จากวาเลนซ์แบนด์ (Valence band) ไปยังคอนดักชันแบนด์ (Conduction band) แสดงดังสมการที่ 2.1 ทำให้เกิดเป็นโฮล (Hole) ขึ้นที่วาเลนซ์แบนด์ ลักษณะเช่นนี้เรียกว่าเกิดเป็นคู่อิเล็กตรอน-โฮล ( $e^-/h^+$  pairs) การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะเกิดสองแบบ คือ อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากคอนดักชันแบนด์ไปยังตัวรับอิเล็กตรอนในสารละลาย (เกิดเป็นปฏิกิริยารีดักชัน) หรืออิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากตัวให้อิเล็กตรอนในสารละลายไปยังโฮลในวาเลนซ์แบนด์ (เกิดเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน) ดังสมการที่ (2.1) ถึง (2.3)



โดย  $h^+$  จะมีคุณสมบัติเป็นตัวออกซิเดทีฟ (Oxidative)

$e^-$  จะมีคุณสมบัติเป็นตัวรีดักทีฟ (Reductive)

**Oxidative reaction :**



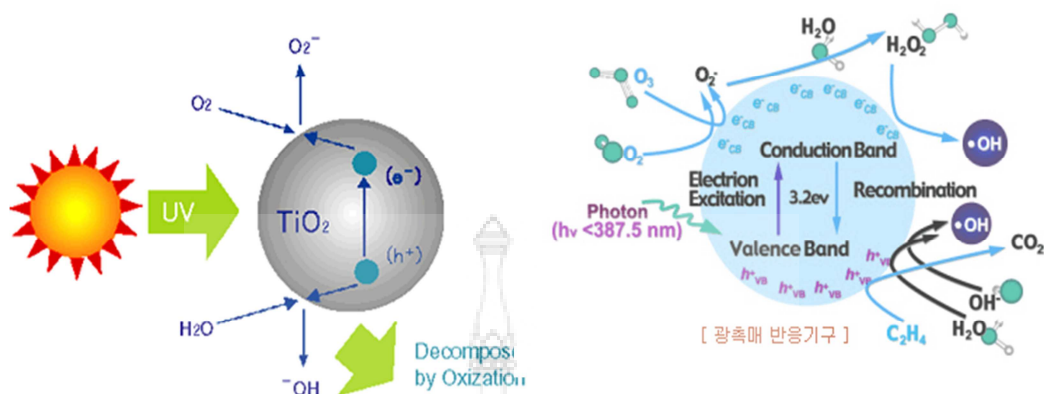
**Reductive reaction :**



โดยกระบวนการบำบัดสารอินทรีย์นั้น Hydroxyl radical ( $\text{OH}^*$ ) ที่มาจากกระบวนการ Oxidative reaction กับ การดูดซับน้ำ (Adsorbed water) หรือ การดูดซับหมู่ไฮดรอกซิล (Adsorbed  $\text{OH}^-$ ) จะทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ในบริเวณที่มี  $\text{O}_2$  โดย  $\text{O}_2$  จะป้องกันการแตกตัวของช่องว่างของอิเล็กตรอน (Electron hole pairs) ปฏิกิริยาในการบำบัดสารอินทรีย์แสดงดังสมการที่ (2.4)



ซึ่งกระบวนการนี้จะเป็นการเปลี่ยนสารอินทรีย์ให้เป็นสารที่ละลายน้ำได้และไม่เกิดอันตราย



ภาพที่ 2.2 ปฏิกริยาโฟโตแคตตาไลติก  
ที่มา <http://puregreencoatings.com; 2553>

กระบวนการที่เกิดขึ้นประกอบด้วย 2 กระบวนการคือ

1. กระบวนการดูดซับ (Adsorption)

อัตราการดูดซับโมเลกุลของสารอินทรีย์บนอนุภาคของสารกึ่งตัวนำนี้สามารถอธิบายได้โดย Langmuir Isotherm

$$\theta = \frac{K[C]}{1+K[C]} \quad \dots(2.5)$$

โดยที่  $\theta$  = อัตราส่วนของปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกดูดติดต่อปริมาณตัวแคตาลิสต์, มิลลิกรัมต่อมิลลิกรัม

$K$  = ค่าคงที่ของการดูดซับ, ลิตรต่อมิลลิกรัม

$[C]$  = ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่จุดสมดุลของการดูดซับ, มิลลิกรัมต่อลิตร

2. กระบวนการสลายตัวโฟโตแคตตาไลติก

อัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้

$$R = \theta k = \frac{kKC}{1+KC} \quad \dots(2.6)$$

โดยที่  $r$  = อัตราการเกิดปฏิกิริยา, มิลลิกรัมต่อนาที

- $k$  = ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา, มิลลิกรัมต่อนาที  
 $K$  = ค่าคงที่ของการดูดซับ, ลิตรต่อมิลลิกรัม  
 $\theta$  = อัตราส่วนของปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกดูดติดต่อปริมาณตัวแคตาลิสต์, มิลลิกรัมต่อมิลลิกรัม  
 $C$  = ความเข้มข้นของสารอินทรีย์

## ตารางที่ 2.1 การประยุกต์ใช้เทคนิคโฟโตแคตตาไลติกในการบำบัด

มวลสารในสภาวะ ตัวกลาง	การประยุกต์ใช้
น้ำ	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ การลดกลิ่น</li> <li>❖ การฆ่าเชื้อโรค</li> <li>❖ การย่อยสลายสารปราบศัตรูพืช</li> <li>❖ กำจัดมวลสารอินทรีย์</li> <li>❖ ย่อยสลายมวลสารอินทรีย์</li> <li>❖ กำจัดสารตั้งผิว</li> <li>❖ ย่อยสลายสี</li> <li>❖ สารระเหยอินทรีย์</li> </ul>
อากาศ	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ ออกซิเดชันออกไซด์ของไนโตรเจน</li> <li>❖ ลดกลิ่นภายในอาคาร</li> <li>❖ ฆ่าเชื้อโรคในอากาศ</li> </ul>
ดิน	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ บำบัดสารฆ่าแมลงในพื้นที่เกษตร</li> <li>❖ ลดกลิ่นในพื้นที่เลี้ยงสัตว์</li> </ul>

ที่มา : Hoffman et al.(1995)

การกำจัดสารพิษโดยอาศัยเทคนิคโฟโตแคตตาไลติกจากพลังงานแสงอาทิตย์  
 ในการศึกษาเทคนิคโฟโตแคตตาไลติกโดยอาศัยแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงาน  
 แสงนั้น สามารถหาค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาได้ดังสมการ

$$Kk = K_0 \alpha (I \cdot t_0^{-1}) \quad \dots(2.7)$$

เมื่อ  $I$  = ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์รวมที่ตกกระทบพื้นในแนวระดับในแต่ละชั่วโมง, จูลต่อตารางเมตร

$I_0$  = ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์เฉลี่ยใน 1 วัน, จูลต่อตารางเมตร

$k_0$  = ค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่ได้จากการทดลอง ณ ความเข้มแสง  $I_0$

$K$  = ค่าคงที่ของการดูดซับ, ลิตรต่อมิลลิกรัม

$k$  = ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา, มิลลิกรัมต่อนาที

## ตารางที่ 2.2 มวลสารที่สามารถบำบัดด้วยเทคนิคโฟโตแคตตาไลติก

ประเภทของมวลสาร	มวลสารตัวอย่าง
มวลสารอินทรีย์	Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene, Phenols, Trichloroethylene และสารระเหยจำพวก halogenated hydrocarbon อื่น ๆ polychlorinatedbiphenyls (PCBs) Dichlorodiphenyl trichloroethane (DDT), dioxins, สารฆ่าแมลงและสารปราบวัชพืช ลิกนินจากอุตสาหกรรมกระดาษอุตสาหกรรมสีย้อม ออกาโนฟอสเฟต และสารลดแรงตึงผิว alkanes, aliphatic alcohols, aliphatic carboxylic acids, alkenes, phenols, aromatic carboxylic acids, simple aromatics, halogenated alkenes และ alkenes
มวลสารอนินทรีย์	Cyanide, Hydrogen sulfide, Mercury, Cadmium, Chromium ( $Cr^{6+}$ ), Sulfite, Manganese, Lead, Zinc, Copper, Arsenic, gold ( $Au^{3+}$ ), $Pt^{4+}$ , $Rh^{3+}$
เชื้อโรค	Escherichia coli, Lactobacillus acidophilus, Saccharomyces cerevisiae, Fecal coliforms

ที่มา : Hoffman et al.(1995)

### 2.5 การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

การดูดซับบนถ่านกัมมันต์ เป็นกระบวนการดูดซับที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย สามารถใช้กำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่มีข้อจำกัดที่น้ำหนักโมเลกุลของของเสียที่จะถูกดูดซับ ต้องมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 400 ซึ่งโดยทั่วไปน้ำหนักโมเลกุลของของเสียในอุตสาหกรรม สีจะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า 400 และสูงกว่า 1,200 ดังนั้นก่อนการกำจัดสีด้วยกระบวนการดูดซับบนถ่านกัม

มันต์ จะต้องมีการปรับขนาดโมเลกุลของของเสียให้เหมาะสมก่อน โดยการไฮโดรไลซิสด้วยปูนขาว ซึ่งต้องใช้ปูนขาวปริมาณมากในการปรับพีเอชของสารละลายให้อยู่ในช่วง 10-11 ซึ่งส่งผลให้พีเอชของน้ำทิ้งสูง ดังนั้น ต้องมีการปรับ พีเอชให้เป็นกลางก่อนปล่อยทิ้งด้วยการกำจัดสี ด้วยกระบวนการดูดซับบนถ่านกัมมันต์เป็นกระบวนการที่ทำให้โมเลกุลของสีติดติดบนผิวของถ่านกัมมันต์ ถ่านกัมมันต์ หมายถึง สารดูดซับชนิดหนึ่งมีลักษณะเป็นของแข็งสีดำ อาจอยู่ในรูปผงหรือเม็ดก็ได้ ใช้ประโยชน์ในการกำจัด สี กลิ่น หรือ ก๊าซ ดังนั้นประสิทธิภาพการดูดซับสีจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณรูพรุนของถ่านกัมมันต์เพราะพื้นที่ผิวจำเพาะมากขึ้นนั่นเองแต่การทำให้โมเลกุลของสีหลุดออกจากผิวของถ่านนั้นทำได้ยาก ต้นทุนการนำถ่านกัมมันต์กลับมาใช้ใหม่จึงสูงมาก เพราะต้องผ่านการเผาและการกำจัดกากซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูง รวมถึงค่าใช้จ่ายในส่วนที่มีการปรับพีเอช ก่อนปล่อยออกจากโรงงานด้วย ทำให้เทคนิคนี้ไม่เป็นที่นิยมแม้จะมีประสิทธิภาพการกำจัดสีสูงก็ตาม

### 2.5.1 ชนิดของถ่านกัมมันต์ซึ่งแบ่งตามเกณฑ์ต่าง ๆ คือ

#### 1. แบ่งตามชนิดการกระตุ้น

- เคมี (Chemical Activated Carbon) ซึ่งเป็นถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยากับผิวคาร์บอน มักเป็นพวกมีรูพรุนขนาดใหญ่
- ฟิสิกส์ (Physical Activated Carbon) ซึ่งเป็นถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากการใช้ก๊าซออกซิไดซ์ มักเป็นพวกมีรูพรุนขนาดเล็ก

#### 2. แบ่งตามชนิดของของสารดูดซับ

- ก๊าซ คือ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับก๊าซพิษและไอสารอินทรีย์ มักใช้ถ่านจากการคาร์บอนไนซ์และมีความแข็งแรงเป็นวัตถุดิบในการผลิต
- สี คือ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการฟอกสี มักใช้ถ่านจากคาร์บอนไนซ์และไม่แข็ง
- โลหะ คือ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้แยกโลหะต่างๆ เช่น แยกทอง เงิน ออกจากแร่ที่ขุดได้

#### 3. แบ่งตามรูปร่างลักษณะ

- ถ่านกัมมันต์ชนิดผง ทำได้โดยการนำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้นามาบด รูปร่างจะแตกต่างกันออกไป ถ่านกัมมันต์ชนิดผงนี้นิยมใช้สำหรับการดูดสีในสภาวะที่เป็นของเหลวส่วนใหญ่โดยทั่วไปมีขนาด 5-100 ไมโครเมตร
- ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด ทำจากวัตถุดิบที่เป็นเม็ด หรือแบบผงทำให้เป็นเม็ด โดยการประสาน ตัวอย่าง เช่น ทาร์ แล้วนำมาอัดเป็นเม็ด วัตถุดิบที่นำมาใช้ได้แก่ วัตถุดิบที่

ค่อนข้างแข็งและมีความหนาแน่นที่ค่อนข้างสูง เช่น กะลามะพร้าว ถ่านหิน ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้มักใช้ในการดูดกลิ่นก๊าซพิษและไอของสารละลายอินทรีย์

## 2.5.2 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์

ในอุตสาหกรรมมีการใช้ถ่านกัมมันต์อย่างแพร่หลาย หน้าที่ของถ่านกัมมันต์ในแต่ละโรงงานจะแตกต่างกันไป ตัวอย่างเช่น

1. ถ่านกัมมันต์ประเภทที่ใช้กับของเหลว (ฟอกสี และทำให้ของเหลวบริสุทธิ์)
  - ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำตาล เพื่อฟอกสีและทำให้น้ำตาลบริสุทธิ์ขึ้น
  - ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำมันและน้ำมันสำหรับบริโภค
  - ใช้ในการแยกเอาสบู่และเปอร็อกไซด์ออกจากน้ำมันและไขมัน
  - แยกสิ่งเจือปนออกจากอาหาร เช่น เจลาติน น้ำส้ม น้ำผลไม้
  - ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ เช่น ไวน์ วิสกี้
  - ใช้ในอุตสาหกรรมเคมีและยา เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนในยา และเคมีภัณฑ์อื่นๆ
  - ใช้ทำน้ำดื่มให้บริสุทธิ์เป็นการกำจัดรส สีและกลิ่น นอกจากนี้ยังใช้บำบัดน้ำเสีย
  - ใช้แยกโลหะจากสารที่ต้องการ เช่น การแยกทองหลังการสกัดจากแร่ด้วยวิธีไซยาไนด์ เป็นต้น
  - ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หรือเป็นตัวพาสารเร่งปฏิกิริยา
  - ใช้ในทางการแพทย์ เช่น ให้ยาถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์
2. ถ่านกัมมันต์ประเภทที่ใช้ดูดซับก๊าซหรือไอ
  - ใช้ในอุตสาหกรรมทำหน้าที่ปกป้องกันก๊าซพิษ ทั้งที่ใช้ในการทางทหารและที่ใช้กันทั่วไป ทั้งนี้ เพราะถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับก๊าซพิษและไอของสารอินทรีย์ได้
  - ใช้แยกก๊าซโซลีนออกจากก๊าซธรรมชาติ
  - กำจัดสิ่งเจือปนออกจากก๊าซ เช่น ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ฮีเลียม แอมโมเนีย คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นต้น
  - กำจัดกลิ่นออกจากอากาศ ในเครื่องปรับอากาศ ทำให้กลิ่นเหม็นลดน้อยลง
  - กำจัดสารประกอบออร์แกนิกซัลเฟอร์ เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และสิ่งเจือปนอื่นๆ จากโรงงานอุตสาหกรรม

## 2.6 สีย้อม

สีย้อมเป็นสารเคมีที่สกัดจากน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหิน เมื่อน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหินผ่านการสกัดจะได้สารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว เช่น เบนซีน ไชลีน แอนทราซีน โทลูอีน แนพทาซีน และพาราฟิน ซึ่งสารไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้ จะถูกเปลี่ยนเป็นสีย้อมด้วยเทคนิคต่างๆซึ่งสีย้อมที่ผลิตขึ้นมาหลายชนิดขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับเส้นใย และกระบวนการย้อมที่มีลักษณะแตกต่างกันไป การที่จะนำสีย้อมใดๆมาย้อมให้ได้ผลดีนั้น ขึ้นอยู่กับอำนาจการรวมตัวของสีกับเส้นใยซึ่งต้องมีอำนาจมากกว่าน้ำเราจะสามารถทำให้เกิดสภาวะเช่นนี้ขึ้นได้เมื่อโมเลกุลของสีย้อมมีหมู่อะตอมซึ่งถูกจัดให้เรียงตัวกันในลักษณะที่จะทำให้เกิดสภาวะเช่นนี้ขึ้นได้ เมื่อโมเลกุลของสีย้อมมีหมู่อะตอมซึ่งถูกจัดเรียงตัวในลักษณะที่จะทำให้เกิดการดูดติดเส้นใยได้เอง (Substantivity) กับเส้นใยแล้วเกิดพันธะ (Bond) ยึดกันแน่น อาจกล่าวได้อย่างกว้างๆว่าอิทธิพลเชิงเคมีมี 4 ชนิดที่ทำให้สีดูดติดเส้นใย คือ พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) แรงแวลส์เดออร์วาลส์ (Van der waals' force) แรงแออน (Ionic bond) และพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) แรงแล่น้ำนี้มักไม่ทำหน้าที่เพียงลำพัง

การดูดติดกันระหว่างโมเลกุลของสีย้อมกับโมเลกุลของเส้นใยอย่างน้อยต้องประกอบไปด้วย 2 ชนิดขึ้นไป บางครั้งก็อาจเกิดแรงทั้ง 4 ชนิดผสมผสานกัน สำหรับแรงยึดติดทางเคมีที่จะให้การยึดติดที่ดีที่สุด ได้แก่ พันธะโควาเลนต์ การเกิดสีของสีย้อมสีซึ่งปรากฏออกมาทำให้ตามนุษย์ปกติมองเห็นได้เกิดจากการเรียงตัวของกลุ่มอะตอมประเภทหนึ่งภายในโมเลกุลของสีย้อม กลุ่มอะตอมที่กล่าวนี้เรียกว่า โครโมฟอร์ (Chromophore) ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 7 กลุ่ม คือ

- กลุ่มไนโตรโซ (Nitroso group)
- กลุ่มไนโตร (Nitro group)
- กลุ่มอะโซ (Azo group)
- กลุ่มเอทิลีน (Ethylene group)
- กลุ่มคาร์บอนิล (Carbonyl group)
- กลุ่มคาร์บอนิล-ไนโตรเจน (Carbonyl-nitrogen group)
- กลุ่มซัลเฟอร์ (Sulphur group)

กลุ่มอะตอมต่างๆ เหล่านี้จะเป็นตัวเพิ่มสีให้แก่สารประกอบอะโรมาติก โดยการดูดกลืนแถบสีขาวยาวบางแถบแสงและปล่อยออกมาบางแถบแสง ทำให้มนุษย์มองเห็นสีย้อมมีโทนสีแตกต่างกันไป สีย้อม สามารถจำแนกได้ดังนี้



## 2.6.1 การจำแนกสีย้อม (Dyestuff)

### สีย้อมตรง (Direct dye)

สีย้อมตรงเป็นสีย้อมที่ละลายน้ำได้และใช้โดยตรง ไม่ต้องใช้มอร์แดนต์ (Mordant) เป็นตัวช่วย เป็นสีกลุ่มใหญ่ที่สุดในเชิงพาณิชย์ เพราะใช้ง่ายและมีราคาถูกไม่แพง เมื่อเทียบกับสีย้อมชนิดอื่นๆ สีย้อมตรงใช้ย้อมกับพวกฝ้าย ลินิน ขนสัตว์ ไหมและไนลอน สีย้อมตรงไม่ค่อยสดีสเท่าสีเบสิค ความคงทนของสีที่ต่ำ เว้นแต่เมื่อผ่านกระบวนการตกแต่งซึ่งผ่านสารตกแต่งเรซิน (Resin finish agent) มีความคงทนของสีต่อการซักล้างไม่ดี ความคงทนของสีปรับปรุงได้โดยการทำให้แห้งหลังการบำบัด (After treatment) ซึ่งผลจะออกมาคือ ความคงทนของสีต่อการซักล้างดีขึ้นแต่ความคงทนของสีต่อแสงจะลดลง

### ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการย้อม

1. อิเล็กโทรไลต์ (Electolyte) เป็นตัวช่วยให้สีไปเกาะติดบนเส้นใยได้ดีขึ้น เนื่องจากไปช่วยลดประจุบนเส้นใยเมื่ออยู่ในน้ำ เพราะเมื่อแตกตัวจะให้ประจุบวก ทำให้โมเลกุลของสีสามารถเข้าใกล้เส้นใยจนสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ ประจุลบของเส้นใยเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิล ส่วนประจุลบของสีเกิดจากหมู่ซัลโฟ ซึ่งหากมีมากเกินไปจะไม่ส่งผลดีต่อการย้อม ต้องเติมเกลือเป็นจำนวนมากในการย้อมทำให้เกลือเกลืออยู่มากในน้ำย้อมเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการแต่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้เพราะมีสีผสมอยู่ด้วย แต่ถ้ามีน้อยอาจไม่ต้องเติมเกลือในน้ำย้อมก็ได้

2. อุณหภูมิที่มีผลต่อการย้อมโดยที่อุณหภูมิต่ำจะดูดซึมได้ช้าแต่ถ้าสม่ำเสมอในทางกลับกันที่อุณหภูมิสูงจะดูดซึมได้เร็วแต่มีความสม่ำเสมอต่ำ ในการย้อมจะมีปรากฏการณ์ 2 แบบ คือ

- ❖ การเข้าไปเกาะติดของสี
- ❖ การหลุดออกของสี

โดยเมื่อเริ่มย้อมอัตราการย้อม จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆและการติดสี ค่อยๆลดลงและถ้าเมื่อย้อมไปซักฟักจะเกิดการกลับกันจนกระทั่งถึงจุดๆหนึ่งที่ทั้งการย้อมและการติดสีเท่ากัน เรียกว่าการเปลี่ยนแปลงที่คงที่ (Dynamic equilibrium) โดยจะเกิดขึ้นง่ายที่อุณหภูมิสูง

3. ค่า pH ที่เหมาะสมคือ ภาวะที่เป็นกลางถ้าน้อยกว่า 7 จะทำให้ลักษณะของสีเปลี่ยนถ้ามักกว่าจะทำให้การละลายดีแต่อัตราการติดสีต่ำ

### สีรีแอคทีฟ ( Reactive dye )

สีรีแอคทีฟ จะทำปฏิกิริยากับทางเคมีกับเส้นใยฝ้าย ลินิน ขนสัตว์ ไหม เรยอน ไนลอน และอะคริลิก ทำให้เกิดสีสดใสนั้น สีรีแอคทีฟมีความคงทนต่อการซักดีมาก แต่จะถูกทำลายถ้าซักฟอกด้วยคลอรีน มีความคงทนต่อการขูดถูเสียดสีดีและคงทนต่อการซีดจางจากควันทันหรือแก๊สด้วย สีรีแอคทีฟเป็นเพียงสีเดียวที่สามารถทำปฏิกิริยาเกิดเป็นพันธะกับเส้นใยในภาวะที่เหมาะสมได้ เพราะมีกลุ่มของรีแอคทีฟ (Reactive group) จึงทำให้มีความคงทนดี มีโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นพวกไดคลอโร ไตรอะซีนิว (Dichloro triazinyl dye)

### **Reaction group ที่ดีควรมีลักษณะดังนี้**

1. ทำปฏิกิริยากับเส้นใยได้ดีและรวดเร็วกว่าทำปฏิกิริยาจากน้ำทั้งเพราะน้ำจัดเป็นNucleophilic ด้วย
2. แรงเกาะเกี่ยวระหว่างสีย้อม-เส้นใย (Dye-fiber) ควรจะต้องมีความแข็งแรง โดยเฉพาะต่อการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)
3. กลุ่มของรีแอคทีฟ (Reactive group)ไม่ควรจะมีผลต่อเฉดของสีทั้งก่อนและหลังการทำปฏิกิริยาแล้ว
4. กลุ่มของรีแอคทีฟ (Reactive group) ที่ใส่เข้าไปในโครงสร้างของสีควรจะทำได้ไม่ยากนัก

### *ประเภทสีรีแอคทีฟ แบ่งได้ 2 ประเภท คือ*

1. แบ่งตามปฏิกิริยาเคมี แบ่งได้ 2 ชนิด ดังนี้
  - ❖ ชนิดการแทนที่ด้วยหมู่ นิวคลีโอฟิลิก (Nucleophilic substitution type) คือสีจะเกิด ปฏิกิริยาการแทนที่ด้วยนิวคลีโอฟิลิก (Nucleophilic) กับเส้นใยได้
  - ❖ ชนิดการเติมของหมู่ นิวคลีโอฟิลิก (Nucleophilic addition type) คือสีจะเกิดปฏิกิริยาการเติมด้วยนิวคลีโอฟิลิก (Nucleophilic) กับเส้นใย
2. แบ่งตามการใช้งาน แบ่งได้ 2 ชนิด ตามอุณหภูมิที่ใช้อย้อม ดังนี้
  - ❖ สีย้อมเย็น ได้แก่ สีย้อมที่ใช้อุณหภูมิในการย้อมอยู่ในช่วง 20-40 องศาเซลเซียส เนื่องจากการย้อมสีชนิดที่อุณหภูมิต่ำสีย้อมจะมีการเคลื่อนตัวจากน้ำย้อมเข้าไปในเส้นใยได้ง่ายและมาก เพราะฉะนั้นจึงไม่จำเป็นที่จะใช้สีที่มีแรงดึงดูดกับเส้นใยมากนักปริมาณเกลือที่ใช้ก็น้อยกว่าสีอีกกลุ่มหนึ่ง และต้องระมัดระวังการใส่เกลือเพราะเนื่องจากสีในกลุ่มนี้ติดเส้นใยได้เร็ว สีกลุ่มนี้ ได้แก่ สี Procion M/MK (ICI), ZLevafix EA (Bayer) และ Cibacron F (Ciba) เป็นต้น

❖ สีย้อมร้อน ได้แก่ สีย้อมที่ใช้อุณหภูมิในการย้อมอยู่ในช่วง 60 – 80 องศาเซลเซียส สีประเภทนี้เนื่องจากย้อมที่อุณหภูมิสูงสีย้อมจะมีการเคลื่อนตัวจากน้ำย้อมเข้าไปได้น้อยเพราะฉะนั้นจึงควรเลือกใช้สีที่มีแรงดึงดูดกับเส้นใยอยู่ในเกณฑ์สูง แต่การย้อมที่อุณหภูมิสูงนี้มีข้อดี คือ ทำให้ย้อมได้อย่างสม่ำเสมอดีกว่าและสีมีการแทรกซึมเข้าไปในเส้นใยอย่างทั่วถึงกว่าในสีกลุ่มย้อมเย็น สีที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ ได้แก่ Procion H (ICI), Remazol (Haechst) เป็นต้น

โครงสร้างของสีรีแอคทีฟ แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

- ❖ โครโมเจน (Chromogen) ส่วนที่ทำให้เกิดสี
- ❖ กลุ่มตัวเชื่อม (Bridging group) เป็นตัวที่ทำหน้าที่เชื่อมระหว่างโครโมเจน (Chromogen) กับ กลุ่มรีแอคทีฟ (Reactive group) ไม่มีผลต่อโมเลกุลของสีบางที่ก็ไม่มี
- ❖ กลุ่มสีรีแอคทีฟ (Reactive group) ส่วนที่ทำปฏิกิริยากับเส้นใยส่วนใหญ่เป็นพวกฮาโลเจน

#### สีดิสเพิร์ส (Disperse dye)

สีดิสเพิร์ส เป็นสีที่ละลายน้ำได้เล็กน้อยเมื่อใช้งานสีย้อมจะละลายในน้ำในรูปของการกระจายตัว (Dispersion) สีย้อมส่วนหนึ่งไม่ละลายน้ำส่วนน้อยละลายเป็นสารละลายเหมือนสีย้อมที่ไม่ละลายจะละลายมาเพิ่มเติมทดแทนส่วนที่ใช้ไปแล้ว โดยลักษณะนี้การย้อมจึงเป็นแบบที่น้ำย้อมมีตัวอยู่ตลอดเวลาสีย้อมพวกนี้เป็นสีกลุ่มที่ไม่มีประจุ (Non-ionic)

สีย้อมกลุ่มนี้ยังระเหิดได้เมื่อถูกความร้อนสูงพอไอของสีจะถูกดูดซับได้ดีโดยเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตท (Cellulose acetate) และ พอลิเอสเตอร์ (Polyester) สีนี้เป็นสีที่เมื่อละลายก็ไม่แตกตัวให้ประจุมีการละลายน้ำต่ำจะมีการกระจายตัวอยู่ในรูปของคอลลอยด์มากกว่า จึงเหมาะสมที่จะใช้ย้อมเส้นใยที่ไม่ชอบน้ำ สีดิสเพิร์สเกิดขึ้นจากความพยายามที่จะหาวิธีการย้อมสีเส้นใยเซลลูโลสและเส้นใยอะซิเตท (Acetate) ซึ่งเป็นเส้นใยประดิษฐ์พวกแรกที่มีความมันเงาเหมาะสำหรับทำเป็นผืนผ้าแต่เป็นเส้นใยที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ซึ่งในขณะนั้นความรู้เกี่ยวกับกลไกในการย้อมและโครงสร้างของโมเลกุลของเส้นใยยังมีจำนวนจำกัดการอะซิเตทเลชัน (Acetylation) ทำให้เส้นใยไม่ชอบน้ำของตัวยากและเมื่ออยู่ในน้ำบริเวณผิวของเส้นใยเกิดประจุไฟฟ้าลบมากขึ้น จึงทำให้ความสามารถในการเกาะติดเส้นใย (Affinity) แต่ยังมีความสามารถในการเกาะติดสีอยู่บ้างกับสีเบสิก (Basic dye) ในระยะแรกๆ ได้พยายามเลือกสี

ย้อมที่ละลายน้ำได้ผลิตออกจำหน่ายเพื่อย้อมเส้นใยอะซิเตทแต่คุณภาพความคงทนของสีและการติดเส้นใยยังไม่ตรงกับความต้องการ

### **สารเคมีที่มีความสำคัญในการย้อม**

1. สารช่วยกระจายตัว (Dispersing agent) ทำหน้าที่ในการกระจายสีย้อมที่ไม่ละลายหรือละลายไม่ดีในน้ำและจะช่วยรักษาสภาพนั้นตลอดกระบวนการย้อมสารช่วยกระจายตัว (Dispersing agent) จะใช้ตามจุดประสงค์ต่อไปนี้

- ❖ เพิ่มความสามารถในการละลาย โดยเมื่อเริ่มย้อมจะไม่ละลายและจะละลายเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิจนถึงประมาณ 85 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมแก่การย้อมเส้นใยอะซิเตท

- ❖ ลดขนาดของสีโดยจะเป็นผงสีให้อยู่ในรูปที่กระจายตัวแขวนลอยอยู่ในน้ำทั่วไปจะมีสารช่วยกระจายตัว (Dispersing agent) ปนมากับสีย้อมตั้งแต่ตอนผลิตเพื่อให้สีอยู่ในสภาพที่มีอนุภาคเล็กละเอียด การทำงานของสารช่วยกระจายตัว (Dispersing agent) นั้นเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิสูงส่วนที่เป็นลิพอฟิลิก (Lipophilic part) ของสารช่วยกระจายตัว (Dispersing agent) จะแตกตัวออกจากผิวหน้าของอนุภาคสีเป็นผลให้ประสิทธิภาพของสารช่วยกระจายตัว (Dispersing agent) ลดลง ดังนั้นต้องเติมสารช่วยกระจายตัว (Dispersing agent) ลงในน้ำย้อมอีก

สารช่วยกระจายตัว (Dispersing agent) ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบของไดเอริลมีเทนซัลโฟเนต (Diarylmethane sulphonate) เช่น โซเดียมไดเอริลมีเทนซัลโฟเนต (Sodiumdiarylmethane) หรือพวกลิกโนซัลโฟเนต (Ligno sulphonate) พวกนี้เป็นสารว่องไวต่อประจุลบ (Anionic surface active agents) สารช่วยกระจายตัวเป็นสารที่ไม่มีประจุ (Nonionic dispersing agent) บางตัวอาจใช้กับการย้อมแบบอุณหภูมิสูงได้โดยผสมกับสารที่มีประจุลบ (Anionic agent) จะทำให้จุดยู่ติ (Cloud point) สูงขึ้น บางกรณีอาจถึงขั้นเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีทำให้ไม่มีจุดยู่ติ (Cloud point) แต่จะพบว่าอาจทำให้การละลายน้ำของสีเพิ่มขึ้นด้วยทำให้ได้สีสม่ำเสมอที่ดีถึงแม้จะมีการติดสี (Colour yield) ต่ำ

2. สารช่วยพา (Carrier) พบว่าสารไฮโดรคาร์บอน ฟีนอล กรดอะมิโน เอไมด์ แอลกอฮอล์ เอสเทอร์ คีโตน และไนไตรล์ มีลักษณะเป็นตัวเร่งอัตราการย้อมสีดีสเฟิร์สบนเส้นใย

พอลิเอสเตอร์ในน้ำย้อมที่จะเดือดสารช่วยย้อมเหล่านี้สารช่วยพา (Carrier) จะเปลี่ยนสมบัติการกระจายตัวของสีและลักษณะทางกายภาพของเส้นใยจนทำให้สีสามารถเคลื่อนตัวจากน้ำย้อมเข้าไปในเส้นใยได้เป็นจำนวนมากขึ้นกว่าการย้อมโดยไม่มีสารช่วยพา การย้อมสีดีสเพิร์สที่สม่ำเสมอบนเส้นใยพอลิเอสเตอร์ ขึ้นอยู่กับพลังงานการเคลื่อนตัวของสี (Migration power) ซึ่งได้รับอิทธิพลจากธรรมชาติและปริมาณการใช้สารช่วยพา (Carrier) เวลาในการย้อมอุณหภูมิ และความเข้มข้นของระดับที่ต้องการ



### บทที่ 3 วิธีการทดลอง

การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมด้วยเทคนิคโฟโตแคตตาไลติก ร่วมกับกระบวนการดูดซับ โดยการสารใช้สารไททาเนียมไดออกไซด์ เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก เนื่องจากสารนี้มีความสามารถในการทำปฏิกิริยาได้ดีในพลังงานแสงอาทิตย์ มีคุณสมบัติในบำบัดน้ำและให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ระเหย สารที่ใช้เตรียมด้วยเทคนิคโซล-เจล และเพื่อให้งานวิจัยสมบูรณ์ได้มีการนำการบำบัดทางกายภาพโดยกระบวนการดูดซับ ด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ในการศึกษาที่มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของกระบวนการบำบัดน้ำสี ทั้งสีไคเร็กซ์, รีแอกทีฟ, แอซิด, ดิสเพิร์ส และ เบสิค ด้วยการผสมผสานระหว่างไททาเนียมไดออกไซด์ และถ่านกัมมันต์ ในการศึกษาทำการศึกษาการบำบัดน้ำสีย้อมทั้งทางเคมีและทางกายภาพโดยใช้เทคนิคโฟโตแคตตาไลติก กำหนดความเข้มข้นไททาเนียมไดออกไซด์ 0, 5, 10 และ 15 กรัมต่อลิตร เวลา 0, 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง และความเข้มข้นถ่านกัมมันต์ 0, 5, 10 และ 15 กรัมต่อลิตร เวลา 0, 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมงตามลำดับ ผลการศึกษาดังต่อไปนี้

#### 3.1 วัสดุและสารเคมี

1. Titanium(IV) isopropoxide, AR grade, บริษัท ALDRICH Chemistry.
2. 2-Propanol, AR grade, บริษัท BRIGHTCHEM SDN BHD.
3. Hydrochloric acid, AR grade, บริษัท Ajax Finechem.
4. ก๊าซไนโตรเจนเหลว, เกรดการค้า
5. Direct Fast Scarlet 4BS (CN) (C.I. Direct Red 23), บริษัท แอนสันเคมีเคิล จำกัด
6. Negative Scarlet HD3G (C.I. Reactive Red 21), บริษัท แอนสันเคมีเคิล จำกัด
7. Lonsperse Red S- 5 BL (C.I. Disperse Red 167), บริษัท แอนสันเคมีเคิล จำกัด
8. Cationic Red GTL 200% (C.I. Basic Red 18), บริษัท แอนสันเคมีเคิล จำกัด
9. Polynyl red MBN (C.I. Acid Red 131), บริษัท แอนสันเคมีเคิล จำกัด
10. Activated carbon บริษัท CARBOKARN
11. Dispersing agent, เกรดการค้า, บริษัท แลนเอ็ก ดัซแลนด์ จำกัด
12. Acetic acid (CH<sub>3</sub>COOH), เกรดการค้า, บริษัท เซลานิส จำกัด
13. Sodium Carbonate (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), เกรดการค้า, บริษัท บุญทวีเคมีภัณฑ์ จำกัด

14. Sodium Sulphate ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), เกรดการค้า, บริษัท บุญทวีเคมีภัณฑ์ จำกัด
15. ชุดขวดสามคอ (Three Neck Flask )
16. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) รุ่น Sension 3
17. UV – Vis Spectrophotometer รุ่น UV-160A , Shimadzu Corporation
18. เครื่อง Hot & Stir รุ่น MS300 ยี่ห้อ Vecstar Furnaces
19. เครื่องอบ Oven รุ่น MPC11 ยี่ห้อ Vecstar Furnace
20. เครื่องเผาอุณหภูมิสูง (Furnance) ยี่ห้อ Vecstar Furnaces
21. Solar box รุ่น 00993 ยี่ห้อ SDL
21. เครื่องย้อมอัตโนมัติ

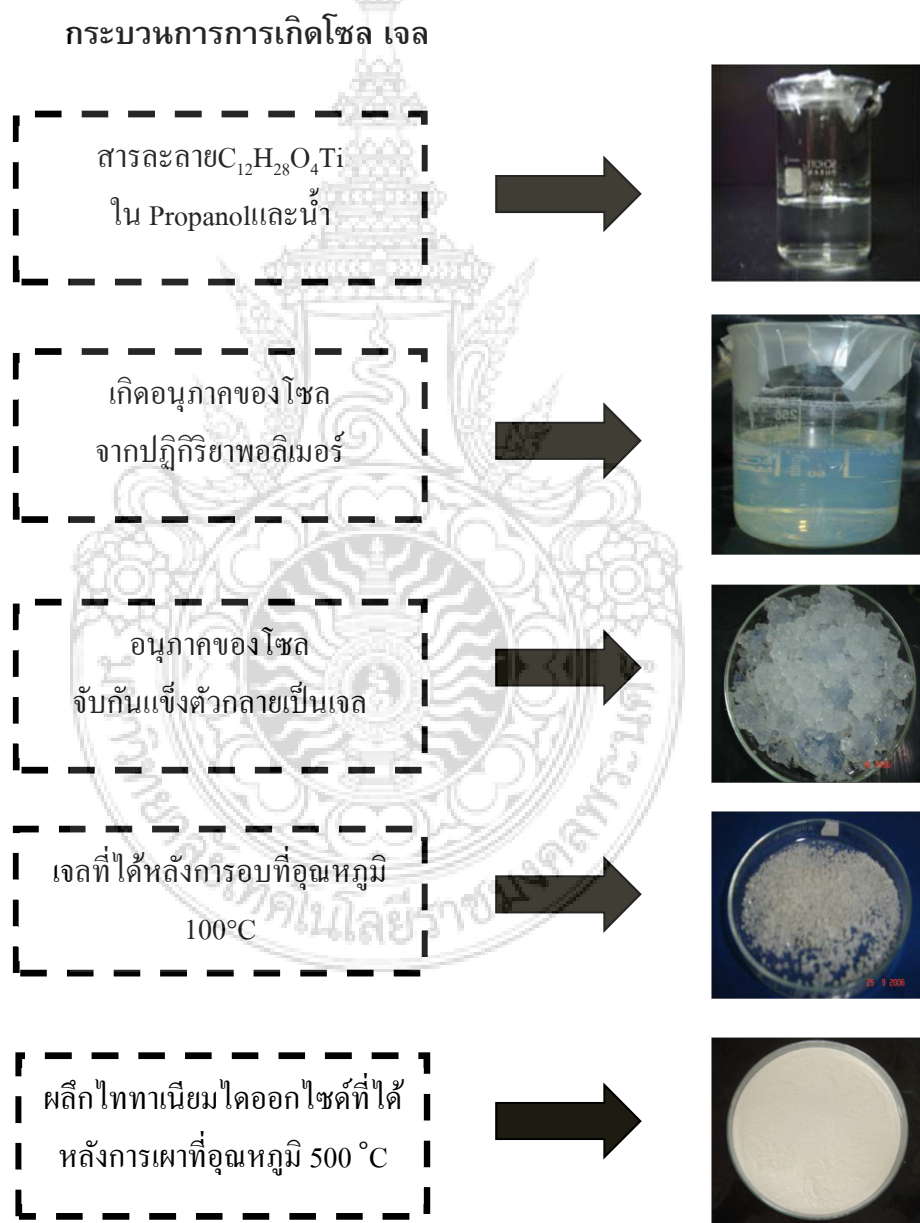
### 3.2 การทดลอง



ภาพที่ 3.1 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย

### 3.2.1 สังเคราะห์ $\text{TiO}_2$ (เทคนิคโซล-เจล)

การเตรียม  $\text{TiO}_2$  ด้วยเทคนิคโซล-เจล ทำโดยละลาย  $\text{C}_{12}\text{H}_{28}\text{O}_4\text{Ti}$  ใน 2-Propanol (LAB-SCAN, 99.7%) ในอัตราส่วน 1: 40 กวนสารเป็นเวลา 15 นาที ที่อุณหภูมิห้อง พร้อมทั้งปล่อยก๊าซไนโตรเจนผ่านตลอดการทำการทดลองแล้วเติมกรด  $\text{HCl}$  2 M กวนต่อไปเป็นเวลา 60 นาที ตั้งสารละลายดังกล่าวทิ้งไว้จนเกิดเป็นเจลและนำเจลที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จนกลายเป็นผลึกของแข็ง จากนั้นจึงนำผลึกดังกล่าวไปเผาเพื่อเปลี่ยนผลึกให้เป็นสารประกอบไททานเนียมไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 3.2 การเตรียม  $\text{TiO}_2$  ด้วยเทคนิคโซล-เจล



### 3.2.2 วิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นในน้ำเสียตัวอย่างก่อนการบำบัด

ทำการเตรียมน้ำที่ใช้ในการทดลองโดยใช้ความเข้มข้นที่ 1 % owf จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการย้อม และนำน้ำย้อมที่ได้หาปริมาณความเข้มข้นในน้ำเสียตัวอย่างก่อนการบำบัด มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### การเตรียมน้ำสีไ้เร็กท์

เตรียมน้ำสีที่ความเข้มข้น 1% owf เติมโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร และ Acetic acid ความเข้มข้นเทียบเท่าปริมาณน้ำหนักผ้าที่ใช้ในการศึกษา (เฉพาะสีแอสิด) จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการย้อมด้วยเครื่องย้อมอัตโนมัติ

#### รายละเอียดของสีที่ใช้

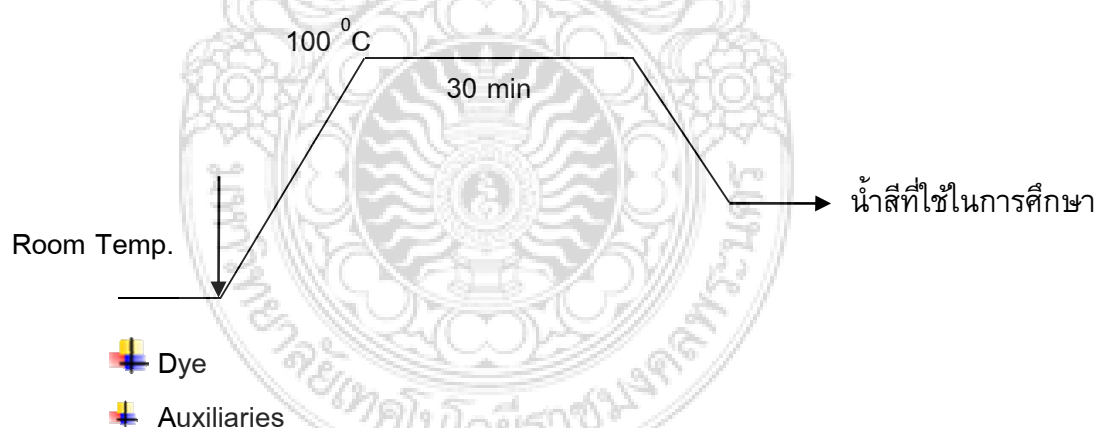
ชื่อทางการค้า : Direct Fast Scarlet 4BS (CN)

ลักษณะของสี : Bright Red

C.I. Number : C.I. Direct Red 23

โครงสร้าง : Diazo

ความยาวคลื่นสูงสุด : 496.5 nm



ภาพที่ 3.3 การเตรียมน้ำสีไ้เร็กท์ แอสิด และเบสิด

#### การเตรียมน้ำสีรีแอกทีฟ

เตรียมน้ำสีที่ความเข้มข้น 1% owf เติมโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้น 45 กรัมต่อลิตรและโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 15 กรัมต่อลิตร จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการย้อมด้วยเครื่องย้อมอัตโนมัติ

### รายละเอียดของสีที่ใช้

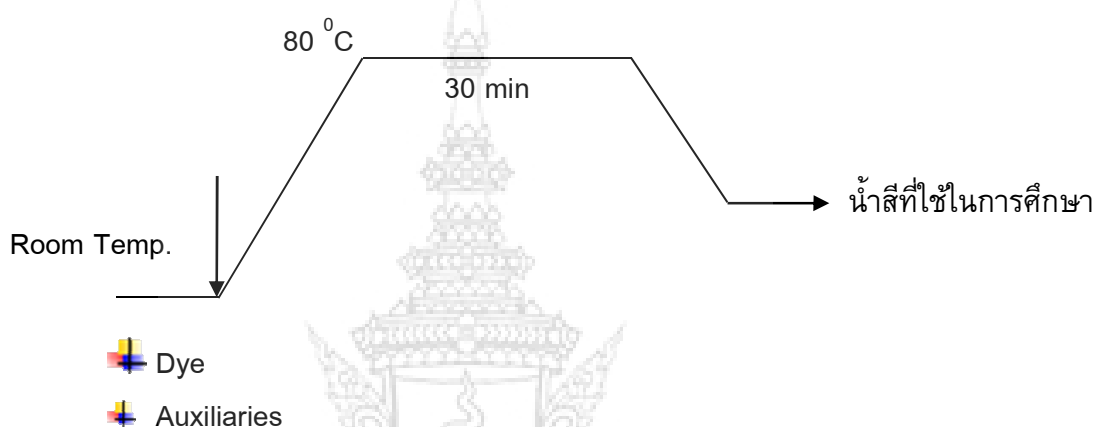
ชื่อทางการค้า : Begative Scarlet HD3G

ลักษณะของสี : Bright Bluish Red

C.I. Number : C.I. Reactive Red 21

โครงสร้าง : Monoazo

ความยาวคลื่นสูงสุด : 508.5 nm



### ภาพที่ 3.4 การเตรียมน้ำสีรีแอคทีฟ

#### การเตรียมน้ำสีแอซิด

เตรียมน้ำสีที่ความเข้มข้น 1% owf เดิม Acetic acid ความเข้มข้นเทียบเท่าปริมาณน้ำหนักผ้าที่ใช้ในการศึกษา จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการย้อมด้วยเครื่องย้อมอัตโนมัติ กระบวนการย้อมจะใช้เหมือนกับกระบวนการย้อมของสีไดเรกต์

### รายละเอียดของสีที่ใช้

ชื่อทางการค้า : Polynyl red MBN

ลักษณะของสี : Bluish red

C.I. Number : C.I. Acid red 131

โครงสร้าง : Monoazo

ความยาวคลื่นสูงสุด : 564.6 nm

### การเตรียมน้ำสีดิสเพิร์ส

เตรียมน้ำสีที่มีความเข้มข้น 1 % owf เติมกรดอะซิติก 1 กรัมต่อลิตร และสารช่วยกระจายตัว 5 กรัมต่อลิตร จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการย้อม ด้วยเครื่องย้อมอัตโนมัติ

#### รายละเอียดของสีที่ใช้

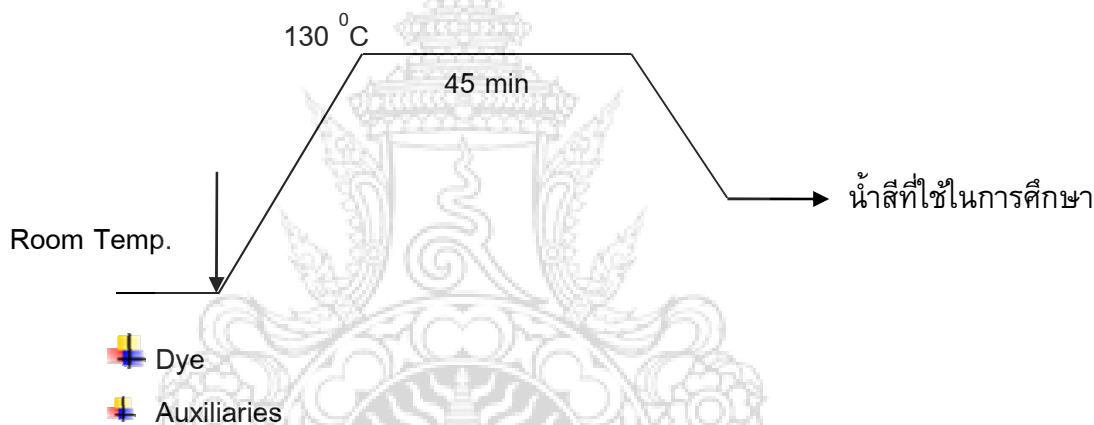
ชื่อทางการค้า : Lonsperse RED S5-BL

ลักษณะของสี : Bluish Red

C.I. Number : C.I. Dipse Red 167

โครงสร้าง : Azo

ความยาวคลื่นสูงสุด : 467.0 nm



ภาพที่ 3.5 การเตรียมน้ำสีดิสเพิร์ส

### การเตรียมน้ำสีเบสิค

สีเบสิคเป็นสีประเภทที่ละลายน้ำได้ เมื่อละลายแตกตัวให้ประจุบวก นิยมใช้ในการย้อมเส้นใยอะไครลิก สภาวะในการย้อมเป็นกรดโดยการเติมสารช่วยย้อมคือ กรดอะซิติก ความเข้มข้นเทียบเท่าปริมาณน้ำหนักผ้าที่ใช้ในการศึกษา เพื่อปรับให้น้ำย้อมอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมกับการติดสี โครงสร้างโดยทั่วไปจะเป็นอะโรมาติก เช่น triarylmethanes, methines, xanthenes เป็นต้น กระบวนการย้อมจะใช้เหมือนกับกระบวนการย้อมของสีไคเร็กซ์

#### รายละเอียดของสีที่ใช้

ชื่อทางการค้า : Cationic Red GTL 200%

ลักษณะของสี : Dull Red

C.I. Number : C.I. Basic red 18  
 โครงสร้าง : Monoazo  
 ความยาวคลื่นสูงสุด, (nm)  $\lambda_{\max}$  : 488.0

### 3.2.3 กระบวนการโฟโต แคตาไลติก และการดูดซับ

การศึกษาแบ่งเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

#### ขั้นตอนที่ 1 การหาความเข้มข้นของไททาเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสม

1. นำน้ำสีไคเร็กซ์ที่ได้จากกระบวนการการย้อมที่ไม่เติมไททาเนียมไดออกไซด์จากนั้นนำไปเข้าเครื่อง UV-Box โดยกำหนดเวลาที่ 6 ชั่วโมง และเก็บตัวอย่าง มาทำการวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงและค่า pH
2. ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 1 โดยเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของไททาเนียมไดออกไซด์เป็น 5 10 และ 15 กรัมต่อลิตร
3. ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 1 และ 2 โดยเปลี่ยนน้ำสีย้อมเป็นสีรีแอคทีฟ สีแอซิด สีดิสเพิร์ส และสีเบสิก
4. จากนั้นนำค่าความเข้มข้นของแต่ละสีมาเปรียบเทียบของแต่ละความเข้มข้น
5. เลือกความเข้มข้นของไททาเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมมาทำการทดลองในขั้นต่อไป

#### ขั้นตอนที่ 2 การหาความสัมพันธ์ระหว่างไททาเนียมไดออกไซด์กับเวลาที่เหมาะสม

1. นำผลของความเข้มข้นของไททาเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมจากทดลองที่แล้วนำมาทำการทดลองต่อ เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมของไททาเนียมไดออกไซด์ในการบำบัดน้ำสีย้อม
2. นำน้ำสีย้อมไคเร็กซ์ที่กำหนดความเข้มข้นของไททาเนียมไดออกไซด์ 10 กรัมในน้ำสีย้อมไคเร็กซ์ 1 ลิตรจากนั้นนำไปเข้า UV-Box เป็นเวลา 2 ชั่วโมงโดยจะมีการเก็บตัวอย่างทุกๆสองชั่วโมง แล้วนำน้ำย้อมหลังเก็บตัวอย่างมาวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงและค่า pH
3. ทดลองซ้ำตามข้อ 2 โดยการเปลี่ยนเวลาเข้าเครื่อง UV-Box เป็นเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมง
4. ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 2 และ 3 โดยเปลี่ยนน้ำสีย้อมเป็นสีรีแอคทีฟ สีแอซิด สีดิสเพิร์ส และสีเบสิก ตามลำดับ

5. จากนั้นนำค่าความเข้มข้นของแต่ละมาเปรียบเทียบของแต่ละความเข้มข้น
6. นำผลของการบำบัดน้ำเสียของไททาเนียมไดออกไซด์และเวลาที่เหมาะสมมาทำการทดลองในขั้นต่อไป

### **ขั้นตอนที่ 3 การหาปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสม**

1. นำผลของการบำบัดน้ำเสียของไททาเนียมไดออกไซด์และเวลาที่เหมาะสมมาทำการทดลองต่อ เพื่อหาปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสีย
2. นำน้ำเสียไดเร็กต์ที่ได้หลังการบำบัดด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ มาทำการใส่ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมโดยเริ่มตั้งแต่ไม่เติมถ่านกัมมันต์ โดยกำหนดเวลาในการบำบัดที่ 2 ชั่วโมง และเก็บตัวอย่าง มาทำการวัดค่าความเข้มข้นและค่า pH
3. ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 2 โดยเปลี่ยนปริมาณถ่านกัมมันต์ เป็น 5 10 และ 15 กรัมต่อลิตร
4. ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 2 และ 3 โดยเปลี่ยนน้ำเสียเป็นสีรีแอกทีฟ สีแอสิด สีดีสเพิร์ส และสีเบสิค ตามลำดับ
5. จากนั้นนำค่าความเข้มข้นของแต่ละมาเปรียบเทียบของแต่ละความเข้มข้น
6. เลือกปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมมาทำการทดลองในขั้นต่อไป

### **ขั้นตอนที่ 4 การหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณถ่านกัมมันต์กับเวลาที่เหมาะสม**

1. นำผลของปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมจากการทดลองที่แล้ว มาหาเวลาที่ที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสีย โดยกำหนดปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ 5 กรัมต่อลิตร
2. นำน้ำเสียไดเร็กต์ที่เติมปริมาณถ่านกัมมันต์ 0.5 กรัม ในน้ำเสียไดเร็กต์ 100 มิลลิลิตร จากนั้นแช่ไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำน้ำเสียมาวัดค่าการดูดกลืนแสงและค่า pH
3. ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 2 โดยเปลี่ยนเวลาเป็น 2 3 และ 4 ชั่วโมง
4. ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 2 และ 3 โดยเปลี่ยนน้ำเสียเป็นสีรีแอกทีฟ สีแอสิด สีดีสเพิร์ส และสีเบสิค ตามลำดับ
5. จากนั้นนำค่าความเข้มข้นของแต่ละมาเปรียบเทียบของแต่ละชั่วโมง

**หมายเหตุ:** ในการศึกษาเป็นการทำการทดลองแบบต่อเนื่อง ด้วยการนำน้ำเสียจากภาวะที่เหมาะสมที่สุดของเทคนิคโฟโตแคตตาไลติกมาเป็นน้ำเสียเข้มข้นเริ่มต้นในกระบวนการดูดซับ

### 3.2.4 วิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นในน้ำเสียตัวอย่างหลังการบำบัด

ผลของความเข้มข้นของน้ำเสียด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer รุ่น UV-160A เพื่อดูค่าความเข้มข้นของสีที่ย้อมที่เกิดขึ้น

$$\text{การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น (\%)} = \frac{[C]_o - [C]_i}{[C]_o} \times 100 \text{ ----- (3.1)}$$

เมื่อ  $[C]_i$  = ความเข้มข้นเริ่มต้น (%w/v)

$[C]_o$  = ความเข้มข้นที่เวลาใดๆ (%w/v)

### 3.3 การขึ้นรูปตัวกรองจากวัสดุธรรมชาติและถ่านกัมมันต์ในการบำบัดน้ำเสีย

ในการศึกษาทำการขึ้นรูปตัวกรองโดยวิธีการต้มใบอ้อยด้วยสารเคมีโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 24 กรัมต่อลิตร เวลา 3 ชั่วโมง อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) 1 กรัมต่อลิตร และถ่านกัมมันต์ 5 กรัมต่อลิตร 10 กรัมต่อลิตร และ 15 กรัมต่อลิตร จากนั้นอบแห้งที่ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และนำไปใช้ทดลองการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมตามการทดลองในขั้นตอนที่ 3 และ 4



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์

ในการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อลดความเข้มข้น โดยดูจากความเข้มข้นของน้ำทิ้ง ปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ และปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำ การศึกษาเริ่มจากสร้างกราฟมาตรฐาน และวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นหลังการบำบัดด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ในปริมาณและเวลาต่าง ๆ กัน ทำการเปรียบเทียบสี ไตเร็กซ์ สีรีแอคทีฟ สีแอซิด สีดีสเพิร์ส และสีเบสิค แต่จากการศึกษาพบว่าสีแอซิด และสีเบสิค น้ำทิ้งที่เหลือจากกระบวนการย้อมมีความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำมาก น้ำเสียที่เหลือมีลักษณะใส ไม่มีสี จึงไม่นำมาทำการทดลองในขั้นต่อไป ผลที่ได้สามารถสรุปได้ดังนี้

#### 4.1 การสร้างกราฟมาตรฐาน (Calibration curve)

กราฟมาตรฐาน เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและค่าการดูดกลืนแสงของสีที่ทำการศึกษา ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสีและค่าการดูดกลืนแสงจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง การเตรียมกราฟมาตรฐานมีขั้นตอนดังนี้

1. ทำโดยการเตรียมสารละลายมาตรฐาน (Blank) และสารละลายสีที่มีความเข้มข้น 0.001 0.002 0.003 0.004 และ 0.005 %w/v ตามลำดับ
2. นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (UV – Vis Spectrophotometer)
3. นำค่าที่ได้จากการวัดมาเขียนกราฟและสร้างสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าความเข้มข้น

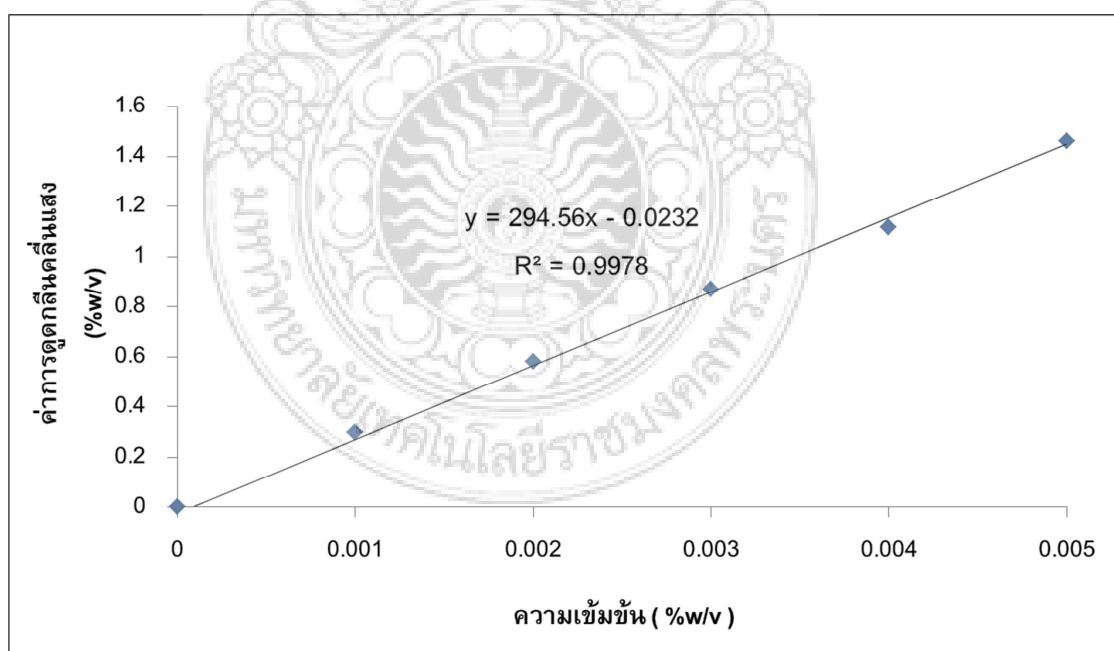
การคำนวณค่าความเข้มข้นของสีก่อนการบำบัดและความเข้มข้นของสีหลังการบำบัด ทำโดยการวัดการดูดกลืนแสงของสารละลายสีที่ได้จากการทดลอง แล้วนำค่าที่ได้จากการวัดมาคำนวณโดยใช้สมการที่ได้จากกราฟมาตรฐานเพื่อแปลงเป็นค่าความเข้มข้นของสารละลายสี

หมายเหตุ 1. การคำนวณค่าความเข้มข้นของสีก่อนการบำบัดและความเข้มข้นของสีหลังการบำบัด ทำโดยการวัดการดูดกลืนแสงของสารละลายสีที่ได้จากการทดลอง แล้วนำค่าที่ได้จากการวัดมาคำนวณโดยใช้สมการที่ได้จากกราฟมาตรฐานเพื่อแปลงเป็นค่าความเข้มข้นของสารละลายสี

2. โดยปกติสีดีสเพิร์สจะต้องนำไปละลายในตัวทำละลายอินทรีย์แต่ในการศึกษาใช้การจำลองสภาพน้ำย้อมจากการปฏิบัติงานจริงในโรงงานฟอกย้อมจึงใช้น้ำแทนสารละลายอินทรีย์

ตารางที่ 4.1 ค่าการดูดกลืนคลื่นแสงของสารละลายมาตรฐานสีไ้ดเร็กท์

ตัวอย่างที่	ความเข้มข้น (%w/v)	ค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (%w/v)
1	0.000	0.000
2	0.001	0.299
3	0.002	0.580
4	0.003	0.872
5	0.004	1.117
6	0.005	1.462

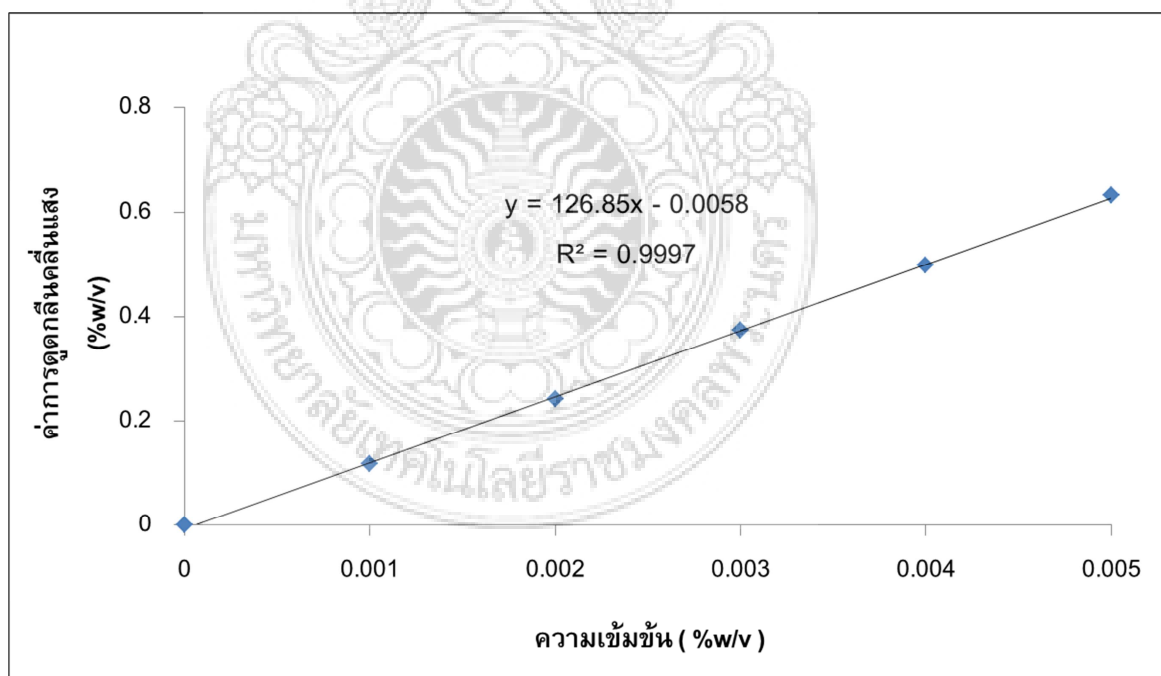


ภาพที่ 4.1 กราฟมาตรฐาน C.I. Direct Red 23



ตารางที่ 4.2 ค่าการดูดกลืนคลื่นแสงของสารละลายมาตรฐานสีรีแอคทีฟ

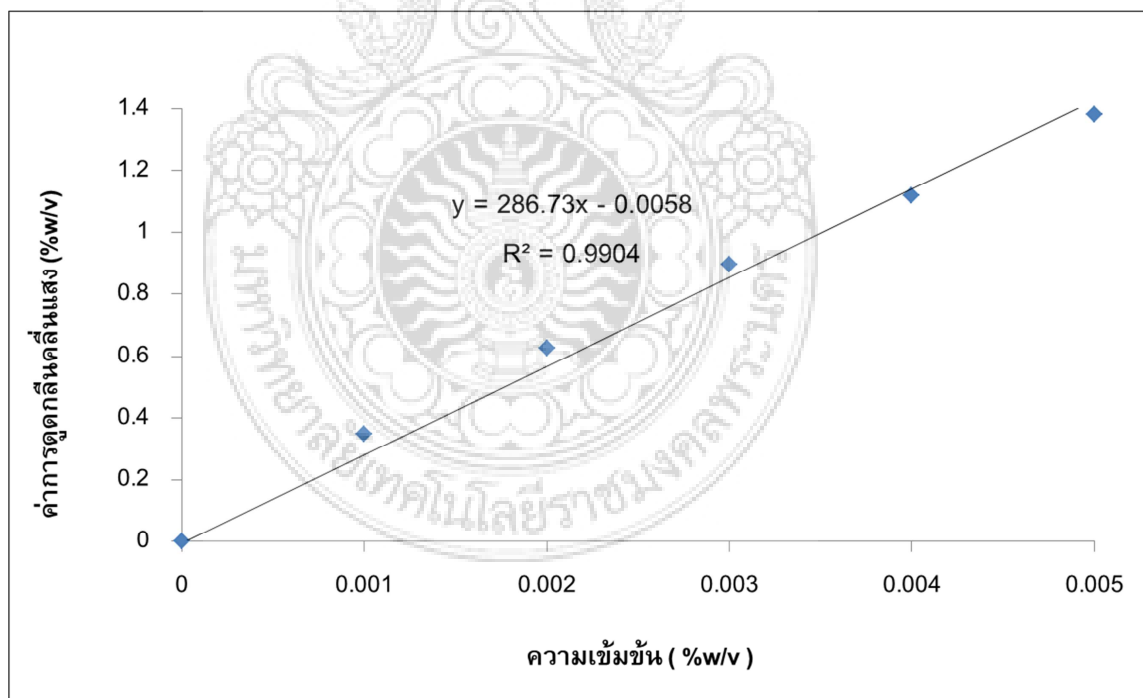
ตัวอย่างที่	ความเข้มข้น (%w/v)	ค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (%w/v)
1	0.000	0.000
2	0.001	0.118
3	0.002	0.243
4	0.003	0.375
5	0.004	0.499
6	0.005	0.633



ภาพที่ 4.2 กราฟมาตรฐาน C.I. Reactive Red 21

ตารางที่ 4.3 ค่าการดูดกลืนคลื่นแสงของสารละลายมาตรฐานสีแอซิด

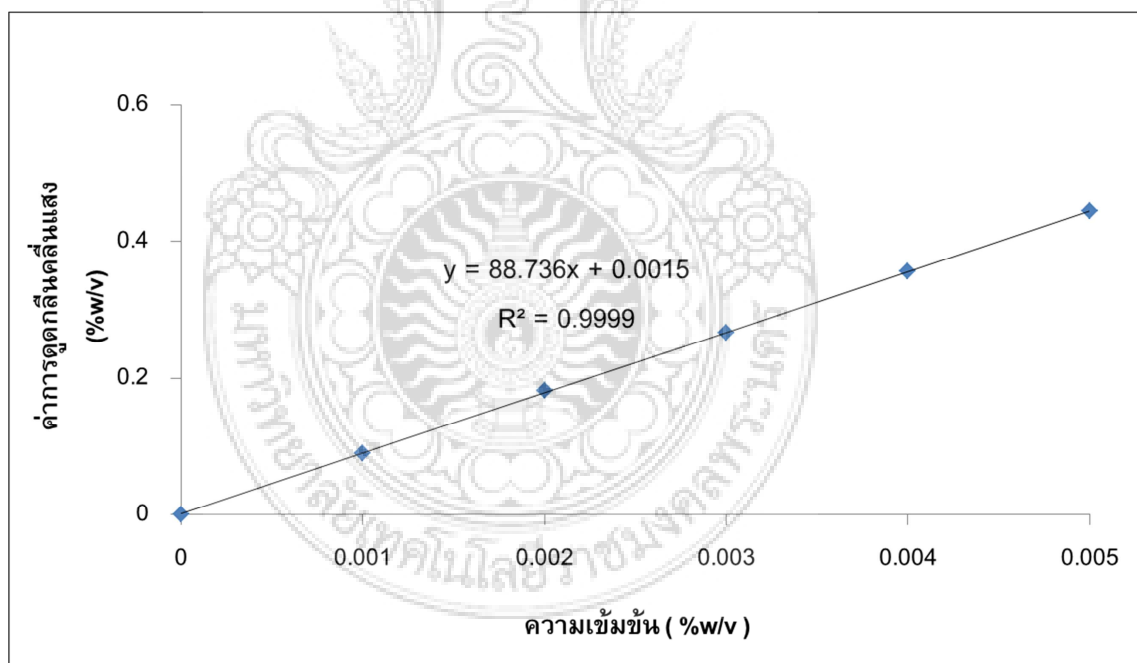
ตัวอย่างที่	ความเข้มข้น (%w/v)	ค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (%w/v)
1	0.000	0.001
2	0.001	0.348
3	0.002	0.627
4	0.003	0.897
5	0.004	1.120
6	0.005	1.382



ภาพที่ 4.3 กราฟมาตรฐาน C.I. Acid Red 131

ตารางที่ 4.4 ค่าการดูดกลืนคลื่นแสงของสารละลายมาตรฐานสีดีสเพิร์ส

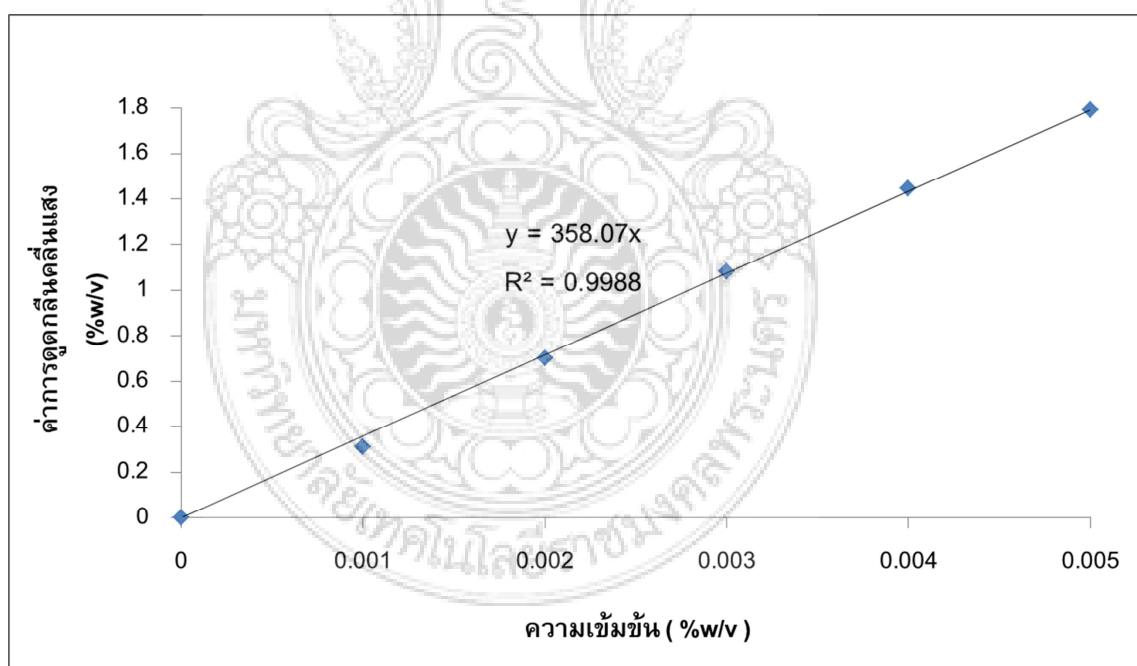
ตัวอย่างที่	ความเข้มข้น (%w/v)	ค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (%w/v)
1	0.000	0.000
2	0.001	0.090
3	0.002	0.182
4	0.003	0.267
5	0.004	0.357
6	0.005	0.444



ภาพที่ 4.4 กราฟมาตรฐาน C.I. Disperse Red 167

ตารางที่ 4.5 ค่าการดูดกลืนคลื่นแสงของสารละลายมาตรฐานสีเบสิค

ตัวอย่างที่	ความเข้มข้น (%w/v)	ค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (%w/v)
1	0.000	0.000
2	0.001	0.310
3	0.002	0.703
4	0.003	1.081
5	0.004	1.445
6	0.005	1.791



ภาพที่ 4.5 กราฟมาตรฐาน C.I. Basic Red 18

#### 4.2 การประเมินผลการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคโฟโตแคตตาไลติก

หลังจากการบำบัดและทำการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสามารถดูค่าความเปลี่ยนแปลงเป็นเปอร์เซ็นต์ได้จากตารางแสดงผลการทดลอง

ตารางที่ 4.6 ความเข้มข้นไดเร็กซ์เมื่อบำบัดด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ในปริมาณและเวลาต่าง ๆ กัน

TiO <sub>2</sub> (กรัมต่อลิตร)	เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น (%w/v)	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น (%)
0	0	0.0017	0
5	2	0.0011	35.29
	4	0.0007	58.82
	6	0.0006	64.71
	8	0.0004	76.47
10	2	0.0011	35.29
	4	0.0006	64.71
	6	0.0004	76.47
	8	0.0003	82.35
15	2	0.0009	47.06
	4	0.0005	70.59
	6	0.0003	82.35
	8	0.0002	88.24

จากตารางที่ 4.6 ความเข้มข้นสีไดเร็กต์ก่อนการบำบัดมีค่าความเข้มข้น 0.0017% w/v เมื่อพิจารณาปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในการบำบัดที่เพิ่มขึ้นจาก 5, 10 และ 15 กรัมต่อลิตร ที่เวลาเดียวกันพบว่า การเพิ่มปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์จะสามารถลดความเข้มข้นของสีไดเร็กต์ได้มากขึ้น หมายความว่าปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นและที่ปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์เท่ากัน เวลาที่ใช้ในการบำบัดที่เพิ่มขึ้นจาก 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง พบว่าการเพิ่มเวลาในการบำบัดจะสามารถลดความเข้มข้นของสีไดเร็กต์ได้มากขึ้น แสดงว่าเวลาที่ใช้ในการบำบัดส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเช่นกัน

การเพิ่มปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้พื้นที่ผิวในการดูดซับสีมีเพิ่มมากขึ้นด้วย และการใช้แสงในการกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาของแคตาลิสเมื่อใช้แสงในการบำบัดที่นานขึ้นค่าความเข้มข้นหลังการบำบัดลดลงมากกว่า 80 % เนื่องจากกระบวนการโฟโตแคตาไลติกเป็นกระบวนการที่ใช้แสงเป็นพลังงานในการกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาผลการบำบัดจึงดีขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น

เมื่อไททาเนียมไดออกไซด์ได้รับพลังงานแสงที่มากกว่า Band gap อิเล็กตรอนในไททาเนียมไดออกไซด์จะถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่จาก วาเลนซ์แบนด์ (Valence band) ไปยังคอนดักชันแบนด์ (Conduction band) ทำให้เกิดเป็นโฮล (Hole) ขึ้นที่วาเลนซ์แบนด์ ลักษณะเช่นนี้เรียกว่าเกิดเป็นคู่อิเล็กตรอน-โฮล ( $e^-/h^+$  pairs) การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะเกิดสองแบบ คือ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากคอนดักชันแบนด์ไปยังตัวรับอิเล็กตรอนในสารละลาย (เกิดเป็นปฏิกิริยารีดักชัน) หรืออิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากตัวให้อิเล็กตรอนในสารละลายไปยังโฮลในวาเลนซ์แบนด์ (เกิดเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน) ให้ hydroxyl radicals ( $OH^*$ ) และ superoxide anion ( $O_2^-$ ) ซึ่งปฏิกิริยาออกซิเดชันนี้ ทำให้สารประกอบอินทรีย์ที่ระเหยได้ (Volatile Organic Compounds: VOCs) และสารอินทรีย์ที่เป็นพิษเปลี่ยนรูปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำที่อุณหภูมิห้อง โดย hydroxyl radicals จะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจน ซึ่งเป็นส่วนประกอบของสารอินทรีย์ กลายเป็นน้ำ ( $H_2O$ ) ในขณะที่ Superoxide anion จะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนในสารอินทรีย์กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) การทำงานของสารโฟโตแคตาลิสต์จะมีลักษณะคล้ายกับการสังเคราะห์แสงของพืช

เมื่อพิจารณาผลการบำบัดน้ำเสีย จึงเลือกการบำบัดด้วย  $TiO_2$  ปริมาณ 10 กรัมต่อลิตร เวลา 6 ชั่วโมง เป็นตัวตั้งต้นสำหรับการบำบัดในขั้นตอนต่อไป

ตารางที่ 4.7 ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟเมื่อบำบัดด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ในปริมาณและเวลาต่าง ๆ กัน

TiO <sub>2</sub> (กรัมต่อลิตร)	เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นสี (%w/v)	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสี (%)
0	0	0.0054	0.00
5	2	0.0039	27.78
	4	0.0026	51.85
	6	0.0022	59.26
	8	0.0017	68.52
10	2	0.0038	29.63
	4	0.0022	59.26
	6	0.0015	72.22
	8	0.0014	74.07
15	2	0.0037	31.48
	4	0.0023	57.41
	6	0.0014	74.07
	8	0.0010	81.48

จากตารางที่ 4.7 ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟก่อนการบำบัดมีค่าความเข้มข้นสี 0.0054 % w/v จะพบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำสีรีแอกทีฟมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับสีไดเร็กต์เปอร์เซินการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นสีลดลงมากกว่า 80 % เมื่อ

พิจารณาผลการบำบัดน้ำเสีย จึงเลือกการบำบัดด้วย  $\text{TiO}_2$  ปริมาณ 10 กรัมต่อลิตร เวลา 6 ชั่วโมง เป็นตัวตั้งต้นสำหรับการบำบัดในขั้นตอนต่อไป

ตารางที่ 4.8 ความเข้มข้นสีดีสเฟิร์สเมื่อบำบัดด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ในปริมาณ และ เวลาต่าง ๆ กัน

$\text{TiO}_2$ (กรัมต่อลิตร)	เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น (%w/v)	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น (%)
0	0	0.0166	0
5	2	0.0136	18.07
	4	0.0097	41.57
	6	0.0085	48.80
	8	0.0075	54.82
10	2	0.0135	18.67
	4	0.0101	39.16
	6	0.0095	42.77
	8	0.0087	47.59
15	2	0.014	15.66
	4	0.0107	35.54
	6	0.0092	44.58
	8	0.0085	48.80

จากตารางที่ 4.8 ความเข้มข้นสีดีสเฟิร์สก่อนการบำบัดมีค่าความเข้มข้น 0.0166 % w/v จะพบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำสีดีสเฟิร์สมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงความ



เข้มสีเช่นเดียวกับสีไดเร็กซ์และสีรีแอคทีฟ แต่เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสีลดลงน้อยกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพิจารณาผลการบำบัดน้ำเสีย พบว่าเทคนิคโฟโตแคตตาไลติกไม่เหมาะสมกับการบำบัดสีดีสเพิร์ส

จากผลการศึกษาสีสามประเภทคือสีไดเร็กซ์ สีรีแอคทีฟ และสีดีสเพิร์สเมื่อพิจารณาจากลักษณะการละลายสีสามารถสรุปผลได้ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัด  $\text{TiO}_2$  10 กรัมต่อลิตรเป็นเวลา 6 ชั่วโมง

ประเภทสี	ลักษณะสี	การเปลี่ยนแปลงความเข้มสี (%)
สีไดเร็กซ์	ประเภทละลายน้ำ	76.47
สีรีแอคทีฟ	ประเภทละลายน้ำ	72.22
สีดีสเพิร์ส	ประเภทไม่ละลายน้ำ	42.77

จากค่าความเข้มสีและเปอร์เซ็นต์ของการเปลี่ยนแปลงความเข้มสีของน้ำย้อมที่ผ่านการบำบัดด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ในปริมาณ 10 กรัมต่อลิตร เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ดังแสดงในตารางที่ 4.9 เมื่อแบ่งประเภทของสีออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ เช่น สีไดเร็กซ์และสีรีแอคทีฟเป็นสีประเภทที่ละลายน้ำได้ส่วนสีดีสเพิร์สเป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ พบว่า สีประเภทละลายน้ำมีค่าความเข้มสีลดลงมากกว่า 70% และสีประเภทที่ไม่ละลายน้ำ มีค่าความเข้มสีลดลงน้อยกว่า 50 % ซึ่งจากค่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มสีจะเห็นว่าสีประเภทที่ละลายน้ำได้มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความเข้มสีที่มากกว่าสีประเภทที่ไม่ละลายน้ำ เนื่องจากสีที่ไม่ละลายน้ำจะไม่เกิดการแตกตัวทำให้อิเล็กตรอนของไททาเนียมไดออกไซด์ไม่สามารถเข้าไปจับกับโครงสร้างสีในสารละลายได้ผลการบำบัดจึงบำบัดได้น้อยกว่าสีประเภทที่ละลายน้ำ ดังนั้น การบำบัดด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยกระบวนการโซล-เจลเพื่อการบำบัดน้ำเสียหลังกระบวนการฟอกย้อม มีความเหมาะสมสำหรับสีประเภทที่ละลายน้ำได้เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัด

### 4.3 การประเมินผลการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการดูดซับ

เพื่อหาปริมาณถ่านกัมมันต์ในการบำบัดน้ำเสียหลังจากที่บำบัดด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ ผลการศึกษาแยกตามประเภทสีได้ดังนี้

ตารางที่ 4.10 การหาสภาวะในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการดูดซับของสีไคเร็กซ์

ถ่านกัมมันต์ (กรัมต่อลิตร)	เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น (%w/v)	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น (%)
0	0	0.0000	0.00
5	1	0.0002	50.00
	2	0.0000	100.00
	3	0.0000	100.00
	4	0.0000	100.00
	10	1	0.0000
10	2	0.0000	100.00
	3	0.0000	100.00
	4	0.0000	100.00
	15	1	0.0000
15	2	0.0000	100.00
	3	0.0000	100.00
	4	0.0000	100.00

จากตาราง จะเห็นได้ว่าปริมาณถ่านกัมมันต์และเวลาที่ใช้ในการบำบัดส่งผลต่อความเข้มข้นของสีไดเร็กทีโดยที่ปริมาณถ่านกัมมันต์ 5 กรัมต่อลิตร เวลา 1 ชั่วโมงจะมีการเปลี่ยนแปลงร้อยละ 50 และความสามารถในการบำบัดน้ำจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มเวลา และปริมาณถ่านกัมมันต์ ในการศึกษาเลือกใช้ถ่านกัมมันต์ 5 กรัมต่อลิตร เวลา 2 ชั่วโมง เป็นค่าที่เหมาะสมในการศึกษา

ตารางที่ 4.11 การหาสภาวะในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการดูดซับของสีรีแอดคทีฟ

ถ่านกัมมันต์ (กรัมต่อลิตร)	เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น (%w/v)	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น (%)
0	0	0.0015	72.22
5	1	0.0012	20.00
	2	0.0006	60.00
	3	0.0004	73.33
	4	0.0000	100.00
10	1	0.0004	73.33
	2	0.0000	100.00
	3	0.0000	100.00
	4	0.0000	100.00
15	1	0.0000	100.00
	2	0.0000	100.00
	3	0.0000	100.00
	4	0.0000	100.00

จากตาราง 4.11 จะเห็นได้ว่าปริมาณถ่านกัมมันต์และเวลาที่ใช้ในการบำบัดส่งผลต่อความเข้มข้นของสีรีแอกทีฟเช่นเดียวกับกับสีไดเร็กซ์ โดยที่ปริมาณถ่านกัมมันต์ 5 กรัมต่อลิตร เวลา 1 ชั่วโมงจะมีการเปลี่ยนแปลงเพียงร้อยละ 20 เนื่องจากสีรีแอกทีฟมีค่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่สูงกว่าสีไดเร็กซ์ แต่ความสามารถในการบำบัดน้ำจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาและปริมาณถ่านกัมมันต์ ในการศึกษาเลือกใช้ถ่านกัมมันต์ 10 กรัมต่อลิตร เวลา 2 ชั่วโมง เป็นค่าที่เหมาะสมในการศึกษา

ตารางที่ 4.12 การหาสภาวะในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการดูดซับของสีดิสเพิร์ส

ถ่านกัมมันต์ (กรัมต่อลิตร)	เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น (%w/v)	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น (%)
0	0	0.0166	0.00
5	1	0.0160	3.61
	2	0.0154	7.23
	3	0.0145	12.65
	4	0.0141	15.06
	10	1	0.0128
10	2	0.0104	37.35
	3	0.0072	56.63
	4	0.0048	71.08
	15	1	0.0053
15	2	0.0021	87.35
	3	0.0011	93.37
	4	0.0000	100.00

จากตาราง 4.12 พบว่าปริมาณถ่านกัมมันต์และเวลาที่ใช้ในการบำบัดส่งผลต่อความเข้มข้นในลักษณะเดียวกับกับสีข้างต้น แต่ผลการบำบัดสีจะถูกกำหนดด้วยปริมาณของถ่านกัมมันต์เป็นปัจจัยหลัก เนื่องจากสีดิสเพิร์สเป็นสีประเภทไม่ละลายน้ำ โมเลกุลของสีจึงสามารถแทรกเข้าไปยังรูพรุนภายในโมเลกุลของถ่านกัมมันต์ เมื่อปริมาณของช่องว่างภายในโมเลกุลถูกแทนที่ด้วยโมเลกุลของสีทั้งหมดส่งผลให้คุณสมบัติในด้านการบำบัดคงที่ หรือเพิ่มขึ้นในปริมาณที่น้อยมากดังผลการทดลองเมื่อใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์ 5 กรัมต่อลิตร และ 10 กรัมต่อลิตร แต่เมื่อเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์ก็เป็นการพื้นที่ในการรองรับโมเลกุลของสีเช่นเดียวกัน ทำให้ผลการดูดซับสีเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่เวลาเทียบเท่ากันในแต่ละความเข้มข้น และผลการบำบัดสีเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้นด้วย จากการศึกษาจึงเลือกปริมาณถ่านกัมมันต์ร้อยละ 15 กรัมต่อลิตร เวลา 4 ชั่วโมง เป็นสภาวะที่ดีที่สุดในการศึกษาสำหรับสีดิสเพิร์ส

ตารางที่ 4.13 ผลสรุปการบำบัดน้ำเสียเทคนิคโฟโตแคตตาไลติกร่วมกับกระบวนการดูดซับ

ประเภทสี	เทคนิค		เวลา รวม (ชั่วโมง)	TiO <sub>2</sub>		ถ่านกัมมันต์	
	โฟโตแคตตาไลติก	การดูดซับ		ปริมาณ (g/l)	เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณ (g/l)	เวลา (ชั่วโมง)
ไจเร็กซ์	☺	☺	8	10	6	5	2
รีแอกทีฟ	☺	☺	8	10	6	10	2
ดิสเพิร์ส	☹	☺	4	-	-	15	4

หมายเหตุ ☺ หมายถึง มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียอยู่ในเกณฑ์ดี  
☹ หมายถึง มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียอยู่ในเกณฑ์ไม่ดี

จากตาราง 4.13 เมื่อนำผลการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมด้วยเทคนิคโฟโตแคตตาไลติกร่วมกับกระบวนการดูดซับมาพิจารณาในภาพรวมพบว่าสีไจ

เร็กซ์และซีรีแอคทีฟเหมาะสมที่จะใช้การบำบัดร่วมกัน สีสเพิร์สไม่เหมาะสมในการบำบัดด้วยเทคนิคโฟโตแคตตาไลติก แต่เหมาะสมกับการบำบัดด้วยกระบวนการดูดซับมากกว่า

#### 4.4 ผลการบำบัดน้ำเสียจากตัวกรองธรรมชาติและถ่านกัมมันต์

จากผลการศึกษารูปร่างตัวกรองด้วยถ่านกัมมันต์ 5 กรัมต่อลิตร 10 กรัมต่อลิตร และ 15 กรัมต่อลิตรตามลำดับ พบว่าเมื่อนำถ่านกัมมันต์ไปผสมกับไบออยและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 5 กรัมต่อลิตร สามารถขึ้นรูปได้ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นเป็น 10 กรัมต่อลิตรและ 15 กรัมต่อลิตรไม่สามารถใช้วิธีการผสมโดยตรงในกระบวนการขึ้นรูปได้ ตัวกรองมีการแยกตัวเป็นอิสระจากนั้น จึงเลือกความเข้มข้นถ่านกัมมันต์ 5 กรัมต่อลิตรในการศึกษาเปรียบเทียบกับผลการศึกษาข้างต้น

จากผลการศึกษาพบว่าผลการบำบัดน้ำเสียด้วยการใช้ถ่านกัมมันต์อย่างเดียวเป็นตัวดูดซับมีความสามารถในการบำบัดมากกว่าการขึ้นรูปเป็นตัวกรอง เนื่องจากการขึ้นรูปเป็นตัวกรองมีการผสมกันของสารและวัตถุตั้งต้นหลายชนิดส่งผลให้มีการแทรกตัวของอนุภาคสารต่างๆ เข้าไปยังรูพรุนของถ่านกัมมันต์ก่อนที่จะนำไปทำการบำบัดน้ำเสีย ดังนั้นโมเลกุลของน้ำเสียจึงไม่สามารถผ่านเข้าไปยังรูพรุนของถ่านกัมมันต์ได้อีก

ข้อเสนอแนะในกรณีที่ต้องการขึ้นรูปตัวกรองด้วยถ่านกัมมันต์ควรทำการขึ้นรูปโดยใช้ถ่านกัมมันต์ผสมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์หรือสารประเภทอื่นที่สามารถเชื่อมอนุภาคของถ่านกัมมันต์ให้อยู่อัดติดกันเท่านั้น ไม่มีความจำเป็นที่ต้องใช้ตัวรองรับตัวอื่นอีก

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมด้วยเทคนิคโฟโตแคตตาไลติกร่วมกับกระบวนการดูดซับมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมด้วยไททาเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์ ศึกษาผลของกระบวนการบำบัดแบบผสมผสานระหว่างไททาเนียมไดออกไซด์ และถ่านกัมมันต์ และศึกษาการขึ้นรูปตัวกรองจากวัสดุธรรมชาติและถ่านกัมมันต์ ในการบำบัดน้ำเสีย น้ำย้อมที่ใช้ในการบำบัดได้แก่ น้ำย้อมสีไคเร็กซ์ รีแอคทีฟ แอซิด ดิสเพิร์ส และ สีเบสิค ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำย้อม คือ 1 % owf สีย้อมที่ใช้ทั้งหมดมีโครงสร้างอะโซ (Azo) เมื่อพิจารณาจากค่าความเข้มข้นสีน้ำย้อมที่ผ่านกระบวนการอย่างสมบูรณ์ พบว่าสีแอซิดและสีเบสิคมีการดูดซับของสีลงไปยังผ้าที่ใช้ในกระบวนการย้อมอย่างสมบูรณ์ น้ำเสียที่เกิดขึ้นมีปริมาณความเข้มข้นสีต่ำมากจึงไม่นำมาทำการศึกษา

การสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการโซล-เจลเพื่อทำการบำบัดน้ำเสียหลังกระบวนการฟอกย้อม มีวัตถุประสงค์เพื่อสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการโซล-เจลและทำการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการย้อมด้วยสีไคเร็กซ์ สีรีแอคทีฟ สีดิสเพิร์ส ด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์โซล-เจล การศึกษาปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในการบำบัด คือ 0, 5, 10 และ 15 กรัมต่อลิตร เวลา คือ 0, 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่าสีไคเร็กซ์ และสีรีแอคทีฟ มีความเหมาะสมในการบำบัดด้วยเทคนิคโฟโตแคตตาไลติก ปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในการบำบัด คือ 10 กรัมต่อลิตร เวลา 6 ชั่วโมง ตัวแปรที่มีผลต่อการบำบัด คือ ปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้น ความเข้มแสง ปริมาณของสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ส่วนสีดิสเพิร์สไม่เหมาะที่จะใช้เทคนิคโฟโตแคตตาไลติกในการบำบัด เนื่องจากสามารถลดความเข้มข้นสีได้น้อยกว่าร้อยละ 50 สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสีทั้ง 3 ประเภท ด้วยเทคนิคโฟโตแคตตาไลติกดังนี้ สีไคเร็กซ์ > สีรีแอคทีฟ > สีดิสเพิร์ส

ส่วนกระบวนการดูดซับใช้ถ่านกัมมันต์เป็นสารหลักในการดูดซับอนุภาคสีในสารละลาย การศึกษาปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการบำบัด คือ 0, 5, 10 และ 15 กรัมต่อลิตร

เวลา คือ 0, 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง เช่นเดียวกับการทดลองด้วยเทคนิคโฟโตแคตตาไลติก จากผลการศึกษาพบว่าสัติสเฟิร์สมีความสามารถในการบำบัดที่ดีที่สุดเนื่องจากสัติสเฟิร์สเป็นสีประเภทไม่ละลายน้ำ อนุภาคของสีสามารถแทรกเข้าไปยังรูพรุนของถ่านกัมมันต์ได้โดยตรง ตัวแปรที่มีผลต่อการบำบัด คือ ลักษณะการละลายตัวของสีย้อมในสารละลาย ปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้น ปริมาณความเข้มข้นถ่านกัมมันต์ และเวลาที่ใช้ในการบำบัด ประสิทธิภาพในการบำบัดสีทั้ง 3 ประเภทด้วยกระบวนการดูดซับดังนี้ สัติสเฟิร์ส > สีไคเร็กซ์ > สีรีแอกทีฟ ส่วนการขึ้นรูปตัวดูดซับจากวัสดุธรรมชาติร่วมกับถ่านกัมมันต์ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่น้อยกว่าการใช้ถ่านกัมมันต์เพียงอย่างเดียว

จากการทดลองทั้งสองขั้นตอนสามารถสรุปได้ว่าเทคนิคโฟโตแคตตาไลติก ร่วมกับกระบวนการดูดซับสามารถใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมได้ ผลการบำบัดจะขึ้นอยู่กับประเภทสีเป็นหลัก





### บรรณานุกรม

กาญจนา ลือพงษ์ และคณะ. การลดความเข้มข้นของสีที่เหลือในน้ำทิ้งจากกระบวนการย้อม  
โดยวิธีการออกซิเดชันและรีดักชัน. 2547.

ขจรศักดิ์ โสภการีย์. การใช้กระบวนการแสงอาทิตย์-โฟแคตาไลติก สำหรับปฏิกรณ์แบบ  
ชั้นบันไดในการบำบัดสารเมทิลีนบลูในน้ำเสีย. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่, 2541.

จุฑามาศ ลีประเสริฐ และ ณิชกมล นิธิมัย. การเตรียม  $\text{TiO}_2$  โดยเทคนิคโซเจลเพื่อกำจัด  
**VOC**, ออกจากอากาศเสีย. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา, 2546.

สิริชัย ภิบาลจอมมี. การกำจัดสีของน้ำเสียสี้อมด้วยกระบวนการโฟโตแคตาไลติกโดยใช้  
ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นแคตาลิสต์. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่, 2549.

ธีรยุทธ นุชเนียม และ นางสาวทิพวัลย์ ตุ่มทอง. การบำบัดน้ำย้อมด้วยกระบวนการ  
ผสมผสานระหว่างไททาเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์. ปริญญาณิพนธ์  
ภาควิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรมสิ่งทอ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร,  
กรุงเทพ, 2552.

\_\_\_\_\_, โครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์แบ่งตามรูปผลึก, [ออนไลน์] สืบค้นจาก  
<http://www.vcharkarn.com/varticle>, 27/08/2010.

\_\_\_\_\_, ปฏิกริยาโฟโตแคตาไลติก, [ออนไลน์] สืบค้นจาก  
<http://puregreencoatings.com>, 20/10/2010.

Ammar et al. ศึกษาการกำจัดสารเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตแคตาไลติกโดยใช้ไท  
ทาเนียมไดออกไซด์เป็นแคตาลิสต์. [ออนไลน์] สืบค้นจาก  
[www.chiangmai.ac.th/emac/journal](http://www.chiangmai.ac.th/emac/journal), 15/10/2010.

Bae, B.S. 2008. **Sol-gel nano materials and process.**, In MS512 Nanotechnology. Korea.

Burch Paula, **Dyeing Polyester with Disperse Dyes** [online]. Available from :

<http://www.pburch.net/dyeing/dispersedye.shtml> [2003, May 16]

Christie R.M. **The Chemistry of Colour Application**. England : Blackwell Science, 2000.

Cooper Peter. **Colour in dyehouse effluent**. England : Society of Dyers and Colourists, 1995.

Daniel M.Marion. **Handbook of U.S.Colorants**. Third edition. The United State of America : John Wiley & Sons, 1991.

Hoffman et al, **semiconductor photocatalysis**, 1995.

Howstuffworks Inc., **What is activated charcoal and why is it used in filters?** [online].

Available from : <http://www.howstuffworks.com/question209.htm> [2003, Jan 12]

Hydroxybnzoic Siham et al. **ศึกษากระบวนการแสงอาทิตย์-โฟโตแคตตาไลติกเพื่อกำจัดสารประเภทเมทิลออเรนจ์ โดยอาศัยไททาเนียมไดออกไซด์เป็นแคตาลีสต์.**

[ออนไลน์] สืบค้นจาก [www.chiangmai.ac.th/emac/journal](http://www.chiangmai.ac.th/emac/journal), 15/10/2010.

Klein, L.C. 1991. Sol-Gel Coatings, In Satas, D. **Coating Technology Handbook**. Marcel Dekker, Inc., USA.

Lakshmi et al. **ศึกษาการกำจัดสารเมทิลินบลูในน้ำ โดยอาศัยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตัวแคตาลีสต์.** [ออนไลน์] สืบค้นจาก

[www.chiangmai.ac.th/emac/journal](http://www.chiangmai.ac.th/emac/journal), 15/10/2010.

Lenntech , **Adsorption/Active Carbon** [online].Available from: <http://www.lenntech>.

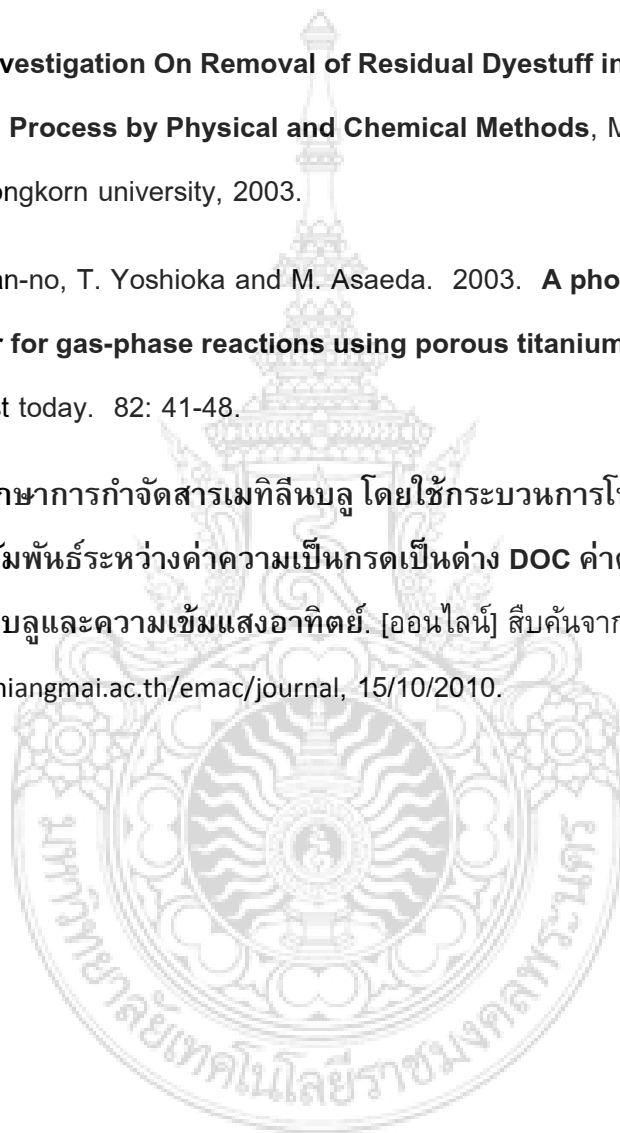
com/adsorption.htm [2003, Aug 8]

Lorimer J.P., **Degradation of dye effluent**. [online]. Available from : <http://www.iu-pac.org/publications/pac/2001/pdf/7312x1957.pdf> [2003, June 3]

Luepong K., **Investigation On Removal of Residual Dyestuff in Effluent From Yarn Dyeing Process by Physical and Chemical Methods**, M.Eng. Thesis, Chulalongkorn university, 2003.

Tsuru T., T. Kan-no, T. Yoshioka and M. Asaeda. 2003. **A photocatalytic membrane reactor for gas-phase reactions using porous titanium oxide membranes**, Catalyst today. 82: 41-48.

Zhang et al. ศึกษาการกำจัดสารเมทิลีนบลู โดยใช้กระบวนการโฟโตแคตาไลติกเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรดเป็นด่าง DOC ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของเมทิลีนบลูและความเข้มแสงอาทิตย์. [ออนไลน์] สืบค้นจาก [www.chiangmai.ac.th/emac/journal](http://www.chiangmai.ac.th/emac/journal), 15/10/2010.



ภาคผนวก



### ประวัตินักวิจัย

ชื่อ - นามสกุล	นางสาวกาญจนา ลือพงษ์ Miss Kanchana Luepong
ตำแหน่งปัจจุบัน	อาจารย์
สถานที่ทำงาน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอและ ออกแบบแฟชั่น
ที่อยู่ปัจจุบัน	49/1 ซอยสุขร่วมกัน เขตดินแดง จังหวัดกรุงเทพฯ รหัสไปรษณีย์ 10400
E-mail Address	kanchana.l@rmutp.ac.th

### ประวัติการศึกษา

- 2538 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขา เคมีสิ่งทอ (ปวส. เคมีสิ่งทอ)  
สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
- 2542 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมีสิ่งทอ (วศ.บ. วิศวกรรมเคมีสิ่งทอ)  
สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล
- 2546 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม. เคมี)  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- 2553 วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วศ.ด. เคมี)  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

### ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัย

#### หัวหน้าโครงการวิจัย :

- การลดความเข้มของสีที่เหลือในน้ำทิ้งจากกระบวนการย้อมโดยวิธีการออกซิเดชันและรีดักชัน ได้รับเงินสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณพิเศษ พ.ศ. 2547 วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล
- การผลิตผ้าไม่ทอจากใบอ้อย ได้รับเงินสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณพิเศษ พ.ศ. 2552 คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอและออกแบบแฟชั่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

### ผู้ร่วมโครงการวิจัย:

- การลอกกาวยไหมด้วยยางมะละกอ ได้รับเงินสนับสนุนงานวิจัยจากงบผลประโยชน์ พ.ศ. 2550 คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอและออกแบบแฟชั่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
- การนำน้ำหล่อเย็นจากเครื่องทำน้ำกลั่นกลับมาใช้ใหม่ ได้รับเงินสนับสนุนงานวิจัยจากงบผลประโยชน์ พ.ศ. 2551 คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอและออกแบบแฟชั่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
- เครื่องย่อยกากอัตโนมิติ (ระบบต่อเนื่อง) ได้รับเงินสนับสนุนงานวิจัยจากกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี พ.ศ. 2549
- การพัฒนาอุปกรณ์พิมพ์สกรีนต้นแบบเพื่องานอุตสาหกรรมสิ่งทอ ได้รับเงินสนับสนุนงานวิจัยจากงบผลประโยชน์ พ.ศ. 2551 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

### ผลงานตีพิมพ์:

Sasithorn, N. and Luepong K., Silk degumming with papaya Linn., **RMUTP Research Journal**. 2 (1) (2008): 69-75. Bangkok, Thailand.

Luepong, K., The preparation of silver fibers by electrospinning process. **RMUTP Research Journal**. 3 (2) (2009): 156-166. Bangkok, Thailand.

Luepong, K., Koombhongse, P., and Kongkachuichay, P. Ceria Fibers Via Electrospinning Process: The Effect of Co-Solvent. **CHIANG MAI JOURNAL OF SCIENCE**. 37 (1) (2010): 85-91. Chaing mai, Thailand.

## ประวัตินักวิจัย

<b>ชื่อ - นามสกุล</b>	นางสาวนนุช ศศิธร Miss Nongnut Sasithorn
<b>ตำแหน่งปัจจุบัน</b>	พนักงานมหาวิทยาลัย (อาจารย์)
<b>สถานที่ทำงาน</b>	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอและ ออกแบบแฟชั่น
<b>ที่อยู่ปัจจุบัน</b>	387 ซอยเพชรเกษม 53 ถนนเพชรเกษม แขวงบางแค เขตบางแค จังหวัดกรุงเทพฯ รหัสไปรษณีย์ 10160
<b>E-mail Address</b>	nongnut.s@rmutp.ac.th

### ประวัติการศึกษา

- 2538 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขา เคมีสิ่งทอ (ปวส. เคมีสิ่งทอ)  
สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
- 2542 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมีสิ่งทอ (วศ.บ. วิศวกรรมเคมีสิ่งทอ)  
สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล
- 2547 ศิลปศาสตรบัณฑิต สาขา สื่อสารมวลชน (ศศ.บ. สื่อสารมวลชน)  
มหาวิทยาลัยรามคำแหง
- 2548 วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขา ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์  
(วท.ม. ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัย

#### หัวหน้าโครงการวิจัย :

- การลอกแก้วใหม่ด้วยยางมะละกอ ได้รับเงินสนับสนุนงานวิจัยจากบ  
ผลประโยชน์ พ.ศ. 2550 คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอและออกแบบแฟชั่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี  
ราชมงคลพระนคร
- การนำน้ำหล่อเย็นจากเครื่องทำน้ำกลั่นกลับมาใช้ใหม่ ได้รับเงินสนับสนุน  
งานวิจัยจากบผล ประโยชน์ พ.ศ. 2551 คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอและออกแบบแฟชั่น  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

#### ผู้ร่วมโครงการวิจัย

- เครื่องย่อยกากอัตโนมัติ (ระบบต่อเนื่อง) ได้รับเงินสนับสนุนงานวิจัยจาก  
กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี พ.ศ. 2549

- การพัฒนาอุปกรณ์พิมพ์สกรีนต้นแบบเพื่องานอุตสาหกรรมสิ่งทอ ได้รับเงินสนับสนุนงานวิจัยจากงบผลประโยชน์ พ.ศ. 2551 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
- การผลิตผ้าไม่ทอจากใบอ้อย ได้รับเงินสนับสนุนงานวิจัยจากงบผลประโยชน์ พ.ศ. 2552 คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอและออกแบบแฟชั่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

**ผลงานตีพิมพ์:**

Sasithorn, N. and Luepong K., Silk degumming with papaya Linn., RMUTP Research Journal. 2 (1) (2008): 69-75. Bangkok, Thailand.

