

การเพิ่มศักยภาพการบำบัดสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่ง  
ปฏิกิริยาผสม AC/TiO<sub>2</sub> โด๊ปด้วยเงินร่วมกับการเติมอากาศไมโคร/นาโนบับเบิล

ENHANCEMENT OF DYE DECOLORIZATION BY PHOTOCATALYTIC  
PROCESS USING HYBRID AC/TiO<sub>2</sub> DOPED WITH Ag AND  
MICRO/NANOBUBBLE AERATION

ยวดี ลิเลิศ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การเพิ่มศักยภาพการบำบัดสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้  
ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม AC/TiO<sub>2</sub> ใต้ด้วยเงินร่วมกับการเติมอากาศ  
ไมโคร/นาโนบับเบิล



ยวดี สีเลิศ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

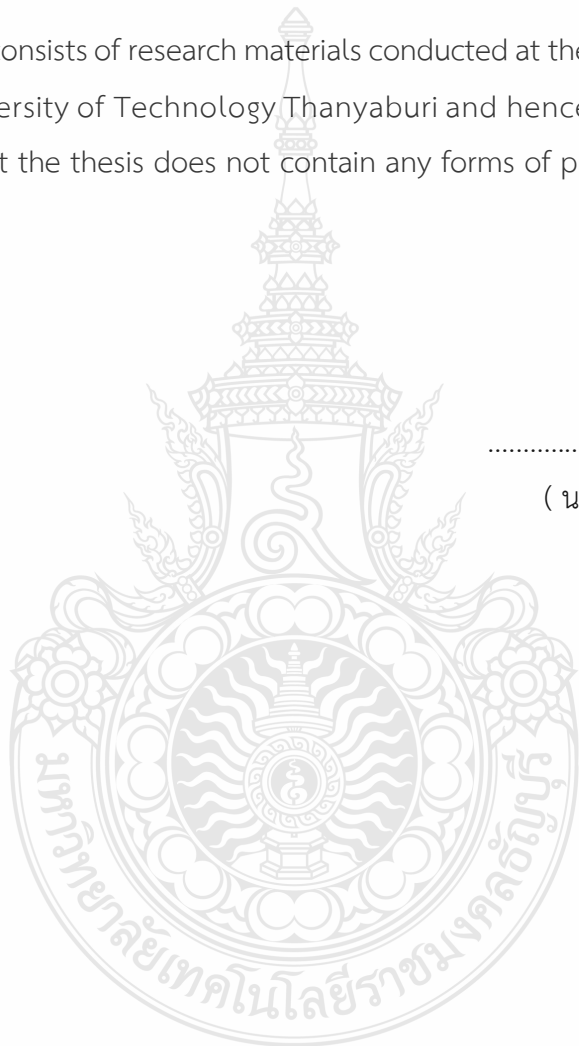
ปีการศึกษา 2565

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.

.....  
( นางสาวยุวดี ลีเลิศ )



หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเพิ่มศักยภาพการบำบัดสีด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม AC/TiO<sub>2</sub> ได้บด้วยเงินร่วมกับการเติมอากาศไมโคร/นาโนบับเบิล  
Enhancement of Dye Decolorization by Photocatalytic Process Using Hybrid AC/TiO<sub>2</sub> Doped with Ag and Micro/Nanobubble Aeration

ชื่อ - นามสกุล

นางสาวยุวดี ลีเลิศ

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

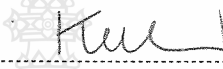
อาจารย์ที่ปรึกษา


ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธรรมศักดิ์ โจรจน์วิรุฬห์, วศ.ด.

ปีการศึกษา


2565

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


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

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

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

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

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาสุปรีย์, Ph.D.)

วันที่ 3 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2565

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเพิ่มศักยภาพการบำบัดสี้อมด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม AC/TiO <sub>2</sub> โด๊ปด้วยเงินร่วมกับการเติมอากาศไมโคร/นาโนบับเบิล
ชื่อ -นามสกุล	นางสาวยุวดี ลีเลิศ
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธรรมศักดิ์ โรจนวีรุฬห์, วศ.ด.
ปีการศึกษา	2565

### บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้มุ่งเน้นประเมินประสิทธิภาพการบำบัดสี้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ 3 ชนิด ได้แก่ สี้อม Indigo Carmine (IC), Methylene Blue (MB) และ Reactive Black 5 (RB5) ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง UVA และการเติมอากาศขนาดไมโคร/นาโนบับเบิล (Micro/Nanobubble, MNBs)

ตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> ถูกเตรียมขึ้นด้วยกระบวนการโซล-เจลและตัวเร่งปฏิกิริยาถูกนำวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ได้แก่ SEM, EDS และ BET ตามลำดับในการตรวจสอบประสิทธิภาพการบำบัดสี้อมของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกได้ดำเนินการอย่างเป็นระบบภายใต้สภาวะการควบคุม 8 ชุด

ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสี้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> ร่วมกับแหล่งกำเนิดแสง UVA และการเติมอากาศขนาด MNBs มีส่งผลให้เกิดประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด โดยการเติม MNBs สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดสี้อม IC, MB และ RB5 โดยมีประสิทธิภาพเท่ากับ 87.03%, 83.78% และ 81.67% ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเติม MNBs มีส่วนส่งเสริมให้เกิดสารที่มีความสามารถออกซิไดซ์ที่รุนแรง ได้แก่ •OH และ •O<sub>2</sub><sup>-</sup> ในปริมาณที่มากขึ้น สำหรับจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาในการบำบัดสี้อมสามารถอธิบายด้วยสมการ Langmuir-Hinshelwood (LH) จากผลการศึกษาค่าคงที่ปฏิกิริยา (k) เท่ากับ 1.39, 0.92 และ 0.28 μM·min<sup>-1</sup> ตามลำดับ และค่าคงที่ในปฏิกิริยาคูดัดผิว (K) เท่ากับ 0.04, 0.04 และ 0.05 μM<sup>-1</sup> สำหรับสี้อม IC, MB และ RB5 ตามลำดับ

**คำสำคัญ :** กระบวนการโฟโตคะตะลิติก สี้อมเมทิลีนบลู สี้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 สี้อมอินดิโกคาร์มีน

<b>Thesis Title</b>	Enhancement of Dye Decolorization by Photocatalytic Process Using Hybrid AC/ TiO <sub>2</sub> Doped with Ag and Micro/Nanobubble Aeration
<b>Name - Surname</b>	Miss Yuwadee Leelert
<b>Program</b>	Civil Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Assistant Professor Thammasak Rojviroon, D.Eng.
<b>Academic Year</b>	2022

## ABSTRACT

This research aimed to evaluate the dye decolorization efficiency in synthetic wastewater with three types of dye, i.e., Indigo Carmine (IC), Methylene Blue (MB), and Reactive Black 5 (RB5) by the photocatalytic process using AC/ 0.1% Ag- TiO<sub>2</sub> as photocatalyst under UVA light source and micro/nanobubbles (MNBs) aeration.

The AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> photocatalyst was prepared by the sol-gel process, and the physical properties of the photocatalyst were investigated via SEM, EDS, and BET, respectively. To verify the dye decolorization efficiency by the photocatalytic process, the experiment was systematically conducted under eight control conditions.

The results showed that the dye decolorization efficiency of IC, MB, and RB5 in synthetic wastewater by the photocatalytic process using AC/ 0.1% Ag- TiO<sub>2</sub> under UVA light source and MNBs aeration achieved maximum efficiency. By adding MNBs, the dye decolorization efficiency of IC, MB, and RB5 could be increased at 87.03%, 83.78%, and 81.67%, respectively. These results indicated that MNBs contributed to the formation of stronger oxidizing agents such as •OH and •O<sub>2</sub><sup>-</sup> in larger quantities. The Langmuir-Hinshelwood (L-H) kinetic model was used to describe the kinetics of the dye decolorization. The kinetic rate constants (*k*) were 1.39, 0.92, and 0.28 μM·min<sup>-1</sup>, and the surface adsorption constants (*K*) were 0.04, 0.04, and 0.05 μM<sup>-1</sup> for IC, MB, and RB5, respectively.

**Keywords:** Indigo Carmine, Methylene Blue, Photocatalytic process, Reactive Black 5

## กิตติกรรมประกาศ

ในการศึกษางานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้อย่างสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณา และความอนุเคราะห์ของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธรรมศักดิ์ โรจน์วิรุฬห์ อาจารย์ที่ปรึกษา และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรณพ โรจน์วิรุฬห์ ผู้ให้ความรู้และกรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้ทำวิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ และมอบความดีทั้งหมดนี้ที่จะเกิดขึ้นเนื่องจากการนำผลงานวิจัยนี้ไปใช้ประโยชน์ให้แก่ คุณพ่อ คุณแม่ และเพื่อนๆ ที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิจัยนี้ รวมถึงคณาจารย์ทุกท่านที่ให้การสนับสนุนและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้ และผู้วิจัยขอขอบคุณบุคลากรเจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัท กรีน ซัสเทนอะบิลิตี้ คอนเซ็ปท์แอนด์ จำกัด (GSC) สำหรับความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์และอุปกรณ์ต่างๆ จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยเล่มนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจหากงานวิจัยในครั้งนี้ขาดตกบกพร่อง หรือไม่สมบูรณ์ประการใด ผู้วิจัยขอกราบขออภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ยุวดี ลีเลิศ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(11)
บทที่ 1 บทนำ.....	12
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	12
1.2 วัตถุประสงค์.....	13
1.3 ขอบเขต.....	13
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	13
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	14
2.1 สีย้อม.....	14
2.2 กระบวนการบำบัดน้ำทิ้ง.....	16
2.3 กระบวนการโฟโตคะตะลิติก (Photocatalytic).....	18
2.4 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide) .....	23
2.5 กระบวนการโซล-เจล (sol-gel).....	24
2.6 ถ่านกัมมันต์.....	26
2.7 ไมโคร/นาโนบับเบิล.....	29
2.8 สารพิษขนาดเล็ก (Micropollutants).....	29
2.9 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชัน .....	30
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	31
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	31
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	34
3.3 การศึกษาจลนพลศาสตร์ (Kinetics) .....	40



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน.....	41
4.1 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO <sub>2</sub> ....	41
4.2 การวิเคราะห์การกระจายตัวและขนาดของฟองอากาศ MNBs.....	44
4.3 การประเมินประสิทธิภาพการบำบัดสีข้อม.....	45
4.4 การศึกษาจลนพลศาสตร์ (Kinetics).....	62
บทที่ 5 ผลการดำเนินงาน.....	60
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	65
5.2 ข้อเสนอแนะที่ได้จากการวิจัย.....	66
บรรณานุกรม.....	67
ภาคผนวก.....	70
ภาคผนวก ก ผลการทดลอง.....	76
ภาคผนวก ข การคำนวณ.....	137
ภาคผนวก ค อุปกรณ์การทดลอง.....	140
ภาคผนวก ง ภาพการทดลอง.....	145
ประวัติผู้เขียน.....	147

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 โมเลกุลของสารประกอบกลุ่มโครโมฟอร์และกลุ่มออกโซโครม.....	14
ตารางที่ 2.2 ข้อดี-ข้อเสีย ของกระบวนการบำบัด .....	18
ตารางที่ 2.3 ช่วงความยาวคลื่นของรังสีอัลตราไวโอเล็ตประเภทต่างๆ.....	19
ตารางที่ 2.4 ขนาดช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	20
ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	24
ตารางที่ 2.6 ข้อดี-ข้อเสีย กระบวนการโซล-เจล.....	26
ตารางที่ 2.7 ประเภทและการใช้งานของถ่านกัมมันต์ .....	27
ตารางที่ 2.8 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี ...	28
ตารางที่ 3.1 รูปแบบสภาวะในการทดลองหาประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5..	39
ตารางที่ 4.1 ปริมาณองค์ประกอบธาตุโดยน้ำหนัก .....	43
ตารางที่ 4.2 ผลวิเคราะห์พื้นที่ผิวเฉพาะ ปริมาตรและขนาดรูพรุนของพื้นผิว .....	44
ตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์.....	46
ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์.....	46
ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์.....	47
ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์ค่าศักย์ในการออกซิเดชัน-รีดักชัน.....	54
ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์โลหะหนักเพื่อหาสารประกอบ Ti และ Ag .....	57
ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกกับงานวิจัยอื่น.....	64

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 การจำแนกประเภทของสีย้อม .....	15
รูปที่ 2.2 การเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะลิติก .....	21
รูปที่ 2.3 โครงสร้างผลึกพื้นฐานของไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	23
รูปที่ 2.4 กระบวนการโซล-เจล .....	24
รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ Dip Coating .....	32
รูปที่ 3.2 การทดลองการบำบัดสีย้อมในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์.....	33
รูปที่ 3.3 อุปกรณ์เติมอากาศขนาด MNBs .....	33
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการเตรียม AC/0.1% Ag-TiO <sub>2</sub> .....	36
รูปที่ 3.5 การประเมินประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 .....	39
รูปที่ 4.1 พื้นผิว AC และตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO <sub>2</sub> ที่วิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ SEM.....	41
รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุบน AC.....	42
รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุบนตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO <sub>2</sub> .....	43
รูปที่ 4.4 การกระจายตัวและขนาดของฟองอากาศ MNBs .....	45
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง $C.C_0^{-1}$ กับเวลาในชุดการทดลองของสีย้อม IC .....	48
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง $C.C_0^{-1}$ กับเวลาในชุดควบคุมที่ 1 ของสีย้อม IC.....	49
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง $C.C_0^{-1}$ กับเวลาในชุดการทดลองของสีย้อม MB.....	49
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง $C.C_0^{-1}$ กับเวลาในชุดควบคุมที่ 1 ของสีย้อม MB .....	50
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง $C.C_0^{-1}$ กับเวลาในชุดการทดลองของสีย้อม RB5.....	50
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง $C.C_0^{-1}$ กับเวลาในชุดควบคุมที่ 1 ของสีย้อม RB5.....	51
รูปที่ 4.11 ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม IC.....	53
รูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม MB.....	53
รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม RB5.....	54
รูปที่ 4.14 ค่า DO ที่เปลี่ยนแปลงของสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์.....	55
รูปที่ 4.15 ค่า DO ที่เปลี่ยนแปลงของสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์.....	56
รูปที่ 4.16 ค่า DO ที่เปลี่ยนแปลงของสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์.....	56
รูปที่ 4.17 โครงสร้างสีย้อม IC .....	59

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.18 โครงสร้างสี่เหลี่ยม MB .....	60
รูปที่ 4.19 โครงสร้างสี่เหลี่ยม RB5 .....	61
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง $r^1$ และ $C^1$ สี่เหลี่ยม IC ในชุดการทดลอง .....	62
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง $r^1$ และ $C^1$ สี่เหลี่ยม MB ในชุดการทดลอง .....	63
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง $r^1$ และ $C^1$ สี่เหลี่ยม RB5 ในชุดการทดลอง .....	63



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

AC	ถ่านกัมมันต์
AC/0.1%Ag-TiO <sub>2</sub>	ตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ดับเงิน
CB	แถบ Conduction
e <sup>-</sup> <sub>CB</sub>	อิเล็กตรอนที่แถบการนำไฟฟ้า
H <sup>+</sup>	โปรตอน
h <sup>+</sup> <sub>VB</sub>	โฮลที่แถบวาเลนซ์
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
hν	พลังงานแสง
IC	สีอินดิโก คาร์มีน (Indigo Carmine)
L-H	แบบจำลองการเกิดปฏิกิริยา (Langmuir-Hinshelwood)
MB	เมทิลีนบลู (Methylene Blue)
MNBs	ไมโคร/นาโนบับเบิล (Micro/Nanobubbles)
O <sup>-</sup>	ออกไซด์ไอออนเรดิคัล (oxide ion radicals)
O <sup>2-</sup>	ออกซิเจนไอออน
O <sub>2</sub>	ออกซิเจน
OH <sup>-</sup>	ไฮดรอกไซด์ไอออน
•O <sub>2</sub> <sup>-</sup>	ซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล (superoxide ion radicals)
•OH <sub>2</sub>	เปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล
•OH	ไฮดรอกซิลเรดิคัล (hydroxyl radicals)
RB5	สีรีแอกทีฟแบล็ค 5 (Reactive Black 5)
RNS	สารอนุมูลอิสระไนโตรเจน Reactive Nitrogen Species
RO <sub>2</sub> S	สารอนุมูลอิสระออกซิเจน
UVA	รังสีอัลตราไวโอเล็ตชนิดเอ
VB	แถบ Valence

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

อุตสาหกรรมฟอกย้อมและอุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมที่มีการใช้น้ำ สารเคมี และสีย้อม ในกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมาก ในส่วนของโครงสร้างโมเลกุลของสีย้อมประกอบด้วยสารประกอบกลุ่มโครโมฟอร์ (Chromophore) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารที่ทำให้เกิดสีและกลุ่มออกโซโครม (Auxochromes) เป็นกลุ่มที่ส่งเสริมกลุ่มโครโมฟอร์ทำให้สีติดเส้นใยได้ดีขึ้น โดยสารประกอบทั้ง 2 กลุ่ม จะมีโครงสร้างที่มีความซับซ้อนและย่อยสลายได้ยาก [1], [2] ส่งผลให้น้ำทิ้งที่เกิดจากอุตสาหกรรมดังกล่าวยังคงมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ปนเปื้อนในน้ำทิ้งในปริมาณมาก [3], [4] เมื่อน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมดังกล่าวถูกปล่อยระบายสู่แหล่งน้ำสาธารณะอาจก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลกระทบต่อห่วงโซ่อาหารและระบบนิเวศเป็นวงกว้าง เช่น เกิดการลดระดับออกซิเจนละลายน้ำจากอากาศสู่ผิวน้ำ บดบังการส่องผ่านของแสงอาทิตย์ ส่งผลกระทบต่อการสังเคราะห์แสงของพืชในแหล่งน้ำ และรบกวนการใช้ชีวิตของสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำรวมถึงส่งผลกระทบต่อคุณภาพของแหล่งน้ำ เป็นต้น [5], [6], [7] ทั้งนี้จึงจำเป็นต้องมีกระบวนการบำบัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมและอุตสาหกรรมสิ่งทอให้เป็นไปตามมาตรฐานน้ำทิ้งก่อนปล่อยระบายสู่แหล่งน้ำสาธารณะ

ปัจจุบันกระบวนการที่มีการนำมาใช้ในการบำบัดสีย้อมในน้ำทิ้งของอุตสาหกรรมดังกล่าว มีหลายวิธี เช่น การตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมี กระบวนการดูดซับ กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน และกระบวนการบำบัดด้วยโอโซน เป็นต้น ซึ่งกระบวนการข้างต้นยังมีข้อจำกัดที่แตกต่างกันไป เช่น ใช้ระยะเวลาในการดำเนินระบบนาน ประสิทธิภาพการบำบัดต่ำ และมีต้นทุนในการดำเนินระบบสูง เป็นต้น [8], [9] สำหรับกระบวนการโฟโตคะตะลิติก (Photocatalytic process) เป็นกระบวนการที่มีศักยภาพสามารถออกซิไดซ์สารมลพิษจำพวกสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ที่มีความเข้มข้นสูง โครงสร้างโมเลกุลที่มีความซับซ้อน และสามารถประยุกต์ใช้กับสารปนเปื้อนได้หลายชนิด [10], [11] โดยอาศัยการทำงานของแสงอาทิตย์หรือแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet, UV) ที่มีความเข้มแสงเพียงพอร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งกระบวนการดังกล่าวเป็นกระบวนการที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและดำเนินระบบง่าย มีขั้นตอนที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนและต้นทุนในการดำเนินระบบต่ำ รวมทั้งยังสามารถประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีได้หลากหลายและสามารถบำบัดน้ำทิ้งประเภทอื่นได้อีกด้วย [12], [13]

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการประเมินประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ (Activated carbon, AC) เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO<sub>2</sub>) ใต้อิออนเงิน (Silver, Ag) ร่วมกับแสง UVA และการเติมอากาศขนาดไมโคร/นาโนบับเบิล (Micro/Nanobubbles, MNBs) ซึ่งเตรียมด้วยวิธีโซล-เจล (sol-gel method) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานในการบำบัดน้ำทิ้ง

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 พัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> ที่เตรียมด้วยวิธีโซล-เจล

1.2.2 ประเมินประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Indigo Carmine (IC), Methylene Blue (MB) และ Reactive Black 5 (RB5) ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> ร่วมกับแหล่งกำเนิดแสง UVA และการเติมอากาศขนาด MNBs

1.2.3 ประเมินการหลุดร่อนของสารประกอบ Ti และ Ag และการสลายโครงสร้างโมเลกุลของสีย้อม IC, MB และ RB5

## 1.3 ขอบเขต

1.3.1 เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> ด้วยวิธีโซล-เจล

1.3.2 สีย้อมที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ IC, MB และ RB5 เตรียมในน้ำเสียสังเคราะห์และทดสอบถึงปฏิกรณ์แบบแบทช์ (Batch reactor)

1.3.3 การเติมอากาศขนาด MNBs

1.3.4 หลอดอัลตราไวโอเล็ตชนิด UVA ความเข้มแสง 1,250 μW.cm<sup>-2</sup>

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบเทคนิคและวิธีการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> ด้วยวิธีโซล-เจล

1.4.2 ทราบประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> ร่วมกับแหล่งกำเนิดแสง UVA และการเติมอากาศขนาด MNBs

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 สีย้อม

สีย้อมเกิดจากกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีที่มนุษย์สร้างขึ้น ส่วนใหญ่มีโครงสร้างเป็นสารประกอบอะโรมาติก (Aromatic) และสารประกอบไอออไนซ์ (Ionizing) ประกอบด้วยโมเลกุลที่มีความซับซ้อน 2 ส่วนคือ กลุ่มโครโมฟอร์ มีหน้าที่ในการทำให้เกิดสี และกลุ่มออกโซโครม ช่วยเสริมสร้างให้กลุ่มโครโมฟอร์ยึดติดกับเส้นใยได้ดี [14], [15]

สำหรับโมเลกุลของสารประกอบกลุ่มโครโมฟอร์และกลุ่มออกโซโครมแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 โมเลกุลของสารประกอบกลุ่มโครโมฟอร์และกลุ่มออกโซโครม [16], [17]

สีย้อม	หมู่ฟังก์ชัน
กลุ่มโครโมฟอร์	
1. อะโซ (azo)	-N=N-
2. คาร์บอนิล (carbonyl)	=C=O
3. คาร์บอน (carbon)	=C=C=
4. คาร์บอน-ไนโตรเจน (carbon-nitrogen)	-C=NH-
5. ไนโตรโซ (nitroso)	-NO
6. ไนโตร (nitro)	-NO <sub>2</sub>
7. กำมะถัน (sulfur)	C=S
กลุ่มออกโซโครม	
1. แอมโมเนีย (Ammonia)	-NH <sub>3</sub>
2. คาร์บอกซิล (carboxyl)	-COOH
3. ซัลโฟนิล (sulfonyl)	-HSO <sub>3</sub>
4. ไฮดรอกซิล (hydroxyl)	-OH

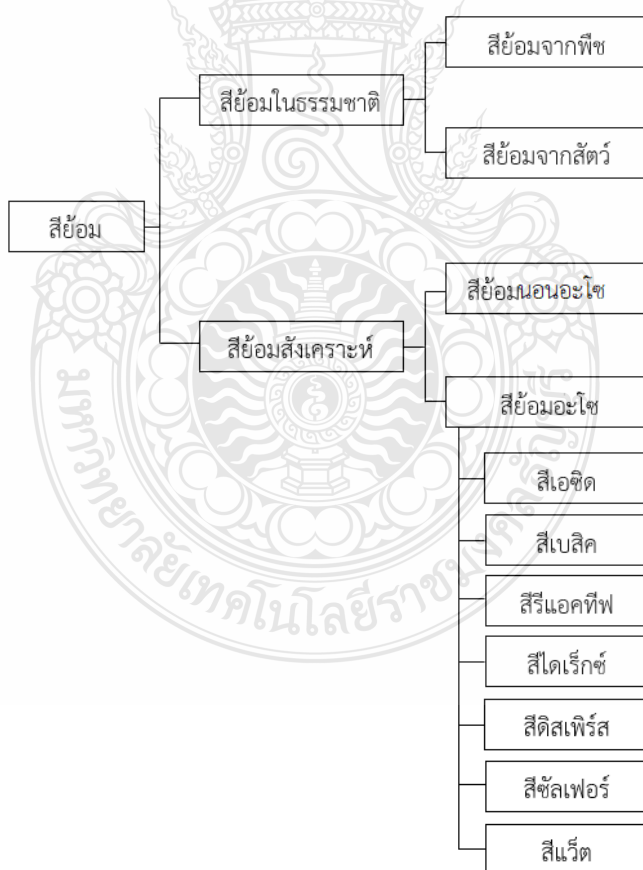


ปัจจุบันเพื่อช่วยลดปัญหาการขาดแคลนของสีย้อมธรรมชาติได้มีการนำสีย้อมสังเคราะห์มาใช้งานกันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง อุตสาหกรรมพลาสติก และอุตสาหกรรมงานพิมพ์ เป็นต้น โดยโมเลกุลของสีที่สายตาสามารถมองเห็นได้เกิดจากการดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่น 400–700 nm สามารถจำแนกสีย้อมที่มีการนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมสิ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภท [18] ได้แก่

- 1) สีย้อมธรรมชาติ คือ สีที่ได้มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น พืชจากดอกอัญชัน แร่ธาตุ และสัตว์จำพวกหอย, แมลง
- 2) สีย้อมสังเคราะห์ คือ สีที่เกิดจากกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีของสารอินทรีย์และอนินทรีย์

### 2.1.1 ประเภทสีย้อม

การจำแนกประเภทสีย้อมโดยทั่วไปมีหลากหลายวิธี เช่น การจำแนกตามโครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลสีย้อม กระบวนการที่นำไปใช้งานในอุตสาหกรรม ความสามารถในการละลายน้ำและไม่ละลายน้ำของสีย้อม และยังมีการจำแนกตามประจุของสารละลาย [19] สำหรับรายละเอียดการจำแนกสีย้อมแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การจำแนกประเภทของสีย้อม

### 2.1.2 ความเป็นพิษที่ย่อม

ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมทำสีย้อมผม อุตสาหกรรมกระดาษ และอุตสาหกรรมพอกหนัง อุตสาหกรรมเหล่านี้ส่วนใหญ่เป็นอุตสาหกรรมที่ก่อให้เกิดสีย้อมในน้ำเสียเป็นปริมาณมาก เนื่องจากการใช้น้ำปริมาณมากในกระบวนการทำงาน เช่น การล้างเส้นใย การพอกสี และการย้อม เป็นต้น เมื่อน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอถูกปล่อยระบายออกสู่แหล่งน้ำสาธารณะ ซึ่งในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมดังกล่าวยังมีองค์ประกอบของโลหะหนัก เช่น นิกเกิล ทองแดง และโครเมียม เป็นต้น [20] ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำโดยเฉพาะปลา เหงือกปลาสามารถสะสมโลหะหนักได้ทำให้มีผลต่อพันธุกรรมของปลา และมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชโดยเฉพาะอย่างยิ่งการสังเคราะห์ด้วยแสง และคาร์บอนไดออกไซด์ ผลกระทบเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อกระบวนการทางนิเวศวิทยาของสิ่งมีชีวิต

## 2.2 กระบวนการบำบัดน้ำทิ้ง [21-23]

### 1) กระบวนการบำบัดทางกายภาพ (Physical treatment)

เป็นกระบวนการดักขยะหรือสิ่งเจือปนที่มีขนาดใหญ่ออกจากน้ำโดยใช้อุปกรณ์ต่างๆ เช่น ตะแกรงดักขยะ ถังดักกรวดทราย เป็นต้น เพื่อลดปริมาณของแข็งในน้ำทิ้ง การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับเป็นกระบวนการที่พื้นผิวที่ไม่เลกุลหรือไอออนดูดซับจะถูกดูดไปยังพื้นผิวที่เป็นของแข็ง ทั้งนี้การดูดซับขึ้นอยู่กับตัวดูดซับ โดยทั่วไปจะมีโครงสร้างที่มีรูพรุนเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสทั้งหมดที่จำเป็นสำหรับการดูดซับโมเลกุลสีย้อมจากน้ำทิ้งอย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ สามารถจำแนกประเภทโดยลักษณะโมเลกุลของสีย้อมถูกดูดซับลงบนพื้นผิวดูดซับมี 2 ประเภท ได้แก่ การดูดซับทางฟิสิกส์ (Physisorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) ข้อดีของกระบวนการดูดซับ ได้แก่ การนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงและใช้ระยะเวลาสั้น ตัวดูดซับมีหลายชนิด เช่น ถ่านกัมมันต์ และซิลิกาเจล เป็นต้น ถูกนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายในการกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้ง

#### • การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange)

การแลกเปลี่ยนไอออนเป็นการสร้างพันธะระหว่างเรซินที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์และตัวทำละลาย โดยกลไกการแลกเปลี่ยนไอออนในการกำจัดสีย้อมจะขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาระหว่างเรซินและประจุในโมเลกุลของสีย้อม

- การกรองเมมเบรน (Membrane filtration)

กระบวนการกรองเมมเบรนเป็นกระบวนการกรองโดยใช้เยื่อบางเมมเบรนเพื่อแยกของเหลวออกจากกัน กระบวนการกรองส่วนใหญ่นิยมใช้แบบ Cross flow filtration สำหรับบำบัดน้ำทิ้งในอุตสาหกรรมสิ่งทอ

- 1) กระบวนการบำบัดทางเคมี (Chemical treatment) กระบวนการบำบัดทางเคมีเป็นกระบวนการที่เหมาะสมกับน้ำทิ้งที่มีความเข้มข้นสูงหรือสารที่พิษ ในปริมาณสูง และมีค่า pH ต่ำหรือสูงมากเกินไป การบำบัดด้วยโอโซน (Ozone treatment)

การบำบัดด้วยโอโซนเป็นกระบวนการใช้ประโยชน์จากลักษณะโครงสร้างที่ไม่เสถียรของตัวโอโซน ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โอโซนนิยมนำมาใช้งานในการบำบัดน้ำ สี กลิ่น และแบคทีเรียต่างๆในน้ำ เป็นกระบวนการที่มีตรต่อสิ่งแวดล้อม หลังจากทีโอโซนทำปฏิกิริยาแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นออกซิเจน

- 2) กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ (Biological treatment) กระบวนการบำบัดทางชีวภาพในการดำเนินระบบสร้างกากตะกอนน้อยมีราคาไม่แพงและประหยัดพลังงานปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น โดยอาศัยหลักการทำงานของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

- 3) กระบวนการบำบัดขั้นสูง (Advanced treatment)

กระบวนการบำบัดขั้นสูง เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดทิ้งที่มีสารประกอบอินทรีย์ที่บำบัดได้ยาก เช่น กระบวนการโฟโตคะตะลิติก, กระบวนการเฟนตัน, กระบวนการออกซิเดชันทางเคมีไฟฟ้า เป็นต้น กระบวนการเหล่านี้สามารถบำบัดน้ำเสียในน้ำทิ้งได้อย่างมีประสิทธิภาพและดำเนินระบบได้อย่างรวดเร็วและไม่มีกากตะกอน

สำหรับกระบวนการบำบัดน้ำทิ้งข้างต้นมีข้อดีข้อเสีย แสดงดังตารางที่ 2.1

## ตารางที่ 2.2 ข้อดี-ข้อเสีย ของกระบวนการบำบัด

กระบวนการบำบัดน้ำทิ้ง	ประสิทธิภาพ		ต้นทุนการดำเนินระบบ	
	สูง	ต่ำ	ต้นทุนต่ำ	ต้นทุนสูง
กระบวนการบำบัดทางกายภาพ				
การดูดซับ	✓			✓
การกรอง	✓			✓
การแลกเปลี่ยนไอออน		✓		✓
กระบวนการบำบัดทางเคมี				
การบำบัดด้วยโอโซน				✓
การบำบัดด้วย UV	✓			
กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ				
Biosorption		✓		
การบำบัดขั้นสูง				
กระบวนการโฟโตคะตะลิติก	✓			✓

## 2.3 กระบวนการโฟโตคะตะลิติก (Photocatalytic)

กระบวนการโฟโตคะตะลิติก (Photocatalytic process) เป็นกระบวนการบำบัดขั้นสูงที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เป็นกระบวนการที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างยิ่งในการนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการบำบัดสารอินทรีย์และชีวภาพ เนื่องจากมีศักยภาพในการสร้างสารออกซิไดซ์ เช่น สารอนุมูลอิสระออกซิเจน (Reactive Oxygen Species, ROSs), สารอนุมูลอิสระไนโตรเจน (Reactive Nitrogen Species, RNS) และไฮดรอกซิลเรดิคัล (hydroxyl radicals,  $\cdot\text{OH}$ ) เป็นต้น โดยใช้พลังงานแสงที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 200-700 nm และสารตัวเร่งปฏิกิริยาในการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยา [24], [25] เมื่อมีการฉายแสงไปยังตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) หรือสารตั้งต้นจะช่วยให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุลอย่างสมบูรณ์ได้เร็วขึ้น ซึ่งองค์ประกอบของโฟโตคะตะลิติก มีดังนี้

- 1) แหล่งกำเนิดแสง มีค่าที่มากกว่าหรือมีค่าเท่ากับโฟตอนของตัวเร่งปฏิกิริยา
- 2) ตัวเร่งปฏิกิริยา
- 3) น้ำ
- 4) ออกซิเจนหรือตัว Oxidants

กระบวนการฉายแสงในปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก คือ การใช้พลังงานในรูปของโฟตอน (Photon energy) ที่มีพลังงานมากพอจะทำให้เกิดปฏิกิริยา เรียกพลังงานชนิดนี้ว่า พลังงานกระตุ้น (Activation energy) คำนวณได้ดังสมการที่ (2.1), (2.2)

$$E = h\nu \quad (2.1)$$

และสมการ 
$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.2)$$

เมื่อ

- E = พลังงานควอนตัม, J
- h = ค่าคงที่ของพลังค์ มีค่าเท่ากับ  $6.626 \times 10^{-34}$  J.s
- $\nu$  = ความถี่ของคลื่นแสง, Hz หรือ  $s^{-1}$
- c = ความเร็วของคลื่นแสง  $2.97 \times 10^8$ ,  $m.s^{-1}$
- $\lambda$  = ความยาวคลื่น, nm

### 2.3.1 แหล่งกำเนิดแสง

รังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet Radiation)

รังสีอัลตราไวโอเล็ตหรือรังสีเหนือม่วง มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 100-400 nm ซึ่งเป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากดวงอาทิตย์ สำหรับรังสีอัลตราไวโอเล็ตสามารถแบ่งช่วงความยาวคลื่นได้ดังตารางที่ 2.3 ทั้งนี้ช่วงความยาวคลื่นของรังสีอัลตราไวโอเล็ตแสดงดังตารางที่ 2.3

**ตารางที่ 2.3** ช่วงความยาวคลื่นของรังสีอัลตราไวโอเล็ตประเภทต่างๆ

ประเภทรังสี	ความยาวคลื่น (nm)
UVA	315-400
UVB	280-315
UVC	100-280

### 2.3.2 ประเภทของกระบวนการโฟโตคะตะลิติก

ปฏิกิริยาของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ตามลักษณะของสถานะตัวเร่งปฏิกิริยา [26]

1) กระบวนการโฟโตคะตะลิติกแบบเนื้อเดียวกัน (Homogeneous photocatalysis) ตัวเร่งปฏิกิริยามีสารกึ่งตัวนำและสารตั้งต้นอยู่ในสถานะเดียวกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด เช่น ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส เป็นต้น

2) กระบวนการโฟโตคะตะลิติกแบบเนื้อต่างกัน (Heterogeneous photocatalysis) ตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสถานะที่ต่างกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด เช่น ของแข็งกับแก๊ส เป็นต้น

#### ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)

คุณสมบัติของสารที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ได้แก่

- 1) โลหะตัวนำ (Transition Metal) เช่น นิกเกิล, โครเมียม และทองแดง เป็นต้น
- 2) สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่น แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) สังกะสีออกไซด์ (ZnO) และไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) เป็นต้น

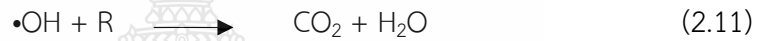
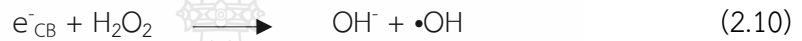
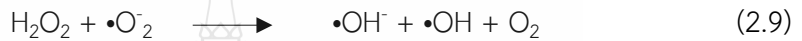
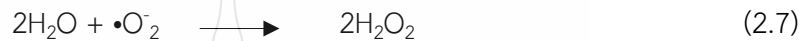
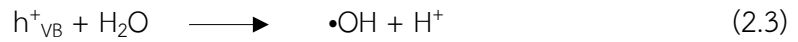
#### ตารางที่ 2.4 ขนาดช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ขนาดช่องว่างพลังงาน (eV)
Ag	2.54
CdS	2.42
SnO <sub>2</sub>	3.60
TiO <sub>2</sub>	3.20
ZnO	3.03

### 2.3.2 การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก

เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาได้รับพลังงานแสง (Photon) ในระดับที่สูงกว่าหรือเท่ากับขนาดช่องว่างพลังงานอิเล็กทรอนิกส์จะถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่จาก Valence Band (VB) ไปยัง Conduction Band (CB) จากนั้นอิเล็กตรอนจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็น superoxide radicals ( $\bullet\text{O}_2^-$ ) และที่ VB จะเกิดสภาพการขาดแคลนอิเล็กตรอน เรียกว่า โฮล (Hole,  $h^+_{\text{VB}}$ ) ซึ่ง  $h^+_{\text{VB}}$  สามารถรับอิเล็กตรอนของสารปนเปื้อนได้จึงเกิด hydroxyl radicals ( $\bullet\text{OH}$ ) [25] โดยสามารถเกิดขึ้นได้ 2 รูปแบบคือ 1) รีดักชัน (Reduction) อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จาก CB ไปยังตัวรับอิเล็กตรอน 2) ออกซิเดชัน (Oxidation) อิเล็กตรอน

เคลื่อนที่จากตัวให้อิเล็กตรอนในสารละลายไปยัง VB แสดงดังรูปที่ 2.2 โดยกลไกการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวแสดงดังสมการที่ (2.3)–(2.11)



เมื่อ

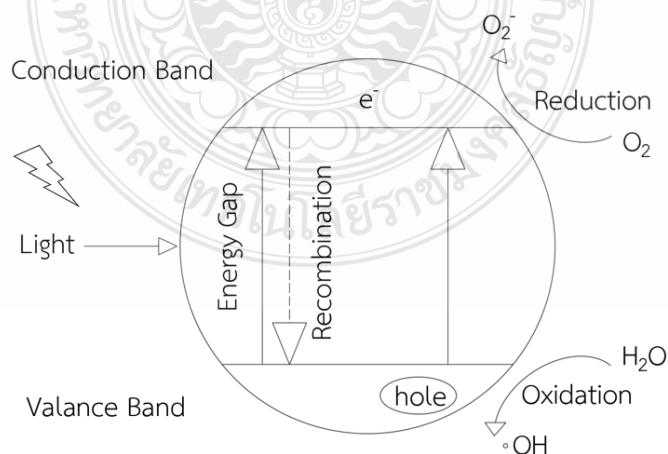
$e^-_{CB}$  = อิเล็กตรอนที่ CB

$h^+_{VB}$  = โฮลที่ VB

$\bullet OH$  = ไฮดรอกซิลเรดิคัล

$\bullet O_2^-$  = ซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล

$H_2O_2$  = ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์



รูปที่ 2.2 การเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะลิสติก

### 2.3.2.1 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่ออัตราการสลายตัวของกระบวนการโฟโตคะตะลิติก [27], [28]

#### 1) ความเข้มข้นเริ่มต้นสารปนเปื้อน (Initial substrate concentration)

ปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้นสารปนเปื้อน ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นสารปนเปื้อน ของสารตั้งต้นมีปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกเกิดปฏิกิริยาได้น้อยลง เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นสารปนเปื้อนเพิ่มขึ้นโมเลกุลเริ่มต้นสารปนเปื้อนมีมากขึ้นสำหรับการกระตุ้นและการถ่ายโอนพลังงานจะลดลง เนื่องจากบดบังการส่องผ่านของแสง

#### 2) ความเข้มแสง (Light intensity)

ความเข้มของแสงที่ถูกเพิ่มมากขึ้นมีผลต่อการเสื่อมสภาพของสารปนเปื้อน ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกจะแปรผันตามความเข้มแสง

- ที่ความเข้มแสงน้อย ( $0-20 \text{ mW.cm}^{-2}$ ) อัตราจะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงด้วยการเพิ่มความเข้มของแสง
- ที่ความเข้มแสงระดับกลาง (ประมาณ  $25 \text{ mW.cm}^{-2}$ ) อัตราจะขึ้นอยู่กับรากที่สองของความเข้มของแสง
- ที่ความเข้มของแสงสูงอัตราจะไม่ขึ้นกับความเข้มของแสง เมื่อมีโฟตอนจะสามารถเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มของแสงเพิ่มขึ้น, ความเข้มแสงจะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาจนถึงระดับหนึ่งเท่านั้นแม้ว่าความเข้มของแสงจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง.

#### 3) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst dosage)

ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสารดูดซับที่ทำให้ปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะลิติกเกิดขึ้นที่บริเวณพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมนั้นขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารปนเปื้อนเริ่มต้น

#### 4) ค่าความเป็นกรดต่าง (pH)

ค่า pH ที่ลดลงมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา มีสาเหตุที่เกิดขึ้น 3 สาเหตุ คือ

- (1) การเกิดปฏิกิริยาที่รุนแรงของไฮดรอกซิล
- (2) การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตรงของ  $\text{h}^+\text{vB}$
- (3) การลดลงโดยตรงโดยอิเล็กตรอนใน CB

#### 5) อุณหภูมิ

อุณหภูมิของปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นโดยทั่วไปส่งผลให้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกเพิ่มขึ้น ช่วงอุณหภูมิระหว่าง  $20-80 \text{ }^\circ\text{C}$  เป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม



## 2.4 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide) [29], [30]

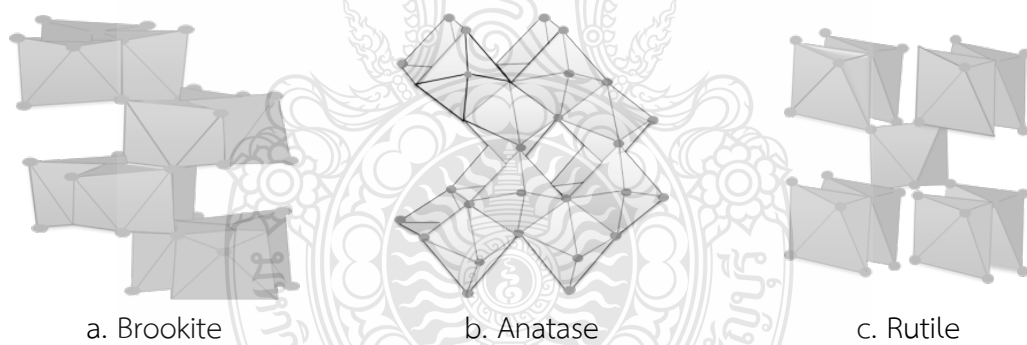
ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) เป็นอนูภาคสารกึ่งตัวและเป็นสารเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสง โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ประกอบด้วย อนาเทส รูไทล์ และบรูคไคท์ โครงสร้างผลึกแบบแอนาเทสและรูไทล์ มีความโดดเด่นที่สุดมีการเชื่อมต่อที่ชัดเจนระหว่างโครงสร้างเหล่านี้ เนื่องจากแอนาเทสมีจุดเชื่อมต่อสี่จุดระหว่างขอบ บรูคไคท์มีจุดเชื่อมต่อสามจุด และรูไทล์มีเพียงสองจุด โครงสร้างนี้ทำให้รูไทล์ มีความเสถียรสูงสุด

- อนาเทส เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมสูงเนื่องจากมีความเสถียรภาพสูงที่ตอบสนองต่อแสงที่มีความยาวคลื่นประมาณ 385 nm

- รูไทล์ (Rutile) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเสถียรสูง และสามารถตอบสนองต่อแสงได้ดี (เมื่อเทียบกับอนาเทสและบรูคไคท์)

- บรูคไคท์ (Brookite) ไม่เป็นที่นิยมในการนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะลิสติก เนื่องจากพบในปริมาณที่น้อยมาก

สำหรับโครงสร้างผลึกพื้นฐานและคุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์แสดงดังรูปที่ 2.3 และตารางที่ 2.5



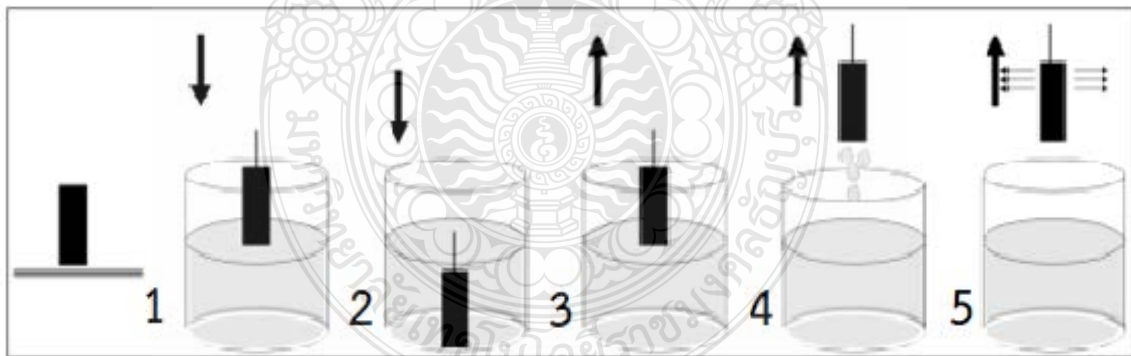
รูปที่ 2.3 โครงสร้างผลึกพื้นฐานของไทเทเนียมไดออกไซด์

**ตารางที่ 2.5** คุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์

คุณสมบัติเฉพาะ	คุณสมบัติทางกายภาพ และเชิงกล
มวลโมเลกุลเท่ากับ $79.9 \text{ g.mol}^{-1}$	สถานะภาพเป็นของแข็ง สีขาว
ความหนาแน่นเท่ากับ $3.84\text{-}4.26 \text{ g.cm}^{-3}$	พื้นที่ผิวเท่ากับ $50 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$
ไม่ละลายน้ำ	ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ $20 \text{ nm}$
จุดเดือดเท่ากับ $2,500 \text{ }^{\circ}\text{C}$	ความหนาแน่นเท่ากับ $130 \text{ g.L}^{-1}$
จุดหลอมเหลวเท่ากับ $1,850 \text{ }^{\circ}\text{C}$	ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ $0.7$
	ไม่มีกลิ่น

**2.5 กระบวนการโซล-เจล (sol-gel)**

วิธีการโซล-เจล เป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการสังเคราะห์พอลิเมอร์อนินทรีย์ เนื่องจากสามารถควบคุมลักษณะพื้นผิวของวัสดุได้ง่าย [31], [32] โดยวิธีการทำให้เกิดโซล-เจล คือ การเปลี่ยนสถานะสารละลายของเหลว เรียกว่า โซล ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) และการควบแน่น (Condensation) ของสารตั้งต้นไปเป็นสถานะกึ่งของแข็ง เรียกว่า เจล โดยใช้เทคนิคการเคลือบผิวแบ่งเป็น 2 เทคนิค ได้แก่ 1) การเคลือบแบบหมุน 2) การเคลือบแบบจุ่ม สำหรับขั้นตอนวิธีการโซล-เจลแสดงดังรูปที่ 2.4



**รูปที่ 2.4** วิธีการโซล-เจล

## ขั้นตอนของวิธีการโซล-เจล

1. Immersion
2. Start up
3. Deposition and drainage
4. Drainage
5. Evaporation

ทั้งนี้กลไกการเกิดปฏิกิริยาโซล-เจลสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยการควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยการเติมกรดหรือเบส โดยพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดโซล-เจล ได้แก่ ค่า pH, ตัวทำละลาย, อุณหภูมิ, เวลา, ตัวเร่งปฏิกิริยาและความปั่นป่วนปัจจัยที่มีผลต่อวิธีการโซล-เจล

- ตัวทำละลายต้องสามารถเก็บอนุภาคนาโนที่ละลายได้เพื่อไม่ให้ตกตะกอนออกจากของเหลว และการช่วยให้อนุภาคนาโนเชื่อมต่อกัน
- อุณหภูมิที่อุณหภูมิต่ำมากเจลจะเกิดได้ช้าซึ่งอาจใช้เวลาหลายสัปดาห์หรือหลายเดือน ในทางตรงกันข้ามที่อุณหภูมิสูงปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจนก่อตัวขึ้นเป็นของแข็งและจะตกตะกอนออกจากของเหลว ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมอุณหภูมิเจลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ
- เวลาการเกิดปฏิกิริยาของขั้นตอนต่าง ๆ ในกระบวนการสร้างเจลจะเกิดปฏิกิริยาแตกต่างกันในแต่ละช่วงเวลา การเกิดเจลโดยทั่วไปจะเกิดการการก่อตัวของเจลเกิดขึ้นอย่างช้าๆและสม่ำเสมอส่งผลให้เจลแข็งแรงขึ้น
- ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโซล-เจล สามารถเร่งให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้นโดยใช้กรด (H) และเบส

สำหรับข้อดี-ข้อเสีย กระบวนการโซล-เจลแสดงดังตารางที่ 2.6

**ตารางที่ 2.6** ข้อดี-ข้อเสีย วิธีการโซล-เจล [33], [34], [35]

ข้อดี	ข้อเสีย
ความยืดหยุ่นสูงสามารถเคลือบวัสดุที่มีรูปทรงต่างๆได้ง่าย	ใช้เวลาในการบ่มก่อนนำมาใช้งานเป็นเวลานาน
ประหยัดพลังงานระหว่างขั้นตอนการเคลือบผิววัสดุมีคุณสมบัติที่ดีขึ้นเป็นขั้นตอนที่ไม่มีความเป็นพิษสูง	สารตั้งต้นมีราคาแพงและไวต่อความชื้น การก่อตัวของผลพลอยได้ที่ไม่พึงประสงค์ การเคลือบผิวที่มีความหนามากเกินไปจะทำให้แตกหักได้ง่าย

**2.6 ถ่านกัมมันต์**

ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) เป็นถ่านที่อยู่ในรูปคาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous carbon) ถูกผลิตขึ้นโดยกระบวนการก่อกัมมันต์ (Activation) พื้นที่ผิวภายในมีโครงสร้างที่เป็นรูพรุนจำนวนมาก [36] ซึ่ง ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับสูงมีพื้นที่ผิวมาก มีความจุในการดูดซับสูง มีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก (Microporous structure) และมีความไวในการดูดซับสูง โดยรูพรุนของถ่านกัมมันต์แบ่งเป็น 3 ประเภทตาม ได้แก่ 1. Micropores ( $\varnothing < 2.0$  nm) 2. Mesopores ( $\varnothing = 2.0-50.0$  nm) 3. Macropores ( $\varnothing > 50.0$  nm) ในการหาพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จะทำการวิเคราะห์โดยการคำนวณการดูดซับไอโอดีน (Iodine number) ที่มีค่าใกล้เคียงกับพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ สำหรับประเภทและการใช้งานของถ่านกัมมันต์ แสดงดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ประเภทและการใช้งานของถ่านกัมมันต์

ประเภทของถ่านกัมมันต์	รูพรุน	การใช้งาน
แบบผง	0.18 mm	การใช้งานในสถานะของเหลวและสำหรับการบำบัดก๊าซไอเสีย
แบบเกล็ด	0.6 – 4.0 mm	การใช้งานในสถานะของเหลว
แบบอัดขึ้นรูป	> 4.0 mm	การใช้งานในสถานะก๊าซ ความแข็งแรงเชิงกลสูงและปริมาณฝุ่นต่ำ
แบบเส้นใย	รูพรุนมีขนาดที่แคบลงจากการกระจายตัว	กลุ่มสารประกอบอินทรีย์ที่ระเหยเป็นไอได้ง่าย
ผ้าถ่านกัมมันต์	รูพรุนสม่ำเสมอ	กลุ่มสารประกอบอินทรีย์ที่ระเหยเป็นไอได้ง่าย

ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุดูดซับที่นิยมใช้กันมากที่สุดในการบำบัดน้ำเสีย และสามารถผลิตได้จาก ถ่านหิน ไม้ แกลบ กะลามะพร้าว และเปลือกวอลนัท เนื่องจากโครงสร้างที่มีรูพรุนขนาดเล็กมาก พื้นที่ผิวจำเพาะขนาดใหญ่ และไม่ชอบน้ำ ถ่านกัมมันต์จึงมีความสามารถในการดูดซับสารมลพิษส่วนใหญ่ได้ดี

#### 2.6.1 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับคือการแยกองค์ประกอบของสารอินทรีย์จากสถานะของเหลวไปยังพื้นผิวของสถานะของแข็ง ซึ่งประสิทธิภาพของกระบวนการดูดซับขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น คุณสมบัติทางเคมีทางกายภาพของสารละลาย โครงสร้างของสารดูดซับ และจำนวนชั้นโมเลกุลของสารดูดซับ เป็นต้น ซึ่งการดูดซับมี 2 ประเภทคือ การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

##### 1) การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

เกิดจากโมเลกุลของสารถูกดูดซับ (Adsorbate) กับสารดูดซับ (Adsorbent) ด้วยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่เรียกว่าแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) ซึ่งไม่มีพันธะทางเคมีเกิดขึ้นและเป็นการจับกันด้วยแรงที่อ่อน การดูดซับทางกายภาพจึงกลับคืนสู่สภาพเดิมได้อย่างสมบูรณ์

##### 2) การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

การดูดซับทางเคมีเกิดจากแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนจึงเกิดการจับกันทางพันธะเคมีที่แข็งแรงของโมเลกุลสารถูกดูดซับกับสารดูดซับ เมื่ออุณหภูมิสูงการดูดซับจะเกิดได้ดีและชั้นของการดูดซับจะเกิดเพียงชั้นเดียว

ทั้งนี้การเปรียบเทียบคุณสมบัติของการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมีแสดงดังตารางที่ 2.8

**ตารางที่ 2.8** การเปรียบเทียบคุณสมบัติของการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี

คุณสมบัติ	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล	แรงแวนเดอร์วาลส์	แรงยึดเหนี่ยวเคมี
ชั้นของการดูดซับ	ชั้นเดียวหรือหลายชั้น	ชั้นเดียว
อัตราการดูดซับ	เร็ว	ช้า
อุณหภูมิของการดูดซับ	ต่ำ	สูง
ความเสถียร	ไม่เสถียร	เสถียร

กลไกการดูดซับ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนดังนี้

- 1) การแพร่ของอนุภาคของสารที่ถูกดูดซับไปยังสารดูดซับ
- 2) อนุภาคของสารที่ถูกดูดซับเกิดการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของน้ำเข้าสู่ช่องว่างภายในสารดูดซับ
- 3) เกิดการดูดซับระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับกับพื้นที่ผิวภายในช่องว่างของสารดูดซับ

#### 2.6.2 ประเภทสารดูดซับ

สารดูดซับ คือ สารที่สามารถดูดซับสารอื่นให้ติดผิวในปริมาณมาก ซึ่งจะมีพื้นที่ผิว หรือ ปริมาตรรูพรุนภายในจำนวนมาก ได้แก่

- 1) สารอินทรีย์

การดูดซับแบบไม่เฉพาะเจาะจงกับสารถูกดูดซับ เช่น ดินเหนียว แมกนีเซียม ออกไซด์ และซิลิกา เป็นต้น

- 2) สารอินทรีย์สังเคราะห์และ ถ่านกัมมันต์

เป็นสารที่สังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ เช่น สารเรซิน เป็นต้น

## 2.7 ไมโคร/นาโนบับเบิล

ไมโคร/นาโนบับเบิล หมายถึง ฟองอากาศขนาดเล็กไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่ามีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า  $1\ \mu\text{m}$  มีพื้นที่ผิวจำเพาะขนาดใหญ่ และพลังงานพื้นผิวสูงเคลื่อนที่ด้วยการลอยตัว ฟองอากาศขนาดเล็กเหล่านี้ช่วยเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายน้ำส่งผลให้ค่า DO เพิ่มขึ้นความเสถียรสูงสามารถคงตัวอยู่ในน้ำได้เป็นเวลานานมากกว่า 1 สัปดาห์ และมีประสิทธิภาพในการถ่ายโอนมวลส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยา hydroxyl radicals ( $\cdot\text{OH}$ ), superoxide radicals ( $\cdot\text{O}_2^-$ ), hydrogen peroxide ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) และ singlet oxygen ( $^1\text{O}_2$ ) [37, 38]

การเกิดอนุมูลอิสระ

ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวจึงได้มีการนำการเติมอากาศขนาด MNBs มาใช้ประโยชน์เพื่อเพิ่มศักยภาพในการใช้งานด้านต่างๆ เช่น การใช้งานด้านการเกษตรและการทำประมง ด้านสิ่งแวดล้อมนำมาบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ และด้านการแพทย์ เป็นต้น

ข้อดี

- ออกซิเจนละลายน้ำมีความเสถียรสูง
- ปริมาตรพื้นผิวใหญ่ขึ้น
- ฟองอากาศขนาด MNBs สามารถอยู่ในน้ำได้เป็นเวลานาน
- ประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวลเพิ่มขึ้น
- เกิดอนุมูลอิสระจากการสลายตัวของฟองอากาศขนาดเล็ก

## 2.8 สารพิษขนาดเล็ก (Micropollutants)

สารพิษขนาดเล็ก คือสารประกอบสังเคราะห์หรือสารก่อมลพิษขนาดเล็กที่มีอยู่ในธรรมชาติ ที่มีความเข้มข้นต่ำมาก ( $\text{ng-ug}\cdot\text{L}^{-1}$ ) [39], [40] ซึ่งมีแหล่งกำเนิดจากกระบวนการทางเคมี ทางกายภาพ และกระบวนการทางชีวภาพ ในโรงงานอุตสาหกรรมหรือกิจกรรมประจำวันของมนุษย์ เช่น การเกษตร และครัวเรือน เป็นต้น เมื่อ Micropollutants มีปริมาณมากส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและห่วงโซ่อาหารในดิน แหล่งน้ำ

- ผลกระทบของ micropollutants ที่มีต่อสิ่งแวดล้อม

ในแหล่งน้ำ micropollutants ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชน้ำบางชนิด เช่น สาหร่าย เป็นต้น โดยในกระบวนการเกิดยูโทรฟิเคชันสาหร่ายจะใช้ออกซิเจนในปริมาณมากขึ้นและบดบังการส่องผ่านของแสงแดด

- ผลกระทบของ micropollutants ต่อมนุษย์

ปริมาณความเข้มข้น micropollutants ในระดับต่ำก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์โดยแสดงอาการเพียงเล็กน้อย เช่น ปวดศีรษะ คลื่นไส้ และมีอาการอ่อนเพลีย เป็นต้น ด้านของผลกระทบในระยะยาวต่อสุขภาพอาจก่อให้เกิดความเสียหายกับอวัยวะ และโรคมะเร็ง เป็นต้น

## 2.9 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก

แบบจำลองจลนพลศาสตร์ Langmuir Hinshelwood ได้รับความนิยมในการคำนวณการเกิดกลไกของปฏิกิริยากระบวนการโฟโตคะตะลิติก ซึ่งสามารถอธิบายอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ (r) แสดงดังสมการที่ 2.15 [41]

$$r = -\frac{dC}{dt} = \frac{kKC}{(1 + KC)} \quad (2.15)$$

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

$C$  = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อน ( $\mu\text{M}$ )

$C_0$  = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารปนเปื้อนที่จุดสมดุลการดูดติดบนสารกึ่งตัวนำ ( $\mu\text{M}$ )

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

$K$  = ค่าคงที่สมดุลการดูดติดผิวของสารปนเปื้อนบนตัวเร่งปฏิกิริยา ( $\mu\text{M}^{-1}$ )

จากสมการที่ 2.15 ค่า  $k$  และ  $K$  สามารถจัดรูปสมการใหม่เพื่อหาความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 2.16

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{kKC} + \frac{1}{k} \quad (2.16)$$

จากสมการที่ 2.15 จะเปลี่ยนไปตามสภาวะการเกิดปฏิกิริยา สำหรับการย่อยสลายสารปนเปื้อนนี้เป็นไปตามสมการจลนพลศาสตร์ของ L-H ซึ่งค่าคงที่  $k$  และ  $K$  สามารถนำมาเปรียบเทียบกับค่าคงที่ของสมการจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (first-order kinetic rate constant,  $k_{1st}$ )

$$-\ln \frac{C}{C_0} = k_1 t \quad (2.17)$$



## บทที่ 3

### ขั้นตอนการทดลอง

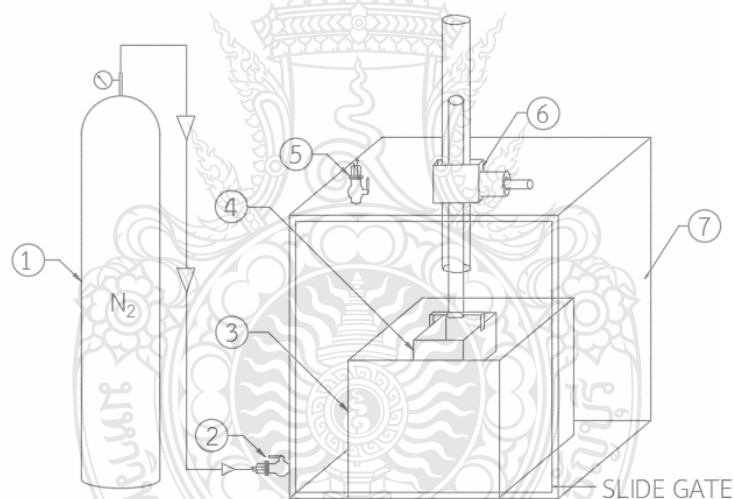
งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม 3 ชนิด ได้แก่ IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> ร่วมกับแหล่งกำเนิดแสง UVA และการเติมอากาศขนาด MNBs

#### 3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

##### 3.1.1 วัสดุอุปกรณ์

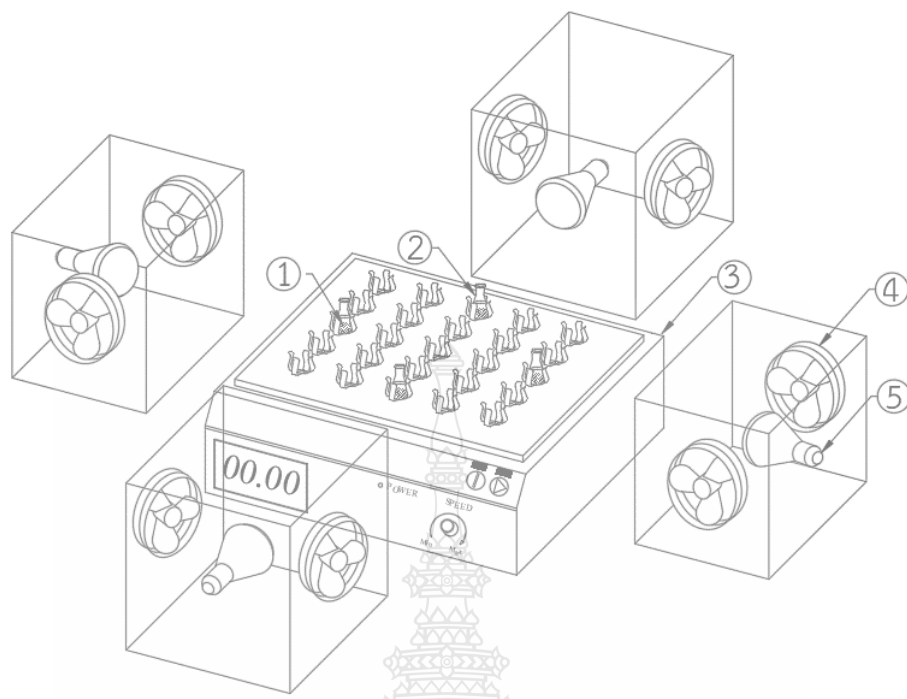
- 1) ตะแกรงร่อนขนาดเบอร์ 8 (2.36 mm) และขนาดเบอร์ 10 (2.00 mm)
- 2) ปีกเกอร์ขนาด 50 mL และ 1,000 mL
- 3) อุปกรณ์ RMUTT-MNB, MNBs model MCH-505S
- 4) อุปกรณ์ Nanobubbles Testing model Nanosight NS300
- 5) อุปกรณ์ ORP Electrode, ORP model ORP-15
- 6) เตาอบลมร้อน Drier Box model OV-9123A
- 7) ตู้ดูดความชื้น Desiccator Dry cabinet model DE-80AD
- 8) เครื่องชั่งตวงวัด 4 ตำแหน่ง Shimadzu model ATX224
- 9) กระจกบอทวงขนาด 250 mL
- 10) ปีเปตขนาด 10 mL
- 11) ซ้อนตักสาร
- 12) แท่งแก้วกวนสาร
- 13) ขวดเก็บสาร Duran ขนาด 1,000 mL และ 2,000 mL
- 14) อุปกรณ์ Hotplate stirrer model HTS-1003
- 15) แท่งแม่เหล็กกวนสาร
- 16) อุปกรณ์ Dip Coating (รูปที่ 3.1)
- 17) ขวดปรับปริมาตรขนาด 500 mL
- 18) ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 mL
- 19) เตาเผาอุณหภูมิสูง Daihan scientific furnace model ON50
- 20) อุปกรณ์ Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy, EDS model INCA-350
- 21) อุปกรณ์ Scanning electron microscope, SEM model JSM-5410LV

- 22) อุปกรณ์ Brunauer-Emmett-Teller Method, BET model Autosorb-1
- 23) ถังปฏิกรณ์แบบแบทช์ (รูปที่ 3.2)
- 24) เครื่องเขย่าสาร (Shaker)
- 25) ขวดพลาสติกเก็บตัวอย่างขนาด 30 mL
- 26) อุปกรณ์ pH Meter model Starter300
- 27) อุปกรณ์วัดค่าออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen DO Meter), DO model Cyber Scan DO 110
- 28) อุปกรณ์ Spectrophotometer model Single Monochrome type U-3900
- 29) อุปกรณ์แก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมทรี (Gas Chromatography – Mass Spectrometry), GC-MS model GC6890N-MS5973N
- 30) อุปกรณ์ Inductively coupled plasma, ICP model 5900 ICP-OES



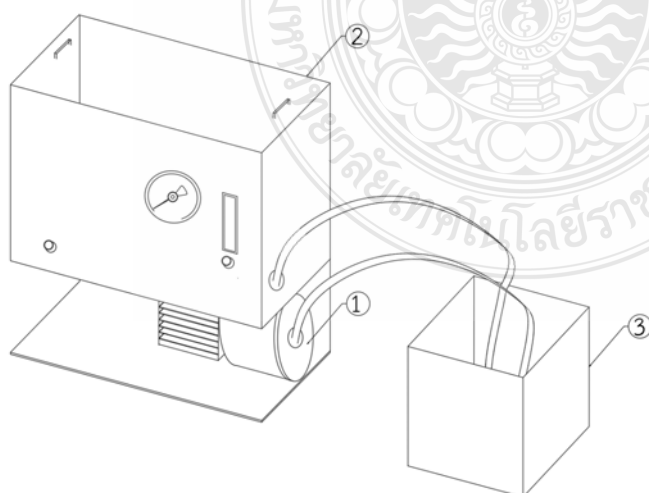
- |   |                    |
|---|--------------------|
| 1. ถังแก๊สไนโตรเจน  | 2. วาล์วควบคุมแก๊ส |
| 3. ภาชนะบรรจุสารละลายตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1%Ag-TiO <sub>2</sub> | 4. ภาชนะบรรจุ AC   |
| 5. วาล์วระบายอากาศ  | 6. มอเตอร์ไฟฟ้า    |
| 7. ชุดอุปกรณ์ Dip Coating                                     |                    |

รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ Dip Coating



1. ตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub>
2. ขวดรูปชมพู่บรรจุสีย้อม
3. เครื่องเขย่าสาร
4. พัดลมระบายอากาศ
5. หลอดอัลตราไวโอเล็ตชนิด UVA

รูปที่ 3.2 การทดลองการบำบัดสีย้อมในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์



1. มอเตอร์ไฟฟ้า
2. เครื่อง MNB
3. ภาชนะบรรจุน้ำ DI

รูปที่ 3.3 อุปกรณ์เติมอากาศขนาด MNBs

### 3.1.2 สารเคมี

- 1) สีย้อม IC ( $C_{16}H_8N_2Na_2O_8S_2$ )
- 2) สีย้อม MB ( $C_{16}H_{18}ClN_3S$ )
- 3) สีย้อม RB5 ( $C_{26}H_{21}N_5Na_4O_{19}S_6$ )
- 4) ซิลเวอร์ไนเตรต (Silver Nitrate,  $AgNO_3$ )
- 5) ไทเทเนียมเตตระไอโซโพรพอกไซด์ (Titanium (IV) Isopropoxide, TTIP)
- 6) ไอโซโพรพานอล (Isopropanol, IPA)
- 7) กรดซัลฟิวริก (Sulfuric Acid,  $H_2SO_4$ )
- 8) กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid, HCl)
- 9) แก๊สไนโตรเจน 99.99% (Nitrogen,  $N_2$ )

## 3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

### 3.2.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

#### 3.2.1.1 การเตรียม AC

- 1) คัดขนาด AC โดยการนำไปร่อนผ่านตะแกรงขนาดเบอร์ 8 (2.36 mm) ค้างตะแกรงขนาดเบอร์ 10 (2.00 mm) เพื่อให้ได้ขนาดของ AC ที่มีความใกล้เคียงกัน
- 2) จากนั้นนำ AC ที่ผ่านการร่อนแล้วมาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน (Deionized water, DI) จำนวน 10 รอบ และแช่ด้วย 20%  $H_2SO_4$  จนครบ 24 hr แล้วนำมาล้างให้สะอาดด้วยน้ำ DI ตามด้วยการแช่น้ำที่ผ่านการเติมอากาศขนาด MNBs เป็นเวลา 15 min
- 3) เมื่อล้างทำความสะอาดเสร็จแล้วนำ AC ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 2 hr นำไปเข้าสู่ตู้ดูดความชื้น 1 hr

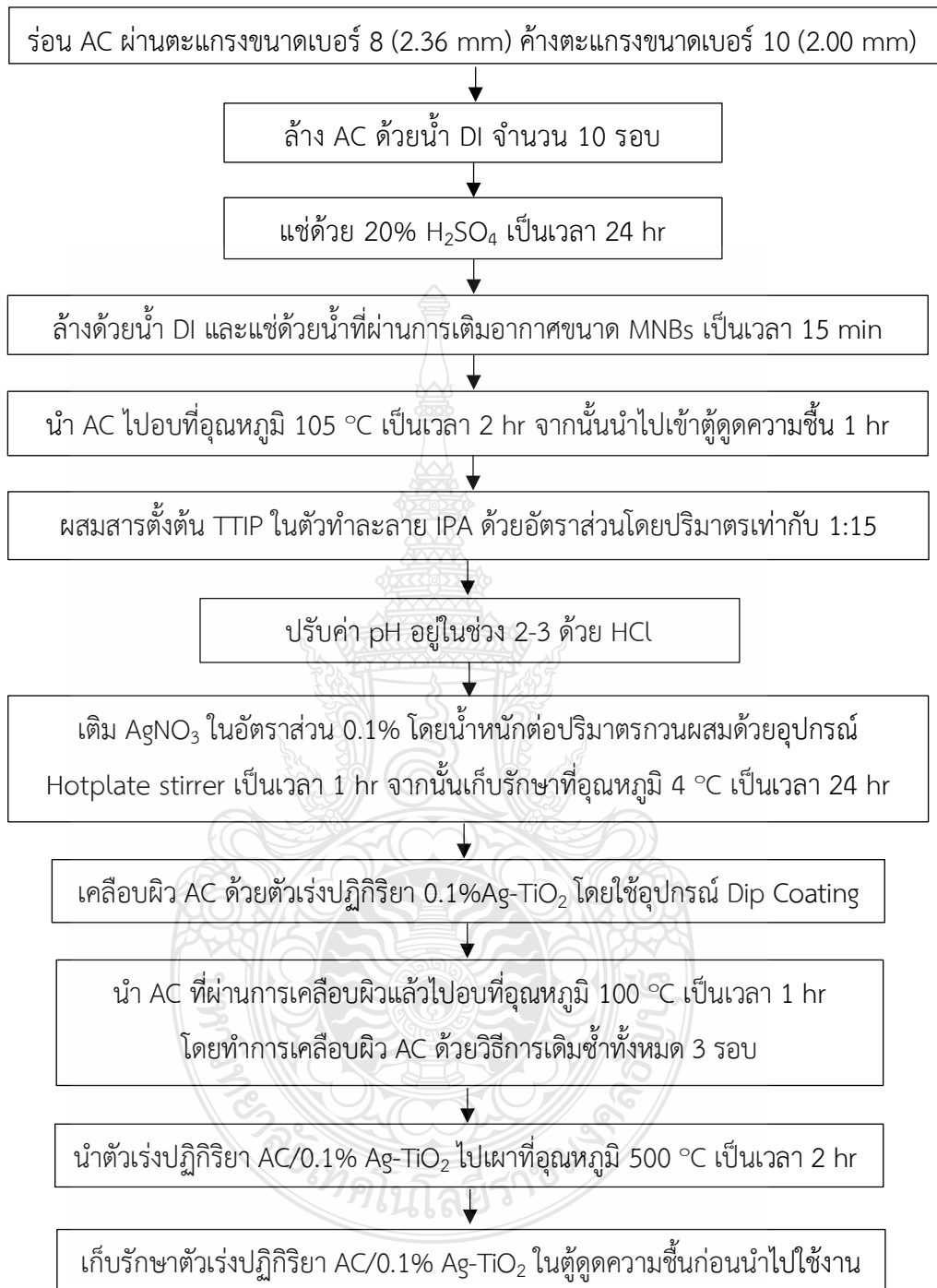
#### 3.2.1.2 การเตรียมและเคลือบสารละลายตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> ด้วยเทคนิคโซล-เจล

- 1) ผสมสารตั้งต้น TTIP ในตัวทำละลาย IPA ด้วยอัตราส่วน 1:15 โดยปริมาตรพร้อมทั้งทำการกวนผสมให้เข้ากันที่อุณหภูมิห้อง
- 2) ทำการปรับค่า pH ให้มีค่าอยู่ในช่วง 2-3 ด้วย HCl
- 3) เติม  $AgNO_3$  ในอัตราส่วน 0.1% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร หลังจากนั้นทำการกวนผสมด้วยอุปกรณ์ Hotplate stirrer เป็นเวลา 1 hr และใช้แผ่นพาราฟิล์มปิดทับรอบภาชนะนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 24 hr ก่อนนำมาใช้งาน

4) จากนั้นนำ AC ที่ได้จากการเตรียมในขั้นตอนที่ 3.1.1.1 มาเคลือบผิวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> โดยอุปกรณ์ Dip Coating โดยใช้ความเร็วรอบในการเคลือบผิว 5 mm.min<sup>-1</sup> จากนั้นนำ AC ที่ผ่านการเคลือบผิวไปอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1 hr ทำการเคลือบผิวด้วยวิธีการเดิมซ้ำทั้งหมด 3 รอบ ขณะทำการเคลือบผิวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> อยู่ในสภาวะไร้ออกซิเจนโดยการเติม N<sub>2</sub>

5) นำตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1% Ag-TiO<sub>2</sub> ไปเผาที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 2 hr ที่งัวให้เย็นที่อุณหภูมิห้องจากนั้นทำการเก็บรักษาไว้ในตู้ดูดความชื้นก่อนนำไปใช้งาน





รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการเตรียม AC/0.1% Ag-TiO<sub>2</sub>

### 3.2.2 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub>

1) วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของพื้นผิว AC และตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> เพื่อเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> ก่อนและหลังทำการเคลือบด้วยอุปกรณ์ SEM

2) วิเคราะห์หาปริมาณองค์ประกอบธาตุโดยน้ำหนักของ AC ก่อนทำการเคลือบผิว และหลังการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> ที่ได้จากขั้นตอนการเตรียมเพื่อหาปริมาณของ Ag ที่ได้ลงในตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> และหาปริมาณองค์ประกอบธาตุชนิดอื่นๆ ด้วยอุปกรณ์ EDS

3) วิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิวเฉพาะ ปริมาตรและขนาดรูพรุนของ AC และตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1% Ag-TiO<sub>2</sub> ด้วยอุปกรณ์ BET

### 3.2.3 การประเมินหาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์

1) กำหนดสถานะต่างๆ ในการทดลองหาประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 มีรายละเอียดดังนี้ ชุดการทดลองใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1%AC/Ag-TiO<sub>2</sub> ร่วมกับแหล่งกำเนิดแสง UVA และการเติมอากาศขนาด MNBs ชุดควบคุมที่ 1 ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1%AC/Ag-TiO<sub>2</sub> ร่วมกับแหล่งกำเนิดแสง UVA ชุดควบคุมที่ 2 ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1%AC/Ag-TiO<sub>2</sub> ร่วมกับการเติมอากาศขนาด MNBs ชุดควบคุมที่ 3 ใช้ AC ร่วมกับแหล่งกำเนิดแสง UVA และการเติมอากาศขนาด MNBs ชุดควบคุมที่ 4 ใช้ AC ร่วมกับการเติมอากาศขนาด MNBs ชุดควบคุมที่ 5 ใช้ AC ร่วมกับแหล่งกำเนิดแสง UVA ชุดควบคุมที่ 6 ใช้ AC เพียงอย่างเดียว และชุดควบคุมที่ 7 ใช้เพียงการเติมอากาศขนาด MNBs อย่างเดียว ซึ่งสถานะในการหาประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 แสดงดังตารางที่ 3.1

2) เติมอากาศขนาด MNBs ในน้ำ DI ด้วยอุปกรณ์ RMUTT-MNB จนกระทั่งมีค่า DO อยู่ในช่วง 10-12 mg.L<sup>-1</sup> จากนั้นนำไปวิเคราะห์การกระจายตัวและขนาดของฟองอากาศ MNBs ด้วยอุปกรณ์ Nanobubbles Testing

3) จากนั้นนำน้ำที่ได้จากข้อ 1 มาเตรียมสีย้อม IC เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 10, 25, 50, 75 และ 100 µM

4) นำสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ได้จากการเตรียมปริมาตร 250 mL และตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> ปริมาณ 2 g เติมลงในขวดรูปชมพู่ทำการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์โดยใช้แสง UVA ความเข้มแสง 1,250 µW.cm<sup>-2</sup> เป็นแหล่งกำเนิดแสง

5) เก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านกระบวนการบำบัดสีย้อมในช่วงเวลา 0, 10, 30, 60, 90, 120 และ 180 min ตามลำดับ โดยทำการวัดค่า pH และ DO ตลอดการทดลอง หลังจากนั้นนำตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ไปวิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลงความเข้มของสีย้อม IC ด้วยอุปกรณ์ Spectrophotometer เพื่อหาค่าการดูดกลืนแสง

6) ทำการทดลองซ้ำตามข้อที่ 1-4 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น 25, 50, 75 และ 100  $\mu\text{M}$  ตามลำดับ

7) การประเมินหาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์มีขั้นตอนในการทดลองเช่นเดียวกับการประเมินหาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม IC ตามขั้นตอนที่ 1-5 โดยการเปลี่ยนชนิดของสีย้อม IC เป็นสีย้อม MB และ RB5 ในการทำการทดลอง

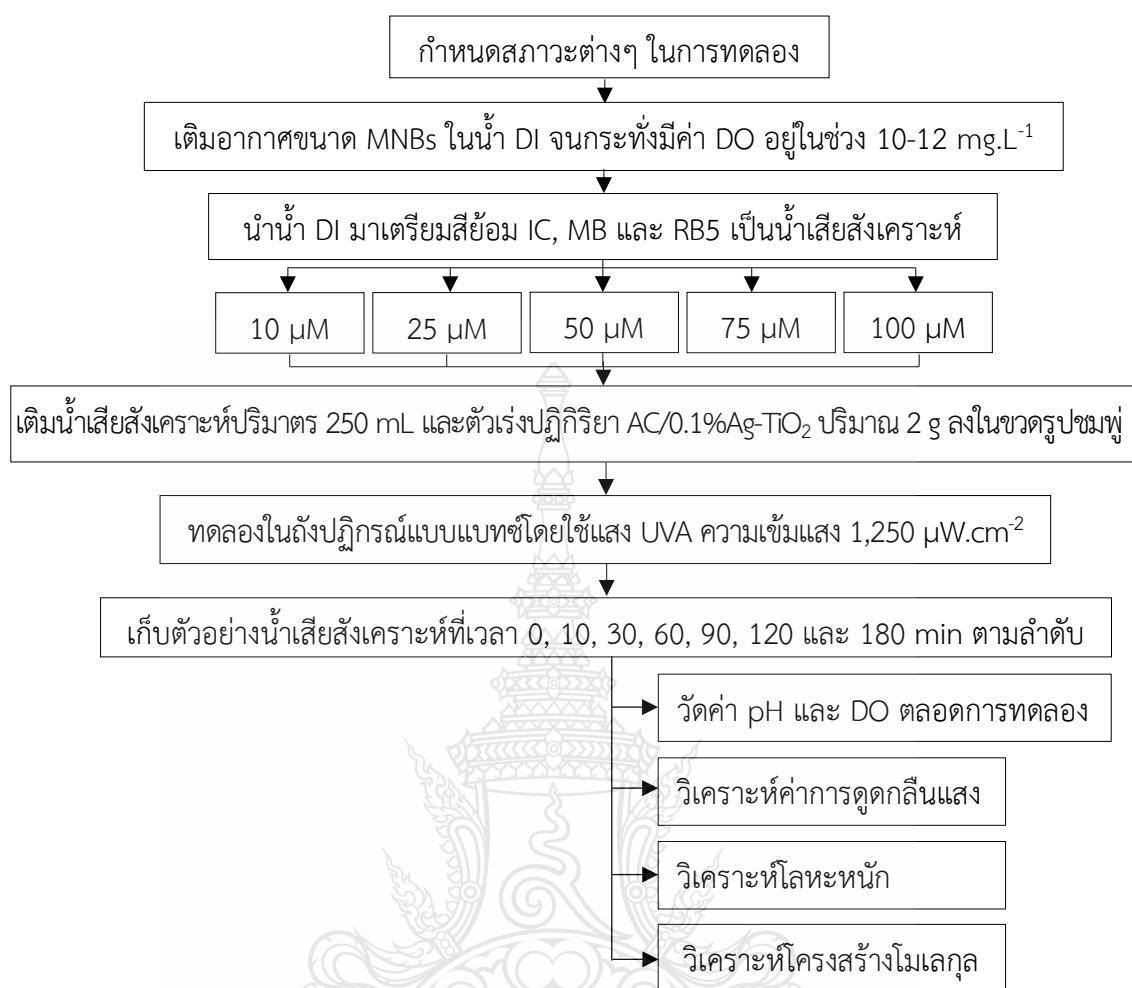
8) วิเคราะห์ผลของการเติมอากาศขนาด MNBs และการเติมอากาศขนาด MNBs ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1% Ag-TiO<sub>2</sub> เพื่อหาค่าศักยภาพการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันด้วยอุปกรณ์ ORP

9) เลือกตัวอย่างการทดลองที่มีประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 สูงสุด มาทำการวิเคราะห์ดังนี้

- วิเคราะห์โลหะหนักเพื่อหาการหลุดร่อนของสารประกอบ Ti และ Ag ด้วยอุปกรณ์ ICP
- วิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลของสีย้อม IC, MB และ RB5 เพื่อดูการสลายตัวของโครงสร้างโมเลกุลและความเป็นพิษด้วยอุปกรณ์ GC-MS

ทั้งนี้ในขั้นตอนการประเมินหาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิสติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> ร่วมกับแหล่งกำเนิดแสง UVA และการเติมอากาศขนาด MNBs สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 3.4





### รูปที่ 3.5 การประเมินประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5

ตารางที่ 3.1 สภาวะในการทดลองหาประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5

การทดลอง	AC	0.1%AC/Ag-TiO <sub>2</sub>	UVA	MNBs
ชุดการทดลอง	✗	✓	✓	✓
ชุดควบคุมที่ 1	✗	✓	✓	✗
ชุดควบคุมที่ 2	✗	✓	✗	✓
ชุดควบคุมที่ 3	✓	✗	✓	✓
ชุดควบคุมที่ 4	✓	✗	✗	✓
ชุดควบคุมที่ 5	✓	✗	✓	✗
ชุดควบคุมที่ 6	✓	✗	✗	✗
ชุดควบคุมที่ 7	✗	✗	✗	✓

### 3.3 การศึกษาจลนพลศาสตร์ (Kinetics)

ในการทดลองหาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม 3 ชนิด ได้แก่ IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> ร่วมกับแหล่งกำเนิดแสง UVA และการเติมอากาศขนาด MNBs ในการศึกษาเพื่อหาสมการจลนพลศาสตร์ โดยในการศึกษาได้นำสมการ Langmuir-Hinshelwood และ First-order มาพิจารณาในการอธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก



## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงาน

การประเมินประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมโดยการเตรียมสีย้อม 3 ชนิด ได้แก่ IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> ร่วมกับแหล่งกำเนิดแสง UVA และการเติมอากาศขนาด MNBs ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> และผลการประเมินประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการดังกล่าวมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 4.1 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพตัวเร่งของปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub>

##### 4.1.1 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของพื้นผิว AC และตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub>

การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพด้วยอุปกรณ์ SEM โดยเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของพื้นผิว AC ก่อนทำการเคลือบและหลังทำการเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> แสดงดังรูปที่ 4.1



ก. AC

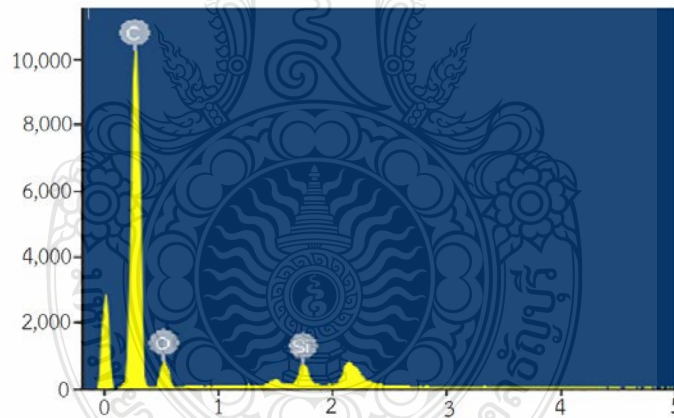
ข. AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub>

รูปที่ 4.1 พื้นผิว AC และตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> ที่วิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ SEM

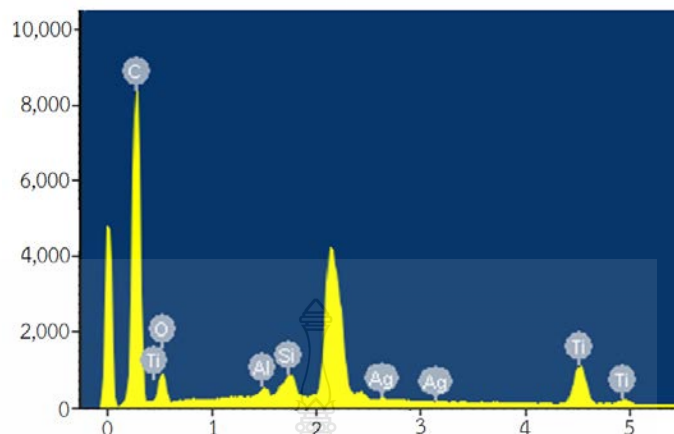
จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นถึงพื้นผิวของ AC และการเกิดผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> หลังจากผ่านการเคลือบผิวที่เตรียมด้วยวิธีโซล-เจล จากรูปดังกล่าวยังแสดงให้เห็นถึงลักษณะโครงสร้างพื้นผิว AC มีลักษณะเป็นโพรงและพื้นผิวเรียบ ในขณะที่พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> มีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระ ซึ่งเป็นลักษณะการเกาะติดของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> ที่มีการได้ตกลงไปบนพื้นผิว AC ทั้งนี้เพื่อความแน่ชัดของการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพจึงนำไปวิเคราะห์หาปริมาณองค์ประกอบธาตุโดยน้ำหนักด้วยอุปกรณ์ EDS ซึ่งผลการวิเคราะห์มีรายละเอียดดังข้อที่ 4.1.2

#### 4.1.2 การวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบธาตุโดยน้ำหนัก

สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบธาตุโดยน้ำหนักของ AC และตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> สามารถวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ EDS เพื่อหาปริมาณองค์ประกอบของ AC ก่อนทำการเคลือบและหลังจากการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.2-4.3 และตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุน้ำหนักของ AC



รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุบนตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub>

จากรูปที่ 4.2-4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุบนตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> แสดงให้เห็นว่าสามารถเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> อยู่บนพื้นผิวของ AC โดย AC ก่อนเคลือบพบปริมาณ C, Si และ O ซึ่งหลังเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> พบปริมาณ Ti, Ag และ Al ในองค์ประกอบของตัวอย่างนอกจากนี้เมื่อพิจารณาธาตุ Ag ซึ่งเป็นสารโด๊ปบนตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> พบว่ามีปริมาณใกล้เคียงกับปริมาณที่เติมลงไปในตัวเร่งที่เตรียมขึ้นในปริมาณ 0.08% โดยน้ำหนัก แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ปริมาณองค์ประกอบธาตุโดยน้ำหนัก

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ชนิดธาตุ	ปริมาณโดยน้ำหนัก (%)
AC	C	27.06
	Si	0.40
	O	72.54
AC/0.1%Ag-TiO <sub>2</sub>	C	26.15
	Si	0.36
	O	71.43
	Al	0.22
	Ag	0.08
	Ti	1.76

#### 4.1.3 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวเฉพาะ ปริมาตรและขนาดรูพรุน

จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวเฉพาะ ปริมาตรและขนาดรูพรุนของ AC และตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> โดยใช้อุปกรณ์ BET Surface Area แสดงให้เห็นถึงพื้นที่ผิวเฉพาะ ปริมาตรและขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าว แสดงดังตารางที่ 4.2

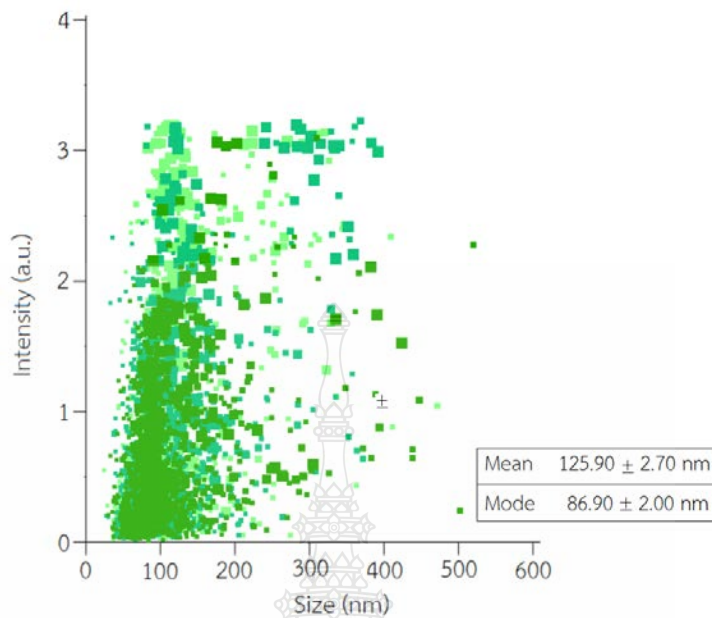
**ตาราง 4.2** ผลวิเคราะห์พื้นที่ผิวเฉพาะ ปริมาตรและขนาดรูพรุนของพื้นผิว

ตัวเร่งปฏิกิริยา	พื้นที่ผิวเฉพาะ (m <sup>2</sup> .g <sup>-1</sup> )	ปริมาตรรูพรุน (m <sup>3</sup> .g <sup>-1</sup> )	ขนาดรูพรุน (nm)
AC	1.980×10 <sup>2</sup>	1.632×10 <sup>-1</sup>	6.235×10 <sup>1</sup>
AC-Ag/TiO <sub>2</sub>	2.116×10 <sup>2</sup>	1.338×10 <sup>-1</sup>	2.531×10 <sup>1</sup>

จากตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวเฉพาะ ปริมาตรและขนาดรูพรุนของ AC และตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> พบว่าพื้นที่ผิวเฉพาะของ AC มีค่าเท่ากับ 1.980×10<sup>2</sup> m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup> หลังจากผ่านการเคลือบผิวด้วยสารละลายตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> มีพื้นที่ผิวเฉพาะเท่ากับ 2.116×10<sup>2</sup> m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup> ซึ่งพื้นที่ผิวเฉพาะเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยมีค่าเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากการสะสมของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> บริเวณผิวหน้าและภายในรูพรุนของ AC ส่งผลให้ขนาดและปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา AC/Ag-TiO<sub>2</sub> มีแนวโน้มที่มีขนาดลดลง [42], [43]

#### 4.2 การวิเคราะห์การกระจายตัวและขนาดของฟองอากาศ MNBs

การวิเคราะห์การกระจายตัวและขนาดของฟองอากาศ MNBs ด้วยอุปกรณ์ Nanobubbles Testing ที่ได้จากการเตรียมโดยการเติมอากาศ MNBs ในน้ำ DI ที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 15 นาที โดยใช้อุปกรณ์ RMUTT-MNB รุ่น MCH-505S อัตราการไหลสูงสุด 20-80 L.min<sup>-1</sup> และความดัน 220-230 kPa สำหรับการกระจายตัวและขนาดของฟองอากาศขนาด MNBs แสดงดังรูปที่ 4.4



**รูปที่ 4.4** การกระจายตัวและขนาดของฟองอากาศขนาด MNBs

จากรูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของ MNBs พบว่า ขนาดของฟองอากาศที่พบมากที่สุดมีขนาดเท่ากับ  $86.90 \pm 2.00$  nm และขนาดของฟองโดยเฉลี่ยมีขนาดเท่ากับ  $125.90 \pm 2.70$  nm แสดงให้เห็นว่าการเติมอากาศด้วยอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถสร้างฟองอากาศขนาด MNBs ได้ ซึ่งผลจากการเติมอากาศขนาด MNBs นอกจากจะสร้างฟองอากาศขนาดเล็กในระดับนาโนยังส่งผลให้ค่า DO เพิ่มขึ้นจากเดิมที่มีค่า DO เท่ากับ  $6.43 \text{ mg.L}^{-1}$  เป็น  $12.81 \text{ mg.L}^{-1}$  รวมทั้งฟองอากาศดังกล่าวยังมีเสถียรภาพและมีความคงตัวอยู่ในน้ำได้นานกว่าปกติมากกว่า 1 สัปดาห์ [44], [45], [46], [47]

#### 4.3 การประเมินประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม

การประเมินประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $0.1\% \text{AC/Ag-TiO}_2$  ร่วมกับแหล่งกำเนิดแสง UVA ที่มีความเข้มแสงเท่ากับ  $1,250 \mu\text{W.cm}^{-2}$  และการเติมอากาศขนาด MNBs โดยเตรียมสีย้อม IC, MB และ RB5 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10, 25, 50, 75 และ  $100 \mu\text{M}$  เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์

เมื่อผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่เวลา 0, 10, 30, 60, 90, 120 และ 180 min โดยเปรียบเทียบสภาวะการทดลองต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.3-4.5

**ตารางที่ 4.3** ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์

การทดลอง	ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมสูงสุด (%) $\pm$ SD ; (n=3)				
	10 $\mu$ M	25 $\mu$ M	50 $\mu$ M	75 $\mu$ M	100 $\mu$ M
ชุดการทดลอง	87.03 $\pm$ 0.03	64.97 $\pm$ 0.06	59.73 $\pm$ 0.24	43.24 $\pm$ 0.62	27.18 $\pm$ 0.30
ชุดควบคุมที่ 1	66.58 $\pm$ 0.71	45.51 $\pm$ 0.81	37.32 $\pm$ 0.40	33.22 $\pm$ 0.16	23.14 $\pm$ 0.44
ชุดควบคุมที่ 2	48.59 $\pm$ 0.58	38.18 $\pm$ 0.79	33.50 $\pm$ 0.92	27.02 $\pm$ 0.38	21.84 $\pm$ 0.51
ชุดควบคุมที่ 3	41.33 $\pm$ 0.77	30.53 $\pm$ 0.56	22.01 $\pm$ 0.68	19.99 $\pm$ 0.71	17.88 $\pm$ 0.84
ชุดควบคุมที่ 4	27.39 $\pm$ 0.46	22.84 $\pm$ 0.70	16.71 $\pm$ 0.72	16.36 $\pm$ 0.03	15.42 $\pm$ 0.60
ชุดควบคุมที่ 5	21.77 $\pm$ 0.19	17.58 $\pm$ 0.37	15.50 $\pm$ 0.15	12.77 $\pm$ 0.10	11.29 $\pm$ 0.19
ชุดควบคุมที่ 6	18.61 $\pm$ 0.97	12.01 $\pm$ 0.59	10.73 $\pm$ 0.29	9.64 $\pm$ 0.37	8.64 $\pm$ 0.14
ชุดควบคุมที่ 7	9.47 $\pm$ 0.22	4.87 $\pm$ 0.32	4.48 $\pm$ 0.14	4.06 $\pm$ 0.05	3.96 $\pm$ 0.05

**ตารางที่ 4.4** ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์

การทดลอง	ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมสูงสุด (%) $\pm$ SD ; (n=3)				
	10 $\mu$ M	25 $\mu$ M	50 $\mu$ M	75 $\mu$ M	100 $\mu$ M
ชุดการทดลอง	83.78 $\pm$ 0.53	55.49 $\pm$ 0.71	42.41 $\pm$ 0.54	32.21 $\pm$ 0.27	28.95 $\pm$ 0.24
ชุดควบคุมที่ 1	61.45 $\pm$ 0.54	53.21 $\pm$ 0.42	36.70 $\pm$ 0.24	32.97 $\pm$ 0.19	22.99 $\pm$ 0.66
ชุดควบคุมที่ 2	43.73 $\pm$ 0.29	36.75 $\pm$ 0.30	31.31 $\pm$ 0.70	25.00 $\pm$ 0.26	22.95 $\pm$ 0.14
ชุดควบคุมที่ 3	40.59 $\pm$ 0.89	34.04 $\pm$ 0.70	24.01 $\pm$ 0.81	21.77 $\pm$ 0.17	16.72 $\pm$ 0.43
ชุดควบคุมที่ 4	23.49 $\pm$ 0.56	20.20 $\pm$ 0.47	18.35 $\pm$ 0.91	14.82 $\pm$ 0.41	12.48 $\pm$ 0.13
ชุดควบคุมที่ 5	18.70 $\pm$ 0.35	16.65 $\pm$ 0.25	14.12 $\pm$ 0.32	11.57 $\pm$ 0.38	11.07 $\pm$ 0.29
ชุดควบคุมที่ 6	16.34 $\pm$ 0.37	12.17 $\pm$ 0.43	10.80 $\pm$ 0.50	8.43 $\pm$ 0.38	6.19 $\pm$ 0.15
ชุดควบคุมที่ 7	4.20 $\pm$ 0.10	4.00 $\pm$ 0.18	3.50 $\pm$ 0.02	3.11 $\pm$ 0.03	2.73 $\pm$ 0.09



ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพการบำบัดสี้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์

การทดลอง	ประสิทธิภาพการบำบัดสี้อมสูงสุด (%) $\pm$ SD ; (n=3)				
	10 $\mu$ M	25 $\mu$ M	50 $\mu$ M	75 $\mu$ M	100 $\mu$ M
ชุดการทดลอง	81.67 $\pm$ 0.96	56.63 $\pm$ 0.87	35.25 $\pm$ 0.15	25.85 $\pm$ 0.31	24.32 $\pm$ 0.27
ชุดควบคุมที่ 1	57.72 $\pm$ 0.67	33.98 $\pm$ 0.24	32.36 $\pm$ 0.38	23.21 $\pm$ 0.75	16.80 $\pm$ 0.19
ชุดควบคุมที่ 2	42.73 $\pm$ 0.66	32.00 $\pm$ 0.14	26.48 $\pm$ 0.50	22.55 $\pm$ 0.66	16.81 $\pm$ 0.24
ชุดควบคุมที่ 3	24.94 $\pm$ 0.46	22.88 $\pm$ 0.66	19.79 $\pm$ 0.20	14.14 $\pm$ 0.61	14.79 $\pm$ 0.12
ชุดควบคุมที่ 4	19.14 $\pm$ 0.58	17.96 $\pm$ 0.05	14.24 $\pm$ 0.48	12.48 $\pm$ 0.10	11.34 $\pm$ 0.52
ชุดควบคุมที่ 5	17.58 $\pm$ 0.62	15.39 $\pm$ 0.27	14.66 $\pm$ 0.43	11.08 $\pm$ 0.18	10.26 $\pm$ 0.09
ชุดควบคุมที่ 6	15.95 $\pm$ 0.17	12.92 $\pm$ 0.07	8.81 $\pm$ 0.78	7.90 $\pm$ 0.20	6.65 $\pm$ 0.45
ชุดควบคุมที่ 7	3.80 $\pm$ 0.22	3.57 $\pm$ 0.09	6.31 $\pm$ 0.41	2.42 $\pm$ 0.05	2.36 $\pm$ 0.04

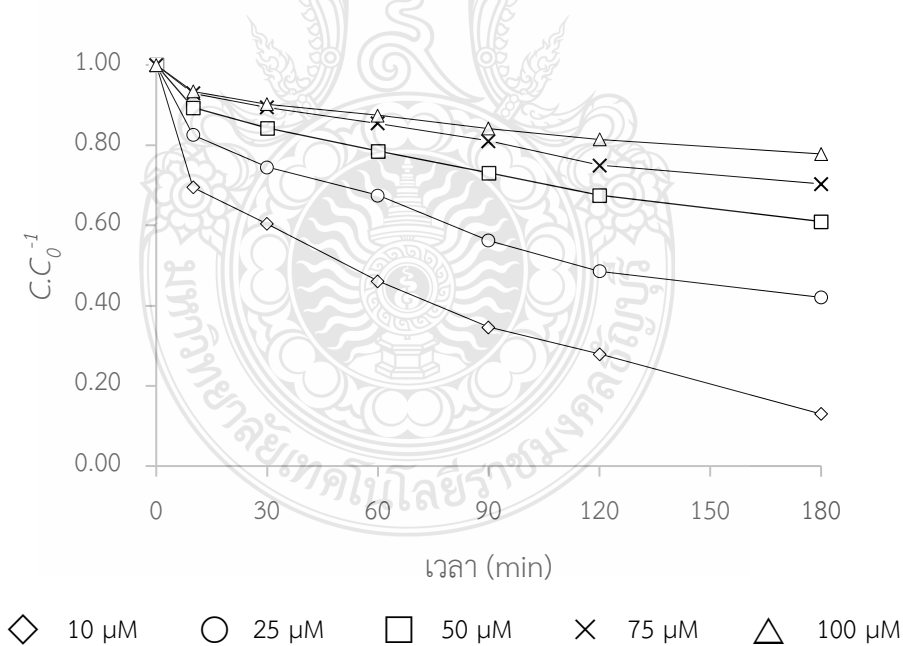
จากตารางที่ 4.3-4.5 แสดงผลการทดลองการประเมินประสิทธิภาพการบำบัดสี้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> ร่วมกับแหล่งกำเนิดแสง UVA และการเติมอากาศขนาด MNBs ภายใต้สภาวะการทดลอง 8 รูปแบบ โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพในชุดการทดลองและชุดควบคุม พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสี้อม IC, MB และ RB5 ในชุดการทดลอง > ชุดควบคุมที่ 1 > ชุดควบคุมที่ 2 > ชุดควบคุมที่ 3 > ชุดควบคุมที่ 4 > ชุดควบคุมที่ 5 > ชุดควบคุมที่ 6 > ชุดควบคุมที่ 7 ตามลำดับ

ทั้งนี้เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในชุดการทดลองซึ่งใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> ร่วมกับแหล่งกำเนิดแสง UVA และการเติมอากาศขนาด MNBs พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสี้อมสูงสุดเท่ากับ 87.03%, 83.78% และ 81.67% สำหรับสี้อม IC, MB และ RB5 ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 10  $\mu$ M ตามลำดับ สำหรับการทดลองในชุดควบคุมที่ 1 ซึ่งมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> ร่วมกับแหล่งกำเนิดแสง UVA พบว่าสามารถเกิดกระบวนการโฟโตคะตะลิติกได้ดี ทั้งนี้จากประสิทธิภาพการบำบัดสี้อมดังกล่าวของชุดทดลองและชุดควบคุมเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสี้อมดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการเติมอากาศขนาด MNBs เป็นการสร้างสภาวะที่มีค่า DO เริ่มต้นมากเกินพอโดยส่งเสริมให้เกิด Reactive Oxidation Species (ROSS) ได้แก่ hydroxyl radicals ( $\bullet$ OH), superoxide radicals ( $\bullet$ O<sub>2</sub><sup>-</sup>), hydrogen peroxide (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) และ singlet oxygen (<sup>1</sup>O<sub>2</sub>) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์ซึ่งเอเจนท์ที่มี

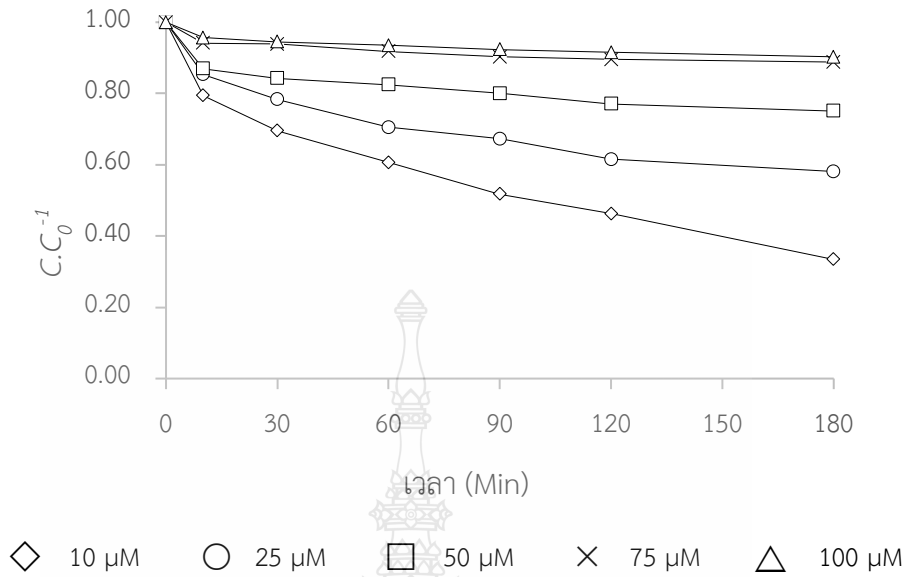
ความรุนแรงในการเกิดปฏิกิริยาทั้งยังช่วยส่งเสริมประสิทธิภาพกระบวนการโฟโตคะตะลิติกให้ดีขึ้น [48], [49] สำหรับการทดลองในชุดควบคุมที่ 2 ซึ่งมีการใช้เพียงตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> ร่วมกับการเติมอากาศขนาด MNBs แต่ปราศจากแหล่งกำเนิดแสง UVA ส่งผลให้ไม่สามารถเกิดกระบวนการโฟโตคะตะลิติกได้ เนื่องจากขาดปัจจัยของการให้พลังงานของโฟตอนจากแหล่งกำเนิดแสง UVA

สำหรับการทดลองในชุดควบคุมที่ 3-7 แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในภาพรวมของการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 มีค่าต่ำกว่า 42 % เนื่องจากการทดลองในชุดควบคุมที่ 3-7 อยู่ในสถานะที่ขาดปัจจัยสำคัญอย่างใดอย่างหนึ่งในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยาหรือแหล่งกำเนิดแสง UVA จึงไม่สามารถเกิดกระบวนการโฟโตคะตะลิติกได้ แต่ยังคงเกิดปฏิกิริยาการดูดติดผิวและดูดซับบริเวณพื้นผิวและภายในรูพรุนของ AC ได้

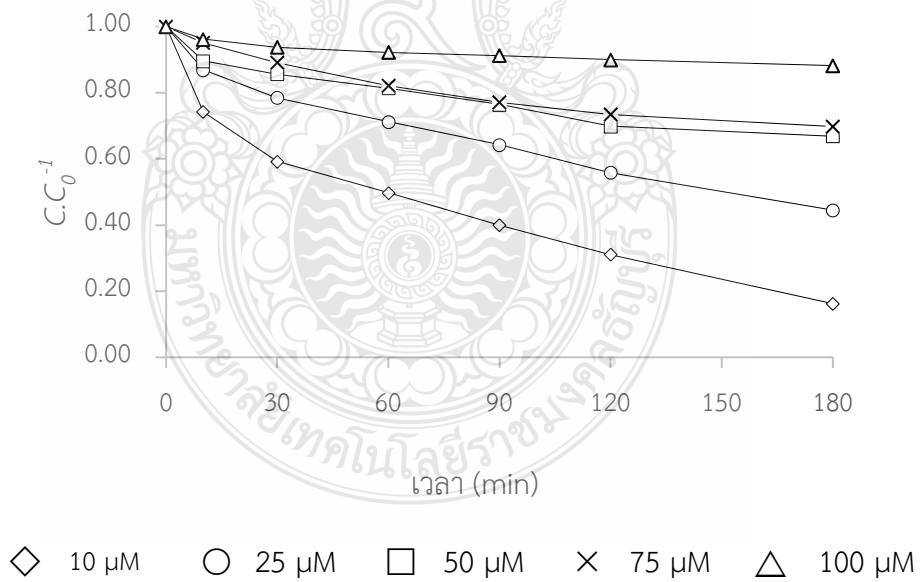
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยอาศัยปัจจัยการเกิดปฏิกิริยา คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาและแหล่งกำเนิดแสง UVA พบว่าในชุดการทดลองและชุดควบคุมที่ 1 เป็นไปตามกลไกการเกิดกระบวนการดังกล่าว สำหรับการแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้น ( $C_0$ ) กับเวลา ของสีย้อมต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.5-4.10



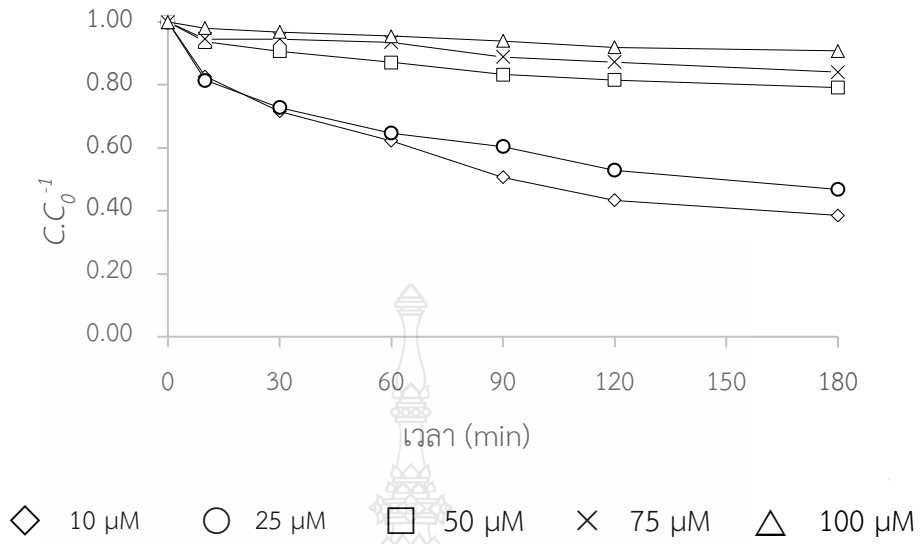
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_0$  กับเวลาในชุดการทดลองของสีย้อม IC



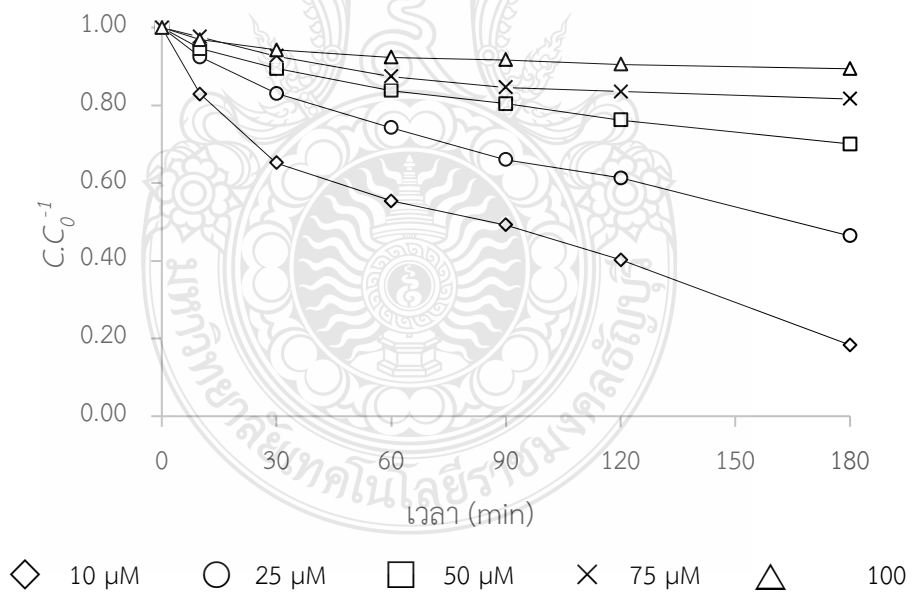
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $C/C_0^{-1}$  กับเวลาในชุดควบคุมที่ 1 ของสีย้อม IC



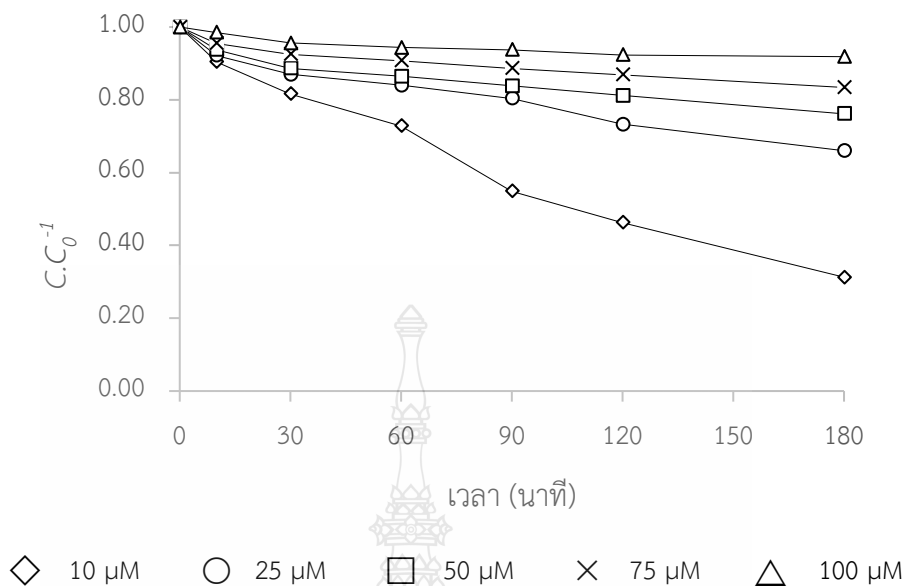
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $C/C_0^{-1}$  กับเวลาในชุดการทดลองของของสีย้อม MB



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $C/C_0^{-1}$  กับเวลาในชุดควบคุมที่ 1 ของสีย้อม MB



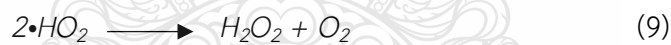
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $C/C_0^{-1}$  กับเวลาในชุดการทดลองของสีย้อม RB5



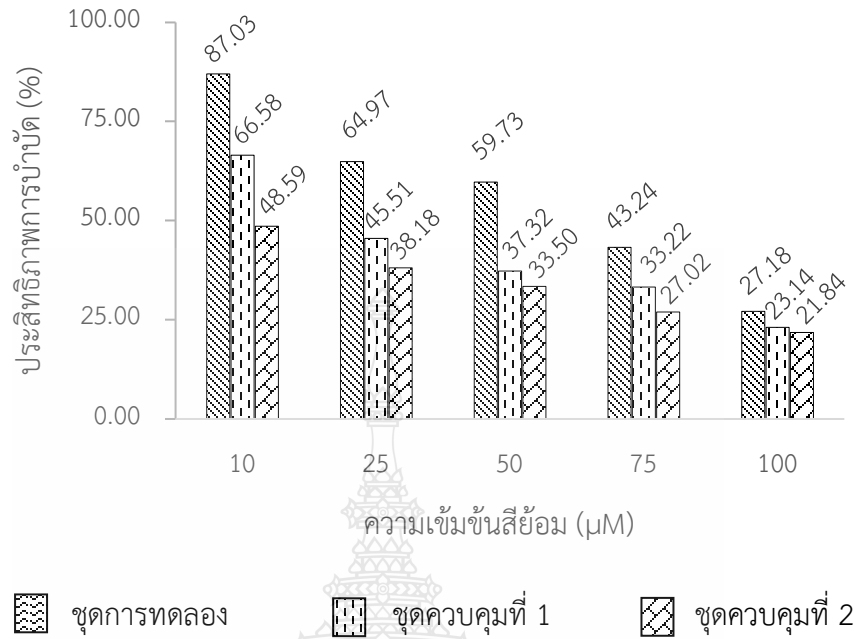
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $C.C_0^{-1}$  กับเวลาในชุดควบคุมที่ 1 สีย้อม RB5

จากรูปที่ 4.5-4.10 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง  $C.C_0^{-1}$  กับเวลาสำหรับสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการดังกล่าวที่เปลี่ยนไปตามเวลา พบว่า ความเข้มข้นของสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ในชุดทดลองและชุดควบคุมที่ 1 เกิดการลดลงอย่างรวดเร็วใน 10 นาทีแรก เนื่องจากกลไกหลักของการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะลิติกช่วงแรก คือ กลไกการดูดติดผิวและดูดซับ โดยในช่วงแรกพื้นผิวและรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1% Ag-TiO<sub>2</sub> มีความสะอาดซึ่งโมเลกุลของสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ยังไม่มีถูกดูดติดผิวและดูดซับรวมทั้งที่ปกคลุมกันบนพื้นผิวและรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1% Ag-TiO<sub>2</sub> ส่งผลให้ศักยภาพในการดูดติดผิวและดูดซับสีย้อม IC, MB และ RB5 มีค่าสูง ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาในช่วงแรกเป็นผลมาจากกลไกการดูดติดผิวและดูดซับเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว เมื่อโมเลกุลของสีย้อม IC, MB และ RB5 ถูกดูดติดผิวเต็มบริเวณพื้นผิวและรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวจะทำให้การเกิดปฏิกิริยาเกิดการชะลอตัวและเริ่มคงที่ [50] ทั้งนี้การประเมินประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการดังกล่าว พบว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม IC, MB และ RB5 ที่เพิ่มขึ้นเป็นปัจจัยสำคัญที่เป็นอุปสรรคต่อการส่องผ่านของแสงที่จะไปกระตุ้นพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> ส่งผลให้การสร้างอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลในการสลายโมเลกุลสีย้อมลดลง [51], [52], [53] ดังแสดงให้เห็นจากผลการทดลองโดยความเข้มข้นของสีย้อม IC, MB และ RB5 ที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการ

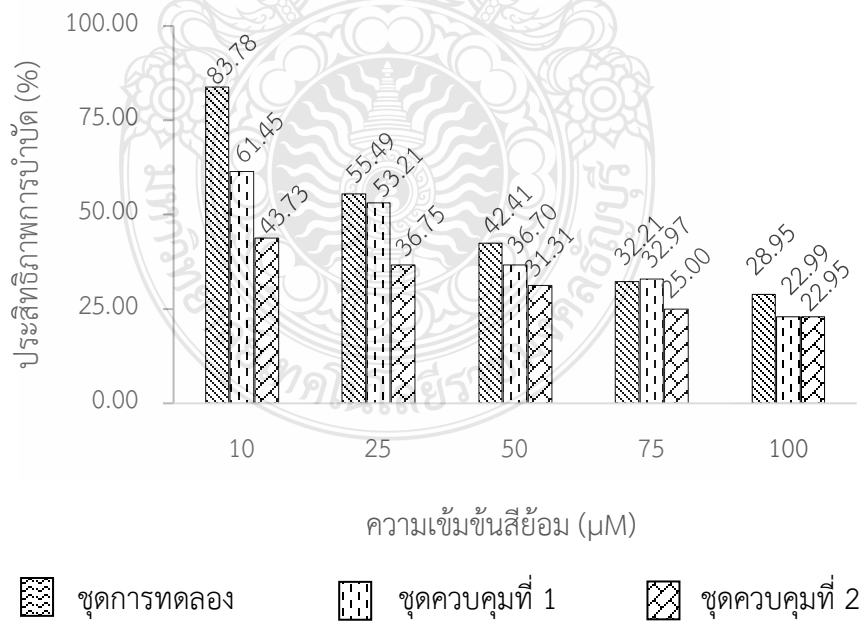
ลดลงของประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ และยังแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> ที่มีขนาดช่องว่างพลังงานที่แคบลงเนื่องจากการโด๊ป 0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> สามารถตอบสนองต่อแหล่งกำเนิดแสง UVA ได้ดีช่วยกระตุ้นให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยัง CB ได้เร็วขึ้นและมีความเสถียร [54], [55] ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> และการเติมอากาศขนาด MNBs สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกได้เพิ่มขึ้น โดยกลไกการเกิดปฏิกิริยาในการเติมอากาศ MNBs สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (4.1) - (4.12)



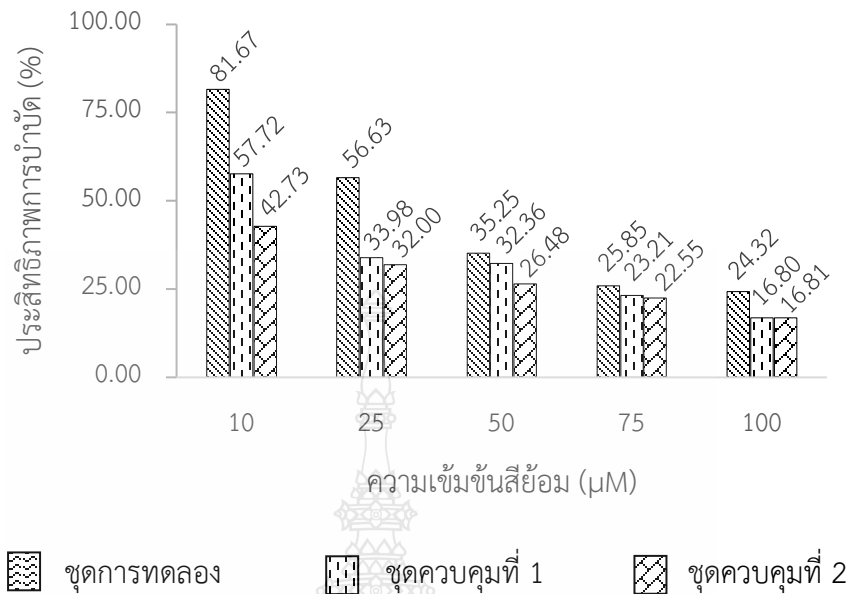
ทั้งนี้เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพโดยรวมของการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกสูงสุด 3 อันดับแรก ได้แก่ ชุดการทดลอง, ชุดควบคุมที่ 1 และชุดควบคุมที่ 2 โดยผลของประสิทธิภาพโดยรวมดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 4.11-4.13



รูปที่ 4.11 ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม IC



รูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม MB



รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพการบำบัดสี้อม RB5

จากรูป 4.11-4.13 เมื่อเปรียบเทียบภาพรวมของประสิทธิภาพการบำบัดสี้อมทั้ง 3 ชนิด พบว่าชุดทดลองมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่าชุดควบคุมที่ 1 และชุดควบคุมที่ 2 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัดสี้อมทั้ง 3 ชนิด ในชุดควบคุมที่ 3 พบว่ามีความน่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากในชุดควบคุมนี้เป็นการทดลองภายใต้สภาวะที่ไม่สามารถเกิดกลไกของปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสติกได้ตามทฤษฎี เนื่องจากขาดแหล่งกำเนิดแสง UVA แต่ประสิทธิภาพการบำบัดด้วยกระบวนการดังกล่าวสูงเป็นอันดับ 3 โดยการเติมอากาศขนาด MNBs อาจส่งผลทำให้เกิดอนุมูลอิสระ (free radical) ทำปฏิกิริยากับพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> จากข้อมูลข้างต้นจึงได้ทดสอบหาค่าศักย์ในการออกซิเดชัน-รีดักชัน ในตัวอย่างน้ำ DI, DI + MNBs และ DI + MNBs + AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> ด้วยอุปกรณ์ ORP Electrode แสดงดังตารางที่ 4.6

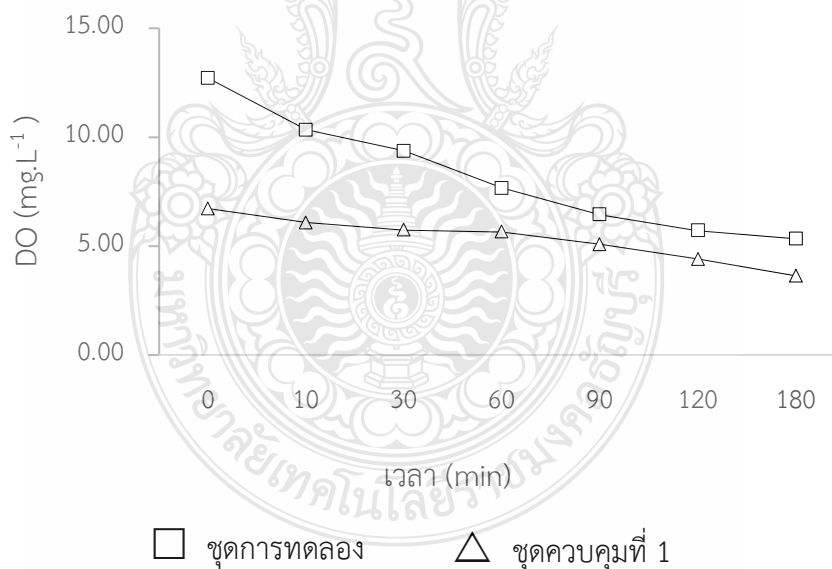
ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์ค่าศักย์ในการออกซิเดชัน-รีดักชัน

ตัวอย่าง	ค่า ORP (mV)
DI	249
DI + MNBs	257
DI + MNBs + AC/0.1%Ag-TiO <sub>2</sub>	272

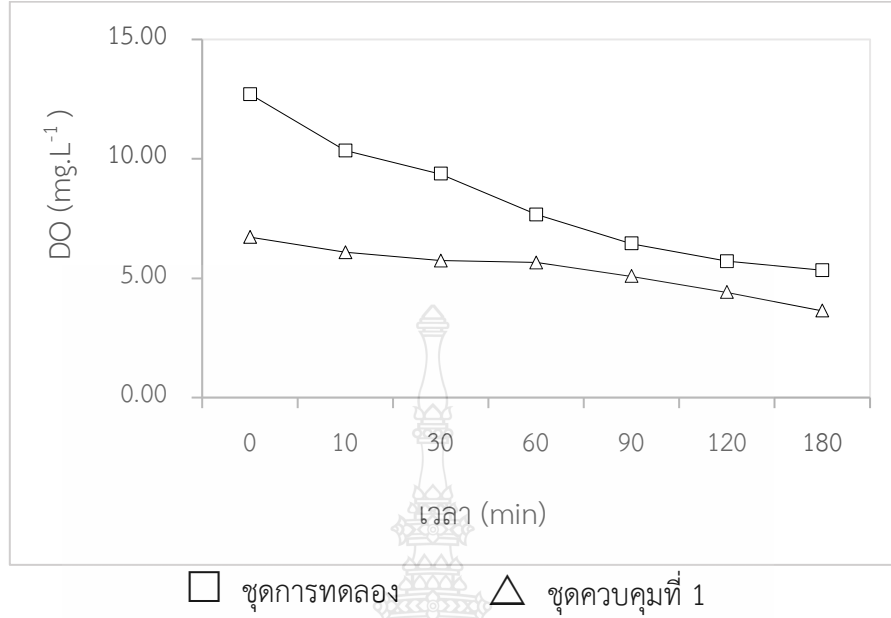


ทั้งนี้จากข้อมูลศักยภาพในการออกซิเดชัน-รีดักชัน ที่หาค่าได้ดังตารางที่ 4.6 พบว่าค่า ORP ในน้ำ DI < น้ำ DI + MNBs < น้ำ DI + MNBs + AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> ทั้งนี้ในน้ำ DI + MNBs + AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> มีค่า ORP สูงเนื่องจากการเติมอากาศขนาด MNBs ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาบางชนิดบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> แสดงให้เห็นว่าแม้ไม่มีแหล่งพลังงานจากแสง UVA ที่เป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะลิติก แต่ยังคงมีปฏิกิริยาบางอย่างที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> จากการเติมอากาศขนาด MNBs ส่งผลให้การทดลองในสภาวะควบคุมดังกล่าวอาจเกิดสารบางอย่างที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์โมเลกุลของสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ [56], [57]

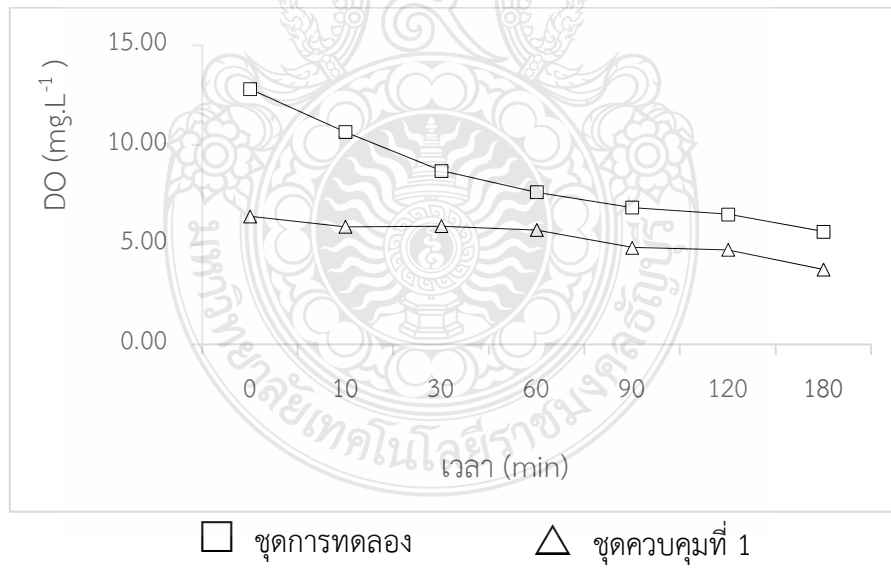
สำหรับการติดตามการเปลี่ยนแปลง DO ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการข้างต้นตลอดระยะเวลาทำการทดลอง โดยเปรียบเทียบสภาวะการทดลองระหว่างชุดการทดลองและชุดควบคุมที่ 1 แสดงดังรูปที่ 4.14-4.16 ทั้งนี้ติดตามการเปลี่ยนแปลง DO ของสีย้อม IC, MB และ RB5 ด้วยอุปกรณ์ DO Meter



รูปที่ 4.14 ค่า DO ที่เปลี่ยนแปลงของสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์



รูปที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลง DO ของสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์



รูปที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลง DO ของสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์

จากรูปที่ 4.14-4.16 การติดตามการเปลี่ยนแปลงของ DO ในน้ำเสียสังเคราะห์ตลอดระยะเวลาการทดลองโดยการเติมอากาศขนาด MNBs ส่งเสริมให้เกิด  $\bullet\text{OH}$  และ  $\bullet\text{O}_2^-$  นำไปสู่การเกิดออกซิไดซ์ซิงเอนท์ [58] ตามสมการที่ 4.6-4.11 ทั้งนี้การเติมอากาศขนาด MNBs ส่งผลให้ค่า DO เริ่มต้นมีปริมาณมากกว่าปกติ โดยพบว่า การทดลองในชุดการทดลองมีอัตราการใช้  $\text{O}_2$  สูงสุดที่ 10 นาทีแรกในกระบวนการโฟโตคะตะลิติกเท่ากับ 0.116, 0.103 และ 0.216  $\text{mg.L}^{-1}$  ตามลำดับ สำหรับสีย้อม IC, MB และ RB5 สำหรับในชุดควบคุมที่ 1 มีอัตราการใช้  $\text{O}_2$  สูงสุดที่ 10 นาทีแรกเท่ากับ 0.014, 0.019 และ 0.052  $\text{mg.L}^{-1}$  ตามลำดับ สำหรับสีย้อม IC, MB และ RB5 เมื่อเปรียบเทียบอัตราการใช้  $\text{O}_2$  ในชุดการทดลองและชุดควบคุมที่ 1 แสดงให้เห็นว่าชุดทดลองมีอัตราการใช้  $\text{O}_2$  สูงกว่าชุดควบคุมที่ 1 เท่ากับ 8.29, 5.42 และ 4.15 เท่า สำหรับสีย้อม IC, MB และ RB5

ทั้งนี้สำหรับการวิเคราะห์โลหะหนักเพื่อหาสารประกอบ Ti และ Ag ที่อาจหลุดร่อนหรือตกค้างในน้ำเสียสังเคราะห์หลังผ่านกระบวนการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก โดยวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ ICP ผลการวิเคราะห์ปริมาณการหลุดร่อนของสารประกอบ Ti และ Ag แสดงดังตารางที่ 4.7

**ตารางที่ 4.7** ผลการวิเคราะห์การหลุดร่อนของสารประกอบ Ti และ Ag

สีย้อม	ปริมาณการหลุดร่อน ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	
	Ti	Ag
IC	0.12	0.02
MB	0.19	0.02
RB5	0.14	0.03

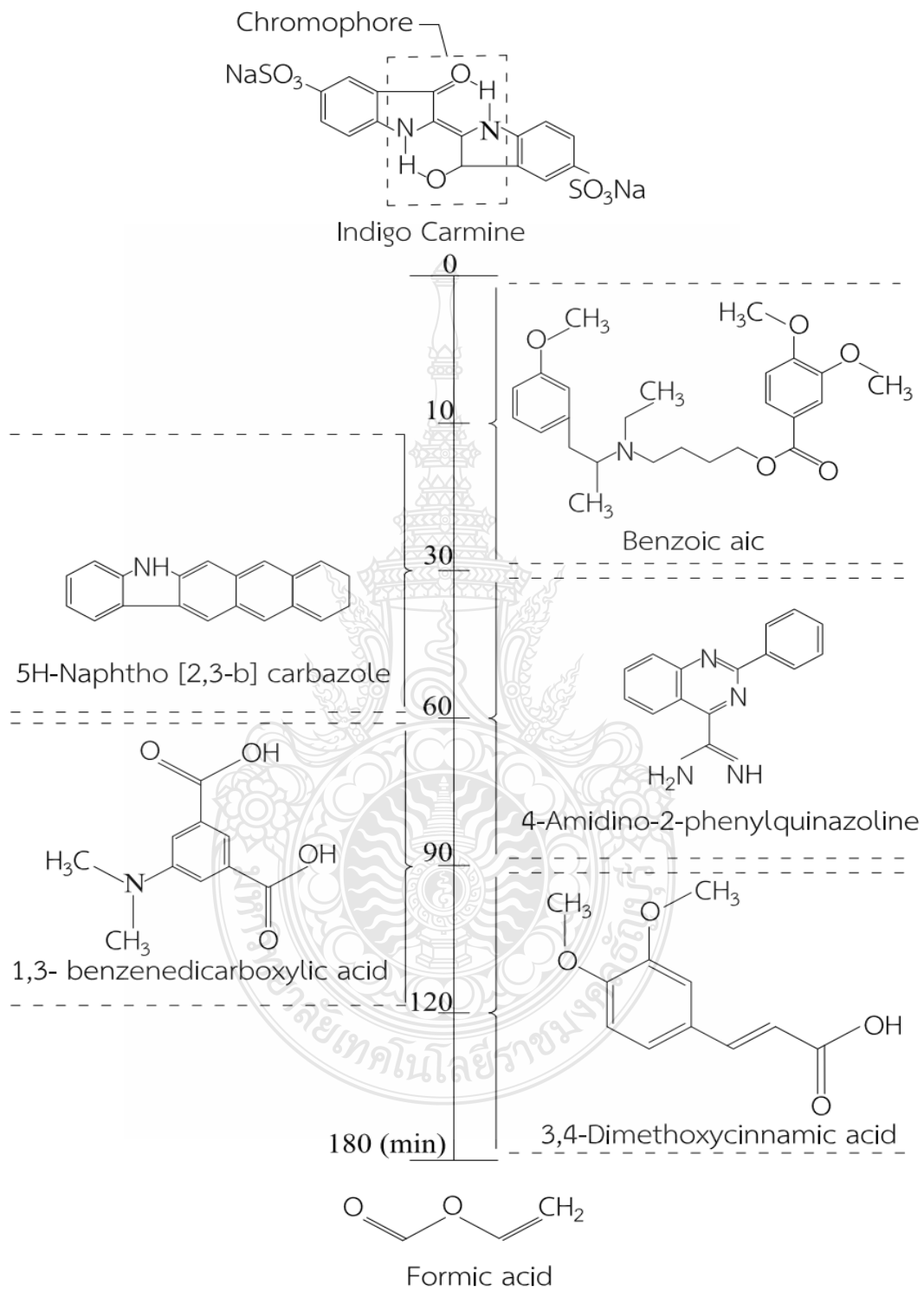
จากตารางที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าในชุดการทดลองปริมาณสารประกอบ Ti และ Ag มีการหลุดร่อนในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกในปริมาณน้อยซึ่งไม่ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศในสิ่งแวดล้อม โดยการทดลองคิดเป็นเปอร์เซ็นต์พบว่าปริมาณ Ti ที่หลุดร่อนมีค่าเท่ากับ 0.09%, 0.13% และ 0.10% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ สำหรับสีย้อม IC, MB และ RB5 และยังพบปริมาณ Ag ที่หลุดร่อนมีค่าเท่ากับ และ 0.31%, 0.31% และ 0.48% โดยน้ำหนัก ตามลำดับสำหรับสำหรับสีย้อม IC, MB และ RB5 (รายการคำนวณแสดงดังภาคผนวกที่ ก) เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำความเป็นพิษ

ระดับชาติตาม US EPA. ไม่มีข้อมูลที่ระบุว่า Ti และ Ag มีความเป็นพิษในสิ่งแวดล้อม [59] ทั้งนี้สารมลพิษขนาดเล็กที่มีการปนเปื้อนในแหล่งน้ำยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในธรรมชาติและมนุษย์ สิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำแบบเฉียบพลันและเรื้อรัง [60]

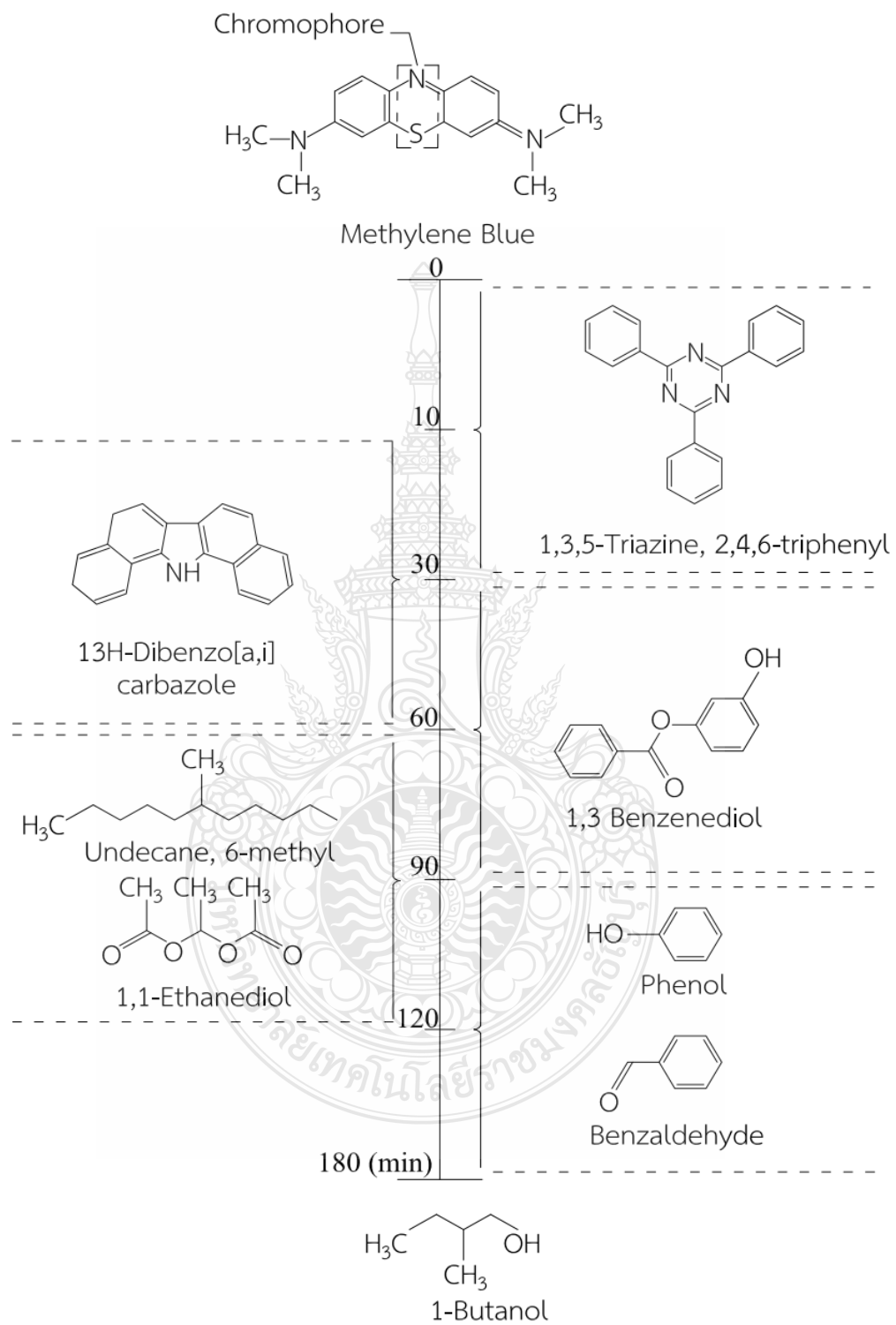
การสลายโครงสร้างโมเลกุลของสีย้อม IC, MB และ RB5

การติดตามการเปลี่ยนแปลงการสลายโครงสร้างโมเลกุลของสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกระยะเวลาทำการทดลอง 180 นาที โดยใช้อุปกรณ์ GC-MS ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 4.18-4.19

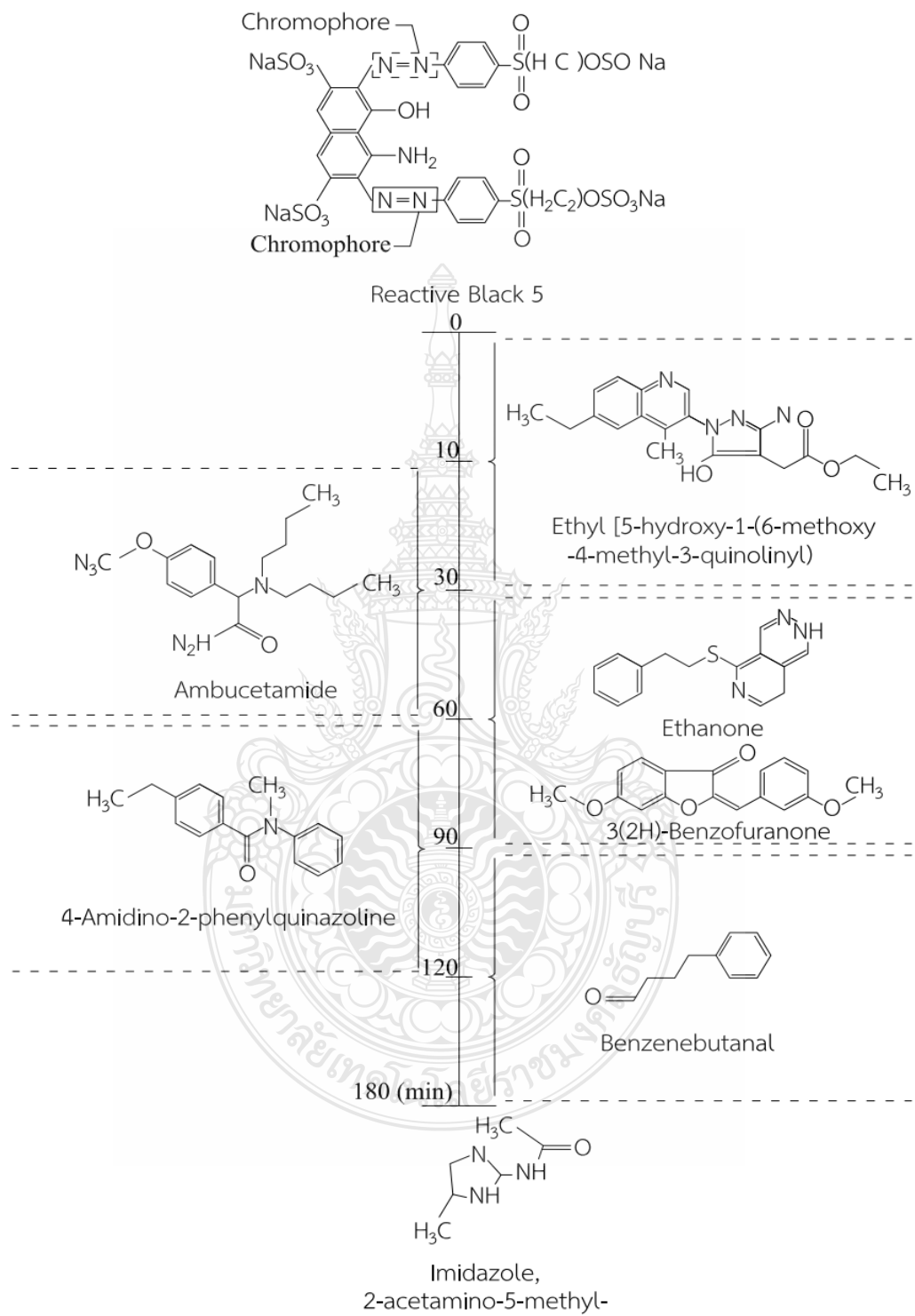




รูปที่ 4.17 โครงสร้างสีย้อม IC



รูปที่ 4.18 โครงสร้างสีย้อม MB

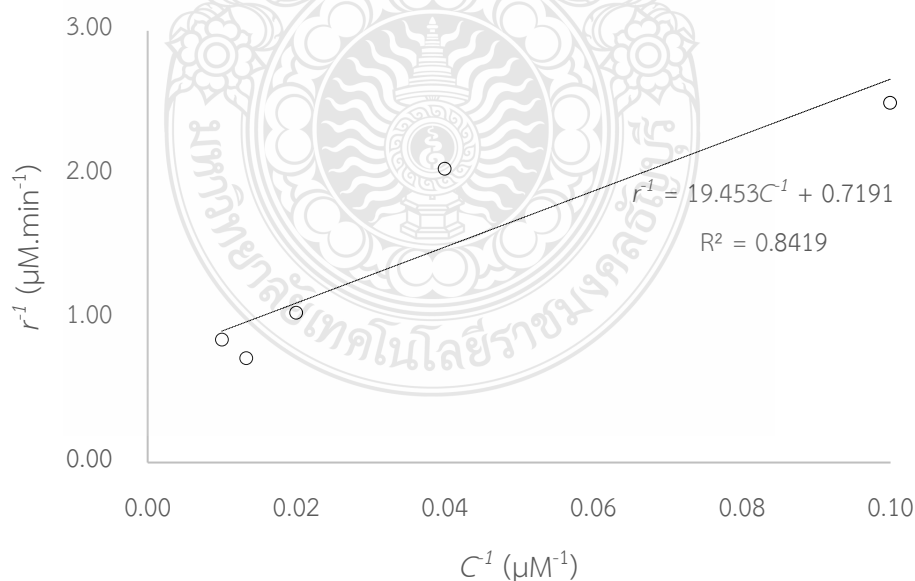


รูปที่ 4.19 โครงสร้างสี้อม RB5

จากรูปที่ 4.17-4.19 แสดงให้เห็นว่ากลุ่มโครโมฟอร์ในโครงสร้างสี้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งเป็นกลุ่มที่ทำให้เกิดสีโดยที่ความเข้มข้นเริ่มต้นโครงสร้างโมเลกุลของสี้อม IC, MB และ RB5 มีโครงสร้างที่ซับซ้อน ทั้งนี้เมื่อผ่านกระบวนการบำบัดสี้อมดังกล่าวด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกพบว่าโครงสร้างสี้อม IC, MB และ RB5 มีการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างและกลุ่มโครโมฟอร์มีความซับซ้อนน้อยลง ดังนั้นโครงสร้างโมเลกุลและขนาดโมเลกุลมีผลต่อประสิทธิภาพการลดลงของความเข้มข้นสี้อม IC, MB และ RB5

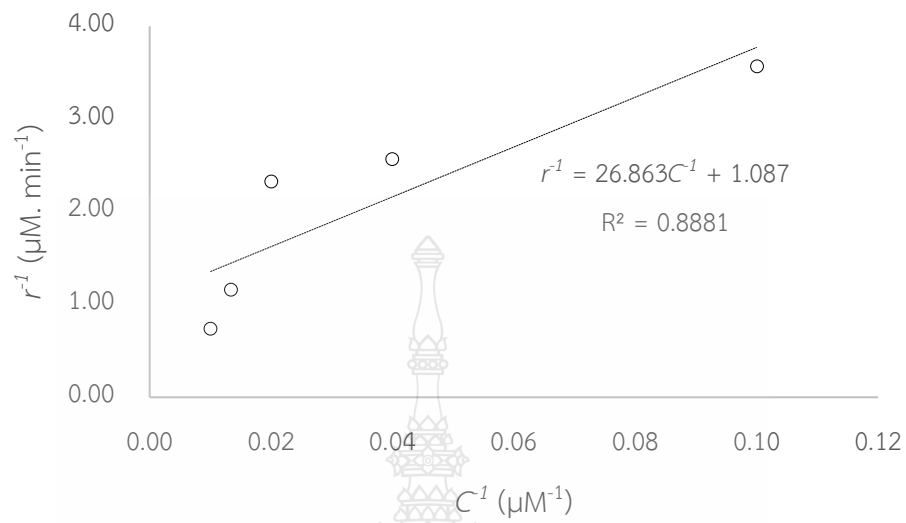
#### 4.4 การศึกษาจลนพลศาสตร์ (Kinetics)

การหาจลนพลศาสตร์ของการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสี้อมด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> ร่วมกับการใช้แสง UVA ที่มีการเติมอากาศขนาด MNBs กลไกการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะลิติกสามารถใช้สมการที่ (4.9) และ (4.10) อธิบายการบำบัดสี้อม IC, MB และ RB5 ซึ่งเป็นไปตามสมการ Langmuir-Hinshelwood การวิเคราะห์ค่าการดูดติดผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1% Ag-TiO<sub>2</sub> โดยความสัมพันธ์ระหว่าง  $r^{-1}$  และ  $C^{-1}$  ในการบำบัดสี้อมทั้ง 3 ชนิด ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกแสดงดังรูปที่ 4.17-4.19

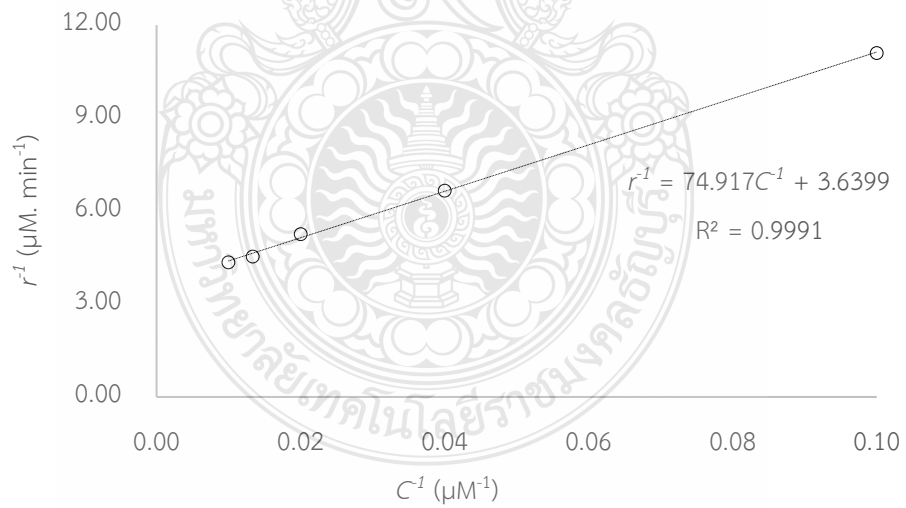


รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $r^{-1}$  และ  $C^{-1}$  สี้อม IC ในชุดการทดลอง





รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $r^{-1}$  และ  $C^{-1}$  สีย้อม MB ในชุดการทดลอง



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $r^{-1}$  และ  $C^{-1}$  สีย้อม RB5 ในชุดการทดลอง

จากภาพที่ 4.17-4.19 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง  $r^{-1}$  และ  $C^{-1}$  ของการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> ร่วมกับแสง UVA และการเติมอากาศขนาด MNBs ซึ่งสามารถหาค่าที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา ( $k$ ) และค่าคงที่สมดุลการดูดติดผิว ( $K$ ) ได้จากสมการ Langmuir-Hinshelwood และนำไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น แสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกกับงานวิจัยอื่น

สีย้อม	ตัวเร่งปฏิกิริยา	$k, \mu\text{M}\cdot\text{min}^{-1}$	$K, \mu\text{M}^{-1}$	$kK, \text{min}^{-1}$	เอกสารอ้างอิง
IC	AC/0.1% Ag-TiO <sub>2</sub> + UVA + MNBs	1.36	0.04	$5.20 \times 10^{-2}$	งานวิจัยนี้
MB		0.92	0.04	$3.72 \times 10^{-2}$	
RB5		0.28	0.05	$1.30 \times 10^{-2}$	
IC	ZnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	-	-	$1.34 \times 10^{-2}$	[61]
	Ag/ZnO	-	-	$2.0 \times 10^{-2}$	[62]
MB	AgMoO <sub>4</sub>	-	-	$4.80 \times 10^{-3}$	[63]
	CoMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	-	-	$2.30 \times 10^{-2}$	[64]
RB5	TiO <sub>2</sub>	-	-	$5.10 \times 10^{-2}$	[65]
	TiO <sub>2</sub>	-	-	$2.6 \times 10^{-2}$	[66]

จากตารางที่ 4.5 พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการดังกล่าว สามารถหาค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก ( $k$ ) ในชุดการทดลองเท่ากับ  $1.39 \mu\text{M}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $0.92 \mu\text{M}\cdot\text{min}^{-1}$  และ  $0.28 \mu\text{M}\cdot\text{min}^{-1}$  และค่าคงที่สมดุลการดูดติดผิว ( $K$ ) คือ 0.04, 0.04 และ  $0.05 \mu\text{M}^{-1}$  ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่น

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาการประเมินประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> ร่วมกับแหล่งกำเนิดแสง UVA และการเติมอากาศขนาด MNBs สามารถสรุปลักษณะสมบัติทางกายภาพ และประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกได้ดังนี้

##### 5.1.1 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub>

การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> เปรียบด้วยวิธีโซล-เจล พบว่ามีธาตุ Ti, Ag และธาตุชนิดอื่นๆเป็นองค์ประกอบ โดยพบว่าธาตุ Ag ที่มีการได้ลงในตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> โดย Ag ที่ได้ลงไปมีค่าเท่ากับ 0.08% โดยน้ำหนัก ซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกับปริมาณที่มีการคำนวณ 0.1% และพบว่าพื้นที่ผิวเฉพาะ AC หลังจากเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> มีขนาดเพิ่มขึ้นจากการทับถมกันของตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าว บริเวณพื้นผิวของ AC และการทับถมภายในรูพรุนส่งผลให้ปริมาตรและขนาดรูพรุนมีขนาดที่เล็กลง ทั้งนี้จากการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในกระบวนการบำบัดสีย้อมสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> ร่วมกับแหล่งกำเนิดแสง UVA และการเติมอากาศขนาด MNBs

##### 5.1.2 ผลจากการเติมอากาศขนาด MNBs

ผลจากการเติมอากาศขนาด MNBs ส่งผลให้ค่า DO ในน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มขึ้นโดยก่อนเติมอากาศขนาดขนาด MNBs และหลัง ค่าเท่ากับ 6.43 mg.L<sup>-1</sup> และ 12.81 mg.L<sup>-1</sup> ตามลำดับ ซึ่งขนาดฟองอากาศที่พบในปริมาณมากที่สุดมีขนาด 86.90 ± 2.00 nm ทั้งนี้การเติมอากาศขนาด MNBs ยังส่งผลต่อค่า ORP เมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> ร่วมกับการเติมอากาศขนาด MNBs สามารถช่วยเพิ่มค่าศักย์ในการออกซิเดชัน-รีดักชันในน้ำเสียสังเคราะห์ได้สูงสุด

### 5.1.3 การประเมินประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม

การประเมินประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> ร่วมกับแหล่งกำเนิดแสง UVA และการเติมอากาศขนาด MNBs โดยระยะเวลาการทดลอง 180 min พบว่า ในชุดการทดลองมี ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมทั้ง 3 ชนิดสูงสุดเท่ากับ 87.03%, 83.78% และ 81.67% ตามลำดับ สำหรับสีย้อม IC, MB และ RB5 ในชุดควบคุมที่ 1 ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมทั้ง 3 ชนิดสูงสุดเท่ากับ 66.58%, 61.45% และ 55.72% สำหรับสีย้อม IC, MB และ RB5 เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพผลการทดลองในชุดการทดลองและชุดควบคุมที่ 1 แสดงให้เห็นว่าการเติมอากาศขนาด MNBs ส่งเสริมให้ ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 ในกระบวนการโฟโตคะตะลิติกให้ดีขึ้น เมื่อพิจารณา ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมดังกล่าวในชุดควบคุมที่ 2 อาจเกิดปฏิกิริยาบางอย่างกับพื้นผิวตัวเร่ง ปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> ส่งผลให้มีประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมข้างต้นสูงเป็นลำดับ 3

### 5.1.4 การศึกษาจลนพลศาสตร์

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการประเมินประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> ร่วมกับ แหล่งกำเนิดแสง UVA และการเติมอากาศขนาด MNBs พบว่าสมการที่เหมาะสมในการอธิบายกลไก การเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการโฟโตคะตะลิติก คือ สมการ Langmuir-Hinshelwood ทั้งนี้พบว่า ในชุดทดลองเมื่อมีการเติมอากาศขนาด MNBs สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ได้มากถึง 2.77, 1.80 และ 1.16 เท่า

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

การประเมินประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม IC, MB และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วย กระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> ร่วมกับแหล่งกำเนิดแสง UVA และการเติมอากาศขนาด MNBs มีข้อเสนอแนะเพิ่มเติมดังต่อไปนี้

5.2.1 ศึกษาผลกระทบของประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> เมื่อมีการนำกลับมาใช้ซ้ำ

5.2.2 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมเมื่อมีการแปรผันหรือเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการเติม อากาศขนาด MNBs ในรูปแบบต่างๆ แบบต่อเนื่องหรือแบบเป็นช่วงเวลาขณะทำการทดลอง (Step-feed of MNBs aeration)

## บรรณานุกรม

- [1] Shah, P., A. Unnarkat, F. Patel, M. Shah, and P. Shah. (2022). A comprehensive review on spinel based novel catalysts for visible light assisted dye degradation. **Process Safety and Environmental Protection**. **161**, 703-722.
- [2] McYotto, F., Q. Wei, D.K. Macharia, M. Huang, C. Shen, and C.W.K. Chow. (2021). Effect of dye structure on color removal efficiency by coagulation. **Chemical Engineering Journal**. **405**, 126674.
- [3] Bilal, M., J. Ali, K. Bibi, S.B. Khan, M. Saqib, R. Saeed, R. Javeria, H. Khan, K. Akhtar, and E.M. Bakhsh. (2022). Remediation of different dyes from textile effluent using activated carbon synthesized from *buxus wallichiana*. **Industrial Crops and Products**. **187**, 115267.
- [4] Noreen, S., M. Tahira, M. Ghamkhar, I. Hafiz, H.N. Bhatti, R. Nadeem, M.A. Murtaza, M. Yaseen, A.A. Sheikh, Z. Naseem, and F. Younas. (2021). Treatment of textile wastewater containing acid dye using novel polymeric graphene oxide nanocomposites (GO/PAN,GO/PPy, GO/PSty). **Journal of Materials Research and Technology**. **14**, 25-35.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [8] Kurien, N.A., K.V. Divya, P. Thomas, and K.E. Abraham. (2019). Photocatalytic colour enhancement of Methylene Blue and Rhodamine B dyes by coupled Titania Tenorite nanocomposites. **Solid State Sciences**. **89**, 37-49.
- [9] Deka, R., S. Shreya, M. Mourya, V. Sirotiya, A. Rai, M.J. Khan, A. Ahirwar, B. Schoefs, M. Bilal, G.D. Saratale, J. Marchand, R.G. Saratale, S. Varjani, and V. Vinayak. (2022). A techno-economic approach for eliminating dye pollutants from industrial effluent employing microalgae through microbial fuel cells: Barriers and perspectives. **Environmental Research**. **212**, 113454.
- [10] Folawewo, A.D. and M.D. Bala. (2022). Carbon-covered alumina-supported ZnO nanocatalysts with enhanced visible light photocatalytic performance for the removal of dyes. **Environmental Technology & Innovation**. **28**, 102866.
- [11] Oyetade, J.A., R.L. Machunda, and A. Hilonga. (2022). Photocatalytic degradation of azo dyes in textile wastewater by Polyaniline composite catalyst-a review. **Scientific African**. **17**, e01305.
- [12] He, J.-M., C.-F. Xie, and J.-J. Long. (2021). Sustainable color stripping of cotton substrate dyed with reactive dyes in a developed UV/K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub> photocatalytic system. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**. **121**, 241-256.
- [13] 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.
- [14] Sirajudheen, P., N.C. Poovathumkuzhi, S. Vigneshwaran, B.M. Chelaveetil, and S. Meenakshi. (2021). Applications of chitin and chitosan based biomaterials for the adsorptive removal of textile dyes from water - A comprehensive review. **Carbohydrate Polymers**. **273**, 118604.
- [15] Sharma, J., S. Sharma, and V. Soni. (2021). Classification and impact of synthetic textile dyes on Aquatic Flora: A review. **Regional Studies in Marine Science**. **45**, 101802.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [16] Benkhaya, S., S. M' rabet, and A. El Harfi. (2020). A review on classifications, recent synthesis and applications of textile dyes. **Inorganic Chemistry Communications**. **115**, 107891.
- [17] Markandeya, D. Mohan, and S.P. Shukla. (2022). Hazardous consequences of textile mill effluents on soil and their remediation approaches. **Cleaner Engineering and Technology**. **7**, 100434.
- [18] Hynes, N.R.J., J.S. Kumar, H. Kamyab, J.A.J. Sujana, O.A. Al-Khashman, Y. Kuslu, A. Ene, and B. Suresh Kumar. (2020). Modern enabling techniques and adsorbents based dye removal with sustainability concerns in textile industrial sector - A comprehensive review. **Journal of Cleaner Production**. **272**, 122636.
- [19] Natarajan, S., H.C. Bajaj, and R.J. Tayade. (2018). Recent advances based on the synergetic effect of adsorption for removal of dyes from waste water using photocatalytic process. **J Environ Sci (China)**. **65**, 201-222.
- [20] Moyo, S., B.P. Makhanya, and P.E. Zwane. (2022). Use of bacterial isolates in the treatment of textile dye wastewater: A review. **Heliyon**. **8**(6), 09632.
- [21] Bilinska, L. and M. Gmurek. (2021). Novel trends in AOPs for textile wastewater treatment. Enhanced dye by-products removal by catalytic and synergistic actions. **Water Resources and Industry**. **26**, 100160.
- [22] Piaskowski, K., R. Swiderska-Dabrowska, and P.K. Zarzycki. (2018). Dye Removal from Water and Wastewater Using Various Physical, Chemical, and Biological Processes. **J AOAC International**. **101**(5), 1371-1384.
- [23] Ramos, M.D.N., J.P.P. Lima, S.F. de Aquino, and A. Aguiar. (2021). A critical analysis of the alternative treatments applied to effluents from Brazilian textile industries. **Journal of Water Process Engineering**. **43**, 102273.
- [24] Regmi, C., B. Joshi, S.K. Ray, G. Gyawali, and R.P. Pandey. (2018). Understanding Mechanism of Photocatalytic Microbial Decontamination of Environmental Wastewater. **Frontiers in Chemistry**. **6**.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [25] Abdurahman, M.H., A.Z. Abdullah, and N.F. Shoparwe. (2021). A comprehensive review on sonocatalytic, photocatalytic, and sonophotocatalytic processes for the degradation of antibiotics in water: Synergistic mechanism and degradation pathway. **Chemical Engineering Journal**. **413**, 127412.
- [26] Ameta, R., M.S. Solanki, S. Benjamin, and S.C. Ameta, (2018). Chapter 6 - Photocatalysis. **Advanced Oxidation Processes for Waste Water Treatment**, 135-175.
- [27] Rafiq, A., M. Ikram, S. Ali, F. Niaz, M. Khan, Q. Khan, and M. Maqbool. (2021). Photocatalytic degradation of dyes using semiconductor photocatalysts to clean industrial water pollution. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**. **97**, 111-128.
- [28] Reza, K.M., A.S.W. Kurny, and F. Gulshan. (2017). Parameters affecting the photocatalytic degradation of dyes using  $\text{TiO}_2$  : a review. **Applied Water Science**. **7**(4), 1569-1578.
- [29] Allen, N.S., N. Mahdjoub, V. Vishnyakov, P.J. Kelly, and R.J. Kriek. (2018). The effect of crystalline phase (anatase, brookite and rutile) and size on the photocatalytic activity of calcined polymorphic titanium dioxide ( $\text{TiO}_2$ ). **Polymer Degradation and Stability**. **150**, 31-36.
- [30] Yamakata, A. and J.J.M. Vequizo. (2019). Curious behaviors of photogenerated electrons and holes at the defects on anatase, rutile, and brookite  $\text{TiO}_2$  powders: A review. **Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews**. **40**, 234-243.
- [31] Mathew Simon, S., G. George, S. M S, P. V P, T. Anna Jose, P. Vasudevan, A.C. Saritha, P.R. Biju, C. Joseph, and N.V. Unnikrishnan. (2021). Recent advancements in multifunctional applications of sol-gel derived polymer incorporated  $\text{TiO}_2$ - $\text{ZrO}_2$  composite coatings: A comprehensive review. **Applied Surface Science Advances**. **6**, 100173.



## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [32] Zheng, K. and A.R. Boccaccini. (2017). Sol-gel processing of bioactive glass nanoparticles: A review. **Advances in Colloid and Interface Science**. **249**, 363-373
- [33] Dehghanhadikolaei, A. and J. Ansary. (2018). Sol-gel process applications: A mini-review. **Proceedings of the Nature Research Society**. **2**.
- [34] Nistico, R., D. Scalarone, and G. Magnacca. (2017). Sol-gel chemistry, templating and spin-coating deposition: A combined approach to control in a simple way the porosity of inorganic thin films/coatings. **Microporous and Mesoporous Materials**. **248**, 18-29.
- [35] Gill, J.K., V. Orsat, and S. Kermasha. (2018). Screening trials for the encapsulation of laccase enzymatic extract in silica sol-gel. **Journal of Sol-Gel Science and Technology**. **85**(3), 657-663.
- [36] Lewoyehu, M. (2021). Comprehensive review on synthesis and application of activated carbon from agricultural residues for the remediation of venomous pollutants in wastewater. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. **159**, 105279.
- [37] Yasui, K., T. Tuziuti, and W. Kanematsu. (2018). Mysteries of bulk nanobubbles (ultrafine bubbles); stability and radical formation. **Ultrasonics Sonochemistry**. **48**, 259-266.
- [38] 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.
- [39] Rousseau, D.P.L., F. Louage, Q. Wang, and R. Zhang, (2022). Constructed Wetlands for Urban Wastewater Treatment: An Overview, in **Encyclopedia of Inland Waters (Second Edition)**, Elsevier: Oxford. 272-284.
- [40] Chavoshani, A., M. Hashemi, M. Mehdi Amin, and S.C. Ameta, (2020). Chapter 1 - Introduction, in **Micropollutants and Challenges**, 1-33.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [41] Choo, K.-H., (2018). Chapter 10 - Modeling Photocatalytic Membrane Reactors. **Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes**, 297-316.
- [42] Dzinun, H., M.H.D. Othman, and A.F. Ismail. (2019). Photocatalytic performance of TiO<sub>2</sub>/Clinoptilolite: Comparison study in suspension and hybrid photocatalytic membrane reactor. **Chemosphere**. **228**, 241-248.
- [43] Khan, M. S., Shah, J. A., Arshad, M., Halim, S. A., Khan, A., Shaikh, A. J., and Bilal, M. (2020). Biocidal Applications of Nonmetal Doped TiO<sub>2</sub>: Isotherm, and S. In Silico Molecular Docking Studies. **Molecules**. **25(19)**, 4468.
- [44] Azevedo, A., R. Etchepare, S. Calgaroto, and J. Rubio. (2016). Aqueous dispersions of nanobubbles: Generation, properties and features. **Minerals Engineering**. **94**, 29-37.
- [45] Zhou, S., S. Nazari, A. Hassanzadeh, X. Bu, C. Ni, Y. Peng, G. Xie, and Y. He. (2022). The effect of preparation time and aeration rate on the properties of bulk micro-nanobubble water using hydrodynamic cavitation. **Ultrasonics Sonochemistry**. **84**, 105965.
- [46] Meegoda, J.N., S. Aluthgun Hewage, and J.H. Batagoda. (2018). Stability of Nanobubbles. **Environmental Engineering Science**. **35(11)**, 1216-1227.
- [47] Yasui, K., T. Tuziuti, and W. Kanematsu. (2018). Mysteries of bulk nanobubbles (ultrafine bubbles); stability and radical formation. **Ultrasonics Sonochemistry**. **48**, 259-266.
- [48] 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.
- [49] Kondrakov, A.O., A.N. Ignatev, V.V. Lunin, F.H. Frimmel, S. Bräse, and H. Horn. (2016). Roles of water and dissolved oxygen in photocatalytic generation of free OH radicals in aqueous TiO<sub>2</sub> suspensions: An isotope labeling study. **Applied Catalysis B: Environmental**. **182**, 424-430.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [50] Balestrin, E., S.M. Arruda Guelli Ulson de Souza, J.A.B. Valle, and A. da Silva. (2021). Sensitivity of the turbulent Schmidt number and the turbulence models to simulate catalytic and photocatalytic processes with surface reaction limited by mass transfer. **Chemical Engineering Research and Design**. **170**, 90-106.
- [51] Aghajari, N., Z. Ghasemi, H. Younesi, and N. Bahramifar. (2019). Synthesis, characterization and photocatalytic application of Ag-doped Fe-ZSM-5@TiO<sub>2</sub> nanocomposite for degradation of reactive red 195 (RR 195) in aqueous environment under sunlight irradiation. **J Environ Health Sci Eng**. **17**(1), 219-232.
- [52] Mathiarasu, R.R., A. Manikandan, K. Panneerselvam, M. George, K.K. Raja, M.A. Almessiere, Y. Slimani, A. Baykal, A.M. Asiri, T. Kamal, and A. Khan. (2021). Photocatalytic degradation of reactive anionic dyes RB5, RR198 and RY145 via rare earth element (REE) lanthanum substituted CaTiO<sub>3</sub> perovskite catalysts. **Journal of Materials Research and Technology**. **15**, 5936-5947.
- [53] Rafiq, A., M. Ikram, S. Ali, F. Niaz, M. Khan, Q. Khan, and M. Maqbool. (2021). Photocatalytic degradation of dyes using semiconductor photocatalysts to clean industrial water pollution. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**. **97**, 111-128.
- [54] Yang, X., F. Ma, K. Li, Y. Guo, J. Hu, W. Li, M. Huo, and Y. Guo. (2010). Mixed phase titania nanocomposite codoped with metallic silver and vanadium oxide: New efficient photocatalyst for dye degradation. **Journal of Hazardous Materials**. **175**(1), 429-438.
- [55] Rani, P., V. Kumar, P.P. Singh, A.S. Matharu, W. Zhang, K.-H. Kim, J. Singh, and M. Rawat. (2020). Highly stable AgNPs prepared via a novel green approach for catalytic and photocatalytic removal of biological and non-biological pollutants. **Environment International**. **143**, 105924.
- [56] Wang, L.L., H.Y. He, Q. Li, and Z.Q. Ren. (2016). Photocatalytic activities of SnS-reduced graphene oxide by the photodegradation of malachite green in water. **Materials Research Innovations**. **20**(6), 458-464.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [57] Ilampirayan, N. and M. Kumar, (2016). Metronidazole in a UV-TiO<sub>2</sub> photocatalytic system: Fate, removal and mineralization. In 13th IWA conference on Small water and wastewater systems, GreeceAt: Greece.
- [58] Harada, T., T. Yatagai, and Y. Kawase. (2016). Hydroxyl radical generation linked with iron dissolution and dissolved oxygen consumption in zero-valent iron wastewater treatment process. **Chemical Engineering Journal**. **303**, 611-620.
- [59] U.S.E.P.A.U.S., (2002). **National Recommended Water Quality Criteria: 2002**.
- [60] havoshani, A., M. Hashemi, M. Mehdi Amin, and S.C. Ameta, (2020). Chapter 1 - Introduction, in **Micropollutants and Challenges**, 1-33.
- [61] Guy, N. and M. Özacar. (2018). Visible light-induced degradation of indigo carmine over ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/Tannin/ZnO: Role of tannin as a modifier and its degradation mechanism. **International Journal of Hydrogen Energy**. **43**(18), 8779-8793.
- [62] Kumar, R., S.Y. Janbandhu, G.K. Sukhadeve, and R.S. Gedam. (2022). Visible light assisted surface plasmon resonance triggered Ag/ZnO nanocomposites: synthesis and performance towards degradation of indigo carmine dye. **Environmental Science and Pollution Research**.
- [63] Balasurya, S., A. Das, A.A. Alyousef, A. Alqasim, N. Almutairi, and S. Sudheer Khan. (2021). Facile synthesis of Bi<sub>2</sub>MoO<sub>6</sub>-Ag<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub> nanocomposite for the enhanced visible light photocatalytic removal of methylene blue and its antimicrobial application. **Journal of Molecular Liquids**. **337**, 116350.
- [64] Martin Mark, J.A., A. Venkatachalam, P. A, S. N, J. K, and J.p. Jesuraj. (2021). Investigation on structural, optical and photocatalytic activity of CoMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles prepared via simple co-precipitation method. **Physica B: Condensed Matter**. **601**, 412349.
- [65] Garg, A., V.K. Sangal, and P.K. Bajpai. (2016). Decolorization and degradation of Reactive Black 5 dye by photocatalysis: modeling, optimization and kinetic study. **Desalination and Water Treatment**. **57**(38), 18003-18015.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [66] Chong, M.N., Y. 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.





ภาคผนวก ก

ผลการทดลอง

ตารางที่ ก.1 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 10  $\mu\text{M}$  ในชุดการทดลอง

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	0.28	0.28	0.28	15.53	15.64	15.58	15.58	1.00
10	0.22	0.20	0.20	12.16	11.30	11.30	11.59	0.74
30	0.16	0.16	0.17	9.24	9.34	9.64	9.41	0.60
60	0.12	0.12	0.12	7.18	7.12	7.28	7.19	0.46
90	0.09	0.08	0.07	5.92	5.21	5.06	5.40	0.35
120	0.06	0.06	0.06	4.41	4.20	4.46	4.35	0.28
180	0.01	0.01	0.02	1.84	1.84	2.39	2.02	0.13
eff (%)				88.17	88.25	88.21	87.03	

ตารางที่ ก.2 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 25  $\mu\text{M}$  ในชุดการทดลอง

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	0.50	0.50	0.50	26.31	26.26	26.41	26.33	1.00
10	0.40	0.40	0.41	21.68	21.53	22.03	21.75	0.83
30	0.36	0.36	0.36	19.26	19.36	19.21	19.28	0.73
60	0.33	0.30	0.30	17.85	16.19	16.54	16.86	0.64
90	0.26	0.24	0.26	14.17	13.47	14.28	13.97	0.53
120	0.20	0.21	0.20	11.61	11.81	11.46	11.62	0.44
180	0.16	0.16	0.16	9.14	9.29	9.24	9.22	0.35
eff (%)				65.27	64.62	65.02	64.97	

ตารางที่ ก.3 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 50  $\mu\text{M}$  ในชุดการทดลอง

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	1.01	1.02	1.02	52.30	52.55	52.65	52.50	1.00
10	0.83	0.83	0.83	43.08	43.28	42.93	43.10	0.82
30	0.69	0.69	0.70	36.18	35.98	36.64	36.27	0.69
60	0.61	0.62	0.62	32.10	32.46	32.76	32.44	0.62
90	0.55	0.58	0.57	29.23	30.29	29.99	29.84	0.57
120	0.49	0.49	0.48	25.86	25.76	25.56	25.72	0.49
180	0.39	0.40	0.39	21.17	21.23	21.02	21.14	0.40
eff (%)				59.51	59.61	60.07	59.73	

ตารางที่ ก.4 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 75  $\mu\text{M}$  ในชุดการทดลอง

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	1.50	1.49	1.50	76.67	76.37	76.87	76.64	1.00
10	1.22	1.25	1.23	62.52	64.38	63.38	63.43	0.83
30	1.11	1.11	1.14	57.43	57.28	58.64	57.79	0.75
60	1.02	1.02	1.03	52.55	52.90	53.00	52.82	0.69
90	0.94	0.93	0.93	48.57	48.12	48.37	48.35	0.63
120	0.88	0.86	0.85	45.50	44.49	44.24	44.74	0.58
180	0.85	0.83	0.83	44.19	43.08	43.23	43.50	0.57
eff (%)				42.37	43.59	43.76	43.24	



ตารางที่ ก.5 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 100  $\mu\text{M}$  ในชุดการทดลอง

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	1.97	1.98	1.98	100.69	101.09	101.20	100.99	1.00
10	1.75	1.76	1.75	89.51	89.76	89.26	89.51	0.89
30	1.62	1.64	1.63	82.97	83.67	83.57	83.40	0.83
60	1.55	1.57	1.56	79.59	80.50	79.69	79.93	0.79
90	1.48	1.49	1.49	75.71	76.32	76.32	76.12	0.75
120	1.43	1.44	1.43	73.35	73.80	73.45	73.53	0.73
180	1.42	1.43	1.45	72.99	73.55	74.10	73.55	0.73
eff (%)				27.51	27.25	26.77	27.18	

ตารางที่ ก.6 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 10  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 1

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	0.22	0.22	0.22	12.41	12.36	12.36	12.38	1.00
10	0.17	0.17	0.17	9.94	9.69	9.84	9.83	0.79
30	0.15	0.13	0.15	8.99	8.03	8.79	8.60	0.69
60	0.13	0.12	0.12	7.63	7.38	7.53	7.51	0.61
90	0.10	0.11	0.10	6.42	6.67	6.12	6.40	0.52
120	0.08	0.09	0.09	5.41	5.92	5.87	5.73	0.46
180	0.06	0.06	0.05	4.10	4.25	4.05	4.14	0.33
eff (%)				66.94	65.59	67.22	66.58	

ตารางที่ ก.7 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 25  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 1

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	0.53	0.53	0.52	27.92	27.87	27.52	27.77	1.00
10	0.38	0.38	0.39	20.67	20.62	20.72	20.67	0.74
30	0.36	0.37	0.37	19.56	19.87	19.76	19.73	0.71
60	0.35	0.35	0.34	18.81	18.76	18.66	18.74	0.67
90	0.31	0.32	0.32	16.74	17.25	17.55	17.18	0.62
120	0.27	0.29	0.292	15.13	16.09	16.04	15.75	0.57
180	0.26	0.27	0.29	14.33	15.08	15.99	15.13	0.54
eff (%)				48.69	45.89	41.90	45.51	

ตารางที่ ก.8 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 50  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 1

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	1.00	1.00	1.00	51.44	51.59	51.59	51.54	1.00
10	0.88	0.86	0.85	45.45	44.74	44.29	44.83	0.87
30	0.78	0.80	0.81	40.66	41.67	41.87	41.40	0.80
60	0.72	0.74	0.74	37.34	38.45	38.35	38.05	0.74
90	0.68	0.69	0.69	35.33	35.93	36.03	35.76	0.69
120	0.64	0.64	0.66	33.31	33.41	34.37	33.70	0.65
180	0.62	0.62	0.61	32.51	32.30	32.10	32.30	0.63
eff (%)				36.81	37.38	37.78	37.32	

ตารางที่ ก.9 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 75  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 1

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	1.52	1.52	1.51	77.83	77.83	77.33	77.66	1.00
10	1.29	1.28	1.28	66.35	65.59	65.69	65.88	0.85
30	1.20	1.22	1.20	61.71	62.92	61.86	62.17	0.80
60	1.11	1.12	1.11	57.38	57.63	57.03	57.35	0.74
90	1.05	1.05	1.05	54.01	54.06	53.96	54.01	0.70
120	1.02	1.03	1.02	52.55	53.35	52.90	52.93	0.68
180	1.00	1.01	1.00	51.79	52.04	51.74	51.86	0.67
eff (%)				33.45	33.13	33.08	33.22	

ตารางที่ ก.10 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 100  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 1

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	1.99	1.98	1.98	101.30	101.20	101.14	101.21	1.00
10	1.79	1.78	1.80	91.48	91.07	91.83	91.46	0.90
30	1.67	1.68	1.69	85.58	85.84	86.34	85.92	0.85
60	1.66	1.65	1.65	84.83	84.43	84.48	84.58	0.84
90	1.60	1.62	1.61	81.76	82.86	82.56	82.39	0.81
120	1.55	1.55	1.56	79.44	79.59	79.74	79.59	0.79
180	1.52	1.53	1.51	78.08	78.18	77.12	77.80	0.77
eff (%)				22.92	22.74	23.75	23.14	

ตารางที่ ก.11 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 10  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 2

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	0.20	0.21	0.20	11.46	11.71	11.56	11.57	1.00
10	0.18	0.17	0.18	10.20	10.05	10.40	10.21	0.88
30	0.17	0.16	0.16	9.74	9.54	9.49	9.59	0.83
60	0.14	0.15	0.15	8.48	8.84	8.79	8.70	0.75
90	0.12	0.13	0.13	7.58	7.63	7.73	7.65	0.66
120	0.10	0.11	0.10	6.52	6.67	6.42	6.54	0.56
180	0.09	0.09	0.10	5.92	5.76	6.17	5.95	0.51
eff (%)				42.87	50.76	46.63	48.59	

ตารางที่ ก.12 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 75  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 2

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	0.53	0.54	0.54	28.07	28.28	28.33	28.23	1.00
10	0.48	0.48	0.48	25.30	25.46	25.61	25.46	0.90
30	0.48	0.48	0.48	25.30	25.46	25.61	25.46	0.90
60	0.41	0.42	0.41	22.08	22.28	22.03	22.13	0.78
90	0.36	0.35	0.36	19.21	19.06	19.26	19.18	0.68
120	0.34	0.34	0.35	18.56	18.41	18.97	18.65	0.66
180	0.32	0.32	0.32	17.50	17.65	17.20	17.45	0.62
eff (%)				37.67	37.58	39.29	38.18	

ตารางที่ ก.13 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 50  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 2

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	1.08	1.09	1.09	55.77	56.43	56.17	56.12	1.00
10	0.98	0.99	0.98	50.74	51.14	50.79	50.89	0.91
30	0.90	0.90	0.91	46.86	46.71	46.96	46.84	0.83
60	0.82	0.84	0.84	42.48	43.84	43.48	43.27	0.77
90	0.80	0.78	0.77	41.57	40.41	40.21	40.73	0.73
120	0.73	0.74	0.72	38.10	38.50	37.34	37.98	0.68
180	0.72	0.72	0.71	37.79	37.34	36.84	37.32	0.67
eff (%)				32.24	33.82	34.42	33.50	

ตารางที่ ก.14 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 75  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 2

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	1.56	1.58	1.57	80.04	80.65	80.45	80.38	1.00
10	1.39	1.39	1.38	71.38	71.13	70.58	71.03	0.88
30	1.32	1.34	1.30	67.76	68.92	67.00	67.89	0.84
60	1.27	1.29	1.28	65.19	66.15	65.69	65.68	0.82
90	1.22	1.22	1.23	62.72	62.57	63.48	62.92	0.78
120	1.16	1.16	1.16	59.85	59.85	59.50	59.73	0.74
180	1.14	1.14	1.13	58.79	58.84	58.34	58.66	0.73
eff (%)				26.55	27.04	27.48	27.02	

ตารางที่ ก.15 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 100  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 2

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	2.04	2.03	2.03	103.81	103.76	103.66	103.75	1.00
10	1.91	1.89	1.89	97.47	96.71	96.26	96.81	0.93
30	1.72	1.73	1.75	88.00	88.35	89.46	88.61	0.85
60	1.69	1.67	1.68	86.39	85.53	85.89	85.94	0.83
90	1.63	1.61	1.63	83.47	82.36	83.32	83.05	0.80
120	1.59	1.60	1.62	81.45	81.81	82.71	81.99	0.79
180	1.57	1.59	1.59	80.40	81.56	81.30	81.09	0.78
eff (%)				22.56	21.40	21.57	21.84	0.21

ตารางที่ ก.16 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 10  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 3

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C_0 C_t^{-1}$
	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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 25  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 3

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C_0 C_t^{-1}$
	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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 50  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 3

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C_0 C_t^{-1}$
	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	0.91	0.92	0.92	47.31	47.46	47.46	47.412	0.88
90	0.88	0.88	0.87	45.50	45.40	45.35	45.414	0.84
120	0.84	0.84	0.84	43.79	43.69	43.74	43.736	0.81
180	0.82	0.81	0.81	42.477	42.175	42.023	42.225	0.78
eff (%)				21.06	22.35	22.62	22.01	

ตารางที่ ก.19 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 75  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 3

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C_0 C_t^{-1}$
	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	0.91	0.92	0.92	47.31	47.46	47.46	47.412	0.88
90	0.88	0.88	0.87	45.50	45.40	45.35	45.414	0.84
120	0.84	0.84	0.84	43.79	43.69	43.74	43.736	0.81
180	0.82	0.81	0.81	42.477	42.175	42.023	42.225	0.78
eff (%)				21.06	22.35	22.62	22.01	

ตารางที่ ก.20 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 100  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 3

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C_0 C_t^{-1}$
	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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 10  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 4

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C_0 C_t^{-1}$
	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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 25  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 4

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C_0 C_t^{-1}$
	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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 50  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 4

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
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	0.86	0.86	0.86	44.74	44.44	44.44	44.54	0.85
180	0.84	0.84	0.84	43.79	43.74	43.79	43.77	0.83
eff (%)				16.99	17.40	15.71	16.71	

ตารางที่ ก.24 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 75  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 4

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 100  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 4

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C_0 C_t^{-1}$
	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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 10  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 5

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	0.248	0.236	0.236	13.82	13.22	13.22	13.42	1.00
10	0.226	0.227	0.224	12.71	12.76	12.61	12.70	0.95
30	0.214	0.215	0.215	12.11	12.16	12.16	12.14	0.90
60	0.202	0.208	0.204	11.51	11.81	11.61	11.64	0.87
90	0.192	0.194	0.194	11.00	11.10	11.10	11.07	0.82
120	0.189	0.187	0.188	10.85	10.75	10.80	10.80	0.80
180	0.184	0.180	0.182	10.60	10.40	10.50	10.50	0.78
eff (%)				23.32	21.34	20.57	21.77	

ตารางที่ ก.27 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 25  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 5

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	0.542	0.548	0.548	28.63	28.93	28.93	28.83	1.00
10	0.526	0.522	0.522	27.82	27.62	27.62	27.69	0.96
30	0.500	0.500	0.506	26.51	26.51	26.82	26.61	0.92
60	0.481	0.485	0.484	25.56	25.76	25.71	25.67	0.89
90	0.462	0.462	0.468	24.60	24.60	24.90	24.70	0.86
120	0.458	0.454	0.454	24.40	24.20	24.20	24.26	0.84
180	0.445	0.445	0.446	23.74	23.74	23.79	23.76	0.82
eff (%)				17.06	17.93	17.76	17.58	

ตารางที่ ก.28 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 50  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 5

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	1.085	1.085	1.085	55.97	55.97	55.97	55.973	1.00
10	1.022	1.022	1.028	52.80	52.80	53.10	52.901	0.95
30	1.008	1.006	1.002	52.10	51.99	51.79	51.961	0.93
60	0.991	0.985	0.983	51.24	50.94	50.84	51.004	0.91
90	0.953	0.963	0.966	49.33	49.83	49.98	49.712	0.89
120	0.921	0.922	0.924	47.71	47.76	47.87	47.781	0.85
180	0.911	0.912	0.915	47.21	47.26	47.41	47.294	0.84
eff (%)				15.65	15.56	15.29	15.50	

ตารางที่ ก.29 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 75  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 5

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	1.505	1.504	1.501	77.12	77.07	76.92	77.04	1.00
10	1.464	1.454	1.457	75.06	74.56	74.71	74.77	0.97
30	1.431	1.434	1.432	73.40	73.55	73.45	73.46	0.95
60	1.401	1.403	1.402	71.89	71.99	71.94	71.94	0.93
90	1.386	1.381	1.380	71.13	70.88	70.83	70.95	0.92
120	1.365	1.361	1.360	70.07	69.87	69.82	69.92	0.91
180	1.308	1.308	1.308	67.20	67.20	67.20	67.20	0.87
eff (%)				12.86	12.81	12.64	12.77	

ตารางที่ ก.30 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 100  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 5

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	2.001	2.005	2.002	102.10	102.30	102.15	102.19	1.00
10	1.944	1.944	1.944	99.23	99.23	99.23	99.23	0.97
30	1.902	1.904	1.904	97.12	97.22	97.22	97.18	0.95
60	1.847	1.847	1.847	94.35	94.35	94.35	94.35	0.92
90	1.802	1.812	1.802	92.08	92.58	92.08	92.25	0.90
120	1.788	1.789	1.789	91.38	91.43	91.43	91.41	0.89
180	1.777	1.771	1.773	90.82	90.52	90.62	90.65	0.89
eff (%)				11.05	11.52	11.29	11.29	

ตารางที่ ก.31 การบำบัดสีย้อม IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 10  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 6

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 25  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 6

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 50  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 6

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 75  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 6

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 100  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 6

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C_0 C_t^{-1}$
	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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 10  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 7

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C_0 C_t^{-1}$
	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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 25  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 7

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 50  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 7

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 75  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 7

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C_0 C_t^{-1}$
	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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 100  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 7

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C_0 C_t^{-1}$
	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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 10  $\mu\text{M}$  ในชุดการทดลอง

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	0.71	0.71	0.71	10.74	10.65	10.72	10.70	1.00
10	0.59	0.59	0.59	7.99	7.93	7.91	7.94	0.74
30	0.52	0.51	0.52	6.50	6.12	6.39	6.34	0.59
60	0.45	0.47	0.49	4.83	5.32	5.83	5.33	0.50
90	0.42	0.43	0.42	4.25	4.47	4.11	4.28	0.40
120	0.39	0.37	0.38	3.58	3.02	3.38	3.33	0.31
180	0.31	0.31	0.31	1.71	1.68	1.82	1.74	0.16
eff (%)				84.11	84.19	83.04	83.78	

ตารางที่ ก.42 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 25  $\mu\text{M}$  ในชุดการทดลอง

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	1.48	1.47	1.47	27.77	27.71	27.66	27.72	1.00
10	1.33	1.30	1.30	24.43	23.89	23.92	24.08	0.87
30	1.20	1.21	1.21	21.66	21.82	21.73	21.74	0.78
60	1.10	1.12	1.13	19.43	19.81	19.97	19.74	0.71
90	1.03	1.04	1.02	17.87	18.03	17.52	17.81	0.64
120	0.91	0.95	0.92	15.04	16.07	15.31	15.47	0.56
180	0.80	0.78	0.78	12.63	12.14	12.23	12.34	0.45
eff (%)				54.52	56.18	55.78	55.49	

ตารางที่ ก.43 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 50  $\mu\text{M}$  ในชุดการทดลอง

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	2.83	2.77	2.78	57.97	56.68	56.76	57.14	1.00
10	2.58	2.53	2.53	52.37	51.26	51.32	51.65	0.90
30	2.34	2.30	2.32	47.00	46.11	46.48	46.53	0.81
60	2.10	2.13	2.13	41.65	42.27	42.34	42.08	0.74
90	1.97	1.93	1.93	38.86	37.88	37.85	38.20	0.67
120	1.77	1.77	1.78	34.29	34.26	34.49	34.35	0.60
180	1.71	1.71	1.70	32.95	32.93	32.84	32.90	0.58
eff (%)				43.16	41.90	42.15	42.41	

ตารางที่ ก.44 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 75  $\mu\text{M}$  ในชุดการทดลอง

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	3.73	3.75	3.77	77.99	78.55	78.95	78.50	1.00
10	3.38	3.33	3.39	70.19	69.05	70.35	69.86	0.89
30	3.10	3.13	3.11	64.08	64.57	64.15	64.27	0.82
60	3.03	3.01	3.02	62.50	61.87	62.12	62.16	0.79
90	2.83	2.87	2.84	57.92	58.86	58.24	58.34	0.74
120	2.73	2.72	2.72	55.72	55.61	55.56	55.63	0.71
180	2.61	2.63	2.62	53.00	53.42	53.22	53.21	0.68
eff (%)				32.05	31.99	32.59	32.21	

ตารางที่ ก.45 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 100  $\mu\text{M}$  ในชุดการทดลอง

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	4.80	4.80	4.81	101.99	101.92	102.08	102.00	1.00
10	4.20	4.19	4.15	88.41	88.36	87.47	88.08	0.86
30	3.98	3.99	3.91	83.52	83.93	82.01	83.15	0.82
60	3.82	3.74	3.73	79.98	78.15	78.08	78.74	0.77
90	3.60	3.64	3.59	75.16	75.97	74.87	75.33	0.74
120	3.51	3.52	3.53	73.02	73.36	73.62	73.33	0.72
180	3.50	3.47	3.47	72.80	72.26	72.33	72.46	0.71
eff (%)				28.62	29.10	29.14	28.95	

ตารางที่ ก.46 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 10  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 1

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	0.70	0.69	0.70	10.43	10.31	10.36	10.37	1.00
10	0.61	0.62	0.62	8.49	8.57	8.66	8.57	0.83
30	0.56	0.59	0.55	7.35	7.91	7.01	7.42	0.72
60	0.52	0.51	0.53	6.37	6.28	6.70	6.45	0.62
90	0.46	0.46	0.47	5.14	5.21	5.41	5.25	0.51
120	0.42	0.43	0.44	4.25	4.52	4.71	4.49	0.43
180	0.41	0.41	0.41	4.09	3.91	3.98	4.00	0.39
eff (%)				60.75	62.05	61.57	61.45	

ตารางที่ ก.47 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 25  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 1

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	1.48	1.46	1.48	27.84	27.46	27.80	27.70	1.00
10	1.23	1.24	1.28	22.22	22.58	23.31	22.71	0.82
30	1.14	1.13	1.14	20.17	20.15	20.17	20.16	0.73
60	1.04	0.99	1.07	18.01	17.00	18.76	17.92	0.65
90	0.98	0.99	0.97	16.80	16.85	16.54	16.73	0.60
120	0.90	0.90	0.86	14.97	14.89	14.06	14.64	0.53
180	0.81	0.81	0.81	12.95	13.01	12.92	12.96	0.47
eff (%)				53.50	52.62	53.51	53.21	

ตารางที่ ก.48 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 50  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 1

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	2.74	2.74	2.73	55.87	55.90	55.76	55.84	1.00
10	2.41	2.42	2.42	48.67	48.89	48.85	48.80	0.87
30	2.26	2.28	2.28	45.28	45.77	45.73	45.59	0.82
60	2.11	2.11	2.12	41.80	41.98	42.16	41.98	0.75
90	2.00	1.99	2.02	39.55	39.21	39.95	39.57	0.71
120	1.85	1.87	1.86	36.20	36.58	36.34	36.38	0.65
180	1.82	1.83	1.81	35.33	35.56	35.16	35.35	0.63
eff (%)				36.76	36.39	36.95	36.70	

ตารางที่ ก.49 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 75  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 1

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	3.71	3.71	3.72	77.64	77.59	77.75	77.66	1.00
10	3.31	3.31	3.32	68.70	68.74	68.85	68.76	0.89
30	3.02	3.03	3.01	62.12	62.32	61.92	62.12	0.80
60	2.79	2.79	2.79	57.01	56.97	57.10	57.02	0.73
90	2.66	2.69	2.67	54.27	54.74	54.38	54.46	0.70
120	2.58	2.57	2.57	52.30	52.19	52.19	52.23	0.67
180	2.56	2.57	2.57	51.86	52.19	52.10	52.05	0.67
eff (%)				33.20	32.73	32.98	32.97	

ตารางที่ ก.50 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 100  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 1

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	4.78	4.78	4.78	101.36	101.34	101.43	101.38	1.00
10	4.33	4.34	4.29	91.40	91.62	90.44	91.15	0.90
30	4.15	4.15	4.13	87.36	87.38	87.03	87.26	0.86
60	4.02	4.02	4.00	84.46	84.48	84.13	84.36	0.83
90	3.82	3.80	3.82	80.09	79.64	79.98	79.90	0.79
120	3.77	3.78	3.74	78.95	79.06	78.20	78.74	0.78
180	3.75	3.75	3.69	78.53	78.53	77.17	78.08	0.77
eff (%)				22.53	22.51	23.92	22.99	

ตารางที่ ก.51 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 10  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 2

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	0.70	0.70	0.70	10.51	10.49	10.56	10.52	1.00
10	0.63	0.63	0.60	8.98	8.86	8.17	8.67	0.82
30	0.61	0.58	0.57	8.46	7.77	7.55	7.93	0.75
60	0.58	0.54	0.54	7.82	6.97	6.99	7.26	0.69
90	0.54	0.54	0.53	6.86	6.79	6.57	6.74	0.64
120	0.50	0.51	0.52	6.05	6.26	6.43	6.25	0.59
180	0.51	0.49	0.49	6.21	5.72	5.83	5.92	0.56
eff (%)				42.70	45.48	44.77	43.73	4.16

ตารางที่ ก.52 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 25  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 2

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	1.52	1.50	1.52	28.78	28.40	28.76	28.64	1.00
10	1.28	1.28	1.27	23.31	23.38	23.23	23.31	0.81
30	1.19	1.20	1.20	21.42	21.53	21.51	21.49	0.75
60	1.15	1.16	1.18	20.53	20.64	21.06	20.74	0.72
90	1.10	1.13	1.15	19.43	20.15	20.53	20.04	0.70
120	1.07	1.11	1.10	18.74	19.57	19.43	19.25	0.67
180	1.03	1.06	1.04	17.87	18.41	18.07	18.12	0.63
eff (%)				37.89	35.18	37.15	36.75	



ตารางที่ ก.53 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 50  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 2

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	2.85	2.84	2.88	58.37	58.26	59.17	58.60	1.00
10	2.55	2.55	2.55	51.64	51.61	51.68	51.64	0.88
30	2.40	2.44	2.39	48.29	49.16	48.11	48.52	0.83
60	2.29	2.28	2.28	45.86	45.73	45.75	45.78	0.78
90	2.15	2.16	2.15	42.81	42.92	42.87	42.86	0.73
120	2.04	2.11	2.10	40.35	41.85	41.71	41.30	0.70
180	2.02	2.05	2.04	39.79	40.60	40.37	40.26	0.69
eff (%)				31.82	30.32	31.77	31.31	

ตารางที่ ก.54 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 75  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 2

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	3.81	3.80	3.79	79.78	79.69	79.47	79.64	1.00
10	3.45	3.46	3.47	71.77	71.95	72.15	71.96	0.90
30	3.31	3.30	3.29	68.56	68.36	68.25	68.39	0.86
60	3.22	3.21	3.20	66.73	66.42	66.24	66.47	0.83
90	3.04	3.05	3.08	62.70	62.85	63.45	63.00	0.79
120	2.95	2.95	2.96	60.53	60.60	60.89	60.67	0.76
180	2.90	2.91	2.92	59.60	59.73	59.86	59.73	0.75
eff (%)				25.30	25.05	24.67	25.00	

ตารางที่ ก.55 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 100  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 2

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	4.90	4.90	4.90	104.13	104.17	104.20	104.17	1.00
10	4.49	4.50	4.50	95.03	95.10	95.14	95.09	0.91
30	4.21	4.22	4.25	88.65	89.06	89.66	89.12	0.86
60	4.07	4.05	4.04	85.55	85.11	85.00	85.22	0.82
90	3.95	3.95	3.92	82.83	82.83	82.34	82.67	0.79
120	3.86	3.86	3.83	80.89	80.98	80.20	80.69	0.77
180	3.84	3.83	3.82	80.38	80.31	80.09	80.26	0.77
eff (%)				22.81	22.90	23.14	22.95	

ตารางที่ ก.56 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 10  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 3

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C_0 C_t^{-1}$
	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	0.54	0.54	0.53	6.81	6.81	6.77	6.80	0.66
120	0.51	0.50	0.51	6.19	6.10	6.12	6.14	0.59
180	0.50	0.49	0.48	5.90	5.83	5.45	5.73	0.55
eff (%)				39.34	41.37	41.03	40.59	

ตารางที่ ก.57 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 25  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 3

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
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	1.08	1.09	1.09	18.88	19.06	19.10	19.01	0.71
120	1.03	1.03	1.03	17.72	17.81	17.74	17.75	0.66
180	1.01	1.01	1.01	17.29	17.32	17.27	17.29	0.64
eff (%)				33.38	35.00	33.74	34.05	

ตารางที่ ก.58 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 50  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 3

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 75  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 3

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C_0 C_t^{-1}$
	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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 100  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 3

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C_0 C_t^{-1}$
	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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 10  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 4

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 25  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 4

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 50  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 4

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 75  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 4

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 100  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 4

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C_0^{-1}$
	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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 10  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 5

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C_0^{-1}$
	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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 25  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 5

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C_0 C_t^{-1}$
	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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 50  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 5

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C_0 C_t^{-1}$
	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.69 การบำบัดสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 75  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 5

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 100  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 5

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 10  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 6

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 25  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 6

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 50  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 6

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 75  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 6

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 100  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 6

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 10  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 7

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 25  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 7

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 50  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 7

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 75  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 7

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 100  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 7

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 10  $\mu\text{M}$  ในชุดการทดลอง

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	0.27	0.27	0.27	11.72	11.44	11.63	11.59	1.00
10	0.23	0.24	0.22	9.57	10.23	9.01	9.60	0.83
30	0.19	0.20	0.16	7.80	8.31	6.54	7.55	0.65
60	0.15	0.18	0.15	6.03	7.38	5.84	6.42	0.55
90	0.15	0.17	0.12	5.79	6.63	4.67	5.70	0.49
120	0.12	0.13	0.12	4.63	4.95	4.39	4.66	0.40
180	0.07	0.07	0.06	2.39	2.06	1.92	2.12	0.18
eff (%)				79.61	81.97	80.79	81.67	

ตารางที่ ก.82 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 25  $\mu\text{M}$  ในชุดการทดลอง

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	0.58	0.59	0.58	26.18	26.41	26.13	26.24	1.00
10	0.52	0.50	0.51	22.96	22.31	22.59	22.62	0.86
30	0.45	0.45	0.45	19.88	20.02	19.84	19.91	0.76
60	0.41	0.40	0.40	17.92	17.64	17.74	17.77	0.68
90	0.35	0.35	0.35	15.12	15.31	15.40	15.28	0.58
120	0.30	0.32	0.31	12.98	13.91	13.58	13.49	0.51
180	0.28	0.28	0.29	11.81	12.05	12.33	12.06	0.46
eff (%)				54.88	54.40	52.84	54.04	

ตารางที่ ก.83 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 50  $\mu\text{M}$  ในชุดการทดลอง

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	1.16	1.16	1.15	52.82	52.82	52.63	52.75	1.00
10	1.00	1.03	1.03	45.63	46.89	46.89	46.47	0.88
30	0.93	0.92	0.92	42.51	41.71	41.90	42.04	0.80
60	0.84	0.87	0.84	38.17	39.43	38.17	38.59	0.73
90	0.81	0.84	0.82	36.77	37.94	37.14	37.28	0.71
120	0.78	0.77	0.78	35.23	35.04	35.37	35.21	0.67
180	0.76	0.75	0.75	34.30	34.11	34.06	34.16	0.65
eff (%)				35.06	35.42	35.28	35.25	

ตารางที่ ก.84 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 75  $\mu\text{M}$  ในชุดการทดลอง

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	1.68	1.68	1.68	77.35	77.17	77.21	77.25	1.00
10	1.54	1.53	1.52	70.87	70.26	69.70	70.28	0.91
30	1.48	1.48	1.46	68.12	67.84	67.09	67.68	0.88
60	1.40	1.40	1.41	64.34	64.29	64.67	64.43	0.83
90	1.32	1.31	1.33	60.42	60.19	60.89	60.50	0.78
120	1.27	1.27	1.28	58.27	58.23	58.55	58.35	0.76
180	1.25	1.25	1.26	57.11	57.15	57.57	57.28	0.74
eff (%)				26.17	25.93	25.43	25.85	



ตารางที่ ก.85 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 100  $\mu\text{M}$  ในชุดการทดลอง

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	2.21	2.21	2.21	102.08	101.98	102.22	102.09	1.00
10	2.05	2.04	2.05	94.47	93.87	94.43	94.26	0.92
30	1.90	1.91	1.93	87.52	88.13	88.97	88.21	0.86
60	1.83	1.84	1.84	84.26	84.63	84.91	84.60	0.83
90	1.76	1.76	1.76	81.23	81.13	81.09	81.15	0.79
120	1.72	1.70	1.71	78.94	78.38	78.52	78.61	0.77
180	1.69	1.67	1.68	77.63	77.03	77.12	77.26	0.76
eff (%)				23.95	24.47	24.55	24.32	

ตารางที่ ก.86 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 10  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 1

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	0.27	0.26	0.27	11.35	11.21	11.39	11.31	1.00
10	0.23	0.24	0.22	9.57	9.90	9.34	9.60	0.85
30	0.21	0.21	0.21	8.59	8.92	8.78	8.76	0.77
60	0.19	0.18	0.18	7.85	7.29	7.24	7.46	0.66
90	0.16	0.15	0.16	6.26	6.07	6.31	6.21	0.55
120	0.14	0.13	0.14	5.28	5.00	5.42	5.23	0.46
180	0.13	0.12	0.13	4.86	4.53	4.95	4.78	0.42
eff (%)				57.15	59.53	56.51	57.72	

ตารางที่ ก.87 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 25  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 1

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	0.60	0.60	0.59	26.79	27.11	26.41	26.77	1.00
10	0.55	0.55	0.56	24.55	24.36	25.11	24.67	0.92
30	0.51	0.52	0.51	22.73	23.15	22.59	22.82	0.85
60	0.48	0.50	0.49	21.52	22.31	21.75	21.86	0.82
90	0.45	0.47	0.45	19.70	20.86	19.79	20.12	0.75
120	0.42	0.43	0.43	18.72	18.95	18.86	18.84	0.70
180	0.41	0.40	0.40	17.88	17.36	17.78	17.67	0.66
eff (%)				33.26	32.97	32.67	33.98	

ตารางที่ ก.88 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 50  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 1

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	1.12	1.12	1.12	51.37	51.18	51.14	51.23	1.00
10	1.03	1.01	1.02	46.80	46.19	46.43	46.47	0.91
30	0.93	0.93	0.94	42.27	42.37	42.74	42.46	0.83
60	0.87	0.86	0.87	39.29	39.10	39.34	39.24	0.77
90	0.82	0.83	0.83	37.14	37.75	37.56	37.48	0.73
120	0.78	0.79	0.78	35.23	35.56	35.37	35.39	0.69
180	0.77	0.76	0.77	34.90	34.34	34.72	34.65	0.68
eff (%)				32.06	32.90	32.11	32.36	

ตารางที่ ก.89 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 75  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 1

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	1.63	1.67	1.68	75.16	76.75	77.26	76.39	1.00
10	1.53	1.54	1.54	70.50	70.59	70.73	70.61	0.92
30	1.47	1.46	1.48	67.32	66.90	67.88	67.37	0.88
60	1.41	1.42	1.41	64.90	65.13	64.48	64.84	0.85
90	1.34	1.36	1.35	61.35	62.29	61.82	61.82	0.81
120	1.31	1.31	1.31	59.81	59.86	59.91	59.86	0.78
180	1.28	1.28	1.28	58.46	58.83	58.69	58.66	0.77
eff (%)				22.22	23.34	24.03	23.21	

ตารางที่ ก.90 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 100  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 1

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	2.24	2.24	2.23	103.57	103.20	103.06	103.28	1.00
10	2.09	2.07	2.09	96.57	95.31	96.48	96.12	0.93
30	2.02	2.02	2.02	93.21	93.12	93.12	93.15	0.90
60	1.95	1.97	1.97	90.09	90.70	90.93	90.57	0.88
90	1.92	1.92	1.92	88.55	88.41	88.36	88.44	0.86
120	1.88	1.88	1.89	86.82	86.40	86.92	86.71	0.84
180	1.86	1.87	1.87	85.89	85.94	85.94	85.92	0.83
eff (%)				17.07	16.73	16.61	16.80	

ตารางที่ ก.91 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 10  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 2

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	0.25	0.24	0.25	10.41	10.18	10.41	10.33	1.00
10	0.21	0.22	0.22	8.78	9.01	8.97	8.92	0.86
30	0.20	0.20	0.19	8.13	8.08	7.75	7.99	0.77
60	0.18	0.19	0.18	7.33	7.66	7.15	7.38	0.71
90	0.17	0.17	0.17	6.82	6.73	6.77	6.77	0.66
120	0.15	0.15	0.15	6.12	6.03	6.12	6.09	0.59
180	0.15	0.15	0.15	6.07	5.84	5.84	5.92	0.57
eff (%)				41.66	42.62	43.90	42.73	

ตารางที่ ก.92 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 25  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 2

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	0.50	0.51	0.51	22.03	22.68	22.63	22.45	1.00
10	0.47	0.47	0.47	20.96	20.82	20.86	20.88	0.93
30	0.45	0.44	0.45	20.02	19.32	19.70	19.68	0.88
60	0.42	0.41	0.42	18.58	18.16	18.58	18.44	0.82
90	0.41	0.39	0.41	18.16	17.08	18.20	17.81	0.79
120	0.37	0.37	0.38	16.38	16.34	16.52	16.41	0.73
180	0.35	0.35	0.35	15.40	15.17	15.22	15.26	0.68
eff (%)				32.94	33.11	32.77	32.00	

ตารางที่ ก.93 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 50  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 2

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	0.95	0.96	0.96	43.30	43.58	43.49	43.46	1.00
10	0.90	0.90	0.90	40.97	41.11	41.06	41.05	0.94
30	0.87	0.87	0.87	39.47	39.61	39.47	39.52	0.91
60	0.83	0.84	0.84	37.70	37.98	38.26	37.98	0.87
90	0.81	0.81	0.82	36.49	36.86	37.38	36.91	0.85
120	0.79	0.79	0.81	35.65	35.79	36.58	36.01	0.83
180	0.71	0.71	0.71	32.15	31.82	31.87	31.95	0.74
eff (%)				25.75	26.97	26.36	26.48	

ตารางที่ ก.94 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 75  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 2

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	1.41	1.42	1.42	64.85	65.27	65.13	65.09	1.00
10	1.36	1.35	1.34	62.52	61.91	61.63	62.02	0.95
30	1.32	1.30	1.31	60.70	59.63	60.14	60.16	0.92
60	1.28	1.27	1.28	58.79	58.32	58.69	58.60	0.90
90	1.26	1.26	1.22	57.85	57.67	55.85	57.12	0.88
120	1.24	1.24	1.22	56.92	56.74	55.62	56.42	0.87
180	1.10	1.09	1.11	50.34	49.97	50.90	50.41	0.77
eff (%)				22.37	23.44	21.84	22.55	

ตารางที่ ก.95 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 100  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 2

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	2.16	2.19	2.18	99.61	100.87	100.82	100.43	1.00
10	2.05	2.07	2.06	94.42	95.55	94.94	94.97	0.95
30	1.99	2.01	1.99	91.54	92.79	91.58	91.97	0.92
60	1.92	1.92	1.93	88.60	88.41	88.88	88.63	0.88
90	1.89	1.88	1.88	86.92	86.73	86.78	86.81	0.86
120	1.83	1.84	1.83	84.26	84.63	84.07	84.32	0.84
180	1.81	1.82	1.82	83.19	83.79	83.65	83.54	0.83
eff (%)				16.49	16.93	17.03	16.81	

ตารางที่ ก.96 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 10  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 3

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 25  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 3

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C_0 C_t^{-1}$
	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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 50  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 3

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C_0 C_t^{-1}$
	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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 75  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 3

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 100  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 3

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
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	1.86	1.86	1.86	85.52	85.57	85.57	85.55	0.85
eff (%)				14.94	14.78	14.66	14.79	



ตารางที่ ก.101 การบำบัดสีย้อม RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 10  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 4

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 25  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 4

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C_0 C_t^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 50  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 4

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C_0 C_t^{-1}$
	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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 75  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 4

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C_0 C_t^{-1}$
	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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 100  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 4

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C.C_0^{-1}$
	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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 10  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 5

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C.C_0^{-1}$
	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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 25  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 5

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 50  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 5

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 75  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 5

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C.C_0^{-1}$
	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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 100  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 5

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C.C_0^{-1}$
	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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 10  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 6

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C_0 C_t^{-1}$
	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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 25  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 6

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )				$C_0 C_t^{-1}$
	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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 50  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 6

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 75  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 6

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 100  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 6

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 10  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 7

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 25  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 7

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 50  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 7

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 75  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 7

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 100  $\mu\text{M}$  ในชุดควบคุมที่ 7

เวลา (min)	Absorbance			C ( $\mu\text{M}$ )			เฉลี่ย	$C.C_0^{-1}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
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	



● การคำนวณความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อม IC, MB และ RB5

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

เตรียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น  $100 \text{ } \mu\text{M} (10^{-6} \text{ mol.L}^{-1})$

$$= 466.35 \text{ g.mol}^{-1} \times 100 \times 10^{-6} \text{ mol.L}^{-1}$$

$$= 0.047 \text{ g.L}^{-1}$$

∴ เตรียมสารละลายในน้ำ 1 L ใช้สารละลาย 0.047 g

L

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

เตรียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น  $100 \text{ } \mu\text{M} (10^{-6} \text{ mol.L}^{-1})$

$$= 319.86 \text{ g.mol}^{-1} \times 100 \times 10^{-6} \text{ mol.L}^{-1}$$

$$= 0.032 \text{ g.L}^{-1}$$

∴ เตรียมสารละลายในน้ำ 1 L ใช้สารละลาย 0.047 g

2. คำนวณความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อม RB5 มวลโมเลกุล  $911.82 \text{ g.mol}^{-1}$

เตรียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น  $100 \text{ } \mu\text{M} (10^{-6} \text{ mol.L}^{-1})$

$$= 911.82 \text{ g.mol}^{-1} \times 100 \times 10^{-6} \text{ mol.L}^{-1}$$

$$= 0.099 \text{ g.L}^{-1}$$

∴ เตรียมสารละลายในน้ำ 1 L ใช้สารละลาย 0.047 g

● การคำนวณปริมาณ Ti และ Ag ในตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub>

จากการวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ EDS พบว่าใน AC 100 g มีปริมาณ Ti และ Ag เท่ากับ 1.76% และ 0.08% ปริมาณโดยน้ำหนัก ตามลำดับ สามารถคำนวณปริมาณ Ti และ Ag บนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub> ได้ดังนี้

1. การคำนวณปริมาณโดยน้ำหนัก Ti

$$\begin{aligned} \text{ตัวอย่าง AC 2 g มี Ti} &= \frac{1.76}{100} \times 2 \\ &= 0.0352 \text{ g} \\ &= 35.20 \text{ mg} \end{aligned}$$

น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง 250 mL วิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ ICP พบว่ามีปริมาณ Ti ที่มีการหลุดร่อนเท่ากับ 0.120 mg.L<sup>-1</sup>

คิดเป็นปริมาณที่หลุดออกจากตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub>

$$= \frac{0.120}{14.80} \times 100$$

$$\therefore \text{ในน้ำตัวอย่างที่มีปริมาณ Ti หลุดร่อน} = 0.81\%$$

2. การคำนวณปริมาณโดยน้ำหนัก Ag

$$\begin{aligned} \text{ตัวอย่าง AC 2 g มีปริมาณ Ag} &= \frac{0.08}{100} \times 2 \\ &= 0.0016 \text{ g} \\ &= 1.60 \text{ mg} \end{aligned}$$

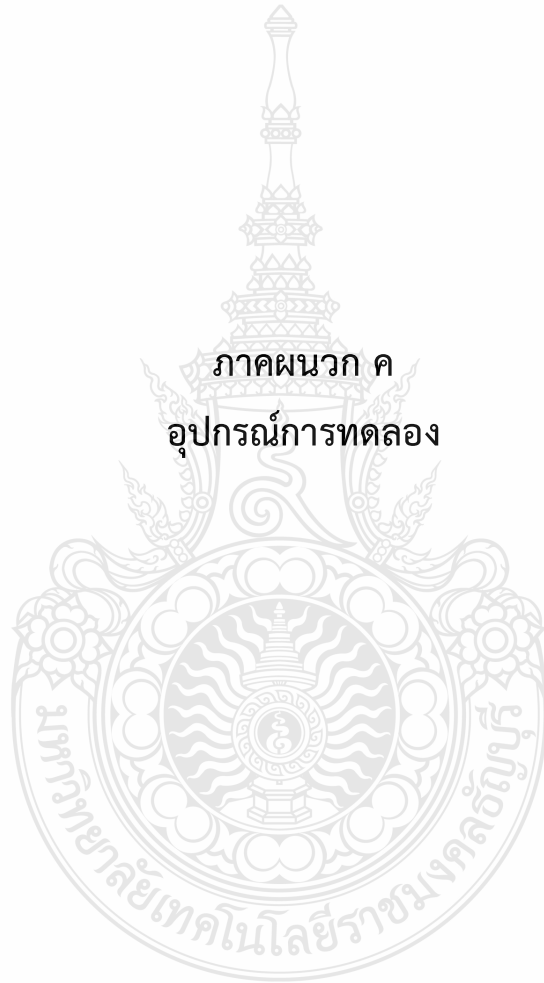
น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง 250 mL วิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ ICP พบว่ามีปริมาณ Ag ที่มีการหลุดร่อนเท่ากับ 0.02 mg.L<sup>-1</sup>

คิดเป็นปริมาณที่หลุดออกจากตัวเร่งปฏิกิริยา AC/0.1%Ag-TiO<sub>2</sub>

$$= \frac{0.02}{1.60} \times 100$$

$$\therefore \text{ในน้ำตัวอย่างที่มีปริมาณ Ag หลุดร่อน} = 1.25\%$$

ภาคผนวก ค  
อุปกรณ์การทดลอง





รูปที่ ค.1 อุปกรณ์ DO meter



รูปที่ ค.2 อุปกรณ์ ORP Electrode (ORP-15)



รูปที่ ค.3 อุปกรณ์เติมอากาศ RMUTT-MNB, MNBs (MCH-505S)



รูปที่ ค.4 อุปกรณ์ Nanobubbles Testing (Nanosight NS300)





รูปที่ ค.5 อุปกรณ์ Desiccator Dry cabinet (DE-80AD)



รูปที่ ค.6 เตาเผาอุณหภูมิสูง Daihan scientific furnace (ON50)

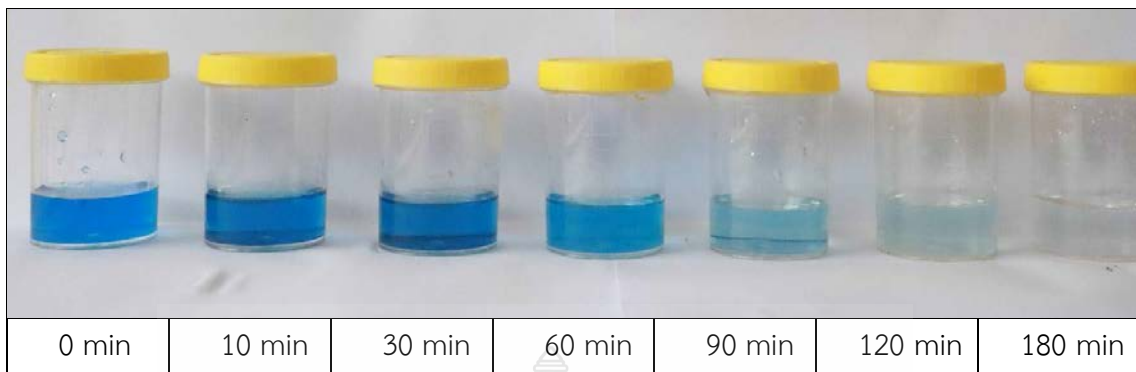


รูปที่ ค.7 อุปกรณ์ GC-MS

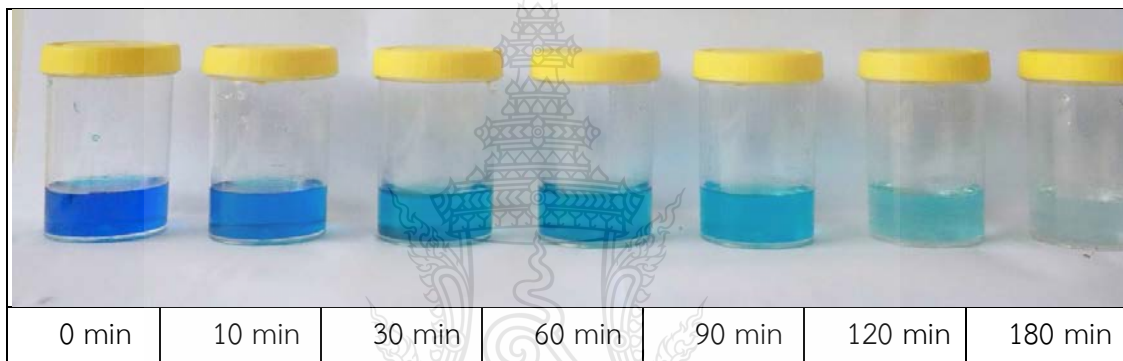


รูปที่ ค.8 อุปกรณ์ pH Meter (Starter300)

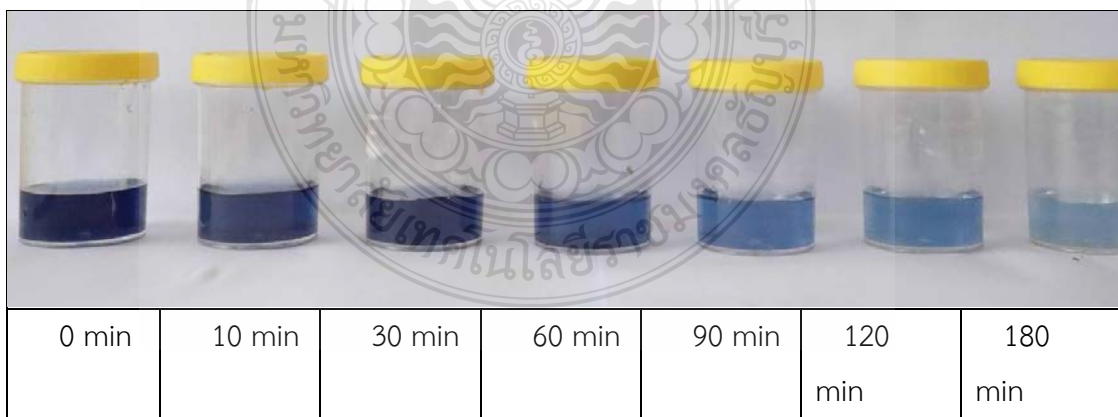




รูปที่ ง.1 การบำบัดสีย้อม IC ที่ความเข้มข้น 10  $\mu$ M เมื่อเวลาผ่านไป 180 min



รูปที่ ง. 2 การบำบัดสีย้อม MB ที่ความเข้มข้น 10  $\mu$ M เมื่อเวลาผ่านไป 180 min



รูปที่ ง. 3 การบำบัดสีย้อม RB5 ที่ความเข้มข้น 10  $\mu$ M เมื่อเวลาผ่านไป 180 min

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล นางสาวยูวดี ถีเลิศ  
วัน เดือน ปีเกิด 3 มกราคม 2538  
ที่อยู่ 29/163 อยู่เจริญแมนชั่น หมู่ 1 ต.คลองหก อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี  
12120  
การศึกษา ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
เบอร์โทรศัพท์ 095-6742832  
อีเมล yuwadee0301@gmail.com

