

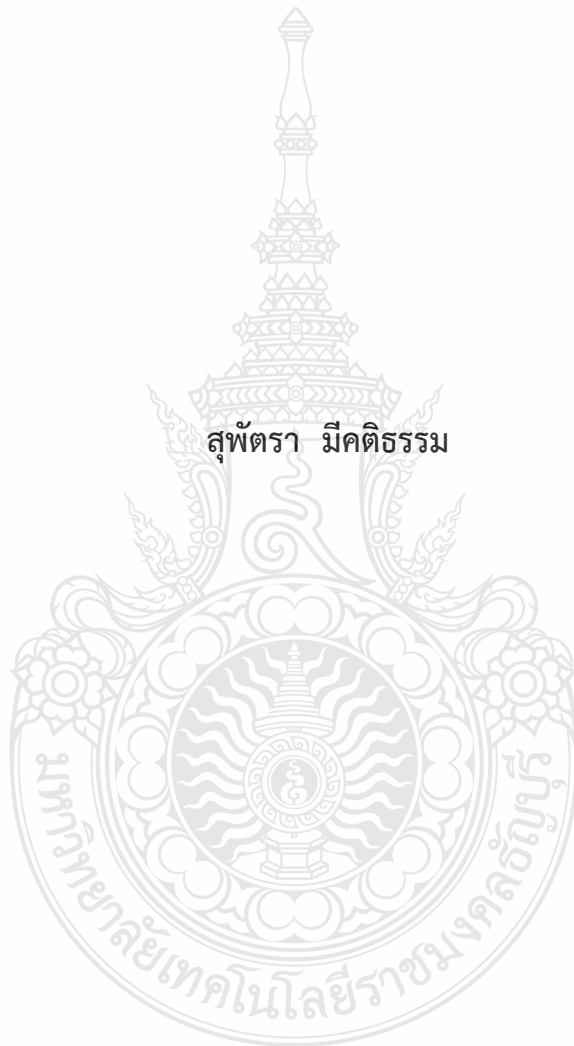
การกำจัดสารพิษที่เกิดขึ้นจากสาหร่ายโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก

REMOVAL OF TOXINS FROM ALGAE BY PHOTOCATALYTIC PROCESS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2562  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

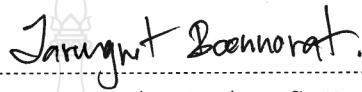
# การกำจัดสารพิษที่เกิดขึ้นจากสาหร่ายโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2562  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์      การกำจัดสารพิษที่เกิดขึ้นจากสาหร่ายโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก  
Removal of Toxins from Algae by Photocatalytic Process  
ชื่อ - นามสกุล      นางสาวสุพัตรา มีคติธรรม  
สาขาวิชา      วิศวกรรมโยธา  
อาจารย์ที่ปรึกษา      ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธรรมศักดิ์ โรจน์วิรุฬห์, วศ.ด.  
ปีการศึกษา      2562

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



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



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



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



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

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท



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

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การกำจัดสารพิษที่เกิดขึ้นจากสาหร่ายโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก
ชื่อ - นามสกุล	นางสาวสุพัตรา มีคดิธรรม
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธรรมศักดิ์ โรจน์วิรุฬห์, วศ.ด.
ปีการศึกษา	2562

## บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้ทำการศึกษาการกำจัดสาหร่ายและสารพิษในน้ำเสียสังเคราะห์โดยทดลองกับสาหร่าย 2 ชนิด ได้แก่ *M. aeruginosa* และ *A. lutea* ซึ่งพบได้บ่อยในแหล่งน้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปาด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) แบบฟิล์มบางที่เตรียมขึ้นโดยวิธีโซลเจล

การเตรียมและวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นสามารถวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ AFM/Asylum Research MFP-3DBIO ร่วมกับโปรแกรม Gwyddion V.2.22 และ UV-Vis spectrometer/ Lambda 650 Perkin ทั้งนี้การประเมินประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายทั้ง 2 ชนิด ทำการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์ภายใต้แสง UVA ที่มีความเข้มแสง 1,240 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และทดลองในถังปฏิกรณ์ชนิดไหลต่อเนื่องภายใต้แสงอาทิตย์เป็นเวลา 240 นาที

ผลของลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 30-70 นาโนเมตร มีพื้นที่ผิวปรากฏขนาด 1.02 ตารางไมโครเมตร ค่าความขรุขระเฉลี่ย เท่ากับ 1.52 นาโนเมตร และขนาดช่องว่างพลังงาน เท่ากับ 3.25 อิเล็กตรอนโวลต์ ในส่วนของประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่าย *M. aeruginosa* และ *A. lutea* ในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์มีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 83.33% และ 65.12% ตามลำดับ สำหรับประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่าย *M. aeruginosa* และ *A. lutea* ในถังปฏิกรณ์ชนิดไหลต่อเนื่องมีประสิทธิภาพการกำจัด เท่ากับ 49.49% และ 32.84% ตามลำดับ ปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลงสูงสุดมีค่าเท่ากับ 57.24% และ 39.67% และค่า ATP ลดลงสูงสุดเท่ากับ 74.06% และ 65.03% ตามลำดับ สำหรับ *M. aeruginosa* และ *A. lutea* ในถังปฏิกรณ์ชนิดไหลต่อเนื่อง ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงของลักษณะทางกายภาพของสาหร่าย พบว่า เซลล์สาหร่ายทั้งสองชนิด มีลักษณะเหี่ยวและเสื่อมสภาพหลังการทดลอง นอกจากนี้ปริมาณสารพิษ Microcystin จากสาหร่าย *M. aeruginosa* มีการลดลงอย่างชัดเจน และไม่สามารถตรวจพบปริมาณสารพิษ Anatoxin จากสาหร่าย *A. lutea*

คำสำคัญ: โฟโตออกซิเดชัน ไทเทเนียมไดออกไซด์ ไมโครซิสติน อะนาทอกซิน

<b>Thesis Title</b>	Removal of Toxins from Algae by Photocatalytic Process
<b>Name - Surname</b>	Miss Suphattra Meekatitam
<b>Program</b>	Civil Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Assistant Professor Thammasak Rojviroon, D.Eng.
<b>Academic Year</b>	2019

## ABSTRACT

This research aimed to investigate the removal of algae and toxic substances in synthetic wastewater. Two types of algae (*M. aeruginosa* and *A. lutea*) found in raw water resources for tap water production by photocatalytic process with titanium dioxide catalysts (TiO<sub>2</sub>) thin films prepared by sol gel method were experimented.

The preparation and physical characteristics of the prepared catalysts were analyzed by AFM/Asylum Research MFP-3DBIO, Gwyddion V.2.22 software, and UV-Vis spectrometer/Lambda 650 Perkin. The evaluation of the removal efficiency of both algae was conducted in a batch reactor under the UVA light intensity of 1,240 μW.cm<sup>2</sup> and a continuous flow reactor under sunlight for 240 minutes.

Results of physical characteristics of the catalysts showed that the particle size was in the range of 30-70 nm with the apparent surface area of 1.02 μm<sup>2</sup>; the surface roughness of the catalysts was 1.52 nm; and the energy gap was 3.25 eV. The removal efficiency of *M. aeruginosa* and *A. lutea* in the batch reactor was 83.33% and 65.12% respectively, while that in the continuous flow reactor was 49.49% and 32.84%, respectively. For *M. aeruginosa* and *A. lutea* in the continuous flow reactor, the highest decrease of chlorophyll was 57.24% and 39.67%, and ATP decreased by 74.06% and 65.03%, respectively. For the changes in physical characteristics of algae, both algae cells withered and deteriorated after the experiment. Moreover, the amount of Microcystin from *M. aeruginosa* was clearly reduced, and the amount of Anatoxin from *A. lutea* could not be detected.

**Keywords:** photo-oxidation, titanium dioxide, microcystin, anatoxin

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับความร่วมมือ และความช่วยเหลือจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธรรมศักดิ์ โรจนวิรุฬห์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท ซึ่งเป็นผู้ให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และชี้แนวทางการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ในทุกๆ ด้านด้วยความเอาใจใส่ และให้กำลังใจแก่ผู้จัดทำวิจัยอย่างดียิ่ง ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง มา ณ โอกาสนี้

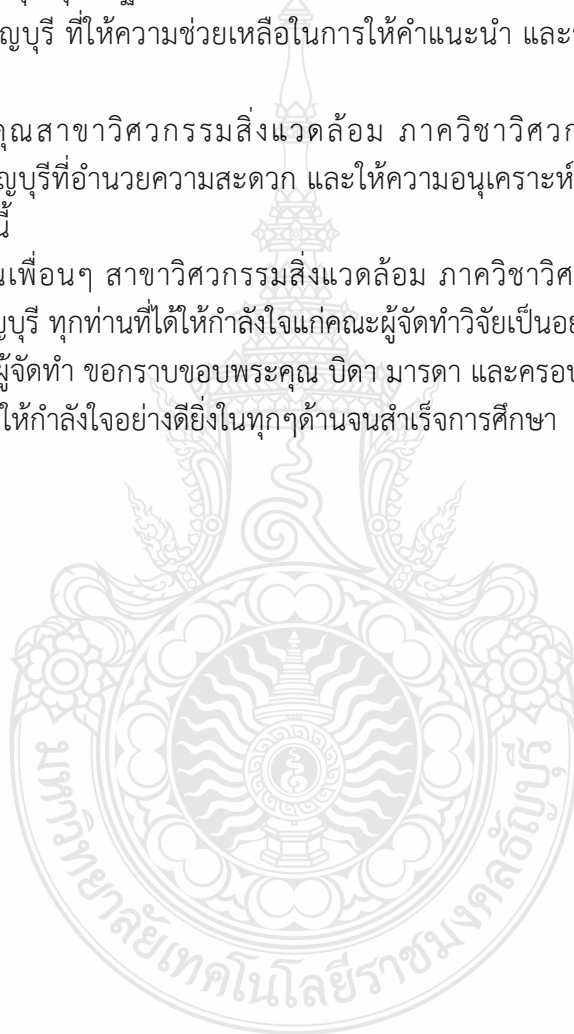
ขอขอบพระคุณคุณณัฐพล ชาวสวน นักวิชาการศึกษาคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความช่วยเหลือในการให้คำแนะนำ และข้อเสนอแนะแก่ผู้จัดทำวิจัยอย่างดียิ่ง

ขอขอบพระคุณสาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่อำนวยความสะดวก และให้ความอนุเคราะห์สถานที่ และอุปกรณ์ในการทดลองในงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีทุกท่านที่ได้ให้กำลังใจแก่คณะผู้จัดทำวิจัยเป็นอย่างมาก

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่อบรมเลี้ยงดู แนะนำ สั่งสอน สนับสนุน และให้กำลังใจอย่างดียิ่งในทุกๆด้านจนสำเร็จการศึกษา

สุพัตรา มีคติธรรม



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(11)
บทที่ 1 บทนำ.....	14
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	14
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	14
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	15
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	15
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับสาหร่าย.....	16
2.2 การจัดหมวดหมู่ของสาหร่าย.....	16
2.3 แหล่งที่อยู่อาศัยของสาหร่าย.....	17
2.4 สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (Division cyanophyta).....	19
2.5 สารพิษที่เกิดจากสาหร่าย.....	19
2.6 ปัจจัยสภาพแวดล้อมที่ผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย.....	22
2.7 ระบบการผลิตน้ำประปา.....	24
2.8 ผลกระทบของสาหร่ายต่อกระบวนการผลิตน้ำประปา.....	27
2.9 เทคโนโลยีการกำจัดสาหร่าย.....	30
2.10 กระบวนการโฟโตคะตะลิติก (Photocatalytic process).....	30
2.11 ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะลิติก (Photocatalytic process).....	34
2.12 เทคนิคการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	35
2.13 ทฤษฎีโซล-เจล (Sol-gel).....	38
2.14 จลพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติก.....	39
2.15 โครงสร้างสาหร่ายที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก.....	40

## สารบัญ (ต่อ)

2.16 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	41
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	43
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	44
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	44
3.3 การหาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายในน้ำเสียสังเคราะห์.....	46
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	51
4.1 ลักษณะกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	51
4.2 ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย.....	52
4.3 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกในการกำจัดสารพิษ ที่เกิดขึ้นจากสาหร่าย.....	59
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	64
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	64
5.2 ข้อเสนอแนะที่ได้จากการวิจัย.....	65
บรรณานุกรม.....	66
ภาคผนวก.....	72
ภาคผนวก ก ผลการทดลอง.....	73
ภาคผนวก ข อุปกรณ์การทดลอง.....	92
ภาคผนวก ค เอกสารการประชุมวิชาการ.....	96
ประวัติผู้เขียน.....	113



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 Division ของสาหร่ายชนิดต่าง ๆ.....	17
ตารางที่ 2.2 ระบบน้ำสะอาดหมู่บ้านตามแบบโยธาธิการ.....	26
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ วิธีวิเคราะห์และอุปกรณ์.....	47
ตารางที่ 3.2 ชุดควบคุมการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์.....	48
ตารางที่ 3.3 ชุดควบคุมการทดลองในถังปฏิกรณ์ชนิดไหลต่อเนื่อง.....	49
ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์.....	50
ตารางที่ ก.1 ข้อมูลความหนาแน่นสาหร่าย <i>M. aeruginosa</i> TISTR 8305 $10^2$ cells·mL <sup>-1</sup> กับเวลาในชุดทดลองในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์ .....	74
ตารางที่ ก.2 ข้อมูลความหนาแน่นสาหร่าย <i>M. aeruginosa</i> TISTR 8305 $10^2$ cells·mL <sup>-1</sup> กับเวลาในชุดควบคุม 1 ในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์.....	74
ตารางที่ ก.3 ข้อมูลความหนาแน่นสาหร่าย <i>M. aeruginosa</i> TISTR 8305 $10^2$ cells·mL <sup>-1</sup> กับเวลาในชุดควบคุม 2 ในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์.....	75
ตารางที่ ก.4 ข้อมูลความหนาแน่นสาหร่าย <i>M. aeruginosa</i> TISTR 8305 $10^4$ cells·mL <sup>-1</sup> กับเวลาในชุดทดลองในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์.....	75
ตารางที่ ก.5 ข้อมูลความหนาแน่นสาหร่าย <i>M. aeruginosa</i> TISTR 8305 $10^4$ cells·mL <sup>-1</sup> กับเวลาในชุดควบคุม 1 ในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์ .....	76
ตารางที่ ก.6 ข้อมูลความหนาแน่นสาหร่าย <i>M. aeruginosa</i> TISTR 8305 $10^4$ cells·mL <sup>-1</sup> กับเวลาในชุดควบคุม 2 ในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์.....	76
ตารางที่ ก.7 ข้อมูลความหนาแน่นสาหร่าย <i>M. aeruginosa</i> TISTR 8305 $10^6$ cells·mL <sup>-1</sup> กับเวลาในชุดทดลองในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์.....	77
ตารางที่ ก.8 ข้อมูลความหนาแน่นสาหร่าย <i>M. aeruginosa</i> TISTR 8305 $10^6$ cells·mL <sup>-1</sup> กับเวลาในชุดควบคุม 1 ในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์.....	77
ตารางที่ ก.9 ข้อมูลความหนาแน่นสาหร่าย <i>M. aeruginosa</i> TISTR 8305 $10^6$ cells·mL <sup>-1</sup> กับเวลาในชุดควบคุม 2 ในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์.....	78
ตารางที่ ก.10 ข้อมูลความหนาแน่นสาหร่าย <i>M. aeruginosa</i> TISTR 8305 $10^8$ cells·mL <sup>-1</sup> กับเวลาในชุดทดลองในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์.....	78
ตารางที่ ก.11 ข้อมูลความหนาแน่นสาหร่าย <i>M. aeruginosa</i> TISTR 8305 $10^8$ cells·mL <sup>-1</sup> กับเวลาในชุดควบคุม 1 ในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์.....	79

## สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ ก.12 ข้อมูลความหนาแน่นสำหรับ <i>M. aeruginosa</i> TISTR 8305 $10^8$ cells·mL <sup>-1</sup> กับเวลาในชุดควบคุม 2 ในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์.....	79
ตารางที่ ก.13 ข้อมูลความหนาแน่นสำหรับ <i>Anabaena lutea</i> TISTR NO. 8074 $10^2$ cells·mL <sup>-1</sup> กับเวลาในชุดทดลองในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์.....	80
ตารางที่ ก.14 ข้อมูลความหนาแน่นสำหรับ <i>Anabaena lutea</i> TISTR NO. 8074 $10^2$ cells·mL <sup>-1</sup> กับเวลาในควบคุม 1 ในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์.....	80
ตารางที่ ก.15 ข้อมูลความหนาแน่นสำหรับ <i>Anabaena lutea</i> TISTR NO. 8074 $10^2$ cells·mL <sup>-1</sup> กับเวลาในควบคุม 2 ในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์.....	81
ตารางที่ ก.16 ข้อมูลความหนาแน่นสำหรับ <i>Anabaena lutea</i> TISTR NO. 8074 $10^4$ cells·mL <sup>-1</sup> กับเวลาในชุดทดลองในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์.....	81
ตารางที่ ก.17 ข้อมูลความหนาแน่นสำหรับ <i>Anabaena lutea</i> TISTR NO. 8074 $10^4$ cells·mL <sup>-1</sup> กับเวลาในควบคุม 1 ในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์.....	82
ตารางที่ ก.18 ข้อมูลความหนาแน่นสำหรับ <i>Anabaena lutea</i> TISTR NO. 8074 $10^4$ cells·mL <sup>-1</sup> กับเวลาในควบคุม 2 ในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์.....	82
ตารางที่ ก.19 ข้อมูลความหนาแน่นสำหรับ <i>Anabaena lutea</i> TISTR NO. 8074 $10^6$ cells·mL <sup>-1</sup> กับเวลาในชุดทดลองในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์.....	83
ตารางที่ ก.20 ข้อมูลความหนาแน่นสำหรับ <i>Anabaena lutea</i> TISTR NO. 8074 $10^6$ cells·mL <sup>-1</sup> กับเวลาในควบคุม 1 ในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์.....	83
ตารางที่ ก.21 ข้อมูลความหนาแน่นสำหรับ <i>Anabaena lutea</i> TISTR NO. 8074 $10^6$ cells·mL <sup>-1</sup> กับเวลาในควบคุม 2 ในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์.....	84
ตารางที่ ก.22 ข้อมูลความหนาแน่นสำหรับ <i>Anabaena lutea</i> TISTR NO. 8074 $10^8$ cells·mL <sup>-1</sup> กับเวลาในชุดทดลองในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์.....	84
ตารางที่ ก.23 ข้อมูลความหนาแน่นสำหรับ <i>Anabaena lutea</i> TISTR NO. 8074 $10^8$ cells·mL <sup>-1</sup> กับเวลาในควบคุม 1 ในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์.....	85
ตารางที่ ก.24 ข้อมูลความหนาแน่นสำหรับ <i>Anabaena lutea</i> TISTR NO. 8074 $10^8$ cells·mL <sup>-1</sup> กับเวลาในควบคุม 2 ในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์.....	85
ตารางที่ ก.25 ข้อมูลความหนาแน่นสำหรับ <i>M. aeruginosa</i> TISTR 8305 กับเวลา ในชุดทดลอง.....	86

## สารบัญตาราง (ต่อ)

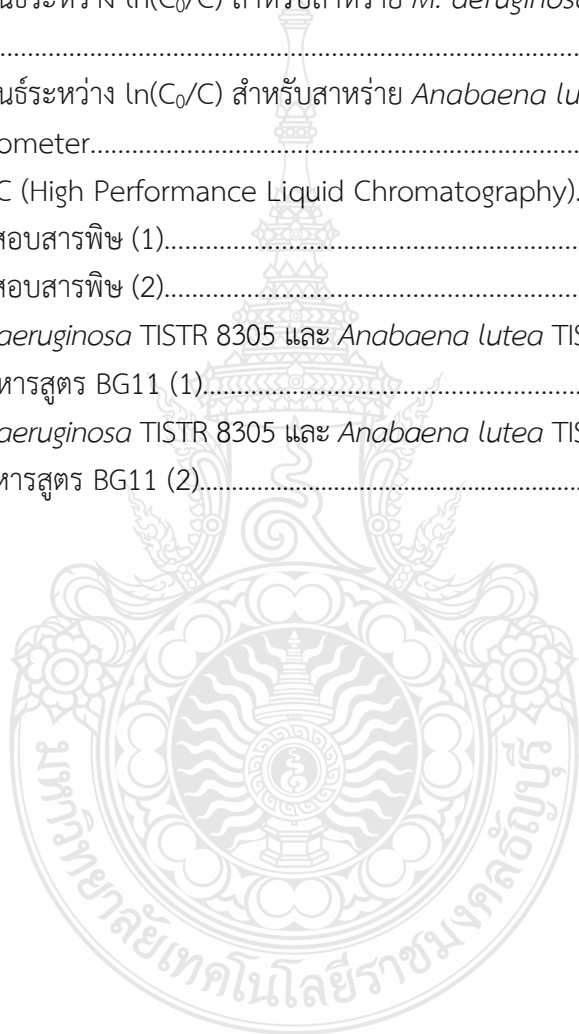
		หน้า
ตารางที่ ก.26	ข้อมูลความหนาแน่นสาหร่าย <i>Anabaena lutea</i> TISTR NO. 8074 กับเวลา ในชุดทดลอง.....	86
ตารางที่ ก.27	ข้อมูลความหนาแน่นสาหร่าย <i>M. aeruginosa</i> TISTR 8305 กับเวลา ในชุดควบคุม.....	87
ตารางที่ ก.28	ข้อมูลความหนาแน่นสาหร่าย <i>Anabaena lutea</i> TISTR NO. 8074 กับเวลา ในชุดควบคุม.....	87
ตารางที่ ก.29	ข้อมูลค่าคลอโรฟิลล์สำหรับสาหร่าย <i>M. aeruginosa</i> TISTR 8305 กับเวลา ในชุดทดลอง.....	88
ตารางที่ ก.30	ข้อมูลค่าคลอโรฟิลล์สำหรับสาหร่าย <i>Anabaena lutea</i> TISTR NO. 8074 กับเวลาในชุดทดลอง.....	88
ตารางที่ ก.31	ข้อมูลค่าคลอโรฟิลล์สำหรับสาหร่าย <i>M. aeruginosa</i> TISTR 8305 กับเวลา ในชุดควบคุม.....	89
ตารางที่ ก.32	ข้อมูลค่าคลอโรฟิลล์สำหรับสาหร่าย <i>Anabaena lutea</i> TISTR NO. 8074 กับเวลาในชุดควบคุม.....	89
ตารางที่ ก.33	สำหรับสาหร่าย <i>M. aeruginosa</i> TISTR 8305 กับเวลา ในชุดทดลอง.....	90
ตารางที่ ก.34	ข้อมูลค่า ATP สำหรับสาหร่าย <i>Anabaena lutea</i> TISTR NO. 8074 กับเวลาในชุดทดลอง.....	90
ตารางที่ ก.35	ข้อมูลค่า ATP สำหรับสาหร่าย <i>M. aeruginosa</i> TISTR 8305 กับเวลา ในชุดทดลอง.....	91
ตารางที่ ก.36	ข้อมูลค่า ATP สำหรับสาหร่าย <i>Anabaena lutea</i> TISTR NO. 8074 กับเวลาในชุดควบคุม.....	91

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างสารพิษ Microcystin.....	22
รูปที่ 2.2 สูตรโครงสร้างสารพิษ Anotoxin.....	22
รูปที่ 2.3 กระบวนการผลิตน้ำประปา.....	25
รูปที่ 2.4 ลักษณะของแพลงก์ตอนและสาหร่ายที่เกิดบริเวณผิวน้ำ.....	29
รูปที่ 2.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาต่างๆในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก.....	32
รูปที่ 2.6 โครงสร้างโมเลกุลของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	35
รูปที่ 2.7 กระบวนการโซล-เจล.....	38
รูปที่ 2.8 โครงสร้างสาหร่าย <i>M. aeruginosa</i> หลังผ่านการกำจัดสาหร่าย ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติก.....	41
รูปที่ 3.1 อุปกรณ์เคลือบผิวตัวเร่งปฏิกิริยา.....	44
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการกำจัดสารพิษที่เกิดขึ้นจากสาหร่ายโดยกระบวนการโฟโตคะตะไลติก.....	45
รูปที่ 3.3 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา $TiO_2$ แบบฟิล์มบาง.....	46
รูปที่ 3.4 ถังปฏิกรณ์แบบแบทช์สำหรับทดลอง.....	47
รูปที่ 3.5 ถังปฏิกรณ์ชนิดไหลต่อเนื่อง.....	50
รูปที่ 4.1 ลักษณะพื้นผิวทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	51
รูปที่ 4.2 ความหนาแน่นของเซลล์สาหร่าย <i>M. aeruginosa</i> TISTR 8305 และ <i>Anabaena lutea</i> TISTR NO. 8074 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กับเวลา.....	53
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสาหร่าย <i>M. aeruginosa</i> TISTR 8305 และ <i>Anabaena lutea</i> TISTR NO. 8074 กับเวลา.....	54
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคลอโรฟิลล์สำหรับสาหร่าย <i>M. aeruginosa</i> TISTR 8305 และ <i>Anabaena lutea</i> TISTR NO. 8074 กับเวลา.....	55
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ATP สำหรับสาหร่าย <i>M. aeruginosa</i> TISTR 8305 และ <i>Anabaena lutea</i> TISTR NO. 8074 กับเวลา.....	56
รูปที่ 4.6 รูปร่างเซลล์สาหร่าย <i>M. aeruginosa</i> TISTR 8305 ที่เวลา 0 และ 240 นาที.....	57
รูปที่ 4.7 รูปร่างเซลล์สาหร่าย <i>Anabaena lutea</i> TISTR NO. 8074 ที่เวลา 0 และ 240 min.....	57
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสารพิษสำหรับสาหร่าย <i>M. aeruginosa</i> TISTR 8305 กับเวลา.....	58
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(C_0/C)$ สำหรับสาหร่าย <i>M. aeruginosa</i> TISTR 8305 กับเวลา.....	60

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(C_0/C)$ สำหรับสาหร่าย <i>Anabaena lutea</i> TISTR NO. 8074 กับเวลา.....	60
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(C_0/C)$ สำหรับสาหร่าย <i>M. aeruginosa</i> TISTR 8305 กับเวลา.....	62
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(C_0/C)$ สำหรับสาหร่าย <i>Anabaena lutea</i> TISTR .....	62
รูปที่ ข.1 Haemocytometer.....	91
รูปที่ ข.2 เครื่อง HPLC (High Performance Liquid Chromatography).....	91
รูปที่ ข.3 อุปกรณ์ทดสอบสารพิษ (1).....	92
รูปที่ ข.4 อุปกรณ์ทดสอบสารพิษ (2).....	92
รูปที่ ข.5 สาหร่าย <i>M. aeruginosa</i> TISTR 8305 และ <i>Anabaena lutea</i> TISTR NO. 8074 ที่เลี้ยงในอาหารสูตร BG11 (1).....	93
รูปที่ ข.6 สาหร่าย <i>M. aeruginosa</i> TISTR 8305 และ <i>Anabaena lutea</i> TISTR NO. 8074 ที่เลี้ยงในอาหารสูตร BG11 (2).....	93



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ACh	Acetylcholine
AChE	Acetylcholinesterase
$e^-$	อิเล็กตรอน
$e^-_{cb}$	อิเล็กตรอนที่แถบการนำไฟฟ้า
Eg	ช่องว่างแถบพลังงาน
g/kg	กรัมต่อกิโลกรัม
eV	อิเล็กตรอนโวลต์
HCl	ไฮโดรคลอริก
$h\nu^+$	โฮลที่แถบวาเลนซ์
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide)
$h\nu$	อนุภาคของแสง (Photon)
IPA	ไอโซโพรพานอล
L-H Model	Langmuir-Hinshelwood model
NO	ไนตริกออกไซด์
nm	นาโนเมตร
O <sub>2</sub> <sup>•-</sup>	ซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล (Superoxide Radical)
TiO <sub>2</sub>	ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide)
TTIP	ไทเทเนียมเตตระไอโซโพรพอกไซด์
W/ml	วัตต์ต่อมิลลิลิตร
WO <sub>3</sub>	ทังสเตนออกไซด์
XRD	X-Ray Diffractometer
ZnO	ซิงค์ออกไซด์
$\mu\text{W}/\text{m}^2$	ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) ปัจจุบันเป็นปัญหาจากสาหร่ายเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วเนื่องจากมีปริมาณสารอาหารโดยเฉพาะธาตุไนโตรเจน และฟอสฟอรัสเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้สาหร่ายหลายชนิดมีการเจริญเติบโตอย่างผิดปกติ ทำให้แหล่งน้ำมีคุณภาพน้ำเสื่อมโทรม สาหร่ายที่พบในปรากฏการณ์ดังกล่าว เช่น *Microcystis aeruginosa*, *Cylindrospermopsis raciborskii*, *Anabaena spp.* และ *Oscillatoria spp.* เป็นต้น [1-2] สาหร่ายดังกล่าวบางชนิดผลิตสารพิษที่ส่งผลต่อสุขภาพของมนุษย์ และสิ่งมีชีวิตโดยรอบ รวมถึงส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตน้ำประปา [3-4] ส่งผลให้เกิดกลิ่น สี และรสชาติของน้ำประปาที่ไม่พึงประสงค์ ทำให้สิ้นเปลืองสารเคมีในการกำจัด โดยเฉพาะคลอรีนที่ใช้ในระบบผลิตน้ำประปา และค่าใช้จ่ายในการดูแลระบบ เนื่องจากสาหร่ายส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพทำให้ระบบผลิตน้ำประปาในกระบวนการก่อนและรวมตะกอนลดลง เกิดการอุดตันในระบบการกรอง อายุการทำงานสั้นลง จากปัญหาเหล่านี้ส่งผลให้น้ำประปาที่ผลิตไม่พอเพียงกับความต้องการใช้น้ำ รวมถึงน้ำประปาไม่ได้คุณภาพ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้กระบวนการโฟโตคะตะลิติก (Photocatalytic process) เพื่อลดสารพิษที่เกิดขึ้นจากสาหร่าย กระบวนการดังกล่าวเป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายเนื่องจากให้ประสิทธิภาพที่สูงเป็นปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับการกระตุ้นด้วยแสง [5] โดยเฉพาะตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) มีความสามารถในการออกซิไดซ์ที่มีเสถียรภาพทางเคมีสูง ทำปฏิกิริยาได้ดี รวมถึงไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถนำกลับมาใช้ได้อีกด้วย ทำให้ไม่ต้องมีการกำจัดตะกอนหรือสารภายหลังการบำบัด และมีราคาถูก [6-9] โดยมุ่งเน้นลดค่าใช้จ่ายและลดการใช้สารเคมีในการกำจัดสาหร่ายในกระบวนการผลิตน้ำประปา และเลือกใช้ระบบการผลิตน้ำประปาที่เหมาะสม พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ ได้แก่ ความหนาแน่นของเซลล์สาหร่าย ปริมาณคลอโรฟิลล์ และ ATP

### 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 ประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกในการกำจัดสาหร่าย และสารพิษที่เกิดขึ้นจากสาหร่าย

1.2.2 ศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกในการกำจัดสารพิษที่เกิดขึ้นจากสาหร่าย

### 1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1.3.1 ใช้  $\text{TiO}_2$  แบบฟิล์มบาง ซึ่งเตรียมด้วยวิธีการโซล-เจล (Sol-gel) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
- 1.3.2 ทำการทดลองในถังปฏิกิริยาแบบแบทช์ (Batch reactor) และถังปฏิกิริยาแบบต่อเนื่อง (Continuous reactor) ในระดับ Lab scale
- 1.3.3 สาหร่ายที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ *Microcystis aeruginosa* และ *Anabaena spp.*
- 1.3.4 แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้สำหรับถังปฏิกิริยาแบบแบทช์ คือ หลอด UVA-LED และถังปฏิกิริยาแบบต่อเนื่องใช้แหล่งกำเนิดแสงจากดวงอาทิตย์

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ข้อมูลประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกในการกำจัดสาหร่าย และสารพิษที่เกิดขึ้นจากสาหร่ายโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบแบทช์ และถังปฏิกิริยาแบบต่อเนื่อง
- 1.4.2 สามารถประเมินความเหมาะสมในการเลือกใช้ระบบผลิตน้ำประปา
- 1.4.3 สามารถลดค่าใช้จ่ายและลดการใช้สารเคมีในการกำจัดสาหร่ายในกระบวนการผลิตน้ำประปา ซึ่งเป็นประโยชน์ในวงกว้างต่อภาคชุมชนและอุตสาหกรรม





## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับสาหร่าย

สาหร่าย (Algae) เป็นสิ่งมีชีวิตที่สามารถพบได้ตามแหล่งน้ำในธรรมชาติโดยมี Chlorophyll เป็นเม็ดสีสังเคราะห์แสงเช่นเดียวกับพืชบกที่ใช้ในการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ [10] สาหร่ายมีรูปแบบการดำรงชีวิตโดยการเป็นแพลงก์ตอนในแหล่งน้ำ หรือเกาะติดกับวัสดุอื่น ๆ และสามารถดำรงชีวิตกับสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ในลักษณะความสัมพันธ์แบบพึ่งพา เช่น ไลเคน ซึ่งเป็นสาหร่ายที่ดำรงชีวิตร่วมกับบรา เป็นต้น [11]

##### 2.1.1 เซลล์สาหร่ายมีส่วนประกอบ ดังนี้

1. ผนังเซลล์ (Cell wall) มีส่วนประกอบจากคาร์โบไฮเดรต หรือ ซิลิเกต และ โปรตีน ซึ่งมีหิнопูน เหล็ก หรือโคตินหุ้มอยู่ ผนังเซลล์ประกอบด้วยจำนวน 2 ชั้น ได้แก่สารเพกติน ส่วนนี้จะมีลักษณะอ่อนนิ่ม และมีเยื่อ และชั้นที่ 2 เป็นเซลลูโลส สารนี้ส่งผลให้เซลล์มีความแข็งแรงและคงรูปอยู่ได้
2. นิวเคลียส (Nucleous) เป็นส่วนที่มีความสำคัญของเซลล์สาหร่ายมากที่สุด สาหร่ายจำพวกโพรแคริโอต (Prokaryote) จะไม่มีนิวเคลียสที่แท้จริงแต่ทำการเก็บ DNA ไว้ในนิวคลอยด์รีเจียน (Nucleoid region) และไม่มีออร์แกเนลล์ที่มีเยื่อหุ้มเมมเบรน และสำหรับยูแคริโอต (Eukaryote) สาหร่ายจำพวกนี้จะมีนิวเคลียสที่แท้จริง DNA จะถูกเก็บไว้ใน Organelle หุ้มด้วยเยื่อเมมเบรน ส่งผลให้โครโมโซมในนิวเคลียสจำนวนมากไม่ออกมาปะปนรวมกับ Organelle ที่อยู่ในไซโทพลาสซึม ตัวอย่างเช่น สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (Blue-green algae)
3. ไซโทพลาสซึม (Cytoplasm) เป็นแหล่งรงควัตถุที่มีส่วนประกอบจากน้ำ และสารประกอบเคมีที่จำเป็น รวมถึงออร์แกเนลล์ต่าง ๆ เช่น พลาสติดในเซลล์และถ้ามีคลอโรฟิลล์ จะให้สีเขียวที่เรียกว่าคลอโรพลาสต์ (Chloroplast) และกรณีนีมีแคโรทีนอยด์ (Carotenoid) จะให้สีเหลือง ส้ม แดง เรียกโครโมพลาสต์ (Chromoplast)

#### 2.2 การจัดหมวดหมู่ของสาหร่าย

##### 2.2.1 สาหร่ายสามารถจัดหมวดหมู่ได้จากเกณฑ์ ดังนี้ [12]

- 1) องค์ประกอบของผนังเซลล์ หรือ เยื่อหุ้มเซลล์ จากการศึกษาโครงสร้างของส่วนห่อหุ้มเซลล์สาหร่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนและการศึกษาด้านชีวเคมี พบว่าองค์ประกอบผนังเซลล์หลายชนิดไม่มีผนังเซลล์ และเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยมีสารอื่นมาห่อหุ้มโดยส่วนมากเป็นสารพวก Cellulose กรดอัลจินิก ซิลิกา และหิнопูน เป็นต้น
- 2) รงควัตถุ ส่วนนี้ในสาหร่ายมีหลายชนิดด้วยกัน เช่น คลอโรฟิลล์ แคโรทีน แซนโทฟิลล์ ไฟโคเออร์รีน และไฟโคไซยานิน เป็นต้น ซึ่งปริมาณรงควัตถุขึ้นอยู่กับชนิดสาหร่าย

3) อาหารสะสมในเซลล์ จากการสร้างอาหารของสาหร่าย จะมีการนำอาหารไปสะสมในเซลล์ในรูปของสารประกอบต่าง ๆ เช่น แป้ง ลิพิดิน ลามินาลิน แมนนิทอล ไขมัน น้ำมัน คอเลสเทอรอล เออโกสเทอรอล ฟอสโฟลีสเทอรอล พาราไมลอน เป็นต้น

4) จำนวน และตำแหน่งของแฟลกเจลลัม สาหร่ายหลายชนิดสามารถเคลื่อนที่ได้ การที่สาหร่ายเคลื่อนที่ได้ก็โดยแฟลกเจลลัม โดยสาหร่ายแต่ละชนิดจะมีจำนวน ลักษณะ และตำแหน่งที่แฟลกเจลลัมฝังตัวอยู่นั้นแตกต่างกัน ซึ่งสามารถใช้ความแตกต่างนี้ในการแยกหมวดหมู่สาหร่ายได้

## ตารางที่ 2.1 Division ของสาหร่ายชนิดต่าง ๆ

Division	ชนิดสาหร่าย
Cyanophyta	สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (Blue-green algae, Cyanobacteria)
Chlorophyta	สาหร่ายสีเขียว (Green algae)
Charophyta	สาหร่ายไฟ (Stoneworts, Brittleworts)
Euglenophyta	สาหร่ายยูกลีโนออยด์ (Euglenoids)
Phaeophyta	สาหร่ายสีน้ำตาล (Brown algae)

## 2.3 แหล่งที่อยู่อาศัยของสาหร่าย

สาหร่ายสามารถพบได้ในพื้นที่ที่มีความชื้น คุณสมบัติทางเคมี สารอาหาร รวมถึงลักษณะทางกายภาพที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายแต่ละชนิด แหล่งที่อยู่อาศัยแบ่งออกได้ดังนี้ [11]

2.3.1 สภาพแวดล้อมที่เป็นอากาศ สาหร่ายจำพวกนี้มีความทนต่อความแห้งแล้ง โดยอาจพบอยู่ในรูปของสปอร์ และถ้ามีความชื้นที่เหมาะสมส่งผลให้เกิดเป็นทลัสส์ หรือ เซลล์ปกติ บางชนิดเจริญอยู่ตามเปลือกไม้ ขอนไม้ หรือรั้วบ้านที่ทำจากไม้ พวกนี้เรียกว่า Epiphytic algae ในขณะที่พวกที่พบเจริญอยู่ตามก้อนหิน ผนังตึก หน้าผา เจดีย์เก่า พวกนี้เรียกว่า Epilithic algae สาหร่ายกลุ่มนี้อาจจำเป็นต้องมีการปรับตัวเพื่อการอยู่รอดในสภาวะที่มีความชื้นน้อยโดยการอยู่ในรูปของสปอร์หรือสร้างชั้นเมือกหุ้มตัวเอง หรือ ทลัสส์ไว้ โดยกลุ่มที่เจริญอยู่บนดิน เรียกว่า Terrestrial algae

### 2.3.2 สาหร่ายที่เจริญในแหล่งน้ำจืด

2.3.2.1 น้ำไหล (Running water) แหล่งน้ำประเภทนี้ได้แก่ แม่น้ำ ลำธาร น้ำตก คลอง สาหร่ายในแหล่งน้ำลักษณะนี้จะมีการปรับตัวโดยมีทลัสส์ลู่ไปตามกระแส น้ำ และมี Hold fast หรือ โครงสร้างสำหรับยึดเกาะกับซับสเตรต (Substrate)

2.3.2.2 น้ำนิ่ง (Standing water) แหล่งน้ำประเภทนี้ได้แก่ ทะเลสาบ อ่างเก็บน้ำ สระน้ำ บ่อน้ำ แบ่งออกได้เป็นดังนี้

1) พวกที่ล่องลอยอิสระในน้ำ (Phytoplankton) คือกลุ่มสาหร่ายที่ล่องลอยอย่างอิสระในน้ำ

2) พวกที่ยึดเกาะกับพืช (Epiphytic algae) คือ กลุ่มสาหร่ายที่ยึดเกาะกับพบในลำต้น หรือ รากพืช และรวมถึงพวกที่ยึดเกาะกับสาหร่ายด้วยกันเอง

3) พวกที่ยึดเกาะกับพื้นดินหรือทราย (Epipellic algae) คือ กลุ่มสาหร่ายที่เจริญเติบโตบนพื้นดินหรือทรายใต้ท้องน้ำ

4) พวกที่ยึดเกาะบนผิวทราย (Episammic algae)

5) พวกที่อาศัยอยู่ในพืช (Endophytic algae)

6) พวกที่อาศัยอยู่บนตัวสัตว์ (Epizooic algae)

7) พวกที่อาศัยอยู่ในตัวสัตว์ (Endozooic algae)

### 2.3.3 สาหร่ายที่เจริญในทะเล

2.3.3.1 บริเวณชายฝั่ง สาหร่ายจะเกาะอยู่บนก้อนหิน โขดหิน หรือเม็ดทราย บริเวณนี้ส่วนมากพบสาหร่ายพวก Epipellic algae ซึ่งจะ สามารถพบได้ทั้งกลุ่มสาหร่ายสีน้ำตาล สาหร่ายสีแดง และสาหร่ายสีเขียว

2.3.3.2 บริเวณกลางมหาสมุทร สาหร่ายที่พบในบริเวณนี้จะเป็นกลุ่มสาหร่ายที่ดำรงชีวิตแบบลอยอิสระ หรือ เรียกว่า Planktonic form สามารถพบสาหร่ายได้หลายดิวิชัน ขึ้นกับปริมาณสารอาหารและสภาพแวดล้อม ปรากฏการณ์การเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของสาหร่ายสามารถพบได้กลางมหาสมุทร หากสาหร่ายกลุ่มที่เจริญอย่างรวดเร็วเป็นสาหร่ายในสกุล *Oscillatoria* จะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Reddish bloom แต่หากสาหร่ายที่เจริญอย่างรวดเร็วเป็นสาหร่ายในกลุ่ม *Dinoflagellates* จะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Red tide

### 2.3.4 สาหร่ายที่เจริญในสภาวะที่ผิดปกติ (Unusual habitat algae)

2.3.4.1 สาหร่ายที่ขึ้นอยู่บนหิมะ (Snow algae) หรืออาจเรียกว่า *Kryoflora algae* โดยสาหร่ายในกลุ่มนี้มี Carotinoid เพื่อการป้องกันแสงที่สว่างเกินไปจากสภาพแวดล้อม

2.3.4.2 สาหร่ายในน้ำพุร้อน (Thermal algae) พบในแหล่งน้ำที่มีอุณหภูมิสูง ซึ่งอาจพบได้ในอุณหภูมิสูงถึง 80 °C สาหร่ายกลุ่มนี้อาจ เรียกว่า Thermophilic algae

2.3.4.3 สาหร่ายซิมไบโอติก (Symbiotic algae) เป็นสาหร่ายที่อาศัยร่วมกับสิ่งมีชีวิตชนิดอื่นตัวอย่างเช่น *Trichormus azollae* (Strasburger) Komárek & Anagnostidis ที่อาศัยอยู่ในช่องใบของแห่นางแว่น

2.3.4.4 สาหร่ายพาราไซติก (Parasitic algae) เป็นสาหร่ายที่ดำรงชีวิตในรูปแบบของพาราไซต์ สาหร่ายที่มีการดำรงชีวิตในรูปแบบนี้พบได้ทั้งกลุ่มสาหร่ายสีเขียว (Green algae) และในกลุ่มสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (Blue green algae) โดยบางชนิดทำให้ต้นไม้บางอย่างเป็นโรคได้ เช่น โรค Algal spot ซึ่งมีสาเหตุจากสาหร่ายชนิด *Cephaleuros virescens* เป็นต้น

Cyanobacteria เป็นสาหร่ายที่มีขนาดเล็กสามารถสังเคราะห์แสงได้ [13] มีรูปร่าง 2 แบบ คือ

2.4.1 รูปร่างเป็นเซลล์เดี่ยวหรือโคโลนีไม่เป็นเส้นสาย (Non filamentous form) อาจจะเป็นเซลล์เดี่ยวๆ เช่น *Chroococcus* หรือ อาจอยู่รวมกันเป็นโคโลนีแบบพาล์มลลา (Palmellate form) เช่น *Merismopedia*, *Eucapsis*, *Anacystis* เป็นต้น

2.4.2 รูปร่างเป็นเส้นสาย (Filamentous form) มีรูปร่างเป็นสายยาวจากเซลล์จำนวนมาก เซลล์ต่อเป็นเส้น ซึ่งอาจมีลักษณะตรงและเรียบไม่มีการแตกแขนง บางชนิดเส้นสายนั้นอาจจะมีปลายโค้งงอหรือบิดเป็นเกลียว เช่น *Arthrospira* เป็นต้น สามารถมีลักษณะแตกแขนงจริงหรือไม่แท้จริงในส่วนของเซลล์ที่เรียงกันเป็นแถวเรียกว่า ไตรโคม (Trichome) ดังนั้น ในแต่ละเส้นสายจึงประกอบไปด้วยไตรโคม และซีทรวมกัน เซลล์ในไตรโคมนี้อาจจะมีการเชื่อมโยงของ Cytoplasm ระหว่างเซลล์ โดยผ่านทางรูเล็ก ๆ ที่ผนังเซลล์ [14]

## 2.5 สารพิษที่เกิดจากสาหร่าย

ปัจจุบันปัญหาสารพิษที่เกิดขึ้นจากสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (Blue-green algae) มีผลต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำที่มีสาหร่ายปลดปล่อยสารพิษสู่แหล่งน้ำ สาหร่ายชนิดนี้เป็นสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียวที่ไม่มี Membrane ที่ห่อหุ้ม Nuclear material ในปี ค.ศ. 1971 ได้มีการจัดกลุ่มของสิ่งมีชีวิตในโลกนี้ โดยจัด Blue-green algae ว่าเป็น Bacteria ชนิดหนึ่ง สาหร่ายชนิดนี้จะสร้างรงควัตถุในเซลล์มีสีเขียวออกน้ำเงิน สามารถแยกได้หลายสกุล โดยสกุลที่มีรายงานว่าทำให้เกิดพิษต่อสัตว์ ได้แก่ สกุล *Microcystis*, *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Nodularia*, *Nostoc* และ *Oscillatoria* โดยสารพิษที่เกิดขึ้นสามารถจัดเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 2 กลุ่มด้วยกัน คือ [11]

2.5.1 สารพิษที่มีผลต่อระบบประสาท สามารถสร้างสารพิษต่อระบบประสาทได้ 4 ชนิด คือ Anatoxin-a, Anatoxin-a(s), Saxitoxin, Neosaxitoxin

Anatoxin-a เป็นสารพิษที่สร้างจากสาหร่ายในสกุล *Anabaena* และ *Oscillatoria* ออกฤทธิ์ที่ Neuromuscular junction โดย Anatoxin-a จะไปจับกับ Acetylcholine receptor เหมือน Acetylcholine (ACh) ปกติ ACh จะถูกทำลายด้วย Acetylcholinesterase (AChE)

แต่ Anatoxin-a ไม่ถูกทำลายด้วยเอ็นไซม์ดังกล่าว ทำให้มีการกระตุ้นที่ปลายประสาทมากจนเกิด Over stimulation ของกล้ามเนื้อเกิด Muscle twitching และ Cramp ในช่วงแรก และเกิดกล้ามเนื้ออ่อนแรง (Paralysis) ตามมาในที่สุด

Anatoxin-a(s) เป็นสารพิษที่สร้างจากสาหร่ายสกุล *Anabaena* ซึ่งกลไกการออกฤทธิ์นั้นเกิดขึ้นโดย Anatoxin-a(s) จะไปจับกับ AChE ทำให้ AChE ทำลาย ACh ที่หลั่งออกจากปลายประสาทไม่ได้ เกิด over stimulation ของปลายประสาททำให้กล้ามเนื้ออ่อนแรงตามมา

จะเห็นว่ากลไกของการเกิดพิษของ Anatoxin-a(s) นั้นคล้ายกับกลไกการเกิดพิษของ Organophosphate มาก ซึ่ง 's' ของ Anatoxin-a(s) นั้นคือ salivation เพราะสัตว์ที่ได้รับพิษเข้าไปจะมีน้ำลายหลั่งออกมามาก Anatoxin-a และ Anatoxin-a(s) ออกฤทธิ์ที่ Neuromuscular junction แต่สำหรับ Saxitoxin และ Neosaxitoxin จะมีผลต่อการส่งกระแสประสาทที่ Axon โดย Saxitoxin และ Neosaxitoxin จะไปยับยั้ง Sodium ion ในการเคลื่อนที่ผ่าน Sodium channel จึงยับยั้งการส่งผ่านของกระแสประสาท และยับยั้งการหลั่งของ ACh ทำให้เกิดกล้ามเนื้ออ่อนแรงตามมา

Saxitoxin และ Neosaxitoxin นั้นพบในสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินในสกุล *Anabaena*, *Aphanizomenon* ซึ่งสารพิษทั้ง 2 ชนิดนี้ยังสามารถพบในสาหร่ายชนิดอื่น ๆ ได้ โดยทำให้เกิด

“Red tides” (Red waterblooms) ในทะเล หอย 2 ผาที่กินสาหร่ายที่ สร้างสารพิษชนิดเป็น อาหาร จึงมีสารพิษสะสมอยู่ เมื่อมีผู้บริโภคหอยเข้าไปทำให้เกิดอาการอ่อนแรงที่เรียกว่า Paralytic shellfish poison

2.5.2 สารพิษที่ส่งผลกระทบต่อตับ ประกอบด้วย 2 ชนิด ได้แก่ *Microcystin* และ *Nodularin* ซึ่งพบในสาหร่ายสกุล *Microcystis* และ *Nodularia* ตามลำดับ สารพิษทั้ง 2 ชนิดนี้ออกฤทธิ์ทำลาย Hepatocyte โดยยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ Phosphatase โดยเฉพาะ Phosphatase 1 และ 2A Phosphatase นี้มีผลทำลาย Cytoskeletal ของเซลล์ตับ ทำให้มีการหดตัวของเซลล์ตับรวมทั้ง Sinusoidal capillary cell ทำให้เลือดแพร่ซึมเข้าไปในเซลล์ตับ เกิดมีการทำลายของเซลล์ตับตามมา

จากกลไกของสารพิษ *Microcystin* และ *Nodularin* ที่มีผลต่อเซลล์ตับดังกล่าวข้างต้นนั้น จะพบว่าการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ Protein kinase และ Protein phosphatases จะมีผลต่อการควบคุมการแบ่งตัวของเซลล์ (Proliferation) คนที่ได้รับ Toxin ชนิดนี้ปริมาณน้อย ๆ ไม่ทำให้เกิดการทำลายเซลล์ตับอย่างรุนแรงแต่จะเป็น Tumor promoter โดยหากมีสารบางอย่างเป็นตัวกระตุ้น (Trigger) สารพิษชนิดนี้จะเป็นตัวเสริมให้มีการเปลี่ยนแปลงเป็นเซลล์มะเร็งได้มากขึ้น

*Microcystin* toxin สามารถตรวจได้ด้วยวิธี Enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) ในแหล่งเก็บกักน้ำที่ใช้ในการทำ Dialysate ของ Center ดังกล่าว ซึ่งมีความผิดพลาดในการบำบัดน้ำก่อนนำมาเก็บกักเพื่อทำ Dialysate และยังมีพบในเลือดและในเซลล์ตับของผู้ป่วยที่เสียชีวิต 17 คน โดยมีปริมาณ 0.03-0.06 g/kg ของเซลล์ตับ (ค่ามัธยฐาน = 0.18) สามารถพบอยู่ทั่วไปในแหล่งน้ำจืด แต่จะทำให้เกิดพิษต่อเมื่อมีการเพิ่มจำนวนของสาหร่ายปริมาณมาก โดยสาหร่ายจะปลดปล่อยสารพิษออกจากเซลล์เมื่อเซลล์แก่และตายทำให้มีเซลล์แตก สารพิษนี้จึงปนเปื้อนในแหล่งน้ำนั้น ๆ

สำหรับรายงานการเป็นพิษส่วนใหญ่แล้วจะพบในสิ่งมีชีวิตที่บริโภคน้ำที่ปนเปื้อนเข้าไป หรือในสัตว์น้ำที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำดังกล่าว ในต่างประเทศมีการตื่นตัวเกี่ยวกับสารพิษ *Microcystin* โดย WHO ได้มีการกำหนดปริมาณ *Microcystin* ที่ตรวจพบในน้ำประปาไม่เกิน 1 µg/L โดยประเทศไทย ยังไม่มีการกำหนดค่ามาตรฐานสำหรับ *Microcystin* toxin ในน้ำดื่ม ฉะนั้นจะเห็นว่า *Microcystin* toxin เป็นสารพิษที่สร้างจากสาหร่ายในสกุล *Microcystis* ซึ่งเป็นกลุ่มของ Cyanobacteria ผลของ Toxin นี้ทำให้เกิดพิษต่อตับโดยมีเฉพาะรายงานในสัตว์เลี้ยง หรือสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำนั้น

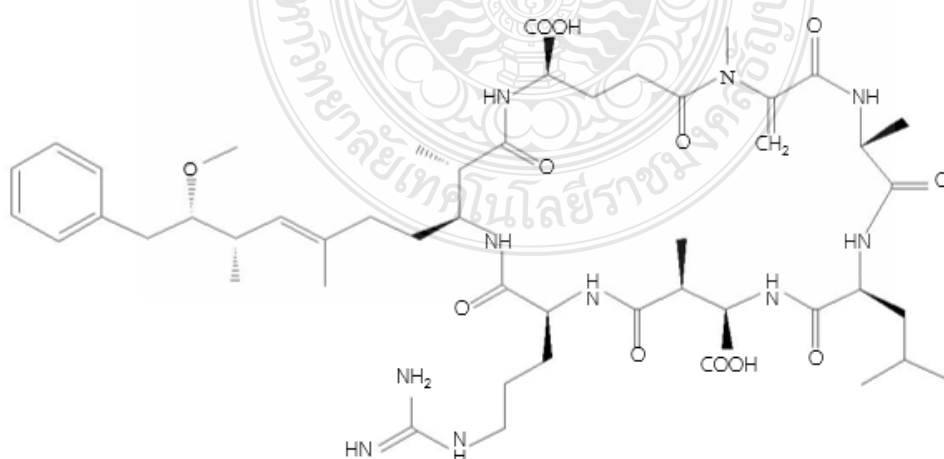
แต่รายงานในคนที่ทำให้เกิดตับอักเสบโดยการดื่มกินน้ำที่มีการปนเปื้อนของ *Microcystin* toxin ยังไม่มี ส่วนการกระตุ้นให้เกิดมะเร็งนั้นก็ยังอยู่ในระหว่างการศึกษาเพิ่มเติม ยังไม่มีรายงานชัดเจนว่าปริมาณน้ำของ Toxin ที่ได้รับเข้าไปประมาณเท่าไรจึงทำให้เกิดพิษในคน หรือเป็น Tumor promotor ได้ ฉะนั้นพิษของ *Microcystin* คงเป็นสิ่งที่เราควรระวังตระหนักถึง แต่ไม่ควรที่จะตระหนกมากเกินไป และสิ่งที่สำคัญไม่น้อยคงเป็นการดูแลแหล่งน้ำไม่ให้มีสารปนเปื้อนที่กระตุ้นการเจริญเติบโตของ สาหร่ายเหล่านี้มากขึ้น เพื่อป้องกันไม่ให้มีปริมาณความเข้มข้นของ *Microcystin* ในแหล่งน้ำนั้นเพิ่มขึ้นด้วย

สารพิษที่ผลิตขึ้นสามารถแบ่งเป็น 5 กลุ่ม ตามลักษณะอาการของการเกิดพิษ ดังนี้

- วงแหวนเปปไทด์ที่เป็นพิษต่อตับ (Hepatotoxic cyclicpeptides) ได้แก่ Microcystins และ Nodularins สัตว์ที่ได้รับสารพิษนี้ จะมีอาการเพ้อ ลดความอยากอาหาร เยื่อบุต่าง ๆ มีสีซีด อาเจียน หนาวสั่น ท้องร่วง เกิดเลือดออกในตับ และเกิดอาการช็อคจนเสียชีวิต
- Neurotoxic alkaloids ได้แก่ สารพิษในกลุ่มอะนาทอกซิน (Anatoxins) และแซกซิทอกซิน (Saxitoxins) อาการที่แสดงออกในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม คือ กล้ามเนื้อหดเกร็ง เป็นอัมพาต ระบบหายใจล้มเหลว และเสียชีวิตในที่สุด
- Cytotoxic alkaloids ได้แก่ สารพิษไซลินโดรสเปอรัมบอซิน (Cylindrospermopsin) สัตว์ที่ได้รับสารพิษนี้ จะถูกทำลายเป็นหลัก ก่อให้เกิดการทำลายอวัยวะภายในต่างๆ ได้แก่ ไต ม้าม ต่อมไทมัส และหัวใจ
- Dermatotoxic alkaloids ได้แก่ สารพิษใน Aplysiatoxins และ Lyngbyatoxin ซึ่งก่อให้เกิดอาการผิวหนังอักเสบอย่างรุนแรงในผู้ที่ลงเล่นน้ำ
- Irritant toxins lipopolysaccharides สารพิษที่สร้างขึ้นก่อให้เกิดอาการระคายเคือง อาการแพ้ต่อเนื้อเยื่อของมนุษย์และสัตว์ที่ได้รับสารพิษ

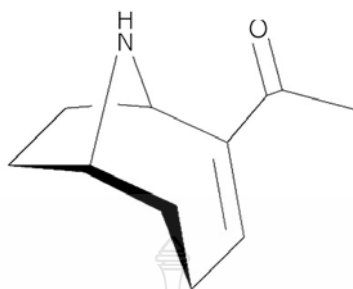
สารพิษที่สาหร่ายผลิตขึ้นนอกจากจะเป็นสาเหตุของปศุสัตว์ สัตว์เลี้ยง และสัตว์ป่าที่มาดื่มน้ำแล้ว ยังมีผลโดยตรงต่อสุขภาพของผู้ที่บริโภคน้ำจากแหล่งน้ำนั้น แม้จะผ่านขั้นตอนการผลิตน้ำประปาแล้วก็ตาม ทั้งนี้เพราะกระบวนการผลิตน้ำประปา และความร้อนจากการต้มน้ำธรรมดาไม่สามารถทำลายสารพิษได้ พบว่า สารพิษจากสาหร่ายเป็นสาเหตุของการเกิดมะเร็งตับ (Primary liver cancer) และยังก่อให้เกิดอาการระคายเคืองอาหารและลำไส้อักเสบ รวมทั้งการเกิดการอักเสบของตับ และระบบทางเดินอาหารของประชากร

### 2.5.3 สูตรโครงสร้างสารพิษ Microcystin



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างสารพิษ Microcystin

## 2.5.4 สูตรโครงสร้างสารพิษ Anotoxin



รูปที่ 2.2 สูตรโครงสร้างสารพิษ Anotoxin

## 2.6 ปัจจัยสภาพแวดล้อมที่ผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโต และแพร่กระจายของสาหร่ายขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ประกอบด้วยทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี ดังนี้ [15]

### 2.6.1 ความเข้มแสง

ความเข้มแสงเป็นปัจจัยทางกายภาพส่งผลกระทบต่อกระบวนการสังเคราะห์แสงที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย เนื่องจากในเซลล์สาหร่ายจะใช้พลังงานแสงสำหรับกระบวนการชีวเคมี มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับ ความขุ่น สี ปริมาณเกลือแร่ที่ละลายอยู่ในน้ำ และอัตราการสังเคราะห์แสงจะลดลงไปตามระดับความลึกที่เพิ่มขึ้น สาหร่ายแต่ละชนิดต้องการความเข้มชั้นที่แตกต่างกัน

### 2.6.2 ความขุ่นของน้ำ

ความขุ่นเกิดจากสิ่งแขวนลอยปิดกั้นทางเดินของแสงในน้ำ ซึ่งอาจมีขนาดที่แตกต่างกัน ทั้งอินทรีย์สาร และอนินทรีย์สาร เช่น ดินละเอียด แพลงก์ตอน รวมถึงสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กในแหล่งน้ำนั้น ส่งผลให้การกระจาย และการดูดซึมของแสงในแหล่งน้ำแต่ละแห่งมีความขุ่นแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น ลักษณะดินบนพื้นน้ำ อัตราการไหลของน้ำ อุณหภูมิ น้ำ เป็นต้น ความขุ่นเป็นสิ่งที่สามารถสังเกตได้ ส่งผลต่อการตัดสินใจของผู้บริโภคในการใช้น้ำ และสร้างอุปสรรคในระบบการกรองน้ำและกระบวนการฆ่าเชื้อโรคในการผลิตน้ำประปา

### 2.6.3 อุณหภูมิ

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในแหล่งน้ำธรรมชาติ ขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้ ความเข้มชั้นของแสง ฤดูกาล อุณหภูมิอากาศ กระแสลม กระแสน้ำ ระดับความสูง ตำแหน่งเส้นรุ้ง ลักษณะภูมิประเทศ ปริมาณน้ำ ความลึกของน้ำ ความขุ่น ต้นกำเนิดของแหล่งน้ำ เวลา สภาพแวดล้อม บริเวณแหล่งน้ำ ความร้อนจากกิจกรรมของสิ่งมีชีวิต เป็นต้น

### 2.6.4 กระแสน้ำ

ทำให้การเจริญเติบโต การแพร่กระจาย รูปร่างเปลี่ยนแปลง สาหร่ายบางชนิดมีโครงสร้างที่เรียกว่า Holdfast และสร้างเมือกเพื่อช่วยในการยึดเกาะกับสิ่งต่าง ๆ ในน้ำ

### 2.6.5 สภาพการนำไฟฟ้า

คือ ความสามารถของน้ำในการนำกระแสไฟฟ้าผ่านสื่อนำไฟฟ้าพวกอิออนของสารประกอบอินทรีย์ไม่แตกตัวจึงไม่มีการนำไฟฟ้า ส่วนสารอนินทรีย์เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีเนื่องจากแตกตัวให้อิออนบวก และลบ ทำให้ทราบปริมาณสารอนินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำ ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำจะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายในน้ำ และจะผันแปรตามความเข้มข้นของสารละลาย อุณหภูมิ และ pH ของน้ำ

### 2.6.6 ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความเข้มข้นของไฮโดรเจนอิออนในแหล่งน้ำนั้น ณ ช่วงเวลาที่ทำ การวัดค่า pH ซึ่งค่า pH มีความสำคัญเป็นอย่างมาก และมีความสัมพันธ์กับระบบต่าง ๆ

### 2.6.7 ฟอสฟอรัสและไนโตรเจน

เนื่องจากปริมาณสารอาหารที่สูงซึ่งมักมีปริมาณความเข้มข้น Phosphorus และ Nitrogen ในปริมาณสูง สาหร่ายมีความสามารถในการสะสม Phosphorus โดยความเข้มข้นสูง จะส่งเสริมสาหร่ายทางอ้อม เนื่องจากทำให้เกิดการเจริญเติบโตของแพลงก์ตอนพืชโดยทั่วไป อย่างหนาแน่น ดังนั้นปริมาณแพลงก์ตอนพืชที่มีความหนาแน่นมากจะทำให้ความขุ่นของน้ำสูงขึ้น และความเข้มแสงต่ำ ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการเจริญของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน [16]

## 2.7 ระบบการผลิตน้ำประปา

ระบบการผลิตน้ำประปานั้นเป็นส่วนสำคัญ โดยมีน้ำดิบเสมือนวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ น้ำประปา การเลือกระบบการผลิตจะเลือกจากลักษณะของแหล่งน้ำดิบ ซึ่งระบบการผลิตจะส่งผล ต่อไปยังองค์ประกอบในระบบประปา โดยทั่วไประบบการผลิตน้ำประปาประกอบด้วย ระบบผลิต น้ำประปาแบบบาดาล และระบบการผลิตน้ำประปาแบบผิวดิน [17] ดังนี้

### 2.7.1 ระบบการผลิตน้ำประปาแบบบาดาล

ใช้แหล่งน้ำใต้ดินเป็นน้ำดิบในการผลิตน้ำประปา ระบบการผลิตเริ่มจากการสูบน้ำ จากบ่อบาดาลด้วยเครื่องสูบน้ำแบบจุ่มใต้น้ำ ส่งไปตามท่อน้ำดิบเข้าสู่ระบบผลิต โดยผ่านระบบการเติมอากาศ และถังกรองสนิมเหล็ก น้ำที่ผ่านการกรองแล้วจะถูกส่งเข้าถังน้ำใส และฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน และส่ง ไปยัง ระบบจ่ายน้ำ ด้วยเครื่องสูบน้ำแบบหอยโข่งขึ้นหอสูง แล้วจึงจ่ายน้ำประปาเข้าสู่ระบบท่อผ่านมาตรวัดน้ำ ให้แก่ผู้ใช้

### 2.7.2 ระบบการผลิตประปาแบบผิวดิน

ใช้น้ำผิวดิน เช่น แม่น้ำ ลำคลอง สระน้ำขนาดใหญ่ เป็นแหล่งน้ำดิบในการผลิต ระบบการผลิตเริ่มจากการสูบน้ำจากแหล่งน้ำผิวดินด้วยเครื่องสูบน้ำแบบหอยโข่งส่งไปตามท่อน้ำดิบเข้าสู่ ระบบผลิตน้ำ โดยการเติมสารส้ม ปูนขาว เพื่อให้เกิดการรวมตะกอนและตกตะกอน น้ำที่ผ่านการ กรองแล้วจะถูกส่งเข้าถังน้ำใส ฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน และส่งไปยังระบบจ่ายน้ำ โดยสูบน้ำด้วยเครื่อง สูบน้ำแบบหอยโข่งขึ้นหอสูง แล้วจึงจ่ายน้ำประปาเข้าสู่ระบบท่อผ่านมาตรวัดน้ำให้แก่ผู้ใช้



### 2.7.3 ขั้นตอนการผลิตน้ำประปา

การผลิตน้ำประปามีขั้นตอนและรายละเอียด ดังต่อไปนี้

1) การสูบน้ำ การผลิตน้ำประปา เริ่มจาก “โรงสูบน้ำแรงต่ำ” ทำการสูบน้ำจากแหล่งน้ำบาดาล หรือแหล่งน้ำผิวดินธรรมชาติ เพื่อลำเลียงเข้าสู่ระบบการผลิตน้ำ ซึ่งน้ำดิบที่สามารถนำมาผลิตน้ำประปาได้นั้นจะต้องมีปริมาณมากเพียงพอที่จะนำมาผลิตน้ำประปาได้อย่างต่อเนื่อง

2) การปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบที่สูบน้ำเข้ามาแล้ว จะถูกผสมด้วยสารเคมี เช่น สารส้ม และปูนขาว เพื่อทำการปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ สารละลายสารส้มจะช่วยให้มีการตกตะกอนได้ดียิ่งขึ้น และสารละลายปูนขาวจะช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของตะไคร่น้ำหรือสาหร่ายในน้ำ หรือ บางครั้งจะมีการเติมคลอรีน เพื่อทำการฆ่าเชื้อโรคที่อาจปะปนมากับน้ำในขั้นตอนนี้ก่อน

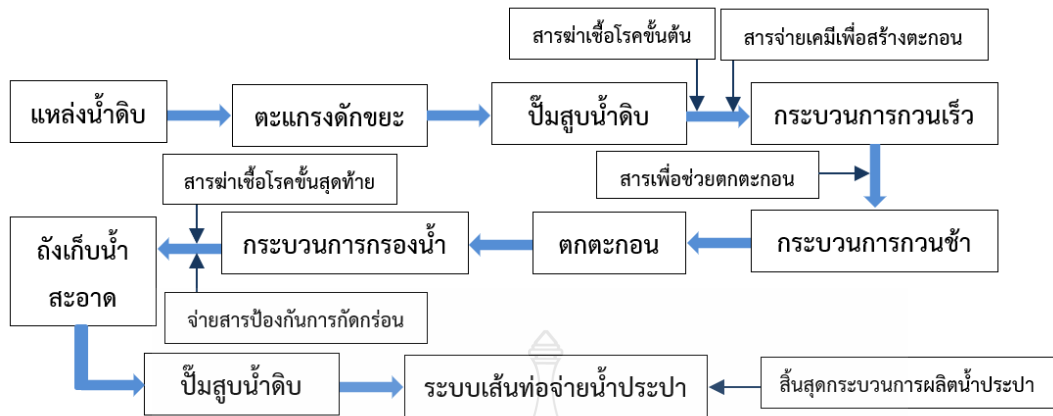
3) การตกตะกอน ขั้นตอนนี้จะปล่อยน้ำที่ผสมสารส้ม และปูนขาวแล้ว ทำให้เกิดหมุนวนเวียนเพื่อให้น้ำกับสารเคมีรวมตัวกันจะช่วยให้มีการจับตัวของตะกอนได้ดียิ่งขึ้น และจะนำน้ำเหล่านั้นให้เข้าสู่ถังตะกอนที่มีขนาดใหญ่ เพื่อทำให้เกิดน้ำนิ่ง ตะกอนที่มีขนาดใหญ่ น้ำหนักมากจะตกลงสู่ก้นถัง และถูกดูดทิ้ง น้ำใสส่วนบนจะไหลตามรางรับน้ำเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป

4) การกรอง ในการกรองจะใช้ทรายหยาบและทรายละเอียด เพื่อการกรองตะกอนขนาดเล็กมากในน้ำ และให้มีความใสสะอาดมากขึ้น ซึ่งในขั้นตอนนี้ น้ำที่ผ่านการกรองจะมีความใสมาก แต่จะมีความขุ่นหลงเหลืออยู่ประมาณ 0.2 – 2.0 หน่วยความขุ่น และทรายกรองจะมีการล้างทำความสะอาดอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้การกรองมีประสิทธิภาพ

5) การฆ่าเชื้อโรค น้ำที่ผ่านการกรองมาแล้วจะมีความใส แต่อาจจะมีเชื้อโรคปนมากับน้ำ ดังนั้นต้องทำการฆ่าเชื้อโรค โดยใช้ คลอรีน ซึ่งคลอรีน สามารถฆ่าเชื้อโรคได้เป็นอย่างดี น้ำที่ได้รับการผสมคลอรีนแล้ว เรียกกันว่า “น้ำประปา” สามารถนำมาใช้เพื่อการอุปโภค-บริโภค

6) การควบคุมคุณภาพน้ำประปา ขั้นตอนนี้ จะเป็นขั้นตอนที่สำคัญ เพราะน้ำประปาที่ทำการผลิตมาแล้วนั้น จะต้องวิเคราะห์ตรวจสอบอีกครั้ง โดยการตรวจคุณภาพน้ำ เพื่อให้ได้น้ำประปาที่สะอาด ปลอดภัย สำหรับการอุปโภค – บริโภค

7) การสูบน้ำจ่ายน้ำประปาที่ผลิตมาแล้ว จะต้องให้บริการถึงบ้านเรือนของผู้ใช้น้ำโดยส่งผ่านไปตามเส้นท่อ ดังนั้นการสูบน้ำจึงมีความจำเป็นด้วยการส่งจากหอถังสูงที่สามารถบริการได้ในพื้นที่ใกล้เคียง และในพื้นที่ที่ไกลออกไปหรือมีความสูงมากจำเป็นต้องใช้เครื่องอัดแรงดันน้ำ เพื่อให้ น้ำประปาสามารถบริการได้อย่างทั่วถึง



รูปที่ 2.3 กระบวนการผลิตน้ำประปา [17]

2.7.4 ระบบน้ำสะอาดหมู่บ้านตามแบบโยธาธิการ มีเป็นลักษณะหอถังสูงเป็นโครงเหล็ก ด้านบนเป็นถังบรรจุน้ำต่อเป็นชุดละ 4 ใบ ใช้แหล่งน้ำบาดาลเป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำประปา มีการออกแบบระบบกรองเป็นชั้นกรองให้จ่ายต่อการ บำรุงรักษาแบ่งออกได้เป็น 3 แบบมาตรฐานตามขนาดของจำนวนประชากร ได้แก่ มาตรฐานขนาดใหญ่ รองรับผู้ใช้น้ำตั้งแต่ 120 หลังคาเรือนขึ้นไป มาตรฐานแบบ ก รองรับผู้ใช้น้ำตั้งแต่ 50 - 120 หลังคาเรือนขึ้นไป มาตรฐานแบบ ข รองรับผู้ใช้น้ำตั้งแต่ 30 - 50 หลังคาเรือนขึ้นไป และมีหน่วยงานราชการได้วางรูปแบบระบบผลิตน้ำประปาที่ก่อสร้างและออกแบบ ซึ่งมีหน่วยงานที่ได้วางมาตรฐาน คือ สำนักบริหารจัดการน้ำ กรมทรัพยากรน้ำ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม โดยมีรูปแบบดังนี้ [18]

ตารางที่ 2.2 ระบบน้ำสะอาดหมู่บ้านตามแบบโยธาธิการ

ระบบประปา	กำลังผลิต	รองรับผู้ใช้น้ำ	ส่วนประกอบ	จำนวน/ ขนาด
1. ขนาดเล็ก	2.5 m <sup>3</sup> ·hr <sup>-1</sup>	30-50 หลังคาเรือน	โรงสูบน้ำ	-
			ระบบกรองน้ำบาดาล	2.5 m <sup>3</sup> ·hr <sup>-1</sup>
			ถังน้ำใส	14 m <sup>3</sup>
			หอถังสูง	10 m <sup>3</sup>
			เครื่องสูบน้ำบาดาลพร้อมอุปกรณ์ควบคุม	1 ชุด
			เครื่องสูบน้ำดีพร้อมอุปกรณ์ควบคุม	1 ชุด
			ระบบน้ำยาคลอรีนและส่วนประกอบอื่น	1 ชุด
2. ขนาดกลาง	7 m <sup>3</sup> ·hr <sup>-1</sup>	50 - 120 หลังคาเรือน	โรงสูบน้ำ	-
			ระบบกรองน้ำบาดาล	7 m <sup>3</sup> ·hr <sup>-1</sup>
			ถังน้ำใส	20 m <sup>3</sup>
			หอถังสูง	15 m <sup>3</sup>
			เครื่องสูบน้ำบาดาลพร้อมอุปกรณ์ควบคุม	1 ชุด
			เครื่องสูบน้ำดีพร้อมอุปกรณ์ควบคุม	1 ชุด
			ระบบน้ำยาคลอรีนและส่วนประกอบอื่น	1 ชุด
3. ขนาดใหญ่	10 m <sup>3</sup> ·hr <sup>-1</sup>	121 - 300 หลังคาเรือน	โรงสูบน้ำ	-
			ระบบกรองน้ำบาดาล	10 m <sup>3</sup> ·hr <sup>-1</sup>
			ถังน้ำใส	100 m <sup>3</sup>
			หอถังสูง	30 m <sup>3</sup>
			เครื่องสูบน้ำบาดาลพร้อมอุปกรณ์ควบคุม	1 ชุด
			เครื่องสูบน้ำดีพร้อมอุปกรณ์ควบคุม	2 ชุด
			ระบบน้ำยาคลอรีนและส่วนประกอบอื่น	1 ชุด
4. ขนาดใหญ่มาก	20 m <sup>3</sup> ·hr <sup>-1</sup>	301 - 700 หลังคาเรือน	โรงสูบน้ำ	-
			ระบบกรองน้ำบาดาล	20 m <sup>3</sup> ·hr <sup>-1</sup>
			ถังน้ำใส	100 m <sup>3</sup>
			หอถังสูง	45 m <sup>3</sup>
			เครื่องสูบน้ำบาดาลพร้อมอุปกรณ์ควบคุม	1 ชุด
			เครื่องสูบน้ำดีพร้อมอุปกรณ์ควบคุม	2 ชุด
			ระบบน้ำยาคลอรีนและส่วนประกอบอื่น	1 ชุด

## 2.8 ผลกระทบของสาหร่ายต่อกระบวนการผลิตน้ำประปา

สาหร่ายสามารถทำให้เครื่องกรองทรายอุดตัน ก่อให้เกิดเรื่องรส และกลิ่น นอกจากนี้ยังสามารถทำให้ pH ความขุ่น สี และความเป็นด่าง (Alkalinity) ของน้ำเปลี่ยนแปลงไปได้ สาหร่ายที่สะสมและเติบโตบนชั้นของผิวทรายกรอง มีลักษณะเป็นผิวบาง ๆ ซึ่งทำให้อัตราการไหลผ่านชั้นกรองลดลง แต่อาจมีประโยชน์บางในแง่สามารถเพิ่มออกซิเจนให้กับน้ำที่ไหลผ่านชั้นกรอง ก่อให้เกิดการย่อยสลายของสารอินทรีย์ในเครื่องกรองในสถานะที่ไม่มีออกซิเจนได้ เรียกเมือกของสาหร่ายพืชน้ำและสัตว์น้ำอื่น ๆ ที่อยู่บนชั้นผิวทรายกรองว่า ผิวกรอง (Filter skin) หรือ Schmutzdecke เมื่อเกิดปัญหาการอุดตันทำให้การล้างย้อน (Back wash) ซึ่งจะต้องทำบ่อยครั้งขึ้นสิ้นเปลืองเวลาและน้ำ รวมทั้งต้องเปลี่ยนทรายกรองบ่อยขึ้น ถ้าสาหร่ายมากจะรบกวนกระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) ทำให้การตกตะกอนของฟล็อก (Floc) ในถังตกตะกอนไม่ได้ผลดีเท่าที่ควร [19]

สาหร่ายในถังตกตะกอนแบ่งได้ 2 ประเภท ได้แก่ สาหร่ายที่เกาะนิ่งกับที่ (Attached algae) และสาหร่ายที่ลอยอย่างอิสระ (Floating algae หรือ Planktonic algae) ซึ่งในบางครั้งอาจมีสัตว์ขนาดเล็กอาศัยอยู่ร่วมกับโคลนของสาหร่ายด้วย เมื่อโคลนของสาหร่ายเจริญเติบโตจนมีขนาดที่ใหญ่พอจะผลัดตัวออกจากผนัง และเกาะรวมกันเป็นตะกอนซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้บ่อกรองอุดตัน นอกจากนี้ยังมีสาหร่ายที่ทำให้เกิดกลิ่นได้เช่น *Anabaena sp.* ซึ่งจะผลิตและปล่อยสารที่มีกลิ่นลงสู่น้ำประปา สารเหล่านี้มีขนาดเล็กมาก ทำให้สามารถผ่านสารกรองไปได้ และทำให้เกิดกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์แก่น้ำประปา

### 2.8.1 สาหร่ายที่เกาะนิ่งกับที่ (Attached algae)

สาเหตุสำคัญที่ทำให้มีสาหร่ายเกาะในถังตกตะกอน คือ ไม่มีการเติมคลอรีนเริ่มต้น (Pre-chlorination) หรือ มีการเติมปริมาณคลอรีนในปริมาณที่น้อยมาก สาหร่ายมักเจริญเติบโตเป็นโคลนโดยอาจเจริญเป็นชั้นบนผนัง หรือ เจริญเป็นเส้นสายยาวพลิวไปตามกระแส น้ำ โดยชั้นส่วนทั้งหมดของสาหร่ายถือเป็นสิ่งสกปรกในกระบวนการผลิตน้ำประปา คือ เมื่อโคลนของสาหร่ายเจริญจนมีขนาดใหญ่พอที่จะผลัดออกจากผนังลงไปเกาะบนผิวชั้นทรายกรอง หรือ รวมตัวกันเป็นก้อนตะกอน ซึ่งทั้งหมดเป็นสาเหตุของการอุดตันของชั้นกรองทราย

### 2.8.2 สาหร่ายที่ลอยอย่างอิสระ (Floating algae หรือ Planktonic algae)

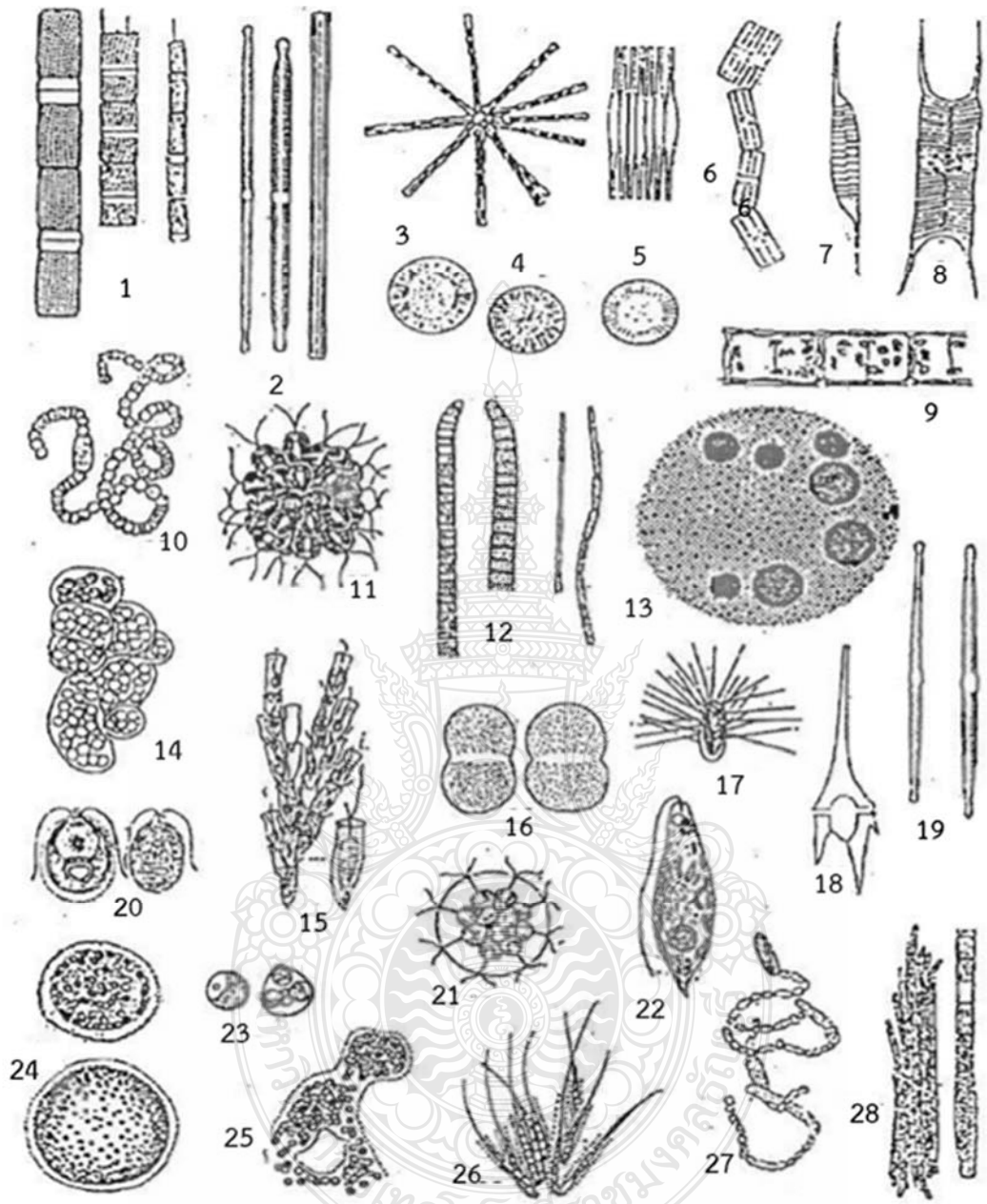
สามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่หนึ่ง และประเภทที่สอง สาหร่ายที่ลอยอย่างอิสระประเภทที่หนึ่ง สามารถเจริญเติบโตในน้ำ แต่กรณีนี้น้ำดิบมีความขุ่นสูง แสงอาทิตย์บางส่วนจะถูกดูดกลืนโดยอนุภาคดิน หรือ โคลนที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ ทำให้ไม่เกิดกระบวนการสังเคราะห์แสงได้ เป็นผลให้ไม่สามารถเจริญเติบโต แสงอาทิตย์สามารถส่องผ่านได้มากขึ้นทำให้สาหร่ายมีการเจริญเติบโตขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยบริเวณที่พบสาหร่ายเจริญมากที่สุด คือ ก้นถังตกตะกอน ส่งผลต่อระบบผลิตน้ำประปา เช่น เมื่อสาหร่ายผ่านการตกตะกอนและการกรองได้ จะผ่านเข้าสู่กระบวนการเติมคลอรีน สาหร่ายที่เป็นแพลงก์ตอนนี้เมื่อสัมผัสคลอรีนจะตายและปล่อยสารที่ทำให้เกิดกลิ่น เช่น จีออสมิน (Geosmin) ออกมาทำให้เกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์ในน้ำประปา

สาหร่ายที่ลอยอย่างอิสระประเภทที่สอง สาหร่ายกลุ่มนี้มักเจริญแล้วมาเกาะรวมกับแผ่นฟิล์มที่ลอยเคลือบบนผิวหน้าน้ำ มองด้วยตาเปล่ามีลักษณะเป็นเมือกสีเขียว เพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็ว

และสามารถต้านทานคลอรีนได้มากกว่าสาหร่ายที่ลอยอย่างอิสระประเภทที่หนึ่ง แบ่งสาหร่ายที่ส่งผลกระทบต่อระบบผลิตน้ำประปาได้ 4 กลุ่ม ดังนี้

- 1) สาหร่ายที่อุดตันระบบกรองน้ำ ประกอบด้วยหมายเลข 1 ถึง 9  
รายชื่อสาหร่ายหมายเลข 1 ถึง 9 คือ *Aulacoseira* หมายเลข 2 ถึง 8 คือ *Synedra*, *Asterionella*, *Cyclotella*, *Fragilaria*, *Tabellaria*, *Rhizosolenia* และ *Atteya*
- 2) สาหร่ายที่ทำให้เกิดกลิ่น ประกอบด้วยหมายเลข 10 ถึง 19  
รายชื่อสาหร่ายหมายเลข 10 ถึง 19 คือ *Anabaena*, *Synura*, *Oscillatoria*, *Volvox*, *Microcystis*, *Dinobryon*, *Mallomonas*, *Ceratium* และ *Synedra* ตามลำดับ
- 3) สาหร่ายที่ทำให้เกิดสี ประกอบด้วยหมายเลข 16 ถึง 23  
รายชื่อสาหร่ายหมายเลข 16 ถึง 23 คือ *Cosmarium*, *Chlamydomonas*, *Pandorina*, *Euglena* และ *Chlorella* ตามลำดับ
- 4) สาหร่ายที่สารพิษ ประกอบด้วยหมายเลข 24 ถึง 28  
รายชื่อสาหร่ายหมายเลข 24 ถึง 28 คือ *Coelosphaerium*, *Microcystis*, *Gloeotrichia*, *Anabaena* และ *Aphanizomeon*





รูปที่ 2.4 ลักษณะของแพลงก์ตอนและสาหร่ายที่เกิดบริเวณผิวน้ำ [19]

## 2.9 เทคโนโลยีการกำจัดสาหร่าย

ขั้นตอนการกำจัดสาหร่ายเป็นขั้นตอนสำคัญในการผลิตน้ำประปาเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งอาจต้องใช้สารเคมีในการจัดในปริมาณมาก มีค่าใช้จ่ายในการดูแลสูง เทคโนโลยีการกำจัดสาหร่ายมีขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้ [20]

2.9.1 การกรอง (Filtration) วิธีเหมาะกับสาหร่ายที่มีเป็นลักษณะเส้นสาย และมีเซลล์ขนาดใหญ่ เช่น *Spirulina sp.* โดยการนำผ้ากรองไนลอนที่มีรูให้กรองตามความเหมาะสมของชนิดสาหร่าย

2.9.2 การปั่นแยก เป็นวิธีที่แยกสาหร่ายที่มีขนาดเล็กมาก เช่น คอลเรลลา (*Chlorella sp.*)

2.9.3 การใช้สารเคมี เป็นวิธีที่เกิดสารตกค้างขึ้นในสิ่งแวดล้อม แต่มีความสะดวกรวดเร็ว แต่ไม่เป็นที่ยอมรับมากนักเนื่องจากมีปัญหาเรื่องสารเคมีตกค้างในสิ่งแวดล้อมเกิดขึ้น

2.9.4 การใช้คลื่นอัลตราโซนิค (Ultrasonic) อาศัยการทำงานของเครื่องผลิต Ultrasonic ในน้ำรัศมี 180 องศา ออกไป เมื่อเซลล์สาหร่ายสัมผัส Ultrasonic จะเกิดการสั่นสะเทือนอย่างรุนแรง สามารถทำลายเซลล์สาหร่ายให้แตกได้ เป็นวิธีที่มีผู้ใช้น้อย เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายในการจัดการสูง

2.9.5 การทำให้เกิดฟล็อก และการตกตะกอนด้วยกระบวนการ ECF โดยไม่มีความจำเป็นต้องใช้สารเคมีร่วมด้วย ไม่ก่อให้เกิดสารตกค้างในสิ่งแวดล้อม สารแขวนลอยและสิ่งเจือปนในน้ำที่มีคุณสมบัติในการนำกระแสไฟฟ้า ทำให้เกิดการรวมตัวของตะกอน และแยกตะกอนออกจากน้ำ

## 2.10 กระบวนการโฟโตคะตะลิติก (Photocatalytic process)

เป็นกระบวนการที่ใช้ในการบำบัดสารปนเปื้อนที่มีอยู่ในน้ำและอากาศให้บริสุทธิ์ และสามารถเพิ่มคุณสมบัติในการทำมาสะอาดด้วยตัวเองได้ ซึ่งได้มีนำกระบวนการโฟโตคะตะลิติกมาประยุกต์ใช้ในการกำจัดสารมลพิษที่เป็นสารอินทรีย์ อนินทรีย์และโลหะหนักบางชนิดในน้ำเสีย แต่ถ้าหากเจือปนโลหะทรานซิชัน จะเป็นอันตรายต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก กระบวนการโฟโตคะตะลิติกจะเริ่มจากการให้ระบบซึ่งรวมถึงสารเคมีต่าง ๆ ในระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าวจะเกิดการเกาะหรือดูดติดผิว (Adsorption process) ของสารปนเปื้อนบน  $\text{TiO}_2$  เกิดขึ้น ในขณะที่เข้าสู่สภาวะสมดุล จากนั้นจึงเป็นการฉายแสง (Irradiation process) ซึ่งทำให้สารปนเปื้อนที่มีอยู่ในน้ำเสียเหล่านี้สลายหรือถูกกำจัดออกไป [21]

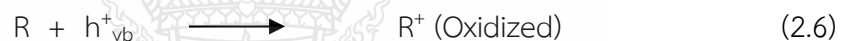
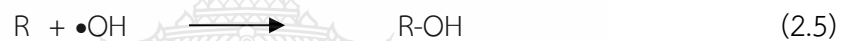
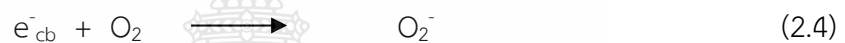
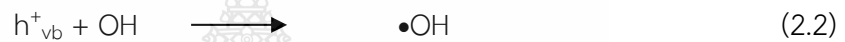
### 2.10.1 กระบวนการโฟโตออกซิเดชัน

กระบวนการโฟโตออกซิเดชัน เป็นกระบวนการที่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เร่งปฏิกิริยาที่ใช้แสง (Photoreaction) ซึ่งในกระบวนการเร่งปฏิกิริยานี้เป็นแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous catalysts) โดยทั่วไปโมเลกุลของสารตั้งต้นจะถูกดูดติด (Adsorb) ไว้บนผิวของ Catalysts แล้วปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่ผิวของ Catalysts โมเลกุลที่ถูกดูดติดจะถูกออกซิไดซ์โดยการถ่ายเทอิเล็กตรอนให้กับโฮล หรือ ให้กับเรดิคัลอิสระ เมื่อมีพลังงานแสงมากกระทบกับพื้นผิว Catalysts ทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นสู่แถบการนำไฟฟ้า หรือทำให้สารอื่น ๆ ที่ เช่น ไอน้ำ และออกซิเจนเปลี่ยนเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล

หลักการเกิดโฟโตออกซิเดชันของ TiO<sub>2</sub> เกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง •OH กับสารปนเปื้อนในสารละลาย และการเกิดออกซิเดชันโดยตรงของ h<sup>+</sup><sub>vb</sub> ในแถบวาเลนซ์กับสารปนเปื้อนที่ดูดติดบนผิว Catalysts

ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกนี้ เป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำ ซึ่งมีแถบพลังงานที่น่าสนใจอยู่สองแถบ คือ แถบวาเลนซ์ (Valence band) และแถบการนำไฟฟ้า (Conduction band) แถบพลังงานทั้งสองนี้จะถูกแยกจากกันโดยมีแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap) ซึ่งมีความกว้าง E<sub>g</sub> กั้นอยู่

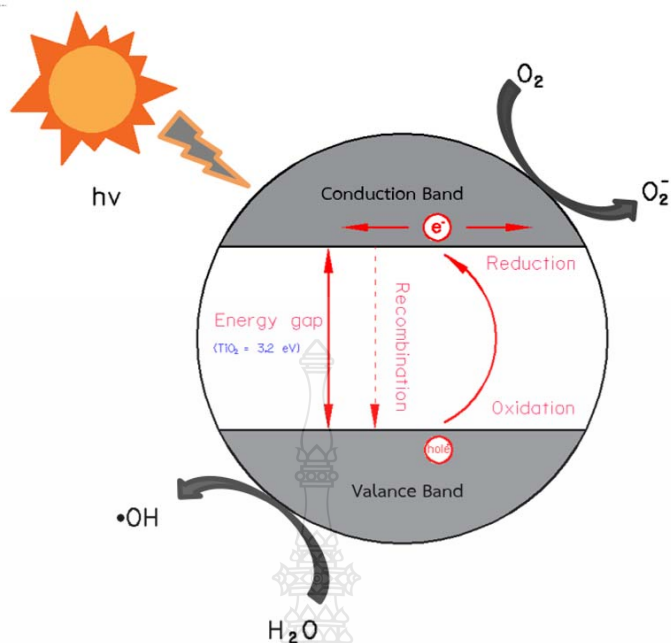
กลไกการเกิดปฏิกิริยาต่างๆในกระบวนการโฟโตออกซิเดชันโดยมีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแสดงได้ด้วยสมการ 2.1 ถึง 2.7 และแสดงในรูปที่ 2.5



เมื่อ

- $h\nu$  = อนุภาคของแสง (Photon)
- $h^+_{vb}$  = โฮลที่แถบวาเลนซ์
- $e^-_{cb}$  = อิเล็กตรอนที่แถบการนำไฟฟ้า
- $\bullet\text{OH}$  = ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl radicals)
- $\text{O}_2^-$  = ซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล (Superoxide Ion Radicals)
- $\text{R}$  = โมเลกุลของสารอินทรีย์ (Organic molecule)



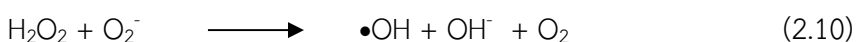
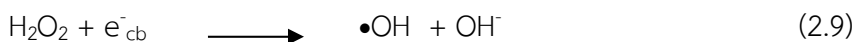


รูปที่ 2.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาต่างๆในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก [22]

อิเล็กตรอนที่แถบการนำไฟฟ้า ( $e^-_{cb}$ ) ทำปฏิกิริยากับโมเลกุลออกซิเจน ( $O_2$ ) ที่ดูดติดผิว  $TiO_2$  ทำให้โมเลกุลออกซิเจนเปลี่ยนไปเป็นซูเปอร์ออกไซด์อ็อกไซด์ (  $O_2^-$  ) ส่วน  $h^+_{vb}$  สามารถรับ  $e^-$  จากโมเลกุลสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในก๊าซได้โดยตรง หรือไฮดรอกซิลอิออน (Hydroxyl ions :  $OH^-$ ) ทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $\bullet OH$  ) และยังทำให้โมเลกุลของน้ำ ( $H_2O$ ) ที่ดูดติดผิว  $TiO_2$  เปลี่ยนเป็น  $\bullet OH$  ด้วยเช่นกัน ซึ่งไฮดรอกซิลเรดิคัล เป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่แรง (Strong oxidizing agent) มีความไวในการทำปฏิกิริยาสูง (Highly reactive) และทำหน้าที่สลายโมเลกุลสารอินทรีย์ในก๊าซที่ดูดติดผิว หรืออยู่ใกล้ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล สามารถที่ ทำปฏิกิริยาต่อไปได้เป็น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) ดังสมการที่ 2.8



ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นเป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่ดี ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำปฏิกิริยาต่อไปได้ โดยจะทำปฏิกิริยากับ  $e^-_{cb}$  ทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ดังสมการที่ 2.9 และ 2.10 [20]



## 2.9.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

### 1) Turbulence

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับอัตราการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม (Film diffusion) หรือ การแพร่ผ่านรูพรุน (Pore diffusion) ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบตัวดูดซับไม่ถูกรบกวนจึงมีความหนามาก และอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาตัวดูดซับ ทำให้การแพร่ผ่านฟิล์มน้ำ เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูง ทำให้น้ำไม่อาจสะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนา เป็นผลให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าไปหาตัวดูดซับได้เร็วกว่า การเคลื่อนที่เข้าไปในโพรงกรณีนี้การแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

### 2) Size and surface area

คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของตัวดูดซับ คือ ขนาด และพื้นที่ผิว ขนาดของตัวดูดซับมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วของการดูดซับในทางลบ กล่าวคือ อัตราเร็วการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ ดังนั้นตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กจึงมีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าขนาดใหญ่ ส่วนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity)

### 3) pH

ค่าความเป็นกรด-ด่าง มีความสัมพันธ์โดยตรงต่อปริมาณไฮโดรเนียมไอออน ( $H_3O^+$ ) เนื่องจากที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำ จะมีปริมาณไฮโดรเนียมไอออนมากกว่าที่ค่าความเป็นกรด-ด่างสูง ซึ่งค่าการดูดซับในกรณีที่ตัวถูกดูดซับมีประจุเป็นบวก และตัวดูดซับมีตำแหน่งดูดซับที่มีประจุเป็นลบ ถ้าสารละลายที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำ จะทำให้ความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มลดลงเนื่องมาจากการแย่งกันที่จะถูกดูดซับของตัวถูกดูดซับที่มีประจุบวกกับไฮโดรเนียมไอออนในสารละลาย แต่จะได้ผลในทางตรงกันข้าม เมื่อการดูดซับอยู่ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างสูง เนื่องจากไฮโดรเนียมไอออนมีปริมาณน้อยลง และปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) เพิ่มขึ้นจึงลดผลในการเข้าแย่งจับหรือดูดซับกับตัวดูดซับ และในกรณีที่ตัวถูกดูดซับมีประจุลบก็จะให้ผลตรงกันข้าม

### 4) อุณหภูมิ

ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับขึ้นอยู่กับว่าการดูดซับในระบบเป็นประเภทใด ถ้าเป็นการดูดซับทางกายภาพ อุณหภูมิจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเปลี่ยนแปลงไปในทางน้อยลงหรือคงที่ ถ้าเป็นการดูดซับทางเคมี อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นไปด้วย เนื่องจากอิทธิพลของความร้อนจะช่วยเร่งการสลายพันธะเคมีให้เร็วขึ้น และเพิ่มโอกาสที่ตัวดูดซับจะเคลื่อนที่เข้าสัมผัสกับตำแหน่งดูดซับได้มากขึ้น

### 5) Solubility

เมื่อมีการดูดซับเกิดขึ้นโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะถูกดูดออกจากน้ำก่อนแล้วจึงไปเกาะติดบนผิวของแข็ง สารที่ละลายน้ำได้ดีจะมีแรงยึดเหนี่ยวมากกว่าสารที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยกว่า อย่างไรก็ตามเกณฑ์ข้างบนไม่ได้เป็นจริงเสมอไปทั้งนี้เพราะมีสารที่ละลายน้ำได้

น้อยหลายชนิด เกาะติดผิวของตัวดูดซับได้ยาก ด้วยเหตุนี้จึงไม่อาจกล่าวได้อย่างเต็มที่ว่าความสามารถในการดูดซับ และความสามารถในการละลายน้ำมีความสัมพันธ์กันอย่างแน่นอนในเชิงปริมาณ

#### 6) Absorbate size

ขนาดของสารหรือโมเลกุลของตัวถูกดูดซับส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับเมื่อน้ำหนักและขนาดของโมเลกุลสารที่ถูกดูดซับเพิ่มมากขึ้น เช่น การดูดซับกรดอินทรีย์โดยถ่านกัมมันต์จะพบว่าสามารถดูดซับ กรดฟอร์มิก กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก และกรดบิวเทอริก ได้มากขึ้นตามลำดับของขนาดโมเลกุลที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ขนาดโมเลกุลที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลต่อการละลายโดยสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างที่ยาวมักจะมีความสามารถในการละลายน้ำได้ลดลง จึงส่งผลทำให้เกิดการดูดซับของตัวดูดซับมากขึ้นตามขนาดที่เพิ่มขึ้น แต่ในกรณีที่ตัวดูดซับมีรูพรุนมาก สารที่มีโมเลกุลเล็กกว่ารูพรุนมักจะถูกดูดซับได้ดีกว่าสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เนื่องจากสารโมเลกุลขนาดใหญ่ไม่สามารถเข้ารูพรุนได้ และพื้นที่ผิวภายนอกที่จะดูดซับมีอยู่น้อย เนื่องจากพื้นที่ผิวภายนอกเป็นรูพรุน

## 2.11 ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะลิติก (Photocatalytic process)

กระบวนการโฟโตคะตะลิติกนิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วย 2 ชนิด ได้แก่

2.11.1 โลหะทรานซิชัน (Transition Metal) เช่น ทองแดง โคโรเนียม นิกเกิล เป็นต้น

2.11.2 สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) แคดเมียมซัลไฟด์ ( $\text{CdS}$ ) สังกะสีออกไซด์ ( $\text{ZnO}$ ) เป็นต้น

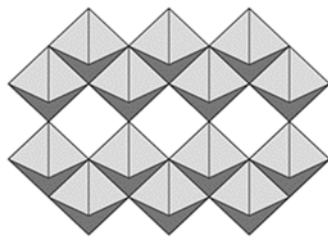
สำหรับโลหะทรานซิชันนั้นเมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอนทำให้อิเล็กตรอนขึ้นไปอยู่ในสถานะกระตุ้น (Excited state) อิเล็กตรอนจะกลับสู่สถานะพื้น (Ground state) ได้ง่ายและรวดเร็ว ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดโลหะทรานซิชันนั้นไม่เป็นที่นิยมในการนำมาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดสารกึ่งตัวนำได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย ซึ่งไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) เป็นสารที่ได้รับความนิยมชนิดหนึ่ง

ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) เป็นสารที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เพราะมีราคาไม่แพง ไม่มีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและมนุษย์ และมีความคงทนต่อการเกิดปฏิกิริยาในรูปแบบต่าง ๆ จึงเหมาะแก่การนำมาทำปฏิกิริยาในหลายรูปแบบมากมาย ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารที่มีความบริสุทธิ์สูง เหมาะแก่การนำมาทำปฏิกิริยา ไทเทเนียมไดออกไซด์มีการค้นพบมานานแล้ว และลักษณะโดยทั่วไปของไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีหลายรูปแบบ เช่น แบบผง แบบแผ่น และแบบแท่ง เป็นต้น ได้มาจากแร่ธาตุ Limonite ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่พบส่วนใหญ่จะมีอยู่ 3 แบบ [21] ได้แก่

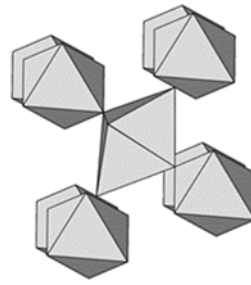
1) แบบอนาเทส (Anatase) จะค่อนข้างมีความเสถียรภาพสูงที่อุณหภูมิต่ำ ๆ ส่วนมากจะใช้ในกระบวนการออกซิเดชัน

2) แบบรูไทล์ (Rutile) จะค่อนข้างมีความเสถียรสูงที่อุณหภูมิสูงๆ ส่วนมากจะนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมในรูปแบบต่างๆมากมายหลายรูปแบบ

3) แบบบรูคไคท์ (Brookite) เป็นแร่ รูปแบบจะเป็นผลึก และผลึกนี้เรียกว่าผลึกแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) จะเป็นโครงสร้างที่เป็นผลึกแบบเตตระโกนอล (Tetragonal) ถูกนำมาใช้ในหลายด้าน เช่น การบำบัดน้ำเสีย และบำบัดมลพิษ เป็นต้น



ก. อนาเทส



ข. รูไทล์



ค. บุคไคล์

รูปที่ 2.6 โครงสร้างโมเลกุลของ  $\text{TiO}_2$  [21]

## 2.12 เทคนิคการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

โดยทั่วไปการทดสอบคุณสมบัติของ  $\text{TiO}_2$  ชนิดต่างๆ แบบฟิล์มบางทำได้โดยการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกคุณสมบัติทางกายภาพ ขนาดการกระจายตัว สภาพความชอบน้ำ ขนาดความกว้างของแถบพลังงานวิเคราะห์หาธาตุประกอบ ดังนี้ [23]

### 2.12.1 การวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ X-Ray Diffraction (XRD)

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ หรือ XRD เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยอาศัยหลักการแทรกสอด (Diffraction) ของรังสีเอ็กซ์ที่กระทบกับหน้าผลึกของวัสดุด้วยมุมต่างๆ กันและเทียบผลวิเคราะห์กับข้อมูลของสารมาตรฐาน เพื่อแยกชนิดของสารที่ทดสอบ สามารถใช้ตรวจหาลักษณะประกอบของวัสดุ ที่อยู่ในรูปของแข็งทั้งที่เป็นชิ้นตัวอย่าง และที่อยู่ในสภาพผง สามารถนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกในสารตัวอย่างเทียบกับข้อมูลมาตรฐาน (Phase analysis) นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ของ XRD จะสามารถหาลักษณะประกอบของตัวอย่างได้แล้วนั้น ยังสามารถคำนวณหาปริมาณขององค์ประกอบต่างๆ ที่อยู่ในตัวอย่าง, คำนวณหาขนาดอนุภาคของแต่ละ Unit cell, ความเครียดของตัวอย่าง, ค่าความเป็นผลึกของตัวอย่างได้อีกด้วย นอกจากนี้ ยังสามารถทำการวิเคราะห์หาลักษณะประกอบของฟิล์มบาง และคำนวณค่าความหนาของชั้นฟิล์มบางได้อีกด้วย

เครื่อง XRD เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่เลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ในผลึกของตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการของ Bragg's law หรือ

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (2.11)$$

เมื่อ

$d$  = ระยะห่างระหว่างระนาบอะตอมที่เกิดการกระเจิง

$\lambda$  = ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ (นาโนเมตร)

$n$  = 1, 2, 3,...

ในการคำนวณค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ที่ยิงผ่านชั้นผลึกที่อยู่ในตัวอย่าง โดยจะใช้ Detector ได้รับความเข้มของรังสีเอ็กซ์ ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนในมุมต่างๆ ของการทดสอบ

ข้อจำกัดของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD คือ ไม่สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างเพื่อหาปริมาณหรือหาค่าประกอบตัวอย่างที่เป็น Amorphous ได้ เนื่องจากตัวอย่างกลุ่มนี้ จะไม่เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ แต่เราอาจสามารถให้ XRD คำนวณหาปริมาณของสัดส่วนที่เป็น Amorphous ในตัวอย่างได้ โดยใช้การเปรียบเทียบกับปริมาณของสารมาตรฐานที่ทราบค่าแน่นอน

### 2.12.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและการกระจายตัวโดยอุปกรณ์ Atomic Force Microscopy (AFM)

Atomic Force Microscope (AFM) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในงานทางด้านวิทยาศาสตร์ระดับนาโนโดยเฉพาะ เช่นเดียวกับกับเครื่อง Scanning Tunneling Microscope (STM) ที่สามารถให้ภาพพื้นผิวได้ถึงอะตอมได้ โดยหลักการการทำงานโดยสังเขป คือ การใช้ปลายเข็มเล็กๆ สแกนไปบนพื้นผิวของแผ่นตัวอย่างโดยอาศัยการวัดกระแสไฟฟ้าที่อยู่บนพื้นผิวที่ทะลุผ่านมาที่ปลายเข็มตามปรากฏการณ์ทางควอนตัมพิสิคส์ เพื่อแปรไปเป็นค่าความสูงต่ำของพื้นผิว เมื่อสแกนเข็มไปที่ละจุดจนทั่วพื้นที่ที่ต้องการวัด ข้อมูลที่ได้จะเป็น ตำแหน่ง x, y และ z ซึ่งสามารถนำไปแสดงเป็นภาพสามมิติได้ สำหรับเครื่อง AFM ถูกพัฒนาขึ้นมาหลังจากเครื่อง STM และสร้างขึ้นมาด้วยหลักการพื้นฐานเดียวกับกับเครื่อง STM โดยเครื่อง AFM จะสามารถทำงานได้โดยการใช้อุปกรณ์ตรวจหรือโพรบ (probe) ที่มีปลายแหลมเล็ก (เหมือนกันกับเครื่อง STM) ซึ่งติดอยู่กับคานยื่น (cantilever) ที่สามารถโก่งงอตัวได้เคลื่อนที่สัมผัสไปบนพื้นผิวของวัตถุ (ซึ่งสามารถที่จะวัดแรงกระทำที่ปลายแหลมของโพรบได้แม้ว่าจะมีขนาดน้อยมากในระดับนาโนก็ตาม และคุณสมบัติของเครื่อง AFM ที่มีมากกว่าเครื่อง STM คือ สามารถตรวจวัดพื้นผิวที่เป็นฉนวนไฟฟ้าได้ เช่น พื้นผิวโพลีเมอร์, เซรามิกส์, คอมโพสิต, กระจกหรือแก้ว และโมเลกุลทางชีวภาพต่างๆ เป็นต้น

หลักการการทำงานของเครื่อง AFM [27] การผ่านแสงเลเซอร์ไปที่กับส่วนปลายแหลม (Tip) ของคานยื่นที่มีขนาดระดับอะตอมในระยะใกล้ ซึ่งส่วนปลายแหลมของคานนั้นจะไปสัมผัสแบบกระดกในทิศทางขึ้นและลงกับพื้นผิวของวัตถุ และเมื่อเครื่อง AFM ลากส่วนปลายแหลมผ่านโครงสร้างระดับนาโนแรงปฏิกิริยาที่กระทำในแนวตั้งฉากที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของพื้นผิวกับปลายแหลมจะดึงคาน ทำให้คานโก่งงอตัวทำให้สามารถตรวจวัดขนาดของแรงเชิงปฏิกิริสัมพันธ์ ระหว่างความสัมพันธ์เชิงตำแหน่งของส่วนปลายแหลมและพื้นผิวของวัตถุ (ทำให้สามารถทราบถึงระดับพลังงานที่เกิดขึ้นได้) ซึ่งจะถูกนำมาแปรสัญญาณร่วมกันเพื่อนำมาสร้างเป็นภาพพื้นผิวที่เป็นลักษณะเชิงโครงสร้างระดับอะตอมที่มีกำลังการขยายสูงไปแสดงบนจอภาพที่เป็นมอเนเตอร์เช่นเดียวกับกับเครื่อง STM (และโดยหลักการเดียวกันนี้ก็สามารถที่ใช้ปลายแหลมของคานนี้ในการสร้างแรงผลึก เพื่อเคลื่อนย้ายอะตอมแต่ละตัวของโครงสร้างวัสดุได้เช่นเดียวกันอีกด้วย)

วิธีการทำงานของเครื่อง AFM ที่นำมาใช้งานทางด้านวิทยาศาสตร์ระดับนาโน สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี ได้แก่

1) เป็นการสัมผัสพื้นผิวพร้อมกับการลากปลายแหลมไปบนพื้นผิวนั้นๆ ตลอดเวลา ข้อเสียของวิธีนี้ คือ จะทำให้เกิดแรงต้านในแนวของการเคลื่อนที่ซึ่งขนานกับพื้นผิวขึ้น อันอาจทำให้คานของโพรบ

ที่ใช้วัดเกิดการโก่งงอตัวหรือเกิดบิดเบี้ยวไป โดยที่มีได้เกิดจากแรงดึงดูดที่ปลายเนื่องจากแรงในแนวตั้งฉากเพียงอย่างเดียว จึงทำให้ข้อมูลความสูงของพื้นผิวที่วัดได้นั้นอาจผิดไปจากความสูงที่แท้จริง

2) เป็นการสัมผัสพื้นผิวโดยให้ปลายแหลมสัมผัสกับพื้นผิวเป็นระยะเวลาสั้นๆ ในแนวตั้งฉากกับพื้นผิว (คล้ายกับการใช้ปลายนิ้วเคาะโต๊ะเป็นจังหวะ) ด้วยลักษณะการสัมผัสแบบนี้แรงต้านในแนวตั้งฉากจะไม่เกิดขึ้น แต่เนื่องจากปลายแหลมสัมผัสพื้นผิวเป็นระยะสั้นๆ จึงทำให้เกิดการสั่นของคาน ซึ่งจะส่งผลให้ค่าสัญญาณที่ตรวจวัดได้นั้นไม่คงที่หรือไม่แม่นยำได้

2.12.3 การวิเคราะห์สภาพความชอบน้ำ (Hydrophilicity) โดยอุปกรณ์ Contact Angle การศึกษาสภาพความชอบน้ำจะทำการวิเคราะห์โดยการหามุมสัมผัสหยดน้ำ (Contact Angle) ซึ่งจะวิเคราะห์ลักษณะสภาพความชอบน้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการวัดมุมตกกระทบของหยดน้ำบนพื้นผิวตัวกลาง ความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำของผิววัสดุ (Hydrophilicity and Hydrophobicity) เป็นหนึ่งในสมบัติของวัสดุที่ใช้ แสดงการยึดเกาะของน้ำบนพื้นผิว ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะพื้นผิวของ วัสดุกับการทำมุมของหยดน้ำ โดยพื้นผิวที่เป็น Hydrophilic Surface จะมีมุมสัมผัสระหว่างน้ำกับพื้นผิวน้อย น้ำจึงสามารถแผ่กระจายบนพื้นผิวได้ ทำให้พื้นผิวมีความเปียก ส่วนผิวที่มีสมบัติเป็น Hydrophobic Surface จะมีมุมสัมผัสระหว่างน้ำกับพื้นผิวมากทำให้หยดน้ำมีลักษณะเป็นทรงกลม ดังนั้นน้ำและสิ่งสกปรกจึงไม่สามารถยึดเกาะได้

2.12.4 การวิเคราะห์หาขนาดความกว้างของแถบพลังงานโดยอุปกรณ์ UV-Vis spectrometer

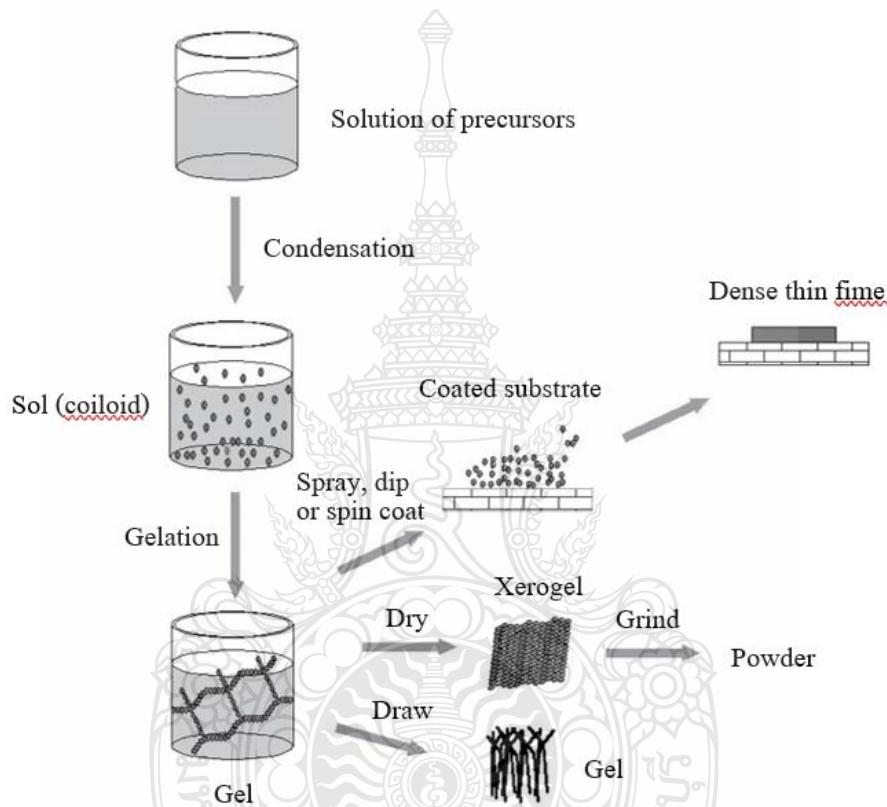
UV-Vis Spectrophotometer เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์สารโดยอาศัยหลักการดูดกลืนรังสีของสารที่อยู่ในช่วง Ultra violet (UV) และ Visible (VIS) ช่วงความยาวคลื่นประมาณ 190-1000 nm ของสารเคมีนั้น ได้แก่ สารอินทรีย์ (Organic Compound), สารประกอบเชิงซ้อน (Complex Compound), หรือสารอนินทรีย์ (Inorganic Compound) โดยนำสารตัวอย่างใส่ในเซลล์ควอร์ต (Quartz) แล้ววางในบริเวณใกล้แหล่งกำเนิดแสง สารตัวอย่างจะดูดกลืนรังสีในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน และ ปริมาณ การดูดกลืนรังสีก็ขึ้นอยู่กับ ความเข้มข้นของสารนั้น การดูดกลืนแสงของสารต่างๆ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสาร จึงสามารถวิเคราะห์ได้ในเชิงคุณภาพและปริมาณ เป็นเทคนิคที่ให้สภาพไวที่ดี และใช้กันอย่างแพร่หลาย ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) และค่าความยาวคลื่น (Wavelength) ซึ่งเรียกว่า Spectrum

2.12.5 การวิเคราะห์หาธาตุโดยวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDS)

Energy Dispersive Spectrometry (EDS) [31] เป็นดีเทคเตอร์ตัวหนึ่งที่อยู่ในระบบของ SEM สำหรับใช้วิเคราะห์ธาตุต่างๆ ที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง ซึ่งทำหน้าที่รับสัญญาณ X-Ray จากสารตัวอย่าง เช่น พื้นผิวของทองแดงในวงจรไฟฟ้า

## 2.13 ทฤษฎีโซล-เจล (Sol-gel)

กระบวนการโซล-เจล เป็นวิธีการที่ใช้เตรียมสารละลายในการสร้างวัสดุจำพวกเซรามิกและแก้ว หลักการพื้นฐาน คือ สารที่นำมาใช้ในการเตรียมการเคลือบเป็นสารประกอบโลหะหรือสารแขวนลอยที่มีขนาดอนุภาคเล็กๆ ในของเหลว และจะเปลี่ยนสถานะจากของเหลว (Sol) เป็นสถานะกึ่งของแข็งที่เรียกว่า เจล (Gel) โดยการดึงออกหรือการเพิ่มอุณหภูมิ หลังจากนั้นนำไปผ่านความร้อนที่อุณหภูมิที่เหมาะสม จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีอนุภาคขนาดเล็กมาก (ประมาณ 1-1,000 nm) [24]



รูปที่ 2.7 กระบวนการโซล-เจล [23]

### 2.13.1 การเคลือบผิวด้วยวิธีโซล-เจล

วิธีการเคลือบผิวมี 2 แบบที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป คือ การจุ่มเคลือบแบบกะ (Batch dip coating) และการจุ่มเคลือบแบบต่อเนื่อง (Continuous dip coating)

การจุ่มเคลือบแบบกะ สามารถแบ่งขั้นตอนในขณะเคลือบได้ 5 ขั้นตอน ดังนี้

- (1) ขั้นตอนการจุ่มชิ้นงาน (Immersion)
- (2) ขั้นตอนการเริ่มต้นดึงชิ้นงานขึ้น (Start up)
- (3) ขั้นตอนที่สารละลายเกาะที่ผิวชิ้นงานและเริ่มไหลย้อนกลับ (Deposition and Drainage)

(4) ขั้นตอนที่สารละลายไหลแยกออกจากชิ้นงาน (Drainage)

(5) ขั้นตอนที่สารละลายระเหย (Evaporation)

สำหรับตัวทำละลายที่ระเหยง่าย เช่น แอลกอฮอล์ ขั้นตอนการระเหยมักจะเกิดขึ้นพร้อม ๆ กับขั้นตอน 1 ถึง 5

## 2.14 จลพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติก

จลพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกสามารถอธิบายได้ด้วย Langmuir-Hinshelwood model (L-H Model) และ Eley-Rideal (E-R Model) ซึ่ง L-H Model เป็นแบบจำลอง ที่อธิบายการดูดติดผิวหน้าตัวเร่งปฏิกิริยาของสาร 2 ชนิด คือ โมเลกุลของสารอินทรีย์ และสารออกซิแดนซ์ ส่วนในกลไกปฏิกิริยา E-R Model จะเกิดขึ้นเมื่อปฏิกิริยาปฏิกิริยาปฏิกิริยาขั้นระหว่างสารออกซิแดนซ์ดูดติดผิวบนตัวเร่งปฏิกิริยา ( $h\nu_0$  หรือ Radical) กับโมเลกุลสารปนเปื้อนที่กระจายตัวในสารละลาย (Bulk solution)

$$r = -\frac{dC}{dt} = k\theta \quad (2.12)$$

$$\theta = \frac{KC}{(1+KC)} \quad (2.13)$$

$$r = -\frac{dC}{dt} = \frac{kC}{(1+Kc)} \quad (2.14)$$

โดยที่  $r$  = อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารตั้งต้นเวลาใดๆ (mol/L-min)  
 $k$  = ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (mol/L-min)  
 $K$  = ค่าคงที่การดูดติดผิว (L/mol)  
 $C$  = ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ (mol/L)

สมการดังกล่าวเมื่ออินทิเกรตแล้วจะแสดงได้ดังสมการที่ 2.15

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

โดยที่  $C_0$  = ความเข้มข้นสารอินทรีย์เบื้องต้น (mol/L)  
 $t$  = เวลาการฉายแสง (min)



สมการที่ 2.15 จะเป็นปฏิกิริยาอันดับศูนย์เมื่อความเข้มข้นของ C (mol/L) มีค่าค่อนข้างสูง ( $C > 5 \times 10^{-3}$ ) ส่งผลให้  $KC > 1$  ซึ่งในกรณีนี้อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดสูงสุดในทางกลับกันเมื่อความเข้มข้นต่ำลง ( $C < 10^{-3}$ ) ทำให้  $KC < 1$  ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

$$r = -\frac{dC}{dt} = kKC = kC \quad (2.16)$$

ซึ่ง  $k_1$  เป็นค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งโดยที่สมการ 2.16 สามารถเขียนใหม่ได้เป็นสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง เมื่อค่า  $C_0$  แสดงดังสมการที่ 2.17

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

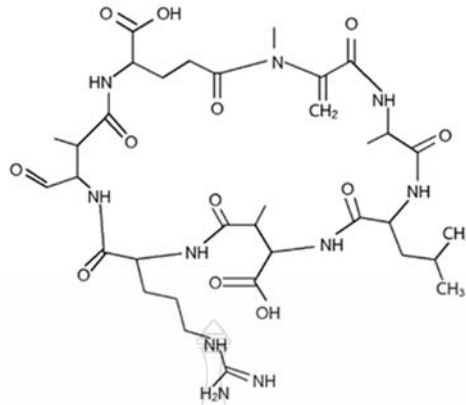
นอกจากนี้การหาอัตราการเกิดปฏิกิริยายังสามารถศึกษาผลของความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยหาความสัมพันธ์ของความเข้มข้นเริ่มต้นมีผลต่ออัตราเริ่มต้น (Initial rate) โดยทั่วไปจะทำการวัดอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้น เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปซึ่งสารตั้งต้นจะมีความเข้มข้นลดลง สำหรับความสัมพันธ์อัตราการเกิดปฏิกิริยาความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีเรียกว่ากฎอัตรา (Rate Law) ค่าคงที่อัตรา (Rate constant) ในกรณีที่สารตั้งต้นมีความเข้มข้น (C) เปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ (P) สามารถเขียนสมการกฎอัตราได้ดังสมการที่ 2.18

$$-\frac{dC}{dt} = kC^n \quad (2.18)$$

โดยที่  $\frac{dC}{dt}$  = อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น C ที่เวลาต่าง ๆ (mol/L-min)  
 $k$  = ค่าคงที่ปฏิกิริยา  
 $n$  = อันดับของปฏิกิริยา

## 2.15 โครงสร้างสารที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก

โครงสร้างสารที่เปลี่ยนแปลงผ่านการกำจัดสารด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก พบว่า ไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $\bullet OH$ ) ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการโฟโตออกซิเดชันทำปฏิกิริยากับพันธะที่ไม่อิ่มตัวของ Adda chain ส่งผลให้มีการเชื่อมสภาพพันธะและวงแหวนเบนซินของ Adda ส่งผลให้เปลี่ยนแปลงโครงสร้างสารพิษจากสารร้ายจึงลดลง [25]



รูปที่ 2.9 โครงสร้างสำหรับ *M. aeruginosa* หลังผ่านการกำจัดสาหร่ายด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก [25]

## 2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Xin Wang และคณะ [26] ได้ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย *M. aeruginosa* ด้วยกระบวนการ Photocatalytic โดยมี  $\text{TiO}_2$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วย Poly dimethyl diallyl ammonium chloride (PDDA) ความเข้มข้นของ PDDA อาจมีผลต่อสภาวะและการกระจายตัวของอนุภาค PDDA และโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา PDDA @ NPT-EGC ที่มี 0.2% มีประสิทธิภาพในการดูดกลืน และกระบวนการ Photocatalytic สูงสุด เมื่อเทียบกับ NPT-EGC ในสภาวะไร้แสง หลังจาก 3 hr เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 70.4 เป็นร้อยละ 88.9 และประสิทธิภาพในการกำจัดในสภาวะมีแสง หลังจาก 2 hr มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 77.8% เป็น 92.6% นอกจากนี้ 0.2PDDA@NPT-EGC มีประสิทธิภาพสูงสุดร้อยละ 96.55% หลังจากผ่านกระบวนการ Photocatalytic เป็นเวลา 3 hr พบว่าโมเลกุลของสาหร่าย *M. aeruginosa* ค่อยๆเปลี่ยนแปลงชี้ให้เห็นถึงการกำจัด Biototoxicity และลดจำนวนสาหร่ายลงได้

Liu Yang และคณะ [27] ศึกษาการใช้สารละลายฟอสฟอรัสด้วยสาหร่าย 2 ชนิด คือ *Microcystis* และ *Anabeana* พบว่า สารละลายฟอสฟอรัสมีความสำคัญต่อการเติบโตของสาหร่าย ทั้ง 2 ชนิดข้างต้น เมื่อมีปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้สาหร่ายมีการเติบโตมากยิ่งขึ้น จึงสรุปได้ว่าฟอสฟอรัสมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย

Xin Wang และคณะ [28] ได้ศึกษาการลดการกระจายของสาหร่าย *M. aeruginosa* ด้วยกระบวนการ Photocatalytic ด้วย Graphite covered carbon พบว่าประสิทธิภาพจากการกำจัดด้วยกระบวนการ Photocatalytic องค์ประกอบของแกรไฟต์บนชั้นคาร์บอน ด้วย Graphitic carbon nitride ( $\text{g-C}_3\text{N}_4$ ) และ Nitrogen-Phosphorus Co-doped titanium dioxide (NP- $\text{TiO}_2$ ) ซึ่งได้ตั้งชื่อว่า AP-EGC-CT ใช้ในการกำจัดสาหร่าย *M. aeruginosa* แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงจาก AP-EGC-CT และ  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  ซึ่ง AP-EGC-CT 5 wt%  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  มีประสิทธิภาพในการกำจัดดีที่สุดที่ร้อยละ 98.5% หลังจากผ่านไป 2 hr

Xiaoge Wu และคณะ [29] ศึกษาการกำจัด *M. aeruginosa* โดยใช้กระบวนการ Fenton ที่ความถี่ต่ำ (20kHz, 0.42 W/ml) และความถี่สูง (800kHz, 0.07 W/ml) ตามลำดับ ที่ความถี่ต่ำสามารถลดจำนวนเซลล์สาหร่ายดังกล่าวจาก  $4.19 \times 10^6$  cells/mL เป็น  $0.45 \times 10^6$  cells/mL หลังจากเวลาผ่านไป 5 min ส่วนที่ความถี่สูงเท่ากับ  $2.33 \times 10^6$  cells/mL หลังจากเวลาผ่านไป 5 min นอกจากนี้ยังพบว่าเกิดการออกซิเดชันนอกเซลล์อย่างรุนแรงสามารถลดจำนวนเซลล์สาหร่ายได้

Yating Zhu และคณะ [30] ผลการศึกษาการใช้ Bisulfite-activated permanganate technology (PM / BS) ในการกำจัด *Microcystis aeruginosa* ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพด้วยกระบวนการ PM/BS สามารถทำให้เซลล์ของเซลล์สาหร่ายมีประสิทธิภาพลดลงของขนาดเซลล์ของสาหร่าย นอกจากนี้ยังศึกษาผลของการปลดปล่อยสาร Macromolecular โดยการเพิ่มปริมาณ  $\text{KMnO}_4$  จาก 3.0 mg/L เป็น 7.0 mg/L แสดงให้เห็นว่าสามารถลดลงเท่ากับ 40.0 mg/L การศึกษาครั้งนี้ชี้ให้เห็นว่ากระบวนการ PM / BS อาจเป็นเทคโนโลยีที่สามารถช่วยในการกำจัดสาหร่ายก่อนการผลิตน้ำประปา

Di Wu และคณะ [31] ทำการศึกษาจากสาหร่าย *Microcystis aeruginosa* ที่ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่แตกต่างกัน (0.1, 1, 10, 50 และ 100 mg/L) ผลการศึกษาพบว่า  $\text{TiO}_2$  มีประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่าย ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีประสิทธิภาพในการสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่าย เท่ากับ (16.03%  $\pm$  2.50% และ 54.13%  $\pm$  0.93%) ผลลัพธ์เหล่านี้บ่งชี้ว่าความเข้มข้นสูงของ  $\text{TiO}_2$  ส่งผลให้ความเข้มข้นของ MCs มีความเข้มข้นลดลง

Zhiying Lu และคณะ [32] ศึกษาสารพิษของ *Microcystis aeruginosa* แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์ของเซลล์ที่ถูกกำจัด ที่ 50 mg/L เป็นเวลา 48 hr ทำให้เปอร์เซ็นต์การสูญเสียความสมบูรณ์ของเซลล์ เท่ากับ 56.7% ทำให้การแบ่ง DNA ของ *M. aeruginosa* ที่ความเข้มข้นจาก 2 ถึง 50 mg/L ซึ่ง ผลการทดลองเหล่านี้ชี้ให้เห็นว่า DNA และ Cell เกิดความเสียหายจากการเกิดกระบวนการออกซิเดชันส่งผลต่อสารพิษจากสาหร่าย *M. aeruginosa*

Hong-Qiang Wang และคณะ [33] ทำการศึกษาผลกระทบของสาหร่าย *Microcystis aeruginosa* ในกระบวนการตกตะกอน ผลการศึกษาพบว่าจากความหนาแน่นสาหร่าย *Microcystis aeruginosa* เริ่มต้นคือ  $10^6$  Cell/ml มีประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายได้ถึง 88.4% เมื่อเพิ่มความเข้มข้น  $\text{KMnO}_4$  ผลการวิจัยพบว่าสามารถกำจัดได้ถึง 9.44% เซลล์ของ *M. aeruginosa* ถูกกำจัดออกไปอย่างสมบูรณ์ สามารถนำมาใช้ในการควบคุมปริมาณสาหร่ายได้

Kumar Singh และคณะ [34] ทำการศึกษา Cyanobacteria สามชนิดคือ *Anabaena sp.* PCC7120, *Anabaena L31* และ *Anabaena doliolum* ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการได้รับแคดเมียมนั้นมีผลกระทบต่อความสามารถในการสังเคราะห์แสง และความสามารถในการตรึงไนโตรเจน สาหร่ายทั้ง 3 ชนิดมีผลในทิศทางเดียวกัน ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายทั้งสามชนิดพบว่า *Anabaena L31* เป็นสายพันธุ์ที่ต้านทานได้ดีกว่าอีก 2 ชนิด คือ *Anabaena PCC7120* และ *Anabaena doliolum*

King Kodawska และคณะ [35] ศึกษาการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Anabaena sp.* PCC7120 ที่สภาวะอุณหภูมิต่าง ๆ ได้แก่ 15 °C, 23 °C, 30 °C และ 37 °C พบว่าอุณหภูมิมีผลต่อการ

ทำงานของการเจริญเติบโตของเซลล์สาหร่าย *Anabaena* ซึ่งจะเปลี่ยนไปตามสภาพอุณหภูมิตามลำดับอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น

Joao P.A และคณะ [36] ได้ศึกษา สาหร่าย *Anabaena* ที่สามารถผลิตสารพิษที่ส่งผลต่อระบบประสาทในประเทศออสเตรเลีย ได้ทำการสำรวจทางสัตววิทยาพบว่ามีสาหร่าย *Anabaena* จำนวน 28 ชนิด จาก 16 ตำแหน่งการเก็บตัวอย่าง ไม่พบความแตกต่างระหว่างขนาด และความเป็นพิษจากตำแหน่งจุดเก็บตัวอย่างทั้ง 16

Shilpi Verma และคณะ [37] ศึกษาการประยุกต์ใช้กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงจาก Peroxymonosulfate (PMS)  $\lambda = 260 \text{ nm}$  พบว่าการสลายตัวของ Anatoxin-a เท่ากับ 98.6% กรดฮิวมิกช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายของ Anatoxin-a เมื่อเปรียบเทียบกับระบบ UV / PMS /  $\text{Fe}_3^+$  ด้วยระบบ UV / PMS /  $\text{Cu}_2^+$  การเสื่อมสภาพถึง 99% ในเวลาการฉายรังสีที่ 10 min ผลการศึกษาครั้งนี้ชี้ให้เห็นว่ากระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงของ UV-C / PMS นั้นมีประสิทธิภาพมากในการย่อยสลาย Anatoxin-a แม้ในแหล่งน้ำธรรมชาติ



### บทที่ 3

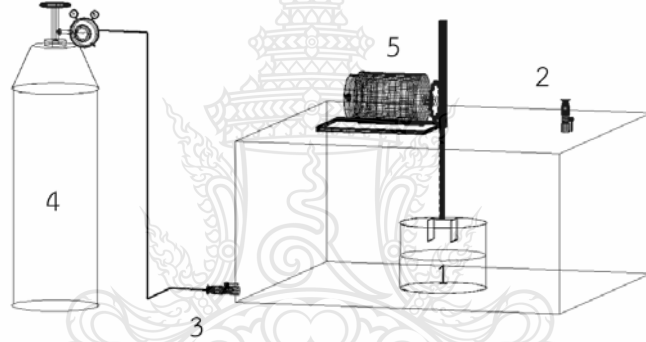
#### วิธีการดำเนินการวิจัย

การกำจัดสารพิษที่เกิดขึ้นจากสาหร่ายโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ซึ่งใช้ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการเทคนิคโฟโตคะตะลิติก โดยมีวิธีการดำเนินงานดังนี้

#### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

##### 3.1.1 อุปกรณ์เคลือบผิวตัวเร่งปฏิกิริยา

การเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์โดยใช้  $\text{TiO}_2$  แบบฟิล์มบางที่เตรียมขึ้นลงบนแผ่นกระจก ขนาดกว้าง 9.0 x ยาว 11.0 x สูง 0.4 cm โดยใช้วิธีจุ่มเคลือบผิว (Dip coating) อุปกรณ์ที่ใช้ในการเคลือบผิวตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 3.1



1. ภาชนะบรรจุสารเคลือบ
2. วาล์วทางออก  $\text{N}_2$
3. วาล์วทางเข้า  $\text{N}_2$
4. ถัง  $\text{N}_2$
5. มอเตอร์ไฟฟ้า

รูปที่ 3.1 อุปกรณ์เคลือบผิวตัวเร่งปฏิกิริยาปฏิกิริยา

### 3.1.2 สารเคมี

1. สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา  
1) ไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ AR Grade ผู้ผลิต Sigma-Aldrich chemistry

2) ไอโซโพรพานอล (Isopropanol) AR Grade

3) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) AR Grade

2. สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสาหร่าย

1) Sodium nitrate ( $\text{NaNO}_3$ )

2) Dipotassium phosphate ( $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ )

3) Magnesium Sulphate ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ )

4) Calcium chloride dihydrate ( $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )

5) Citric acid

6) Ferric ammonium Citrate

7) EDTA (Disodium magnesium salt)

8) Sodium carbonate ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )

9) Trace metal mix

### 3.1.3 สายพันธุ์สาหร่าย

1. *Microcystis aeruginosa* TISTR NO. 8305

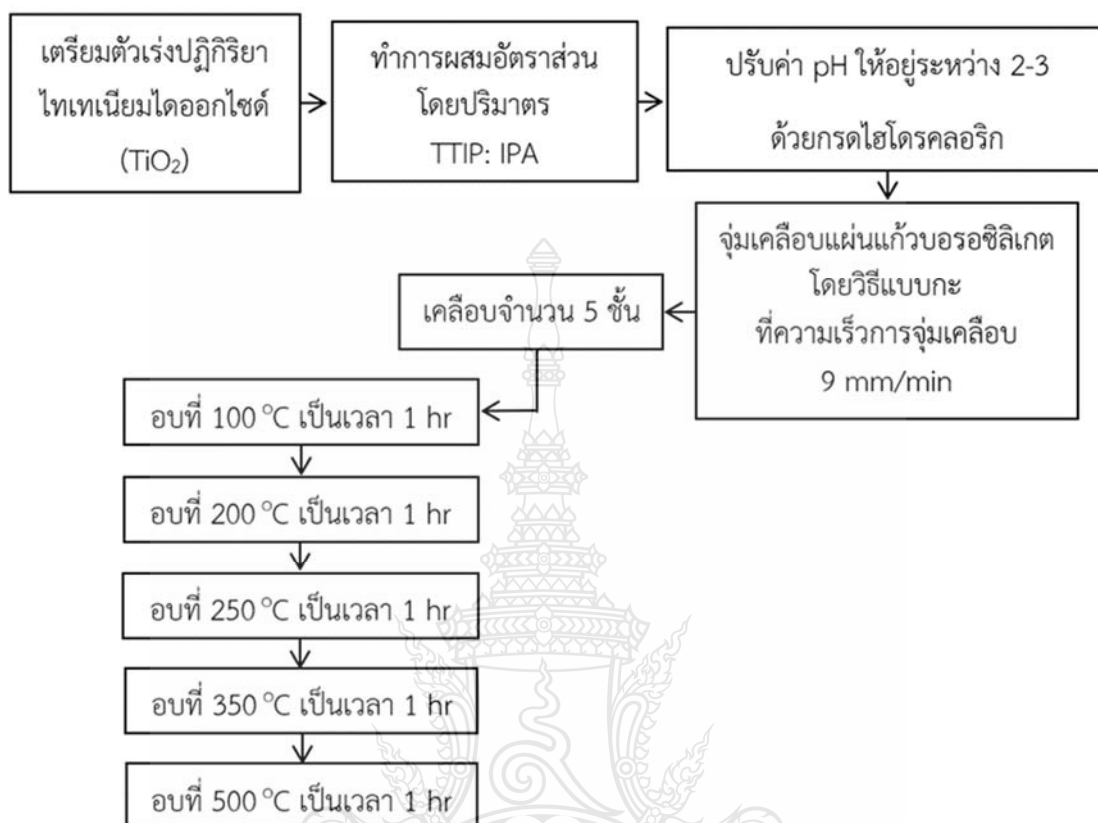
2. *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074

## 3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการกำจัดสารพิษที่เกิดขึ้นจากสาหร่ายโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก

### 3.2.1 เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2$



รูปที่ 3.3 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  แบบฟิล์มบาง

#### 1) การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ $\text{TiO}_2$

ใช้เทคนิค Sol-Gel ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  แบบฟิล์มบาง โดยใช้ไทเทเนียมเตตระไฮโดรพรอกไซด์ (TTIP) เป็นสารตั้งต้นในตัวทำละลายไอโซโพรพานอล (IPA) ที่อุณหภูมิห้อง และปรับพีเอช (pH) ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้นให้อยู่ระหว่าง 2-3 ซึ่งมีขั้นตอนการเตรียมดังนี้

1. ผสมสารตั้งต้น TTIP: IPA อัตราส่วนเท่ากับ 1:15 โดยปริมาตร พร้อมทำการกวนที่อุณหภูมิห้อง
2. ปรับ pH ให้มีค่า 2-3 ด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น
3. กวนสารละลายเป็นเวลา 1 hr จากนั้นเก็บทิ้งไว้เป็นเวลา 24 hr
4. นำสารละลายมาจุ่มเคลือบแบบบะ ขณะจุ่มเคลือบทำการเป่าไล่อากาศด้วยแก๊สไนโตรเจน สำหรับตัวกลางที่ใช้ คือ แผ่นแก้วบอโรซิลิเกตโดยทำการจุ่มเคลือบเป็นจำนวน 5 ชั้น
5. นำแผ่นแก้วดังกล่าวไปอบที่อุณหภูมิต่าง ๆ ครั้งละ 1 hr

### 3.2.2 การวิเคราะห์ลักษณะกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  แบบฟิล์มบาง โดยการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ลักษณะพื้นผิว ขนาดอนุภาค ความขรุขระเฉลี่ย พื้นที่ผิวปรากฏ และขนาดช่องว่างพลังงาน สำหรับรายละเอียดของวิธีวิเคราะห์ และอุปกรณ์ในการวิเคราะห์ แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ วิธีวิเคราะห์และอุปกรณ์

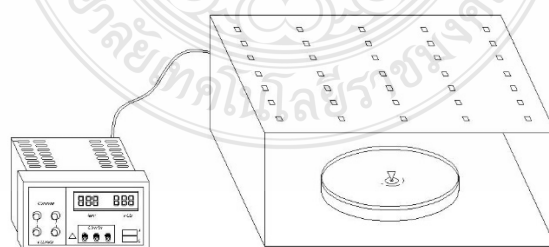
พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์/อุปกรณ์
ลักษณะพื้นผิว	AFM/Asylum Research MFP-3DBIO
ขนาดอนุภาค พื้นที่ผิวปรากฏความขรุขระเฉลี่ย	Software/ Gwyddion V.2.22
ขนาดช่องว่างพลังงาน	UV-Vis spectrometer/ Lambda 650 Perkin Elmer

### 3.3 การหาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายในน้ำเสียสังเคราะห์

#### 3.3.1 การหาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์

ทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายทั้งสองชนิด ได้แก่ *Microcystis aeruginosa* TISTR NO.8305 และ *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074 จากศูนย์จุลินทรีย์ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย เพาะเลี้ยงในอาหารสูตร BG-11 ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ml โดยให้แสงสลับกับไม่ให้แสงเป็นเวลา 12 hr ระดับความเข้มแสง 3,000 Lux ที่อุณหภูมิ 28 °C ความหนาแน่นเซลล์สาหร่ายมีค่าเริ่มต้นอยู่ในช่วง  $10^2$ ,  $10^4$ ,  $10^6$  และ  $10^8$  cells·mL<sup>-1</sup>

นำสาหร่ายที่เตรียมขึ้นเติมลงใน Petri dish ที่ผ่านการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  แบบฟิล์มบางปริมาตร 30 mL และทำการให้แสงจากแหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ตจากหลอด UVA ที่มีพลังงานต่ำโดยมีความเข้มแสงเฉลี่ยเท่ากับ  $12 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$  ถึงปฏิกรณ์แบบแบทช์สำหรับทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.4



1. แผ่นกระจก เคลือบ  $\text{TiO}_2$
2. สาหร่ายที่เตรียมในอาหาร BG 11
3. หลอด UVA
4. แหล่งจ่ายไฟฟ้า

รูปที่ 3.4 ถังปฏิกรณ์แบบแบทช์สำหรับทดลอง



หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงจำนวนเซลล์ของสาหร่ายในช่วงเวลาต่าง ๆ ดังนี้ 10, 30, 60, 120, 150 และ 180 min ตามลำดับ โดยใช้วิธีการนำเซลล์สาหร่ายมาแยกให้ออกจากกันเป็นเซลล์เดี่ยว ๆ ด้วยเครื่องอัลตราโซนิค ยี่ห้อ GT Sonic รุ่น GT-2227QTS หลังจากนั้นนับจำนวนเซลล์ด้วยอุปกรณ์ Haemocytometer และทำการนับจำนวนเซลล์ต่อหน่วยปริมาตรด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง Olympus รุ่น CX 22 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายทำการเปรียบเทียบกับชุดควบคุม 1 ในสภาวะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  แบบฟิล์มบางแต่ไม่มีการให้แสงระหว่างการทดลอง และชุดควบคุมที่ 2 ในสภาวะควบคุมสาหร่ายที่มีการเจริญเติบโตในอาหารสูตร BG-11 ตามลำดับ

### ตารางที่ 3.2 ชุดควบคุมการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์

ชุดควบคุม	$\text{TiO}_2$	UV
ชุดทดลอง	✓	✓
ชุดควบคุม 1	✓	✗
ชุดควบคุม 2	✗	✗

#### 3.3.2 การหาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายในถังปฏิกรณ์ชนิดไหลต่อเนื่อง

- เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โดยให้ค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ  $10^2 \text{ cells}\cdot\text{mL}^{-1}$
- อัตราการไหลเวียนน้ำในถังปฏิกรณ์ชนิดไหลต่อเนื่องที่  $30 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  ช่วงอัตราการไหลดังกล่าวเป็นค่ามาตรฐานในการผลิตน้ำประปาสำหรับหมู่บ้านของแบบโยธาธิการ แบบ ข [18]
- หลังจากนั้นทำการวางแผนกระจกที่เคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  บนรางปฏิกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 3.3
- เติมน้ำเสียสังเคราะห์เข้าสู่ระบบที่อัตราการไหล  $30 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  ไหลผ่านผิวกระจกเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  แบบฟิล์มบาง ทำการศึกษาภายใต้สภาวะที่มีแสงจากดวงอาทิตย์ ที่มีความเข้มแสงเฉลี่ย  $1,240 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$  เป็นเวลา 240 min
- การวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์ ที่เวลา 0, 60, 120, 180 และ 240 min ตามลำดับ สำหรับวิธีวิเคราะห์ในพารามิเตอร์ดังกล่าวแสดงดังตารางที่ 3.2
- การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายที่เวลา 0, 60, 120, 180 และ 240 min ตามลำดับสำหรับวิธีวิเคราะห์ในพารามิเตอร์ดังกล่าวแสดงดังตารางที่ 3.2
- การวิเคราะห์ค่า ATP ทำการวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ Lumitester PD-20-Kikkoman (ประเทศญี่ปุ่น) ทำการตรวจจับแสงจากการเปลี่ยนแปลงของเอนไซม์ที่ขึ้นกับค่า ATP โดยเฉพาะอย่างยิ่ง D-luciferin ใน ATP ได้เปลี่ยนเป็น Oxyluciferin โดย Luciferase จากการสร้างแสง ซึ่งปริมาณของความเข้มแสงวัดโดย Lumitester และผลที่ได้แสดงเป็นหน่วยสัมพัทธ์แสง (RLU) โดยให้มีความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายเริ่มต้นอยู่ในช่วงค่า  $10^2 \text{ cells}\cdot\text{mL}^{-1}$  เวลา 0, 60, 120, 180 และ 240 min

8. การทดลองการกำจัดสารพิษ *M. aeruginosa* TISTR 8305 และ *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074 โดยใช้เครื่อง Microplaterereader ของ BIOCHROM Model EZ Read 2000

8.1 การเตรียมตัวอย่าง

8.1.1 กรองน้ำตัวอย่างด้วยกระดาษกรอง GF/C แล้วตวงน้ำตัวอย่าง ปริมาตร 5 mL เก็บในขวดสีชาถ้ายังไม่ได้ใช้ให้เก็บในตู้ -20 °C

8.2 การเตรียมสารละลายฟอสฟาเตส (Phosphatase solution)

8.2.2 เติมน้ำละลายฟอสฟาเตส ปริมาตร 3 mL ลงในหลอดเขย่าให้เข้ากัน

8.2.3 นำตัวอย่างไปไว้ในที่อุณหภูมิห้อง  $23 \pm 3$  °C เวลา 60 min สารละลาย ชนิดนี้ควรเตรียมใหม่ทุกครั้งก่อนใช้

8.3 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

8.3.1 เติมน้ำละลายมาตรฐาน Microcystin และ *Anabaena* ลงในช่องๆละ 50  $\mu$ L โดย ช่อง A1 และ A2 เติมน้ำละลายมาตรฐานไมโครซิสติน ความเข้มข้น 0.25  $\mu$ g/L ช่อง B1 และ B2 เติมน้ำละลายมาตรฐานไมโครซิสติน ความเข้มข้น 0.50  $\mu$ g/L ช่อง C1 และ C2 เติมน้ำละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้น 1.00  $\mu$ g/L และช่อง D1 และ D2 เติมน้ำละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้น 2.50  $\mu$ g/L

8.3.2 เติมน้ำตัวอย่างที่ผ่านการกรองลงในช่องๆละ 50  $\mu$ L

8.3.3 เติมน้ำละลายฟอสฟาเตส ลงในช่องๆละ 70  $\mu$ L

8.3.4 เติมน้ำละลายโครโมจีนิกซับสเตรทลงในช่องๆละ 90  $\mu$ L ผสมสารทั้งหมด ด้วยการเขย่าเป็นทิศทางสี่ทิศทาง

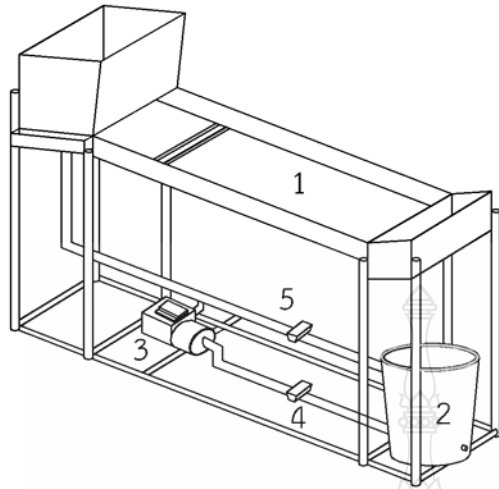
8.3.5 ปิดด้วยแผ่นฟิล์ม นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 °C เวลา 60 min

8.3.6 เติมน้ำละลายหยุดปฏิกิริยาลงในแต่ละช่องๆละ 70  $\mu$ L ผสมสาร ทั้งหมดด้วยการเขย่าเป็นทิศทางสี่ทิศทาง นำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 405 nm

การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายทำการเปรียบเทียบกับชุดควบคุม 1 ใน สภาวะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  แบบฟิล์มบางแต่ไม่มีการให้แสงระหว่างการทดลอง

**ตารางที่ 3.3** ชุดควบคุมการทดลองในถังปฏิกรณ์ชนิดไหลต่อเนื่อง

ชุดควบคุม	$\text{TiO}_2$	UV
ชุดทดลอง	✓	✓
ชุดควบคุม 1	✓	✗



1. รางติดแผ่นกระจกเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$
2. ถังเก็บน้ำ
3. ปั๊มน้ำ
4. วาล์วเวียนน้ำกลับเข้าระบบบำบัด
5. วาล์วปรับอัตราการไหล

รูปที่ 3.5 ถังปฏิกรณ์ชนิดไหลต่อเนื่อง

ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์

พารามิเตอร์	หน่วย	วิธีวิเคราะห์/อุปกรณ์
ความหนาแน่นของเซลล์สาหร่าย	cells/mL	Haemocytometer และ Microscope
ปริมาณคลอโรฟิลล์	$\mu\text{g/L}$	Chlorophyll determination methods
ค่าสารพิษ	$\mu\text{g/L}$	Microplatereader ของ BIOCHROM Model EZ Read 2000
ATP	-	Lumitester PD-20-Kikkoman

3.3.3 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกในการกำจัดสารพิษที่เกิดขึ้นจากสาหร่าย

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกในการกำจัดสารพิษที่เกิดขึ้นจากสาหร่ายที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยความหนาแน่นในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์เซลล์สาหร่ายเริ่มต้นอยู่ในช่วงค่า  $10^2$ ,  $10^4$ ,  $10^6$  และ  $10^8$  cells·mL<sup>-1</sup> ในอาหารสูตร BG-11 และในถังปฏิกรณ์แบบราง เซลล์สาหร่ายเริ่มต้นอยู่ในช่วงค่า  $10^2$  cells·mL<sup>-1</sup> นำมาทดลองเพื่อหาค่าจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาคะตะลิติก ที่เวลาต่างๆกัน คือ 10, 30, 60, 120, 150 และ 180 min ตามลำดับ

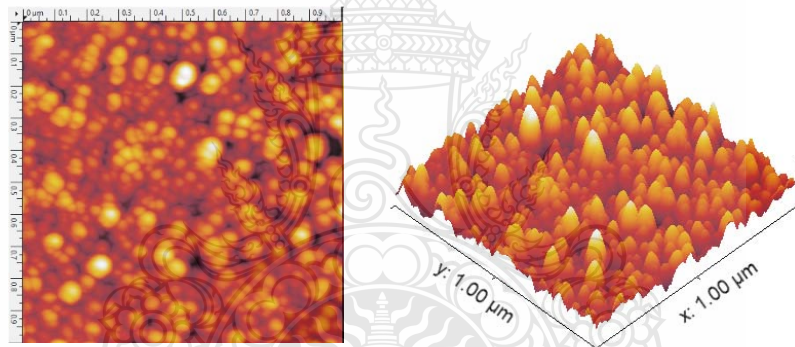
## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ทำการศึกษาการกำจัดสารพิษที่เกิดขึ้นจากสาหร่ายโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก สามารถอธิบายผลการทดลองได้ดังนี้

#### 4.1 ลักษณะกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

จากการศึกษาลักษณะทางภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  แบบฟิล์มบาง วิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ Atomic force microscopy (AFM) รุ่น Asylum research MFP-3DBIO การวิเคราะห์หาขนาดอนุภาคความขรุขระเฉลี่ย (RMS) และพื้นที่ผิวปรากฏของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  แบบฟิล์มบาง ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว Gwyddion version 2.22 และขนาดช่องว่างพลังงานวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ UV-Vis spectrometer รุ่น Lambda 650 Perkin Elmer



รูปที่ 4.1 ลักษณะพื้นผิวทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

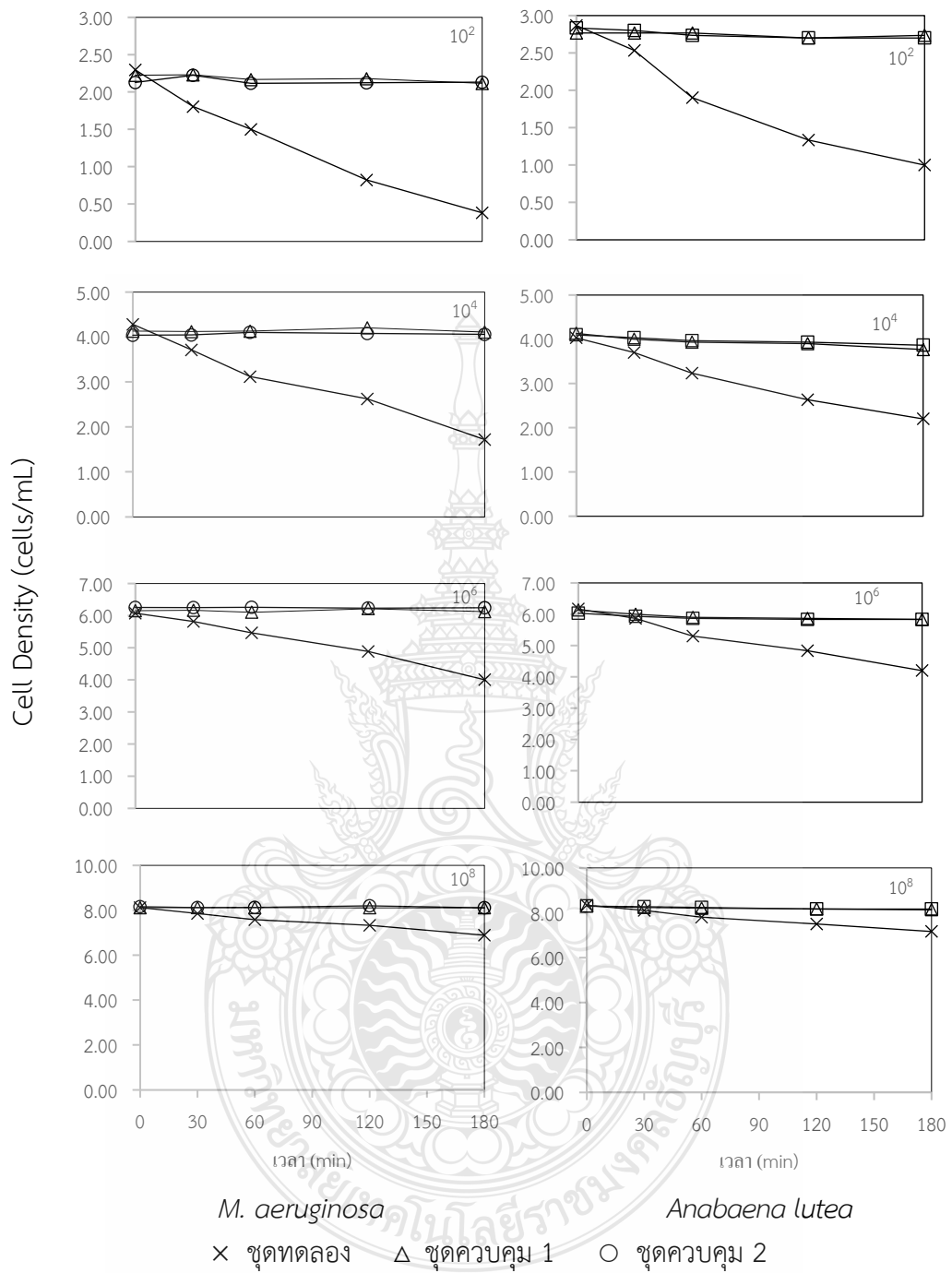
จากผลการศึกษา พบว่า อนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  แบบฟิล์มบางที่เตรียมสามารถเคลือบและยึดเกาะอยู่บนพื้นผิวของแผ่นกระจกมีลักษณะกระจายทั่วบริเวณพื้นผิวอย่างสม่ำเสมอ โดยมีขนาดอนุภาค  $\text{TiO}_2$  อยู่ในช่วง 30-70 nm สำหรับพื้นที่ผิวปรากฏมีขนาด  $1 \mu\text{m}^2$  มีค่าเท่ากับ  $1.02 \mu\text{m}^2$  ค่าความขรุขระเฉลี่ยเท่ากับ 1.52 nm รวมทั้งมีขนาดช่องว่างพลังงาน เท่ากับ  $3.25\text{eV}$  จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  แบบฟิล์มบางที่เตรียมมีระดับขนาดอนุภาคในระดับนาโน ซึ่งมีขนาดช่องว่างแถบพลังงานอยู่ในช่วงการตอบสนองต่อคลื่นอัลตราไวโอเล็ตได้เป็นอย่างดี เมื่อมีแสงที่มากเกินพอส่งผลให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ เคลื่อนที่ไปสู่แถบการนำไฟฟ้าได้ [38-39]

## 4.2 ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย

### 4.2.1 การหาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์

จากการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์สำหรับสาหร่าย ทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ *M. aeruginosa* TISTR 8305 และ *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074 จากความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายเริ่มต้นที่  $10^2$ ,  $10^4$ ,  $10^6$  และ  $10^8$  cells·mL<sup>-1</sup> เพาะเลี้ยงในอาหารสูตร BG-11 พบว่าเซลล์สาหร่ายทั้ง 2 ชนิดมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาการทดลองมากขึ้น โดยสาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุด เท่ากับ 83.33%, 59.97%, 34.09% และ 15.17% ตามลำดับ ที่เวลา 180 min และสำหรับประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่าย *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุด เท่ากับ 65.12%, 45.45%, 31.89% และ 14.00% ตามลำดับ ที่เวลา 180 min จากผลประสิทธิภาพข้างต้นแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305 มีประสิทธิภาพสูงกว่าสาหร่าย *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074 เนื่องจาก สาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305 มีขนาดเซลล์ที่เล็กและผนังเซลล์บางกว่าสาหร่าย *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074 จึงทำให้เซลล์ถูกทำลายได้ดีกว่า *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074 สำหรับผลของการทดลองในชุดควบคุมที่ 1 และ 2 พบว่า ทั้ง 2 ชุดควบคุมไม่พบการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของสาหร่ายอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากความหนาแน่นของสาหร่ายเริ่มต้นมีค่าสูงมากขึ้น เมื่อแสงที่มีพลังงานมากพอกระทบกับพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา TiO<sub>2</sub> ที่เตรียมทำให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์เคลื่อนที่ไปสู่แถบการนำไฟฟ้าได้ จากกระบวนการโฟโตคะตะลิติกพร้อมทั้งมี •OH และ •O<sub>2</sub><sup>-</sup> ดังแสดงในสมการที่ 4.1-4.4 ในขณะที่พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามีปริมาณเท่าเดิม จึงส่งผลให้ความหนาแน่นของสาหร่ายที่ถูกกำจัดมีปริมาณที่ลดลง [40] แสดงดังรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ความหนาแน่นของสาหร่ายเริ่มต้นกับเวลา แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นเริ่มต้นของสาหร่ายมีผลโดยตรงกับประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่าย [41-42]

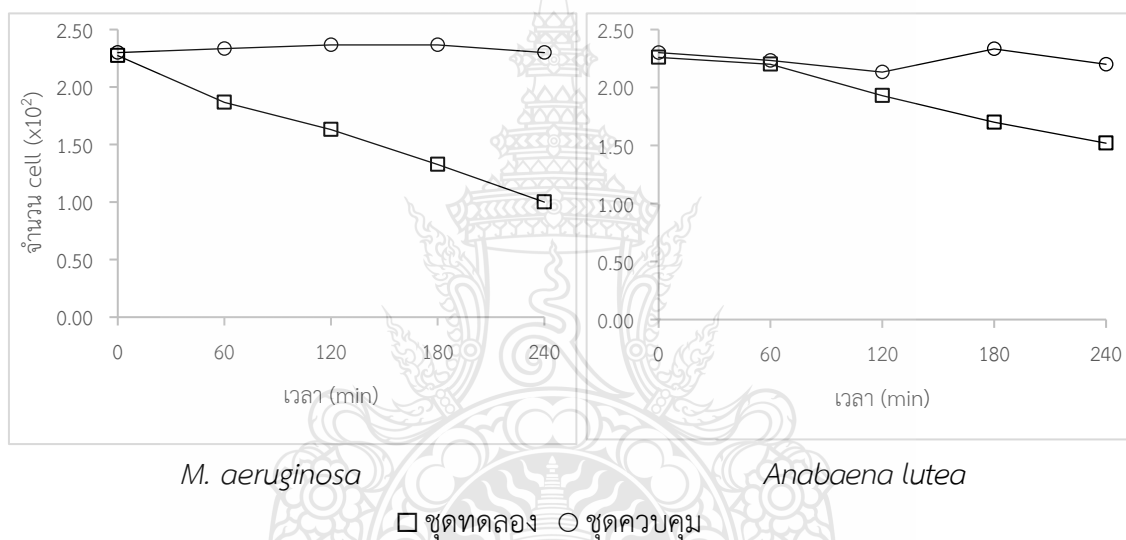




รูปที่ 4.2 ความหนาแน่นของเซลล์สาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305 และ *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กับเวลา

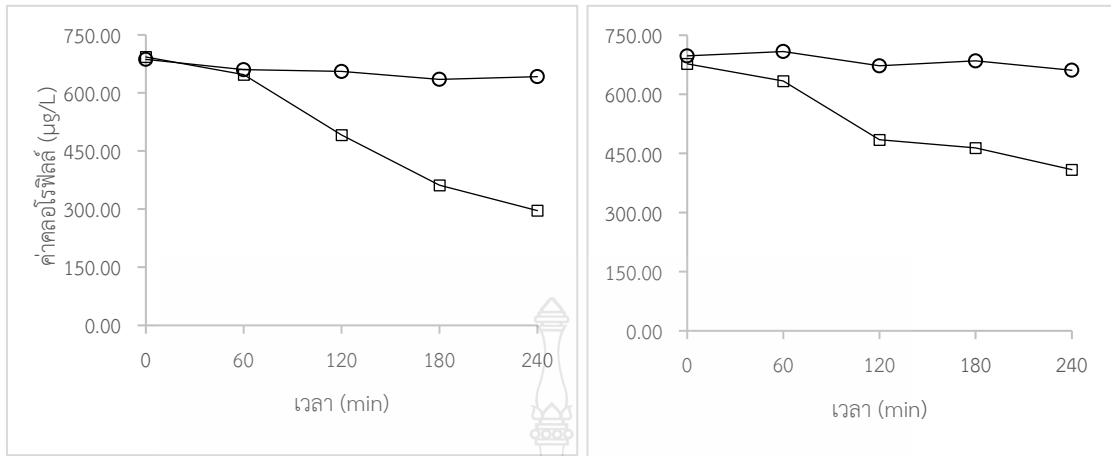
#### 4.2.2 การหาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายด้วยถังปฏิกรณ์แบบบราว

ผลการทดลอง พบว่า สาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305 และ *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074 ทั้ง 2 ชนิดภายใต้กระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่มีความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายเริ่มต้นอยู่ในช่วงเท่ากับ  $10^2$  cells/mL เนื่องจากผลการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์ในชุดควบคุมทั้ง 2 ไม่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ จึงเลือกชุดควบคุมเพียงชุดเดียวในการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบบราว มีจำนวนเซลล์ลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาการทดลองมากขึ้น โดยที่เวลา 240 min สาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305 มีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 49.49% และ *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074 มีค่าสูงสุดเท่ากับ 32.84% ที่อัตราการไหล  $30 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  สำหรับในชุดทดลองของสาหร่ายทั้ง 2 ชนิด พบว่า มีอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของเซลล์น้อยมากรวมถึงปริมาณคลอโรฟิลล์ แสดงดังรูปที่ 4.3 และ 4.4



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305 และ *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074 กับเวลา

จากรูปที่ 4.3 ผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305 และ *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074 มีจำนวนลดลงหลังจากกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่มี  $\text{TiO}_2$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบฟิล์มบางเมื่อที่สภาวะที่มีแสงจากดวงอาทิตย์เป็นเวลา 240 min มีความเข้มแสงเฉลี่ยเท่ากับ  $1,240 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$  จากกระบวนการข้างต้นส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันเช่นเดียวกับแบบแบทช์ [43-46] ซึ่งในส่วนถังปฏิกรณ์แบบแบทช์มีประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายสูงกว่าแบบถังปฏิกรณ์ชนิดไหลต่อเนื่อง เนื่องจากในถังปฏิกรณ์ชนิดไหลต่อเนื่องในรางนั้นมีการไหลเวียนของน้ำตลอดเวลาทำให้การสัมผัสไม่ทั่วถึง แต่ในขณะที่แบบแบทช์มีการสัมผัสทั่วถึงตลอดเวลาการทดลองจึงส่งผลให้ความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายที่ลดลงของถังปฏิกรณ์ทั้งสองแตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 4.2



*M. aeruginosa*

*Anabaena lutea*

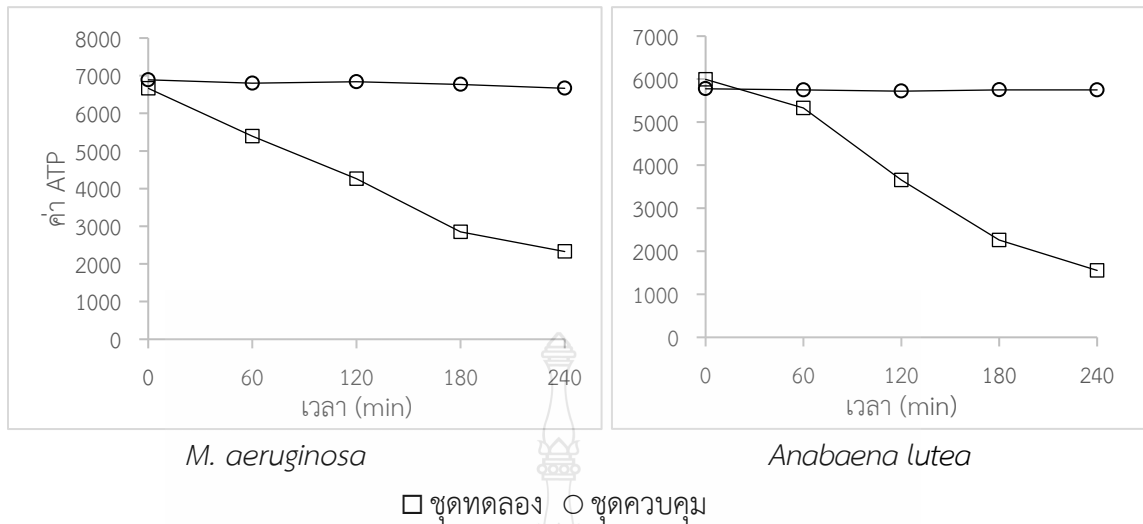
□ ชุดทดลอง ○ ชุดควบคุม

**รูปที่ 4.4** ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคลอโรฟิลล์สำหรับสาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305 และ *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074 กับเวลา

จากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่ากระบวนการโฟโตคะตะลิติก ส่งผลให้ความหนาแน่นสาหร่าย ที่อัตราการไหล 30 L·min<sup>-1</sup> สาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305 ลดลงได้สูงสุดมีค่าเท่ากับ 57.24% และ *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074 ลดลงได้สูงสุดมีค่าเท่ากับ 39.67% ที่เวลา 240 min จากกระบวนการข้างต้นส่งผลให้ปริมาณคลอโรฟิลล์โดยรวมลดลงจากการที่เซลล์ได้รับความเสียหายและคลอโรฟิลล์หลุดออกจากเซลล์ หลังจากนั้นเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไฮดรอกซิลเรดิคัลขึ้นจากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าอัตราการลดเซลล์สาหร่ายและปริมาณคลอโรฟิลล์แปรผกผันกับระยะเวลาที่ทดลองมากขึ้น [47]

สำหรับค่า ATP จากสาหร่ายทั้ง 2 ชนิดด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกด้วยอุปกรณ์ Lumitester PD-20-Kikkoman แสดงดังรูปที่ 4.5

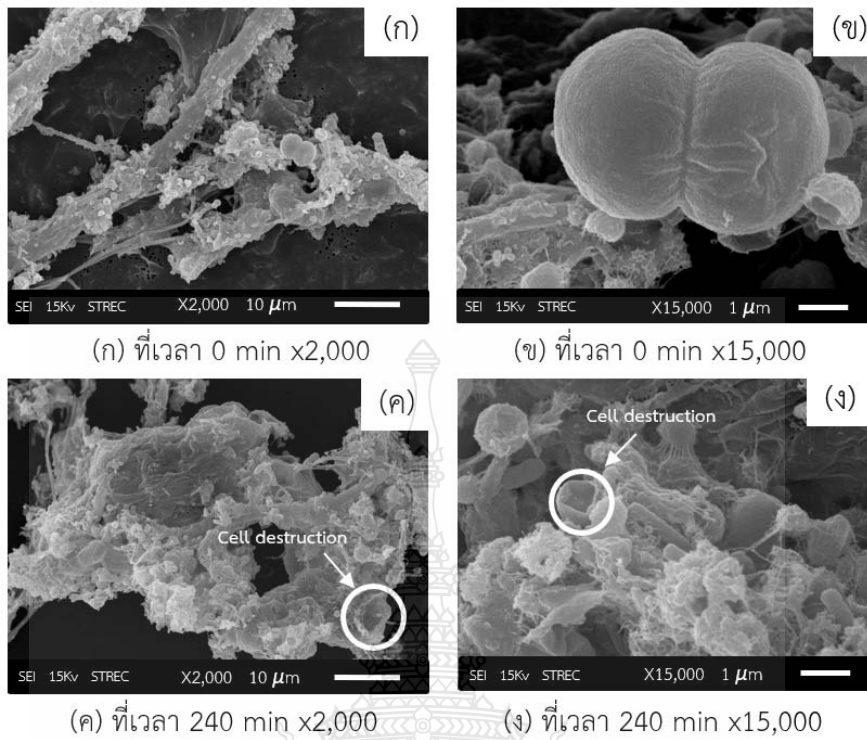




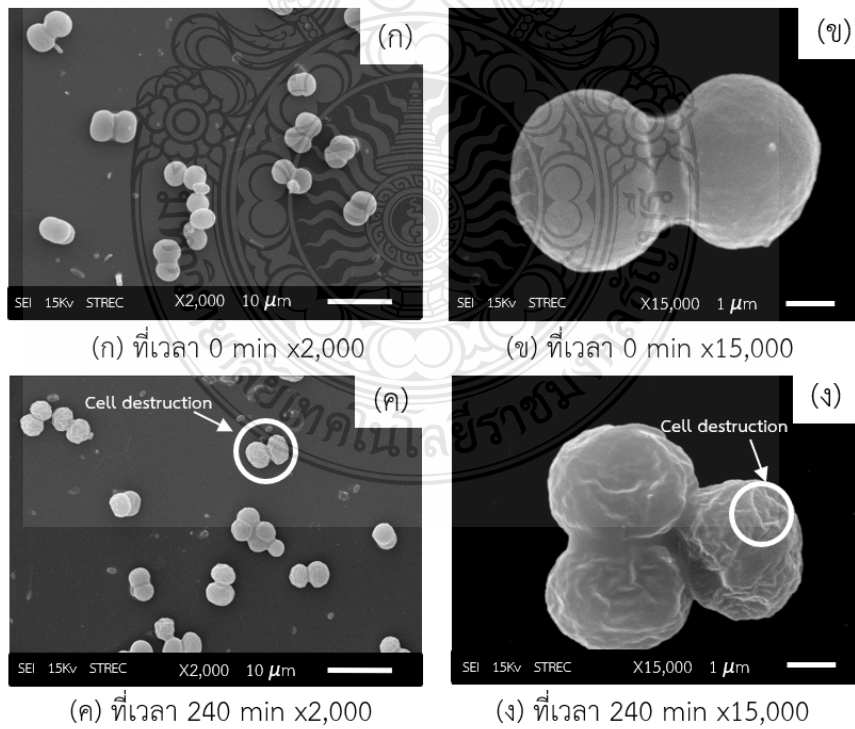
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ATP สำหรับสาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305 และ *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074 กับเวลา

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า กระบวนการโฟโตคะตะลิติกส่งผลต่อกระบวนการสร้างพลังงานของเซลล์สาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305 และ *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074 พบว่าค่า ATP ลดลงอย่างชัดเจนตลอดการทดลอง ทั้งนี้ค่า ATP ลดลงสูงสุดที่เวลา 240 min สำหรับสาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305 มีค่าเท่ากับ 74.06% และสาหร่าย *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074 มีค่า ATP ที่ลดลงสูงสุด เท่ากับ 65.03% เมื่อเทียบกับค่า ATP เนื่องจากจำนวนเซลล์ของสาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305 เมื่อเซลล์ถูกทำลายจึงไม่มีการสร้าง ATP ขึ้นมาทดแทนได้ [48]

สำหรับผลการวิเคราะห์รูปร่างเซลล์สาหร่ายทั้ง 2 ชนิด สำหรับการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบราง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ (SEM-EDS (6610LV)) ที่มีความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายเริ่มต้นอยู่ในช่วงค่า  $10^2$  cells·mL<sup>-1</sup> ในอาหาร BG-11 ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกแสดงดังรูปที่ 4.6 และ 4.7



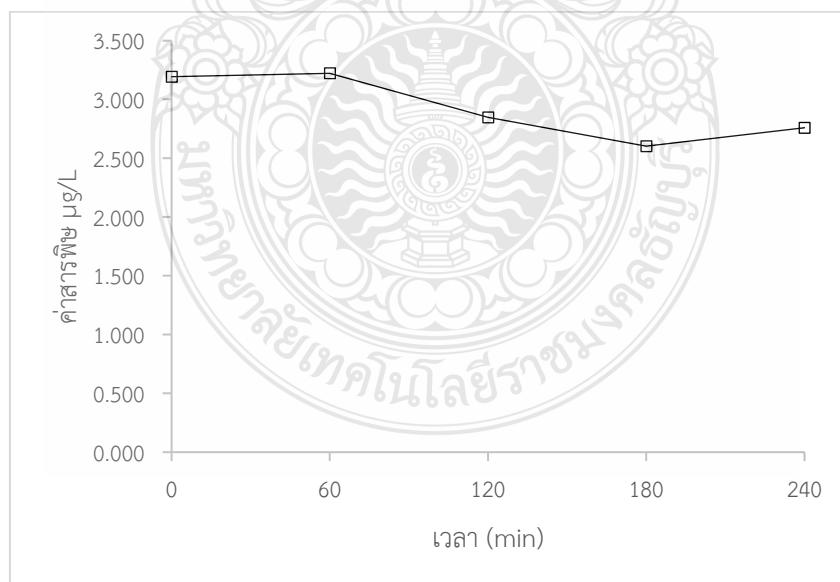
รูปที่ 4.6 รูปร่างเซลล์สำหรับ *M. aeruginosa* TISTR 8305 ที่เวลา 0 และ 240 min



รูปที่ 4.7 รูปร่างเซลล์สำหรับ *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074 ที่เวลา 0 และ 240 min

จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่ารูปร่างเซลล์สาหร่ายหลังจากการทดลองโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่มี  $\text{TiO}_2$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบฟิล์มบาง สาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305 ที่เวลา 0 min เซลล์สาหร่ายมีรูปร่างเป็นทรงกลมเกาะกลุ่มกันเป็นเส้นสายยาว หลังเวลาการทดลองผ่านไป ที่ 240 min เซลล์มีลักษณะเหี่ยวรวมถึงแตกและเสีรูปร่างไปจากเดิม ส่วนสาหร่าย *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074 ที่เวลา 0 min มีลักษณะเซลล์เป็นทรงกลม หลังจากเวลาผ่านไป 240 min เซลล์มีลักษณะเหี่ยวรวมถึงแตกและเสีรูปร่างไปจากเดิมเช่นเดียวกับ *M. aeruginosa* TISTR 8305 เนื่องจากกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่มี  $\text{TiO}_2$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้รับพลังงานจากแหล่งกำเนิดแสงจากดวงอาทิตย์ที่มีพลังงานมากกว่าช่องว่างแถบพลังงานทำให้กระตุ้นอิเล็กตรอนหลุดออกจากแถบวาเลนซ์ไปสู่แถบนำไฟฟ้า (Conduction band) ทำให้เกิดโฮล (Hole) ที่แถบวาเลนซ์ จึงทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสารออกซิไดซิงเอเจนต์ที่รุนแรง ได้แก่  $\cdot\text{OH}$  และ  $\cdot\text{O}_2^-$  ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับผนังเซลล์ทำให้เกิดการรั่วไหลของส่วนประกอบภายในเมตาบอลิท์ในเมตาบอลิซึมถูกออกซิไดซ์ทำให้เซลล์มีรูปร่างแตกและเสีรูปร่างจากเดิม [49-53]

สำหรับผลการวิเคราะห์สารพิษของสาหร่ายทั้ง 2 ชนิด สำหรับการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบวางด้วยเครื่อง Microplaterreader ของ BIOCHROM Model EZ Read 2000 พบว่าสาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305 สารพิษ Microcystin มีอัตราการลดลงอย่างชัดเจน สำหรับสาหร่าย *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074 ไม่พบปริมาณสารพิษ Anotoxin จากการวิเคราะห์จึงไม่เห็นผลการเปลี่ยนแปลงของสารพิษที่เกิดขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสารพิษสำหรับสาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305 กับเวลา

จากผลการวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงสารพิษ Microcystin จากสาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305 มีอัตราการลดลงอย่างชัดเจน และในสาหร่าย *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074 สารพิษ Anotoxin ไม่พบปริมาณสารพิษในขณะทดลอง ซึ่งอาจเกิดจากสาหร่าย ยังไม่อยู่ในช่วงที่มีการปลดปล่อยสารพิษออกมา หรือ มีปริมาณสารพิษต่ำมากจึงส่งผลให้ไม่พบ การเปลี่ยนแปลงจากสารพิษที่เกิดขึ้น โดยสาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305 จากข้อมูลปริมาณสารพิษ Microcystin ที่ลดลงข้างต้นส่งผลทำให้โครงสร้างของสารพิษที่เป็นสารอินทรีย์สามารถถูกทำลาย กลายเป็นผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ที่ไม่มีความเป็นพิษหรือมีความเป็นพิษลดลง โดยทำลายพันธะที่หมู่  $\beta$ -amino acid (Adda) เป็น 6Z adda Microcystis LR ทำให้มีความเป็นพิษลดลงจากเดิม ซึ่งสาร ดังกล่าวจะถูกย่อยสลายต่อไปด้วยกระบวนการทางธรรมชาติ ส่งผลให้มีโครงสร้างที่เล็กลง [54-55]

### 4.3 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกในการกำจัด สารพิษที่เกิดขึ้นจากสาหร่าย

#### 4.3.1 ถังปฏิกรณ์แบบแบทช์

ผลจากการหาจลนพลศาสตร์ของการกำจัดสาหร่ายทั้ง 2 ชนิดด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก สามารถนำสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งมาประยุกต์ใช้เพื่ออธิบายดังสมการที่ 4.5

$$\frac{dC}{dt} = -k_1 C \quad (4.5)$$

สามารถนำมาจัดรูปสมการใหม่ให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นได้ ดังสมการที่ 4.6

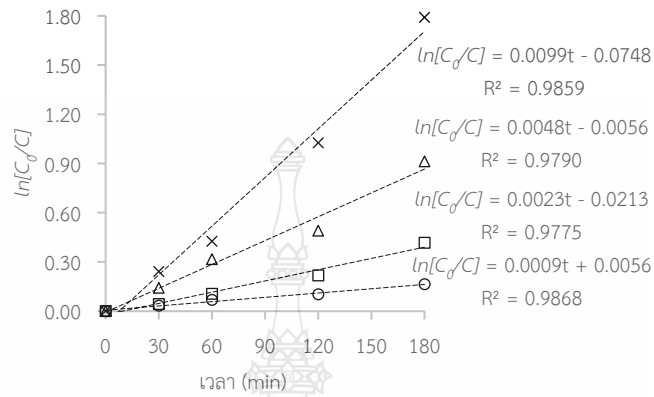
$$\ln\left(\frac{C_0}{C}\right) = k_1 t \quad (4.6)$$

โดย

$\frac{dC}{dt}$	=	อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เวลาใดๆ (cells/mL-min)
$C_0$	=	ความหนาแน่นสาหร่ายที่เวลาเริ่มต้น (cells/mL)
$C$	=	ความหนาแน่นสาหร่ายที่เวลาใดๆ (cells/mL)
$t$	=	เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา (min)
$k_1$	=	ค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ( $\text{min}^{-1}$ )

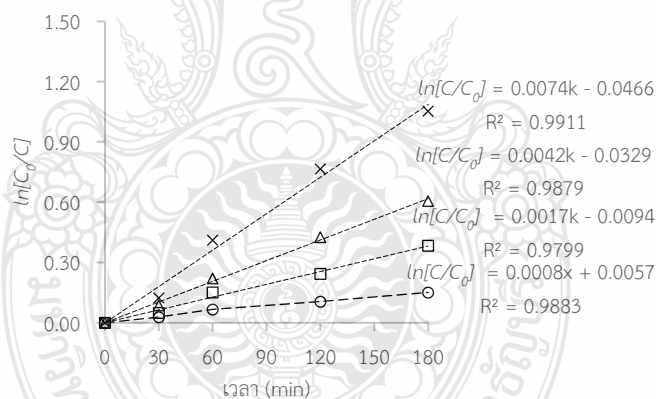
ทั้งนี้ในการเปรียบเทียบอัตราการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดสาหร่ายทั้ง 2 ชนิดข้างต้น ด้วยกระบวนการดังกล่าว พบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาในการกำจัดสาหร่าย *M. aeruginosa*

TISTR 8305 มีค่าสูงกว่า สาหร่าย *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074 เมื่อความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายเริ่มต้นมีค่าเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10



x  $C_0 = 10^2$  Δ  $C_0 = 10^4$  □  $C_0 = 10^6$  ○  $C_0 = 10^8$

รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(C_0/C)$  สำหรับสาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305 กับเวลา



x  $C_0 = 10^2$  Δ  $C_0 = 10^4$  □  $C_0 = 10^6$  ○  $C_0 = 10^8$

รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(C_0/C)$  สำหรับสาหร่าย *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074 กับเวลา

จากการหาจลนพลศาสตร์ของการกำจัดสาหร่ายทั้ง 2 ชนิด พบว่าเมื่อความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายเริ่มต้นมีค่าสูงขึ้นส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยามีค่าน้อยกว่าในกรณีที่ความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายเริ่มต้นมีค่าต่ำ เนื่องจากความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายที่มีปริมาณมากขึ้น ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากระบวนการโฟโตคะตะลิสติกโดยไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถกำจัดสาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305 โดยมีค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาในการกำจัด

สาหร่ายสูงสุดมีค่าเท่ากับ  $9.9 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$  และ *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074 มีค่าเท่ากับ  $7.4 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$  ที่ความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายเริ่มต้นเท่ากับ  $10^2 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$  [56]

#### 4.3.2 ถึงปฏิกรณ์แบบราง

ผลจากการหาจลนพลศาสตร์ของการกำจัดสาหร่ายทั้ง 2 ชนิดด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกสามารถอธิบายโดยใช้สมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (First order equation) ซึ่งสามารถหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกได้จากการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln[C_0/C]$  กับ  $t$  ตามสมการของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง อธิบายดังสมการที่ 4.7

สมมติปฏิกิริยาเป็นแบบ First order reaction โดยที่  $R = -kC$

$$0 = -v \frac{dC}{dx} + r \quad (4.7)$$

$$0 = -v \frac{dC}{dx} - kC \quad (4.8)$$

$$kC = -v \frac{dC}{dx} \quad (4.9)$$

$$\frac{dC}{C} = -\frac{k}{v} dx \quad (4.10)$$

$$\ln C = -\frac{k}{v} [x]_0^x \quad (4.11)$$

โดย

$C_0$  = ความหนาแน่นสาหร่ายที่เวลาเริ่มต้น ( $\text{cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ )

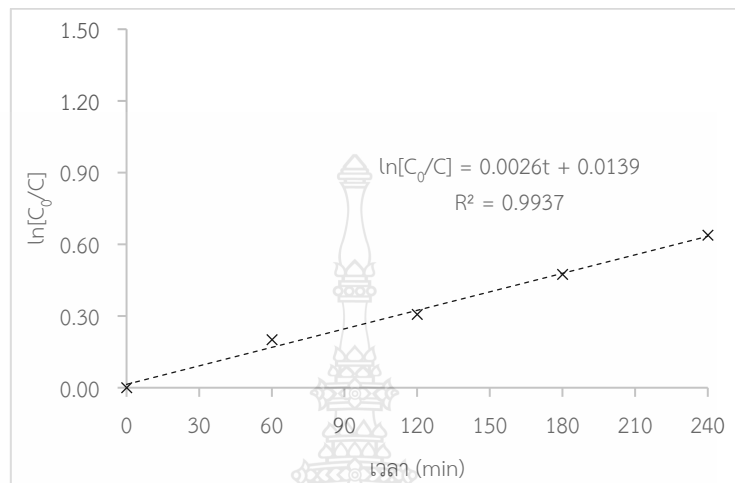
$C$  = ความหนาแน่นสาหร่ายที่เวลาสุดท้าย ( $\text{cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ )

$k$  = ค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ( $\text{min}^{-1}$ )

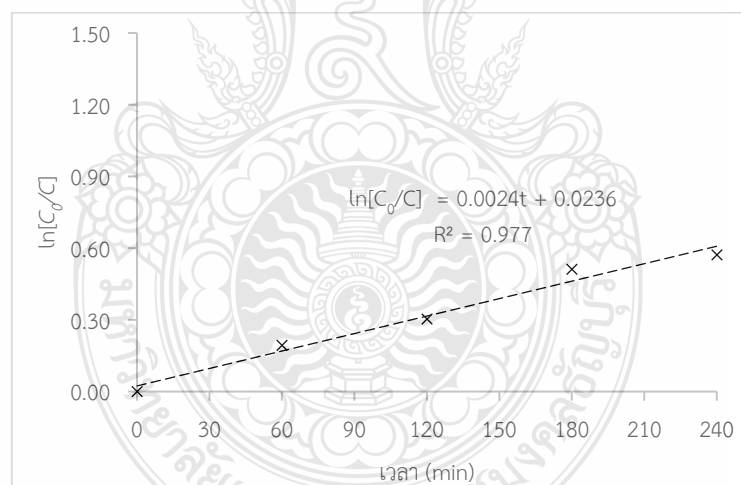
$v$  = อัตราการไหลในถังปฏิกรณ์  $30 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$

$x$  = ความยาวของถังปฏิกรณ์  $1.42 \text{ m}$

ทั้งนี้ในการเปรียบเทียบอัตราการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดสาหร่ายทั้ง 2 ชนิดด้วยกระบวนการดังกล่าว พบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาในการกำจัดสาหร่ายมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายเริ่มต้นมีค่าเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และ 4.12



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(C_0/C)$  สำหรับสาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305 กับเวลา



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(C_0/C)$  สำหรับสาหร่าย *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074 กับเวลา

จากการหาจลนพลศาสตร์ของการกำจัดสาหร่ายทั้ง 2 ชนิด พบว่ามีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเช่นเดียวกับถึงปฏิกิริยาแบบแบทช์ โดยสาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305 โดยมีค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาในการกำจัดสาหร่ายสูงสุดมีค่าเท่ากับ  $2.6 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$  และ *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074 มีค่าเท่ากับ  $2.4 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$  ที่ความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายเริ่มต้นเท่ากับ  $10^2 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองในถังปฏิกรณ์ทั้ง 2 ชนิด พบว่า แบบแบทช์ มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่าแบบถังปฏิกรณ์ชนิดไหลต่อเนื่อง เนื่องจากในถังปฏิกรณ์ชนิดไหลต่อเนื่องในเวลานั้นมีการไหลเวียนของน้ำตลอดเวลาทำให้การสัมผัสไม่ทั่วถึง แต่ในขณะที่แบบแบทช์มีการสัมผัสทั่วถึงตลอดเวลา การทดลองจึงส่งผลให้ความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายที่ลดลงทั้งสองแบบต่างกัน อัตราการเกิดปฏิกิริยาของถังปฏิกรณ์ทั้งสองจึงแตกต่างกัน





## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษากำจัดสาหร่ายในแหล่งน้ำดิบด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

##### 5.1.1 ลักษณะกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  แบบฟิล์มบางมีขนาดอนุภาคของ  $\text{TiO}_2$  อยู่ในช่วง 30-70 nm โดยมีพื้นที่ผิวปรากฏที่เคลือบผิวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  แบบฟิล์มบางขนาด  $1 \mu\text{m}^2$  เท่ากับ  $1.02 \mu\text{m}^2$  ค่าความขรุขระเฉลี่ย เท่ากับ 1.52 nm รวมทั้งมีขนาดช่องว่างพลังงานเท่ากับ 3.25eV

จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  แบบฟิล์มบางที่เตรียมมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและมีขนาดใกล้เคียงกัน มีความเหมาะสมเพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะลิติก สามารถตอบสนองในช่วงคลื่นอัลตราไวโอเล็ตได้ ทำให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์เคลื่อนที่ไปสู่แถบการนำได้

##### 5.1.2 ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย

การหาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์

จากการศึกษาพบว่าสาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุด ที่ความหนาแน่นของเซลล์สาหร่าย  $10^2$ ,  $10^4$ ,  $10^6$  และ  $10^8$  เท่ากับ 83.33%, 59.97%, 34.09% และ 15.17% ตามลำดับ ที่เวลา 180 min และสาหร่าย *A. lutea* TISTR NO. 8074 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุด เท่ากับ 65.12%, 45.45%, 31.89% และ 14.00% ตามลำดับ ที่เวลา 180 min ในขณะที่การทดลองในชุดควบคุม 1 และ 2 พบว่า การทดลองในชุดควบคุมทั้ง 2 ชุด ไม่พบการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของสาหร่ายอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเวลาผ่านไป

การหาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายด้วยถังปฏิกรณ์แบบรวม

จากการศึกษา พบว่า สาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305 และ *A. lutea* TISTR NO. 8074 ที่เวลา 240 min สาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305 มีประสิทธิภาพสูงสุด เท่ากับ 49.49% และในส่วนของสาหร่าย *A. lutea* TISTR NO. 8074 สูงสุดเท่ากับ 32.84% ที่อัตราการไหล 30 L/min ในขณะที่การทดลองในชุดควบคุม ไม่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเวลาผ่านไป

การเปลี่ยนแปลงปริมาณคลอโรฟิลล์สาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305 และ *A. lutea* TISTR NO. 8074 สามารถลดลงได้สูงสุดมีค่าเท่ากับ 57.24% และ 39.67% ตามลำดับ ที่อัตราการไหล 30 L/min และ เวลา 240 min

ค่า ATP ลดลงสูงสุด ที่เวลา 240 min สำหรับสาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305 มีค่าเท่ากับ 74.06% และ *A. lutea* TISTR NO. 8074 เท่ากับ 65.03% ที่อัตราการไหล 30 L/min เมื่อเทียบกับค่า ATP เริ่มต้นแสดงให้เห็นถึงศักยภาพกระบวนการดังกล่าวที่มีผลต่อเซลล์สาหร่ายทั้ง 2 ชนิด

สำหรับการวิเคราะห์รูปร่างเซลล์สาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305 และสาหร่าย *A. lutea* TISTR NO. 8074 ที่เวลา 240 min เซลล์มีลักษณะเหี่ยวและเสียรูปทรงไปจากเดิม

ผลการเปลี่ยนแปลงสารพิษ Microcystin จากสาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305 มีอัตราการลดลงอย่างชัดเจน และในสาหร่าย *A. lutea* TISTR NO. 8074 สารพิษ Anotoxin ไม่พบปริมาณสารพิษในขณะทดลอง ซึ่งอาจเกิดจากสาหร่ายยังไม่อยู่ในช่วงที่มีการปลดปล่อยสารพิษออกมา

5.1.3 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกในการกำจัดสารพิษที่เกิดขึ้นจากสาหร่าย

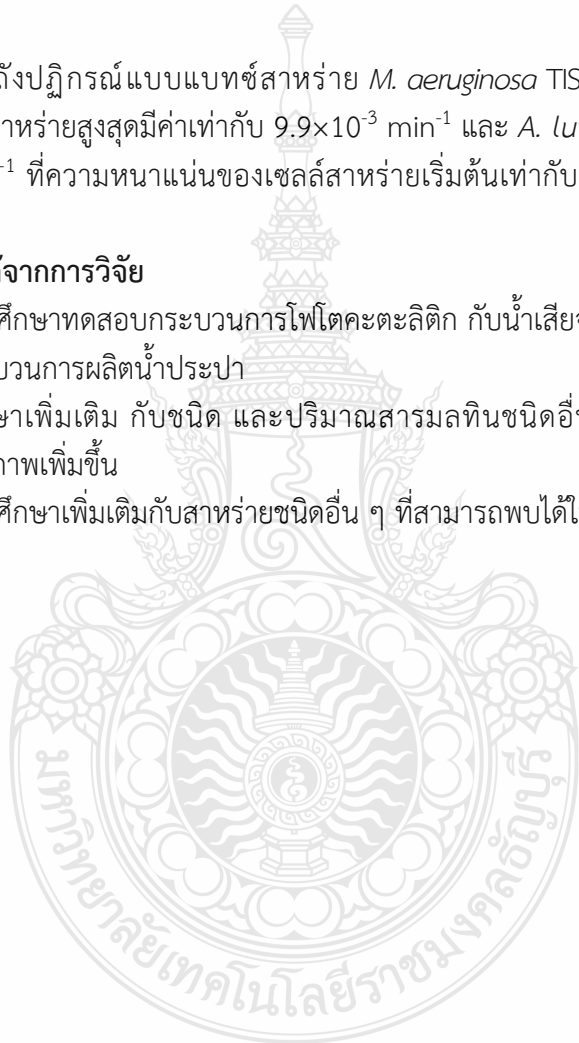
1) ถังปฏิกรณ์แบบแบทช์สาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305 มีค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาในการกำจัดสาหร่ายสูงสุดมีค่าเท่ากับ  $9.9 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$  และ *A. lutea* TISTR NO. 8074 มีค่าเท่ากับ  $7.4 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$  ที่ความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายเริ่มต้นเท่ากับ  $10^2 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$

## 5.2 ข้อเสนอแนะที่ได้จากการวิจัย

5.2.1 ควรศึกษาทดสอบกระบวนการโฟโตคะตะลิติก กับน้ำเสียจริงเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตน้ำประปา

5.2.2 ศึกษาเพิ่มเติม กับชนิด และปริมาณสารมลทินชนิดอื่น เพื่อช่วยให้พัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

5.2.3 ควรศึกษาเพิ่มเติมกับสาหร่ายชนิดอื่น ๆ ที่สามารถพบได้ในประเทศไทย



## บรรณานุกรม

- [1] Mindong, B., Xiaodian, H., Ziqing, Z., Meijun, C., and Ming, G. (2020). Comparison of OH and NaClO on geosmin degradation in the process of algae colonies inactivation at a drinking water treatment plant. **Chemical Engineering Journal**. 393: 123243.
- [2] Mindong, B., Yixuan, Y., Jianguo, C., Zhixin, J., and Ji, L. (2019). OH degraded 2-Methylisoborneol during the removal of algae-laden water in a drinking water treatment system: Comparison with ClO<sub>2</sub>. **Chemosphere**. 236: 124342.
- [3] Rajiv, L., Rakesh, R., Pradip, K., Pradhan and Pragnya D. (2019). Effect of hydrogeological factors on removal of turbidity during river bank filtration: Laboratory and field studies. **Groundwater for Sustainable Development**. 9: 100229.
- [4] Wang, Z., Zhang, J., Li, E., Zhang, L., Wang X. and Song, L. (2017). Combined toxic effects and mechanisms of microcystin-LR and copper on Vallisneria Natans (Lour.) Hara seedlings. **Journal of Hazardous Materials**. 328: 108-116.
- [5] Yang, Y., Kang, L. and Li, H. (2018). Enhancement of photocatalytic hydrogen production of BiFeO<sub>3</sub> by Gd<sup>3+</sup> doping. **Ceramics International**.
- [6] Zhong, N., Chen, M., Luo, Y., Wang, Z., Xin, X., and Rittmann, B. (2019). A novel photocatalytic optical hollow-fiber with high photocatalytic activity for enhancement of 4-chlorophenol degradation. **Chemical Engineering Journal**. 355: 731-739.
- [7] Wu, D., Li, X. Zhang, J. Chen, W. Lu, P. Tang, Y. and Li, L. (2018). Efficient PFOA degradation by persulfate-assisted photocatalytic ozonation. **Separation and Purification Technology**. 207: 255-261.
- [8] Liu, H., Guo, Y., Wang, N., Liu, B., Zhang, Y., Liu, H. and Chen, R. (2019). Controllable synthesis and photocatalytic activity of ultrathin hematite nanosheets. **Journal of Alloys and Compounds**. 771: 343-349.
- [9] Poznyak, T., Chairez Oriá I. and Poznyak, A. (2019). Chapter 6 - Photocatalytic ozonation in ozonation and biodegradation. **Environmental Engineering**. 169-198.
- [10] Chia, S., Ong, C., Chew, W., Show, L., Phang, S.-M., Ling, C., Nagarajan, D., Lee, D.-J. and Chang, J.-S. (2018). Sustainable approaches for algae utilisation in bioenergy production. **Renewable Energy**. 129: 838-852.
- [11] สรฉัตร เทียมดาว. (2560). **สาหร่ายวิทยา Phycology BI05201**. คณะวิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี.
- [12] Henrik, B., and Sabine, Z. (2016). The Evolution of Cell Division: From Streptophyte Algae to Land Plants. **Trend in plant science**. 21: 872-883.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [13] Deepali, C., Mukesh, M., Tansukh, B., Prashant, S. and Kanika. S. (2020). Cyanobacteria as a source of biofertilizers for sustainable agriculture. **Biochemistry and Biophysics Reports**. 22: 100737.
- [14] Lee, E. (2018). **Phycology**. Colorado State University.
- [15] Wei, W., Liang-Chiung, C. and Jo-Shu, C. (2020). Live and lyophilized fungi-algae pellets as novel biosorbents for gold recovery: Critical parameters, isotherm, kinetics and regeneration studies. **Bioresource Technology**. 36: 123041.
- [16] Wei, Z., Zheng, Z., JunLei, Z., Saint-Fort, R. and Xing, Z. (2019). Evaluation of the use of eucalyptus to control algae bloom and improve water quality. **Science of The Total Environment**. 667: 412-418.
- [17] Bruno, M., Juho, H., Martin, R., and Markus, A. (2020). Study of process water recirculation in a flotation plant by means of process simulation. **Minerals Engineering**. 148: 106181.
- [18] ชัตตยรัตน์ สงวนสัตย์. (2554). **ศักยภาพระบบผลิตน้ำประปาของกิจการประปากระฉูด ตำบลตลาด อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา**. (ปริญญาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี).
- [19] Mindong, Bai., Yixuan, Yu., Jianguo, Cheng., Zhixin, Ji. and Ji, Li. (2019). OH degraded 2-Methylisoborneol during the removal of algae-laden water in a drinking water treatment system: Comparison with ClO<sub>2</sub>. **Chemosphere**. 236: 124342.
- [20] ยุทธนา พาหุกุล. (2556). **ศักยภาพของวิธีการ Electro-Coagulation ในการกำจัดสาหร่ายในน้ำจืดขนาดเล็ก**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- [21] Guocheng, H., Zhengtao, X., Weiqian, Z., Yaxin, F., Cuiping, Z., Chuanhao, L., Shengwei, L. and KeungWong, P. (2020). A study on titanium dioxide nanoparticles synthesized from titanium isopropoxide under SILAR-induced gel method: Transition from anatase to rutile structure. **Inorganic Chemistry Communications**. 112: 107705.
- [22] Yuan, T., Xiaohong, Y., Manman, M., Yue, J. and Tianwei, Ou. (2020). Anatase TiO<sub>2</sub>@MIL-101(Cr) nanocomposite for photocatalytic degradation of bisphenol A. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**. 21: 124745.
- [23] อติพล สว่างอารมย์. (2556). **การศึกษาประสิทธิภาพของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบอนุภาคทองคำต่อการเสื่อมสภาพของเมทิลีนบลูโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [24] Guocheng, H., Zhengtao ,X., Weiqian, Z., Yaxin, F., Cuiping, Z., Chuanhao, L., Shengwei, L., and KeungWong, P. (2020). Hydrogen production from natural organic matter via cascading oxic-anoxic photocatalytic processes: An energy recovering water purification technology. **Water Research**. 175: 115684.
- [25] Peng, S., Yan, Y., Zhiqiu, Z. and Xiaofei, Y. (2020). Study on the properties of Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub> thin films grown alternately by pulsed laser deposition and sol-gel method. **Physics Letters A**. 11: 126232.
- [26] Xin, W., Xuejiang, W., Jianfu, Z., Jingke, S., Chenliang, S. and Zhongchang, W. (2018). Surface modified TiO<sub>2</sub> floating photocatalyst with PDDA for efficient adsorption and photocatalytic inactivation of *Microcystis aeruginosa*. **Water Research**. 131: 320-333.
- [27] Liu, Y., Yuqian, L., Xiuyun, C., Zijun, Z., Siyang, W., Jian, X., Chunlei, S. and Yiyong, Z. (2017). Community composition specificity and potential role of phosphorus solubilizing bacteria attached on the different bloom-forming cyanobacteria. **Microbiological Research**. 205: 59-65.
- [28] Xin, W., Xuejiang, W., Jianfu, Z., Jingke, S., Lijie, Z., Jiayi, W., Xin, T. and Yongsheng, C. (2017). An alternative to in situ photocatalytic degradation of microcystin-LR by worm-like N, P co-doped TiO<sub>2</sub>/expanded graphite by carbon layer (NPT-EGC) floating composites. **Applied Catalysis B: Environmental**. 206: 479-489.
- [29] Xiaoge, W., Junli, L. and Jun-Jie, Z. (2019). Sono-Fenton hybrid process on the inactivation of *Microcystis aeruginosa*: Extracellular and intracellular oxidation. **Ultrasonics Sonochemistry**. 53: 68-76.
- [30] Yating, Z., Jinfeng, L., Lei, L. and Xiaohong, G. (2019). The effectiveness of bisulfite-activated permanganate technology to enhance the coagulation efficiency of *Microcystis aeruginosa*. **Chinese Chemical Letters Available online**. In Press, Journal Pre-proof.
- [31] Di, W., Shixiong, Yang., Wenchao, D., Ying, Y., Jingxian, Z. and Hongyan, G. (2019). Effects of titanium dioxide nanoparticles on *Microcystis aeruginosa* and microcystins production and release. **Journal of Hazardous Materials**. 377: 1-7.
- [32] Zhiying, L., Yongyuan, Z., Yunni, G., Biyun, L., Xuemei, S., Feng, H., Qiaohong, Z. and Zhenbin, W. (2016). Effects of pyrogalllic acid on *Microcystis aeruginosa*: oxidative stress related toxicity. **Ecotoxicology and Environmental Safety**. 132: 413-419.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [33] Hong-Qiang, W., Tian-Guang, M., Bei-Dou, X., Lie-Yu, Z. and Qiao-Hong, Z. (2015).  $\text{KMnO}_4$  pre-oxidation for *Microcystis aeruginosa* removal by a low dosage of flocculant. **Ecological Engineering**. 81: 298-300.
- [34] Kumar, S., Wenjing, W. and Alok, K. (2018). Cadmium-mediated morphological, biochemical and physiological tuning in three different *Anabaena* species. **Aquatic Toxicology**. 202: 36-45.
- [35] Alok, S., Sarita, P., Karl., Prashant, S., Shilpi, S., Ruchi, R. and Lal, R. (2016X). Overexpression of AhpC enhances stress tolerance and  $\text{N}_2$ -fixation in *Anabaena* by upregulating stress responsive genes. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects**. 1860: 2576-2588.
- [36] Joao, P., Paul, A., Rabia, M., Jason, N., Russell, P., Ian, J. and Brett, A. (2017). Molecular and morphological survey of saxitoxin-producing cyanobacterium *Dolichospermum circinale* (*Anabaena circinalis*) isolated from geographically distinct regions of Australia. **Toxicon**. 138: 68-77.
- [37] Shilpi, V., Shuji, N. and Mika, S. (2016). Application of UV-C LED activated PMS for the degradation of anatoxin-a. **Chemical Engineering Journal**. 284: 122-129.
- [38] Dolat, D., Ohtani, B., Mozia, S., Moszanski, D., Guskos, N., Lenzion-Bielun, Z. and Morawski, A. (2015). Preparation, characterization and charge transfer studies of nickel – modified and nickel, nitrogen co-modified rutile titanium dioxide for photocatalytic application. **Chemical Engineering Journal**. 239: 149-157.
- [39] Ehsan, B., Nasser, S., Mohammad, J. and Habib-allah, T. (2016). Preparation of titanium dioxide nanoparticles supported on hexagonal mesoporous silicate (HMS) modified by oak gall tannin and its photocatalytic performance in degradation of azo dye. **Advanced Powder Technology**. 27: 1047-1055.
- [40] Nirina, K. and Akhanda, R. (2019). Photocatalytic degradation of Microcystin-LR by visible light active and magnetic,  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ -Ag/rGO nanocomposite and toxicity assessment of the intermediates. **Chemosphere Volume**. 221: 441-451.
- [41] Xi, Z., Zhen, W., Chengyan, W., Gaoke, Z., Xiaojie, P., Jianhua, P. and Jianbo, C. (2016). Novel  $\text{Ag}/\text{AgCl}/\text{K}_6\text{Nb}_{10}\text{O}_{30}$  photocatalyst and its enhanced visible light photocatalytic activities for the degradation of microcystin-LR and acid red G. **Journal of Molecular Catalysis A: Chemical**. 411: 364-371.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [42] Chunhong. W., Yanfen, F., Araya, T., Miaomiao, X., Yingping, H. and Chuncheng, C. (2017). Photochemical oxidation mechanism of microcystin-RR by p-n heterojunction Ag/Ag<sub>2</sub>O-BiVO<sub>4</sub>. **Chinese Journal of Catalysis**. 38; 192-198.
- [43] Miguel, P., Polycarpos, F., Athanassios, G., Konto, A., de la C., Kevin, O., Patrick, S., J. Anthony, B. and Dionysios, D. (2012). A comparative study on the removal of cylindrospermopsin and microcystins from water with NF-TiO<sub>2</sub>-P<sub>25</sub> composite films with visible and UV-vis light photocatalytic activity. **Applied Catalysis B: Environmental**. 121-122: 30-39.
- [44] Amani, M., Alansi, M., Ibrahim, O., Alade, F. and Tawfik, A. (2018). Visible-light responsive BiOBr nanoparticles loaded on reduced graphene oxide for photocatalytic degradation of dye. **Journal of Molecular Liquids**. 253: 297-304.
- [45] Soryong, C., Tahereh, N., Yoontaek, O., In, S. and Jin-Soo, P. (2019). Effective removal of emerging dissolved cyanotoxins from water using hybrid photocatalytic composites. **Water Research**. 149; 421-431.
- [46] Yuan, Z., Qianlong, F., Xiaoyu, W., Wenwen, Z., Xinxin, H., Chuang, L. and Wenyan, L. (2019). Photoelectrocatalytic degradation of microcystin-LR using a dimensionally stable anode and the assessment of detoxification. **Chemical Engineering Journal**. 368; 968-979.
- [47] Xi, H., Xinjiang, H., Chunfang, T., Shizhi, W., Xiaofu, W., Jian, L., Xiong, Y., Hui, W. and Lu, Z. (2017). Mechanisms underlying degradation pathways of microcystin-LR with doped TiO<sub>2</sub> photocatalysis. **Chemical Engineering**. 330; 355-371.
- [48] Katherine, E., Greenstein, C. and Wert. (2019). Using rapid quantification of adenosine triphosphate (ATP) as an indicator for early detection and treatment of cyanobacterial blooms. **Water Research**. 154; 171-179.
- [49] Anjali Krishnan, Gary Koski and Xiaozhen Mou. 2020. **Characterization of microcystin-induced apoptosis in HepG2 hepatoma cells**. *Toxicon*. 173: 20-26.
- [50] Gongduan, F., Jinjin, Z., Xiaomei, Z., Jing, L., Liang, H. and Fangshu, Q. (2020). Fast photocatalytic inactivation of *Microcystis aeruginosa* by metal-organic frameworks under visible light. **Chemosphere**. 239; 124721.
- [51] Nicoletta, S., Franca, B., Simona, S., laJean-Lou, C. and Emanuela, T. (2020). In vitro detoxication of microcystins in human samples: variability among variants with different hydrophilicity and structure. **Toxicology Letters**. 322: 131-139.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [52] Xin, W., Jingke, S., Jianfu, Z., Zhongchang, W. and Xuejiang, W. (2019). In-situ active formation of carbides coated with NPTiO<sub>2</sub> nanoparticles for efficient adsorption-photocatalytic inactivation of harmful algae in eutrophic water. **Chemosphere**. 228: 351-359
- [53] Yan, J., Shasha, Z., Hangzhou, X., Chunxia, M., Jiongming, S., Hongmin, L. and Haiyan, P. (2019). Application of N-TiO<sub>2</sub> for visible-light photocatalytic degradation of *Cylindrospermopsis raciborskii* — More difficult than that for photodegradation of *Microcystis aeruginosa*. **Environmental Pollution**. 245; 642-650.
- [54] Gagala, I. and Mankiewicz-Boczek, J. (2013). The Natural Degradation of Microcystins. (Cyanobacterial Hepatotoxins) in Fresh Water – the Future of Modern Treatment Systems and Water Quality Improvement. **Polish Journal of Environmental Studies**. 21(5): 1125-1139.
- [55] Jacobs, L., Peralta-Zamora, P., Ramos, F., Pontarolo, R. (2013). Photocatalytic degradation of microcystin-LR in aqueous solutions. **Chemosphere**. 90: 1552–1557.
- [56] Xiaoxin, W., Jingtao, Z., Wuzhu, S., Weiyi, Y., Jiaojiao, C., iL, P. and Jian, K. (2015). Anti-algal activity of palladium oxide-modified nitrogen-doped titanium oxide photocatalyst on *Anabaena* sp. PCC 7120 and its photocatalytic degradation on Microcystin LR under visible light illumination. **Chemical Engineering Journal**. 264: 437-444.





ภาคผนวก ก  
ผลการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลความหนาแน่นสาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305  $10^2$  cells·mL<sup>-1</sup> กับเวลา  
ในชุดทดลองในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์

เวลา (min)	$10^2$ ครั้งที่ 1	$10^2$ ครั้งที่ 2	$10^2$ ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	2.30	2.30	2.30	2.30
60	1.84	1.78	1.82	1.81
120	1.52	1.49	1.42	1.48
180	0.82	0.82	0.82	0.82
240	0.40	0.39	0.36	0.38
ประสิทธิภาพ (%)	82.61	83.04	84.35	83.33

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลความหนาแน่นสาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305  $10^2$  cells·mL<sup>-1</sup> กับเวลา  
ในชุดควบคุม 1 ในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์

เวลา (min)	$10^2$ ครั้งที่ 1	$10^2$ ครั้งที่ 2	$10^2$ ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	2.30	2.28	2.29	2.29
60	2.34	2.32	2.27	2.31
120	2.28	2.27	2.29	2.28
180	2.25	2.27	2.24	2.25
240	2.18	2.21	2.23	2.21
ประสิทธิภาพ (%)	5.22	3.07	2.62	3.64

**ตารางที่ ก.3** ข้อมูลความหนาแน่นสาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305  $10^2$  cells·mL<sup>-1</sup> กับเวลา  
ในชุดควบคุม 2 ในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์

เวลา (min)	$10^2$ ครั้งที่ 1	$10^2$ ครั้งที่ 2	$10^2$ ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	2.31	2.29	2.30	2.30
60	2.29	2.27	2.28	2.28
120	2.28	2.28	2.28	2.28
180	2.26	2.21	2.20	2.22
240	2.28	2.20	2.24	2.24
ประสิทธิภาพ (%)	1.30	3.93	2.61	2.61

**ตารางที่ ก.4** ข้อมูลความหนาแน่นสาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305  $10^4$  cells·mL<sup>-1</sup> กับเวลา  
ในชุดทดลองในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์

เวลา (min)	$10^4$ ครั้งที่ 1	$10^4$ ครั้งที่ 2	$10^4$ ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	4.31	4.31	4.32	4.31
60	3.72	3.73	3.74	3.73
120	3.12	3.18	3.14	3.15
180	2.34	2.33	2.36	2.34
240	1.73	1.73	1.72	1.73
ประสิทธิภาพ (%)	59.86	59.86	60.19	59.97

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลความหนาแน่นสาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305  $10^4$  cells·mL<sup>-1</sup> กับเวลา  
ในชุดควบคุม 1 ในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์

เวลา (min)	10 <sup>4</sup> ครั้งที่ 1	10 <sup>4</sup> ครั้งที่ 2	10 <sup>4</sup> ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	4.21	4.12	4.10	4.14
60	4.10	4.19	3.98	4.09
120	4.00	3.90	4.00	3.97
180	4.00	4.10	4.00	4.03
240	4.00	3.98	3.99	3.99
ประสิทธิภาพ (%)	4.99	3.40	2.68	3.70

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลความหนาแน่นสาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305  $10^4$  cells·mL<sup>-1</sup> กับเวลา  
ในชุดควบคุม 2 ในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์

เวลา (min)	10 <sup>4</sup> ครั้งที่ 1	10 <sup>4</sup> ครั้งที่ 2	10 <sup>4</sup> ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	4.20	4.19	4.18	4.19
60	4.00	3.87	4.12	4.00
120	4.10	3.92	3.91	3.98
180	4.00	4.19	3.91	4.03
240	4.00	4.12	3.89	4.00
ประสิทธิภาพ (%)	4.76	1.67	6.94	4.46

ตารางที่ ก.7 ข้อมูลความหนาแน่นสาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305  $10^6$  cells·mL<sup>-1</sup> กับเวลา  
ในชุดทดลองในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์

เวลา (min)	$10^6$ ครั้งที่ 1	$10^6$ ครั้งที่ 2	$10^6$ ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	6.19	6.17	6.15	6.17
60	5.84	5.86	5.86	5.85
120	5.72	5.71	5.73	5.72
180	4.84	4.87	4.91	4.87
240	4.08	4.02	4.10	4.07
ประสิทธิภาพ (%)	34.09	34.85	33.33	34.09

ตารางที่ ก.8 ข้อมูลความหนาแน่นสาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305  $10^6$  cells·mL<sup>-1</sup> กับเวลา  
ในชุดควบคุม 1 ในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์

เวลา (min)	$10^6$ ครั้งที่ 1	$10^6$ ครั้งที่ 2	$10^6$ ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	6.18	6.19	6.08	6.15
60	6.17	6.12	6.15	6.15
120	6.15	6.14	6.16	6.15
180	6.12	6.1	6.11	6.12
240	6.06	6.10	6.07	6.08
ประสิทธิภาพ (%)	1.94	5.90	0.16	1.19

ตารางที่ ก.9 ข้อมูลความหนาแน่นสาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305  $10^6$  cells·mL<sup>-1</sup> กับเวลา  
ในชุดควบคุม 2 ในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์

เวลา (min)	$10^6$ ครั้งที่ 1	$10^6$ ครั้งที่ 2	$10^6$ ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	6.21	6.19	6.18	6.19
60	6.18	6.17	6.17	6.17
120	6.16	6.14	6.15	6.15
180	6.12	6.11	6.13	6.12
240	6.07	6.05	6.03	6.05
ประสิทธิภาพ (%)	2.25	2.26	2.43	2.31

ตารางที่ ก.10 ข้อมูลความหนาแน่นสาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305  $10^8$  cells·mL<sup>-1</sup>  
กับเวลาในชุดทดลองในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์

เวลา (min)	$10^8$ ครั้งที่ 1	$10^8$ ครั้งที่ 2	$10^8$ ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	8.34	8.33	8.33	8.33
60	7.98	7.97	7.98	7.98
120	7.81	7.84	7.79	7.81
180	7.54	7.61	7.58	7.58
240	7.21	7.00	7.29	7.17
ประสิทธิภาพ (%)	0.00	15.97	12.48	14.00

ตารางที่ ก.11 ข้อมูลความหนาแน่นสาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305  $10^8$  cells·mL<sup>-1</sup>  
กับเวลาในชุดควบคุม 1 ในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์

เวลา (min)	$10^8$ ครั้งที่ 1	$10^8$ ครั้งที่ 2	$10^8$ ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	8.32	8.32	8.31	8.32
60	8.31	8.29	8.28	8.29
120	8.31	8.29	8.24	8.28
180	8.17	8.28	8.18	8.21
240	8.21	8.27	8.21	8.23
ประสิทธิภาพ (%)	1.32	0.60	1.20	1.04

ตารางที่ ก.12 ข้อมูลความหนาแน่นสาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305  $10^8$  cells·mL<sup>-1</sup>  
กับเวลาในชุดควบคุม 2 ในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์

เวลา (min)	$10^8$ ครั้งที่ 1	$10^8$ ครั้งที่ 2	$10^8$ ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	8.32	8.28	8.29	8.30
60	8.32	8.29	8.29	8.30
120	8.29	8.29	8.28	8.29
180	8.24	8.26	8.22	8.24
240	8.22	8.25	8.24	8.24
ประสิทธิภาพ (%)	1.20	0.36	0.60	0.72

ตารางที่ ก.13 ข้อมูลความหนาแน่นสาหร่าย *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074  $10^2$  cells·mL<sup>-1</sup> กับเวลาในชุดทดลองในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์

เวลา (min)	$10^2$ ครั้งที่ 1	$10^2$ ครั้งที่ 2	$10^2$ ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	2.91	2.69	3.00	2.87
60	2.62	2.41	2.61	2.55
120	1.90	1.88	1.89	1.89
180	1.21	1.52	1.29	1.34
240	1.00	1.10	0.90	1.00
ประสิทธิภาพ (%)	65.64	59.11	70.00	65.12

ตารางที่ ก.14 ข้อมูลความหนาแน่นสาหร่าย *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074  $10^2$  cells·mL<sup>-1</sup> กับเวลาในควบคุม 1 ในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์

เวลา (min)	$10^2$ ครั้งที่ 1	$10^2$ ครั้งที่ 2	$10^2$ ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	2.81	2.89	2.80	2.83
60	2.82	2.81	2.81	2.81
120	2.69	2.79	2.80	2.76
180	2.68	2.71	2.81	2.73
240	2.72	2.71	2.70	2.71
ประสิทธิภาพ (%)	3.20	6.23	3.57	4.35



ตารางที่ ก.15 ข้อมูลความหนาแน่นสาหร่าย *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074  $10^2$  cells·mL<sup>-1</sup> กับเวลาในชุดควบคุม 2 ในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์

เวลา (min)	$10^2$ ครั้งที่ 1	$10^2$ ครั้งที่ 2	$10^2$ ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	2.79	2.74	2.80	2.78
60	2.75	2.79	2.78	2.77
120	2.69	2.79	2.80	2.76
180	2.71	2.69	2.67	2.69
240	2.70	2.69	2.67	2.69
ประสิทธิภาพ (%)	3.23	1.82	4.64	3.24

ตารางที่ ก.16 ข้อมูลความหนาแน่นสาหร่าย *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074  $10^4$  cells·mL<sup>-1</sup> กับเวลาในชุดทดลองในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์

เวลา (min)	$10^4$ ครั้งที่ 1	$10^4$ ครั้งที่ 2	$10^4$ ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	4.10	4.00	4.00	4.03
60	3.79	3.71	3.62	3.71
120	3.19	3.41	3.11	3.24
180	2.82	2.48	2.61	2.64
240	1.91	2.09	2.60	2.20
ประสิทธิภาพ (%)	53.41	47.75	35.00	45.45

ตารางที่ ก.17 ข้อมูลความหนาแน่นสาหร่าย *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074  $10^4$  cells·mL<sup>-1</sup> กับเวลาในควบคุม 1 ในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์

เวลา (min)	$10^4$ ครั้งที่ 1	$10^4$ ครั้งที่ 2	$10^4$ ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	4.20	4.02	4.08	4.10
60	3.99	3.98	4.11	4.03
120	3.99	3.91	4.00	3.97
180	4.00	3.90	3.87	3.92
240	3.90	3.88	3.81	3.86
ประสิทธิภาพ (%)	7.14	3.48	6.62	5.77

ตารางที่ ก.18 ข้อมูลความหนาแน่นสาหร่าย *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074  $10^4$  cells·mL<sup>-1</sup> กับเวลาในชุดควบคุม 2 ในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์

เวลา (min)	$10^4$ ครั้งที่ 1	$10^4$ ครั้งที่ 2	$10^4$ ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	4.11	4.19	4.08	4.13
60	4.00	3.98	4.00	3.99
120	4.00	3.92	3.88	3.93
180	4.00	3.90	3.78	3.89
240	3.82	3.79	3.71	3.77
ประสิทธิภาพ (%)	7.06	9.55	9.07	8.56

ตารางที่ ก.19 ข้อมูลความหนาแน่นสาหร่าย *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074  $10^6$  cells·mL<sup>-1</sup> กับเวลาในชุดทดลองในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์

เวลา (min)	$10^6$ ครั้งที่ 1	$10^6$ ครั้งที่ 2	$10^6$ ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	6.21	5.99	6.21	6.14
60	5.91	5.89	5.81	5.87
120	5.22	5.30	5.41	5.31
180	4.79	4.82	4.88	4.83
240	4.19	4.20	4.21	4.20
ประสิทธิภาพ (%)	32.53	29.88	32.21	31.56

ตารางที่ ก.20 ข้อมูลความหนาแน่นสาหร่าย *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074  $10^6$  cells·mL<sup>-1</sup> กับเวลาในควบคุม 1 ในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์

เวลา (min)	$10^6$ ครั้งที่ 1	$10^6$ ครั้งที่ 2	$10^6$ ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	6.01	6.10	6.02	6.04
60	5.94	5.99	5.92	5.95
120	5.94	5.99	5.91	7.28
180	5.81	5.99	5.81	5.87
240	5.79	5.87	5.82	5.83
ประสิทธิภาพ (%)	3.66	5.90	3.32	3.59

ตารางที่ ก.21 ข้อมูลความหนาแน่นสาหร่าย *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074  $10^6$  cells·mL<sup>-1</sup> กับเวลาในชุดควบคุม 2 ในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์

เวลา (min)	$10^6$ ครั้งที่ 1	$10^6$ ครั้งที่ 2	$10^6$ ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	6.11	6.19	6.12	6.14
60	6.11	6.18	5.91	6.07
120	5.97	5.99	5.90	5.95
180	5.92	5.87	5.78	5.86
240	5.81	5.87	5.82	5.83
ประสิทธิภาพ (%)	4.91	5.17	4.90	4.99

ตารางที่ ก.22 ข้อมูลความหนาแน่นสาหร่าย *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074  $10^8$  cells·mL<sup>-1</sup> กับเวลาในชุดทดลองในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์

เวลา (min)	$10^8$ ครั้งที่ 1	$10^8$ ครั้งที่ 2	$10^8$ ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	8.41	8.29	8.30	8.33
60	8.20	8.02	8.09	8.10
120	7.91	7.71	7.80	7.81
180	7.50	7.42	7.62	7.51
240	7.19	7.11	7.19	7.16
ประสิทธิภาพ (%)	0.00	14.23	13.37	14.04

ตารางที่ ก.23 ข้อมูลความหนาแน่นสาหร่าย *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074  $10^8$  cells·mL<sup>-1</sup> กับเวลาในควบคุม 1 ในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์

เวลา (min)	$10^8$ ครั้งที่ 1	$10^8$ ครั้งที่ 2	$10^8$ ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	8.31	8.29	8.29	8.30
60	8.31	8.29	8.19	8.26
120	8.19	8.29	8.19	8.22
180	8.19	8.22	8.15	8.19
240	8.20	8.21	8.10	8.17
ประสิทธิภาพ (%)	1.32	0.97	2.29	1.53

ตารางที่ ก.24 ข้อมูลความหนาแน่นสาหร่าย *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074  $10^8$  cells·mL<sup>-1</sup> กับเวลาในชุดควบคุม 2 ในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์

เวลา (min)	$10^8$ ครั้งที่ 1	$10^8$ ครั้งที่ 2	$10^8$ ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	8.31	8.30	8.30	8.30
60	8.31	8.23	8.23	8.26
120	8.25	8.19	8.23	8.22
180	8.25	8.19	8.16	8.20
240	8.22	8.12	8.10	8.15
ประสิทธิภาพ (%)	1.08	2.17	2.41	1.89

ตารางที่ ก.25 ข้อมูลความหนาแน่นสำหรับสาย *M. aeruginosa* TISTR 8305 กับเวลาในชุดทดลอง  
ในถังปฏิกรณ์แบบบราว

เวลา (min)	10 <sup>2</sup> ครั้งที่ 1	10 <sup>2</sup> ครั้งที่ 2	10 <sup>2</sup> ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	1.95	2.12	1.87	1.98
60	1.75	1.88	1.72	1.78
120	1.65	1.68	1.56	1.63
180	1.11	1.32	1.55	1.33
240	0.95	0.93	1.12	1.00
ประสิทธิภาพ (%)	51.28	56.13	40.11	49.49

ตารางที่ ก.26 ข้อมูลความหนาแน่นสำหรับสาย *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074 กับเวลาในชุดทดลอง  
ในถังปฏิกรณ์แบบบราว

เวลา (min)	10 <sup>2</sup> ครั้งที่ 1	10 <sup>2</sup> ครั้งที่ 2	10 <sup>2</sup> ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	2.24	2.56	1.99	2.26
60	2.25	2.11	2.23	2.20
120	1.95	2.02	1.83	1.93
180	1.65	1.42	2.02	1.70
240	1.54	1.35	1.67	1.52
ประสิทธิภาพ (%)	31.25	47.27	16.08	32.84

ตารางที่ ก.27 ข้อมูลความหนาแน่นสำหรับ *M. aeruginosa* TISTR 8305 กับเวลาในชุดควบคุม  
ในถังปฏิกรณ์แบบบราว

เวลา (min)	10 <sup>2</sup> ครั้งที่ 1	10 <sup>2</sup> ครั้งที่ 2	10 <sup>2</sup> ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	2.40	2.30	2.30	2.33
60	2.30	2.40	2.30	2.33
120	2.40	2.30	2.40	2.37
180	2.30	2.40	2.40	2.37
240	2.40	2.20	2.30	2.30
ประสิทธิภาพ (%)	0.00	4.35	0.00	1.43

ตารางที่ ก.28 ข้อมูลความหนาแน่นสำหรับ *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074 กับเวลาในชุดควบคุม  
ในถังปฏิกรณ์แบบบราว

เวลา (min)	10 <sup>2</sup> ครั้งที่ 1	10 <sup>2</sup> ครั้งที่ 2	10 <sup>2</sup> ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	2.40	2.30	2.30	2.33
60	2.20	2.20	2.30	2.23
120	2.00	2.20	2.20	2.13
180	2.30	2.30	2.40	2.33
240	2.20	2.30	2.10	2.20
ประสิทธิภาพ (%)	8.33	0.00	8.70	5.71

ตารางที่ ก.29 ข้อมูลค่าคลอโรฟิลล์สำหรับสาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305 กับเวลาในชุดทดลอง ในถังปฏิกรณ์แบบบราว

เวลา (min)	10 <sup>2</sup> ครั้งที่ 1	10 <sup>2</sup> ครั้งที่ 2	10 <sup>2</sup> ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	579.00	677.00	823.00	693.00
60	686.00	534.00	722.00	647.33
120	565.00	477.00	432.00	491.33
180	442.00	324.00	319.00	361.67
240	380.00	215.00	294.00	296.33
ประสิทธิภาพ (%)	34.37	68.24	64.28	57.24

ตารางที่ ก.30 ข้อมูลค่าคลอโรฟิลล์สำหรับสาหร่าย *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074 กับเวลาในชุดทดลอง ในถังปฏิกรณ์แบบบราว

เวลา (min)	10 <sup>2</sup> ครั้งที่ 1	10 <sup>2</sup> ครั้งที่ 2	10 <sup>2</sup> ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	616.00	722.00	694.00	677.00
60	665.00	659.00	577.00	634.00
120	534.00	422.00	498.00	485.00
180	462.00	511.00	419.00	464.00
240	402.00	438.00	386.00	409.00
ประสิทธิภาพ (%)	34.74	39.34	44.38	39.67



ตารางที่ ก.31 ข้อมูลค่าคลอโรฟิลล์สำหรับสาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305 กับเวลาในชุดควบคุม  
ในถังปฏิกรณ์แบบวาง

เวลา (min)	10 <sup>2</sup> ครั้งที่ 1	10 <sup>2</sup> ครั้งที่ 2	10 <sup>2</sup> ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	650.00	650.00	650.00	650.00
60	662.00	652.00	666.00	650.00
120	645.00	650.00	671.00	655.00
180	642.00	621.00	642.00	635.00
240	642.00	643.00	641.00	642.00
ประสิทธิภาพ (%)	1.23	1.08	1.38	1.23

ตารางที่ ก.32 ข้อมูลค่าคลอโรฟิลล์สำหรับสาหร่าย *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074 กับเวลา  
ในชุดควบคุม ในถังปฏิกรณ์แบบวาง

เวลา (min)	10 <sup>2</sup> ครั้งที่ 1	10 <sup>2</sup> ครั้งที่ 2	10 <sup>2</sup> ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	698.00	701.00	693.00	697.00
60	721.00	711.00	693.00	708.00
120	675.00	682.00	659.00	672.00
180	686.00	673.00	695.00	685.00
240	698.00	643.00	642.00	662.00
ประสิทธิภาพ (%)	0.00	8.27	7.36	5.21

ตารางที่ ก.33 ข้อมูลค่า ATP สำหรับสาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305 กับเวลาในชุดทดลอง  
ในถังปฏิกรณ์แบบบราว

เวลา (min)	10 <sup>2</sup> ครั้งที่ 1	10 <sup>2</sup> ครั้งที่ 2	10 <sup>2</sup> ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	6,678.00	6,895.00	6,421.00	6,664.67
60	5,009.00	5,409.00	5,762.00	5,393.33
120	4,009.00	4,572.00	4,213.00	4,264.67
180	2,661.00	3,012.00	2,875.00	2,849.33
240	2,300.00	2,371.00	2,321.00	2,330.67
ประสิทธิภาพ (%)	65.56	65.61	63.85	65.03

ตารางที่ ก.34 ข้อมูลค่า ATP สำหรับสาหร่าย *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074 กับเวลาในชุดทดลอง  
ในถังปฏิกรณ์แบบบราว

เวลา (min)	10 <sup>2</sup> ครั้งที่ 1	10 <sup>2</sup> ครั้งที่ 2	10 <sup>2</sup> ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	5,682.00	6,214.00	6,087.00	5,994.33
60	5,148.00	5,420.00	5,421.00	5,329.67
120	3,528.00	3,754.00	3,682.00	3,654.67
180	2,015.00	2,492.00	2,273.00	2,260.00
240	1,534.00	1,624.00	1,506.00	1,554.67
ประสิทธิภาพ (%)	73.00	73.87	75.26	74.06

ตารางที่ ก.11 ข้อมูลค่า ATP สำหรับสาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305 กับเวลาในชุดควบคุม  
ในถังปฏิกรณ์แบบบราว

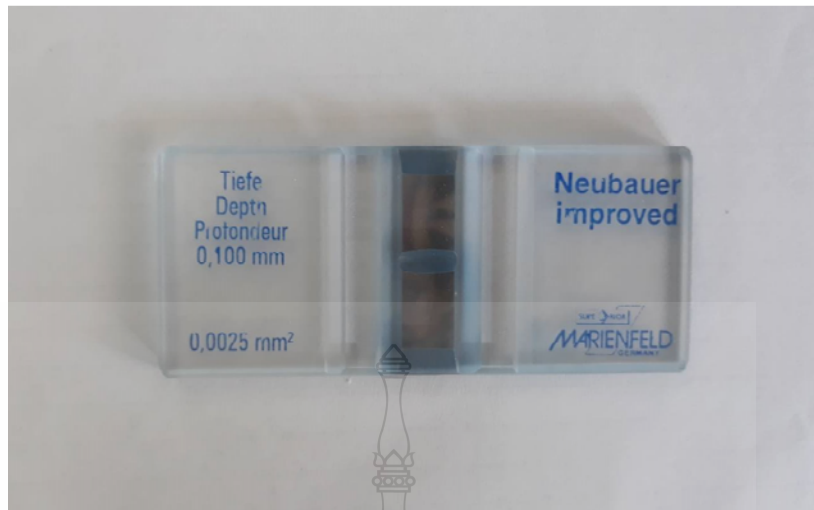
เวลา (min)	10 <sup>2</sup> ครั้งที่ 1	10 <sup>2</sup> ครั้งที่ 2	10 <sup>2</sup> ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	6,875.00	6,894.00	6,900.00	6,889.67
60	6,768.00	6,821.00	6,809.00	6,799.33
120	6,786.00	6,864.00	6,861.00	6,837.00
180	6,841.00	6,852.00	6,609.00	6,767.33
240	6,685.00	6,521.00	6,795.00	6,667.00
ประสิทธิภาพ (%)	2.76	5740.00	1.52	3.23

ตารางที่ ก.12 ข้อมูลค่า ATP สำหรับสาหร่าย *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074 กับเวลาในชุดควบคุม  
ในถังปฏิกรณ์แบบบราว

เวลา (min)	10 <sup>2</sup> ครั้งที่ 1	10 <sup>2</sup> ครั้งที่ 2	10 <sup>2</sup> ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	5,788.00	5,792.00	5,748.00	5,770.00
60	5,754.00	5,747.00	5,743.00	5,748.00
120	5,716.00	5,719.00	5,721.00	5,718.67
180	5,768.00	5,742.00	5,739.00	5,749.67
240	5,776.00	5,728.00	5,735.00	5,746.33
ประสิทธิภาพ (%)	0.21	1.10	0.23	0.51

ภาคผนวก ข  
อุปกรณ์การทดลอง





รูปที่ ข.1 Haemacytometer



รูปที่ ข.2 เครื่อง HPLC (High Performance Liquid Chromatography)



รูปที่ ข.3 อุปกรณ์ทดสอบสารพิษ (1)



รูปที่ ข.4 อุปกรณ์ทดสอบสารพิษ (2)



รูปที่ ข.5 สำหรับ *M. aeruginosa* TISTR 8305 และ *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074

ที่เลี้ยงในอาหารสูตร BG11 (1)



รูปที่ ข.6 สำหรับ *M. aeruginosa* TISTR 8305 และ *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074

ที่เลี้ยงในอาหารสูตร BG11 (2)



ภาคผนวก ค  
เอกสารการประชุมวิชาการ





เอกสารประกอบ  
**การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 19**  
 27-29 พฤษภาคม 2563 โรงแรมเฮอริเทจ เชียงราย จังหวัดเชียงราย  
 (บทความฉบับสมบูรณ์)



**บรรณาธิการ**

ธเรศ ศรีสถิตย์ วันเพ็ญ วิโรจนนุกุล สุชาติ เหลืองประเสริฐ ต่อพงษ์ กวีธาชาติ อนุสรณ์ บุญปก



## คณะกรรมการสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย

ผู้ทรงคุณวุฒิภาคีสภาคณะ	ศ.กิตติคุณ ดร. ธงชัย พรรณสวัสดิ์
ที่ปรึกษาภาคีสภาคณะ	ผศ.พิเศษ ประณี พันธมสินชัย ดร. เกษมสันต์ สุวรรณรัตน์ ดร. ประเสริฐ ตปนียางกูร
นายก	ศ.กิตติคุณ ดร. ธเรศ ศรีสถิตย์
อุปนายก	รศ.ดร. วันเพ็ญ วิโรจนภุช รศ.ดร. วราวุธ เสือดี
กรรมการกลาง	รศ.ดร. ซาติ เขียมไชยศรี ผศ.ดร. ศรีณีย์ เตชะเสนา รศ.ดร. ต่อพงษ์ กริธาชาติ ผศ.ดร. ดลเดช ตั้งตระกูลพงษ์
ประธานฝ่ายกิจกรรม	รศ.ดร. เพ็ชรพร เขาวกิจเจริญ
ประธานฝ่ายวิชาการ	รศ.ดร. สุชาติ เหลืองประเสริฐ
ประธานฝ่ายการเงิน	รศ.ดร. วิษณุ มื้ออยู่
เลขาธิการ	ผศ.ดร. อัจฉริยา สุริยะวงศ์

## กองบรรณาธิการ

ศ.กิตติคุณ ดร. ธีรศ ศรีสถิตย์

รศ.ดร. วันเพ็ญ วิโรจนกุล

รศ.ดร. สุชาติ เหลืองประเสริฐ

รศ.ดร. ต่อพงศ์ กรีธาชาติ

ผศ.ดร. อนุสรณ์ บุญปก

สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย

สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย

คณะวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คณะพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยพะเยา

คณะพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์



## เจ้าภาพร่วมจัด

### คณะพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยพะเยา

#### ที่ปรึกษา

รศ.ดร. สุภกร พงศบางโพธิ์  
รศ.ดร. เสมอ ถาน้อย

#### ประธานคณะกรรมการจัดงาน

รศ.ดร. ต่อพงศ์ กวีธาดา

#### คณะกรรมการฝ่ายวิชาการและการจัดทำ Proceedings

ผศ.ดร. อนุสรณ์ บุญปก  
ดร. โสมนัส สมประเสริฐ  
ดร. ศตวรรษ ทนารัตน์

#### คณะกรรมการฝ่ายพิธีการและต้อนรับ

ดร. สุรัตน์ เศษโพธิ์  
ผศ.ดร. เนติยา กวีธาดา  
ดร. สุปรีดา ทอมกลิ่น  
ดร. สุขุมมา ชิตาภรณ์พันธุ์  
อ. ชัยวัฒน์ โพธิ์ทอง

ผศ.ดร. สุขทัย พงศ์พัฒนศิริ  
ผศ.ดร. บุหรีน พันธุ์สุวรรณค์  
ผศ.ดร. รัฐภูมิ พรหมณะ  
ผศ.ดร. กฤตชญา อีสกุล  
ผศ.ดร. ธีรชัย อำนวยลือเจริญ

#### คณะกรรมการฝ่ายประชาสัมพันธ์ ประสานงานและประเมินผล

ผศ.ดร. ศักดิ์สิทธิ์ อิมแมน  
ผศ.ดร. สิทธิชัย พิมลศรี

ดร. สุขัญญา ทองเครือ  
อ. พิมพ์ศิริ สุวรรณพัฒน์

#### คณะกรรมการฝ่ายเลขานุการ

คุณณรงค์ฤทธิ์ อมรินทร์  
คุณนพตล มั่นที่สุด

## หน่วยงานร่วมจัด

กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

กระทรวงอุตสาหกรรม

กระทรวงพลังงาน

กรมควบคุมมลพิษ

สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม



## สารจากนายกสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย

สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย (สวสท.) เป็นผู้ดำเนินการจัดการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติเป็นประจำทุกปีมาตั้งแต่ พ.ศ. 2545 มีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นเวทีให้นักวิชาการ นักวิจัย และผู้มีประสบการณ์ ผู้สนใจนำเสนอผลงานวิจัย ผลงานประยุกต์ และข้อคิดเห็นเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมด้านต่างๆ ซึ่งเป็นการพัฒนาและเผยแพร่องค์ความรู้ เพื่อนำไปใช้ในการป้องกัน และแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมของสังคมและประเทศไทย ในปีนี้ สวสท. ได้รับเกียรติอย่างสูงจากมหาวิทยาลัยพะเยา ร่วมจัดการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 19 ควบคู่กับการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมนานาชาติครั้งที่ 9

ตั้งแต่วันที่ทราบกันดีว่าตั้งแต่ปลายปี พ.ศ. 2562 จนถึงต้นปี พ.ศ. 2563 เป็นต้นมา ประเทศไทยได้เผชิญปัญหาโรคระบาด COVID-19 และได้มีการประกาศพระราชกำหนดการบริหารราชการในสถานการณ์ฉุกเฉิน โดยห้ามจัดการประชุมวิชาการที่มีการรวมบุคลากรจำนวนมาก ประกอบกับมาตรการของทางราชการที่จัดให้ประชาชนมีระยะห่างทางสังคม (Social Distancing) ด้วยความตระหนักต่อความรับผิดชอบต่อสุขภาพของผู้เข้าร่วมประชุม คณะผู้จัดงานจึงได้เลื่อนการจัดการประชุมออกไปในวันที่ 7-9 ตุลาคม พ.ศ. 2563 ณ สถานที่เดิม แต่กระบวนการดำเนินการจัดประชุมยังคงเดินต่อไปตามกำหนดที่ทางผู้จัดได้จัดทำไว้ อาทิ การรับลงทะเบียน การส่งบทความ การพิจารณาบทความ การจัดทำเอกสารประกอบการประชุม (Proceeding) รวมทั้งการนำเสนอบทความแบบปากเปล่าตามความต้องการของผู้นำเสนอบทความ เป็นต้น

คณะกรรมการจัดการประชุมได้รวบรวมบทคัดย่อ ซึ่งผ่านการกลั่นกรองจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ และกองบรรณาธิการไว้เป็นรูปเล่ม และบทความวิชาการฉบับเต็มในรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้น คุณภาพเอกสารดังกล่าว จึงเป็นไปตามมาตรฐานระหว่างประเทศ โดยในการประชุมมีการบรรยายพิเศษ การเสนอผลงาน ทั้งด้วยการบรรยายและโปสเตอร์ นอกจากนี้ สวสท. ได้รับความร่วมมือและสนับสนุนอย่างดียิ่งจากหน่วยราชการต่างๆ ดังนี้ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม กระทรวงพลังงาน กรมควบคุมมลพิษ และสำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

ในนามของ สวสท. กระผมขอแสดงความยินดีและขอบคุณทุกท่านที่ได้มีส่วนร่วมในการนำเสนอผลงานวิจัยและผลงานประยุกต์ และหน่วยสนับสนุนอื่นๆ รวมทั้งบริษัทเอกชนต่างๆ ดังต่อไปนี้ บริษัท ปูนซิเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน) บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) บริษัท บางจาก คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน) บริษัท แอสโซซิเอชันออฟฟัทร จำกัด และ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย (ศสอ.) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในทุกรูปแบบ และหวังอย่างยิ่งว่าผลการประชุมวิชาการในครั้งนี้จะสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ทุกประการ

ศาสตราจารย์ กิตติคุณ ดร. ธีรศ ศรีสถิตย์  
นายกสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย

## สารจากอธิการบดีมหาวิทยาลัยพะเยา

การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ซึ่งจัดโดยสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย (สวสท.) เป็นเวทีที่สำคัญให้นักวิชาการและนักวิจัยได้นำเสนอผลงานทางวิชาการที่เป็นประโยชน์เกี่ยวกับสิ่งแวดล้อม ในปีนี้ มหาวิทยาลัยพะเยา ได้รับเกียรติอย่างสูงจาก สวสท. ให้เป็นเจ้าภาพร่วมจัดการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 19 ควบคู่กับการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมนานาชาติครั้งที่ 9

เนื่องด้วยสถานการณ์ปัจจุบันประเทศไทยได้เผชิญปัญหาโรคระบาด COVID-19 และได้มีการห้ามจัดประชุมรวมกลุ่มบุคคลจำนวนมาก จึงได้มีการปรับกิจกรรมต่างๆ เพื่อความเหมาะสมกับสถานการณ์ แต่อย่างไรก็ตามยังคงมีกระบวนการต่างๆ เพื่อให้การประชุมวิชาการมีความสมบูรณ์และเป็นไปตามมาตรฐานของการประชุมวิชาการทุกประการ ทั้งกิจกรรมการบรรยายพิเศษ การเสนอผลงาน ทั้งด้วยการบรรยายและโปสเตอร์

มหาวิทยาลัยพะเยา ขอขอบคุณหน่วยราชการและหน่วยสนับสนุนอื่นๆ อันได้แก่ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม กระทรวงพลังงาน กรมควบคุมมลพิษ สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม และ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย (ศสอ.) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รวมทั้งบริษัทเอกชนต่างๆ อันประกอบด้วย บริษัท ปูนซิเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน) บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) บริษัท บางจาก คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน) และ บริษัท แอสโซซิเอชันออฟทรี จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในทุกรูปแบบ ตลอดจนคณะกรรมการจัดประชุมทุกฝ่าย ที่ได้รวบรวมบทความที่ย่อย ซึ่งผ่านการกลั่นกรองจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ และกองบรรณาธิการไว้เป็นรูปเล่ม และบทความวิชาการฉบับเต็มในรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์

ในนามของมหาวิทยาลัยพะเยา ดิฉันขอแสดงความยินดีและขอบคุณทุกท่านที่ได้มีส่วนร่วมในการนำเสนอผลงานวิจัยและผลงานประยุกต์ และหวังอย่างยิ่งว่าผลการประชุมวิชาการในครั้งนี้จะสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ทุกประการ

  
รองศาสตราจารย์ ดร. สุภกร พงศบางโพธิ์  
อธิการบดีมหาวิทยาลัยพะเยา

## สารบัญ

### นำเสนอผลงานด้วยวาจา (Oral Presentation)

001	ปัจจัยที่ทำให้เกิดเศษวัสดุและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในงานก่อสร้าง กรณีศึกษาอาคารการเรียนรู้ 100 ปี <u>สุพัตรา ทองบุญ และ จงรักษ์ ผลประเสริฐ</u>	1
002	การจัดการขยะมูลฝอยงานวิ้งมาราธอนระดับนานาชาติในจังหวัดภูเก็ต สินีนภฎ พวงมณี และ <u>มาลิก แซ่อาทลี</u>	8
003	การจัดการขยะมูลฝอยชุมชน: กรณีศึกษาดานคนเดินกลาง สินีนภฎ พวงมณี และ <u>กัลญารัตน์ ช่วยศรีนวล</u>	16
004	ผลของความเข้มข้น COD ที่มีต่อการบำบัดน้ำชะขยะสังเคราะห์และการผลิตไฟฟ้า ด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบถังกรอง เพชร เพ็งชัย <u>กนกพรรณ ใจขาน ศศิภากรณ์ ปิติมล และ ทรรศ มงคลพิศ</u>	24
005	ประสิทธิภาพการกรองของเยื่อกรองแบบไมโครโดยใช้สารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง สุพัฒน์พงษ์ มัตราช และ <u>ศุภินันท์ สันติกุล</u>	29
006	สถานการณ์และการเก็บรวบรวมมูลฝอยในอำเภอปากเซ ประเทศลาว <u>บุญปอน บุญวิไล และ สมภพ สอนองราชกูร์</u>	36
007	ระบบตรวจวัดดัชนีฝุ่นละอองขนาดเล็กในอากาศและแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันไลน์ <u>ชาญชัย อรรถผาดี และ พงศธร บัวทอง</u>	44
008	สมรรถนะเครื่องฟอกอากาศแบบทำด้วยตนเองในการกำจัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก <u>มณีรัตน์ องค์กรธรรมดี กมลชัย ยงประพัฒน์ และ ชูเกียรติ วิเชียรเจริญ</u>	51

009	การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากเรือพลังงานแสงอาทิตย์แบบคาตามารานขนาดเล็ก <u>สรวิษฐ์ หงษ์พาเวียน กันต์ ปานประยูร และ มณฑิรา ยุติธรรม</u>	58
011	การกำจัดสารประกอบไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในบ่อน้ำด้วยผักตบชวาและจอก เพชร เพ็งชัย <u>พิชิตชัย ป้องนางไชย และ รัตนพร แผลติตะ</u>	65
012	การกำจัดสาหร่ายในแหล่งน้ำดิบด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก <u>สุภัตรา มีคติธรรม ธรรมศักดิ์ โรจน์วิรุฬห์ สัญญา สิริวิทยาปกรณ์ อรรพรรณ โรจน์วิรุฬห์</u> และ <u>ณัฐพล ขาวสวน</u>	71
013	การกำจัดสีด้วยโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันร่วมกับการเติมอากาศขนาดนาโนแบบเปิด <u>อรกษ สุทธิวัฒน์กุล ธรรมศักดิ์ โรจน์วิรุฬห์ อรรพรรณ โรจน์วิรุฬห์ และ สัญญา สิริวิทยาปกรณ์</u>	79
014	คุณภาพอากาศภายในสถานประกอบการรับซื้อของเก่าในตำบลบ้านกอก อำเภอเขื่องใน จังหวัดอุบลราชธานี <u>กุลวรรณ ไสร์จรัญ อนุวัฒน์ ยินดีสุข อรรพรรณ บุญโสม และ กฤตวิชญ์ สุขอึ้ง</u>	85
015	ผลของปูนขาวต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน <i>Spirulina platensis</i> <u>ทรงพล บัวอ่อน และ รัฐภูมิ พรหมณะ</u>	91
017	การผลิตก๊าซชีวภาพจากข้าวฟ่างหวานด้วยระบบ Leach-Bed Reactor <u>ปาริชาติ แยมศรี นงลักษณ์ โรจน์แสง สมชาย ดารารัตน์ และ เอริน เภาภูทอง</u>	97
018	การบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมพอลิเอทิลีนโดยใช้การตกตะกอนด้วยไฟฟ้าและโอโซน <u>ธิดารัตน์ ชมภูราช และ ทิพย์สุรีย์ กรบุญรักษา</u>	105
019	การกำจัดไนโตรเจนด้วยกระบวนการไนตริเตชันและอนาโม็กซในระบบบึงประดิษฐ์ <u>ทศพล แทนทรัพย์ สุวศา กานตวนิชกูร วรรณิการ์ สัจจาพันธ์ และ พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์</u>	113
020	การยับยั้งการเจริญเติบโตของ <i>Chlorella sp.</i> ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันและ โคแอกกูเลชัน <u>เกื้อกุล นฤเกต และ ทิพย์สุรีย์ กรบุญรักษา</u>	120





## การกำจัดสาหร่ายในแหล่งน้ำดิบด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก Removal of Algae in Tap Water by Photocatalytic Process

สุพัตรา มีคัตติธรรม<sup>1\*</sup> อรรณศักดิ์ วัฒนวิรุฬห์<sup>1</sup> สันญา สิทธิวิทยาปรกรณ์<sup>1</sup> อรวรรณ วัฒนวิรุฬห์<sup>1</sup> และ ณัฐพล ชาวสวน<sup>1</sup>  
Suphattra Meekattitam<sup>1\*</sup> Thammasak Rojviroon<sup>2</sup> Sanya Sirivithayapakorn<sup>3</sup> Orawan Rojviroon<sup>4</sup> and Natthaphon Chaosuan<sup>3</sup>

<sup>1</sup>นิสิตบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี 12110;

<sup>2</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี 12110

<sup>3</sup>อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

<sup>4</sup>นักวิชาการการศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

โทรศัพท์ : 02-549-3410, E-mail : suphattra\_m@mail.rmutt.ac.th

### บทคัดย่อ

การกำจัดสาหร่ายในแหล่งน้ำดิบด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) แบบฟิล์มบาง เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 30-70 nm มีพื้นที่ผิวปรากฏขนาด 1.02 μm<sup>2</sup> บนพื้นที่ผิวที่วิเคราะห์ขนาด 1 μm<sup>2</sup> ค่าความขรุขระเฉลี่ย เท่ากับ 1.52 nm รวมทั้งมีขนาดช่องว่างหลังงานเท่ากับ 3.25 eV ในส่วนของการประเมินประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย *Anabaena lutea* สายพันธุ์ TISTR NO. 8074 ทำการทดลองในถังปฏิกรณ์ชนิดไหลต่อเนื่องภายใต้แสงอาทิตย์เป็นเวลา 240 min พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายดังกล่าวมีค่าสูงสุดเท่ากับ 32.84% ปริมาณคลอโรฟิลล์และค่า ATP ลดลงสูงสุดมีค่าเท่ากับ 39.67% และ 65.03% ตามลำดับ เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของลักษณะทางกายภาพของสาหร่าย พบว่า เซลล์สาหร่ายมีลักษณะเหี่ยวและเสื่อมสภาพหลังการทดลอง นอกจากนี้การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสารพิษ Anatoxin ตลอดระยะเวลาในการทำการทดลองไม่พบปริมาณสารพิษ ในขณะที่ทดลอง ซึ่งอาจเกิดจากสาหร่ายยังไม่อยู่ในสภาพสมบูรณ์หรือเหมาะสมในการสร้างและปลดปล่อยสารพิษ หรือมีปริมาณสารพิษต่ำในระดับที่ไม่สามารถตรวจพบ สำหรับจลนพลศาสตร์ที่ใช้ในการอธิบายการกำจัดสาหร่ายด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกมีความสัมพันธ์เป็นไปตามรูปแบบของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งซึ่งมีค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาสูงสุด เท่ากับ 2.4×10<sup>-3</sup> min<sup>-1</sup> ที่ความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายเริ่มต้น เท่ากับ 10<sup>7</sup> cells·mL<sup>-1</sup>

คำสำคัญ : โฟโตออกซิเดชัน, ไทเทเนียมไดออกไซด์, อนาบินา, สารพิษจากสาหร่าย

### Abstract

This work presents the removal efficiencies of algae in tap water by photocatalytic process with titanium dioxide catalysts (TiO<sub>2</sub>) thin film. The physical characteristics of the prepared catalysts in term of particle sizes were in the range of 30-70 nm. The apparent surface area was 1.02 μm<sup>2</sup> on the analysis surface area of 1 μm<sup>2</sup> and the surface roughness of catalysts was 1.52 nm with the energy gap was 3.25 eV. In terms of evaluating the removal efficiency of *Anabaena lutea* TISTR NO. 8074. The experiment was conducted in a continuous flow reactor under sunlight radiation for 240 min. The results showed that the highest removal efficiency of algae was 32.84%. Chlorophyll quantity and ATP can be reduced by 65.03% and 39.67%, respectively. Considering changes in physical characteristics of algae, it was found that algae cells wilted and deteriorated after the experiment. In addition, the analysis of Anatoxin throughout the experiment period showed that no toxic substance could be detected, which may be because of either algae are not being in suitable condition for the creation and release of toxic substances or the toxic substances present at level below detection limit. For the kinetics used to describe the removal of algae by photocatalytic processes, the

experiment data indicate the correlation with the first order reaction kinetic with the highest reaction constant of  $2.4 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ , where the initial cell density of algae is  $10^2 \text{ cells}\cdot\text{mL}^{-1}$

**Keywords :** Photo-oxidation, Titanium dioxide, *Anabaena*, Toxins from algae

## บทนำ

ในปัจจุบันปัญหาการเจริญเติบโตของสาหร่ายเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วจากการเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน ซึ่งมีสาหร่ายที่พบบ่อยหลายชนิด เช่น *Microcystis aeruginosa*, *Cylindrospermopsis raciborskii*, *Anabaena spp.* และ *Oscillatoria spp.* เป็นต้น [1] สาหร่ายบางชนิดสามารถผลิตสารพิษบางประเภทที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ และสัตว์ในสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังเป็นปัญหาต่อระบบผลิตน้ำประปา [2] และยังก่อให้เกิดกลิ่น สี รสชาติของน้ำที่ไม่พึงประสงค์ ทำให้สิ้นเปลืองสารเคมีในการกำจัด และค่าใช้จ่ายในการดูแลระบบ ปัญหาที่เกิดขึ้นส่งผลกระทบต่อทั้งภาคชุมชน และอุตสาหกรรม ในการจัดหาแหล่งน้ำ และการผลิตน้ำประปาที่ได้คุณภาพ

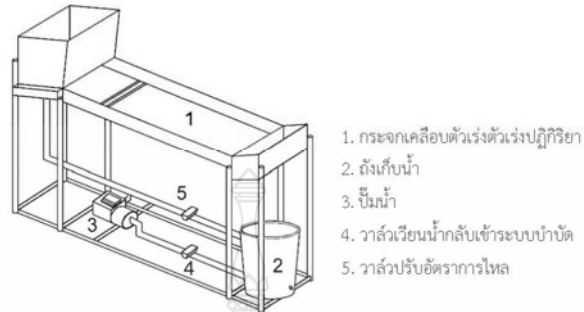
ตั้งแต่นั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาการประยุกต์ใช้กระบวนการโฟโตคะตะลิสติก (Photocatalytic process) ในการกำจัด การสะสมของสาหร่าย *Anabaena lutea* สายพันธุ์ TISTR NO. 8074 ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ชนิดฟิล์มบาง ซึ่งกระบวนการดังกล่าวมีความสามารถในการออกซิไดซ์ที่ดี มีเสถียรภาพทางเคมีสูง ทำปฏิกิริยาได้ดี รวมถึงตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ฟิล์มบางที่ใช้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ ลดปัญหาการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาที่แขวนลอยออกจากระบบ และมีราคาถูก ทั้งนี้งานวิจัยนี้มุ่งเน้นลดค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีสำหรับกำจัดสาหร่ายในกระบวนการผลิตน้ำประปา และศึกษาถึงความเหมาะสมกับการใช้กระบวนการดังกล่าวกับระบบผลิตน้ำประปาขนาดเล็ก [3] โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ประเมินการกำจัดสาหร่าย ได้แก่ ความหนาแน่นของเซลล์สาหร่าย ปริมาณคลอโรฟิลล์ Adenosine triphosphate (ATP) และปริมาณสารพิษที่เกิดจากสาหร่ายและการเปลี่ยนแปลงตามเวลา

## อุปกรณ์และวิธีการ

เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  แบบฟิล์มบางโดยวิธีโซลเจล โดยใช้ไทเทเนียมเตตระไฮโดรฟลูออไรด์ (TTIP) เป็นสารตั้งต้นในตัวทำละลายไอโซโพรพานอล (IPA) ที่อุณหภูมิห้อง และปรับเพื่อเอชด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ให้อยู่ระหว่าง 2-3 โดยนำแผ่นกระจก ขนาด  $9.0 \times 11.0 \times 0.4 \text{ cm}$  จุ่มเคลือบ (Dip coating) จำนวน 5 ชั้น ซึ่งแต่ละชั้นของการเคลือบผิว นำไปอบที่อุณหภูมิ 100, 200, 250, 350 และ  $500^\circ\text{C}$  นาน 1 hr ตามลำดับ [4] และทำการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้น ได้แก่ ลักษณะพื้นผิว ขนาดอนุภาค ความขรุขระเฉลี่ย ด้วยอุปกรณ์ AFM/Asylum Research MFP-3DBIO ร่วมกับโปรแกรม Gwyddion V.2.22 และขนาดช่องว่างแถบพลังงานด้วยอุปกรณ์ UVspectrometer/ Lambda 650 Perkin

## การประเมินประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย

ทำการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Anabaena lutea* สายพันธุ์ TISTR NO. 8074 จากศูนย์จุลินทรีย์ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย เพาะเลี้ยงในอาหารสูตร BG-11 ในขวดรูปชมพู่ โดยให้ค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ  $10^2 \text{ cells/mL}$  ทำการให้แสงสลัดกับไม่ให้แสงช่วงละ 12 hr ระดับความเข้มแสง 3,000 Lux ที่อุณหภูมิ  $28^\circ\text{C}$  นำแผ่นกระจกที่เคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  ฟิล์มบางวางลงในถังปฏิกรณ์แบบไหลต่อเนื่อง ทำการทดลองด้วยอัตราการไหลของน้ำเข้าระบบเท่ากับ  $30 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  (อัตราการไหลตามค่ามาตรฐานในการผลิตน้ำประปาสำหรับหมู่บ้านของแบบโยธาธิการแบบ ข) [5] โดยความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายเริ่มต้นเท่ากับ  $10^2 \text{ cells}\cdot\text{mL}^{-1}$  ภายใต้สภาวะที่มีแสงจากดวงอาทิตย์เป็นเวลา 240 min มีความเข้มแสงเฉลี่ยเท่ากับ  $1,240 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$  และขณะทำการทดลองเก็บข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของเซลล์สาหร่าย ( $\text{cells}\cdot\text{mL}^{-1}$ ) และ ปริมาณคลอโรฟิลล์ ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) และ ATP ด้วยอุปกรณ์ Haemocytometer, Microscope และ Chlorophyll determination methods ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 1 รวมทั้งสังเกตการเปลี่ยนแปลงของเซลล์สาหร่ายหลังผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิสติกเป็นเวลา 240 min ด้วยอุปกรณ์ SEM-EDS (6610LV) ทั้งนี้ในส่วนของการทำการทดลองได้ศึกษาเปรียบเทียบกับชุดควบคุมในสภาวะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  แบบฟิล์มบางแต่ไม่มีการให้แสง รวมทั้งศึกษาจากผลพหุศาสตร์ของกระบวนการโฟโตคะตะลิสติกในการกำจัดสาหร่ายดังกล่าว

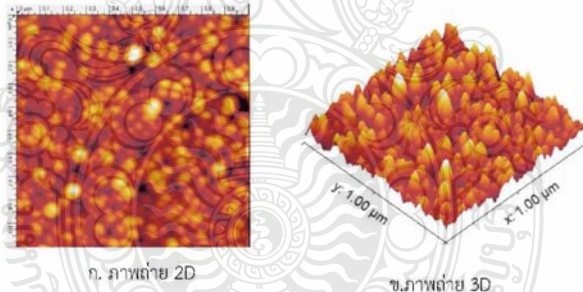


รูปที่ 1 ถังปฏิกรณ์แบบไหลต่อเนื่อง

**ผลการทดลองและวิจารณ์**

**ลักษณะกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา**

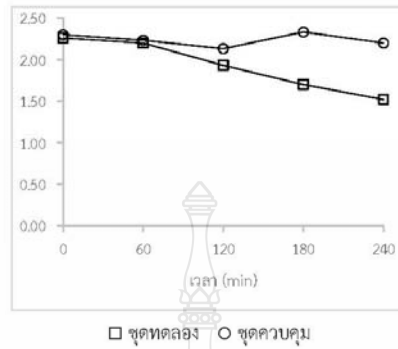
ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  แบบฟิล์มบาง พบว่า อนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  แบบฟิล์มบางสามารถเคลือบและยึดเกาะอยู่บนพื้นผิวของตัวกลางพร้อมทั้งกระจายทั่วบริเวณพื้นผิวของกระจกเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างสม่ำเสมอ มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 30-70 nm มีพื้นที่ผิวปรากฏขนาด  $1.02 \mu\text{m}^2$  บนพื้นที่ผิวที่วิเคราะห์ขนาด  $1 \mu\text{m}^2$  ค่าความขรุขระเฉลี่ย เท่ากับ 1.52 nm รวมทั้งมีขนาดช่องว่างพลังงาน เท่ากับ 3.25 eV จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าสามารถเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  แบบฟิล์มบางที่มีขนาดอนุภาคในระดับนาโน มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วบริเวณพื้นผิวตัวกลางกระจกแสดงดังรูปที่ 2 สำหรับขนาดช่องว่างแถบพลังงานมีค่าเท่ากับ 3.25 eV ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกได้ว่าเหมาะสมต่อการตอบสนองในช่วงคลื่นอัลตราไวโอเล็ตได้ ทำให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ เคลื่อนที่ไปสู่แถบการนำได้ทำให้เกิดกระบวนการโฟโตคะตะลิสติกได้ [6], [7]



รูปที่ 2 ลักษณะพื้นผิวทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

**ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย**

ผลการทดลองดังกล่าว พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิสติกมีค่าสูงสุดเท่ากับ 32.84% ที่เวลา 240 min ที่ค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายเริ่มต้น เท่ากับ  $10^2$  cells/mL โดยจำนวนเซลล์ลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาการทดลองผ่านไป ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองในชุดควบคุมสำหรับในชุดในสภาวะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  แบบฟิล์มบางแต่ไม่มีการให้แสง ผลการทดลองในส่วนของความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายไม่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเวลาผ่านไปแสดงดังรูปที่ 3



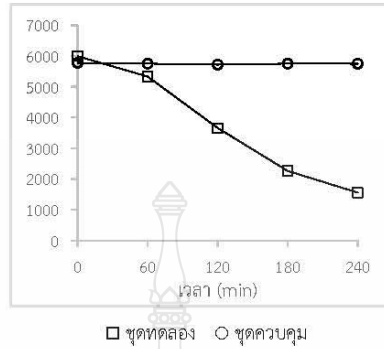
รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นสาหร่ายกับเวลา

ในส่วนปริมาณคลอโรฟิลล์มีการลดลงอย่างต่อเนื่องสอดคล้องกับปริมาณสาหร่ายที่ลดลงตามเวลา โดยปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลงสูงสุด เท่ากับ 39.67% ที่เวลา 240 min จากกระบวนการข้างต้นแสดงให้เห็นถึงกระบวนการโฟโตคะตะลิติกส่งผลโดยตรงกับความหนาแน่นของสาหร่าย *Anabaena lutea* ทำให้สาหร่ายผลิตคลอโรฟิลล์ได้ลดลง สอดคล้องกับผลการติดตามการเปลี่ยนแปลง ATP ในขณะที่ทำการทดลองเนื่องจาก ATP เป็นค่าที่บ่งชี้ถึงกิจกรรมการสร้างพลังงานภายในเซลล์ของสาหร่ายซึ่งโดยปกติแล้วเซลล์สิ่งมีชีวิตต่างๆต้องสร้าง ATP ขึ้นมาใหม่ตลอดเวลา แต่ข้อมูลจากการทดลอง พบว่า ค่า ATP ของสาหร่าย TISTR พบว่า ค่า ATP มีการเปลี่ยนแปลงลดลงอย่างชัดเจนตลอดเวลาขณะทำการทดลอง โดยค่า ATP มีค่าลดลงสูงสุดเท่ากับ 65.03% ที่เวลา 240 min เนื่องจากเมื่อเซลล์ถูกทำลายจึงไม่มีการสร้าง ATP ขึ้นมาทดแทนได้ [8] สำหรับในชุดควบคุม ไม่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเวลาผ่านไป แสดงดังรูปที่ 5



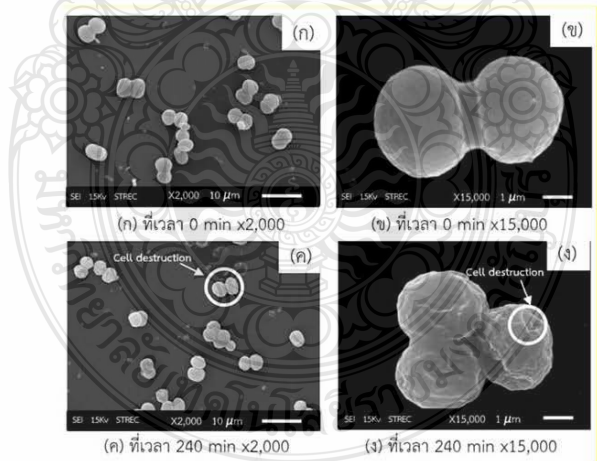
รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงของค่าคลอโรฟิลล์กับเวลา





รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงของค่า ATP กับเวลา

ผลการทดลองการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของเซลล์สาหร่ายด้วยอุปกรณ์ SEM-EDS (6610LV) ดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่า สามารถสังเกตความเสียหายและความเสื่อมสภาพของเซลล์สาหร่ายและพบว่า มีคลอโรพลาสต์หลุดออกจากเซลล์ แสดงให้เห็นว่า กระบวนการโฟโตคะตะลิสติกส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับเซลล์สาหร่ายซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  ที่เตรียมขึ้นถูกกระตุ้น โดยแสงอาทิตย์ที่มีพลังงานมากกว่าช่องว่างแถบพลังงานทำให้กระตุ้นอิเล็กตรอนหลุดออกจากแถบวาเลนซ์ไปสู่ แถบนำไฟฟ้า (Conduction band) ทำให้เกิดโฮล (Hole) ที่แถบวาเลนซ์ จึงทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารประกอบอินทรีย์ในเมแทบอลิซึม ได้แก่  $\cdot\text{OH}$  และ  $\cdot\text{O}_2$  ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับผนังเซลล์ทำให้เกิดการรั่วไหลของส่วนประกอบภายในเมแทบอลิซึม ไนเมแทบอลิซึมถูกออกซิไดซ์ทำให้เซลล์มีรูปร่างเสียรูปทรงจากเดิม ซึ่งอาจจะเกิดการรั่วที่ผนังเซลล์จึงทำให้เสียรูปทรงได้ [9] สำหรับ ในชุดควบคุม ไม่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเวลาผ่านไป แสดงดังรูปที่ 4 ทั้งนี้ในการตรวจสอบปริมาณสารพิษ Anotoxin ในขณะทดลอง ซึ่งอาจเกิดจากสาหร่ายยังไม่อยู่ในสภาพสมบูรณ์หรือเหมาะสมในการสร้างและปลดปล่อยสารพิษ หรือมีปริมาณสารพิษต่ำในระดับที่ไม่สามารถตรวจพบ [10], [11], [12]



รูปที่ 6 รูปร่างเซลล์สาหร่าย *Anabaena lutea* ที่เปลี่ยนแปลงหลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิสติก

ในส่วนของจลนพลศาสตร์ของที่ใช้อธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาในการกำจัดสาหร่ายสาหร่าย *Anabaena lutea* ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก พบว่า สามารถอธิบายโดยใช้สมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (First order equation) ซึ่งสามารถหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกได้จากการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln[C_0/C]$  กับ  $t$  ตามสมการของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ดังแสดงในสมการที่ 1-5

$$0 = -v \frac{dC}{dx} + r \quad (1)$$

$$0 = -v \frac{dC}{dx} - kC \quad (2)$$

$$kC = -v \frac{dC}{dx} \quad (3)$$

$$\frac{dC}{C} = -\frac{k}{v} dx \quad (4)$$

$$\ln C = -\frac{k}{v} [x]_0^t \quad (5)$$

โดยที่

$C_0$  = ความหนาแน่นสาหร่ายที่เวลาเริ่มต้น (cells·mL<sup>-1</sup>)

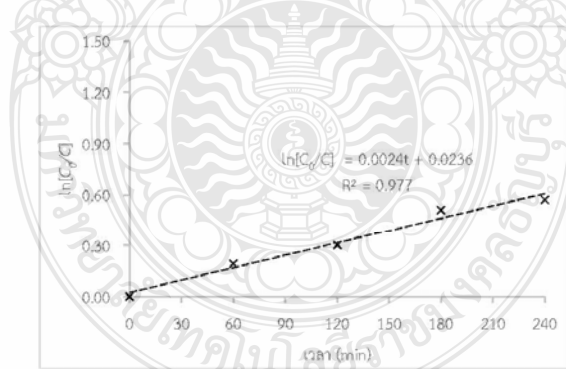
$C$  = ความหนาแน่นสาหร่ายที่เวลาสุดท้าย (cells·mL<sup>-1</sup>)

$k$  = ค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (min<sup>-1</sup>)

$v$  = อัตราการไหลในถังปฏิกรณ์ 30 L·min<sup>-1</sup>

$x$  = ความยาวของถังปฏิกรณ์ 1.42 m

จากรูปที่ 6 สามารถหาค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาในการกำจัดสาหร่ายสูงสุดมีค่าเท่ากับ  $2.4 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$  ที่ความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายเริ่มต้นเท่ากับ  $10^2 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$  [13]



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(C_0/C)$  กับเวลา ของสาหร่าย *Anabaena lutea*

## สรุป

ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย *Anabaena lutea* ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่มี  $\text{TiO}_2$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา มีประสิทธิภาพสูงเมื่อมีระยะเวลาในการทดลองมากขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นสาหร่าย ปริมาณคลอโรฟิลล์ ค่า ATP ของสาหร่าย ลดลงและเซลล์สาหร่ายเหี่ยวและเสื่อมสภาพ โดยมีค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาในการกำจัดสาหร่ายสูงสุดมีค่ากับ  $2.4 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$  ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสารพิษ Anotoxin ไม่พบปริมาณสารพิษในขณะทดลอง ซึ่งอาจเกิดจากสาหร่ายยังไม่อยู่ในสภาพ สมบูรณ์หรือเหมาะสมในการสร้างและปลดปล่อยสารพิษ หรือมีปริมาณสารพิษต่ำในระดับที่ไม่สามารถตรวจพบ เมื่อพิจารณา ในส่วนของการลดค่าใช้จ่ายสารเคมีเมื่อใช้กระบวนการโฟโตคะตะลิติกทดแทนการใช้สารเคมีในการกำจัดสาหร่าย สามารถลด ค่าใช้จ่ายได้ เท่ากับ 1,684.8 บาท/เดือน ในกรณีที่กำหนดอัตราการใช้น้ำต่อเดือนที่อัตราการไหลเท่ากับ  $30 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ทำให้การดำเนินงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Liu, Y., Yuqian, L., Xiuyun, C., Zijun, Z., Siyang, W., Jian, X., Chunlei, S. and Yiyong, Z. 2017. Community composition specificity and potential role of phosphorus solubilizing bacteria attached on the different bloom-forming cyanobacteria. *Microbiological Research*. 205: 59-65.
- [2] Soryong, C., Tahereh, N., Yoontae, O., In-Kim, S. and Jin-Soo, P. 2019. Effective removal of emerging dissolved cyanotoxins from water using hybrid photocatalytic composites. *Water Research*. 149: 421-431.
- [3] Zhong, N., Chen M., Luo, Y., Wang, Z. and Xin, X. 2019. A novel photocatalytic optical hollow-fiber with high photocatalytic activity for enhancement of 4-chlorophenol degradation. *Chemical Engineering Journal*. 355: 731-739.
- [4] Rojvirorn, T. and Sirivithayapakorn, S. 2012. Photocatalytic Activity of Toluene under UV-LED Light with  $\text{TiO}_2$  Thin Films. *International Journal of Photoenergy*. 2012: 8.
- [5] ชัตตยรัตน์ สงวนสัตย์. 2554. ศักยภาพระบบผลิตน้ำประปาของกิจการประปากระจัด ตำบลลาด อำเภอมือง นครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา. วิทยุฉบับจัด มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [6] Binaeian, E., Seghatoleslami, N., Chaichi, M. and Tayebic, H. 2016. Preparation of titanium dioxide nanoparticles supported on hexagonal mesoporous silicate (HMS) modified by oak gall tannin and its photocatalytic performance in degradation of azo dye. *Advanced Powder Technology*. 27: 1047-1055.
- [7] Dolat, D., Ohtani, B., Mozia, S., Mosznski, D., Guskos, N., Lenzion-Bielun, Z. and Morawski, A.W. 2015. Preparation, characterization and charge transfer studies of nickel – modified and nickel, nitrogen co-modified rutile titanium dioxide for photocatalytic application. *Chemical Engineering Journal*. 239: 149-157.
- [8] Lucila, A., Arash, Z., Benoit, B., Fatima, J., Flávio, R. and Michle, P. 2013. Oxidation of *Microcystis aeruginosa* and *Anabaena flos-aquae* by ozone: Impacts on cell integrity and chlorination by-product formation. *Water Research*. 47: 2983-2994.
- [9] Katherine, E., Greenstein, C. and Wert. 2019. Using rapid quantification of adenosine triphosphate (ATP) as an indicator for early detection and treatment of cyanobacterial blooms. *Water Research*. 154: 171-179.
- [10] YuYing, H. and Donat, P. 2018. UV-B-induced formation of reactive oxygen species and oxidative damage of the cyanobacterium *Anabaena* sp.: protective effects of ascorbic acid and N-acetyl-L-cysteine. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 66: 115-124.
- [11] Xin, W., Jingke, S., Jianfu, Z., Zhongchang, W. and Xuejiang, W., 2019. In-situ active formation of carbides coated with  $\text{NPTiO}_2$  nanoparticles for efficient adsorption-photocatalytic inactivation of harmful algae in eutrophic water. *Chemosphere*. 228: 351-359.



- [12] Yan, J., Shasha, Z., Hangzhou, X., Chunxia, M., Jiongming, S., Hongmin, L. and Haiyan, P. 2019. Application of N-TiO<sub>2</sub> for visible-light photocatalytic degradation of *Cylindrospermopsis raciborskii* — More difficult than that for photodegradation of *Microcystis aeruginosa*. *Environmental Pollution*. 245: 642-650.
- [13] Xiaoxin, W., Jingtao, Z., Wuzhu, S., Weiyi, Y., Jiaojiao, C., Ying, P. and Jian, K. 2015. Anti-algal activity of palladium oxide-modified nitrogen-doped titanium oxide photocatalyst on *Anabaena* sp. PCC 7120 and its photocatalytic degradation on Microcystin LR under visible light illumination. *Chemical Engineering Journal*. 264: 437-444.





## ประวัติผู้จัดทำปฏิญยานิพนธ์

ชื่อ-สกุล	นางสาวสุพัตรา มีคติธรรม
วัน เดือน ปีเกิด	25 สิงหาคม 2537
ที่อยู่	8 หมู่ 6 ตำบลลิ้นถิ่น อำเภอทองนาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี 71180
การศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
เบอร์โทรศัพท์	089-0751378
อีเมล	meekatitam25@hotmail.com

