

การบำบัดสี้อมด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม
AC/TiO₂ ร่วมกับการเติมอากาศไมโคร/นาโนบับเบิล

DYE DECOLORIZATION BY PHOTOCATALYTIC PROCESS USING
HYBRID AC/TiO₂ AS CATALYST AND MICRO/NANOBUBBLE
AERATION

ณิชารีย์ เอกชาตรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การบำบัดสี้อมด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม
AC/TiO₂ ร่วมกับการเติมอากาศไมโคร/นาโนบับเบิล



ณิชารีย์ เอกชาตรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยที่เกิดจากการค้นคว้าและวิจัย ขณะที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ในคณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถือเป็น
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และข้อความต่างๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้า
ขอรับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำงานวิจัยของผู้อื่นมานำเสนอในชื่อของข้าพเจ้า

This thesis consists of research materials conducted at the Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Thanyaburi and hence the copyright owner.
I hereby certify that the thesis does not contain any forms of plagiarism.


.....
(นางสาวณิชารีย์ เอกชาติ)



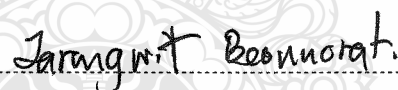
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การบำบัดสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม
AC/TiO₂ ร่วมกับการเติมอากาศไมโคร/นาโนบับเบิล
Dye Decolorization by Photocatalytic Process Using Hybrid
AC/TiO₂ as Catalyst and Micro/Nanobubble Aeration

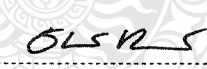
ชื่อ - นามสกุล นางสาวณิชารีย์ เอกชาตรี
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธรรมศักดิ์ โรจน์วิรุฬห์, วศ.ด.
ปีการศึกษา 2565

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

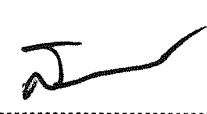

..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์กุลยา สารีชีวิน, วศ.ด.)


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


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์จรุงวิทย์ บุญโนรัตน์, วศ.ด.)


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

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาสุปรีย์, Ph.D.)
วันที่ 3 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2565

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การบำบัดสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม AC/TiO ₂ ร่วมกับการเติมอากาศไมโคร/นาโนบับเบิล
ชื่อ -นามสกุล	นางสาวณิชาธิ์ย์ เอกชาติตรี
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธรรมศักดิ์ โรจน์วิรุฬห์, วศ.ด.
ปีการศึกษา	2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ (AC/TiO₂) ในกระบวนการโฟโตคะตะลิติก และประเมินประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม อินดิโกคาร์มีน (IC), เมทิลีนบลู (MB) และสีรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ (RB5) ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกมีตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂ ร่วมเติมอากาศขนาดไมโคร/นาโนบับเบิล (micro/nanobubble, MNBs)

การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂ ด้วยวิธี dip coating โดยทำการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพพื้นผิว วิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ ขนาดพื้นผิวเฉพาะ ปริมาตรและขนาดรูพรุนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂ และวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของฟองอากาศขนาด MNBs รวมทั้งประเมินประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 10, 25, 50, 75 และ 100 μM ทำการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์โดยเปรียบเทียบสภาวะที่แตกต่างกันทั้ง 7 สภาวะ

ผลการวิเคราะห์พบว่าลักษณะทางกายภาพพื้นผิว องค์ประกอบของธาตุ ขนาดพื้นผิวเฉพาะ ปริมาตรและขนาดรูพรุนของพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂ พบว่ามีสารละลาย TiO₂ เคลือบอยู่บนผิว AC ส่วนขนาดและการกระจายตัวของ MNBs พบว่า อุปกรณ์การเติมอากาศสามารถผลิตฟองอากาศขนาด MNBs ได้ สำหรับการประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะลิติก พบว่าการเติมอากาศขนาด MNBs สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกได้ดี ซึ่งประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมดังกล่าวของ AC/TiO₂+UVA+MNBs เท่ากับ 69.06%, 60.06% และ 55.19% ส่วน AC/TiO₂+UVA เท่ากับ 59.11%, 44.19% และ 37.89% ตามลำดับ ส่วนจลนศาสตร์ของ Langmuir-Hinshelwood เมื่อเปรียบเทียบค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งของการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก พบว่าการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า (AC/TiO₂+UVA+MNBs) สูงกว่า (AC/TiO₂+UVA) 1.28, 1.15 และ 1.12 เท่าตามลำดับ

คำสำคัญ : การเติมอากาศขนาดไมโคร/นาโนบับเบิล กระบวนการโฟโตคะตะลิติก เทคนิคโซล-เจล

Thesis Title	Dye Decolorization by Photocatalytic Process Using Hybrid AC/TiO ₂ as Catalyst and Micro/Nanobubble Aeration
Name - Surname	Miss Nicharee Akechatree
Program	Civil Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Thammasak Rojviroon, D.Eng.
Academic Year	2022

ABSTRACT

This research aimed to develop a hybrid titanium dioxide coated with activated carbon (AC/TiO₂) as a photocatalyst for photocatalytic process and evaluate the efficiency of dye wastewater treatment using Indigo Carmine (IC), Methylene Blue (MB), and Reactive Black 5 through photocatalytic process with the combination of AC/TiO₂ and micro/nanobubble aeration (MNBs).

The development of a hybrid AC/TiO₂ was carried out with dip coating. The surface physical characteristics of the prepared catalyst were analyzed including elemental analysis, specific surface size, volume and surface pore size of AC/TiO₂ catalyst and distribution of the MNBs. The efficiency of dye wastewater treatment with IC, MB and RB5 was evaluated at concentration of 10, 25, 75 and 100 µM. The test was carried out in reactor batch and 7 different conditions were compared.

The research results revealed that when analyzing the surface physical characteristics, element, specific surface size, volume and surface pore size of AC/TiO₂, it was found that TiO₂ was coated at the surface. In terms of size and distribution of MNBs, it showed that the bubble device could produce bubbles with the size of MNBs. The evaluation of degradation efficiency of the photocatalytic process showed that it could increase the efficiency of IC, MB and RB5. The decolorization efficiency of AC/TiO₂+UVA+MNBs was 69.06%, 60.06% and 55.19% and AC/TiO₂+UVA was 59.11%, 44.19% and 37.89% respectively. The Langmuir-Hinshelwood kinetics model was used to compare the kinetic of the dye decolorization reaction of IC, MB and RB5 dyes. The kinetic rate constants of the pseudo first-order decolorization of the photocatalytic process with MNBs AC/TiO₂+UVA+MNBs were 1.28, 1.15 and 1.12 times higher than those with AC/TiO₂+UVA.

Keywords: micro/nanobubble, Photocatalytic, Sol-Gel

กิตติกรรมประกาศ

ในการศึกษางานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์ด้วยความกรุณา และความอนุเคราะห์ของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธรรมศักดิ์ โรจนวิรุฬห์ อาจารย์ที่ปรึกษา และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรรรณ โรจนวิรุฬห์ ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้ทำการศึกษาวิจัยขอขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณบริษัท กรีน ซัสเทนอะบิลิตี้ คอนเซ็ปท์แอนด์ เทคโนโลยี จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือทดสอบ และอุปกรณ์สำหรับการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ให้สามารถทำงานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จ รวมถึงขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สัญญา สิริวิทยาปกรณ์ ดร.กฤษยา สาริชีวิน และรองศาสตราจารย์ ดร.จรุงวิทย์ บุญโนรัตน์ ที่ได้ให้ความกรุณาให้คำแนะนำและข้อเสนอที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย รวมทั้งเสียสละเวลาในการเป็นกรรมการสอบในการสอบครั้งนี้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ และมอบความดีทั้งหมดนี้ที่จะเกิดขึ้นเนื่องจากการนำผลงานวิจัยนี้ไปใช้ประโยชน์ให้แก่ คุณพ่อ คุณแม่ ญาติพี่น้อง และเพื่อนๆ ที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิจัยนี้ รวมถึงคณาจารย์สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีทุกท่านที่ให้การสนับสนุนและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้ นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ พี่ก๊าก พี่เบนซ์บุคลากรเจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมโยธาที่ให้ความช่วยเหลือในสิ่งต่างๆ จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี หากงานวิจัยนี้มีข้อผิดพลาด ขาดตกบกพร่อง หรือไม่สมบูรณ์ประการใด ผู้วิจัยขอกราบขออภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ณิชารีย์ เอกชาตรี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(9)
สารบัญรูป.....	(10)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(13)
บทที่ 1 บทนำ.....	14
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	14
1.2 วัตถุประสงค์.....	15
1.3 ขอบเขต.....	15
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	15
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.1 สีย้อม.....	16
2.1.1 ประเภทสีย้อม.....	16
2.1.2 ความเป็นพิษของสีย้อม.....	18
2.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย.....	18
2.3 กระบวนการโฟโตคะตะลิติก.....	23
2.3.1 ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2	26
2.3.2 แหล่งกำเนิดแสง.....	27
2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการสลายตัวของโฟโตคะตะลิติก.....	28
2.3.4 การประยุกต์ใช้กระบวนการโฟโตคะตะลิติก.....	30
2.4 กระบวนการโซล-เจล.....	30
2.5 ถ่านกัมมันต์.....	32
2.5.1 ประเภทของถ่านกัมมันต์.....	33
2.5.2 โครงสร้างรูพรุน.....	34

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.3 วิธีกระตุ้นถ่านกัมมันต์.....	35
2.5.4 การดูดซับ.....	35
2.6 ไมโคร/นาโนบับเบิล (Micro/Nanobubbles ; MNBs).....	36
2.6.1 คุณสมบัติในการบำบัดน้ำของไมโคร/นาโนบับเบิล.....	37
2.7 สารก่อมลพิษขนาดเล็ก (Micropollutants, MPs).....	38
2.8 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก.....	39
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	40
3.1 วัสดุและอุปกรณ์.....	40
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	44
3.2.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO ₂	45
3.2.2 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO ₂	47
3.2.3 การประเมินประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์.....	47
3.4 การศึกษาจลนพลศาสตร์ (Kinetics) ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกในการบำบัดสีย้อม.....	49
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน.....	50
4.1 ผลวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO ₂	50
4.1.1 ผลวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO ₂	50
4.1.2 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO ₂	51
4.1.3 ผลการวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวเฉพาะ ปริมาตรและขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO ₂	53
4.1.4 ผลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของฟองอากาศ MNBs.....	53
4.2 การประเมินประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก.....	54
4.3 การศึกษาจลนพลศาสตร์ (Kinetics) ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO ₂ ร่วมกับการเติมอากาศขนาด MNBs.....	69
บทที่ 5 ผลการดำเนินงาน.....	74
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	74

สารบัญ (ต่อ)

5.2 ข้อเสนอแนะที่ได้จากการวิจัย.....	75
บรรณานุกรม.....	76
ภาคผนวก.....	92
ภาคผนวก ก ผลการทดลอง.....	93
ภาคผนวก ข อุปกรณ์การทดลอง.....	155
ภาคผนวก ค รายการคำนวณ	161
ประวัติผู้เขียน	164



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 การแบ่งประเภทของสีย้อมสังเคราะห์ตามรูปแบบโครงสร้างและการทำงาน.....	17
ตารางที่ 2.2 ความเป็นพิษของสีย้อมแต่ละประเภท.....	18
ตารางที่ 2.3 กระบวนการในการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีต่างๆ.....	19
ตารางที่ 2.4 ประเภทของเมมเบรน.....	23
ตารางที่ 2.5 ขนาดช่องว่างแถบพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ.....	25
ตารางที่ 2.6 โครงสร้างของ TiO_2	27
ตารางที่ 2.7 การบำบัดสารปนเปื้อนประเภทต่างๆโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก.....	30
ตารางที่ 2.8 เทคนิคการเคลือบฟิล์มแบบต่างๆ.....	32
ตารางที่ 2.9 กระบวนการบำบัด MPs ในน้ำเสีย.....	38
ตารางที่ 3.1 ชุดการทดลองและชุดควบคุม.....	49
ตารางที่ 4.1 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุของ AC และตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO_2	52
ตารางที่ 4.2 ผลวิเคราะห์ขนาดพื้นผิวเฉพาะ ปริมาตรและขนาดรูพรุนของ AC และตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO_2	53
ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบประเมินประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมในน้ำเสีย สังเคราะห์ของชุดทดลองและชุดควบคุมที่ 1.....	64
ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกกับงานวิจัยอื่น.....	73

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก.....	25
รูปที่ 2.2 ความยาวคลื่นรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มนุษย์สามารถมองเห็น.....	28
รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการเคลือบผิวด้วยกระบวนการโซลเจล.....	31
รูปที่ 2.4 ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC).....	33
รูปที่ 2.5 ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (GAC).....	34
รูปที่ 2.6 ฟองอากาศขนาดต่างๆ.....	37
รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ Dip Coating	43
รูปที่ 3.2 อุปกรณ์เติมอากาศขนาด MNBs.....	43
รูปที่ 3.3 ถังปฏิกรณ์แบบแบทช์สำหรับการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วย กระบวนการโฟโตคะตะลิติก.....	44
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	44
รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO ₂	46
รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการประเมินประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์.....	48
รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของพื้นผิว.....	50
รูปที่ 4.2 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของ AC	51
รูปที่ 4.3 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO ₂	53
รูปที่ 4.4 การกระจายตัวของฟองอากาศขนาด MNBs	54
รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม IC ในสภาวะที่แตกต่างกัน.....	55
รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม MB ในสภาวะที่แตกต่างกัน.....	55
รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม RB5 ในสภาวะที่แตกต่างกัน.....	56
รูปที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ค่าศักยภาพการออกซิเดชัน-รีดักชันของตัวอย่างน้ำ.....	58
รูปที่ 4.9 การติดตามการเปลี่ยนแปลง $C.C_0^{-1}$ กับเวลาต่างๆ ในชุดทดลอง ของสีย้อม IC.....	59
รูปที่ 4.10 การติดตามการเปลี่ยนแปลง $C.C_0^{-1}$ กับเวลาต่างๆ ในชุดควบคุมที่ 1 ของสีย้อม IC.	59
รูปที่ 4.11 การติดตามการเปลี่ยนแปลง $C.C_0^{-1}$ กับเวลาต่างๆ ในชุดทดลองของสีย้อม MB.....	60
รูปที่ 4.12 การติดตามการเปลี่ยนแปลง $C.C_0^{-1}$ กับเวลาต่างๆ ในชุดควบคุมที่ 1 ของสีย้อม MB...	60

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.13 การติดตามการเปลี่ยนแปลง $C.C_0^{-1}$ กับเวลาต่างๆ ในชุดทดลองของสีย้อม RB5.....	61
รูปที่ 4.14 การติดตามการเปลี่ยนแปลง $C.C_0^{-1}$ กับเวลาต่างๆ ในชุดควบคุมที่ 1 ของสีย้อม RB5..	61
รูปที่ 4.15 ค่า DO ของการบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์.....	62
รูปที่ 4.16 ค่า DO ของการบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์.....	63
รูปที่ 4.17 ค่า DO ของการบำบัดสีย้อม ในน้ำเสียสังเคราะห์ RB5.....	63
รูปที่ 4.18 การเปลี่ยนโครงสร้างของสีย้อม IC โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ตลอด ระยะเวลา 180 นาที.....	66
รูปที่ 4.19 การเปลี่ยนโครงสร้างของสีย้อม MB โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ตลอด ระยะเวลา 180 นาที.....	67
รูปที่ 4.20 การเปลี่ยนโครงสร้างของสีย้อม RB5 โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ตลอด ระยะเวลา 180 นาที.....	68
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง r_0^{-1} กับ C^{-1} สำหรับสีย้อม IC ของชุดทดลอง.....	69
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง r_0^{-1} กับ C^{-1} สำหรับสีย้อม IC ของชุดควบคุมที่ 1.....	70
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง r_0^{-1} กับ C^{-1} สำหรับสีย้อม MB ของชุดทดลอง.....	70
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่าง r_0^{-1} กับ C^{-1} สำหรับสีย้อม MB ของชุดควบคุมที่ 1.....	71
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่าง r_0^{-1} กับ C^{-1} สำหรับสีย้อม RB5 ของชุดทดลอง.....	71
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่าง r_0^{-1} กับ C^{-1} สำหรับสีย้อม RB5 ของชุดควบคุมที่ 1.....	72
รูปที่ ก.1 การบำบัดสีย้อม IC ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเมื่อเวลาผ่านไป 180 min.....	149
รูปที่ ก.2 การบำบัดสีย้อม MB ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเมื่อเวลาผ่านไป 180 min.....	149
รูปที่ ก.3 การบำบัดสีย้อม RB5 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเมื่อเวลาผ่านไป 180 min.....	149
รูปที่ ข.1 อุปกรณ์ pH Meter.....	156
รูปที่ ข.2 ตู้บลมร้อน.....	156
รูปที่ ข.3 อุปกรณ์ Scanning Electron Microscope (SEM).....	157
รูปที่ ข.4 อุปกรณ์ Brunauer-Emmett-Teller Method (BET Surface).....	157
รูปที่ ข.5 อุปกรณ์ Nanobubbles Testing.....	158
รูปที่ ข.6 อุปกรณ์ Oxidation Reduction Potential Electrode (ORP).....	158
รูปที่ ข.7 อุปกรณ์ Spectrophotometer.....	159

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ ข.8 อุปกรณ์ Dissolved Oxygen DO Meter (DO).....	159
รูปที่ ข.9 เครื่อง Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES)	160
รูปที่ ข.10 เครื่อง Gas Chromatography–Mass spectrometry (GC-MS).....	160



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

e^-_{CB}	อิเล็กตรอนที่แถบการนำไฟฟ้า
H^+	โปรตอน (Proton)
H_2O_2	ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide)
$h\nu$	พลังงานโฟตอน
h^+_{VB}	โฮลที่แถบวาเลนซ์
IC	สีอินดิโกคาร์มีน (Indigo Carmine)
L-H	แลงเมียร์-ฮันเซลวูด (Langmuir Hishiwood)
MB	สีเมทิลีนบลู (Methylene Blue)
O^{2-}	ออกซิเจนไอออน (Oxygen ion)
OH^-	ไฮดรอกไซด์ไอออน (Hydroxide ion)
O_2	ออกซิเจน (Oxygen)
RB5	สีรีแอกทีฟแบล็ค 5 (Reactive Black 5)
UVA	รังสีอัลตราไวโอเล็ตชนิดเอ (Ultraviolet A)
$\bullet O_2^-$	ซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล (superoxide ion radicals)
$\bullet OH_2$	เปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Perhydroxyl radical)
$\bullet OH$	ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl radical)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

อุตสาหกรรมที่มีการปล่อยระบายน้ำทิ้งปนเปื้อนสีย้อมลงสู่สิ่งแวดล้อมจำนวนมากเป็นอันดับแรกๆ ได้แก่ อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมฟอกหนัง และอุตสาหกรรมการผลิตสีย้อม [1], [2] อุตสาหกรรมเหล่านี้เป็นอุตสาหกรรมที่มีขั้นตอนหลากหลาย เช่น การฟอกสี การชุบ การฟอกย้อม การพิมพ์ และการตกแต่งผลิตภัณฑ์ เป็นต้น [3] ซึ่งมีการใช้สารเคมีและสีย้อมชนิดหลากหลายชนิดในกระบวนการผลิตปริมาณมาก โดยกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมสิ่งทอมีการปล่อยระบายน้ำเสียที่มีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และอาจจะมีส่วนประกอบของสารกลุ่มโลหะหนักซึ่งยังคงมีโครงสร้างโมเลกุลที่มีความซับซ้อน อีกทั้งโมเลกุลของสีย้อมมีองค์ประกอบที่เป็นสารประกอบโครโมฟอร์ (Chromophore) ซึ่งเป็นสารให้สี และสารประกอบออกโซโครม (Auxochrome) ซึ่งมีพันธะที่ละลายน้ำได้ [4], [5] ส่งผลให้หากมีการปล่อยระบายน้ำเสียจากอุตสาหกรรมดังกล่าวลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ อาจส่งผลกระทบต่อประชากรและความหลากหลายทางชีวภาพของระบบนิเวศ เนื่องจากโมเลกุลของสีย้อมบดบังแสงอาทิตย์ที่จะเข้ามาทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในน้ำส่งผลให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพลดลง จึงมีความจำเป็นต้องมีการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอให้เป็นไปตามมาตรฐานน้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม [6]

ในปัจจุบันมีการบำบัดน้ำที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ ซึ่งสามารถแบ่งเป็นกระบวนการหลักได้หลากหลายประเภท เช่น การบำบัดทางกายภาพ (Physical treatment) การบำบัดทางเคมี (Chemical treatment) การบำบัดทางชีวภาพ (Biological treatment) และกระบวนการบำบัดขั้นสูง (Advance treatment) เป็นต้น [1], [2] กระบวนการที่กล่าวมาข้างต้นเป็นกระบวนการที่ใช้กันแพร่หลายในการบำบัดสีย้อมในน้ำเสีย ทั้งนี้กระบวนการโฟโตคะตะลิติกเป็นกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงที่มีศักยภาพในการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยกระบวนการดังกล่าวจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับการกระตุ้นด้วยแสง ทำให้เกิด

ผลิตภัณฑ์ที่มีความสามารถเป็นตัวออกซิไดซ์รุนแรงได้ดี และมีความสามารถย่อยสลายองค์ประกอบของสีย้อมที่มีโครงสร้างโมเลกุลที่ซับซ้อนได้เป็นอย่างดี [7], [8]

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการประเมินประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก โดยใช้ถ่านกัมมันต์ชุบเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ (AC/TiO₂) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับกระบวนการเติมอากาศขนาดไมโคร-นาโนบับเบิล (Micro/Nanobubbles, MNBs) เพื่อประเมินประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ 3 ชนิด ได้แก่ Indigo Carmine (IC), Methylene Blue (MB) และ Reactive Black 5 (RB5) รวมทั้งศึกษาจลนพลศาสตร์ของการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก

1.1 วัตถุประสงค์

1.1.1 พัฒนาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ในกระบวนการโฟโตคะตะลิติก โดยเคลือบถ่านกัมมันต์ด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีโซลเจล (Sol-Gel)

1.1.2 ประเมินประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก โดยใช้ AC/TiO₂ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

1.2 ขอบเขต

1.2.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้คือ AC/TiO₂

1.2.2 สีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้เป็นสี IC, MB และ RB5 ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 10, 25, 50, 75 และ 100 µM

1.2.3 ทดสอบในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์ (Batch reactor)

1.2.4 แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ คือ หลอด UVA ที่มีความเข้มแสง 1,250 µW.cm⁻²

1.2.5 อุปกรณ์การเติมอากาศขนาด MNBs

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 สามารถพัฒนาวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาและนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งมีศักยภาพที่ดีสำหรับกระบวนการโฟโตคะตะลิติก

1.3.2 สามารถประเมินประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สีย้อม

สีย้อมเป็นสารประกอบอินทรีย์ และอนินทรีย์ [9], [10] ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการให้สีกับวัสดุต่างๆ เช่น กระดาษ ผลิตภัณฑ์สิ่งทอ ผนัง หรือวัสดุที่มีการเปลี่ยนสี [11], [12] อีกทั้งยังมีออกซิโครมและโครโมฟอร์ เป็นส่วนประกอบ ซึ่งโครโมฟอร์มีหน้าที่ในการให้สี ประกอบด้วยกลุ่มเอโซ ($-N=N-$), คาร์บอนิล ($-C=O$), เอทิลีน ($-C=C-$), หมู่คาร์บอนไนโตรเจน ($-C=NH-$), ไนโตรเจนไดออกไซด์ ($-NO_2-$) และกลุ่มควินอยด์ เมื่อโครโมฟอร์มีมากขึ้นความเข้มข้นของสีก็จะมากขึ้น นอกจากนี้โครโมฟอร์ที่มีหน้าที่ให้สีแล้วยังมีออกซิโครมที่คอยส่งเสริมการให้สีของโครโมฟอร์และโมเลกุลที่ละลายในน้ำโดยออกซิโครม ประกอบด้วยกลุ่ม เอมีน ($-NH_2$), คาร์บอกซิล ($-COOH$), ซัลโฟเนต ($-SO_3H$) และไฮดรอกซิล ($-OH$) [13], [14] ซึ่งส่วนประกอบของสีย้อมดังกล่าวมีความเป็นพิษสูง เมื่อมีการปล่อยน้ำเสียสีย้อมลงสู่สิ่งแวดล้อมจะส่งผลกระทบต่อความสวยงามของแหล่งน้ำ บดบังการส่องผ่านของแสงแดด และลดออกซิเจนที่ละลายในน้ำ [11], [12]

2.1.1 ประเภทของสีย้อม

สีย้อมสามารถแบ่งได้เป็นสีย้อมสังเคราะห์ที่ได้จากสารปิโตรเคมี [15] สีย้อมธรรมชาติได้จากพืช แมลง แร่ธาตุ และสัตว์ [16], [17] โดยสีย้อมสังเคราะห์มีสีสันทันที่โดดเด่น มีความคงทนสูง ราคาถูก มีประสิทธิภาพในการย้อมสี และใช้งานได้หลากหลาย เช่น เครื่องสำอาง สิ่งทอ การพิมพ์ ผนังอุตสาหกรรมและพลาสติก สีย้อมสังเคราะห์ส่วนใหญ่ประกอบด้วย 3 ประเภทหลัก สีย้อมเอโซ สีย้อมแอนทราควิโนน สีย้อมไตรฟีนิลมีเทน ส่วนประกอบที่กล่าวมาข้างต้น เป็นสารก่อมะเร็ง ซึ่งย่อยสลายทางชีวภาพยาก มีความเป็นพิษสูงทั้งต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม [18], [19] ส่วนสีย้อมธรรมชาติ เช่น แคโรทีนอยด์ ฟลาโวนอยด์ และควิโนน [20], [21] เป็นสีย้อมที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และมีความเป็นพิษต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมน้อย สาเหตุที่อุตสาหกรรมส่วนใหญ่ไม่นิยมใช้สีย้อมธรรมชาติ เนื่องจากสีย้อมธรรมชาติมีความคงทนต่ำทำให้สีย้อมซีดจางเมื่อสัมผัสแสงแดดและการซักผ้า [22]

การแบ่งสีย้อมสังเคราะห์สามารถแบ่งได้หลากหลายประเภท ในงานวิจัยนี้จะแบ่งสีย้อมสังเคราะห์ โดยพิจารณาจากรูปแบบโครโมฟอร์ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การแบ่งประเภทของสีย้อมสังเคราะห์ตามรูปแบบโครงสร้างและการใช้งาน

ประเภทของสีย้อม	คุณสมบัติ	โครงสร้างโมเลกุล	ที่มา
1. Acid	<ul style="list-style-type: none"> - มีความสว่าง, มีความคงทนต่อการซัก - เป็นสีประจุลบที่ละลายน้ำได้ 		[23]
2. Basic	<ul style="list-style-type: none"> - มักใช้กับพื้นผิวอะคริลิก กระดาษ ไนลอน และโพลีเอสเตอร์บางชนิด - มีความคงทน 		[24]
3. Direct	<ul style="list-style-type: none"> - ความคงทนต่อการซักอยู่ในระดับปานกลาง - ใช้ในการย้อมผ้าฝ้าย เรยอน กระดาษหนัง เส้นใยเซลลูโลส และไนลอน - เป็นสีย้อมประจุลบที่ละลายน้ำได้ - ใช้งานง่าย มีเฉดสีที่กว้าง และราคาถูก 		[24], [25]
4. Disperse	<ul style="list-style-type: none"> - ความสามารถในการละลายในน้ำไม่ดี - ใช้สำหรับย้อมเส้นใยสังเคราะห์ 		[23], [26]
5. Sulphur	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้สำหรับการย้อมวัสดุเซลลูโลส - เป็นสีที่เข้มที่สุด มีราคาไม่แพง ทนต่อแสงและการซัก 	<p>Leuco Sulfur Black 1</p>	[26]
6. Vat	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้กับเส้นใยเซลลูโลสโดยเฉพาะฝ้าย - มีความคงทนต่อแสงและความชื้นสูงมาก - ไม่ละลายในน้ำแต่ละลายได้โดยการใช้อัลตราไวท์ - ราคาแพง 		[23], [26]

2.1.2 ความเป็นพิษของสีย้อม

การปล่อยระบายสีย้อมในน้ำเสียออกสู่สิ่งแวดล้อม ทำให้เกิดปัญหาต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม แม้จะมีปริมาณเล็กน้อยก็สามารถทำให้เกิดปัญหา โดยมีรายละเอียดความเป็นพิษของสีย้อมที่ส่งผลต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ความเป็นพิษของสีย้อมแต่ละประเภท

ประเภทของสีย้อม	ความเป็นพิษ						ที่มา
	ระบบทางเดินหายใจ	ระคายเคือง	ระบบทางเดินอาหาร	ระบบสืบพันธุ์	โรคมะเร็ง	อื่นๆ	
1. Acid	✓	✓	✓				[27]
2. Basic		✓					[27], [28]
3. Direct		✓					[27], [29]
4. Disperse		✓		✓	✓	✓	[27], [28]
5. Sulphur	✓						[27]
6. Vat		✓					[27]

2.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย

การบำบัดน้ำเสียเป็นกระบวนการบำบัดหรือการย่อยสลายสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียที่มาจากกระบวนการผลิตให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรม และไม่ทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม ซึ่งน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมแต่ละประเภทจะมีลักษณะของน้ำเสียที่ต่างกัน ดังนั้นกระบวนการบำบัดน้ำจึงมีหลายวิธี โดยระบบบำบัดน้ำเสียมี 3 วิธีคือ

- 1) กระบวนการทางกายภาพ
- 2) กระบวนการทางเคมี
- 3) กระบวนการทางชีวภาพ

โดยแต่ละกระบวนการจะมีคุณสมบัติ ข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 กระบวนการในการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีต่างๆ

วิธีการบำบัด	ประเภท	คุณสมบัติ	ข้อดี	ข้อเสีย	ที่มา
1. ทางกายภาพ (Physical treatment)	Adsorb	- กระบวนการที่ถ่ายโอนโมเลกุลสารปนเปื้อนไปยังตัวดูดซับ - การดูดซับขึ้นอยู่กับลักษณะและคุณสมบัติของตัวดูดซับ - การดูดซับแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางชีวภาพ	- ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม	- ไม่สามารถดูดซับสารแบบเฉพาะเจาะจง	[30], [31], [32]
	Membrane Technology	- อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของเมมเบรนจะถูกดูดซับโดยพันธะเคมี และแรง Vander Waals	- ประหยัดพลังงาน - บำบัดสีย้อมได้ทุกประเภท	- ค่าใช้จ่ายสูง - อายุการใช้งานต่ำ - มีตะกอนเกิดขึ้นมาก - ไม่สามารถบำบัดได้ที่อุณหภูมิห้อง	[32], [30], [33], [31]
2. ทางเคมี (Chemical treatment)	Direct-Chemical Oxidation	- ใช้คลอรีน โอโซน หรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการกำจัดสารปนเปื้อน	- กำจัดสีย้อมที่ละลายน้ำได้	- ทำให้เกิดความเป็นพิษของสารประกอบอินทรีย์	[31]
	Coagulation-Flocculation	- กำจัดสีด้วยการสร้างตะกอน	- กำจัดสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ	- มีตะกอนมาก - มีผลกระทบต่อ pH	[32], [30]

ตารางที่ 2.3 (ต่อ) กระบวนการในการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีต่างๆ

วิธีการบำบัด	ประเภท	คุณสมบัติ	ข้อดี	ข้อเสีย	ที่มา
2. ทางเคมี (Chemical treatment)	Ozonation	<ul style="list-style-type: none"> - ฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยปฏิกิริยาออกซิไดซ์ที่รุนแรง - ทำลายกลิ่น และสี 	<ul style="list-style-type: none"> - ไม่มีของแข็งเกิดขึ้นในระบบ - ไม่ส่งผลกระทบต่อ pH 	<ul style="list-style-type: none"> - แก๊สโอโซนสลายตัวเร็ว - ไม่สามารถลดค่า COD 	[32]
3. การบำบัดทางชีวภาพ (Biological treatment)	Decolorization by Bacteria	- สียอมจะเสื่อมสภาพในสภาวะที่ไม่ใช้ออกซิเจน และใช้ออกซิเจน	<ul style="list-style-type: none"> - บำบัดสียอมได้ที่ - เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม - ค่าใช้จ่ายต่ำ - เกิดตะกอนในระบบน้อย 	- ใช้เวลาในการบำบัดนาน	[34], [30], [35]
	Decolorization by Fungi	<ul style="list-style-type: none"> - ราฟุสีขาว เป็นเชื้อราที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการกำจัดสียอม - เชื้อราผลิตเอนไซม์ได้ปริมาณมากทั้งภายในและภายนอกเซลล์ - เชื้อ <i>Aspergillus flavus</i> สามารถลดสีเขียวมาลาโคต์ได้ประมาณ 98–99% หลังจากพักตัวเป็นเวลา 6 วันในสภาวะที่เหมาะสม 	<ul style="list-style-type: none"> - ค่าใช้จ่ายต่ำ - บำบัดได้ในทุกสภาวะ 	- ใช้ในการบำบัดเวลานาน	[34], [30], [31], [35]

ตารางที่ 2.3 (ต่อ) กระบวนการในการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีต่างๆ

วิธีการบำบัด	ประเภท	คุณสมบัติ	ข้อดี	ข้อเสีย	ที่มา
3. การบำบัดทางชีวภาพ (Biological treatment)	Decolorization with Algal Cultures	<ul style="list-style-type: none"> - มีพื้นผิวและความสูง - มีความสามารถในการบำบัดสีข้อม - กลไกการย่อยสลายสีข้อม ได้แก่ <ul style="list-style-type: none"> (1) การใช้สีข้อมเพื่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย (2) การเปลี่ยนสีข้อมเป็นสารตัวกลางหรือน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ต่างๆ (3) การดูดซับโครโมฟอร์บนสาหร่าย สามารถย่อยสลายทางชีวภาพและดูดซับสีข้อมได้ 	<ul style="list-style-type: none"> - มีตรงกับสิ่งแวดล้อม - ค่าใช้จ่ายต่ำ 	<ul style="list-style-type: none"> - ในสภาวะแอโรบิก - สีข้อมประจุบวกย่อยสลายได้ช้า 	[34], [30], [31], [36]
	Decolorization by Yeast	<ul style="list-style-type: none"> - สามารถบำบัดสารอินทรีย์ที่บำบัดได้ยากในน้ำเสีย 	<ul style="list-style-type: none"> - มีการเจริญเติบโตที่รวดเร็ว - ต้นทุนต่ำ - เพาะเลี้ยงได้ง่าย - ทนต่อสภาวะที่ pH ต่ำ 	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้ในการบำบัดเวลานาน 	[30], [37], [35]

ตารางที่ 2.3 (ต่อ) กระบวนการในการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีต่างๆ

วิธีการบำบัด	ประเภท	คุณสมบัติ	ข้อดี	ข้อเสีย	ที่มา
4. การบำบัดขั้นสูง (Advance treatment)	Fenton Chemistry	<ul style="list-style-type: none"> - กระบวนการเฟนตันเกิดจากปฏิกิริยา H_2O_2 กับ Fe^{2+} และได้ไฮดรอกซิลเรดิคัล (hydroxyl radical, $\bullet OH$) - ปฏิกิริยาเกิดภายใต้สภาวะที่เป็นกรด 	<ul style="list-style-type: none"> - สามารถทำได้ที่อุณหภูมิห้อง - ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม 	<ul style="list-style-type: none"> - การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยังไม่มีประสิทธิภาพ - ต้นทุนสูง - มีปริมาณของ TDS 	[38], [39]
	Photocatalytic	- เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับแสงในการย่อยสลายสารปนเปื้อน	<ul style="list-style-type: none"> - ประหยัดต้นทุนสำหรับการดำเนินงานขนาดใหญ่ - มีความเป็นพิษต่ำ - มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง - มีความคงตัวทางเคมีและความร้อนสูง 	-	[40], [41]

ตารางที่ 2.4 ประเภทของเมมเบรน [42], [43], [44]

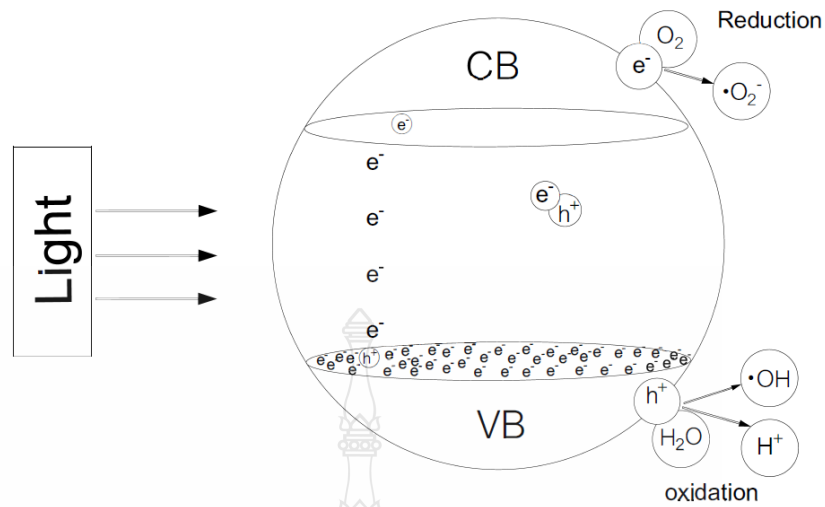
ชนิดเมมเบรน	ขนาดรูพรุน (μm)	คุณสมบัติทั่วไป
ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration, MF)	0.1-5.0	- กำจัดเม็ดสีย้อม แบคทีเรีย คอลลอยด์ และโปรโตซัว
อัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration, UF)	0.1-0.001	- กำจัดสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และสีที่ไม่ละลายน้ำ - มีความต้านทานความร้อนสูง - ใช้พลังงานต่ำ
นาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration, NF)	<0.002	- ใช้พลังงานต่ำ - กำจัดสารปนเปื้อนในกลุ่มสารอินทรีย์และอนินทรีย์ - แยกตัวทำละลายและตัวถูกละลายโมเลกุลขนาดใหญ่
รีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis, RO)	<0.001	- แยกสารละลายออกจากน้ำ - น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

2.3 กระบวนการโฟโตคะตะลิติก

โฟโตคะตะลิติกเป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับการกระตุ้นด้วยแสง ซึ่งอยู่ภายใต้กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Process, AOP) กระบวนการโฟโตคะตะลิติกประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนหลัก คือการดูดกลืนแสงโดยเซมิคอนดักเตอร์เพื่อสร้างคู่อิเล็กตรอนโฮล การแยกประจุ และการเคลื่อนย้ายไปยังพื้นผิวของเซมิคอนดักเตอร์ ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวสามารถอธิบายการเกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้ เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาได้รับพลังงานแสงในรูปพลังงานโฟตอนมากเพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดอิเล็กตรอน (e_{CB}^-) และโฮล (h_{VB}^+) เรียกพลังงานดังกล่าวว่าพลังงานกระตุ้นจากการกระตุ้นด้วยพลังงานที่มากพอจนทำให้ e_{CB}^- ที่แถบเวเลนซ์ (Valence Band, VB) ซึ่งเป็นระดับพลังงานเคลื่อนที่ไปแถบการนำ (Conduction Band, CB) ส่งผลทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน e_{CB}^- และ h_{VB}^+ สามารถเคลื่อนที่ไปมาระหว่างแถบ VB และแถบ CB ได้ง่ายและรวดเร็ว โดยปกติแล้วระดับของพลังงานต่ำที่สุดของแถบ CB จะเป็นระดับของศักย์พลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ เมื่อ e_{CB}^- เคลื่อนที่ไปแถบ CB ทำให้แถบ VB เกิดช่องว่างและเกิดสภาวะขาดแคลน e_{CB}^- ทำให้เกิด h_{VB}^+ ซึ่ง h_{VB}^+ ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับน้ำ (H_2O) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\bullet OH$) ซึ่งเป็นตัวออกซิแดนท์

(oxidant) ที่รุนแรงในกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ซึ่งสามารถย่อยสลายสารปนเปื้อนชนิดต่างๆ ได้ดี อีกทางด้านหนึ่งปฏิกิริยาที่แถบ CB โดย e_{CB}^- ที่เคลื่อนจากแถบ VB ไปยังแถบ CB ทำปฏิกิริยารีดักชันกับออกซิเจน (O_2) เกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล ($\cdot O_2^-$) ซึ่ง $\cdot O_2^-$ สามารถทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออน (H^+) เกิดเป็นเปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\cdot OH_2$) และ $\cdot O_2^-$ ทำปฏิกิริยากับน้ำได้เป็นเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) 2 โมเลกุลจากนั้น H_2O_2 ทำปฏิกิริยาต่อได้เป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\cdot OH$) 2 โมเลกุล หลังจากนั้น H_2O_2 ทำปฏิกิริยากับ $\cdot O_2^-$ เกิดเป็น OH^- , $\cdot OH$ และ O_2 โดยที่ e_{CB}^- ยังสามารถทำปฏิกิริยากับ H_2O_2 เกิดเป็น OH^- และ $\cdot OH$ ได้อีก ซึ่ง $\cdot OH$ ทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้น (reactant) สามารถย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ในน้ำได้เช่นกัน ผลลัพธ์สุดท้ายจากการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ในน้ำคือ คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ทั้งนี้สมการของกลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก ทั้งหมดแสดงดังสมการที่ 2.1- 2.10 [45], [46] สำหรับกลไกการกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ดังแสดงในรูปที่ 2.1





รูปที่ 2.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสติก

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะลิสติกเพื่อบำบัดสีย้อมในน้ำเสียมีหลายชนิด เช่น CdS, ZnO, ZnS และตัวเร่งปฏิกิริยาอื่นๆ เป็นต้น ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ขนาดช่องว่างแถบพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ

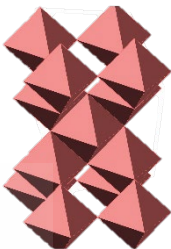
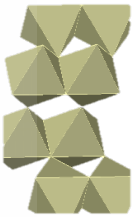
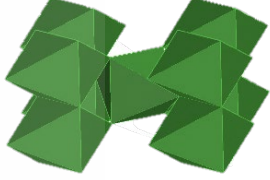
ตัวเร่งปฏิกิริยา	ขนาดช่องว่างแถบพลังงาน (eV)
BaTiO ₃	3.30
CuO	1.70
GaAs	1.42
FeO	2.40
TiO ₂	3.20
WO ₃	2.70
ZnO	3.20
Zns	3.20

2.3.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂)

TiO₂ เป็นสารกึ่งตัวนำที่นิยมใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะลิติก มีลักษณะเป็นผงสีขาว TiO₂ สามารถสะสมอยู่บนพื้นผิว เช่น แก้ว เซรามิก และแผ่นโลหะ เป็นต้น โดยสามารถสังเคราะห์ได้ด้วยวิธีต่างๆ เช่น วิธีโซล-เจล ไฮโดรเทอร์มอล กระบวนการโซโนเคมี และวิธีสกัดโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ เป็นต้น สำหรับ TiO₂ มีคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดี ได้แก่ มีความเสถียรทางเคมีสูง มีการใช้งานที่กว้างขวาง ต้นทุนต่ำ มีฤทธิ์ต้านแบคทีเรีย และไม่เป็นอันตรายกับสิ่งแวดล้อม [47], [48], [49] ทำให้ TiO₂ เป็นที่นิยมในการนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยากันอย่างแพร่หลาย โดย TiO₂ สามารถประยุกต์ใช้ในหลายกระบวนการ เช่น การบำบัดน้ำเสีย การฟอกอากาศ การขจัดสิ่งปนเปื้อนต้านแบคทีเรีย การป้องกันรังสียูวี และใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะลิติก เป็นต้น ทั้งนี้โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ สามารถแบ่งโครงสร้างได้ 3 ประเภท โดยแต่ละประเภทมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.6



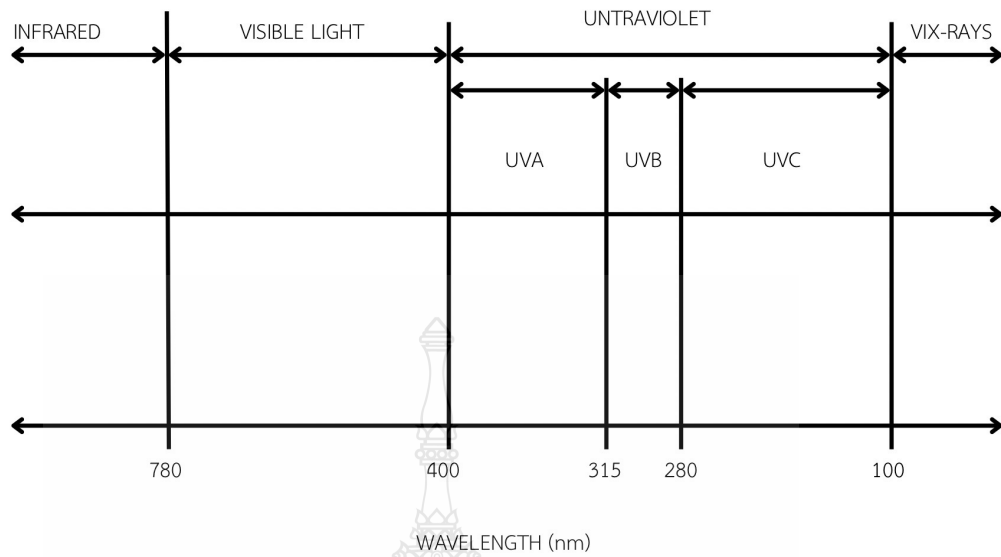
ตารางที่ 2.6 โครงสร้างโมเลกุลของ TiO_2

ประเภท	คุณสมบัติ	โครงสร้าง
1. แอนาเทส (Anatase)	- เป็นรูปแบบที่เสถียรที่สุดและมีมากที่สุด - ไม่มีจุดหลอมเหลวจำเพาะ - โครงสร้างผลึกแบบ Tetragonal	
2. รูไทล์ (Rutile)	- มีการหักเหของแสงสูง - มีความถ่วงจำเพาะสูง - มีโครงสร้างผลึกแบบ Tetragonal	
3. บรูคไคต์ (Brookite)	- มีโครงสร้างผลึกแบบ Orthorhombic - บรูคไคต์มีการตอบสนองโฟโตคะตะลิสติกที่สูงกว่าแอนาเทสและรูไทล์ แต่ไม่นิยมใช้เนื่องจากมีขั้นตอนซับซ้อนในการเตรียม	

2.3.2 แหล่งกำเนิดแสง

การฉายแสงในกระบวนการโฟโตคะตะลิสติกจะช่วยย่อยสลายสารปนเปื้อนซึ่งพลังงานแสงได้จากรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet Radiation) เป็นรังสีที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่ามีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 100-400 nm ความยาวคลื่นทั้งหมด 3 ช่วง [50], [51] สำหรับความยาวคลื่นของรังสีอัลตราไวโอเล็ต ดังแสดงในรูปที่ 2.2

- รังสีอัลตราไวโอเล็ตชนิดเอ (Ultraviolet A, UVA) มีความยาวคลื่น 315-400 nm
- รังสีอัลตราไวโอเล็ตชนิดบี (Ultraviolet B, UVB) มีความยาวคลื่น 280-315 nm
- รังสีอัลตราไวโอเล็ตชนิดซี (Ultraviolet C, UVC) มีความยาวคลื่น 100-280 nm



รูปที่ 2.2 ความยาวคลื่นรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มนุษย์สามารถมองเห็น

2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการสลายตัวของกระบวนการโฟโตคะตะลิติก

1) ความเข้มของสี

ความเข้มข้นของสีย้อมมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก เมื่อสีย้อมมีความเข้มข้นสูง ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารปนเปื้อนจะลดลง เนื่องจากโมเลกุลของสีย้อมมีการถ่ายเทมวลสารไปยังตัวเร่งปฏิกิริยามากเกินไป ส่งผลให้พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการอิมมัว และบดบังแสงแดดที่จะเข้ามาทำปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกส่งผลให้การสร้างสารออกซิแดนซ์เกิดได้ไม่ดี [52], [41]

2) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นส่วนช่วยในการย่อยสลายสารปนเปื้อนในกระบวนการโฟโตคะตะลิติก โดยอัตราการย่อยสลายสารปนเปื้อนเพิ่มขึ้นตามปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากปริมาณ $\bullet\text{OH}$ ที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกมีเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีประสิทธิภาพการย่อยสลายสารปนเปื้อนเพิ่มขึ้น ซึ่ง $\bullet\text{OH}$ มีความสามารถในการย่อยสลายสารปนเปื้อน [53]

3) ผลของ pH

ประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกขึ้นอยู่กับค่า pH ของสารละลาย เนื่องจาก pH ของสารละลายจะเปลี่ยนประจุที่พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้การเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงภายใต้สภาวะกรด-ด่าง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารปนเปื้อนแปรผันตามค่าของ pH ดังนั้นเมื่อ pH ต่ำส่งผลให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารปนเปื้อนที่เป็นประจุบวกจะลดลง ส่วนสารปนเปื้อนที่เป็นประจุลบจะมีประสิทธิภาพการย่อยสลายสารปนเปื้อนเพิ่มขึ้น อีกนัยหนึ่งเมื่อ pH สูงส่งผลให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารปนเปื้อนประจุลบจะลดลงและประสิทธิภาพการย่อยสลายสารปนเปื้อนประจุบวกจะเพิ่มขึ้น [54], [55]

4) อุณหภูมิ

อุณหภูมิของปฏิกิริยาต่ำกว่าจะช่วยให้เกิดการดูดติดผิวและช่วยย่อยสลายสารปนเปื้อนที่ยึดในน้ำเสีย ส่วนอุณหภูมิของปฏิกิริยาที่สูงส่งผลให้เกิดการรวมตัวของ e^- และ h^+ ส่งผลให้การดูดติดผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและการย่อยสลายสารปนเปื้อนลดลง กรณีที่อุณหภูมิสูงมากจนเกินไปส่งผลให้ขัดขวางการดูดซับ-คายการดูดซับ [41], [56]

5) ความเข้มข้นสารปนเปื้อน

ปริมาณความเข้มข้นของสารปนเปื้อนมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก เนื่องจาก ความเข้มข้นสูงของสารปนเปื้อนทำให้พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาอิ่มตัว และลดประสิทธิภาพของการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก [57]

2.3.4 การประยุกต์ใช้กระบวนการโฟโตคะตะลิติก

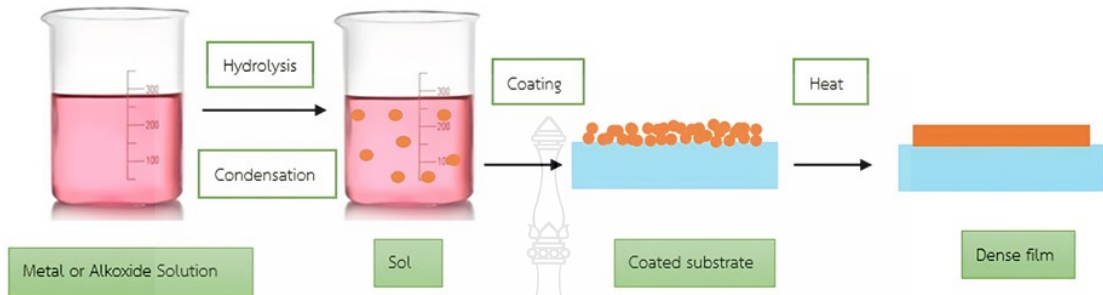
กระบวนการโฟโตคะตะลิติกนอกจากจะมีประสิทธิภาพในบำบัดสีย้อมในน้ำเสียยังสามารถประยุกต์ใช้กับการบำบัดสารปนเปื้อนได้ประเภทต่างๆ ได้ เช่น ยา ยาฆ่าแมลง และโลหะหนัก เป็นต้น ข้อมูลในการบำบัดสารปนเปื้อนประเภทต่างๆ โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยสังเขป แสดงดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 การบำบัดสารปนเปื้อนประเภทต่างๆ โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิสติก

ประเภท	มลพิษ	ตัวเร่งปฏิกิริยา	อ้างอิง
สีย้อม	Methyl orange	Tungsten doped Al ₂ O ₃ /ZnO coating Al	[58], [59]
	Rhodamine 6G	TiO ₂	[60], [61]
	Methylene blue	Ag@AgCl@MIL- 100(Fe)/CCF	[62], [63]
โลหะหนัก	Hg(II)	TiO ₂	[61], [64]
	Cr(VI)	ZrO ₂	[61], [65]
	Pb(II)	TiO ₂ /Alg/FeNPs	[58], [66]
ยา	Norfloxacin	Ag ₃ PO ₄ /GO film	[58], [67]
	Tetracycline hydrochlorid	ZnFe ₂ O ₄ porous hollow cube	[58], [68]
	Acetaminophen	CdS sub- microspheres	[58], [69]
ยาฆ่าแมลง	Kappa furan pesticides	TiO ₂	[61], [70]
	Phenoxyacetic acid	Au/TiO ₂	[58], [71]

2.4 กระบวนการโซล-เจล

โซล-เจล (Sol-gel) เป็นกระบวนการเกิดปฏิกิริยาเคลือบผิว โดยสารตั้งต้นซึ่งเป็นสารละลายคอลลอยด์ในรูปโซลถูกสลายพันธะทำให้แตกตัวเป็นโมเลกุลเล็กลงด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ดังสมการที่ 2.11 หลังจากนั้นจะเปลี่ยนรูปเป็นเจลที่มีความหนืดสูงขึ้นจากการควบแน่นระหว่างสารแขวนลอยกับสารละลาย โดยโมเลกุลจะเรียงตัวกันเกิดเป็นโครงสร้างแบบ 3 มิติ โดยสมการในการเปลี่ยนรูปจากสารละลายกลายเป็นเจลแสดงดังสมการที่ 2.12 [72], [73] และรูปที่ 2.2 ทั้งนี้กระบวนการโซล-เจลเป็นวิธีที่ประหยัดพลังงาน มีความบริสุทธิ์สูง มีความเป็นเนื้อเดียวกับวัสดุที่นำมาเคลือบผิว สามารถควบคุมขนาด พื้นผิวของวัสดุได้ ใช้งานง่าย ต้นทุนต่ำ และสามารถประยุกต์ใช้กับวิธีการเคลือบได้อย่างหลากหลาย [74], [75] สำหรับขั้นตอนการเคลือบผิวด้วยกระบวนการโซลเจลแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการเคลือบผิวด้วยกระบวนการโซลเจล

สำหรับเทคนิคการเคลือบฟิล์มแบบต่างๆ ในส่วนของรายละเอียดของวิธีการเคลือบผิว ข้อดี และข้อเสียต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.8 เทคนิคการเคลือบฟิล์มแบบต่างๆ

วิธีการ	ข้อดี	ข้อเสีย	อ้างอิง
Electrospray Deposition	- ไม่ทำลายโมเลกุลของสารละลาย - ไม่เกาะตัวกันเป็นก้อน - ทำได้ที่อุณหภูมิห้อง	- ระยะพ่นเคลือบผิวมีระยะห่างไม่มากเกินไป โดยมีระยะห่างอยู่ระหว่าง 0-40 mm	[76], [77], [78]
Chemical Bath Deposition	- ใช้งานง่าย - สามารถกำหนดความหนา และจำนวนครั้งที่เคลือบผิว	- เกิดของเสียที่เป็นสารเคมี - ส่งผลเสียต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม	[79], [80]

ตารางที่ 2.8 เทคนิคการเคลือบฟิล์มแบบต่างๆ (ต่อ)

Spin Coating	- ติดตั้งง่าย ต้นทุนต่ำ และเคลือบผิวได้รวดเร็ว - สามารถเคลือบเมมเบรนที่มีความหนาในช่วง 70-500 nm	- ความเร็วรอบมีผลต่อความหนาของการเคลือบ ถ้าใช้ความเร็วรอบต่ำ ฟิล์มที่เคลือบจะไม่สม่ำเสมอ	[81], [82]
Dip Coating	- พื้นผิวที่เคลือบมีความยืดหยุ่น ไม่เกิดของเสีย - ใช้งานง่ายและประหยัดต้นทุน	- ไวต่อสารปนเปื้อน และพื้นผิวที่รองรับ	[83], [82]
Spray Coating	- ค่าบำรุงรักษาต่ำและใช้พลังงานต่ำ - สามารถควบคุมความหนาของฟิล์มได้ - ใช้สารเคมีน้อย	- ต้องกำหนดอุณหภูมิในการเคลือบผิว - เกิดซัลไฟด์ ภายใต้สภาวะบรรยากาศ	[84], [85]

2.5 ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon, AC) เป็นวัสดุคาร์บอนที่ผลิตด้วยวิธีไพโรไลซิสภายใต้สภาวะต่างๆ และใช้วัตถุดิบจากธรรมชาติในการผลิต เช่น กะลามะพร้าว ไม้ ถ่านหิน พีช และอื่นๆ เป็นต้น [86], [87] สำหรับ AC โดยทั่วไปมีลักษณะเป็นรูพรุนทั่วพื้นผิวซึ่งรูพรุนของ AC เกิดจากการเรียงตัวของคาร์บอนทำให้มีโครงสร้างที่ซับซ้อน และมีพื้นที่ผิวเฉพาะประมาณ $3,000 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ [74], [75] อีกทั้งยังมีปริมาตรรูพรุน และพื้นที่ผิวเฉพาะสูงทำให้มีคุณสมบัติในการดูดซับสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ได้ดี [88], [89], [90] โดยสามารถแบ่งชนิดของ AC ออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ แบบผง และแบบเกล็ด นอกจากนี้โครงสร้างของ AC ยังมีกลุ่มคาร์บอกซิล คาร์บอนิล ฟีนอล แลคโตน และควิโนน ซึ่งมีหน้าที่ในการดูดซับสารปนเปื้อน เนื่องจากมีพื้นที่ผิวที่สูงขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น อีกทั้ง AC ยังมีข้อดีในการบำบัดน้ำเสียคือ มีต้นทุนต่ำ ใช้งานง่าย มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูง การกำจัดสารเคมีปนเปื้อนในวงกว้าง มีความยืดหยุ่นสูง ไวต่อสารพิษและปลอดภัยต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม [91] ซึ่งในปัจจุบันมีการใช้งาน AC ในหลากหลายด้านที่แตกต่างกัน เช่น การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม การผลิตอาหาร ยารักษาโรค และเกษตรกรรม เป็นต้น [92], [93]

2.5.1 ประเภทของถ่านกัมมันต์

1) ถ่านกัมมันต์แบบผง (Power Activated Carbons, PAC) แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ กัมมันต์ผงชนิดหยาบและชนิดละเอียด โดยปกติจะใช้งานกับของเหลว ข้อดีคือ มีราคาที่ถูกกว่าแบบเกล็ด และมีพื้นที่ผิวเฉพาะสูงทำให้สามารถดูดซับได้ดีและดูดซับได้เร็วเนื่องจากพื้นผิวสามารถเข้าถึงได้ง่าย ข้อเสียคือ ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ สำหรับลักษณะทางกายภาพของ PAC แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.4 PAC

2) ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (Granular Activated Carbons, GAC) มีลักษณะเป็นเกล็ดที่ได้จากการย่อยขนาดใหญ่ หรืออาจทำเป็นเม็ดโดยอัดเป็นเส้นกลมๆ แล้วตัดออกเป็นท่อนเท่ากัน โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ GAC ที่ไม่มีรูปร่างหรือหักได้มาจากอนุภาคที่มีรูปร่างผิดปกติที่เพิ่งถูกบด และ GAC รูปแบบเฉพาะได้มาจากการทำให้เป็นเม็ดหรือการอัดขึ้นรูปของผงคาร์บอน ข้อดีของ GAC คือมีความสกปรกน้อยกว่า นำไปใช้งานได้สะดวก และมีความหลากหลายในการใช้งานมากกว่า PAC เนื่องจากสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ส่วนใหญ่ใช้ในการบำบัดของเหลวหรือแก๊ส [91] สำหรับลักษณะทางกายภาพของ GAC แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.5 GAC

2.5.2 โครงสร้างรูพรุน [91]

1) Micropores

มีปริมาตรของรูพรุนประมาณ $0.2-0.6 \text{ g.cm}^{-3}$ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 2 nm ไมโครพอร์มีความสำคัญที่สุดในเรื่องของการดูดซับ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสูงจึงมีความสามารถในการดูดซับสูง ซึ่งมีขนาดที่เหมาะสมในการกักเก็บโมเลกุลของสารละลาย และการดูดซับแก๊ส เช่น สารประกอบที่มักก่อให้เกิดกลิ่น, รส, ตัวทำละลาย และสารระเหย เป็นต้น

2) Mesopores

มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง $2-50 \text{ nm}$ และมีพื้นที่ผิวของรูพรุนอยู่ในช่วง $20-200 \text{ g.m}^{-2}$ ปริมาตรของรูพรุนอยู่ในช่วง $0.1-0.5 \text{ g.cm}^{-3}$ เมโซพอร์มีความสำคัญในการกักเก็บของเหลว และยังมีหน้าที่เป็นตัวนำในการดูดซับของ AC ก่อนที่จะของเหลวดังกล่าวผ่านไปยังไมโครพอร์

3) Macropores

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 50 nm เป็นรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ มีหน้าที่เป็นทางผ่านไปยังเมโซพอร์ จึงไม่ค่อยมีความสำคัญในเรื่องการดูดซับ แต่ทำให้ทราบว่าเกิดกระบวนการดูดซับของ AC และสามารถกักเก็บโมเลกุลขนาดใหญ่

2.5.3 วิธีกระตุ้นถ่านกัมมันต์

1) การกระตุ้นทางกายภาพ

วัตถุประสงค์ของการกระตุ้นทางกายภาพ คือการปรับปรุงโครงสร้างรูพรุนโดยการนำ AC ที่ผ่านการคาร์บอนีซึ่มมากระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ไอน้ำ และไนโตรเจนที่

อุณหภูมิ 800–1,100 °C สำหรับ AC ที่ผ่านการกระตุ้นทางกายภาพมีพื้นที่ผิวน้อยกว่า 300 m².g⁻¹ และมีคุณภาพค่อนข้างต่ำกว่าการกระตุ้นทางเคมี เนื่องจากใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นที่สูง และใช้เวลาในการกระตุ้นที่เพิ่มขึ้นจากการกระตุ้นทางเคมี โดยการกระตุ้นทางกายภาพเป็นวิธีการกระตุ้นที่ราคาไม่แพง และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากใช้เฉพาะแก๊สหรือไอน้ำเท่านั้น [75], [94]

2) การกระตุ้นทางเคมี

สำหรับการเตรียม AC โดยการกระตุ้นทางเคมี สารตั้งต้นกับสารกระตุ้นจะทำหน้าที่ในการกำจัดน้ำและสารออกซิไดซ์ออกจาก AC จากนั้นกระตุ้นโดยใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 400 ถึง 900 °C และกำจัดสารกระตุ้นด้วยแก๊ส เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน หรืออาร์กอน เมื่อเทียบกับการกระตุ้นทางกายภาพ พบว่า การกระตุ้นทางเคมีจะมีปริมาณรูพรุนมากกว่าการกระตุ้นทางกายภาพ อีกทั้งยังใช้เวลาในการกระตุ้นต่ำกว่า ข้อเสียการกระตุ้นทางเคมี คือสารกระตุ้นมีราคาแพงและมีฤทธิ์ในการกัดกร่อน [88], [95], [96] สารเคมีนิยมใช้ในการกระตุ้นได้แก่ ต่าง (KOH, K₂CO₃, NaOH และ Na₂CO₃), เกลือของโลหะอัลคาไลเอิร์ธ (AlCl₃ และ ZnCl₂) และกรด (H₃PO₄, H₂SO₄) เป็นต้น

2.5.4 การดูดซับ

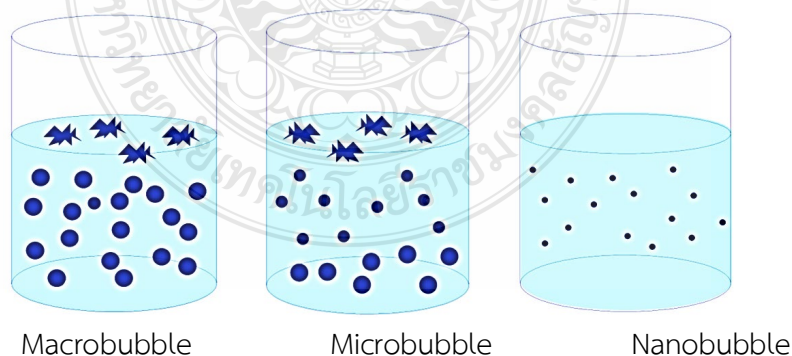
การดูดซับเป็นกระบวนการทางเคมีกายภาพที่มีความสามารถในการกำจัดมลพิษต่างๆ ออกจากน้ำเสีย ซึ่งมีต้นทุนต่ำ ใช้งานง่าย และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [97] ซึ่งการดูดซับเกิดบนพื้นผิวระหว่างของเหลวหรือแก๊สกับของแข็ง โดยการถ่ายโอนมวลสารของเหลวหรือแก๊สไปสะสมที่พื้นผิวของของแข็งที่มีปริมาตรรูพรุนสูงเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของการดูดซับ ดังนั้นพื้นผิวที่มีปริมาตรรูพรุนสูงจะสามารถดูดซับสารปนเปื้อนได้มากขึ้น [98], [99] การดูดซับขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ความเข้มข้นหรือความดันของตัวดูดซับ อุณหภูมิ พื้นผิวสัมผัส ค่า pH ของสารละลาย และชนิดของตัวดูดซับ [97] โดยสามารถแบ่งประเภทของการดูดซับได้ 2 แบบ คือ

1) การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) เป็นการดูดซับที่ไม่มีการสร้างพันธะหรือมีการสร้างพันธะที่ต่ำมากระหว่างสารตั้งต้นกับพื้นผิวของตัวดูดซับ แต่จะเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล (van de Waals) ซึ่งข้อดีของการดูดซับทางกายภาพ ได้แก่ สามารถเกิดย้อนกลับได้ การดูดซับเกิดขึ้นได้ง่าย ใช้พลังงานในการดูดซับต่ำ โมเลกุลไม่ถูกทำลาย และการดูดซับเกิดในอุณหภูมิต่ำ [100], [101]

2) การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) เป็นการดูดซับที่เกิดพันธะเคมีระหว่างสารตั้งต้นและตัวดูดซับ โดยเกิดการจัดเรียงความหนาแน่นของอิเล็กตรอนใหม่ระหว่างตัวดูดซับและสารตั้งต้น ซึ่งพันธะดังกล่าวคือ พันธะไอออนิกหรือพันธะโควาเลนต์ ซึ่งการดูดซับทางเคมี มีลักษณะการก่อตัวแบบชั้นเดียว ใช้พลังงานในการดูดซับสูง โมเลกุลถูกทำลาย การดูดซับเกิดในอุณหภูมิสูง [100], [101]

2.6 ไมโคร/นาโนบับเบิล (Micro/Nanobubble, MNBs)

เป็นเทคโนโลยีฟองอากาศที่มีอนุภาคขนาดเล็กระดับไมโครเมตรหรือนาโนเมตร เนื่องจากฟองอากาศมีขนาดเล็กมาก จึงมีพื้นที่ผิวของอากาศจำนวนมาก ทำให้สามารถละลายแทรกตัวในตัวกลางที่เป็นของเหลว เช่น น้ำ ได้มากกว่าสภาวะปกติหลายเท่าตัวและทำให้มีแรงลอยตัวต่ำทำให้การลอยขึ้นสู่ผิวน้ำช้ากว่าฟองอากาศทั่วไป นอกจากนี้ที่ผิวของฟองอากาศขนาด MNBs ยังมีประจุลบอ่อนๆ ล้อมรอบทำให้ฟองอากาศขนาด MNBs ไม่รวมตัวกันเป็นฟองอากาศขนาดใหญ่ และทำให้ฟองอากาศขนาด MNBs คงตัวอยู่ในน้ำได้นานและทำให้ฟองอากาศมีคุณสมบัติพิเศษต่างจากฟองอากาศทั่วไป โดยฟองอากาศขนาด MNBs สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ Macrobubbles มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเท่ากับ 100 μm -2 mm, Microbubbles มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเท่ากับ 1-100 μm และ Nanobubbles มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคมากกว่า 1 μm ตามลำดับปัจจุบันมีการนำ MNBs มาใช้กับออกซิเจน โอโซนและคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งทำให้ออกซิเจน โอโซนและคาร์บอนไดออกไซด์ สามารถละลายในน้ำได้มากกว่าค่าอิ่มตัวปกติหลายเท่าและสามารถคงอยู่ได้นาน ดังแสดงในรูปที่ 2.5 [102], [103], [104] สำหรับขนาดของฟองอากาศ แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.6 ฟองอากาศขนาดต่างๆ

2.6.1 คุณสมบัติในการบำบัดน้ำของ MNBs

การบำบัดน้ำเสียด้วยการเติมอากาศขนาด MNBs สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียได้ดี เนื่องจาก MNBs สามารถเพิ่มปริมาณออกซิเจนที่มีขนาดเล็กในน้ำได้ปริมาณมาก เมื่อมีออกซิเจนมากปริมาณพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น มีความดันของก๊าซสูง และสามารถคงอยู่ในน้ำได้นาน ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์และอนินทรีย์ที่ปนเปื้อนได้ดีกว่าการเติมอากาศแบบทั่วไป อีกทั้งยังสามารถสร้างอนุภาคลิโธสที่มีปฏิกิริยาสูงคือ ไฮดรอกซิลเรดิคัลซึ่งจัดเป็นสารอนุมูลอิสระที่มีคุณสมบัติเป็นสารออกซิไดส์ที่มีความรุนแรงในการย่อยสลายสารปนเปื้อนและสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับสารต่าง ๆ ที่อยู่รอบข้างในทันทีที่มีการเติมอากาศขนาด MNBs เข้าไปในระบบทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้อย่างรวดเร็ว

การย่อยสลายจุลินทรีย์และไนโตรเจนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของจุลินทรีย์แบบใช้อากาศและแบบไม่ใช้ออกซิเจนในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบเมมเบรนที่จมอยู่ในน้ำ MNBs พบว่า น้ำที่มีการเติมอากาศขนาด MNBs มีความสามารถเร่งปฏิกิริยาทางเคมี และส่งเสริมประสิทธิภาพในการกำจัดสารปนเปื้อนในกระบวนการบำบัดน้ำทางเคมีได้ [105]

2.7 สารก่อมลพิษขนาดเล็ก (Micropollutants, MPs)

เป็นสารที่มีความเข้มข้นระหว่างนาโนกรัมต่อลิตรและไมโครกรัมต่อลิตรซึ่งประกอบไปด้วยสารประกอบอินทรีย์ธรรมชาติ เช่น ยาปฏิชีวนะ (เพนิซิลลิน) หรือเอสโตรเจน และสารประกอบที่สังเคราะห์ขึ้น เช่น โมเลกุลที่มีฮาโลเจนอย่างเข้มข้น โดย MPs ที่มีอยู่ในแหล่งน้ำมีแหล่งกำเนิดที่หลากหลายได้แก่ น้ำเสียในครัวเรือนที่ปนเปื้อนด้วยสารซักฟอก ผลิตภัณฑ์ดูแลร่างกาย เครื่องสำอาง ยา รักษาโรค [106], [107] MPs ที่มาจากผลิตภัณฑ์เหล่านี้จะเข้าสู่แหล่งน้ำเสียโดยการขับปัสสาวะและอุจจาระของมนุษย์ หรือน้ำจากเกษตรกรรมส่วนใหญ่ที่ปนเปื้อนด้วยยาฆ่าแมลงที่ใช้เป็นสารป้องกันผักและผลไม้จากแมลงเพื่อให้ได้ผลผลิตเป็นที่ต้องการ หรือแม้แต่ น้ำที่ไหลผ่านวัสดุก่อสร้างตามบ้านเรือนก็มี MPs ที่อยู่ในสารกันซึม พลาสติก-ไซเซอร์ และโฟม ซึ่ง MPs ที่มีแหล่งกำเนิดที่แตกต่างกันที่ไม่ผ่านการบำบัดจะไหลลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติส่งผลให้ MPs ที่ไหลลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติเข้าไปสะสมอยู่ในสิ่งมีชีวิตในน้ำ และสารก่อมลพิษที่สะสมที่ผิวน้ำดินเข้าไปสะสมอยู่ในสิ่งมีชีวิตได้โดยสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในดินกินตะกอนที่ปนเปื้อน MPs เข้าไปซึ่งอาจมีผลกระทบต่อสัตว์น้ำเนื่องจากสิ่งมีชีวิตบนดินอาจนำไปเป็นอาหารให้สิ่งมีชีวิตในน้ำทำให้ MPs สะสมในร่างกายของสิ่งมีชีวิตในน้ำรวมทั้งก่อให้เกิดผลเสียต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งแวดล้อมทางน้ำทั้งความเป็นพิษในระยะสั้นและระยะยาว [108], [109]

ตารางที่ 2.9 กระบวนการบำบัด MPs ในน้ำเสีย [110], [111]

กระบวนการบำบัด MPs ในน้ำเสีย	คุณสมบัติ
Coagulation–Flocculation	<ul style="list-style-type: none"> - การกำจัด MPs ของกระบวนการบำบัดน้ำดื่มมีประสิทธิภาพตั้งแต่ 15 ถึง 75% - สารอินทรีย์ที่ละลายน้ำที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดยาที่แตกตัวเป็นไอออน - สารประกอบอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำอาจจะส่งผลต่อการยับยั้งการกำจัด MPs ซึ่งขึ้นอยู่กับสารก่อตะกอนแต่ละชนิด
Activated Carbon Adsorption	<ul style="list-style-type: none"> - การเพิ่มปริมาณ AC สามารถบำบัดสารก่อมลพิษขนาดเล็กได้มากกว่า 80% - การบำบัดขึ้นอยู่กับปริมาณของ AC เวลาในการบำบัด และองค์ประกอบน้ำเสีย - ปริมาณรูพรุนมีความสำคัญต่อความสามารถในการดูดซับ - สารก่อมลพิษขนาดเล็กที่มีประจุลบจะถูกดูดซับได้ไม่ดี โดยคาร์บอนที่มีประจุลบและถูกดูดซับได้ดีโดยคาร์บอนที่มีประจุบวก
Ozonation and Advanced Oxidation Processes (AOPs)	<ul style="list-style-type: none"> - O_3/H_2O_2 มีประสิทธิภาพในการบำบัด 90% - มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารประกอบที่บำบัดได้ยาก - ใช้เวลาในการบำบัดน้อย

ตารางที่ 2.9 กระบวนการบำบัด MPs ในน้ำเสีย [110], [111]

Membrane Processes	<ul style="list-style-type: none"> - การบำบัดขึ้นอยู่กับ ชนิดของกระบวนการเมมเบรน ลักษณะของเมมเบรน สภาพการทำงาน ลักษณะเฉพาะของสารก่อมลพิษขนาดเล็ก - สารก่อมลพิษขนาดเล็กจะไม่ถูกกำจัดโดย UF และ MF เพียงอย่างเดียว เนื่องจากขนาดรูพรุนของเมมเบรนจะใหญ่กว่าขนาดโมเลกุลของ สารมลพิษขนาดเล็ก จึงต้องมีการบำบัดรวมกันกับ NF หรือ RO - MF เพียงอย่างเดียวสามารถบำบัดสารประกอบบางชนิดได้มากกว่า 50% เมื่อนำ MF กับ RO มาบำบัดด้วยกัน ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดได้ดีขึ้นตั้งแต่ 65% ถึง 90%
--------------------	--

2.8 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก

จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก สามารถอธิบายอัตราการดูดซับโมเลกุลของสารอินทรีย์บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้สมการจลนพลศาสตร์ของ Langmuir–Hinshelwood (L-H) model [112] ดังสมการที่ 2.13

$$r = -\frac{dC}{dt} = \frac{kKC}{(1+KC)} \tag{2.13}$$

โดยที่ r = อัตราการย่อยสลายสารปนเปื้อน ($\mu\text{M}\cdot\text{min}^{-1}$)

C = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อน (μM)

C_0 = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารปนเปื้อนที่จุดสมดุลการดูดติดบนสารกึ่งตัวนำ (μM)

k = ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา ($\mu\text{M}\cdot\text{min}^{-1}$)

K = ค่าคงที่สมดุลการดูดติดผิวของสารปนเปื้อนบนตัวเร่งปฏิกิริยา (μM^{-1})

จากสมการ 2.13 สามารถจัดรูปให้เป็นสมการเชิงเส้นได้ดังสมการที่ 2.14

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{kKC} + \frac{1}{k} \tag{2.14}$$

สำหรับสมการที่ 2.13 สามารถอินทิเกรตสมการดังกล่าวแบบจำกัดขอบเขต $C = C_0$ ที่เวลาเริ่มต้นเท่ากับ t_0 และ $C = C$ ที่เวลาใดๆเท่ากับ t

$$\ln \frac{C_0}{C} + k(C_0 - C) = kKt \quad (2.15)$$

สำหรับสมการที่ 2.15 ในกรณีที่ $KC \ll 1$ สมการจลนพลศาสตร์ของ L-H สามารถลดรูปซึ่งเป็นไปตามสมการจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ดังแสดงในสมการที่ 2.16 ทั้งนี้ในกรณีดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าค่า k และ K ซึ่งเป็นค่าคงที่ปฏิกิริยาตามสมการจลนพลศาสตร์ของ L-H ในกรณีดังกล่าวสามารถนำมาใช้คำนวณเพื่อเปรียบเทียบกับค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ได้ โดยที่ $kK = k_1$

$$-\ln \frac{C_0}{C} = k_1 t \quad (2.16)$$



บทที่ 3

ขั้นตอนการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการหาประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ 3 ชนิด ได้แก่ IC, MB และ RB5 ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂ ร่วมกับการเติมอากาศขนาด MNBs

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

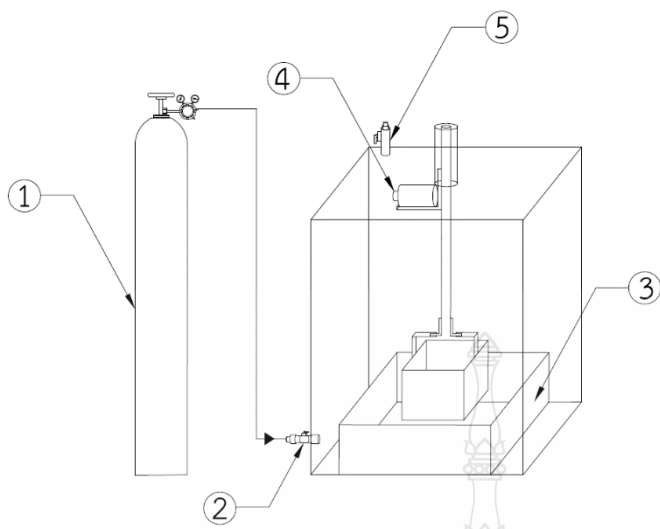
3.2.1 สารเคมี

- 1) ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon, AC)
- 2) กรดซัลฟูริก (Sulfuric Acid, H₂SO₄)
- 3) ไทเทเนียมไอโซโพรพอกไซด์ (Titanium Isopropoxide, TTIP)
- 4) ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isopropyl Alcohol, IPA)
- 5) กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid, HCl)
- 6) แก๊สไนโตรเจน 99.99% (Nitrogen, N₂)
- 7) สีอินดิโก คาร์มิน (Indigo Carmine, IC)
- 8) สีรีแอกทีฟแบล็ก 5 (Reactive Black 5, RB5)
- 9) สีเมทิลีนบลู (Methylene Blue, MB)

3.2.2 อุปกรณ์

- 1) ตะแกรงเบอร์ 10 และเบอร์ 8
- 2) บีกเกอร์ 1,000 mL
- 3) อุปกรณ์เติมอากาศขนาด MNBs RMUTT-MNB Model MCH-505S
- 4) อุปกรณ์ pH Meter Model Starter 300
- 5) ปิเปตขนาด 10 mL
- 6) แท่งแก้วคนสาร
- 7) ซ้อนตักสาร
- 8) อุปกรณ์ Dip Coating

- 9) เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- 10) เตาอบ Model OV-9123A
- 11) ตู้ดูดความชื้น
- 12) อุปกรณ์ Scanning Electron Microscope (SEM) Model JSM-5410LV
- 13) อุปกรณ์ Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) Model INCA-350
- 14) อุปกรณ์ Brunauer-Emmett-Teller Method (BET Surface) Model Autosorb-1
- 15) อุปกรณ์ Nanobubbles Testing Model Nanosight NS300
- 16) อุปกรณ์ Oxidation Reduction Potential Electrode (ORP) Model ORP-15
- 17) ถังปฏิกรณ์แบบแบทช์สำหรับการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก
- 18) อุปกรณ์ Spectrophotometer Model Single Monochrome Type U-3900
- 19) อุปกรณ์ Dissolved Oxygen DO Meter (DO) Model Cyber Scan DO 110
- 20) อุปกรณ์ Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES) Model 5900
- 21) อุปกรณ์ Gas Chromatography–Mass spectrometry (GC-MS) Model GC6890N-MS5973N

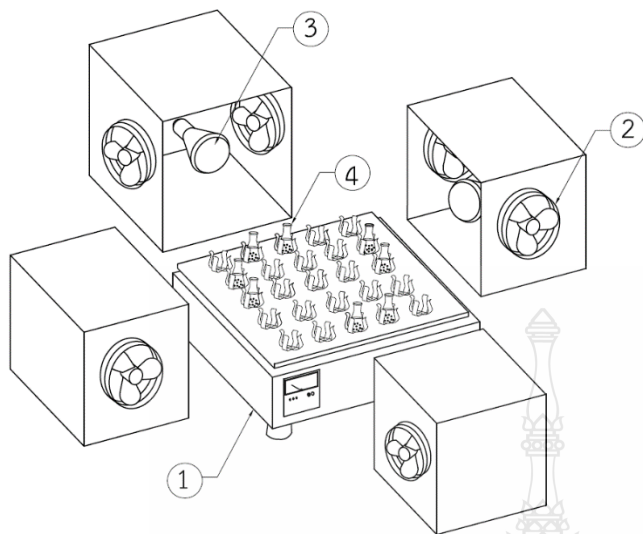


1. ถังแก๊สไนโตรเจน
2. วาล์วทางเข้าของแก๊ส N₂
3. สารละลายตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂
4. มอเตอร์ไฟฟ้าความเร็วรอบต่ำ
5. วาล์วระบายอากาศ

รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ Dip Coating



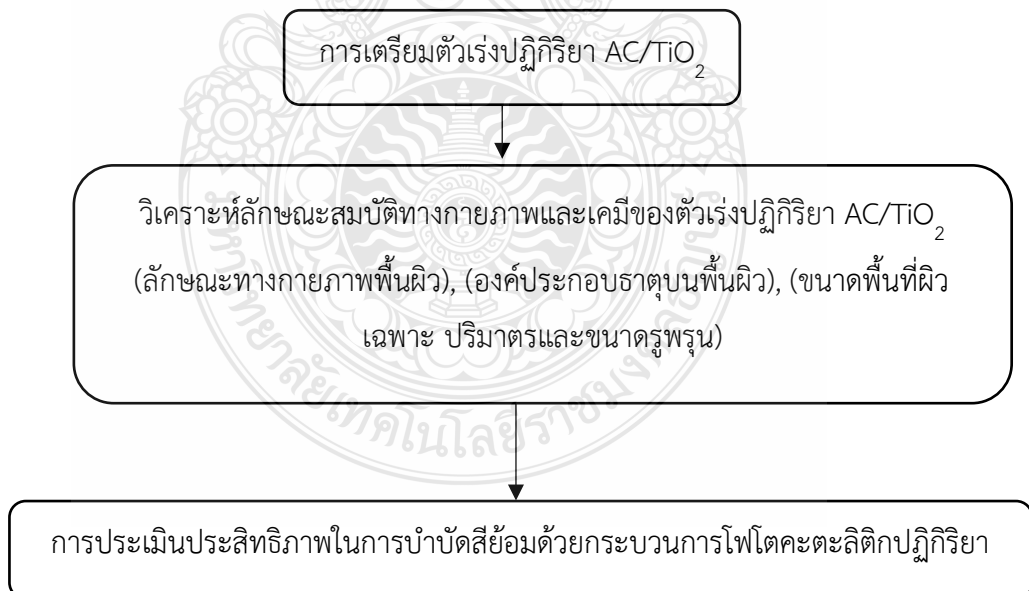
รูปที่ 3.2 อุปกรณ์เติมอากาศขนาด MNBs



1. เครื่องเขย่าสาร
2. พัดลมระบายอากาศ
3. แหล่งกำเนิดแสง
4. ขวดทดลองบรรจุสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์กับตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂

รูปที่ 3.3 ถังปฏิกรณ์แบบเบทซ์สำหรับการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก

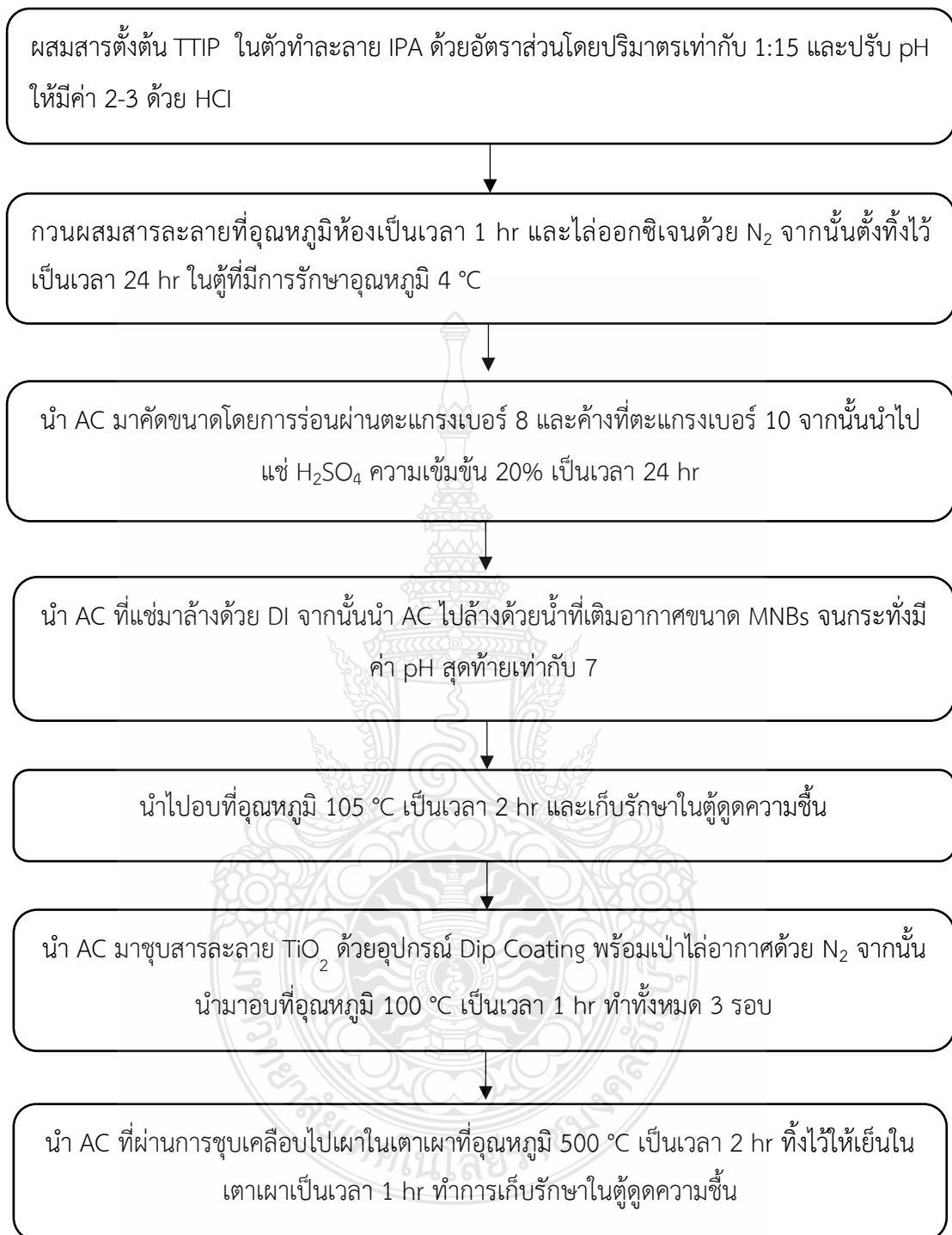
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.2.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂

- 1) ผสมสารตั้งต้น TTIP ต่อตัวทำละลาย IPA ด้วยอัตราส่วนโดยปริมาตรเท่ากับ 1:15
- 2) ปรับ pH ของสารละลายให้อยู่ในช่วง 2-3 ด้วยกรด HCl เข้มข้น
- 3) กวนผสมสารละลายที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 hr และไล่ออกซิเจนด้วย N₂ จากนั้นตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 24 hr ในตู้ที่มีการรักษาอุณหภูมิ 4 °C
- 4) หลังจากเตรียมสารละลาย TiO₂ ในข้อ 1-3 เสร็จ นำ AC มาร้อนด้วยตะแกรงเบอร์ 8 (2.36 mm.) โดยคัดขนาด AC ที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 8 และค้างอยู่ที่ตะแกรงเบอร์ 10 (2.00 mm.)
- 5) นำ AC ที่ผ่านการคัดขนาดจากข้อ 4 ไปแช่ H₂SO₄ ด้วยความเข้มข้น 20% เป็นเวลา 24 hr แล้วล้างด้วย Deionized water (DI) จนกระทั่งน้ำที่ล้างไม่มีสิ่งเจือปน จากนั้นนำ AC ไปล้างด้วยน้ำที่เติมอากาศขนาด MNBs จนกระทั่งน้ำล้างสุดท้ายมีค่า pH เท่ากับ 7
- 6) นำ AC ที่ล้างแล้วจากข้อ 5 ไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 2 hr และเก็บรักษาในตู้ดูดความชื้น
- 7) นำ AC จากข้อ 6 มาชุบเคลือบด้วยสารละลาย TiO₂ ที่เตรียมได้จากข้อ 1-3 ด้วยอุปกรณ์ Dip Coating (รูปที่ 3.1) ด้วยความเร็วในการชุบเคลือบ 5 mm.min⁻¹ ชุบเคลือบในสภาวะที่ไร้ออกซิเจนภายในอุปกรณ์ชุบเคลือบโดยไล่ออกซิเจนด้วยแก๊สไนโตรเจน
- 8) นำ AC ที่ผ่านการชุบเคลือบสารละลาย TiO₂ มาอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1 hr ทำการชุบเคลือบทั้งหมด 3 รอบ
- 9) นำ AC ที่ผ่านการชุบเคลือบในข้อ 8 ไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 2 hr และทิ้งให้เย็นในเตาเผาเป็นเวลา 1 hr จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂ ทำการเก็บรักษาในตู้ดูดความชื้นก่อนนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะลิสติก



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂

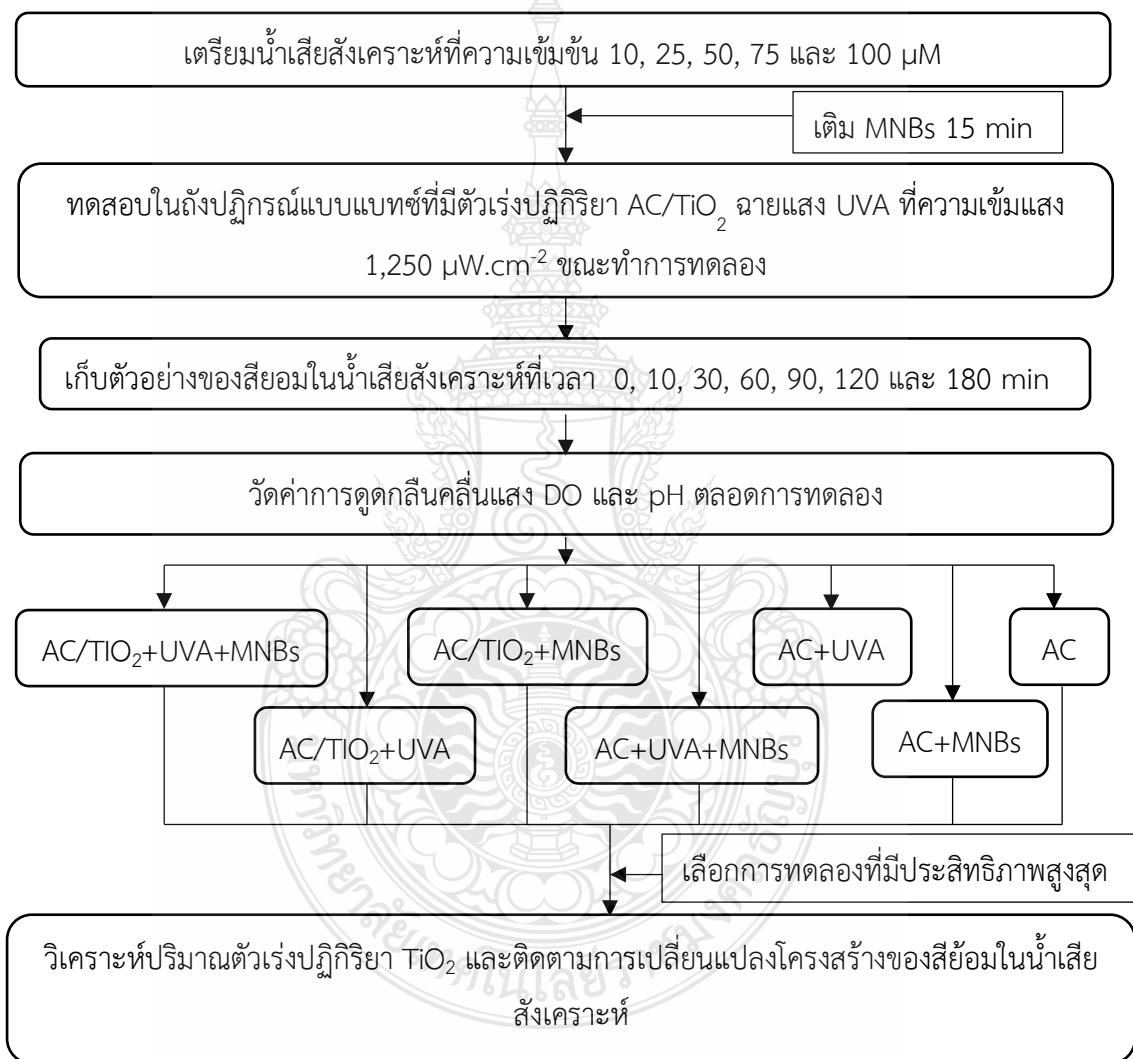
3.2.1 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂

- 1) วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของ AC และตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂ ด้วยอุปกรณ์ SEM
- 2) วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุบนพื้นผิวของ AC และตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂ ด้วยอุปกรณ์ EDS
- 3) วิเคราะห์ขนาดพื้นผิวเฉพาะ ปริมาตร และขนาดรูพรุนของ AC และตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂ ด้วยอุปกรณ์ BET Surface

3.2.2 การประเมินประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี IC, MB และ RB5 ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิสต์ร่วมกับ การเติมอากาศขนาด MNBs มีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

- 1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี IC ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 10 μM ด้วยน้ำ DI ที่มีการเติมอากาศขนาด MNBs ด้วยเครื่องอัดอากาศ RMUTT-MNBs เป็นเวลา 15 min
- 2) นำน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 250 mL ที่เตรียมได้จากข้อ 1 และตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂ จำนวน 2 g มาใส่ในขวดรูปชมพู่ ทำการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์พร้อมทั้งฉายแสง UVA ที่มีความเข้มแสง $1,250 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ ขณะทำการทดลอง
- 3) เก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิสต์ตลอดการทดลองที่เวลา 0, 10, 30, 60, 90, 120 และ 180 min
- 4) นำตัวอย่างที่เก็บได้จากข้อ 3 ไปวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงเพื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นของสีที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาโดยมีการติดตามค่า DO ตลอดการทดลอง
- 5) ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 1-4 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสีเป็น 25, 50, 75 และ 100 μM ตามลำดับ
- 6) ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 1-5 โดยเปลี่ยนชนิดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์เป็นสี MB และ RB5 ตามลำดับ
- 7) วัดค่าศักยภาพการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน รีดักชัน ด้วยอุปกรณ์ ORP ของการเติมอากาศขนาด MNBs และการเติมอากาศขนาด MNBs ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂ เพื่อวิเคราะห์ผลของการเติมอากาศขนาด MNBs กับตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลกระทบต่อ การเกิดปฏิกิริยา
- 8) ทำการทดลองในสภาวะควบคุมเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในสภาวะการทดลองต่างๆ โดยมีรายละเอียดการจำลองสภาวะการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3.1

9) เลือกการทดลองที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสี้อมในน้ำเสียสังเคราะห์สูงสุด ทำการวิเคราะห์ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ของสี้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เก็บตามเวลาดำวยอุปกรณ์ ICP-OES ซึ่งอาจเกิดการหลุดร่อนขณะเกิดปฏิกิริยาฯ และวิเคราะห์โครงสร้างของสี้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ เพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสี้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนเข้ากระบวนการโฟโตคะตะลิติก และหลังเข้ากระบวนการดังกล่าว ด้วยอุปกรณ์ GC-MS



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการประเมินประสิทธิภาพการบำบัดสี้อมในน้ำเสียสังเคราะห์

ตารางที่ 3.1 ชุดการทดลองและชุดควบคุม

การทดลอง	AC	AC/TiO ₂	UVA	MNBs
ชุดการทดลอง	✗	✓	✓	✓
ชุดควบคุม 1	✗	✓	✓	✗
ชุดควบคุม 2	✗	✓	✗	✓
ชุดควบคุม 3	✓	✗	✓	✓
ชุดควบคุม 4	✓	✗	✓	✗
ชุดควบคุม 5	✓	✗	✗	✓
ชุดควบคุม 6	✓	✗	✗	✗
ชุดควบคุม 7	✗	✗	✗	✓

3.4 การศึกษาจลนพลศาสตร์ (Kinetics) ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกของสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ทำการศึกษาโดยใช้สีย้อม 3 ชนิด ได้แก่ IC, MB และ RB5 ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่มี AC/TiO₂ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับการเติมอากาศขนาด MNBs เพื่อหาสมการจลนพลศาสตร์ที่เหมาะสมในการอธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก โดยเบื้องต้นจะพิจารณาสมการ Langmuir Hinshelwood (L-H) และสมการ First-order reaction ซึ่งเป็นจลนพลศาสตร์ที่ใช้อธิบายการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ในกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยเคลือบถ่านกัมมันต์ด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีโซลเจล โดยผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา และการประเมินประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ AC/TiO₂ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับการเติมอากาศขนาด MNBs ซึ่งทำการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์ที่ให้แสง UVA ตลอดเวลาทำการทดลองโดยควบคุมการทดลองในสภาวะที่แตกต่างกันทั้งหมด 8 สภาวะ (ตารางที่ 3.1) รวมทั้งศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก

4.1 ผลวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂

4.1.1 ผลวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂

ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวของ AC และตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂ ด้วยอุปกรณ์ SEM ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า เพื่อเปรียบเทียบระหว่างพื้นผิว AC และตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂ ดังแสดงในรูปที่ 4.1

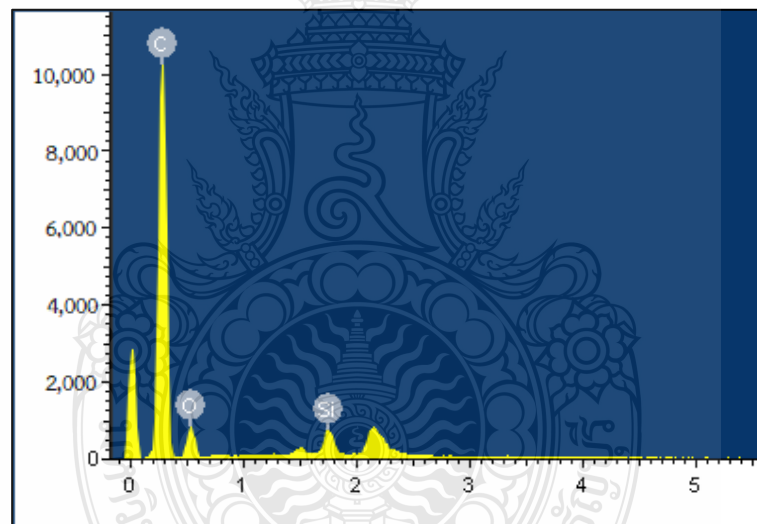


รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของพื้นผิว

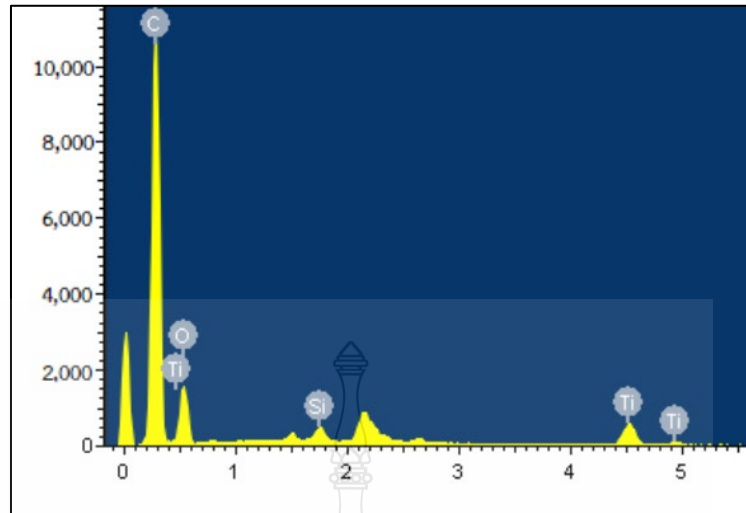
จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นถึงลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของ AC และตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂ มีลักษณะพื้นผิวที่คล้ายคลึงกัน ทำให้ไม่สามารถระบุได้แน่ชัดว่าบนพื้นผิวของ AC มีองค์ประกอบธาตุ TiO₂ และผลึกของสารละลาย TiO₂ เคลือบบนพื้นผิวของ AC ได้อย่างชัดเจน เนื่องจากข้อจำกัดของวิธีวิเคราะห์และอุปกรณ์ SEM ที่ใช้วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของ AC และตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂

4.1.2 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂

เนื่องจากผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂ ด้วยอุปกรณ์ SEM มีข้อจำกัดในการยืนยันว่าสามารถเคลือบ TiO₂ บนพื้นผิวของ AC จึงมีความจำเป็นที่จะต้องวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุนบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นโดยใช้อุปกรณ์ EDS ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของ AC และตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂ ดังแสดงในรูปที่ 4.2-4.3



รูปที่ 4.2 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุของ AC



รูปที่ 4.3 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂

ตารางที่ 4.1 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุของ AC และตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂

องค์ประกอบธาตุ	ตัวเร่งปฏิกิริยา	
	AC	AC/TiO ₂
C	27.26	26.83
Si	0.40	0.21
Ti	-	0.74
O	72.54	72.21

จากรูปที่ 4.2-4.3 แสดงให้เห็นถึงผลการเปรียบเทียบองค์ประกอบธาตุของพื้นผิว AC และตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂ และจากข้อมูลในตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าบนพื้นผิวของ AC มีองค์ประกอบธาตุพื้นฐาน ได้แก่ C, Si และ O ในส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂ มีองค์ประกอบธาตุพื้นฐานเหมือนกับ AC และยังพบ Ti ประมาณ 0.74% โดยน้ำหนัก ทำให้สามารถยืนยันได้ว่าการเคลือบสารละลาย TiO₂ บนพื้นผิวของ AC ได้จริง

4.1.3 ผลการวิเคราะห์ขนาดพื้นผิวเฉพาะ ปริมาตรและขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂

การวิเคราะห์ขนาดพื้นผิวเฉพาะ ปริมาตรและขนาดรูพรุนของพื้นผิว AC และตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂ ด้วยอุปกรณ์ BET เพื่อเปรียบเทียบขนาดพื้นผิวเฉพาะ ปริมาตรและขนาดรูพรุนของ AC

กับตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂ ผลวิเคราะห์ขนาดพื้นผิวเฉพาะ ปริมาตรและขนาดรูพรุนของ AC และตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

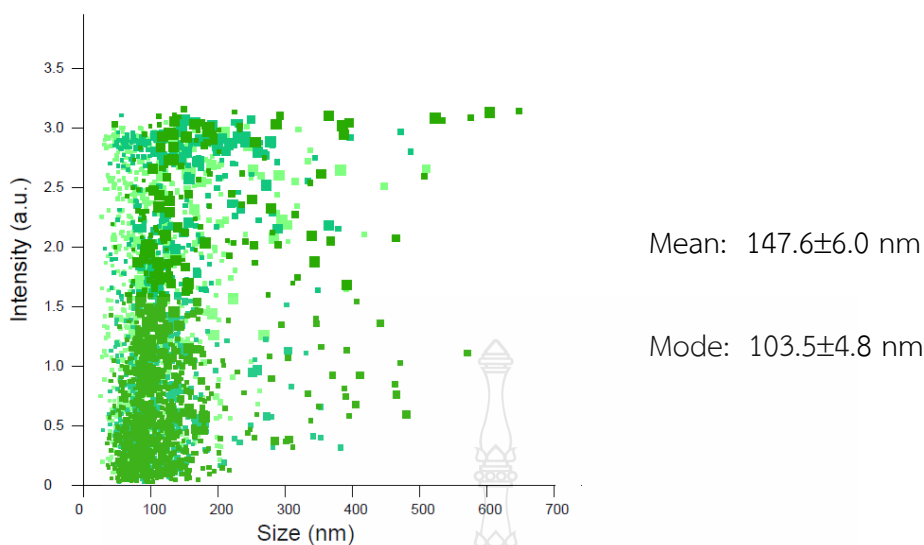
ตารางที่ 4.2 ผลวิเคราะห์ขนาดพื้นผิวเฉพาะ ปริมาตรและขนาดรูพรุนของ AC และตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ขนาดพื้นผิวเฉพาะ (m ² .g ⁻¹)	ปริมาตรรูพรุน (mL.g ⁻¹)	ขนาดรูพรุน (Å)
AC	1.981×10 ²	1.832×10 ⁻¹	6.235×10 ¹
AC/TiO ₂	1.603×10 ²	1.704×10 ⁻¹	4.253×10 ¹

จากตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นถึงผลการวิเคราะห์ขนาดพื้นผิวเฉพาะ ปริมาตรและขนาดรูพรุนของ AC และตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂ พบว่าขนาดพื้นผิวเฉพาะ ปริมาตรและขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂ มีแนวโน้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ AC เนื่องจากผลจากการหุบเคลือบ TiO₂ ก่อให้เกิดผลึกของ TiO₂ เกิดการซ้อนทับกันบนพื้นผิวและในช่องว่างรูพรุนของ AC แสดงให้เห็นว่าสารละลาย TiO₂ สามารถเคลือบบนพื้นผิวของ AC ได้

4.1.4 ผลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของฟองอากาศ MNBs

ผลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของฟองอากาศ MNBs โดยเติมอากาศเป็นเวลา 15 min ด้วยอุปกรณ์เติมอากาศ RMUTT-MNB ที่มีอัตราการไหลของน้ำสูงสุด 20-80 L.min⁻¹ และแรงดัน 220-230 kPa ทำการวัดค่า DO ก่อนเติมอากาศขนาด MNBs และหลังการเติมอากาศขนาด MNBs จากนั้นนำน้ำ DI ที่ผ่านการเติมอากาศขนาด MNBs มาทดสอบ Nanobubbles Testing เพื่อตรวจสอบขนาดและการกระจายตัวของฟองอากาศขนาด MNBs ที่ใช้ในการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.3

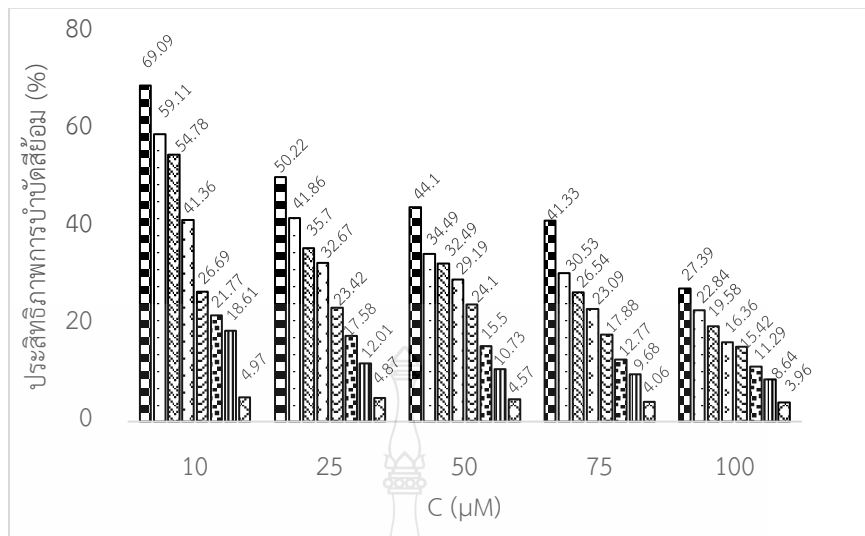


รูปที่ 4.4 การกระจายตัวของฟองอากาศขนาด MNBs

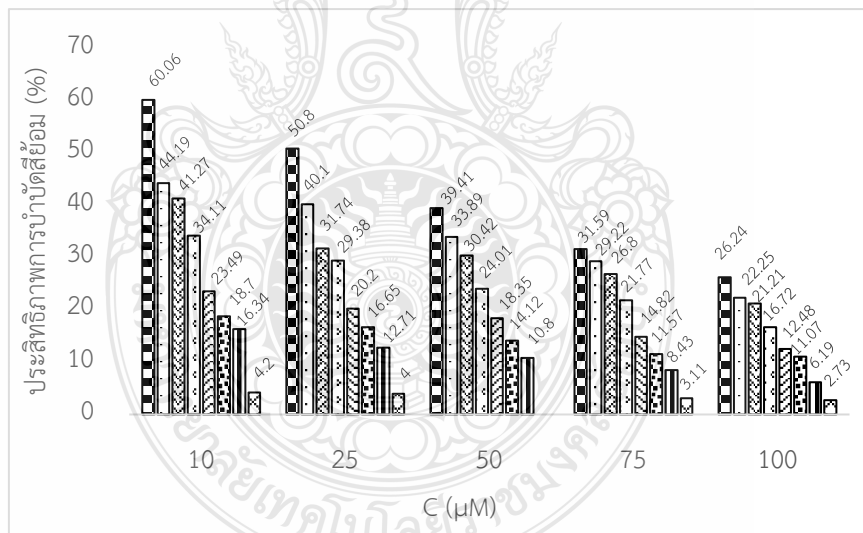
จากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นการกระจายตัวของฟองอากาศขนาด MNBs ซึ่งมีขนาดระหว่าง 86.9-258.2 nm โดยขนาดฟองอากาศที่พบมากที่สุดมีขนาดเท่ากับ 103.5 ± 4.8 nm และมีขนาดเฉลี่ยของฟองอากาศเท่ากับ 147.6 ± 6.0 nm และค่า DO ก่อนเติมอากาศขนาด MNBs เท่ากับ 7.27 และหลังการเติมอากาศขนาด MNBs เท่ากับ 9.12 ซึ่งค่า DO หลังการเติมอากาศขนาด MNBs เพิ่มขึ้นจากเดิม 1.25 เท่า จากข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้น สามารถระบุได้ว่าอุปกรณ์การเติมอากาศขนาด MNBs RMUTT-MNB สามารถสร้างฟองอากาศให้อยู่ในระดับ MNBs ได้

4.2 การประเมินประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก

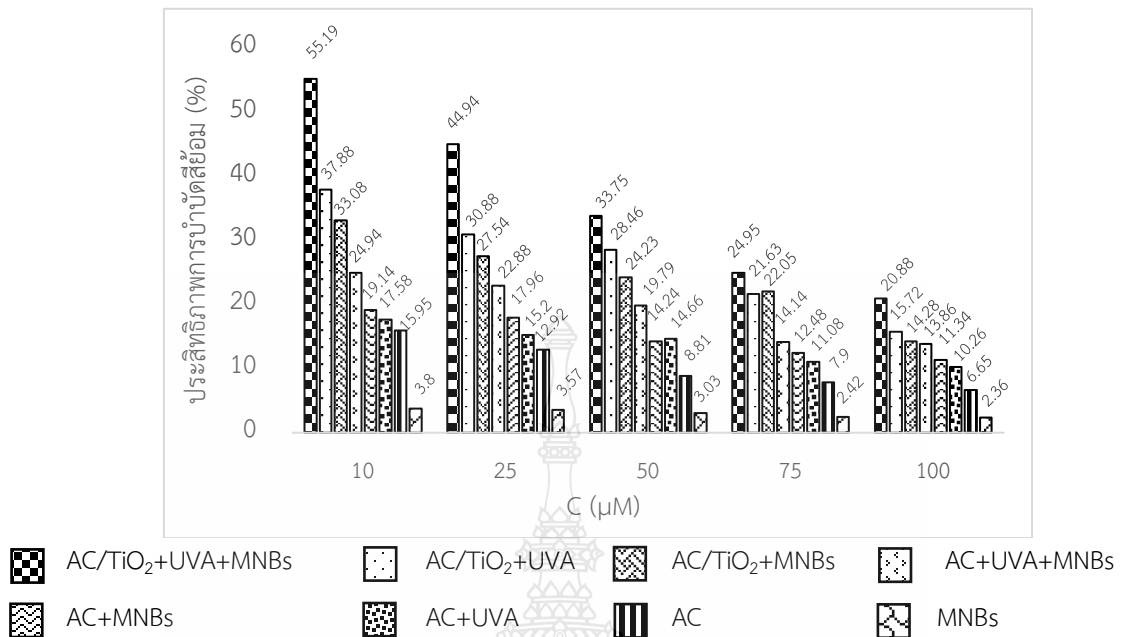
การประเมินประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สีย้อม IC, MB และ RB5 ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก โดยมี AC/TiO_2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับการเติมอากาศขนาด MNBs มีค่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 0, 25, 50, 75 และ 100 μM ทำการทดสอบในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์ขณะทำการทดลองให้แสง UVA ที่มีความเข้มแสงเท่ากับ $1,250 \mu W \cdot cm^{-2}$ ตลอดการทดลอง และเก็บตัวอย่างที่เวลา 0, 10, 30, 60, 90, 120 และ 180 min ตามลำดับ โดยติดตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้น และการหลุดร่อนของสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาขณะทดลองสำหรับประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 ที่แตกต่างกัน 8 สีภาวะ ดังรูปที่ 4.5-4.7



รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม IC ในสภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน



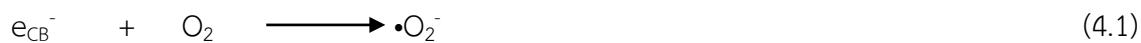
รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม MB ในสภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน



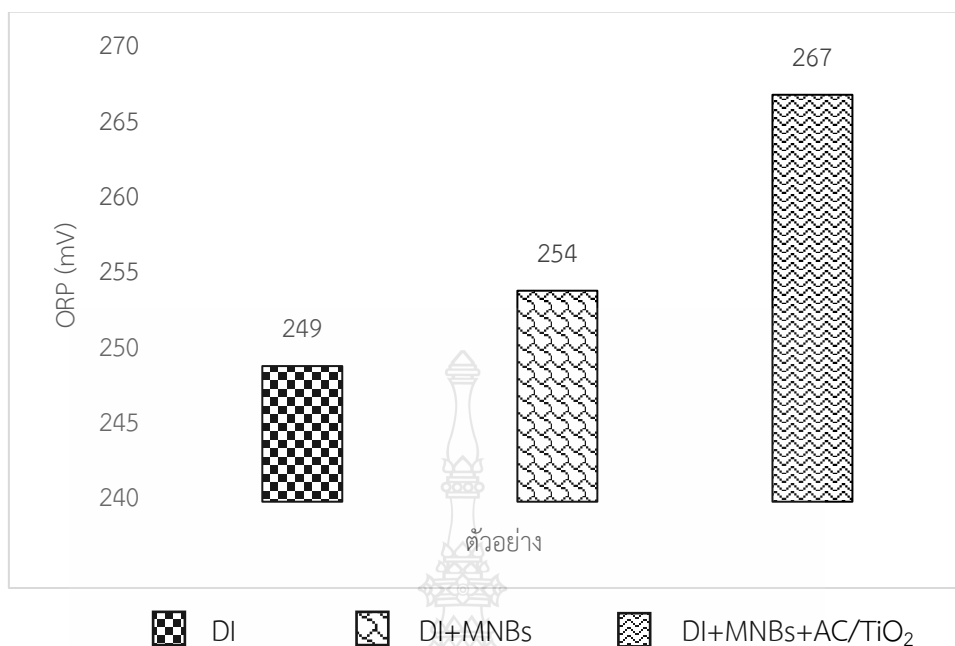
รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม RB5 ในสภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.5-4.7 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ ในสภาวะที่แตกต่างกันทั้ง 7 สภาวะ พบว่าในสภาวะที่เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 สูงที่สุด ได้แก่ชุดทดลอง (AC/TiO₂+UVA+MNBs) ซึ่งเป็นชุดที่มีประสิทธิภาพสูงเป็นอันดับแรกโดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสีย้อม IC, MB และ RB5 เท่ากับ 69.09% 60.06% และ 55.19% ตามลำดับ และชุดควบคุมที่ 1 (AC/TiO₂+UVA) เป็นชุดควบคุมที่มีประสิทธิภาพดีเป็นอันดับที่ 2 โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสีย้อม IC, MB และ RB5 เท่ากับ 50.22% 44.19% และ 37.88% ตามลำดับ จากผลการทดลองที่กล่าวมาข้างต้น แสดงให้เห็นว่าชุดทดลองมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 สูงที่สุด เนื่องจากปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกมีการใช้ O₂ เป็นตัวสนับสนุนให้เกิด •OH และ •O₂⁻ ซึ่งในปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก •OH และ •O₂⁻ เป็นสารออกซิไดซ์ที่สามารถย่อยสลายสีย้อม IC, MB และ RB5 ได้ เมื่อมีการเติมอากาศขนาด MNBs เข้าไปในปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกทำให้ O₂ ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกเพิ่มมากขึ้นและส่งเสริมให้เกิด •OH และ •O₂⁻ เพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังสมการที่ (4.1)-(4.7) [113], [114], [115] เมื่อ •OH และ •O₂⁻ มีเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 สูง สำหรับในสภาวะที่ไม่เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก ได้แก่ ชุดควบคุมที่ 2

(AC/TiO₂+MNBs) ชุดควบคุมที่ 3 (AC+UVA+MNBs) และชุดควบคุมที่ 4 (AC+UVA) ชุดควบคุมที่ 5 (AC+MNBs) และชุดควบคุมที่ 6 (AC)



สำหรับชุดควบคุมที่ 2 เป็นชุดควบคุมที่ไม่เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกเนื่องจากชุดควบคุมมีตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂ และการเติมอากาศ MNBs แต่ไม่มีการกระตุ้นด้วยแสง UVA ซึ่งจากสมการที่ 4.5-4.7 ชุดควบคุมที่ 2 มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 สูงเป็นอันดับที่ 3 โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสีย้อม IC, MB และ RB5 เท่ากับ 44.10% 41.07% และ 33.08% ตามลำดับ จากข้อมูลข้างต้นอาจสันนิษฐานได้ว่าการเติมอากาศขนาด MNBs ทำให้เกิดอนุมูลอิสระ (free radical) ซึ่งอาจเกิดปฏิกิริยาบางอย่างบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂ และช่วยส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมเช่นกัน จากข้อสันนิษฐานข้างต้นจึงมีการตรวจสอบศักยภาพการออกซิเดชัน-รีดักชันของสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยอุปกรณ์วิเคราะห์ศักยภาพการออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction Potential, ORP) โดยผลการวิเคราะห์การออกซิเดชัน-รีดักชันของสีย้อม IC, MB และ RB5 แสดงในรูปที่ 4.8

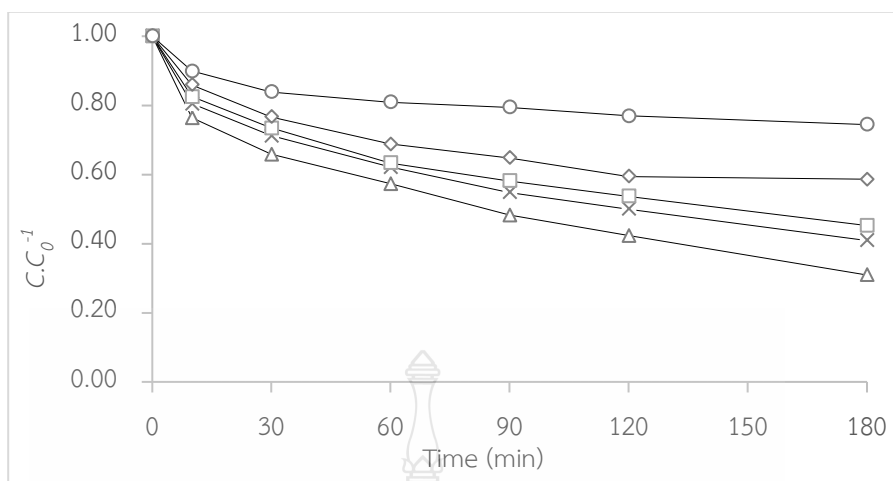


รูปที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ค่าศักยภาพการออกซิเดชัน-รีดักชันของตัวอย่างน้ำ

จากรูปที่ 4.8 เมื่อพิจารณาค่า ORP ของตัวอย่างน้ำแสดงให้เห็นว่าค่า ORP ของ DI+MNBs+AC/TiO₂ > DI+MNBs > DI ซึ่งค่า ORP แสดงถึงความสามารถในการออกซิไดซ์สารต่างๆ ในปฏิกิริยา [116], [117] เมื่อมีการเติม MNBs ส่งผลให้การออกซิไดซ์เกิดได้ดี ส่วน DI+MNBs+AC/TiO₂ มีค่า ORP มากที่สุด เนื่องจากมีตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂ เพิ่มเข้ามาโดย MNBs อาจทำให้เกิดปฏิกิริยาบางอย่างบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂ ทำให้ชุดควบคุมที่ 2 มีความสามารถในการออกซิไดซ์สีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ได้แม้ว่าสภาวะทดลองดังกล่าวจะไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก เนื่องจากไม่มีแหล่งกำเนิดแสงที่มีพลังงานสูงพอ

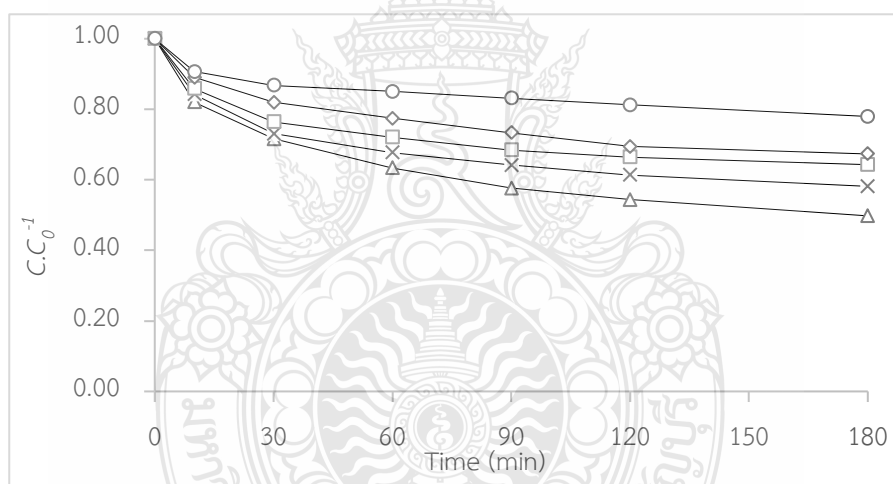
สำหรับชุดควบคุมที่ 3-7 เป็นชุดควบคุมในสภาวะที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกเช่นเดียวกัน แต่จะเกิดปฏิกิริยาการดูดซับ ซึ่ง AC มีความสามารถในการดูดซับสารปนเปื้อน เนื่องจาก AC มีปริมาณรูพรุน ขนาดพื้นผิว และขนาดรูพรุนจำนวนมาก ซึ่งคุณสมบัติที่กล่าวมาข้างต้นส่งผลให้ AC เป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาการดูดซับ [118], [119], [120] โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสีย้อม IC, MB และ RB5 ค่อนข้างต่ำโดยมีค่าระหว่าง 1.121%-41.36%

เนื่องจากชุดทดลอง และชุดควบคุมที่ 1 มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์มากที่สุด จึงได้นำมาพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม IC, MB และ RB5 กับความเข้มข้นเริ่มต้นที่เวลาต่างๆ ขณะทำการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.9-4.14



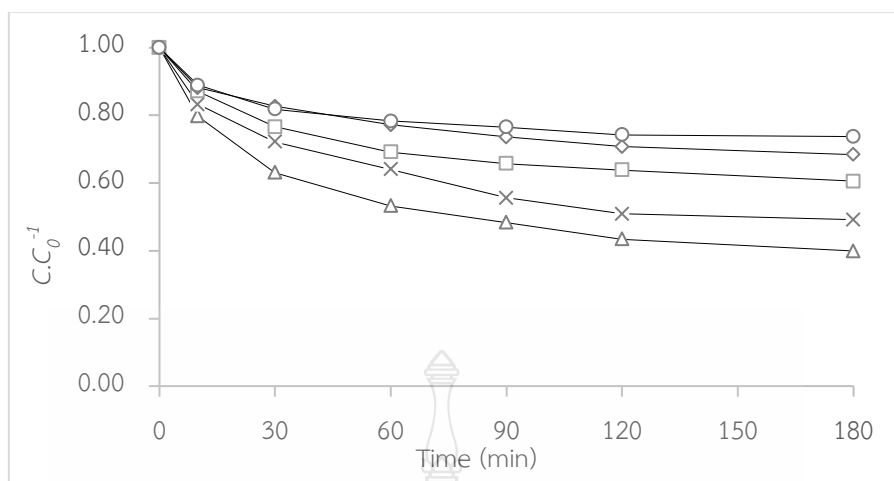
$\Delta = 10 \mu\text{M}$ X = 25 μM $\square = 50 \mu\text{M}$ $\diamond = 75 \mu\text{M}$ O = 100 μM

รูปที่ 4.9 การติดตามการเปลี่ยนแปลง $C.C_0^{-1}$ กับเวลาต่างๆ ในชุดทดลอง ของสีย้อม IC



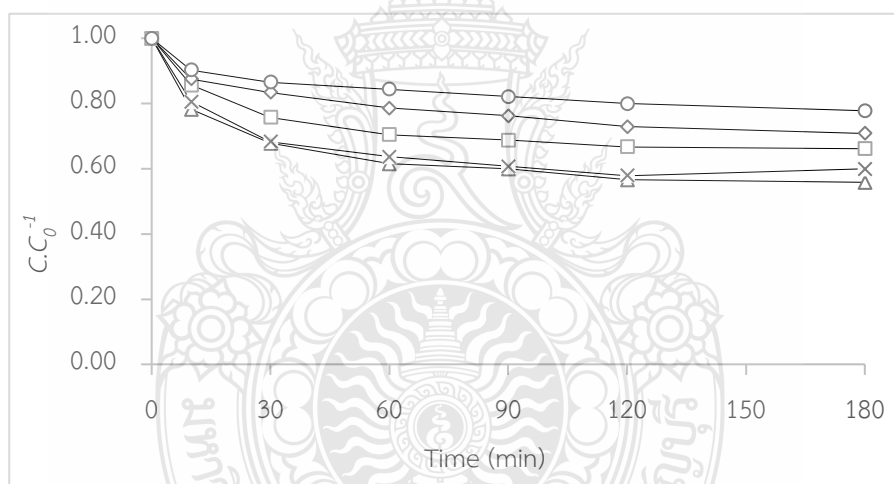
$\Delta = 10 \mu\text{M}$ X = 25 μM $\square = 50 \mu\text{M}$ $\diamond = 75 \mu\text{M}$ O = 100 μM

รูปที่ 4.10 การติดตามการเปลี่ยนแปลง $C.C_0^{-1}$ กับเวลาต่างๆ ในชุดควบคุมที่ 1 ของสีย้อม IC



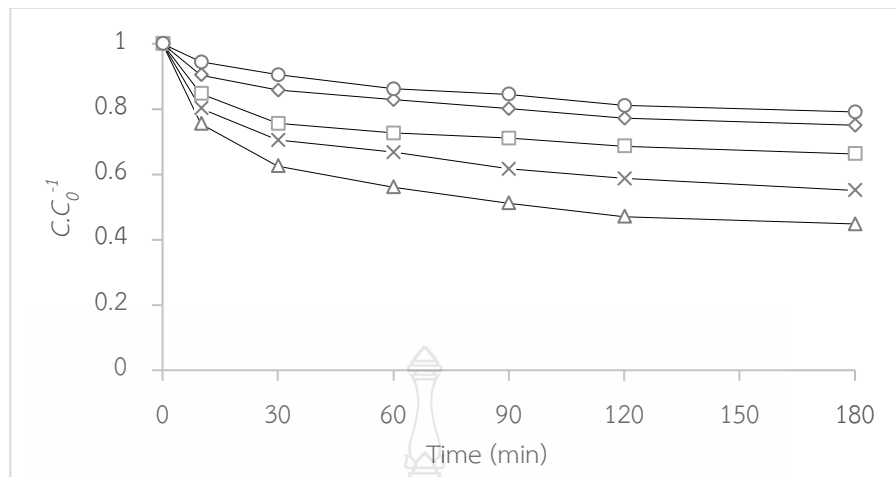
Δ = 10 μM X = 25 μM □ = 50 μM ◇ = 75 μM ○ = 100 μM

รูปที่ 4.11 การติดตามการเปลี่ยนแปลง $C.C_0^{-1}$ กับเวลาต่างๆ ในชุดทดลองของสีย้อม MB



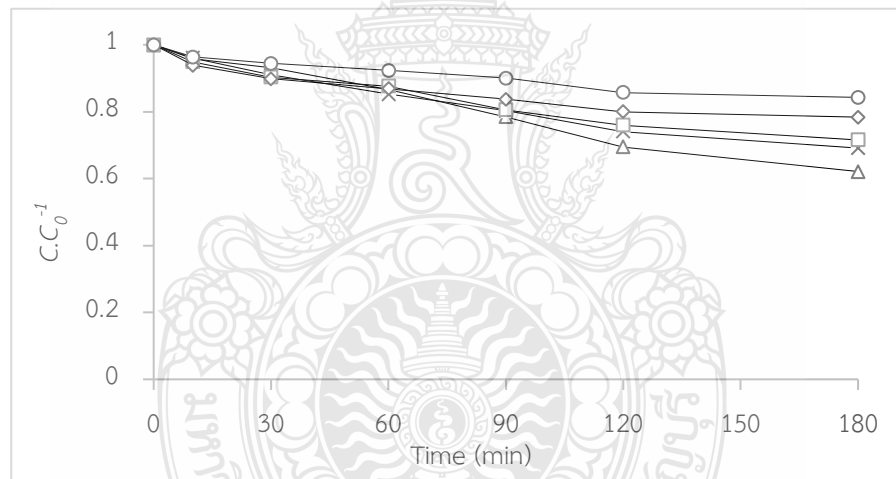
Δ = 10 μM X = 25 μM □ = 50 μM ◇ = 75 μM ○ = 100 μM

รูปที่ 4.12 การติดตามการเปลี่ยนแปลง $C.C_0^{-1}$ กับเวลาต่างๆ ในชุดควบคุมที่ 1 ของสีย้อม MB



Δ = 10 μM X = 25 μM □ = 50 μM ◇ = 75 μM O = 100 μM

รูปที่ 4.13 การติดตามการเปลี่ยนแปลง C/C_0^{-1} กับเวลาต่างๆ ในชุดทดลองของสีย้อม RB5

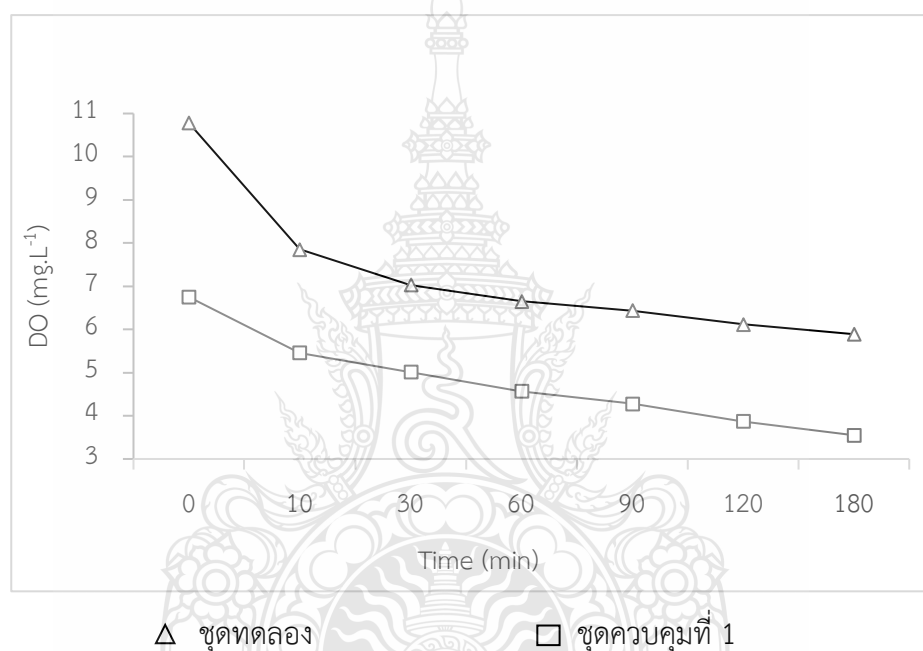


Δ = 10 μM X = 25 μM □ = 50 μM ◇ = 75 μM O = 100 μM

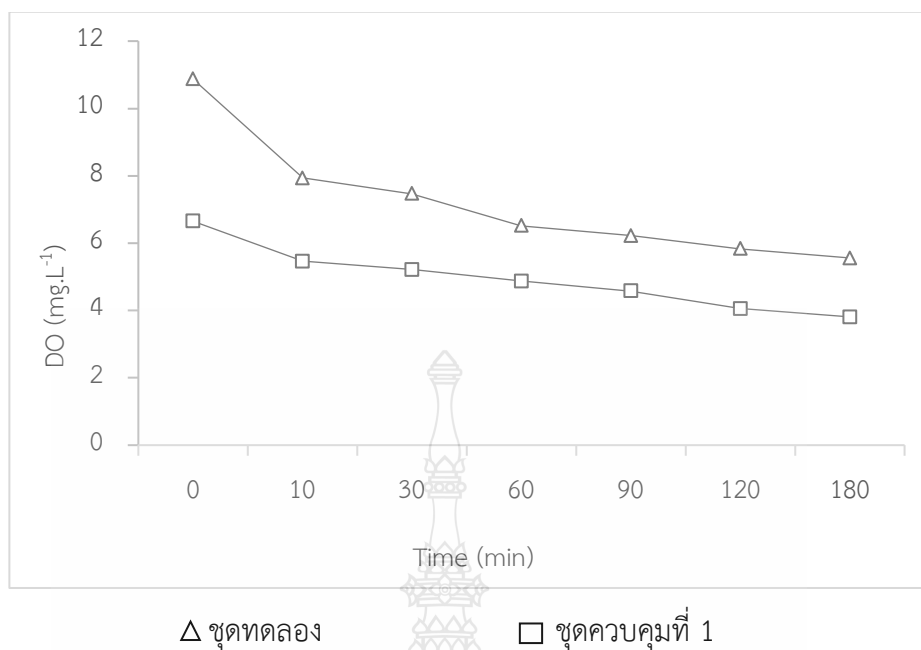
รูปที่ 4.14 การติดตามการเปลี่ยนแปลง C/C_0^{-1} กับเวลาต่างๆ ในชุดควบคุมที่ 1 ของสีย้อม RB5

จากรูปที่ 4.9-4.14 แสดงให้เห็นว่าในการประเมินประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ในชุดทดลอง และชุดควบคุมที่ 1 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม IC, MB และ RB5 10, 25, 50, 75 และ 100 μM มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 10 นาทีแรก เนื่องจากพื้นผิวและรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂ ยังคงสะอาดและยังมีศักยภาพในการรองรับหรือเกิดปฏิกิริยาการดูดซับผิวของสีย้อม IC, MB และ RB5 ที่พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂ ได้ดี [121],

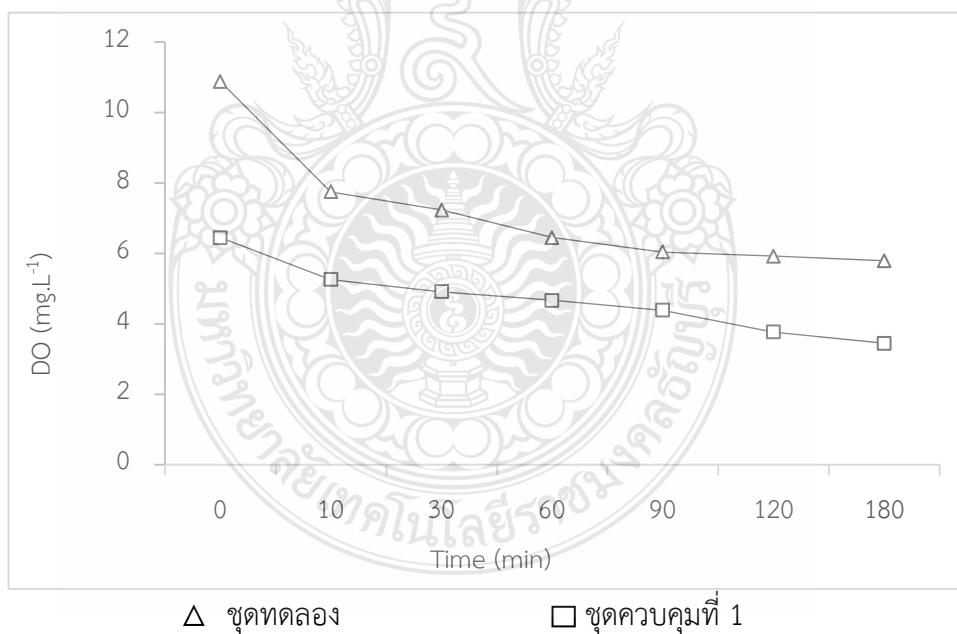
[122] นอกจากนี้เมื่อพิจารณาภาวะการทดลองที่กำหนดให้มีการเติมอากาศขนาด MNBs พบว่าการลดลงของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม IC, MB และ RB5 ในชุดทดลองมีค่ามากกว่าชุดควบคุมที่ 1 แสดงให้เห็นว่าการเติมอากาศขนาด MNBs ช่วยสนับสนุนกระบวนการโฟโตคะตะลิติกในการการย่อยสลายสีย้อม IC, MB และ RB5 โดยสามารถส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาออกซิไดซ์ได้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยากระบวนการโฟโตคะตะลิติกมีการใช้ O_2 [123], [124] ซึ่งอัตราการใช้ O_2 สามารถติดตามได้จากค่า DO ที่เปลี่ยนไปในกระบวนการโฟโตคะตะลิติกของสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดทดลอง และชุดควบคุมที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 4.15-4.17



รูปที่ 4.15 ค่า DO ของการบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 4.16 ค่า DO ของการบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 4.17 ค่า DO ของการบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เวลาต่างๆ

จากรูปที่ 4.15-4.17 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงค่า DO ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกในการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ลดลงอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาในขณะที่ทำการ

ทดลอง ทั้งนี้อัตราการลดลงหรือการใช้ DO สูงสุดในปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกเกิดขึ้นในช่วงเวลา 10 นาทีแรก เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองในชุดทดลองและชุดควบคุมที่ 1 พบว่าผลจากการเติมอากาศขนาด MNBs ส่งผลให้ค่า DO ในชุดทดลองมีค่าสูงกว่าในชุดควบคุมที่ 1 ที่ไม่มีการเติมอากาศขนาด MNBs เมื่อพิจารณาอัตราการลดลงหรือการใช้ DO ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกในการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดทดลองมีค่าเท่ากับ 0.29 mg.L⁻¹, 0.294 mg.L⁻¹ และ 0.313 mg.L⁻¹ ตามลำดับ ในขณะที่อัตราการลดลงหรือการใช้ DO ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกในการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ในชุดควบคุมที่ 1 มีค่าต่ำกว่าโดยมีค่าเท่ากับ 0.129 mg.L⁻¹, 0.119 mg.L⁻¹ และ 0.119 mg.L⁻¹ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าชุดทดลองมีการใช้ DO ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกในการบำบัดของสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์มากกว่าชุดควบคุมที่ 1 เท่ากับ 2.24, 2.47 และ 2.63 เท่า ตามลำดับ โดยการเติมอากาศขนาด MNBs ในกระบวนการโฟโตคะตะลิติกส่งผลให้เกิด DO ในปริมาณที่มากเกินไปจนพอสำหรับการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกซึ่ง DO เป็นตัวส่งเสริมให้เกิด H₂O₂, •OH และ •O₂⁻ ดังสมการที่ 4.1-4.7

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดทดลองและชุดควบคุมที่ 1

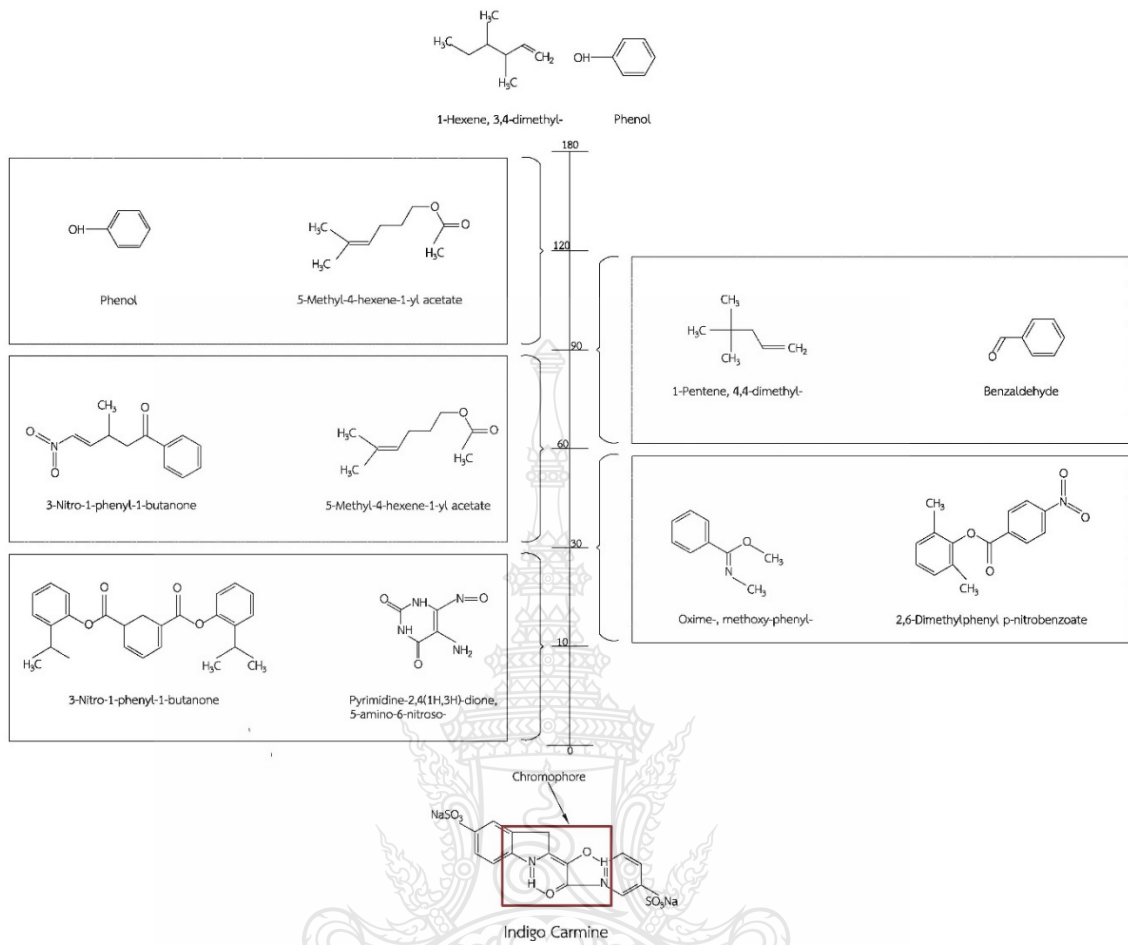
การทดลอง	ความเข้มข้นเริ่มต้น (µM)	ประสิทธิภาพการบำบัดเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO ₂		
		±SD (n=3)		
		IC	MB	RB5
ชุดทดลอง (AC/TiO ₂ +UVA+MNBS)	10	69.09±0.84	60.06±0.23	55.19±0.54
	25	59.11±2.84	50.80±0.04	44.94±0.03
	50	54.78±1.12	39.41±0.44	33.75±0.15
	75	41.36±0.05	31.59±0.46	24.95±0.11
	100	25.57±0.04	26.24±0.15	20.88±0.09
ชุดควบคุมที่ 1 (AC/TiO ₂ +UVA)	10	50.22±0.84	44.19±0.67	37.88±0.56
	25	41.86±1.09	40.10±0.32	30.88±0.58
	50	35.70±1.58	33.89±0.89	28.46±0.16
	75	32.67±0.02	29.22±0.42	21.63±0.35
	100	22.04±0.94	22.25±0.26	15.72±0.94

จากตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์แปรผันตามความเข้มข้น ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำของสีย้อม IC, MB และ RB5 มีประสิทธิภาพ

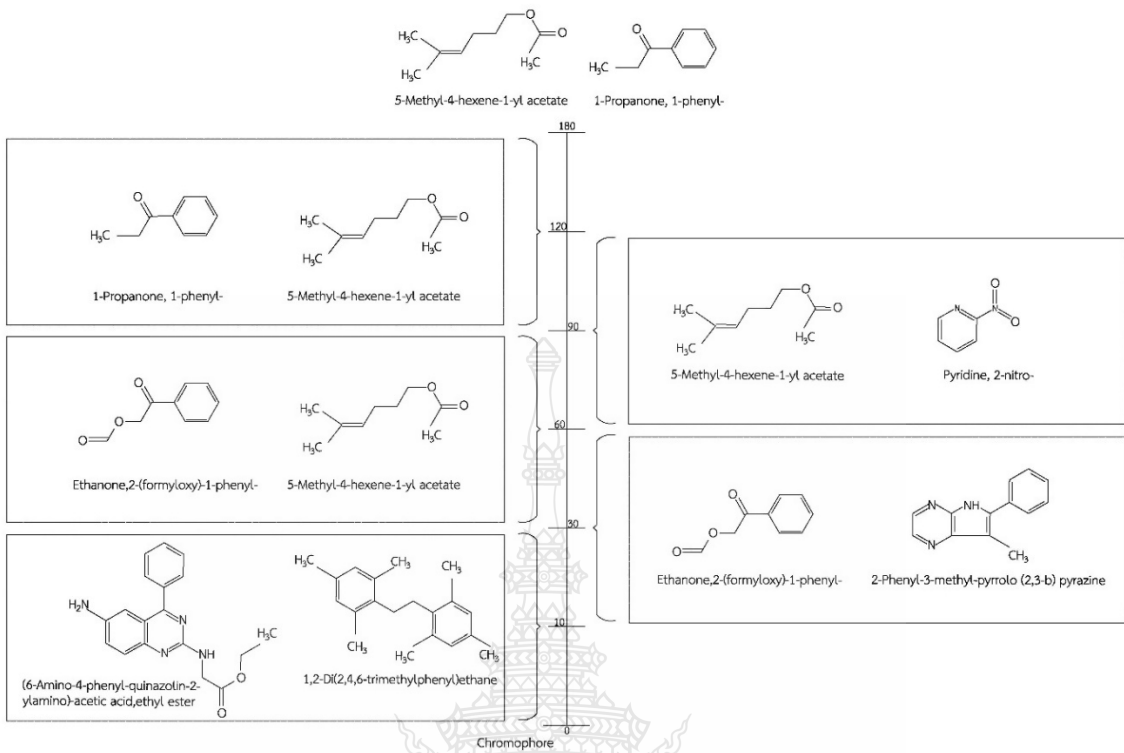
ในการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้นอื่นๆ เนื่องจากความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำของสีย้อม IC, MB และ RB5 ไม่ก่อให้เกิดอุปสรรคในการบดบังแสงที่จะส่องผ่านไปยังตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂ ส่งผลให้ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำของสีย้อม IC, MB และ RB5 เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกได้ดี สำหรับที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสูงของสีย้อม IC, MB และ RB5 ส่งผลกระทบต่อเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกเป็นอย่างมาก เนื่องจากความเข้มข้นเริ่มต้นสูงของสีย้อม IC, MB และ RB5 เข้าไปบดบังแสง UVA ที่จะส่องผ่านไปยังตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂ ทำให้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกเกิดขึ้นได้ยาก [125], [120] ซึ่งในกระบวนการโฟโตคะตะลิติกมีแสงเป็นปัจจัยที่สามารถกระตุ้นให้ e⁻ จากแถบเวเลนซ์เคลื่อนที่ไปยังแถบการกระตุ้น ทำให้แถบเวเลนซ์เกิด h⁺ ซึ่งเป็นกลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก

ในส่วนของการติดตามการหลุดร่อนของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ ที่เคลือบอยู่บนผิว AC หลังจากการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกสามารถวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ ICP ซึ่งเป็นการบ่งบอกถึงความเสี่ยงในการตกค้างของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ ในสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์ปริมาณ Ti ในตัวอย่างของสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำสังเคราะห์ที่ผ่านการบำบัดแล้ว พบปริมาณ Ti ที่หลุดร่อนออกมาและอยู่ในตัวอย่างดังกล่าว เท่ากับ 0.31, 0.33 และ 0.42 mg.L⁻¹ ซึ่งคิดเป็นปริมาณการหลุดร่อนเท่ากับ 0.523%, 0.557% และ 0.709% ตามลำดับ ดังแสดงรายการคำนวณคำนวณในภาคผนวก ค จากข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำสังเคราะห์ อย่างไรก็ตามการหลุดร่อนของ Ti ที่พบในกระบวนการโฟโตคะตะลิติกมีปริมาณค่อนข้างน้อย อีกทั้ง Ti เป็นสารที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและระบบนิเวศทางน้ำ เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานคุณภาพน้ำดื่มและคุณภาพน้ำระดับชาติของ US.EPA ไม่ได้ระบุค่าความเป็นพิษของ Ti [126], [127] แต่อย่างไรก็ตามการหลุดร่อนของสารดังกล่าวอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อมโดย MPs ที่คงอยู่ในแหล่งน้ำธรรมชาติส่งผลให้ MPs สะสมอยู่ในสิ่งมีชีวิตในน้ำ รวมก่อให้เกิดความเป็นพิษในระยะสั้นและระยะยาว และส่งผลเสียต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งแวดล้อมทางน้ำ [128], [129]

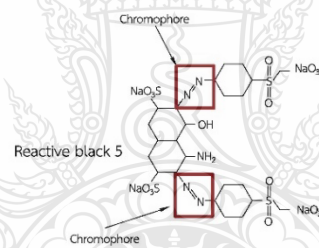
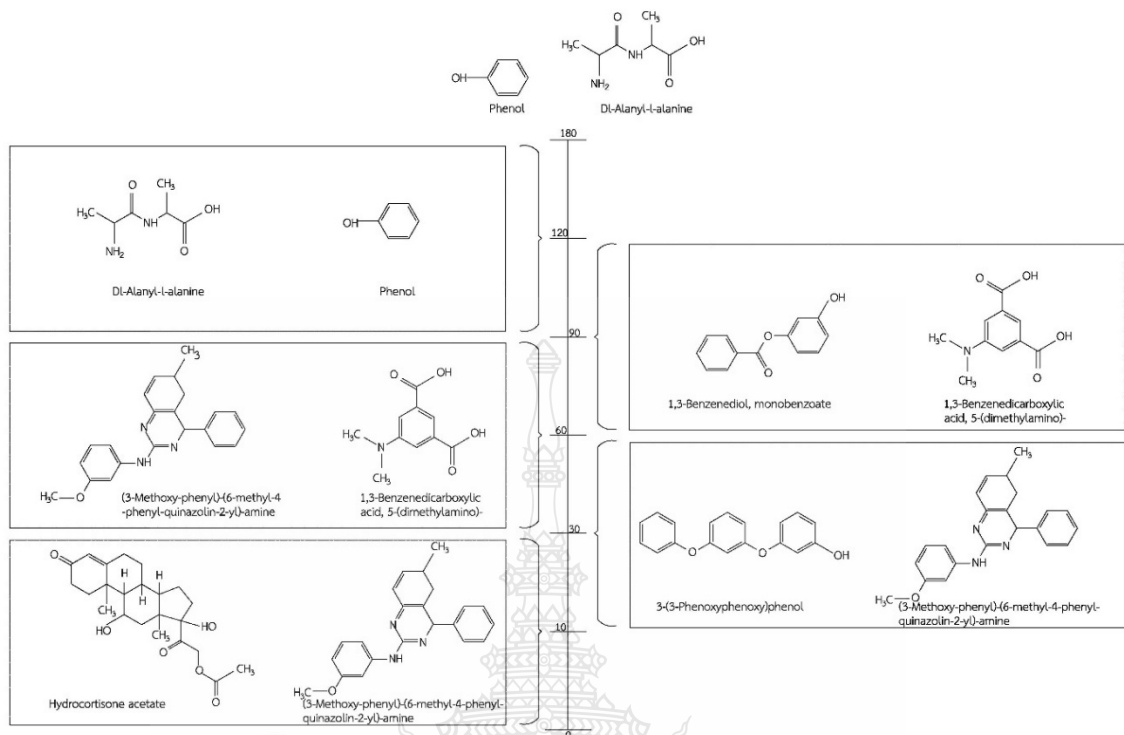
ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ ก่อนเข้ากระบวนการโฟโตคะตะลิติก และหลังเข้ากระบวนการดังกล่าว ด้วยอุปกรณ์ GC-MS ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ แสดงดังรูปที่ 4.18-4.12



รูปที่ 4.18 การเปลี่ยนโครงสร้างของสีย้อม IC โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ตลอดระยะเวลา 180 นาที



รูปที่ 4.19 การเปลี่ยนโครงสร้างของสีย้อม MB โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ตลอดระยะเวลา 180 นาที

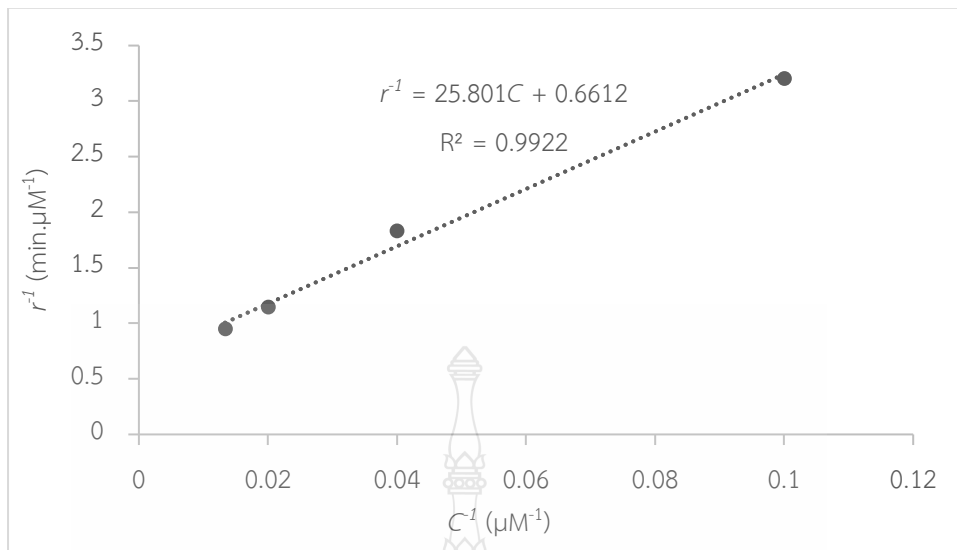


รูปที่ 4.20 การเปลี่ยนโครงสร้างของสีย้อม RB5 โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ตลอดระยะเวลา 180 นาที

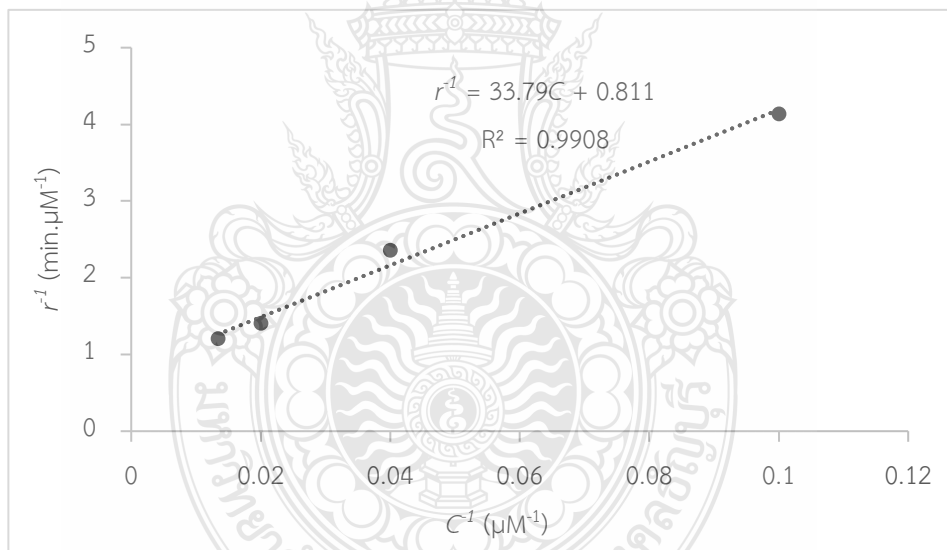
จากรูปที่ 4.18-4.20 แสดงลักษณะโครงสร้างของสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งสีย้อมดังกล่าวมีโครงสร้างซับซ้อนที่ประกอบด้วยกลุ่มโครโมฟอร์ที่ทำให้เกิดสี และกลุ่มออกซิโครมที่ส่งเสริมการให้สีของกลุ่มโครโมฟอร์ จากการทดลองเมื่อสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก พบว่า โครงสร้างของย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์มีขนาดและความซับซ้อนของโครงสร้างลดลง รวมทั้งยังคงพบว่าการสลายตัวของสีย้อมในรูปแบบต่างๆ เมื่อเวลาผ่านไป แสดงให้เห็นว่ากระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่มีการเติมอากาศขนาด MNBs มีศักยภาพในการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ ไม่เพียงแต่จะสลายโครงสร้างกลุ่มโครโมฟอร์แต่ยังปรับเปลี่ยนโครงสร้างของสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ให้ซับซ้อนน้อยลง และเปลี่ยนเป็นสารอื่นที่มีความเป็นพิษลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับ LD_{50} ของสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้น พบว่ามีค่าแนวโน้ม LD_{50} ของ IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ลดลง

4.3 การศึกษาจลนพลศาสตร์ (Kinetics) ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO_2 ร่วมกับการเติมอากาศขนาด MNBs

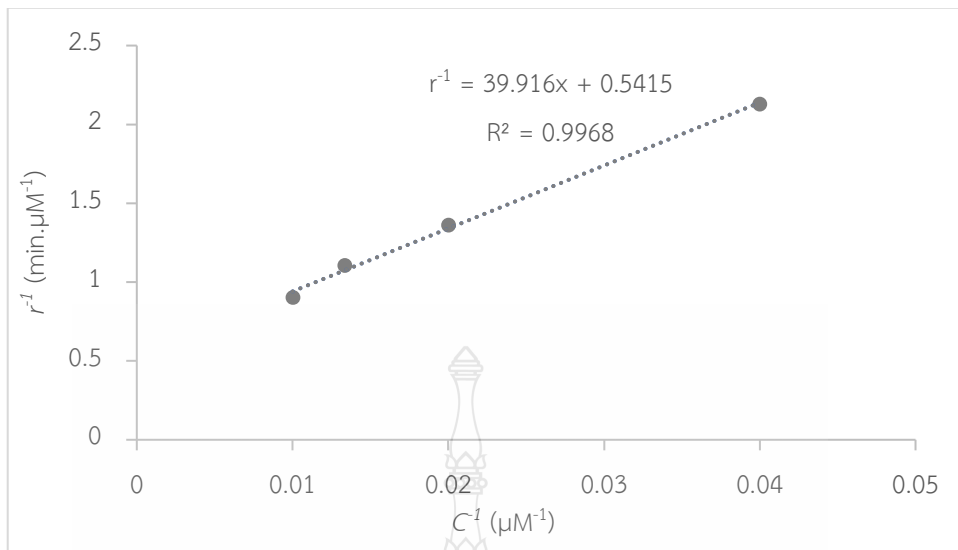
การหาจลนพลศาสตร์ของการบำบัดน้ำสีย้อม IC, MB และ RB5 ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO_2 ร่วมกับการเติมอากาศขนาด MNBs ที่ให้แสงขณะทำการทดลอง $1,250 \mu W \cdot cm^{-2}$ โดยใช้สมการ Langmuir Hinshelwood (L-H) ในการอธิบายกลไกการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะลิติก และสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยากับความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดทดลอง และชุดควบคุมที่ 1 ดังรูปที่ 4.18-4.23



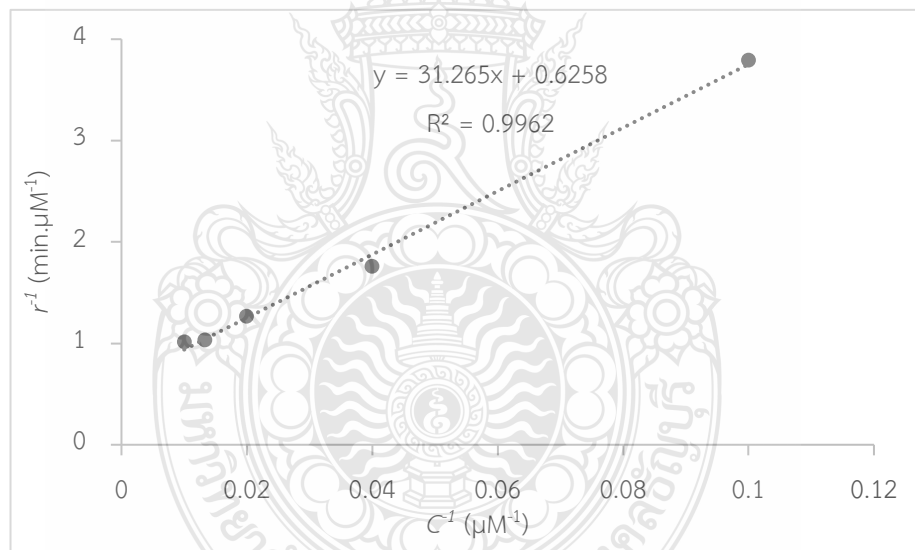
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง r_0^{-1} กับ C^{-1} สำหรับสีย้อม IC ของชุดทดลอง



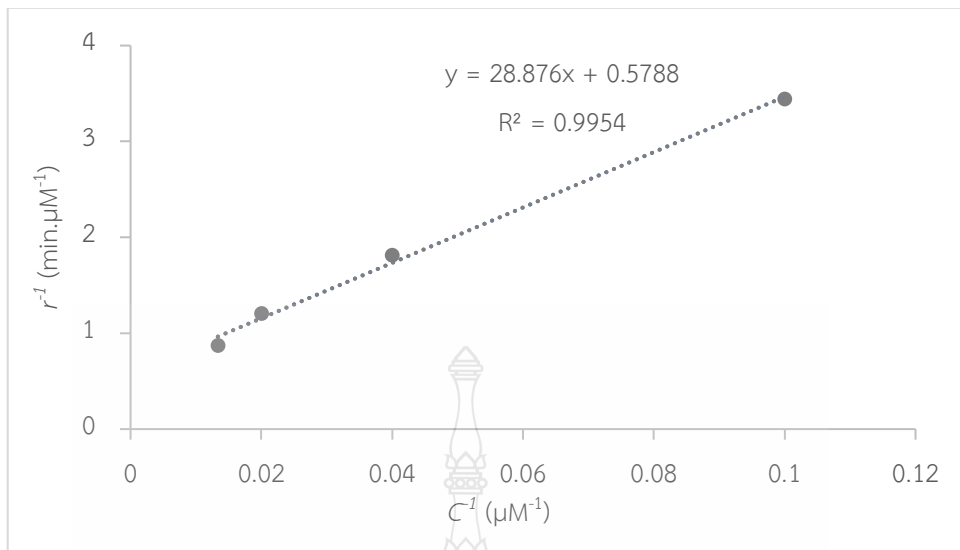
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง r_0^{-1} กับ C^{-1} สำหรับสีย้อม IC ของชุดควบคุมที่ 1



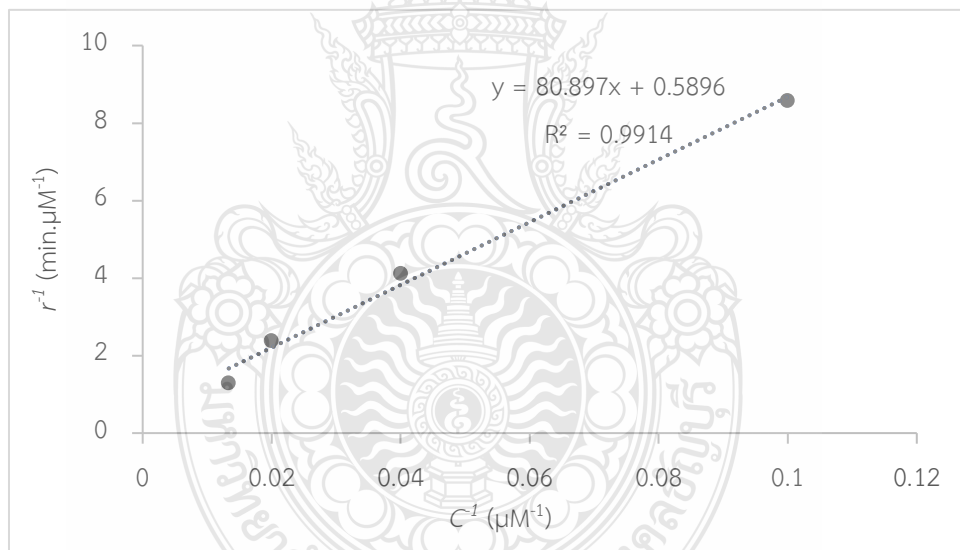
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง r_0^{-1} กับ C^{-1} สำหรับสีย้อม MB ของชุดทดลอง



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่าง r_0^{-1} กับ C^{-1} สำหรับสีย้อม MB ของชุดควบคุมที่ 1



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่าง r_0^{-1} กับ C^{-1} สำหรับสีย้อม RB5 ของชุดทดลอง



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่าง r_0^{-1} กับ C^{-1} สำหรับสีย้อม RB5 ของชุดควบคุมที่ 1

จากรูปที่ 4.18-4.23 สามารถหาค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก (k) ของชุดทดลอง เท่ากับ $1.512 \mu\text{M} \cdot \text{min}^{-1}$, $1.846 \mu\text{M} \cdot \text{min}^{-1}$ และ $1.902 \mu\text{M} \cdot \text{min}^{-1}$ ชุดควบคุมที่ 1 เท่ากับ $1.233 \mu\text{M} \cdot \text{min}^{-1}$, $1.597 \mu\text{M} \cdot \text{min}^{-1}$ และ $1.696 \mu\text{M} \cdot \text{min}^{-1}$ รวมทั้งค่าคงที่ในปฏิกิริยาดูดติดผิว (k) ของชุดทดลอง เท่ากับ $0.025 \mu\text{M}^{-1}$, $0.013 \mu\text{M}^{-1}$ และ $0.018 \mu\text{M}^{-1}$ และชุดควบคุมที่ 1 เท่ากับ $0.024 \mu\text{M}^{-1}$,

0.020 μM^{-1} และ 0.007 μM^{-1} เมื่อพิจารณาค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก พบว่าการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวในชุดทดลองมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าชุดควบคุมที่ 1 ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบค่าคงที่ดังกล่าวกับงานวิจัยอื่นๆ ซึ่งจากข้อมูลดังกล่าวเมื่อพิจารณาหน่วยของค่า k และ K พบว่า kK จะมีหน่วยตรงกับค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ซึ่งในงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้นำเสนอค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกในรูปแบบการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ทั้งนี้สามารถเปรียบเทียบค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาของสมการ L-H กับค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกกับงานวิจัยอื่น

ตัวเร่งปฏิกิริยา	สี	$k, \mu\text{M}\cdot\text{min}^{-1}$	$K, \mu\text{M}^{-1}$	kK, min^{-1}	เอกสารอ้างอิง
AC/TiO ₂	IC	1.512	0.025	3.78×10^{-2}	งานวิจัยนี้
AC/TiO ₂	MB	1.846	0.013	2.5×10^{-2}	งานวิจัยนี้
AC/TiO ₂	RB5	1.727	0.034	2.0×10^{-2}	งานวิจัยนี้
TiO ₂	IC	-	-	5.08×10^{-2}	[130]
		-	-	1.67×10^{-2}	[131]
TiO ₂	MB	-	-	9.40×10^{-2}	[132]
		-	-	2.25×10^{-2}	[133]
TiO ₂	RB5	-	-	5.15×10^{-2}	[134]
		-	-	2.3×10^{-2}	[135]

จากตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่น พบว่า ค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่น ซึ่งค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกอยู่ในช่วง 10^{-2} min

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการประเมินประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂ ร่วมกับการเติมอากาศขนาด MNBs สามารถสรุปการศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂ การประเมินประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยติดตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสีย้อม IC, MB และ RB5 การหุตร้อนของ Ti ของตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂ และโครงสร้างของสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ จากการศึกษาดังกล่าวสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 การวิเคราะห์หาลักษณะทางกายภาพของ AC/TiO₂

จากการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของ AC/TiO₂ ที่เตรียมขึ้นโดยวิธี Sol-gel dip coating พบว่าลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของ AC และ AC/TiO₂ มีลักษณะทางกายภาพพื้นผิวใกล้เคียงกันทำให้ไม่สามารถระบุได้ว่ามีสารละลาย TiO₂ เคลือบบนพื้นผิวของ AC จึงต้องวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂ เพิ่มเติม ส่วนการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂ พบธาตุ Ti บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂ เท่ากับ 0.74% โดยน้ำหนัก และการวิเคราะห์ขนาดพื้นผิวเฉพาะ ปริมาตรและขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂ พบว่ามีขนาดพื้นผิวเฉพาะ ปริมาตรและขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂ ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ AC เนื่องจาก การชุบเคลือบสารละลาย TiO₂ ก่อให้เกิดผลึกของ TiO₂ ทำให้เกิดการซ้อนทับกันบนพื้นผิวของ AC จากข้อสรุปข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการชุบเคลือบด้วยวิธี Sol-gel dip coating สามารถเคลือบสารละลาย TiO₂ บนพื้นผิวของ AC ได้จริง

5.1.2 การประเมินประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ AC/TiO₂ ร่วมกับการเติมอากาศขนาด MNBs จากการศึกษาพบว่าชุดทดลองมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 สูงสุดในระยะเวลา 180 min ที่ความเข้มข้น 10 µM เท่ากับ 69.09% 60.06% และ 55.19% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองในชุดทดลองกับชุดควบคุมทั้งหมด พบว่า ผลการทดลองในชุดควบคุมที่ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์สูงสุดในอันดับถัดมา ได้แก่ ชุดควบคุมที่ 1 และชุดควบคุมที่ 2 ทั้งนี้เมื่อพิจารณาสถานะสำหรับการทดลองในชุดควบคุมที่ 1 เป็นชุดควบคุมที่สามารถเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกได้ ในส่วนชุดควบคุมที่ 2 เป็นชุดควบคุมที่ไม่เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก แต่กลับพบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์สูงเป็นอันดับ 3

ทั้งนี้ในสภาวะการทดลองดังกล่าวเมื่อพิจารณาปัจจัยจากการเติมอากาศขนาด MNBs ร่วมกับใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂ อาจมีผลทำให้เกิดอนุมูลอิสระ (free radical) ซึ่งอาจเกิดปฏิกิริยาบางอย่างบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂ และช่วยส่งเสริมให้เกิดสารที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์ ทั้งนี้จะเห็นได้ว่ากระบวนการโฟโตคะตะลิสติกที่เติมอากาศขนาด MNBs สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมให้สูงขึ้นได้

5.1.3 การศึกษาจลนพลศาสตร์ (Kinetics) ของกระบวนการโฟโตคะตะลิสติกโดยใช้ AC/TiO₂ ร่วมกับการเติมอากาศขนาด MNBs ซึ่งสมการที่สามารถทำนายปฏิกิริยาได้คือ สมการ Langmuir-Hinshelwood โดยค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาในการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ได้เท่ากับ 1.512 $\mu\text{M}\cdot\text{min}^{-1}$, 1.846 $\mu\text{M}\cdot\text{min}^{-1}$ และ 1.902 $\mu\text{M}\cdot\text{min}^{-1}$ ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะที่ได้จากการวิจัย

การบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิสติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา AC/TiO₂ ร่วมกับการเติมอากาศขนาด MNBs สามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.2.1 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมเมื่อมีการแปรผันหรือเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการเติมอากาศขนาด MNBs ในรูปแบบต่างๆ แบบต่อเนื่องหรือแบบเป็นช่วงเวลาขณะทำการทดลอง (Step-feed of MNBs aeration)

บรรณานุกรม

- [1] Samsami, S., M. Mohamadizani, M.-H. Sarrafzadeh, E.R. Rene, and M. Firoozbahr. (2020). Recent advances in the treatment of dye-containing wastewater from textile industries: Overview and perspectives. **Process Safety and Environmental Protection**, **143**, 138-163.
- [2] Abdi, J., M. Vossoughi, N.M. Mahmoodi, and I. Alemzadeh. (2017). Synthesis of metal-organic framework hybrid nanocomposites based on GO and CNT with high adsorption capacity for dye removal. **Chemical Engineering Journal**, **326**, 1145-1158.
- [3] Rajoriya, S., S. Bargole, S. George, and V.K. Saharan. (2018). Treatment of textile dyeing industry effluent using hydrodynamic cavitation in combination with advanced oxidation reagents. **Journal of Hazardous Materials**, **344**, 1109-1115.
- [4] Katheresan, V., J. Kansedo, and S.Y. Lau. (2018). Efficiency of various recent wastewater dye removal methods: A review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, **6**(4), 4676-4697.
- [5] Popli, S. and U.D. Patel. (2015). Destruction of azo dyes by anaerobic-aerobic sequential biological treatment: a review. **International Journal of Environmental Science and Technology**, **12**(1), 405-420.
- [6] Akpan, U.G. and B.H. Hameed. (2009). Parameters affecting the photocatalytic degradation of dyes using TiO₂-based photocatalysts: A review. **Journal of Hazardous Materials**, **170**(2), 520-529.
- [7] Buthelezi, P., A. Olaniran, and B. Pillay. (2012). Textile Dye Removal from Wastewater Effluents Using Biofloculants Produced by Indigenous Bacterial Isolates. **Molecules (Basel, Switzerland)**, **17**, 14260-74.
- [8] Poblete, R., E. Cortes, G. Salihoglu, and N.K. Salihoglu. (2020). Ultrasound and heterogeneous photocatalysis for the treatment of vinasse from pisco production. **Ultrasonics Sonochemistry**, **61**, 104825.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [9] Khan, A.A. and Q. Husain. (2007). Decolorization and removal of textile and non-textile dyes from polluted wastewater and dyeing effluent by using potato (*Solanum tuberosum*) soluble and immobilized polyphenol oxidase. **Bioresource Technology**, **98**(5), 1012-1019.
- [10] Buthelezi, P., A. Olaniran, and B. Pillay. (2012). Textile Dye Removal from Wastewater Effluents Using Biofloculants Produced by Indigenous Bacterial Isolates. **Molecules (Basel, Switzerland)**, **17**, 14260-74.
- [11] Iqbal, A., N. Ali, Z.-H. Shang, N.H. Malik, M.M.U. Rehman, W. Sajjad, M.L.U. Rehman, and S. Khan. (2022). Decolorization and toxicity evaluation of simulated textile effluent via natural microbial consortia in attached growth reactors. **Environmental Technology & Innovation**, **26**, 102284.
- [12] Fu, Y. and T. Viraraghavan. (2001). Fungal decolorization of dye wastewaters: a review. **Bioresource Technology**, **79**(3), 251-262.
- [13] Kumar, A., U. Dixit, K. Singh, S. Gupta, and M. Beg, *Structure and Properties of Dyes and Pigments*. 2021. p. 1-19.
- [14] El-Sikaily, A., A. Khaled, and A. El Nemr, *Textile Dyes Xenobiotic and Their Harmful Effect*. 2012. p. 31-64.
- [15] Fobiri, G. (2022). Synthetic Dye Application in Textiles: A Review on the Efficacies and Toxicities Involved. **Textile & Leather Review**, **5**, 180-198.
- [16] Zerín, I., N. Farzana, A.S. Muhammad Sayem, D. Anang, and J. Haider, *Potentials of Natural Dyes for Textile Applications* <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128035818116686>. 2019.
- [17] Samsami, S., M. Mohamadizani, M.-H. Sarrafzadeh, E.R. Rene, and M. Firoozbahr. (2020). Recent advances in the treatment of dye-containing wastewater from textile industries: Overview and perspectives. **Process Safety and Environmental Protection**, **143**, 138-163.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [18] Dulo, B., K. Phan, J. Githaiga, K. Raes, and S. De Meester. (2021). Natural Quinone Dyes: A Review on Structure, Extraction Techniques, Analysis and Application Potential. **Waste and Biomass Valorization**, 12(12), 6339-6374.
- [19] Li, H.-h., Y.-t. Wang, Y. Wang, H.-x. Wang, K.-k. Sun, and Z.-m. Lu. (2019). Bacterial degradation of anthraquinone dyes. **Journal of Zhejiang University-SCIENCE B**, 20(6), 528-540.
- [20] Singhee, D., *Review on Natural Dyes for Textiles from Wastes*. 2020.
- [21] Bhute, A. (2012). Plant based dyes and mordant: A Review. **Journal of Natural Products and Plant Resources**.
- [22] Samanta, P., *A Review on Application of Natural Dyes on Textile Fabrics and Its Revival Strategy*. 2020.
- [23] Benkhaya, S., S. Harfi, and A. Elharfi. (2017). Classifications, properties and applications of textile dyes: A review.
- [24] Katheresan, V., J. Kannedo, and S.Y. Lau. (2018). Efficiency of various recent wastewater dye removal methods: A review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, 6(4), 4676-4697.
- [25] Ajmal, A., I. Majeed, R.N. Malik, H. Idriss, and M.A. Nadeem. (2014). Principles and mechanisms of photocatalytic dye degradation on TiO₂ based photocatalysts: a comparative overview. **RSC Advances**, 4(70), 37003-37026.
- [26] Suresh, S. (2015). Treatment of Textile Dye Containing Effluents. **Current Environmental Engineering**, 1, 162-184.
- [27] Lellis, B., C.Z. Fávoro-Polonio, J.A. Pamphile, and J.C. Polonio. (2019). Effects of textile dyes on health and the environment and bioremediation potential of living organisms. **Biotechnology Research and Innovation**, 3(2), 275-290.
- [28] Slama, H., A. Chenari Bouket, Z. Pourhassan, F. Alenezi, A. Silini, H. Cherif-Silini, T. Oszako, L. Luptakova, P. Golinska, and B. Lassaad. (2021). Diversity of Synthetic Dyes from Textile Industries, Discharge Impacts and Treatment Methods.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [29] Manzoor, D. and M. Sharma, *Impact of Textile Dyes on Human Health and Environment*. 2020. p. 162-169.
- [30] Al-Tohamy, R., S.S. Ali, F. Li, K.M. Okasha, Y.A.G. Mahmoud, T. Elsamahy, H. Jiao, Y. Fu, and J. Sun. (2022). A critical review on the treatment of dye-containing wastewater: Ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, **231**, 113160.
- [31] Sardar, M., M. Manna, M. Maharana, and S. Sen, *Remediation of Dyes from Industrial Wastewater Using Low-Cost Adsorbents*. 2021. p. 377-403.
- [32] Kumar, P., R. Agnihotri, K. Wasewar, H. Uslu, and C. Yoo. (2012). Status of adsorptive removal of dye from textile industry effluent. **Desalination and Water Treatment**, **50**, 226-244.
- [33] Donkadokula, N.Y., A.K. Kola, I. Naz, and D. Saroj. (2020). A review on advanced physico-chemical and biological textile dye wastewater treatment techniques. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, **19**(3), 543-560.
- [34] Saratale, R.G., G.D. Saratale, J.-S. Chang, and S. Govindwar. (2011). Bacterial Decolorization and Degradation of Azo Dyes: A Review. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, **42**, 138-157.
- [35] Ramachandra, T.V., A. N, and K. Rd. (2005). Biosorption: Techniques and Mechanisms. **CES Technical Report 110**.
- [36] Sivarajasekar, N. and B. Rajoo. (2015). Agriculture waste biomass valorisation for cationic dyes sequestration: A concise review. **Journal of Chemical and Pharmaceutical Research**, **2015**, 737-748.
- [37] Yu, Z. and X. Wen. (2005). Screening and identification of yeasts for decolorizing synthetic dyes in industrial wastewater. **International Biodeterioration & Biodegradation**, **56**(2), 109-114.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [38] Saharan, V.K., D.V. Pinjari, P.R. Gogate, and A.B. Pandit, *Chapter 3 - Advanced Oxidation Technologies for Wastewater Treatment: An Overview*, in *Industrial Wastewater Treatment, Recycling and Reuse*, V.V. Ranade and V.M. Bhandari, Editors. 2014, Butterworth-Heinemann: Oxford. p. 141-191.
- [39] Babuponnusami, A. and K. Muthukumar. (2014). A review on Fenton and improvements to the Fenton process for wastewater treatment. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, 2(1), 557-572.
- [40] Khan, S., M. Sayed, M. Sohail, L.A. Shah, and M.A. Raja, *Chapter 6 - Advanced Oxidation and Reduction Processes*, in *Advances in Water Purification Techniques*, S. Ahuja, Editor. 2019, Elsevier. p. 135-164.
- [41] Din, M.I., R. Khalid, J. Najeeb, and Z. Hussain. (2021). Fundamentals and photocatalysis of methylene blue dye using various nanocatalytic assemblies-a critical review. **Journal of Cleaner Production**, 298, 126567.
- [42] Bhuyar, K.D. *Design, Fabrication Application and Advantages of Nanofiltration Unit*. 2015.
- [43] Shindhal, T., P. Rakholiya, S. Varjani, A. Pandey, H. Ngo, W. Guo, Y. Ng, and M. Taherzadeh. (2020). A critical review on advances in the practices and perspectives for the treatment of dye industry wastewater. **Bioengineered**, 12, 70-87.
- [44] J, V., S.J. Basha, and J. Jegan. (2013). A review on efficacious methods to decolorize reactive Azo Dye. **Journal of Urban and Environmental Engineering**, 7, 30-47.
- [45] Sirirerkratana, K., P. Kemacheevakul, and S. Chuangchote. (2019). Color removal from wastewater by photocatalytic process using titanium dioxide-coated glass, ceramic tile, and stainless steel sheets. **Journal of Cleaner Production**, 215, 123-130.
- [46] Chong, M.N., Y.J. Cho, P.E. Poh, and B. Jin. (2015). Evaluation of Titanium dioxide photocatalytic technology for the treatment of reactive Black 5 dye in synthetic and real greywater effluents. **Journal of Cleaner Production**, 89, 196-202.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [47] Chatterjee, A. (2010). Properties improvement of PMMA using nano TiO₂. **Journal of Applied Polymer Science**, **118**, 2890-2897.
- [48] Bangera, M., R. Kotian, and R. N. (2020). Effect of titanium dioxide nanoparticle reinforcement on flexural strength of denture base resin: A systematic review and meta-analysis. **The Japanese dental science review**, **56**, 68-76.
- [49] Chen, Z., S. Han, S. Zhou, H. Feng, Y. Liu, and G. Jia. (2020). Review of health safety aspects of titanium dioxide nanoparticles in food application. **NanoImpact**, **18**, 100224.
- [50] Turtoi, M. (2013). Ultraviolet light potential for wastewater disinfection. **Annals. Food Science and Technology**, **14**, 153-164.
- [51] Gallagher, R.P. and T.K. Lee. (2006). Adverse effects of ultraviolet radiation: A brief review. **Progress in Biophysics and Molecular Biology**, **92**(1), 119-131.
- [52] Rajagopal, S., B. Paramasivam, and K. Muniyasamy. (2020). Photocatalytic removal of cationic and anionic dyes in the textile wastewater by H₂O₂ assisted TiO₂ and micro-cellulose composites. **Separation and Purification Technology**, **252**, 117444.
- [53] Gnanaprakasam, A., V.M. Sivakumar, and M. Thirumarimurugan. (2015). Influencing Parameters in the Photocatalytic Degradation of Organic Effluent via Nanometal Oxide Catalyst: A Review. **Indian Journal of Materials Science**, **2015**, 1-16.
- [54] Rajabi, H.R., O. Khani, M. Shamsipur, and V. Vatanpour. (2013). High-performance pure and Fe₃₊-ion doped ZnS quantum dots as green nanophotocatalysts for the removal of malachite green under UV-light irradiation. **J Hazard Mater**, **250-251**, 370-8.
- [55] Khan, I., K. Saeed, I. Zekker, B. Zhang, A. Hendi, A. Ahmad, S. Ahmad, Zada, H. Ahmad, L. Shah, T. Shah, and I. Khan. (2022). Review on Methylene Blue: Its Properties, Uses, Toxicity and Photodegradation. **Water**, **14**, 242.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [56] Karimi, L., S. Zohoori, and M.E. Yazdanshenas. (2014). Photocatalytic degradation of azo dyes in aqueous solutions under UV irradiation using nano-strontium titanate as the nanophotocatalyst. **Journal of Saudi Chemical Society**, **18**(5), 581-588.
- [57] Xiao, Y., S. Xu, Z. Li, X. An, L. Zhou, Y. Zhang, and F.Q. Shiang. (2010). Progress of applied research on TiO₂ photocatalysis-membrane separation coupling technology in water and wastewater treatments. **Chinese Science Bulletin**, **55**(14), 1345-1353.
- [58] Ren, G., H. Han, Y. Wang, S. Liu, J. Zhao, X. Meng, and Z. Li. (2021). Recent Advances of Photocatalytic Application in Water Treatment: A Review. **Nanomaterials**, **11**, 1804.
- [59] Stojadinović, S., R. Vasilčić, N. Radić, N. Tadić, P. Stefanov, and B. Grbić. (2016). The formation of tungsten doped Al₂O₃/ZnO coatings on aluminum by plasma electrolytic oxidation and their application in photocatalysis. **Applied Surface Science**, **377**, 37-43.
- [60] Asiri, A.M., M.S. Al-Amoudi, T.A. Al-Talhi, and A.D. Al-Talhi. (2011). Photodegradation of Rhodamine 6G and phenol red by nanosized TiO₂ under solar irradiation. **Journal of Saudi Chemical Society**, **15**(2), 121-128.
- [61] Jiang, L., Y. Wang, and C. Feng. (2012). Application of Photocatalytic Technology in Environmental Safety. **Procedia Engineering**, **45**, 993-997.
- [62] Lin, L., H. Wang, H. Luo, and P. Xu. (2015). Enhanced photocatalysis using side-glowing optical fibers coated with Fe-doped TiO₂ nanocomposite thin films. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**, **307-308**, 88-98.
- [63] Lin, L., W. Jiang, L. Chen, P. Xu, and H. Wang. (2020). Treatment of Produced Water with Photocatalysis: Recent Advances, Affecting Factors and Future Research Prospects. **Catalysts**, **10**, 924.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [64] Khalil, L.B., M.W. Rophael, and W.E. Mourad. (2002). The removal of the toxic Hg(II) salts from water by photocatalysis. **Applied Catalysis B: Environmental**, **36**(2), 125-130.
- [65] Botta, S.G., J.A. Navío, M.a.C. Hidalgo, G.M. Restrepo, and M.I. Litter. (1999). Photocatalytic properties of ZrO₂ and Fe/ZrO₂ semiconductors prepared by a sol-gel technique. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**, **129**(1), 89-99.
- [66] Kanakaraju, D., N. Rusydah bt Mohamad Shahdad, Y.-C. Lim, and A. Pace. (2019). Concurrent removal of Cr(III), Cu(II), and Pb(II) ions from water by multifunctional TiO₂/Alg/FeNPs beads. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, **14**, 100176.
- [67] Ji, B., W. Zhao, J. Duan, L. Fu, L. Ma, and Z. Yang. (2020). Immobilized Ag₃PO₄/GO on 3D nickel foam and its photocatalytic degradation of norfloxacin antibiotic under visible light. **RSC Advances**, **10**, 4427-4435.
- [68] Cao, Y., X. Lei, Q. Chen, C. Kang, W. Li, and B. Liu. (2018). Enhanced photocatalytic degradation of tetracycline hydrochloride by novel porous hollow cube ZnFe₂O₄. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**, **364**, 794-800.
- [69] Nasr, M., R. Viter, C. Eid, R. Habchi, P. Miele, and M. Bechelany. (2018). Optical and structural properties of Al₂O₃ doped ZnO nanotubes prepared by ALD and their photocatalytic application. **Surface and Coatings Technology**, **343**, 24-29.
- [70] Lopez-Alvarez, B., R.A. Torres-Palma, and G. Peñuela. (2011). Solar photocatalytic treatment of carbofuran at lab and pilot scale: Effect of classical parameters, evaluation of the toxicity and analysis of organic by-products. **Journal of Hazardous Materials**, **191**(1), 196-203.
- [71] Lannoy, A., R. Bleta, C. Machut, A. Addad, E. Monflier, and A. Ponchel. (2017). Cyclodextrin-Directed Synthesis of Gold-Modified TiO₂ Materials and Evaluation of Their Photocatalytic Activity in the Removal of a Pesticide from Water: Effect of Porosity and Particle Size. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, **5**.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [72] Navas, D., S. Fuentes, A. Castro-Alvarez, and E. Chávez-Ángel. (2021). Review on Sol-Gel Synthesis of Perovskite and Oxide Nanomaterials. **Gels**, **7**, 275.
- [73] Aguilar, G., *Introductory Chapter: A Brief Semblance of the Sol-Gel Method in Research*. 2018.
- [74] Sadeek, S.A., E.A. Mohammed, M. Shaban, M.T.H. Abou Kana, and N.A. Negm. (2020). Synthesis, characterization and catalytic performances of activated carbon-doped transition metals during biofuel production from waste cooking oils. **Journal of Molecular Liquids**, **306**, 112749.
- [75] Naji, S.Z. and C.T. Tye. (2022). A review of the synthesis of activated carbon for biodiesel production: Precursor, preparation, and modification. **Energy Conversion and Management: X**, **13**, 100152.
- [76] Kavadiya, S. and P. Biswas. (2018). Electrospray deposition of biomolecules: Applications, challenges, and recommendations. **Journal of Aerosol Science**, **125**, 182-207.
- [77] Castrovilli, M.C., P. Bolognesi, J. Chiarinelli, L. Avaldi, A. Cartoni, P. Calandra, E. Tempesta, M.T. Giardi, A. Antonacci, F. Arduini, and V. Scognamiglio. (2020). Electrospray deposition as a smart technique for laccase immobilisation on carbon black-nanomodified screen-printed electrodes. **Biosensors and Bioelectronics**, **163**, 112299.
- [78] Altmann, K., R.D. Schulze, and J. Friedrich. (2014). Polymer deposition morphology by electrospray deposition - Modifications through distance variation. **Thin Solid Films**, **564**, 269-276.
- [79] Chalapathi, U., S.-H. Park, and W.J. Choi. (2021). Two-step chemical bath deposition enhanced mobility of PbS thin films. **Materials Science in Semiconductor Processing**, **136**, 106147.
- [80] Munna, F.T., V. Selvanathan, K. Sobayel, G. Muhammad, N. Asim, N. Amin, K. Sopian, and M. Akhtaruzzaman. (2021). Diluted chemical bath deposition of CdZnS as prospective buffer layer in CIGS solar cell. **Ceramics International**, **47**(8), 11003-11009.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [81] Oviroh, P., R. Akbarzadeh, D. Pan, R. Alfred, M. Coetzee, T.-C. Jen, and R. Coetzee. (2019). New Development of Atomic Layer Deposition: Processes, Methods, and Applications. **Science and Technology of Advanced Materials**.
- [82] Mavukkandy, M.O., S.A. McBride, D.M. Warsinger, N. Dizge, S.W. Hasan, and H.A. Arafat. (2020). Thin film deposition techniques for polymeric membranes– A review. **Journal of Membrane Science**, **610**, 118258.
- [83] Chinavinijkul, P., K. Riansuwan, P. Kiratisin, S. Srisang, and N. Nasongkla. (2021). Dip- and Spray-coating of Schanz pin with PLA and PLA nanosphere for prolonged antibacterial activity. **Journal of Drug Delivery Science and Technology**, **65**, 102667.
- [84] Gavrilović, T.V., D.J. Jovanović, and M.D. Dramićanin, *Chapter 2 - Synthesis of Multifunctional Inorganic Materials: From Micrometer to Nanometer Dimensions*, in *Nanomaterials for Green Energy*, B.A. Bhanvase, et al., Editors. 2018, Elsevier. p. 55-81.
- [85] Pedanekar, R.S., S.K. Shaikh, and K.Y. Rajpure. (2020). Thin film photocatalysis for environmental remediation: A status review. **Current Applied Physics**, **20**(8), 931-952.
- [86] Huang, K., Y. Xiu, and H. Zhu. (2015). Removal of hexavalent chromium from aqueous solution by crosslinked mangosteen peel biosorbent. **International Journal of Environmental Science and Technology**, **12**(8), 2485-2492.
- [87] Ioannidou, O. and A. Zabaniotou. (2007). Agricultural residues as precursors for activated carbon production—A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, **11**(9), 1966-2005.
- [88] Jjagwe, J., P.W. Olupot, E. Menya, and H.M. Kalibbala. (2021). Synthesis and Application of Granular Activated Carbon from Biomass Waste Materials for Water Treatment: A Review. **Journal of Bioresources and Bioproducts**, **6**(4), 292-322.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [89] Mustafa, R. and E. Asmatulu. (2020). Preparation of activated carbon using fruit, paper and clothing wastes for wastewater treatment. **Journal of Water Process Engineering**, **35**, 101239.
- [90] Jaria, G., V. Calisto, C.P. Silva, M.V. Gil, M. Otero, and V.I. Esteves. (2019). Obtaining granular activated carbon from paper mill sludge - A challenge for application in the removal of pharmaceuticals from wastewater. **Sci Total Environ**, **653**, 393-400.
- [91] Bedia, J., M. Peñas-Garzón, A. Gómez-Avilés, J. Rodriguez, and C. Belver. (2020). Review on Activated Carbons by Chemical Activation with FeCl₃. **C**, **6**.
- [92] Karahan, H.E., C. Wiraja, C. Xu, J. Wei, W. Yilei, L. Wang, F. Liu, and Y. Chen. (2018). Graphene Materials in Antimicrobial Nanomedicine: Current Status and Future Perspectives. **Advanced Healthcare Materials**, **7**, 1701406.
- [93] Dias, J.M., M.C.M. Alvim-Ferraz, M.F. Almeida, J. Rivera-Utrilla, and M. Sánchez-Polo. (2007). Waste materials for activated carbon preparation and its use in aqueous-phase treatment: A review. **Journal of Environmental Management**, **85**(4), 833-846.
- [94] Rashidi, N.A. and S. Yusup. (2017). A review on recent technological advancement in the activated carbon production from oil palm wastes. **Chemical Engineering Journal**, **314**, 277-290.
- [95] González-García, P. (2018). Activated carbon from lignocellulosics precursors: A review of the synthesis methods, characterization techniques and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, **82**, 1393-1414.
- [96] Yahya, M., M. Mansor, W. Zolkarnaini, N. Rusli, A. Aminuddin, K. Mohamad, F. Sabhan, A. Atik, and L. Ozair, *A brief review on activated carbon derived from agriculture by-product*. Vol. 1972. 2018. 030023.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [97] Yagub, M.T., T.K. Sen, S. Afroze, and H.M. Ang. (2014). Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: A review. **Advances in Colloid and Interface Science**, **209**, 172-184.
- [98] Shahrabadi, A., A. Daghandan, and M. Arabiyoun. (2022). Experimental investigation of the adsorption process of the surfactant-nanoparticle combination onto the carbonate reservoir rock surface in the enhanced oil recovery (EOR) process. **Chemical Thermodynamics and Thermal Analysis**, **6**, 100036.
- [99] Dev, V.V., K.K. Nair, G. Baburaj, and K.A. Krishnan. (2022). Pushing the boundaries of heavy metal adsorption: A commentary on strategies to improve adsorption efficiency and modulate process mechanisms. **Colloid and Interface Science Communications**, **49**, 100626.
- [100] Benjelloun, M., Y. Miyah, G. Akdemir Evrendilek, F. Zerrouq, and S. Lairini. (2021). Recent Advances in Adsorption Kinetic Models: Their Application to Dye Types. **Arabian Journal of Chemistry**, **14**(4), 103031.
- [101] Alaqarbeh, M. (2021). Adsorption Phenomena: Definition, Mechanisms, and Adsorption Types: Short Review. **13**, 43-51.
- [102] Li, D., Z. Xiao, and T. Aftab. (2019). Applications of Micro-nano Bubble Technology in Environmental Pollution Control. **Micro & Nano Letters**, **14**.
- [103] Agarwal, A., W.J. Ng, and Y. Liu. (2011). Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment. **Chemosphere**, **84**(9), 1175-1180.
- [104] Azevedo, A., H. Oliveira, and J. Rubio. (2019). Bulk nanobubbles in the mineral and environmental areas: Updating research and applications. **Advances in Colloid and Interface Science**, **271**, 101992.
- [105] Singh, B., N. Shukla, C.-H. Cho, B. Kim, M.-H. Park, and K. Kim. (2021). Effect and application of micro- and nanobubbles in water purification. **Toxicology and Environmental Health Sciences**, **13**.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [106] Stamm, C., K. Räsänen, F.J. Burdon, F. Altermatt, J. Jokela, A. Joss, M. Ackermann, and R.I.L. Eggen, Chapter Four - Unravelling the Impacts of Micropollutants in Aquatic Ecosystems: Interdisciplinary Studies at the Interface of Large-Scale Ecology, in *Advances in Ecological Research*, A.J. Dumbrell, R.L. Kordas, and G. Woodward, Editors. 2016, Academic Press. p. 183-223.
- [107] Basha, A., A. Gebreyohannes, R.A. Tufa, D. Bekele, E. Curcio, and L. Giorno. (2017). Removal of Emerging Micropollutants by Activated Sludge Process and Membrane Bioreactors and the Effects of Micropollutants on Membrane Fouling: A Review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5.
- [108] Kumar, N.M., M.C. Sudha, T. Damodharam, and S. Varjani, Chapter 3 - Micropollutants in surface water: Impacts on the aquatic environment and treatment technologies, in *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*, S. Varjani, et al., Editors. 2020, Elsevier. p. 41-62.
- [109] Kang, Y.-M., M.-K. Kim, T. Kim, T.-K. Kim, and K.-D. Zoh. (2019). Occurrence and Fate of Micropollutants in Private Wastewater Treatment Facility (WTF) and Their Impact on Receiving Water. *Environmental Management*, 64(5), 650-660.
- [110] Hossain, A., *Micropollutants in Wastewater: Fate and Removal Processes*. 2016.
- [111] Luo, Y., W. Guo, H.H. Ngo, L.D. Nghiem, F.I. Hai, J. Zhang, S. Liang, and X.C. Wang. (2014). A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment. *Science of The Total Environment*, 473-474, 619-641.
- [112] Kumar, K.V., K. Porkodi, and F. Rocha. (2008). Langmuir–Hinshelwood kinetics – A theoretical study. *Catalysis Communications*, 9(1), 82-84.
- [113] Sirirerkratana, K., P. Kemacheevakul, and S. Chuangchote. (2019). Color removal from wastewater by photocatalytic process using titanium dioxide-coated glass, ceramic tile, and stainless steel sheets. *Journal of Cleaner Production*, 215, 123-130.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [114] Chong, M.N., Y.J. Cho, P.E. Poh, and B. Jin. (2015). Evaluation of Titanium dioxide photocatalytic technology for the treatment of reactive Black 5 dye in synthetic and real greywater effluents. **Journal of Cleaner Production**, **89**, 196-202.
- [115] Kumar, A. (2017). A Review on the Factors Affecting the Photocatalytic Degradation of Hazardous Materials. **Material Science & Engineering International Journal**, **1**.
- [116] Grimalt-Aleman, A., C. Etlar, K. Asimakopoulos, I.V. Skiadas, and H.N. Gavala. (2021). ORP control for boosting ethanol productivity in gas fermentation systems and dynamics of redox cofactor NADH/NAD⁺ under oxidative stress. **Journal of CO2 Utilization**, **50**, 101589.
- [117] Du, C., H. Yan, Y. Zhang, Y. Li, and Z. Cao. (2006). Use of oxidoreduction potential as an indicator to regulate 1,3-propanediol fermentation by *Klebsiella pneumoniae*. **Applied Microbiology and Biotechnology**, **69**(5), 554-563.
- [118] Sethia, G. and A. Sayari. (2016). Activated carbon with optimum pore size distribution for hydrogen storage. **Carbon**, **99**, 289-294.
- [119] Li, L., F. Sun, J. Gao, L. Wang, X. Pi, and G. Zhao. (2018). Broadening the pore size of coal-based activated carbon: Via a washing-free chem-physical activation method for high-capacity dye adsorption. **RSC Advances**, **8**, 14488-14499.
- [120] Akpan, U.G. and B.H. Hameed. (2009). Parameters affecting the photocatalytic degradation of dyes using TiO₂-based photocatalysts: A review. **Journal of Hazardous Materials**, **170**(2), 520-529.
- [121] Padmini, M., T. Balaganapathi, and P. Thilakan. (2022). Rutile-TiO₂: Post heat treatment and its influence on the photocatalytic degradation of MB dye. **Ceramics International**, **48**(12), 16685-16694.
- [122] Aliaa Razali, N. and S. Amira Othman. (2022). Sol-gel technique in study of titanium dioxide (TiO₂) photocatalytic activity- a short review. **Materials Today: Proceedings**.

บรรณานุกรม (ต่อ)

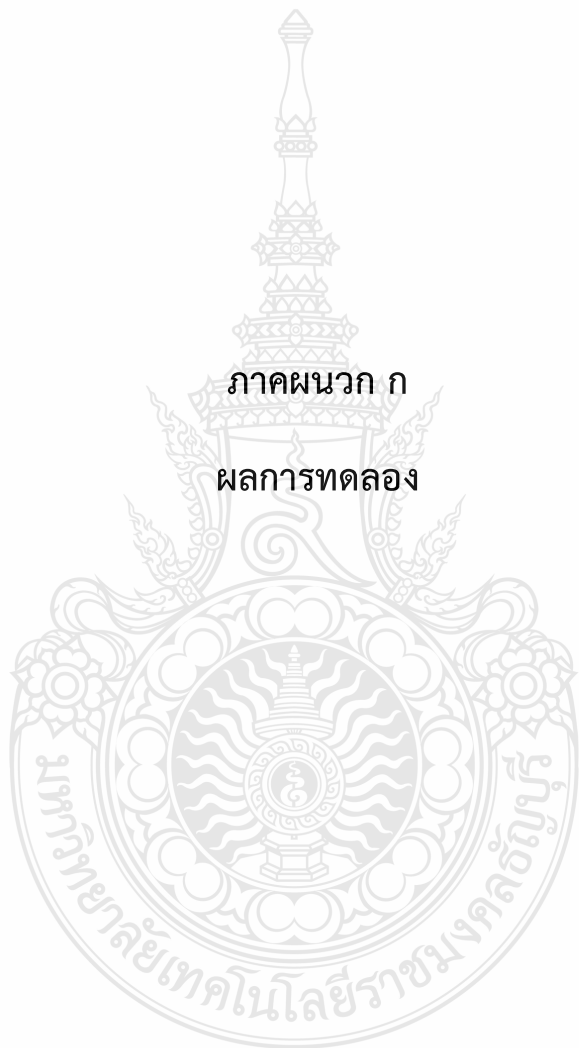
- [123] Arcanjo, G.S., A.H. Mounteer, C.R. Bellato, L.M.M.d. Silva, S.H. Brant Dias, and P.R.d. Silva. (2018). Heterogeneous photocatalysis using TiO₂ modified with hydrocalcite and iron oxide under UV-visible irradiation for color and toxicity reduction in secondary textile mill effluent. **Journal of Environmental Management**, **211**, 154-163.
- [124] Awais, M., S. Khursheed, R. Tehreem, Sirajuddin, Y.S. Mok, and G.U. Siddiqui. (2022). pH regulated rapid photocatalytic degradation of methylene blue dye via niobium-nitrogen co-doped titanium dioxide nanostructures under sunlight. **Applied Catalysis A: General**, **643**, 118764.
- [125] Rojviroon, O. and T. Rojviroon. (2022). Photocatalytic process augmented with micro/nano bubble aeration for enhanced degradation of synthetic dyes in wastewater. **Water Resources and Industry**, **27**, 100169.
- [126] United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA). 2022. National Recommended Water Quality Criteria - Aquatic Life Criteria. U.S. EPA, Washington, DC. Available at: <https://www.epa.gov/wqc/national-recommended-water-quality-criteria-human-health-criteria-table>.
- [127] United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA). 2022. National Recommended Water Quality Criteria - Aquatic Life Criteria. U.S. EPA, Washington, DC. Available at: <https://www.epa.gov/wqc/national-recommended-water-quality-criteria-human-health-criteria-table>.
- [128] Abdel-Latif, H.M.R., M.A.O. Dawood, S. Menanteau-Ledouble, and M. El-Matbouli. (2020). Environmental transformation of n-TiO₂ in the aquatic systems and their ecotoxicity in bivalve mollusks: A systematic review. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, **200**, 110776.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [129] Della Torre, C., T. Balbi, G. Grassi, G. Frenzilli, M. Bernardeschi, A. Smerilli, P. Guidi, L. Canesi, M. Nigro, F. Monaci, V. Scarcelli, L. Rocco, S. Focardi, M. Monopoli, and I. Corsi. (2015). Titanium dioxide nanoparticles modulate the toxicological response to cadmium in the gills of *Mytilus galloprovincialis*. *Journal of Hazardous Materials*, 297, 92-100.
- [130] Oriol, R., I. Sirés, E. Brillas, and A.R. De Andrade. (2019). A hybrid photoelectrocatalytic/photoelectro-Fenton treatment of Indigo Carmine in acidic aqueous solution using TiO₂ nanotube arrays as photoanode. ***Journal of Electroanalytical Chemistry*, 847**, 113088.
- [131] Abdel-Messih, M., M. Ahmed, A. Soltan, and S. Anis. (2016). Facile approach for homogeneous dispersion of metallic silver nanoparticles on the surface of mesoporous titania for photocatalytic degradation of methylene blue and indigo carmine dyes. ***Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 335**.
- [132] Jawad, A.H., N.S.A. Mubarak, M.A.M. Ishak, K. Ismail, and W.I. Nawawi. (2016). Kinetics of photocatalytic decolorization of cationic dye using porous TiO₂ film. ***Journal of Taibah University for Science*, 10(3)**, 352-362.
- [133] Farouq, R. (2018). Investigation of the kinetics and optimization of photocatalytic degradation of methylene blue. ***Journal of the Chinese Chemical Society*, 65**.
- [134] Sangal, V., A. Garg, and P. Bajpai. (2015). Decolorization and degradation of Reactive Black 5 dye by photocatalysis: modeling, optimization and kinetic study. ***Desalination and water treatment*, 57**.
- [135] Haroon, H. and K. Majid. (2020). MnO₂ nanosheets supported metal-organic framework MIL-125(Ti) towards efficient visible light photocatalysis: Kinetic and mechanistic study. ***Chemical Physics Letters*, 745**, 137283.

ภาคผนวก





ตารางที่ ก.1 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 μM ของชุดการทดลอง

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	0.23	0.24	0.24	13.12	13.32	13.22	13.22	1.00
10	0.17	0.17	0.18	10.10	10.00	10.20	10.10	0.76
30	0.15	0.14	0.15	8.84	8.48	8.79	8.70	0.66
60	0.12	0.13	0.12	7.53	7.68	7.53	7.58	0.57
90	0.10	0.10	0.10	6.27	6.27	6.57	6.37	0.48
120	0.09	0.08	0.08	5.71	5.51	5.56	5.60	0.42
180	0.06	0.05	0.05	4.20	4.00	4.05	4.09	0.31
eff (%)				67.95	69.95	69.34	69.09	

ตารางที่ ก.2 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 25 μM ของชุดการทดลอง

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	0.49	0.51	0.52	26.21	27.22	27.42	26.95	1.00
10	0.40	0.41	0.40	21.68	21.88	21.48	21.68	0.80
30	0.35	0.36	0.36	19.06	19.21	19.31	19.19	0.71
60	0.29	0.31	0.32	16.04	16.74	17.45	16.74	0.62
90	0.27	0.27	0.27	14.73	14.83	14.78	14.78	0.55
120	0.24	0.24	0.24	13.42	13.52	13.47	13.47	0.50
180	0.17	0.22	0.19	9.94	12.46	10.65	11.02	0.41
eff (%)				62.06	54.21	61.16	59.11	

ตารางที่ ก.3 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 μM ของชุดการทดลอง

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				C_0^{-1}
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	0.94	0.99	0.99	48.47	51.09	50.94	50.16	1.00
10	0.79	0.80	0.80	41.12	41.52	41.57	41.40	0.83
30	0.71	0.74	0.67	37.09	38.45	34.92	36.82	0.73
60	0.61	0.63	0.57	32.05	33.11	30.19	31.78	0.63
90	0.55	0.56	0.55	29.13	29.48	28.83	29.15	0.58
120	0.45	0.59	0.49	24.05	30.84	25.96	26.95	0.54
180	0.42	0.42	0.43	22.69	22.58	22.79	22.69	0.45
eff (%)				53.20	55.79	55.27	54.78	

ตารางที่ ก.4 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 75 μM ของชุดการทดลอง

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				C_0^{-1}
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	1.47	1.46	1.47	75.31	74.91	75.26	75.16	1.00
10	1.26	1.25	1.26	64.74	64.48	64.53	64.58	0.86
30	1.11	1.12	1.13	56.98	57.63	58.24	57.62	0.77
60	0.95	1.02	1.03	49.38	52.75	52.95	51.69	0.69
90	0.88	0.94	1.01	45.40	48.72	51.94	48.69	0.65
120	0.85	0.87	0.87	44.04	44.89	44.99	44.64	0.59
180	0.75	0.90	0.90	39.00	46.46	46.76	44.07	0.59
eff (%)				48.21	37.98	37.87	41.36	

ตารางที่ ก.5 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 μM ของชุดการทดลอง

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	1.96	1.96	1.96	100.19	100.19	100.14	100.17	1.00
10	1.76	1.76	1.76	90.12	90.12	90.07	90.10	0.90
30	1.64	1.64	1.65	84.07	83.97	84.17	84.07	0.84
60	1.59	1.58	1.58	81.25	80.95	81.00	81.07	0.81
90	1.55	1.55	1.56	79.54	79.44	79.79	79.59	0.79
120	1.50	1.50	1.51	77.02	76.92	77.27	77.07	0.77
180	1.43	1.43	1.43	73.50	73.40	73.40	73.43	0.73
eff (%)				26.64	26.74	26.70	26.69	

ตารางที่ ก.6 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 μM ของชุดการควบคุมที่ 1

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	0.24	0.24	0.24	13.47	13.52	13.42	13.47	1.00
10	0.19	0.19	0.20	10.80	11.10	11.25	11.05	0.82
30	0.17	0.17	0.16	9.64	9.79	9.49	9.64	0.72
60	0.15	0.14	0.14	8.64	8.53	8.43	8.53	0.63
90	0.13	0.13	0.13	7.78	7.73	7.78	7.76	0.58
120	0.12	0.12	0.12	7.38	7.28	7.33	7.33	0.54
180	0.10	0.11	0.11	6.57	6.72	6.82	6.71	0.50
eff (%)				51.22	50.28	49.16	50.22	

ตารางที่ ก.7 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 25 μM ของชุดการควบคุมที่ 1

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	0.49	0.51	0.52	26.21	27.22	27.42	26.95	1.00
10	0.42	0.43	0.42	22.69	22.89	22.53	22.70	0.84
30	0.36	0.37	0.37	19.56	19.71	19.82	19.70	0.73
60	0.34	0.34	0.34	18.20	18.20	18.30	18.24	0.68
90	0.32	0.32	0.32	17.25	17.35	17.30	17.30	0.64
120	0.30	0.30	0.30	16.64	16.54	16.44	16.54	0.61
180	0.28	0.28	0.29	15.64	15.53	15.84	15.67	0.58
eff (%)				40.35	42.92	42.24	41.86	

ตารางที่ ก.8 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 μM ของชุดการควบคุมที่ 1

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	0.94	0.99	0.99	48.47	51.09	50.94	50.16	1.00
10	0.83	0.83	0.83	43.08	43.03	43.08	43.06	0.86
30	0.73	0.74	0.74	38.10	38.45	38.43	38.33	0.76
60	0.69	0.69	0.69	36.13	36.13	36.23	36.17	0.72
90	0.65	0.66	0.65	34.17	34.52	34.27	34.32	0.68
120	0.63	0.64	0.64	33.11	33.36	33.51	33.33	0.66
180	0.61	0.61	0.62	32.25	32.15	32.35	32.25	0.64
eff (%)				33.46	37.06	36.48	35.70	

ตารางที่ ก.9 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 75 μM ของชุดการควบคุมที่ 1

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	1.48	1.48	1.47	75.86	75.71	75.46	75.68	1.00
10	1.28	1.28	1.38	65.74	65.74	70.58	67.35	0.89
30	1.21	1.21	1.20	62.02	62.17	61.92	62.03	0.82
60	1.14	1.14	1.14	58.59	58.59	58.59	58.59	0.77
90	1.08	1.07	1.08	55.57	55.42	55.47	55.49	0.73
120	1.02	1.02	1.02	52.60	52.45	52.55	52.53	0.69
180	0.99	0.99	0.98	51.09	50.99	50.79	50.95	0.67
eff (%)				32.66	32.66	32.70	32.67	

ตารางที่ ก.10 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 μM ของชุดการควบคุมที่ 1

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	2.177	2.115	2.127	110.96	107.84	108.45	109.08	1.00
10	1.939	1.939	1.933	98.98	98.98	98.68	98.88	0.91
30	1.858	1.852	1.851	94.90	94.60	94.55	94.68	0.87
60	1.817	1.813	1.815	92.84	92.63	92.73	92.73	0.85
90	1.758	1.756	1.752	89.86	89.76	89.56	89.73	0.82
120	1.708	1.706	1.708	87.35	87.25	87.35	87.31	0.80
180	1.632	1.631	1.634	83.52	83.47	83.62	83.54	0.77
eff (%)				24.73	22.60	22.89	23.42	

ตารางที่ ก.11 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 μM ของชุดการควบคุมที่ 2

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	0.21	0.22	0.21	12.06	12.31	12.06	12.14	1.00
10	0.17	0.18	0.18	10.00	10.45	10.40	10.28	0.85
30	0.15	0.15	0.15	8.94	8.94	8.89	8.92	0.73
60	0.14	0.14	0.13	8.28	8.33	8.08	8.23	0.68
90	0.12	0.12	0.13	7.43	7.48	7.78	7.56	0.62
120	0.11	0.11	0.11	7.07	6.97	7.07	7.04	0.58
180	0.11	0.11	0.11	6.77	6.92	6.67	6.79	0.56
eff (%)				43.85	43.77	44.68	44.10	

ตารางที่ ก.12 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 25 μM ของชุดการควบคุมที่ 2

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	0.56	0.55	0.56	29.69	29.13	29.38	29.40	1.00
10	0.51	0.51	0.50	26.82	26.76	26.61	26.73	0.91
30	0.48	0.48	0.47	25.46	25.25	25.15	25.29	0.86
60	0.45	0.45	0.45	23.84	23.84	23.84	23.84	0.81
90	0.41	0.41	0.40	21.88	21.78	21.53	21.73	0.74
120	0.39	0.39	0.38	20.77	20.82	20.62	20.74	0.71
180	0.36	0.35	0.36	19.31	19.06	19.41	19.26	0.66
eff (%)				34.95	34.57	33.93	34.49	

ตารางที่ ก.13 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 μM ของชุดการควบคุมที่ 2

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	1.071	1.072	1.074	55.27	55.32	55.42	55.335	1.00
10	0.985	0.987	0.982	50.94	51.04	50.79	50.920	0.92
30	0.921	0.925	0.926	47.71	47.92	47.97	47.865	0.87
60	0.872	0.876	0.879	45.25	45.45	45.60	45.431	0.82
90	0.812	0.816	0.819	42.22	42.43	42.58	42.410	0.77
120	0.775	0.779	0.766	40.36	40.56	39.91	40.278	0.73
180	0.717	0.716	0.713	37.44	37.39	37.24	37.357	0.68
eff (%)				32.26	32.41	32.80	32.49	

ตารางที่ ก.14 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 75 μM ของชุดการควบคุมที่ 2

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	1.55	1.51	1.53	79.44	77.33	78.23	78.33	1.00
10	1.41	1.41	1.40	72.09	72.19	71.89	72.05	0.92
30	1.33	1.33	1.34	68.46	68.51	68.61	68.53	0.87
60	1.27	1.27	1.28	65.44	65.49	65.59	65.51	0.84
90	1.21	1.21	1.20	62.02	62.17	61.92	62.03	0.79
120	1.14	1.13	1.14	58.79	58.39	58.84	58.68	0.75
180	1.07	1.08	1.07	55.27	55.82	55.32	55.47	0.71
eff (%)				30.43	27.81	29.29	29.19	

ตารางที่ ก.15 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 μM ของชุดการควบคุมที่ 2

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	2.04	2.04	2.06	103.91	103.87	105.22	104.34	1.00
10	1.91	1.91	1.90	97.27	97.32	97.22	97.27	0.93
30	1.81	1.82	1.82	92.63	92.73	92.89	92.75	0.89
60	1.76	1.77	1.77	90.12	90.22	90.37	90.23	0.86
90	1.70	1.70	1.71	87.15	87.15	87.40	87.23	0.84
120	1.60	1.62	1.62	82.01	82.66	82.97	82.55	0.79
180	1.54	1.54	1.55	79.04	79.09	79.44	79.19	0.76
eff (%)				23.94	23.86	24.50	24.10	

ตารางที่ ก.16 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 μM ของชุดการควบคุมที่ 3

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	0.22	0.24	0.24	12.51	13.42	13.42	13.12	1.00
10	0.21	0.21	0.21	11.66	11.76	11.76	11.72	0.89
30	0.19	0.19	0.19	10.80	10.75	10.80	10.78	0.82
60	0.16	0.17	0.17	9.59	9.74	9.84	9.73	0.74
90	0.15	0.15	0.15	9.04	8.94	9.04	9.00	0.69
120	0.13	0.14	0.14	7.93	8.28	8.28	8.17	0.62
180	0.12	0.13	0.13	7.48	7.78	7.83	7.70	0.59
eff (%)				40.25	42.03	41.65	41.33	

ตารางที่ ก.17 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 25 μM ของชุดการควบคุมที่ 3

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	0.51	0.52	0.51	26.92	27.27	26.97	27.05	1.00
10	0.46	0.46	0.46	24.60	24.65	24.55	24.60	0.91
30	0.43	0.44	0.43	23.04	23.39	23.09	23.17	0.86
60	0.40	0.41	0.41	21.63	21.78	21.78	21.73	0.80
90	0.38	0.38	0.38	20.37	20.27	20.27	20.30	0.75
120	0.36	0.36	0.36	19.51	19.61	19.56	19.56	0.72
180	0.35	0.35	0.34	18.91	18.81	18.66	18.79	0.69
eff (%)				29.75	31.03	30.81	30.53	

ตารางที่ ก.18 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 μM ของชุดการควบคุมที่ 3

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	1.04	1.05	1.05	53.81	54.31	54.31	54.143	1.00
10	0.99	0.99	0.98	51.04	51.09	50.79	50.971	0.94
30	0.94	0.95	0.95	48.82	48.97	48.97	48.923	0.90
60	0.89	0.90	0.90	46.30	46.46	46.46	46.405	0.86
90	0.84	0.84	0.83	43.48	43.38	43.33	43.400	0.80
120	0.80	0.80	0.80	41.77	41.67	41.72	41.721	0.77
180	0.77	0.76	0.76	39.858	39.757	39.707	39.774	0.73
eff (%)				25.92	26.80	26.89	26.54	

ตารางที่ ก.19 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 75 μM ของชุดการควบคุมที่ 3

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				C_0^{-1}
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	1.47	1.50	1.47	75.21	76.92	75.31	75.81	1.00
10	1.40	1.40	1.40	71.99	72.04	72.04	72.02	0.95
30	1.35	1.35	1.36	69.42	69.47	69.57	69.49	0.92
60	1.30	1.30	1.31	66.90	66.95	67.05	66.97	0.88
90	1.25	1.24	1.24	64.23	63.98	63.83	64.01	0.84
120	1.18	1.19	1.18	60.86	61.01	60.91	60.92	0.80
180	1.13	1.13	1.13	58.34	58.29	58.29	58.31	0.77
eff (%)				22.43	24.22	22.60	23.09	

ตารางที่ ก.20 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 μM ของชุดการควบคุมที่ 3

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				C_0^{-1}
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	2.03	1.98	1.98	103.31	101.25	101.25	101.93	1.00
10	1.89	1.88	1.89	96.41	95.76	96.26	96.14	0.94
30	1.84	1.84	1.84	93.94	93.89	93.89	93.91	0.92
60	1.79	1.79	1.79	91.32	91.68	91.68	91.56	0.90
90	1.75	1.75	1.75	89.56	89.51	89.51	89.53	0.88
120	1.70	1.71	1.70	87.04	87.20	87.04	87.09	0.85
180	1.63	1.64	1.64	83.62	83.72	83.77	83.70	0.82
eff (%)				19.06	17.31	17.26	17.88	

ตารางที่ ก.21 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 μM ของชุดการควบคุมที่ 4

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	0.24	0.24	0.24	13.22	13.52	13.52	13.42	1.00
10	0.22	0.23	0.23	12.31	12.92	12.92	12.71	0.95
30	0.21	0.22	0.22	11.86	12.51	12.51	12.29	0.92
60	0.20	0.21	0.21	11.20	11.81	11.86	11.62	0.87
90	0.19	0.19	0.19	10.75	11.05	11.05	10.95	0.82
120	0.17	0.18	0.18	10.00	10.15	10.15	10.10	0.75
180	0.17	0.17	0.17	9.79	9.64	9.79	9.74	0.73
eff (%)				25.91	28.68	27.56	27.39	

ตารางที่ ก.22 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 25 μM ของชุดการควบคุมที่ 4

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	0.51	0.52	0.52	26.97	27.52	27.52	27.34	1.00
10	0.49	0.52	0.52	25.96	27.47	27.47	26.97	0.99
30	0.50	0.50	0.50	26.26	26.26	26.26	26.26	0.96
60	0.47	0.48	0.48	24.90	25.46	25.46	25.27	0.92
90	0.45	0.45	0.45	23.84	23.84	23.84	23.84	0.87
120	0.42	0.42	0.42	22.28	22.43	22.43	22.38	0.82
180	0.39	0.39	0.39	21.07	21.12	21.07	21.09	0.77
eff (%)				21.85	23.24	23.42	22.84	

ตารางที่ ก.23 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 μM ของชุดการควบคุมที่ 4

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	1.02	1.03	1.01	52.75	52.95	51.94	52.55	1.00
10	0.98	1.00	0.99	50.89	51.44	51.24	51.19	0.97
30	0.95	0.95	0.95	49.38	49.28	49.28	49.31	0.94
60	0.91	0.91	0.91	47.31	46.96	47.01	47.09	0.90
90	0.88	0.88	0.88	45.65	45.70	45.80	45.72	0.87
120	0.85	0.85	0.85	44.24	43.94	43.94	44.04	0.84
180	0.81	0.81	0.81	42.28	42.22	42.28	42.26	0.80
eff (%)				19.86	20.26	18.61	19.58	

ตารางที่ ก.24 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 75 μM ของชุดการควบคุมที่ 4

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	1.54	1.51	1.51	78.94	77.33	77.33	77.86	1.00
10	1.48	1.48	1.48	75.76	76.02	76.02	75.93	0.98
30	1.46	1.47	1.47	75.06	75.26	75.11	75.14	0.97
60	1.42	1.42	1.42	72.89	72.99	72.99	72.96	0.94
90	1.37	1.36	1.37	70.17	69.62	70.07	69.96	0.90
120	1.31	1.32	1.32	67.40	67.56	67.56	67.51	0.87
180	1.26	1.27	1.27	64.74	65.34	65.29	65.12	0.84
eff (%)				15.53	15.50	15.57	16.36	

ตารางที่ ก.25 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 μM ของชุดการควบคุมที่ 4

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				C_0^{-1}
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	2.00	2.03	2.03	101.95	103.51	103.51	102.99	1.00
10	1.98	1.98	1.98	101.25	100.84	100.84	100.98	0.98
30	1.95	1.95	1.94	99.43	99.38	99.23	99.35	0.96
60	1.90	1.91	1.91	97.12	97.42	97.42	97.32	0.94
90	1.84	1.84	1.83	93.79	93.89	93.69	93.79	0.91
120	1.78	1.78	1.78	90.77	90.77	90.77	90.77	0.88
180	1.70	1.71	1.70	87.09	87.25	86.99	87.11	0.85
eff (%)				14.57	15.71	15.96	15.42	

ตารางที่ ก.26 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 μM ของชุดการควบคุมที่ 5

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				C_0^{-1}
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	0.25	0.24	0.24	13.82	13.22	13.22	13.42	1.00
10	0.23	0.23	0.22	12.71	12.76	12.61	12.70	0.95
30	0.21	0.22	0.22	12.11	12.16	12.16	12.14	0.90
60	0.20	0.21	0.20	11.51	11.81	11.61	11.64	0.87
90	0.19	0.19	0.19	11.00	11.10	11.10	11.07	0.82
120	0.19	0.19	0.19	10.85	10.75	10.80	10.80	0.80
180	0.18	0.18	0.18	10.60	10.40	10.50	10.50	0.78
eff (%)				23.32	21.34	20.57	21.77	

ตารางที่ ก.27 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 25 μM ของชุดการควบคุมที่ 5

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	0.54	0.55	0.55	28.63	28.93	28.93	28.83	1.00
10	0.53	0.52	0.52	27.82	27.62	27.62	27.69	0.96
30	0.50	0.50	0.51	26.51	26.51	26.82	26.61	0.92
60	0.48	0.49	0.48	25.56	25.76	25.71	25.67	0.89
90	0.46	0.46	0.47	24.60	24.60	24.90	24.70	0.86
120	0.46	0.45	0.45	24.40	24.20	24.20	24.26	0.84
180	0.45	0.45	0.45	23.74	23.74	23.79	23.76	0.82
eff (%)				17.06	17.93	17.76	17.58	

ตารางที่ ก.28 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 μM ของชุดการควบคุมที่ 5

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	1.09	1.09	1.09	55.97	55.97	55.97	55.973	1.00
10	1.02	1.02	1.03	52.80	52.80	53.10	52.901	0.95
30	1.01	1.01	1.00	52.10	51.99	51.79	51.961	0.93
60	0.99	0.99	0.98	51.24	50.94	50.84	51.004	0.91
90	0.95	0.96	0.97	49.33	49.83	49.98	49.712	0.89
120	0.92	0.92	0.92	47.71	47.76	47.87	47.781	0.85
180	0.91	0.91	0.92	47.21	47.26	47.41	47.294	0.84
eff (%)				15.65	15.56	15.29	15.50	

ตารางที่ ก.29 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 75 μM ของชุดการควบคุมที่ 5

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				C_0^{-1}
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	1.51	1.50	1.50	77.12	77.07	76.92	77.04	1.00
10	1.46	1.45	1.46	75.06	74.56	74.71	74.77	0.97
30	1.43	1.43	1.43	73.40	73.55	73.45	73.46	0.95
60	1.40	1.40	1.40	71.89	71.99	71.94	71.94	0.93
90	1.39	1.38	1.38	71.13	70.88	70.83	70.95	0.92
120	1.37	1.36	1.36	70.07	69.87	69.82	69.92	0.91
180	1.31	1.31	1.31	67.20	67.20	67.20	67.20	0.87
eff (%)				12.86	12.81	12.64	12.77	

ตารางที่ ก.30 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 μM ของชุดการควบคุมที่ 5

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				C_0^{-1}
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	2.00	2.01	2.00	102.10	102.30	102.15	102.19	1.00
10	1.94	1.94	1.94	99.23	99.23	99.23	99.23	0.97
30	1.90	1.90	1.90	97.12	97.22	97.22	97.18	0.95
60	1.85	1.85	1.85	94.35	94.35	94.35	94.35	0.92
90	1.80	1.81	1.80	92.08	92.58	92.08	92.25	0.90
120	1.79	1.79	1.79	91.38	91.43	91.43	91.41	0.89
180	1.78	1.77	1.77	90.82	90.52	90.62	90.65	0.89
eff (%)				11.05	11.52	11.29	11.29	

ตารางที่ ก.31 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 μM ของชุดการควบคุมที่ 6

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.00	0.21	0.21	0.21	12.11	11.81	11.81	11.91	1.00
10.00	0.20	0.20	0.20	11.30	11.30	11.30	11.30	0.95
30.00	0.19	0.19	0.19	10.80	10.80	10.80	10.80	0.91
60.00	0.18	0.18	0.18	10.25	10.25	10.25	10.25	0.86
90.00	0.17	0.17	0.17	10.00	10.00	10.00	10.00	0.84
120.00	0.17	0.17	0.17	9.84	9.84	9.84	9.84	0.83
180.00	0.17	0.17	0.17	9.69	9.69	9.69	9.69	0.81
eff (%)				19.96	17.91	17.91	18.61	

ตารางที่ ก.32 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 25 μM ของชุดการควบคุมที่ 6

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.00	0.52	0.52	0.52	27.67	27.67	27.67	27.67	1.00
10.00	1.00	1.00	0.99	51.79	51.79	51.19	51.59	1.86
30.00	0.92	0.92	0.93	47.87	47.56	48.17	47.87	1.73
60.00	0.87	0.88	0.88	45.15	45.75	45.45	45.45	1.64
90.00	1.00	1.01	1.00	51.79	52.10	51.79	51.89	1.88
120.00	0.92	0.91	0.92	47.56	47.26	47.87	47.56	1.72
180.00	0.46	0.45	0.46	24.35	24.15	24.55	24.35	0.88
eff (%)				12.01	12.74	11.28	12.01	

ตารางที่ ก.33 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 μM ของชุดการควบคุมที่ 6

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.00	1.10	1.10	1.10	56.78	56.78	56.78	56.78	1.00
10.00	2.05	2.05	2.06	104.37	104.67	105.27	104.77	1.85
30.00	1.98	1.99	1.99	101.04	101.35	101.35	101.25	1.78
60.00	1.87	1.86	1.87	95.61	95.00	95.30	95.30	1.68
90.00	1.93	1.93	1.92	98.32	98.63	98.02	98.32	1.73
120.00	1.83	1.81	1.82	93.49	92.58	92.89	92.99	1.64
180.00	0.98	0.98	0.98	50.69	50.48	50.89	50.69	0.89
eff (%)				10.73	11.09	10.38	10.73	

ตารางที่ ก.34 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 75 μM ของชุดการควบคุมที่ 6

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.00	1.53	1.53	1.53	78.38	78.38	78.38	78.38	1.00
10.00	3.20	3.18	3.19	162.38	161.48	161.78	161.88	2.07
30.00	3.11	3.10	3.09	157.85	157.24	156.94	157.35	2.01
60.00	2.95	2.95	2.96	149.69	149.99	150.60	150.09	1.91
90.00	2.83	2.84	2.85	143.95	144.25	144.86	144.35	1.84
120.00	2.77	2.77	2.77	140.63	140.93	140.93	140.83	1.80
180.00	1.38	1.37	1.39	70.83	70.43	71.13	70.80	0.90
eff (%)				9.64	10.15	9.25	9.68	

ตารางที่ ก.35 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 μM ของชุดการควบคุมที่ 6

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.00	2.21	2.21	2.21	112.43	112.73	112.73	112.63	1.00
10.00	2.17	2.17	2.18	110.66	110.61	110.86	110.71	0.98
30.00	2.15	2.15	2.15	109.66	109.66	109.66	109.66	0.97
60.00	2.13	2.13	2.13	108.65	108.65	108.65	108.65	0.96
90.00	2.11	2.11	2.11	107.44	107.44	107.44	107.44	0.95
120.00	2.06	2.06	2.06	104.92	104.92	104.92	104.92	0.93
180.00	2.02	2.02	2.02	102.91	102.96	102.81	102.89	0.91
eff (%)				8.47	8.67	8.80	8.64	

ตารางที่ ก.36 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 μM ของชุดการควบคุมที่ 7

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.00	0.19	0.19	0.19	10.80	10.80	10.80	10.80	1.00
10.00	0.19	0.19	0.19	10.70	10.65	10.75	10.70	0.99
30.00	0.18	0.18	0.18	10.60	10.60	10.20	10.47	0.97
60.00	0.18	0.18	0.18	10.50	10.45	10.45	10.47	0.97
90.00	0.18	0.18	0.18	10.40	10.35	10.30	10.35	0.96
120.00	0.18	0.18	0.18	10.30	10.25	10.25	10.26	0.95
180.00	0.18	0.18	0.18	10.25	10.25	10.30	10.26	0.95
eff (%)				5.13	5.13	4.66	4.97	

ตารางที่ ก.37 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 25 μM ของชุดการควบคุมที่ 7

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.00	0.49	0.49	0.49	25.86	25.86	25.86	25.86	1.00
10.00	0.48	0.47	0.47	25.25	25.20	25.20	25.22	0.98
30.00	0.47	0.47	0.47	25.05	25.10	25.05	25.07	0.97
60.00	0.47	0.47	0.47	24.90	24.95	24.85	24.90	0.96
90.00	0.47	0.47	0.47	24.75	24.80	24.75	24.77	0.96
120.00	0.46	0.46	0.46	24.65	24.70	24.65	24.67	0.95
180.00	0.46	0.46	0.46	24.50	24.60	24.70	24.60	0.95
eff (%)				5.26	4.87	4.48	4.87	

ตารางที่ ก.38 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 μM ของชุดการควบคุมที่ 7

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.00	1.00	1.00	1.00	51.74	51.74	51.74	51.743	1.00
10.00	1.00	1.00	1.00	51.59	51.59	51.54	51.575	1.00
30.00	0.99	0.99	0.99	50.99	50.99	50.99	50.987	0.99
60.00	0.98	0.98	0.98	50.43	50.58	50.63	50.551	0.98
90.00	0.97	0.97	0.97	50.23	50.23	50.23	50.232	0.97
120.00	0.96	0.96	0.96	49.73	49.68	49.78	49.728	0.96
180.00	0.95	0.95	0.95	49.38	49.38	49.38	49.376	0.95
eff (%)				4.57	4.57	4.57	4.57	

ตารางที่ ก.39 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 75 μM ของชุดการควบคุมที่ 7

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.00	1.47	1.47	1.47	75.51	75.51	75.51	75.51	1.00
10.00	1.45	1.45	1.45	74.45	74.40	74.45	74.44	0.99
30.00	1.44	1.44	1.44	73.90	73.95	73.90	73.92	0.98
60.00	1.44	1.44	1.43	73.60	73.65	73.55	73.60	0.97
90.00	1.43	1.43	1.43	73.09	73.15	73.09	73.11	0.97
120.00	1.42	1.42	1.42	72.79	72.74	72.79	72.78	0.96
180.00	1.41	1.41	1.41	72.40	72.44	72.49	72.44	0.96
eff (%)				4.12	4.07	4.00	4.06	

ตารางที่ ก.40 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 μM ของชุดการควบคุมที่ 7

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.00	2.00	2.00	2.00	102.05	102.15	102.10	102.10	1.00
10.00	1.99	1.99	1.99	101.45	101.40	101.35	101.40	0.99
30.00	1.97	1.97	1.97	100.44	100.39	100.34	100.39	0.98
60.00	1.95	1.95	1.95	99.43	99.38	99.33	99.38	0.97
90.00	1.94	1.94	1.94	98.93	98.88	98.83	98.88	0.97
120.00	1.93	1.93	1.93	98.43	98.38	98.32	98.38	0.96
180.00	1.92	1.92	1.92	97.97	98.07	98.12	98.06	0.96
eff (%)				4.00	3.99	3.90	3.96	

ตารางที่ ก.41 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 μM ของชุดการทดลอง

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	0.39	0.37	0.38	13.73	13.44	13.57	13.58	1.00
10	0.25	0.25	0.26	10.78	10.80	10.89	10.83	0.80
30	0.15	0.16	0.15	8.53	8.64	8.53	8.57	0.63
60	0.09	0.10	0.09	7.19	7.30	7.19	7.23	0.53
90	0.06	0.06	0.07	6.54	6.54	6.61	6.57	0.48
120	0.03	0.03	0.04	5.88	5.88	5.94	5.90	0.43
180	0.02	0.01	0.01	5.47	5.41	5.39	5.42	0.40
eff (%)				60.11	59.75	60.31	60.06	

ตารางที่ ก.42 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 25 μM ของชุดการทดลอง

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	1.02	1.03	1.03	27.89	28.04	28.13	28.02	1.00
10	0.81	0.82	0.82	23.16	23.40	23.40	23.32	0.83
30	0.68	0.68	0.68	20.21	20.24	20.19	20.21	0.72
60	0.58	0.58	0.57	17.98	17.96	17.90	17.95	0.64
90	0.47	0.47	0.47	15.58	15.60	15.60	15.59	0.56
120	0.41	0.41	0.41	14.24	14.26	14.26	14.25	0.51
180	0.38	0.38	0.40	13.64	13.70	14.02	13.78	0.49
eff (%)				51.10	51.13	50.18	50.80	

ตารางที่ ก.43 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 μM ของชุดการทดลอง

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	2.35	2.32	2.32	57.59	56.92	56.90	57.14	1.00
10	2.00	2.00	2.00	49.81	49.76	49.76	49.78	0.87
30	1.73	1.74	1.74	43.74	43.85	43.83	43.81	0.77
60	1.53	1.53	1.56	39.33	39.33	39.97	39.54	0.69
90	1.44	1.46	1.46	37.23	37.68	37.76	37.56	0.66
120	1.41	1.40	1.41	36.49	36.40	36.49	36.46	0.64
180	1.33	1.31	1.33	34.80	34.24	34.82	34.62	0.61
eff (%)				39.57	39.84	38.80	39.41	

ตารางที่ ก.44 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 75 μM ของชุดการทดลอง

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	3.18	3.23	3.22	76.03	77.26	76.97	76.75	1.00
10	2.81	2.80	2.80	67.78	67.65	67.62	67.68	0.88
30	2.61	2.62	2.62	63.43	63.48	63.48	63.46	0.83
60	2.42	2.43	2.43	59.20	59.24	59.24	59.22	0.77
90	2.30	2.31	2.31	56.50	56.54	56.56	56.53	0.74
120	2.20	2.21	2.21	54.29	54.33	54.33	54.32	0.71
180	2.12	2.12	2.13	52.48	52.48	52.55	52.51	0.68
eff (%)				30.97	32.07	31.73	31.59	

ตารางที่ ก.45 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 μM ของชุดการทดลอง

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				C_0^{-1}
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	4.26	4.28	4.26	100.23	100.54	100.18	100.32	1.00
10	3.77	3.76	3.78	89.23	89.01	89.46	89.23	0.89
30	3.46	3.45	3.45	82.23	82.10	82.12	82.15	0.82
60	3.29	3.29	3.30	78.60	78.53	78.66	78.60	0.78
90	3.21	3.21	3.21	76.75	76.79	76.77	76.77	0.77
120	3.11	3.11	3.11	74.56	74.52	74.58	74.55	0.74
180	3.09	3.09	3.08	74.14	74.11	73.73	73.99	0.74
eff (%)				26.03	26.28	26.40	26.24	

ตารางที่ ก.46 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 μM ของชุดควบคุมที่ 1

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				C_0^{-1}
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	0.30	0.32	0.32	11.90	12.23	12.21	12.11	1.00
10	0.19	0.19	0.20	9.42	9.44	9.56	9.47	0.78
30	0.14	0.14	0.14	8.17	8.24	8.20	8.20	0.68
60	0.11	0.10	0.10	7.50	7.41	7.44	7.45	0.62
90	0.10	0.10	0.09	7.26	7.30	7.21	7.26	0.60
120	0.08	0.08	0.08	6.86	6.81	6.90	6.86	0.57
180	0.07	0.08	0.07	6.75	6.81	6.72	6.76	0.56
eff (%)				43.30	44.30	44.93	44.19	

ตารางที่ ก.47 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 25 μM ของชุดควบคุมที่ 1

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C \cdot C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	1.08	1.08	1.08	29.31	29.11	29.16	29.19	1.00
10	0.83	0.83	0.82	23.54	23.54	23.47	23.52	0.81
30	0.66	0.66	0.66	19.95	19.92	19.88	19.92	0.68
60	0.60	0.60	0.61	18.59	18.54	18.63	18.59	0.64
90	0.56	0.56	0.57	17.69	17.67	17.76	17.71	0.61
120	0.53	0.53	0.53	16.89	16.89	16.85	16.88	0.58
180	0.55	0.56	0.56	17.43	17.52	17.52	17.49	0.60
eff (%)				40.55	39.83	39.92	40.10	

ตารางที่ ก.48 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 μM ของชุดควบคุมที่ 1

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C \cdot C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	2.29	2.21	2.22	56.10	54.47	54.58	55.05	1.00
10	1.88	1.89	1.89	47.11	47.18	47.18	47.15	0.86
30	1.64	1.63	1.64	41.76	41.44	41.78	41.66	0.76
60	1.50	1.51	1.51	38.68	38.79	38.77	38.75	0.70
90	1.47	1.47	1.47	37.81	37.88	37.90	37.86	0.69
120	1.42	1.41	1.41	36.83	36.63	36.65	36.70	0.67
180	1.40	1.40	1.40	36.38	36.40	36.38	36.39	0.66
eff (%)				35.14	33.16	33.34	33.89	

ตารางที่ ก.49 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 75 μM ของชุดควบคุมที่ 1

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	3.28	3.22	3.26	78.19	76.97	77.75	77.64	1.00
10	2.82	2.81	2.82	67.96	67.89	67.98	67.94	0.88
30	2.68	2.67	2.67	64.79	64.64	64.70	64.71	0.83
60	2.50	2.51	2.50	60.91	61.07	60.91	60.96	0.79
90	2.42	2.42	2.43	59.15	59.15	59.28	59.20	0.76
120	2.31	2.31	2.30	56.63	56.61	56.50	56.58	0.73
180	2.24	2.23	2.23	55.00	54.91	54.94	54.95	0.71
eff (%)				29.66	28.65	29.34	29.22	

ตารางที่ ก.50 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 μM ของชุดควบคุมที่ 1

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	4.29	4.33	4.33	100.85	101.72	101.77	101.45	1.00
10	3.88	3.88	3.87	91.60	91.60	91.51	91.57	0.90
30	3.70	3.71	3.71	87.72	87.81	87.83	87.78	0.87
60	3.61	3.60	3.61	85.62	85.49	85.62	85.58	0.84
90	3.51	3.51	3.50	83.32	83.37	83.28	83.32	0.82
120	3.41	3.41	3.40	81.09	81.14	81.05	81.09	0.80
180	3.30	3.30	3.32	78.75	78.77	79.11	78.88	0.78
eff (%)				21.91	22.56	22.26	22.25	

ตารางที่ ก.51 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 μM ของชุดควบคุมที่ 2

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	0.35	0.34	0.40	12.90	12.77	13.99	13.22	1.00
10	0.25	0.26	0.25	10.80	10.83	10.80	10.81	0.82
30	0.21	0.21	0.21	9.85	9.82	9.85	9.84	0.74
60	0.18	0.19	0.20	9.18	9.27	9.67	9.37	0.71
90	0.16	0.17	0.16	8.80	8.89	8.80	8.83	0.67
120	0.14	0.13	0.14	8.24	8.13	8.31	8.22	0.62
180	0.11	0.11	0.13	7.68	7.68	7.93	7.76	0.59
eff (%)				40.45	39.83	43.35	41.27	

ตารางที่ ก.52 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 25 μM ของชุดควบคุมที่ 2

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	1.04	1.01	1.02	28.38	27.75	27.82	27.98	1.00
10	0.84	0.83	0.84	23.85	23.74	23.85	23.81	0.85
30	0.74	0.74	0.74	21.66	21.66	21.66	21.66	0.77
60	0.70	0.70	0.70	20.84	20.82	20.84	20.83	0.74
90	0.67	0.66	0.66	20.04	19.88	19.92	19.95	0.71
120	0.63	0.62	0.63	19.10	19.06	19.14	19.10	0.68
180	0.59	0.58	0.59	18.27	18.16	18.27	18.24	0.65
eff (%)				32.69	31.34	31.18	31.74	

ตารางที่ ก.53 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 μM ของชุดควบคุมที่ 2

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	2.27	2.23	2.27	55.74	54.94	55.78	55.49	1.00
10	1.97	1.98	1.98	49.03	49.23	49.25	49.17	0.89
30	1.76	1.76	1.77	44.34	44.32	44.52	44.40	0.80
60	1.68	1.67	1.67	42.49	42.40	42.40	42.43	0.76
90	1.59	1.59	1.59	40.53	40.53	40.57	40.54	0.73
120	1.50	1.50	1.50	38.68	38.61	38.52	38.60	0.70
180	1.45	1.45	1.45	37.56	37.50	37.52	37.53	0.68
eff (%)				30.61	29.71	30.94	30.42	

ตารางที่ ก.54 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 75 μM ของชุดควบคุมที่ 2

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	3.21	3.27	3.29	76.81	78.08	78.60	77.83	1.00
10	2.98	2.91	2.91	71.66	70.10	69.99	70.58	0.91
30	2.77	2.76	2.70	66.84	66.75	65.44	66.35	0.85
60	2.61	2.61	2.61	63.39	63.39	63.37	63.38	0.81
90	2.49	2.48	2.49	60.60	60.47	60.62	60.56	0.78
120	2.31	2.34	2.32	56.74	57.34	56.83	56.97	0.73
180	2.20	2.20	2.20	54.13	54.09	54.16	54.13	0.70
eff (%)				26.13	26.56	27.69	26.80	

ตารางที่ ก.55 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 μM ของชุดควบคุมที่ 2

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				C_0^{-1}
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	4.30	4.35	4.33	100.94	102.10	101.63	101.56	1.00
10	4.01	4.01	4.00	94.52	94.50	94.43	94.48	0.93
30	3.78	3.78	3.78	89.34	89.52	89.48	89.45	0.88
60	3.58	3.58	3.57	85.00	85.04	84.68	84.91	0.84
90	3.50	3.48	3.49	83.10	82.83	82.86	82.93	0.82
120	3.39	3.35	3.33	80.69	79.91	79.44	80.02	0.79
180	3.21	3.27	3.21	76.61	77.99	76.75	77.12	0.76
eff (%)				20.06	21.73	21.83	21.21	

ตารางที่ ก.56 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 μM ของชุดควบคุมที่ 3

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				C_0^{-1}
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	0.69	0.70	0.70	10.20	10.40	10.38	10.33	1.00
10	0.64	0.64	0.64	9.09	9.09	9.11	9.09	0.88
30	0.60	0.59	0.60	8.20	8.11	8.17	8.16	0.79
60	0.56	0.56	0.56	7.37	7.39	7.39	7.39	0.72
90	0.55	0.55	0.54	7.04	7.04	6.99	7.02	0.68
120	0.54	0.53	0.54	6.86	6.77	6.79	6.81	0.66
180	0.52	0.51	0.52	6.41	6.32	6.34	6.36	0.62
eff (%)				32.79	34.94	34.59	34.11	

ตารางที่ ก.57 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 25 μM ของชุดควบคุมที่ 3

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	1.42	1.46	1.43	26.59	27.40	26.77	26.92	1.00
10	1.30	1.30	1.31	23.87	23.94	24.01	23.94	0.89
30	1.20	1.20	1.21	21.66	21.64	21.73	21.68	0.81
60	1.14	1.14	1.14	20.37	20.35	20.30	20.34	0.76
90	1.12	1.12	1.12	19.77	19.72	19.77	19.75	0.73
120	1.08	1.09	1.09	18.88	19.06	19.10	19.01	0.71
180	1.03	1.03	1.03	17.72	17.81	17.74	17.75	0.66
eff (%)				29.01	30.44	28.65	29.38	

ตารางที่ ก.58 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 μM ของชุดควบคุมที่ 3

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	2.72	2.77	2.79	55.52	56.72	57.01	56.42	1.00
10	2.50	2.50	2.50	50.52	50.54	50.57	50.54	0.90
30	2.45	2.45	2.45	49.52	49.56	49.52	49.53	0.88
60	2.36	2.37	2.37	47.58	47.69	47.60	47.62	0.84
90	2.33	2.33	2.33	46.75	46.71	46.73	46.73	0.83
120	2.26	2.26	2.26	45.32	45.28	45.30	45.30	0.80
180	2.15	2.15	2.16	42.83	42.83	42.96	42.87	0.76
eff (%)				22.86	24.49	24.64	24.01	

ตารางที่ ก.59 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 75 μM ของชุดควบคุมที่ 3

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				C_0^{-1}
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	3.61	3.65	3.64	75.41	76.21	75.92	75.85	1.00
10	3.34	3.36	3.38	69.41	69.72	70.14	69.76	0.92
30	3.14	3.18	3.16	64.97	65.71	65.31	65.33	0.86
60	3.10	3.09	3.10	63.90	63.83	63.88	63.87	0.84
90	3.04	3.01	3.04	62.74	61.92	62.67	62.44	0.82
120	2.92	2.99	2.99	59.89	61.51	61.43	60.94	0.80
180	2.88	2.90	2.89	59.15	59.46	59.40	59.34	0.78
eff (%)				21.56	21.98	21.77	21.77	

ตารางที่ ก.60 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 μM ของชุดควบคุมที่ 3

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				C_0^{-1}
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	4.86	4.84	4.81	103.22	102.75	102.06	102.67	1.00
10	4.49	4.50	4.50	94.92	95.17	95.17	95.08	0.93
30	4.39	4.46	4.48	92.65	94.21	94.65	93.83	0.91
60	4.32	4.34	4.37	91.26	91.53	92.24	91.68	0.89
90	4.21	4.21	4.21	88.79	88.79	88.81	88.80	0.86
120	4.11	4.11	4.11	86.45	86.47	86.45	86.45	0.84
180	4.06	4.07	4.07	85.44	85.53	85.55	85.51	0.83
eff (%)				17.22	16.76	16.17	16.72	

ตารางที่ ก.61 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 μM ของชุดควบคุมที่ 4

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				C_0^{-1}
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	0.71	0.71	0.71	10.63	10.60	10.67	10.63	1.00
10	0.66	0.66	0.66	9.56	9.53	9.51	9.53	0.90
30	0.63	0.63	0.63	8.98	8.95	8.98	8.97	0.84
60	0.62	0.62	0.63	8.71	8.71	8.86	8.76	0.82
90	0.62	0.62	0.61	8.66	8.60	8.51	8.59	0.81
120	0.60	0.61	0.60	8.28	8.37	8.26	8.31	0.78
180	0.60	0.60	0.60	8.15	8.17	8.08	8.14	0.77
eff (%)				23.29	22.92	24.24	23.49	

ตารางที่ ก.62 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 25 μM ของชุดควบคุมที่ 4

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				C_0^{-1}
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	1.46	1.45	1.46	27.51	27.08	27.33	27.31	1.00
10	1.36	1.36	1.36	25.23	25.28	25.21	25.24	0.92
30	1.33	1.33	1.32	24.50	24.41	24.34	24.41	0.89
60	1.30	1.30	1.31	23.87	23.92	23.96	23.92	0.88
90	1.27	1.27	1.27	23.07	23.09	23.05	23.07	0.84
120	1.23	1.23	1.23	22.33	22.36	22.36	22.35	0.82
180	1.21	1.21	1.21	21.80	21.78	21.80	21.79	0.80
eff (%)				20.75	19.60	20.24	20.20	

ตารางที่ ก.63 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 μM ของชุดควบคุมที่ 4

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	2.73	2.80	2.78	55.78	57.21	56.94	56.65	1.00
10	2.62	2.62	2.62	53.38	53.31	53.35	53.35	0.94
30	2.53	2.53	2.53	51.23	51.19	51.17	51.20	0.90
60	2.46	2.47	2.46	49.76	49.90	49.78	49.81	0.88
90	2.40	2.41	2.40	48.42	48.58	48.47	48.49	0.86
120	2.35	2.35	2.34	47.18	47.15	47.09	47.14	0.83
180	2.31	2.30	2.31	46.26	46.24	46.26	46.25	0.82
eff (%)				17.07	19.18	18.76	18.35	

ตารางที่ ก.64 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 75 μM ของชุดควบคุมที่ 4

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	3.76	3.72	3.75	78.77	77.86	78.51	78.38	1.00
10	3.55	3.55	3.55	73.94	74.00	73.94	73.96	0.94
30	3.43	3.42	3.42	71.28	71.19	71.19	71.22	0.91
60	3.38	3.38	3.39	70.26	70.32	70.41	70.33	0.90
90	3.34	3.34	3.33	69.23	69.32	69.14	69.23	0.88
120	3.26	3.26	3.26	67.65	67.62	67.58	67.62	0.86
180	3.22	3.22	3.23	66.71	66.71	66.87	66.76	0.85
eff (%)				15.31	14.32	14.83	14.82	

ตารางที่ ก.65 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 μM ของชุดควบคุมที่ 4

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				C_0^{-1}
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	4.78	4.78	4.76	101.43	101.36	101.07	101.29	1.00
10	4.61	4.60	4.61	97.55	97.48	97.62	97.55	0.96
30	4.50	4.50	4.51	95.30	95.25	95.37	95.31	0.94
60	4.42	4.41	4.41	93.34	93.23	93.25	93.27	0.92
90	4.37	4.36	4.36	92.20	92.15	92.18	92.18	0.91
120	4.28	4.28	4.27	90.19	90.21	90.13	90.18	0.89
180	4.20	4.21	4.21	88.61	88.72	88.63	88.65	0.88
eff (%)				12.64	12.47	12.31	12.48	

ตารางที่ ก.66 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 μM ของชุดควบคุมที่ 5

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				C_0^{-1}
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	0.21	0.21	0.21	11.76	11.76	11.76	11.76	1.00
10	0.19	0.19	0.19	10.95	10.95	11.10	11.00	0.94
30	0.19	0.19	0.18	10.85	10.65	10.55	10.68	0.91
60	0.17	0.17	0.18	10.00	10.10	10.20	10.10	0.86
90	0.17	0.16	0.17	9.84	9.54	9.64	9.68	0.82
120	0.16	0.17	0.16	9.44	9.79	9.44	9.56	0.81
180	0.15	0.14	0.15	9.09	8.48	8.99	8.85	0.75
eff (%)				22.70	23.13	23.56	18.70	

ตารางที่ ก.67 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 25 μM ของชุดควบคุมที่ 5

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	0.52	0.53	0.53	27.72	27.92	28.12	27.92	1.00
10	0.50	0.50	0.51	26.71	26.56	27.22	26.83	0.96
30	0.47	0.49	0.47	25.10	26.21	25.20	25.51	0.91
60	0.45	0.45	0.45	23.94	23.99	24.05	23.99	0.86
90	0.44	0.44	0.45	23.59	23.34	23.79	23.58	0.84
120	0.43	0.43	0.44	23.19	23.19	23.44	23.27	0.83
180	0.42	0.42	0.41	22.69	22.69	22.18	22.52	0.81
eff (%)				16.35	16.95	16.65	16.65	

ตารางที่ ก.68 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 μM ของชุดควบคุมที่ 5

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	1.00	1.00	1.00	51.49	51.49	51.49	51.491	1.00
10	0.97	0.96	0.96	49.98	49.68	49.48	49.712	0.97
30	0.93	0.94	0.94	47.97	48.47	48.77	48.402	0.94
60	0.92	0.91	0.91	47.46	47.36	47.16	47.328	0.92
90	0.89	0.90	0.89	45.95	46.46	46.15	46.186	0.90
120	0.86	0.85	0.85	44.44	44.04	44.19	44.222	0.86
180	0.82	0.82	0.81	42.58	42.43	42.17	42.393	0.82
eff (%)				13.69	14.47	14.18	14.12	

ตารางที่ ก. การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 75 μM ของชุดควบคุมที่ 5

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	1.52	1.53	1.53	77.98	78.23	78.48	78.23	1.00
10	1.47	1.47	1.47	75.46	75.46	75.56	75.50	0.97
30	1.43	1.44	1.42	73.45	73.75	72.94	73.38	0.94
60	1.40	1.40	1.41	71.58	71.94	72.19	71.90	0.92
90	1.39	1.39	1.40	71.43	71.08	71.79	71.43	0.91
120	1.35	1.34	1.35	69.37	68.92	69.27	69.18	0.88
180	1.33	1.32	1.32	68.16	67.66	67.91	67.91	0.87
eff (%)				11.04	11.91	11.74	11.57	

ตารางที่ ก.70 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 μM ของชุดควบคุมที่ 5

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	2.02	2.01	2.01	102.96	102.61	102.76	102.77	1.00
10	1.96	1.97	1.96	100.09	100.34	99.99	100.14	0.97
30	1.92	1.91	1.92	97.87	97.57	98.07	97.84	0.95
60	1.91	1.90	1.91	97.52	96.86	97.57	97.32	0.95
90	1.84	1.86	1.85	93.99	94.90	94.55	94.48	0.92
120	1.79	1.79	1.78	91.53	91.63	91.02	91.39	0.89
180	1.75	1.76	1.75	89.36	89.81	89.46	89.55	0.87
eff (%)				11.10	10.70	11.42	11.07	0.11

ตารางที่ ก.71 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 μM ของชุดควบคุมที่ 6

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	0.81	0.81	0.81	12.97	12.97	12.97	12.97	1.00
10	0.78	0.78	0.78	12.30	12.30	12.30	12.30	0.95
30	0.78	0.78	0.78	12.14	12.14	12.14	12.14	0.94
60	0.75	0.75	0.75	11.61	11.61	11.61	11.61	0.90
90	0.74	0.74	0.74	11.41	11.41	11.41	11.41	0.88
120	0.72	0.72	0.72	10.96	10.96	10.96	10.96	0.85
180	0.72	0.72	0.72	10.85	10.85	10.85	10.85	0.84
eff (%)				16.34	16.34	16.34	16.34	1.26

ตารางที่ ก.72 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 25 μM ของชุดควบคุมที่ 6

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	1.42	1.40	1.42	26.57	26.12	26.62	26.44	1.00
10	1.38	1.37	1.37	25.57	25.43	25.48	25.49	0.96
30	1.34	1.35	1.35	24.83	24.90	24.90	24.88	0.94
60	1.32	1.32	1.32	24.23	24.27	24.21	24.24	0.92
90	1.31	1.30	1.31	23.98	23.94	24.01	23.98	0.91
120	1.30	1.30	1.30	23.78	23.78	23.78	23.78	0.90
180	1.27	1.27	1.26	23.23	23.11	22.89	23.08	0.87
eff (%)				12.59	11.52	13.99	12.71	

ตารางที่ ก.73 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 μM ของชุดควบคุมที่ 6

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	2.75	2.74	2.75	56.21	56.01	56.23	56.15	1.00
10	2.68	2.67	2.67	54.60	54.49	54.29	54.46	0.97
30	2.71	2.68	2.67	55.27	54.60	54.42	54.77	0.98
60	2.57	2.58	2.57	52.26	52.30	52.13	52.23	0.93
90	2.48	2.62	2.62	50.05	53.31	53.24	52.20	0.93
120	2.54	2.55	2.58	51.59	51.68	52.35	51.87	0.92
180	2.47	2.49	2.47	50.03	50.34	49.87	50.08	0.89
eff (%)				10.99	10.11	11.30	10.80	

ตารางที่ ก.74 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 75 μM ของชุดควบคุมที่ 6

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	3.50	3.48	3.47	72.87	72.37	72.15	72.46	1.00
10	3.38	3.38	3.38	70.30	70.30	70.30	70.30	0.97
30	3.35	3.35	3.35	69.63	69.63	69.63	69.63	0.96
60	3.33	3.32	3.32	69.03	68.96	68.94	68.98	0.95
90	3.31	3.31	3.31	68.65	68.65	68.65	68.65	0.95
120	3.29	3.29	3.29	68.14	68.14	68.14	68.14	0.94
180	3.21	3.21	3.21	66.35	66.35	66.35	66.35	0.92
eff (%)				8.94	8.32	8.04	8.43	

ตารางที่ ก.75 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 μM ของชุดควบคุมที่ 6

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	4.80	4.79	4.79	101.86	101.59	101.70	101.71	1.00
10	4.78	4.76	4.77	101.39	101.05	101.23	101.22	1.00
30	4.75	4.74	4.74	100.74	100.58	100.65	100.66	0.99
60	4.71	4.72	4.71	99.94	100.07	99.87	99.96	0.98
90	4.69	4.68	4.69	99.40	99.25	99.45	99.37	0.98
120	4.65	4.66	4.65	98.58	98.71	98.51	98.60	0.97
180	4.51	4.50	4.52	95.39	95.25	95.61	95.42	0.94
eff (%)				6.35	6.23	5.99	6.19	

ตารางที่ ก.76 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 μM ของชุดควบคุมที่ 7

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.00	0.722	0.722	0.722	10.96	10.96	10.96	10.96	1.00
10.00	0.718	0.717	0.716	10.87	10.85	10.83	10.85	0.99
30.00	0.714	0.714	0.715	10.78	10.78	10.80	10.79	0.98
60.00	0.712	0.720	0.710	10.74	10.92	10.69	10.78	0.98
90.00	0.709	0.708	0.709	10.67	10.65	10.67	10.66	0.97
120.00	0.706	0.706	0.706	10.60	10.60	10.60	10.60	0.97
180.00	0.701	0.702	0.701	10.49	10.51	10.49	10.50	0.96
eff (%)				4.27	4.07	4.27	4.20	

ตารางที่ ก.77 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 25 μM ของชุดควบคุมที่ 7

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)			เฉลี่ย	$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0.00	1.37	1.37	25.41	25.43	25.46	25.43	1.37	1.00
10.00	1.36	1.36	25.23	25.28	25.25	25.25	1.36	0.99
30.00	1.36	1.36	25.01	25.08	25.08	25.05	1.36	0.99
60.00	1.35	1.34	24.74	24.85	24.83	24.81	1.35	0.98
90.00	1.34	1.34	24.70	24.72	24.68	24.70	1.34	0.97
120.00	1.33	1.33	24.56	24.54	24.54	24.55	1.33	0.97
180.00	1.33	1.32	24.45	24.41	24.39	24.41	1.33	0.96
eff (%)				3.77	4.03	4.20	4.00	

ตารางที่ ก.78 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 μM ของชุดควบคุมที่ 7

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)			เฉลี่ย	$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0.00	2.48	2.48	2.48	50.05	50.05	50.05	50.05	1.00
10.00	2.46	2.45	2.45	49.70	49.58	49.58	49.62	0.99
30.00	2.45	2.45	2.45	49.47	49.43	49.41	49.44	0.99
60.00	2.44	2.44	2.44	49.16	49.21	49.18	49.18	0.98
90.00	2.43	2.42	2.43	48.94	48.85	49.00	48.93	0.98
120.00	2.42	2.41	2.41	48.71	48.65	48.67	48.68	0.97
180.00	2.40	2.40	2.40	48.31	48.29	48.29	48.30	0.96
eff (%)				3.48	3.52	3.52	3.50	

ตารางที่ ก.79 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 75 μM ของชุดควบคุมที่ 7

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.00	3.38	3.38	3.38	70.30	70.30	70.30	70.30	1.00
10.00	3.36	3.37	3.37	69.85	69.90	69.90	69.88	0.99
30.00	3.35	3.35	3.35	69.63	69.59	69.61	69.61	0.99
60.00	3.33	3.32	3.32	69.03	68.96	68.94	68.98	0.98
90.00	3.31	3.31	3.31	68.65	68.61	68.58	68.61	0.98
120.00	3.30	3.29	3.29	68.34	68.32	68.32	68.32	0.97
180.00	3.29	3.28	3.29	68.14	68.09	68.12	68.12	0.97
eff (%)				3.08	3.14	3.11	3.11	

ตารางที่ ก.80 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 μM ของชุดควบคุมที่ 7

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.00	4.75	4.74	4.74	100.83	100.65	100.65	100.71	1.00
10.00	4.72	4.72	4.72	100.16	100.21	100.18	100.18	0.99
30.00	4.71	4.71	4.71	99.92	99.96	99.92	99.93	0.99
60.00	4.71	4.72	4.71	99.85	100.07	99.85	99.92	0.99
90.00	4.69	4.68	4.69	99.45	99.31	99.51	99.42	0.99
120.00	4.65	4.66	4.65	98.62	98.73	98.60	98.65	0.98
180.00	4.62	4.62	4.62	97.95	97.98	97.95	97.96	0.97
eff (%)				2.85	2.66	2.68	2.73	

ตารางที่ ก.81 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 μM ของชุดการทดลอง

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				C_0^{-1}
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	0.28	0.28	0.28	11.81	11.91	11.95	11.89	1
10	0.22	0.22	0.22	8.97	9.01	8.97	8.98	0.76
30	0.18	0.18	0.18	7.43	7.38	7.52	7.44	0.63
60	0.17	0.17	0.17	6.63	6.68	6.68	6.67	0.56
90	0.15	0.15	0.15	6.07	6.12	6.07	6.09	0.51
120	0.14	0.14	0.14	5.51	5.61	5.65	5.59	0.47
180	0.14	0.14	0.14	5.37	5.33	5.28	5.33	0.45
eff (%)				54.50	55.25	55.81	55.19	

ตารางที่ ก.82 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 25 μM ของชุดการทดลอง

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				C_0^{-1}
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	0.62	0.62	0.62	27.95	27.81	27.91	27.89	1.00
10	0.49	0.49	0.49	21.84	21.89	21.80	21.84	0.78
30	0.44	0.45	0.44	19.51	19.79	19.65	19.65	0.70
60	0.42	0.42	0.42	18.62	18.58	18.67	18.62	0.67
90	0.39	0.39	0.39	17.18	17.27	17.18	17.21	0.62
120	0.37	0.37	0.38	16.38	16.29	16.48	16.38	0.59
180	0.35	0.35	0.35	15.40	15.31	15.36	15.36	0.55
eff (%)				44.89	44.95	44.97	44.94	

ตารางที่ ก.83 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 μM ของชุดการทดลอง

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				C_0^{-1}
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	1.19	1.19	1.19	54.45	54.64	54.54	54.54	1.00
10	1.02	1.01	1.01	46.38	46.15	46.15	46.22	0.85
30	0.91	0.91	0.91	41.30	41.25	41.16	41.23	0.76
60	0.87	0.87	0.88	39.62	39.57	39.76	39.65	0.73
90	0.85	0.86	0.86	38.64	38.87	38.82	38.78	0.71
120	0.83	0.82	0.82	37.61	37.38	37.33	37.44	0.69
180	0.80	0.80	0.80	36.16	36.21	36.02	36.13	0.66
eff (%)				33.58	33.73	33.95	33.75	

ตารางที่ ก.84 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 75 μM ของชุดการทดลอง

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				C_0^{-1}
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	1.76	1.76	1.76	81.09	81.13	81.18	81.13	1.00
10	1.60	1.59	1.59	73.48	73.30	73.20	73.33	0.90
30	1.52	1.52	1.51	69.66	69.75	69.43	69.61	0.86
60	1.46	1.46	1.46	67.14	67.23	67.19	67.19	0.83
90	1.41	1.42	1.42	64.90	64.99	65.09	64.99	0.80
120	1.36	1.37	1.36	62.47	62.71	62.52	62.57	0.77
180	1.33	1.33	1.33	60.93	60.93	60.79	60.89	0.75
eff (%)				24.85	24.90	25.11	24.95	

ตารางที่ ก.85 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 μM ของชุดการทดลอง

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				C/C_0^{-1}
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	2.33	2.33	2.34	107.82	107.63	107.91	107.79	1.00
10	2.20	2.21	2.20	101.75	101.94	101.61	101.77	0.94
30	2.12	2.11	2.11	97.60	97.46	97.51	97.52	0.90
60	2.01	2.01	2.02	92.84	92.84	93.08	92.92	0.86
90	1.98	1.98	1.98	91.16	91.16	91.12	91.15	0.85
120	1.90	1.90	1.90	87.43	87.48	87.34	87.42	0.81
180	1.85	1.85	1.85	85.29	85.29	85.29	85.29	0.79
eff (%)				20.90	20.76	20.97	20.88	

ตารางที่ ก.86 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 μM ของชุดควบคุมที่ 1

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				C/C_0^{-1}
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	0.30	0.29	0.29	12.79	12.65	12.61	12.68	1
10	0.29	0.29	0.28	12.23	12.37	11.86	12.15	0.96
30	0.27	0.28	0.28	11.72	11.95	11.77	11.81	0.93
60	0.26	0.26	0.26	11.02	10.93	11.02	10.99	0.87
90	0.24	0.24	0.24	9.95	9.95	9.95	9.95	0.78
120	0.21	0.21	0.21	8.87	8.78	8.78	8.81	0.69
180	0.19	0.19	0.19	7.85	7.89	7.89	7.88	0.62
eff (%)				38.66	37.61	37.38	37.88	

ตารางที่ ก.87 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 25 μM ของชุดควบคุมที่ 1

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	0.64	0.63	0.63	28.75	28.37	28.09	28.40	1.00
10	0.61	0.61	0.61	27.30	27.16	27.35	27.27	0.96
30	0.57	0.58	0.58	25.71	25.95	25.85	25.84	0.91
60	0.55	0.54	0.54	24.73	24.17	24.17	24.36	0.86
90	0.51	0.51	0.51	22.82	22.82	22.78	22.81	0.80
120	0.47	0.47	0.47	21.00	21.05	21.00	21.02	0.74
180	0.45	0.44	0.44	19.74	19.51	19.65	19.63	0.69
eff (%)				31.32	31.24	30.06	30.88	

ตารางที่ ก.88 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 μM ของชุดควบคุมที่ 1

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	1.14	1.14	1.14	52.21	52.30	52.21	52.24	1.00
10	1.09	1.08	1.09	49.83	49.32	49.60	49.58	0.95
30	1.03	1.03	1.04	47.08	47.13	47.31	47.17	0.90
60	1.01	1.00	1.00	45.96	45.63	45.68	45.76	0.88
90	0.93	0.93	0.92	42.23	42.09	41.90	42.07	0.81
120	0.87	0.87	0.88	39.62	39.29	40.08	39.66	0.76
180	0.82	0.82	0.83	37.33	37.33	37.47	37.38	0.72
eff (%)				28.50	28.63	28.23	28.46	

ตารางที่ ก.89 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 75 μM ของชุดควบคุมที่ 1

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	1.65	1.65	1.64	75.96	76.10	75.49	75.85	1.00
10	1.54	1.56	1.54	70.68	71.85	70.96	71.17	0.94
30	1.48	1.47	1.50	68.17	67.33	68.87	68.12	0.90
60	1.44	1.44	1.43	66.07	65.93	65.74	65.91	0.87
90	1.38	1.39	1.38	63.45	63.59	63.45	63.50	0.84
120	1.32	1.33	1.33	60.28	60.75	60.89	60.64	0.80
180	1.29	1.30	1.30	59.30	59.49	59.54	59.44	0.78
eff (%)				21.93	21.82	21.13	21.63	

ตารางที่ ก.90 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 μM ของชุดควบคุมที่ 1

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	2.35	2.31	2.35	108.66	106.61	108.42	107.90	1.00
10	2.29	2.27	2.20	105.63	104.69	101.61	103.98	0.96
30	2.21	2.21	2.21	101.80	101.89	101.85	101.85	0.94
60	2.16	2.16	2.16	99.56	99.47	99.65	99.56	0.92
90	2.11	2.10	2.11	97.23	97.00	97.14	97.12	0.90
120	2.00	2.01	2.00	92.42	92.66	92.28	92.45	0.86
180	1.96	1.98	1.98	90.32	91.07	91.40	90.93	0.84
eff (%)				16.87	14.57	15.70	15.72	

ตารางที่ ก.91 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 μM ของชุดควบคุมที่ 2

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				C_0^{-1}
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	0.27	0.28	0.27	11.58	11.81	11.30	11.56	1
10	0.25	0.26	0.25	10.69	10.97	10.60	10.76	0.93
30	0.25	0.25	0.25	10.37	10.41	10.46	10.41	0.90
60	0.24	0.24	0.23	9.99	9.95	9.76	9.90	0.86
90	0.22	0.22	0.23	9.29	9.25	9.57	9.37	0.81
120	0.21	0.21	0.21	8.78	8.83	8.73	8.78	0.76
180	0.19	0.19	0.19	7.57	7.89	7.75	7.74	0.67
eff (%)				34.65	33.17	31.38	33.08	

ตารางที่ ก.92 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 25 μM ของชุดควบคุมที่ 2

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				C_0^{-1}
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	0.60	0.63	0.62	27.02	28.28	27.86	27.72	1.00
10	0.59	0.58	0.60	26.51	26.09	26.74	26.44	0.95
30	0.56	0.56	0.56	25.20	25.15	25.15	25.17	0.91
60	0.54	0.55	0.54	24.31	24.55	24.27	24.38	0.88
90	0.52	0.52	0.51	23.15	22.96	22.87	22.99	0.83
120	0.48	0.47	0.48	21.24	21.00	21.19	21.14	0.76
180	0.45	0.45	0.45	20.02	20.12	20.12	20.09	0.72
eff (%)				25.90	28.87	27.80	27.54	

ตารางที่ ก.93 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 μM ของชุดควบคุมที่ 2

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	1.23	1.25	1.24	56.27	57.06	56.83	56.72	1.00
10	1.14	1.20	1.19	52.07	54.78	54.36	53.74	0.95
30	1.13	1.13	1.12	51.60	51.46	51.28	51.45	0.91
60	1.11	1.11	1.11	50.63	50.58	50.67	50.63	0.89
90	1.03	1.09	1.07	46.94	49.74	48.67	48.45	0.85
120	1.00	1.01	1.01	45.68	45.91	45.91	45.84	0.81
180	0.94	0.94	0.95	42.88	42.97	43.07	42.97	0.76
eff (%)				23.79	24.69	24.22	24.23	

ตารางที่ ก.94 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 75 μM ของชุดควบคุมที่ 2

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	1.82	1.83	1.82	84.03	84.49	83.65	84.06	1.00
10	1.71	1.75	1.75	78.90	80.62	80.57	80.03	0.95
30	1.65	1.71	1.71	75.91	78.85	78.85	77.87	0.93
60	1.62	1.68	1.68	74.42	77.17	77.45	76.34	0.91
90	1.58	1.58	1.58	72.41	72.50	72.41	72.44	0.86
120	1.55	1.53	1.55	71.15	70.26	71.10	70.84	0.84
180	1.43	1.43	1.43	65.55	65.51	65.51	65.52	0.78
eff (%)				21.99	22.47	21.69	22.05	

ตารางที่ ก.95 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 μM ของชุดควบคุมที่ 2

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				C_0^{-1}
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	2.31	2.31	2.30	106.51	106.70	106.05	106.42	1.00
10	2.16	2.25	2.25	99.79	103.81	103.76	102.45	0.96
30	2.11	2.20	2.20	97.46	101.66	101.75	100.29	0.94
60	2.07	2.16	2.16	95.69	99.51	99.75	98.32	0.92
90	2.05	2.05	2.04	94.38	94.34	94.24	94.32	0.89
120	2.00	2.01	2.00	92.42	92.47	92.38	92.42	0.87
180	1.98	1.97	1.99	91.12	90.88	91.68	91.23	0.86
eff (%)				14.45	14.82	13.55	14.28	

ตารางที่ ก.96 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 μM ของชุดควบคุมที่ 3

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				C_0^{-1}
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	0.25	0.26	0.25	10.69	10.88	10.79	10.79	1
10	0.24	0.24	0.24	10.32	10.23	10.27	10.27	0.95
30	0.23	0.24	0.23	9.71	10.09	9.81	9.87	0.91
60	0.23	0.23	0.23	9.48	9.43	9.53	9.48	0.88
90	0.22	0.22	0.22	9.11	9.06	9.06	9.08	0.84
120	0.21	0.21	0.21	8.55	8.55	8.59	8.56	0.79
180	0.20	0.20	0.20	8.03	8.17	8.08	8.10	0.75
eff (%)				24.87	24.87	25.09	24.94	

ตารางที่ ก.97 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 25 μM ของชุดควบคุมที่ 3

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				C_0^{-1}
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	0.60	0.59	0.59	26.74	26.60	26.60	26.65	1.00
10	0.58	0.57	0.56	25.76	25.62	24.92	25.43	0.95
30	0.55	0.55	0.54	24.50	24.41	24.27	24.39	0.92
60	0.53	0.53	0.53	23.75	23.75	23.71	23.74	0.89
90	0.51	0.50	0.51	22.50	22.45	22.54	22.50	0.84
120	0.49	0.48	0.49	21.66	21.38	21.84	21.62	0.81
180	0.46	0.47	0.46	20.40	20.72	20.54	20.55	0.77
eff (%)				23.73	22.10	22.80	22.88	

ตารางที่ ก.98 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 μM ของชุดควบคุมที่ 3

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				C_0^{-1}
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	1.11	1.11	1.11	50.91	50.53	50.81	50.75	1.00
10	1.10	1.10	1.11	50.44	50.39	50.63	50.49	0.99
30	1.07	1.08	1.07	48.85	49.18	48.71	48.91	0.96
60	1.04	1.03	1.04	47.22	47.13	47.22	47.19	0.93
90	0.99	1.00	0.99	45.21	45.49	45.31	45.34	0.89
120	0.94	0.93	0.94	42.55	42.46	42.65	42.55	0.84
180	0.90	0.89	0.90	40.74	40.502	40.875	40.704	0.80
eff (%)				19.98	19.85	19.56	19.79	

ตารางที่ ก.99 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 75 μM ของชุดควบคุมที่ 3

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	1.68	1.71	1.70	77.31	78.66	78.01	77.99	1.00
10	1.67	1.67	1.68	77.03	76.84	77.26	77.04	0.99
30	1.65	1.65	1.65	76.00	76.05	75.96	76.00	0.97
60	1.62	1.62	1.62	74.46	74.46	74.32	74.42	0.95
90	1.54	1.55	1.54	70.87	71.06	70.87	70.93	0.91
120	1.51	1.50	1.51	69.24	69.10	69.19	69.18	0.89
180	1.46	1.46	1.46	67.00	67.00	66.91	66.97	0.86
eff (%)				13.34	14.83	14.23	14.14	

ตารางที่ ก.100 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 μM ของชุดควบคุมที่ 3

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	2.18	2.18	2.17	100.54	100.40	100.26	100.40	1.00
10	2.09	2.09	2.09	96.39	96.58	96.20	96.39	0.96
30	2.05	2.04	2.05	94.34	94.20	94.38	94.31	0.94
60	1.99	2.00	1.99	91.86	92.14	91.96	91.99	0.92
90	1.94	1.93	1.93	89.39	89.06	89.11	89.19	0.89
120	1.88	1.89	1.89	86.78	86.97	87.06	86.93	0.87
180	1.88	1.88	1.88	86.45	86.50	86.50	86.48	0.86
eff (%)				14.01	13.85	13.73	13.86	

ตารางที่ ก.101 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 μM ของชุดควบคุมที่ 4

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	0.28	0.28	0.28	11.95	11.77	11.86	11.86	1
10	0.27	0.27	0.27	11.44	11.30	11.49	11.41	0.96
30	0.26	0.26	0.26	11.11	11.16	11.11	11.13	0.94
60	0.26	0.25	0.25	10.83	10.65	10.74	10.74	0.91
90	0.24	0.25	0.25	10.27	10.55	10.51	10.44	0.88
120	0.24	0.24	0.24	10.04	9.99	10.09	10.04	0.85
180	0.23	0.23	0.23	9.57	9.53	9.67	9.59	0.81
eff (%)				19.91	19.03	18.49	19.14	

ตารางที่ ก.102 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 25 μM ของชุดควบคุมที่ 4

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	0.57	0.55	0.57	25.53	24.64	25.43	25.20	1.00
10	0.55	0.55	0.55	24.36	24.41	24.64	24.47	0.97
30	0.53	0.53	0.54	23.75	23.71	24.03	23.83	0.95
60	0.53	0.52	0.52	23.43	23.29	23.24	23.32	0.93
90	0.50	0.51	0.50	22.45	22.50	22.40	22.45	0.89
120	0.48	0.49	0.49	21.42	21.70	21.61	21.58	0.86
180	0.47	0.47	0.47	20.72	20.63	20.68	20.68	0.82
eff (%)				18.82	18.77	18.71	17.96	

ตารางที่ ก.103 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 μM ของชุดควบคุมที่ 4

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	1.18	1.17	1.17	53.84	53.33	53.38	53.52	1.00
10	1.14	1.14	1.14	52.30	52.21	52.16	52.23	0.98
30	1.13	1.14	1.13	51.70	52.02	51.84	51.85	0.97
60	1.12	1.12	1.12	51.05	51.14	50.95	51.05	0.95
90	1.07	1.08	1.07	48.90	49.41	48.99	49.10	0.92
120	1.04	1.04	1.05	47.50	47.59	47.69	47.59	0.89
180	1.01	1.01	1.01	45.82	45.96	45.91	45.90	0.86
eff (%)				14.90	13.82	13.98	14.24	

ตารางที่ ก.104 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 75 μM ของชุดควบคุมที่ 4

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	1.72	1.72	1.72	79.13	79.13	79.04	79.10	1.00
10	1.71	1.70	1.71	78.62	78.43	78.48	78.51	0.99
30	1.65	1.65	1.64	75.68	75.86	75.63	75.72	0.96
60	1.61	1.61	1.61	73.90	74.14	74.18	74.07	0.94
90	1.56	1.57	1.55	71.80	72.08	71.29	71.73	0.91
120	1.52	1.52	1.51	69.89	69.61	69.57	69.69	0.88
180	1.51	1.51	1.51	69.33	69.15	69.19	69.22	0.88
eff (%)				12.38	12.62	12.45	12.48	

ตารางที่ ก.105 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 μM ของชุดควบคุมที่ 4

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	2.30	2.27	2.30	106.37	104.83	106.00	105.73	1.00
10	2.27	2.26	2.27	104.83	104.41	104.88	104.71	0.99
30	2.21	2.23	2.23	102.17	102.92	102.83	102.64	0.97
60	2.18	2.18	2.19	100.82	100.73	101.29	100.95	0.95
90	2.10	2.10	2.10	96.95	97.09	97.09	97.04	0.92
120	2.07	2.06	2.06	95.46	95.08	95.22	95.25	0.90
180	2.03	2.03	2.03	93.73	93.68	93.82	93.75	0.89
eff (%)				11.88	10.64	11.49	11.34	

ตารางที่ ก.106 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 μM ของชุดควบคุมที่ 5

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	0.27	0.27	0.27	11.67	11.67	11.67	11.67	1.00
10	0.26	0.26	0.26	11.21	11.21	11.21	11.21	0.96
30	0.25	0.23	0.25	10.74	9.67	10.74	10.38	0.89
60	0.24	0.24	0.24	10.27	10.27	10.27	10.27	0.88
90	0.23	0.23	0.23	9.81	9.81	9.81	9.81	0.84
120	0.23	0.23	0.23	9.67	9.67	9.67	9.67	0.83
180	0.23	0.23	0.23	9.62	9.62	9.62	9.62	0.82
eff (%)				17.58	17.58	17.58	17.58	

ตารางที่ ก.107 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 25 μM ของชุดควบคุมที่ 5

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	0.60	0.60	0.60	26.97	26.79	26.97	26.91	1.00
10	0.58	0.56	0.57	25.90	25.25	25.57	25.57	0.95
30	0.55	0.55	0.56	24.50	24.64	24.97	24.70	0.92
60	0.55	0.54	0.55	24.50	24.08	24.41	24.33	0.90
90	0.54	0.54	0.54	24.17	24.03	23.89	24.03	0.89
120	0.53	0.54	0.52	23.57	24.03	23.24	23.61	0.88
180	0.51	0.51	0.51	22.82	22.82	22.82	22.82	0.85
eff (%)				15.39	14.80	15.39	15.20	

ตารางที่ ก.108 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 μM ของชุดควบคุมที่ 5

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	1.15	1.15	1.15	52.35	52.40	52.44	52.40	1.00
10	1.07	1.08	1.06	48.90	49.09	48.48	48.82	0.93
30	1.05	1.04	1.06	48.06	47.64	48.15	47.95	0.92
60	1.03	1.03	1.02	46.94	46.75	46.57	46.75	0.89
90	1.01	1.01	1.00	46.15	45.82	45.59	45.85	0.88
120	1.00	0.99	0.98	45.49	45.17	44.84	45.17	0.86
180	0.98	0.99	0.98	44.70	44.98	44.47	44.72	0.85
eff (%)				14.61	14.16	15.21	14.66	

ตารางที่ ก.109 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 75 μM ของชุดควบคุมที่ 5

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				C_0^{-1}
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	1.64	1.63	1.64	75.21	75.16	75.30	75.23	1.00
10	1.55	1.56	1.55	71.20	71.48	71.34	71.34	0.95
30	1.51	1.50	1.49	69.15	68.96	68.54	68.88	0.92
60	1.49	1.48	1.48	68.21	67.98	67.79	67.99	0.90
90	1.48	1.47	1.48	67.75	67.56	68.17	67.82	0.90
120	1.47	1.46	1.46	67.47	67.05	66.81	67.11	0.89
180	1.45	1.46	1.46	66.72	66.81	67.14	66.89	0.89
eff (%)				11.29	11.11	10.84	11.08	

ตารางที่ ก.110 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 μM ของชุดควบคุมที่ 5

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				C_0^{-1}
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	2.22	2.22	2.22	102.50	102.50	102.50	102.50	1.00
10	2.20	2.20	2.21	101.75	101.33	101.94	101.68	0.99
30	2.18	2.20	2.19	100.73	101.43	101.24	101.13	0.99
60	2.15	2.15	2.16	99.37	99.23	99.61	99.41	0.97
90	2.11	2.12	2.12	97.51	97.97	97.79	97.76	0.95
120	2.07	2.08	2.07	95.64	96.06	95.32	95.67	0.93
180	2.00	2.00	1.99	92.00	92.10	91.86	91.99	0.90
eff (%)				10.24	10.15	10.38	10.26	

ตารางที่ ก.111 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 μM ของชุดควบคุมที่ 6

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				C_0^{-1}
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	0.26	0.26	0.26	11.11	11.11	11.11	11.11	1.00
10	0.24	0.24	0.24	10.23	10.23	10.23	10.23	0.92
30	0.24	0.24	0.24	9.99	9.99	9.99	9.99	0.90
60	0.23	0.23	0.23	9.76	9.76	9.76	9.76	0.88
90	0.23	0.23	0.23	9.67	9.67	9.67	9.67	0.87
120	0.23	0.23	0.23	9.53	9.53	9.53	9.53	0.86
180	0.22	0.22	0.22	9.34	9.34	9.34	9.34	0.84
eff (%)				15.95	15.95	15.95	15.95	

ตารางที่ ก.112 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 25 μM ของชุดควบคุมที่ 6

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				C_0^{-1}
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	0.57	0.56	0.56	25.48	25.25	25.11	25.28	1.00
10	0.54	0.53	0.54	24.31	23.85	24.13	24.10	0.95
30	0.52	0.52	0.52	23.38	23.38	23.38	23.38	0.92
60	0.52	0.51	0.53	23.15	22.92	23.61	23.23	0.92
90	0.51	0.52	0.52	22.54	23.15	23.01	22.90	0.91
120	0.50	0.51	0.52	22.31	22.59	23.06	22.65	0.90
180	0.50	0.49	0.49	22.17	21.98	21.89	22.01	0.87
eff (%)				13.00	12.93	12.82	12.92	

ตารางที่ ก.113 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 μM ของชุดควบคุมที่ 6

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	1.14	1.13	1.13	52.21	51.74	51.70	51.88	1.00
10	1.10	1.11	1.11	50.35	50.63	50.81	50.59	0.98
30	1.08	1.09	1.08	49.37	49.60	49.13	49.37	0.95
60	1.06	1.06	1.06	48.48	48.25	48.43	48.39	0.93
90	1.06	1.04	1.05	48.25	47.50	47.97	47.90	0.92
120	1.04	1.04	1.04	47.50	47.55	47.31	47.45	0.91
180	1.03	1.04	1.04	47.03	47.50	47.41	47.31	0.91
eff (%)				9.92	8.20	8.30	8.81	

ตารางที่ ก.114 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 75 μM ของชุดควบคุมที่ 6

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	1.64	1.64	1.63	75.26	75.40	75.02	75.23	1.00
10	1.59	1.59	1.60	72.92	73.20	73.39	73.17	0.97
30	1.56	1.55	1.56	71.52	71.38	71.76	71.56	0.95
60	1.53	1.54	1.54	70.31	70.59	70.87	70.59	0.94
90	1.53	1.52	1.52	70.26	69.66	70.03	69.98	0.93
120	1.51	1.52	1.51	69.43	69.94	69.19	69.52	0.92
180	1.51	1.52	1.50	69.19	69.66	69.01	69.29	0.92
eff (%)				8.06	7.61	8.02	7.90	

ตารางที่ ก.115 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 μM ของชุดควบคุมที่ 6

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	2.18	2.19	2.19	100.68	101.19	100.96	100.95	1.00
10	2.11	2.11	2.10	97.18	97.32	96.90	97.14	0.96
30	2.09	2.09	2.08	96.20	96.25	95.74	96.06	0.95
60	2.08	2.07	2.07	96.06	95.69	95.32	95.69	0.95
90	2.08	2.06	2.06	95.78	95.08	95.18	95.35	0.94
120	2.06	2.05	2.05	94.85	94.48	94.76	94.69	0.94
180	2.05	2.03	2.05	94.38	93.82	94.48	94.23	0.93
eff (%)				6.26	7.28	6.42	6.65	

ตารางที่ ก.116 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 μM ของชุดควบคุมที่ 7

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	0.24	0.24	0.24	10.23	10.23	10.23	10.23	1.00
10	0.24	0.24	0.24	10.13	10.18	10.18	10.16	0.99
30	0.24	0.24	0.24	10.04	10.04	10.09	10.06	0.98
60	0.24	0.23	0.24	9.99	9.79	9.99	9.93	0.97
90	0.24	0.24	0.24	9.95	9.95	9.95	9.95	0.97
120	0.24	0.24	0.24	9.90	9.90	9.90	9.90	0.97
180	0.23	0.23	0.23	9.85	9.85	9.81	9.84	0.96
eff (%)				3.65	3.65	4.11	3.80	

ตารางที่ ก.117 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 25 μM ของชุดควบคุมที่ 7

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	0.56	0.56	0.56	25.25	25.25	25.25	25.25	1.00
10	0.56	0.56	0.56	24.97	24.92	24.83	24.91	0.99
30	0.55	0.55	0.55	24.59	24.64	24.64	24.63	0.98
60	0.55	0.55	0.55	24.55	24.50	24.50	24.52	0.97
90	0.55	0.55	0.55	24.45	24.50	24.45	24.47	0.97
120	0.55	0.55	0.55	24.41	24.36	24.36	24.38	0.97
180	0.55	0.54	0.55	24.36	24.31	24.36	24.35	0.96
eff (%)				3.51	3.70	3.51	3.57	

ตารางที่ ก.118 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 μM ของชุดควบคุมที่ 7

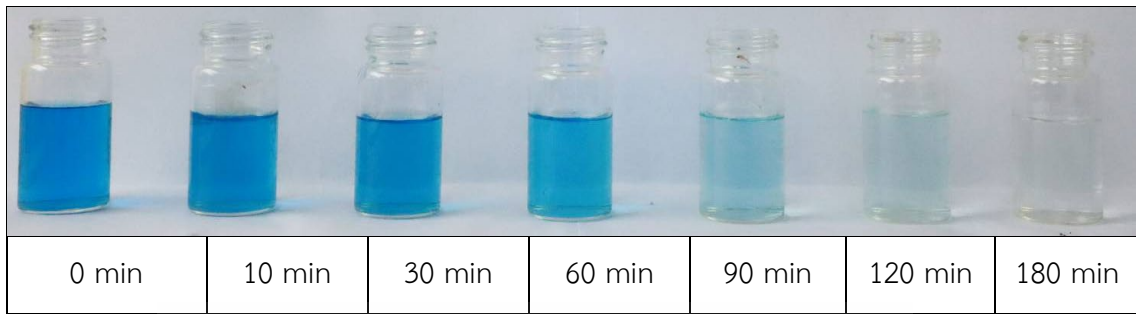
เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	1.10	1.00	1.10	50.35	45.68	50.35	48.79	1.00
10	1.08	1.08	1.08	49.41	49.51	49.51	49.47	1.01
30	1.07	1.07	1.07	48.90	48.90	48.90	48.90	1.00
60	1.06	1.06	1.06	48.43	48.43	48.43	48.43	0.99
90	1.06	1.06	1.06	48.15	48.15	48.15	48.15	0.99
120	1.04	1.04	1.04	47.50	47.64	47.59	47.58	0.98
180	1.04	1.04	1.04	47.31	47.31	47.31	47.31	0.97
eff (%)				6.02	-3.57	6.02	3.03	

ตารางที่ ก.119 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 75 μM ของชุดควบคุมที่ 7

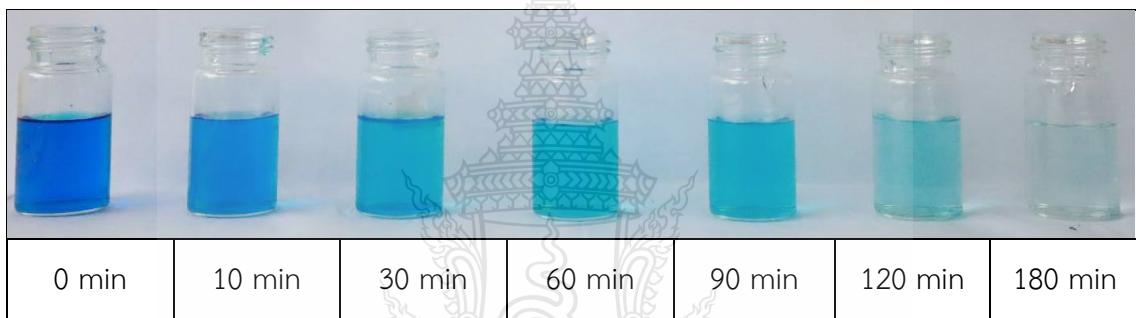
เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	1.64	1.64	1.64	75.26	75.26	75.26	75.26	1.00
10	1.63	1.63	1.63	74.98	75.02	75.02	75.01	1.00
30	1.62	1.63	1.63	74.70	74.74	74.79	74.74	0.99
60	1.62	1.62	1.62	74.51	74.56	74.60	74.56	0.99
90	1.62	1.61	1.62	74.28	74.23	74.32	74.28	0.99
120	1.60	1.60	1.60	73.62	73.67	73.72	73.67	0.98
180	1.60	1.60	1.60	73.44	73.48	73.39	73.44	0.98
eff (%)				2.42	2.36	2.48	2.42	

ตารางที่ ก.120 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 μM ของชุดควบคุมที่ 7

เวลา (min)	Absorbance			C (μM)				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	2.19	2.19	2.19	100.91	100.91	100.91	100.91	1.00
10	2.18	2.18	2.18	100.49	100.45	100.49	100.48	1.00
30	2.17	2.16	2.16	99.93	99.89	99.84	99.89	0.99
60	2.15	2.15	2.15	99.33	99.37	99.37	99.36	0.98
90	2.15	2.15	2.15	99.14	99.19	99.19	99.17	0.98
120	2.14	2.14	2.14	98.86	98.77	98.81	98.81	0.98
180	2.14	2.14	2.13	98.58	98.53	98.49	98.53	0.98
eff (%)				2.31	2.36	2.40	2.36	



รูปที่ ก.1 การบำบัดสีย้อม IC ที่ความเข้มข้น 10 μM เมื่อเวลาผ่านไป 180 min



รูปที่ ก.2 การบำบัดสีย้อม MB ที่ความเข้มข้น 10 μM เมื่อเวลาผ่านไป 180 min



รูปที่ ก.3 การบำบัดสีย้อม RB5 ที่ความเข้มข้น 10 μM เมื่อเวลาผ่านไป 180 min

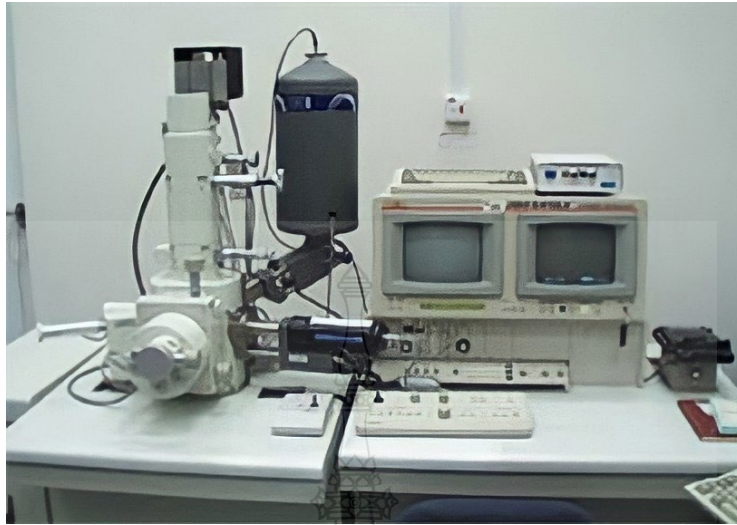




รูปที่ ข.1 อุปกรณ์ pH



รูปที่ ข.2 ตู้อบลมร้อน



รูปที่ ข.3 อุปกรณ์ SEM-EDS



รูปที่ ข.4 อุปกรณ์ BET Surface



รูปที่ ข.5 อุปกรณ์ Nanobubbles Testing



รูปที่ ข.6 อุปกรณ์ ORP



รูปที่ ข.7 อุปกรณ์ Spectrophotometer



รูปที่ ข.8 อุปกรณ์ DO



รูปที่ ข.9 เครื่อง ICP-OES



รูปที่ ข.10 เครื่อง GC-M



● การคำนวณความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อม IC, MB และ RB5

1. คำนวณความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อม IC มวลโมเลกุล $466.35 \text{ g.mol}^{-1}$

$$\begin{aligned} & \text{เตรียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น } 100 \text{ } \mu\text{M} \text{ (} 10^{-6} \text{ mol.L}^{-1}\text{)} \\ & = 466.35 \text{ g.mol}^{-1} \times 100 \times 10^{-6} \text{ mol.L}^{-1} \\ & = 0.047 \text{ g.L}^{-1} \end{aligned}$$

∴ เตรียมสารละลายในน้ำ 1 L ใช้สารละลาย 0.047 g

2. คำนวณความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อม MB มวลโมเลกุล $319.86 \text{ g.mol}^{-1}$

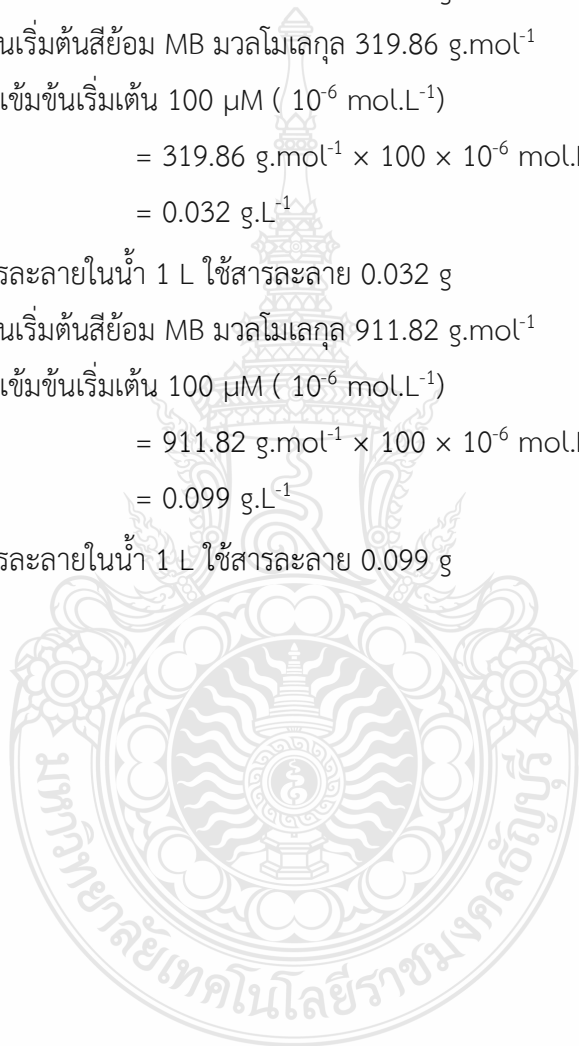
$$\begin{aligned} & \text{เตรียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น } 100 \text{ } \mu\text{M} \text{ (} 10^{-6} \text{ mol.L}^{-1}\text{)} \\ & = 319.86 \text{ g.mol}^{-1} \times 100 \times 10^{-6} \text{ mol.L}^{-1} \\ & = 0.032 \text{ g.L}^{-1} \end{aligned}$$

∴ เตรียมสารละลายในน้ำ 1 L ใช้สารละลาย 0.032 g

3. คำนวณความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อม MB มวลโมเลกุล $911.82 \text{ g.mol}^{-1}$

$$\begin{aligned} & \text{เตรียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น } 100 \text{ } \mu\text{M} \text{ (} 10^{-6} \text{ mol.L}^{-1}\text{)} \\ & = 911.82 \text{ g.mol}^{-1} \times 100 \times 10^{-6} \text{ mol.L}^{-1} \\ & = 0.099 \text{ g.L}^{-1} \end{aligned}$$

∴ เตรียมสารละลายในน้ำ 1 L ใช้สารละลาย 0.099 g



- การคำนวณปริมาณโดยน้ำหนัก Ti

การคำนวณปริมาณโดยน้ำหนัก Ti

นำผลวิเคราะห์ปริมาณ Ti = 0.74 กรัมโดยน้ำหนักที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยอุปกรณ์ EDS มาคำนวณหาปริมาณ Ti บนตัวอย่าง AC ปริมาณ 2 g ที่นำมาทดสอบในการประเมินประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม IC, MB, และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ 250 mL ได้ดังนี้

$$\text{ในตัวอย่าง } 100 \text{ g มี Ti} = 0.74 \text{ g}$$

$$\text{ถ้าตัวอย่าง } 2 \text{ g มี Ti} = 0.0148 \text{ g}$$

ดังนั้น ในตัวอย่าง AC 2 g ในน้ำเสียสังเคราะห์ 250 mL มี Ti อยู่ 0.0148 g

จากนั้นหาปริมาณ Ti ในน้ำเสียสังเคราะห์ 1,000 mL ได้ดังนี้

$$\text{ในน้ำเสียสังเคราะห์ } 250 \text{ mL มี Ti} = 0.0148 \text{ g.L}^{-1}$$

$$\text{ถ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ } 1,000 \text{ mL มี Ti} = 0.0592 \text{ g.L}^{-1}$$

$$\approx 59.2 \text{ mg.L}^{-1}$$

ดังนั้น ในน้ำเสียสังเคราะห์ 1,000 mL มี Ti อยู่ 59.2 mg.L⁻¹

เมื่อนำสีย้อม IC, MB, และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่มีการเติมอากาศขนาด MNBs มาวิเคราะห์การหลุดร่อนด้วยเครื่อง ICP พบว่า มีปริมาณ Ti ที่หลุดร่อนในน้ำเสียสังเคราะห์ เท่ากับ 0.31 mg.L⁻¹

สามารถหาปริมาณการหลุดร่อนของ Ti (%) ในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ดังนี้

$$= \frac{0.31}{59.2} \times 100$$

$$= 0.523\%$$

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล นางสาวณิชารีย์ เอกชาตรี
วัน เดือน ปีเกิด 6 สิงหาคม 2538
ที่อยู่ บ้านเลขที่ 55/162 หมู่บ้านพฤษภาวิไลเลข 2 หมู่ 2 ตำบลลำผักกูด อำเภอ
ธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110
การศึกษา ปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
เบอร์โทรศัพท์ 088-6051651
อีเมล nicharee057614@gmail.com

