การบำบัดสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับการเติมอากาศขนาดนาโนบับเบิ้ล

DYE WASTEWATER TREATMENT BY PHOTOCATALYTIC PROCESS USING TiO_2 CATALYSTS AND NANOBUBBLES

อรกช สุทธิวัฒนกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การบำบัดสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับการเติมอากาศขนาดนาโนบับเบิ้ล

อรกช สุทธิวัฒนกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การบำบัดสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับการเติมอากาศขนาดนาโนบับเบิ้ล Dye Wastewater Treatment by Photocatalytic Process Using TiO_2 Catalysts and Nanobubbles
ชื่อ – นามสกุล	นางสาวอรกช สุทธิวัฒนกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธรรมศักดิ์ โรจน์วิรุฬห์, วศ.ด.
ปีการศึกษา	2562

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

Jarungrat Boonnorat. ..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จรุงวิทย์ บุญโนรัตน์, วศ.ด.)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์สัญญา สิริวิทยาปกรณ์, Ph.D.)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ฐนียา รังษีสุริยะชัย, วศ.ด.)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธรรมศักดิ์ โรจน์วิรุฬห์, วศ.ด.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)
วันที่ 18 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2563

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การบำบัดสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับการเติมอากาศขนาดนาโนบับเบิ้ล
ชื่อ - นามสกุล	นางสาวอรกช สุทธิวัฒนกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธรรมศักดิ์ โรจน์วิรุฬห์, วศ.ด.
ปีการศึกษา	2562

บทคัดย่อ

อุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมประเภทที่มีการใช้น้ำและสารเคมีจำนวนมากทำให้เกิดสารปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียที่ระบายทิ้งจากกระบวนการฟอกย้อม ซึ่งสารปนเปื้อนบางชนิดมีโครงสร้างของโมเลกุลที่มีความซับซ้อน มีความเป็นพิษสูง และไม่สามารถกำจัดได้โดยกระบวนการทางชีวภาพ หรือกระบวนการทางเคมี ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับการเติมอากาศขนาดนาโนบับเบิ้ลซึ่งเป็นกระบวนการที่มีศักยภาพสูง ค่าใช้จ่ายต่ำและไม่เกิดสารตกค้างที่เป็นพิษในสิ่งแวดล้อม

การประเมินประสิทธิภาพและจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาสำหรับชุดทดลองในการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกร่วมกับการเติมอากาศขนาดนาโนบับเบิ้ลภายใต้แหล่งกำเนิดแสง UVA ที่มีความเข้มแสง 1,580 μW.cm^{-2} ทำการศึกษากับน้ำเสียสีสังเคราะห์จากสีย้อม Reactive Black 5 (RB5) และ Indigo Carmine (IC) ที่มีความความเข้มข้นเริ่มต้น 2-10 μM ชุดทดลองขนาด 1.0 ลิตร ในระยะเวลาทดลอง 90 นาที โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบกับชุดควบคุม 7 ชุด

ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกในชุดทดลองสำหรับสีย้อม RB5 และ IC ที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 2-8 μM ผลการทดลองแสดงให้เห็นประสิทธิภาพสูงสุด เท่ากับ 100% และ 100% ตามลำดับ สำหรับค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมทั้งสองชนิดที่มีค่าเท่ากับ 10 μM พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมมีค่าลดลงโดยมีค่าเท่ากับ 87.57%, 99.35% สำหรับ RB5 และ IC ตามลำดับ ทั้งนี้จลนพลศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับใช้อธิบายปฏิกิริยาการบำบัดสีย้อมดังกล่าวเป็นไปตามรูปแบบของสมการ Langmuir-Hinshelwood Model (L-H model) โดยมีค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชัน (k) และค่าคงที่ในปฏิกิริยาดูดติดผิว (K) เท่ากับ 0.661 μM.min และ 0.919 μM^{-1} ตามลำดับ สำหรับสีย้อม RB5 ในส่วนของการกำจัดสีย้อม IC เท่ากับ 0.545 μM.min และ 0.366 μM^{-1} ตามลำดับ

คำสำคัญ: โฟโตออกซิเดชัน รีแอกทีฟแบ็ค 5 อินดิโกคาร์มีน

Thesis Title	Dye Wastewater Treatment by Photocatalytic Process Using TiO_2 Catalysts and Nanobubbles
Name-Surname	Miss Orakot Suthivatanakul
Program	Civil Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Thammasak Rojviroon, D.Eng.
Academic Year	2019

ABSTRACT

Textile dyeing industry uses a lot of water and chemicals causing contaminated wastewater. The contaminants with complex molecular structures or high degrees of toxicity may not be biological or chemical degradable. Therefore, this research focuses on the treatment of dye contaminated wastewater by photocatalytic process using titanium dioxide (TiO_2) as catalysts along with nanobubble aeration system which is a high potential, low cost and non-toxic procedure.

The efficacy and reaction kinetics of the dye wastewater treatment by photocatalytic process using a UVA light source with the intensity of 1,580 $\mu W.cm^{-2}$ along with nanobubble aeration system were evaluated. In the experiment, one litre of synthetic dye wastewater containing Reactive Black 5 (RB5) and Indigo Carmine (IC) in the initial concentrations of 2-10 μM was treated for 90 minutes and compared with seven controlled experiments.

The optimum efficiency of photocatalytic process for RB5 and IC dye removal with an initial concentration of 2-8 μM. was obtained as 100% and 100%, respectively. However, with an initial concentration of 10 μM., the optimum efficiency for dye treatment of RB5 and IC decreased to 87.57% and 99.35%, respectively. The optimum reaction kinetics for RB5 dye removal, according to Langmuir-Hinshelwood model (L-H model), included photocatalytic oxidation rate constant (k) of 0.661 μM.min and surface adsorption constant (K) of 0.919 μM^{-1}. While the optimum reaction kinetics for IC dye removal included photocatalytic oxidation rate constant (k) of 0.545 μM.min and surface adsorption constant (K) of 0.366 μM^{-1}.

Keywords: photo-oxidation, Reactive Black 5, Indigo Carmine

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธรรมศักดิ์ โรจน์วิรุฬห์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ซึ่งเป็นผู้ให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และชี้แนวทางการแก้ไขปัญหาข้อบกพร่องต่างๆ ในทุกๆ ด้านด้วยความเอาใจใส่ และให้กำลังใจแก่ผู้จัดทำวิจัยอย่างดียิ่ง ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง มา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ บริษัท สรธัช เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สำหรับการศึกษาต่อในครั้งนี้ และขอขอบพระคุณสาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่อำนวยความสะดวก ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ และอุปกรณ์ในการทดลองในงานวิจัยครั้งนี้ให้ผ่านไปได้ด้วยดี

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่อบรมเลี้ยงดู แนะนำสั่งสอน สนับสนุน และให้กำลังใจอย่างดียิ่งในทุกๆด้านจนสำเร็จการศึกษา

อรกช สุทธิวัฒนกุล

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....(4)
กิตติกรรมประกาศ.....(5)
สารบัญ.....(6)
สารบัญตาราง.....(8)
สารบัญรูป.....(9)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....(11)
บทที่ 1 บทนำ.....12
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....12
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....13
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....13
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....13
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....14
2.1 อุตสาหกรรมฟอกย้อม.....14
2.2 ประเภทของสีย้อม.....15
2.3 อันตรายจากสีย้อมและสารเคมีที่ช่วยในย้อมสีต่อสิ่งแวดล้อม.....20
2.4 การบำบัดสีในน้ำเสีย.....21
2.5 โฟโตคะตะลิติก.....23
2.6 ไมโคร/นาโนบับเบิ้ล.....28
2.7 จลพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก.....32
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....33
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....37
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....37
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....38
3.3 ชุดควบคุม.....40
3.4 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก.....40

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล....42
4.1 การศึกษาการบำบัดสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับการเติมอากาศขนาดนาโนบับเบิ้ล....42
4.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์ (Kinetics) ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับการเติมอากาศขนาดนาโนบับเบิ้ล....48
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ....51
5.1 สรุปผลการวิจัย....51
5.2 ข้อเสนอแนะที่ได้จากการวิจัย....51
บรรณานุกรม....53
ภาคผนวก ก รูป....57
ภาคผนวก ข ผลการทดลอง....72
ประวัติผู้เขียน....75

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 โลหะหนักที่อยู่ในโครงสร้างโมเลกุลของสีต่าง ๆ.....21
ตารางที่ 2.2 แถบพลังงานและช่วงความยาวคลื่นที่มีผลต่อแถบพลังงานของสารประกอบที่ pH=1..... 28
ตารางที่ 3.1 ชุดควบคุมการทดลอง.....40
ตารางที่ ข-1 ข้อมูลประสิทธิภาพการกำจัดสี.....73

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของสีเอซิด....15
รูปที่ 2.2 โครงสร้างโมเลกุลของสีไดเร็กท์....16
รูปที่ 2.3 โครงสร้างโมเลกุลของสีเบสิก....17
รูปที่ 2.4 โครงสร้างโมเลกุลของสีดีสเพอร์ส....17
รูปที่ 2.5 โครงสร้างโมเลกุลของสีรีแอกทีฟ....18
รูปที่ 2.6 โครงสร้างโมเลกุลของสีอะโซอิค....19
รูปที่ 2.7 โครงสร้างโมเลกุลของสีแว็ต....19
รูปที่ 2.8 โครงสร้างโมเลกุลของสีซัลเฟอร์....20
รูปที่ 2.9 กลไกของกระบวนการโฟโตคะตะลิติก....26
รูปที่ 2.10 ฟองอากาศแบบธรรมดากับฟองอากาศไมโคร/นาโน ที่ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ....29
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการหาประสิทธิภาพการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก....39
รูปที่ ก.1 การลดลงของสี IC ตามลำดับเวลา ที่บำบัดด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกร่วมกับการเติมอากาศขนาดนาโนบับเบิ้ล....58
รูปที่ ก.2 ณ เวลา ที่ 0 นาที....58
รูปที่ ก.3 ณ เวลาที่ 5 นาที....59
รูปที่ ก.4 ณ เวลาที่ 15 นาที....59
รูปที่ ก.5 ณ เวลาที่ 30 นาที....60
รูปที่ ก.6 ณ เวลาที่ 60 นาที....60
รูปที่ ก.7 ณ เวลาที่ 90 นาที....61
รูปที่ ก.8 การลดลงของสี IC ตามลำดับเวลา ที่บำบัดด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยไม่เติมอากาศขนาดนาโนบับเบิ้ล....61
รูปที่ ก.9 ณ เวลาที่ 0 นาที....62
รูปที่ ก.10 ณ เวลาที่ 5 นาที....62
รูปที่ ก.11 ณ เวลาที่ 15 นาที....63
รูปที่ ก.12 ณ เวลาที่ 30 นาที....63
รูปที่ ก.13 ณ เวลาที่ 60 นาที....64

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ ก.14 ณ เวลาที่ 90 นาที....64
รูปที่ ก.15 การลดลงของสี RB5 ตามลำดับเวลา ที่บำบัดด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกร่วมกับการเติมอากาศขนาดนาโนบับเบิ้ล....65
รูปที่ ก.16 ณ เวลาที่ 0 นาที....65
รูปที่ ก.17 ณ เวลาที่ 5 นาที....66
รูปที่ ก.18 ณ เวลาที่ 15 นาที....66
รูปที่ ก.19 ณ เวลาที่ 30 นาที....67
รูปที่ ก.20 ณ เวลาที่ 60 นาที....67
รูปที่ ก.21 ณ เวลาที่ 90 นาที....68
รูปที่ ก.22 การลดลงของสี RB5 ตามลำดับเวลา ที่บำบัดด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยไม่เติมอากาศขนาดนาโนบับเบิ้ล....68
รูปที่ ก.23 ณ เวลาที่ 0 นาที....69
รูปที่ ก.24 ณ เวลาที่ 5 นาที....69
รูปที่ ก.25 ณ เวลาที่ 15 นาที....70
รูปที่ ก.26 ณ เวลาที่ 30 นาที....70
รูปที่ ก.27 ณ เวลาที่ 60 นาที....71
รูปที่ ก.28 ณ เวลาที่ 90 นาที....71

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

Nanobubble (NB)	นาโนบับเบิ้ล
Indigo Carmine (IC)	สีอินดิโกคาร์มีน
Reactive Black 5 (RB5)	สีรีแอคทีฟแบล็คไฟท์
Eg	ช่องว่างแถบพลังงาน
μM	ไมโครโมลาร์
μW	ไมโครวัตต์
h_{vb}^{+}	โฮลที่แถบวาเลนซ์
H_2O_2	ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide)
$h\nu$	อนุภาคของแสง (Photon)
L-H Model	Langmuir-Hinshelwood model
min	นาที
$O_2^{-\bullet}$	ซุปเปอร์ออกไซด์เรดิคอล (Superoxide Redical)
TiO_2	ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

อุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมประเภทที่มีการใช้น้ำและสารเคมีเป็นจำนวนมาก ซึ่งปัญหาส่วนใหญ่ที่พบและมีผลกระทบโดยตรงต่อระบบสิ่งแวดล้อมคือ การปล่อยน้ำเสียจากโรงงานลงสู่สิ่งแวดล้อม น้ำเสียที่ปล่อยออกมามีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ สี, บีโอดี, ซีโอดี, พีเอช, สารแขวนลอย, อุณหภูมิ และอื่น ๆ ซึ่งมีผลต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ ทำให้เกิดการทำลายทัศนียภาพและเป็นที่น่ารังเกียจ มลสารส่วนใหญ่ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมนั้นมาจากกระบวนการย้อมสี (dyeing) และการตกแต่งสำเร็จ (finishing) โดยส่วนมากแล้วมลสารเหล่านี้และสีบางประเภทสามารถบำบัดได้ด้วยวิธีทางกายภาพและทางเคมี ทั่ว ๆไป แต่มีสีบางประเภทที่ไม่สามารถบำบัดได้ด้วยวิธีการดังกล่าว ผลเสียที่เกิดขึ้นจากสี นอกจากจะทำให้แหล่งน้ำธรรมชาติขาดความสวยงามแล้วยังลดอัตราการละลายของออกซิเจนจากบรรยากาศลงสู่แหล่งน้ำ และบดบังปริมาณแสงอาทิตย์ที่ตกลงสู่ผิวน้ำ ส่งผลกระทบต่อการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำอีกทั้งยังทำให้ให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลงซึ่งกระทบโดยตรงต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ ปัจจุบันเทคโนโลยีที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมมีทั้งกระบวนการทางกายภาพและเคมีซึ่งมีข้อจำกัดต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสี สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ ที่ใช้ในกระบวนการผลิต นอกจากนี้ยังมีค่าใช้จ่ายในส่วนของสารเคมีในการบำบัดค่อนข้างสูง

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการประเมินประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกร่วมกับการเติมอากาศขนาดนาโนบับเบิ้ล ทั้งนี้เพื่อมุ่งเน้นในการปรับปรุงประสิทธิภาพในการบำบัดสีโดยกระบวนการดังกล่าวให้ดียิ่งขึ้น โดยศึกษาผลจากเติมอากาศขนาดนาโนบับเบิ้ลต่อการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดสี และจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาที่เปลี่ยนไป

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ประเมินประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับการเติมอากาศขนาดนาโนบับเบิ้ล

1.2.2 หาค่าจลนพลศาสตร์ (Kinetics) ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับการเติมอากาศขนาดนาโนบับเบิ้ล

1.3 ขอบเขต

1.3.1 น้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งเตรียมจากสีย้อม Reactive Black 5 (RB5) และ Indigo Carmine (IC)

1.3.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะลิติกคือ ผง Nano-TiO_2

1.3.2 การเติมอากาศโดยใช้มีอนุภาคขนาดนาโนบับเบิ้ล

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับการเติมอากาศขนาดนาโนบับเบิ้ล

1.4.2 ข้อมูลจลนพลศาสตร์ (Kinetic) ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับการเติมอากาศขนาดนาโนบับเบิ้ล

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อุตสาหกรรมฟอกย้อม

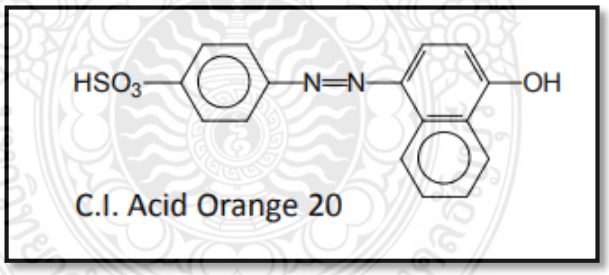
เนื่องจากอุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่มในไทยในปัจจุบันมีความจำเป็นต่อการนำเข้าเงินตราต่างประเทศเป็นอย่างมาก และยังเป็นอุตสาหกรรมที่มีการขยายตัวสูงขึ้นเรื่อย ๆ ตามความต้องการของผู้บริโภค โดยเครื่องนุ่งห่มเป็นสิ่งสำคัญต่อการใช้ชีวิตของมนุษย์ อุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมขั้นกลางของอุตสาหกรรมสิ่งทอ เป็นกระบวนการที่เปลี่ยนวัสดุของสิ่งทอที่อยู่ในรูปเส้นด้ายหรือผ้าดิบให้เป็นวัสดุสำเร็จรูปที่สามารถนำไปผลิตหรือจำหน่ายให้แก่ผู้บริโภคต่อไปได้ ขั้นตอนการผลิตที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมฟอกย้อมนั้นต้องใช้วัตถุดิบที่เป็นสารเคมี ไม่ว่าจะเป็นสีย้อม กรด ด่าง สารปรุงแต่งคุณภาพต่าง ๆ เช่น สารตกแต่ง สารฟอกขาว เป็นต้น ซึ่งสิ่งที่ขาดไม่ได้ก็คือน้ำที่ใช้ในขั้นตอนการฟอกย้อมที่มีการใช้ปริมาณที่มาก เพื่อให้ได้ผ้าหรือเส้นด้ายที่มีสีสันสวยงาม และคงทนต่อสภาวะแวดล้อมตลอดจนความพอใจของผู้บริโภค

ดังนั้นผลกระทบที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมจึงทำให้เกิดน้ำและสารเคมีที่ใช้จากขั้นตอนการฟอกย้อม ซึ่งน้ำเสียที่ปล่อยออกมาจะมีทั้งสารพิษ สารแขวนลอย น้ำมัน และของเสียเช่น สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ชนิดต่าง ๆ นอกจากนี้ยังมีอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูง มีสภาพความเป็นด่าง มีกลิ่นที่แรงและมีสีที่น่ารังเกียจ เมื่อน้ำเสียที่มีสีถูกปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม ทำให้ความสวยงามของธรรมชาติถูกทำลาย และยังทำให้สมดุลทางธรรมชาติเสียไปอีกด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าสีที่เจอในน้ำเสียซึ่งเป็นอนุภาคคอลลอยด์จะไปขัดขวางแสงอาทิตย์ที่ตกลงสู่ผิวน้ำ ทำให้ให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลง ทำให้สัตว์น้ำอาจตายได้ ดังนั้นก่อนที่จะปล่อยน้ำเสียลงสู่สิ่งแวดล้อมควรจะต้องมีกระบวนการในการกำจัด หรือบำบัดน้ำเสียก่อน เพื่อปรับปรุงคุณภาพของปริมาณสี จะเป็นหรือแก้ปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นได้ โดยเฉพาะมลพิษทางน้ำ ในปัจจุบันได้มีการกำหนด ข้อบังคับเกี่ยวกับการปล่อยน้ำเสียซึ่งเป็นที่ยอมรับในหลาย ๆ ประเทศ อาทิเช่น การดูจากสิ่งมีชีวิตมีความสามารถรับได้ในปริมาณเท่าไหร่ สมบัติทางเคมีของน้ำทิ้ง ระดับของสีในน้ำทิ้ง เป็นต้น [3]

2.2 ประเภทของสีย้อม

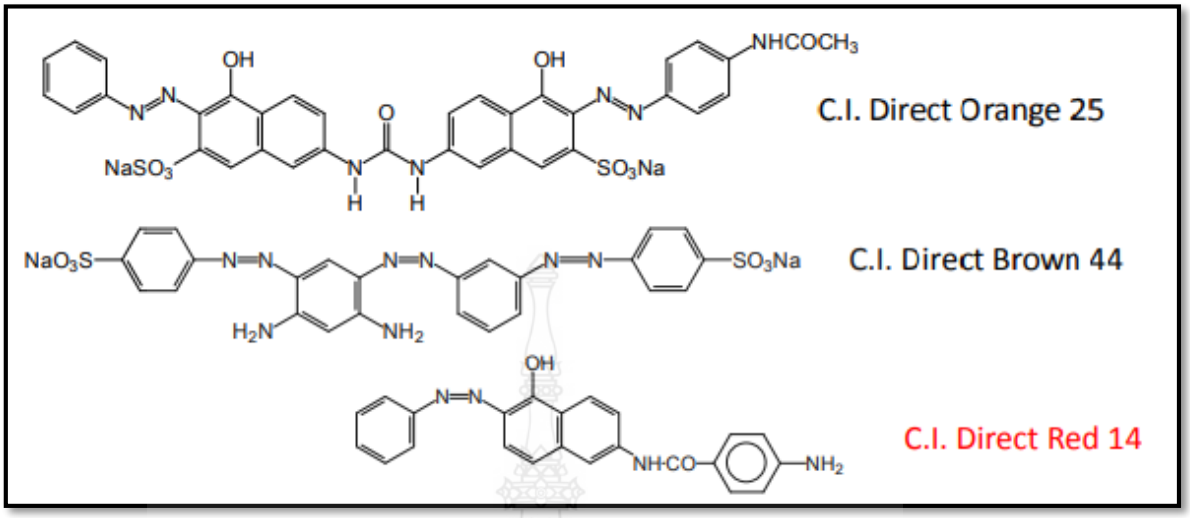
การแบ่งสีย้อมที่มีความนิยมกันมากที่สุด คือ การแบ่งสีย้อมตามการใช้งาน เพราะจะต้องมีความคงทนต่อการซักล้าง มีความคงทนต่อแสงและมีความคงทนต่อความร้อน ซึ่งในกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมได้แบ่งสีย้อมตามวิธีใช้ออกเป็น 11 ประเภท คือ สีเอซิด, สีไดเร็กท์, สีเบสิค, สีดิสเพอร์ส, สีรีแอกทีฟ, สีอะโซอิค, สีแว็ต, สีมอร์แดนท์, สีอินเกรน, สีออกซิเดชัน และ สีซัลเฟอร์ โดยที่สีย้อมแต่ละประเภทจะมีสูตรโครงสร้างโมเลกุลทางเคมี คุณสมบัติของสีย้อม ตลอดจนวิธีการใช้งานที่แตกต่างกัน ดังนั้นในการเลือกใช้สีย้อมจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อกระบวนการย้อมสี เพราะบางวัสดุสามารถย้อมได้ด้วยสีย้อมเพียงกลุ่มเดียว บางวัสดุสามารถย้อมได้หลายสีย้อม เช่น เส้นใยเซลลูโลส ซึ่งส่วนใหญ่จะย้อมด้วยสีไดเร็กท์ เป็นต้น [2],[19]

1) สีเอซิด (Acid dye) สีประเภทนี้เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ที่มีประจุลบ สามารถละลายน้ำได้ดี ส่วนใหญ่เป็นเกลือโซเดียมของกรดซัลโฟนิก โดยจะมีโครงสร้างโมเลกุลคล้ายกับสีย้อมไดเร็กท์ กลไกในการติดของสีเกิดเป็นพันธะไอออนิก ใช้สำหรับย้อมเส้นใยโปรตีน ในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรดเจือจาง สีเอซิดบางตัวสามารถนำไปใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่น ปอ ป่าน ไนลอน ใยขนแกะ ไหม และ อะคลิริกได้เป็นอย่างดี ซึ่งวิธีการใช้จะนำสีย้อมที่เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ไปละลายน้ำที่เป็นกรดหรือเป็นกลาง สีเอซิดไม่ทนต่อการซัก ไม่ทนเหงื่อ



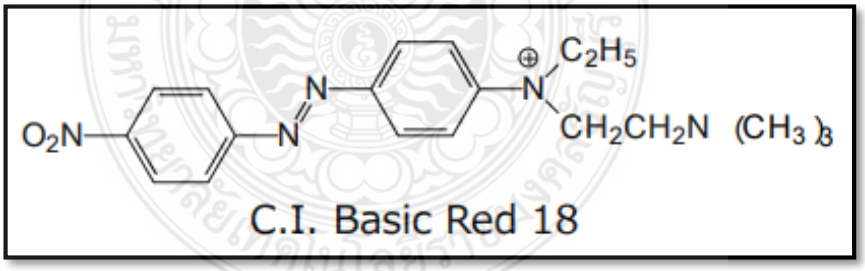
รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของสีเอซิด

2) สีไดเร็กท์ (Direct dye) หรืออาจเรียกว่าสีย้อมฝ้าย สีประเภทนี้ส่วนใหญ่มีสารประกอบ อะโซที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิคที่ทำให้ตัวสีมีความสามารถละลายน้ำได้ มีประจุลบ นิยมใช้สำหรับย้อมเส้นใยเซลลูโลส สีจะติดเส้นใยได้ด้วยโมเลกุลของสีจัดเรียงตัวแทรกอยู่ในระหว่างโมเลกุลเส้นใย และยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ซึ่งสีไม่ทนต่อการซักน้ำ สีตกง่าย ทนแสง



รูปที่ 2.2 โครงสร้างโมเลกุลของสีไดเร็กท์

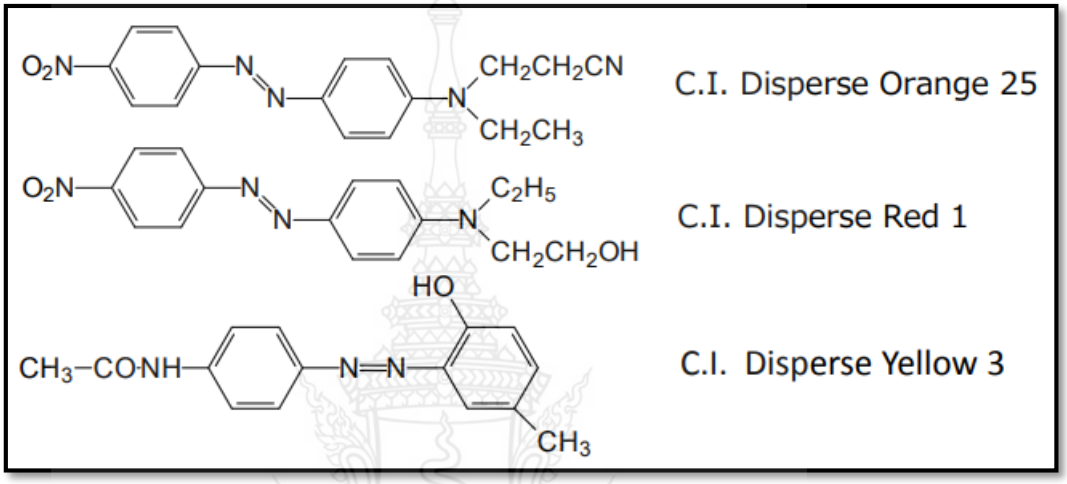
3) สีเบสิก (Basic or cationic dye) สีย้อมประเภทนี้เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ (organic base) ให้ประจุลบ ละลายน้ำได้ นิยมใช้สำหรับย้อมเส้นใยโปรตีน ไนลอนและใยอะคริลิกได้ดี ซึ่งในขณะย้อมโมเลกุลของสีจะมีส่วนที่มีประจุลบยึดจับเข้ากับโมเลกุลของเส้นใย เป็นสีที่มีความติดทน ไม่ควรใช้ย้อมกับเส้นใยธรรมชาติเพราะจะไม่มีความทนต่อการซักและแสง



รูปที่ 2.3 โครงสร้างโมเลกุลของสีเบสิก

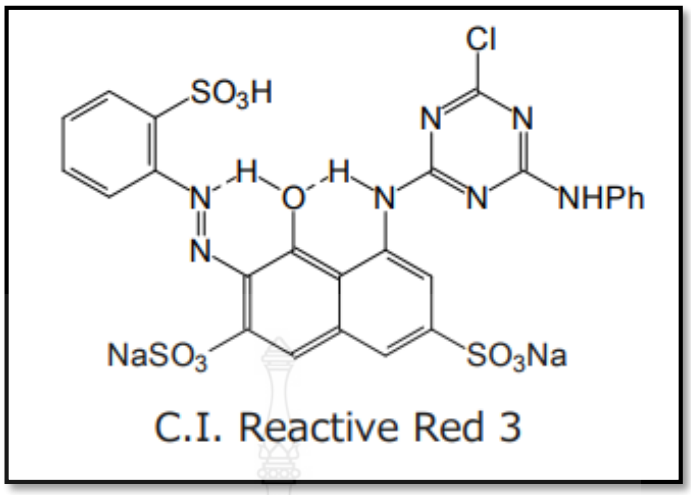
4) สีดิสเพอร์ส (Disperse dye) เป็นสีประเภทที่ไม่ละลายน้ำแต่มีคุณสมบัติกระจายได้ดี สามารถย้อมเส้นใยอะซิเตท เส้นใยโพลีเอสเตอร์ ไนลอน และอะคริลิกได้ดี ในการย้อมจะใช้สารพา (carrier) เพื่อช่วยเร่งอัตราการดูดซึมของเม็ดสีเข้าไปในเส้นใยหรือย้อมโดยใช้อุณหภูมิ และความดันสูง ซึ่งสีดิสเพอร์สเป็นสีที่มีความทนแสง และมีสามารถซักได้เป็นอย่างดี แต่สีจะซีดลงหากได้สัมผัส

ควันหรือแก๊สบางชนิด เช่น แก๊สไนตรัสออกไซด์ สีดิสเพอร์สแบ่งประเภทออกได้เป็น 2 กลุ่ม โดยพิจารณากลุ่มเคมีในตัวสีย้อม ได้แก่ สีย้อมอะโซ (azo dyes) และสีย้อมแอมมิโน แอนทราคิวโนน (amino anthraquinone) ซึ่งทั้ง 2 กลุ่ม ประกอบด้วยอนุพันธ์ของเอทราโนลามีน (ethanolamine; $NH_2CH_2CH_2CH$) หรืออนุพันธ์ที่มีความคล้ายคลึงกัน



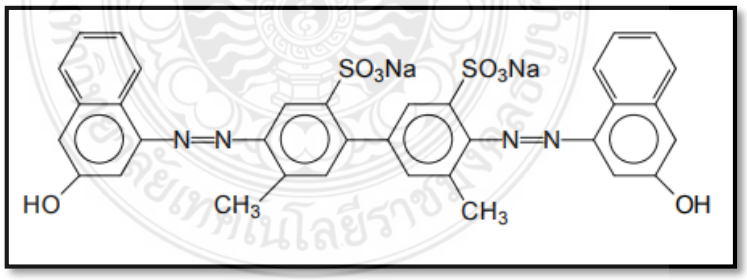
รูปที่ 2.4 โครงสร้างโมเลกุลของสีดีสเพอร์ส

5) สีรีแอกทีฟ (Reactive dye) เป็นสีประเภทที่สามารถในการละลายน้ำได้ มีประจุเป็นลบ เมื่ออยู่ในน้ำจะมีคุณสมบัติเป็นด่าง สีย้อมประเภทนี้เหมาะต่อการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด โดยโมเลกุลของเม็ดสีจะยึดจับกับหมู่ไฮดรอกไซด์ (OH^-) ของเซลลูโลสและเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ในสภาวะที่ทีความเป็นด่างกลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส สีรีแอกทีฟแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ย้อมติดสีที่อุณหภูมิสูง 70-75 °C และกลุ่มที่ย้อมติดสีที่อุณหภูมิปกติ สีรีแอกทีฟให้สีที่มีความสดใส ทุกสีจะติดทนในทุกสภาวะ



รูปที่ 2.5 โครงสร้างโมเลกุลของสีรีแอกทีฟ

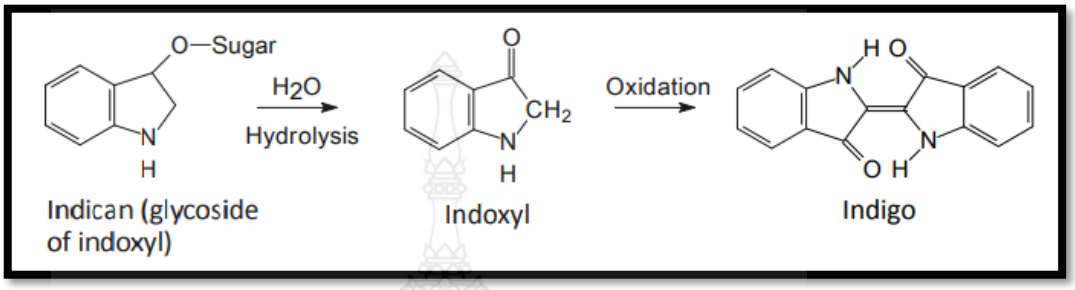
6) สีอะโซอิค (Azoic dye) สีย้อมประเภทนี้ไม่สามารถละลายในน้ำได้ การที่สีจะก่อรูปเป็นเส้นใยได้ต้องย้อมด้วยสารประกอบฟีนอลซึ่งต้องละลายน้ำก่อน โดยเป็นขั้นตอนที่ทำให้รวมตัวกันเป็นสี (coupling) แล้วย้อมทับด้วยสารไดอะโซคอมโพแนนท์จึงจะเกิดเป็นสีขึ้นมาได้ สีอะโซอิคใช้ย้อมเส้นใยได้ทั้งเซลลูโลส ไนลอน หรืออะซิเตท สีอะโซอิคเป็นสีที่ความทนต่อการซัก แต่ไม่ความทนต่อการขัดถู



รูปที่ 2.6 โครงสร้างโมเลกุลของสีอะโซอิค

7) สีแว็ต (Vat dye) เป็นสีประเภทที่ไม่มีความสามารถในการละลายน้ำได้ เมื่อจะทำการย้อมจึงต้องมีการเตรียมน้ำย้อมให้ สีแว็ตละลายน้ำ โดยทำปฏิกิริยากับสารรีดิวซ์และโซเดียมไฮ

ดรอกไซด์ สีแว็ตจะถูกรีดิวส์ให้กลายเป็นเกลือ ทำให้สามารถซึมเข้าไปในเส้นใยได้ เมื่อนำผ้าไปผึ่งในอากาศสีในเส้นใยจะถูกออกซิไดส์เป็น สีแว็ต สีย้อมประเภทนี้มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญอยู่ 2 กลุ่ม คือ สีอินดิกอยด์ (indigoid) และ สีแอนทราควินอยด์ (anthraquinoid)



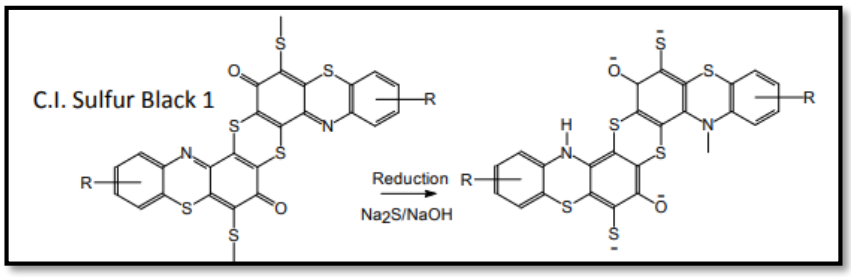
รูปที่ 2.7 โครงสร้างโมเลกุลของสีแว็ต

8) สีมอร์แดนท์ หรือโครม (Mordant or chrome dye) สีย้อมประเภทนี้ต้องมีการใช้สารช่วยติด เพื่อเข้าไปช่วยทำให้เกิดการติดสีลงบนเส้นใย สารที่ช่วยให้ติดสีที่ใช้คือ สารประกอบออกไซด์ของโลหะ เช่น โครเมียม ดีบุก เหล็ก อะลูมิเนียม เป็นต้น สีมอร์แดนท์เป็นสีที่มีโมเลกุลใหญ่ ซึ่งเกิดจากสีมอร์แดนท์หลายโมเลกุลจับกับโลหะแล้วละลายน้ำได้จึงทำให้ย้อมได้ง่าย ซึ่งใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนและเส้นใยพอลีเอไมด์ได้ดี

9) สีอินเกรน เป็นสีประเภทที่ไม่ละลายน้ำ โดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยากับน้ำ สีย้อมประเภทนี้เหมาะสำหรับย้อมฝ้าย

10) สีออกซิเดชัน (Oxidation dye) เป็นสีประเภทที่มีการละลายน้ำ โดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยาในน้ำ โดยสีจะมีความติดทน อาศัยในปฏิกิริยาการตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย เหมาะสำหรับย้อมฝ้ายและขนสัตว์

11) สีซัลเฟอร์ (Sulfur dye) เป็นสีประเภทที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ เมื่อจะทำการย้อมต้องมีการรีดิวซ์สี เพื่อให้โมเลกุลอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้ แต่สีซัลเฟอร์บางประเภทที่ผลิตออกมาจำหน่ายจะอยู่ในรูปที่ถูกรีดิวซ์แล้วละลายน้ำได้ ซึ่งนิยมนำสีซัลเฟอร์มาย้อมฝ้าย สีจะมีความติดทน และยังเป็นสีที่มีราคาถูก แต่เป็นสีที่ไม่มีความทนต่อการซัก



รูปที่ 2.8 โครงสร้างโมเลกุลของสีซัลเฟอร์

2.3 อันตรายจากสีย้อมและสารเคมีที่ช่วยในย้อมสีต่อสิ่งแวดล้อม

จากกระบวนการต่าง ๆ สำหรับการย้อม จะเห็นได้ว่ามีการใช้สีย้อม และสารเคมีอยู่หลายชนิด เพื่อให้กระบวนการย้อมสีมีประสิทธิภาพสูงที่สุด แต่ในสีย้อม และสารเคมี มีองค์ประกอบที่อันตรายต่อสิ่งแวดล้อมอยู่หลายชนิด เช่น อิออนของโลหะหนัก Cu, Ni, Cr, Hg และCo ซึ่งสารโลหะหนักเหล่านี้เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมทั้งสิ้น โดยที่มาของอิออนของโลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในสีย้อมนั้น ได้แก่ [15]

2.3.1 เจือปนจากกระบวนการสังเคราะห์สี เช่น Hg ที่ถูกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้นตอนการ Sulfonation ของสีในกลุ่มของสีแอนทราควินอยด์ทำให้ตกค้างในสีย้อม

2.3.2 ส่วนหนึ่งในโครงสร้างโมเลกุลของสีเอง เพื่อทำให้สีย้อมมีความคงทนสูงขึ้น อิออนของโลหะหนักนั้นจะต้องทำให้มวลโมเลกุลของสีย้อมสูงขึ้นด้วยเพื่อให้คงทนต่อการซักดีขึ้น รวมทั้งสามารถดูดอิเล็กตรอนที่ถูกเร้าเมื่อได้รับแสงที่มากระทบจึงทำให้มีความคงทนต่อแสงแดดสูงขึ้นอีกด้วย โดยสีย้อมแต่ละชนิดจะมีโลหะหนักอยู่ในโมเลกุลที่แตกต่างกันตามประเภทของสี ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 โลหะหนักที่อยู่ในโครงสร้างโมเลกุลของสีต่าง ๆ [3]

ชนิดของสีย้อม	โลหะหนักที่อยู่ในโครงสร้างโมเลกุล
ไดเร็กท์	Cu
รีแอคทีฟ	Cu, Ni
แว็ต	Non-Heavy metal
ดีสเพอร์ส	Non-Heavy metal
เอซิด	Cu, Cr, Co

2.3.3 กรด และด่างที่ใช้สำหรับการย้อมจะส่งผลทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งในเรื่องการกัดกร่อน การเปลี่ยนรูปของสารละลายในน้ำ โดยค่า pH ที่เป็นมาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม กำหนดอยู่ในช่วงระหว่าง 5.5-9.0 ซึ่งจะเป็นช่วงที่มีความเป็นกลางโดยในการปรับสภาพความเป็นกรดด่างของน้ำก่อนทิ้งสู่สิ่งแวดล้อมจะสามารถสะเทินได้ด้วยสารตรงกันข้าม

2.4 การบำบัดสีในน้ำเสีย

ส่วนใหญ่สีที่โรงงานฟอกย้อมใช้จะเป็นสีย้อมและสารเคมี ซึ่งจะมีส่วนที่หลงเหลืออยู่ในน้ำที่ใช้ในขั้นตอนการผลิต และถูกปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำ โดยตามความในประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดให้สีในน้ำทิ้ง มีค่าไม่เกิน 300 เอดีเอ็มไอ ดังนั้นน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมก่อนที่จะมีการปล่อยทิ้งออกจากโรงงานต้องมีการผ่านขั้นตอนการบำบัดน้ำเสีย เพื่อทำการบำบัดและกำจัดสารต่าง ๆ รวมทั้งสีที่หลงเหลือก่อน ซึ่งมีวิธีการบำบัดดังนี้

2.4.1 การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical Coagulation) เป็นการกำจัดสีที่มีการใช้กันอย่างกว้างขวางโดยมักใช้ร่วมกับการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง และสามารถใช้เป็นขั้นตอนการบำบัดขั้นต้น โดยสารตกตะกอนที่มีความนิยมใช้ ได้แก่ ปูนขาว, สารส้ม, เฟอร์รัสคลอไรด์ หรือเฟอร์รัสซัลเฟต เป็นต้น ในการการกำจัดสีด้วยการตกตะกอน โดยใช้สารส้มทำให้โมเลกุลของสีถูกดูดซับบนอนุภาคของสารส้ม ทำให้เกิดตะกอนของสีรวมตัวจมตัวลงในน้ำทิ้ง จากนั้นต้องทำให้น้ำทิ้งมีค่าเป็นกลางก่อนปล่อยลงท่อน้ำทิ้ง เทคนิคนี้สามารถกำจัดสีออกไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งน้ำทิ้งจะมีลักษณะที่ไม่เหมือนกัน สามารถแบ่งได้ตามประเภทของโมเลกุลสีย้อมถ้าสีย้อมมีโมเลกุลเล็ก เช่นสีแอสิด, สีรีแอคทีฟ การเกิด

ตะกอนของสีโดยการใช้สารส้มนั้นจะไม่สามารถทำได้ ดังนั้นต้องมีการปรับปรุงประสิทธิภาพในปฏิกิริยาการตกตะกอนให้เป็นไปอย่างสมบูรณ์ ด้วยการใช้สารช่วยให้เกิดการรวมตัวกันของตะกอน เช่น Polyelectrolyte เป็นต้น ซึ่งจะต้องใช้ในปริมาณที่เหมะสม เพราะความเข้มข้นของ Polyelectrolyteที่หลงเหลืออยู่ในน้ำทิ้ง ส่งผลทำให้เกิดกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification)

2.4.2 ขั้นตอนการบำบัดทางชีววิทยา (Biological Treatment) ขั้นตอนนี้จะอาศัยจุลินทรีย์ในการลดสีโดยจุลินทรีย์ที่มีการเติบโตขึ้นมาใหม่จะมีการดูดซับสีไปด้วยทำให้สามารถบำบัดสีได้ แบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ

1) ระบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge) เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยาซึ่งอาศัยจุลินทรีย์ในการเปลี่ยนรูปของมวลสารต่าง ๆ ที่มีอยู่ในน้ำเสีย ทำให้ความสกปรกในน้ำเสียลดลง

2) ระบบบ่อเติมอากาศ (Aerated Lagoon) ดัดแปลงจากการขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียแบบที่มีการใช้อากาศและไม่มีการใช้อากาศร่วมกัน โดยติดตั้งเครื่องเติมอากาศที่ผิวน้ำ ระบบนี้จะมีความคล้ายกับระบบตะกอนเร่ง ต่างกันตรงที่บ่อนี้จะมีขนาดค่อนข้างใหญ่ ขุดจากพื้นดินโดยตรง คุณภาพของน้ำเมื่อผ่านขั้นตอนนี้จะมีค่าบีโอดีลดลงโดยประมาณร้อยละ 30-50

2.4.3 การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) เป็นขั้นตอนการดูดซับที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายสามารถใช้ในการกำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่จะมีข้อจำกัดอยู่ที่น้ำหนักโมเลกุลของของเสียที่จะถูกดูดซับจะต้องมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 400 ซึ่งโดยทั่วไปน้ำหนักโมเลกุลของเสียในอุตสาหกรรม สีจะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า 400 และน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า 1200 ดังนั้นก่อนการกำจัดสีด้วยขั้นตอนการดูดซับบนถ่านกัมมันต์จะต้องมีการปรับขนาดของโมเลกุลของเสียให้เหมาะสมก่อน [16],[21]

2.4.4 การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน (Ozone Treatment) โดยทั่วไปโมเลกุลสีย้อมจะมีหมู่โครโมฟอร์จะเป็นสารประกอบอินทรีย์จำพวกวงแหวนกับพันธะคู่ หรือพันธะเดี่ยว ดังนั้นการที่จะทำลายโมเลกุลของสีนั้นต่องทำลายหมู่โครโมฟอร์ที่เป็นพันธะคู่ หรือพันธะเดี่ยวก่อน ซึ่งในการบำบัดในทางชีววิทยาจะไม่สามารถทำได้ เนื่องจาก O_3 สามารถออกซิไดซ์ได้รุนแรง จะทำปฏิกิริยากับสารประกอบในน้ำทิ้งอย่างรวดเร็ว เมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเด ชันโมเลกุลของสีย้อม ซึ่งส่วนใหญ่ประกอบกด้วยไนโตรเจน , คลอรีนหรือซัลเฟอร์เกิดเป็นสารประกอบตัวใหม่ที่มีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารดังกล่าว [26]

2.4.5 เทคโนโลยีเยื่อแผ่น (Membrane Technology) เป็นขั้นตอนการกำจัดสีย้อมด้วยเยื่อแผ่น (Membrane) สามารถใช้ในการกำจัดสีและนำเอาสารเคมีที่ใช้ในขั้นตอนการย้อมสีหรือสีย้อมบางประเภทกลับมาใช้ใหม่ได้

2.5 โฟโตคะตะลิติก

กระบวนการโฟโตคะตะลิติก (Photocatalytic Process) เป็นกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้โฟโตคะตะลิสต์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Photocatalyst) คำว่าโฟโตคะตะลิสต์เป็นคำที่ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ โฟโต (Photo) หมายถึง การใช้แสงเป็นตัวเร่งในการเกิดปฏิกิริยา และ คะตะลิสต์ (Catalyst) หรือตัวเร่งปฏิกิริยา หมายถึง สารประกอบทั่วไปไม่ว่าจะอยู่ในรูปผงหรือฟิล์มก็สามารถเพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยาให้เข้าสู่สมดุลเร็วขึ้น โดยที่ตัวเองไม่เปลี่ยนแปลงหลังจากปฏิกิริยาดำเนินไปอย่างสมบูรณ์ [1],[6],[11]

กระบวนการโฟโตคะตะลิติกติก ประกอบด้วยการปล่อยอิเล็กตรอนจากแถบเวเลนต์ (VB) ไปยังแถบนำไฟฟ้า (CB) ของสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) และการสร้างโฮล (h^+)ในแถบเวเลนต์ เพราะว่ารังสีอัลตราไวโอเลต มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าแถบพลังงาน (Band Gap > 3.2 eV) กระบวนการนี้จึงสามารถถูกใช้ในการทำลายมวลสารได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับปรากฏการณ์จากข้างต้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่มีการส่องแสงลงบนสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดอิเล็กตรอน และ โฮล (e^-- h^+) โดยประจุที่เกิดขึ้นนี้มีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และรีดักชันในสารละลายในความสามารถที่เหมาะสมของปฏิกิริยารีดอกซ์

องค์ประกอบของการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกประกอบไปด้วยดังนี้

1) Catalysts

2) พลังงานแสง ซึ่งจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเทียบเท่ากับพลังงานโฟตอนของตัวคะตะลิสต์

3) น้ำ (H_2O)

4) ออกซิเจน (O_2) หรือ ตัวออกซิแดนท์ อื่น ๆ

2.5.1 ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาคะตะลิติก

1. ชนิดตัวคะตะลิสต์ (Type of Catalyst)

สารกึ่งตัวนำที่นำมาทำเป็นตัวแคตาลิสต์ ในกระบวนการโฟโตคะตะลิติก มีหลายชนิด ได้แก่ TiO_2, ZnO, CdS, Molybdenum (VI) Oxide และ Tungsten (VI) Oxide ซึ่งชนิดต่าง ๆ จะมีลักษณะแตกต่างกัน ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่นิยมนำมาเป็นตัวคะตะลิสต์ ไทเทเนียมไดออกไซด์มีความสามารถละลายน้ำต่ำ (Low Solubility) ราคาไม่แพง ไม่เป็นพิษ ทนต่อการกัดกร่อน มีพื้นที่ผิวมาก มีช่องว่างแถบพลังงาน (Band Gap) กว้างและเหมาะสม จะป้องกันการรวมตัวใหม่ของ e^- และ h^+

2. ปริมาณตัวคะตะลิสต์ (Catalyst Dosage)

ตัวคะตะลิสต์ทำหน้าที่เป็นสารดูดซับสารทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกที่ผิวของคะตะลิสต์ การเพิ่มของปริมาณแคตาลิสต์ ทำให้พื้นที่ผิวของการดูดซับเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกเพิ่มขึ้น

3. ความเข้มแสง (Light Intensity)

การเพิ่มความเข้มแสงจะเป็นการเพิ่มจำนวนโฟตอนให้มากขึ้นทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยามากขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของแสงที่ความเข้มแสงต่ำ e^- กับ h^+และการรวมตัวของ e^- กับ h^+ จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว

4. ปริมาณการละลายของออกซิเจนในน้ำ (Dissolved Oxygen, DO)

ออกซิเจนที่ละลายในน้ำและตัวรับอิเล็กตรอนอื่น จะทำให้อัตราของปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกเพิ่มขึ้น เพราะโมเลกุลออกซิเจนทำปฏิกิริยากับ e^- ได้ซุปเปอร์ออกไซด์อิออนเรดิคอล ทำให้ e^- กับ h^+ รวมตัวกันได้ยากขึ้น ทำให้การเกิดโฟโตคะตะลิติกเพิ่มขึ้น ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ จึงมีผลต่อประสิทธิภาพการเกิดโฟโตคะตะลิติก

2.5.2 ชนิดของโฟโตคะตะลิติก

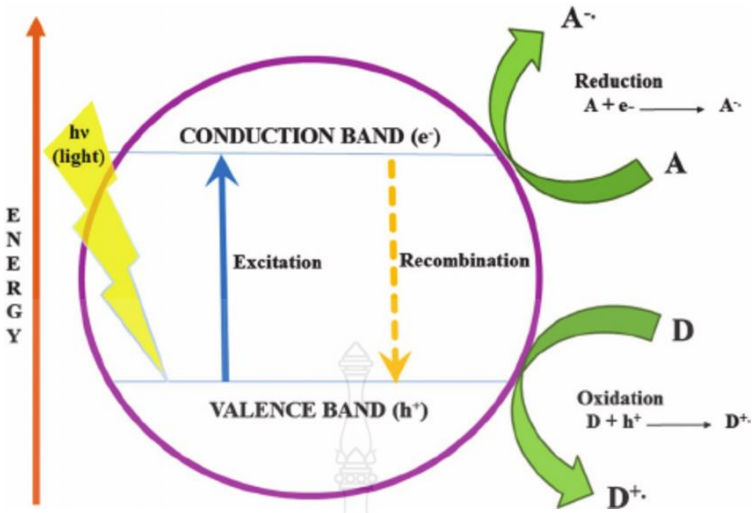
โฟโตคะตะลิติกสามารถแยกได้ 2 ประเภท เมื่อพิจารณาจากสถานะของตัวคะตะลิสต์ ดังนี้

1. โฟโตคะตะลิติกแบบสถานะเดียว (Homogeneous Photocatalysis) เป็นกระบวนการโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ที่มีสถานะเดียวกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด (โดยทั่วไปแล้วจะเป็นของเหลว)

2. โฟโตคะตะลิติกแบบสถานะต่าง (Heterogeneous Photocatalysis) เป็นกระบวนการที่ใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ต่างสถานะกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด

2.5.3 ปรากฏการณ์โฟโตคะตะลิติกใน TiO_2

สารกึ่งตัวนำมีอยู่มากมายหลายชนิด ซึ่งหนึ่งในจำนวนสารกึ่งตัวนำหลายๆ ชนิดที่มีความนิยมใช้กันในทางปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก คือ TiO_2 เนื่องจาก TiO_2 มีราคาไม่แพง และไม่มีเป็นพิษ มีความสามารถในการละลายต่ำ ความเสถียรสูง นอกจากนี้ได้มีการศึกษาเปรียบเทียบสารกึ่งตัวนำหลายๆ ชนิดที่จะนำมาใช้ในทางปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก พบว่า การใช้ TiO_2 แบบแขวนลอย สามารถเกิดปฏิกิริยาขึ้นได้อย่างรวดเร็ว แต่เนื่องจาก TiO_2 มี ช่องว่างแถบพลังงาน (Band Gap) ประมาณ 3.2 eV ซึ่งจะมีมากกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น ๆ โดยส่วนใหญ่ทำให้ต้องใช้พลังงานแสงในช่วงของแสง UV (ความยาวคลื่นน้อยกว่า 400 nm) ในแสงอาทิตย์ที่ส่องมาถึงพื้นโลกมีแสงยูวีน้อยกว่า 1% ทำให้ไม่สามารถใช้แสงธรรมชาติได้ จำเป็นต้องใช้แสงจากหลอดรังสี UV เป็นแหล่งกำเนิดแสง (พลังงาน) [17],[18] TiO_2 มีคุณสมบัติพิเศษ คือ จะไม่มีการแสดงประจุใด ๆ ขณะยังไม่ได้รับการเหนี่ยวนำ แต่หากถูกเหนี่ยวนำโดยสิ่งแวดล้อมจะทำให้แสดงประจุชนิดเดียวกันกับสิ่งแวดล้อมซึ่งแตกต่างจากคอลลอยด์ตามธรรมชาติที่จะมีประจุลบ ยกตัวอย่างเช่น ถ้าหากใส่ TiO_2 ลงไปในน้ำที่มีค่า pH ต่ำ ๆ ซึ่งในน้ำจะมีประจุบวกอยู่มาก ทำให้ TiO_2 ถูกเหนี่ยวนำของประจุที่เป็นบวก และถ้าหากใส่ลงไปในน้ำที่มี pH สูงๆ ซึ่งในน้ำจะมีประจุลบอยู่มาก TiO_2 ก็จะถูกเหนี่ยวนำของประจุที่เป็นลบ เป็นต้น ทำให้ TiO_2 ช่วยการกำจัดมลภาวะน้ำเสีย โดยโลหะหนักหรือสารอินทรีย์ที่เจือปนอยู่ในน้ำเสียจะถูกดูดซับอยู่บนผิวของโฟโตคะตะลิติก นอกจากการกำจัดสารอินทรีย์ และโลหะหนักโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันแล้ว สารมลพิษอื่น ๆ ทั้งสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์อาจถูกกำจัดจากสารละลายด้วยการดูดซับอยู่ที่ผิวของโฟโตคะตะลิติก [4],[7],[8]



รูปที่ 2.9 กลไกของกระบวนการโฟโตคะตะลิติก

การกระตุ้น

$$\text{Semiconductor} + h\nu \longrightarrow e^- + h^+ \quad (2.1)$$

การเกิดเรดิคอลจาก e^-/h^+

$$h^+ + OH^- \longrightarrow \bullet OH \quad (2.2)$$

$$h^+ + H_2O \longrightarrow \bullet OH + H^+ \quad (2.3)$$

$$e^- + O_2 \longrightarrow O_2^- \quad (2.4)$$

$$H^+ + O^-_2 \longrightarrow \bullet OH_2 \quad (2.5)$$

$$2H_2O + O_2^- \longrightarrow 2H_2O_2 \quad (2.6)$$

$$H_2O_2 \longrightarrow 2\bullet OH_2 \quad (2.7)$$

$$H^+ + e^- \longrightarrow \bullet H \quad (2.8)$$

การรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮล (Electron-Hole Recombination)

$$e^- + h^+ \longrightarrow \text{Heat} \quad (2.9)$$

โดยที่

h^+ คือ โฮลที่เวเลนต์แบนด์ (Valence Band Hole)

e^- คือ อิเล็กตรอน (Electron)

•OH คือ ไฮดรอกซิลเรดิคอล (Hydroxyl Radical)

O_2^- คือ ซุปเปอร์ออกไซด์อิออนเรดิคอล (Superoxide Ion Radical)

$\bullet OH_2$ คือ เปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคอล (Perhydroxyl Radical)

H^+ คือ ไฮโดรเจนเรดิคอล (Hydrogen Radical)

ปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกในการบำบัด มีกลไกดังนี้ ส่วนที่พื้นผิวของสารกึ่งตัวนำที่มี h^+ จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไฮดรอกไซด์อิออน (OH^-) และน้ำ (H_2O) เกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคอล(•OH) และเรดิคอลตัวอื่น ส่วนพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำที่มีอิเล็กตรอน จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับออกซิเจนบนพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ และเกิดเป็นซุปเปอร์ออกไซด์อิออนเรดิคอล (O_2^-) เปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคอล ($\bullet OH_2$)และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ในขณะที่สภาวะในการทดลองมีออกซิเจนไม่เพียงพอ โฟตอนซึ่งเกิดจากการแตกตัวของน้ำ จะเข้ามามีบทบาทเข้ารับอิเล็กตรอนแทน เกิดเป็นไฮโดรเจนเรดิคอล (H^+) การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโฟโตคะตะลิติกเกิดได้ 2 ทาง คือ

1. การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ h^+ กับไฮดรอกไซด์ออนหรือน้ำได้ไฮดรอกซิล เรดิคอล และปฏิกิริยาของอิเล็กตรอนกับออกซิเจนหรือไฮโดรเจนอิออนได้ซุปเปอร์ออกไซด์ อิออนเรดิคอลเปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคอล หรือไฮโดรเจนเรดิคอล

2. การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตรงกับสารอินทรีย์ที่ดูดติดบนตัวคะตะลิสต์กับ h^+ ซึ่งจะมีความสามารถของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์ที่มีมากกว่าความสามารถของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนไทเทเนียมไดออกไซด์และตัวคะตะลิสต์อื่น [20]

2.5.4 ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะลิติก

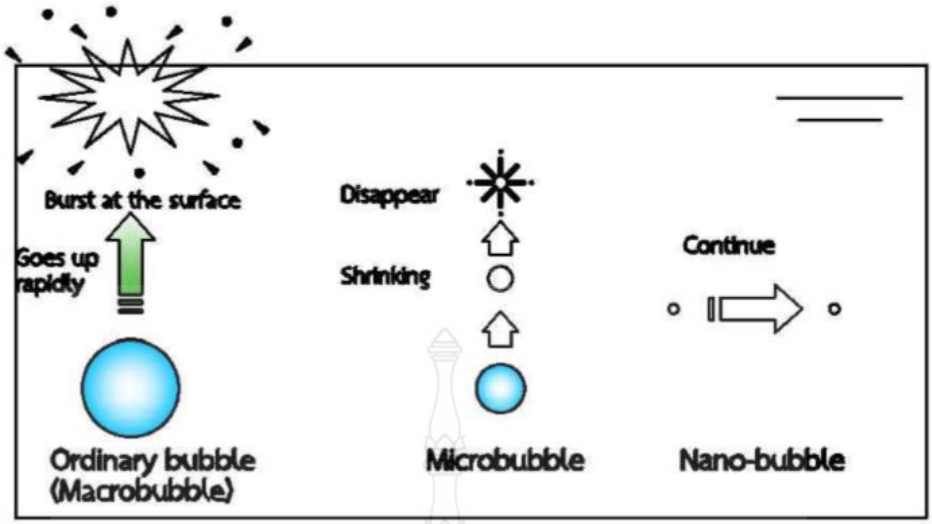
สารประกอบที่สามารถนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการบำบัดมลพิษโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ได้แก่ WO_3, ZnO, TiO_2, Fe_2O_3, $SrTiO_3$, CdS, MoS, ZnS, ZnTe และ CdSe เป็นต้น ดังแสดงในตารางที่ 2.2 จะแสดงให้เห็นว่าในช่วงแถวแนวตั้งสุดท้ายแสดงถึงช่วงคลื่นพลังงานแสงที่ต้องการไปใช้สำหรับการกระตุ้นตัวนำนั้น ๆ [1], [23], [24], [28]

ตารางที่ 2.2 แถบพลังงานและช่วงความยาวคลื่นที่มีผลต่อแถบพลังงานของสารประกอบที่ pH=1

สารประกอบ	แถบพลังงาน (eV)	ช่วงความยาวคลื่นที่มีผลต่อแถบพลังงาน (nm)
$BaTiO_3$	3.3	375
Cds	2.5	497
CdSe	1.7	730
GaAs	1.4	887
GaP	2.3	540
SnO_2	3.9	318
$SrTiO_3$	3.4	365
TiO_2	3.2	388
WO_3	2.8	443
ZnO	3.2	388
ZnS	3.7	336

2.6 ไมโคร/นาโนบับเบิ้ล

ไมโคร/นาโนบับเบิ้ล (Micro/Nano bubbles) เป็นเทคโนโลยีฟองอากาศซึ่งอนุภาคที่เกิดขึ้นจะมีรูปร่างเล็กในระดับไมโครเมตรหรือนาโนเมตร ฟองอากาศระดับไมโครเมตร หรือ ไมโครบับเบิ้ล (Microbubble) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10-50 ไมโครเมตร มองเห็นน้ำมีลักษณะคล้ายสีของนม และค่อยๆลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ ส่วนฟองอากาศระดับนาโนเมตร หรือ นาโนบับเบิ้ล (Nanobubble) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 200 นาโนเมตร สามารถคงอยู่ในน้ำได้นานกว่าฟองอากาศทั่วไปหลายเดือน เนื่องจากนาโนบับเบิ้ลมีพื้นที่ผิวของอากาศจำนวนมาก ไม่รวมตัวกันเป็นฟองขนาดใหญ่ ทำให้สามารถละลายหรือแทรกตัวในตัวกลางที่เป็นของเหลว เช่น น้ำ ได้มากกว่าสภาวะปกติหลายเท่าตัว และทำให้มีแรงลอยตัวต่ำ จึงทำให้เกิดการลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำช้ากว่าฟองอากาศทั่วไป ดังรูปที่ 2.10 เมื่อทดสอบด้วยการใช้แสงเลเซอร์ยิงผ่านในน้ำที่มีฟองอากาศอนุภาคไมโครนาโน (Micro/nano bubbles) จะมองเห็นฟองอากาศอนุภาคขนาดนาโนเป็นฟองอากาศขนาดเล็กมากผ่านลำแสงลอยอยู่ใต้ผิวน้ำ ส่วนฟองอากาศที่เป็นขนาดไมโครลักษณะคล้ายฟองนมจะลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ เมื่อยิงแสงเลเซอร์ลำแสงไม่สามารถส่องผ่านฟองอากาศขนาดไมโครได้ ลำแสงปะทะกับอนุภาคจึงเกิดการกระเจิงของแสง ทำให้ไม่สามารถเห็นเป็นลำแสงได้ [5],[10],[13]



รูปที่ 2.10 ฟองอากาศแบบธรรมดากับฟองอากาศไมโคร/นาโนที่ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ

นอกจากนี้ฟองอากาศอนุภาคขนาดนาโน หรือ nanobubble เหล่านี้จะมีขนาดเล็กมากและสามารถคงตัวอยู่ในน้ำได้นานแล้ว nanobubble ยังมีพื้นที่ผิวของอากาศจำนวนมหาศาลและมีประจุลบล้อมรอบจำนวนมาก ทำให้ nanobubble มีคุณสมบัติพิเศษที่แตกต่างจากฟองอากาศทั่วไป ซึ่งประเทศญี่ปุ่นมีการนำมาประยุกต์ในด้านต่าง ๆ มากมาย เช่น การบำบัดน้ำ การทำความสะอาดพื้นผิว ตลอดจนการเกษตรกรรม และการประมง [5]

2.6.1 ทฤษฎีของไมโคร/นาโนบับเบิ้ล (micro/nanobubbles)

Micro Nano-bubble (MNB) คือ ฟองก๊าซที่มีขนาด 50 -200 μm โดยฟองไมโครบับเบิ้ลที่มีขนาดมากกว่า 50 μm จะลอยช้า ๆ ขึ้นสู่ผิวน้ำหรือของเหลว ในระหว่างการลอยขึ้นก๊าซจะละลายเข้าสู่น้ำหรือของเหลว ฟองที่มีขนาด 50 μm ลงมาจะยุบตัวและละลายเข้าสู่น้ำจนหมด กรณีที่น้ำหรือของเหลวนั้นมีสารอิเลคโตไลต์ (electrolyte) ฟองไมโครบับเบิ้ลจะมีประจุเป็นลบล้อมรอบระหว่างผิวสัมผัสระหว่าง (Interface) ก๊าซกับน้ำ โดยฟองไมโครบับเบิ้ลจะมีค่า zeta potential ประมาณ -40 mV เมื่อฟองไมโครบับเบิ้ลยุบตัวลงจะเกิดปรากฏการณ์ salting-out ที่ทำให้แรงตึงผิวเท่ากับ แรงไฟฟ้าป้องกันไม่ให้ก๊าซละลายจนหมด แต่จะคงตัวเป็นฟองขนาดนาโนเมตรที่เรียกว่า Nano-bubble และคงตัวอยู่ในน้ำได้เป็นเวลานาน [14],[30]

2.6.2 การนำไมโคร/นาโนบับเบิ้ลมาประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ

2.6.2.1 ด้านเกษตรกรรม เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (Aquaculture)

ในอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมีการนำนาโนบับเบิ้ลเข้ามาช่วยเพิ่มคุณภาพและปริมาณของผลิตภัณฑ์ อีกทั้งยังสามารถลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดและการดูแลคุณภาพของน้ำที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงกุ้งและสัตว์น้ำชนิดอื่น ๆ จึงได้มีการศึกษาการเลี้ยงปลาในระบบหมุนเวียน ของมหาวิทยาลัยแห่งชาติเกาหลีใต้ (Micro bubble for Aquaculture Water Reuse System , Seoul National University) นอกจากนี้ในประเทศญี่ปุ่นได้ทดลองการใช้เทคโนโลยีข้างต้นมาใช้ในการเพาะเลี้ยงหอยนางรมและหอยมุก พบว่าหอยนางรมที่ใช้ระบบ nanobubble มีอัตราการเจริญเติบโตดีกว่าการลี้ยงแบบเดิม กรณีของการเลี้ยงหอยมุก พบว่าหอยมุกที่เลี้ยงด้วยระบบ nanobubble จะให้ผลผลิตที่ดีกว่าการเลี้ยงระบบปกติเป็นผลมาจากการเพิ่มค่า dissolved oxygen (DO) และผลของประจุลบของ nanobubble ในประเทศไทย มีการนำระบบ nanobuble มาใช้ในบ่อเลี้ยงกุ้ง โดยมีความคิดที่ว่าบริเวณให้อาหารกุ้ง เมื่อกุ้งมากินอาหารจะทำให้ออกซิเจนบริเวณนั้นต่ำ ทำให้การกินอาหารของกุ้งไม่ดี ดังนั้นหากเพิ่มปริมาณออกซิเจนในบริเวณให้อาหารกุ้ง จะทำให้กุ้งกินอาหารดีขึ้น จึงได้นำระบบ nanobuble มาใช้ โดยเน้นเฉพาะบริเวณหว่านอาหารเท่านั้น ผลจากการใช้พบว่ากุ้งกินอาหารได้ดีขึ้นมากและสามารถจับกุ้งได้น้ำหนักรวมมากกว่าก่อนใช้ระบบ nanobuble 1-2 ตัน/รอบการเลี้ยง [5]

2.6.3 การรักษาสิ่งแวดล้อม (Environmental)

การประยุกต์ใช้เทคนิค nanobuble ในกระบวนการบำบัดของน้ำเสีย ด้วยจุดเด่นในด้านการเพิ่มประสิทธิภาพในการละลายของอากาศ ด้วยคุณสมบัติในด้านการมีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก มีความดันของก๊าซสูงและมีเวลาอยู่ในน้ำได้นาน ทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทสูงกว่าการเติมอากาศแบบทั่วไป นอกเหนือจากจุดเด่นในการเติมอากาศแล้ว ยังมีการประยุกต์ใช้ร่วมกับโอโซนในการบำบัดน้ำเสีย อีกด้วยมีการศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทมวล (Mass transfer) ของโอโซน เปรียบเทียบระหว่างวิธีการแบบเดิมกับการใช้ไมโคร/นาโนบับเบิ้ล พบว่าการใช้ระบบ nanobuble มีค่าสัมประสิทธิการถ่ายเท (Mass transferring co-efficient) สูงกว่าโดยเฉลี่ย 2.5 เท่า นอกจากนี้การประยุกต์ใช้เทคโนโลยี nanobuble ร่วมกับกระบวนการโฟโตคะลิติก สามารถกำจัดสีในน้ำเสียได้ เนื่องจาก

ประสิทธิภาพในการละลายของอากาศ โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกจำเป็นต้องใช้ออกซิเจนในการเกิดปฏิกิริยา จึงทำให้มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเพื่อกำจัดสีได้ [5]

2.6.4 สุขภาพและความงาม (Health & Beauty)

การประยุกต์ใช้กระบวนการดังกล่าวในด้านสุขภาพ มีการนำไปผลิตน้ำดื่มอุดมออกซิเจน (Oxygenenriched drinking water) ออกจำหน่ายในโซนอเมริกา ยุโรป และเอเชีย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในญี่ปุ่น ด้วยคุณสมบัติในการเพิ่มการละลายของออกซิเจนในน้ำได้มากว่าและความคงตัว (stable) ของออกซิเจนในน้ำ ทำให้น้ำอุดมไปด้วยออกซิเจนที่ผลิตด้วย nanobuble มีความแตกต่างจากขบวนการผลิตแบบเดิม(ลดอุณหภูมิและเพิ่มความดัน) ที่เมื่อเปิดขวดจะมีฟองก๊าซผุดขึ้นมา เช่น น้ำโซดาและน้ำอัดลม แต่ถ้าเป็นการผลิตด้วยระบบ nanobuble จะไม่มีฟองก๊าซผุดขึ้นมา แต่ก๊าซทั้งหมดจะละลายอยู่ในน้ำ ซึ่งสามารถตรวจวัดค่าด้วยเครื่องมือที่ เรียกว่า Dissolved Oxygen Meter /DO meter [14]

2.7 จลน์พลศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก

เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกดูดติดอยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นไปตามกลไกการเกิดปฏิกิริยามี 2 ขั้นตอน คือ การดูดติดของสารมลพิษบนพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำและการย่อยสลายสารมลพิษที่ดูดติดบนผิวสารกึ่งตัวนำ โดยอัตราการย่อยสลายสารมลพิษสามารถอธิบายได้ดังสมการ (2.10), (2.11)

$$r = -\frac{dC}{dt} = k\theta \tag{2.10}$$

$$\theta = \frac{KC}{(1+KC)} \tag{2.11}$$

แทนสมการที่ (2.10) ใน สมการที่ (2.11) ดังนั้น

$$-\frac{dC}{dt} = \frac{kKC}{(1+KC)} \tag{2.12}$$

ซึ่งสามารถจัดรูปสมการใหม่ดังนี้

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{kKC} + \frac{1}{k} \quad (2.13)$$

เมื่อ k = ค่าคงที่ที่เกิดจากตัวแปรที่องค์ประกอบหลายอย่าง เช่น มวลของตัวเร่งปฏิกิริยา การไหลของโฟตอน ชั้นของออกซิเจน เป็นต้น (mol-L^{-1}- min^{-1})

K = ค่าคงที่สมดุลการดูดติดผิวของโมเดล L-H ในการศึกษากระบวนการโฟโตคะตะไลติก ซึ่งสามารถใช้ได้ทั้งกรณีที่ใช้แสงและไม่มีแสง โดยเริ่มจาก langmuir isotherm (L- mol^{-1})

C = ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ตั้งต้นที่เวลาใดๆ (mol-L^{-1})

θ = พื้นที่ผิวของซับสเตรตหรืออัตราการดูดซับบนพื้นที่ผิว

โดยถ้า $KC << 1$ จะเกิดเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ดังสมการ (2.14)

$$-\frac{dC}{dt} = kKC \quad (2.14)$$

กำหนดให้ $$k_1' = kK \quad (2.15)$$

ดังนั้นสมการที่ (2.13) สามารถเขียนในรูปจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ดังสมการที่ (2.16)

$$-\frac{dC}{dt} = k_1'C \quad (2.16)$$

เมื่อ k_1' = ค่าคงที่ของจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาแบบ pseudo first order (min^{-1})

ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ขั้นต้นเป็นการศึกษาในสถานะของเหลว ซึ่งไม่มีการอธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาดูดติดผิวเหมือนกรณีเกิดในสถานะแก๊ส ดังนั้นในการอธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวจึงจะพิจารณาเพียงค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้น (initial rate) และอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นเท่านั้น [6]

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Tao wang ศึกษาเกี่ยวกับ TiO_2 nano fibers / nanotubes ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการหลอมที่อุณหภูมิสูงนั้นเป็นเฟสผสมของเฟสรูไทน์ และเฟสอะนาเทส อาจเป็นประโยชน์ต่อการแยกคู่รูอิเล็กตรอนแบบโฟโตอิเล็กทริกและยังสามารถเพิ่มความสามารถในการดูดซับสีย้อมสูง ๆ ซึ่งความขรุขระของพื้นผิวสามารถเพิ่มพื้นที่ใช้งานมากขึ้นและเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาของโฟโตคะตะลิติก โดยการเพิ่มของสนามแม่เหล็กควบคุมลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ TiO_2 และจะลดช่องว่างของวงเพื่อ จำกัดประสิทธิภาพของโฟโตคะตะลิติก [12]

Lei wang ศึกษาเกี่ยวกับนาโนบับเบิ้ลมีประสิทธิภาพในความคงอยู่ในระยะยาว และการสร้างสายพันธุ์ออกซิเจนที่สามารถตอบสนองต่อสิ่งต่าง ๆได้มีการศึกษาน้อยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้นาโนบับเบิ้ลของออกซิเจนในขั้นสูง กระบวนการออกซิเดชัน (AOP) ในการศึกษาครั้งนี้เป็นครั้งแรกที่ออกซิเจนนาโนบับเบิ้ล อยู่นำเข้าสู่ระบบแสงปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสงที่มองเห็นเพื่อปรับปรุงการย่อยสลายด้วยแสง ของ oxytetracycline (OTC) ผลการวิจัยพบว่าท่อนาโนออกซิเจนปรับปรุงการสลายตัวของ OTC อย่างมีนัยสำคัญผ่านการถ่ายโอนมวลสูงและ การสร้างอนุมูลปฏิกิริยาในระหว่างการสลายของนาโนบับเบิ้ล อนุภาคนาโนออกซิเจนเสถียรภาพได้รับการยืนยันว่าขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด - ด่าง ความเข้มข้นของฟองนาโนเพิ่มขึ้นจาก 0.76 เป็น 3.78 × 108 อนุภาค / ml. ในขณะที่ขนาดเฉลี่ยลดลงจาก 205 nm เป็น 138 nm เมื่อค่าพีเอช เพิ่มขึ้น (3.2-11.0) ประสิทธิภาพการย่อยสลายแสงของ OTC คือ เพิ่มขึ้นจาก 45% เป็น 98% พร้อมการเพิ่มขึ้นของค่าพีเอช (4.0-11.0) นาโนบับเบิ้ลสามารถปรับปรุง AOPs เช่นการลดตัวเร่งปฏิกิริยาและการใช้สารเคมีและ ค่าใช้จ่าย การทดลองดังแสดงให้เห็นว่า• OH เป็นสิ่งที่ใช้งานได้ดีที่สุด ทำให้เกิดการสลายตัวของ OTC การศึกษาให้เทคโนโลยี nanobubble มีประสิทธิภาพมากเป็นมิตรกับระบบสิ่งแวดล้อม และมีการนำไปใช้อย่างกว้างขวางในการบำบัดน้ำเสียและ ดื่มน้ำบริสุทธิ์ [13]

Kazunori minamikawa ศึกษาเกี่ยวกับนาโนบับเบิ้ลที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง <1 ไมโครเมตร มีคุณสมบัติที่เป็นเอกลักษณ์รวมถึงความยาวอายุการใช้งานในน้ำ การศึกษาก่อนหน้าแสดงให้เห็นว่าการชลประทานด้วยน้ำที่มีจำนวนมากออกซิเจนออกซิเจน (น้ำ, นาโนบับเบิ้ล, ออกซิเจน) ช่วยลดการปล่อยก๊าซมีเทนตามฤดูกาลมีเทน จากการเพาะปลูกข้าวที่ถูกน้ำท่วม 21% เราจึงตั้งสมมติฐานว่าการปล่อย มีเทนลดลงเนื่องมาจากการเกิดออกซิเดชันของดิน เพื่อทดสอบสมมติฐานนี้เราดำเนินการสามข้อการทดลองดินตามลำดับภายใต้สภาพน้ำท่วมและสภาพที่ไม่ต้องการสารอาหาร พวกเขาแบ่งปันการตั้งค่าการทดลองเดียวกันยกเว้นความยาวของการจัดเก็บดินก่อนการทดลอง (2–3 ปี) ทำการ

ชลประทานด้วยตนเองด้วยน้ำประปาแบบมีอากาศ (ชุดควบคุม) หรือน้ำที่ใช้ออกซิเจน NB เป็นท่อปั๊ม ถูกดำเนินการเพื่อระบายน้ำชะล้างอย่างต่อเนื่องจากด้านล่าง ในระหว่างระยะเวลาการทดลอง 57 วัน เราวัดก๊าซเรือนกระจกที่ละลายในระบบเป็นประจำจากการระบายน้ำและชะล้างโลหะหนัก พบปริมาณแมงกานีสมากกว่าเหล็ก แสดงให้เห็นว่าสภาพดินมีประสิทธิภาพลดลง [14]

Weiguang Zhou ศึกษาเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ nanobubble ในการลอยแร่ได้รับการสำรวจอย่างกว้างขวางในทศวรรษที่ผ่านมาในขณะที่มีงานวิจัยน้อยมากที่ได้ทำการเปิดเผยนิวเคลียสที่ต่างกันของ nanobubble ในการศึกษานี้นิวคลีเอชันนิวเคลียสที่แตกต่างกันของนาโนบับเบิ้ล เกิดขึ้นจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นบนพื้นผิวของกล้ามเนื้อมอสโกที่มีการปรับ dodecylamine และอิทธิพลของมันต่อการลอยของแร่ธาตุที่เกี่ยวข้อง แสดงให้เห็นว่านาโนบับเบิ้ล นิวเคลียส nanobubble บนพื้นผิว muscovite hydrophobized ช่วยเพิ่มความดึงดูดระหว่างอนุภาคแร่ส่งผลให้การรวมตัวของอนุภาคที่สำคัญมากขึ้นและประสิทธิภาพการลอยอยู่ในน้ำที่ดีขึ้น การคัดเลือกนิวเคลียสของ nanobubble บนพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำมากขึ้นจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกได้มากขึ้นตามดัชนีการลอยตัวของแร่มอสโกวต์จริง [10]

Khanh Kim Thi Phan ศึกษาเกี่ยวกับความสำคัญของ nanobubble ที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง ขนาดและความคงอยู่ของ nanobubble เป็นโพรงเล็ก ๆ ที่เติมก๊าซซึ่งมีลักษณะทางกายภาพที่เป็นเอกลักษณ์ ของเสถียรภาพความดันภายในสูงพื้นผิวที่มีขนาดใหญ่มากต่อปริมาตรและก๊าซสูงอัตราการละลายเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของ nanobubble ที่นำไปสู่การใช้งานในเทคโนโลยีขั้นสูงต่าง ๆ ขอบเขตและวิธีการบทความนี้แสดงความคืบหน้าการวิจัยล่าสุดเกี่ยวกับการใช้ฟองด้วยระดับนาโนเมตรในภาคอาหาร จะมุ่งเน้นไปที่สถานะปัจจุบันของการใช้งานเกี่ยวกับการแปรรูปอาหารและการใช้งานที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาลักษณะพารามิเตอร์ด้วยวิธีการที่ทันสมัยของการวัดและวิเคราะห์ nanobubble [9]

Xiaonan Ji ศึกษาเกี่ยวกับยูโทรฟิเคชันสามารถทำให้เกิดภาวะขาดออกซิเจน ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการเก็บตัวอย่างตะกอนผิวดินและน้ำที่อยู่เหนือจากทะเลสาบยูโทรฟิกทั่วไป ทะเลสาบ ไท่หู่ จากการจำลองระบบตะกอนแสดงให้เห็นว่าน้ำยูโทรโทรฟิคสามารถทำเมธิเลต Hg ได้ตามธรรมชาติและตะกอนนั้นก็เป็น ZnHg ที่สำคัญในระบบ หลังจากการเพิ่มของสารละลาย $HgCl_2$ (ประมาณ 1 มก. – 1 ในสารละลาย) ความเข้มข้น MeHg ในตะกอนเพิ่มขึ้น 11.7 เท่าหลังจาก 48 ชั่วโมง การทดลองในคอลัมน์ถัดไปพบว่า O_2 นาโนบับเบิ้ล สามารถลดค่า MPA ของตะกอนผิวได้ถึง 48% นอกจากนี้ยังพบว่า

O_2 นาโนบับเบิ้ล สามารถแก้ไขภาวะขาดออกซิเจนได้โดยการเพิ่มออกซิเจนละลาย (จาก 0 ถึง 2.1 $mg.L^{-1}$), ศักยภาพในการลดการเกิดออกซิเดชัน (โดยเฉลี่ย 37%) และซัลเฟต (เพิ่มขึ้น 31% โดยเฉลี่ย) ในน้ำ นอกจากนี้ O_2 นาโนบับเบิ้ล ยังสามารถช่วยลดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ โดยการลดลงของคาร์บอนอินทรีย์ที่ละลายในน้ำที่ (มากถึง 57%) และคาร์บอนอินทรีย์รวมในตะกอนดิน (37%) การลดลงของสารอนินทรีย์ สามารถนำไปสู่การลดลงของความอุดมสมบูรณ์ของยีน hgcA (สูงถึง 86%) [22]

บทที่ 3
ขั้นตอนการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม 2 ชนิด ได้แก่ IC และ RB5 ด้วยกระบวนการด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับการเติมอากาศขนาดนาโนบับเบิ้ล

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 สารเคมี

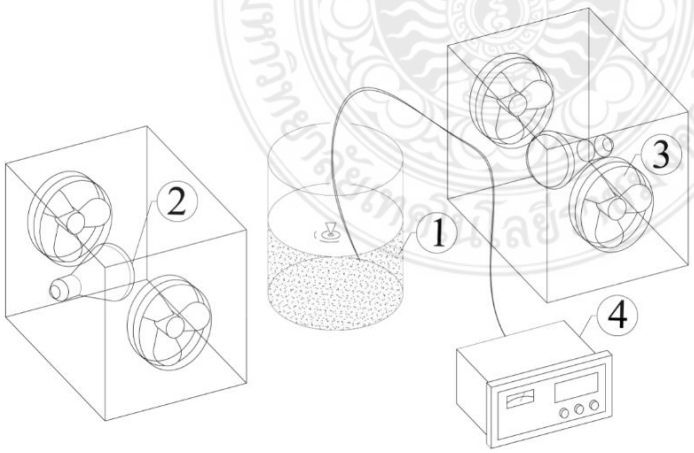
1) สี Indigo carmine

2) สี Reactive black five

3) ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ TiO_2 Nano-powder (anatase 99+% ขนาดผง 10-25 nm) ผลิตโดยบริษัท US Research Nano materials, Inc.

3.1.2 อุปกรณ์

1) ชุดทดลองกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชัน



1.บีกเกอร์ใส่น้ำเสียสังเคราะห์
2. แหล่งกำเนิดแสง ความเข้มแสง 1,580 $\mu W.cm^{-2}$
3. พัดลมระบายอากาศ
4. ชุดเติมอากาศนาโนบับเบิ้ล

2) บีกเกอร์ขนาด 1,000 mL

3) แท่งแก้วคนสาร

4) เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง

5) ปิเปตขนาด 10 mL

6) ช้อนตักสาร

7) เครื่องสเปคโตโฟโตมิเตอร์ รุ่น Spectroquant Prove 600

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

สำหรับขั้นตอนการดำเนินงานในงานวิจัยนี้ จะทำการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมด้วยกระบวนการโฟคะตะลิติกร่วมกับการเติมอากาศขนาดนาโนบับเบิ้ล ทำการศึกษาโดยใช้สี 2 ชนิด ได้แก่ RB5 และ IC โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.2.1 การประเมินประสิทธิภาพในการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี RB5 ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกร่วมกับการเติมอากาศขนาดนาโนบับเบิ้ล มีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี RB5 ที่มีความเข้มข้น เท่ากับ 2 μM ปริมาตร 1,000 mL

2) นำน้ำเสียสังเคราะห์ในข้อที่ 1 ที่เตรียมไว้มาทำการทดลองใน Photoreactor โดยใส่น้ำเสียสังเคราะห์ในบีกเกอร์ ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 พร้อมฉายแสงอัลตราไวโอเลตใน Photoreactor โดยมีความเข้มแสง 1,580 $\mu W.cm^{-2}$

3) เก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่เวลา 0, 5, 15, 30, 60 และ 90 นาที แล้วนำไปวัดค่าความเข้มข้นสี ด้วยเครื่องสเปคโตโฟโตมิเตอร์ รุ่น Spectroquant Prove 600

4) ทำการทดลองซ้ำข้อที่ 1-3 โดยเปลี่ยนจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี RB5 ที่มีความเข้มข้น 2 μM เป็น 4, 6, 8 และ 10 μM ตามลำดับ

ทั้งนี้ขั้นตอนการหาประสิทธิภาพการบำบัดสี RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 3.1

รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการหาประสิทธิภาพการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก

3.2.2 การเมินประสิทธิภาพในการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี IC ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกร่วมกับการเติมอากาศขนาดนาโนบับเบิ้ล มีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

มีขั้นตอนการดำเนินการทดลองเช่นเดียวกับสี RB5 ตาม ขั้นตอนที่ 3.2.1 แต่มีการเปลี่ยนแปลงชนิดของสี เป็นสี IC ในการทำการทดลองแทน

3.3 ชุดควบคุม

ในการทดลองได้มีการทำการทดลองชุดควบคุมในหลายลักษณะ ซึ่งมีความแตกต่างกันในส่วนของการแปรผันตัวเร่งปฏิกิริยา แสง การเติมอากาศ ได้มีการกำหนดชุดควบคุม ได้มีการแปรผันการควบคุม UV ได้มีการควบคุมการแปรผันตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ชุดควบคุมการทดลอง

ชุดการทดลอง		TiO_2	UV	NB
1	ชุดทดลอง	✓	✓	✓
2		✓	✓	✗
3		✓	✗	✓
4		✗	✓	✓
5	ชุดควบคุม	✗	✓	✗
6		✗	✗	✓
7		✓	✗	✗
8		✗	✗	✗

3.4 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก

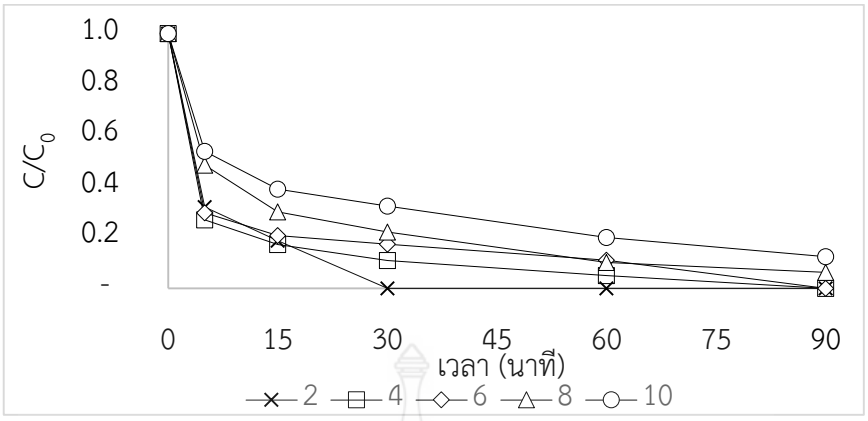
ในส่วนของการประเมินค่าตัวแปรต่างๆตามจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก ซึ่งกลไกการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการโฟโตคะตะลิติก เมื่อพิจารณาอัตราการเกิดปฏิกิริยาในภาพรวมอัตราการเกิดปฏิกิริยาในขั้นแรกจะแปรผันตามพื้นที่ผิวที่เกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา และแปรผันตามความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่เข้าทำปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชัน ดังนั้นในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกจึงสอดคล้องตามสมการ Langmuir-Hinshelwood ในการประเมินค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาของการดูดติดผิวและค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันที่พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งได้อธิบายในบทที่ 2

บทที่ 4
ผลการดำเนินงาน

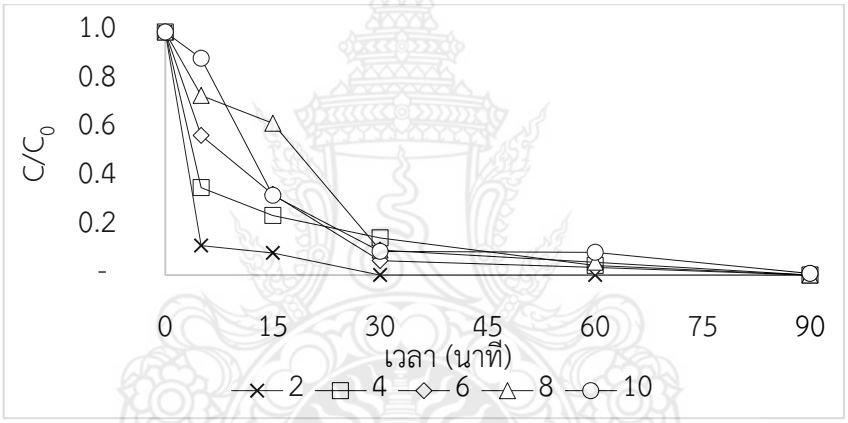
ผลการดำเนินงานของงานวิจัยนี้สามารถแบ่งได้ 2 ส่วน คือผลการบำบัดสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ร่วมกับ NB เมื่อเทียบกับค่าความเข้มข้นสี RB5 และ IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ นอกจากนี้ยังดำเนินการหาประสิทธิภาพการบำบัดสีด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ร่วมกับ NB รวมทั้งศึกษาจลนพลศาสตร์ของการบำบัดสีทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ RB5 และ IC ด้วยกระบวนการข้างต้น

4.1 การศึกษาการบำบัดสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับการเติมอากาศขนาดนาโนบับเบิ้ล

ในการศึกษาการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี RB5 และ IC ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ร่วมกับการเติมอากาศขนาดนาโนบับเบิ้ล สำหรับสี RB5 และ IC มีการแปรผันของช่วงค่าความเข้มข้น เริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 2, 4, 6, 8 และ 10 μM ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเลตที่มีความเข้มแสงเท่ากับ 1,580 $\mu W.cm^{-2}$ หลังจากผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกร่วมกับการเติมอากาศขนาดนาโนบับเบิ้ลแล้วทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียดังกล่าวที่เวลา 0, 5, 15, 30, 60 และ 90 min ตามลำดับ สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง C/C_0 ของสี RB5 และ IC ที่ผ่านการบำบัดด้วย กระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ร่วมกับการเติมอากาศขนาดนาโนบับเบิ้ล เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลง ความเข้มข้นของสีทั้ง 2 ชนิดที่มีความเข้มข้นลดลงด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่เวลาต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของสีมีการเปลี่ยนแปลงสูงสุดที่เวลา 5 min เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 มีความสะอาดสามารถดูดติดผิวได้ดี ทำให้สามารถดูดสีได้มาก และเมื่อเวลาผ่านไปจึงเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในการทำความสะอาดที่ TiO_2 ดูดติดผิวไว้ จึงเกิดการชะลอตัวในการทำปฏิกิริยาในเวลาต่อมาตามลำดับ สามารถประเมินประสิทธิภาพของการบำบัดสีดังแสดงในรูปที่ 4.3-4.4 และตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงของ C/C_0 กับเวลาในกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ TiO_2 +UV+NB สำหรับสี RB5

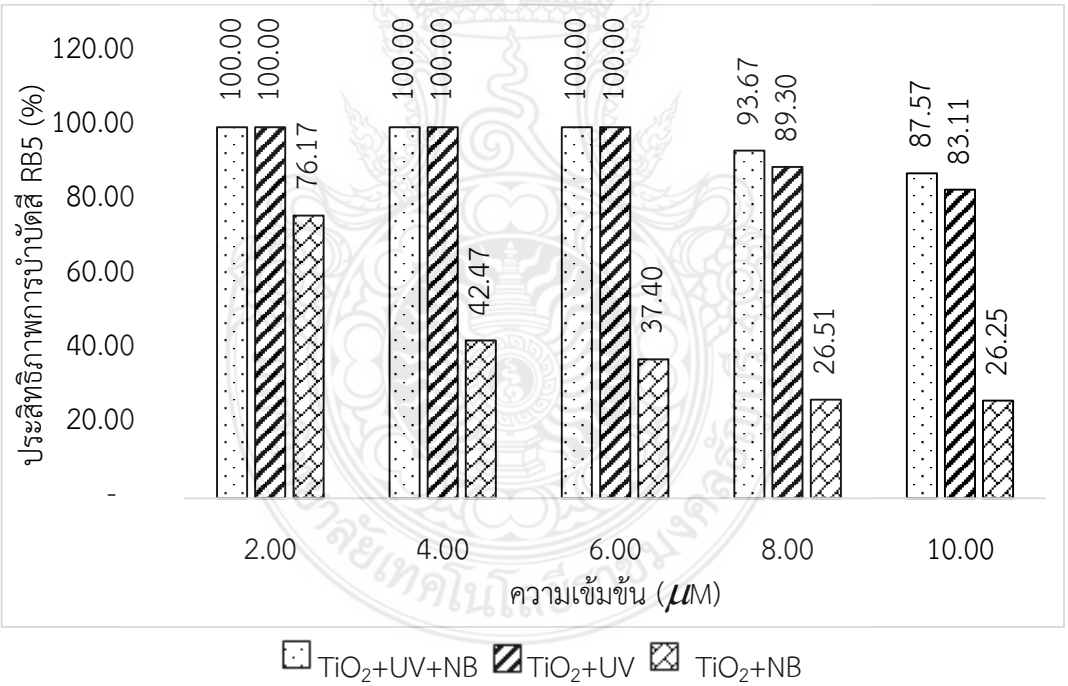


รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงของ C/C_0 กับเวลาในกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ TiO_2 +UV+NB สำหรับสี IC

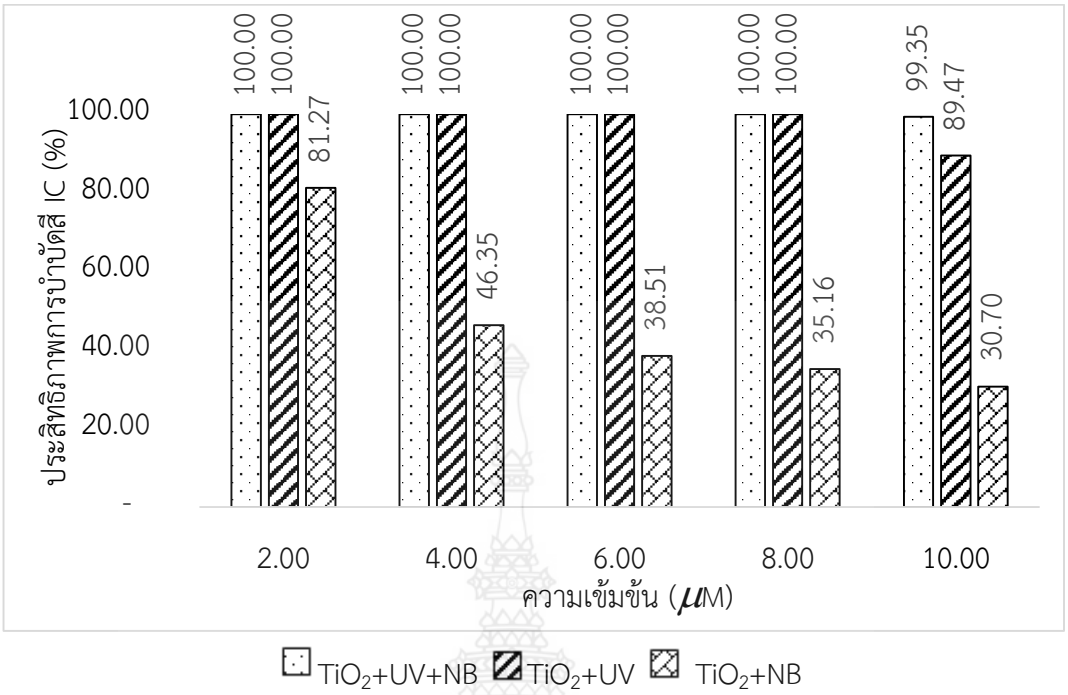
จากผลการทดลองสามารถสังเกตเห็นประสิทธิภาพในการกำจัดสี RB5 และสี IC ได้อย่างชัดเจน ในชุดการทดลองที่ 1-3 ดังตารางที่ 4.1 อยู่ในช่วง 76.17-100% และ 81.27-100.00% ตามลำดับ สำหรับในส่วนของชุดการทดลองที่ 4-7 ดังตารางที่ 4.1 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสี RB5 และสี IC ต่ำกว่า 30.00% และ 26.00% ตามลำดับ โดยเฉพาะอย่างยิ่งชุดทดลองที่ 8 ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นสี RB5 และสี IC ดังนั้นจึงพิจารณาเฉพาะชุดทดลองที่ 1-3 ทั้งนี้ประสิทธิภาพในการกำจัดสี RB5 และสี IC ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกแสดงดังรูปที่ 4.3 และ 4.4

ตารางที่ 4.1 ประสิทธิภาพการกำจัดสี

	ชุดการทดลอง	TiO_2	UV	NB	ประสิทธิภาพการกำจัดสี (%)	
					RB5	IC
1	ชุดทดลอง	✓	✓	✓	87-100	99-100
2		✓	✓	✗	83-100	89-100
3		✓	✗	✓	26-74	30-81
4		✗	✓	✓	3-10	4-12
5	ชุดควบคุม	✗	✓	✗	3-13	4-15
6		✗	✗	✓	2-7	3-9
7		✓	✗	✗	6-26	8-30
8		✗	✗	✗	ไม่เปลี่ยนแปลง	



รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพการบำบัดสี RB5 ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก



รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพการบำบัดสี IC ด้วยกระบวนการโฟโตคะลิติก

ตารางที่4.2 ข้อมูลประสิทธิภาพการกำจัดสี

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นเริ่มต้น, หน่วย	ประสิทธิภาพการกำจัดสี (%)		ความเข้มสี, ADMI	
		RB5	IC	RB5	IC
TiO_2+UV+NB	2	100	100	0	0
	4	100	100	0	0
	6	100	100	0	0
	8	93.67	100	0.35	0
	10	87.57	99.35	1.24	0.07
TiO_2+UV	2	100	100	0	0
	4	95	100	0	0
	6	88	100	0.59	0
	8	89	100	0.86	0
	10	83	89.47	1.69	1.05
TiO_2+NB	2	74	81.27	0.55	0.37
	4	45	46.35	2.30	1.63
	6	37	38.51	3.76	4.05
	8	27	35.16	5.88	6.96
	10	26	30.7	7.37	9.48

จากตารางที่ 4.2 พบว่ากระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 แหล่งกำเนิดแสง UV และการเติม NB สามารถที่จะกำจัดสีได้ดี เนื่องจากมีการดูดติดผิว และสามารถบำบัดสีย้อมได้ดียิ่งขึ้นจากการเติม NB เข้าไปในการทดลอง ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ผลิตภัณฑ์เป็น •OH และ O_2^- ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ขั้นรุนแรง สามารถทำปฏิกิริยาได้ในการกำจัดสีได้ดังปฏิกิริยาดังต่อไปนี้

ตัวเร่งปฏิกิริยา $TiO_2 + hv$ ไปเป็น $e^- + h^+$ (4.1)

$h^+ + OH^- \longrightarrow \bullet OH$ (4.2)

$h^+ + H_2O \longrightarrow \bullet OH + H^+$ (4.3)

$e^- + O_2 \longrightarrow O_2^-$ (4.4)

$H^+ + O^-_2 \longrightarrow \bullet OH_2$ (4.5)

$2H_2O + O_2^- \longrightarrow 2H_2O_2$ (4.6)

$H_2O_2 \longrightarrow 2{\bullet}OH_2$ (4.7)

$H^+ + e^- \longrightarrow {\bullet}H$ (4.8)

${\bullet}OH + R \longrightarrow CO_2 + H_2O$ (4.9)

โดยปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ได้แก่ ความเข้มแสง สำหรับการงานวิจัยนี้ปัจจัยดังกล่าวเป็นผลมาจากความเข้มข้นของสีย้อม ซึ่งส่งผลกระทบต่อการส่องผ่านของแสง UVA โดยตรง ทำให้ที่ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นต่ำ ๆ สามารถทำให้แสง UVA ส่องผ่านไปยังตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ได้ดีกว่าในกรณีที่ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นค่าสูง ๆ ซึ่งจากสาเหตุดังกล่าวส่งผลให้เมื่อแสง UVA ที่มีพลังงานสูงมากกว่าขนาดช่องว่างแถบพลังงานของ TiO_2 ส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ถูกกระตุ้นทำให้อิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์ (Valence Band) เคลื่อนที่ไปสู่แถบการนำ (Conduction Band) และเกิดช่องว่าง (h^+) ซึ่งเป็นสภาวะสูญเสียอิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์ ดังแสดงในสมการที่ 4.1 ส่งผลให้กระบวนการโฟโตคะตะลิติกถูกขับเคลื่อนให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่และได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็น •OH ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซิ่งเอเจนท์ (Strong oxidizing agent) ที่มีความรุนแรงสามารถเกิดปฏิกิริยารุนแรงกับสารปนเปื้อนและเกิดเป็นผลิตภัณฑ์เป็น CO_2 และ H_2O ในกรณีที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยสมบูรณ์ ดังแสดงในสมการที่ 4.2-4.8

ทั้งนี้ภาพรวมของอัตราการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะลิติกร่วมกับแหล่งกำเนิดแสง UVA และการเติมอากาศขนาดนาโนบับเบิ้ล (TiO_2/UV/NB) จะสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่าการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ใช้เพียงตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 อย่างเดียว (TiO_2/UV) ซึ่งการเติมอากาศขนาดนาโนบับเบิ้ลส่งผลต่อปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันเนื่องจากเกิดฟองอากาศในระดับนาโนทำให้เกิดสภาวะปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำที่มีความอิ่มตัวยิ่งยวด โดยพิจารณาจากค่าออกซิเจนละลายขณะทำการทดลองมีค่าอยู่ระหว่าง 15-20 $mg.L^{-1}$ ซึ่งมากกว่าค่าปกติที่มีค่าออกซิเจนอิ่มตัวละลายในน้ำได้เพียง 5-8 $mg.L^{-1}$ ทำให้ค่าออกซิเจนละลายน้ำเพิ่มโอกาสการเกิดปฏิกิริยากับอิเล็กตรอนแล้วเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ O_2^- ในปริมาณมาก [8-10] ตามสมการที่ 4.4 ทั้งนี้การเกิดผลิตภัณฑ์ O_2^- ยังเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่กับ H^+ และ H_2O ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็น $\bullet OH_2$ และ H_2O_2 ตามสมการที่ 4.5-4.6 โดย H_2O_2 เป็นผลิตภัณฑ์ตัวหนึ่งที่เป็นตัวออกซิไดซิ่งเอเจนท์ที่มีความรุนแรงเช่นกันและยังสามารถเกิดปฏิกิริยากับ O_2^- ได้เป็น •OH อีกทางหนึ่งตามสมการที่ 4.7 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะลิติกร่วมกับแหล่งกำเนิดแสง UVA และการเติมอากาศขนาดนาโนบับเบิ้ล

สามารถเพิ่มโอกาสให้ปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันเกิดได้ดีขึ้นเนื่องจากเกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นตัวออกซิไดซิ่งเอเจนท์ที่มีความรุนแรง ได้แก่ O_2^-, H_2O_2 และ •OH เกิดขึ้นได้ในปริมาณที่มากกว่าเดิม ซึ่งตัวออกซิไดซิ่งเอเจนท์ดังกล่าวสามารถเกิดปฏิกิริยากับสีย้อม IC ที่ละลายอยู่ได้เป็นอย่างดีตามสมการที่ 4.9 ทำให้โมเลกุลสีถูกย่อยสลายกลายเป็นโมเลกุลเล็กลงและทำให้หมู่ฟังก์ชันที่ทำให้เกิดสีในสีกลุ่ม organic dye ดังกล่าวมีความเข้มของสีลดลง [29]

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสีย้อม IC ขณะทำการทดลองโดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง C/C_0 กับเวลาในกระบวนการโฟโตคะตะลิติกร่วมกับแหล่งกำเนิดแสง UVA และการเติมอากาศขนาดนาโนบับเบิ้ล (รูปที่ 4.3-4.4) พบว่า การลดลงของความเข้มข้นของสีมีการเปลี่ยนแปลงสูงสุดที่เวลา 5 min ดังแสดงในรูปที่ 4.1-4.2 เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ยังมีความสะอาดไม่มีสารรบกวนใดมาเกาะติดที่ผิวหน้าทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาการดูดติดผิวได้ดี และเมื่อเวลาผ่านไปผลจาการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวทำให้เกิดการย่อยสลายของสารในกลุ่มสารอินทรีย์ที่ละลายได้ปรากฏขึ้นระหว่างการเกิดปฏิกิริยาทำให้สารกลุ่มดังกล่าวไปรบกวนและบดบังการทำงานของพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ปฏิกิริยามีการชะลอตัวลง [27]

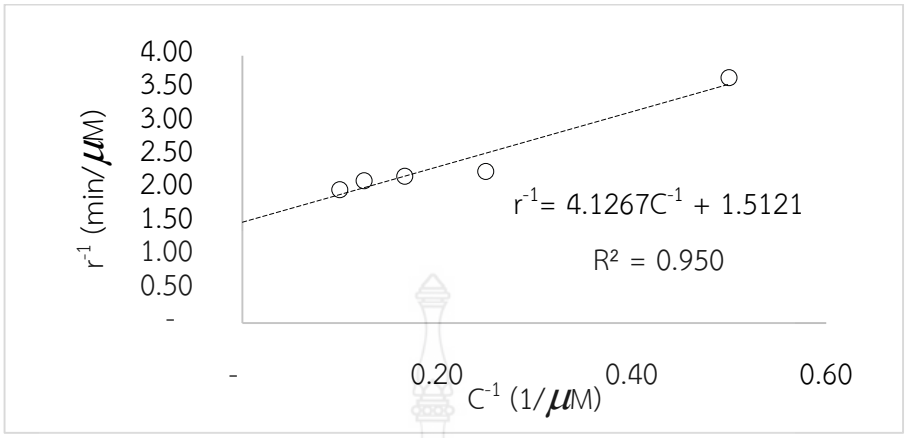
4.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์ (Kinetics) ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับการเติมอากาศขนาดนาโนบับเบิ้ล

สำหรับการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี RB5 และ IC ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับการเติมอากาศขนาดนาโนบับเบิ้ล โดยเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้แสงอัลตราไวโอเลตที่มี ความเข้มแสงเท่ากับ 1,580 $\mu W.cm^{-2}$ จากการทดลองดังกล่าวข้างต้น พบว่า สมการที่เหมาะสมในการใช้ อธิบายกลไกการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะลิติกการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี RB5 และ IC คือ สมการปฏิกิริยาดูดติดผิว โดยสามารถวิเคราะห์หาค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาได้จากสมการ

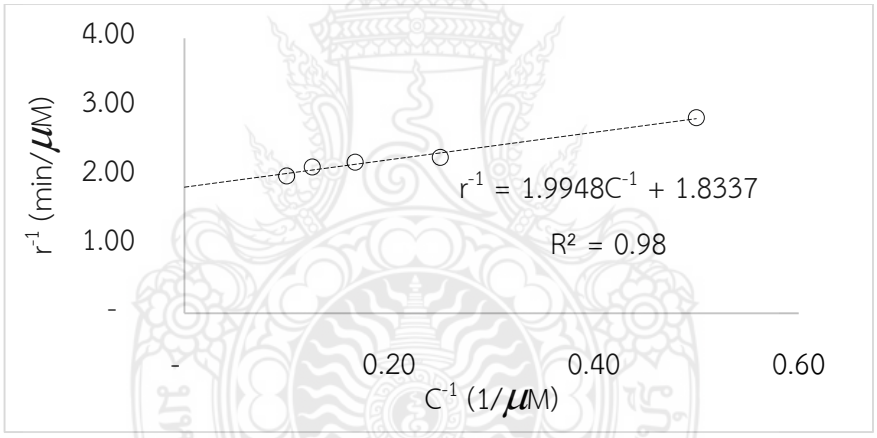
$$-\frac{dC}{dt} = \frac{kKC}{(1+KC)} \tag{4.10}$$

ซึ่งสามารถจัดรูปสมการใหม่ดังนี้

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{kKC} + \frac{1}{k} \tag{4.11}$$



รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี RB5



รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี IC

จากรูป 4.5 และ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยากับเวลาของการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี RB5 และ IC สามารถหาค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการบำบัดสี RB5 และ IC ได้เท่ากับ 1.9948 min^{-1} และ 4.1267 min^{-1} ตามลำดับ ซึ่งสี IC มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่มากกว่า RB5 เพราะว่าสี RB5 มี โครงสร้างโมเลกุลที่ซับซ้อนกว่าสี IC ทำให้แสงส่องผ่านเข้าไปเร่งตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดปฏิกิริยาได้ยากกว่า และสี RB5 ย่อยสลายได้ยากกว่า สี IC [25]

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการบำบัดสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับการเติมอากาศขนาดนาโนบับเบิ้ล สามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับการเติมอากาศขนาดนาโนบับเบิ้ล

จากการศึกษาการบำบัดสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับการเติมอากาศขนาดนาโนบับเบิ้ล พบว่าน้ำเสียสังเคราะห์สี RB5 มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีสูงสุดคือ 88.00% ในระยะเวลาการบำบัด 90 นาทีน้ำ และเสียสังเคราะห์สี IC มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีสูงสุดคือ 100.00%

จากการศึกษากระบวนการดังกล่าว เมื่อเปรียบเทียบชุดที่ให้ผลน่าสนใจ 3 ชุด คือ ชุดที่ 1.TiO_2+UV+NB, 2.TiO_2+UV และ 3.TiO_2+NB ชุดที่ 1 และ 2 ให้ผลการทดลองที่มีค่าประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน สามารถสรุปได้ว่า การเติม NB เข้าไปสามารถช่วยให้กระบวนการโฟโตคะตะลิติกเกิดขึ้นได้ดี

5.1.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์ (Kinetics) ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับการเติมอากาศขนาดนาโนบับเบิ้ล

จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติก โดยนำผลการทดลองพลอตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(\frac{C_0}{C})$ กับ t ของ สี RB5 และสี ICสามารถหาค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก (k) คือ 1.9948 min^{-1} และ 4.1267 min^{-1} ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะที่ได้จากการวิจัย

5.2.1 ควรศึกษาทดสอบกระบวนการโฟโตคะตะลิติก โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบอื่น โดปสารชนิดอื่น

5.2.2 ควรศึกษากับสีย้อมประเภทอื่น

5.2.3 ควรนำไปประยุกต์ใช้กับการบำบัดสีในโรงงานอุตสาหกรรม

บรรณานุกรม

[1] ทักษิณา ศรีโลห้อ. (2556). **การกำจัดสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการโฟโตแคตาไลติกโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีโซล-เจล.** (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยขอนแก่น).

[2] สุภาพร พงศ์ธรพฤกษ์. (2550). **การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีและปริมาณโลหะหนักในน้ำทิ้งสีย้อมผ้า โดยใช้วัสดุเหลือใช้จากธรรมชาติ.** (วิทยานิพนิพนธ์ปริญญามหาบัญฑิต, มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์).

[3] วิโรจน์ สารการโกศล. (2560). **มลภาวะและอันตรายของน้ำทิ้งจากการย้อมผ้า.** วารสารสิ่งแวดล้อม. 20 (มกราคม 2560): 7.

[4] กฤษณะ กอบวิทยา. (2557). **กระบวนการโฟโตคะตะไลติกรีดักชันของไนเตรตด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ดัดแปลงจากโลหะ.** (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.)

[5] รุ่งระวี ทองดอนเอ. (2560). **เทคโนโลยีไมโคร/นาโนบับเบิ้ลกับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ.** (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต,มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิษณุโลก).

[6] Rojviroon, T., Rojviroon, O., Sirivithayapakorn, S. (2016). **Photocatalytic decolourisation of dyes using TiO_2 thin film photocatalysts**. Surface Engineering. 32:8:562-569.

[7] Li, B., Wang, X., Yan, M., and Li, L. (2012). **Preparation and characterization of nano TiO_2 powder**. Materials chemistry and physics. 78: 184.

[8] Ye, Y., Bruning, H., Li, X., Yuntema, D., H,M., Rijnaarts, H. (2018). **Significant enhancement of micro pollutant photocatalytic degradation using a TiO_2 nanotube array photoanode based photocatalytic fuel cell**. Chemical Engineering Journal. 354: 553-562.

[9] Phan, K., Truong, T., Wang, Y. and Bhandari, B. (2019). **Nanobubbles: Fundamental characteristics and applications in food processing**. Trends in Food Science & Technology. 95: 118-130.

บรรณานุกรม (ต่อ)

[10] Zhou, W., Wu, C., Lv, H., Zhao, B., Liu, K. and Ou, L. (2019). **Nanobubbles heterogeneous nucleation induced by temperature rise and its influence on minerals flotation**. Applied Surface Science.508: 145282.

[11] Alipour, A. and Lakouarj, M. (2019). **Photocatalytic degradation of RB dye by CdS-decorated nanocomposites based on polyaniline and hydrolyzed pectin: Isotherm and kinetic.** Journal of Environmental Chemical Engineering 7: 102837.

[12] Wang,T., Gao, Y., Tang, T., Bian, H., Zhang, Z., Xu, J., Xiao, H., Chu, X. (2019). **Preparation of ordered TiO_2 nanofibers/ nanotubes by magnetic field assisted electrospinning and the study of their photocatalytic properties**. Ceramics International. 45: 14404-14410.

[13] Wang, L., Ali, J., Wang, Z., Oladoja, N., Cheng, R., Zhang, C., Mailhot, G. and Pan, G. (2019). **Oxygen nanobubbles enhanced photodegradation of oxytetracycline under visible light: synergistic effect and mechanism**. Chemical Engineering Journal. 388: 124227.

[14] Minamikawa, K. and Makino, T. (2019). **Oxidation of flooded paddy soil through irrigation with water containing bulk oxygen nanobubbles**. Science of The Total Environment. 709: 136323.

[15] Zollinger, H. (2003). **Color chemistry, synthesis, properties and application of organic dyes and pigments.** 3rded. Wiley VCH, New York.

[16] Santhy, K. and Selvapathy, P. (2006). **Removal of reactive dyes from wastewater by adsorption on coir pith activated carbon**. Bioresour. Technol. 97: 1329-1336.

บรรณานุกรม (ต่อ)

[17] Wang, N., Zhang, C. He, H. Li, X. and Yang, J. (2011). **Hydrothermal-assisted liquid phase deposition synthesis and photocatalytic activities of titanium nanocrystals**. Powder Technology 205: 61-64.

[18] Zhao, Y., Zhao, Q. Li, X., Hou, Y., Zou, X., Wang, J., Jiang, T. and Xie, T. (2012). **Synthesis and photo activity of flower-like anatase TiO_2 with {001} facets exposed**. Materials Letters 66: 308-310.

[19] พงษ์ศักดิ์ ขาวอิน. (2555). **การกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดฟื้นฟูสภาพได้**.(วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต,มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา).

[20] สรรค์ จิตรใคร่ครวญ, **การทำความสะอาดโดยตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์**. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ, น. 21-24.

[21] กิติโรจน์ หวันตาลา, ชยาภาส ทับทอง และ สินศุภา จุ้ยจุลเจิม. 2552. การดูดซับสีย้อมผ้าด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว. **วารสารวิจัยสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.** 10 (2): 104-112.

[22] Ji, X., Liu, C. and Pan, G. (2020). **Interfacial oxygen nanobubbles reduce methylmercury production ability of sediments in eutrophic water.** Ecotoxicology and Environmental Safety 188: 109888.

[23] Lee, S. and Park, S. (2013). **TiO_2 photocatalyst for water treatment applications.** Journal of Industial and Engineering Chemistry 19: 1761-1769.

บรรณานุกรม (ต่อ)

[24] Bahadoria, E., Rapfb,M., Michelec, A. and Rossettia, I.(2020). **Photochemical vs. photocatalytic azo-dye removal in a pilot free-surface reactor: Is the catalyst effective?**. Separation and Purification Technology 237: 116320.

[25] Alipour, A. and Lakouarj ,M. (2019). **Photocatalytic degradation of RB dye by CdS-decorated nanocomposites based on polyaniline and hydrolyzed pectin: Isotherm and kinetic.** Journal of Environmental Chemical Engineering 7: 102837.

[26] Wang, J. and Chena, H. (2020). **Catalytic ozonation for water and wastewater treatment: Recent advances and perspective.** Science of The Total Environment 704: 135249.

[27] Abdel-Aziz, R., Ahmed, M. and Abdel-Messih, M. (2020). **A novel UV and visible light driven photocatalyst $AgIO_4$/ZnO nanoparticles with highly enhanced photocatalytic performance for removal of rhodamine B and indigo carmine dyes.** Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry 389: 112245.

[28] Makia,L., Malekib, A., Rezaeeb, R., Daraeib, H. and Yetilmezsoyc, K. (2019). **LED-activated immobilized Fe-Ce-Ntri-doped TiO_2 nanocatalyst on glass bed for photocatalytic degradation organic dye from aqueous solutions.** Environmental Technology & Innovation 15: 100411.

บรรณานุกรม (ต่อ)

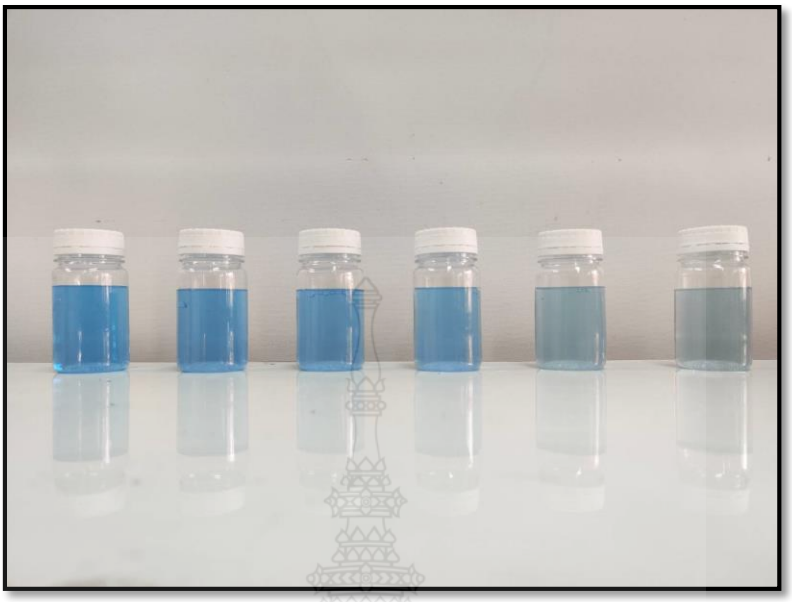
[29] Xiao, W. and Xu, G. (2020). **Mass transfer of nanobubble aeration and its effect on biofilm growth: Microbial activity and structural properties**. Science of The Total Environment 703: 134976.

[30] Temesgen, T., Bui, T., Han, M., Kim, T. and Park, H. (2017). **Micro and nanobubble technologies as a new horizon for water-treatment techniques: A review.** Advances in Colloid and Interface Science 246: 40-51.

ภาคผนวก

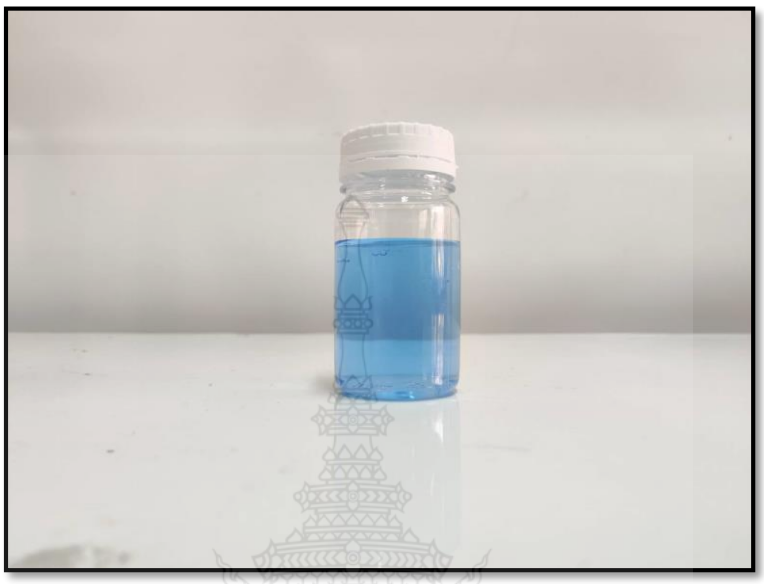
ภาคผนวก ก

ภาพประกอบการทดลอง



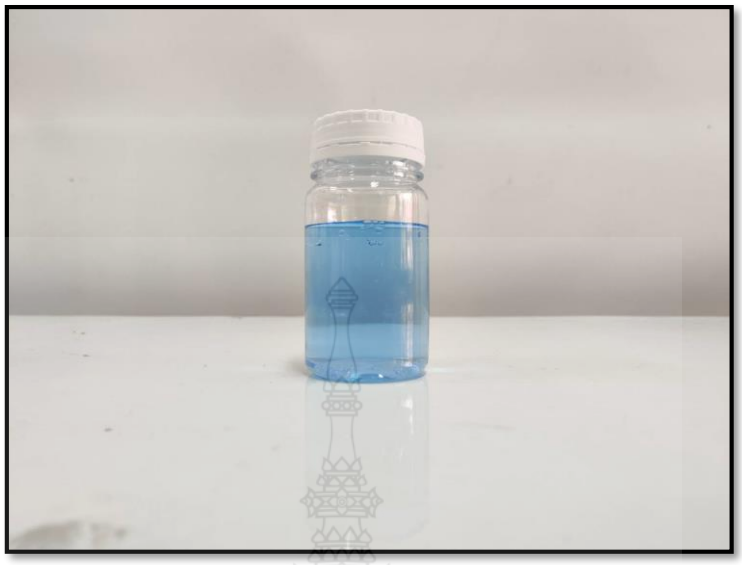
รูปที่ ก.1 การลดลงของสี IC ตามลำดับเวลา ที่บำบัดด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกร่วมกับการเติมอากาศขนาดนาโนบับเบิ้ล

รูปที่ ก.2 ความเข้มข้นสีที่เวลา 0 นาที



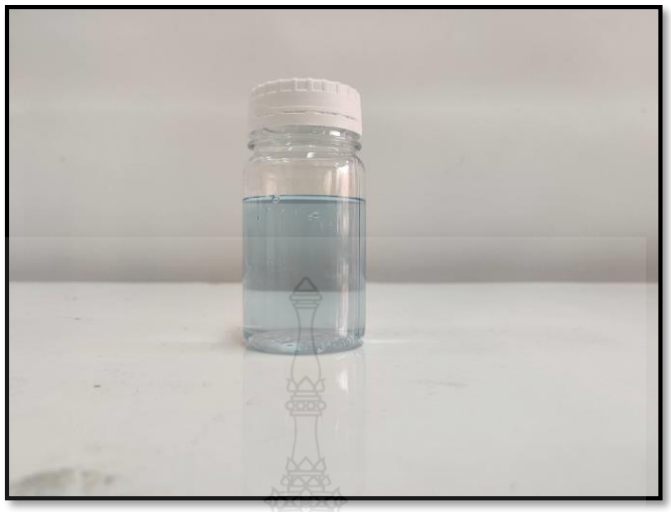
รูปที่ ก.3 ความเข้มข้นสีที่เวลา 5 นาที

รูปที่ ก.4 ความเข้มข้นสีที่เวลา 15 นาที

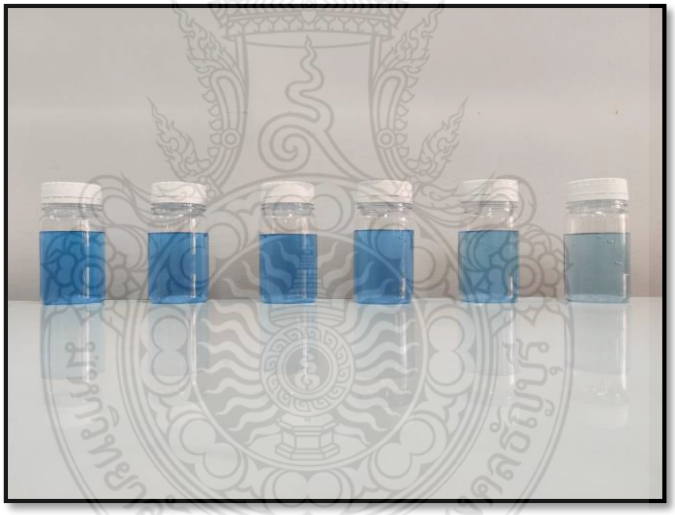


รูปที่ ก.5 ความเข้มข้นสีที่เวลา 30 นาที

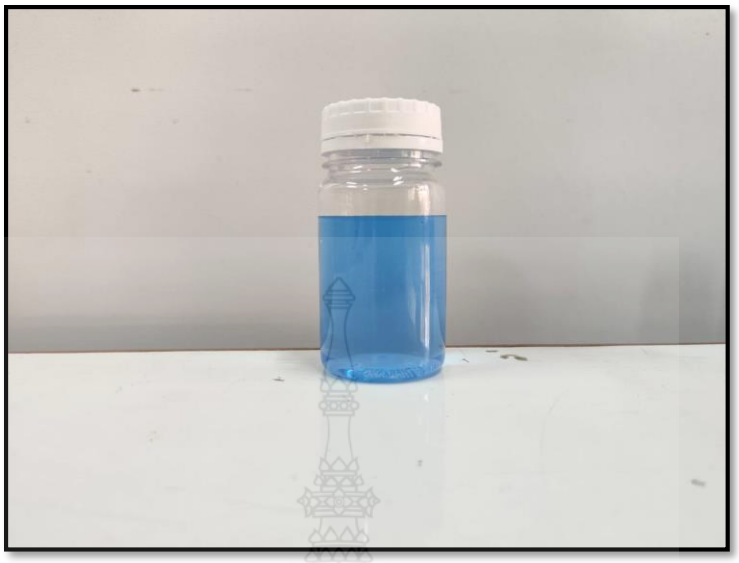
รูปที่ ก.6 ความเข้มข้นสีที่เวลา 60 นาที



รูปที่ ก.7 ความเข้มข้นสีที่เวลา 90 นาที

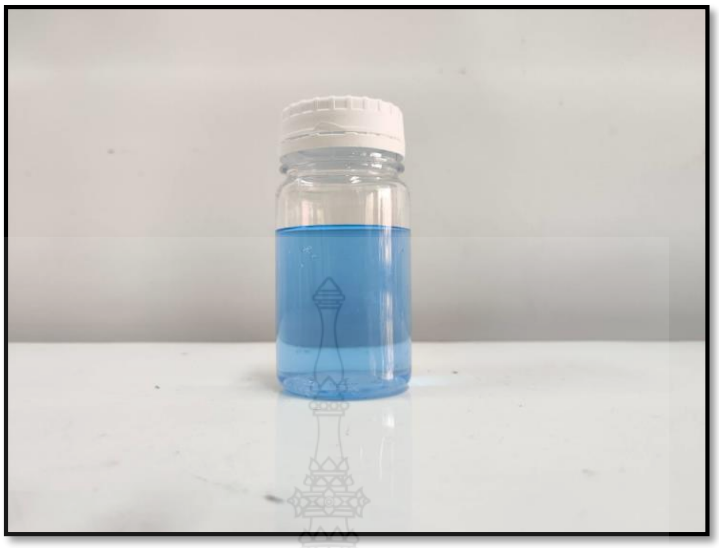


รูปที่ ก.8 การลดลงของสี IC ตามลำดับเวลา ที่บำบัดด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยไม่เติมอากาศ ขนาดนาโนบับเบิ้ล



รูปที่ ก.9 ณ เวลาที่ 0 นาที

รูปที่ ก.10 ณ เวลาที่ 5 นาที

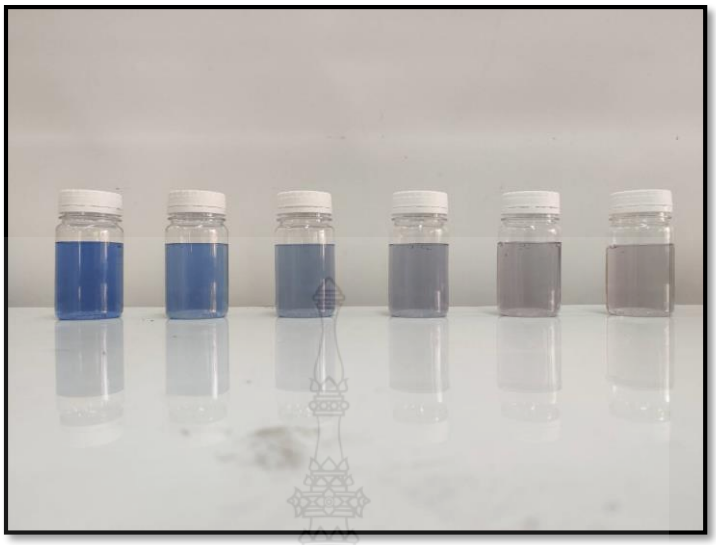


รูปที่ ก.11 ณ เวลาที่ 15 นาที

รูปที่ ก.12 ณ เวลาที่ 30 นาที

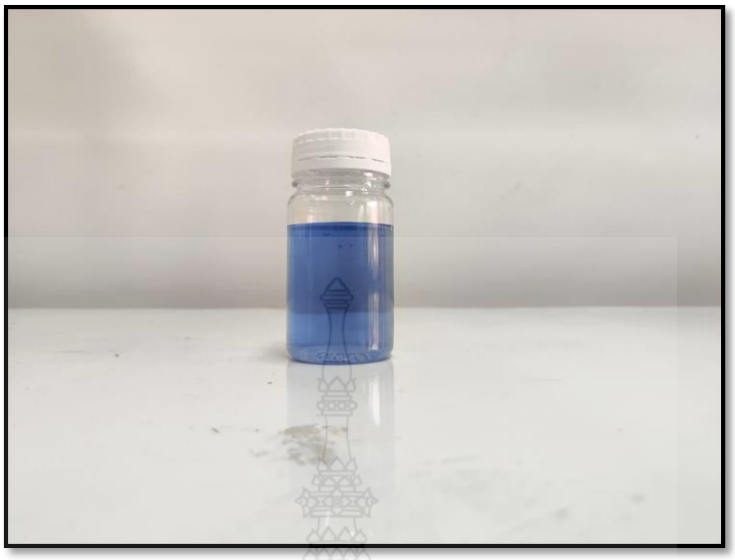
รูปที่ ก.13 ณ เวลาที่ 60 นาที

รูปที่ ก.14 ณ เวลาที่ 90 นาที



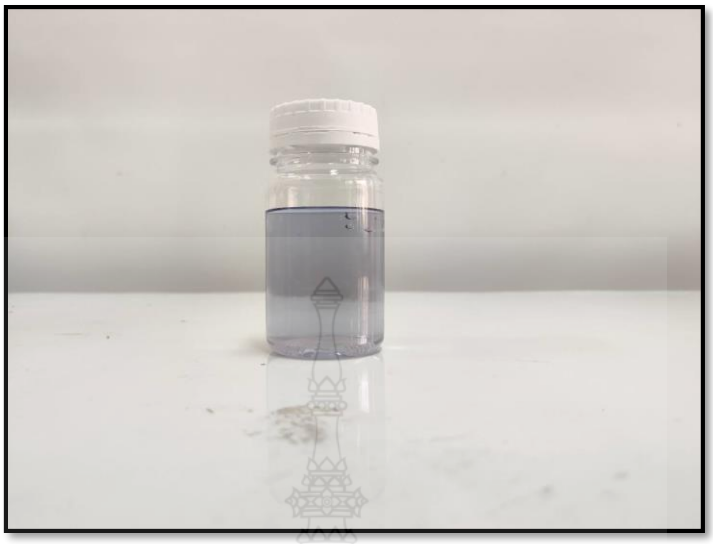
รูปที่ ก.15 การลดลงของสี RB5 ตามลำดับเวลา ที่บำบัดด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกร่วมกับการเติมอากาศขนาดนาโนบับเบิ้ล

รูปที่ ก.16 ณ เวลาที่ 0 นาที



รูปที่ ก.17 ณ เวลาที่ 5 นาที

รูปที่ ก.18 ณ เวลาที่ 15 นาที

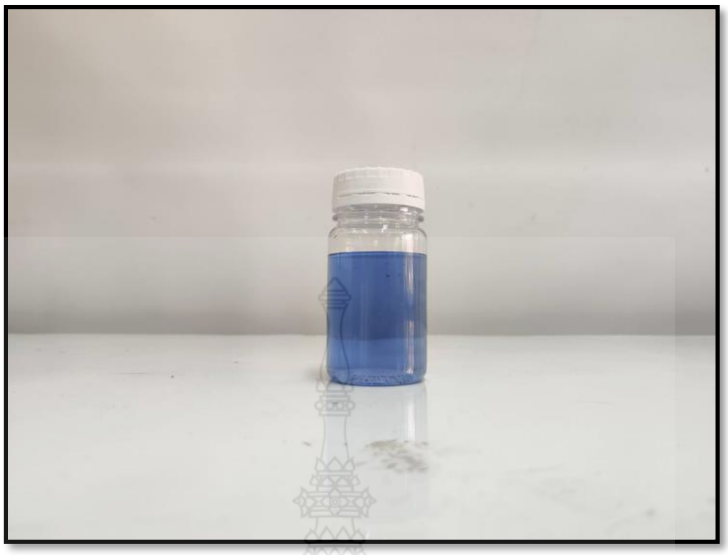


รูปที่ ก.19 ณ เวลาที่ 30 นาที

รูปที่ ก.20 ณ เวลาที่ 60 นาที

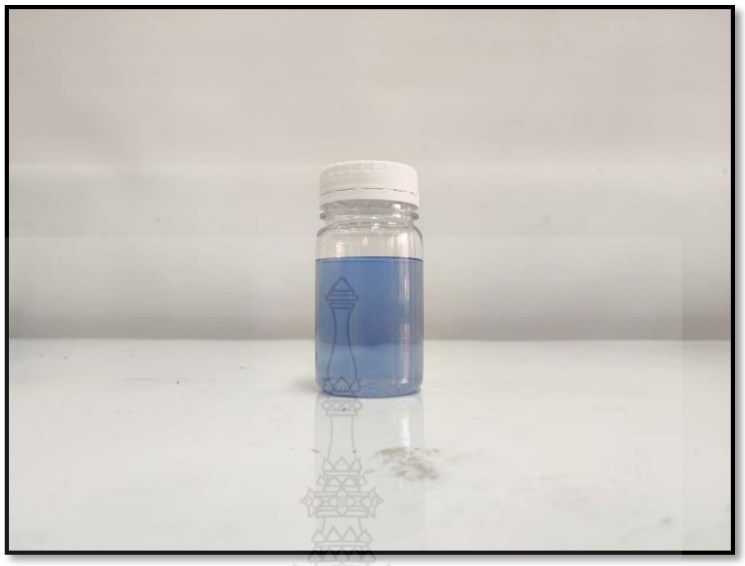
รูปที่ ก.21 ณ เวลาที่ 90 นาที

รูปที่ ก.22 การลดลงของสี RB5 ตามลำดับเวลา ที่บำบัดด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยไม่เติมอากาศขนาดนาโนบับเบิ้ล



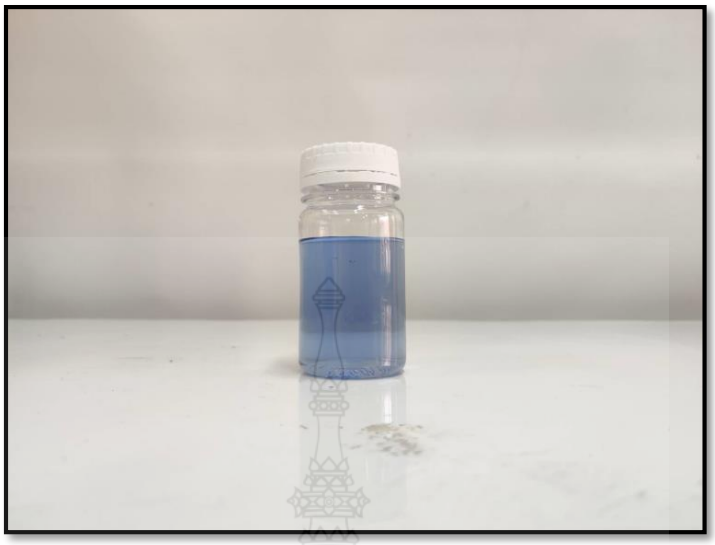
รูปที่ ก.23 ณ เวลาที่ 0 นาที

รูปที่ ก.24 ณ เวลาที่ 5 นาที



รูปที่ ก.25 ณ เวลาที่ 15 นาที

รูปที่ ก.26 ณ เวลาที่ 30 นาที



รูปที่ ก.27 ณ เวลาที่ 60 นาที

รูปที่ ก.28 ณ เวลาที่ 90 นาที

ภาคผนวก ข

ผลการทดลองตามช่วงเวลา

ตารางที่ ข-1 ข้อมูลประสิทธิภาพการกำจัดสี

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นเริ่มต้น, หน่วย	ประสิทธิภาพการกำจัดสี (%)		ความเข้มสี, ADMI	
		RB5	IC	RB5	IC
TiO_2+UV+NB	2	100	100	0	0
	4	100	100	0	0
	6	100	100	0	0
	8	93.67	100	0.35	0
	10	87.57	99.35	1.24	0.07
TiO_2+UV	2	100	100	0	0
	4	95	100	0	0
	6	88	100	0.59	0
	8	89	100	0.86	0
	10	83	89.47	1.69	1.05
TiO_2+NB	2	74	81.27	0.55	0.37
	4	45	46.35	2.30	1.63
	6	37	38.51	3.76	4.05
	8	27	35.16	5.88	6.96
	10	26	30.7	7.37	9.48
UV+NB	2	5.71	10.3	1.79	1.84
	4	3.28	9.59	3.62	3.8
	6	2.44	5.71	5.77	5.88
	8	2.15	4.92	7.54	7.83
	10	2.03	3.82	9.67	9.76

ตารางที่ ข-1 ข้อมูลประสิทธิภาพการกำจัดสี (ต่อ)

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นเริ่มต้น, หน่วย	ประสิทธิภาพการกำจัดสี (%)		ความเข้มสี, ADMI	
		RB5	IC	RB5	IC
UV	2	4.80	13.23	5.70	1.74
	4	4.77	12.94	7.79	1.81
	6	3.17	9.84	7.85	3.47
	8	2.58	9.27	9.52	3.67
	10	1.81	4.85	9.68	5.71
NB	2	4.00	13.22	5.81	1.74
	4	3.46	7.58	7.68	1.85
	6	2.20	6.18	7.82	3.75
	8	1.85	5.11	9.59	3.80
	10	1.68	4.08	9.81	5.79
TiO_2	2	8.42	26.29	5.50	1.47
	4	8.41	18.97	7.29	1.62
	6	7.89	15.75	7.58	2.19
	8	5.74	10.71	9.21	2.60
	10	5.31	8.88	9.43	3.37
non TiO_2+UV+NB	2	0	0	2	2
	4	0	0	4	4
	6	0	0	6	6
	8	0	0	8	8
	10	0	0	10	10

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวอรกช สุทธิวัฒนกุล
วัน เดือน ปีเกิด	9 กุมภาพันธ์ 2538
ที่อยู่	99/25(15) ซ.นวมินทร์24 ถ.นวมินทร์ แขวงคลองกุ่ม เขตบึงกุ่ม จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10240
การศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
เบอร์โทรศัพท์	0924996198
อีเมล์	orakot_s@mail.rmutt.ac.th