

การบำบัดสีย้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคลาไลติก
ในสถานะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

นางสาวดวงชีวัน

บุญเผือก

นางสาวปิ่นแก้ว

แสงวิโรจน์

นายวิรัช

โล่ห์สิวานนท์

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม

ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

63

การนำบัตรยืมด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคทาไลติก
ในสถานะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



T107781

นางสาวดวงชีวัน	บุญเผือก
นางสาวปิ่นแก้ว	แสงวิโรจน์
นายวิรัช	โล่ห์สิวานนท์

๒/๗๗

๑/๖๗ ๗

๑๕๔๙

เลขหมู่.....
 เลขทะเบียน.....**107781**
 วัน,เดือน,ปี..... 14 พ.ค. 2553

b..... 12212568
i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
 สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม
 ภาควิชาเคมี
 คณะวิทยาศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ปีการศึกษา 2549

ผลิตโดย: สำนักหอสมุดกลาง

**Treatment of dye Photocatalytic
Using Titanium Dioxide (TiO₂) as Catalyst**

Miss Duangcheewan Boonpuak

Miss Pinkaew Saengwiroj

Mr Vishat Losivanon

**A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for
the Degree of Bachelor of Science
Department of Chemistry
Faculty of Science
King Monkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year 2006**

โครงการพิเศษเรื่อง การบำบัดสีย้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก
 ในสถานะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

นักศึกษา นางสาว ดวงจันทร์ บุญเฟือก
 นางสาว ปิ่นแก้ว แสงวิโรจน์
 นาย วิชัช โล่ห์สีวานนท์

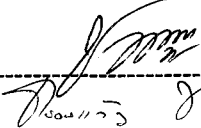
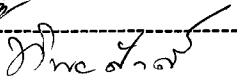
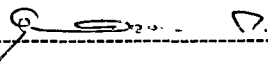
ภาควิชา เคมี

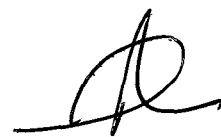
สาขาวิชา เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.สามารถ คงทวีเลิศ

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 อนุมัติให้โครงการพิเศษเรื่องนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์	
กรรมการ ผศ. กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์	
กรรมการ ผศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์	



.....
 (ผศ.ดร. ประยงค์ ดวงดี)
 หัวหน้าภาควิชา

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โครงการพิเศษเรื่อง	การบำบัดสีย้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกในสภาวะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
นักศึกษา	นางสาว ดวงชีวัน นุญเฝือก นางสาว ปิ่นแก้ว แสงวิโรจน์ นาย วิรัช โล่ห์สิวานนท์
ภาควิชา	เคมี
สาขาวิชา	เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา	2549
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.สามารถ คงทวีเลิศ

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสารละลายสีย้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกในสภาวะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สีย้อมที่ใช้ในการทดลอง คือ สีย้อม Reactive Red 141 ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ระยะเวลาการให้แสงยูวี พีเอช ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ และความเข้มข้นของสีย้อม ทำการทดลองโดยแปรค่าปัจจัยที่ต้องการศึกษา จากนั้นทำการวัดความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมทั้งก่อนบำบัดและหลังบำบัด จากผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม คือ ระยะเวลาสัมผัส 180 นาทีพีเอช 11 ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 5 กรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของสีย้อม 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งที่สภาวะนี้จะให้ค่าประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ $85.88 \pm 2.07\%$

คำสำคัญ : โฟโตแคตาไลติก, ไทเทเนียมไดออกไซด์, สีย้อมรีแอคทีฟ

Special Project Title	Treatment of dye Photocatalytic Using Titanium Dioxide (TiO ₂) as Catalyst
Name	Miss Duangcheewan Boonpuak Miss Pinkaew Saengwiroj Mr Vishat Losivanon
Department	Chemistry
Program	Environmental Resource Chemistry
Academic Year	2006
Special Project Advisor	Asst. Prof. Usarat Thawornchaisit. Ph.D
Special Project Co-Advisor	Samart Kongtaweelerd. Ph.D

ABSTRACT

This special project studied factors affecting photocatalytic treatment of dye-containing solution using TiO₂ as a catalyst. Dye using in the experiment was Reactive Red 141. Factors being studied were UV lighting time, pH, amount of titanium dioxide, and initial dye concentration. Studies were conducted by varying the studied factors, then measured concentration of dye in the solution before and after treatment by photocatalytic reaction. Results showed that optimum conditions for removing of dye were at UV lighting time of 180 min, pH of 11, amount of TiO₂ of 5 g/L and initial dye concentration of 20 mg/L. At this condition, treatment efficiency of dye by photocatalytic reaction was 85.88±2.07%

Keyword : Photocatalytic, Titanium dioxide, Reactive Dyed Solution

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเรื่องการบำบัดสี้อมรีแอกทีฟโดยใช้ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกในสภาวะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยานี้ถูกจัดทำขึ้น โดยการตระหนักถึงปัญหาสภาพแวดล้อมในปัจจุบันที่คณะผู้จัดทำได้ประสบมา จึงได้มีการจัดทำโครงการพิเศษฉบับนี้ขึ้น

โครงการพิเศษฉบับนี้จะสำเร็จลุล่วงไปมิได้หากมิได้รับความช่วยเหลือจากท่าน ผศ.ดร. อุตารัตน์ อารวยชัยสิทธิ์ และท่าน ดร.สามารถ คงทวีเลิศ และคณาจารย์คณะวิทยาศาสตร์ทุกท่าน ซึ่งคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งสำหรับคำปรึกษาและคำแนะนำอันมีค่ายิ่งแก่คณะผู้จัดทำ รวมถึงเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการและเจ้าหน้าที่ห้องธุรการภาคเคมีทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในทุกๆด้าน

ขอขอบพระคุณ บริษัท ไคสตาร์(ประเทศไทย) จำกัด ที่เอื้อเฟื้อสีย้อมในงานวิจัยครั้งนี้ และส่งมอบไปยังงานวิจัยในปีการศึกษาถัดไป

ขอขอบคุณกลุ่มเพื่อนๆทุกคนสำหรับคำแนะนำ กำลังใจและความห่วงใยที่ให้แก่คณะผู้จัดทำเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณอย่างยิ่งสำหรับ พ่อแม่ ของคณะผู้จัดทำที่ให้กำลังใจตลอดการศึกษาและการทำโครงการพิเศษฉบับนี้

นางสาวดวงชีวัน บุญเฟือก
นางสาวปิ่นแก้ว แสงวิโรจน์
นายวิรัช โล่ห์สินนท์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
คำย่อและสัญลักษณ์	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 สီย้อม	3
2.2 กระบวนการโฟโตแคตาไลติก	17
2.3 ลักษณะเฉพาะของสารไทเทเนียมไดออกไซด์	26
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	28
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	31
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี	31
3.2 การดำเนินการวิจัย	32
3.2.1 การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์	32
3.2.2 ศึกษาสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดอนาเทส	32
3.2.3 การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานสีย้อม	33
3.2.4 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม	33

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	36
4.1 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์	36
4.2 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการกำจัดสีข้อม	37
4.2.1 การศึกษาผลของระยะเวลาการให้แสงยูวี	37
4.2.2 การศึกษาผลของพีเอช	38
4.2.3 การศึกษาผลของปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์	39
4.2.4 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสีข้อม	40
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	43
5.1 สรุปผลการทดลอง	43
5.2 ข้อเสนอแนะ	44
บรรณานุกรม	45
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก	49

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สัญลักษณ์ของสี	4
ตารางที่ 2.2 สัญลักษณ์บอกธรรมชาติของสี	5
ตารางที่ 2.3 สัญลักษณ์บอกคุณภาพของสี	5
ตารางที่ 2.4 เปอร์เซนต์โครงสร้างทางเคมีของสีรีแอคทีฟที่แบ่งตามโทนสี	11
ตารางที่ ก.1 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆของสารละลายมาตรฐานสีย้อม Reactive Red 141 (λ_{max} 545 nm)	49
ตารางที่ ก.2 ผลการศึกษาระยะเวลาสัมผัสของโฟโตแคตตาไลซิส	50
ตารางที่ ก.3 ผลการศึกษาระยะเวลาสัมผัสของโฟโตไลซิส	50
ตารางที่ ก.4 ผลการศึกษาระยะเวลาสัมผัสของชุดควบคุม	50
ตารางที่ ก.5 ผลการศึกษาค่าของพีเอช 3	51
ตารางที่ ก.6 ผลการศึกษาค่าของพีเอช 7	51
ตารางที่ ก.7 ผลการศึกษาค่าของพีเอช 11	51
ตารางที่ ก.8 ผลของการศึกษาปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ของโฟโตแคตตาไลซิส	51
ตารางที่ ก.9 ผลของการศึกษาปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ของโฟโตไลซิส	52
ตารางที่ ก.10 ผลของการศึกษาปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ของชุดควบคุม	52
ตารางที่ ก.11 ผลของการศึกษาความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นของโฟโตแคตตาไลซิส	52
ตารางที่ ก.12 ผลของการศึกษาความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นของโฟโตไลซิส	53
ตารางที่ ก.13 ผลของการศึกษาความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นของชุดควบคุม	53

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างสีย้อม Reactive Red 141	10
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ	18
รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาการเกิด โสลของสารกึ่งตัวนำ และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ	19
รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะของรูปผลึกชนิดต่างๆของไทเทเนียมไดออกไซด์	28
รูปที่ 4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ขึ้น	36
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม RR141 ที่เวลาต่างๆ	37
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม RR141 ที่พีเอชต่างๆ	38
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม RR141 ที่ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ	39
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม RR141 ที่ความเข้มข้นต่างๆ	41
รูปที่ 4.6 สารละลายสีย้อมก่อนบำบัดและหลังบำบัด	42
รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานความเข้มข้นสีย้อม Reactive Red 141	49

คำย่อและสัญลักษณ์

คำย่อ	ความหมาย
RR141	สีย้อม Reactive Red 141
C.I.	ดัชนีสี (Color Index)
Abs	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)
BOD	ปริมาณออกซิเจนที่ถูกจุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Biochemical Oxygen Demand)
COD	ปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ (Chemical Oxygen Demand)
SS	ตะกอนแขวนลอย (Suspended Solids)
λ_{\max}	ความยาวคลื่นที่สามารถดูดกลืนแสงได้มากที่สุด
Eg	ช่องว่างพลังงาน (Band Gap)
k	ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา, (นาที) ⁻¹
A	แฟกเตอร์แห่งความถี่, (นาที) ⁻¹
E_g	พลังงานกระตุ้น, (จูล/โมล)
R	ค่าคงที่ = 8.3143 จูล/โมล เคลวิน
T	อุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน)
E	พลังงานควอนตัม (Quantum Energy), จูล
h	ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant) = 6.625×10^{-34} จูล-วินาที
ν	ความถี่ของคลื่นแสง, เฮิร์ตซ์ หรือ วินาที ⁻¹
λ	ความยาวคลื่นแสง, นาโนเมตร
c	ความเร็วของคลื่นแสง = 2.997×10^8 เมตร/วินาที

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

อุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่มของประเทศไทยมีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งนับเป็นอุตสาหกรรมที่นำรายได้เข้าสู่ประเทศอย่างมาก อย่างไรก็ตามอุตสาหกรรมประเภทนี้มีการใช้น้ำในกระบวนการผลิตค่อนข้างมาก ซึ่งส่งผลให้ปริมาณน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่มมีปริมาณเพิ่มขึ้นมาก ซึ่งน้ำทิ้งดังกล่าวจะมีสารเคมีจำพวกสีย้อมที่ใช้ในกระบวนการผลิตปนเปื้อนออกมาด้วยเนื่องจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสีย้อมกับเส้นใยโดยทั่วไปแล้วไม่สามารถเกิดได้สมบูรณ์ทั้งหมด หากโรงงานมีการปล่อยน้ำทิ้งโดยไม่มีการบำบัดก็จะเป็นการไปเพิ่มมลภาวะทางน้ำกับสิ่งแวดล้อม

สีย้อมที่ใช้กันโดยทั่วไปในโรงฟอกย้อมมักจะเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีสูตรโครงสร้างใหญ่ ซับซ้อน ซึ่งถ้ามีการปนเปื้อนของสีย้อมในแหล่งน้ำจะก่อให้เกิดอันตรายแก่พืชและสัตว์ในแหล่งน้ำนั้นๆ ลดความสามารถในการส่องผ่านของแสงลงไปแหล่งน้ำ ทำให้กระบวนการสังเคราะห์แสงในแหล่งน้ำลดลง มีทัศนียภาพที่ไม่น่ามองและไม่เหมาะสมต่อการนำไปอุปโภค ดังนั้นการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมจากโรงงานอุตสาหกรรมการฟอกย้อมก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจึงมีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่ง

วิธีการที่ใช้ในการบำบัดมีอยู่หลายวิธี ได้แก่ กระบวนการดูดซับ การตกตะกอนทางเคมี โอโซนเนชัน คลอรีเนชัน กระบวนการออกซิเดชันทางเคมี โดยวิธีการดังกล่าวมีข้อจำกัดคือ กระบวนการดูดซับและการตกตะกอนทางเคมีก่อให้เกิดมลพิษทุติยภูมิและเป็นปัญหาในการกำจัดต่อไป โอโซนเนชันจัดเป็นกระบวนการที่มีค่าใช้จ่ายสูง คลอรีเนชันก่อให้เกิดสารอินทรีย์ที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบซึ่งอาจจะเป็นพิษมากกว่าตัวของสีย้อมเอง กระบวนการออกซิเดชันทางเคมีสามารถกำจัดสีของน้ำเสียได้แต่ไม่สามารถทำให้สารอินทรีย์สลายตัวไปเป็นสารอนินทรีย์ได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นกระบวนการบำบัดเพียงขั้นตอนนี้ไม่สามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่มีอยู่ในน้ำเสียได้ จึงจำเป็นต้องหากระบวนการควบคู่ที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ

การออกซิเดชันโดยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกเป็นกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงที่สามารถนำมาใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำ จัดเป็นกระบวนการที่ได้รับความสนใจในช่วงหลายปีที่ผ่านมาเนื่องจากสามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่เป็นมลพิษให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และไอออนลบของสารอนินทรีย์ได้ ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกนั้น

เกี่ยวข้องกับการใช้สารกึ่งตัวนำเป็นแคตาลิสต์ให้เกิดไฮดรอกซิลแรดิคัล ที่เข้าปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ก่อให้เกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำ การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นแคตาลิสต์สำหรับปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกนั้นได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ราคาถูก เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ไม่สลายตัวโดยแสง และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ อย่างไรก็ตามความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกในสถานะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ยังมีอยู่ค่อนข้างจำกัด โครงการพิเศษนี้ได้ถูกจัดทำขึ้นเพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีย้อมในสารละลาย และทำการศึกษการบำบัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานสีย้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกในสถานะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวแคตาลิสต์

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาความเป็นไปได้ในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟโดยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกในสถานะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
2. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟโดยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกในสถานะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาสมบัติทางกายภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยศึกษาโครงสร้างผลึก
2. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟโดยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกในสถานะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่ง โดยทำการทดลองแบบเบซท์ ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ ระยะเวลาการให้แสงยูวี พีเอช ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ และความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น แปรค่าปัจจัยที่ต้องการศึกษา จากนั้นทำการวัดความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมที่เหลือภายหลังการบำบัด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟโดยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกในสถานะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่ง
2. ได้วิธีกำจัดสีย้อมที่มีประสิทธิภาพสูงและไม่ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม
3. สามารถนำปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกไปประยุกต์ใช้ร่วมกับน้ำเสียจริงจากโรงงานฟอกย้อมได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สีย้อม

สีย้อมเป็นสารที่ละลายน้ำได้ หรือสามารถทำให้ละลายน้ำได้ คิดคิดเส้นใยได้ การนำสีย้อมมาใช้ให้ได้ผลดีขึ้นกับอำนาจการรวมตัวของสีกับเส้นใย ซึ่งต้องมีมากกว่าอำนาจการรวมตัวของสีกับน้ำ โดยจะต้องทำให้เกิดสถานะที่โมเลกุลของสีย้อมจัดเรียงตัวกัน ในลักษณะที่ทำให้เกิดการดูดติด (Substantivity) กับเส้นใยแล้วเกิดพันธะ (Bond) ยึดติดกันแน่น อิทธิพลที่ทำให้เกิดการดูดติดกับเส้นใย คือ

- ก. พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond)
- ข. แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waal's forces)
- ค. แรงไอออนิก (Ionic forces)
- ง. พันธะโคเวเลนต์ (Covalent bond)

การดูดติดกันระหว่างโมเลกุลของเส้นใยจะต้องประกอบด้วยแรงตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป บางครั้งอาจเกิดแรงทั้ง 4 ชนิดผสมผสานกัน แต่แรงดึงดูดที่ทำให้เกิดการยึดติดได้ดีที่สุด คือ พันธะโคเวเลนต์ (Covalent bond) นอกจากนี้รูปร่างและขนาดโมเลกุลของสีย้อมก็มีผลต่อการยึดติดหรือมีผลกระทบต่อการใช้เป็นอย่างมาก เช่น ถ้าโมเลกุลของสีย้อมยิ่งเล็กและยาวเท่าไรก็จะผ่านช่องว่างเข้าไปในเส้นใยได้มากขึ้นเท่านั้น ซึ่งทำให้การติดสีดีขึ้น หรือถ้าโมเลกุลของสีย้อมมีลักษณะแบนและมีความกว้างความยาวมากๆ จะทำให้เกิดการติดสีที่มีความคงทนสูงมากขึ้น (ราตรีและคณะ, 2543)

2.1.1 คุณสมบัติของสีย้อม

ในสีย้อมแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไปในสภาพสารละลายหรือสารแขวนลอย เช่น ความสามารถในการละลายน้ำ การรวมตัวในสารละลาย การย่อยสลายในระหว่างการย้อมสี อัตราการเกิดปฏิกิริยาการให้และการรับอิเล็กตรอน สำหรับโครงสร้างทางเคมีของสีแต่ละชนิดมีความสัมพันธ์โดยตรงกับคุณสมบัติของสี ดังนี้

1. ความเหมาะสมต่อเส้นใยชนิดหนึ่งๆจะขึ้นอยู่กับอนุโมลของสีย้อมและเส้นใย
2. ความสามารถที่จะเข้ากันได้ดีกับเส้นใยหนึ่ง
3. จลศาสตร์ของสีย้อม
4. คุณสมบัติการเคลื่อนตัวและความสม่ำเสมอของสี

5. ความทนต่อแสง
6. ความทนต่อความชื้น
7. ความทนต่อความร้อน และอื่นๆ

การเลือกสีย่อมต้องเลือกตามชนิดของวัตถุที่จะย้อม มีความคงทนพอดีสามารถย้อมออกมาได้เหมือนสีตามตัวอย่าง และมีราคาถูกลงตามต้องการ

2.1.2 สัญลักษณ์ของสี

สีย้อมที่ผลิตขึ้นมาในท้องตลาดมีจำนวนมาก และมักมีสีสันทึบใกล้เคียงกันยากต่อการจดจำ เช่น สีฟ้าก่อนไปทางแดงหรือฟ้าก่อนไปทางเหลือง ดังนั้นจึงกำหนดให้มีสัญลักษณ์ของสีเพื่อสะดวกต่อการจำแนกสี ดังแสดงในตารางที่ 2.1-2.3 (ราตรีและคณะ , 2543)

ตารางที่ 2.1 สัญลักษณ์ของสี (ราตรี และคณะ, 2543)

สัญลักษณ์	สี
บี(B)	สีน้ำเงิน
จี(G)	สีเขียวหรือเหลือง
เจ(J)	สีเหลือง
เอ็ม(M)	สีแดงคล้ำ
อาร์(R)	สีแดง
วี(V)	สีม่วง
วาย(Y)	สีเหลือง
เอ(A)	เข้มขึ้นมาก
อี(E)	เข้มขึ้นมากที่สุด(Excellent)
โอ(O)	เข้มขึ้นมาก
เอกซ์(X)	เข้มขึ้นเป็นพิเศษ(Extra)
เค(K)	เข้มขึ้น(Konz)

ตารางที่ 2.2 สัญลักษณ์บอกธรรมชาติของสี (ราตรี และคณะ, 2543)

สัญลักษณ์บอกธรรมชาติของสี	ลักษณะ
ซี(C=Chlorine)	ทนต่อสารคลอรีน(ฟอกขาวด้วยไฮโปคลอไรต์ได้)บางครั้งใช้สัญลักษณ์ Cl ซึ่งมีความหมายเช่นเดียวกัน
ดี(D=Discharge)	สามารถลอกสีออกได้ดี
ดี(Disperse)	สีชนิดกระจายตัวได้
เอฟ(F=Fast)	ความคงทนดี สีไม่ตก (สัญลักษณ์ตัวนี้จะระบุก่อนอย่างอื่น)
เอฟ(F=Fine)	ให้สีสดไม่มีสิ่งอื่นปน (ระบุเป็นตัวสุดท้าย)
เอช(H=Half Wool)	ใช้กับผ้าขนสัตว์ปั่นฝ้ายหรือปนเรยอนได้
เค(K=Kait)	ใช้ย้อมเย็นได้
แอล(L=Light)	ทนแสงได้ดี
เอ็น(N=Neutral)	อาจย้อมในน้ำย้อมที่เป็นกลางได้
พี(P=Perion)	เหมาะสำหรับใช้ย้อมในลอน
เอส(S=Soluble)	ละลายน้ำได้ดี
เอส(S= Silk)	เหมาะสำหรับใช้ย้อมไหม
ที(T=Tannin)	เหมาะสำหรับพิมพ์ลอกสีด้วยแทนนิน
ยู(U=Ultra)	กระจายตัวได้ดีเป็นพิเศษ
ดับเบิลยู(W=Washing)	ทนต่อการซักได้ดี
ดับเบิลยู(W=Wool)	สีไคเรคท์เหมาะสำหรับย้อมขนสัตว์

ตารางที่ 2.3 สัญลักษณ์บอกคุณภาพของสี (ราตรี และคณะ, 2543)

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

2.1.3 การตั้งชื่อสี

สมาคมผู้ประกอบการย้อมสีในอเมริกา (American Association of Textile Chemists and Colorists) และสมาคมผู้ประกอบการย้อมสีในประเทศอังกฤษ (Society of Dye and Colorists) ได้ร่วมกันจัดทำทะเบียนรายชื่อสีที่มีจำหน่ายในท้องตลาดขึ้นเรียกว่า ดัชนีสี (Color Index) โดยตั้งชื่อให้กับสีแต่ละตัวเรียกว่า C.I. Generic Name โดยมีองค์ประกอบ ดังนี้

C.I. + ชื่อประเภทของสี + เฉดสี + หมายเลขลำดับ

โดยที่ประเภทสีแบ่งออกเป็น 15 ประเภท คือ Acid, Azoic, Direct, Disperse, Fluorescent brighteners, Food, Ingrain, Leather, Mordant, Oxidation, Pigment, Reactive, Solvent, Sulfur และ Vat ส่วนเฉดสีจะแบ่งออกเป็น 8 เฉดสี คือ สีเหลือง (yellow), ส้ม (orange), แดง (red), ม่วง (violet), ฟ้า (blue), เขียว (green), น้ำตาล (brown) และ ดำ (black) (ราตรี และคณะ 2543) ตัวอย่างการเรียกชื่อสี เช่น C.I. Acid Yellow 1 หมายถึง สีแอซิดสีเหลืองหมายเลขหนึ่ง

2.1.4 องค์ประกอบของสีย้อม

สามารถจำแนกออกเป็นกลุ่มได้ดังนี้

2.1.4.1 กลุ่มโครโมฟอร์ (Chromophores group) เป็นกลุ่มที่มีพันธะคู่สามารถให้สีได้โดยสามารถดูดกลืนรังสีในช่วงอัลตราไวโอเล็ต (UV range) และช่วงที่มองเห็นได้ (visible range; VS) ตั้งแต่ 200-800 นาโนเมตร ตัวอย่างโครโมฟอร์ ได้แก่

C = C ethylene chromophores

C = O carbonyl chromophores

- N = O nitroso chromophores

- NO₂ nitro chromophores

- N = N azo chromophores

2.1.4.2 กลุ่มออกโซโครม (Auxochrom group) เป็นกลุ่มที่ทำให้สีเกาะติดกับเส้นใย ปกติแล้วหมายถึง saturated group ซึ่งมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว และไม่สามารถดูดกลืนรังสีที่มีความยาวคลื่นเกิน 200 นาโนเมตร แต่เมื่อไปเกาะในตำแหน่งที่ติดกับโครโมฟอร์จะทำให้เกิด resonance interaction ทำให้โครโมฟอร์ดูดกลืนรังสีที่มีความยาวคลื่นมากขึ้น ตัวอย่างออกโซโครม ได้แก่

- OH hydroxyl

- NH₂ amino

- COOH carboxylic

2.1.5 แหล่งกำเนิดของสีย้อม

สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

2.1.5.1 สีย้อมธรรมชาติ (Natural dyes) เป็นสีย้อมที่ได้จากพืชและสัตว์ เช่น สีดำจากผลมะเกลือ สีคราม ได้มาจากต้นคราม หรือสีม่วงแดง ได้มาจากครั่ง นอกจากนี้ ยังมีเปลือกไม้หลายชนิดที่นำมาย้อมเสื้อได้

2.1.5.2 สีสังเคราะห์ (Synthetic dyes) William Henry Perkin เป็นคนแรกที่สังเคราะห์สีม่วงอ่อน (Mauve) ขึ้น โดยบังเอิญจาก Alinine ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ หลังจากนั้นจึงเกิดสีสังเคราะห์นานาชนิดขึ้น เช่น สีแดง(Fuchsin) สีส้มและเหลือง(Azo dyes) และสีชมพู (Phenolphthalein) ปัจจุบันนิยมใช้สีสังเคราะห์มากขึ้น เพราะราคาถูกกว่า สวยกว่า ทนทานกว่า มีสีให้เลือกมากมาย การย้อมให้สีสม่ำเสมอไม่เป็นด่าง เป็นดอกดวง

2.1.6 การจำแนกประเภทของสีย้อม

สีย้อมสามารถจำแนกออกได้เป็นลักษณะใหญ่ๆตามลักษณะทางกายภาพ การใช้งาน และ โครงสร้างทางเคมีได้ดังนี้ (กรองกาญจน์, 2530)

2.1.6.1 จำแนกตามลักษณะทางกายภาพ สีย้อมสามารถจำแนกตามลักษณะทางกายภาพได้เป็น 2 ชนิด คือ สีชนิดละลายน้ำได้ ได้แก่ สีแอซิด (Acid dyes) สีเบสิด (Basic Dyes) สีไคเร็กซ์ (Direct Dyes) สีรีแอคทีฟ (Reactive dyes) และสีชนิดที่ไม่ละลายน้ำ เช่น สีอะโซ (Azo dyes) สีดีสเพอร์ส (Disperse dyes) สีแว้ต (Vat dyes) สีพิกเมนต์ (Pigment dyes) สีซัลเฟอร์ (Sulfur dyes) สีเมทัลคอมเพล็กซ์ (Metal complex dyes)

2.1.6.2 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)

โครงสร้างทางเคมีเป็นสารประกอบอะโรมาติกที่มีหมู่ไนโตร (-NO₂) และหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) หรือหมู่อะมิโน (-NH₂) ในตำแหน่งที่ติดกัน หรือตรงกันข้ามในวงแหวนวงเบนซีน โครงสร้างของสารประกอบอะโรมาติกเป็นโครงสร้างควิโนดอยด์ (Quinodoid) แบ่งออกเป็นสีซัลโฟเนตเตดไนโตร (Sulfonated nitro dyes) ใช้สำหรับย้อมขนสัตว์ และสีอันซัลโฟเนตเตดไนโตร (Un sulfonated nitro dyes) เป็นสี pigment

3. สีอะโซ (Azo dyes)

เป็นสีที่มีหมู่อะโซ ($-N=N-$) หนึ่งกลุ่มหรือมากกว่า ทำหน้าที่เป็น โครโมฟอร์ 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 ซึ่งสีย้อมนี้ใช้ย้อมได้กับเส้นใยทุกชนิด (อังคณา, 2540)

4. สีอะโซอิก (Azolic dyes)

เป็นสีอะโซที่ไม่ละลายน้ำและตัวทำละลายต่างๆ ต้องเตรียมขึ้นบนเส้นใย มีโครโมฟอร์และออกโซโครมเหมือนสีอะโซ

5. สีสติลบีน (Stilbene dyes)

โครงสร้างมีสติลบีน ($C_6H_5-CH=CH-C_6H_5$) และหมู่อะโซเป็นโครโมฟอร์

6. สีคาโรทีนอยด์ (Carotenoid dyes)

โครงสร้างมีหมู่โซพอลิอิน (Polyene) ของคาร์บอนอย่างน้อย 18 อะตอมเป็นโครโมฟอร์ สีชนิดนี้เป็นสีทั่วไปที่พบในธรรมชาติ สำหรับสีคาโรทีนอยด์ที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อใช้เป็นสีผสมอาหาร เช่น เบตา-คาโรทีน (β -Carotene) เป็นต้น

7. สีไดฟีนิลมีเทน (Diphenylmethane dyes)

โครงสร้างหลักเป็นไดฟีนิลมีเทนมีหมู่อินนีน ($-C=NH$) เป็นโครโมฟอร์ และหมู่อะมิโนเป็นออกโซโครมส่วนใหญ่ใช้ย้อมกระดาษ นอกจากนี้ อาจใช้ย้อมขนสัตว์ ไหม หนัง ฝ้าย หรือเส้นใยอะคริลิก

8. สีแซนทีน (Xanthrene dyes)

โครงสร้างหลักเป็นแซนทีน (Dibenzo-1,4-pyran) และมีหมู่อะมิโนหรือหมู่ไฮดรอกซิลเป็นออกโซโครม โครโมฟอร์เป็นโครงสร้างควิโนดอยด์ นิยมเรียกสีชนิดนี้ว่า สีอะมิโนแซนทีน (Amino xanthrene dye) หรือสีไฮดรอกซิลแซนทีน (Hydroxyl xanthrene dye) สีย้อมกลุ่มนี้ให้สีสดใส เนื่องจากสารละลายให้ฟลูออเรสเซนซ์ ใช้ย้อมขนสัตว์และไหมได้ ใช้ย้อมผ้าฝ้ายโดยใช้แทนนินเป็นมอร์แดนท์

9. สีอะคริดิน (Acridine dyes)

โครงสร้างหลักเป็นอะคริดินและมีหมู่อะมิโนเป็นออกโซโครม มีโครโมฟอร์เป็นโครงสร้างควิโนดอยด์ สีชนิดนี้นิยมใช้ย้อมหนัง และใช้เป็นสีเบสิกสำหรับย้อมไหมและเซลลูโลส

10. สีควิโนลิน (Quinoline dyes)

โครงสร้างหลักเป็นควิโนลิน สีกุ่มนี้มีโครโมฟอร์คือ 2(2-Quinoly)-1,3-indandiene สีพวกนี้นิยมใช้เป็นตัวทำละลายและสีเบสสำหรับย้อมกระดาษ

11. สีแอนทราควิโนน (Anthraquinone dyes)

โครงสร้างหลักคือ แอนทราควิโนนเป็นโครโมฟอร์ และมีหมู่อะมิโนหรือหมู่ไฮดรอกซิลเป็นออกโซโครม นิยมใช้เป็นสีวัต สีแอซิด สีมอร์แดนท์

12. สีอินดิโกอยด์ (Indigoid dyes)

โครโมฟอร์ คือ $-CO-C=C-CO-$ และหมู่อะมิโนหรือซัลเฟอร์เป็นออกโซโครม ใช้เป็นสีวัตในการย้อมผ้า

13. สีไทอะโซล (Thiazole dyes)

โครงสร้างหลักคือ วงแหวนไทอะโซลเป็นโครโมฟอร์ มีหมู่อะมิโนเป็นออกโซโครม ชนิดนี้ใช้ย้อมผ้าได้โดยตรง

14. สีซัลเฟอร์ (Sulfur dyes)

เป็นสีที่มีกำมะถัน (S) เป็นองค์ประกอบของโครงสร้างทางเคมี สีซัลเฟอร์นี้ไม่ละลายน้ำ และสีไม่ติดเส้นใย ต้องเปลี่ยนให้อยู่ในสารประกอบลิโว (Leuco compound) โดยทำปฏิกิริยากับโซเดียมซัลไฟด์ (Sodium sulfide) หรือโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ (Sodium hydrosulfide) ก่อน ทำให้สีเกาะติดเส้นใย นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส ผ้าไหม และขนสัตว์

15. สีฟธาโลไซยานิน (Phthalocyanin dyes)

สีกลุ่มนี้มี Tetrabenzoporphyrane เป็นโครโมฟอร์ และโครงสร้างโมเลกุลที่สามารถจับโลหะ มีสมบัติคงทนต่อแสง ความร้อน กรดและเบส ใช้สำหรับสีเคลือบผิว หมึกพิมพ์ พลาสติคเส้นใย ยาง เป็นต้น

2.1.7 สีย้อมรีแอกทีฟ (Reactive dyes)

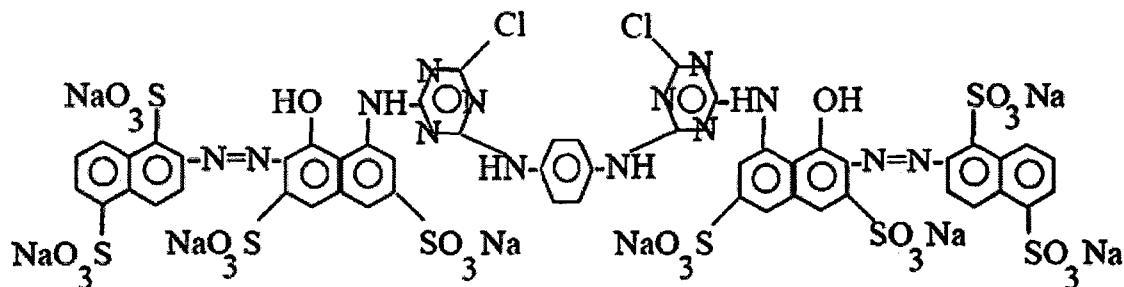
สีรีแอกทีฟเป็นสีที่ใช้มากในอุตสาหกรรมฟอกย้อม (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542) เป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อน ละลายน้ำได้ดี และย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ดี โดยจะมีคุณสมบัติเป็นอออนลบเมื่ออยู่ในน้ำย้อมที่มีฤทธิ์เป็นด่าง ในขณะที่ย้อม โมเลกุลของสีจะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซี (OH) ของเส้นใยเซลลูโลส แล้วเชื่อมโยงติดกันโดยพันธะโควาเลนต์แบบครอสลิงค์ (Cross link) กับเซลลูโลส ได้สารประกอบชนิดใหม่ ทำให้ได้สีที่มีความทนทานต่อการซักฟอก

โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมรีแอกทีฟประกอบด้วย 4 กลุ่ม และสามารถเขียนได้เป็นสัญลักษณ์ของโครงสร้างอย่างง่ายคือ

S - D - T - X

- เมื่อ D = Chromophoric group เป็นกลุ่มที่ทำให้เกิดสี (Chromophore) และสร้างการยึดเกาะ (Substantivity) กับเส้นใยเซลลูโลส
- X = Reactive system เป็นกลุ่มที่ทำให้สียอมเกิดปฏิกิริยากับกลุ่มไฮดรอกซี (OH) ของเส้นใย
- T = Bridging group เป็นกลุ่มที่ทำหน้าที่เชื่อมระหว่าง Reactive system กับ Chromophore ยกตัวอย่างเช่น หมู่ -NH, -NHCO, -SO₂, -NHSO₃ และ -NCH₃ เป็นต้น
- S = Solubilising group คือ กลุ่มที่มีความสามารถในการละลายน้ำสูง และเป็นกลุ่มที่ติดอยู่กับโครโมฟอร์ (Chromophoric group) โดยทั่วไปเป็นพวกกรดซัลโฟนิค (-SO₃Na) ซึ่งอาจมีเพียงกลุ่มเดียวหรือมากกว่า 1 กลุ่ม

ตัวอย่างสูตร โครงสร้างสีย้อม Reactive Red141 แสดงดังรูป 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างสีย้อม Reactive Red141 (Rujira Dolphen et.al)

กลุ่มสีรีแอกทีฟบางครั้งอาจจะติดกับกลุ่มโครโมฟอร์ โดยไม่ต้องมีตัวเชื่อมก็ได้ และกลุ่มสีรีแอกทีฟส่วนใหญ่เป็นสารเฮเทอโรไซคลิกริง (Heterocyclic ring) ซึ่งลักษณะของกลุ่มตัวเชื่อมและส่วนประกอบของเฮเทอโรไซคลิกริง มีอิทธิพลเป็นอย่างมากต่อความสามารถในการทำปฏิกิริยาและคุณสมบัติอื่นๆ ของสี

สีรีแอกทีฟที่เป็นสีเหลือง ส้ม แดง ม่วง น้ำตาล และดำ ส่วนใหญ่จะเป็นโครงสร้างอะโซ (Azo group: -N=N-) ส่วนสีฟ้าหรือน้ำเงิน มีทั้งโครงสร้างอะโซ แอนทราควิโนน และทาโลไซยานีน (Phthalocyanine) สีย้อมอะโซบางชนิดมีโครงสร้างเป็นคอปเปอร์ นอกจากนี้สีดำ สี

น้ำตาลบางชนิด และสีรีแอกทีฟสำหรับย้อมผ้าขนสัตว์ มักมีโครงสร้างทางเคมีของสีรีแอกทีฟตาม โทนสีเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 เปอร์เซนต์โครงสร้างทางเคมีของสีรีแอกทีฟที่แบ่งตาม โทนสี

Chemical class	Distribution in hue sector (%)								% of all Reactive dyes
	Yellow	Orange	Red	Violet	Blue	Green	Brown	Black	
Unmetailisedazo	97	90	90	63	20	16	57	42	66
Metal-complex azo	2	10	9	32	17	5	43	55	15
Anthraquinone				5	34	37		3	10
Phthalocyanine					27	42			8
Miscellaneous	1		1		2				1

ที่มา : โกมล (2541)

2.1.8 ความเป็นพิษของสีย้อม

โดยทั่วไปสีย้อมที่มีความเป็นพิษต่ำ จากประวัติที่มีการเก็บรวบรวมในต่างประเทศ พบว่า ผู้ที่ทำงานในโรงงานฟอกย้อมพื้อมีอัตราการตายหรือการเจ็บป่วยไม่แตกต่างจากบุคคลในอาชีพอื่นแต่อย่างใด (นันทยา, 2537) อย่างไรก็ตามสีย้อมบางชนิดอาจเปลี่ยนแปลงกลายเป็นสารที่มีความเป็นพิษได้ เช่น สีย้อมที่มีโครงสร้างแบบอะโซ ซึ่งเป็ยสีย้อมที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมฟอกย้อม โดยมีการใช้ถึง 60-70% ของสีที่ใช้กันอยู่ สีอะโซจะมีพันธะคู่ของไนโตรเจน (N=N) เป็นหมู่โครโมฟอร์ ซึ่งในสภาวะที่ไม่ใช่ออกซิเจน หมู่อะโซจะถูกทำลายโดยสารรีดิวซ์ (Reducing agent) พันธะอะโซจะแตกตัวออกได้เป็นสารอะโรมาติกเอมีน (Aromatic amine) ซึ่งสารมัธยันต์ (intermediate) ของสารก่อมะเร็ง และเป็นสารก่อมะเร็งในสัตว์ทดลองได้ แต่สารพิษนี้สามารถถูกออกซิไดซ์ต่อไปได้ในสภาวะที่ใช้ออกซิเจน ดังนั้นการบำบัดสีย้อมโดยใช้จุลินทรีย์ในการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนเพียงอย่างเดียว ไม่สามารถใช้เป็นขั้นสุดท้ายในการกำจัดสีย้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ต้องใช้กระบวนการบำบัดแบบใช้ออกซิเจนร่วมด้วย เพื่อให้เกิดการย่อยสลายสีย้อมที่สมบูรณ์ (โกมล, 2541) อย่างไรก็ตามสารอะโรมาติกอะมีนที่ใช้ในอุตสาหกรรมสีที่สามารถก่อให้เกิดมะเร็งมีเพียง 15 ชนิดเท่านั้น โดยทั่วไปแล้วสีอะโซจะไม่แตกตัวให้สารอะโรมาติกอะมีน แต่จะแตกตัวให้กรดอะโรมาติกอะมิโนซัลโฟนิค (Aromatic aminosulphonic acid) ซึ่งไม่ก่อให้เกิดมะเร็งหรือมีโอกาสที่จะก่อให้เกิดมะเร็งน้อยมาก (อังคณา,

2540) สีย้อมอาจเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทางคือ โดยทางหายใจ ด้วยการสูดดมสีที่ฟุ้งกระจายอยู่ในอากาศ โดยการสัมผัสทางผิวหนัง และ โดยการปะปนเข้าไปกับอาหารการกิน

สำหรับผลกระทบของสีย้อมต่อสิ่งแวดล้อม พบว่าสีย้อมเป็นสารที่สลายตัวทางชีวภาพได้ยาก แต่มีความเป็นพิษต่อปลาค่อนข้างต่ำ ดังนั้นปัญหาสำคัญของสีย้อมในน้ำที่ปัจจุบัน จึงไม่ได้อยู่ที่ความเป็นพิษของสีย้อม แต่อยู่ที่สีของน้ำที่ สีย้อมเป็นสารที่มีสีเข้มแม้จะมีสีอยู่ในแหล่งน้ำเพียงปริมาณเล็กน้อยก็ทำให้น้ำมีสีเป็นที่น่ารังเกียจต่อผู้พบเห็น โดยทั่วไปแล้วปริมาณของสีที่ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำแล้วสังเกตเห็นได้จะอยู่ในช่วง 0.1-1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร อย่างไรก็ตาม ยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น ชนิดสี สภาพแสง และระดับความใสของน้ำ และจากการศึกษาของ Brown และ Hamburger (1987) สีย้อมที่ปล่อยมาจากโรงงานย้อมสิ่งทอมีความเข้มข้นประมาณ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่โรงงานจะต้องกำจัดสีจากน้ำทิ้งแม้ว่าสีจะมีความเป็นพิษต่ำก็ตาม

2.1.9 แหล่งกำเนิดและลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

2.1.9.1 แหล่งกำเนิดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

น้ำเสียในการย้อมผ้า เกิดจากกระบวนการต่างๆ ดังนี้

1. กระบวนการต้มเป้ง เป็นการกำจัดเป้งที่ติดมากับกระบวนการทอออก การต้มเป้งเป็นการทำให้เป้งสลายตัวเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้
2. กระบวนการทำความสะอาด เป็นการเอาสิ่งสกปรกที่ติดมากับเส้นใยออกก่อนที่จะนำเอาไปทอเป็นผืนผ้า
3. กระบวนการฟอกขาว เป็นการกำจัดสีธรรมชาติของเส้นใยออกโดยใช้สารเคมีคือ โซเดียมไฮโปคลอไรด์ กระบวนการนี้จะทำก่อนการย้อมเพื่อให้สีติดดียิ่งขึ้นและสีไม่เปลี่ยน
4. กระบวนการชุบน้ำมันเป็นการทำเพื่อให้ผ้าเพิ่มความมันและดูดีดสีได้มากขึ้น
5. กระบวนการย้อมสีและการตกแต่งพิเศษ
6. กระบวนการพิมพ์ผ้า

2.1.9.2 ลักษณะน้ำเสีย

น้ำเสียที่มาจากโรงงานต่างๆ จะมีลักษณะแตกต่างกันไปตามชนิดของเส้นใยที่นำมาย้อม และการใช้กระบวนการย้อมที่แตกต่างกัน ลักษณะน้ำเสียที่มาจากโรงงานฟอกย้อมจะมีลักษณะดังนี้

1. ปริมาณสารอินทรีย์สูง เนื่องจากมีค่า BOD และ COD สูง ปริมาณสารอินทรีย์ที่ได้จากกระบวนการฟอกย้อมได้แก่ เป้ง สีย้อม เส้นใย และด้ายที่ปนออกมาจากกระบวนการย้อมและตกแต่ง ไชมัน และตัวทำลายต่างๆ เป็นต้น

2. มีความเป็นด่างสูง สารที่ทำให้มีลักษณะเป็นด่างคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์และ โซเดียมคาร์บอเนต

3. มีอุณหภูมิสูง

4. มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำสูง ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำมาจากเกลือ โซเดียม และกรดต่างๆ

5. มีสีเข้มมาก ซึ่งมาจากสีที่ใช้ในกระบวนการย้อมผ้า

6. มีโลหะหนักเจือปน โลหะหนักนี้มาจากสีที่ใช้ย้อมผ้า โดยส่วนใหญ่จะเป็น โลหะพวกทองแดง โครเมียม ตะกั่ว และสังกะสี

7. มีปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดสูง

2.1.9.3 ประเภทสิ่งสกปรกที่เจือปนอยู่ในน้ำเสีย

สิ่งสกปรกที่เจือปนในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมจำแนกออกได้ดังนี้

1. สีย้อม ในการย้อมเส้นใยจะมีการดูดซึมสีย้อมได้เพียงบางส่วน ที่เหลือจะยังคงอยู่ในน้ำย้อม และจะถูกปล่อยออกมากับน้ำเสียในที่สุด ปริมาณสีที่ยังคงเหลืออยู่ในน้ำย้อมจะแตกต่างกันออกไปขึ้นกับประเภทที่ใช้

2. สารเคมีที่ช่วยในกระบวนการฟอกย้อม สารเคมีเหล่านี้จะมีอยู่มากมายหลายประเภท ซึ่งส่วนใหญ่จะคงเหลืออยู่ในน้ำย้อมและจะถูกปล่อยออกมาเป็นน้ำเสีย

3. สิ่งสกปรกเจือปนในเส้นใยมีทั้งที่เป็นสารจีฟี่ง ไขมัน โปรตีน ตลอดจนสารประกอบโลหะต่างๆ นอกจากนี้ในกระบวนการผลิตยังมีการเติมสารเคมีต่างๆลงไปในเส้นใยด้วย เช่น พวกสารหล่อลื่น และแป้งที่ใช้ในการลงแป้งเส้นด้ายขึ้น เป็นต้น

4. เศษเส้นใย ในน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมมีองค์ประกอบอันหนึ่งที่จะหลีกเลี่ยงไม่ได้คือ เศษเส้นใยที่หลุดออกมา เศษเส้นใยนี้หากปริมาณมากก็อาจทำให้เกิดการอุดตัน ในเครื่องย้อมได้

2.1.9.4 ภาวะมลพิษที่เกิดจากน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

โดยทั่วไปมลภาวะที่เกิดจากน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมมีดังนี้

1. ความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ น้ำเสียจากน้ำย้อมผ้ามักมีสารที่มีพิษ เช่น สารประกอบแอนิดิน ซึ่งจะมีผลต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำและจุลินทรีย์ในกระบวนการบำบัดทางชีววิทยา

2. การลดลงของออกซิเจนในแหล่งน้ำ น้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าเมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจะทำให้ปริมาณออกซิเจนลดลง เนื่องจากถูกนำไปใช้ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ และใช้ในการทำปฏิกิริยากับสารประกอบไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งเป็นสารประกอบของสีย้อมบางประเภท

3. ทำให้สภาวะทางกายภาพของแหล่งน้ำเสื่อมลง น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมเมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจะก่อให้เกิดความรู้สึกรังเกียจต่อผู้ที่พบเห็น ทำให้ทัศนียภาพไม่น่าดู นอกจากนี้ สีส้อมที่มีปริมาณความเข้มข้นที่สูงจะขัดขวางการเดินทางของแสงลงสู่แหล่งน้ำ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศของแหล่งน้ำนั้น (กรมโรงงานอุตสาหกรรม , 2542)

2.1.9.5 แนวทางการลดของเสียในอุตสาหกรรมฟอกย้อม

แนวทางการลดของเสียในอุตสาหกรรมฟอกย้อม มีดังนี้

1. การเลือกสีย้อมและสารเคมีที่ใช้เหมาะสม

การเลือกใช้สารเคมีที่เหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งในการลดของเสียที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากสารเคมีแต่ละชนิดจะมีความเป็นพิษที่แตกต่างกัน และการใช้ปริมาณสารเคมีหรือสีย้อมในปริมาณที่เหมาะสมเป็นการลดปริมาณสารเคมีส่วนเกิน ซึ่งปริมาณสารเคมีส่วนเกินนั้นจะกลายเป็นมลพิษทางน้ำต่อไป จากการศึกษากระบวนการฟอกย้อมพบว่า หากสามารถลดปริมาณสารเคมีได้ 20-50% จะสามารถลดปริมาณของเสียในน้ำทิ้งในรูปของ BOD ได้ถึงปริมาณ 30-50% ผลอีกประการหนึ่งที่ได้เห็นได้ชัดเจนก็คือค่าใช้จ่ายในการใช้สารเคมีจะลดลงด้วย

2. การนำเทคโนโลยีที่สะอาดมาใช้ในโรงงาน

เทคโนโลยีที่สะอาด หมายถึง เทคโนโลยีที่เป็นการผลิตที่ปราศจากของเสียหรือมีของเสีย น้อยที่สุด แม้ว่าเทคโนโลยีเหล่านี้ส่วนใหญ่ยังคงมีราคาแพงและอาจต้องใช้เวลาในการปรับปรุง โรงงาน เพื่อให้ใช้เทคโนโลยีนี้ให้ค่อนข้างนานแต่ระยะยาว การเลือกใช้เทคโนโลยีนี้จัดเป็น ทางออกที่ดี

3. การลดปริมาณและความสกปรกของน้ำทิ้ง

ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำทิ้งแปรผันตามปริมาณและความสกปรกของน้ำ ดังนั้นการลด ปริมาณและความสกปรกของน้ำย้อมสามารถช่วยลดภาระในการบำบัดน้ำทิ้งของโรงงานลงได้ วิธี ลดปริมาณและความสกปรกของน้ำทิ้งอาจทำได้มากมายหลายทาง เช่น การใช้น้ำด้วยความ ประหยัด การเลือกใช้สีที่มีเปอร์เซ็นต์การดูดติดในเส้นใยสูง เป็นต้น

4. การใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสมมาใช้ในการบำบัดน้ำทิ้ง

น้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมมีความหลากหลายทั้งในด้านคุณภาพและปริมาณ ดังนั้น โรงงานควรเลือกใช้กรรมวิธีในการบำบัดน้ำทิ้งที่เหมาะสมกับลักษณะเฉพาะของโรงงาน เพื่อให้ สามารถดำเนินงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง

5. การนำกลับมาใช้ใหม่

วิธีการลดปริมาณสีสามารถทำได้อีกวิธีหนึ่งคือการนำกลับมาใช้ใหม่หรือใช้ซ้ำอีกเท่าที่จะทำได้ สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการเตรียมควรจะต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมคือ เลือกชนิดที่สามารถใช้ซ้ำได้อีก โดยไม่ทำให้เกิดปัญหาขึ้น เช่น เกิดเป็นจุดบนผ้า (ลันทม, 2535)

2.1.10 การกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากการย้อมผ้า

สีย้อมในน้ำเสียจากกระบวนการย้อมผ้าสามารถถูกกำจัดไปบางส่วนจากการบำบัดน้ำเสียขั้นทุติยภูมิ ไม่ว่าจะเป็นกระบวนการบำบัดด้วยวิธีการทางเคมีหรือทางชีวภาพ ความพยายามที่จะกำจัดสีย้อมที่เหลืออยู่ในน้ำทิ้งให้หมดไปหรือให้มีเหลืออยู่น้อยที่สุด ได้มีการคิดค้นมาเป็นเวลานาน วิธีการบำบัดอาจใช้วิธีใดวิธีหนึ่งหรืออาจจะใช้หลายวิธีร่วมกันก็ได้ ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดขึ้นอยู่กับสารเคมีที่นำมาใช้ในการผลิตสี บางครั้งพบว่าวิธีการเดียวอาจไม่สามารถกำจัดสีย้อมได้อย่างเหมาะสมจึงจำเป็นต้องมีวิธีอื่นร่วมด้วย เนื่องจากโรงงานฟอกย้อมมีการใช้สีย้อมหลายประเภทด้วยกัน วิธีที่ใช้ในการบำบัดสีย้อมในน้ำทิ้งมีดังนี้

2.1.10.1 โคแอกกูเลชันด้วยสารเคมี (Chemical coagulation)

โคแอกกูเลชันหรือการสร้างตะกอนเคมี ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนใหญ่ๆ คือ ขั้นตอนการเติมสารเคมีสร้างตะกอน (coagulation) ซึ่งได้แก่ สารส้ม ปูนขาว เกลือของเหล็ก สารโพลีอิเล็กโทรไลต์ (polyelectrolyte) เป็นต้น ผสมกับน้ำเสียที่มีตะกอนแขวนลอยเล็กๆ ขั้นตอนที่สอง คือ การกวนอย่างช้าๆ เพื่อให้เกิดสภาพรวมตะกอน (flocculation) ซึ่งได้มีการเกาะกันระหว่างตะกอนแขวนลอยเล็กๆ กับสารสร้างตะกอน จนได้ตะกอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจนสามารถตกตะกอนได้ สาเหตุที่ต้องทำการกวนอย่างช้าๆ เพราะไม่ให้สภาพการเกาะตัวกันเกิดการแตกหลุดจากกันของตะกอนเล็กๆ เหล่านั้น การหาปริมาณสารเคมีที่ต้องการใช้ในการสร้างตะกอนจำเป็นต้องทำการทดลองที่เรียกว่า จาร์เทส (Jar test) โคนการทดลองจะมีทั้งการกวนเร็ว 100 รอบต่อนาที ประมาณ 1 นาที ตามด้วยการกวนช้า 20-70 รอบต่อนาที ประมาณ 20 นาที ในกระบวนการกำจัดสีย้อมด้วยโคแอกกูเลชันนั้นมีสารเคมีสร้างตะกอนให้เลือกหลายชนิด การเลือกใช้สารสร้างตะกอนขึ้นอยู่กับความเหมาะสม โดยดูปัจจัยด้านประสิทธิภาพค่าใช้จ่าย วัสดุประสงค์ และอื่นๆ

2.1.10.2 การดูดซับสี (Adsorption)

การดูดซับสีเป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ ซึ่งอยู่ในรูปของเหลวหรือก๊าซให้มาเกาะจับหรือติดบนผิวโมเลกุลหรือคอลลอยด์เรียกว่า สารดูดซับ (adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับเรียกว่า สารดูดซับ (adsorbent) และเรียกกลไกตั้งแต่โมเลกุลหรือคอลลอยด์เคลื่อนที่ไปเกาะติดพื้นผิวของอีกสารหนึ่งว่า การดูดซับสี (adsorption) การเกาะจับโมเลกุลบนผิวของสาร อาจเกิดขึ้นด้วยแรงทางกายภาพ เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) หรือด้วยแรงทางเคมีหรือทั้งสองอย่างรวมกัน โดยทั่วไปการดูดซับสีในกระบวนการกำจัด

สีและกลิ่นในน้ำประปา และกระบวนการกำจัดสีในน้ำเสีย นิยมใช้ถ่านกัมมันต์ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง จึงทำให้มีความสามารถในการดูดติดผิวสูง

2.1.10.3 คลอรีนชัน (Chlorination)

คลอรีนชันเป็นวิธีการกำจัดสีโดยใช้คลอรีนเป็นตัวออกซิไดซิงเอเจนต์ (Oxidizing agent) ซึ่งมีอำนาจออกซิไดซ์สูง ไปทำปฏิกิริยากับสีที่อยู่ในน้ำทิ้ง ทำให้สีหายไปหรือลดปริมาณสีลง ปริมาณสีที่ลดลงขึ้นอยู่กับปริมาณและความเข้มข้นของคลอรีนที่ใช้ คลอรีนที่ใช้จะอยู่ในรูปของก๊าซคลอรีน สารประกอบไฮโปคลอไรท์ (Hypochlorite) และคลอรีน ไดออกไซด์ (Chlorinedioxide)

2.1.10.4 โอโซนเนชัน (Ozonation)

โอโซนเนชันเป็นการกำจัดสีในน้ำเสียโดยใช้โอโซน (O_3) เป็นตัวออกซิไดซิงเอเจนต์ไปทำปฏิกิริยากับสีที่อยู่ในน้ำทิ้งเช่นเดียวกับการใช้คลอรีน แต่โอโซนมีความสามารถในการออกซิไดซ์สูงกว่าคลอรีนเกือบ 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 ถ้าใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์แทนอากาศแห้งอาจได้โอโซนเพิ่มเป็น 60-90 กรัม/ลูกบาศก์เมตร โอโซนสามารถทำให้เป็นของเหลวได้ แต่นิยมใช้ในรูปก๊าซมากกว่า โอโซนเป็นก๊าซพิษที่ก่อให้เกิดการระคายเคืองอย่างรุนแรง มนุษย์สามารถทนโอโซนได้ถึง 0.1 ppm โดยปริมาตร โดยไม่เป็นอันตราย แต่ถ้าให้มนุษย์ดมโอโซนเข้มข้นประมาณ 1% (ที่ผลิตได้โดยตรงจากเครื่อง) จะถึงแก่ความตายภายใน 1 นาที

2.1.10.5 เทคโนโลยีในการใช้เมมเบรน (Membrane Technology)

เทคโนโลยีในการใช้เมมเบรนประกอบด้วยวิธีอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration) และ รีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) วิธีอัลตราฟิลเตรชันมีหลักการทำงานของระบบคือ ใช้แผ่นเยื่อกระดาษ (membrane) แบบ porous พวกเซลลูโลสอะซิเตต (Cellulose acetate) หรือพอลิเมอร์สังเคราะห์ต่างๆ และอัดน้ำเข้าไปด้วยแรงดันไม่เกิน 1.034 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร เยื่อกรองจะทำหน้าที่แยกสารปนเปื้อนทั้งแบบละลายน้ำและตะกอนเล็กที่มีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 500-500,000 และขนาดตั้งแต่ 2×10^{-6} ถึง 1×10^{-2} มิลลิเมตรได้ สำหรับวิธีรีเวอร์สออสโมซิสสามารถแยกสารปนเปื้อนที่มีขนาดตั้งแต่ 4×10^{-7} ถึง 6×10^{-5} มิลลิเมตร ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าวิธีอัลตราฟิลเตรชัน นิยมใช้ในการแยกเกลือที่ละลายน้ำได้ด้วยการกรองผ่านเยื่อกรองแบบเยื่อกึ่งซึมผ่านได้ (semipermeable membrane) ณ ความดันตั้งแต่ความดันบรรยากาศจนถึง 6,900 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร ระบบนี้ประกอบด้วยแผ่นเยื่อกรอง ตัวถัง และเครื่องสูบน้ำที่ให้ความดันสูง พวกแผ่นเยื่อกรองที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่ เซลลูโลสอะซิเตต และไนลอน

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

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

2.1.10.6 เทคนิคทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Technique)

เทคนิคทางเคมีไฟฟ้าหรืออิเล็กโตรเคมีคัลเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพดีวิธีหนึ่ง แต่ใช้กันน้อยมากในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม วิธีนี้ใช้ในการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสีย อุตสาหกรรมต่อมาได้มีการปรับปรุงเพื่อนำมากำจัด BOD COD SS และสีในน้ำทิ้ง ลักษณะการทำงานมีองค์ประกอบหลักคือ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC power source) ขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้ว (electrode) และสารละลายนำไฟฟ้า (electrolyte solution) เมื่อทำการผ่านกระแสไฟฟ้าสู่เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ผ่านแผ่นเหล็ก (Fe) เป็นขั้วไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.2 พบว่าที่ขั้วบวก (anode) จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของเหล็ก ซึ่งทำให้แผ่นเหล็กเกิดการสึกกร่อนและละลายออกมาในรูปของเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ที่ละลายอยู่ในน้ำ เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณของ Fe^{2+} จะเพิ่มปริมาณมากขึ้นในขณะที่ขั้วลบ (cathode) จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำ ซึ่งน้ำจะเกิดการแตกตัวให้ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เมื่อเวลาผ่านไปน้ำจะมีสภาพเป็นด่าง และทำให้เกิดตกตะกอนของเฟอร์รัสไอออนและเฟอร์ริกไอออนซึ่งจะดูดติดและช่วยตกตะกอนของโลหะหนัก สีย้อมหรือสิ่งปนเปื้อนต่างๆ ในน้ำเสีย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

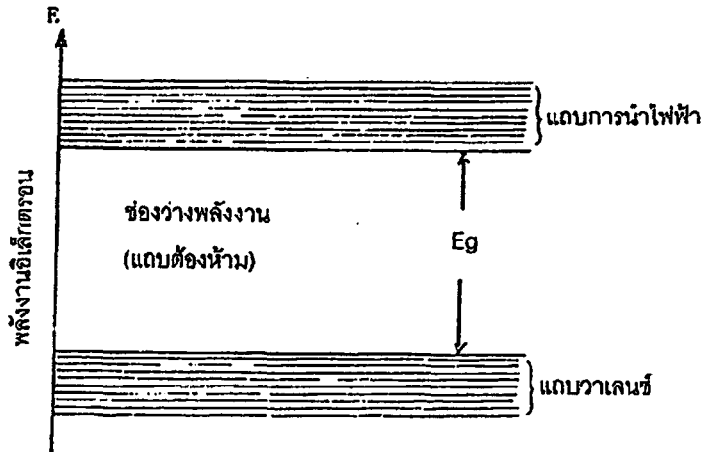
2.2 กระบวนการโฟโตแคตาไลติก

2.2.1 กระบวนการโฟโตออกซิเดชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา หรือโฟโตแคตาไลติกออกซิเดชัน (Photocatalytic Oxidation)

กระบวนการโฟโตแคตาไลติกออกซิเดชัน เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เร่งปฏิกิริยาที่ใช้แสง (Photoreaction) ซึ่งในกระบวนการเร่งปฏิกิริยานี้เป็นแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous catalysis) (ทบวงมหาวิทยาลัย, 2533) คือการเร่งที่ผิวหน้าระหว่างสถานะที่ต่างกันของระบบที่มีมากกว่าหนึ่งสถานะ โดยทั่วไปโมเลกุลของสารตั้งต้นจะถูกดูดซับ (adsorbed) ไว้บนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา แล้วปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โมเลกุลที่ถูกดูดซับจะเกิดการเปลี่ยนแปลงในแง่ของการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนและบางพันธะของโมเลกุลจะเริ่มสลาย

ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตแคตาไลติกออกซิเดชันนี้ เป็นวัสดุกึ่งตัวนำทั้งนี้เพื่อที่จะให้เข้าใจการเกิดปฏิกิริยาจึงจำเป็นต้องศึกษาและทำความเข้าใจกับโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำจะมีแถบพลังงานอยู่สองแถบ คือ แถบวาเลนซ์ (Valence band) และแถบการนำ

ไฟฟ้า (Conduction band) แถบพลังงานทั้งสองนี้จะถูกแยกจากกัน โดยมีแถบช่องว่างพลังงาน (Band Gap) ซึ่งมีช่องว่างพลังงาน หรือแถบต้องห้าม (E_g) กั้นอยู่ ดังแสดงดังรูปที่ 2.2

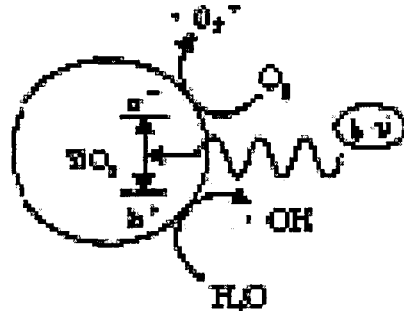


รูปที่ 2.2 โครงสร้างของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ

กระบวนการโฟโตแคตาไลติกออกซิเดชันในสารละลาย (Aqueous phase) มีหลักการเกิดปฏิกิริยาดังนี้คือ แสง (Photon) ซึ่งมีพลังงานเท่ากับหรือสูงกว่าช่องว่างพลังงาน E_g อนุภาคของสารกึ่งตัวนำ ได้มาตกกระทบที่ผิวหน้าอนุภาคสารกึ่งตัวนำ ทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นและเปลี่ยนที่อยู่จากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดโฮล (Hole) หรือสภาวะขาดอิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์ แสดงด้วยสัญลักษณ์ h^+ ซึ่งโฮลที่เกิดขึ้นในแถบวาเลนซ์ เป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่ดี (Strong oxidation) ในขณะที่แถบการนำไฟฟ้ามีอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นจากการกระตุ้นแทนด้วยสัญลักษณ์ e^- ส่งผลให้แถบการนำไฟฟ้าในสภาวะนี้ ทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนที่ดี ซึ่ง h^+ และ e^- สามารถที่จะกลับมาอยู่ในสภาวะเดิมได้อีก เรียกว่า รีคอมไบเนชัน (Recombination) โดยการให้และรับอิเล็กตรอนกับสารอื่นๆที่อยู่ในสารละลาย เช่น ในกรณีที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำสัมผัสกับสารละลายที่มีสารอินทรีย์เป็นส่วนประกอบ (Solid-liquid interface) อิเล็กตรอนจากผู้ให้อิเล็กตรอน เช่น สารอินทรีย์ในสารละลายสามารถถ่ายเทไปสู่โฮลที่เกิดขึ้นในแถบวาเลนซ์ ปฏิกิริยานี้เรียกว่าปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ในขณะเดียวกันอิเล็กตรอนสามารถที่จะเคลื่อนย้ายจากแถบการนำไฟฟ้าไปสู่ตัวรับอิเล็กตรอน (Acceptor) เช่น ก๊าซออกซิเจนในสารละลายได้ ปฏิกิริยานี้เรียกว่า ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ดังแสดงในรูปที่ 2.3

อนุภาคสารกึ่งตัวนำที่นิยมใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาก็คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เนื่องจากมีเสถียรภาพต่อสารเคมี ไม่ละลาย สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ในปริมาณสูง มี

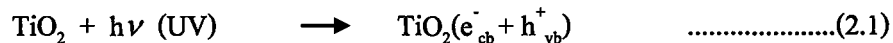
ประสิทธิภาพสูง ราคาถูกและไม่อันตราย มีช่องว่างพลังงาน E_g ไม่สูง ($E_g > 3.2$ อิเล็กตรอน โวลต์) และดูดซับแสงที่ความยาวคลื่นต่ำ ประมาณ 390 นาโนเมตร (วูทชินันท์, 2544)



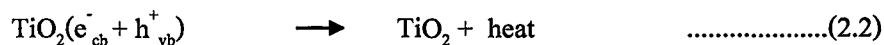
รูปที่ 2.3 ปฏิริยาการเกิดโฮลของสารกึ่งตัวนำ และปฏิริยาที่เกิดขึ้นที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ

กระบวนการโฟโตแคตาไลติกออกซิเดชัน โดยมีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิริยา

เนื่องจาก TiO_2 เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง ดังนั้นเมื่อได้รับพลังงานกระตุ้นจากแสงยูวี ทำให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์เคลื่อนที่ไปยังแถบการนำไฟฟ้า เกิดเป็น e_{cb}^- และ h_{vb}^+ ดังสมการ

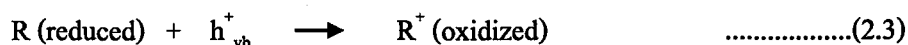


ในสภาวะที่ไม่มีตัวให้หรือรับอิเล็กตรอน (Electron donor หรือ Electron acceptor) e_{cb}^- และ h_{vb}^+ ที่เกิดขึ้นจะกลับมารวมตัวกันอีกภายในระยะเวลาอันรวดเร็ว และจะได้รับความร้อนออกมา ดังสมการ

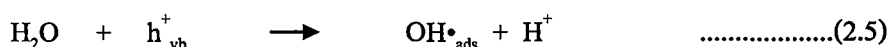
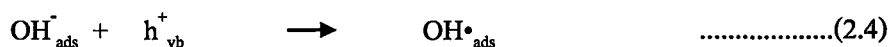


ในสภาวะที่มีสารอินทรีย์ปนเปื้อนในสารละลาย การย่อยสลายของสารอินทรีย์อาจเกิดได้จากวิธีใดวิธีหนึ่งดังต่อไปนี้คือ

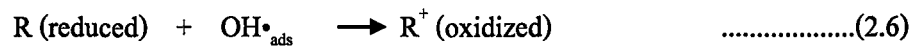
1. สารอินทรีย์ (R) ทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนกับโฮลในแถบวาเลนซ์ (h_{vb}^+) ของไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังสมการ



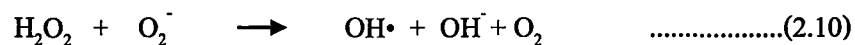
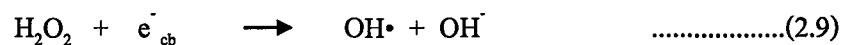
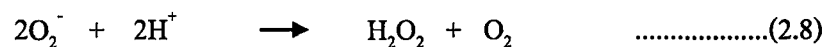
2. โฮลในแถบวาเลนซ์ (h_{vb}^+) ทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนจาก OH^- และ H_2O ที่ติดกับผิวอนุภาค TiO_2 (OH_{ads}^- และ H_2O_{ads}) เกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\text{OH}\cdot$) ดังสมการ



ไฮดรอกซิลเรดิคัล เป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่แรง (Strong oxidizing agent) มีความไวในการทำปฏิกิริยาสูง (Highly reactive) และทำหน้าที่สลายโมเลกุลสารอินทรีย์ในสารละลายที่ดูดติดผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังสมการ



3. อิเล็กตรอนที่แถบการนำไฟฟ้า (e^-_{cb}) ทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจน (O_2) ที่ดูดติดผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้โมเลกุลของก๊าซออกซิเจนเปลี่ยนไปเป็นซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล (O_2^-) ซึ่งสามารถที่จะทำปฏิกิริยาต่อไปได้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และเกิดปฏิกิริยากับ e^-_{cb} ทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ($OH\cdot$) ตามลำดับ ดังสมการ



2.2.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกออกซิเดชัน ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อ

กระบวนการโฟโตแคตตาไลติกออกซิเดชัน ได้แก่ ค่าพีเอช, ปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2 Dosage), ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนตั้งต้น (Initial Substrate Concentration), อุณหภูมิ, ปริมาณออกซิเจนละลาย (Dissolved oxygen), ความเข้มข้นของแสง (Light intensity) และปริมาณไอออนบวก-ลบในสารละลาย (Dissolved anions-cations)

1) ค่าพีเอช ประสิทธิภาพในกระบวนการโฟโตออกซิเดชันขึ้นอยู่กับค่าพีเอชในสารละลาย ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากค่าพีเอชมีผลต่อความสามารถในการดูดเกาะของสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาในสารละลาย เพราะประจุไฟฟ้าที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเมื่อค่าพีเอชสูงหรือต่ำ โดยประจุที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจะเป็นบวกที่ค่าพีเอชต่ำและจะเป็นลบเมื่อค่าพีเอชสูง สำหรับไทเทเนียมไดออกไซด์ ค่าพีเอชที่ทำให้ประจุเป็นกลางเท่ากับ 6-6.3 จากการศึกษาของ Tang และคณะ (1997) สรุปว่าโฮล (h^+_{vb}) จะมีอิทธิพลต่อกระบวนการโฟโตแคตตาไลซิส (Photocatalysis) เมื่อค่าพีเอชน้อยกว่า 3 ในขณะที่ไฮดรอกซิลเรดิคัล ($OH\cdot$) มีความสำคัญในการทำปฏิกิริยาที่ค่าพีเอชมากกว่า 3 นอกจากนี้ค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงไป ยังทำให้ค่าช่องว่างพลังงาน Eg ของสารกึ่งตัวนำประเภทเมทัลออกไซด์ (Metal oxide) เปลี่ยนแปลงได้

สีย้อมผ้าต่างชนิดกันมีความสามารถในการสลายตัวได้ในสภาวะค่าพีเอชต่างกัน แต่การสลายตัวของสีย้อมผ้าบางชนิดไม่ขึ้นอยู่กับค่าพีเอช ซึ่งการสลายตัวนี้มีผลมาจากความสามารถในการดูดเกาะของสีย้อมผ้าที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาต่างกัน

2) ความเข้มข้นของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารละลายทำหน้าที่ให้ไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH^\bullet) ทำปฏิกิริยาและเร่งให้เกิดปฏิกิริยาการกำจัดสีและไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่เพียงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางให้สารอินทรีย์ในสารละลายยึดเกาะ การยึดเกาะของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ขึ้นอยู่กับปริมาณและขนาดของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังนั้นพื้นที่ผิวจึงเป็นหนึ่งในปัจจัยควบคุมการเกิดปฏิกิริยา

ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มากเกินไปในสารละลายจะทำปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันลดลงเนื่องจากอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มากเกินไป จะขัดขวางแสงยูวีที่ส่องลงไป สารละลาย ทำให้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่กระตุ้นด้วยอนุภาคของแสง และปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลลดลง ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในการศึกษาเรื่องโฟโตออกซิเดชัน ส่วนใหญ่จะมีปริมาณความเข้มข้น 1-5 กรัม/ลิตร

3) ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนตั้งต้น ข้อมูลวิจัยจำนวนมากได้แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของสีย้อมผ้าตั้งต้นที่ต่ำจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูง Davis และคณะ (1994) ได้ชี้ให้เห็นว่าแสงยูวีจะถูกดูดซับทั้งจากอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่กระจายอยู่ในสารละลายและสีย้อมผ้าในสารละลาย ซึ่งเป็นผลในการลดการส่องผ่านของแสงยูวี แต่ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับโครงสร้างโมเลกุลของสารตั้งต้นด้วยเหมือนกัน ถ้าหากโครงสร้างโมเลกุลมีความซับซ้อนต่ำ เช่น คลอโรฟอร์ม (Chloroform) ความเข้มข้นของสารตั้งต้นจะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัด แต่ถ้าหากโครงสร้างโมเลกุลมีความซับซ้อนมากขึ้น ความเข้มข้นของสารตั้งต้นก็จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการกำจัดมากขึ้นด้วย แต่ในทางตรงกันข้ามจากการศึกษาของ Gupta (1994) ได้ทดสอบสารพีซีอี (Perchloroethylene, PCE) ผลที่ได้คือประสิทธิภาพในการกำจัดจะสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของพีซีอีตั้งต้นสูงขึ้น

การทดลองที่ผ่านมาในอดีต ค่าความเข้มข้นของสีย้อมผ้าตั้งต้นเฉลี่ยที่นิยมใช้ในการทดลองคือ 30 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งมีค่าประมาณ 2000 ADMI (American Dye Manufacturers Institute) และจากการศึกษาของ Langphasuk (1997) พบว่าความเข้มของสีย้อมผ้าในน้ำเสียจากการย้อมผ้าฝ้ายในจังหวัดปทุมธานี มีค่าประมาณ 15-75 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งประมาณ 1000-5000 ADMI

4) อุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราการกำจัดสีในสารละลายจะเพิ่มขึ้น Bing-Nan และคณะ (1999) ได้ทำการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพในการกำจัดสีมีค่ามากกว่าเป็น 2 เท่าที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และเมื่อดูจากทฤษฎีทางจลศาสตร์ อุณหภูมินับเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างมากต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ค่าคงที่อัตราการทำปฏิกิริยาจากสมการของอาร์เรเนียส เขียนได้ดังนี้

$$K = Ae^{E_a/RT} \quad \dots\dots\dots(2.11)$$

เมื่อ k	=	ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา , (นาที) ⁻¹
A	=	แฟกเตอร์แห่งความถี่ , (นาที) ⁻¹
E _a	=	พลังงานกระตุ้น , (จูล/โมล)
R	=	ค่าคงที่ = 8.3143 จูล/โมล เคลวิน
T	=	อุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน)

ซึ่งสามารถหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ได้จากความชันของกราฟลอการิทึม ที่เขียนกราฟระหว่างค่าคงที่อัตราการทำปฏิกิริยา (k) กับค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ 1/T (K)

$$\ln k = - E_a/RT + \ln A \quad \dots\dots\dots(2.12)$$

ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากอัตราการทำปฏิกิริยาของ e⁻_{cb} และ h⁺_{vb} กับสารปนเปื้อนในสารละลายมีค่ามากกว่าอัตราการกลับมารวมตัวกันใหม่ของ e⁻_{cb} และ h⁺_{vb} และอาจเนื่องมาจากความถี่ในการชนกันของโมเลกุลมีมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และอาจเนื่องมาจากการลดลงของพลังงานการกระตุ้นในการทำปฏิกิริยา

5) ปริมาณออกซิเจนละลาย อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของออกซิเจนละลายเพิ่มขึ้น ออกซิเจนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก เพราะออกซิเจนจะยึดเกาะบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา ทำหน้าที่ยึดจับ e⁻_{cb} ที่แถบการนำไฟฟ้า ทำให้เกิดซูเปอร์ออกไซด์ไฮดรอกไซด์ และจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไฮดรอกไซด์ (h⁺) ต่อไปได้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และด้วยเหตุนี้ออกซิเจนจึงทำหน้าที่เป็นตัวยึดเวลาการกลับมารวมตัวกันใหม่ของ e⁻_{cb} และ h⁺_{vb} นอกจากนี้ ออกซิเจนยังทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล

6) ความเข้มของแสง เนื่องจากความเข้มของแสงขึ้นอยู่กับพลังงานของแสงโดยตรง ถ้าให้พลังงานของแสงทั้งหมดที่ตกกระทบหนึ่งหน่วยพื้นที่ของผิวหน้าโลหะเป็น E_T ดังนั้น จำนวนโฟตอนที่ตกกระทบ เท่ากับพลังงานของแสงทั้งหมดที่ตกกระทบ/พลังงานของแสง 1 โฟตอน

เพื่อที่จะกระตุ้นไทเทเนียมไดออกไซด์ ให้เกิด e_{cb}^- และ h_{vb}^+ ต้องใช้ความยาวคลื่นแสงที่ส่องประมาณ 390 นาโนเมตร หรือต้องมีพลังงานอย่างน้อย 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ Ollis และคณะ (1990) ได้สรุปผลของความเข้มแสงที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไว้ว่า ที่ระดับความเข้มแสงต่ำ อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเป็นสัดส่วน โดยตรงกับความเข้มแสง ที่ระดับความเข้มแสงปานกลาง อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะแปรผันตามรากที่สองของความเข้มแสง และที่ระดับความเข้มแสงสูงอัตราการเกิดปฏิกิริยาไม่ขึ้นกับความเข้มแสง และอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะมีค่าคงที่ เมื่อถึงจุดจำกัดของการเคลื่อนย้ายมวล อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพควอนตัมของการสลายตัวจะมีค่าคงที่ที่ระดับความเข้มแสงต่ำและจะแปรผกผันกับรากที่สองของความเข้มแสงที่ระดับความเข้มแสงสูง

7) ปริมาณไอออนบวก-ลบ ในสารละลายโดยปกติแล้วน้ำเสียชุมชนและน้ำเสียอุตสาหกรรมจะมีสารอนินทรีย์ (Anion และ Cation) ประกอบอยู่ด้วยนอกเหนือจากสารอินทรีย์ เช่น แมงกานีส (manganese) สังกะสี (Zinc) คลอไรด์ (Chloride) ไนเตรท (Nitrate) เป็นต้น ซึ่งไอออนบางชนิดจะขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาและบางชนิดจะเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา น้ำเสียที่ถูกลบป้อนด้วยขยสารอินทรีย์ หากมีความเข้มข้นของโลหะสูงในน้ำเสีย อาจจะต้องทำการบำบัดขั้นต้นเพื่อกำจัดโลหะออกบางส่วนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสลายตัวของสารอินทรีย์ในปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชัน

โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และ โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) โดยปกติแล้วจะถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ซึ่ง Bing-Nan และคณะ (1999) ได้ศึกษาพบว่าคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) เป็นตัวยับยั้งการกำจัดสีมากที่สุด รองลงมาได้แก่ คลอไรด์ (Cl) และ ซัลเฟต (SO_4^{2-}) ตามลำดับ และจากการศึกษาของ Haarstrick และคณะ (1996) พบว่าไบคาร์บอเนตและคาร์บอเนตไอออน สามารถยับยั้งการทำปฏิกิริยาของไฮดรอกซิลเรดิคัลได้ แต่ในทางตรงกันข้าม Halmann (1996) ได้ศึกษาพบว่าคาร์บอเนต ไบคาร์บอเนต ไนเตรท และเปอร์คลอเรตไอออน มีผลเล็กน้อยต่อปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชัน

ในสภาวะความเป็นด่าง อัตราการสลาย 2,4,6-TCP (2,4,6-Trichlorophenol) โดยกระบวนการโฟโตออกซิเดชันเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อคลอไรด์ไอออนมีความเข้มข้นมากกว่า 60 มิลลิกรัม/ลิตร การเกิดปฏิกิริยาสามารถถูกขัดขวางได้โดยประจุบวก เช่น Na^+ เนื่องจากประจุบวกสามารถที่จะจับอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก และทำให้เกิดการรวมตัวกันใหม่

ของ e^-_{cb} และ h^+_{vb} Gupta (1994) จากการทดลองของ Davis และ Huang (1991) สรุปได้ว่ามีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยในอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน อันเนื่องมาจากไอออนที่เปลี่ยนไป ซึ่งนี่คือข้อดีอย่างหนึ่งของการใช้กระบวนการโฟโตแคตาไลติก

2.2.3 พลังงานแสง

การฉายแสงในกระบวนการโฟโตแคตาไลติก นั้น เป็นการให้พลังงานกับระบบในรูปแบบของพลังงานโฟตอน (Photon Energy) มากพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาขึ้นได้ ซึ่งพลังงานดังกล่าวนี้ เรียกว่า พลังงานกระตุ้น (Activation Energy) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$E = h\nu = hc / \lambda \quad \dots\dots\dots(2.13)$$

เมื่อ E คือ พลังงานควอนตัม (Quantum Energy), จูล

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant) = 6.625×10^{-34} จูล-วินาที

ν คือ ความถี่ของคลื่นแสง, เฮิร์ตซ์ หรือ วินาที⁻¹

λ คือ ความยาวคลื่นแสง, นาโนเมตร

c คือ ความเร็วของคลื่นแสง = 2.997×10^8 เมตร/วินาที

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

2.2.3.1 คลื่นยาว (Long Wave UV, UV-A) อยู่ในช่วง 400 - 320 นาโนเมตร

2.2.3.2 คลื่นกลาง (Middle Wave UV, UV-B) อยู่ในช่วง 320 - 280 นาโนเมตร

2.2.3.3 คลื่นสั้น (Short Wave UV, UV-C) อยู่ในช่วง 280 - 200 นาโนเมตร

ความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า 200 นาโนเมตร มีความสำคัญน้อยมากเพราะรังสีอยู่ในช่วง Vacuum UV ซึ่งจะถูกดูดกลืนในอากาศจนหมดในช่วงระยะทางสั้นๆ ที่แสงเดินทาง แสงอาทิตย์มีช่วงความยาวคลื่นที่กว้างมาก ความเข้มของแสงยูวีและแสงขาวที่ส่องลงมายังพื้นผิวโลกจะถูกทำให้ลดลงอย่างมากในชั้นบรรยากาศจากการถูกดูดกลืนและการกระเจิงของแสง ที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 320 นาโนเมตร ความเข้มของแสงจะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการถูกดูดกลืนโดยโอโซนในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ (สูงจากพื้นผิวโลกในช่วงประมาณ 10 - 35 ไมล์) และที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 288 นาโนเมตร มีรังสีที่แผ่มาถึงพื้นโลกน้อยดังนั้นแสง UV ที่ส่องมายังพื้นโลกจึงมีขีดจำกัด

ในกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสที่ใช้สารไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นตัวแคตตาลิสต์นั้น เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ มีพลังงานแบนด์แก๊ปประมาณ 3.2 โวลต์ ดังนั้นการให้พลังงานกับระบบจึงต้องให้พลังงานมากกว่าหรือเท่ากับพลังงานแบนด์แก๊ป ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกจึงจะเกิดขึ้นได้ ซึ่งช่วงของแสง UV ที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 400 นาโนเมตร จะให้ค่าพลังงานที่มากกว่าหรือเท่ากับพลังงานแบนด์แก๊ปของไทเทเนียมไดออกไซด์ แต่เนื่องจากแสงอาทิตย์ที่ส่องมายังพื้นผิวโลกมีช่วงแสงที่เป็น UV ในปริมาณน้อยมาก คือเฉพาะช่วง 350 - 400 นาโนเมตรเท่านั้น ปัจจุบันจึงมีงานวิจัยที่มุ่งเน้นการปรับปรุงไทเทเนียมไดออกไซด์ให้มีความสามารถที่จะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงแสงอาทิตย์ลดการใช้หลอดไฟ UV ในกระบวนการโฟโตแคตาไลซิส

2.2.4 ชนิดของโฟโตแคตาไลซิส

โฟโตแคตาไลซิส สามารถแยกได้ 2 ประเภท เมื่อพิจารณาจากสถานะของตัวแคตตาลิสต์ ดังนี้

2.2.4.1 โฟโตแคตาไลซิส แบบสถานะเดียว (Homogeneous Photocatalysis) เป็นกระบวนการที่ใช้แคตตาลิสต์ซึ่งมีสถานะเดียวกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด (โดยทั่วไปแล้วจะเป็นของเหลว) เช่น การย่อยสลาย 2, 4 - Dinitrotoluene โดยใช้ UV/H_2O_2

2.2.4.2 โฟโตแคตาไลซิส แบบสถานะต่าง (Heterogeneous Photocatalysis) เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวแคตตาลิสต์ ซึ่งมีสถานะต่างกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด เช่น การย่อยสลาย 2 - Chlorophenol โดยใช้ UV/TiO_2

สารกึ่งตัวนำมีมากมายหลายชนิด หนึ่งในจำนวนสารกึ่งตัวนำหลายๆ ชนิด ที่นิยมใช้กันในปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ มีราคาไม่แพง ไม่เป็นพิษ ความสามารถในการละลายต่ำ ความเสถียรสูง (ทนทานต่อการกัดกร่อน) นอกจากนั้นได้มีการศึกษาเปรียบเทียบสารกึ่งตัวนำหลายๆ ชนิดที่นำมาใช้ในปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก พบว่าการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบแขวนลอย สามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว แต่เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ มีแบนด์แก๊ปประมาณ 3.2 โวลต์ ซึ่งมากกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ โดยส่วนใหญ่ ทำให้ต้องใช้พลังงานแสงในช่วงของแสงยูวี ($\lambda \leq 400$ นาโนเมตร) ในแสงอาทิตย์ที่ส่องมาถึงพื้นโลกมีแสงยูวี น้อยกว่า 1% ทำให้ไม่สามารถใช้แสงธรรมชาติได้ จำเป็นต้องใช้แสงจากหลอดรังสียูวีเป็นแหล่งกำเนิดแสง (พลังงาน)

2.2.5 ชนิดของตัวแคตาลิสต์

สารที่ใช้เป็นตัวแคตาลิสต์ในปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส ได้แก่

1. โลหะตัวนำ (Transition Metal) เช่น ทองแดง โคโรเนียม นิกเกิล เป็นต้น
2. สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS), สังกะสีออกไซด์ (ZnO) เป็นต้น

การนำสารกึ่งตัวนำมาใช้ในกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสแบบต่างสถานะสามารถพิจารณาออกเป็น 2 แบบได้ดังนี้

แบบแขวนลอย (Slurry) เป็นการนำสารกึ่งตัวนำ มาผสมกับสารละลายอินทรีย์โดยสารกึ่งตัวนำจะแขวนลอยอยู่ในสารละลาย ซึ่งแบบนี้จะประสบปัญหาในการแยกสารกึ่งตัวนำ ออกจากน้ำ ที่ผ่านการบำบัดแล้วซึ่งปัจจุบันยังไม่มีวิธีที่จะแยกสารกึ่งตัวนำแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพเท่าที่ควร

แบบตรึงอยู่กับที่ (Immobilize) เป็นการนำสารกึ่งตัวนำ ไปเคลือบบนตัวกลาง (Media) หรือที่ผิวของถังปฏิกิริยา แบบเคลือบผิวนี้จะสะดวกกว่าในแบบแขวนลอยเนื่องจากไม่ต้องแยกสารกึ่งตัวนำออกจากน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดแล้วแต่จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า การใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ชนิดอนาเทสแบบเคลือบผิวให้ประสิทธิภาพต่ำกว่าแบบแขวนลอยภายใต้สภาวะเดียวกัน

2.3 ลักษณะเฉพาะของสารไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียม (Ti) เป็นโลหะสีเทา มีมวลอะตอมเท่ากับ 47.9 ทนต่อการกัดกร่อนสูงไม่เป็นสารไวไฟ มีเลขออกซิเดชัน +4, +3, +2 แต่สภาพที่พบทั่วไปเป็น +4 ไทเทเนียมไดออกไซด์จะเป็นผงสีขาว มวลโมเลกุล 79.9 เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง ซึ่งมีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ คือ บรูคไคท์ (Brookite) อนาเทส (Anatase) และรูไทล์ (Rutile) โดยที่โครงสร้างผลึก ที่นิยมนำมาใช้สำหรับกระบวนการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำ โดยวิธีกระตุ้นด้วยแสง คือ โครงสร้างผลึกแบบอนาเทสและรูไทล์ ซึ่งมีการจัดเรียงตัวของอะตอมไทเทเนียมเป็นแบบ Orthorhombic และที่อะตอมออกซิเจนเข้าไปเติมเต็มในช่องว่างแบบ Octahedron โดยที่มุมระหว่างแกนของ Octahedron ในรูไทล์มีค่าเท่ากับ 90 และ 81.21 องศาในขณะที่อนาเทสมีค่ามุมระหว่างแกนเท่ากับ 78.12 และ 92.43 องศา

จากการที่ไทเทเนียมไดออกไซด์มีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันนั้น ส่งผลให้โครงสร้างผลึกแต่ละโครงสร้างมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาทางด้านเทอร์โมไดนามิกส์พบว่าพลังงานเสรีของกิบส์ของการเกิดที่ภาวะมาตรฐาน สำหรับไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่มีโครงสร้าง

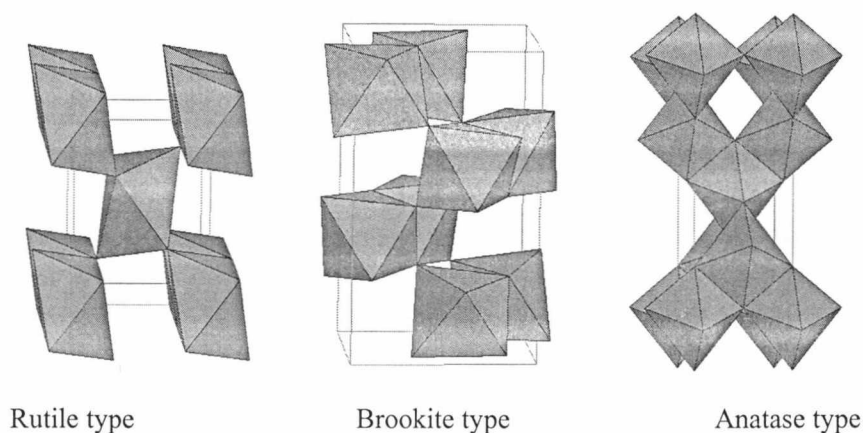
ผลึกแบบอนาเทสมีค่า 884.5 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งมากกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่มีโครงสร้างแบบรูไทล์ที่มีค่า -889.5 กิโลจูลต่อโมล อีกทั้งค่าความหนาแน่นของไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสนั้น มีค่าเท่ากับ 3.894 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในขณะที่ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์นั้นมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 4.250 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

คุณสมบัติที่แตกต่างกันดังกล่าวจึงทำให้ผลึกของโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบอนาเทสนั้นจะมี แบนด์แก๊ป สูงกว่าโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ โดยค่าแบนด์แก๊ปของโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส มีค่าเท่ากับ 3.23 โวลต์ ในขณะที่รูไทล์มีค่าเท่ากับ 3.02 โวลต์ จึงทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์และโครงสร้างผลึกแบบบรูคไคท์การทำให้บริสุทธิ์นั้นทำได้ยาก ส่วนโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ จะเกิดการรวมตัวใหม่ของ e^- และ h^+ ได้ง่ายทั้งยังมีความสามารถในการดูดซับต่ำกว่าโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส ในปัจจุบันจึงเป็นที่นิยมใช้โครงสร้างผลึกแบบอนาเทส มากกว่าแบบอื่น

รูปผลึก ขนาดอนุภาค ผิวหน้าผลึก ปริมาณการรวมเป็นการรวมเป็นผลึกและความบริสุทธิ์ของกระบวนการผลิตถูกควบคุมให้เหมาะสมกับการใช้งาน สารไทเทเนียมไดออกไซด์ มีลักษณะทางเคมีที่ดี ทำให้มีผลข้างเคียงต่อสิ่งแวดล้อมน้อยมาก จึงปลอดภัยและใช้งานได้ง่าย

รูปผลึกของสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่เกี่ยวข้องและกล่าวถึง คือ รูไทล์ และอนาเทส นั้นมีความแตกต่างกัน ด้านการหักเหของแสง ความหนาแน่น และการทำปฏิกิริยาของแสง ซึ่งไทเทเนียมไดออกไซด์ และประจุบวกของออกซิเจน อยู่ในโครงตาข่ายที่มีมากมายหลายแบบ รูปผลึกแบบที่ 3 ซึ่งไม่ได้กล่าวถึงของไทเทเนียมไดออกไซด์ คือ บรูคไคท์ ลักษณะของรูปผลึกชนิดต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.4

รูไทล์ มีรูปผลึกที่แน่นอน สามารถดูดกลืนรังสีเหนือม่วง (Ultra Violet) ได้น้อยกว่าอนาเทสและรูไทล์ มีลักษณะของสีค่อนข้างเหลือง อย่างไรก็ตาม การนำสารไทเทเนียมไดออกไซด์ไปใช้กับแสงที่มีความเข้มสูงเพราะว่า ดัชนีการหักเหแสงสูง และการกระจายของแสงของผลึกชนิดรูไทล์ มีผลกระทบในตัวกลางจับสารอินทรีย์ มากกว่าแบบอนาเทส ประมาณ 20 %



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะของรูปผลึกชนิดต่างๆของไทเทเนียมไดออกไซด์

(ruby.colorado.edu/~smyth/min/tio2.html)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นสารที่ต้องใช้แสงยูวี ในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน กับสารประกอบอินทรีย์ ผิวหน้าผลึกของรูไทล์ ประมาณ 10 เท่า ต่อการเกิดปฏิกิริยานั้นๆ และอนาเทส จะมีการลดลง 10% ของปฏิกิริยาครึ่งชีวิตของ รูไทล์ ดังนั้นสำหรับการใช้งานภายนอก ต้องให้ความสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของผลึก รูไทล์ และปริมาณ 1% ของรังสี X-rays จะไม่สามารถส่องผ่านผลึกของสารชนิดนี้ อีกทั้งสารชนิดนี้สามารถทำให้บริสุทธิ์ได้โดยปฏิกิริยา คลอไรด์ ที่สามารถเกิดขึ้นเองได้ตามธรรมชาติ

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

E. Bizani และคณะ (2006) ศึกษาอัตราการกำจัดสีและการสลายตัวของสีย้อมรีแอกทีฟอะโซทางการค้าสองชนิด คือ Cibacron Red FNR และ Cibacron Yellow FN2R ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก โดยมีไทเทเนียมไดออกไซด์สองชนิดคือ P-25 Degussa และ Hombikat UV-100 เป็นแคตาไลสต์ ปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราการกำจัดสีและการสลายตัวของสีย้อมที่ทำการศึกษา คือ ชนิดของแคตาไลสต์ จลนพลศาสตร์ในการกำจัดสี ค่าพีเอชเริ่มต้น ความเข้มข้นของแคตาไลสต์ และผลของตัวออกซิไดซ์ (H_2O_2 และ $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$) ที่มีต่ออัตราการกำจัดสี การเปลี่ยนแปลงของความเป็นพิษ และการสลายตัวของสีย้อม ผลการศึกษาในกรณีชนิดของแคตาไลสต์พบว่า TiO_2 ชนิด Hombikat UV-100 จะใช้เวลาในการกำจัดสีน้อยกว่า TiO_2 ชนิด P-25 จลนพลศาสตร์การสลายตัวของสีย้อมทั้งสองชนิดเป็นไปตาม Langmuir-Hinshelwood model กรณีของค่าพีเอชเริ่มต้นพบว่าที่ค่าพีเอชเท่ากับ 3 อัตราการกำจัดสีจะเร็วกว่าที่ค่าพีเอชเท่ากับ 7 และ 9 ตามลำดับ ผลของการเพิ่มตัวออกซิไดซ์ คือ H_2O_2

และ $K_2S_2O_8$ ทำให้อัตราของปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น การศึกษาการสลายตัวของสีย้อมทั้งสองชนิด ตรวจวัดจากค่า Dissolved Organic Carbon (DOC) ตรวจสอบลักษณะความเป็นพิษโดยใช้ Microtox bioassay การประยุกต์ใช้กับน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอนั้นมีประสิทธิภาพเพียงพอในการกำจัดสี ซึ่งจะใช้เวลาในการกำจัดสีอย่างสมบูรณ์ภายในเวลา 6 ชั่วโมง

Rongcheng Wu และคณะ (2005) ศึกษาผงแม่เหล็กแมงกานีสเฟอร์ไรต์ในการนำมาใช้เป็นทั้งตัวดูดซับ และตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดสีย้อมเอโซ ARB (Acid Red B) ซึ่งผงแม่เหล็กชนิดนี้สามารถทำการคัดแยกออกจากสารละลายได้ด้วยวิธีการคัดแยกด้วยแม่เหล็กได้มากกว่าร้อยละ 99 โดยเตรียมผงแม่เหล็กที่มีอัตราส่วนแมงกานีสต่อเหล็ก 3 อัตราส่วน คือ 2:3, 1:2 และ 1:3 และที่มีการเคลือบด้วยเหล็กอีก 1 อัตราส่วน สำหรับศึกษาคุณสมบัติการดูดซับ ผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง และ ไอออนลบ (Cl^- และ SO_4^{2-}) ต่อการดูดซับ และการนำผงแม่เหล็กที่ผ่านการใช้งานแล้วมาทำการบำบัดเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่โดยการเผาไหม้แบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา จากการศึกษา ผลปรากฏว่าผงแม่เหล็กชนิดนี้สามารถดูดซับสีย้อม ARB ได้ดีในสภาวะที่สารละลายเป็นกรด และอัตราการดูดซับที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับแบบจำลองจลนศาสตร์ปฏิกิริยาลำดับสองเทียมน ความจุดูดซับของผงแม่เหล็กนี้แปรผันตรงกับปริมาณเหล็กที่เป็นองค์ประกอบและพื้นที่ผิวของผงแม่เหล็ก นอกจากนี้ ผลของการดูดซับเมื่อมี Cl^- และ SO_4^{2-} ในสารละลาย พบว่า SO_4^{2-} มีผลทำให้ความจุดูดซับลดลง ส่วน Cl^- ไม่มีผลต่อการดูดซับ ผงแม่เหล็กที่ผ่านการดูดซับสีย้อม ARB แล้วสามารถนำไปบำบัดกลับมาใช้ใหม่ได้อีก โดยการเผาไหม้แบบมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิตั้งแต่ 400 องศาเซลเซียสขึ้นไป ดังนั้นผงแม่เหล็กแมงกานีสเฟอร์ไรต์ จึงสามารถนำไปบำบัดสีย้อมและสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้

M. Muncer และคณะ (2005) ศึกษาการกำจัดโดยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสของสีย้อม 2 ชนิด ด้วยการแผ่รังสี UV และการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารแขวนลอยในน้ำโดยใช้สีย้อมสังเคราะห์คือ Acridine Orange และ Ethidium Bromide โดยศึกษาถึงปัจจัยที่ใช้ในการกำจัดโดยเมื่อเวลาผ่านไปจะพบว่าการลดลงของความเข้มข้นของสีย้อมแต่ลดลงด้วยความไวไม่เท่ากันคือ มีการทดสอบโดยใช้การตัวเร่งในปฏิกิริยาซึ่งพบว่าการใช้สาร Degussa P25 ให้ผลการกำจัดที่ดีที่สุดสำหรับสีย้อมทั้ง 2 ชนิดร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ในด้าน pH ในกรณีของสีย้อม Acridine Orange จะมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ pH เท่ากับ 10 ในทางตรงกันข้ามในกรณีสีย้อม Ethidium Bromide จะดีกว่าถ้ามี pH เท่ากับ 4.6 ในเรื่องความเข้มข้นสีย้อม Acridine Orange ได้มีความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้เกิดการลดลงที่มากที่สุดมีอัตราอยู่ที่ 0.25 mM และมีความเข้มข้นมากขึ้นก็จะมีการลดลงที่ช้าลง สำหรับสีย้อม Ethidium Bromide อัตราการกำจัดจะต่ำลงในช่วง 0.1-0.4

mM โดยการทดลองนี้แสดงให้เห็นความสำคัญของการเลือกสภาวะที่ดีที่สุดของการกำจัดสีข้อมใน แต่ละพารามิเตอร์เพื่อให้ได้รับอัตราการกำจัดที่สูงที่สุด

วินัย เฝิงเจริญลิตี และคณะ (2548) ศึกษาการดูดซับ Cr^{6+} ด้วยกระบวนการโฟโตแคตาไลติกโดยตั้งปฏิกรณ์แบบกะ ถูกตั้งด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยสภาวะที่ทำการศึกษาคือ ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 3, ค่าความเข้มแสงที่ 36 และ 171 W/m^2 และค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของ Cr^{6+} ที่ 5, 25 และ 50 ppm จากการศึกษพบว่า อัตราการดูดซับโครเมียมที่ความเข้มแสง 171 W/m^2 มากกว่าที่ 36 W/m^2 ระยะเวลาในการดูดซับสารประกอบไดโครเมต ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) จน TiO_2 อิ่มตัวอยู่ที่ 35 ชั่วโมง และอัตราการดูดซับที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของ Cr^{6+} ที่ 50 ppm มีค่ามากที่สุด ส่วน TiO_2 ที่ใช้แล้วสามารถใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 3 โมลาลิตี (M) ทำการฟื้นฟูสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ซ้ำได้และมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นด้วย

ฉลาด บรรเทา และชูลิตี ศรีสุทธิภม (2548) การบำบัดสีจากน้ำเสียโรงงานผลิตเยื่อกระดาษโดยไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส โดยศึกษาระยะเวลา ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมที่ใช้ในการบำบัด และประสิทธิภาพในการนำไปใช้บำบัดน้ำเสียจริง การทดลองทำโดยใช้แบบจำลองแบบเต็มเต็มครั้งเดียว (Batch) และใช้น้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งปริมาณลิกนิน 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการหาระยะเวลาโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมจากการทดลองพบว่าระยะเวลาลิกนินถูกบำบัดหมดใน 8 ชั่วโมง การศึกษาหาปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสม พบว่า ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมคือ 4.0 กรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการกำจัด สามารถกำจัดลิกนินได้ 100% และจากการทดลองในการบำบัดสีจากลิกนินในน้ำเสียจริง ซึ่งมีปริมาณลิกนิน 27.4 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าเมื่อใช้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 4.0 กรัมต่อลิตร และระยะเวลา 8 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการกำจัดลิกนินสามารถกำจัดได้ร้อยละ 69.8

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์

1. เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ รุ่น 6405 บริษัท Jenway Co., Ltd
2. เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน รุ่น D8 Advance บริษัท Bruker A.G. Co., Ltd
3. เครื่องพีเอชมิเตอร์ รุ่น Model 215 บริษัท Denver instrument Co., Ltd
4. เตาเผาอุณหภูมิสูง (Muffle furnace) รุ่น F6010 บริษัท Thermolyne
5. เครื่องกรองสูญญากาศและชุดกรอง
6. เครื่องปั่นกวน
7. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง
8. กระดาษกรองละเอียด
9. เครื่องแก้วต่างๆ
10. ขวดฉีดน้ำกลั่น
11. ซ้อนตักสาร
12. กระจกนาฬิกา
13. หลอด UV 125 วัตต์

3.1.2 สารเคมี

1. พงสีรีแอคทีฟ (Reactive Red 141) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Distar
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Co., Ltd
3. กรดไฮโดรคลอริก เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Co., Ltd
4. ไทเทเนียมไดออกไซด์ไฮโซโพรพอกไซด์ บริษัท Carlo Erba Co., Ltd
5. แอมโมเนียไฮดรอกไซด์ เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Co., Ltd
6. น้ำปราศจากไอออน

3.2 การดำเนินการวิจัย

3.2.1 การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์

1. เปิดสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ไอโซโพรพอกไซด์ เข้มข้น 97 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักต่อปริมาตร 82.47 มิลลิลิตร และอะซีเตดปราศจากน้ำ (กลีเซิลอะซีติก) ปริมาณ 50 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยโพรพานอล

2. นำสารละลายที่ได้ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร นำไปปั่นกวนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสโดยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นเวลา 30 นาที

3. เติมแอมโมเนียไฮดรอกไซด์ขณะที่ยังปั่นกวนอยู่ประมาณ 2-3 หยดทุกๆ 1 นาที จนสารละลายในบีกเกอร์มีพีเอชเท่ากับ 7

4. นำสารละลายที่ได้ใส่หลอดเซนติฟิวส์ นำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องเซนติฟิวส์ เป็นเวลา 2 นาที เทสารละลายออกให้คงเหลือแต่ตะกอน

5. เติมแอมโมเนียลงไป ปั่นเหวี่ยงเป็นเวลา 2 นาที แล้วเทสารละลายออกให้คงเหลือแต่ตะกอน ทำซ้ำโดยเปลี่ยนจากแอมโมเนียเป็นน้ำกลั่นอีก 3 ครั้ง และอะซีโตนอีก 1 ครั้ง

6. นำตะกอนที่ได้ใส่ในกระจกนาฬิกา นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส

7. นำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.2.2 ศึกษาสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดอนาเทส

ไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดอนาเทสที่นำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ขึ้นในห้องปฏิบัติการ ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จาก ดร.สามารถ คงทวีเลิศ สมบัติทางกายภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ทำการศึกษาได้แก่ โครงสร้างของผลึก

3.2.3 การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานสีย้อม Reactive Red 141

1. เตรียมสารละลายสต็อกสีย้อมรีแอคทีฟที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร
ชั่งสีย้อมรีแอคทีฟมา 0.5 กรัม ลงในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตรละลายด้วยน้ำกลั่นจนหมด
ถ่ายลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น
2. เตรียมสารละลายมาตรฐานสีย้อมรีแอคทีฟ
เตรียมกราฟมาตรฐานที่มีความเข้มข้นระหว่าง 5-50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีเปิด
สารละลายสต็อกสีย้อมรีแอคทีฟที่มีความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตรมา 0, 1, 2, 4, 6, 8 และ 10
มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จะได้สารละลาย
มาตรฐานสีย้อมรีแอคทีฟที่มีความเข้มข้น 0, 5, 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร นำไปวัดค่า
การดูดกลืนแสงที่ ความยาวคลื่น 545 นาโนเมตร (โดยการสแกนหา λ_{max}) โดยใช้น้ำกลั่นเป็นแบลนด์
จากนั้นนำไปพลอต กราฟมาตรฐาน โดยให้ค่าการดูดกลืนแสงเป็นแกน Y และความเข้มข้นเป็น
แกน X จากนั้นนำตัวอย่างมาเจือจางให้อยู่ในช่วงของความเข้มข้นในกราฟมาตรฐานและทำการวัด
ค่าดูดกลืนแสงที่ ความยาวคลื่น 545 นาโนเมตร โดยใช้น้ำกลั่นเป็นแบลนด์ เมื่อได้ค่าดูดกลืนแสง
แล้วให้นำไปแทนค่าในสมการของกราฟมาตรฐาน โดยให้ค่าดูดกลืนแสงเป็นค่า (y) จากนั้น
คำนวณหาค่าความเข้มข้นสีย้อม (x) หลังจากเจือจางแล้ว ทำการคำนวณกลับไปสู่ความเข้มข้นก่อน
เจือจางต่อไป จะได้ความเข้มข้นของสีย้อมในน้ำตัวอย่าง

3.2.4 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Red 141

3.2.4.1 การศึกษาผลของระยะเวลาการให้แสงยูวี

1. ชั่งไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ จำนวน 0.05 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด
100 มิลลิลิตร จำนวน 3 บีกเกอร์
2. เติมสารละลายสีย้อม Reactive Red 141 ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50
มิลลิลิตร ลงไปในบีกเกอร์ทั้ง 3 และอีก 1 บีกเกอร์ที่ไม่มีไทเทเนียมไดออกไซด์
3. นำบีกเกอร์ที่บรรจุสารละลายในข้อ 2 ไปใส่ในกล่องทึบแสงที่ต่อกับหลอด UV ทำการ
ป้อนเป็นเวลา 5 นาที โดยปราศจากแสงจากหลอด UV
4. เปิดสวิตซ์เพื่อให้แสงจากหลอด UV
5. ทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที นำสารละลายที่ได้ไปกรอง
6. นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 545 นาโนเมตร
7. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-6 เพิ่มเวลาเป็น 60, 90, 120, 150, 180, 210 และ 240
นาที ตามลำดับ

8. ในการทดลองแต่ละครั้งจะต้องทำชุดควบคุมควบคู่กันไปด้วย โดยชุดควบคุมจะเตรียมขึ้นโดยวิธีการเช่นเดียวกับสารตัวอย่าง ยกเว้นจะเก็บไว้ในกล่องที่บดแสงและไม่ใส่ไทเทเนียมไดออกไซด์โดยไม่มีการเปิดสวิตซ์หลอดยูวี

3.2.4.2 การศึกษาผลของพีเอช

1. ชั่งไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ จำนวน 0.05 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร จำนวน 3 บีกเกอร์

2. เติมสารละลายสีย้อม Reactive Red 141 ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงไปในบีกเกอร์ทั้ง 3 และอีก 1 บีกเกอร์ที่ไม่มีไทเทเนียมไดออกไซด์

3. ปรับพีเอชของสารละลายเป็น 3 ด้วย 1M HCl หรือ 1M NaOH

4. นำบีกเกอร์ที่บรรจุสารละลายในข้อ 3 ไปใส่ในกล่องที่บดแสงที่ต่อกับหลอด UV ทำการปั่นกวนเป็นเวลา 5 นาที โดยปราศจากแสงจากหลอด UV

5. เปิดสวิตซ์เพื่อให้แสงจากหลอด UV

6. ทิ้งไว้เป็นเวลาที่ได้จากการทดลอง 3.2.4.1 นำสารละลายที่ได้ไปกรอง

7. นำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 545 นาโนเมตร

8. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-8 เปลี่ยนพีเอชเป็น 7 และ 11 ตามลำดับ

9. ในการทดลองแต่ละครั้งจะต้องทำชุดควบคุมควบคู่กันไปด้วย โดยชุดควบคุมจะเตรียมขึ้นโดยวิธีการเช่นเดียวกับสารตัวอย่าง ยกเว้นจะเก็บไว้ในกล่องที่บดแสงและไม่ใส่ไทเทเนียมไดออกไซด์โดยไม่มีการเปิดสวิตซ์หลอดยูวี

3.2.4.3 การศึกษาผลของปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์

1. ชั่งไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ จำนวน 0.025 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร จำนวน 3 บีกเกอร์

2. เติมสารละลายสีย้อม Reactive Red 141 ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงไปในบีกเกอร์ทั้ง 3 และอีก 1 บีกเกอร์ที่ไม่มีไทเทเนียมไดออกไซด์

3. ปรับพีเอชของสารละลายให้มีค่าเท่ากับทำการทดลองข้อ 3.2.4.2 ด้วย 1M HCl หรือ 1M NaOH

4. นำบีกเกอร์ที่บรรจุสารละลายในข้อ 3 ไปใส่ในกล่องที่บดแสงที่ต่อกับหลอด UV ทำการปั่นกวนเป็นเวลา 5 นาที โดยปราศจากแสงจากหลอด UV

5. เปิดสวิตซ์เพื่อให้แสงจากหลอด UV

6. ทิ้งไว้เป็นเวลาที่ได้จากการทดลอง 3.2.4.1 นำสารละลายที่ได้ไปกรอง

7. นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 545 นาโนเมตร

8. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-8 เปลี่ยนปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เป็น 0.05, 0.15, 0.25 และ 0.35 กรัม ตามลำดับ

9. ในการทดลองแต่ละครั้งจะต้องทำชุดควบคุมควบคู่กันไปด้วย โดยชุดควบคุมจะเตรียมขึ้นโดยวิธีการเช่นเดียวกับสารตัวอย่าง ยกเว้นจะเก็บไว้ในกล่องทึบแสงและไม่ใส่ไทเทเนียมไดออกไซด์โดยไม่มีการเปิดสวิตซ์หลอดยูวี

3.2.4.4 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น

1. ชั่งไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ จำนวนตามการทดลองข้อที่ 3.2.4.3 ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร จำนวน 3 บีกเกอร์

2. เติมสารละลายสีย้อม Reactive Red 141 ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงไปในบีกเกอร์ทั้ง 3 และอีก 1 บีกเกอร์ที่ไม่มีไทเทเนียมไดออกไซด์

3. ปรับพีเอชของสารละลายให้มีค่าเท่ากับการทดลองข้อ 3.2.4.2 ด้วย 1M HCl หรือ 1M NaOH

4. นำบีกเกอร์ที่บรรจุสารละลายในข้อ 3 ไปใส่ในกล่องทึบแสงที่ต่อกับหลอด UV ทำการปั่นกวนเป็นเวลา 5 นาที โดยปราศจากแสงจากหลอด UV

5. เปิดสวิตซ์เพื่อให้แสงจากหลอด UV

6. ทิ้งไว้เป็นเวลาที่ได้จากการทดลอง 3.2.4.1 นำสารละลายที่ได้ไปกรอง

7. นำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 545 นาโนเมตร

8. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-8 เปลี่ยนความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

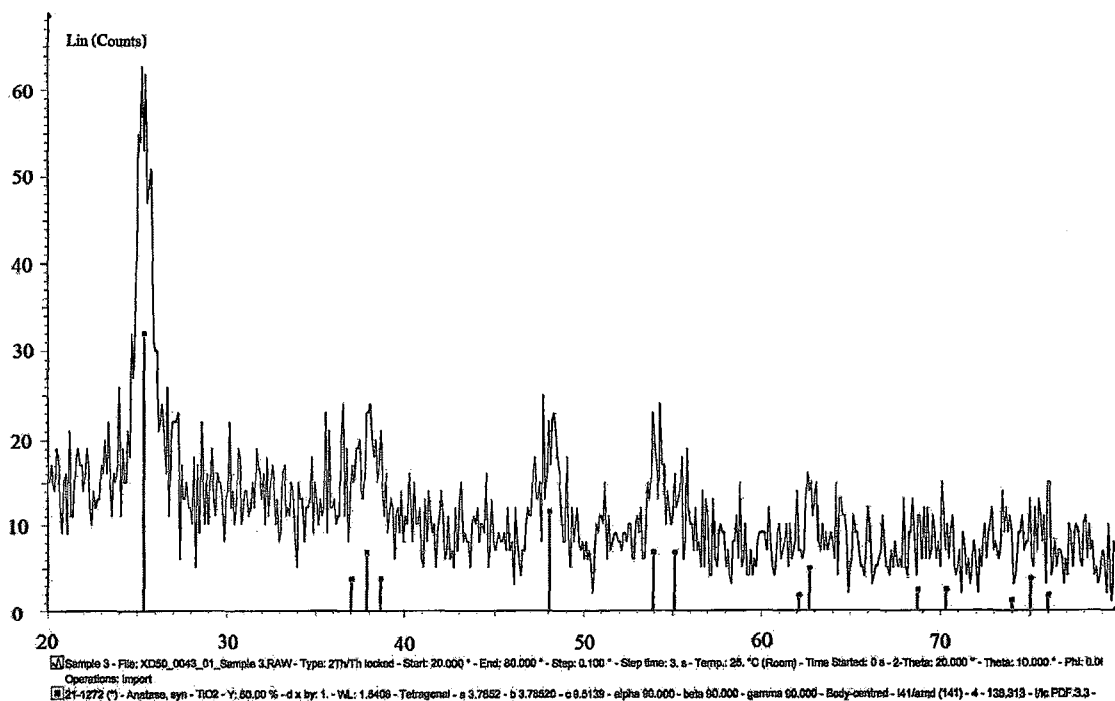
9. ในการทดลองแต่ละครั้งจะต้องทำชุดควบคุมควบคู่กันไปด้วย โดยชุดควบคุมจะเตรียมขึ้นโดยวิธีการเช่นเดียวกับสารตัวอย่าง ยกเว้นจะเก็บไว้ในกล่องทึบแสงและไม่ใส่ไทเทเนียมไดออกไซด์โดยไม่มีการเปิดสวิตซ์หลอดยูวี

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์

จากการนำตัวอย่างไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ นำไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยใช้เครื่องเอ็กซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ผลการทดลองที่ได้เป็นดังรูปที่ 4.1



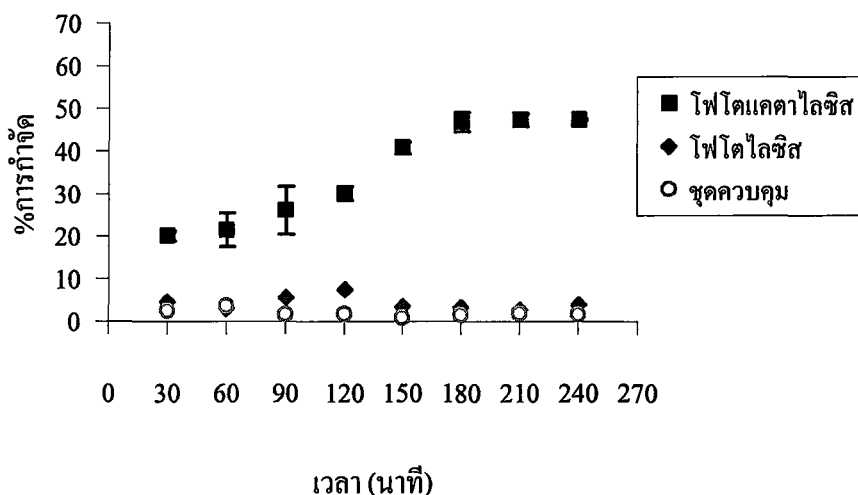
รูปที่ 4.1 การวิเคราะห์ โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ขึ้น

จากรูปที่ 4.1 เราพบว่าทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีเอ็กซเรย์ดิฟแฟรคชัน โดยทำการเทียบเส้นตรงอ้างอิงซึ่งเป็นเส้นกราฟมาตรฐานของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบอนาเทสกับเส้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เราทำการสังเคราะห์ขึ้น โดยที่ตำแหน่งที่ 25.81 จะพบว่ามียุคที่สูงที่สุดซึ่งเป็นจุดเด่นของโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส และในบริเวณอื่นก็พบว่ามียุคที่เด่นเกิดขึ้นตรงตามกราฟมาตรฐานของไทเทเนียมไดออกไซด์ จึงพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ขึ้นมีลักษณะเป็น โครงร่างผลึกแบบอนาเทส

4.2 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Red 141 (RR141)

4.2.1 การศึกษาผลของระยะเวลาการให้แสงยูวี

ในการศึกษาผลของระยะเวลาการให้แสงยูวี ทำการศึกษาโดยกำหนดให้มีค่าปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เข้มข้น 1 กรัม/ลิตร ความเข้มข้นของสีย้อม RR141 ที่ใช้ 20 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ทำการแปรค่าระยะเวลาการให้แสงยูวีที่ 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210 และ 240 นาที ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.2



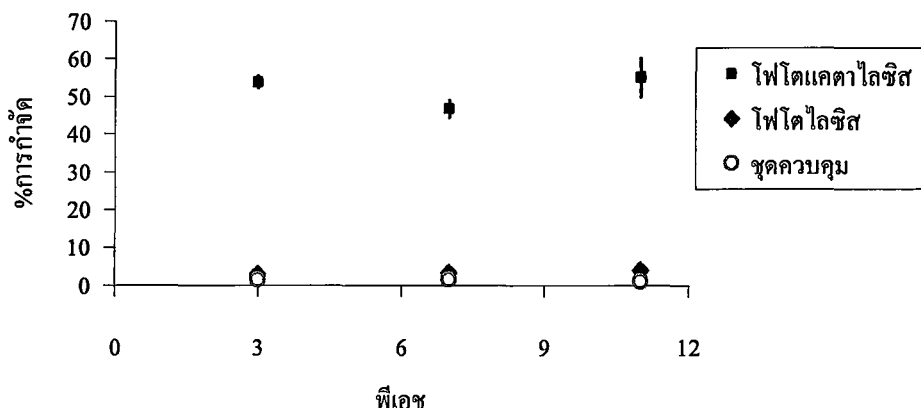
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม RR141 ที่เวลาต่างๆ

จากรูปที่ 4.2 พบว่า เมื่อระยะเวลาในการให้แสงยูวีนานขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยที่ระยะเวลาให้แสงยูวี 30 นาที ประสิทธิภาพในการบำบัดคิดเป็นร้อยละ 20.09 ± 1.23 เมื่อเพิ่มระยะเวลาให้แสงยูวีเป็น 180 นาที ประสิทธิภาพในการบำบัดคิดเป็นร้อยละ 46.80 ± 2.26 ซึ่งทั้งนี้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาในการให้แสงยูวีนานขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของสีย้อมมีโอกาสสัมผัสกับพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้น แต่ที่เวลา 210 และ 240 นาที ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมจะเริ่มคงที่ ดังนั้นระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดสีย้อมคือ 180 นาที

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมระหว่างปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสกับปฏิกิริยาโฟโตไลซิส พบว่าปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสสามารถบำบัดสีย้อมได้ดีกว่าปฏิกิริยาโฟโตไลซิส ดังจะเห็นได้จากประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตไลซิส ที่ระยะเวลาการให้แสงยูวี 30 นาที ประสิทธิภาพในการบำบัดเท่ากับร้อยละ 4.52 ± 1.34 ถึงแม้ว่าระยะเวลาในการให้แสงยูวีนานขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตไลซิสมีค่าค่อนข้างคงที่

4.2.2 การศึกษาผลของพีเอช

ในการศึกษาผลของพีเอช ทำการศึกษาโดยกำหนดให้มีความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์เข้มข้น 1 กรัม/ลิตร ความเข้มข้นของสีย้อม RR141 ที่ใช้ 20 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร และระยะเวลาสัมผัส 180 นาที ทำการแปรค่าพีเอชเป็น 3, 7 และ 11 ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม RR141 ที่ pH ต่างๆ

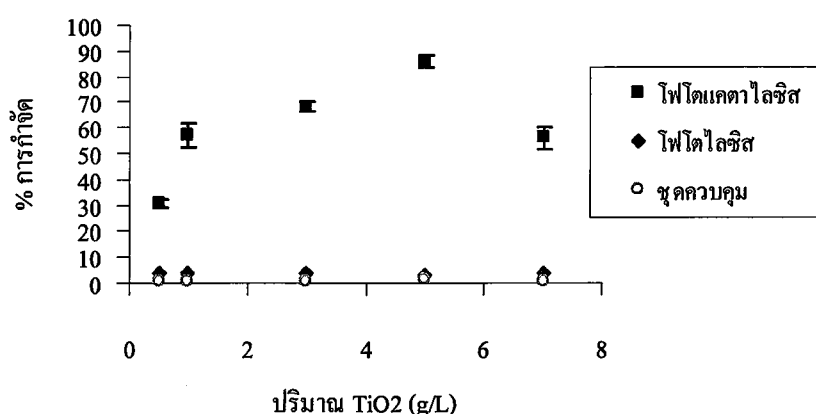
จากรูปที่ 4.3 พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสมีค่าสูงสุดที่พีเอช 3 และ 11 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน โดยคิดเป็นร้อยละ 56.99 ± 4.92 และ ร้อยละ 53.82 ± 1.50 ตามลำดับ และมีค่าต่ำสุดที่พีเอช 7 คิดเป็นร้อยละ 46.8 ± 2.26 ทั้งนี้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม RR141 มีค่าสูงสุดเมื่อสารละลายสีย้อมมีความพีเอชอยู่ในช่วงที่เป็นด่าง เนื่องจากปริมาณไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) ที่มากเกินไป ในสารละลายที่อยู่ในช่วงด่าง ทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH^\bullet) ในปริมาณที่สูงตามไปด้วย (จุฑานันท์, 2544) สำหรับในกรณีที่สารละลายสีย้อมมีความพีเอชอยู่ในช่วงที่เป็นกรด ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม RR141 จะมีการลดลง เนื่องจากเมื่อค่าพีเอชต่ำจะทำให้พื้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่าเป็นบวกทำให้เกิดแรงดึงดูดกับโมเลกุลของสีย้อม เป็นผลให้โมเลกุลของสีย้อมถูกดูดเข้ามาเกาะติดอยู่ที่ผิวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้เกิดการออกซิไดส์ได้โดยตรงระหว่างโมเลกุลของสีย้อมกับโฮลในแถบวาเลนซ์ที่ผิวอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์สะดวกขึ้น จากการศึกษาของ Tang และคณะ (1997) ได้สรุปว่าโฮลจะมีอิทธิพลต่อกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสเมื่อค่าพีเอชต่ำ ในขณะที่ไฮดรอกซิลเรดิคัลมีความสำคัญในการทำปฏิกิริยาเมื่อค่าพีเอชสูง แต่เนื่องจากอิทธิพลของไฮดรอกซิลเรดิคัลที่มากเกินไปในสภาวะด่าง จึงยังคงทำให้การเกิดปฏิกิริยาการบำบัดสีย้อม ในสภาวะด่างเกิดขึ้นได้สูงกว่าใน

สภาวะกรด อีกทั้งไฮดรอกซิลเรดิคัลที่เกิดจากไฮโดรเจนไอออนจะเกิดขึ้นได้ช้ากว่าไฮดรอกซิลเรดิคัลที่เกิดจากไฮดรอกซิลไอออน เพราะไฮโดรเจนไอออนมีขั้นตอนที่จะทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลซับซ้อนและยุ่งยากกว่า ส่วนค่าพีเอชที่ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมต่ำสุด จะอยู่ในช่วงค่าพีเอชที่เป็นกลาง เป็นผลเนื่องมาจากที่ค่าพีเอชนี้เป็นค่าพีเอชที่ใกล้เคียงกับค่าพีเอชที่ทำให้ประจุที่ผิวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นกลาง จึงทำให้ปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าในสภาวะที่เป็นกรดและด่าง ดังนั้นค่าพีเอชที่เหมาะสมในการบำบัดสีย้อมคือ พีเอช 11

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมระหว่างปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสกับปฏิกิริยาโฟโตไลซิส พบว่าปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสสามารถบำบัดสีย้อมได้ดีกว่าปฏิกิริยาโฟโตไลซิส ดังจะเห็นได้จากประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตไลซิส ที่พีเอช 3 ประสิทธิภาพในการบำบัดเท่ากับร้อยละ 2.96 ± 0.54 ถึงแม้ว่าพีเอชมีค่าเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตไลซิสมีค่าค่อนข้างคงที่

4.2.3 การศึกษาผลของปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์

ในการศึกษาผลของพีเอช ทำการศึกษาโดยกำหนดให้มีค่าพีเอชเท่ากับ 11 ความเข้มข้นสีย้อม RR141 ที่ใช้ 20 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร และระยะเวลาการให้แสงยูวี 180 นาที ทำการแปรค่าปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เป็น 0.5, 1, 3, 5 และ 7 กรัม/ลิตร ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม RR141 ที่ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ

จากรูปที่ 4.4 พบว่า เมื่อความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสมีค่าสูงขึ้น โดยประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมคิด

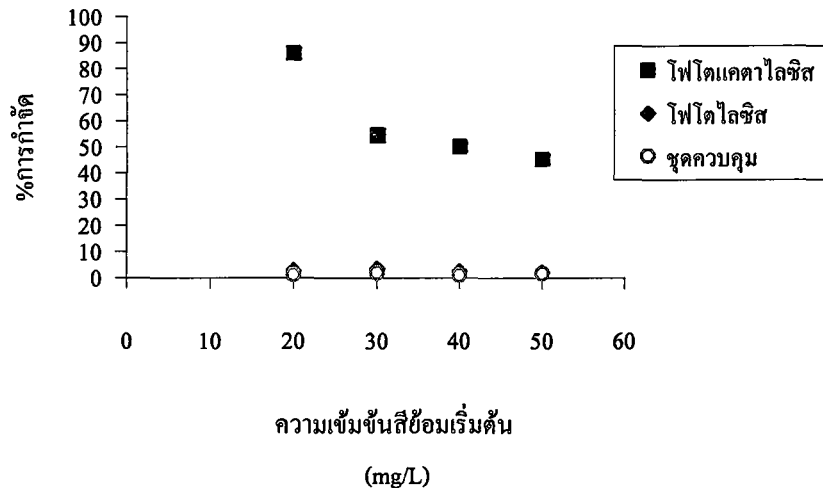
เป็นร้อยละ 30.51 ± 1.87 เมื่อใช้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.5 กรัม/ลิตร และเมื่อเพิ่มปริมาณไทเทเนียมเป็น 5 กรัม/ลิตร ประสิทธิภาพในการบำบัดมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 85.88 ± 2.07 ทั้งนี้ผลของปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อมอาจเป็นผลเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกออกซิเดชัน จะเกิดขึ้นที่ผิวอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นเมื่อความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น เป็นผลทำให้มีสัดส่วนของพื้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มขึ้นด้วย

อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณไทเทเนียมเพิ่มขึ้นจาก 5 กรัม/ลิตร เป็น 7 กรัม/ลิตร พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อมมีแนวโน้มลดลงอาจเป็นผลเนื่องมาจาก ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มากเกินไปในสารละลายจะทำปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกออกซิเดชันลดลงเพราะอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มากเกินไป จะขัดขวางแสงยูวีที่ส่องลงไป สารละลาย ทำให้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่กระตุ้นด้วยอนุภาคของแสง และปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลลดลง ดังนั้นความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมในการบำบัดสีข้อม คือ 5 กรัม/ลิตร

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อมระหว่างปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสกับปฏิกิริยาโฟโตไลซิส พบว่าปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสสามารถบำบัดสีข้อมได้ดีกว่าปฏิกิริยาโฟโตไลซิส ดังจะเห็นได้จากประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตไลซิสเมื่อใช้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.5 กรัม/ลิตร ประสิทธิภาพในการบำบัดคิดเป็นร้อยละ 3.96 ± 0.38 ถึงแม้ว่าปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตไลซิสมีค่าค่อนข้างคงที่

4.2.4 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสีข้อม

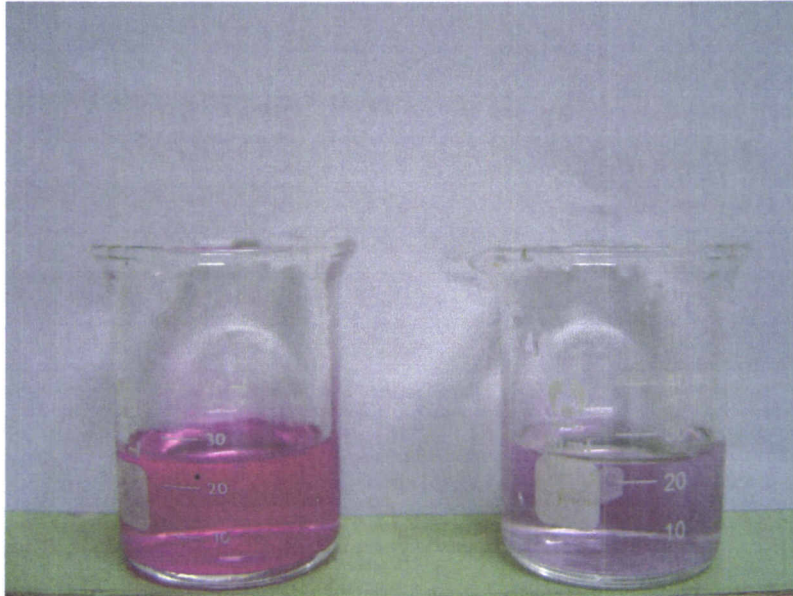
ในการศึกษาผลของความเข้มข้นของสีข้อม ทำการศึกษาโดยกำหนดให้มีค่าพีเอชเท่ากับ 11 ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เข้มข้น 5 กรัม/ลิตร และระยะเวลาการให้แสงยูวี 180 นาที ทำการแปรค่าความเข้มข้นของสีข้อมเป็น 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร การทดลองที่ผ่านมาในอดีต ความเข้มข้นของสีข้อมผ้าที่นิยมใช้ในการทดลองคือ 30 มิลลิกรัม/ลิตร (วุทธินันท์, 2544) ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม RR141 ที่ความเข้มข้นต่างๆ

จากรูปที่ 4.5 พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสีย้อม RR141 มีค่าเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม มีแนวโน้มลดลง โดยประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส คิดเป็นร้อยละ 85.88 ± 2.07 เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเท่ากับ 20 มิลลิกรัม/ลิตร เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 50 มิลลิกรัม/ลิตร ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมมีค่าลดลงเหลือเพียงร้อยละ 45.18 ± 1.73 ทั้งนี้ผลของความเข้มข้นของสีย้อมต่อประสิทธิภาพการบำบัดด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ 1) เมื่อความเข้มข้นของสีย้อมเพิ่มขึ้น เป็นผลทำให้จำนวนโมเลกุลของสีย้อมเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จึงทำให้ที่ระยะเวลาการบำบัดเท่ากัน โมเลกุลของสีย้อมที่จะถูกบำบัดยังคงเหลืออยู่ในปริมาณสูง 2) เมื่อความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นสูงขึ้นทำให้ประสิทธิภาพในการแพร่กระจายและการส่องผ่านของแสงยูวีในสารละลายลดลง เป็นผลทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมลดลง และ 3) พื้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์มีจำกัด เมื่อความเข้มข้นของสีย้อมเพิ่มมากขึ้น แต่ความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่ผิวหน้าของไทเทเนียมไดออกไซด์ยังคงเท่าเดิม เป็นผลทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมลดลง ดังนั้นความเข้มข้นของสีย้อม RR141 ที่เหมาะสมคือ 20 มิลลิกรัม/ลิตร

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมระหว่างปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสกับปฏิกิริยาโฟโตไลซิส พบว่าปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสสามารถบำบัดสีย้อมได้ดีกว่าปฏิกิริยาโฟโตไลซิส ดังจะเห็นได้จากประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตไลซิสเมื่อความเข้มข้นของสีย้อมเท่ากับ 20 มิลลิกรัม/ลิตร ประสิทธิภาพในการบำบัดคิดเป็นร้อยละ 2.93 ถึงแม้ว่าความเข้มข้นของสีย้อมเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตไลซิสมีค่าค่อนข้างคงที่



รูปที่ 4.6 สารละลายสีเข้มก่อนบำบัดและหลังบำบัด

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

โครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาการบำบัดสีย้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกในสถานะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Reactive red 141 ผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

การศึกษาผลของระยะเวลาการให้แสงยูวีพบว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาการให้แสงยูวี ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยช่วงเวลาการให้แสงที่เหมาะสมคือ 180 นาที ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ทำให้เกิดการบำบัดสีย้อมได้มากที่สุด

การศึกษาผลของพีเอช พบว่า พีเอชของสารละลายมีผลต่อการบำบัดสีย้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสในสถานะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมสูงที่สุดเมื่อพีเอชของสารละลายอยู่ในช่วงที่เป็นด่าง ในลำดับรองลงมาคือ พีเอชอยู่ในช่วงที่เป็นกรด และต่ำสุดเมื่อพีเอชเป็นกลาง

การศึกษาผลของปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมคือ 5 กรัม/ลิตร ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้เกิดการบำบัดสีย้อมได้มากที่สุด แต่เมื่อปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้นมากกว่า 5 กรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมมีค่าลดลง

การศึกษาผลของความเข้มข้นของสีย้อม พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสีย้อม RR141 เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมมีแนวโน้มลดลง โดยค่าความเข้มข้นของสีย้อม RR141 ที่เหมาะสมคือ 20 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้เกิดการบำบัดสีย้อมได้มากที่สุด

จากผลเบื้องต้นสรุปได้ว่า สถานะที่เหมาะสมในการบำบัดสีย้อม RR141 มีประสิทธิภาพมากที่สุด คือ ระยะเวลาการให้แสงยูวี 180 นาที ค่าพีเอชสารละลายอยู่ในช่วงที่เป็นด่าง ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 5 กรัม/ลิตร และความเข้มข้นของสีย้อม 20 มิลลิกรัม/ลิตร

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อม
2. ทำการวัดประสิทธิภาพน้ำทิ้งหลังการบำบัด โดยวัดความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมที่เหลือภายหลังการบำบัด และวัดสมบัติทางเคมีของน้ำภายหลังการบำบัดเทียบกับก่อนบำบัด
3. นำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการกรองแล้วกลับมาใช้ใหม่ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการบำบัดน้ำเสียสีย้อม หากมีความจำเป็นที่จะต้องใช้ซ้ำจะสามารถคาดเดาประสิทธิภาพได้
4. นำผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นภายหลังการบำบัดไปตรวจสอบว่ายังมีโครงสร้างที่เปลี่ยนไปหรือไม่ โดยนำไปสแกนหาค่าความยาวคลื่นที่สามารถดูดกลืนแสงได้มากที่สุดว่าเปลี่ยนไปหรือไม่
5. ควรทำการทดลองดูว่าปริมาณสารละลายมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดหรือไม่

บรรณานุกรม

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2542. **คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรมฟอกย้อม**. กรุงเทพฯ : สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม.
- โกมล เอี่ยมเสมอ. 2541. **ประสิทธิภาพในการกำจัดสีของสีย้อมรีแอกทีฟชนิดเอโซ โดยกระบวนการ เอสปีอาร์แบบแอนแอโรบิก ซึ่งมีและไม่มีสารอาหารที่ส่งเสริมกระบวนการอีพีอาร์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ฉลาด บรรเทา และ ชูสิทธิ์ ศรีสุทธิกมล. 2548. **การบำบัดสีจากน้ำเสียโรงงานกระดาษด้วย ไทเทเนียมไดออกไซด์**. โครงการพิเศษสาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- นันทยา ขานูมาศ. 2537. “ความเป็นพิษและมลพิษของสีย้อมและสารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ.” **วารสารคัลเลอร์เวย์**. 1(6) : 42-47
- ราตรี ปิ่นทอง และคณะ. 2543. **การดูดซับสารละลายสีย้อมโดยใช้ต้นข้าวโพดและมันสำปะหลัง**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ลัดดา แสงสุวรรณถาวร. 2545. **การกำจัดสีรีแอกทีฟเยลโล 17 และสีรีแอกทีฟบลู 19 ด้วยกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ล้นทม จอนจอบทรง. 2535. “การบำบัดและการจัดการน้ำเสียจากการย้อมสี.” **วารสารเทคโนโลยีที่เหมาะสม**. (ต.ค. – ธ.ค.) : 38-43
- วรรณวิภา ผลาหาญ. 2547. **การกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมโดยใช้เศษผงเหล็ก**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- วุทธินันท์ ศิริพงษ์. 2544. **การบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- วินัย เถียงเจริญสิทธิ์ และคณะ. 2548. “การดูดซับ Cr^{6+} ด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกโดยถังปฏิกรณ์แบบกะ ถูกตรึงด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์” **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 10**. ชลบุรี(2-4 พฤษภาคม)
- อังคณา ตูลาไตรรัตน์. 2540. “สุขภาพและสิ่งแวดล้อมกับการใช้สีอินทรีย์.” **คัลเลอร์เวย์. 2** (มีนาคม-เมษายน) : 29-37
- Bing-Nan L., L. Woei-Deng and L. Jie-chung. 1999. Photocatalytic decolorization of methylene blue in aqueous TiO_2 suspension. **Environ. Eng. Sci.** 16(3) : 165-175.
- Bizan E.,Fytianos K., Poulios I.,Tsiridis V., Photocatalytic decolorization and degradation of dye solutions and wastewaters in the presence of titanium dioxide, **Journal of Hazardous Materials.** 136(2006), 85-94
- Brown, D. and Hamburger, B. 1987 . “The degradation of dyestuffs: Part III-Investigations of Their Ultimate Degradability.” **Chemosphere.** 16(7), 1539-1553.
- Davis, A. P. and C. P. Huang. 1991. The photocatalytic oxidation of sulfur-containing organic compounds using cadmium sulfide and effect on CdS photocorrosion. **Water Research.** 25(10) : 1273-1278.
- Davis, R. J., J. L. Gainer, G. O’Nel and I. W. Wu. 1994. Photocatalytic decolorization of wastewater dyes. **Water Environment Research.** 66(1) :50-53.
- Duk Jong Joo , Won Sik Shin , Jeong-Hak Choi , Sang June Choi , Myung-Chil Kim , Myung Ho Han , Tae Wook Ha and Young-Hum Kim , Decolorization of reactive dyes using inorganic coagulants and synthetic polymer ., **Dyes and Pigment** .59-64
- Faisal M., Abu Tariq M. and Muneer M., Photocatalysed degradation of two selected dyes in UV-irradiated aqueous suspensions of titania., **Dyes and Pigments.** 233-239
- Gupta, H. 1994. Photocatalytic decolorization of chlorinated hydrocarbons and its combination with anaerobic digestion. **AIT Dissertation, AIT** , Bangkok.
- Haarstrick, A., O. M. Kut and E. E. Heinzle. 1996. TiO_2 – Assisted degradation of environmentally relevant organic compounds in wastewater using a novel fluidized bed photoreaction. **Environment Science Technology.** 30(3) : 817-824.
- Halmann, M. M. 1996. Photodegradation of water pollution. Boca Raton : CRC Press Cited by langphasuk, M. 1997. The potential for photocatalytic oxidation of dyes in textile

wastewater . **Ph.D. thesis, Asian Institute of Technology**, Bangkok.

Langphasuk, M. 1997. The potential for photocatalytic oxidation of dyes in textile wastewater.

Oh.D. thesis. **Asian Institute of Technology**, Bangkok.

Rongcheng Wu ,Jiuhui Qu ,Yongsheng Chen., Magnetic powder MnO-Fe₂O₃ composite-a novel material for the removal of azo-dye from water ,**Water Research**. 39(2005), 630-638.

Rujira Dolphen , Niramol Sakkayawong , Paitip Thiravetyan , Woranan Nakbanpote. ,Adsorption of Reactive Red 141 from wastewater onto modified chitin. **Journal of Hazardous Materials (2006)** .

ภาคผนวก ก

ภาคผนวก ก

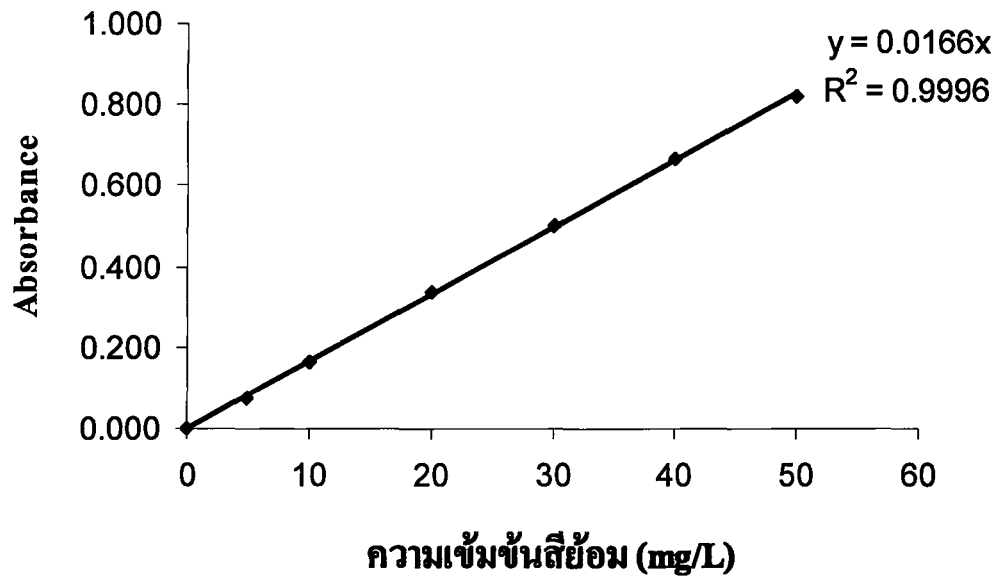
ข้อมูลผลการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆของสารละลายมาตรฐานสีเขียวอม

Reactive Red 141 (λ_{\max} 545 nm)

ความเข้มข้น (mg/L)	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าการดูดกลืนแสง เฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
0	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.08	0.071	0.078	0.076
10	0.168	0.157	0.168	0.164
20	0.345	0.330	0.342	0.339
30	0.506	0.495	0.512	0.504
40	0.657	0.661	0.681	0.666
50	0.818	0.811	0.828	0.819

กราฟมาตรฐานสีเขียวอม Reactive Red 141



รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานความเข้มข้นสีเขียวอม Reactive Red 141

ตารางที่ ก.2 ผลการศึกษาระยะเวลาสัมผัสของโฟโตแคตาไลซิส

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L) (Co)			ความเข้มข้นที่เวลาต่างๆ (mg/L) (Ce)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
30	19.17	19.88	18.99	15.3	15.65	15.42
60	21.85	21.73	20.48	18.1	16.9	15.36
90	20.24	20.36	19.76	15.77	15.54	13.33
120	19.46	18.21	18.21	13.93	12.44	12.74
150	19.46	20.24	N/E	11.73	11.79	N/E
180	19.76	20.61	20.24	10.79	11.21	10.24
210	20.13	19.87	20.12	10.63	10.76	10.27
240	18.97	19.76	19.94	9.70	10.30	10.30

ตารางที่ ก.3 ผลการศึกษาระยะเวลาสัมผัสของโฟโตไลซิส

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L) (Co)			ความเข้มข้นที่เวลาต่างๆ (mg/L) (Ce)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
30	19.17	19.88	18.99	18.57	18.95	17.85
60	21.85	21.73	20.48	20.95	21.19	20.00
90	20.24	20.36	19.76	18.99	19.52	18.51
120	19.46	18.21	18.21	17.92	17.08	16.73
150	19.46	20.24	N/E	18.87	19.46	N/E
180	19.76	20.61	20.24	19.13	19.97	19.56
210	20.13	19.87	20.12	19.46	19.45	19.65
240	18.94	19.76	19.91	18.06	19.03	19.27

ตารางที่ ก.4 ผลการศึกษาระยะเวลาสัมผัสของชุดควบคุม

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L) (Co)			ความเข้มข้นที่เวลาต่างๆ (mg/L) (Ce)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
30	19.17	19.88	18.99	18.75	19.35	18.45
60	21.85	21.73	20.48	21.19	20.89	19.64
90	20.24	20.36	19.76	19.88	20.06	19.46
120	19.46	18.21	18.21	19.11	17.86	17.92
150	19.46	20.24	N/E	19.29	20.06	N/E
180	19.76	20.61	20.24	19.51	20.19	19.97
210	20.13	19.87	20.12	19.83	19.51	19.68
240	18.94	19.76	19.91	18.67	19.52	19.52

ตารางที่ ก.5 ผลการศึกษาค่าของพีเอช 3

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L) (Co)			ความเข้มข้นที่เวลาต่างๆ (mg/L) (Ce)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
โฟโตไลซิส	18.38	19.35	19.40	17.73	18.8	18.92
โฟโตแคตตาไลซิส	18.38	19.35	19.40	8.81	8.75	8.81
ชุดควบคุม	18.38	19.35	19.40	18.18	18.86	19.20

ตารางที่ ก.6 ผลการศึกษาค่าของพีเอช 7

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L) (Co)			ความเข้มข้นที่เวลาต่างๆ (mg/L) (Ce)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
โฟโตไลซิส	18.38	19.35	19.40	17.73	18.8	18.92
โฟโตแคตตาไลซิส	18.38	19.35	19.40	8.81	8.75	8.81
ชุดควบคุม	18.38	19.35	19.40	18.18	18.86	19.20

ตารางที่ ก.7 ผลการศึกษาค่าของพีเอช 11

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L) (Co)			ความเข้มข้นที่เวลาต่างๆ (mg/L) (Ce)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
โฟโตไลซิส	20.97	21.27	20.67	20.48	20.06	19.88
โฟโตแคตตาไลซิส	20.97	21.27	20.67	8.36	8.61	10.06
ชุดควบคุม	20.97	21.27	20.67	20.73	21.03	20.43

ตารางที่ ก.8 ผลของการศึกษาปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ของโฟโตแคตตาไลซิส

ปริมาณ TiO ₂ (g/L)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L) (Co)			ความเข้มข้นที่เวลาต่างๆ (mg/L) (Ce)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0.5	20.43	20.43	20.73	14.15	13.84	14.82
1	20.97	21.27	20.67	10.61	8.61	10.06
3	20.73	N/E	N/E	7.01	6.28	6.52
5	19.57	N/E	N/E	2.87	2.32	2.41
7	20.79	N/E	N/E	10.12	8.48	8.72

ตารางที่ ก.9 ผลของการศึกษาปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ของโฟโตไลซิส

ปริมาณ TiO ₂ (g/L)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L) (Co)			ความเข้มข้นที่เวลาต่างๆ (mg/L) (Ce)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0.5	20.43	20.43	20.73	19.57	19.57	20.00
1	20.97	21.27	20.67	20.48	20.06	19.88
3	20.73	N/E	N/E	20.00	N/E	N/E
5	19.57	N/E	N/E	19.02	N/E	N/E
7	20.79	N/E	N/E	20.00	N/E	N/E

ตารางที่ ก.10 ผลของการศึกษาปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ของชุดควบคุม

ปริมาณ TiO ₂ (g/L)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L) (Co)			ความเข้มข้นที่เวลาต่างๆ (mg/L) (Ce)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0.5	20.43	20.43	20.73	20.18	20.18	20.55
1	20.97	21.27	20.67	20.75	21.03	20.42
3	20.73	N/E	N/E	20.55	N/E	N/E
5	19.57	N/E	N/E	19.33	N/E	N/E
7	20.79	N/E	N/E	20.55	N/E	N/E

ตารางที่ ก.11 ผลของการศึกษาความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นของโฟโตแคตาไลซิส

ความเข้มข้นสีย้อม เริ่มต้น(mg/L)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L) (Co)			ความเข้มข้นที่เวลาต่างๆ (mg/L) (Ce)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
20	19.57	N/E	N/E	2.87	2.32	2.41
30	31.52	N/E	N/E	15.12	13.6	14.39
40	41.83	N/E	N/E	21.04	20.18	21.46
50	49.94	N/E	N/E	28.35	26.71	27.07

ตารางที่ ก.12 ผลของการศึกษาความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นของโฟโตไลซิส

ความเข้มข้นสีย้อม เริ่มต้น(mg/L)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L) (Co)			ความเข้มข้นที่เวลาต่างๆ (mg/L) (Ce)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
20	19.57	N/E	N/E	19.02	N/E	N/E
30	31.52	N/E	N/E	30.45	N/E	N/E
40	41.83	N/E	N/E	40.85	N/E	N/E
50	49.94	N/E	N/E	48.9	N/E	N/E

ตารางที่ ก.13 ผลของการศึกษาความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นของชุดควบคุม

ความเข้มข้นสีย้อม เริ่มต้น(mg/L)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L) (Co)			ความเข้มข้นที่เวลาต่างๆ (mg/L) (Ce)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
20	19.57	N/E	N/E	19.33	N/E	N/E
30	31.52	N/E	N/E	30.89	N/E	N/E
40	41.83	N/E	N/E	41.40	N/E	N/E
50	49.94	N/E	N/E	49.09	N/E	N/E

หมายเหตุ N/E = not experiment