

การกำจัดสาหร่ายจากน้ำโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

นาย กานต์ ตุ่มศรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# ALGAE REMOVAL FROM WATER BY ELECTROCOAGULATION PROCESS

Mr. Kan Tumsri

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การกำจัดสาหร่ายจากน้ำโดยกระบวนการรวมตะกอน  
ด้วยไฟฟ้า

โดย

นาย กานต์ ตุ่มศรี

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุภางค์ จุฬาลักษณ์านุกุล)

กานต์ ตุ่มศรี : การกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า. (ALGAE REMOVAL FROM WATER BY ELECTROCOAGULATION PROCESS)

อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ. ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์, 182 หน้า.

น้ำรีไซเคิลหรือน้ำใสส่วนบนของบ่อพักตะกอนซึ่งรองรับน้ำล้างย้อนบ่อกรองและสลัดจ์จากถังตกตะกอนในระบบผลิตน้ำประปา มีคุณสมบัติสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งน้ำดิบทดแทนแหล่งน้ำจากธรรมชาติได้เนื่องจากมีความขุ่นต่ำ แต่เนื่องจากปัญหาการปนเปื้อนของสาหร่ายสูงมาก จึงอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของกระบวนการตกตะกอนทางเคมีที่ใช้ในโรงผลิตน้ำประปาทั่วไปลดลง ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตน้ำสะอาดจากน้ำรีไซเคิลโดยกำจัดสาหร่ายด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยศึกษาวัสดุของขั้วอิเล็กโทรดและสภาวะที่เหมาะสมต่อการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ซึ่งวัสดุของขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดลองแบ่งเป็น 2 รูปแบบ คือ ขั้วอะลูมิเนียม—ขั้วแกรไฟต์ และขั้วทองแดง—ขั้วแกรไฟต์ และศึกษาผลกระทบจากตัวแปรต่างๆ ดังนี้ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (20-40 แอมแปร์ต่อตร.ม.) อัตราการกวนผสม (0-600 รอบต่อนาที) พีเอชเริ่มต้น (6-9) ความเข้มข้นสาหร่าย ( $10^7$ - $10^9$  เซลล์ต่อลิตร) ความเข้มข้นไฮเดียมคลอไรด์ (0-2 มิลลิโมลาร์) และ สัดส่วนระหว่างพื้นที่ทำปฏิกิริยาของขั้วอิเล็กโทรดและปริมาตรน้ำ (2.86-6.67 เมตร<sup>1</sup>) โดยทำการทดลองกับน้ำปนเปื้อนสาหร่ายสังเคราะห์สายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* จากผลการศึกษาพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสาหร่ายจากน้ำรีไซเคิลได้อย่างมีประสิทธิภาพคือ การเดินระบบด้วยขั้วอะลูมิเนียม—ขั้วแกรไฟต์ ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์ต่อตร.ม. โดยไม่มีการเพิ่มการกวนผสมจากภายนอก เดิมไฮเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์ และใช้ระยะเวลาในการเดินระบบ 40 นาที ที่สภาวะดังกล่าว มีประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายร้อยละ 95.6 พีเอชของน้ำหลังการบำบัด 7.84 และมีค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ 4.66 บาทต่อ ลบ.ม. จึงเห็นได้ว่า กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้ามีศักยภาพที่จะเป็นหนึ่งในทางเลือกที่ถูกบูรณาการเข้าไปในระบบผลิตน้ำประปา ซึ่งต้องการใช้แหล่งน้ำดิบที่มีสาหร่ายปนเปื้อนสูง

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่อนิติ.....  
 สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา 2553.....



## 5170215621 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : ALGAE REMOVAL / ELECTROCOAGULATION / WATER TREATMENT  
PROCESS / RECYCLED WATER

KAN TUMSRI : ALGAE REMOVAL BY ELECTROCOAGULATION PROCESS.

ADVISOR : ASSOC. PROF. ORATHAI CHAVALAPARIT, Ph.D., 182 pp.

Characteristics of recycled water or supernatant from sludge lagoon receiving backwash effluent and clarification sludge make it possible to be a substitution for natural water source. Recycled water has low turbidity but could contain high concentration of algae. However, the effectiveness of algae removal by chemical coagulation method on such water is questionable. It may also pose problem to water recirculation. This research aimed to study the effectiveness of electrochemical process as well as optimum conditions and electrode materials for removing algae from recycled water using electrocoagulation process. Materials selected for the electrodes were divided into 2 sections as follow: aluminum-graphite and copper-graphite. Operating parameters were current density ( $20-40 \text{ A/m}^2$ ), rate of mixing (0-600 rpm), initial pH (6-8), algae cell density ( $10^7-10^9 \text{ cells/L}$ ), NaCl addition (0-2 mM) and the ratio between the total electrode area and the volume of water in the reactor ( $2.86-6.67 \text{ m}^{-1}$ ). *Chlorella vulgaris* was used as model algae in this study. The results showed that the optimum conditions for efficiently removing algae from recycled water were using aluminum-graphite electrodes at current density of  $20 \text{ A/m}^2$ , no need of external mixing, NaCl addition of 0.5 mM and contact time of 40 minutes. Under the optimal conditions, 95.6% of algae removal was achieved with effluent pH of 7.8 and operating cost of 4.66 baht/ $\text{m}^3$ . This process, thus, has the potential to be one of the integrated options in conventional treatment process for treatment where high amount of algae is expected in a water resource.

Department : Environmental Engineering Student's Signature.....

Field of Study: Environmental Engineering Advisor's Signature .....

Academic Year : 2010.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

รองศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้คำปรึกษาแนะแนวทางหลักการในการดำเนินงานวิจัย และแก้ไขสิ่งบกพร่องมาตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัย ซึ่งมีส่วนสำคัญมากในการทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

รองศาสตราจารย์ ดร. ขวลิต รัตนธรรมสกุล ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ตลอดจน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุภางศ์ จุฬาลักษณ์านุกูล ที่ได้ให้คำปรึกษา ชี้แนะ จนวิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการน้ำเสียและห้องปฏิบัติการจุลชีววิทยา ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์และอำนวยความสะดวกในการใช้วัสดุอุปกรณ์ในการทดลอง

ขอบคุณเพื่อนๆ และพี่ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และดูแลกันและกันในระหว่างการทำวิจัยมาโดยตลอด

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก ทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช รุ่นที่ 13 (3/2553)

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 การผลิตน้ำประปา.....	4
2.1.1 แหล่งน้ำดิบ.....	4
2.1.2 กระบวนการผลิตน้ำประปา.....	5
2.1.3 การผลิตน้ำประปา.....	7
2.2 น้ำรีไซเคิล (Recycled water).....	9
2.3 สาหร่าย (Algae).....	12
2.4 สาหร่ายที่ก่อให้เกิดปัญหาในระบบผลิตน้ำประปา.....	15
2.4.1 สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินหรือไซยาโนแบคทีเรีย (Division-cyanophyta).....	15
2.4.2 สาหร่ายสีเขียว (Division chlorophyta).....	16
2.4.3 สาหร่ายสีน้ำตาลแกมทอง (Division chrysophyta).....	17
2.5 ปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อการเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็ก.....	21
2.5.1 แสง.....	21

	หน้า
2.5.2 อุณหภูมิ.....	22
2.5.3 ความเป็นกรด-เบส (pH).....	22
2.5.4 ธาตุอาหาร.....	23
2.5.4.1 ธาตุอาหารหลัก.....	23
2.5.4.2 ธาตุอาหารรอง.....	25
2.5.5 ความขุ่นของน้ำ (Turbidity).....	27
2.5.6 กระแสน้ำ.....	27
2.5.7 สภาพนำไฟฟ้า (Conductivity).....	27
2.5.8 ออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved oxygen; DO).....	28
2.6 การควบคุมการเจริญเติบโตของสาหร่าย.....	28
2.6.1 การควบคุมในแหล่งน้ำดิบ.....	28
2.6.2 การควบคุมในระบบผลิตน้ำประปา.....	29
2.7 ปัญหาในระบบผลิตน้ำประปาที่เกิดจากสาหร่าย.....	30
2.8 เสถียรภาพของสาหร่ายในแหล่งน้ำ.....	30
2.9 หลักการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี.....	31
2.9.1 หลักการของเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	32
2.9.2 การควบคุมการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี.....	33
2.9.3 ศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดเดี่ยวและศักย์ไฟฟ้าอิเล็กโทรดมาตรฐาน.....	36
2.9.4 ค่าการนำไฟฟ้า.....	37
2.9.5 การแลกเปลี่ยนประจุและการเคลื่อนที่ของประจุ.....	38
2.9.6 กฎฟาราเดย์เกี่ยวกับไฟฟ้าเคมี.....	38
2.9.7 การวางขั้วอิเล็กโทรดในเครื่องปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมี ของระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า.....	40
2.9.8 ขั้วอิเล็กโทรด.....	42
2.9.9 ปัจจัยที่ต้องควบคุมในเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	43
2.9.10 หลักการในการออกแบบเครื่องรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี.....	44
2.9.11 ข้อดีและข้อเสียของการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี.....	45
2.9.11.1 ข้อดีของการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี.....	45
2.9.11.2 ข้อเสียของการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี.....	45
2.10 การประยุกต์ใช้หลักการไฟฟ้าเคมีในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนจากน้ำ.....	46

2.10.1	กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation; EC)	46
2.10.2	กระบวนการทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า (Electroflotation; EF)	48
2.11	ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	49
2.11.1	การกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี (Coagulation) และกระบวนการตกตะกอน (Sedimentation)	49
2.11.2	การกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี (Coagulation) และกระบวนการทำให้ลอย (Flotation)	53
2.11.3	การกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี (Coagulation) และกระบวนการกรอง (Filtration)	55
2.11.4	การกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation)	57
<b>บทที่ 3</b>	<b>แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย</b>	<b>59</b>
3.1	แผนการวิจัย	59
3.2	วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี	62
3.2.1	น้ำที่ใช้ในการทดลอง	62
3.2.1.1	น้ำสาหร่ายสังเคราะห์	62
3.2.1.2	น้ำรีไซเคิล	62
3.2.2	อาหารเลี้ยงสาหร่าย	62
3.2.3	อุปกรณ์และสารเคมี	62
3.2.3.1	ระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า	63
3.2.3.2	ขั้วอิเล็กโทรด	64
3.3	การดำเนินการทดลอง	65
3.3.1	การเตรียมน้ำสาหร่ายสังเคราะห์	65
3.3.2	ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง	67
3.3.2.1	การทดลองที่ 1 ศึกษาผลของวัสดุของขั้วอิเล็กโทรดที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์	67

3.3.2.2	การทดลองที่ 2 ศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย จากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์.....	69
3.3.2.3	การทดลองที่ 3 ศึกษาผลของอัตราการกวนผสมที่ส่งผลต่อ ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์.....	71
3.3.2.4	การทดลองที่ 4 ศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้นที่ส่งผลต่อ ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์.....	74
3.3.2.5	การทดลองที่ 5 ศึกษาผลของความเข้มข้นสาหร่ายที่ส่งผลต่อ ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์.....	76
3.3.2.6	การทดลองที่ 6 ศึกษาผลของการเติมโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย จากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์.....	78
3.3.2.7	การทดลองที่ 7 ศึกษาผลของสัดส่วนระหว่างพื้นที่ทำปฏิกิริยา ของขั้วอิเล็กโทรดและปริมาตรน้ำในถังปฏิกิริยา (AV) ที่ส่ง ผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่าย สังเคราะห์.....	81
3.3.2.8	การทดลองที่ 8 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย จากน้ำรีไซเคิลจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขน.....	83
3.4	การเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่าง.....	86
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....</b>		<b>87</b>
4.1	การทดลองที่ 1 ศึกษาผลของวัสดุของขั้วอิเล็กโทรด ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์.....	87
4.1.1	การทดลองชุดที่ 1 การเดินระบบโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรด ชนิดอะลูมิเนียม-แกรไฟต์.....	88
4.1.2	การทดลองชุดที่ 2 การเดินระบบโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรด ชนิดทองแดง-แกรไฟต์.....	93

4.2 การทดลองที่ 2 ศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์.....	103
4.3 การทดลองที่ 3 ศึกษาผลของอัตราการกวนผสม ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์.....	107
4.4 การทดลองที่ 4 ศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้น ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์.....	109
4.5 การทดลองที่ 5 ศึกษาผลของความเข้มข้นสาหร่าย ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์.....	113
4.6 การทดลองที่ 6 ศึกษาผลของการเติมโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์.....	118
4.7 การทดลองที่ 7 ศึกษาผลของสัดส่วน ระหว่างพื้นที่ทำปฏิกิริยาของขั้วอิเล็กโทรดและปริมาตรน้ำในถังปฏิกิริยา (AV) ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์.....	123
4.8 การทดลองที่ 8 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย จากน้ำรีไซเคิลจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขน.....	125
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>131</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	131
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	132
<b>รายการอ้างอิง.....</b>	<b>133</b>
<b>ภาคผนวก.....</b>	<b>143</b>
<b>ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....</b>	<b>182</b>

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ปริมาณน้ำทิ้งจากระบบผลิตและน้ำรีไซเคิล พ.ศ. 2549.....	11
ตารางที่ 2.2 ผลวิเคราะห์คุณภาพน้ำของโรงผลิตน้ำประปา โดยเก็บตัวอย่างเมื่อวันที่ 15 มิถุนายน 2552.....	13
ตารางที่ 2.3 ผลวิเคราะห์ชนิดและปริมาณสาหร่ายที่ก่อให้เกิดปัญหาอุดตันบ่อกกรอง (Filter clogging) โดยเก็บตัวอย่างเมื่อวันที่ 15 มิถุนายน 2552.....	14
ตารางที่ 2.4 กลุ่มของสาหร่ายที่เป็นสาเหตุของการอุดตันของระบบกรองน้ำด้วยทราย.....	18
ตารางที่ 2.5 ประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี และกระบวนการตกตะกอน.....	49
ตารางที่ 2.6 ประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี และกระบวนการทำให้ลอย.....	53
ตารางที่ 2.7 ประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายโดยตกตะกอนทางเคมี และกระบวนการกรอง.....	55
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของน้ำสาหร่ายสังเคราะห์และน้ำรีไซเคิล.....	67
ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 1.....	69
ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 2.....	70
ตารางที่ 3.4 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 3.....	73
ตารางที่ 3.5 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 4.....	76
ตารางที่ 3.6 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 5.....	78
ตารางที่ 3.7 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 6.....	79
ตารางที่ 3.8 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 7.....	83
ตารางที่ 3.9 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 8.....	85
ตารางที่ 3.10 พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์น้ำสาหร่ายสังเคราะห์ น้ำรีไซเคิล และตะกอนที่เกิดขึ้น.....	86
ตารางที่ 4.1 ปริมาณธาตุคาร์บอน ออกซิเจนและอะลูมิเนียมในสาหร่าย และตะกอนอะลูมิเนียม.....	93
ตารางที่ 4.2 ปริมาณธาตุคาร์บอน ออกซิเจนและอะลูมิเนียมในสาหร่าย และตะกอนทองแดง.....	98



ตารางที่ 4.3	การเปรียบเทียบการเดินระบบด้วยขั้วอิเล็กโทรดชนิดอะลูมิเนียม—แกรไฟต์ และชนิดทองแดง—แกรไฟต์ (ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์/ตร.ม. ระยะเวลาในการเดินระบบ 40 นาที และพีเอชเริ่มต้น 7).....	100
ตารางที่ 4.4	ผลการทดลองการกำจัดสาหร่ายด้วยขั้วอิเล็กโทรดชนิดอะลูมิเนียม—แกรไฟต์ ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20-40 แอมแปร์/ตร.ม.....	106
ตารางที่ 4.5	ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น สาหร่าย $10^7$ - $10^9$ เซลล์/ลิตร.....	115
ตารางที่ 4.6	ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น สาหร่าย $10^7$ - $10^9$ เซลล์/ลิตร (จำนวนเซลล์สาหร่ายเทียบจากร้อยละการกำจัด สาหร่ายในรูปคลอโรฟิลล์ เอ).....	116
ตารางที่ 4.7	ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบตามกฎของฟาราเดย์ (คุณสมบัติขของน้ำและการควบคุม ระบบแสดงดังตารางในภาคผนวกที่ ก.1.....	117
ตารางที่ 4.8	คุณสมบัติของน้ำรีไซเคิลจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขน (7 มีนาคม 2554).....	125
ตารางที่ 4.9	คุณสมบัติของน้ำรีไซเคิลหลังการบำบัดและค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ.....	129
ตารางที่ 4.10	ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายของแต่ละกระบวนการ.....	130

## สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการผลิตน้ำประปา.....	7
รูปที่ 2.2 ป้อพักตะกอน.....	9
รูปที่ 2.3 คลองระบายน้ำรีไซเคิล.....	10
รูปที่ 2.4 สาหร่ายและผลกระทบบที่มีต่อระบบผลิตน้ำประปา.....	20
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการสังเคราะห์ด้วยแสงกับความเข้มแสง.....	22
รูปที่ 2.6 รูปแบบของคาร์บอนอนินทรีย์ที่ปรากฏที่ระดับค่าพีเอชต่างๆ.....	24
รูปที่ 2.7 องค์ประกอบเกิดการเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี.....	31
รูปที่ 2.8 การเกิดปฏิกิริยาในเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	32
รูปที่ 2.9 การทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่.....	34
รูปที่ 2.10 การทำงานแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่.....	34
รูปที่ 2.11 การจัดเรียงขั้วอิเล็กโทรดโมโนโพลาร์แบบขนาน.....	41
รูปที่ 2.12 การจัดเรียงขั้วอิเล็กโทรดโมโนโพลาร์แบบอนุกรม.....	41
รูปที่ 2.13 การจัดเรียงขั้วอิเล็กโทรดไบโพลาร์.....	41
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	61
รูปที่ 3.2 ระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า.....	64
รูปที่ 3.3 การจัดวางขั้วอิเล็กโทรดแบบโมโนโพลาร์หลายเซลล์.....	64
รูปที่ 3.4 ขั้วอะลูมิเนียม—ขั้วแกรไฟต์.....	65
รูปที่ 3.5 ขั้วทองแดง—ขั้วแกรไฟต์.....	65
รูปที่ 3.6 ลักษณะเซลล์ของ <i>Chlorella vulgaris</i> .....	66
รูปที่ 3.7 ผังการทดลองที่ 1.....	68
รูปที่ 3.8 ผังการทดลองที่ 2.....	71
รูปที่ 3.9 ผังการทดลองที่ 3.....	72
รูปที่ 3.10 ผังการทดลองที่ 4.....	75
รูปที่ 3.11 ผังการทดลองที่ 5.....	77
รูปที่ 3.12 ผังการทดลองที่ 6.....	80
รูปที่ 3.13 ผังการทดลองที่ 7.....	82
รูปที่ 3.14 ผังการทดลองที่ 8.....	84
รูปที่ 4.1 ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์ ด้วยขั้วอะลูมิเนียม—ขั้วแกรไฟต์.....	89

รูปที่ 4.2	ตะกอนลอยบริเวณผิวน้ำของการเดินระบบด้วยขั้วอะลูมิเนียม—ขั้วแกรไฟต์	90
รูปที่ 4.3	พีเอชในระหว่างการเดินระบบด้วยขั้วอะลูมิเนียม—ขั้วแกรไฟต์	90
รูปที่ 4.4	ลักษณะโครงสร้างของตะกอนลอยที่เกิดจากการเดินระบบ ด้วยขั้วอะลูมิเนียม-ขั้วแกรไฟต์	92
รูปที่ 4.5	ลักษณะโครงสร้างของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบไม่เป็นผลึก	92
รูปที่ 4.6	ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์ด้วย ขั้วทองแดง—ขั้วแกรไฟต์	94
รูปที่ 4.7	ตะกอนจากการเดินการเดินระบบด้วยขั้วทองแดง—ขั้วแกรไฟต์	94
รูปที่ 4.8	พีเอชในระหว่างการเดินระบบด้วยขั้วทองแดง—ขั้วแกรไฟต์	95
รูปที่ 4.9	การเรียงตัวของผลึกคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ (Spetiniite)	96
รูปที่ 4.10	ลักษณะคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ที่มีโครงสร้างยังไม่สมบูรณ์	96
รูปที่ 4.11	ลักษณะโครงสร้างของคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ที่มีโครงสร้างสมบูรณ์	97
รูปที่ 4.12	ลักษณะโครงสร้างของคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ (วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 6,500 เท่า)	98
รูปที่ 4.13	ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์ด้วย ขั้วอะลูมิเนียม—ขั้วแกรไฟต์ และขั้วทองแดง—ขั้วแกรไฟต์	99
รูปที่ 4.14	พีเอชในระหว่างการเดินระบบด้วยขั้วอะลูมิเนียม—ขั้วแกรไฟต์ และ ขั้วทองแดง—ขั้วแกรไฟต์	101
รูปที่ 4.15	สีของน้ำหลังการบำบัด	101
รูปที่ 4.16	ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์ที่ความหนาแน่นกระแส ไฟฟ้า 20-40 แอมแปร์/ตร.ม.	104
รูปที่ 4.17	พีเอชในระหว่างการเดินระบบด้วยขั้วอะลูมิเนียม—ขั้วแกรไฟต์ ที่ความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 20-40 แอมแปร์/ตร.ม.	105
รูปที่ 4.18	ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20-40 แอมแปร์/ตร.ม.	106
รูปที่ 4.19	ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์ที่อัตราการกวนผสม ต่างๆ	107
รูปที่ 4.20	ความหนาแน่นของชั้นตะกอนลอย	108

รูปที่ 4.21	พลั๊กของสาหร่าย (วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 40 เท่า)	109
รูปที่ 4.22	ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์ที่มีพีเอชเริ่มต้น 6-9	110
รูปที่ 4.23	แผนภูมิแสดงความสามารถในการละลาย (Solubility diagram) ของอะลูมิเนียม	110
รูปที่ 4.24	ผลึกที่มีประจุบวกดูดติดผิวสาหร่ายผ่านกลไกการทำลายประจุ (วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 15,000 เท่า)	112
รูปที่ 4.25	สาหร่ายถูกห่อหุ้มด้วยอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ผ่านกลไกการตกตะกอนแบบกวาด (วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 15,000 เท่า)	112
รูปที่ 4.26	พีเอชในระหว่างการเดินระบบด้วยขั้วอะลูมิเนียม—ขั้วแกรไฟต์ ที่พีเอชเริ่มต้น 6-8	113
รูปที่ 4.27	ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์ ที่มีความเข้มข้นสาหร่าย $10^7$ - $10^9$ เซลล์/ลิตร	114
รูปที่ 4.28	ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์ ที่มีการเติมโซเดียมคลอไรด์ 0-2 มิลลิโมลาร์	119
รูปที่ 4.29	ลักษณะโครงสร้างของสาหร่าย	121
รูปที่ 4.30	ความนำไฟฟ้าของน้ำที่เติมโซเดียมคลอไรด์ 0-2 มิลลิโมลาร์	122
รูปที่ 4.31	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ระยะเวลาในการเดินระบบ 40 นาที ที่ปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 0-2 มิลลิโมลาร์	122
รูปที่ 4.32	พีเอชในระหว่างการเดินระบบด้วยขั้วอะลูมิเนียม—ขั้วแกรไฟต์ ที่มีความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 0-2 มิลลิโมลาร์	123
รูปที่ 4.33	ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายและพีเอช ที่เดินระบบด้วย AV 2.86-6.67 เมตร <sup>1</sup>	124
รูปที่ 4.34	คลอโรฟิลล์ เอ และประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำรีไซเคิล	126
รูปที่ 4.35	ตะกอนลอยจากการกำจัดสาหร่ายจากน้ำรีไซเคิล	126
รูปที่ 4.36	ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์และน้ำรีไซเคิล	127
รูปที่ 4.37	ตะกอนลอยจากการกำจัดสาหร่ายจากน้ำ	128
รูปที่ 4.38	พีเอชในระหว่างการเดินระบบด้วยน้ำสาหร่ายสังเคราะห์และน้ำรีไซเคิล	129

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

น้ำทิ้งจากโรงผลิตน้ำประปาประกอบด้วยสลัดจ์จากถังตกตะกอน (Clarification) และน้ำล้างย้อนบ่อกรอง (Back wash) ถูกระบายสู่บ่อพักตะกอน (Sludge lagoon) โดยบ่อพักตะกอนมีหน้าที่เพิ่มความเข้มข้นให้กับสลัดจ์ก่อนเข้าสู่กระบวนการกำจัดสลัดจ์ในลำดับต่อไป ด้านบนของชั้นสลัดจ์ที่เกิดจากการจมตัวด้วยแรงโน้มถ่วงเป็นชั้นของน้ำใสส่วนบน (Supernatant) หรือเรียกว่า “น้ำรีไซเคิล” ซึ่งมีอัตราการระบายเฉลี่ย 58,139 ลบ.ม./วัน (การประปานครหลวง, 2549) และจากรายงานวิเคราะห์คุณภาพน้ำประจำเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2552 พบว่าน้ำรีไซเคิลมีปริมาณสาหร่ายสูงถึง  $5.2 \times 10^6$  หน่วย/ลิตร (การประปานครหลวง, 2552) ปัจจุบันโรงผลิตน้ำประปายังไม่มีการนำน้ำรีไซเคิลมาใช้เป็นแหล่งน้ำดิบในกระบวนการผลิตน้ำประปา

เทคโนโลยีของโรงผลิตน้ำประปาในปัจจุบันใช้กระบวนการตกตะกอนทางเคมี (Coagulation) กระบวนการตกตะกอน (Sedimentation) และกระบวนการกรอง (Filtration) ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงในการผลิตน้ำประปา แต่ในกรณีที่แหล่งน้ำดิบมีการปนเปื้อนของอนุภาคแขวนลอยบางชนิดที่มีความหนาแน่นต่ำ อาจส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของกระบวนการตกตะกอนต่ำลงและต้องการสารเคมีช่วยในการตกตะกอนสูงขึ้น เป็นผลให้กระบวนการกรองต้องรับภาระสูงและมีอายุการใช้งานลดลง จึงจำเป็นต้องล้างย้อนบ่อกรองบ่อยครั้งขึ้นซึ่งเป็นการสูญเสียน้ำประปาเป็นจำนวนมาก

สาหร่ายเป็นพืชขนาดเล็กที่มีความหนาแน่นต่ำและมีน้ำหนักเบา เมื่อปนเปื้อนในน้ำดิบจะก่อให้เกิดปัญหาต่อระบบผลิตน้ำประปา เช่น ประสิทธิภาพการทำงานของถังตกตะกอนลดลง บ่อกรองน้ำอุดตันเร็วขึ้น ท่อส่งน้ำอุดตัน น้ำประปามีรส กลิ่น สี และปนเปื้อนสารพิษ สาหร่ายหลายชนิดสามารถเจริญเติบโตได้ดีในระบบผลิตน้ำประปา ซึ่งมักเป็นสาหร่ายที่ยึดเกาะพื้นผิวอุปกรณ์ภายใน ส่งผลให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ต่างๆ ลดลง (พิษณุพล สงวนนวล, 2543) การควบคุมการเจริญเติบโตของสาหร่ายมีหลายวิธี ทั้งการควบคุมในแหล่งน้ำดิบ เช่น การใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เพื่อปิดกั้นแสง การใช้สารกำจัดสาหร่าย เช่น คอปเปอร์ซัลเฟต ( $\text{CuSO}_4$ ) หรือโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ( $\text{KMnO}_4$ ) และการควบคุมคุณภาพน้ำทิ้งให้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งชุมชนและโรงงานอุตสาหกรรม และการควบคุมในระบบผลิตน้ำประปา เช่น การเลือกตำแหน่งรับน้ำ (Water intake) โดยเลือกตำแหน่งรับน้ำให้อยู่ต่ำกว่าระดับผิวน้ำ การใช้คลอรีน (Prechlorination) ความเข้มข้นสูงจะทำให้จำนวนสาหร่ายลดลง การเพิ่มสารสร้างตะกอน

(Coagulant) และการใช้ระบบกรองแบบไมโครสเตรนเนอร์ (Microstrainer) (ทันดาว ทองตัน, 2545)

กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation) เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูงในการลดสารปนเปื้อนในน้ำ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดไขมัน น้ำมัน สี ย้อม สารแขวนลอย โลหะหนัก และสาหร่าย เป็นต้น กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าเป็นกระบวนการสร้างโลหะไฮดรอกไซด์ที่ใช้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนระหว่างสารที่เกิดออกซิเดชัน (Oxidation) และสารที่เกิดรีดักชัน (Reduction) ผ่านทางตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสม เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่ละลายน้ำและฟองก๊าซขนาดเล็กเข้ายึดจับกับสารประกอบเชิงซ้อนบางส่วนให้ลอยขึ้นสู่น้ำ ทำให้สามารถกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ (อัญชลี ศรีรังสรรค์, 2551)

กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าจึงเป็นกระบวนการที่มีศักยภาพสูงสามารถประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบผลิตน้ำประปาที่มีสาหร่ายปนเปื้อนในแหล่งน้ำดิบ งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการกำจัดสาหร่ายจากน้ำโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสาหร่ายจากน้ำ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาผลของวัสดุของขั้วอิเล็กโทรด ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า อัตราการรวมผสมพีเอชเริ่มต้น ความเข้มข้นสาหร่าย ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ และสัดส่วนระหว่างพื้นที่ทำปฏิกิริยาของขั้วอิเล็กโทรดและปริมาตรน้ำในถังปฏิกิริยา ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

2. ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำรีไซเคิลโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale) โดยทำการทดลองแบบทีละเท (Batch) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้อง ณ ห้องปฏิบัติการจุลชีววิทยาและห้องปฏิบัติการน้ำเสีย อาคารภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ และศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยกำหนดขอบเขตของงานวิจัยดังนี้

1. น้ำที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำสาหร่ายสังเคราะห์จากการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* และน้ำรีไซเคิลจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขนที่มีสาหร่ายปนเปื้อน

2. การหาความเข้มข้นสาหร่ายใช้วิธีการนับเซลล์ (Phytoplankton counting techniques) และคลอโรฟิลล์ เอ

3. การกำจัดสาหร่ายจากน้ำโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าระดับห้องปฏิบัติการเป็นการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบที่ละเท โดยใช้ถังปฏิกรณ์ขนาด 37.5 ลิตร (25 x 30 x 50 ซม.)

4. วัสดุของขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดลองมี 3 ชนิด คือ อะลูมิเนียม ทองแดง และแกรไฟต์ โดยจัดเรียงขั้วอิเล็กโทรดแบบโมโนโพลาร์หลายเซลล์แบบขนาน มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 1.5 ซม. แบ่งการจัดเรียงขั้วอิเล็กโทรดออกเป็น 2 แบบ คือ

- แบบที่ 1 ใช้ขั้วแอโนดผลิตจากอะลูมิเนียมและขั้วแคโทดผลิตจากแกรไฟต์
- แบบที่ 2 ใช้ขั้วแอโนดผลิตจากทองแดงและขั้วแคโทดผลิตจากแกรไฟต์

5. ศึกษาตัวแปรต่างๆ ตามที่กำหนดดังนี้

- ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 3 ค่า คือ 20 30 และ 40 แอมแปร์/ตร.ม.
- ระยะเวลาในการเดินระบบ 13 ค่า คือ 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 และ 60 นาที
- อัตราการกวนผสม 4 ค่า คือ 0 200 400 และ 600 รอบ/นาที
- พีเอชเริ่มต้น 3 ค่า คือ 6 7 และ 8
- ความเข้มข้นสาหร่าย 3 ค่า คือ  $10^7$   $10^8$  และ  $10^9$  เซลล์/ลิตร
- ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) 4 ค่า คือ 0 0.5 1.0 และ 2.0 มิลลิโมลาร์
- สัดส่วนระหว่างพื้นที่ทำปฏิกิริยาของขั้วอิเล็กโทรดและปริมาตรน้ำในถังปฏิกรณ์ (AV) 4 ค่า คือ 2.86 4.00 5.00 และ 6.67 เมตร<sup>-1</sup>

6. พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์ ได้แก่ ความเข้มข้นสาหร่าย ความเข้มข้นคลอโรฟิลล์ เอ พีเอช อุณหภูมิ ความนำไฟฟ้า ความต่างศักย์ไฟฟ้า น้ำหนักขั้วอิเล็กโทรด ของแข็งแขวนลอย อะลูมิเนียมและทองแดงในน้ำ ลักษณะโครงสร้างและปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของผลึก (SEM-EDS) เฟสและความเป็นผลึก (XRD) และไตรฮาโลมีเทน

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสาหร่ายจากน้ำโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า
2. นำไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดสาหร่ายจากแหล่งน้ำต่างๆ เช่น สระน้ำ บึง รวมถึงน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อใช้เป็นแหล่งน้ำดิบในกระบวนการผลิตน้ำประปา
3. เป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบกำจัดสาหร่ายในกระบวนการผลิตน้ำประปา

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การผลิตน้ำประปา

##### 2.1.1 แหล่งน้ำดิบ (สาวิตรี ตาสุดิน, 2552)

ในการผลิตน้ำประปาให้ได้คุณภาพสูง แหล่งน้ำดิบเป็นสิ่งที่สำคัญ การเลือกแหล่งน้ำดิบที่มีความสกปรกหรือมลทินน้อยที่สุดจะทำให้สามารถผลิตน้ำประปาได้ในราคาประหยัด สำหรับแหล่งน้ำดิบในการผลิตประปาแบ่งเป็น 2 แหล่ง คือ

1) น้ำผิวดิน เป็นแหล่งน้ำดิบที่สำคัญมากในการผลิตน้ำประปา เพราะมักมีปริมาณมากกว่าแหล่งน้ำดิบอื่นและสะดวกต่อการนำมาใช้ประโยชน์

น้ำผิวดิน หมายถึงน้ำจากแม่น้ำ คลอง ทะเลสาบ อ่างเก็บน้ำ หนอง และบึง เนื่องจากน้ำผิวดินมักมีแหล่งกำเนิดจากน้ำใต้ดิน ดังนั้นคุณสมบัติของน้ำจึงขึ้นอยู่กับแหล่งน้ำเดิม การไหลนองบนพื้นดินทำให้น้ำผิวดินได้รับความสกปรกจากสิ่งแวดล้อม อาจมีความขุ่นและสารอินทรีย์ในระดับสูง ปริมาณเกลือแร่ในน้ำอาจสูงหรือต่ำ นอกจากนี้น้ำฝนยังชะล้างสารพิษต่างๆ จากบริเวณเกษตรกรรม สารพิษเหล่านี้ ได้แก่ โลหะหนัก ไนเตรต ฟอสฟอรัส ยาฆ่าแมลง ฯลฯ มารวมกับน้ำผิวดิน

อ่างเก็บน้ำหรือทะเลสาบมักตั้งอยู่ในบริเวณที่ต่ำ ซึ่งเป็นที่สะสมน้ำผิวดินจากแหล่งต่างๆ การที่น้ำถูกขังอยู่หนึ่งเป็นเวลานาน จึงมีปฏิกิริยาต่างๆ ทั้งกายภาพ เคมี และชีวภาพเกิดขึ้นตลอดทั้งชั้นน้ำ สารแขวนลอยเกิดการตกตะกอนและจมลงสู่ก้นอ่าง สำหรับรายขนาดเล็กหรือจุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตได้ดีเนื่องจากมีอาหารสมบูรณ์อยู่ในน้ำ การหมักแบบไร้ออกซิเจนเกิดขึ้นที่ก้นอ่าง และอาจก่อให้เกิดผลเสียต่างๆ เช่น ทำให้เหล็กและแมงกานีสละลายกลับคืนสู่น้ำ นอกจากนี้ความลึกของอ่างเก็บน้ำทำให้เกิดการแบ่งชั้นน้ำตามระดับอุณหภูมิซึ่งแตกต่างกันและทำให้เกิดการพลิกตัว (Turnover) ของน้ำ เป็นผลให้น้ำชั้นล่างเคลื่อนที่ขึ้นสู่ด้านบน และน้ำชั้นบนจมตัวลงสู่ด้านล่าง

2) น้ำบาดาล หมายถึง น้ำที่ไหลซึมลงไปใต้ดินจะซึมผ่านชั้นต่างๆ ของดินจนถึงชั้นหินซึ่งซึมผ่านไม่ได้ ระดับของน้ำบาดาลขึ้นกับลักษณะภูมิประเทศและดินฟ้าอากาศ น้ำบาดาลจะเกิดอยู่ในชั้นหินที่เป็นหินอิมิตัวด้วยน้ำ ซึ่งประกอบด้วย ชั้นกรวด ชั้นทราย ชั้นหินเนื้อพรุน ในที่ว่าง รอยแตกหรือโพรงในชั้นหินอย่างใดอย่างหนึ่ง และชั้นน้ำบาดาลเหล่านี้จะรองรับด้วยหินเนื้อแน่น ไม่ยอมให้น้ำไหลซึมผ่านลงไป อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าน้ำบาดาลจะไม่ไหลซึมลงไปด้านล่าง แต่ น้ำบาดาลจะมีการเคลื่อนไหวและไหลอยู่ตลอดเวลา การไหลของน้ำบาดาลมักมีทิศทางการไหล



เหมือนน้ำในลำธาร กล่าวคือจะไหลไปสู่ที่ซึ่งมีระดับต่ำซึ่งมีทะเลเป็นจุดสุดท้าย ทั้งนี้ย่อมขึ้นอยู่กับลักษณะภูมิประเทศและชั้นต่างๆ ของดินที่สามารถกักเก็บน้ำได้

น้ำบาดาลมักมีความขุ่นต่ำ ปราศจากสีและสารอินทรีย์ ปริมาณสารละลาย (TDS) จะมีปริมาณสูง น้ำบาดาลมักไม่มีออกซิเจนละลายน้ำ แต่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงมาก ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดออกซิเดชันใต้ดิน ทำให้มีการใช้ออกซิเจนและผลิตคาร์บอนไดออกไซด์ เหล็ก และแมงกานีสพบได้ง่ายในน้ำใต้ดิน ซึ่งอิมิตัวด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อสูบน้ำบาดาลขึ้นมา ข้างบนและสัมผัสอากาศ เหล็กและแมงกานีสจะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันในอากาศ ทำให้เกิดตกผลึก ซึ่งการตกผลึกอาจเกิดขึ้นรวดเร็วมากถ้าพีเอชของน้ำสูงเพียงพอ ทำให้น้ำบาดาลเมื่อแรกสูบน้ำขึ้นมาใสมาก กลายเป็นน้ำขุ่นภายใน 10 นาที

## 2.1.2 กระบวนการผลิตน้ำประปา (มันดิน ตันทูลเวศน์, 2542)

1) การตกตะกอนทางเคมี (Coagulation) เป็นกระบวนการกำจัดอนุภาคคอลลอยด์ขนาดเล็กที่ตกตะกอนได้ช้า คอลลอยด์มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.1-1 นาโนเมตร ซึ่งไม่สามารถแยกตัวออกจากน้ำได้โดยวิธีตกตะกอนตามธรรมชาติ เนื่องจากอนุภาคของคอลลอยด์มีขนาดเล็กเกินไป หลักการของกระบวนการตกตะกอนทางเคมี คือ การเติมสารสร้างตะกอน (Coagulant) ลงไปในน้ำเพื่อทำให้อนุภาคคอลลอยด์จับตัวกันเป็นกลุ่ม เรียกว่า ฟล็อก (Floc) จนมีน้ำหนักมากและสามารถตกตะกอนลงมาได้รวดเร็ว สารสร้างตะกอนจะทำหน้าที่เหมือนตัวประสานให้อนุภาคคอลลอยด์มารวมตัวกันเป็นฟล็อก

ส่วนประกอบสำคัญของกระบวนการตกตะกอนทางเคมี มี 2 ส่วน คือ ถังกวนเร็ว และถังกวนช้า ถังกวนเร็วเป็นที่เติมสารเคมี สารเคมีและน้ำจะผสมกันทันทีอย่างรวดเร็ว ส่วนถังกวนช้าเป็นที่สำหรับกระบวนการสร้างฟล็อก (Flocculation) ที่เกิดจากการรวมตัวของอนุภาคคอลลอยด์ เพื่อส่งไปตกตะกอนในถังตกตะกอน นอกจากนี้ยังสามารถเติมสารช่วยสร้างตะกอน (Coagulant aid) เป็นสารเคมีประเภทโพลีอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte) ซึ่งเป็นสารโพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง โดยทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมระหว่างอนุภาคหรือฟล็อก ให้เกิดเป็นฟล็อกขนาดใหญ่และตกตะกอนได้ง่าย สารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในกระบวนการตกตะกอนทางเคมี มี 3 ประเภท ได้แก่ โพลีเมอร์ประจุบวก (Cationic polymer) โพลีเมอร์ประจุลบ (Anionic polymer) และโพลีเมอร์ที่ไม่มีประจุ (Nonionic polymer)

2) การใช้เมมเบรน (Membrane processes) หมายถึง กระบวนการต่างๆ ที่อาศัยเยื่อเมมเบรน (Semi-permeable membrane) ในการแยกสารละลายออกจากน้ำหรือของเหลว กระบวนการเมมเบรนที่สำคัญมี 3 แบบ คือ Electrodialysis (ED) Reverse osmosis (RO) และ Ultrafiltration (UF) ความแตกต่างของกระบวนการทั้ง 3 ประเภทอยู่ที่ความสามารถใน

การแยกสารละลายที่มีขนาดต่างๆ และแรงขับเคลื่อนที่ทำให้เกิดการแยกสารประกอบและน้ำออกจากกัน ED ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นแรงขับเคลื่อนให้เกิดการแยกสารประกอบซึ่งแตกตัวเป็นไอออนได้ออกจากน้ำแต่ไม่สามารถแยกสารอินทรีย์ ส่วน RO และ UF ใช้แรงดันในการแยกสารต่างๆ ออกจากน้ำ RO สามารถแยกสารอินทรีย์ขนาดใหญ่และสารอนินทรีย์ชนิดต่างๆ เกือบทุกชนิดออกมาได้ แต่ UF มีความสามารถดีต่อยกกว่า RO เพราะสามารถแยกสารอินทรีย์ขนาดใหญ่เท่านั้น อย่างไรก็ตาม UF มักใช้แรงดันประมาณ 100 ปอนด์/ตารางนิ้ว หรือน้อยกว่า ส่วน RO มักใช้แรงดันตั้งแต่ 300-1000 ปอนด์/ตารางนิ้ว

เยื่อเมมเบรนของกระบวนการทั้ง 3 มีหน้าที่ และขีดความสามารถไม่เท่ากัน กล่าวคือ แผ่นเมมเบรน RO สร้างขึ้นเพื่อให้น้ำไหลผ่านเท่านั้นและไม่ตั้งใจให้สารอื่นๆ ไหลผ่านได้ แผ่นเมมเบรนสำหรับ UF นั้นก็ทำได้เฉพาะสารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและยอมให้สารอื่นๆ รวมทั้งน้ำไหลผ่าน แผ่นเมมเบรนสำหรับ ED มี 2 ชนิด คือ แผ่นบวกและแผ่นลบ ซึ่งยอมให้เฉพาะไอออนที่มีประจุไฟฟ้าเหมือนกันไหลผ่าน โมเลกุลของน้ำไหลผ่านได้ยาก

ในปัจจุบันความจำเป็นที่ต้องการใช้น้ำสะอาดที่มีปริมาณสารละลายต่ำและความสกปรกที่เพิ่มขึ้นของแหล่งน้ำดิบทำให้กระบวนการเมมเบรนต่างๆ มีความสำคัญเพิ่มขึ้นและกลายเป็นระบบที่จำเป็น เนื่องจากระบบ RO นั้นมีขีดความสามารถกว้างกว่า UF และ ED จึงมีการนำ RO ไปใช้ในการผลิตน้ำสะอาดมากกว่าระบบเมมเบรนแบบอื่น

RO กำจัดเกลือและสารอินทรีย์ต่างๆ ได้ด้วยกลไกที่แตกต่างจากระบบอื่นโดยเมมเบรนจะยอมให้เฉพาะโมเลกุลของน้ำไหลผ่าน ไอออนต่างๆ ของเกลือถูกเมมเบรนผลักดันออกไปจึงไม่สามารถผ่านเมมเบรนได้ ส่วนการกำจัดโมเลกุลของสารอินทรีย์ออกจากน้ำจะทำโดยวิธีการกรองติดค้าง (Sieve) โมเลกุลขนาดใหญ่ถูกกำจัดออกจากน้ำเพราะไม่สามารถลอดผ่านรูบนเมมเบรน แต่โมเลกุลขนาดเล็กสามารถลอดรูและทะลุออกไปจากเมมเบรนได้

3) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) เป็นการแลกเปลี่ยนระหว่างไอออนที่อยู่ในภาคของแข็งกับภาคของเหลว ซึ่งไอออนที่อยู่ในภาคของแข็งที่ไม่ติดแน่นสามารถเกิดการแลกเปลี่ยนซึ่งเกิดจากแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) บนผิวของเรซิน (Resin) และเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุเหมือนกันในสารละลายที่ไหลผ่านเรซิน โดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดมีความชอบหรือถูกดูดซับโดยเรซินไม่เท่ากันหรือการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างของแข็งกับของเหลว โดยไม่เกี่ยวข้องกับอนุโมลในโครงสร้างทางกายภาพของของแข็งแต่อย่างใด การแลกเปลี่ยนไอออนสามารถกำจัดไอออนประจุบวก (Cation) และไอออนประจุลบ (Anion) จากน้ำได้ ในปัจจุบันการแลกเปลี่ยนไอออนแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ ซีโอไลต์ (Zeolite) และเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange resin) ซึ่งเรซินแลกเปลี่ยนไอออนเป็นที่นิยมเนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงกว่า น้ำจะไหลผ่านถึงบรรจุเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ไอออนประจุบวกในน้ำจะ

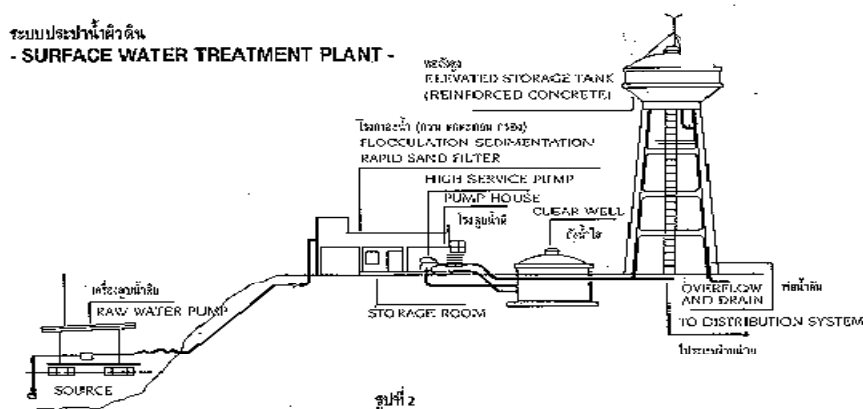
แลกเปลี่ยนกับไอออนของไฮโดรเจน ( $H^+$ ) หรือไอออนของโซเดียม ( $Na^+$ ) ของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ได้แก่ เรซินแบบกรดแก่ (Strong acid cation resin) และเรซินแบบกรดอ่อน (Weak acid cation resin) ส่วนไอออนประจุลบในน้ำจะถูกแลกเปลี่ยนกับไอออนของไฮดรอกไซด์ ( $OH$ ) ของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนแบบด่างแก่ (Strong base anion resin) เรซินทุกชนิดเมื่อใช้ไปในระยะเวลาหนึ่งจะหมดประสิทธิภาพ แต่สามารถเรียกประสิทธิภาพกลับคืนมาได้อีกโดยทำการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration) ซึ่งเรซินแต่ละชนิดจะมีประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพแตกต่างกัน

4) การดูดติดผิว (Adsorption) เป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ซึ่งอยู่ในของเหลวหรือก๊าซให้มาเกาะจับและติดบนผิว ปฏิกิริยาการนี้จัดเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (Mass transfer) จากของเหลวหรือก๊าซมายังผิวของของแข็ง โมเลกุลหรือคอลลอยด์เรียกว่า Adsorbate ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของ Adsorbate เรียกว่า Adsorbent

การเกาะจับของโมเลกุลบนผิวของสารอาจเกิดขึ้นด้วยแรงกายภาพหรือแรงเคมีหรือทั้งสองอย่างร่วมกัน โดยทั่วไปการเกาะติดผิวในระบบประปามักถือเป็นกระบวนการทางกายภาพ เพราะโมเลกุลถูกดูดให้เกาะบนผิวของของแข็งโดยแรงกายภาพและมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นเล็กน้อยการดูดติดผิวมีบทบาทสำคัญในระบบผลิตน้ำประปาเนื่องจากสามารถกำจัดสารมลทินที่มีขนาดเล็กจนถึงขั้นโมเลกุล ซึ่งไม่อาจกำจัดได้ด้วยวิธีตกตะกอนหรือการกรองแบบธรรมดา

### 2.1.3 การผลิตน้ำประปา (สาวิตรี ตาสุดิน, 2552)

ขั้นตอนและกรรมวิธีในการผลิตน้ำประปา ดังรูปที่ 2.1 โดยทั่วไปเป็นไปตามหลักเกณฑ์การผลิตน้ำของการประปานครหลวง คือ การใช้สารเคมีเป็นตัวปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ การกำจัดตะกอนผ่านกระบวนการกรองน้ำ และการฆ่าเชื้อโรคโดยใช้คลอรีน เพื่อให้ได้คุณภาพตามมาตรฐานน้ำดื่ม โดยแบ่งขั้นตอนในการผลิตที่สำคัญออกเป็น 7 ขั้นตอน ดังนี้



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการผลิตน้ำประปา (การประปานครหลวง, 2552)

1) การสูบน้ำ การผลิตน้ำประปาเริ่มจากโรงสูบน้ำแรงต่ำทำการสูบน้ำดิบจากแหล่งน้ำธรรมชาติเพื่อลำเลียงเข้าสู่กระบวนการผลิต ซึ่งน้ำดิบที่สามารถนำมาผลิตน้ำประปาได้นั้นต้องเป็นน้ำที่ไม่มีสี กลิ่น รส และสิ่งสกปรกโสโครกปนเปื้อนเกินกว่าที่กำหนด ซึ่งต้องผ่านการวิเคราะห์ตรวจสอบก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิต ภายหลังจากสูบน้ำดิบจากแหล่งน้ำ น้ำดิบที่ไหลมาตามคลองประปาจะสัมผัสอากาศและแสงแดด และจะตกตะกอนตามธรรมชาติทำให้คุณภาพน้ำดีขึ้น และระหว่างนั้นจะมีการกำจัดสวะ เศษไม้ สาหร่าย ถูพลาสติก และสิ่งแปลกปลอมต่างๆ ที่ลอยมากับน้ำดิบโดยที่หน้าโรงสูบน้ำดิบจะมีตะแกรงหยาบ (Trash rack) และตะแกรงละเอียด (Fine screen) ดักเก็บและป้องกันไม่ให้วัสดุที่ไม่ต้องการเหล่านี้ เข้าไปเป็นอันตรายหรืออุดตันเครื่องสูบน้ำและอุปกรณ์ในกระบวนการผลิตน้ำ

2) การปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ น้ำดิบที่สูบเข้ามาจะถูกผสมด้วยสารเคมี เช่น สารส้มและปูนขาว เพื่อทำการปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ สารละลายสารส้มจะช่วยให้มีการตกตะกอนได้ดีขึ้น และสารละลายปูนขาวจะช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของตะไคร่น้ำหรือสาหร่ายในน้ำ บางครั้งจะมีการเติมคลอรีนเพื่อทำการฆ่าเชื้อโรคที่อาจปะปนมากับน้ำในขั้นตอนนี้ก่อน

3) การตกตะกอน เมื่อเติมสารเคมีในน้ำดิบแล้ว ตะกอนในน้ำดิบจะทำปฏิกิริยากับสารเคมีรวมตัวกันเป็นตะกอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นไหลเข้าถังตกตะกอน ทำให้ตะกอนหนักตกสู่พื้นล่างของถังตกตะกอนและน้ำส่วนบนจะไหลเข้ารางรับน้ำไปยังบ่อกรองน้ำ ส่วนตะกอนหนักที่อยู่พื้นล่างจะถูกระบายออกไปเก็บไว้ในบ่อพักตะกอนเพื่อรอการกำจัดต่อไป

4) การกรอง น้ำที่ผ่านการตกตะกอนแล้วยังคงมีตะกอนละเอียดแขวนลอยอยู่บางส่วน (ความขุ่นไม่เกิน 5 เอ็นทียู) จะไหลเข้าบ่อกรองน้ำซึ่งมีทรายเป็นสารกรองเพื่อกำจัดตะกอนที่ละเอียดอีกครั้งหนึ่ง น้ำที่ผ่านการกรองขั้นตอนนี้จะมีความใสมากโดยมีความขุ่นไม่เกิน 2 เอ็นทียู แต่เนื่องจากบ่อกรองที่ใช้เป็นชนิดอัตราการกรองเร็วเมื่อใช้งานไปได้ประมาณ 24 ชั่วโมง จะต้องมีการล้างโดยการพ่นลมและน้ำย้อนขึ้นมาจากใต้บ่อกรองเพื่อให้ทรายขยายตัว (Back wash) และให้ตะกอนที่ตกค้างอยู่บนผิวหน้าทรายไหลตามน้ำออกไปกลับสู่กระบวนการผลิตอีกครั้ง

5) การฆ่าเชื้อโรคและควบคุมความเป็นกรด-ด่าง น้ำที่ออกจากบ่อกรองน้ำก่อนที่ จะนำไปเก็บไว้ในถังเก็บน้ำใสอาจยังมีแบคทีเรียหลงเหลืออยู่ จึงต้องมีการฆ่าเชื้อโรคเพื่อให้ความปลอดภัยสามารถอุปโภคและบริโภคได้ โดยจะใช้คลอรีนเป็นสารฆ่าเชื้อโรคและเติมน้ำปูนขาวเพื่อปรับสภาพสภาวะความเป็นกรด-ด่าง ให้ได้คุณภาพตามมาตรฐานน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลก

6) การควบคุมคุณภาพน้ำประปา ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญ เพราะน้ำประปา ที่ทำการผลิตมาแล้วนั้นจะต้องวิเคราะห์ตรวจสอบอีกครั้งจากนักวิทยาศาสตร์ และการตรวจสอบนี้จะดำเนินการอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้ได้น้ำประปาที่สะอาด ปลอดภัย สำหรับการอุปโภคบริโภค

7) การสูบน้ำประปา น้ำประปาที่ได้ผ่านกรรมวิธีการผลิตข้างต้น ซึ่งจะมีการเก็บตัวอย่างน้ำไปตรวจสอบวิเคราะห์อยู่ตลอดเวลา เพื่อประกันว่าจะได้คุณภาพตามมาตรฐานน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลก สามารถบริโภคได้อย่างปลอดภัยและจะถูกสูบน้ำจากถังเก็บน้ำใสเข้าระบบท่อประปา เพื่อจ่ายให้กับประชาชนในเขตบริการของการประปานครหลวงต่อไป

## 2.2 น้ำรีไซเคิล (Recycled water)

น้ำทิ้งจากโรงผลิตน้ำประปาประกอบด้วยสลัดจ์จากถังตกตะกอน (Clarification) และน้ำล้างย้อนบ่อกรอง (Back wash) ถูกระบายสู่บ่อพักตะกอน (Sludge lagoon) ดังรูปที่ 2.2 โดยบ่อพักตะกอนมีหน้าที่เพิ่มความเข้มข้นให้กับสลัดจ์ก่อนเข้าสู่กระบวนการกำจัดสลัดจ์ในลำดับต่อไป ด้านบนของชั้นสลัดจ์ที่เกิดจากการจมตัวด้วยแรงโน้มถ่วงเป็นชั้นของน้ำใสส่วนบน (Supernatant) หรือเรียกว่า “น้ำรีไซเคิล” ซึ่งมีอัตราการระบายเฉลี่ย 58,139 ลบ.ม./วัน (การประปานครหลวง, 2549) ดังตารางที่ 2.1 และจากรายงานวิเคราะห์คุณภาพน้ำประปาประจำเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2552 พบว่าน้ำรีไซเคิลมีปริมาณสาหร่ายสูงถึง 5,224,000 หน่วย/ลิตร (การประปานครหลวง, 2552) ปัจจุบันโรงผลิตน้ำประปายังไม่มีการนำน้ำรีไซเคิลมาใช้เป็นแหล่งน้ำดิบในกระบวนการผลิตน้ำประปา โดยน้ำรีไซเคิลถูกระบายลงสู่คลองประปาผ่านคลองระบายน้ำรีไซเคิล ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 บ่อพักตะกอน



รูปที่ 2.3 คลองระบายน้ำรีไซเคิล

ความหลากหลายของฤดูกาลมีบทบาทสำคัญต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย เนื่องจาก อุณหภูมิและความอุดมสมบูรณ์ของธาตุอาหารเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดความเข้มข้น สาหร่ายในน้ำ ความเข้มข้นสาหร่ายในคลองประปาจึงแปรผันตามฤดูกาลที่เปลี่ยนแปลง และ คลองประปายังเป็นแหล่งรองรับน้ำทิ้งจากระบบผลิตน้ำประปา โดยน้ำรีไซเคิลจากบ่อกักตะกอน ถูกระบายผ่านคลองระบายลงสู่คลองประปา จึงเป็นการเพิ่มความเข้มข้นสาหร่ายให้กับแหล่งน้ำ ดิบ รายงานน้ำทิ้งจากระบบผลิตและน้ำรีไซเคิล (2549) พบว่าในช่วงเดือนพฤศจิกายน-ธันวาคม ปริมาณน้ำทิ้งจากระบบผลิตมีค่าสูงผิดปกติ เนื่องจากน้ำดิบบริเวณคลองประปามีสาหร่าย ปนเปื้อนสูง เมื่อน้ำดิบมีการปนเปื้อนของสาหร่ายเข้าสู่ระบบผลิต จึงเป็นการเพิ่มภาระให้กับ กระบวนการกรอง ส่งผลให้บ่อกกรองมีอายุการใช้งานลดลงจึงต้องใช้น้ำประปาในการล้างบ่อกกรอง สูงขึ้น ดังนั้นน้ำทิ้งจากระบบผลิตจึงมีปริมาณสูงขึ้น โดยในเดือนพฤศจิกายนและธันวาคมมี ปริมาณสาหร่ายในน้ำรีไซเคิล 211,310 และ 904,310 หน่วย/ลิตร ตามลำดับ และใช้น้ำในการล้าง บ่อกกรอง 2,342,315 และ 3,389,910 ลบ.ม. ตามลำดับ ดังตารางที่ 2.1 เมื่อเปรียบเทียบความ แตกต่างระหว่างปริมาณน้ำทิ้งจากระบบผลิตและน้ำรีไซเคิลในฤดูกาลปกติและในฤดูกาลที่มี สาหร่ายปนเปื้อนสูง พบว่ามีปริมาณน้ำทิ้งจากระบบผลิตและน้ำรีไซเคิลเพิ่มขึ้นร้อยละ 97

จากการเปรียบเทียบคุณภาพน้ำระหว่างน้ำรีไซเคิลและน้ำดิบรวมบางเขนพบว่า น้ำรีไซเคิลมีคุณสมบัติเหมาะสมในการเป็นเป็นแหล่งน้ำดิบที่ดี โดยน้ำรีไซเคิลมีความขุ่น (Turbidity) พีเอช (pH) และความนำไฟฟ้า เท่ากับ 10 เอ็นทียู 7.31 และ 331 ไมโครซีเมนส์/ซม.

ตารางที่ 2.1 ปริมาณน้ำทิ้งจากระบบผลิตและน้ำรีไซเคิล พ.ศ. 2549

เดือน	น้ำระบายจากระบบผลิต (ลบ.ม.)			น้ำรีไซเคิล (ลบ.ม.)		
	ถึง ตกตะกอน	ล้าง บ่อกรอง	รวม	ปริมาณ	ปริมาณ เฉลี่ย/วัน	สาหร่าย (หน่วย/ ลิตร)
มกราคม	105,929	1,608,643	1,714,572	1,699,247	54,814	173,240
กุมภาพันธ์	64,553	1,228,015	1,292,568	1,280,415	45,729	20,610
มีนาคม	73,159	1,390,989	1,464,148	1,448,823	46,736	20,370
เมษายน	57,948	1,361,437	1,419,395	1,406,818	46,894	40,590
พฤษภาคม	73,478	1,419,874	1,493,352	1,475,606	47,500	104,510
มิถุนายน	884,111	1,367,194	2,251,305	2,199,294	73,310	29,650
กรกฎาคม	201,064	1,335,119	1,536,183	1,504,977	48,548	23,610
สิงหาคม	168,956	1,214,807	1,383,763	1,357,383	43,787	21,330
กันยายน	142,425	1,156,033	1,296,458	1,267,469	42,249	11,700
ตุลาคม	116,224	1,465,826	1,582,050	1,564,793	50,477	86,970
พฤศจิกายน	105,479	2,342,315	2,447,794	2,437,238	81,241	211,310
ธันวาคม	225,910	3,389,910	3,615,829	3,504,853	116,286	904,310
รวม	2,219,236	19,280,171	21,499,407	21,246,920	-	-
เฉลี่ย/วัน	6,080	52,622	58,902	58,211	58,139	137,370
เฉลี่ย/วัน (ม.ค. - ต.ค.)			50,776	50,016	50,014	
เฉลี่ย/วัน (พ.ย. - ธ.ค.)			99,404	99,051	98,763	

ที่มา: การประปานครหลวง, 2549

ตามลำดับ และน้ำดิบรวมบางเขนมีค่าความขุ่น พีเอส และความนำไฟฟ้า 85 เอ็นทียู 7.38 และ 287 ไมโครซีเมนส์/ซม. ตามลำดับ ดังตารางที่ 2.2 เมื่อทำการเปรียบเทียบความขุ่นของน้ำพบว่า น้ำรีไซเคิลมีความขุ่นต่ำกว่าน้ำดิบรวมบางเขน ดังนั้นน้ำรีไซเคิลจึงมีคุณสมบัติเหมาะสมในการเป็นแหล่งน้ำดิบของโรงผลิตน้ำประปาได้เป็นอย่างดี แต่จากผลวิเคราะห์ชนิดและปริมาณสาหร่ายที่ก่อให้เกิปัญหาอุดตันบ่อกรอง (Filter clogging) โดยเก็บตัวอย่างเมื่อวันที่ 15 มิถุนายน พ.ศ. 2552 พบว่าน้ำรีไซเคิลมีปริมาณสาหร่ายปนเปื้อนสูงถึง 5,224,000 หน่วย/ลิตร สาหร่ายเหล่านี้นอกจากจะเป็นสาเหตุให้เกิดการอุดตันและลดประสิทธิภาพของบ่อกรองแล้ว ยังพบว่าเป็น

สาเหตุให้เกิดกลิ่นและรสในน้ำ เช่น กลิ่นอับและกลิ่นสกปรกคล้ายเล้าหมู ส่งผลให้น้ำประปามีคุณสมบัติไม่เหมาะสมแก่การนำไปบริโภคหรืออุปโภค ดังตารางที่ 2.3

### 2.3 สาหร่าย (Algae)

สาหร่ายเป็นสิ่งมีชีวิตที่พบทั่วไปในธรรมชาติ โดยเฉพาะในน้ำ ทั้งน้ำจืด น้ำเค็ม และน้ำกร่อย นอกจากนี้ยังพบในดิน น้ำพุร้อน หรือแม้กระทั่งอาศัยพึ่งพาร่วมกันกับสิ่งมีชีวิตอื่น เช่น รา หรือปะการังบางชนิด สาหร่ายจัดเป็นพืชชั้นต่ำที่มีโครงสร้างไม่สลับซับซ้อน เนื่องจากสาหร่ายไม่มีส่วนที่เป็นราก ลำต้น หรือใบ แม้ว่ามีส่วนชนิดที่มีลักษณะคล้ายพืชชั้นสูง จึงเรียกลักษณะของสาหร่ายว่าทาลัส (Thallus) ซึ่งมักเป็นสาหร่ายขนาดใหญ่ (Macroalgae) ที่จัดสาหร่ายเป็นพืช เนื่องจากสาหร่ายมีรงควัตถุในการสังเคราะห์ด้วยแสง คือ คลอโรฟิลล์ ทำให้สามารถสร้างอาหารเองได้

สาหร่ายมีรูปร่างและขนาดที่มีความหลากหลาย กล่าวคือ ชนิดที่มีขนาดเล็กที่สุดอาจมีขนาดใกล้เคียงกับแบคทีเรีย คือ มีขนาดเพียง 0.2-2 ไมครอน ส่วนชนิดที่มีขนาดใหญ่ คือ เคลป์ (Kelp) ที่พบเฉพาะในมหาสมุทรแปซิฟิก อาจมีขนาดความยาวถึง 200 ฟุต ส่วนรูปร่างนั้นมีรูปร่างต่างๆ เช่น รูปร่างกลม แบน ทรงกระบอก เป็นแฉก เป็นเหลี่ยม หรือรูปดาว เป็นต้น สาหร่ายสามารถแบ่งประเภทได้โดยดูจากลักษณะเซลล์ คือ สาหร่ายเซลล์เดี่ยว (Unicellular) และสาหร่ายหลายเซลล์ (Multicellular) เป็นเส้นสาย (Filament) หรือเป็นกลุ่มเซลล์ (Colony) แบ่งจากการเคลื่อนที่ คือ เคลื่อนที่ได้และเคลื่อนที่ไม่ได้ เป็นต้น (Bold, 1985)

การแพร่กระจายของสาหร่ายขึ้นอยู่กับที่อยู่อาศัยของสาหร่าย (Habitat) สาหร่ายที่อยู่ในน้ำไหลเอื่อยจะมีรูปร่างและชนิดต่างจากชนิดที่อยู่ในน้ำไหลแรง เช่น ในน้ำตมมักพบสาหร่ายสีเขียว เช่น *Ulothrix* สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน เช่น *Rivularia* สาหร่ายสีแดง เช่น *Batrachospermum* และ *Demanina* ส่วนในน้ำนิ่ง ชนิดของสาหร่ายขึ้นอยู่กับแสง อุณหภูมิ และความสมบูรณ์ของอินทรีย์สาร (ยูวดี พีรพรพิศาล, 2532)

ปัจจัยด้านต่างๆในการจำแนกชนิดของสาหร่าย ได้แก่

- 1) ชนิดของรงควัตถุ (Pigments) ในการสังเคราะห์แสง
- 2) ชนิดของอาหารสะสม
- 3) รูปร่าง ลักษณะ จำนวน และตำแหน่งของหนวด (Flagella)
- 4) องค์ประกอบของผนังเซลล์
- 5) วิธีการสืบพันธุ์
- 6) โครงสร้างของเซลล์



ตารางที่ 2.2 ผลวิเคราะห์คุณภาพน้ำของโรงผลิตน้ำประปา โดยเก็บตัวอย่างเมื่อวันที่ 15 มิถุนายน 2552

ตัวอย่างที่	เวลา	ค่าความขุ่น (เอ็นทียู)	ค่า พีเอช	ค่าการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนส์/ซม.)	คลอรีนตกค้าง (มก./ลิตร)	สารส้ม (มก./ลิตร)	PAC (มก./ลิตร)
1.น้ำดิบสำแล	-	-	-	-	-	-	-
2.น้ำดิบรวมบางเขน	8.00	85	7.38	287	-	-	-
3.น้ำดิบระบบการผลิต 1	8.00	89	7.34	-	0.00	45	-
4.น้ำดิบระบบการผลิต 2	8.00	88	7.32	-	0.40	45	15
5.น้ำรีไซเคิล	8.00	10	7.31	331	-	-	-
6.น้ำถังตกตะกอน 1	-	-	-	-	0.00	-	-
7.น้ำถังตกตะกอน 2	-	-	-	-	0.24	-	-
8.น้ำบ่อกรอง 1	-	-	-	-	0.00	-	-
9.น้ำบ่อกรอง 2	-	-	-	-	0.00	-	-
10.น้ำประปาสูบส่ง 1	8.00	1.00	7.01	300	1.4	-	-
11.น้ำประปาสูบส่ง 2	8.00	1.10	7.01	300	1.4	-	-
12.น้ำประปาสูบส่ง 3	8.00	1.00	7.02	300	1.8	-	-

ที่มา: การประปานครหลวง, 2552

ตารางที่ 2.3 ผลวิเคราะห์ชนิดและปริมาณสาหร่ายที่ก่อให้เกิดปัญหาอุดตันป่อกรอง (Filter clogging) โดยเก็บตัวอย่างเมื่อวันที่ 15 มิถุนายน 2552

ชนิดของสาหร่าย	ปริมาณสาหร่าย (หน่วย/ลิตร)							หมายเหตุ
	น้ำดิบรวม บางเขน	น้ำดิบ ระบบการผลิต 1	น้ำดิบ ระบบการผลิต 2	น้ำรีไซเคิล	น้ำประปา สูบส่ง 1	น้ำประปา สูบส่ง 2	น้ำประปา สูบส่ง 3	
<i>Melosira</i> sp.	400	0	0	4,000	0	0	0	FC
<i>Oscillatoria</i> sp.	10,000	10,800	16,400	4,602,000	400	400	1,200	FC
<i>Cyclotella</i> sp.	0	0	0	0	0	0	0	FC
<i>Synedra</i> sp.	0	0	80	14,000	0	0	0	FC, TO
<i>Lyngbya</i> sp.	0	0	0	0	0	0	0	FC
<i>Nitzschia</i> sp.	0	0	1,200	400,000	0	0	0	FC
<i>Anabaena</i> sp.	0	0	0	168,000	0	0	0	FC
<i>Chlorella</i> sp.	0	0	40	36,000	0	0	0	FC
<i>Euglena</i> sp.	0	0	0	0	0	0	0	PW
รวม	10,400	10,800	18,800	5,224,000	400	400	1,200	

ที่มา: การประปานครหลวง, 2552

FC คือ สาหร่ายที่ก่อให้เกิดปัญหาอุดตันป่อกรอง

TO คือ สาหร่ายที่เกิดรสและกลิ่นในน้ำ

PW คือ สาหร่ายที่พบในน้ำปนเปื้อนน้ำเสีย

OD คือ สาหร่ายที่ทำให้เกิดกลิ่นในน้ำ

การจำแนกเป็นกลุ่มของสาหร่ายจะใช้รงควัตถุภายในเซลล์ในการจำแนก แบ่งได้เป็น 9 กลุ่ม (Division) ดังนี้ (Bold, 1985)

- 1) สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (Division cyanophyta)
- 2) สาหร่ายสีเขียว (Division chlorophyta)
- 3) สาหร่ายสีน้ำตาลแกมทอง (Division chrysophyta)
- 4) ยูกลีโนอยด์ (Division euglenophyta)
- 5) สาหร่ายไฟ (Division charophyta)
- 6) สาหร่ายสีน้ำตาล (Division phaeophyta)
- 7) สาหร่ายสีเหลืองแกมน้ำตาล (Division pyrrophyta)
- 8) คริปโตโมแนด (Division cryptophyta)
- 9) สาหร่ายสีแดง (Division rhodophyta)

## 2.4 สาหร่ายที่ก่อให้เกิดปัญหาในระบบผลิตน้ำประปา

สาหร่ายที่ก่อให้เกิดปัญหาในระบบผลิตน้ำประปาส่วนมากอยู่ใน 3 กลุ่ม ดังนี้ (ทันดาว ทองตัน, 2545)

### 2.4.1 สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินหรือไซยาโนแบคทีเรีย (Division cyanophyta)

จัดเป็นพวกเดียวกับแบคทีเรีย (Prokaryotic cell) เนื่องจากเป็นสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียวที่ไม่มีเยื่อหุ้มนิวเคลียส แต่สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมีคลอโรฟิลล์ เอ จึงสามารถสังเคราะห์แสงได้ ซึ่งไม่พบในแบคทีเรีย

สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินพบได้ทุกหนแห่ง ส่วนใหญ่พบในน้ำจืด แต่ก็สามารถเจริญได้ในน้ำทะเล น้ำกร่อย แม้กระทั่งในน้ำพุร้อน หิมะ หรือในทะเลทราย เนื่องจากสาหร่ายเหล่านี้ทนต่อสภาวะแห้งแล้งได้ดีกว่าสาหร่ายกลุ่มอื่นๆ ลักษณะที่สำคัญ คือ

- 1) รงควัตถุในการสังเคราะห์แสง ได้แก่ คลอโรฟิลล์ เอ แคโรทีนอยด์ ไฟโคบิลิโปรตีน โดยรงควัตถุไม่อยู่ในพลาสติด แต่จะกระจายเป็นอิสระในไซโตพลาสซึม
- 2) มีผนังเซลล์ 2 ชั้น คล้ายแบคทีเรียแกรมลบ ด้านนอกผนังเซลล์มีลักษณะเป็นเมือกใส เรียกว่า Sheath
- 3) ไม่มีหนวด (Flagella) แต่จะเคลื่อนที่แบบเลื่อนไหล (Gliding movement) มีทั้งแบบถอยหน้าถอยหลัง แกว่งซ้ายขวา เคลื่อนไหวเป็นคลื่น หรือหมุนเป็นเกลียว
- 4) ไม่มีการสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศ

5) สามารถตรึงไนโตรเจนจากอากาศและเซลล์สามารถเปลี่ยนสีได้ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นของแสง ความเข้มข้นของแสงหรือปริมาณธาตุอาหาร แต่จะพบในบางชนิดเท่านั้น

6) อาหารสะสมคือ แป้งไซยาโนไฟซิน (Cyanophycin starch) ซึ่งเป็นคาร์โบไฮเดรตในรูปแกรนูล (Granules) กระจายอยู่ในโครโมพลาสต์ซึม นอกจากนี้ยังมีไกลโคเจน แกรนูลและหยดน้ำมัน

สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินพบได้ทั้งเซลล์เดี่ยว (Unicellular) กลุ่มเซลล์ (Colony) แบบพาลเมลลา (Palmella) หรือแบบเส้นสาย (Filamentous) แบบเส้นสายที่พบบ่อยที่สุดคือ *Oscillatoria* โดยมีการเรียงตัวของเซลล์เป็นแถวเรียก Trichome โดยรอบๆ Trichome จะมี Sheath หุ้ม จึงเรียก Trichome ที่มี Sheath หุ้มว่า Filament ในบางสกุลมีเซลล์ที่มีผนังหนาอยู่ระหว่างเซลล์ปกติ เรียกว่า Heterocyst เช่น สกุล *Anabaena* และ *Anabaenopsis* เส้นสายของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน มีทั้งแบบแตกแขนงและไม่แตกแขนง และการแตกแขนงมีทั้งแบบแขนงแท้และแขนงเทียม

สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินหลายชนิดเกิดการเจริญเติบโตและขยายพันธุ์อย่างรวดเร็ว (Algae bloom) จนทำให้แหล่งน้ำเปลี่ยนสี เมื่อมีปริมาณมากจะทำให้สัตว์น้ำตาย น้ำมีกลิ่นเหม็น สารเคมีบางชนิดทำให้น้ำมีกลิ่นและรสเปลี่ยนแปลง เช่น จีออสมิน (Geosmin) และสาร 2-methylisoborneol (2-MIB) และสาหร่ายบางชนิดยังสร้างสารพิษ (Toxin) เช่น *Microcystis* และ *Anabaena* สารพิษนี้มีผลในการทำลายตับและระบบประสาท สามารถทำให้คนถึงแก่ความตายถ้าดื่มน้ำที่มีสารพิษชนิดนี้

นอกจากนี้ถ้าสัมผัสกับน้ำที่มีการบลูมของสาหร่ายบางชนิดจะทำให้ผิวหนังอักเสบ คันและบวม เช่น *Anabaena* sp., *Oscillatoria agardhii*, *O. rubescens*, *Lyngbya majuscula* หรือ *Gloeotrichia eechinulata*

การทำลายสารพิษเหล่านี้ไม่สามารถทำลายให้หมดโดยการกรอง การใส่คลอรีน การต้ม หรือแม้แต่การใช้ด่าง นอกจากนี้สารปฏิชีวนะ เช่น สเตรปโตมัยซิน (Streptomycin) หรือ นีโอไมซิน (Neomycin) สามารถลดการเจริญเติบโตของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินบางชนิดได้ แต่วิธีที่ดีที่สุด คือ การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

#### 2.4.2 สาหร่ายสีเขียว (Division chlorophyta)

มีเซลล์เหมือนพืชชั้นสูง (Eucaryotic cell) พบทั่วไปในน้ำจืด น้ำกร่อย น้ำทะเล หรือแม้แต่บนดิน มีลักษณะที่สำคัญ คือ

1) มีรงควัตถุสีเขียว เนื่องจากไม่ถูกบดบังด้วยรงควัตถุอื่นๆ มีส่วนประกอบเหมือนพืชชั้นสูง คือ มีคลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์ บี แคโรทีน และแซนโทฟิลล์ รงควัตถุอยู่ในคลอโรพลาสต์ โดยที่คลอโรพลาสต์มีเยื่อหุ้ม 2 ชั้น มีรูปร่างแตกต่างกัน เช่น รูปถ้วย (Cup-shaped) รูปวงรอบเซลล์ (Girdle-shaped) เป็นตาข่าย (Reticulate) เป็นรูปเกลียว (Spiral) รูปดาว (Stellate) หรือเป็นแถบข้างเซลล์ (Parietal) และจะมีจำนวน 1 อัน ขึ้นไป

2) อาจมีหรือไม่มีผนังเซลล์ โดยทั่วไปมีผนังเซลล์ 2 ชั้น

3) มีหรือไม่มีหนวด จะพบหนวดในกลุ่มที่เคลื่อนที่ได้ โดยพบตั้งแต่ 1 เส้น หรือมากกว่า หนวดไม่มีขน (Turbular hair) อาจพบเกล็ด (Scale) บนหนวดได้

4) อาหารสะสมมีทั้งแป้งและไขมัน ส่วนมากอยู่ในรูปของแป้งที่ประกอบด้วยอะไมโลส (Amylose) และอะไมโลเพกติน (Amylopectin) สร้างจากไฟรีนอยด์ซึ่งอยู่ภายในหรือบนคลอโรพลาสต์

5) สืบพันธุ์ได้ทั้งแบบอาศัยเพศและไม่อาศัยเพศ

#### 2.4.3 สาหร่ายสีน้ำตาลแกมทอง (Division chrysophyta)

เป็นดิวิชันใหญ่ที่รวมสาหร่ายสีเขียวแกมเหลือง (Yellow-green algae) และสาหร่ายกลุ่มไดอะตอม (Diatom) เข้าไว้ด้วยกัน มีลักษณะสำคัญ คือ

1) รงควัตถุในคลอโรพลาสต์ คือ คลอโรฟิลล์ เอ บางชนิดมี คลอโรฟิลล์ ซี แคโรทีน ได้แก่ เบต้า-แคโรทีน ( $\beta$ -Carotene) และเอพซีลอน-แคโรทีน ( $\epsilon$ -Carotene) แซนโทฟิลล์ ได้แก่ ฟุโคแซนทิน (Fucoxanthin) ไดอะโตแซนทิน (Diatozanthin) และไฟโคบิลิโปรตีน ปริมาณของแคโรทีนอยด์และแซนโทฟิลล์มีมากกว่าคลอโรฟิลล์ จึงทำให้สีของคลอโรพลาสต์มีสีตั้งแต่เหลือง เขียวแกมเหลือง เขียวมะกอก เหลืองแกมน้ำตาล น้ำตาลแกมทอง และน้ำตาลอ่อน เป็นต้น

2) ผนังเซลล์เป็นเนื้อเดียวกันหรือเป็นแผ่น บางกลุ่มไม่มีผนังเซลล์แต่มีเยื่อหุ้มเซลล์

3) อาหารสะสมมีทั้งแป้ง (อยู่ในรูป Chrysolaminarin หรือ Leucosin) และไขมัน

4) เซลล์มีรูปร่างแตกต่างกัน อาจมีรูปร่างรี กลม ทรงกระบอก หรือรูปกระสวย บางกลุ่มมีรูปร่างเฉพาะ เช่น ไดอะตอม ซึ่งมีลักษณะเป็น 2 ฝาครอบกันพอดี

สำหรับสาหร่ายกลุ่มไดอะตอมอยู่ใน Class bacillariophyceae เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของกลุ่มประชากรสาหร่าย พบได้ในน้ำจืดและน้ำเค็ม อยู่เป็นเซลล์เดี่ยวและกลุ่มเซลล์ เซลล์ปกติไม่พบหนวด ผนังเซลล์ของไดอะตอมมีลักษณะพิเศษ ประกอบด้วย ฟุสตุล (Frustule) ที่เป็นซิลิกาล้อมด้วยสารเมือก (Mucilaginous) ฟุสตุลมี 2 ฝา คือ ฝาบน (Epitheca) และฝาล่าง (Hypotheca) และวงศาตรอบฝาทั้งสอง เรียกว่า Girdle band อนุกรมวิธานของ

ไดอะตอมจำแนกโดยใช้รูปร่าง จำนวนและตำแหน่งของคลอโรพลาสต์ รวมทั้งรูปร่างของเซลล์ โครงสร้างและลวดลายบนฝา (Striae) ที่มีลวดลายแตกต่างกันมาก โดยมี 2 อันดับ (Order) คือ Centric diatom และ Pennate diatom

กลุ่มของไดอะตอมในระบบนิเวศ แบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ

1) Euplanktonic diatom เป็นกลุ่มที่เป็นแพลงก์ตอนตลอดเวลา ส่วนมากเป็น Centric diatom มักก่อให้เกิดบลูมในฤดูใบไม้ผลิและฤดูใบไม้ร่วงในทะเลสาบและมหาสมุทรในเขตอบอุ่น และในฤดูร้อนในเขตละติจูดที่สูงกว่า

2) Benthic diatom สำหรับกลุ่มนี้ส่วนใหญ่เป็น Pennate diatom เป็นสาหร่ายที่จับกับสิ่งที่มีน้ำเป็นกลุ่มแรก การจับเมือกของไดอะตอมและแบคทีเรียทำให้เกิดฟิล์มบางๆ บนพื้นผิวของสิ่งที่มีน้ำ เป็นการเตรียมพื้นที่ผิวให้กับสาหร่ายอื่นๆ การเกาะกับพื้นผิวอาจใช้ฝาข้างหนึ่งแนบพื้นผิวหรือเกาะโดยเมือกเหนียวๆ ก็ได้

3) Meroplanktonic diatom เป็นแพลงก์ตอนชั่วคราว ส่วนมากเป็น Pennate Diatom ที่เกาะพื้นผิวอย่างหลวมๆ เมื่อถูกรบกวนจะพัดพากลายเป็นแพลงก์ตอนลอยอิสระในน้ำ

ในระบบผลิตน้ำประปาสาหร่ายที่สร้างกลิ่นและรสเป็นปัญหาในการผลิตน้ำ เช่น สกุล *Synura* ผลิตกลิ่นแตงกวาดิบและรสขม สกุล *Dinobryon Uroglenopsis* และ *Peridinium* ผลิตกลิ่นคาวปลาอย่างแรง *Synedra* ผลิตกลิ่นอับ สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินสกุล *Anabaena Anacystis* และ *Aphanizomenon* ผลิตกลิ่นสกปรกคล้ายเจ้าหนู *Gomphosphaeria Cylindrospermum* และ *Rivularia* ผลิตกลิ่นหญ้า *Chlamydomonas Cryptomonas* และ *Euglena* ผลิตรสหวาน (อาภารัตน์ มหาพันธ์, 2541)

กลุ่มสาหร่ายที่ผลิตเมือก (Slime) เช่น *Palmella Anacystis Rivularia Anabaena* และ *Oscillatoria* เป็นสาเหตุของรสและกลิ่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีเกิดการย่อยสลายในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน (Anaerobic decomposition)

สาหร่ายที่เป็นสาเหตุของการอุดตันของระบบกรองน้ำด้วยทราย ทำให้ช่วงเวลากกรองสั้นลงมักเป็นสาหร่ายกลุ่มไดอะตอม เช่น *Asterionella Fragilaria Tabellaria Aulacoseira (Melosira)* และ *Synedra* ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 กลุ่มของสาหร่ายที่เป็นสาเหตุของการอุดตันของระบบกรองน้ำด้วยทราย

กลุ่มของสาหร่าย	ชนิดของสาหร่าย
สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (Cyanophyta)	<i>Anabaena flos-aquae</i> <i>Anacystis dimidiata</i> หรือ <i>Chroococcus turgidus</i> <i>Gloeotrichia echinulata</i>

ตารางที่ 2.4 (ต่อ) กลุ่มของสาหร่ายที่เป็นสาเหตุของการอุดตันของระบบกรองน้ำด้วยทราย

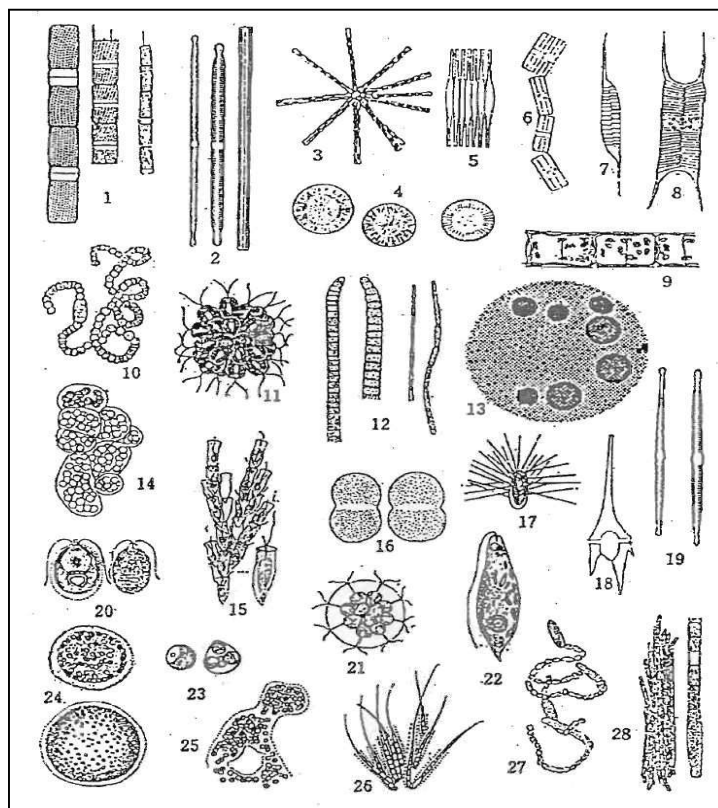
กลุ่มของสาหร่าย	ชนิดของสาหร่าย
สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (Cyanophyta)	<i>Oscillatoria amphibian</i> <i>Oscillatoria chalybea</i> <i>Oscillatoria ornate</i> <i>Oscillatoria princeps</i> <i>Oscillatoria pseudogeminata</i> <i>Oscillatoria rubescens</i> <i>Oscillatoria splendid</i> <i>Rivularia dura</i>
สาหร่ายสีเขียว (Chlorophyta)	<i>Chlorella pyrenoidosa</i> <i>Cladophora aegagropila</i> <i>Closterium moniliferum</i> <i>Dictyosphaerium pulchellum</i> <i>Hydrodictyon sphaerocarpa</i> <i>Spirogyra porticalls</i> <i>Ulothrix variabilis</i> <i>Zygnema insigne</i>
ไดอะตอม (Chrysophyta)	<i>Asterionella formosa</i> <i>Cyclotella meneghiniana</i> <i>Cymbella ventricosa</i> <i>Diatoma vulgare</i> <i>Fragilaria crotonensis</i> <i>Melosira granulate</i> <i>Melosira varians</i> <i>Melosira granulate var. angustissima f. spiralis</i> <i>Melosira italiga</i> <i>Gyrosigma nodiferum</i> <i>Synedra ulna</i> <i>Synedra acus</i> <i>Navicula graciloides</i>

ตารางที่ 2.4 (ต่อ) กลุ่มของสาหร่ายที่เป็นสาเหตุของการอุดตันของระบบกรองน้ำด้วยทราย

กลุ่มของสาหร่าย	ชนิดของสาหร่าย
ไดอะตอม (Chrysophyta)	<i>Tabellaria fenestrata</i> <i>Tabellaria flocculose</i>

ที่มา: Kankanlaung, 2000

สาหร่ายที่สะสมและเติบโตบนผิวของทรายกรอง ในลักษณะเป็นฟิล์มบางๆ ทำให้อัตราการไหลผ่านชั้นกรองลดลง แต่ก็อาจมีประโยชน์ในแง่ที่สามารถเพิ่มออกซิเจนให้น้ำที่ไหลผ่านก่อนให้เกิดการย่อยสลายอินทรีย์สารในเครื่องกรองในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนได้ เรียก เมือกของสาหร่าย ฟิชน้ำ และสตรน้ำอื่นๆ ที่อยู่บริเวณผิวกรองทรายชื่อว่า ผิวกรอง (Filter Skin) หรือ Schmutzdecke เมื่อเกิดปัญหาการอุดตันทำให้การล้างย้อนต้องทำบ่อยครั้งขึ้น สิ้นเปลืองเวลาและน้ำ รวมทั้งต้องเปลี่ยนทรายบ่อย ถ้ามีสาหร่ายมากจะรบกวนการทำงานของกระบวนการตกตะกอนทางเคมี ทำให้การตกตะกอนของฟล็อกในถังตกตะกอนไม่ได้ผลดีเท่าที่ควร (พิชญพล สงวนนวน, 2543)



รูปที่ 2.4 สาหร่ายและผลกระทบที่มีต่อระบบผลิตน้ำประปา (Konno, 1999)



ก) สาหร่ายที่ดูดตันระบบกรองน้ำ

1. และ 9. *Aulacoseira* 2. *Synedra* 3. *Asterionella* 4. *Cyclotella* 5. *Fragilaria* 6.  
*Tabellaria* 7. *Rhizosolenia* 8. *Atteya*

ข) สาหร่ายที่ทำให้เกิดกลิ่น

10. *Anabaena* 11. *Synura* 12. *Oscillatoria* 13. *Volvox* 14. *Microcystis* 15. *Dinobryon*  
17. *Mallomonas* 18. *Ceratium* 19. *Synedra*

ค) สาหร่ายที่ทำให้เกิดสี

16. *Cosmarium* 20. *Chlamydomonas* 21. *Pandorina* 22. *Euglena* 23. *Chlorella*

ง) สาหร่ายที่สร้างสารพิษ

24. *Coelosphaerium* 25. *Microcystis* 26. *Gloeotrichia* 27. *Anabena* 28.  
*Aphanizomenon*

## 2.5 ปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อการเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็ก

ในการเจริญเติบโตและแพร่กระจายของสาหร่ายขึ้นอยู่กับที่อยู่อาศัยของสาหร่าย โดยมีปัจจัยต่างๆ ทั้งทางกายภาพ เคมีและชีวภาพดังนี้

### 2.5.1 แสง

แสงเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมากในการสังเคราะห์ด้วยแสง เนื่องจากเป็นแหล่งพลังงานที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง จึงมีผลต่อการสังเคราะห์ด้วยแสง การเติบโต การสร้างรงควัตถุ การหายใจ และรูปร่างลักษณะของเซลล์ (Brown และ Richardson, 1963) นอกจากนี้แสงยังเป็นปัจจัยจำกัด (Limiting factor) ที่สำคัญมากที่สุดปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเติบโตของสาหร่ายด้วย

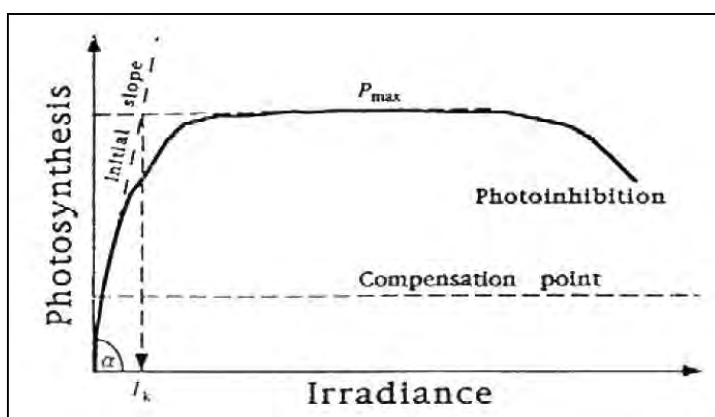
ตามปกติการสังเคราะห์ด้วยแสงของสาหร่ายจะเพิ่มขึ้น เมื่อสาหร่ายได้รับแสงที่มีความเข้มแสงสูงขึ้น จนกระทั่งถึงความเข้มแสงที่ทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงไม่เพิ่มสูงขึ้นอีก เรียกว่า ความเข้มแสงอิ่มตัว (Light-saturation intensity) ณ ความเข้มแสงอิ่มตัวนี้มีผลทำให้สาหร่ายมีการสังเคราะห์ด้วยแสงสูงสุด (Devlin และ Barker, 1971) ดังรูปที่ 2.5 เรียกกราฟในรูปนี้ว่า Light saturation curve และถ้าความเข้มแสงที่สาหร่ายได้รับสูงกว่าความเข้มแสงอิ่มตัวมากๆ อาจเกิดการยับยั้งการสังเคราะห์ด้วยแสง (Photoinhibition) ขึ้นได้ แต่การยับยั้งการสังเคราะห์ด้วยแสงนี้สามารถคืนสภาพได้หลังจากการพักตัวสักระยะเวลาหนึ่ง ทั้งนี้ระดับความอิ่มตัวของการสังเคราะห์ด้วยแสงจะแปรผันขึ้นกับชนิดของสาหร่ายด้วย โดยมีรายงานว่าสาหร่าย *Chlorella* sp. และ *Scenedesmus* sp. มีระดับความเข้มแสงอิ่มตัวอยู่ที่ประมาณ 200

ไมโครโมล/ตร.ม./วินาที (Hanagata และคณะ, 1992) นอกจากนี้ระดับความเข้มแสงอิ่มตัวยังขึ้นกับปัจจัยสถานะแวดล้อมด้วย โดยมีรายงานว่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงจะเพิ่มขึ้นถ้าปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์มีมากถึงจุดอิ่มตัว (Devlin และ Barker, 1971)

### 2.5.2 อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีผลต่อการสังเคราะห์ด้วยแสงและการหายใจของสาหร่าย โดยเมื่ออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมสูงขึ้น อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงจะเพิ่มตามการเพิ่มของอุณหภูมิจนถึงระดับอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเติบโตของสาหร่าย โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นกว่านี้อัตราการเติบโตจะลดลง (Darley, 1982) แต่อุณหภูมิจะไม่มีผลต่อการสังเคราะห์ด้วยแสง ถ้าถูกจำกัดด้วยแสงหรือคาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากนี้อุณหภูมียังมีผลต่ออัตราการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ โดยเมื่ออุณหภูมิลดลงจะทำให้อัตราการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น

มานิทย์ อัครวารีย์และธิดา เพชรมณี (2534) ได้ศึกษาการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp. ที่อุณหภูมิ 3 ระดับ ได้แก่ 21 28 และ 35 องศาเซลเซียส โดยให้แสงด้วยหลอดฟลูออเรสเซนต์ วันละ 8 ชั่วโมง เลี้ยงจนได้ความหนาแน่นประมาณ  $1 \times 10^6$  เซลล์/มล. พบว่าค่าเฉลี่ยของระยะเวลาในการเพิ่มจำนวนเซลล์เป็น 2 เท่า เท่ากับ 1.3 1.3 และ 5 วัน ตามลำดับ



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการสังเคราะห์ด้วยแสงกับความเข้มแสง (Vonshak, 1997)

### 2.5.3 ความเป็นกรด-เบส (pH)

สาหร่ายแต่ละชนิดสามารถเติบโตได้ที่ระดับค่าพีเอชต่างกัน สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินจะเติบโตได้ดีในน้ำที่มีสภาพเป็นกลางจนถึงมีสภาพเป็นเบส หรือประมาณ 6.5-7.5

ส่วนสาหร่ายสีเขียวบางกลุ่ม เช่น เดสมิด เป็นต้น ชอบน้ำที่มีสภาพเป็นกรดอ่อนหรือเป็นกรด ซึ่งมีค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 5.5-6.5 (Hirata และคณะ, 1996)

ค่าพีเอชของสารละลายมีผลทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อกระบวนการเมแทบอลิซึมของสาหร่าย และยังมีบทบาทต่อการละลายของเกลือและสารประกอบเชิงซ้อนชนิดต่างๆ ในสารละลาย ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเป็นพิษหรือยับยั้งการเติบโตของสาหร่าย ขณะเดียวกันค่าพีเอชยังส่งผลต่อการละลายของสารประกอบโลหะ โดยการเพิ่มค่าพีเอชจะเป็นสาเหตุให้สารประกอบโลหะที่เป็นธาตุอาหารที่จำเป็นบางชนิดตกตะกอน ดังนั้นสาหร่ายจึงอาจขาดธาตุอาหารที่จำเป็นบางตัวได้

นอกจากนี้ค่าพีเอชยังมีผลต่อการละลายของธาตุอาหารจำพวกฟอสฟอรัส คือที่ค่าพีเอชสูงกว่า 7 ฟอสเฟตจะเปลี่ยนเป็นฟอสเฟตไอออน ซึ่งสาหร่ายนำไปใช้ไม่ได้ ในขณะที่ค่าพีเอชในช่วง 5.6-6.5 ฟอสเฟตจะอยู่ในรูปไดไฮโดรเจนฟอสเฟตไอออนและไฮโดรเจนฟอสเฟตไอออน ซึ่งสาหร่ายสามารถใช้ได้ แต่ถ้าสภาพสารละลายมีความเป็นกรดมาก ฟอสเฟตจะรวมตัวกับเหล็กหรืออะลูมิเนียมและตกตะกอนได้

Kodama และคณะ (1993) ได้ศึกษาผลของค่าพีเอชต่อการเติบโตของ *Chlorococcum littorale* พบว่าถ้าค่าพีเอชมากกว่า 4 การเติบโตไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ถ้าค่าพีเอชเท่ากับ 3.5 การเติบโตจะลดลงร้อยละ 50 ของการเติบโตที่ค่าพีเอชมากกว่า 4 ที่ค่าพีเอชน้อยกว่า 4 การเติบโตจะลดลง และที่ค่าพีเอชเท่ากับ 3 สาหร่ายไม่สามารถเติบโตได้

## 2.5.4 ธาตุอาหาร

การเติบโตของสาหร่ายซึ่งเป็นผลมาจากการสังเคราะห์ด้วยแสงนั้นขึ้นอยู่กับอาหารที่ใช้เลี้ยง ซึ่งแตกต่างกันไปตามชนิดของสาหร่าย ดังนั้นถ้าในน้ำมีความเข้มข้นของอาหารไม่เพียงพอกับความต้องการของสาหร่าย จะทำให้อัตราการเติบโตลดลง (ลัดดา วงศ์รัตน์, 2540)

ธาตุอาหารเป็นปัจจัยทางเคมีที่มีผลต่อการเติบโตของสาหร่ายทั้งในด้านปริมาณและด้านชนิดของธาตุอาหาร โดยทั่วไปธาตุอาหารจะแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ ธาตุอาหารหลัก (Macronutrients) และธาตุอาหารรอง (Micronutrients)

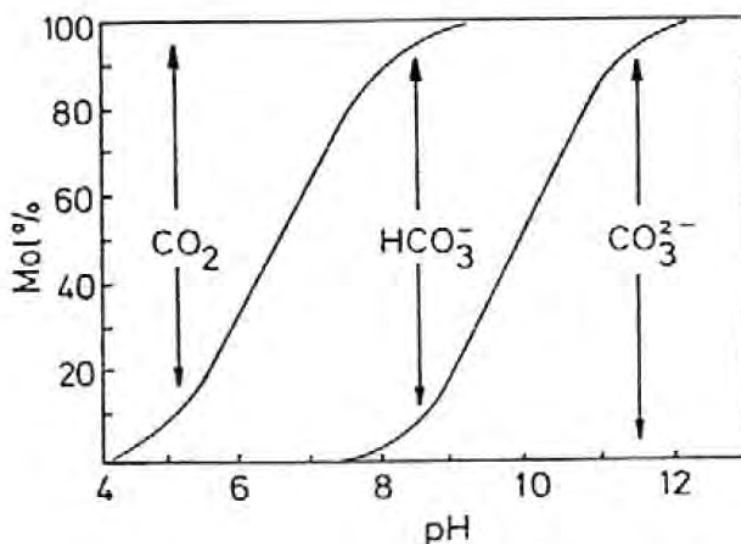
### 2.5.4.1 ธาตุอาหารหลัก

ประกอบด้วยธาตุต่อไปนี้

- 1) คาร์บอน คาร์บอนที่สาหร่ายนำไปใช้ได้แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ คาร์บอนอินทรีย์ และคาร์บอนอนินทรีย์
  - คาร์บอนอินทรีย์ สารคาร์บอนอินทรีย์จะทำหน้าที่เป็นทั้งแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงานแทนพลังงานที่สาหร่ายจะได้รับจากแสง (Ogbonna และคณะ, 1997) ดังนั้น

สาหร่ายบางชนิดสามารถเติบโตได้แม้จะอยู่ในที่มืด (Heterotrophic culture) สารคาร์บอนอินทรีย์ที่ใช้ในการเลี้ยงสาหร่าย ได้แก่ น้ำตาล (กลูโคสหรือซูโครส) ไขมัน และกรดอินทรีย์ (กรดอะซิติก) เป็นต้น (Gladue, 1991)

- คาร์บอนอินทรีย์ ในแหล่งน้ำธรรมชาติพบคาร์บอนอินทรีย์ได้ 3 รูปแบบคือ คาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายน้ำ ไบคาร์บอเนต และคาร์บอเนตไอออน ซึ่งคาร์บอนอินทรีย์จะอยู่ในรูปแบบใดมากหรือน้อย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของน้ำ ดังรูปที่ 2.6 โดยที่ค่าพีเอชอยู่ในช่วง 7-9 จะอยู่ในรูปของเกลือไบคาร์บอเนต ( $\text{HCO}_3^-$ ) เมื่อค่าพีเอชมากกว่า 9.5 จะอยู่ในรูปเกลือคาร์บอเนต ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) และเมื่อค่าพีเอชมีค่าประมาณ 5 คาร์บอนไดออกไซด์จะอยู่ในรูปก๊าซที่ละลายน้ำ ซึ่งจะถูกตรึงโดยเอนไซม์ Ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase/oxygenase (Rubisco) ทั้งนี้คาร์บอนอินทรีย์ จะมีการเปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่สาหร่ายเองสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้โดยตรง ซึ่งจะอยู่ในรูปแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของสาหร่ายด้วย (Kaplan และคณะ, 1986)



รูปที่ 2.6 รูปแบบของคาร์บอนอินทรีย์ที่ปรากฏที่ระดับค่าพีเอชต่างๆ (Becker, 1993)

## 2) ไนโตรเจน

สาหร่ายส่วนใหญ่สามารถใช้ไนเตรท ไนไตรท์ และแอมโมเนียได้ นอกจากนี้สาหร่ายบางชนิดสามารถตรึงไนโตรเจนได้จากอากาศ ได้แก่ สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (Darley, 1982) โดยสาหร่ายส่วนใหญ่จะเลือกใช้แอมโมเนียก่อน เนื่องจากสาหร่ายสามารถใช้แอมโมเนียในกระบวนการเมแทบอลิซึมโดยเฉพาะการสร้างกรดอะมิโนได้โดยตรง ในขณะที่ถ้าใช้

ไนเตรตต้องเปลี่ยนไนเตรตให้อยู่ในรูปของแอมโมเนียก่อน เซลล์จึงจะสามารถนำไปใช้ได้ (Lobban และ Harrison, 1994)

### 3) ฟอสฟอรัส

เป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเติบโตของสาหร่าย เนื่องจากฟอสฟอรัสมีส่วนเกี่ยวข้องกับกระบวนการต่างๆ ของเซลล์ โดยเฉพาะกระบวนการถ่ายทอพลังงานและกระบวนการสร้างกรดนิวคลีอิก ออโรฟอสเฟตเป็นแหล่งฟอสฟอรัสอนินทรีย์ที่สำคัญต่อการเติบโตของสาหร่าย โดยสาหร่ายส่วนใหญ่จะเก็บฟอสฟอรัสส่วนเกินไว้ในรูปโพลีฟอสเฟตในไซโตพลาสซึมไมโทคอนเดรีย (Darley, 1982) แต่การได้รับฟอสฟอรัสที่ไม่เพียงพออาจไม่มีผลต่อการสังเคราะห์ด้วยแสงของสาหร่ายเมื่ออยู่ในภาวะความเข้มแสงต่ำ แต่จะส่งผลชัดเจนเมื่อเพิ่มความเข้มแสง (Szerenos และคณะ, 2004)

### 4) แคลเซียม

แคลเซียมเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเติบโตสำหรับสาหร่ายสีเขียว โดยมีส่วนเกี่ยวข้องในการสร้างโครงสร้างของสาหร่ายโดยเฉพาะในสาหร่ายทะเล และมีบทบาทในการสร้างผนังเซลล์ของเซลล์สืบพันธุ์เพศผู้ (ลัดดา วงศ์รัตน์, 2540) ซึ่งปริมาณแคลเซียมที่พืชต้องการขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุอาหารชนิดอื่นด้วย เช่น แมกนีเซียม เหล็ก สังกะสี โคบอลต์ ทองแดง โมลิบดีนัม นิกเกิล อะลูมิเนียม โซเดียม ปोटสเซียม และตะกั่ว เป็นต้น

### 5) โปแตสเซียมและแมกนีเซียม

โปแตสเซียมเป็นธาตุอาหารที่เป็นส่วนประกอบของเอนไซม์หลายชนิดในสาหร่ายและมีผลในการยับยั้งการเติบโตของสาหร่ายบางชนิด (Wiessner, 1962) ส่วนแมกนีเซียมมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อกระบวนการเมแทบอลิซึมของเซลล์ (ลัดดา วงศ์รัตน์, 2540)

### 6) ซัลเฟอร์

เป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อสาหร่ายทุกชนิด ซัลเฟอร์ในสาหร่ายมีหลายรูปแบบ เช่น กรดอะมิโน วิตามิน บี กรดแพนโทเทนิก ซัลเฟอร์ที่สาหร่ายใช้อยู่ในรูปสารอนินทรีย์ ได้แก่ ซัลเฟต (Sulfate) (Schiff, 1962)

#### 2.5.4.2 ธาตุอาหารรอง

เป็นธาตุอาหารที่สาหร่ายต้องการใช้ในปริมาณที่น้อย แต่สามารถช่วยให้สาหร่ายเติบโตได้ดีขึ้น ซึ่งธาตุอาหารรองนี้ถูกนำไปใช้เป็นส่วนประกอบของโมเลกุลที่จำเป็นต่อเซลล์ เช่น เอนไซม์และวิตามินต่างๆ เป็นต้น แบ่งได้เป็นธาตุอาหารรองอนินทรีย์และธาตุอาหารรองอินทรีย์

##### 1) ธาตุอาหารรองอนินทรีย์ (Inorganic micronutrients) ได้แก่

- เหล็ก เป็นธาตุอาหารที่ช่วยดูดซึมน้ำไนโตรเจนและเหล็กเป็นองค์ประกอบของรงควัตถุ ถ้าสาหร่ายขาดเหล็กจะมีผลต่อสีเขียวและการเติบโตของสาหร่าย (Brock และคณะ, 1984) นอกจากนี้เหล็กยังเป็นองค์ประกอบของเอนไซม์หลายชนิด เช่น เฟอร์ริดอกซิน (Ferredoxin) คตะเลส (Catalase) อีกทั้งยังเป็นองค์ประกอบของไซโตโครม (Cytochrome) และพอร์ไฟริน (Porphyrins) (Warburg, 1948)

- โบรอน เป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อสาหร่ายบางชนิด เช่น สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินและไดอะตอม เป็นต้น

- แมงกานีส เป็นธาตุที่จำเป็นต่อสาหร่ายหลายชนิด ซึ่งแมงกานีสเป็นองค์ประกอบที่สำคัญต่อกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของสาหร่าย โดย Wiessner (1962) ได้ทดลองเติมแมงกานีสลงในอาหารเลี้ยงสาหร่าย พบว่ามีผลในการเพิ่มอัตราการเติบโตของสาหร่าย

- สังกะสี เป็นธาตุอาหารที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงซึ่งมีผลต่อการเติบโตของ *Stichococcus bacillaris* (Wiessner, 1962) ในอาหารเลี้ยงสาหร่ายหลายชนิดจะมีสังกะสีอยู่ในความเข้มข้นประมาณ 0.01-0.1 มก./ลิตร โดยมี EDTA เป็นคีเลเตอร์ นอกจากนี้ Stagman (1940) พบว่าเมื่อปริมาณสังกะสีลดลงจะทำให้การสร้างคลอโรฟิลล์ลดลง

- ทองแดง พบในเอนไซม์สำหรับกระบวนการออกซิเดชัน นอกจากนี้ทองแดงยังมีความสำคัญต่อกระบวนการหายใจ โดยพบว่าการหายใจลดลงเมื่อปริมาณทองแดงลดลง (Wiessner, 1962) สำหรับ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงในห้องปฏิบัติการจะมีอาการผิดปกติเมื่อเลี้ยงในอาหารเลี้ยงสาหร่ายที่มีทองแดงต่ำกว่า  $10^{-7}$  โมลาร์ (Walker, 1953)

- ซิลิกา เป็นธาตุอาหารที่จำเป็นที่สุดของสาหร่ายจำพวกไดอะตอมเพื่อใช้ในการสร้างเปลือก ในขณะที่สาหร่ายชนิดอื่นไม่จำเป็นต้องใช้

2) ธาตุอาหารรองอินทรีย์ (Organic micronutrients) ธาตุอาหารประเภทนี้อาจเรียกอีกชื่อว่า แร่ธาตุปริมาณน้อย (Trace metals) แบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่

- คาร์โบไฮเดรต เช่น น้ำตาลเดกซ์โตรส  
- เกลืออินทรีย์หรือสารประกอบที่มีเกลืออินทรีย์อยู่ด้วย ได้แก่ เกลืออะซิเตตต่างๆ

- วิตามิน ได้แก่ วิตามิน 3 ชนิด คือ วิตามินบี 1 บี 12 และบีรวม  
- อาหารเสริม ได้แก่ อาหารที่ช่วยการเติบโตของสาหร่าย คือ เป็นสารเสริมการเติบโต (Growth factor) ตัวอย่างเช่น อะเดนิน (Adenine) ไคเนติน (Kinetin) ทั้ง 2 ชนิดนี้ละลายในน้ำได้เล็กน้อย แต่ละลายได้ดีในสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต อาหารเสริมอีก 2 ชนิดที่นิยมใช้ คือ Gibberellic acid ละลายในน้ำได้ดี และ Indole acetic acid (IAA) มีคุณสมบัติละลายได้เล็กน้อยในน้ำร้อนและสลายตัวได้ง่ายเมื่อถูกแสงสว่าง

### 2.5.5 ความขุ่นของน้ำ (Turbidity)

เกิดจากการที่สิ่งแขวนลอยกันทางเดินแสงในน้ำ อาจมีขนาดแตกต่างกันทั้งอินทรีย์สารและอนินทรีย์สาร เช่น ดินละเอียด แพลงก์ตอน และสิ่งมีชีวิตเล็กๆ สิ่งเหล่านี้จะทำให้เกิดการกระเจา (Scattered) และการดูดซึม (Absorbed) ของแสง แหล่งน้ำต่างๆ จะมีความขุ่นแตกต่างกัน ขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น ลักษณะดินบนพื้นน้ำ อัตราการไหลของน้ำ อุณหภูมิ น้ำ เป็นต้น ความขุ่นสามารถสังเกตได้ง่าย ทำให้เป็นปัจจัยในการตัดสินใจของผู้บริโภคในการใช้น้ำ และยังเป็นอุปสรรคในการกรองน้ำและฆ่าเชื้อโรคในการผลิตน้ำประปา (มันสิน ตันฑกุลเวศม์, 2543)

### 2.5.6 กระแสน้ำ

เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโต การแพร่กระจาย รูปร่าง และชนิดของสาหร่าย สาหร่ายบางชนิดมีโครงสร้างที่เรียกว่า Holdfast และสร้างเมือกเพื่อช่วยในการยึดเกาะกับสิ่งต่างๆ ในน้ำ ได้แก่ สกุล *Cladophore* *Gomphonema* *Achnanthes* *Cocconeis* และ *Cymbella* (บานเย็น จันทราฤทธิกุล, 2534)

### 2.5.7 สภาพนำไฟฟ้า (Conductivity)

ความสามารถของน้ำในการนำกระแสไฟฟ้าผ่านสื่อ นำไฟฟ้าพวกไอออนของสารประกอบอนินทรีย์ เช่น กรดอนินทรีย์ ด่าง และเกลือ สารอนินทรีย์เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี เพราะแตกตัวให้ไอออนบวกและลบ ทำให้ทราบปริมาณของสารอนินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำ ส่วนสารอินทรีย์ไม่แตกตัวจึงไม่นำไฟฟ้า ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำไม่ได้เป็นค่าเฉพาะของไอออนตัวใดตัวหนึ่ง แต่เป็นค่ารวมของไอออนทั้งหมดในน้ำ และค่านี้ไม่ได้บอกให้ทราบถึงชนิดของสารในน้ำ บอกแต่เพียงว่ามีการเพิ่มหรือลดของไอออนที่ละลายในน้ำเท่านั้น ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายในน้ำ และจะผันแปรตามความเข้มข้นของสารละลาย อุณหภูมิ และค่าพีเอชของน้ำ ซึ่งขึ้นอยู่กับอิทธิพลของสภาพแวดล้อมของแหล่งน้ำและลุ่มน้ำ เช่น ลักษณะของดินและหิน ภูมิประเทศ ฝน การระเหยน้ำ ปริมาณน้ำ กระบวนการทางชีวเคมีในแหล่งน้ำ และกิจกรรมของมนุษย์ เป็นต้น น้ำที่ไหลจากต้นน้ำและผ่านพื้นที่ที่มนุษย์อยู่อาศัยจะมีค่าการนำไฟฟ้าของน้ำเพิ่มมากขึ้น โดยทั่วไปแหล่งน้ำธรรมชาติจะมีค่าการนำไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 100–5,000 ไมโครซีเมนส์/ซม. แต่ปัจจุบันในประเทศไทยจะวัดค่าการนำไฟฟ้าได้สูงกว่า เพราะมีสารละลายปะปนอยู่ในปริมาณมาก ค่าการนำไฟฟ้าอาจเป็นเครื่องชี้วัดได้ถึงความเป็นมลพิษ คือ ถ้ามีค่าสูงกว่า 3,000 ไมโครซีเมนส์/ซม. จัดว่ามีผลกระทบต่อการใช้ชีวิตของสัตว์น้ำและพืชน้ำ (บานเย็น จันทราฤทธิกุล, 2534)

### 2.5.8 ออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved oxygen; DO)

สิ่งมีชีวิตในน้ำได้รับออกซิเจนจากการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชที่ปล่อยออกซิเจนอิสระออกมาละลายในน้ำและจากการแพร่ของออกซิเจนจากบรรยากาศลงสู่น้ำ การละลายของออกซิเจนขึ้นอยู่กับความดัน อุณหภูมิ และปริมาณของแข็งละลาย ค่าออกซิเจนละลายน้ำสามารถบอกให้ทราบว่าน้ำมีมลภาวะหรือไม่ และมีความเหมาะสมต่อการดำรงชีพของสิ่งมีชีวิตในน้ำเพียงใด

## 2.6 การควบคุมการเจริญเติบโตของสาหร่าย (ทันดาว ทองตัน, 2545)

วิธีการควบคุมการเจริญเติบโตของสาหร่ายมีหลายวิธี ทั้งการควบคุมในแหล่งน้ำดิบและการควบคุมในระบบผลิตน้ำประปา

### 2.6.1 การควบคุมในแหล่งน้ำดิบ

1) ทางกายภาพ เช่น การใช้เครื่องจักรตักขึ้น การใช้สี การใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เพื่อปิดกั้นแสง การขูดลอกตะกอนที่ทับถมอยู่ก้นอ่างเก็บน้ำดิบ การใช้คลื่นเสียง (Ultrasonic radiation) เพื่อกำจัดสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน

2) ทางเคมี วิธีการใช้สารฆ่าสาหร่าย (Algicides) เป็นวิธีที่ได้รับความนิยม สารที่ใช้กันมาก เช่น คอปเปอร์ซัลเฟต ( $\text{CuSO}_4$ ) ในบางครั้งการใช้ด่างทับทิมหรือสารโพแตสเซียมเปอร์แมงกาเนต ( $\text{KMnO}_4$ ) ก็ได้ผลเช่นกัน ในการเลือกสารฆ่าสาหร่ายที่ดีควรเลือกสารที่สามารถฆ่าเฉพาะสาหร่ายชนิดที่ต้องการได้ โดยไม่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตชนิดอื่นๆ ในแหล่งน้ำ ไม่ทำให้คุณภาพน้ำต่ำลง ไม่สะสมในแหล่งน้ำ มีราคาถูกและใช้งานง่ายไม่เป็นอันตราย

3) ทางชีวภาพ เช่น การใช้โปรโตซัว แพลงก์ตอนสัตว์ การใช้ปลา ในการลดปริมาณสาหร่าย แต่ต้องไม่มีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตอื่นซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีใหม่และยังไม่สามารถใช้งานจริงในอ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่ได้

4) ควบคุมการปล่อยน้ำทิ้งสู่แหล่งน้ำ ปล่อยน้ำทิ้งสู่แหล่งน้ำตามมาตรฐานน้ำทิ้งชุมชนและโรงงานอุตสาหกรรมโดยควบคุมปริมาณสารอาหารที่จำเป็นในการเติบโตของสาหร่าย เช่น ฟอสเฟต ไนเตรท ไม่ให้มีค่ามากพอสำหรับการเติบโตของสาหร่าย

5) การป้องกันการแบ่งชั้นของน้ำ (Destratification) โดยการเป่าอากาศลงในน้ำให้น้ำที่เย็นกว่าจากด้านล่างอ่างเก็บน้ำเคลื่อนที่มาที่ผิวน้ำเป็นการลดปริมาณสาหร่ายได้อีกทางหนึ่ง



## 2.6.2 การควบคุมในระบบผลิตน้ำประปา

### 1) ทางกายภาพ

- การเลือกตำแหน่งรับน้ำ (Water intake) โดยเลือกตำแหน่งให้อยู่ต่ำกว่าพื้นผิวน้ำ เนื่องจากสาหร่ายส่วนใหญ่มีกาศัยอยู่ในส่วนบนของน้ำ
- การตักสาหร่าย โดยตักสาหร่ายที่ลอยขึ้นในถังกรองทรายและถังตกตะกอน เนื่องจากสาหร่ายบางชนิดสร้างฟองอากาศ
- การขัดบ่อ
- การบั้งแสงแดด โดยการหาวัสดุครอบถังบำบัด เป็นการช่วยลดปัจจัยในการเจริญเติบโตของสาหร่ายได้ทางหนึ่ง

### 2) ทางเคมี

- การเพิ่มค่าพีเอชเพื่อปรับสภาพน้ำให้ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย ที่เมืองลากอส ประเทศไนจีเรีย ทำการปรับค่าพีเอชของน้ำในถังตกตะกอนจาก 6 เป็น 8 สามารถป้องกันการเจริญเติบโตของสาหร่ายเส้นใย เช่น *Spicgyra* ได้
- การใช้คลอรีน (Prechlorination) ในการฆ่าเชื้อโรค โดยผสมคลอรีนในถังตกตะกอนก่อนนำน้ำผ่านถังกรองทราย ความเข้มข้นของคลอรีนที่สูงขึ้นทำให้สาหร่ายลดจำนวนได้มาก แต่ข้อเสีย คือ เมื่อคลอรีนทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์จากการย่อยสลายของสาหร่าย ทำให้เกิดสารไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethanes) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง จึงได้มีการกำหนดจากองค์การป้องกันสภาวะแวดล้อมของประเทศสหรัฐอเมริกา (Environmental protection agency: US EPA) ให้มีปริมาณสารไตรฮาโลมีเทนในน้ำประปาได้ไม่เกิน 100 ไมโครกรัม/ลิตร
- การเพิ่มสารสร้างตะกอน (Coagulant) และการเติมถ่านกัมมันต์ แต่วิธีนี้ใช้ต้นทุนในการผลิตสูง
- การใช้ไฟฟ้า ระบบประปาที่เมืองปัวตีเยร์ (Poitiers) ประเทศฝรั่งเศส ใช้รางที่มีขั้วทองแดงจุ่มในน้ำก่อนเข้าถังทรายกรองที่ไหลด้วยความเร็ว 30 ซม./วินาที ให้มีสนามไฟฟ้า 36 โวลต์/ซม. กระแสไฟฟ้า 2.6 แอมแปร์ ความต่างศักย์ 115 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ พบว่าลดปริมาณสาหร่ายเส้นใยและระยะเวลาการกรองของถังทรายกรองได้
- การใช้ระบบกรอง เช่น ไมโครสเตรนเนอร์ (Microstrainer) และพรีฟิลเตอร์ (Prefilter) การใช้ไมโครสเตรนเนอร์ที่มีขนาดรู (Apertures) 35 ไมครอน สามารถกรองสาหร่ายที่มีขนาดใหญ่กว่า 35 ไมครอน ออกไปได้ แต่ถ้าต้องการกรองสาหร่ายที่มีขนาดเล็กกว่านี้จะต้องใช้ตะแกรงที่เล็กลง ทำให้ต้องใช้แรงดันน้ำมากซึ่งจะต้องใช้กลไกควบคุมการหมุนของตะแกรงและการฉีดน้ำล้างตะแกรงตลอดเวลา จึงทำให้ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานสูง ส่วนวิธีพรีฟิลเตอร์ใช้ต้นทุนต่ำกว่า แต่การใช้กรวดเป็นสารกรองทำให้อุดตันง่ายและทำความสะอาดยาก

## 2.7 ปัญหาในระบบผลิตน้ำประปาที่เกิดจากสาหร่าย (พิษณุพล สงวนนวล, 2543)

- 1) ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติของน้ำ เช่น ค่าพีเอช ความเป็นด่าง ความกระด้าง และค่าออกซิเจนละลายน้ำ
- 2) รบกวนการทำงานของกระบวนการตกตะกอนทางเคมี มีรายงานว่า *Asterionella* และ *Synedra* เป็นตัวขัดขวางการเกิดฟล็อกที่เหมาะสม และในบางกรณีการเพิ่มปริมาณสารเคมีก็ไม่ช่วยในการกำจัดสาหร่ายเลย
- 3) รบกวนการทำงานของถังตกตะกอน เนื่องจากแรงลอยตัวของสาหร่ายทำให้สาหร่ายมีแนวโน้มที่จะกระจายอยู่ทั่วไปในถังตกตะกอน จึงขัดขวางการตกตะกอนของฟล็อกทำให้ประสิทธิภาพของถังตกตะกอนลดลง
- 4) ทำให้ถังทรายกรองอุดตันเร็ว เนื่องจากสาเหตุหลายประการ เช่น ความสามารถในการเพิ่มปริมาณได้อย่างรวดเร็วของสาหร่าย ลักษณะของเซลล์ที่ประสานในเม็ดทราย เช่น ผนังเซลล์ที่แข็งของไดอะตอม เมือกที่หุ้มรอบเซลล์ของ *Pamella* และแนวโน้มที่จะประสานกันเป็นร่างแหในกรณีของ *Fragilaria* และ *Tribonema*
- 5) ทำให้เกิดการอุดตันของท่อส่งน้ำจากระบบผลิตน้ำประปา เนื่องจากสาหร่ายบางชนิดและแบคทีเรียพวก Iron bacteria สามารถเจริญเติบโตได้ในที่มืด เมื่อมีปริมาณมากก็จับตัวเป็นกลุ่มทำให้เกิดการอุดตัน
- 6) ทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับกลิ่นและรสในน้ำ สาหร่ายทำให้น้ำมีกลิ่นต่างๆ เช่น กลิ่นหญ้า กลิ่นไม้ผุ ซึ่งปัญหาเกี่ยวกับกลิ่นต่างๆ เหล่านี้ทำให้น้ำไม่น่าดื่มและใช้

## 2.8 เสถียรภาพของสาหร่ายในแหล่งน้ำ (พิษณุพล สงวนนวล, 2543)

สาหร่ายซึ่งเป็นพืชน้ำขนาดเล็กแขวนลอยอยู่ในน้ำ อาจถือได้ว่ามีคุณสมบัติเป็นคอลลอยด์ชนิดหนึ่ง เสถียรภาพของสาหร่ายที่เกิดขึ้นทำให้แขวนลอยอยู่ในน้ำและตกตะกอนเองได้ยากในธรรมชาติ เนื่องจากคุณสมบัติเฉพาะตัวของสาหร่าย ได้แก่

### 1) Surface charge

สาหร่ายเป็นเช่นเดียวกับอนุภาคคอลลอยด์โดยทั่วไปที่มีคุณสมบัติของประจุไฟฟ้า (โดยทั่วไปมีประจุลบ) คุณสมบัติทางไฟฟ้านี้ทำให้เกิดแรงผลักระหว่างเซลล์ของสาหร่ายทำให้เกิดการแขวนลอยอยู่ในน้ำ

### 2) Hydrophilic effects

เกิดจากการที่มีโมเลกุลของน้ำล้อมรอบหรือถูกดูดติดอยู่บนเซลล์ของสาหร่าย ซึ่งกลไก Hydrophilic effect นี้ จะมีความสำคัญมากในเรื่องของกระบวนการทำให้ลอย เนื่องจาก

ฟองอากาศต้องการพื้นที่ผิวเป็น Hydrophobic ของอนุภาค (Hydrophobic spots) ฟองอากาศจึงจะสามารถเกาะติดไปกับอนุภาคได้

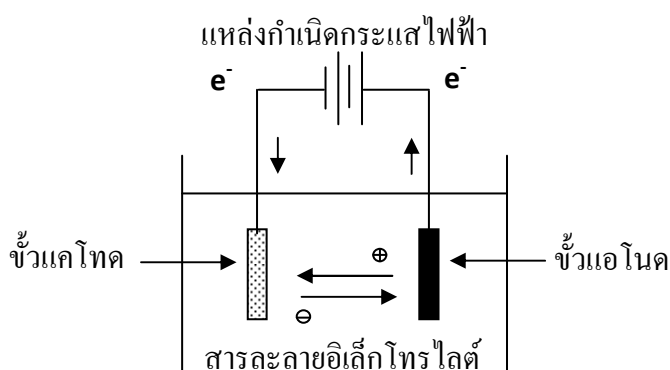
### 3) Steric effect

ในช่วงการเจริญเติบโตของเซลล์สาหร่าย สาหร่ายจะมีการขับสารบางอย่างซึ่งเรียกว่า Extracellular organic matter (EOM) ออกมา โดย EOM นี้จะประกอบด้วยสารจำพวก Polysaccharides Pectins Lipoproteins และ Polyamino acids ซึ่งสารเหล่านี้จะถูกดูดติด (Adsorbed) อยู่บนผิวเซลล์ของสาหร่าย สารเหล่านี้อาจมีคุณสมบัติทำให้เซลล์สาหร่ายมีเสถียรภาพได้ ปฏิบัติที่เกิดขึ้นดังกล่าว เรียกว่า Steric effects

## 2.9 หลักการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี

กระบวนการไฟฟ้าเคมี คือ กระบวนการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยอาศัยพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดภายนอก ส่วนประกอบที่สำคัญของกระบวนการนี้ ได้แก่ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากภายนอก สารละลายอิเล็กโทรไลต์ และขั้วอิเล็กโทรด (รัตน จิระรัตนานนท์, 2541)

แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าภายนอกเป็นส่วนที่ใช้เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าซึ่งควบคุมปริมาณของกระแสไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าที่ผ่านเข้าระบบตามที่กำหนด ส่วนสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทำหน้าที่ส่งผ่านกระแสไฟฟ้า โดยผ่านทางไอออนต่างๆ ที่อยู่ในสารละลาย ซึ่งไอออนเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการเดินทางของกระแสผ่านไปยังขั้วอิเล็กโทรดทั้ง 2 ขั้ว ซึ่งขั้วอิเล็กโทรดที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เรียกว่า แอโนด ส่วนขั้วอิเล็กโทรดที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน เรียกว่า แคโทด ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 องค์ประกอบการเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี (วรรณรัตน์ วัฒนชัย, 2547)

ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด

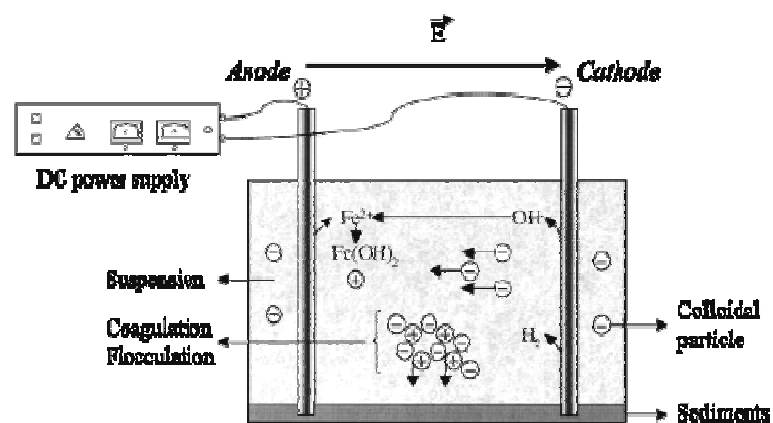


ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด

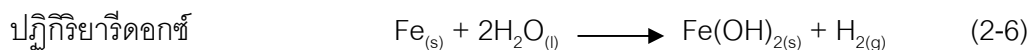
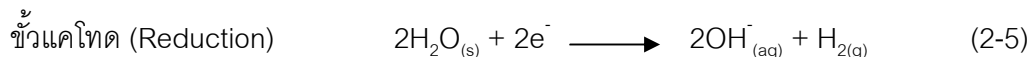
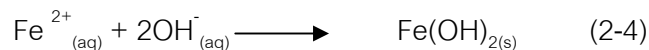
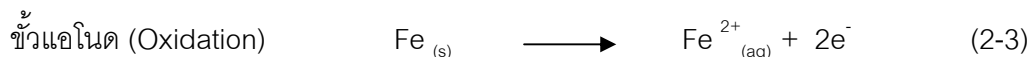


### 2.9.1 หลักการของเซลล์ไฟฟ้าเคมี

หลักการของเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบอิเล็กโทรลิติกเซลล์นั้น ประกอบด้วย แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง โดยจะใช้ขั้วอิเล็กโทรดอย่างน้อย 2 ขั้ว และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ดังรูปที่ 2.8 เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ถึงปฏิกิริยาที่ใช้โลหะเป็นขั้วอิเล็กโทรด จะเกิดปฏิกิริยาที่มีการถ่ายโอนอิเล็กตรอนหรือปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (ปฏิกิริยารีดอกซ์) ของขั้วอิเล็กโทรด เช่น เหล็ก โดยจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วบวก (ขั้วแอโนด) ทำให้โลหะเกิดการสึกกร่อนและละลาย อยู่ในน้ำ ในขณะที่ขั้วลบ (แคโทด) จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำ ซึ่งน้ำจะเกิดการแตกตัว ให้ก๊าซไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) และไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ ) เมื่อเวลาผ่านไปน้ำจะมีสภาพเป็นด่าง เนื่องจากปริมาณไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นในน้ำ และทำให้เกิดการตกตะกอนของเฟอร์รัสไอออน ( $\text{Fe}^{2+}$ ) และเฟอร์ริกไอออน ( $\text{Fe}^{3+}$ ) ในรูปเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ ( $\text{Fe}(\text{OH})_{2(\text{s})}$ ) และเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ( $\text{Fe}(\text{OH})_{3(\text{s})}$ )



รูปที่ 2.8 การเกิดปฏิกิริยาในเซลล์ไฟฟ้าเคมี (Larue และ Vorobiev, 2003)



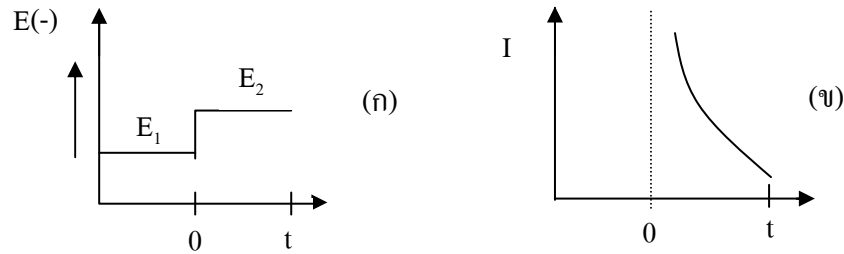
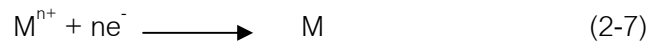
### 2.9.2 การควบคุมการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี (อัษฎลี้ ศรีรังสรรค์, 2551)

สามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ

1) การทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่ (Controlled-potential method หรือ Potentiostatic mode) เป็นการควบคุมค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วแอโนดให้อยู่ที่ค่าคงที่ ซึ่งจะทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าในระบบเปลี่ยนแปลงไปกับเวลา โดยเมื่อปรับค่าความต่างศักย์เพียงพอ ไอออนบวกของโลหะที่อยู่ในสารละลายจะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวของขั้วแคโทด และเมื่อเวลาผ่านไปจะทำให้ความเข้มข้นของไอออนที่บริเวณผิวหน้าของขั้วแคโทดมีค่าต่ำลง ทำให้ค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วแอโนดอ้างอิงมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นปริมาณกระแสไฟฟ้าจึงต้องลดต่ำลง เพื่อควบคุมค่าความต่างศักย์ให้มีค่าคงที่ ผลที่เกิดจากการทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่ ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้ากับเวลา เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์จาก  $E_1$  เป็น  $E_2$  ที่ขั้วแคโทด

$E_1$  คือ ค่าความต่างศักย์ที่เริ่มต้นก่อนการเกิดปฏิกิริยาและ  $E_2$  คือ ค่าความต่างศักย์ที่เป็นอัตราขีดจำกัดการกระจายตัว (Diffusion limited rate) หรือเป็นขีดจำกัดการถ่ายโอนมวลสาร (Mass transfer limited) ซึ่งตัวออกซิไดซ์จะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ ทำให้ความเข้มข้นของไอออนบวกที่ผิวหน้าของขั้วแคโทดลดลงจนเกือบเป็นศูนย์ การลดลงของความเข้มข้นของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จะมีผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าของระบบลดลง ดังรูป (ข) เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้น ( $I = kC$ )

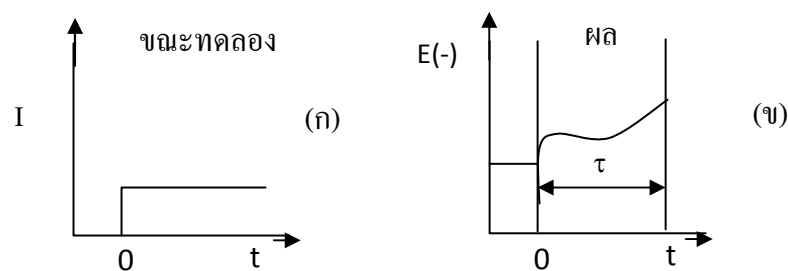
2) การทำงานแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่ (Controlled-current method หรือ Galvanostatic mode) การควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่อาจเรียกว่า โครโนโพเทนชันเมทรี (Chronopotentiometry) หรือเทคนิคโครโนโพเทนชันเมทรีค (Chronopotentiometric technique) โดยเป็นการควบคุมให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วแอโนดให้คงที่ ทำให้ค่าความต่างศักย์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เมื่อควบคุมให้กระแสไฟฟ้าผ่านขั้วแอโนดทั้ง 2 คงที่ ทำให้สารออกซิไดซ์ ( $M^{n+}$ ) เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์กลายเป็นสารรีดิวซ์ ( $M$ ) ด้วยอัตราที่คงที่



รูปที่ 2.9 การทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่ (Friedrich, 1962)

- (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่  
 (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่

ดังนั้น ค่าความต่างศักย์จะแปรตามค่าความเข้มข้นของตัวรีดอกซ์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลง  $M^{n+}/M$  ที่ผิวขั้วอิเล็กโทรดกับเวลา เมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นของ  $M^{n+}$  ที่ผิวหน้าของขั้วอิเล็กโทรดจะลดลง ค่าความต่างศักย์ที่ผิวของขั้วอิเล็กโทรดก็จะลดลงเช่นกันตามสมการของเนินสต์ ในช่วงเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์โดยกระแสไฟฟ้าคงที่ เรียกว่า ช่วงของการเปลี่ยนสถานะ (Transition time:  $\tau$ ) ซึ่งค่านี้สัมพันธ์กับความเข้มข้นและสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การทำงานแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่ (Friedrich, 1962)

- (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่  
 (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่

ค่าความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลงไปกับความเข้มข้นของตัวออกซิไดซ์สามารถแสดงได้ตามสมการของเนิร์นสต์ (Nernst's equation)

$$E = E^\circ + \frac{RT}{nF} \ln \frac{[Ox]}{[red]} \quad (2-8)$$

E	=	ค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วแอโนด ณ สภาวะใดๆ (โวลต์)
E <sup>0</sup>	=	ค่าความต่างศักย์มาตรฐานระหว่างขั้วแคโทดและสารละลาย (โวลต์)
R	=	ค่าคงที่ของก๊าซเท่ากับ 8.314 (จูล/โมล/เคลวิน)
T	=	อุณหภูมิ (เคลวิน)
n	=	จำนวนอิเล็กตรอนที่ใช้ไปในการเกิดปฏิกิริยา (ประจุ/โมล)
F	=	ค่าคงที่ฟาราเดย์เท่ากับ 96,500 (แอมแปร์ วินาที/ประจุ)
[Ox],[red]	=	ความเข้มข้นของตัวออกซิไดซ์และตัวรีดิวซ์ตามลำดับ (โมล/ลิตร)

เพื่อให้ได้อัตราในการกำจัดสูงสุด การรีดักชันของไฮดรอกซิลเป็นการควบคุมแบบถ่ายโอนมวลสาร (Mass transport control) สมการแสดงอัตราในการนำไฮดรอกซิลออกจากสารละลาย เขียนได้ดังนี้

$$-V \frac{dC}{dt} = \frac{-I_L}{nF} = k_m A_e \quad (2-9)$$

V	=	ปริมาตรของสารละลาย (ลบ.ซม.)
C	=	ความเข้มข้นของไฮดรอกซิล (โมล/ลิตร)
t	=	เวลา (วินาที)
I <sub>L</sub>	=	กระแสจำกัด (Limiting current) (แอมแปร์)
k <sub>m</sub>	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสาร (Mass transfer coefficient)
A <sub>e</sub>	=	พื้นที่ผิวของขั้วอิเล็กโทรด (ตร.ม.)

อินทิเกรตสมการที่ 2-9 เทียบกับเวลาจะได้สมการดังนี้

$$\frac{C(t)}{C(0)} = \exp \frac{(-k_m A_c t)}{V} \quad (2-10)$$

$C_{(0)}$  = ความเข้มข้นของไอออนในสารละลายเริ่มต้น (โมล/ลิตร)

$C_{(t)}$  = ความเข้มข้นของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เมื่อเวลาเปลี่ยนไป (โมล/ลิตร)

จากสมการกล่าวได้ว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนขึ้นกับตัวแปรที่สำคัญ คือ

1) การถ่ายโอนมวลสารจากสารละลายสู่ผิวหน้าของขั้วอิเล็กโทรด ขึ้นกับสมบัติของอิเล็กโทรไลต์และขั้วอิเล็กโทรด การกวนจะช่วยเพิ่มการถ่ายโอนมวลสาร

2) พื้นที่ผิวของขั้วอิเล็กโทรด

2.9.3 ศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดเดี่ยวและศักย์ไฟฟ้าอิเล็กโทรดมาตรฐาน (วรรณวรรณ เทียงวรรณกานต์, 2546)

เนื่องจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ คือ ผลรวมทางพีชคณิตของศักย์ไฟฟ้าของแต่ละขั้วอิเล็กโทรด ในทางปฏิบัติไม่มีวิธีวัดศักย์ไฟฟ้าเฉพาะแต่ละขั้วเดี่ยวได้โดยตรง แต่ต้องวัดเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ ดังนั้นจึงต้องกำหนดศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดมาตรฐานขึ้น คือ กำหนดให้อิเล็กโทรดไฮโดรเจนเมื่ออยู่ที่สภาวะมาตรฐาน เมื่อต้องการทราบศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดอื่น เช่น  $Fe^{3+}/Fe^{2+}$  เป็นต้น ต้องนำอิเล็กโทรดเหล่านั้นมาจับคู่กับอิเล็กโทรดไฮโดรเจน ที่มีศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานเท่ากับศูนย์และวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่วัดได้จะเป็นศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดที่ต้องการทราบ แต่ถ้าอิเล็กโทรดนั้นอยู่ในสภาวะมาตรฐานด้วยแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์จะเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้ามาตรฐาน ( $E^0_{cell}$ ) และเป็นค่าเดียวกับศักย์มาตรฐานของอิเล็กโทรดเดี่ยว ( $E^0_{cell}$ ) ที่มาจับคู่กับอิเล็กโทรดไฮโดรเจนมาตรฐาน โดยการทำเช่นนี้กับอิเล็กโทรดอื่นๆ ทำให้ได้ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดต่างๆ

ศักย์ไฟฟ้าแสดงให้เห็นแนวโน้มของขั้วอิเล็กโทรดที่จะรับอิเล็กตรอนว่ามี ความสามารถมากน้อยเพียงใด หรือเรียกว่าเป็นการแสดงความสามารถในการเป็นตัวออกซิไดส์ (หรือตัวรีดิวซ์) เช่น  $MnO_4^-$  กับ  $Fe^{2+}$  ในสารละลายกรดพบว่าค่า  $E^0$  ของระบบ  $Fe^{3+}/Fe^{2+} = +0.77$  โวลต์ และค่า  $E^0$  ของ  $MnO_4^-/Mn^{2+} = +1.52$  โวลต์ แสดงว่าระบบ  $MnO_4^-/Mn^{2+}$  มีแนวโน้มที่จะรับอิเล็กตรอนได้ดีกว่าระบบ  $Fe^{3+}/Fe^{2+}$  จึงเป็นตัวออกซิไดส์ที่ดีกว่า จากสูตรการหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ที่สภาวะมาตรฐาน คือ



$$E^{\circ}_{\text{cell}} = E^{\circ}(\text{ขั้วบวก}) - E^{\circ}(\text{ขั้วลบ}) \quad (2-11)$$

ในการทำงานเดียวกันถ้าวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ที่สภาวะใดๆ จะได้ความสัมพันธ์คล้ายกับสมการที่ (2-12) คือ

$$E_{\text{cell}} = E(\text{ขั้วบวก}) - E(\text{ขั้วลบ}) \quad (2-12)$$

#### 2.9.4 ค่าการนำไฟฟ้า (อภิรดี สุนทรภา, 2549)

ค่าการนำไฟฟ้ามีผลโดยตรงต่อกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียและมีผลต่อปริมาณประจุที่ปล่อยออกมาในปฏิกิริยา ตามกฎของฟาราเดย์ที่ว่า 1 ฟาราเดย์ ของประจุที่ผ่านเข้าวงจร จะสะสมประจุออกมาจากขั้วอิเล็กโทรด 96,487 วัตต์-ชั่วโมง ซึ่งถ้าจำนวนประจุมากขึ้นก็จะทำให้มีประจุสะสมหรือเหล็กหลุดออกมาจากอิเล็กโทรดเพียงพอที่จะทำให้โลหะไฮดรอกไซด์ตกตะกอนได้มากขึ้น จากกฎของโอห์ม ซึ่งกล่าวว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลไปในวงจรได้ จะมีค่าเท่ากับผลคูณระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าและความต้านทานกระแสไฟฟ้า ดังสมการที่ (2-13)

$$V = IR \quad (2-13)$$

V = ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)

I = ค่ากระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

R = ค่าความต้านทาน (โอห์ม)

และมีความสัมพันธ์กับงานทางไฟฟ้า ดังสมการที่ (2-14)

$$\text{งานไฟฟ้าสุทธิ } (W_{\text{elect}}) = \text{คูลอมบ์} \times \text{โวลต์} = nE \times 96,487 \quad (2-14)$$

ดังนั้นความต้านทานกระแสไฟฟ้าในกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี คือ ความต้านทานกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์นั่นเอง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าการนำไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ตามสมการที่ (2-15)

$$R = l / (CA) \quad (2-15)$$

R	=	เป็นความต้านทานกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (โอห์ม)
I	=	เป็นระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (ซม.)
C	=	เป็นค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (ซีเมนส์)
A	=	เป็นพื้นที่หน้าตัดของอิเล็กโทรดที่สัมผัสกับสารละลาย อิเล็กโทรไลต์ (ตร.ซม.)

#### 2.9.5 การแลกเปลี่ยนประจุและการเคลื่อนที่ของประจุ (เอกรัฐ มีวาสนา, 2552)

การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่งทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าซึ่งวัดได้ในหน่วยแอมแปร์ (Ampere) จำนวนกระแสไฟฟ้าที่ผ่านไปต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัดจะถูกวัดในรูปของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current intensity, I) การวัดปริมาณของกระแสซึ่งผ่านเข้าไปในวัสดุ เรียกว่า การนำไฟฟ้าของวัสดุ (Conductivity) ในโลหะส่วนใหญ่จะอยู่ภายใต้กฎของโอห์ม ซึ่งสามารถเขียนเป็นรูปความเข้มของสนามไฟฟ้า ( $E_f$ ) (โวลต์/ซม.) ดังสมการที่ (2-16) และ (2-17) คือ

$$I = \sigma E_f \quad (2-16)$$

$$E_f = \frac{I}{\sigma} = \frac{V}{R\sigma} \quad (2-17)$$

โดย

$\sigma$	=	เป็นค่าการนำไฟฟ้า (โอห์ม/ซม.)
V	=	เป็นความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุด (โวลต์)
R	=	เป็นความต้านทานระหว่างจุดสองจุด (โอห์ม)
I	=	เป็นค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน (แอมแปร์)

#### 2.9.6 กฎฟาราเดย์เกี่ยวกับไฟฟ้าเคมี (อินทิรา หาญพงษ์พันธ์, 2539)

ปริมาณไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ หมายถึง ปริมาณไฟฟ้าที่ต้องผ่านเข้าไปในสารละลายในเซลล์อิเล็กโทรไลติก เพื่อให้อิเล็กตรอน 1 โมล ทำปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดออกซิเดชันและรีดักชัน หรือคือ ผลคูณของประจุไฟฟ้ากับจำนวนอิเล็กตรอน 1 โมล

$$\begin{aligned}
 1 \text{ ฟาราเดย์} &= eN = (1.602 \times 10^{-19} \text{ คูลอมป์})(6.02 \times 10^{23} \text{ โมล}^{-1}) \\
 &= 96,487 \text{ คูลอมป์/โมล} \\
 \text{จะได้ } X \text{ คูลอมป์} &= I (\text{แอมแปร์}) \times t (\text{วินาที})
 \end{aligned}$$

หรือ 1 ฟาราเดย์ คือ ไฟฟ้าฟาราเดย์ทำให้เกิดสารแต่ละชนิดที่ขั้วอิเล็กโทรดจำนวน 1 โมลเท่ากัน เช่น

- ผ่านกระแสไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ลงใน  $\text{Al}^{3+}$  จะได้  $\text{Al}_{(s)}$  1 โมล = น.น.กรัม/โมล/ประจุ  
=  $26.98/3 = 9$  กรัม
- ผ่านกระแสไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ลงใน  $\text{Fe}^{3+}$  จะได้  $\text{Fe}_{(s)}$  1 โมล = น.น.กรัม/โมล/ประจุ  
=  $55.85/2 = 27.9$  กรัม

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและปริมาณของขั้วโลหะที่ละลายลงสู่สารละลายนำไฟฟ้าจะสามารถอธิบายด้วยกฎฟาราเดย์ ดังต่อไปนี้

$$W = \frac{ItM}{ZF} \quad (2-18)$$

- W = เป็นปริมาณโลหะที่ละลายน้ำ (กรัม)
- I = เป็นค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (แอมแปร์)
- M = เป็นน้ำหนักโมเลกุลที่ขั้วแอโนด (กรัม/โมล)
- t = เป็นเวลาที่ใช้ (วินาที)
- Z = เป็นจำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยารีดอกซ์
- F = เป็นค่าคงที่ของฟาราเดย์เท่ากับ 96,487 (คูลอมป์/โมล)

มวลของสารที่คำนวณได้จากกฎฟาราเดย์ คือ มวลของสารที่ควรเกิดปฏิกิริยาตามทฤษฎี หมายความว่า กระแสไฟฟ้าทั้งหมดที่ให้แก่ระบบถูกนำไปใช้ในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของไอออนทั้งหมด ซึ่งในทางปฏิบัติปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ให้กับระบบไม่ได้ถูกใช้ในการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมด เนื่องจากการสูญเสียไปในการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง เช่น การเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำเป็นก๊าซไฮโดรเจนที่ขั้วแคโทด การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำเป็นก๊าซออกซิเจนที่ขั้วแอโนด หรืออาจเกิดจากความต้านทานต่างๆ เนื่องจากมีตัวออกซิไดซ์หลายชนิดละลายอยู่รวมกันในสารละลาย ดังนั้น จึงต้องมีการวัดประสิทธิภาพเชิงกระแส

$$\text{ประสิทธิภาพเชิงกระแส} = \frac{\text{มวลที่ได้จริงจากกระบวนการ}}{\text{มวลที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี}} \quad (2-19)$$

### 2.9.7 การวางขั้วอิเล็กโทรดในเครื่องปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมีของระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

การวางขั้วอิเล็กโทรดในเครื่องปฏิกรณ์มี 2 แบบ ขึ้นอยู่กับความต้องการของวิธีที่ใช้ในการบำบัด ถ้าระบบบำบัดต้องการกำจัดสารแขวนลอยด้วยวิธีทำให้ลอย ควรวางขั้วอิเล็กโทรดในแนวตั้ง เพื่อให้ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีพาสารแขวนลอยดังกล่าวขึ้นมาพร้อมกับตะกอนเบาที่เกิดขึ้นแต่ถ้าระบบต้องการกำจัดสารแขวนลอยด้วยวิธีตกตะกอนควรวางขั้วอิเล็กโทรดในแนวนอนโดยให้ขั้วแอโนดอยู่ด้านล่าง (Mollah et al., 2004)

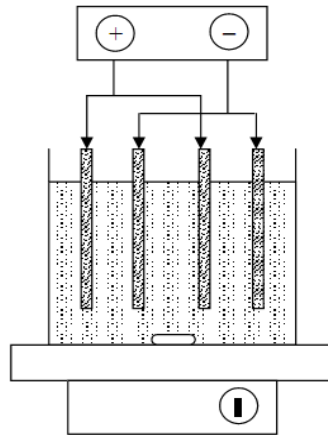
การจัดเรียงขั้วอิเล็กโทรดที่ง่ายที่สุด คือ มีขั้วอิเล็กโทรดเพียง 1 คู่โดยขั้วหนึ่งเป็นแอโนดและอีกขั้วเป็นแคโทด ซึ่งการวางขั้วในรูปแบบนี้ไม่เป็นที่นิยม เนื่องจากการนำไปประยุกต์ใช้นั้นต้องใช้ขนาดใหญ่เพื่อให้มีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยามาก ทำให้ต้องมีการจัดเรียงตัวของแผ่นขั้วอิเล็กโทรดรูปแบบต่างๆ ขึ้น สำหรับกรณีที่ต้องใช้ขั้วอิเล็กโทรดมากกว่า 1 คู่ สามารถเลือกวิธีต่อทางไฟฟ้าได้ 2 แบบ คือ

1. แบบโมโนโพลาร์ (Monopolar electrode) การวางขั้วแบบนี้จะมีจุดเชื่อมของขั้วอิเล็กโทรดแต่ละแผ่นทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นระหว่างขั้วแคโทดและขั้วแอโนด ซึ่งวางสลับกัน โดยที่ผิวหน้าของขั้วอิเล็กโทรดแผ่นเดียวกันจะมีประจุชนิดเดียวกัน ในทางไฟฟ้านั้นขั้วอิเล็กโทรดจะสามารถจัดเรียงเซลล์ได้ 2 แบบ คือ

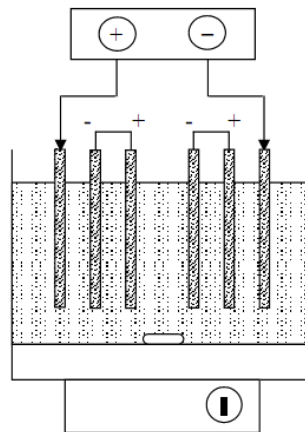
- แบบขนาน (Parallel connections) กระแสไฟฟ้าจะถูกแบ่งให้แต่ละเซลล์โดยขึ้นอยู่กับความต้านทานภายในของเซลล์นั้นๆ ซึ่งค่าความต่างศักย์ของระบบจะมีค่าเท่ากัน ดังรูปที่ 2.11

- แบบอนุกรม (Series connections) มีการจัดเรียงของขั้วอิเล็กโทรดคล้ายเซลล์เดี่ยวหลายๆ เซลล์มาต่อกัน โดยมีจุดเชื่อมของขั้วอิเล็กโทรด ดังรูปที่ 2.12

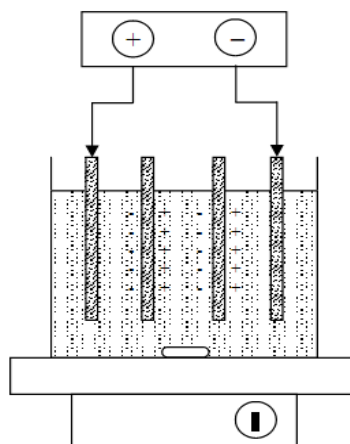
2. ไบโพลาร์ (Bipolar electrode) เป็นการต่อขั้วแบบที่มีจุดเชื่อมของขั้วอิเล็กโทรดเพียง 2 จุดเท่านั้นซึ่งจะอยู่บริเวณอยู่ปลายนอกสุด ดังรูปที่ 2.13 โดยแต่ละแผ่นของขั้วอิเล็กโทรดจะมีด้านหนึ่งเป็นขั้วลบซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนดและอีกด้านเป็นขั้วบวกซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด โดยกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านต้องการความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูง เนื่องจากมีความต้านทานที่สูงกว่าของเซลล์ที่ต่อแบบอนุกรม แต่อย่างไรก็ตามระบบจะมีกระแสไฟฟ้าเท่ากัน นั่นคือจะมีกระแสไฟฟ้าเดียวกันไหลผ่านขั้วอิเล็กโทรดทั้งหมด ซึ่งการจัดเรียงขั้วแบบนี้ทำให้ง่ายต่อการติดตั้งและบำรุงรักษาในขณะใช้งาน



รูปที่ 2.11 การจัดเรียงขั้วอิเล็กโทรดไมโนโพลาร์แบบขนาน (Chen, 2004)



รูปที่ 2.12 การจัดเรียงขั้วอิเล็กโทรดไมโนโพลาร์แบบอนุกรม (Chen, 2004)



รูปที่ 2.13 การจัดเรียงขั้วอิเล็กโทรดไบโพลาร์ (Chen, 2004)

### 2.9.8 ขั้วอิเล็กโทรด (ณัฐพล กสิวัฒน์, 2552)

ขั้วอิเล็กโทรดเป็นส่วนประกอบของแต่ละครึ่งเซลล์ไฟฟ้า ทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าต่อเชื่อมระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์และอุปกรณ์วัดสัญญาณไฟฟ้า โดยวัสดุที่ใช้ในการทำขั้วอิเล็กโทรดมีหลายชนิด เช่น

1) อะลูมิเนียม (Aluminium) มีลักษณะสีขาวเหมือนเงิน น้ำหนักเบา นำความร้อนได้ดี ไม่สึกกร่อนง่าย ทำปฏิกิริยากับกรดและด่างบางชนิดเท่านั้น และแข็งมาก ไม่ค่อยมีรอยแตกร้าว โดยอะลูมิเนียมจัดว่าว่องไวสามารถทำปฏิกิริยากับโลหะอื่นๆ ได้ มีเลขออกซิเดชันเท่ากับ +3 มักจะเป็นสารประกอบโควาเลนต์ การใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วอิเล็กโทรดในอิเล็กโทรลิติกเซลล์ เมื่ออิเล็กโทรไลต์ขึ้นทำให้อะลูมิเนียมเกิดการกัดกร่อนและจะละลายในสารละลายซึ่งไฮดรอกไซด์ของอะลูมิเนียมจะไม่ละลายน้ำ ดังนั้นในสารละลายอาจจะมีคอลลอยด์อยู่มาก

2) เหล็กกล้า (Steel) เป็นโลหะหนัก มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาปานกลาง สารประกอบของเหล็กมีเลขออกซิเดชัน +2 และ +3 เลขออกซิเดชันสูงๆ พบได้บ้างแต่ไม่เสถียรและเป็นตัวออกซิไดส์อย่างแรง ถ้าทิ้งไว้ในอากาศที่มีความชื้นมักจะกลายเป็นสนิมที่ผิวที่เรียกว่า สนิมเหล็ก เหล็กทำปฏิกิริยารวมกับโลหะทั้งหลายได้เกือบทั้งหมดเมื่อทำให้ร้อนเล็กน้อย แต่ไม่ทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนเมื่ออยู่ในสารละลาย เหล็กมักอยู่ในรูปของเฟอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ ) และเฟอร์ริกไอออน ( $Fe^{3+}$ ) ปนกัน เหล็กที่มีเลขออกซิเดชัน +2 นั้นเสถียรมากและสามารถเกิดเกลือต่างๆ กับไอออนลบที่เสถียรได้ สารประกอบที่ปราศจากน้ำของเฟอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ ) ไม่มีสี แต่ถ้ามีน้ำหรืออยู่ในสารละลายจะมีสีเขียวอ่อนของไอออน ( $Fe(H_2O)_6^{2+}$ ) สารละลายเฟอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ ) นี้ถูกออกซิไดส์ด้วยอากาศกลายเป็นเฟอร์ริกไอออน ( $Fe^{3+}$ ) ได้ เฟอร์ริกไอออน ( $Fe^{3+}$ ) อยู่ในสารละลายของน้ำเป็นไฮเดรชัน (Hydrated ion) เนื่องจากเฟอร์ริกไอออน ( $Fe^{3+}$ ) มีขนาดไอออนเล็กและมีประจุมากจึงแสดงสมบัติเป็นกรด ทั้งเฟอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ ) และเฟอร์ริกไอออน ( $Fe^{3+}$ ) ทำปฏิกิริยากับสารที่ทำให้เกิดทรอนและเกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้

การใช้เหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรดในอิเล็กโทรลิติกเซลล์ เมื่อเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสขึ้นที่ผิวของแผ่นขั้วแอโนด จะเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมาพร้อมเหล็กในรูปเฟอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ ) ที่ขั้วแคโทดจะมีการให้ไฮดรอกไซด์ไอออนที่ทำให้ค่าพีเอชของน้ำสูงขึ้นได้ ทำให้เหล็กที่มาจากแผ่นขั้วอิเล็กโทรดแอโนดสามารถตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ เช่น เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ ( $Fe(OH)_2$ ) ปริมาณการตกตะกอนของเหล็กจึงขึ้นกับปริมาณไฮดรอกไซด์ที่ได้จากขั้วแคโทดและค่าพีเอชของน้ำเสีย ดังนั้นต้องมีการเปลี่ยนแผ่นเหล็กในอิเล็กโทรไลต์เซลล์เมื่อใช้ไประยะหนึ่ง โดยมากแผ่นเหล็กจะหาซื้อได้ง่ายและราคาถูก ยิ่งไปกว่านั้นยังมีประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายไอออนโลหะหนักได้ดี จึงเป็นที่นิยมใช้กันมาก

3) เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) เป็นเหล็กกล้าที่นำมาผสมกับธาตุ โดยธาตุผสมที่สำคัญ คือ โครเมียม ซึ่งจะมีตั้งแต่ร้อยละ 11 ขึ้นไป โครเมียมที่อยู่ในเนื้อเหล็กกล้าจะก่อให้เกิดฟิล์มโครเมียมออกไซด์ ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) ซึ่งมีเสถียรภาพสูงอยู่ที่ผิวของเหล็กกล้า ฟิล์มนี้มีความเงางามและป้องกันไม่ให้เกิดออกซิเดชันกับเหล็กซึ่งอยู่ภายในเหล็กกล้าไร้สนิม ให้คุณสมบัติทนทานต่อการกัดกร่อนและผิวมีความเงาแวววาว

4) ไทเทเนียม (Titanium) มีลักษณะขาวเทาคล้ายเงิน จุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูง แข็ง และเหนียว สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้ไฮดรอกไซด์และไฮโดรเจน ไทเทเนียมมีเลขออกซิเดชัน +2 +3 และจะเสถียรที่ +4 ไทเทเนียมขาวถูกนำมาใช้เป็นขั้วอิเล็กโทรดในอิเล็กโทรลิติกเซลล์ และไม่ทำให้โลหะตัวอื่นกัดกร่อนในระหว่างเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิส ยิ่งไปกว่านั้นที่ขั้วลพบพบว่าจะมีโลหะหนักเกิดขึ้นมาก สารละลายใสไม่มีตะกอน อีกทั้งยังเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี เพราะจุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูงในสภาวะปกติ ดังนั้นจึงเป็นที่ยอมรับ แต่ข้อเสียคือ ไทเทเนียมมีราคาสูงและหาซื้อได้ยาก

5) แพลตินัม (Platinum) เป็นธาตุที่มีสีขาวและอ่อน มีเลขออกซิเดชันได้หลายค่า ตั้งแต่ +2 ถึง +8 แต่ที่สำคัญ คือ +2 ถึง +4 มีความแข็งแรงของพันธะโลหะและไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยา นอกจากนี้สารประกอบของแพลตินัมมักไม่ค่อยเสถียร โดยเมื่อให้ความร้อนสูงขึ้นจะสลายตัวเป็นโลหะ แพลตินัมหายากและมีราคาแพง สามารถนำความร้อนและไฟฟ้าได้ดีมาก มีความเฉื่อยต่อปฏิกิริยาจึงมีประโยชน์ในการทำอิเล็กโทรด เบ้าทนไฟ และภาชนะสำหรับงานที่อุณหภูมิสูงและต้องการความต้านทานการกัดกร่อนสูง

6) แกรไฟต์ (Graphite) เป็นอีกรูปหนึ่งของธาตุคาร์บอนซึ่งเกิดตามธรรมชาติ มีชื่อสามัญเรียกว่า พลัมเบโก (Plumbago) หรือแร่ดินสอดำ มีลักษณะเป็นของแข็ง มีรูปผลึกเป็นแผ่นบางๆ ทึบแสง และเป็นเงามันเหมือนโลหะเล็กน้อย สีเทาเข้มถึงดำ เนื้ออ่อน เป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าได้มากในทิศทางที่ขนานกับระนาบของอะตอม แต่ในทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบของอะตอมจะนำไฟฟ้าได้น้อย อะตอมของแกรไฟต์ยึดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ มีระยะห่างระหว่างอะตอมคาร์บอนในระนาบเดียวกัน เท่ากับ 1.415 อังสตรอม ซึ่งสั้นพอที่จะทำให้เชื่อว่าอะตอมคาร์บอนน่าจะยึดกับอะตอมข้างเคียงด้วยพันธะแกรไฟต์มักใช้ทำไส้ดินสอดำ เบ้าหลอมโลหะ น้ำมันหล่อลื่นบางชนิด ไส้ถ่านไฟฉาย ไส้ไฟอาร์ก ใช้เป็นตัวลดความเร็ว ช่วยควบคุมจำนวนอนุภาคนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

## 2.9.9 ปัจจัยที่ต้องควบคุมในเซลล์ไฟฟ้าเคมี (ปริเมธ เจริญนพคุณ, 2545)

ทิศทางของไอออนและกระแสไฟฟ้าที่ไหลสู่ระบบนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าการควบคุม ดังนี้

- 1) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้า โดยกระแสไฟฟ้าจะมีสัดส่วนโดยตรงกับกระแสไฟฟ้าภายนอกที่ให้แก่ระบบ
- 2) การเคลื่อนที่ของประจุไอออน ความสามารถของไอออนที่จะนำกระแสไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับประจุบนไอออนและขนาดไอออน
- 3) อุณหภูมิ ในการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิของสารละลาย โดยที่ความสามารถในการเคลื่อนที่จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 2 ต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียส
- 4) พื้นที่สัมผัสของขั้วกระแสไฟฟ้า ขั้วอิเล็กโทรดที่มีขนาดของผิวสัมผัสใหญ่ จะดีสำหรับการถ่ายเทและรับอิเล็กตรอน โดยที่กระแสไฟฟ้าจะมีสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวสัมผัสของขั้วอิเล็กโทรด
- 5) ระยะห่างของขั้วอิเล็กโทรด จำนวนกระแสไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับระยะทางที่ไอออนเคลื่อนที่จากขั้วอิเล็กโทรด โดยที่ระยะห่างน้อยกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มมากขึ้น
- 6) จำนวนประจุของไอออนจะมีมากขึ้น เมื่อมีการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้ามากขึ้น
- 7) ความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้าได้ ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายจะมีสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารนั้น

2.9.10 หลักการในการออกแบบเครื่องรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี (คังกรม คงเงาะ, 2548)

เครื่องรวมตะกอนด้วยไฟฟ้ามีหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับลักษณะที่จะประยุกต์ใช้งาน โดยมีหลักการที่สำคัญในการออกแบบ คือ

- 1) ควรออกแบบให้ง่ายที่สุด ค่าใช้จ่ายต่ำสุด ถ้าเป็นไปได้ควรมีการหลีกเลี่ยงการออกแบบของงานที่มีการกวนหรือการไหลของสารละลาย
- 2) ต้องสามารถเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่สมบูรณ์ ก่อนที่จะผ่านเข้าสู่ขั้นตอนอื่นๆ ในกรณีที่มีกระบวนการอื่นนอกจากกระบวนการไฟฟ้าเคมีเข้ามาเกี่ยวข้อง ควรทำการแยกจากกระบวนการไฟฟ้าเคมี
- 3) เมื่อจำเป็นต้องมีการกวนผสมหรือการไหลของสารละลาย ต้องพิจารณาการถ่ายเทมวลสารเป็นอันดับแรก เช่น การกวนผสมอาจต้องใช้แผ่นกั้นหรือใบพัดที่ไม่นำไฟฟ้า
- 4) ออกแบบให้มีการกระจายความต่างศักย์ให้สม่ำเสมอทั่วพื้นที่ผิวของอิเล็กโทรด



5) ควรออกแบบให้มีระยะระหว่างอิเล็กโทรดน้อยที่สุด เพราะระยะห่างยิ่งมากจะทำให้ต้องใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้น

6) การเลือกวัสดุที่ใช้ทำถังปฏิกริยานั้น ต้องคำนึงถึงสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่จะผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมีและสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยสามารถคงทนไม่สึกกร่อนภายใต้สภาพการใช้งาน

7) การเลือกวัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรดนั้น ต้องคำนึงถึงปฏิกริยาเคมีที่จะเกิดขึ้นให้สอดคล้องกับความต้องการของระบบบำบัดและปฏิกริยาข้างเคียงที่อาจเกิดขึ้นได้

#### 2.9.11 ข้อดีและข้อเสียของการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี (Yousef และ Robert, 2000)

##### 2.9.11.1 ข้อดีของการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี

- 1) การรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีเป็นระบบที่ใช้งานง่าย
- 2) สามารถบำบัด สี กลิ่น รส สารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ได้
- 3) ตะกอนที่ได้มีลักษณะคล้ายตะกอนจากระบบเคมี แต่มีขนาดใหญ่กว่าและกรองง่ายกว่าตะกอนจากระบบเคมี ตกตะกอนและรีดน้ำออกง่ายเพราะส่วนใหญ่เป็นออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์ของโลหะและอัตราการเกิดตะกอนต่ำ
- 4) น้ำที่ผ่านการบำบัดจากกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีจะให้ค่าของแข็งละลายน้ำ (TDS) น้อยกว่าจากระบบเคมี
- 5) สามารถกำจัดอนุภาคคอลลอยด์ขนาดเล็กได้ เพราะการใส่กระแสไฟฟ้าเข้าไปทำให้อนุภาคเกิดการเคลื่อนที่เร็วขึ้น จึงง่ายต่อการตกตะกอน
- 6) ไม่มีการเติมสารเคมีใดๆ ลงไป จึงไม่มีปัญหามลพิษที่ตามมาจากการใส่สารเคมี
- 7) ก๊าซที่เกิดขึ้นจากการทำงานของระบบสามารถดันตัวและยกมลสารให้ลอยขึ้นเหนือน้ำ ทำให้ง่ายต่อการกำจัดออก
- 8) เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่ต้องการการบำรุงรักษาน้อย

##### 2.9.11.2 ข้อเสียของการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี

- 1) ชั่วอิเล็กโทรดสามารถสึกกร่อนได้ อันเกิดจากปฏิกริยาออกซิเดชันและละลายลงไปในน้ำได้ทำให้ต้องมีการเปลี่ยนชั่วอิเล็กโทรดมาทดแทน
- 2) ไม่เหมาะสมสำหรับพื้นที่ที่มีค่าไฟฟ้าราคาสูง
- 3) สารบางชนิดอาจมาเกาะที่อิเล็กโทรดได้ ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานลดลง
- 4) ต้องการค่าการนำไฟฟ้าในน้ำ ระบบจึงสามารถทำงานได้ดี

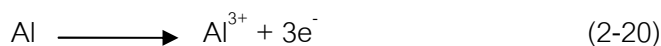
## 2.10 การประยุกต์ใช้หลักการไฟฟ้าเคมีในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนจากน้ำ

กระบวนการไฟฟ้าเคมีได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ไม่จำเป็นต้องเติมสารเคมี หลักการของกระบวนการเคมีไฟฟ้า คือ การถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างสารละลายกับผิวของขั้วอิเล็กโทรดแล้วเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยอาศัยแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากภายนอก

### 2.10.1 กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation; EC)

การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าเป็นเทคนิคที่ใช้กันอยู่แพร่หลาย เนื่องจากเป็นกระบวนการที่สะดวกและมีประสิทธิภาพสูงในการลดสารมลพิษในน้ำเสีย ซึ่งกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีองค์ประกอบของไขมัน น้ำมัน สีขุ่น สารแขวนลอย สารอินทรีย์และโลหะหนัก เป็นต้น โดยอาศัยหลักการเดียวกับการตกตะกอนด้วยสารเคมี คือ การทำงานให้อนุภาคของคอลลอยด์หรือสารมลพิษในน้ำเสียที่มีอนุภาคเล็กๆ มารวมตัวกันเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจนหนักพอที่จะสามารถตกตะกอนตกลงมาโดยอาศัยสารสร้างตะกอน ซึ่งสารสร้างตะกอนสำหรับกระบวนการตกตะกอนด้วยสารเคมีนิยมใช้อะลูมิเนียมซัลเฟตหรือสารส้ม ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ) หรือเฟอริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) แต่สำหรับกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า จะใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดที่กัดกร่อนได้ (Sacrificial electrode) เช่น เหล็กหรืออะลูมิเนียมในการสร้างสารสร้างตะกอน โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดภายนอกไปยังขั้วอิเล็กโทรด โดยโลหะที่เป็นขั้วแอโนดจะมีการสูญเสียอิเล็กตรอนกลายเป็นโลหะไอออนละลายอยู่ในน้ำเสีย ดังปฏิกิริยาที่ (2-20) และ (2-21) ซึ่งโลหะไอออนเหล่านี้จะรวมตัวกับไฮดรอกไซด์ไอออนเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เรียกว่า Polynuclear metal hydroxyl complexes ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารสร้างตะกอน

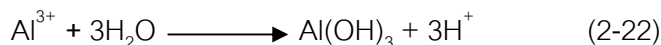
กรณีของอะลูมิเนียม เมื่อใช้เป็นขั้วแอโนดจะแตกตัวให้  $\text{Al}^{3+}$  ลงในสารละลาย ดังปฏิกิริยาที่ (2-20) ซึ่ง  $\text{Al}^{3+}$  จะรวมตัวกับ  $\text{OH}^-$  หรือ  $\text{H}_2\text{O}$  ขึ้นอยู่กับความเป็นกรด-เบสของระบบ และตกตะกอนออกมาในรูปของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) ดังปฏิกิริยาที่ (2-21) และ (2-22) (Kobyas และคณะ, 2003)



ภาวะสารละลายเป็นเบส



ภาวะสารละลายเป็นกรด

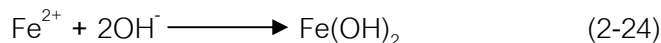


นอกจากนี้  $\text{Al}^{3+}$  ในสารละลายสามารถรวมตัวกับ Polyhydroxides กลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เรียกว่า Poly-nuclear hydroxyl aluminum (III) complexes ซึ่งอาจเป็น Monomeric หรือ Polymeric อย่างไรก็ตามสารประกอบเชิงซ้อนของ  $\text{Al}^{3+}$  จะตกตะกอนในรูปของ Monomeric ได้แก่  $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$   $\text{Al}(\text{OH})_2^+$   $\text{Al}(\text{OH})_4^-$  เป็นต้น ส่วนตัวอย่างของ Polymeric ได้แก่  $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$   $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$   $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4+}$   $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+}$  และ  $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}^{7+}$  (Mollah และคณะ, 2004)

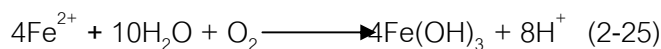
สำหรับกรณีของเหล็กเมื่อใช้เป็นขั้วแอโนดจะแตกตัวให้  $\text{Fe}^{2+}$  ลงในสารละลาย (2-23) และตกตะกอนออกมาในรูปของ  $\text{Fe}(\text{OH})_n$  เมื่อ n เท่ากับ 2 หรือ 3 ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความเป็นกรด-เบสของสารละลาย ปฏิกิริยาที่เกิดแสดงสมการที่ (2-24) และ (2-25) (Laure และคณะ, 2003)



ภาวะสารละลายเป็นเบส



ภาวะสารละลายเป็นกรด

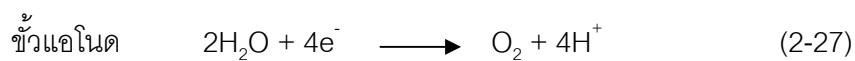
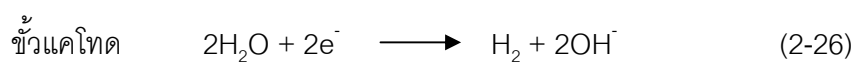


$\text{Fe}^{3+}$  ในสารละลายสามารถรวมตัวกับ Polyhydroxides กลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เรียกว่า Poly-nuclear hydroxyl iron (III) complexes ซึ่งอาจเป็น Monomeric และ Ferric hydroxo complexes ขึ้นอยู่กับความเป็นกรด-เบส แต่สุดท้ายสารประกอบเชิงซ้อนของ  $\text{Fe}^{3+}$  จะตกตะกอนในรูปของ  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  สำหรับตัวอย่างของ Monomeric และ Ferric hydroxo complexes ได้แก่  $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$   $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$   $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$   $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5\text{OH}^{2+}$   $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_4(\text{OH})_2^+$  เป็นต้น (Murugunathan และคณะ, 2004)

### 2.10.2 กระบวนการทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า (Electroflotation; EF) (Chen, 2004)

กระบวนการทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า คือ กระบวนการที่ทำให้สารปนเปื้อนในน้ำลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำโดยฟองก๊าซขนาดเล็กของไฮโดรเจนและออกซิเจน ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิส ประสิทธิภาพในการกำจัดสารปนเปื้อนจะขึ้นกับขนาดของฟองก๊าซ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย และชนิดของขั้วอิเล็กโทรด

ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทดและขั้วแอโนดสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจน ดังปฏิกิริยาที่ (2-26) และ (2-27) ตามลำดับ



## 2.11 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.11.1 การกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี (Coagulation) และกระบวนการตกตะกอน (Sedimentation) (Henderson และคณะ, 2010)

จากการรวบรวมงานวิจัยในการกำจัดสาหร่ายชนิดต่างๆ โดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีร่วมกับกระบวนการตกตะกอน โดยใช้สารสร้างตะกอน การกวนเร็ว การกวนช้า และระยะเวลาในการตกตะกอนที่แตกต่างกัน สามารถรวบรวมจากผู้วิจัยหลายท่านและสรุปได้ ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีและกระบวนการตกตะกอน

Algae	Source water	Algae concentration	pH	Coagulant dose (mg/l)	Rapid mix (rpm; s)	Flocculation (rpm; min)	Settling time (min)	Cell removal (%)	Reference
<i>Microcystis aeruginosa</i>	Reservoir water	5.0 x 10 <sup>5</sup> to 1.5 x 10 <sup>6</sup> cells/ml	7.2	10.3 mg/l as Al (Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> )	230; 60	25; 14	15	75	Drikas et al. (2001)
<i>Microcystis aeruginosa</i>	Reservoir water	1 x 10 <sup>4</sup> cells/ml ; 3-3.5 NTU	8	10 mg/l as Fe; 1.0 mg/l as superfloc C-573	G = 10 <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ; 30	G = 30 s <sup>-1</sup> ; ≥ 30	60	98.9	Vlaski et al. (1996)
<i>Microcystis aeruginosa</i>	Growth media	5.8 x 10 <sup>4</sup> cells/ml ; 6.1 NTU	7.5	5 mg/l as Fe (Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> )	300; 60	35; 20	60	62	Jiang and Graham (1998)
<i>Microcystis aeruginosa</i>	Growth media	5.8 x 10 <sup>4</sup> cells/ml ; 6.1 NTU	7.5	5 mg/l as Fe (PFS)	300; 60	35; 20	60	81.6	

ตารางที่ 2.5 (ต่อ) ประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีและกระบวนการตกตะกอน

Algae	Source water	Algae concentration	pH	Coagulant dose (mg/l)	Rapid mix (rpm; s)	Flocculation (rpm; min)	Settling time (min)	Cell removal (%)	Reference
<i>Anabaena flosaquae</i>	Growth media	$2 \times 10^5$ cells/ml	7.5	11.2 mg/l as Fe ( $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ )	300; 120	35; 25	120	74	Jiang et al. (1993)
<i>Anabaena flosaquae</i>	Growth media	$2 \times 10^5$ cells/ml	7.5	5.4 mg/l as Al ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ )	300; 120	35; 25	120	78	
<i>Anabaena flosaquae</i>	Growth media	$2 \times 10^5$ cells/ml	7.5	11.2 mg/l as Fe (PFS)	300; 120	35; 25	120	94	
<i>Anabaena flosaquae</i>	Growth media	$2 \times 10^5$ cells/ml	7.5	5.4 mg/l as Al (PAC)	300; 120	35; 25	120	68	
<i>Asterionella formosa</i>	Growth media	$2 \times 10^5$ cells/ml	7.5	11.2 mg/l as Fe ( $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ )	300; 120	35; 25	120	63	
<i>Asterionella formosa</i>	Growth media	$2 \times 10^5$ cells/ml	7.5	5.4 mg/l as Al ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ )	300; 120	35; 25	120	79	
<i>Asterionella formosa</i>	Growth media	$2 \times 10^5$ cells/ml	7.5	5.4 mg/l as Al (PAC)	300; 120	35; 25	120	68	

ตารางที่ 2.5 (ต่อ) ประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีและกระบวนการตกตะกอน

Algae	Source water	Algae concentration	pH	Coagulant dose (mg/l)	Rapid mix (rpm; s)	Flocculation (rpm; min)	Settling time (min)	Cell removal (%)	Reference
<i>Synedra acus/Melosira</i>	Reservoir water	1500 cells/ml	6.8	1.62 mg/l as Al (Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> )	135; 60	45; 10	30	88	Jun et al. (2001)
<i>Synedra acus</i>	Reservoir water	1040 cells/ml	7	2.16 mg/l as Al (PAC)	135; 60	45; 10	30	76	
<i>Synedra acus</i>	Reservoir water	760 cells/ml	7	2.16 mg/l as Al (PAHCS)	135; 60	45; 10	30	54	
<i>Synedra acus</i>	Reservoir water	1040 cells/ml	5.3	14 mg/l as Fe (FeCl <sub>3</sub> )	135; 60	45; 10	30	74	
<i>Synedra acus</i>	Reservoir water	1048 cells/ml	6.8	2.16 mg/l as Al (Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ) ; 0.25 mg/l cationic polymer C-599A	135; 60	45; 10	30	99	

ตารางที่ 2.5 (ต่อ) ประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีและกระบวนการตกตะกอน

Algae	Source water	Algae concentration	pH	Coagulant dose (mg/l)	Rapid mix (rpm; s)	Flocculation (rpm; min)	Settling time (min)	Cell removal (%)	Reference
<i>Chlorella</i> sp.	Deionised water; 0.05 M NaNO <sub>3</sub>	6.8 x 10 <sup>5</sup> cells/ml	7	8 mg/l as Al (PAC)	100; 120	25; 20	30	85	Liu et al. (1999)
<i>Synedra acus</i>	Reservoir water	1048 cells/ml	6.8	2.16 mg/l as Al (Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ) ; 0.25 mg/l cationic polymer C-599A	135; 60	45; 10	30	99	Jun et al. (2001)
<i>Spirulina</i> , <i>Oscillatoria</i> and <i>Chlorella</i>	Nutrient media and tap water; 14 mg/l as CaCO <sub>3</sub>	55 NTU	7	5.0 mg/l as Chitosan	100; 5	60; 30	30	90	Divakaran and Pillal (2002)



2.11.2 การกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี (Coagulation) และกระบวนการทำให้ลอย (Flotation)

จากการรวบรวมงานวิจัยในการกำจัดสาหร่ายชนิดต่างๆ โดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีร่วมกับกระบวนการทำให้ลอย โดยใช้สารสร้างตะกอน การกวนเร็ว การกวนช้าและปัจจัยในการทำให้ลอยที่แตกต่างกัน สามารถรวบรวมจากผู้วิจัยหลายท่านและสรุปได้ ดังตารางที่ 2.6 (Henderson และคณะ, 2010)

ตารางที่ 2.6 ประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีและกระบวนการทำให้ลอย

Algae	Source water	Algae concentration	pH	Coagulant dose (mg/l)	Rapid mix (rpm; s)	Flocculation (rpm; min)	Flotation/R <sub>f</sub> /bubble concentration (min; %; ppm)	Cell removal (%)	Reference
<i>Chlorella vulgaris</i>	Reservoir water	1-1.3 x 10 <sup>5</sup> cells/ml	5.5	0.5 mg/l as Al (PAC)	400; 120	30; 5	10; 8; 4600	97-99	Edzwald and Wingler (1990)
<i>Chlorella vulgaris</i>	Reservoir water	1-1.3 x 10 <sup>5</sup> cells/ml	6.5	1.6 mg/l as Al (Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> )	400; 120	30; 5	10; 8; 4600	96.8	
<i>Cyclotella</i> sp.	Reservoir water	4.7-5.3 x 10 <sup>4</sup> cells/ml	5.5	0.5-1 mg/l as Al (PAC)	400; 120	30; 5	10; 8; 4600	97-99	
<i>Cyclotella</i> sp.	Reservoir water	4.7-5.3 x 10 <sup>4</sup> cells/ml	6.5	1.2 mg/l as Al (Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> )	400; 120	30; 5	10; 8; 4600	99.8	

ตารางที่ 2.6 (ต่อ) ประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีและกระบวนการทำให้ลอย

Algae	Source water	Algae concentration	pH	Coagulant dose (mg/l)	Rapid mix (rpm; s)	Flocculation (rpm; min)	Flotation/R <sub>f</sub> /bubble concentration (min; %; ppm)	Cell removal (%)	Reference
<i>Microcystis aeruginosa</i>	Reservoir water	1 x 10 <sup>4</sup> cells/ml; 3-3.5 NTU	8	5 mg/l as Fe; 0.5 mg/l Superfloc C-573	G = 10 <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ; 30	G = 10 s <sup>-1</sup> ; 8	5; 7; Pressure = 600 kP	94.5	Vlaski et al. (1996)
<i>Melosira cyclotella</i> <i>/Stephanodiscus</i>	Reservoir water	1.5 x 10 <sup>5</sup> cells/ml	7.74	1.30 mg/l as Al (PAC)	Static mix	3; > 7.2	9.5; 6 ;Pressure = 6 Bar	80	Kempeneers et al. (2001)
<i>Synedra</i>	Reservoir water	1.2 x 10 <sup>6</sup> cells/ml	7.74	1.30 mg/l as Al (PAC)	Static mix	3; > 7.2	9.5; 6 ;Pressure = 6 Bar	76	
<i>Asterionella</i>	Reservoir water	4.0 x 10 <sup>4</sup> cells/ml	7.74	1.30 mg/l as Al (PAC)	Static mix	3; > 7.2	9.5; 6 ;Pressure = 6 Bar	58	
<i>Chlamydomonas</i>	Reservoir water	3.4 x 10 <sup>4</sup> cells/ml	7.74	1.30 mg/l as Al (PAC)	Static mix	3; > 7.2	9.5; 6 ;Pressure = 6 Bar	66	
<i>Scenedesmus</i>	Reservoir water	4.2 x 10 <sup>4</sup> cells/ml	7.74	1.30 mg/l as Al (PAC)	Static mix	3; > 7.2	9.5; 6 ;Pressure = 6 Bar	46	

2.11.3 การกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี (Coagulation) และกระบวนการกรอง (Filtration)

จากการรวบรวมงานวิจัยในการกำจัดสาหร่ายชนิดต่างๆ โดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีร่วมกับกระบวนการกรอง โดยใช้สารสร้างตะกอน การกวนเร็ว การกวนช้า และปัจจัยในการกรองที่แตกต่างกัน สามารถรวบรวมจากผู้วิจัยหลายท่านและสรุปได้ ดังตารางที่ 2.7 (Henderson และคณะ, 2010)

ตารางที่ 2.7 ประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีและกระบวนการกรอง

Algae	Source water	Algae concentration	Coagulant dose (mg/l)	Rapid mix (rpm; s)	Flocculation (rpm; min)	Media	Loading rate (m/h)	Cell removal (%)	Reference
<i>Synchococcus</i>	Reservoir water	$1.2 \times 10^6$ cells/ml	Prechlorination 1.25-1.68 mg/l as Al ( $Al_2(SO_4)_3$ )	Flash mixing	-	0.4 m no. 2 anthracite; 0.45 m 16/30 sand	5; run time 42 hours	95	Johnson et al. (1977)
<i>Stephanodiscus hantzacii</i>	Natural water	$2.0 \times 10^3$ cells/ml	1 mg/l as Fe ( $FeCl_3$ )	$G = 10^3$ s <sup>-1</sup> ; 30	$G = 10$ s <sup>-1</sup> ; 7	200 mm; anthracite/sand	10	97	Petrusevski et al. (1993)
Algae (< 3µm)	Natural water	$3.0 \times 10^3$ cells/ml	1 mg/l as Fe ( $FeCl_3$ )	$G = 10^3$ s <sup>-1</sup> ; 30	$G = 10$ s <sup>-1</sup> ; 7	200 mm; anthracite/sand	10	48	

ตารางที่ 2.7 (ต่อ) ประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีและกระบวนการกรอง

Algae	Source water	Algae concentration	pH	Coagulant dose (mg/l)	Rapid mix (rpm; s)	Flocculation (rpm; min)	Flotation/R <sub>f</sub> /bubble concentration (min; %; ppm)	Cell removal (%)	Reference
<i>Rhodomonas minuta</i>	Natural water	500 cells/ml	1 mg/l as Fe (FeCl <sub>3</sub> )	G = 10 <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ; 30	G = 10 s <sup>-1</sup> ; 7	200 mm; anthracite/sand	10	5	Petrusevski et al. (1993)
<i>Algae (species not specified)</i>	-	Various algal concentration	100 mg/l as PAC; 0.5 mg/l as 423 K (50% ionic groups)	Static mix	-	200 mm anthracite/sand 0.35m activated carbon; 0.7 m sand; 0.1 m gravel	10	95	Klute and Neis (1983)

Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> = Aluminium sulphate      PAHCS = Polyaluminium hydrogen chloride silicate  
 Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> = Ferrous sulphate      FeCl<sub>3</sub> = Ferric chloride  
 PFS = Polyferric sulphate      PAC = Polyaluminium chloride

#### 2.11.4 การกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation)

Poleman และคณะ (1997) ศึกษาการกำจัดสาหร่ายจากน้ำล้างแผ่นกรองไมโครสเตรนเนอร์ (Micro strainer) จากโรงผลิตน้ำดื่ม Kluisen โดยใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า น้ำล้างมีความเข้มข้นของสาหร่าย 1-50 มก. น้ำหนักแห้ง/ลิตร ในการทดลองใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วแอโนดมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.2 ซม. สูง 50 ซม. และใช้ตะกั่วเป็นขั้วแคโทดมีขนาด 50 x 10 x 0.1 ซม. จากการทดลอง เมื่อใช้ขั้วแอโนด 3 แท่ง และขั้วแคโทด 6 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 26.5 ซม. และใช้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ 1 แอมแปร์ พบว่าเป็นรูปแบบที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายจากน้ำเหมาะสมที่สุด หากพิจารณาในด้านของราคาการก่อสร้างและค่าพลังงานที่ต้องการใช้ระหว่างการเดินระบบ ในระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 75 นาที ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายถึงร้อยละ 96.3 ต้องการค่าพลังงานไฟฟ้า 0.33 กิโลวัตต์ชั่วโมง ต่อลูกบาศก์เมตร ในการสร้างระบบกำจัดสาหร่ายที่มีอัตราการกำจัดน้ำสาหร่าย 15 ลบ.ม./ชั่วโมง จะมีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างประมาณ 25,000 ดอลลาร์สหรัฐ

Azarian และคณะ (2007) ศึกษาการกำจัดสาหร่ายจากน้ำจากบ่อปรับเสถียรของโรงงาน Bu-ali โดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ในการทดลองใช้ถังปฏิกิริยาแบบไหลต่อเนื่องขนาดรวม 24 ลิตร ใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วอิเล็กโทรดขนาด 14 x 24 ตร.ซม. จำนวน 5 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 2 ซม. จากการทดลองพบว่าค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำและระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ในการทดลองใช้ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ 550 วัตต์ ในระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 15 นาที พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายและปริมาณของแข็งแขวนลอยเป็นร้อยละ 100 และ 99.5 ตามลำดับ สำหรับในกรณีที่ใช้ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ 100 วัตต์ จะต้องใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเป็น 30 นาที เพื่อที่จะได้ประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายและปริมาณของแข็งแขวนลอยเท่ากัน

Gheraout และคณะ (2008) ศึกษาการกำจัด *Escherichia coli* และสาหร่ายจากแหล่งน้ำดิบโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ในการทดลองทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของขั้วอิเล็กโทรดแต่ละชนิด ได้แก่ อะลูมิเนียม เหล็ก และเหล็กกล้าไร้สนิม มีพื้นที่ทำปฏิกิริยา 49.5 ตร.ซม. ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 5 ซม. จากการทดลองพบว่าขั้วอิเล็กโทรดที่ทำจากอะลูมิเนียมมีคุณสมบัติเหมาะสมที่สุดในการนำมาใช้งาน ฟล็อกของอะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นยังมีน้ำหนักเบากว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็ก และจากการศึกษาการกำจัดสาหร่ายจากแหล่งน้ำดิบ Keddara ซึ่งเป็นแหล่งน้ำดิบที่มีปริมาณสาหร่ายอยู่หนาแน่นพบว่าที่ค่ากระแสไฟฟ้า 0.25

แอมแปร์ จะต้องใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 35 นาที เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย ร้อยละ 100

Alfafara และคณะ (2002) ศึกษาการกำจัดสาหร่ายจากน้ำทะเลสาบ Senba ในช่วงฤดูร้อนที่เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน มีช่วงความเข้มข้นของสาหร่ายที่ 300–1500 มก./ลบ.ม. โดยใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดลองมี 3 ชนิด ได้แก่ อะลูมิเนียม ไทเทเนียม และแกรไฟต์ แผ่นอะลูมิเนียมและไทเทเนียมมีขนาด 8.2 x 18.6 ตร.ซม. แท่งแกรไฟต์มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.4 ซม. สูง 14.8 ซม. ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1.5 ซม. จากการทดลองโดยใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วแอโนดและใช้ไทเทเนียมเป็นขั้วแคโทดพบว่าที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 140 วัตต์/ลิตร ในระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 10 นาที สามารถกำจัดสาหร่ายได้ร้อยละ 85.7 และในการทดลองเปรียบเทียบชนิดของขั้วแอโนด 2 ชนิด ได้แก่ อะลูมิเนียมและแกรไฟต์ พบว่าการใช้ขั้วแอโนดที่ทำจากแกรไฟต์จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับขั้วแอโนดที่ทำจากอะลูมิเนียม โดยให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายสูงสุดเพียงร้อยละ 50

## บทที่ 3

### แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย

#### 3.1 แผนการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale) เพื่อศึกษาการนำน้ำรีไซเคิล (Recycled water) ซึ่งเป็นน้ำทิ้งจากโรงผลิตน้ำประปา กลับมาใช้เป็นแหล่งน้ำดิบทดแทนแหล่งน้ำดิบจากธรรมชาติ โดยทำการทดลองแบบทีละเท (Batch) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้อง เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าที่มีการจัดเรียงขั้วอิเล็กโทรดแบบโมโนโพลาร์หลายเซลล์แบบขนาน ทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการจุลชีววิทยาและห้องปฏิบัติการน้ำเสีย อาคารภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ และศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งมีขั้นตอนในการทดลอง ดังนี้

1. วิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของน้ำสาหร่ายสังเคราะห์และน้ำรีไซเคิลจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขน โดยพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นสาหร่าย ความเข้มข้นคลอโรฟิลล์ เอ พีเอช อุณหภูมิ และความนำไฟฟ้า

2. วิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายและศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการกำจัดสาหร่ายจากน้ำโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำ ได้แก่

2.1 วัสดุของขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดลองมี 3 ชนิด คือ อะลูมิเนียม ทองแดง และแกรไฟต์ โดยแบ่งการจัดเรียงขั้วอิเล็กโทรดออกเป็น 2 แบบ คือ

- แบบที่ 1 ใช้ขั้วแอโนดผลิตจากอะลูมิเนียมและขั้วแคโทดผลิตจากแกรไฟต์
- แบบที่ 2 ใช้ขั้วแอโนดผลิตจากทองแดงและขั้วแคโทดผลิตจากแกรไฟต์

2.2 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 3 ค่า คือ 20 30 และ 40 แอมแปร์/ตร.ม.

2.3 ระยะเวลาในการเดินระบบ 13 ค่า คือ 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 และ 60 นาที

2.4 อัตราการกวนผสม 4 ค่า คือ 0 200 400 และ 600 รอบ/นาที

2.5 พีเอชเริ่มต้น 3 ค่า คือ 6 7 และ 8

2.6 ความเข้มข้นสาหร่าย 3 ค่า คือ  $10^7$   $10^8$  และ  $10^9$  เซลล์/ลิตร

2.7 ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) 4 ค่า คือ 0 0.5 1 และ 2 มิลลิโมลาร์

2.8 สัดส่วนระหว่างพื้นที่ทำปฏิกิริยาของขั้วอิเล็กโทรดและปริมาตรน้ำในถังปฏิกิริยา (A/V) 4 ค่า คือ 2.86 4.00 5.00 และ 6.67 เมตร<sup>-1</sup>

โดยมีขั้นตอนการทดลอง ดังนี้

การทดลองที่ 1 ศึกษาผลของวัสดุของขั้วอิเล็กโทรดที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์

การทดลองที่ 2 ศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์

การทดลองที่ 3 ศึกษาผลของอัตราการกวนผสมที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์

การทดลองที่ 4 ศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้นที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์

การทดลองที่ 5 ศึกษาผลของความเข้มข้นสาหร่ายที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์

การทดลองที่ 6 ศึกษาผลของการเติมโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์

การทดลองที่ 7 ศึกษาผลของสัดส่วนระหว่างพื้นที่ทำปฏิกิริยาของขั้วอิเล็กโทรดและปริมาตรน้ำในถังปฏิกิริยา (AV) ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์

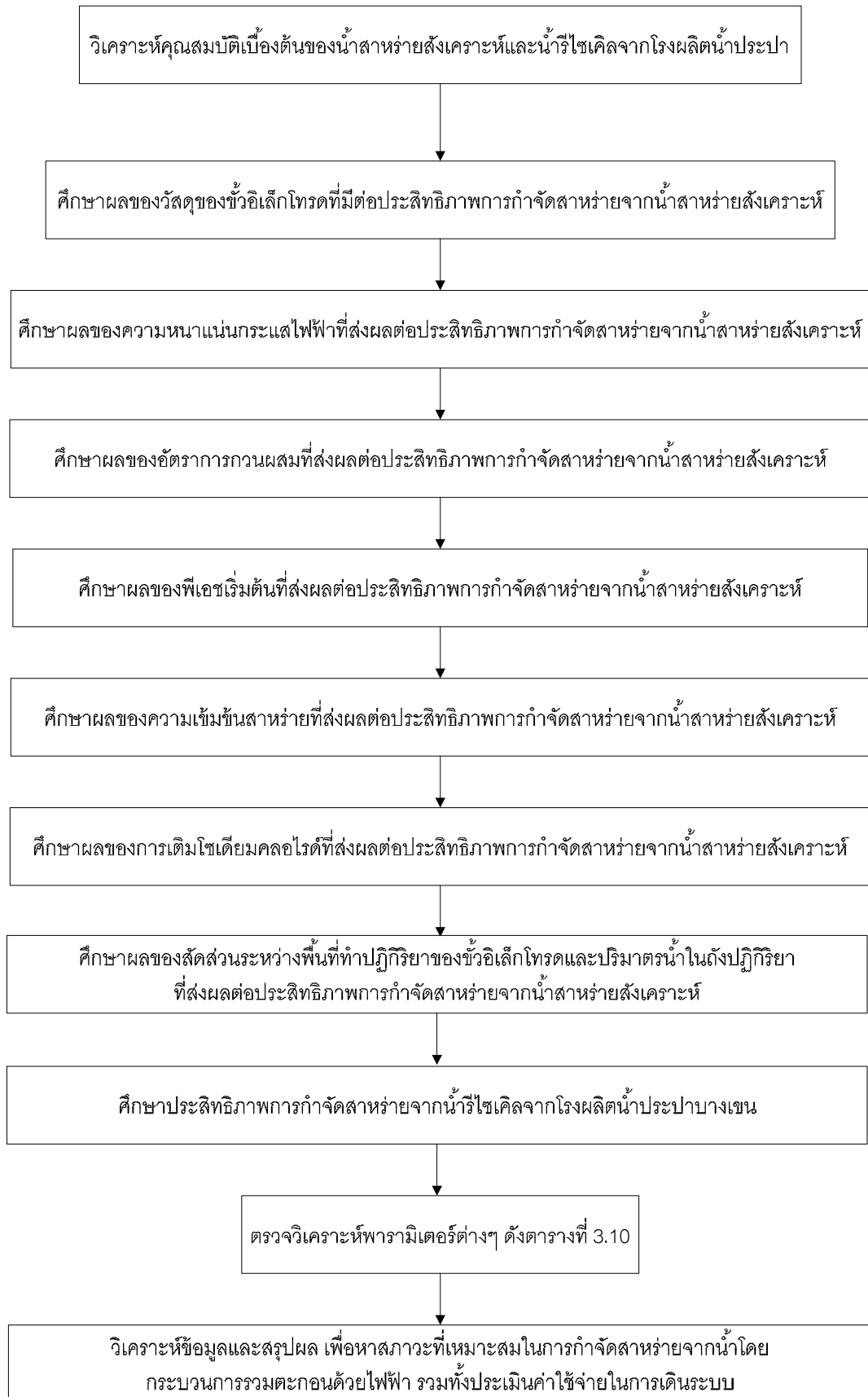
การทดลองที่ 8 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำรีไซเคิลจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขน

3) ตรวจวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ความเข้มข้นคลอโรฟิลล์ เอ พีเอช อุณหภูมิ ความนำไฟฟ้า ความต่างศักย์ไฟฟ้า น้ำหนักขั้วอิเล็กโทรด ของแข็งแขวนลอย อะลูมิเนียมและทองแดงในน้ำ ลักษณะโครงสร้างและปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของผลึก (SEM-EDS) เฟส และความเป็นผลึก (XRD) และไตรฮาโลมีเทน

4) วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผล เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสาหร่ายจากน้ำ โดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า รวมทั้งประเมินค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ

โดยแผนผังขั้นตอนการดำเนินการวิจัยแสดงไว้ดังรูปที่ 3.1





รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

## 3.2 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

### 3.2.1 น้ำที่ใช้ในการทดลอง

#### 3.2.1.1 น้ำสำหรับยีสต์

น้ำที่ใช้ในการทดลองยีสต์จากสาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* จากศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 3.2.1.2 น้ำรีไซเคิล

น้ำรีไซเคิลจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขนที่มีสาหร่ายปนเปื้อน

### 3.2.2 อาหารเลี้ยงสาหร่าย

อาหารเลี้ยงสาหร่าย N-8 (ภาคผนวก ข)

### 3.2.3 อุปกรณ์และสารเคมี

#### อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและส่วนของอุปกรณ์ในการวิเคราะห์ผล

#### 1) ระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

- ถังปฏิกรณ์ (Reactor) ขนาด 37.5 ลิตร
- ขั้วอิเล็กโทรด (Electrode) ผลิตจากอะลูมิเนียม ทองแดง และแกรไฟต์
- เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC power supply) ยี่ห้อ GW รุ่น GPR-6060D

#### 2) อุปกรณ์ในการวิเคราะห์ผล

- เครื่องวัดพีเอช (pH meter) ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น SevenEasy
- เครื่องวัดความนำไฟฟ้า (Conductivity meter) ยี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น Orion 4 stars
- เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง (Analytical balance) ยี่ห้อ Satorius รุ่น BP210S
- เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น ED224S
- กล้องจุลทรรศน์ (Microscope) ยี่ห้อ Olympus รุ่น BX40CY
- เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer) ยี่ห้อ Weipro รุ่น MT-10

- สไลด์นับเซลล์สำหรับ (Haemocytometer counting chamber) ยี่ห้อ HBG
- เครื่องวัดปริมาณธาตุ (Inductively coupled plasma atomic emission spectrometer; ICP) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น 4300 DV
- เครื่องสเปกโตรฟลูออโรมิเตอร์ (Spectrofluorometer) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น LS55
- กระดาษกรอง (Filter paper) ยี่ห้อ Whatman รุ่น GF/F 0.7  $\mu\text{m}$
- เครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic stirrer) ยี่ห้อ AS ONE รุ่น REXIM RS-60
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning electron microscope with EDS attachment; SEM-EDS) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6400
- เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-Ray diffractometer; XRD) ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance
- เครื่องดูดสูญญากาศ (Suction pump) ยี่ห้อ GAST รุ่น G21DX
- เครื่องแก้ว (Laboratory glassware)
- เครื่องมือวิเคราะห์ที่เกิดจากการแยกสารผสมที่ระเหยเป็นก๊าซ (Gas Chromatography; GC)

#### สารเคมี

- 1) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) (AR grade, QRèC)
- 2) กรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) (AR grade, Malinckrodt Chemicals)
- 3) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) (AR grade, Carlo Erba)
- 4) อะซีโตน (Acetone) (AR grade, Carlo Erba)
- 5) น้ำรีเวิร์สออสโมซิส (Reverse osmosis water)

#### 3.2.3.1 ระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

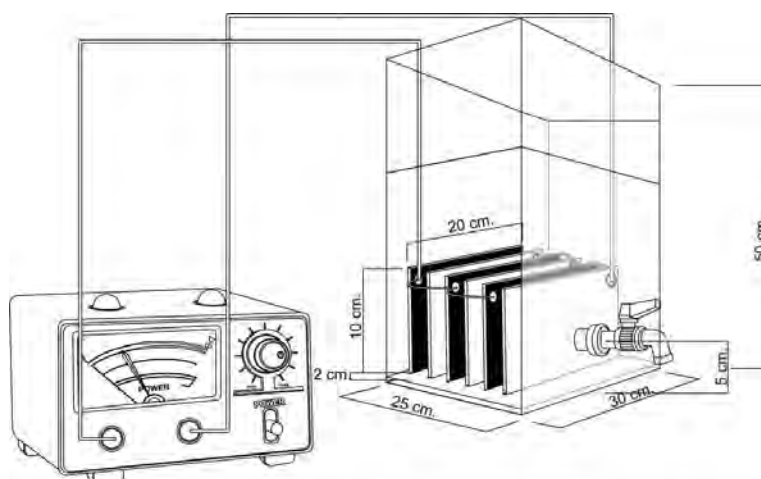
ในการศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ใช้ถังปฏิกริยามผลิตจากแก้ว ขนาด 37.5 ลิตร (25 x 30 x 50 ซม.) โดยมีปริมาตรการใช้งานจริงอยู่ในช่วง 15 – 35 ลิตร ด้านหน้าของถังปฏิกริยามมีวาล์วสำหรับเก็บน้ำตัวอย่างสูงจากก้นถัง 5 ซม. และการติดตั้งระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ดังรูปที่ 3.2

### 3.2.3.2 ขั้วอิเล็กโทรด

วัสดุของขั้วอิเล็กโทรดในการทดลองผลิตจากอะลูมิเนียม ทองแดง และแกรไฟต์ โดยมีการจัดเรียงขั้วอิเล็กโทรดแบบโมโนโพลาร์หลายเซลล์แบบขนาน ซึ่งใช้ขั้วแอโนดและขั้วแคโทดชนิดละ 3 แผ่น มีพื้นที่ทำปฏิกิริยารวม 1,000 ตร.ซม. ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1.5 ซม. ดังรูปที่ 3.3 และสามารถแบ่งการจัดเรียงขั้วอิเล็กโทรดออกเป็น 2 แบบ ดังนี้

1) ขั้วแอโนดผลิตจากอะลูมิเนียมและขั้วแคโทดผลิตจากแกรไฟต์ (ขั้วอะลูมิเนียม—ขั้วแกรไฟต์) ขนาด  $20 \times 10 \times 0.1$  ซม. และ  $20 \times 10 \times 0.5$  ซม. ตามลำดับ ดังรูปที่ 3.4

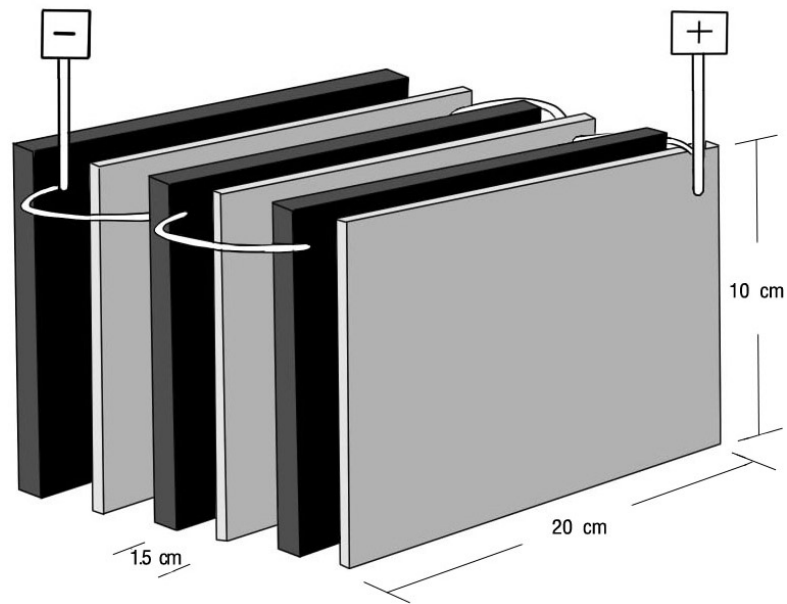
2) ขั้วแอโนดผลิตจากทองแดงและขั้วแคโทดผลิตจากแกรไฟต์ (ขั้วทองแดง—ขั้วแกรไฟต์) ขนาด  $20 \times 10 \times 0.1$  ซม. และ  $20 \times 10 \times 0.5$  ซม. ตามลำดับ ดังรูปที่ 3.5



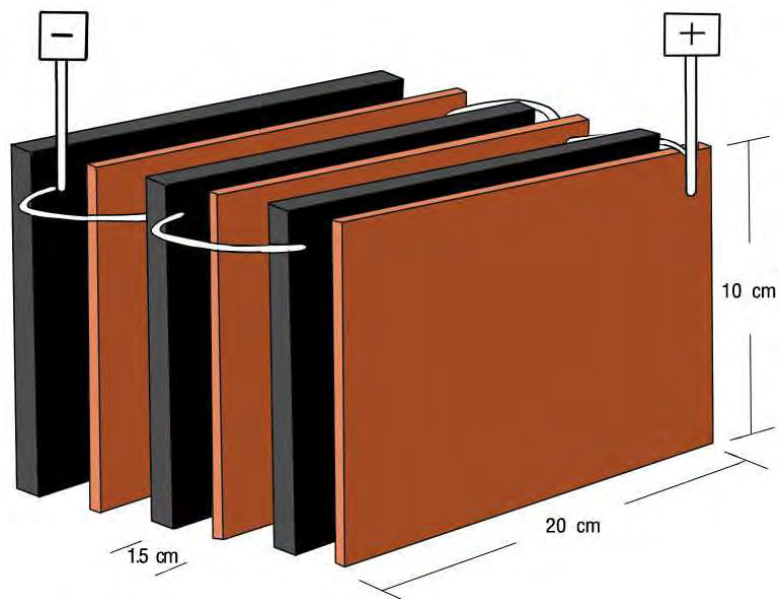
รูปที่ 3.2 ระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า



รูปที่ 3.3 การจัดเรียงขั้วอิเล็กโทรดแบบโมโนโพลาร์หลายเซลล์แบบขนาน



รูปที่ 3.4 ขั้วอะลูมิเนียม—ขั้วแกรไฟต์



รูปที่ 3.5 ขั้วทองแดง—ขั้วแกรไฟต์

### 3.3 การดำเนินการทดลอง

#### 3.3.1 การเตรียมน้ำสาหร่ายสังเคราะห์

1) จากรายงานของ Mohan และคณะ (2009) พบว่าการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* ที่ระยะเวลา 6-20 วัน เป็นช่วงเวลาที่สาหร่ายมีอัตราการเจริญเติบโตอย่าง

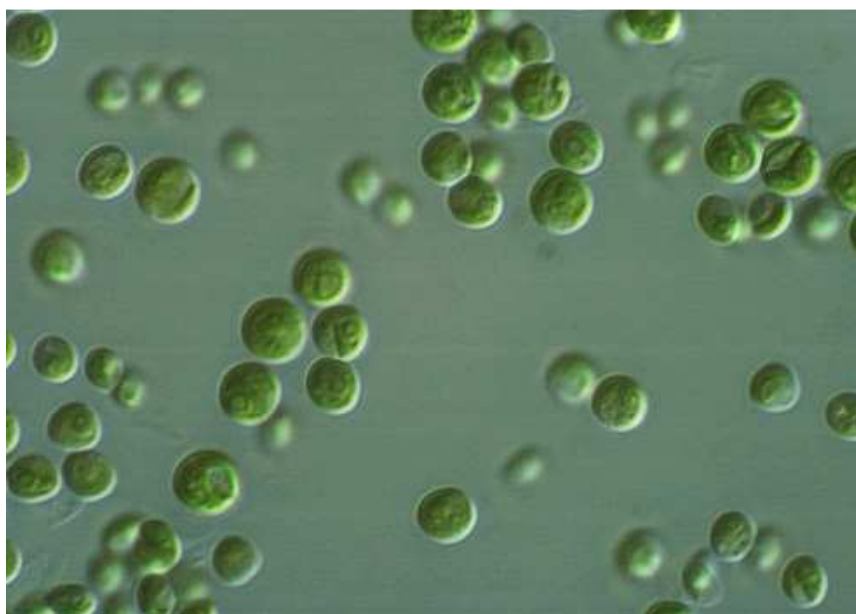
รวดเร็ว (Logarithmic phase) ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สาหร่ายในช่วงเวลาดังกล่าวมาใช้ในการทดลอง

2) นำน้ำสาหร่ายเข้มข้นจากการเพาะเลี้ยงในช่วงเวลา 6-20 วัน มาวิเคราะห์หาความเข้มข้นสาหร่ายโดยใช้สไลด์นับเซลล์สาหร่าย (Haemocytometer counting chamber) โดยวิธีการนับเซลล์สาหร่ายและการคำนวณความเข้มข้นสาหร่ายอธิบายไว้ในภาคผนวก ค

3) นำน้ำประปาซึ่งผ่านการเติมอากาศ (Aeration) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดคลอรีนตกค้างในน้ำ (Buttner, 1993) ผสมกับน้ำรีเวิร์สออสโมซิส เพื่อปรับให้มีความนำไฟฟ้าประมาณ 250 ไมโครซีเมนส์/ซม. และพักน้ำไว้สำหรับใช้เจือจางน้ำสาหร่ายเข้มข้น

4) คำนวณอัตราการเจือจางระหว่างน้ำสาหร่ายเข้มข้นและน้ำประปาที่เตรียมไว้ โดยในงานวิจัยนี้กำหนดให้น้ำสาหร่ายสังเคราะห์มีความเข้มข้นสาหร่าย  $10^8$  เซลล์/ลิตร ยกเว้นในการทดลองที่ 5 ที่ศึกษาผลของความเข้มข้นสาหร่ายที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย จะใช้น้ำสาหร่ายที่มีความเข้มข้นสาหร่ายในช่วง  $10^7$ - $10^9$  เซลล์/ลิตร

5) นำน้ำสาหร่ายเข้มข้นและน้ำประปาที่เตรียมไว้ตามปริมาตรที่คำนวณได้จากข้อ 4 มาผสมให้เข้ากันกลายเป็นน้ำสาหร่ายสังเคราะห์ คุณสมบัติของน้ำสาหร่ายสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง ดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.6 ลักษณะเซลล์ของ *Chlorella vulgaris*

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของน้ำสาหร่ายสังเคราะห์และน้ำรีไซเคิล

พารามิเตอร์	คุณสมบัติของน้ำสาหร่าย	
	น้ำสาหร่ายสังเคราะห์	น้ำรีไซเคิล (7 มีนาคม 2554)
ความเข้มข้นสาหร่าย (cells/L)	$10^7$ - $10^9$	-
ความเข้มข้นสาหร่ายในรูปคลอโรฟิลล์ เอ (mg/L)	481-14,411	17,854
พีเอช	6-8	7.55
อุณหภูมิ (°C)	27.9-30.3	28.4
ความนำไฟฟ้า ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	243.2-269.7	285.6

### 3.3.2 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

งานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 8 การทดลอง ดังนี้

3.3.2.1 การทดลองที่ 1 ศึกษาผลของวัสดุของขั้วอิเล็กโทรดที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์

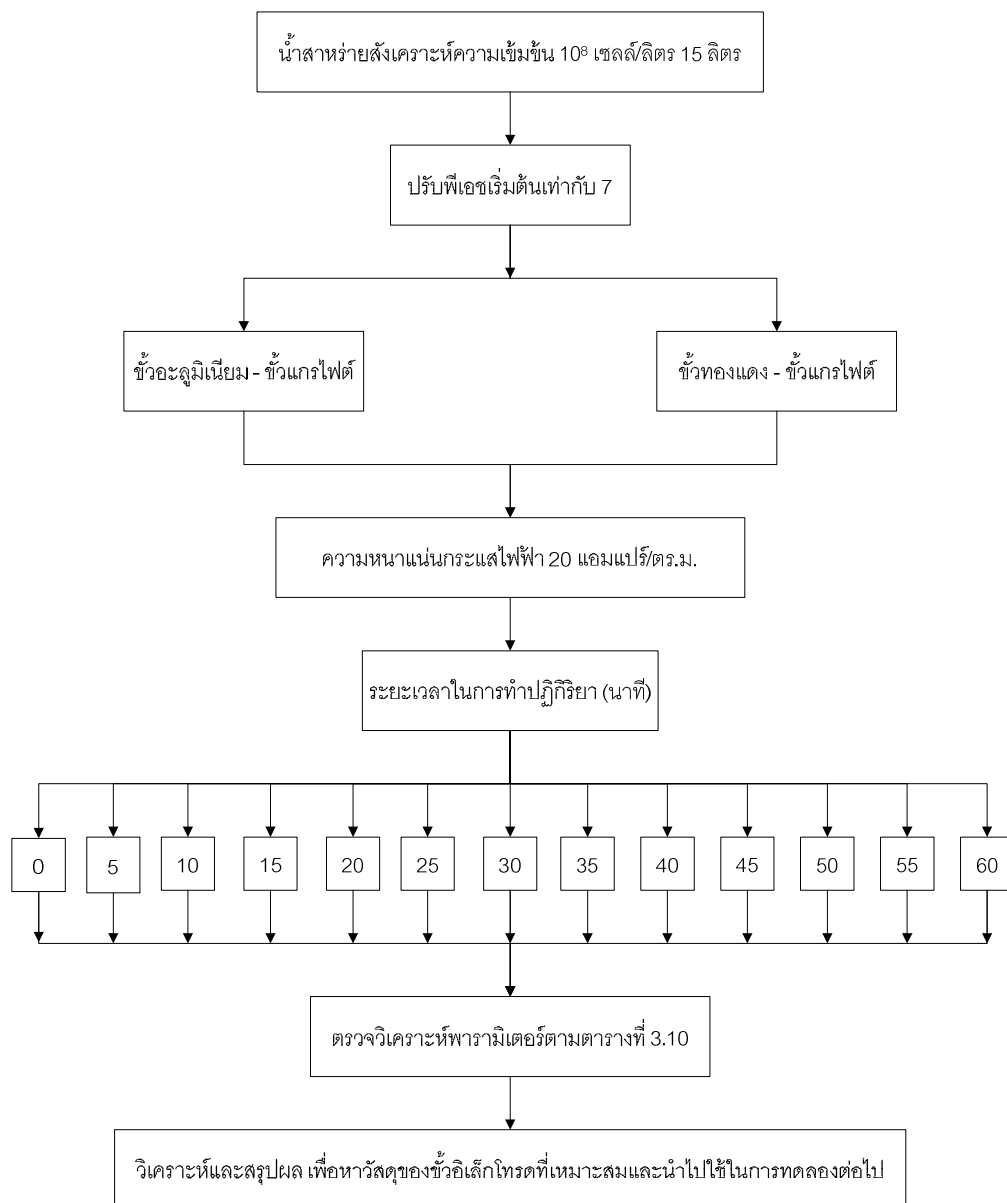
ศึกษาผลของวัสดุของขั้วอิเล็กโทรดที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายระหว่างการจัดเรียงขั้วอิเล็กโทรด 2 แบบ ใช้น้ำสาหร่ายสังเคราะห์ความเข้มข้น  $10^8$  เซลล์/ลิตร ที่มีพีเอชเริ่มต้น 7 ในการเดินระบบ ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์/ตร.ม. โดยปรับเปลี่ยนการจัดเรียงขั้วอิเล็กโทรดระหว่างขั้วอะลูมิเนียม—ขั้วแกรไฟต์ และขั้วทองแดง—ขั้วแกรไฟต์

โดยแผนผังการทดลองแสดงไว้ ดังรูปที่ 3.7 และตัวแปรที่ทำการศึกษาดังตารางที่ 3.2

#### วิธีการทดลอง

- 1) ปรับพีเอชน้ำสาหร่ายสังเคราะห์ความเข้มข้น  $10^8$  เซลล์/ลิตร เท่ากับ 7
- 2) จัดเรียงขั้วอิเล็กโทรดแบบโมโนโพลาร์หลายเซลล์แบบขนาน โดยใช้ขั้วอะลูมิเนียม—ขั้วแกรไฟต์ ต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง และติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์
- 3) นำน้ำสาหร่ายสังเคราะห์ 15 ลิตร ใส่ลงในถังปฏิกิริยา
- 4) เปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง โดยปรับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 20 แอมแปร์/ตร.ม. บันทึกความต่างศักย์ไฟฟ้าและอุณหภูมิเริ่มต้น และบันทึกทุกครั้งที่เก็บน้ำตัวอย่าง
- 5) เก็บน้ำตัวอย่างจากวาล์วที่อยู่สูงจากก้นถังปฏิกิริยา 5 ซม. ทุก 5 นาที โดยเริ่มเก็บน้ำตัวอย่างตั้งแต่ก่อนเดินระบบจนกระทั่งเดินระบบครบ 60 นาที

- 6) เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด ปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงและตั้งน้ำตัวอย่างทิ้งไว้ 20 นาที
- 7) ดูดน้ำตัวอย่างที่บริเวณกึ่งกลางความสูงของน้ำและทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 3.10
- 8) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-7 โดยทำการปรับเปลี่ยนขั้วอิเล็กโทรดเป็น ขั้วทองแดง—ขั้วแกรไฟต์
- 9) นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปผล เพื่อหาวัสดุของขั้วอิเล็กโทรดที่เหมาะสมในการกำจัดสาหร่ายและนำไปใช้ในการทดลองต่อไป



รูปที่ 3.7 ผังการทดลองที่ 1



ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 1

การทดลอง	ศึกษาผลของวัสดุของขั้วอิเล็กโทรดที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์
ตัวแปรอิสระ	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. การจัดเรียงขั้วอิเล็กโทรด ได้แก่ ขั้วอะลูมิเนียม—ขั้วแกรไฟต์ และ ขั้วทองแดง—ขั้วแกรไฟต์</li> <li>2. ระยะเวลาในการเดินระบบ 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 และ 60 นาที</li> </ol>
ตัวแปรควบคุม	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. น้ำสาหร่ายสังเคราะห์ความเข้มข้น <math>10^8</math> เซลล์/ลิตร</li> <li>2. พีเอชเริ่มต้น เท่ากับ 7</li> <li>3. ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์/ตร.ม.</li> <li>4. จำนวนขั้วอิเล็กโทรด 6 แผ่น</li> <li>5. ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1.5 ซม.</li> <li>6. ความนำไฟฟ้า 250 ไมโครซีเมนส์/ซม.</li> </ol>
ตัวแปรตาม	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. พีเอช</li> <li>2. อุณหภูมิ</li> <li>3. ความนำไฟฟ้า</li> <li>4. ความต่างศักย์ไฟฟ้า</li> <li>5. ความเข้มข้นคลอโรฟิลล์ เอ</li> <li>6. อะลูมิเนียมในน้ำ</li> <li>7. ทองแดงในน้ำ</li> <li>8. น้ำหนักขั้วอิเล็กโทรด</li> <li>9. ลักษณะโครงสร้างและปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของผลึก (SEM-EDS)</li> <li>10. เฟสและความเป็นผลึก (XRD)</li> </ol>

3.3.2.2 การทดลองที่ 2 ศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์

ศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดที่เหมาะสม (จากการทดลองที่ 1) และน้ำสาหร่ายสังเคราะห์ความเข้มข้น  $10^8$  เซลล์/ลิตร ที่มีพีเอชเริ่มต้น 7 ในการเดินระบบ ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์/ตร.ม. โดยปรับเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 3 ค่า คือ 20 30 และ 40 แอมแปร์/ตร.ม.

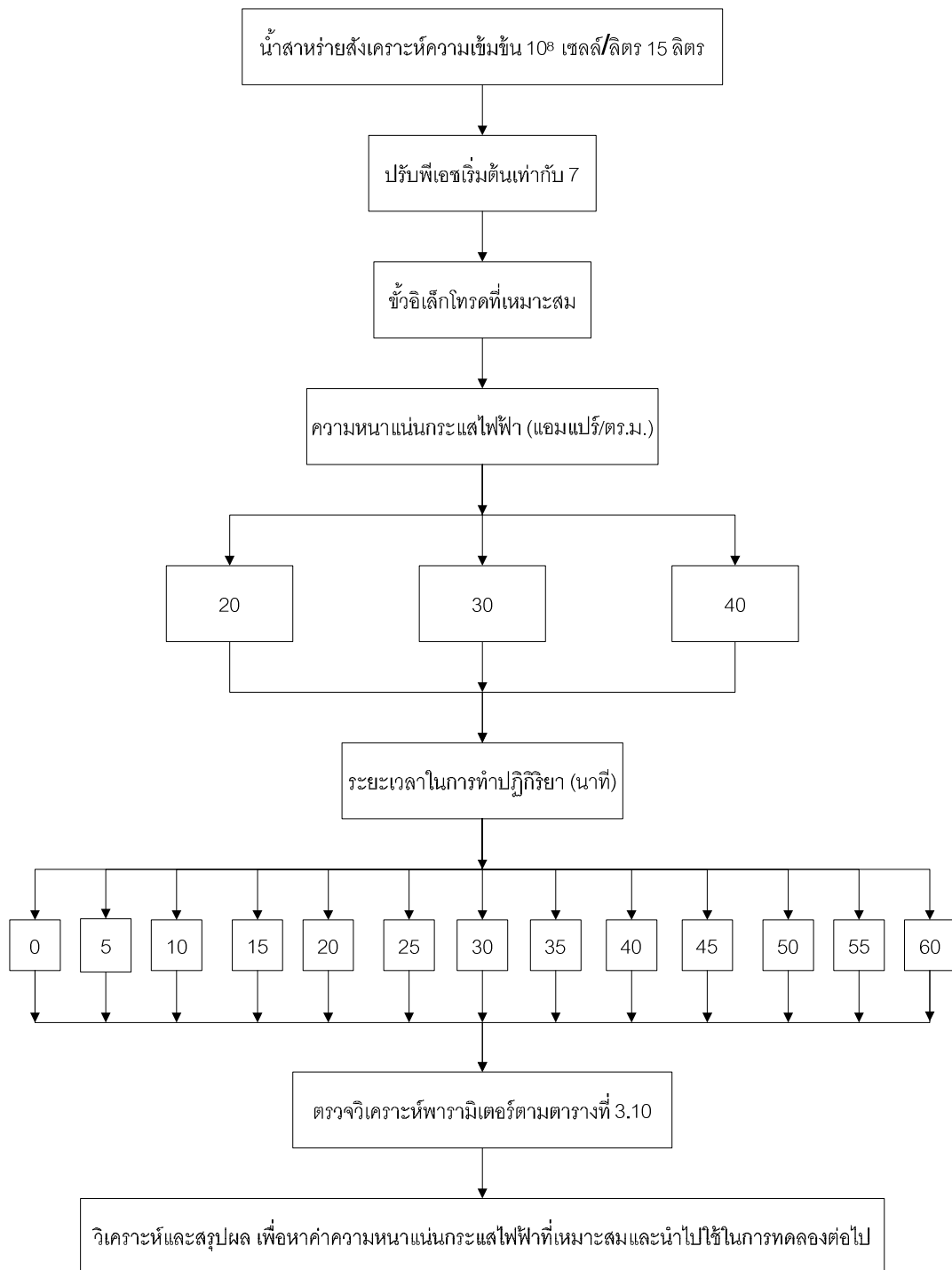
โดยแผนผังการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 3.8 และตัวแปรที่ทำการศึกษาดังตารางที่ 3.3

#### วิธีการทดลอง

- 1) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-7 ของการทดลองที่ 1 โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดที่เหมาะสมในการเดินระบบ
- 2) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1 โดยทำการปรับเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเป็น 30 และ 40 แอมแปร์/ตร.ม.
- 3) นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปผล เพื่อหาความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดสาหร่ายและนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 2

การทดลอง	ศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์
ตัวแปรอิสระ	1. ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 30 และ 40 แอมแปร์/ตร.ม. 2. ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 และ 60 นาที
ตัวแปรควบคุม	1. น้ำสาหร่ายสังเคราะห์ความเข้มข้น $10^8$ เซลล์/ลิตร 2. พีเอชเริ่มต้น เท่ากับ 7 3. จำนวนขั้วอิเล็กโทรด 6 แผ่น 4. ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1.5 ซม. 5. ความนำไฟฟ้า 250 ไมโครซีเมนส์/ซม. 6. ขั้วอิเล็กโทรดที่เหมาะสม
ตัวแปรตาม	1. พีเอช 2. อุณหภูมิ 3. ค่าการนำไฟฟ้า 4. ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 5. ความเข้มข้นคลอโรฟิลล์ เอ 6. น้ำหนักขั้วอิเล็กโทรด



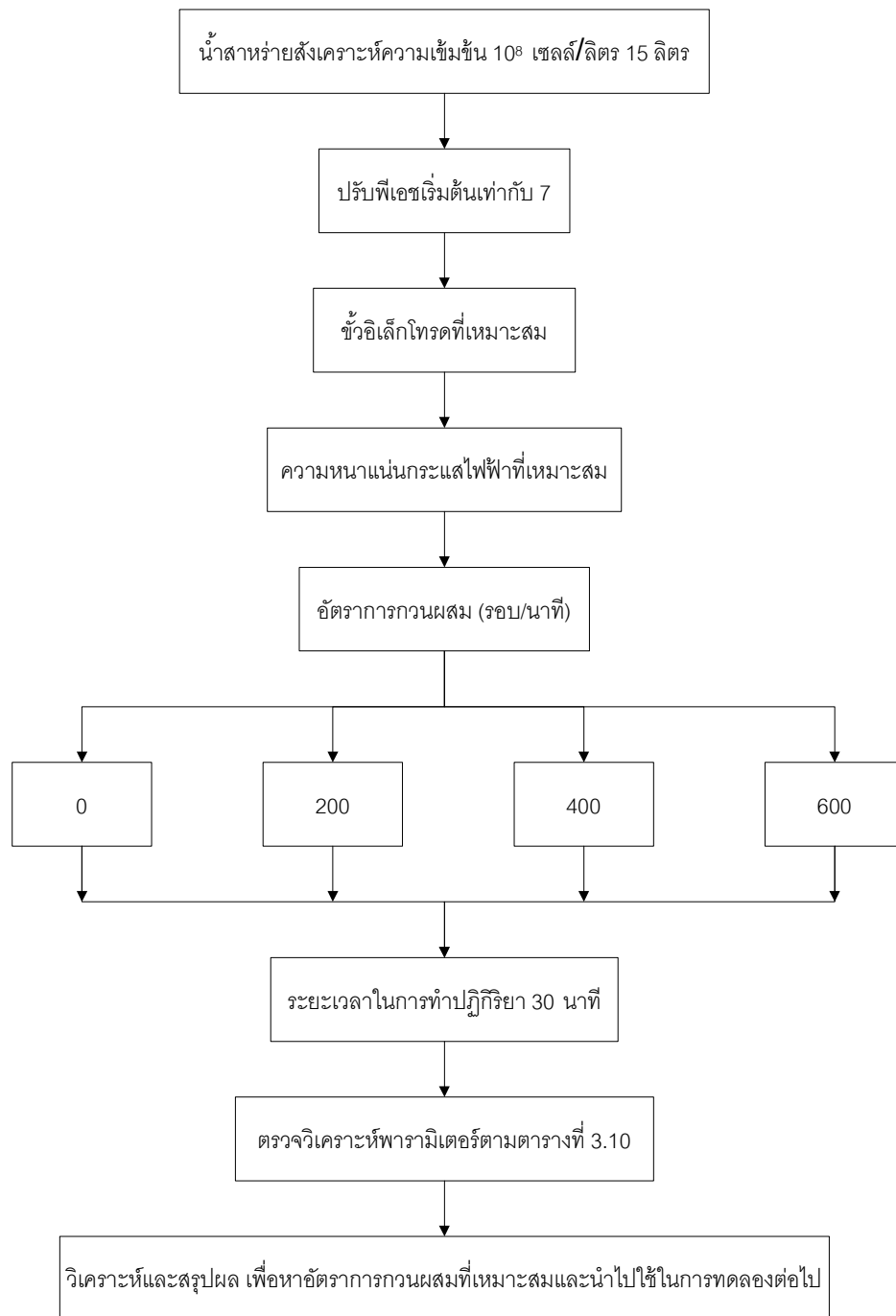
รูปที่ 3.8 ผังการทดลองที่ 2

3.3.2.3 การทดลองที่ 3 ศึกษาผลของอัตราการกวนผสมที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์

ศึกษาผลของอัตราการกวนผสมที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย โดยใช้เชื้อเล็กโทรดที่เหมาะสม (จากการทดลองที่ 1) และน้ำสาหร่ายสังเคราะห์ความเข้มข้น

$10^8$  เซลล์/ลิตร ที่มีพีเอชเริ่มต้น 7 ในการเดินระบบ 30 นาที ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม (จากการทดลองที่ 2) โดยปรับเปลี่ยนอัตราการกวนผสม 4 ค่า คือ 0 200 400 และ 600 รอบ/นาที

โดยแผนผังการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 3.9 และตัวแปรที่ทำการศึกษาดังตารางที่ 3.4



รูปที่ 3.9 ผังการทดลองที่ 3

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 3

การทดลอง	ศึกษาผลของอัตราการกวนผสมที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์
ตัวแปรอิสระ	1. อัตราการกวนผสม 0 200 400 และ 600 รอบ/นาที 2. ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 และ 60 นาที
ตัวแปรควบคุม	1. น้ำสาหร่ายสังเคราะห์ความเข้มข้น $10^8$ เซลล์/ลิตร 2. พีเอชเริ่มต้น เท่ากับ 7 3. ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม 4. จำนวนขั้วอิเล็กโทรด 6 แผ่น 5. ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1.5 ซม. 6. ความนำไฟฟ้า 250 ไมโครซีเมนส์/ซม. 7. ขั้วอิเล็กโทรดที่เหมาะสม
ตัวแปรตาม	1. พีเอช 2. อุณหภูมิ 3. ค่าการนำไฟฟ้า 4. ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 5. ความเข้มข้นคลอโรฟิลล์ เอ

## วิธีการทดลอง

- 1) ปรับพีเอชน้ำสาหร่ายสังเคราะห์ความเข้มข้น  $10^8$  เซลล์/ลิตร เท่ากับ 7
- 2) จัดเรียงขั้วอิเล็กโทรดแบบโมโนโพลาร์หลายเซลล์แบบขนาน โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดที่เหมาะสมต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง และติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์
- 3) นำน้ำสาหร่ายสังเคราะห์ 15 ลิตร ใส่ลงในถังปฏิกิริยา
- 4) เปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม (จากการทดลองที่ 2) และเปิดเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ 0 รอบ/นาที บันทึกความต่างศักย์ไฟฟ้าและอุณหภูมิเริ่มต้น และบันทึกทุกครั้งที่เก็บน้ำตัวอย่าง
- 5) เก็บน้ำตัวอย่างจากวาล์วที่อยู่สูงจากก้นถังปฏิกิริยา 5 ซม. โดยเริ่มเก็บน้ำตัวอย่างตั้งแต่ก่อนเดินระบบและเมื่อเดินระบบครบ 30 นาที
- 6) เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด ปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงและเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า และตั้งน้ำตัวอย่างทิ้งไว้ 20 นาที

7) ดูดน้ำตัวอย่างที่บริเวณกึ่งกลางความสูงของน้ำและทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 3.10

8) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-7 โดยทำการปรับเปลี่ยนอัตราการกวนผสมเป็น 200 400 และ 600 รอบ/นาที ตามลำดับ

9) นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปผล เพื่อหาอัตราการกวนผสมที่เหมาะสมในการกำจัดสาหร่ายและนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

3.3.2.4 การทดลองที่ 4 ศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้นที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์

ศึกษาผลของเอชเริ่มต้นที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดที่เหมาะสม (จากการทดลองที่ 1) และน้ำสาหร่ายสังเคราะห์ความเข้มข้น  $10^8$  เซลล์/ลิตร ในการเดินระบบ ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและอัตราการกวนผสมที่เหมาะสม (จากการทดลองที่ 2 และ 3 ตามลำดับ) โดยปรับเปลี่ยนปรับเปลี่ยนพีเอชเริ่มต้น 3 ค่า คือ 6 7 และ 8

โดยแผนผังการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 3.10 และตัวแปรที่ทำการศึกษาดังตารางที่ 3.5

#### วิธีการทดลอง

1) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-4 ของการทดลองที่ 3 โดยใช้อัตราการกวนผสมที่เหมาะสมในการเดินระบบ

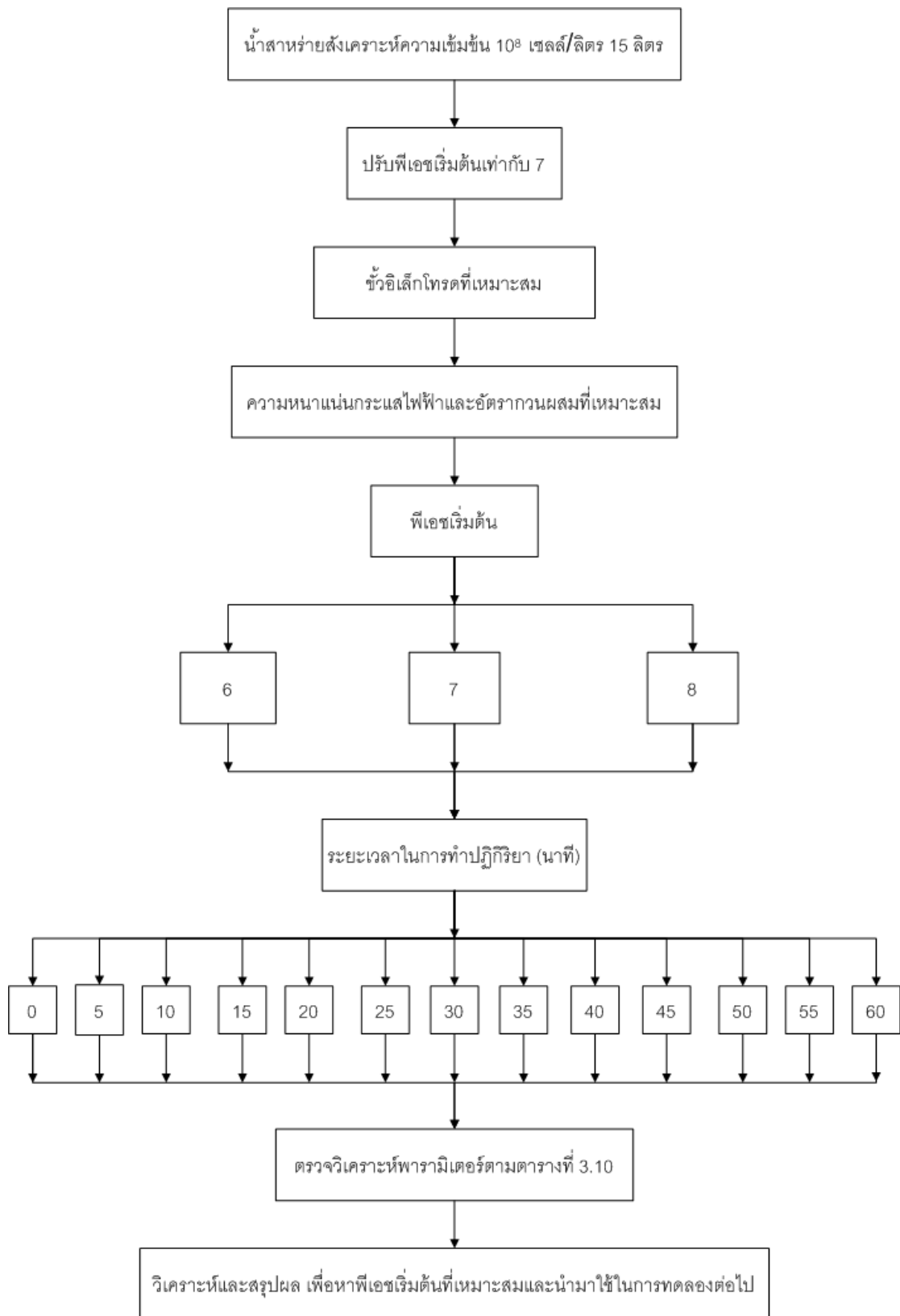
2) เก็บน้ำตัวอย่างจากวาล์วที่อยู่สูงจากก้นถังปฏิกิริยา 5 ซม. ทุก 5 นาที โดยเริ่มเก็บน้ำตัวอย่างตั้งแต่ก่อนเดินระบบจนกระทั่งเดินระบบครบ 60 นาที

3) เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด ปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง และตั้งน้ำตัวอย่างทิ้งไว้ 20 นาที

4) ดูดน้ำตัวอย่างที่บริเวณกึ่งกลางความสูงของน้ำและทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 3.10

5) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-4 โดยทำการปรับเปลี่ยนพีเอชเริ่มต้นเป็น 6 และ 8 ตามลำดับ

9) นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปผล เพื่อหาพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมในการกำจัดสาหร่ายและนำไปใช้ในการทดลองต่อไป



รูปที่ 3.10 ผังการทดลองที่ 4

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 4

การทดลอง	ศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้นที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์
ตัวแปรอิสระ	1. พีเอชเริ่มต้น 6 7 และ 8 2. ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 และ 60 นาที
ตัวแปรควบคุม	1. น้ำสาหร่ายสังเคราะห์ความเข้มข้น $10^8$ เซลล์/ลิตร 2. ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม 3. จำนวนขั้วอิเล็กโทรด 6 แผ่น 4. ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1.5 ซม. 5. ความนำไฟฟ้า 250 ไมโครซีเมนส์/ซม. 6. ขั้วอิเล็กโทรดที่เหมาะสม 7. อัตราการกวนผสมที่เหมาะสม
ตัวแปรตาม	1. พีเอช 2. อุณหภูมิ 3. ค่าการนำไฟฟ้า 4. ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 5. ความเข้มข้นคลอโรฟิลล์ เอ

3.3.2.5 การทดลองที่ 5 ศึกษาผลของความเข้มข้นสาหร่ายที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์

ศึกษาผลความเข้มข้นสาหร่ายที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดที่เหมาะสม (จากการทดลองที่ 1) และน้ำสาหร่ายสังเคราะห์ที่มีพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสม (จากการทดลองที่ 4) ในการเดินระบบ ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและอัตราการกวนผสมที่เหมาะสม (จากการทดลองที่ 2 และ 3 ตามลำดับ) โดยปรับเปลี่ยนปรับเปลี่ยนความเข้มข้นสาหร่าย 3 ค่า คือ  $10^7$   $10^8$  และ  $10^9$  เซลล์/ลิตร

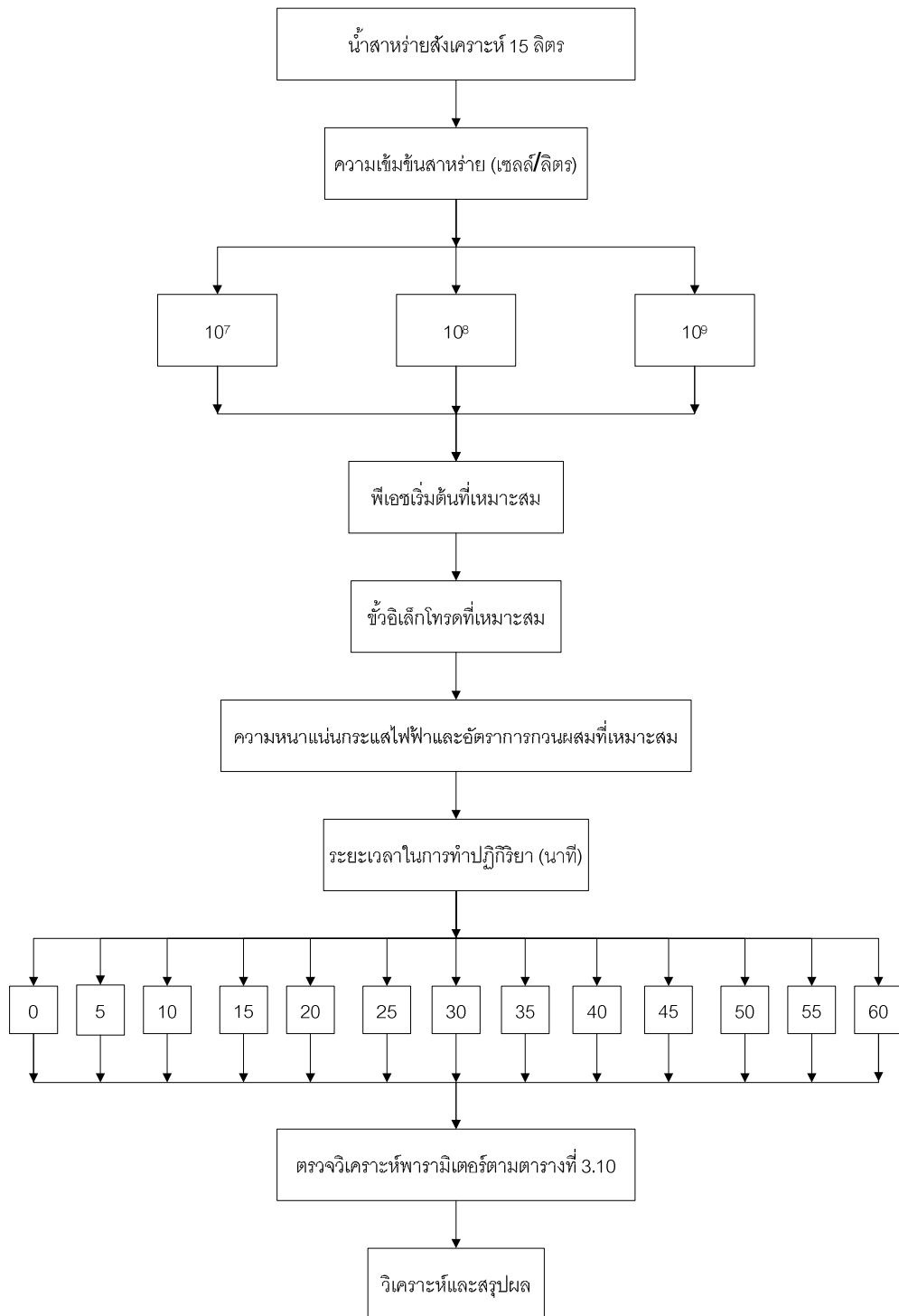
โดยแผนผังการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 3.11 และตัวแปรที่ทำการศึกษาดังตารางที่ 3.6

#### วิธีการทดลอง

1) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-4 ของการทดลองที่ 4 โดยใช้พีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมในการเดินระบบ



- 2) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1 โดยทำการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นสาหร่าย เป็น  $10^7$  และ  $10^9$  เซลล์/ลิตร
- 3) นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปผล



รูปที่ 3.11 ผังการทดลองที่ 5

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 5

การทดลอง	ศึกษาผลของความเข้มข้นสาหร่ายที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์
ตัวแปรอิสระ	1. น้ำสาหร่ายสังเคราะห์ความเข้มข้น $10^7$ $10^8$ และ $10^9$ เซลล์/ลิตร 2. ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 และ 60 นาที
ตัวแปรควบคุม	1. พีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสม 2. ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม 3. จำนวนขั้วอิเล็กโทรด 6 แผ่น 4. ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1.5 ซม. 5. ความนำไฟฟ้า 250 ไมโครซีเมนส์/ซม. 6. ขั้วอิเล็กโทรดที่เหมาะสม 7. อัตราการกวนผสมที่เหมาะสม
ตัวแปรตาม	1. พีเอช 2. อุณหภูมิ 3. ค่าการนำไฟฟ้า 4. ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 5. ความเข้มข้นคลอโรฟิลล์ เอ

3.3.2.6 การทดลองที่ 6 ศึกษาผลของการเติมโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์

ศึกษาผลการเติมโซเดียมคลอไรด์ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดที่เหมาะสม (จากการทดลองที่ 1) และน้ำสาหร่ายสังเคราะห์ความเข้มข้น  $10^8$  เซลล์/ลิตร ที่มีพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสม (จากการทดลองที่ 4) ในการเดินระบบ ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและอัตราการกวนผสมที่เหมาะสม (จากการทดลองที่ 2 และ 3 ตามลำดับ) โดยปรับเปลี่ยนปรับเปลี่ยนการเติมโซเดียมคลอไรด์ 4 ค่า คือ 0 0.5 1.0 และ 2.0 มิลลิโมลาร์

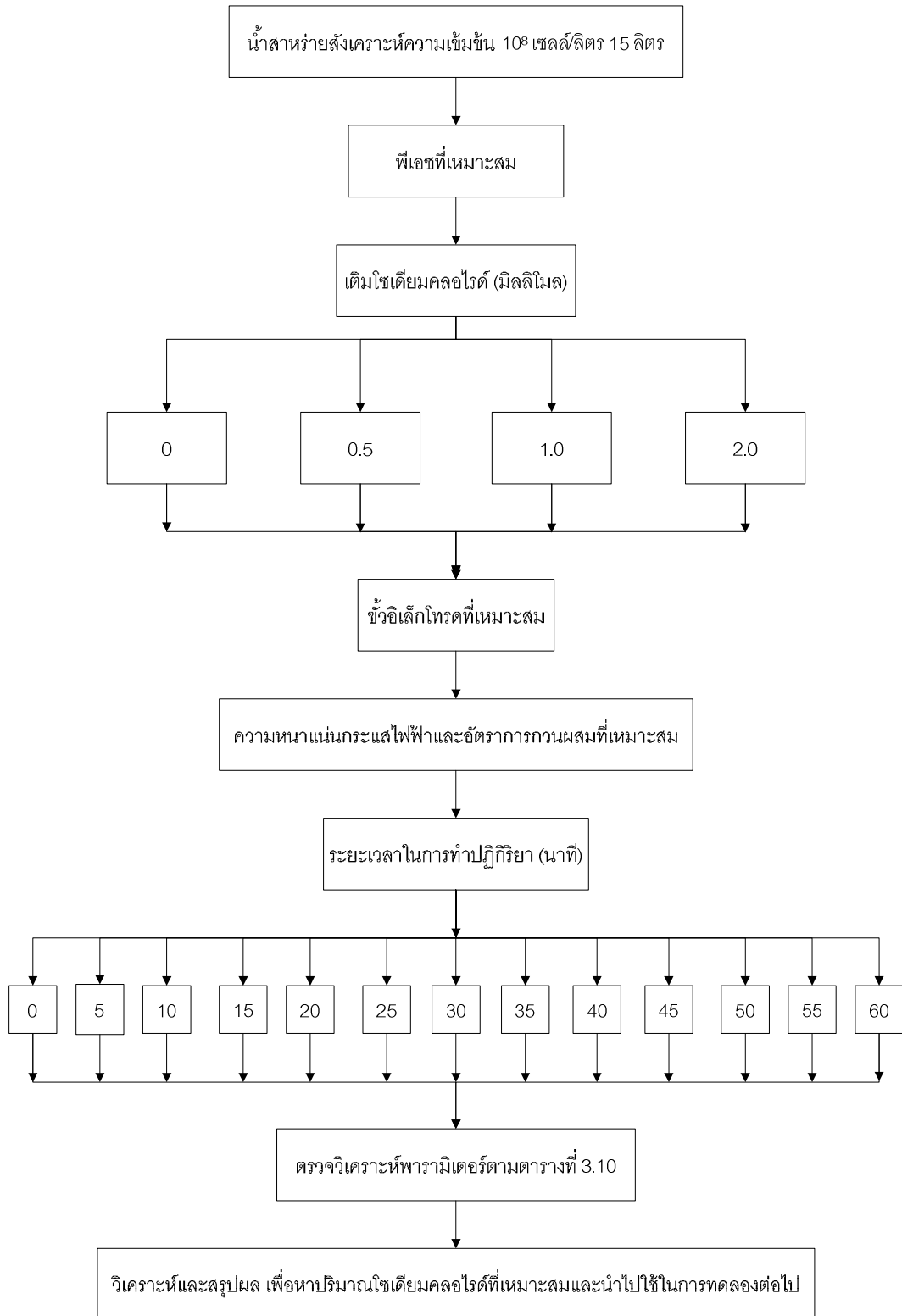
โดยแผนผังการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 3.12 และตัวแปรที่ทำการศึกษาดังตารางที่ 3.7

### วิธีการทดลอง

- 1) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-4 ของการทดลองที่ 4 โดยใช้พีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมในการเดินระบบ
- 2) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1 โดยทำการปรับเปลี่ยนการเติมไฮเดียมคลอไรด์เป็น 0.5 1.0 และ 2.0 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ
- 3) นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปผล เพื่อหาปริมาณไฮเดียมคลอไรด์ที่เหมาะสมในการกำจัดสาหร่ายและนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

### ตารางที่ 3.7 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 6

การทดลอง	ศึกษาผลของการเติมไฮเดียมคลอไรด์ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์
ตัวแปรอิสระ	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ปริมาณไฮเดียมคลอไรด์ 0 0.5 1.0 และ 2.0 มิลลิโมลาร์</li> <li>2. ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 และ 60 นาที</li> </ol>
ตัวแปรควบคุม	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. น้ำสาหร่ายสังเคราะห์ความเข้มข้น <math>10^8</math> เซลล์/ลิตร</li> <li>2. พีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสม</li> <li>3. ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม</li> <li>4. จำนวนขั้วอิเล็กโทรด 6 แผ่น</li> <li>5. ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1.5 ซม.</li> <li>6. ความนำไฟฟ้า 250 ไมโครซีเมนส์/ซม.</li> <li>7. ขั้วอิเล็กโทรดที่เหมาะสม</li> <li>8. อัตราการผสมที่เหมาะสม</li> </ol>
ตัวแปรตาม	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. พีเอช</li> <li>2. อุณหภูมิ</li> <li>3. ค่าการนำไฟฟ้า</li> <li>4. ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า</li> <li>5. ความเข้มข้นคลอโรฟิลล์ เอ</li> <li>6. ลักษณะโครงสร้างและปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของผลึก</li> </ol>



รูปที่ 3.12 ผังการทดลองที่ 6

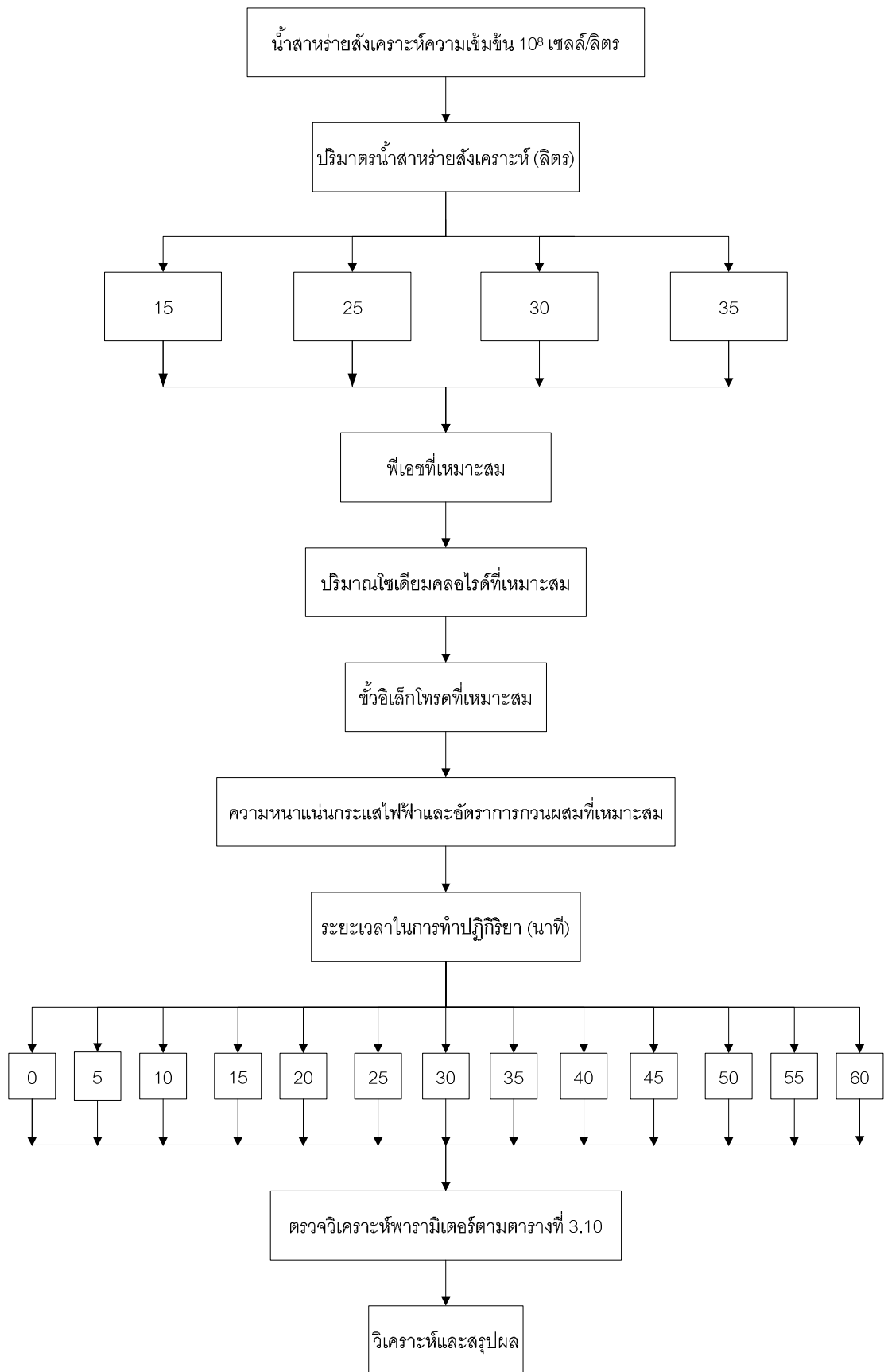
3.3.2.7 การทดลองที่ 7 ศึกษาผลของสัดส่วนระหว่างพื้นที่ทำปฏิกิริยาของซั้วอิเล็กโทรดและปริมาตรน้ำในถังปฏิกิริยา (AV) ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์

ศึกษาผลของสัดส่วนระหว่างพื้นที่ทำปฏิกิริยาของซั้วอิเล็กโทรดและปริมาตรน้ำในถังปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย โดยใช้ซั้วอิเล็กโทรดที่เหมาะสม (จากการทดลองที่ 1) และน้ำสาหร่ายสังเคราะห์ความเข้มข้น  $10^6$  เซลล์/ลิตร ที่มีพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสม (จากการทดลองที่ 4) ในการเดินระบบ ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า อัตราการกวนผสม และปริมาณโซเดียมคลอไรด์ที่เหมาะสม (จากการทดลองที่ 2 3 และ 6 ตามลำดับ) โดยปรับเปลี่ยนสัดส่วนระหว่างพื้นที่ทำปฏิกิริยาของซั้วอิเล็กโทรดและปริมาตรน้ำในถังปฏิกิริยา 4 ค่า คือ 2.86 4.00 5.00 และ 6.67 เมตร<sup>1</sup> ในงานวิจัยนี้ทำการปรับเปลี่ยนสัดส่วนระหว่างพื้นที่ทำปฏิกิริยาของซั้วอิเล็กโทรดและปริมาตรน้ำในถังปฏิกิริยาโดยการปรับเปลี่ยนปริมาตรน้ำในถังปฏิกิริยา 4 ค่า คือ 15 20 25 และ 35 ลิตร

โดยแผนผังการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 3.13 และตัวแปรที่ทำการศึกษาดังตารางที่ 3.8

#### วิธีการทดลอง

- 1) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-4 ของการทดลองที่ 3 โดยใช้อัตราการกวนผสมและพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมในการเดินระบบ
- 2) เติมโซเดียมคลอไรด์ปริมาณที่เหมาะสมในน้ำสาหร่ายสังเคราะห์
- 3) เก็บน้ำตัวอย่างจากวาล์วที่อยู่สูงจากก้นถังปฏิกิริยา 5 ซม. โดยเริ่มเก็บน้ำตัวอย่างตั้งแต่ก่อนเดินระบบและเมื่อเดินระบบครบ 40 นาที
- 4) เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด ปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงและเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้าและตั้งน้ำตัวอย่างทิ้งไว้ 20 นาที
- 5) ดูดน้ำตัวอย่างที่บริเวณกึ่งกลางความสูงของน้ำและทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 3.10
- 6) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-4 โดยทำการปรับเปลี่ยนปริมาตรน้ำในถังปฏิกิริยาเป็น 20 25 และ 30 ลิตร ตามลำดับ
- 7) นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปผล



รูปที่ 3.13 ผังการทดลองที่ 7

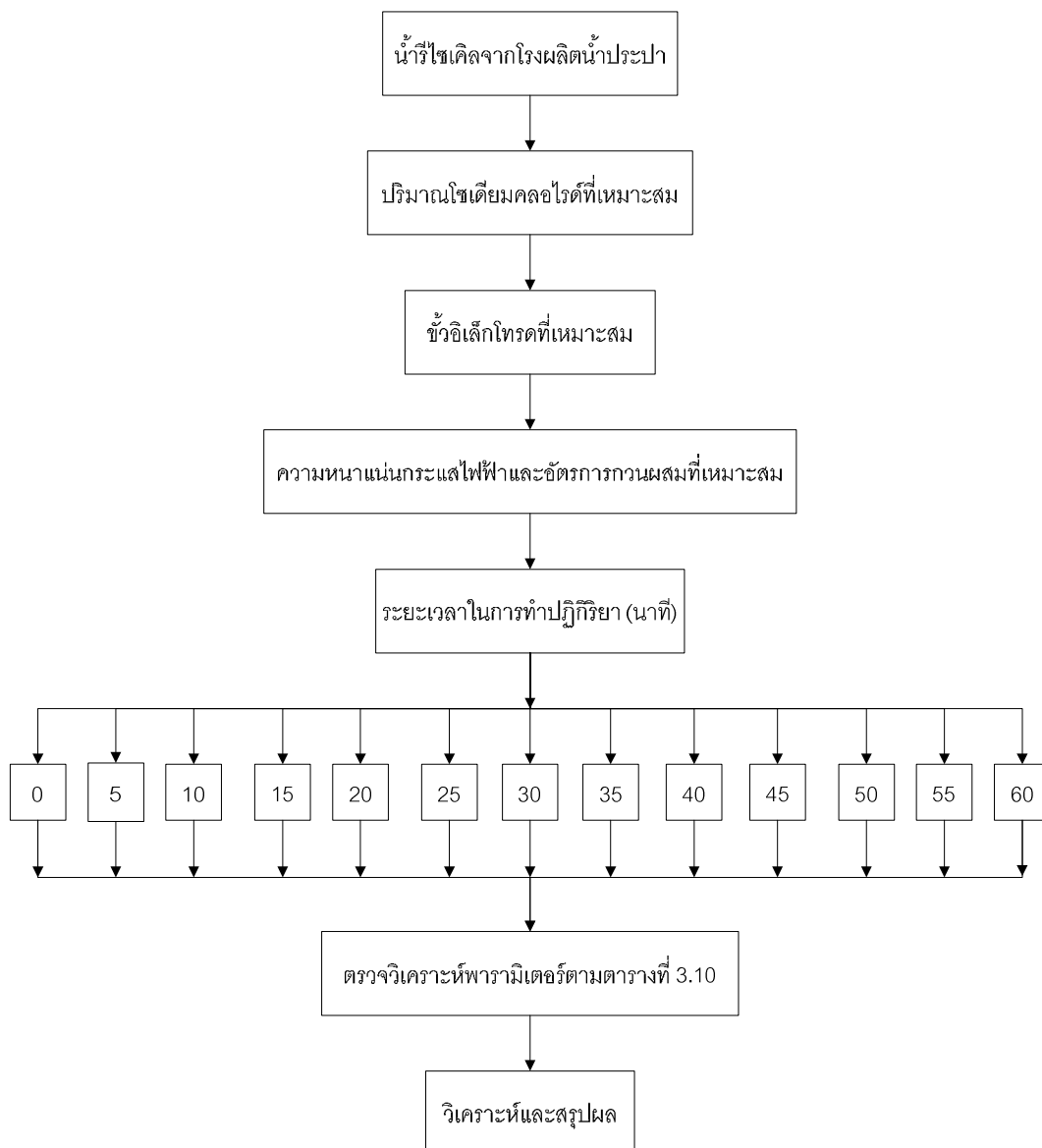
ตารางที่ 3.8 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 7

การทดลอง	ศึกษาผลของสัดส่วนระหว่างพื้นที่ทำปฏิกิริยาของซัลไฟด์โทรดและปริมาณน้ำในถังปฏิกิริยา (AV) ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์
ตัวแปรอิสระ	1. ปริมาณน้ำสาหร่ายสังเคราะห์ 15 25 35 ลิตร 2. ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 และ 60 นาที
ตัวแปรควบคุม	1. น้ำสาหร่ายสังเคราะห์ความเข้มข้น $10^8$ เซลล์/ลิตร 2. พีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสม 3. ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม 4. จำนวนซัลไฟด์โทรด 6 แผ่น 5. ระยะห่างระหว่างซัลไฟด์โทรด 1.5 ซม. 6. ความนำไฟฟ้า 250 ไมโครซีเมนส์/ซม. 7. ซัลไฟด์โทรดที่เหมาะสม 8. อัตราการผสมที่เหมาะสม 9. ปริมาณโซเดียมคลอไรด์ที่เหมาะสม
ตัวแปรตาม	1. พีเอช 2. อุณหภูมิ 3. ค่าการนำไฟฟ้า 4. ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 5. ความเข้มข้นคลอโรฟิลล์ เอ

3.3.2.8 การทดลองที่ 8 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำรีไซเคิลจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขน

ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำรีไซเคิลจากโรงผลิตน้ำประปา โดยใช้ซัลไฟด์โทรดที่เหมาะสม (จากการทดลองที่ 1) และน้ำรีไซเคิลจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขนในการเดินระบบ ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า อัตราการผสมและปริมาณโซเดียมคลอไรด์ที่เหมาะสม (จากการทดลองที่ 2 3 และ 6 ตามลำดับ)

โดยแผนผังการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 3.14 และตัวแปรที่ทำการศึกษาดังตารางที่ 3.9



รูปที่ 3.14 ผังการทดลองที่ 8

#### วิธีการทดลอง

- 1) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-4 ของการทดลองที่ 3 โดยใช้ น้ำรีไซเคิล อัตราการกวนผสมและพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมในการเดินระบบ
- 2) เติมโซเดียมคลอไรด์ปริมาณที่เหมาะสมในน้ำสำหรับยสังเคราะห์
- 3) เก็บน้ำตัวอย่างจากวาล์วที่อยู่สูงจากกันถึงปฏิกิริยา 5 ซม. โดยเริ่มเก็บน้ำตัวอย่างตั้งแต่ก่อนเดินระบบจนกระทั่งเดินระบบครบ 60 นาที
- 4) เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด ปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงและเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้าและตั้งน้ำตัวอย่างทิ้งไว้ 20 นาที



5) ดูดน้ำตัวอย่างที่บริเวณกึ่งกลางความสูงของน้ำและทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 3.10

6) นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปผล

ตารางที่ 3.9 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 8

การทดลอง	ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารหายากจากน้ำรีไซเคิลจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขน
ตัวแปรอิสระ	1. ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 และ 60 นาที
ตัวแปรควบคุม	1. น้ำรีไซเคิลจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขน 2. พีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสม 3. ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม 4. จำนวนขั้วอิเล็กโทรด 6 แผ่น 5. ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1.5 ซม. 6. ความนำไฟฟ้า 250 ไมโครซีเมนส์/ซม. 7. ขั้วอิเล็กโทรดที่เหมาะสม 8. อัตราการวนผสมที่เหมาะสม 9. ปริมาณโซเดียมคลอไรด์ที่เหมาะสม
ตัวแปรตาม	1. พีเอช 2. อุณหภูมิ 3. ค่าการนำไฟฟ้า 4. ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 5. ความเข้มข้นคลอโรฟิลล์ เอ 6. ของแข็งแขวนลอย 7. อะลูมิเนียมในน้ำ 8. ไตรฮาโลมีเทน

### 3.4 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำสาหร่ายสังเคราะห์ น้ำรีไซเคิล และตะกอนที่เกิดขึ้นโดยแสดงวิธีวิเคราะห์ดังตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.10 พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์น้ำสาหร่ายสังเคราะห์ น้ำรีไซเคิล และตะกอนที่เกิดขึ้น

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์/ เครื่องมือวิเคราะห์	ก่อนการ ทดลอง	หลังการทดลอง	
			ทุกครั้ง	ชุดที่ เหมาะสม
1. พีเอช	pH meter	√	√	
2. อุณหภูมิ	Thermometer	√	√	
3. ค่าการนำไฟฟ้า	Conductivity meter	√	√	
4. ความต่างศักย์ไฟฟ้า	DC power supply	√	√	
5. ความเข้มข้นสาหร่าย	Phytoplankton counting techniques	√		
6. ความเข้มข้นคลอโรฟิลล์ เอ	Fluorometric method (Strickland and Parsons, 1972)	√	√	
7. น้ำหนักขั้วอิเล็กโทรด	Analytical balance	√		√
8. ของแข็งแขวนลอย	Suspended solids dried at 103 – 105 °C	√		√
9. ลักษณะโครงสร้างและปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของผลึก	Scanning electron microscope with EDS attachment			√
10. อะลูมิเนียมและทองแดงในน้ำ	Inductively coupled plasma atomic emission spectrometer	√		√
11. เฟสและความเป็นผลึก	X-Ray diffractometer			√
12. ไตรฮาโลมีเทน	Gas chromatography method	√		√

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาการนำน้ำรีไซเคิล (Recycled water) ซึ่งเป็นน้ำทิ้งจากโรงผลิตน้ำประปา เพื่อการนำมาใช้เป็นแหล่งน้ำดิบทดแทนแหล่งน้ำดิบจากธรรมชาติ โดยศึกษาถึงประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า แบ่งการทดลองเป็น 8 การทดลอง ดังนี้

การทดลองที่ 1 ศึกษาผลของวัสดุของขั้วอิเล็กโทรดที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์

การทดลองที่ 2 ศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์

การทดลองที่ 3 ศึกษาผลของอัตราการกวนผสมที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์

การทดลองที่ 4 ศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้นที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์

การทดลองที่ 5 ศึกษาผลของความเข้มข้นสาหร่ายที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์

การทดลองที่ 6 ศึกษาผลของการเติมโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์

การทดลองที่ 7 ศึกษาผลของสัดส่วนระหว่างพื้นที่ทำปฏิกิริยาของขั้วอิเล็กโทรดและปริมาตรน้ำในถังปฏิกิริยา (AV) ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์

การทดลองที่ 8 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำรีไซเคิลจากโรงผลิตน้ำประปา

#### 4.1 การทดลองที่ 1 ศึกษาผลของวัสดุของขั้วอิเล็กโทรดที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์

วัสดุของขั้วอิเล็กโทรดมีบทบาทสำคัญในการกำหนดกลไกการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงไปยังขั้วอิเล็กโทรด จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยารีดักชันขึ้นที่ขั้วแอโนดและขั้วแคโทดตามลำดับ ปฏิกิริยาออกซิเดชันของขั้วแอโนดที่ผลิตจากอะลูมิเนียมและทองแดงจะก่อให้เกิดการก่อตัวของขั้วแอโนด ดังสมการที่ (4-1) และ (4-9) ตามลำดับ เกิดเป็นสารสร้างตะกอน

(Coagulant) ช่วยทำลายเสถียรภาพสาหร่ายในน้ำ และปฏิกิริยารีดักชันของขั้วแคโทดที่ผลิตจากแกรไฟต์ จะผลิตฟองก๊าซขนาดเล็กช่วยพาสาหร่ายที่ถูกทำลายเสถียรภาพในน้ำให้ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ ดังสมการที่ (4-2) และ (4-11)

การทดลองนี้จึงทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยปรับเปลี่ยนขั้วอิเล็กโทรด 2 แบบ คือ ขั้วอะลูมิเนียม—ขั้วแกรไฟต์ และขั้วทองแดง—ขั้วแกรไฟต์ (ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด ตามลำดับ) ใช้น้ำสาหร่ายสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น  $10^8$  เซลล์/ลิตร ที่มีพีเอช 7 ในการเดินระบบที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์/ตร.ม. และทำการเก็บน้ำตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดทุก 5 นาที เป็นระยะเวลา 60 นาที แบ่งการทดลองเป็น 2 ชุดการทดลอง ดังนี้

ชุดที่ 1 ทำการเดินระบบโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดอะลูมิเนียม—แกรไฟต์

ชุดที่ 2 ทำการเดินระบบโดยใช้อิเล็กโทรดชนิดทองแดง—แกรไฟต์

จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปผลเพื่อหาวัสดุของขั้วอิเล็กโทรดที่เหมาะสมในการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

4.1.1 การทดลองชุดที่ 1 การเดินระบบโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดอะลูมิเนียม—แกรไฟต์

จากผลการทดลองการเดินระบบโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดอะลูมิเนียม—แกรไฟต์ พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายสูงขึ้นตามลำดับ เมื่อระยะเวลาในการเดินระบบสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.1 โดยต้องใช้ระยะเวลาในการเดินระบบ 60 นาที จึงสามารถกำจัดสาหร่ายทั้งหมดออกจากน้ำได้ (ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายมากกว่าร้อยละ 99.9) เนื่องจากในการเดินระบบโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดอะลูมิเนียม—แกรไฟต์ จะทำให้เกิดสารสร้างตะกอนและฟองก๊าซขึ้นดังปฏิกิริยาที่ (4-1) และ (4-2) (Yilmaz และคณะ, 2007)

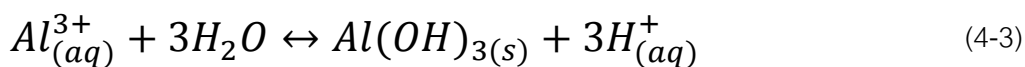
ขั้วแอโนด

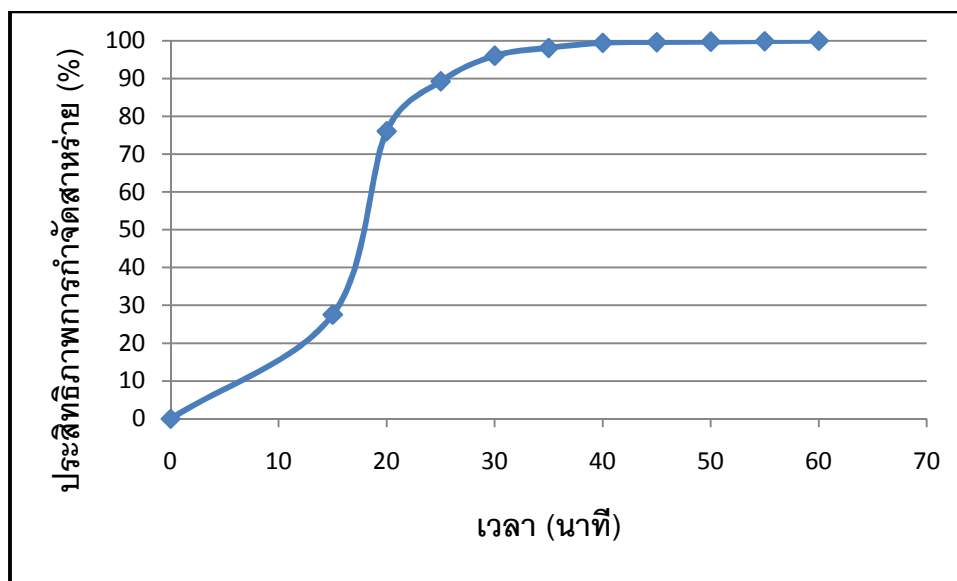


ขั้วแคโทด



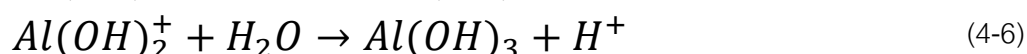
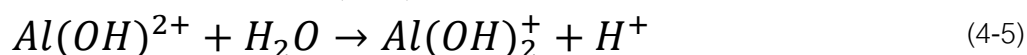
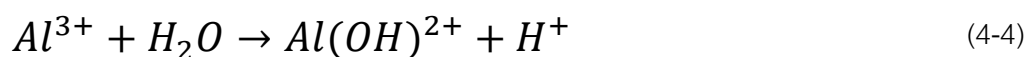
ปฏิกิริยาในสารละลาย



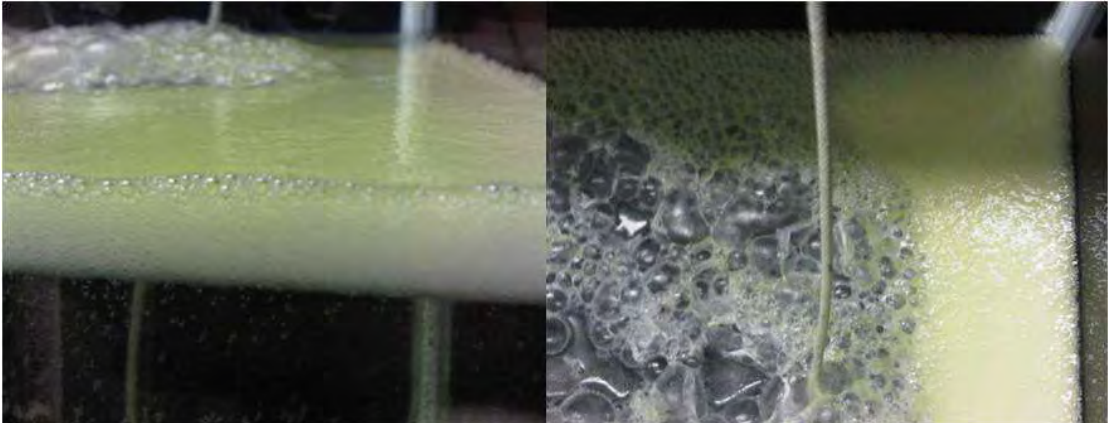


รูปที่ 4.1 ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์ด้วย  
 ไขว้อะลูมิเนียม—ไขว้แกรไฟต์

อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ( $Al^{3+}$ ) เป็นสารสร้างตะกอนที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันบริเวณ  
 ไขว้แอโนด จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis reaction) ขึ้นทันที ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจาก  
 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส เช่น  $Al(OH)^{2+}$   $Al(OH)_2^+$  และ  $Al(OH)_3$  ดังปฏิกิริยาที่ (4-4)-(4-6)  
 (Mouedhen และคณะ, 2008) สามารถทำลายเสถียรภาพของสาหร่ายในน้ำ การยึดจับระหว่าง  
 อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ( $Al(OH)_3$ ) และสาหร่ายเกิดการรวมตัวเป็นฟล็อก (Floc) ขนาดใหญ่ ซึ่ง  
 สามารถแยกจากน้ำโดยการทำให้ลอยด้วยฟองก๊าซขนาดเล็กที่เกิดจากปฏิกิริยารีดักชันบริเวณไขว้  
 แคโทด ดังปฏิกิริยาที่ (4-2) ฟองก๊าซไฮโดรเจนจะยึดจับฟล็อกของสาหร่ายให้ลอยขึ้นสู่น้ำ เกิด  
 เป็นชั้นของตะกอนลอยดังรูปที่ 4.2 ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนนั้นยังเป็นการผลิตไฮดรอกไซด์  
 ไฮดรอกไซด์ ( $OH^-$ ) เข้าสู่ระบบอย่างต่อเนื่อง เมื่อระบบได้รับ  $OH^-$  เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการเดิน  
 ระบบ พีเอชของน้ำจึงมีค่าสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.3



จากผลการทดลอง พบว่าที่ระยะเวลาในการเดินระบบ 40 นาที มีประสิทธิภาพการกำจัด  
 สาหร่ายร้อยละ 99.4 ไขว้อะลูมิเนียมกรองตัวลงสู่น้ำ 0.52 กรัม น้ำหลังการบำบัดใสไม่มีสี



รูปที่ 4.2 ตะกอนลอยบริเวณผิวน้ำของการเดินระบบด้วยขั้วอะลูมิเนียม—ขั้วแกรไฟต์

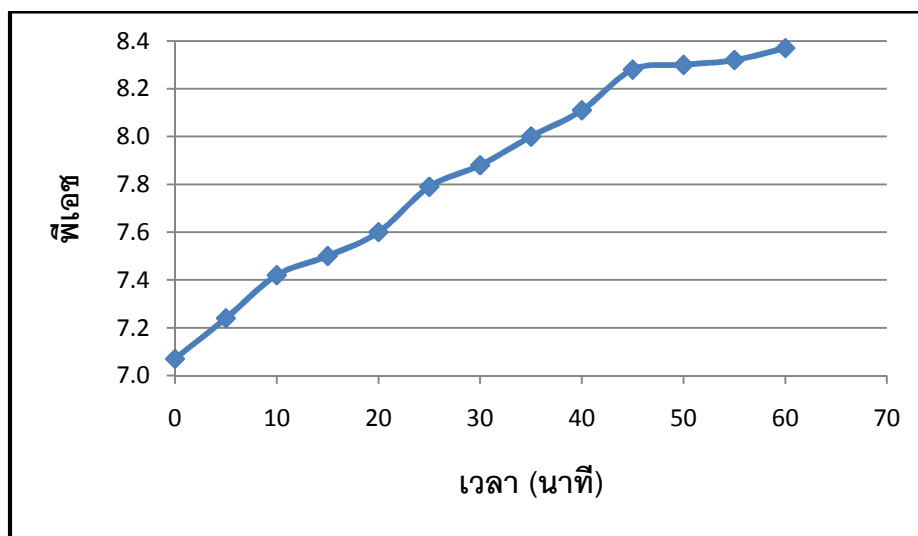
มีพีเอชเท่ากับ 8.11 และต้องการพลังงานไฟฟ้า 1.22 กิโลวัตต์ชั่วโมง/ลบ.ม. โดยความต้องการพลังงานไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4-7) (Gao และคณะ, 2010a)

$$W = \frac{UIt_{EC}}{V_{EC}} \quad (4-7)$$

โดยที่ W คือ งานทางไฟฟ้า (วัตต์ชั่วโมง/ลบ.ม.)

U คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)

I คือ กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)



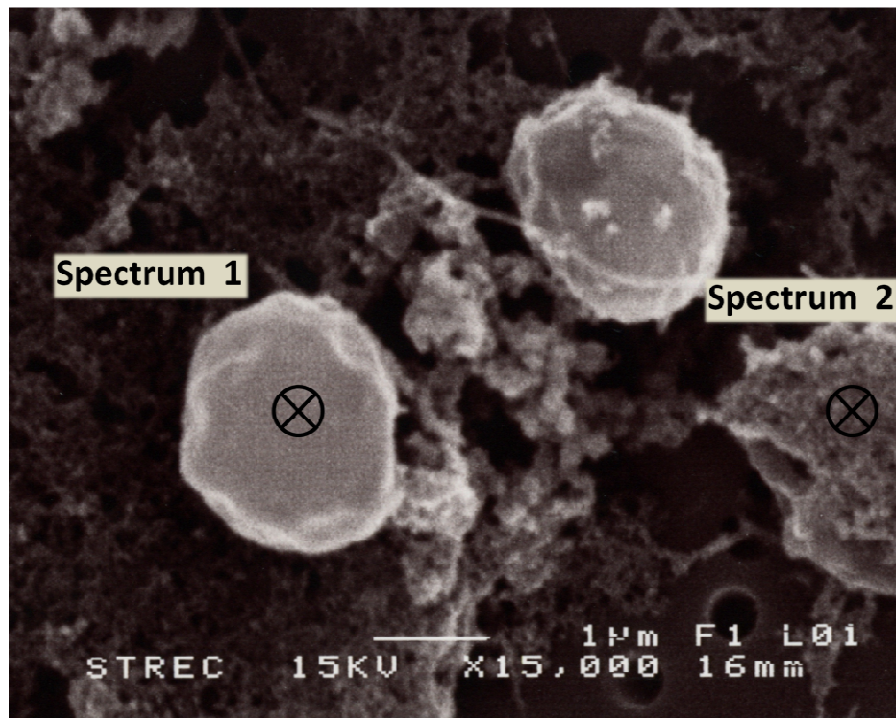
รูปที่ 4.3 พีเอชในระหว่างการเดินระบบด้วยขั้วอะลูมิเนียม—ขั้วแกรไฟต์

$t_{EC}$  คือ ระยะเวลาในการเดินระบบ (ชั่วโมง)

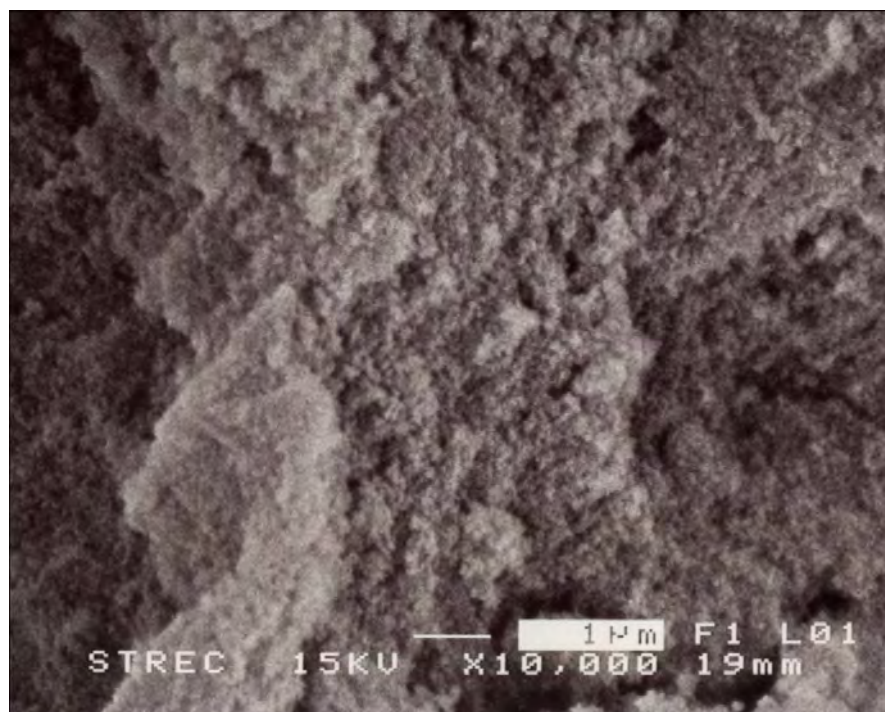
$V_{EC}$  คือ ปริมาตรของน้ำในถังปฏิกิริยา (ลบ.ม.)

ทำการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างและปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของตะกอนลอยโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM-EDS) โดยเก็บตัวอย่างตะกอนลอยที่ระยะเวลาในการเดินระบบ 60 นาที พบว่าตะกอนลอยบริเวณผิวน้ำซึ่งเกิดจากการสะสมตัวของฟล็อกของสาหร่ายประกอบด้วยสาหร่ายและอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ดังรูปที่ 4.4 เซลล์สาหร่ายมีลักษณะโครงสร้างเป็นรูปทรงกลมถูกยึดจับด้วยอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบไม่เป็นผลึก (Amorphous) ดังรูปที่ 4.5 และพื้นผิวของสาหร่ายบางส่วนถูกอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ปกคลุม วัตถุทรงกลมและตะกอนที่ตรวจพบสามารถระบุได้ว่าเป็นสาหร่ายและอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์จากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบ โดยทำการยิงสเปกตรัม (Spectrum) ไปยังตำแหน่งของวัตถุทรงกลม (สเปกตรัม 1) และตะกอน (สเปกตรัม 2) ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าคาร์บอนและออกซิเจนซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของสาหร่ายนั้น เป็นองค์ประกอบหลักของวัตถุทรงกลมเช่นกัน โดยมีปริมาณร้อยละ 60.15 และ 28.75 ตามลำดับ และพบอะลูมิเนียมเพียงร้อยละ 0.10 สำหรับผลการวิเคราะห์ตะกอน พบว่ามีปริมาณคาร์บอนเป็นองค์ประกอบลดลง แต่ออกซิเจนและอะลูมิเนียมมีค่าสูงขึ้น โดยมีปริมาณร้อยละ 28.27 52.68 และ 12.54 ตามลำดับ ปริมาณอะลูมิเนียมและออกซิเจนที่สูงขึ้น อาจเป็นผลมาจากตะกอนนั้นเป็นตะกอนอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ดังปฏิกิริยาที่ (4-6) ซึ่งเป็นตะกอนที่มีอะลูมิเนียมและออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ จึงเป็นการพิสูจน์ได้ว่าตะกอนที่ทำการวิเคราะห์ (สเปกตรัม 2) เป็นสารประกอบของอะลูมิเนียมและออกซิเจน

เนื่องจากการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างและปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของตะกอนอะลูมิเนียมโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM-EDS) ให้ผลการวิเคราะห์ในเชิงปริมาณเท่านั้น ทำให้ทราบผลเพียงปริมาณของธาตุแต่ละชนิดในตะกอนอะลูมิเนียม ดังนั้นการวิเคราะห์เฟสและความเป็นผลึกโดยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-Ray diffraction) จึงถูกนำมาใช้เพื่อระบุชนิดของสารประกอบในตะกอนอะลูมิเนียม โดยการนำตัวอย่างตะกอนลอยที่ระยะเวลาในการเดินระบบ 60 นาที มาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส และใส่ในเดซิเคเตอร์ (Desiccator) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนทำการวิเคราะห์ ผลการวิเคราะห์พบว่าตะกอนอะลูมิเนียมเป็นสารประกอบ  $Al_2O_3$  (Daispore) จากรายงานของ Ricordel และคณะ (2010) พบว่าการใช้ขั้วแอโนดผลิตจากอะลูมิเนียมจะเกิดตะกอนลอยของสารประกอบ  $Al(OH)_3$  ขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองจากงานวิจัยนี้ กล่าวคือ  $Al(OH)_3$  ที่เกิดขึ้นดังปฏิกิริยาที่ (4-6) นั้นสามารถเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็น  $Al_2O_3$  ในสภาวะที่มีอุณหภูมิระหว่าง 140-420 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.4 ลักษณะโครงสร้างของตะกอนลอยที่เกิดจากการเดินระบบด้วยขั้วอะลูมิเนียม-ขั้วแกรไฟต์  
(วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 15,000 เท่า)



รูปที่ 4.5 ลักษณะโครงสร้างของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบไม่เป็นผลึก  
(วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 10,000 เท่า)



ตารางที่ 4.1 ปริมาณธาตุคาร์บอน ออกซิเจนและอะลูมิเนียมในสาหร่ายและตะกอนอะลูมิเนียม

ธาตุ	สาหร่าย (สเปคตรัม 1)		ตะกอนอะลูมิเนียม (สเปคตรัม 2)	
	ปริมาณธาตุ (%)	น้ำหนักธาตุ (%)	ปริมาณธาตุ (%)	น้ำหนักธาตุ (%)
คาร์บอน	60.15	69.48	28.27	36.96
ออกซิเจน	28.75	24.93	52.68	51.71
อะลูมิเนียม	0.10	0.05	12.54	7.30

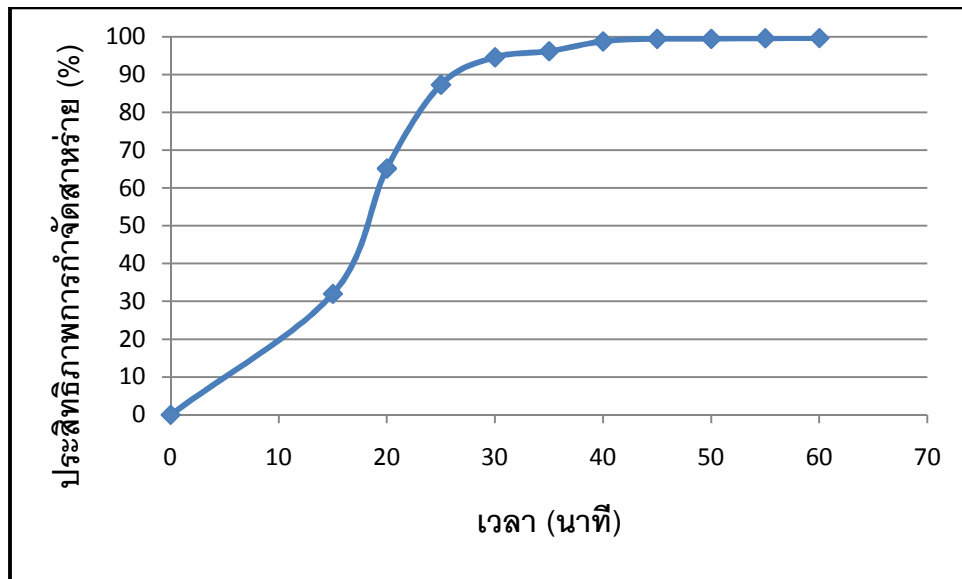
ดังปฏิกิริยาที่ (4-8) (Du และคณะ, 2009) โดยสภาวะดังกล่าวเกิดขึ้นในการเตรียมตัวอย่างก่อนทำการวิเคราะห์ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าตะกอนลอยบริเวณผิวน้ำประกอบด้วยสาหร่ายและอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์



#### 4.1.2 การทดลองชุดที่ 2 การเดินระบบโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดทองแดง—แกรไฟต์

จากผลการทดลองการเดินระบบโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดทองแดง—แกรไฟต์ พบว่าเมื่อระยะเวลาในการเดินระบบเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยที่ระยะเวลาในการเดินระบบ 60 นาที มีประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายร้อยละ 99.6 ดังรูปที่ 4.6

เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับระบบ ขั้วทองแดงจะสามารถร่อนตัวกลายเป็นคอปเปอร์ไอออน ( $Cu^{2+}$ ) ลงสู่น้ำ ดังปฏิกิริยาที่ (4-9) ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเพื่อผลิตสารประกอบเชิงซ้อนไฮดรอกไซด์ (Metal hydroxide complex) ดังปฏิกิริยาที่ (4-13)-(4-14) (Prasad, 2010) สารเหล่านี้สามารถทำลายเสถียรภาพสาหร่ายในน้ำและเกิดการรวมตัวเป็นฟล็อกของสาหร่าย โดยคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ ( $Cu(OH)_2$ ) จะยึดจับสาหร่ายกลายเป็นฟล็อกขนาดใหญ่ นอกจากนี้ปฏิกิริยารีดักชันของน้ำจะผลิตฟองก๊าซไฮโดรเจน ดังสมการที่ (4-11) ซึ่งสามารถยึดจับฟล็อกของสาหร่ายให้ลอยขึ้นสู่น้ำเกิดเป็นชั้นตะกอนลอย แต่ยังมีฟล็อกของสาหร่ายบางส่วนเกิดการตกตะกอนดังรูปที่ 4.7 นอกจากนี้ปฏิกิริยารีดักชันของน้ำ ยังมีการผลิตไฮดรอกไซด์ไอออนเข้าสู่ระบบ ส่งผลให้พีเอชของระบบมีค่าสูงขึ้นตามระยะเวลาในการเดินระบบ ดังรูปที่ 4.8

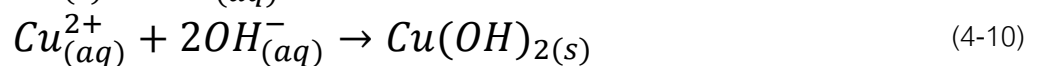


รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์ด้วย  
ขั้วทองแดง—ขั้วแกรไฟต์

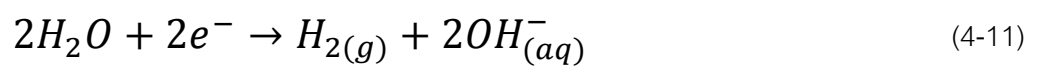


รูปที่ 4.7 ตะกอนจากการเดินระบบด้วยขั้วทองแดง—ขั้วแกรไฟต์  
(ก) ตะกอนลอยบริเวณผิวน้ำ (ข) ตะกอนที่ก้นภาชนะ

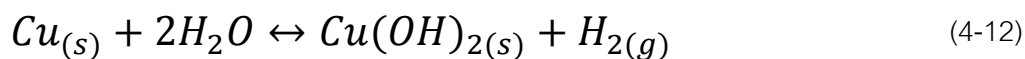
ขั้วแอโนด



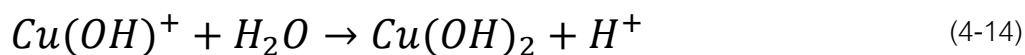
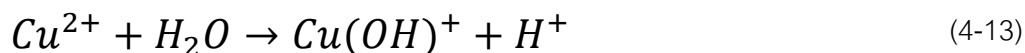
ขั้วแคโทด



ปฏิกิริยารวม

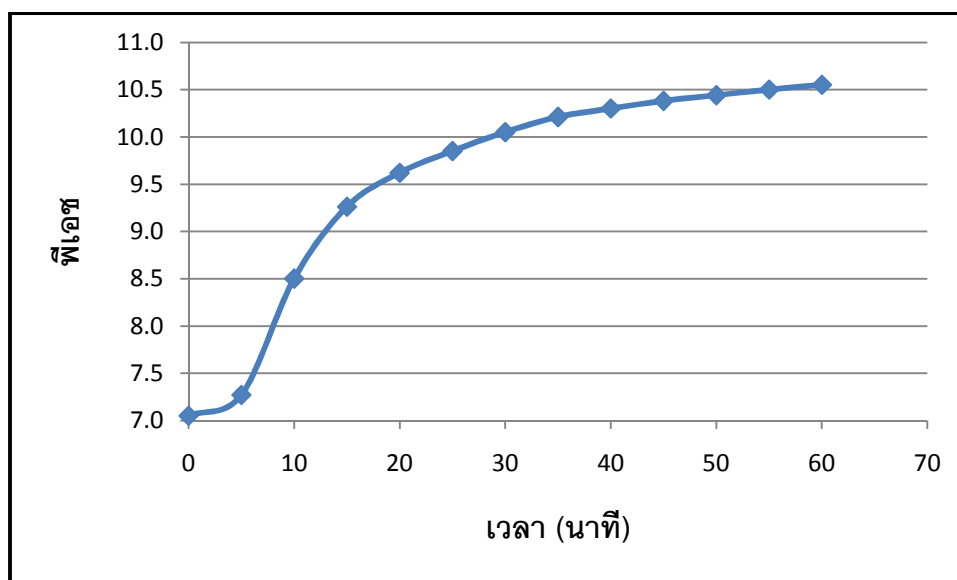


ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของทองแดง

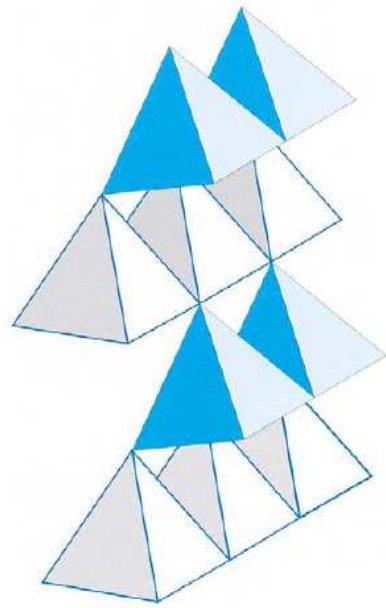


จากผลการทดลอง พบว่าที่ระยะเวลาในการเดินระบบ 40 นาที มีประสิทธิภาพการกำจัดสารห่วยร้อยละ 98.8 ขั้วทองแดงก่อนตัวลงสู่น้ำ 1.32 กรัม น้ำหลังการบำบัดมีสีฟ้าใสและมีพีเอช 10.30 และต้องการพลังงานไฟฟ้า 1.16 กิโลวัตต์ชั่วโมง/ลบ.ม.

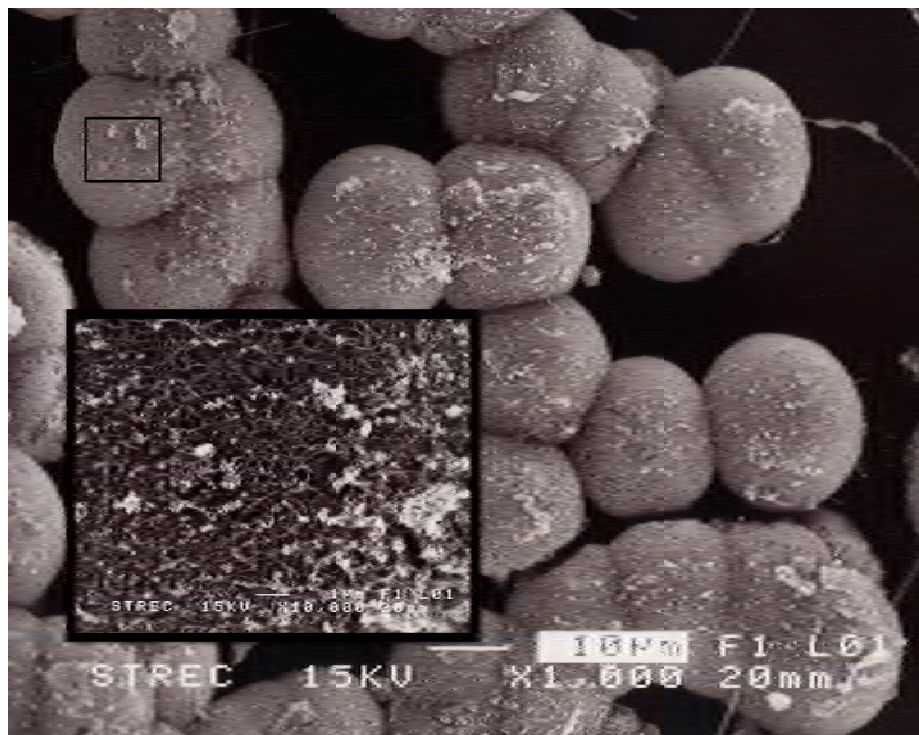
ทำการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างและปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของตะกอนลอยโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน โดยเก็บตัวอย่างตะกอนลอยที่ระยะเวลาในการเดินระบบ 60 นาที พบว่าตะกอนลอยจากการเดินระบบด้วยขั้วอิเล็กโทรดชนิดทองแดง—แกรไฟต์ คือ คอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ ดังปฏิกิริยาที่ (4-10) ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างของผลึกเป็นรูปปริมาตรฐานสี่เหลี่ยม (Square pyramid) และมีการจัดเรียงผลึกดังรูปที่ 4.9 (Cudennec และ Lecerf, 2003) การก่อตัวของผลึกคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ในช่วงเริ่มต้นยังมีรายละเอียดของผลึกไม่ชัดเจน โดยมีลักษณะดังรูปที่ 4.10 และผลึกคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ที่มีโครงสร้างสมบูรณ์มีลักษณะดังรูปที่ 4.11



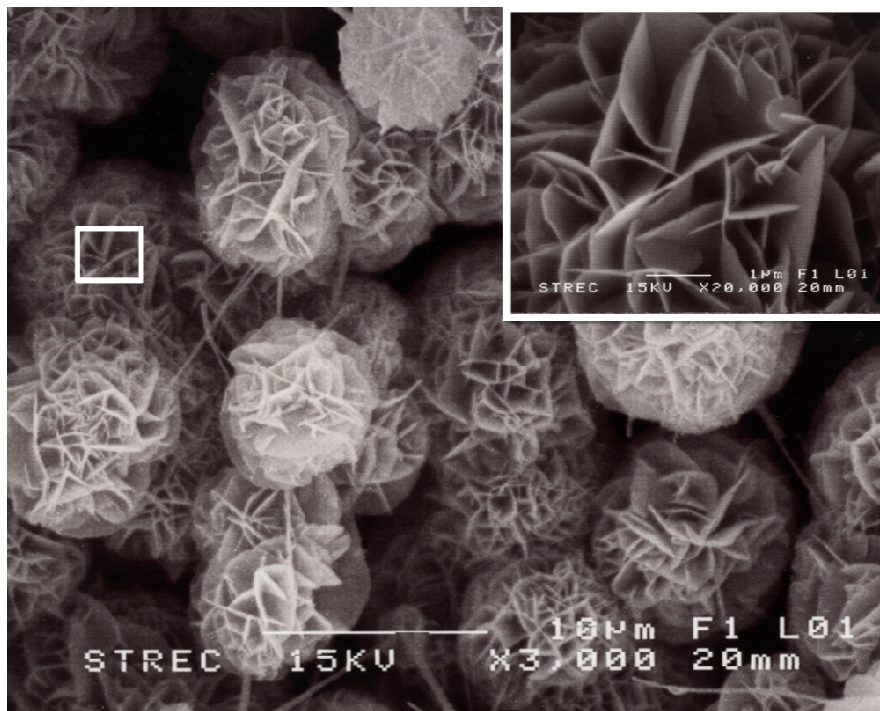
รูปที่ 4.8 พีเอชในระหว่างการเดินระบบด้วยขั้วทองแดง—ขั้วแกรไฟต์



รูปที่ 4.9 การเรียงตัวของผลึกคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ (Spetiniite)

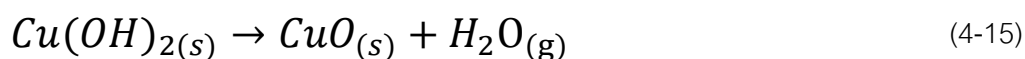


รูปที่ 4.10 ลักษณะคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ที่มีโครงสร้างยังไม่สมบูรณ์ (วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 10,000 เท่า)



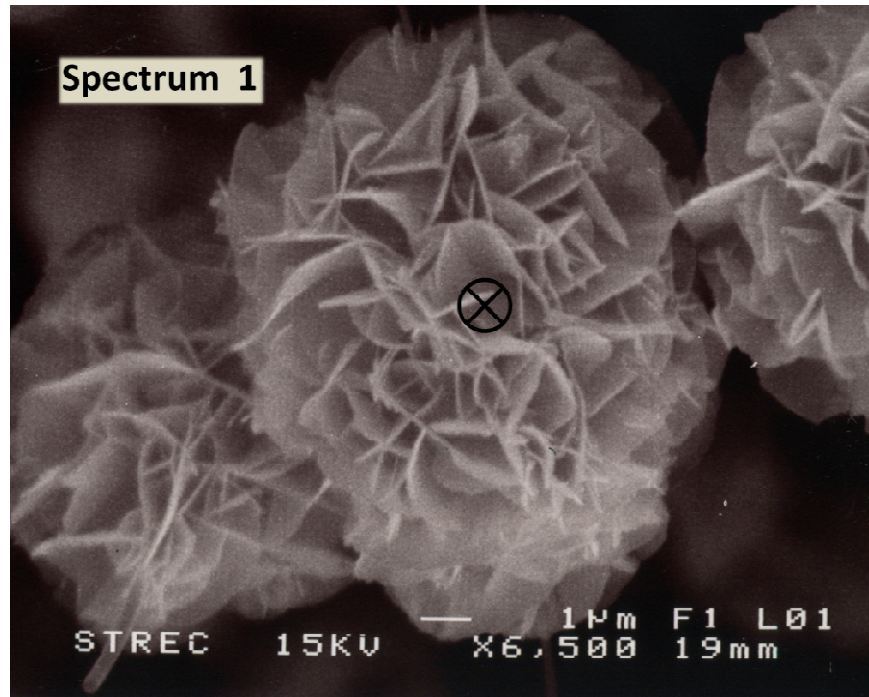
รูปที่ 4.11 ลักษณะโครงสร้างของคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ที่มีโครงสร้างสมบูร์น (วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 3,000 เท่า)

การวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบ (EDS) สามารถช่วยพิสูจน์ได้ว่าตะกอนลอยที่เกิดขึ้นเป็นสารประกอบระหว่างทองแดงและออกซิเจน โดยทำการยิงสเปกตรัมไปยังผลึก (สเปกตรัม 1) ดังรูปที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.2 พบว่ามีปริมาณคาร์บอน ออกซิเจน และทองแดงร้อยละ 30.35 49.42 และ 18.75 ตามลำดับ และจากผลการวิเคราะห์เฟสและความเป็นผลึก (XRD) (วิธีเตรียมตัวอย่างตะกอนลอยเหมือนการทดลองที่ 4.1.1) เพื่อระบุชนิดของสารประกอบในผลึกดังรูปที่ 4.12 พบว่าสารประกอบของผลึก คือ  $\text{CuO}$  (Copper oxide) จากรายงานของ Cudennec และ Lecerf (2003) พบว่าที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  สามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็น  $\text{CuO}$  ได้ดังปฏิกิริยาที่ (4-15) โดยสภาวะดังกล่าวเกิดขึ้นในการเตรียมตัวอย่างก่อนทำการวิเคราะห์ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าตะกอนลอยบริเวณผิวน้ำ คือ ผลึกคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์



จากการวิเคราะห์โครงสร้าง (SEM) ของตะกอนลอย พบว่าไม่มีโครงสร้างที่มีลักษณะกลมของสาหร่ายบนพื้นผิวตะกอนลอยที่เกิดจากการเดินระบบด้วยขั้วทองแดง—แกรไฟต์ ซึ่งผลการ





รูปที่ 4.12 ลักษณะโครงสร้างของคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์  
(วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 6,500 เท่า)

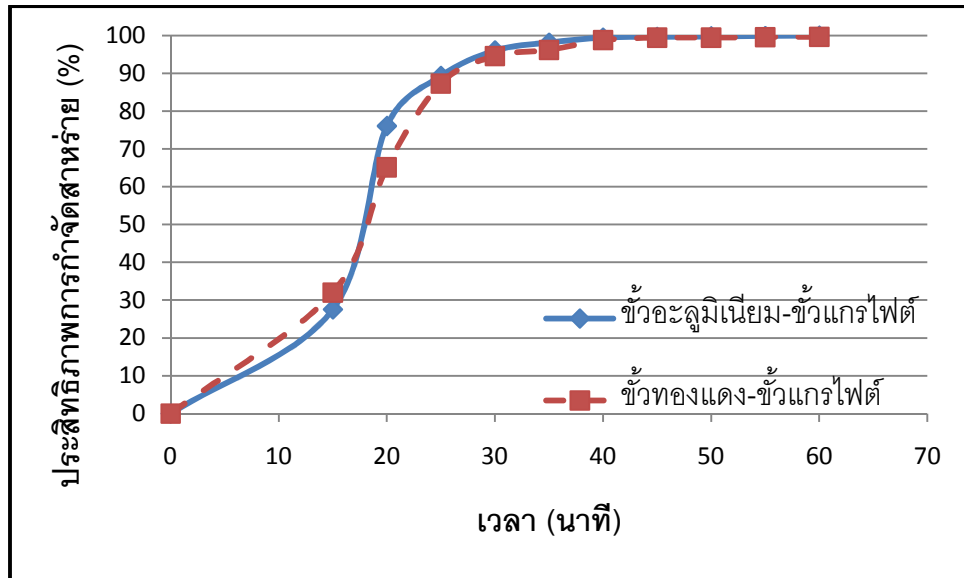
ทดลองที่ผ่านมามีดังรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายสูงขึ้นตามระยะเวลาในการเดินระบบที่สูงขึ้น การกำจัดสาหร่ายที่เกิดขึ้นอาจเป็นผลจากกลไกการตกตะกอนแบบกวาด (Sweep coagulation) โดยการเกิด  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  บริเวณพื้นผิวของสาหร่าย ซึ่งสาหร่ายอาจเป็นแกนในของผลึกดังกล่าวรวมทั้งสาหร่ายที่แขวนลอยในน้ำสัมผัสกับ  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  ที่ก่อตัวขึ้นในน้ำ ทำให้เกิดการยึดจับและถูกห่อหุ้มโดย  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  ดังนั้นการวิเคราะห์โครงสร้างของตะกอนลอยจึงตรวจไม่พบสาหร่ายบริเวณพื้นผิวของตะกอนลอย

ตารางที่ 4.2 ปริมาณธาตุคาร์บอน ออกซิเจนและทองแดงในตะกอนทองแดง

ธาตุ	ปริมาณ (%)	น้ำหนัก (%)
คาร์บอน	30.35	42.35
ออกซิเจน	49.42	51.78
ทองแดง	18.75	4.95

เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์ด้วยการใช้ขี้วัวอิเล็กโทรดชนิดอะลูมิเนียม—แกรไฟต์ และขี้วัวอิเล็กโทรดชนิดทองแดง—แกรไฟต์ จากการทดลอง

ชุดที่ 1 และ 2 พบว่า ขั้วอิเล็กโทรดทั้ง 2 ชนิด มีประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายสูงและประสิทธิภาพที่ได้รับจากขั้วอิเล็กโทรดแต่ละชนิดไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังรูปที่ 4.13 ดังนั้นในการพิจารณาเลือกวัสดุของขั้วอิเล็กโทรดที่เหมาะสมในการกำจัดสาหร่าย จึงต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายในการเดินระบบและคุณสมบัติของน้ำหลังการบำบัดด้วย



รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์ด้วย  
ขั้วอะลูมิเนียม—ขั้วแกรไฟต์ และขั้วทองแดง—ขั้วแกรไฟต์

ผลการเปรียบเทียบการเดินระบบด้วยขั้วอิเล็กโทรดชนิดอะลูมิเนียม—แกรไฟต์ และชนิดทองแดง—แกรไฟต์ จากการทดลองชุดที่ 1 และ 2 สามารถสรุปผลได้ดังตารางที่ 4.3 ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบประกอบด้วยค่าขั้วแอโนดกร่อนตัวและค่าพลังงานไฟฟ้า โดยค่าพลังงานไฟฟ้าเป็นต้นทุนที่มีมูลค่าสูงในกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ดังนั้นระบบที่สามารถใช้กระแสไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงนับว่าเป็นระบบที่ดี โดยประสิทธิภาพเชิงกระแส ( $\phi$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4-16 (Ghosh และคณะ, 2008)

$$\phi = \frac{M_{exp}}{M_{theo}} \times 100 \tag{4-16}$$

โดยที่  $M_{exp}$  คือ ปริมาณการกร่อนตัวของขั้วแอโนดจากการทดลอง  
 $M_{theo}$  คือ ปริมาณการกร่อนตัวของขั้วแอโนดตามทฤษฎี

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบการเดินระบบด้วยขั้วอิเล็กโทรดชนิดอะลูมิเนียม—แกรไฟต์และชนิดทองแดง—แกรไฟต์ (ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์/ตร.ม. ระยะเวลาในการเดินระบบ 40 นาที และพีเอชเริ่มต้น 7)

พารามิเตอร์	ชนิดของขั้วอิเล็กโทรด	
	ขั้วอะลูมิเนียม—ขั้วแกรไฟต์	ขั้วทองแดง—ขั้วแกรไฟต์
ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	99.4	98.8
ประสิทธิภาพเชิงกระแส (%)	116.3	83.5
พีเอชหลังการบำบัด	8.11	10.30
สีของน้ำหลังการบำบัด	ใส	ฟ้าใส
ขั้วแอโนดกร่อนตัว (กรัม)	0.52 (0.0398 บาท) <sup>ก</sup>	1.32 (0.3750 บาท) <sup>ก</sup>
ค่าพลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์ชั่วโมง/ลบ.ม.)	1.22 (2.0325 บาท) <sup>ง</sup>	1.16 (1.9325 บาท) <sup>ง</sup>
ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ (บาท/ลบ.ม.)	4.6858	26.9325

<sup>ก</sup> อะลูมิเนียมราคา 2,534.50 ดอลลาร์สหรัฐ/ตัน (London Metal Exchange, 2011: online)

<sup>ข</sup> ทองแดงราคา 9,419.50 ดอลลาร์สหรัฐ/ตัน (London Metal Exchange, 2011: online)

<sup>ค</sup> อัตราแลกเปลี่ยน 30.1651 บาท/ดอลลาร์สหรัฐ (ธนาคารแห่งประเทศไทย, 2554: ออนไลน์)

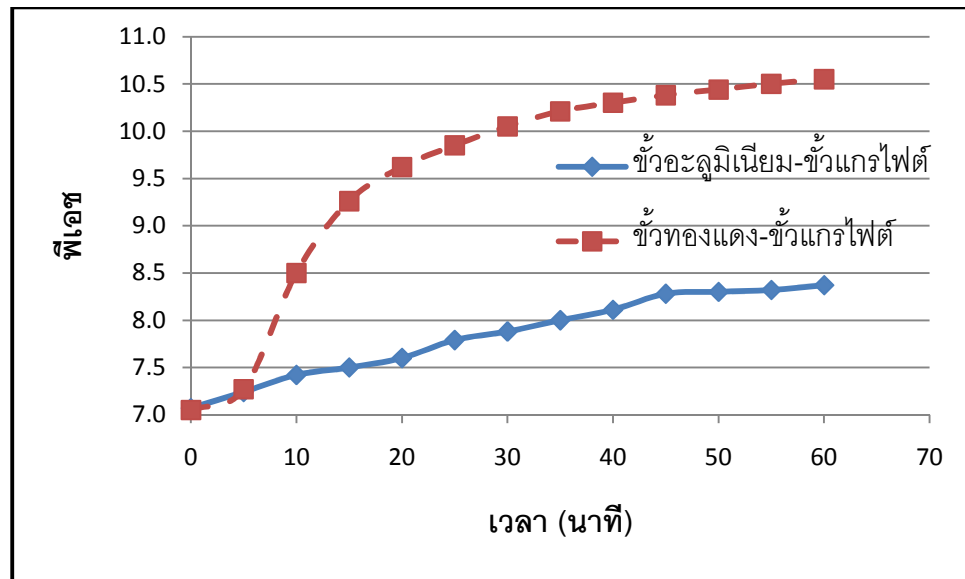
<sup>ง</sup> ค่าพลังงานไฟฟ้า 1.6660 บาท/หน่วย (ประเภทที่ 4 กิจกรรมขนาดใหญ่) (การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2554: ออนไลน์)

โดยปริมาณการกร่อนตัวของขั้วแอโนดตามทฤษฎีสามารถคำนวณได้จากกฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) ดังสมการที่ 4-17 (Ghosh และคณะ, 2008)

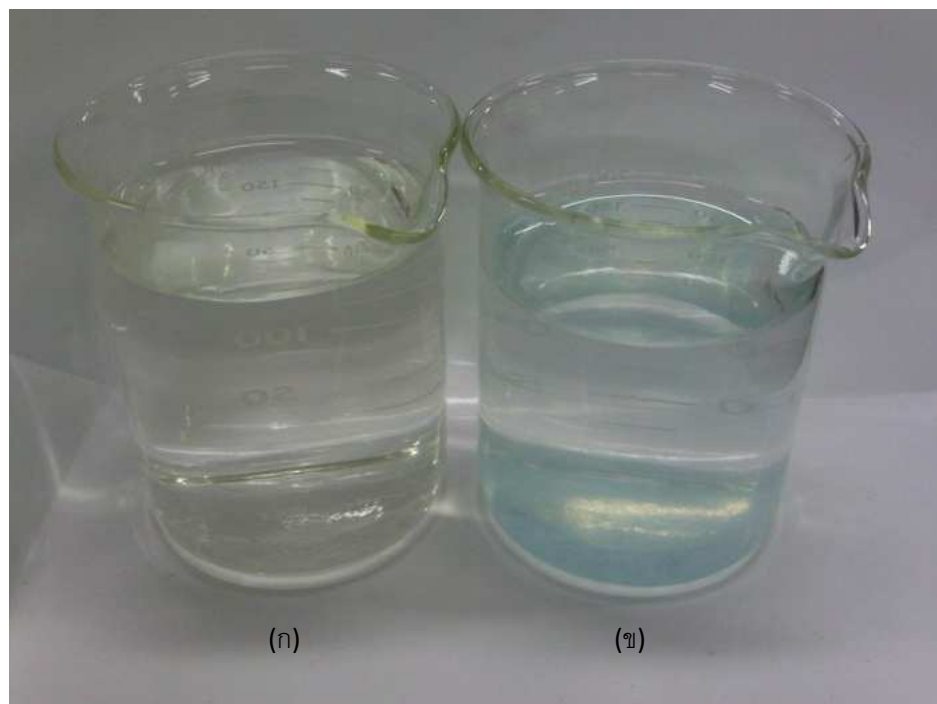
$$M_{\text{theo}} = \frac{MIt_{\text{EC}}}{nF} \quad (4-17)$$

โดยที่ M คือ มวลโมเลกุลของวัสดุของขั้วแอโนด (กรัม/โมล)  
 I คือ กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)  
 $t_{\text{EC}}$  คือ ระยะเวลาในการเดินระบบ (วินาที)  
 n คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่ใช้ในปฏิกิริยา  
 F คือ ค่าคงที่ฟาราเดย์เท่ากับ 96,487 (คูลอมบ์/โมล)





รูปที่ 4.14 พีเอชในระหว่างการเดินระบบด้วยข้าวอะลูมิเนียม-ข้าวแกรไฟต์ และ ข้าวทองแดง-ข้าวแกรไฟต์



รูปที่ 4.15 สีของน้ำหลังการบำบัด  
(ก) ข้าวอะลูมิเนียม-ข้าวแกรไฟต์ (ข) ข้าวทองแดง-ข้าวแกรไฟต์

เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์/ตร.ม. และระยะเวลาในการเดินระบบ 40 นาที ประสิทธิภาพเชิงกระแสของขั้วอิเล็กโทรดชนิดอะลูมิเนียม—แกรไฟต์ มีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับขั้วอิเล็กโทรดชนิดทองแดง—แกรไฟต์ โดยมีประสิทธิภาพเชิงกระแสเท่ากับร้อยละ 116.0 และ 83.5 ตามลำดับ กล่าวคือขั้วอิเล็กโทรดชนิดอะลูมิเนียม—แกรไฟต์ มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิวของขั้วอิเล็กโทรดได้ดีกว่าขั้วอิเล็กโทรดชนิดทองแดง—แกรไฟต์ ทราบจากมวลของอะลูมิเนียมที่กร่อนตัวมีค่าสูงกว่าค่าตามทฤษฎี จึงเป็นการเพิ่มปริมาณสารสร้างตะกอนเข้าสู่ระบบซึ่งช่วยในการทำละลายเสียรภาพสาหร่ายในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

พีเอชของน้ำหลังการบำบัดตามมาตรฐานขององค์การอนามัยโลกควรอยู่ในช่วง 6.5-9.5 (WHO, 2008) จากรูปที่ 4.14 พบว่าพีเอชน้ำหลังการบำบัดด้วยขั้วอิเล็กโทรดชนิดอะลูมิเนียม—แกรไฟต์ มีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานตลอดระยะเวลาในการเดินระบบ แต่ในกรณีของขั้วอิเล็กโทรดชนิดทองแดง—แกรไฟต์ เมื่อใช้ระยะเวลาในการเดินระบบเพียง 20 นาที พบว่า พีเอชของน้ำหลังการบำบัดมีค่าไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานและพีเอชยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

ทำการเปรียบเทียบสีของน้ำหลังการบำบัด ดังรูปที่ 4.15 พบว่าน้ำหลังการบำบัดของขั้วอิเล็กโทรดชนิดอะลูมิเนียม—แกรไฟต์ สีไม่มีสี แต่ของขั้วอิเล็กโทรดชนิดทองแดง—แกรไฟต์ มีสีฟ้าใส ซึ่งเกิดจากการกร่อนตัวของขั้วทองแดง (Copper dissolution) ลงสู่น้ำดังปฏิกิริยาที่ (4-9) จากการวิเคราะห์ปริมาณทองแดงในน้ำโดยเครื่องวัดปริมาณธาตุ (ICP) ผลการวิเคราะห์พบว่า มีทองแดงปนเปื้อนในน้ำ 1.40 มก./ลิตร โดยน้ำที่ปนเปื้อนทองแดงความเข้มข้นสูงกว่า 1 มก./ลิตร อาจทำให้ท่อเหล็กอบสังกะสีและข้อต่อเหล็กเกิดการกร่อนตัว และยังเป็นสาเหตุของการเกิดคราบที่สุขภัณฑ์และเสื้อผ้า ที่ความเข้มข้นสูงกว่า 5 มก./ลิตร ทองแดงในน้ำอาจก่อให้เกิดรสขมในน้ำดื่ม (WHO, 2008)

การกร่อนตัวของขั้วแอโนดของขั้วทองแดงมีปริมาณสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับขั้วอะลูมิเนียม โดยในการเดินระบบขั้วทองแดงจะกร่อนตัว 1.32 กรัม ในขณะที่ขั้วอะลูมิเนียมจะกร่อนตัว 0.52 กรัม ส่งผลให้ฟล็อกที่เกิดขึ้นจากขั้วทองแดงมีปริมาณสูงและมีน้ำหนักมาก โดยความหนาแน่นของฟล็อกที่เกิดจากขั้วทองแดงและอะลูมิเนียมมีค่า 3.37 และ 2.42 กรัม/ลบ.ซม. ตามลำดับ และทองแดงยังเป็นโลหะที่มีมูลค่าสูง ดังตารางที่ 4.1 การเลือกใช้ขั้วทองแดงจึงเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายในการเดินระบบทั้งในด้านมูลค่าของขั้วแอโนดที่กร่อนตัวและค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอน

ดังนั้นขั้วอิเล็กโทรดชนิดอะลูมิเนียม—แกรไฟต์ จึงมีความเหมาะสมสำหรับการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและนำมาใช้ในการทดลองต่อไป

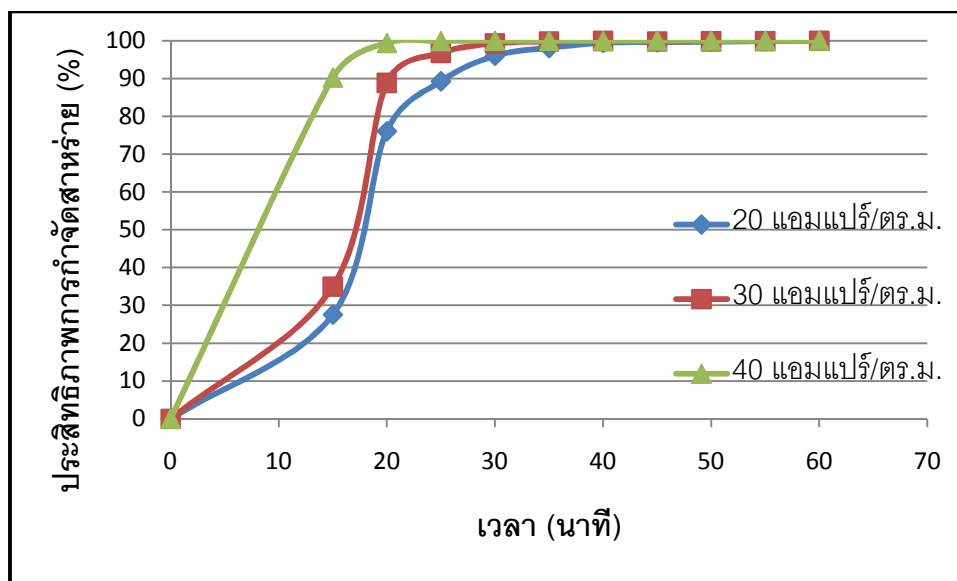
#### 4.2 ศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมกลไกการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox reaction) และอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าในการเดินระบบ การใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงเป็นการเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน—รีดักชัน ซึ่งเป็นประโยชน์ในด้านการออกแบบระบบ ทำให้ระบบมีขนาดเล็กและลดระยะเวลาในการบำบัด (Ricodel และคณะ, 2010) แต่การใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่สูงเกินไป ส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าไปในรูปพลังงานความร้อน (Chen และคณะ, 2004) ดังนั้นการเลือกความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม จึงควรพิจารณาถึงคุณสมบัติของน้ำหลังการบำบัดที่ต้องการและค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ

การทดลองนี้จึงเป็นการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าด้วยขั้วอิเล็กโทรดชนิดอะลูมิเนียม—แกรไฟต์ โดยแปรผันความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่วง 20-40 แอมแปร์/ตร.ม. ใช้น้ำสาหร่ายสังเคราะห์ความเข้มข้น  $10^5$  เซลล์/ลิตร ที่มีพีเอช 7 ในการเดินระบบ และทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดทุก 5 นาที เป็นระยะเวลา 60 นาที

ผลการเดินระบบโดยแปรผันความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (รูปที่ 4.16) พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการเดินระบบ (0-25 นาที) และเพิ่มสูงขึ้นจนสามารถกำจัดสาหร่ายทั้งหมดจากน้ำ เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์/ตร.ม. ในการเดินระบบ จะต้องใช้ระยะเวลาในการเดินระบบถึง 60 นาที จึงสามารถกำจัดสาหร่ายทั้งหมดจากน้ำ ในขณะที่เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 30 และ 40 แอมแปร์/ตร.ม. จะต้องการระยะเวลาในการเดินระบบเพียง 40 และ 25 นาที ตามลำดับ สำหรับการกำจัดสาหร่ายทั้งหมดจากน้ำ กล่าวคือ ยิ่งใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงในการเดินระบบ จะยิ่งเป็นการลดระยะเวลาในการบำบัดให้สั้นลง แต่ยังคงมีประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายเท่าเดิม

ปริมาณการร่อนตัวของขั้วอะลูมิเนียมเป็นอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ( $Al^{3+}$ ) ลงสู่น้ำ ดังปฏิกิริยาที่ (4-1) จะเพิ่มขึ้น เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาในการเดินระบบสูงขึ้นซึ่งเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ดังสมการที่ (4-17) อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เป็นสารสร้างตะกอนที่มีคุณภาพสูง ความเข้มข้นของอะลูมิเนียมในน้ำที่สูงขึ้นนั้น แสดงถึงการมีพื้นที่ผิวสัมผัสของสารสร้างตะกอนเพิ่มขึ้น กล่าวคือ เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำลายเสถียรภาพของสาหร่ายและก่อให้เกิดการรวมตัวเป็นฟล็อกขึ้นในที่สุด

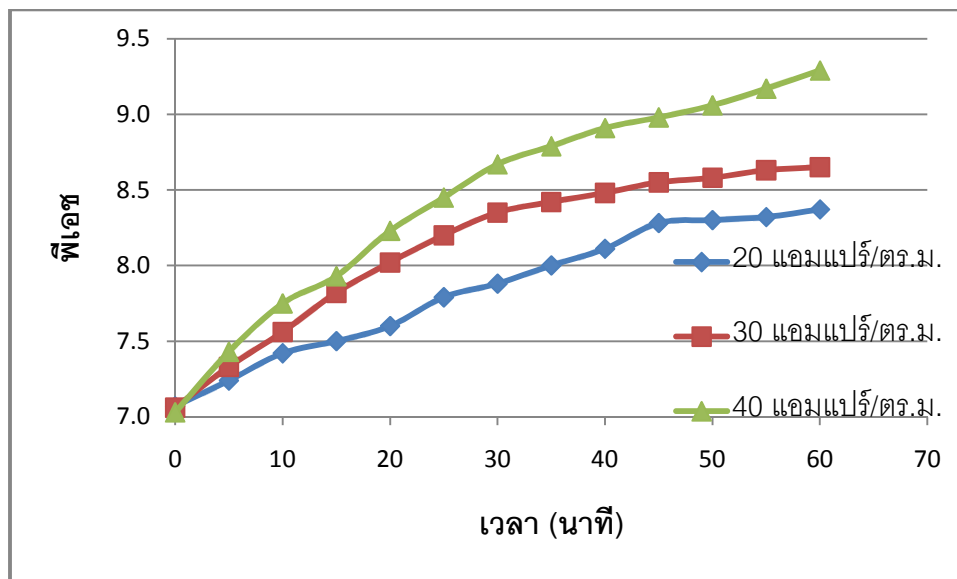


รูปที่ 4.16 ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20-40 แอมแปร์/ตร.ม.

จากผลการวิจัยของ Mollah และคณะ (2004) พบว่าเมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงเพียงพอ ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่บริเวณขั้วแอโนดสามารถผลิตฟองก๊าซออกซิเจนดังปฏิกิริยาที่ (4-18) และปฏิกิริยารีดักชันที่บริเวณขั้วแคโทดสามารถผลิตฟองก๊าซไฮโดรเจนดังสมการที่ (4-2) โดยเมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น อัตราการผลิตฟองก๊าซจะเพิ่มขึ้นและฟองก๊าซมีขนาดเล็กลง ส่งผลให้กระบวนการทำให้ลอยมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ฟล็อกของสาหร่ายจึงถูกทำให้ลอยขึ้นสู่น้ำได้อย่างรวดเร็ว (Kobyta และคณะ, 2009) เกิดการสะสมเป็นชั้นตะกอนลอยบริเวณผิวน้ำ



นอกจากนี้ พีเอชของน้ำยังเกิดการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการเดินระบบ โดยพีเอชของน้ำจะมีค่าสูงขึ้นตามระยะเวลาในการเดินระบบและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นดังรูปที่ 4.17 ที่ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายทั้งหมดจากน้ำ พบว่าพีเอชของน้ำหลังการบำบัดมีค่า 8.37 8.48 และ 8.45 เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 30 และ 40 แอมแปร์/ตร.ม. ตามลำดับ ซึ่งพีเอชของน้ำหลังการบำบัดทุกความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าผ่านเกณฑ์มาตรฐานขององค์การอนามัยโลก (6.5-9.5) (WHO, 2008) พีเอชที่เพิ่มขึ้นขณะเดินระบบนั้น มีสาเหตุหลักมาจากปฏิกิริยารีดักชันที่บริเวณขั้วแคโทด ดังสมการที่ (4-2) ซึ่งเกิดการผลิตก๊าซไฮโดรเจนและไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ )



รูปที่ 4.17 พีเอชในระหว่างการเดินระบบด้วยขั้วอะลูมิเนียม—ขั้วแกรไฟต์ ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20-40 แอมแปร์/ตร.ม.

ไฮดรอกไซด์ไอออนที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาในการเดินระบบนั้น จะสะสมอยู่ในน้ำ จึงเป็นผลให้พีเอชของน้ำมีค่าสูงขึ้น (Mouedhen และคณะ, 2008)

ความต้องการพลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพเชิงกระแสของระบบมีค่าสูงขึ้น เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น โดยเมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 30 และ 40 แอมแปร์/ตร.ม. ในการเดินระบบเพื่อให้มีประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายร้อยละ 99 พบว่าต้องใช้ค่าพลังงานไฟฟ้า 1.22 1.92 และ 2.01 กิโลวัตต์ชั่วโมง/ลบ.ม. ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพเชิงกระแสร้อยละ 116.3 147.0 และ 154.2 ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.4 กล่าวคือ เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น จะส่งผลให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าในระบบมีค่าสูงขึ้นดังรูปที่ 4.18 ดังนั้นอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าจึงมีค่าสูงขึ้นตามสมการที่ (4-7) และการเดินระบบด้วยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูง ยังเป็นการเพิ่มอัตราการร่อนตัวของขั้วอะลูมิเนียม น้ำหนักของขั้วอะลูมิเนียมที่วัดได้หลังการทดลองจึงมีค่าลดลง ซึ่งแปรผกผันกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้น ประสิทธิภาพเชิงกระแสซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (4-16) จึงมีค่าสูงขึ้น (Tezcan Un และคณะ, 2009)

ดังนั้นความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์/ตร.ม. จึงมีความเหมาะสมสำหรับใช้กำจัดสาหร่ายจากน้ำโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยพิจารณาจากประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย พีเอชของน้ำหลังการบำบัด และค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ

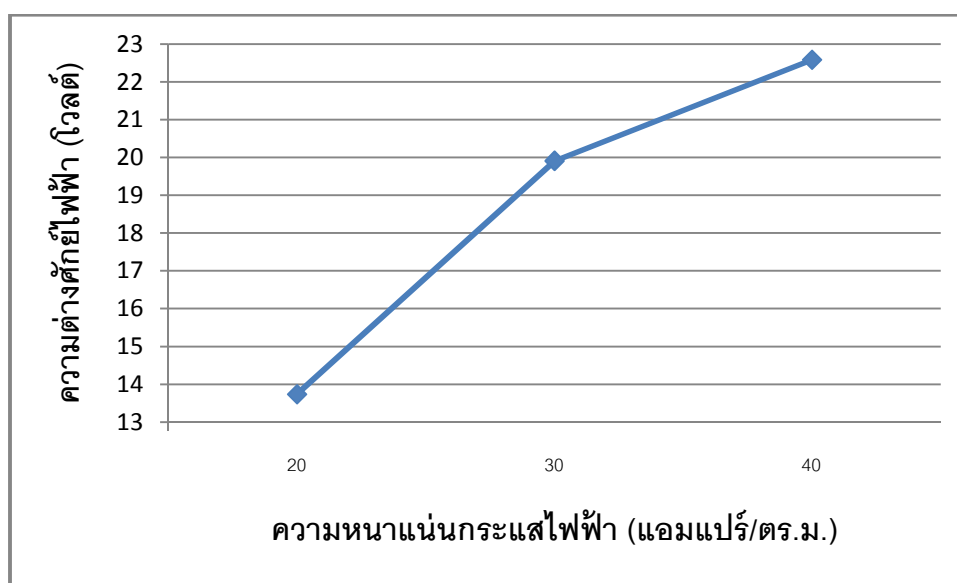
ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองการกำจัดสาหร่ายด้วยขี้เถ้าเกล็ดโทรตชนิดอะลูมิเนียม—แกรไฟต์ ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20-40 แอมแปร์/ตร.ม.

พารามิเตอร์	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์/ตร.ม.)		
	20	30	40
ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	99.4	99.3	99.4
ระยะเวลาในการเดินระบบ (นาที)	40	30	20
ประสิทธิภาพเชิงกระแส (%)	116.3	147.0	154.2
พีเอชของน้ำหลังการบำบัด	8.11	8.35	8.23
ขี้เถ้าอะลูมิเนียมก่อนตัว (กรัม)	0.52 (0.0398 บาท) <sup>กข</sup>	0.74 (0.0566 บาท) <sup>กข</sup>	0.69 (0.0528 บาท) <sup>กข</sup>
ค่าพลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์ชั่วโมง/ลบ.ม.)	1.22 (2.0352 บาท) <sup>ก</sup>	1.92 (3.1987 บาท) <sup>ก</sup>	2.01 (3.3487 บาท) <sup>ก</sup>
ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ (บาท/ลบ.ม.)	4.6885	6.9717	6.8687

<sup>ก</sup> อะลูมิเนียมราคา 2,534.50 ดอลลาร์สหรัฐ/ตัน (London Metal Exchange, 2011: online)

<sup>ข</sup> อัตราแลกเปลี่ยน 30.1651 บาท/ดอลลาร์สหรัฐ (ธนาคารแห่งประเทศไทย, 2554: ออนไลน์)

<sup>ค</sup> ค่าพลังงานไฟฟ้า 1.6660 บาท/หน่วย (ประเภทที่ 4 กิจการขนาดใหญ่) (การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2554: ออนไลน์)



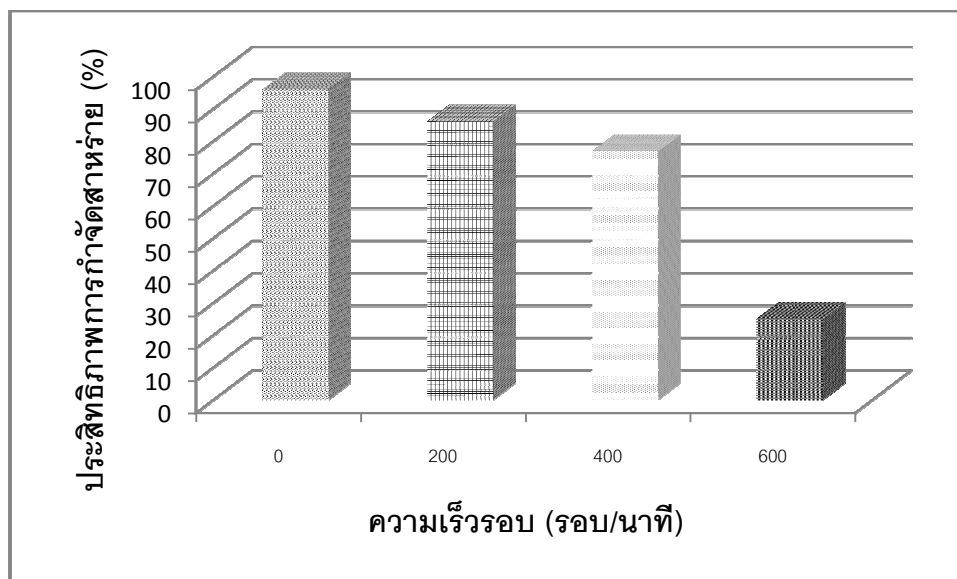
รูปที่ 4.18 ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20-40 แอมแปร์/ตร.ม.

#### 4.3 ศึกษาผลของอัตราการกวนผสมที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์

การกวนผสมเป็นการเพิ่มการกระจายตัวของสารสร้างตะกอนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่บริเวณขั้วแอโนด ช่วยเพิ่มโอกาสในการทำลายเสถียรภาพสาหร่ายและสร้างสัมผัสให้กับสาหร่ายที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้ว ให้รวมตัวกันเป็นฟล็อก อย่างไรก็ตามการเพิ่มการกวนผสมเข้าสู่ระบบเป็นการเพิ่มการใช้พลังงานไฟฟ้า ดังนั้นหากสามารถลดขั้นตอนการกวนผสมในกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย จะทำให้ความต้องการพลังงานไฟฟ้าของระบบลดลง

งานวิจัยนี้จึงเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าด้วยขั้วอิเล็กโทรดชนิดอะลูมิเนียม—แกรไฟต์ โดยแปรผันอัตราการกวนผสมในช่วง 0-600 รอบ/นาที ใช้น้ำสาหร่ายสังเคราะห์ความเข้มข้น  $10^8$  เซลล์/ลิตร ที่มีพีเอช 7 ในการเดินระบบที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์/ตร.ม. และใช้ระยะเวลาในการเดินระบบ 30 นาที

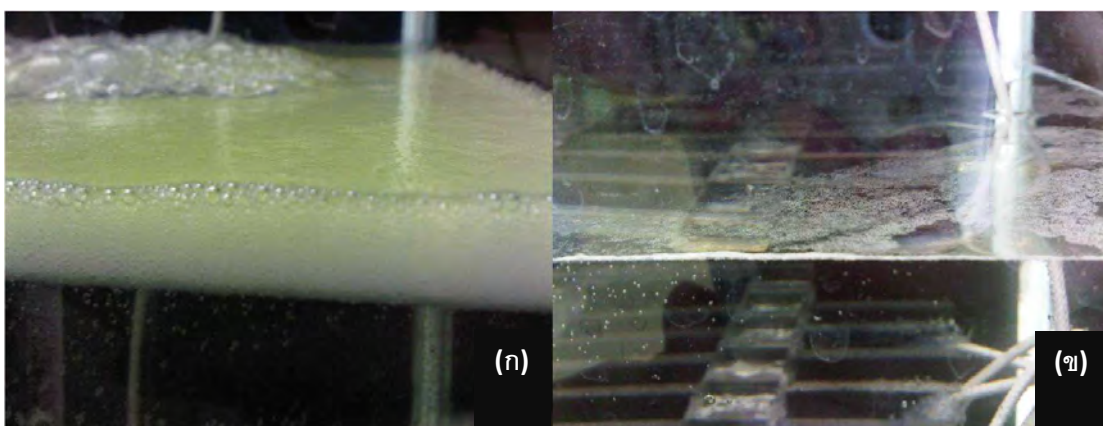
จากผลการทดลองการเดินระบบโดยแปรผันอัตราการกวนผสมในช่วง 0-600 รอบ/นาที พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายลดลงตามลำดับ เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการกวนผสมสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.19 โดยประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายลดลงจากร้อยละ 96.0 86.1 76.9 และ 25.1 เมื่ออัตราการกวนผสมเพิ่มขึ้นจาก 0 200 400 และ 600 รอบ/นาที ตามลำดับ งานวิจัยนี้จึงแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มการกวนผสมเข้าสู่ระบบนั้น มีผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายลดลง



รูปที่ 4.19 ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์ที่อัตราการกวนผสมต่างๆ

การกวนผสมภายในถังปฏิกริยาโดยที่ไม่มีการเพิ่มการกวนผสมจากภายนอก เกิดขึ้นจากปฏิกริยาอิเล็กโทรไลซิสของน้ำ ความปั่นป่วนเกิดจากการผลิตฟองก๊าซออกซิเจน ดังปฏิกริยาที่ (4-18) และฟองก๊าซไฮโดรเจน ดังปฏิกริยาที่ (4-2) และความหนาแน่นของน้ำที่แตกต่างกันซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างน้ำในบริเวณขั้วอิเล็กโทรดและน้ำในถังปฏิกริยา (น้ำบริเวณขั้วอิเล็กโทรดจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นจากการเป็นตัวกลางให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน) ดังนั้นการหมุนเวียนของน้ำจึงเกิดขึ้นในถังปฏิกริยา (Alfafara และคณะ, 2002)

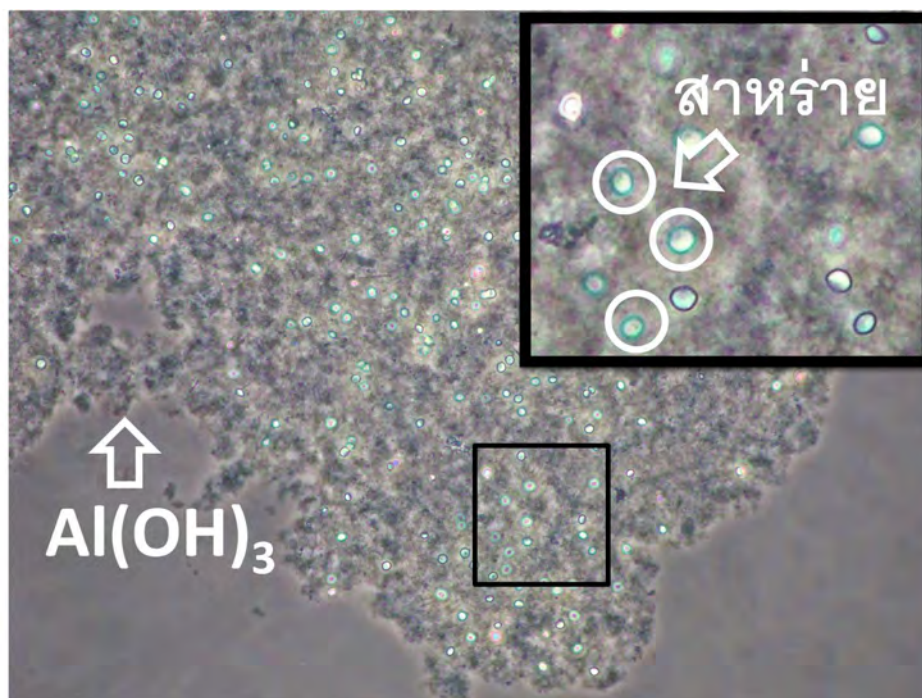
ในกรณีที่มีการเพิ่มการกวนผสมเข้าสู่ระบบพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายลดลง เนื่องจากการเพิ่มอัตราการกวนผสม จะยังเป็นการเพิ่มแรงเฉือน (Shear force) เข้าสู่ระบบ ซึ่งมีผลทำให้ฟองก๊าซขนาดเล็กกระจายอยู่ภายในถังปฏิกริยาไม่ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำในทันที ส่งผลให้ความสามารถในการแยกฟล็อกของสาหร่ายให้ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำลดลง กลุ่มฟล็อกของสาหร่ายจึงแขวนลอยอยู่ในน้ำ สังเกตได้จากชั้นของตะกอนลอยที่มีความหนาแน่นลดลงเมื่อมีการเพิ่มอัตราการกวนผสม ดังรูปที่ 4.20 และแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดสภาวะที่ไม่เหมาะสมในการสร้างฟล็อก และยังเป็นสาเหตุให้ฟล็อกเกิดการแตกตัว (Ilhan และคณะ, 2008) ผลการวิเคราะห์ลักษณะฟล็อกของสาหร่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์มีลักษณะดังรูปที่ 4.21 ดังนั้นอัตราการกวนผสมจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย โดยอัตราการกวนผสมที่เหมาะสมควรมีความสมดุลระหว่างประสิทธิภาพในการสร้างฟล็อกของสาหร่ายและประสิทธิภาพในการทำให้ลอยด้วยฟองก๊าซ จากการทดลองนี้พบว่าการกวนผสมจากปฏิกริยาอิเล็กโทรไลซิสเพียงอย่างเดียวมีความเหมาะสมในการกำจัดสาหร่ายทั้งในด้านประสิทธิภาพการกำจัดและการใช้พลังงาน



รูปที่ 4.20 ความหนาแน่นของชั้นตะกอนลอย

(ก) อัตราการกวนผสมที่ 0 รอบ/นาที (ข) อัตราการกวนผสมที่ 600 รอบ/นาที





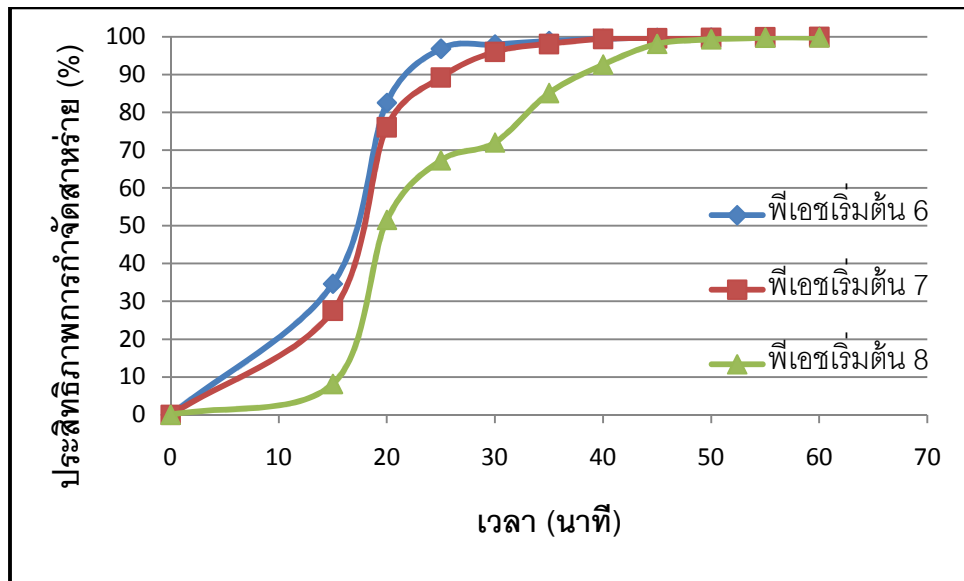
รูปที่ 4.21 พลัอกของสาหร่าย (วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 40 เท่า)

#### 4.4 ศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้นที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์

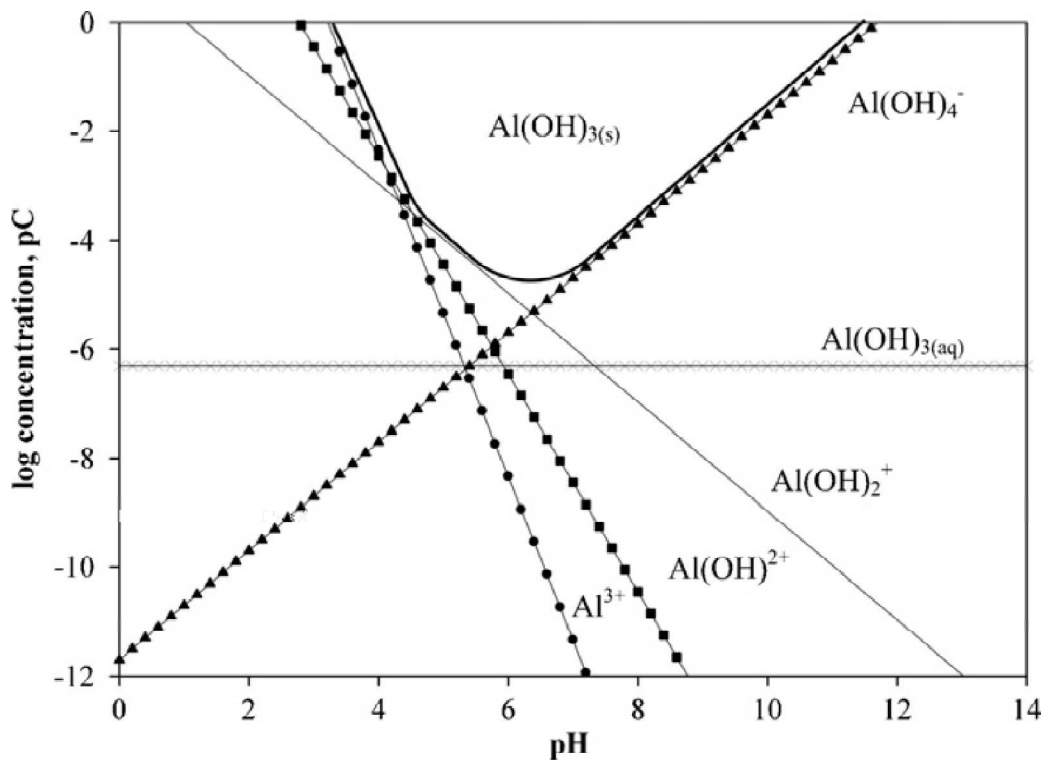
พีเอชของน้ำเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยเป็นปัจจัยที่กำหนดความเข้มข้นและชนิดของสารประกอบเชิงซ้อน ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Kiliç และคณะ, 2009) และมีศักยภาพในการทำลายเสถียรภาพสาหร่าย งานวิจัยนี้จึงเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าด้วยขั้วอิเล็กโทรดชนิดอะลูมิเนียม—แกรไฟต์ โดยแปรผันพีเอชเริ่มต้นของน้ำ ในช่วง 6-9 ใช้น้ำสาหร่ายสังเคราะห์ความเข้มข้น  $10^8$  เซลล์/ลิตร ในการเดินระบบที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์/ตร.ม. และใช้ระยะเวลาในการเดินระบบ 60 นาที

ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายเมื่อพีเอชเริ่มต้นของน้ำมีค่าเป็นกรด—กลาง (6-7) มีค่าสูงกว่าประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายเมื่อพีเอชเริ่มต้นของน้ำมีค่าเป็นด่าง (8) ดังรูปที่ 4.22 พบว่าที่ระยะเวลาในการเดินระบบ 30 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายมีค่าร้อยละ 98.0 96.0 และ 72.0 เมื่อเดินระบบด้วยพีเอชเริ่มต้น 6 7 และ 8 ตามลำดับ กล่าวคือ ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจะลดลงเมื่อเดินระบบด้วยพีเอชเริ่มต้นสูงขึ้น และเมื่อใช้ระยะเวลาในการเดินระบบ 60 นาที พบว่าการเดินระบบด้วยพีเอชเริ่มต้น 6 7 และ 8 สามารถกำจัดสาหร่ายทั้งหมดออกจากน้ำ

ชนิดและความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของอะลูมิเนียม จะแปรผันตามพีเอชของน้ำ ดังรูปที่ 4.23 พบว่า  $Al^{3+}$  จะมีความเข้มข้นสูงสุดเมื่อพีเอชของน้ำมีค่าต่ำกว่า 4



รูปที่ 4.22 ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูจากน้ำสารหนูสังเคราะห์ที่มีพีเอชเริ่มต้น 6-9



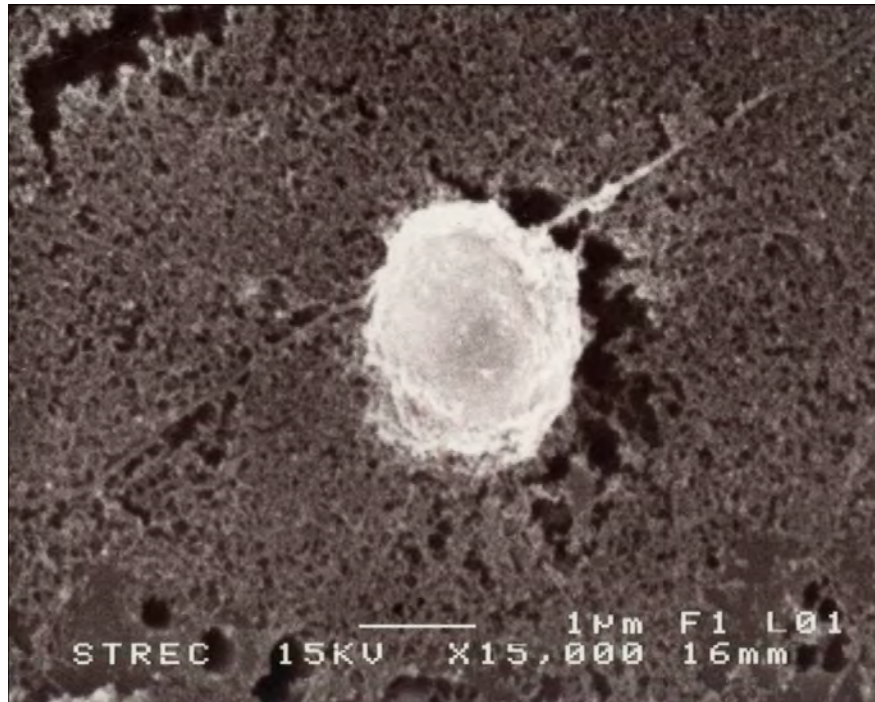
รูปที่ 4.23 แผนภูมิแสดงความสามารถในการละลาย (Solubility diagram) ของอะลูมิเนียม (Kiliç และคณะ, 2009)

และที่พีเอชของน้ำมีค่า 5-6 ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส คือ  $\text{Al(OH)}^{2+}$  และ  $\text{Al(OH)}_2^+$  ในส่วนของ  $\text{Al(OH)}_3$  พบว่าเกิดขึ้นมากในช่วงพีเอช 5.2-8.8 และที่พีเอชของน้ำมีค่าสูงกว่า 9 จะพบ  $\text{Al(OH)}_4^-$  เป็นผลิตภัณฑ์หลัก (Gomes และคณะ, 2007) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Carrier และคณะ (2007) พบว่า  $\text{Al(OH)}_3$  จะสามารถละลายตัวได้น้อยที่สุดในช่วงพีเอช 6-7

ที่สภาวะพีเอชของน้ำเป็นกรด—กลาง (6-7) พบว่า  $\text{Al(OH)}_3$  และไอออนคอมเพล็กซ์ซึ่งมีอะลูมิเนียมอะตอมเดี่ยวที่มีประจุบวก (Cationic monomeric specie) เช่น  $\text{Al(OH)}^{2+}$  และ  $\text{Al(OH)}_2^+$  รวมทั้งไอออนคอมเพล็กซ์ซึ่งมีอะลูมิเนียมหลายอะตอม (Polymeric specie) เช่น  $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$ ,  $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4+}$  และ  $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}$  เป็นผลิตภัณฑ์หลักจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ไอออนคอมเพล็กซ์เหล่านี้และผลึกที่มีประจุบวก (Positively charged precipitate) ซึ่งเกิดจาก  $\text{Al(OH)}_3$  ดูดซับไอออนคอมเพล็กซ์ที่มีประจุบวก สามารถทำลายเสถียรภาพสาหร่ายด้วยกลไกการทำลายประจุ (charge neutralization) กับสาหร่ายซึ่งมีประจุลบโดยการดูดติดผิวของสาหร่าย ดังรูปที่ 4.24 ทำให้สาหร่ายสูญเสียเสถียรภาพและพร้อมที่จะรวมตัวเป็นฟล็อก (Merzouk และคณะ, 2009; Gao และคณะ, 2010a)

ที่สภาวะพีเอชของน้ำเป็นด่างพบว่า  $\text{Al(OH)}_4^-$  เป็นผลิตภัณฑ์หลักจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งสามารถดูดซับกับ  $\text{Al(OH)}_3$  เกิดเป็นผลึกที่มีประจุลบ (Caizares และคณะ, 2006) ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการทำลายเสถียรภาพสาหร่ายลดลง ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำซึ่งมีพีเอชเริ่มต้น 8 จึงต่ำกว่าประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำที่มีพีเอชเริ่มต้น 6-7 แต่จากรูปที่ 4.22 กลับพบว่า เมื่อระยะเวลาในการเดินระบบเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายยังคงมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ ขั้วอะลูมิเนียมที่เกิดการกร่อนตัวตลอดระยะเวลาในการเดินระบบ ส่งผลให้มีปริมาณอะลูมิเนียมในระบบเพิ่มขึ้น ดังนั้นในสภาวะที่พีเอชและความเข้มข้นของอะลูมิเนียมเหมาะสม จะสามารถเกิดการทำลายเสถียรภาพสาหร่ายโดยกลไกตกตะกอนแบบกวาด (Sweep coagulation) โดยการเกิด  $\text{Al(OH)}_3$  ซึ่งสาหร่ายอาจเป็นแกนในของผลึกดังกล่าวรวมทั้งสาหร่ายที่แขวนลอยในน้ำสัมผัสกับ  $\text{Al(OH)}_3$  ที่ก่อตัวขึ้นในน้ำ ทำให้เกิดการยึดจับและถูกห่อหุ้มโดย  $\text{Al(OH)}_3$  และรวมตัวเป็นฟล็อก ดังรูปที่ 4.25

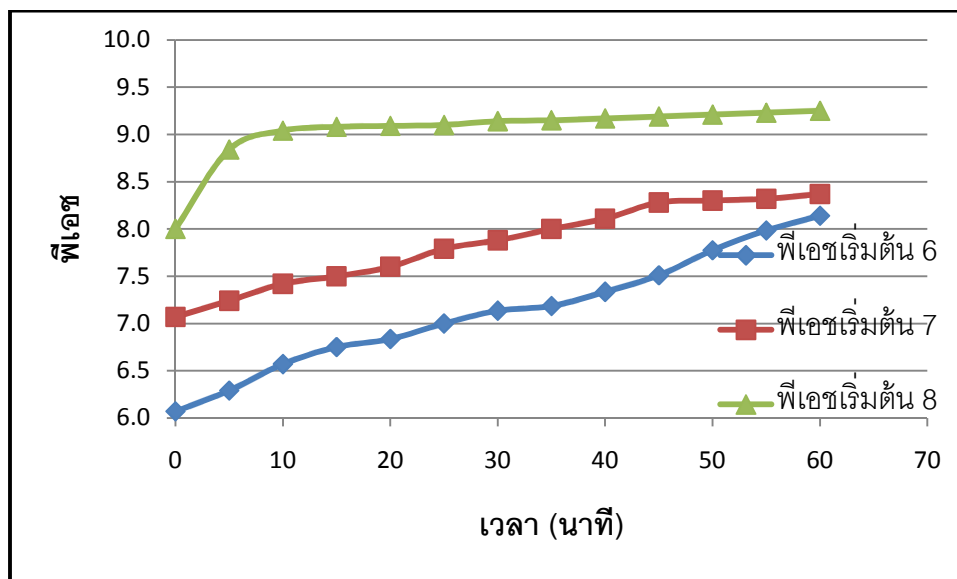
เมื่อระยะเวลาในการเดินระบบเพิ่มขึ้น ปริมาณ  $\text{OH}^-$  ในระบบจะมีปริมาณสูงขึ้น ส่งผลให้พีเอชของน้ำสูงขึ้นดังรูปที่ 4.26 ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยารีดักชันบริเวณขั้วแคโทด ดังสมการที่ 4-2 โดยเมื่อเดินระบบด้วยพีเอชเริ่มต้น 6 7 และ 8 พบว่าที่ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายทั้งหมดจากน้ำ พีเอชของน้ำหลังการบำบัดมีค่า 7.99 8.37 และ 9.25 ตามลำดับ ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานองค์การอนามัยโลก (WHO, 2008) พีเอชหลังการบำบัดของการเดินระบบด้วยพีเอชเริ่มต้น 8 มีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 10 นาที แรกของปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิส หลังช่วงเวลาดังกล่าวพีเอชของน้ำหลังการบำบัดจะสูงขึ้นอีกเพียงเล็กน้อย อยู่ในช่วง 9.10-9.25 เนื่องจากเมื่อพีเอชของน้ำสูงกว่า



รูปที่ 4.24 ผลึกที่มีประจุบวกดูดติดผิวสำหรับถ่ายผ่านกลไกการทำลายประจุ  
(วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 15,000 เท่า)

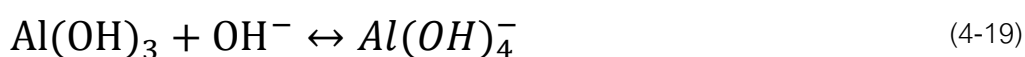


รูปที่ 4.25 สำหรับถ่ายห่อหุ้มด้วยอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ผ่านกลไกการตกตะกอนแบบกวาด  
(วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 15,000 เท่า)



รูปที่ 4.26 พีเอชในระหว่างการเดินระบบด้วยขั้วอะลูมิเนียม—ขั้วแกรไฟต์ ที่พีเอชเริ่มต้น 6-8

$Al(OH)_4^-$  จะเป็นผลิตภัณฑ์หลักจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Gomes และคณะ, 2007) ซึ่งการสลาย  $Al(OH)_4^-$  จำเป็นต้องใช้  $OH^-$  ในระบบดังกล่าวที่ (4-19) ส่งผลให้พีเอชของระบบมีค่าค่อนข้างคงที่ ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ต้องการในการกำจัดสาหร่ายทั้งหมดจากน้ำของการเดินระบบด้วยพีเอชเริ่มต้น 6 7 และ 8 คือ 1.66 1.85 และ 1.87 กิโลวัตต์ชั่วโมง/ลบ.ม. ตามลำดับ กล่าวคือพีเอชเริ่มต้นของน้ำในช่วง 6-8 ไม่ส่งผลกระทบต่อความต้องการพลังงานไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญ



พีเอชเริ่มต้นของน้ำที่อยู่ในสภาวะเป็นกรด—กลาง สามารถให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายได้สูงกว่าการเดินระบบด้วยพีเอชเริ่มต้นของน้ำเป็นด่าง ดังนั้น พีเอชเริ่มต้น 7 จึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการทดลองต่อไป โดยพิจารณาจากประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายและคุณสมบัติของน้ำรีไซเคิลซึ่งมีพีเอชประมาณ 7 ทำให้ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการปรับพีเอชเริ่มต้น

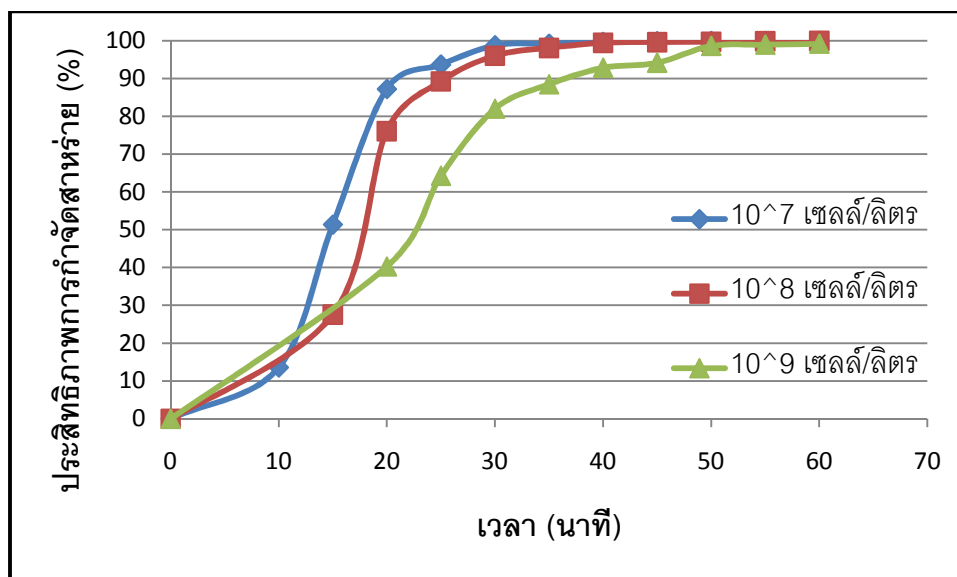
#### 4.5 ศึกษาผลของความเข้มข้นสาหร่ายที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์

ความหลากหลายของฤดูกาลมีบทบาทสำคัญต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย เนื่องจากอุณหภูมิและความอุดมสมบูรณ์ของธาตุอาหาร เป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดความเข้มข้น



สำหรับในน้ำ ความเข้มข้นสารห่วยจึงแปรผันตามฤดูกาลที่เปลี่ยนแปลง งานวิจัยนี้จึงเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารห่วยโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าด้วยขั้วอิเล็กโทรดชนิดอะลูมิเนียม—แกรไฟต์ โดยแปรผันความเข้มข้นน้ำสารห่วยสังเคราะห์ในช่วง  $10^7$ - $10^9$  เซลล์/ลิตร ที่มีพีเอช 7 เติมน้ำที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์/ตร.ม. และใช้ระยะเวลาในการเดินระบบ 60 นาที

ความเข้มข้นสารห่วยเริ่มต้นที่เปลี่ยนแปลง ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารห่วย ดังรูปที่ 4.27 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารห่วยสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาในการเดินระบบสูงขึ้น ที่ความเข้มข้นสารห่วยเริ่มต้น  $10^7$  เซลล์/ลิตร ต้องการระยะเวลาในการเดินระบบ 50 นาที จึงสามารถกำจัดสารห่วยทั้งหมดจากน้ำ แต่เมื่อความเข้มข้นของสารห่วยเริ่มต้นเพิ่มเป็น  $10^8$  เซลล์/ลิตร ต้องการระยะเวลาในการเดินระบบถึง 60 นาที จึงสามารถกำจัดสารห่วยทั้งหมดได้ และที่เวลาเดียวกันนี้ การเดินระบบด้วยความเข้มข้นสารห่วยเริ่มต้น  $10^9$  เซลล์/ลิตร พบว่า มีประสิทธิภาพการกำจัดสารห่วยเพียงร้อยละ 99.2 ประสิทธิภาพการกำจัดสารห่วยที่ลดลงตามความเข้มข้นของสารห่วยที่เพิ่มขึ้นนั้น สามารถอธิบายได้จากกฎของฟาราเดย์ ดังสมการที่ (4-17) ปริมาณสารสร้างตะกอนที่เกิดขึ้นจากการกร่อนตัวของขั้วอะลูมิเนียม (Aluminum dissolution) ถูกกำหนดโดยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาในการเดินระบบ ดังนั้นการเดินระบบที่มีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาเท่ากัน ส่งผลให้มีสารสร้างตะกอนปริมาณเท่ากันในระบบ ซึ่งพบว่าเพียงพอในการทำลายเสถียรภาพสารห่วยทั้งหมดจากน้ำที่มีความเข้มข้นสารห่วย



รูปที่ 4.27 ประสิทธิภาพการกำจัดสารห่วยจากน้ำสารห่วยสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นสารห่วย  $10^7$ - $10^9$  เซลล์/ลิตร

เริ่มต้น  $10^7$ - $10^8$  เซลล์/ลิตร ภายในระยะเวลาในการเดินระบบ 60 นาที เท่านั้น แต่ที่ความเข้มข้นสำหรับเริ่มต้น  $10^9$  เซลล์/ลิตร พบว่าปริมาณสารสร้างตะกอนที่เกิดขึ้นยังมีปริมาณน้อยเกินกว่าจะทำลายเสถียรภาพสาหร่ายทั้งหมด ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Merzouk และคณะ (2009) และ Ghosh และคณะ (2010)

ทำการเปรียบเทียบสัดส่วนระหว่างปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ที่ลดลง (สาหร่ายที่ถูกกำจัด) และปริมาณชีวอะลูมิเนียมก่อนตัวตามกฎของฟาราเดย์ (สมการที่ 4-17) ดังตารางที่ 4.5 และ 4.6 พบว่าในการเดินระบบด้วยน้ำสาหร่ายสังเคราะห์ความเข้มข้น  $10^7$   $10^8$  และ  $10^9$  เซลล์/ลิตร สัดส่วนระหว่างปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ที่ลดลงและปริมาณชีวอะลูมิเนียมก่อนตัว มีค่าสูงสุดที่ระยะเวลาในการเดินระบบ 20 20 และ 30 นาที ตามลำดับ กล่าวคือ ในช่วงเวลาดังกล่าวเป็นช่วงที่ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ หรือสาหร่ายถูกกำจัดได้สูง โดยต้องการปริมาณสารสร้างตะกอนในการทำลายเสถียรภาพสาหร่ายต่ำ โดยอัตราการกำจัดสาหร่ายจะสูงขึ้นในช่วงแรกของการเดินระบบ จนกระทั่งถึงระยะเวลาในการเดินระบบประมาณ 30 นาที หลังจากช่วงเวลาดังกล่าวอัตราการกำจัดสาหร่ายเริ่มมีค่าลดลง

จากผลการทดลองสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการคาดคะเนประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายในแหล่งน้ำอื่นๆ โดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ทำการเก็บน้ำตัวอย่างจากแหล่งน้ำที่ต้องการเพื่อหาความเข้มข้นคลอโรฟิลล์ เอ หรือความเข้มข้นของสาหร่าย จากนั้นสามารถเทียบดูระยะเวลาที่ต้องการในการกำจัดสาหร่าย ดังตารางที่ 4.5 (คลอโรฟิลล์ เอ) และ 4.6 (ความเข้มข้นสาหร่าย) เมื่อทราบระยะเวลาที่ต้องการในการเดินระบบ จึงสามารถคาดคะเนค่าใช้จ่ายในการเดินระบบได้จากสมการที่ (4-7) และ (4-17) ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นสาหร่าย  $10^7$ - $10^9$  เซลล์/ลิตร

เวลา (นาที)	ชีวอะลูมิเนียม ก่อนตัว (กรัม)	ความเข้มข้นสาหร่าย $10^7$ เซลล์/ลิตร		ความเข้มข้นสาหร่าย $10^8$ เซลล์/ลิตร		ความเข้มข้นสาหร่าย $10^9$ เซลล์/ลิตร	
		คลอโรฟิลล์ เอ ที่ลดลง (mg/L)	คลอโรฟิลล์ เอ/ชีวอะลูมิเนียม (mg/L-g)	คลอโรฟิลล์ เอ ที่ลดลง (mg/L)	คลอโรฟิลล์ เอ/ชีวอะลูมิเนียม (mg/L-g)	คลอโรฟิลล์ เอ ที่ลดลง (mg/L)	คลอโรฟิลล์ เอ/ชีวอะลูมิเนียม (mg/L-g)
10	0.11	65	583	0	0	0	0
15	0.16	247	1,473	1,264	7,539	0	0
20	0.22	419	1,876	3,492	15,614	5,800	2,5931

ตารางที่ 4.5 (ต่อ)ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นสาหร่าย  $10^7$ - $10^9$  เซลล์/ลิตร

เวลา (นาทีก)	ข้าว อะลูมิเนียม กรองตัว (กรัม)	ความเข้มข้นสาหร่าย $10^7$ เซลล์/ลิตร		ความเข้มข้นสาหร่าย $10^8$ เซลล์/ลิตร		ความเข้มข้นสาหร่าย $10^9$ เซลล์/ลิตร	
		คลอโรฟิลล์ เอ ที่ ลดลง (mg/L)	คลอโรฟิลล์ เอ/ข้าว อะลูมิเนียม (mg/L-g)	คลอโรฟิลล์ เอ ที่ ลดลง (mg/L)	คลอโรฟิลล์ เอ/ข้าว อะลูมิเนียม (mg/L-g)	คลอโรฟิลล์ เอ ที่ลดลง (mg/L)	คลอโรฟิลล์ เอ/ข้าว อะลูมิเนียม (mg/L-g)
25	0.27	450	1,611	4,098	14,657	9,264	33,131
30	0.33	475	1,416	4,409	13,139	11,814	35,210
35	0.39	477	1,219	4,504	11,505	12,748	32,565
40	0.44	479	1,072	4,566	10,206	13,381	29,908
45	0.50	480	954	4,574	9,087	13,571	26,962
50	0.55	480	859	4,580	8,190	14,211	25,411
55	0.61	480	781	4,586	7,454	14,260	23,180
60	0.67	481	716	4,590	6,839	14,293	21,298

ตารางที่ 4.6 ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นสาหร่าย  $10^7$ - $10^9$  เซลล์/ลิตร (จำนวนเซลล์สาหร่ายเทียบจากร้อยละการกำจัดสาหร่ายในรูปคลอโรฟิลล์ เอ)

เวลา (นาทีก)	ข้าว อะลูมิเนียม กรองตัว (กรัม)	ความเข้มข้นสาหร่าย $10^7$ เซลล์/ลิตร		ความเข้มข้นสาหร่าย $10^8$ เซลล์/ลิตร		ความเข้มข้นสาหร่าย $10^9$ เซลล์/ลิตร	
		สาหร่าย ที่ถูก กำจัด (เซลล์ x $10^3$ )	สาหร่ายที่ถูก กำจัด/ข้าว อะลูมิเนียม (เซลล์ x $10^3$ / กรัม)	สาหร่าย ที่ถูก กำจัด (เซลล์ x $10^3$ )	สาหร่ายที่ถูก กำจัด/ข้าว อะลูมิเนียม (เซลล์ x $10^3$ / กรัม)	สาหร่ายที่ ถูกกำจัด (เซลล์ x $10^3$ )	สาหร่ายที่ถูก กำจัด/ข้าว อะลูมิเนียม (เซลล์ x $10^3$ / กรัม)
10	0.11	1,357	12,130	0	0	0	0
15	0.16	5,135	30,608	27,536	164,126	0	0
20	0.22	8,721	38,985	76,039	339,914	402,506	1,799,304
25	0.27	9,364	33,487	89,223	319,077	642,835	2,298,909
30	0.33	9,873	29,422	95,980	286,037	819,798	2,443,137
35	0.39	9,921	25,341	98,054	250,471	884,592	2,259,629



ตารางที่ 4.6 (ต่อ) ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นสาหร่าย  $10^7$ - $10^9$  เซลล์/ลิตร (จำนวนเซลล์สาหร่ายเทียบจากร้อยละการกำจัดสาหร่ายในรูปคลอโรฟิลล์ เอ)

เวลา (นาท)	ชีว อะลูมิเนียม กร่อนตัว (กรัม)	ความเข้มข้นสาหร่าย $10^7$ เซลล์/ลิตร		ความเข้มข้นสาหร่าย $10^8$ เซลล์/ลิตร		ความเข้มข้นสาหร่าย $10^9$ เซลล์/ลิตร	
		สาหร่าย ที่ถูก กำจัด (เซลล์ $\times$ $10^3$ )	สาหร่ายที่ถูก กำจัด/ชีว อะลูมิเนียม (เซลล์ $\times 10^3$ / กรัม)	สาหร่าย ที่ถูก กำจัด (เซลล์ $\times 10^3$ )	สาหร่ายที่ถูก กำจัด/ชีว อะลูมิเนียม (เซลล์ $\times 10^3$ / กรัม)	สาหร่ายที่ ถูกกำจัด (เซลล์ $\times 10^3$ )	สาหร่ายที่ถูก กำจัด/ชีว อะลูมิเนียม (เซลล์ $\times 10^3$ / กรัม)
40	0.44	9,969	22,281	99,411	222,195	928,470	2,075,249
45	0.50	9,985	19,837	99,573	197,829	941,660	1,870,871
50	0.55	9,990	17,863	99,711	178,292	986,081	1,763,213
55	0.61	9,992	16,243	99,835	162,285	989,481	1,608,448
60	0.67	9,995	14,893	99,924	148,895	991,771	1,477,823

ตารางที่ 4.7 ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบตามกฎของฟาราเดย์ (คุณสมบัติของน้ำและการควบคุมระบบแสดงดังตารางในภาคผนวก ก.1)

เวลา	ค่าพลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์ชั่วโมง/ลบ.ม.)	ชีวอะลูมิเนียมกร่อนตัว (กรัม)	ค่าใช้จ่ายในการ เดินระบบ <sup>ก</sup> (บาท/ลบ.ม.)
5	0.16	0.06	0.5446
10	0.31	0.11	1.0892
15	0.47	0.17	1.6339
20	0.62	0.22	2.1785
25	0.78	0.28	2.7231
30	0.93	0.34	3.2677
35	1.09	0.39	3.8124
40	1.25	0.45	4.3570
45	1.40	0.50	4.9016
50	1.56	0.56	5.4462
55	1.71	0.62	5.9909

ตารางที่ 4.7 (ต่อ) ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบตามกฎของฟาราเดย์ (คุณสมบัติขงน้ำและการควบคุมระบบแสดงดังตารางในภาคผนวก ก.1)

เวลา	ค่าพลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์ชั่วโมง/ลบ.ม.)	ขั้วอะลูมิเนียมกร่อนตัว (กรัม)	ค่าใช้จ่ายในการ เดินระบบ <sup>กขค</sup> (บาท/ลบ.ม.)
60	1.87	0.67	6.5355

<sup>ก</sup> อะลูมิเนียมราคา 2,534.50 ดอลลาร์สหรัฐ/ตัน (London Metal Exchange, 2011: online)

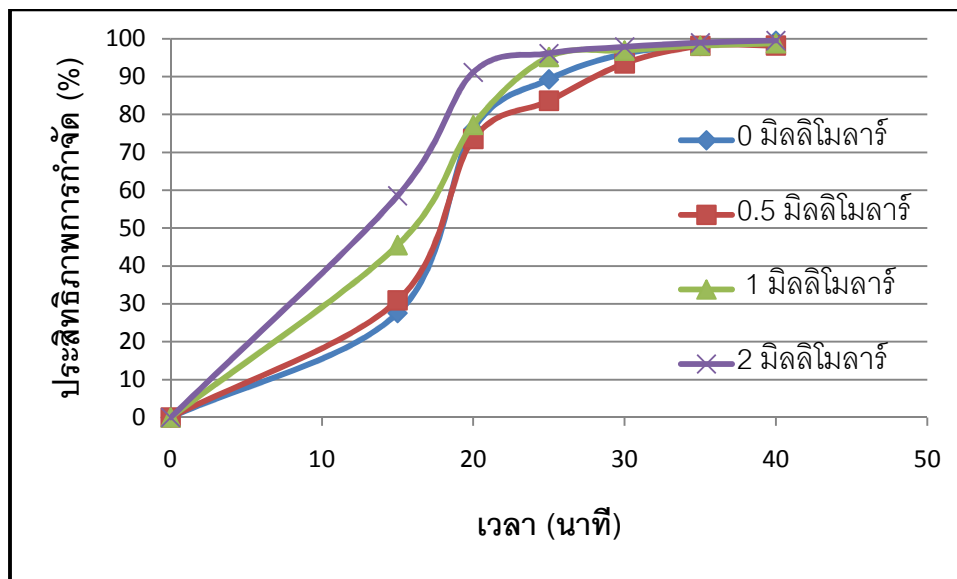
<sup>ข</sup> อัตราแลกเปลี่ยน 30.1651 บาท/ดอลลาร์สหรัฐ (ธนาคารแห่งประเทศไทย, 2554: ออนไลน์)

<sup>ค</sup> ค่าพลังงานไฟฟ้า 1.6660 บาท/หน่วย (ประเภทที่ 4 กิจการขนาดใหญ่) (การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2554: ออนไลน์)

#### 4.6 ศึกษาผลของการเติมโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์

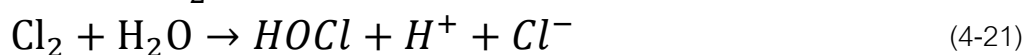
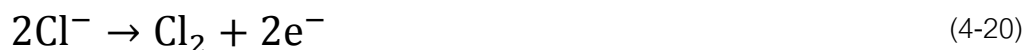
จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าคลอไรด์ไอออน (Cl<sup>-</sup>) มีส่วนช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดมลพิษต่างๆ ในน้ำโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า เช่น โลหะหนัก ฟลูออไรด์ น้ำมัน และสารมลพิษอื่นๆ และยังสามารถลดปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ต้องการในการเดินระบบ (Mouedhen และคณะ, 2008; Hu และคณะ, 2003; Trompette และคณะ, 2009; Arroyo และคณะ, 2009) เป็นผลให้ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบลดต่ำลง งานวิจัยนี้จึงเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าด้วยขั้วอิเล็กโทรดชนิดอะลูมิเนียม—แกรไฟต์ โดยแปรผันความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ในช่วง 0-2 มิลลิโมลาร์ ใช้น้ำสาหร่ายสังเคราะห์ความเข้มข้น 10<sup>8</sup> เซลล์/ลิตร ที่มีพีเอช 7 ในการเดินระบบที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์/ตร.ม. และใช้ระยะเวลาในการเดินระบบ 40 นาที

ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายสูงขึ้นตามลำดับ เมื่อระยะเวลาในการเดินระบบและความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์สูงขึ้น ดังรูปที่ 4.28 พบว่าเพียง 20 นาที แรกการเดินระบบ ที่ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 2 มิลลิโมลาร์ มีประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายสูงถึงร้อยละ 91.1 และที่ระยะเวลาในการเดินระบบ 40 นาที มีประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายร้อยละ 99.4 98.2 98.8 และ 99.5 เมื่อเดินระบบด้วยความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 0 0.5 1 และ 2 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ บ่งชี้ว่าการเติมโซเดียมคลอไรด์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายให้สูงขึ้นเพียง 30 นาที แรกของการเดินระบบ การกำจัดสาหร่ายเมื่อเดินระบบที่มีการเติมโซเดียมคลอไรด์สามารถแบ่งกลไกในการทำลายเสถียรภาพได้เป็น 2 แบบ คือ การทำลายเสถียรภาพด้วยสารสร้างตะกอนจากปฏิกิริยาออกซิเดชันบริเวณขั้วแอโนด ดังได้อธิบายในการทดลองที่ 4 และการทำให้สาหร่ายเสื่อมสภาพ (Inactivation) ด้วยคลอรีนอิสระที่เกิดจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ Cl<sup>-</sup> ในน้ำ ดังมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 4.28 ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์ที่มีการเติมโซเดียมคลอไรด์ 0-2 มิลลิโมลาร์

น้ำที่มีคลอไรด์ไอออน ( $\text{Cl}^-$ ) ปนเปื้อนในกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า สามารถผลิต ก๊าซคลอรีน ( $\text{Cl}_2$ ) จากปฏิกิริยาออกซิเดชันบริเวณขั้วแอโนด ดังสมการที่ (4-20)  $\text{Cl}_2$  ที่เกิดขึ้นจะ แตกตัวในน้ำทันที ได้ผลิตภัณฑ์เป็นคลอรีนอิสระ (Free available chlorine) ประกอบด้วยไฮโป คลอรัส ( $\text{HOCl}$ ) และไฮโปคลอไรต์ ( $\text{OCl}^-$ ) ดังปฏิกิริยาที่ (4-21) และ (4-22) (Yildiz และคณะ, 2008) ซึ่งเป็นสารฆ่าเชื้อโรค (Disinfectant) คุณภาพสูงที่ใช้ในระบบผลิตน้ำประปา สารประกอบ คลอรีนไม่เพียงสามารถกำจัดแบคทีเรียและสาหร่ายเท่านั้น แต่ยังสามารถทำปฏิกิริยากับสารที่ ก่อให้เกิดกลิ่นและรส เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ จุลินทรีย์ และสารประกอบอินทรีย์ (Organic compound) จากสาหร่าย (Shen และคณะ, 2011)

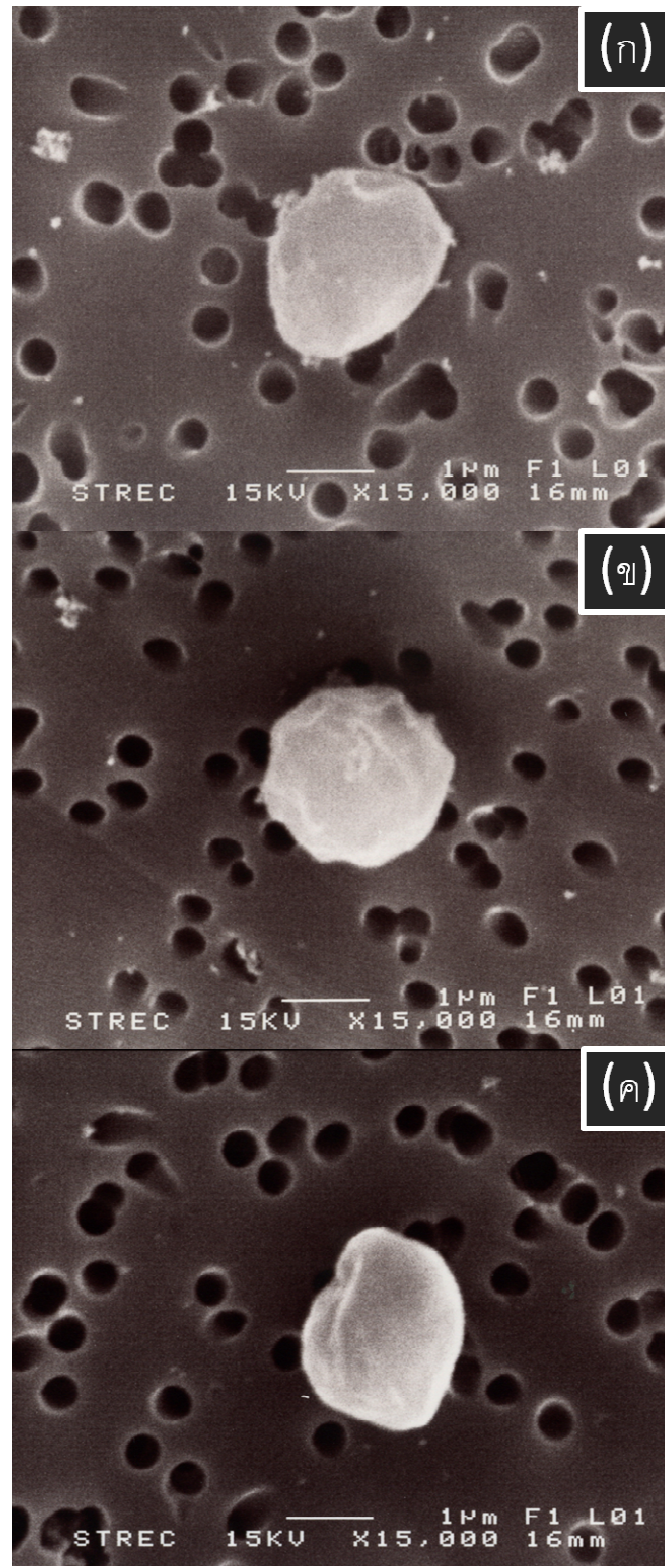


ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning electron microscope; SEM) แสดงให้ เห็นถึงรูปร่างและพื้นผิวของ *Chlorella vulgaris* โดยสาหร่ายที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการรวม ตะกอนด้วยไฟฟ้าจะมีรูปร่างกลม (Sphere) และมีพื้นผิวเรียบ (รูปที่ 4.29 (ก)) ในส่วนของสาหร่าย ที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยไม่มีการเติมโซเดียมคลอไรด์พบว่า

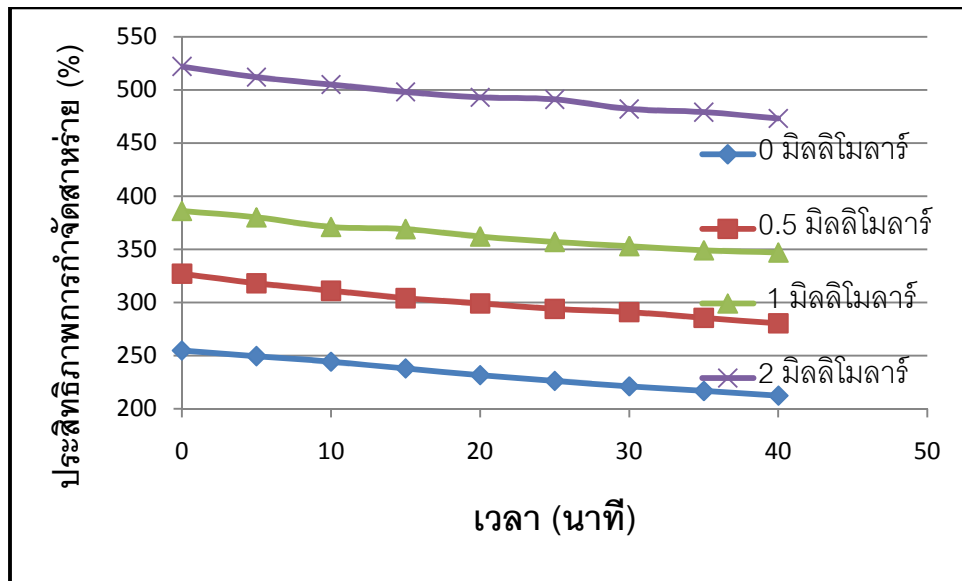
พื้นผิวของสาหร่ายเกิดรอยขรุขระแต่ไม่มีรอยแตกของเซลล์ (รูปที่ 4.29 (ข)) โดยอาจมีสาเหตุจากความต่างศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกันระหว่างภายในเซลล์สาหร่ายและนอกเซลล์สาหร่าย (Transmembrane potential) ก่อให้เกิดรูขึ้นชั่วคราวหรือถาวรบนพื้นผิวของสาหร่าย (Weaver และคณะ, 1996; Drees และคณะ, 2003) ดังนั้นสนามไฟฟ้าสามารถก่อให้เกิดความเสียหายแก่ผิวของสาหร่ายโดยที่ไม่ทำให้เซลล์แตกออก สำหรับในกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าที่มีการเติมโซเดียมคลอไรด์ 2 มิลลิโมลาร์ พบว่าผิวของสาหร่ายที่ผ่านการบำบัดได้รับความเสียหาย ผนังเซลล์มีการยุบตัวและโครงสร้างของสาหร่ายเกิดการเปลี่ยนแปลง (รูปที่ 4.29 (ค)) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากปฏิกิริยาของคลอรีนอิสระร่วมกับผลของสนามไฟฟ้าที่มีต่อสาหร่าย กล่าวคือ คลอรีนอิสระสามารถเข้าสู่ภายในเซลล์สาหร่ายผ่านรูที่เกิดขึ้นที่ผิวสาหร่ายขณะที่สาหร่ายสัมผัสกับสนามไฟฟ้า (Gao และคณะ, 2010b)

การเติมโซเดียมคลอไรด์เป็นการลดความต่างศักย์ไฟฟ้าในระบบ เนื่องจากความต้านทานของน้ำมีค่าต่ำลง (Essadki และคณะ, 2008) กล่าวคือ เป็นการลดค่าพลังงานไฟฟ้าในการเดินระบบ ดังรูปที่ 4.30 แสดงให้เห็นว่าความนำไฟฟ้าเริ่มต้นของน้ำมีค่า 254.9 327.0 386.0 และ 522 ไมโครซีเมนต์/ซม. เมื่อเติมโซเดียมคลอไรด์ 0 0.5 1 และ 2 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ ส่งผลให้มีความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่ระยะเวลาในการเดินระบบ 40 นาที คือ 1.22 1.05 0.87 และ 0.70 กิโลวัตต์ชั่วโมง/ลบ.ม. ตามลำดับ (รูปที่ 4.31) จากรายงานของ Ricordel และคณะ (2010) พบว่ากระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าสามารถกำจัดไอออนต่างๆ ในน้ำ เช่น คลอไรด์ แคลเซียม แมกนีเซียม ซัลเฟต ไนเตรท และฟอสฟอรัส ด้วยเหตุนี้ความนำไฟฟ้าของน้ำจึงมีค่าลดลงตามลำดับ ดังรูปที่ 4.30

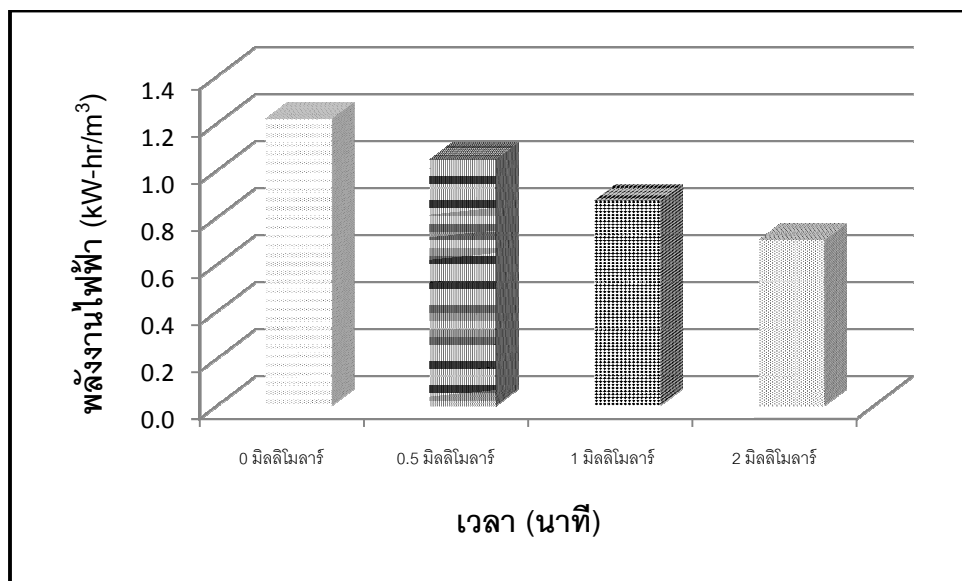
พีเอชของน้ำหลังการบำบัดที่เปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาในการเดินระบบ ที่มีการเติมโซเดียมคลอไรด์ในช่วง 0-2 มิลลิโมลาร์ ดังรูปที่ 4.32 พบว่าเมื่อเติมโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0-1 มิลลิโมลาร์ ปริมาณโซเดียมคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้น ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าพีเอชของน้ำอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ พีเอชของน้ำหลังการบำบัดมีค่าใกล้เคียงกันโดยพีเอชมีค่าสูงขึ้นตามลำดับ เมื่อระยะเวลาในการเดินระบบสูงขึ้น เป็นผลมาจากปริมาณ  $\text{OH}^-$  ที่สูงขึ้นจากปฏิกิริยารีดักชันบริเวณขั้วแคโทด ดังสมการที่ (4-2) ในส่วนของการเดินระบบด้วยความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 2 มิลลิโมลาร์ อัตราการเปลี่ยนแปลงของพีเอชมีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการเดินระบบด้วยความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ในช่วง 0-1 มิลลิโมลาร์ ปัจจัยที่ทำให้พีเอชของน้ำหลังการบำบัดเพิ่มสูงขึ้นนอกจาก  $\text{OH}^-$  ที่ผลิตจากขั้วแคโทดแล้ว จากรายงานของ Chen และคณะ (2000) พบว่าหากในน้ำมีไอออนบางชนิด เช่น  $\text{Cl}^-$  และ  $\text{SO}_4^{2-}$  ปนเปื้อนในปริมาณสูง ไอออนเหล่านี้สามารถแลกเปลี่ยนกับ  $\text{OH}^-$  ใน  $\text{Al}(\text{OH})_3$   $\text{OH}^-$  จึงละลายกลับสู่น้ำและเกิดการสะสมเพิ่มขึ้นในน้ำ ส่งผลให้พีเอชของน้ำหลังการบำบัดมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 4.29 ลักษณะโครงสร้างของสาหร่าย (ก) เซลล์สาหร่ายที่ยังไม่ผ่านการบำบัด  
 (ข) เซลล์สาหร่ายที่ผ่านการบำบัด (ค) เซลล์สาหร่ายที่ผ่านการบำบัดและเติมโซเดียมคลอไรด์  
 ความเข้มข้น 2 มิลลิโมลาร์ (วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 15,000 เท่า)

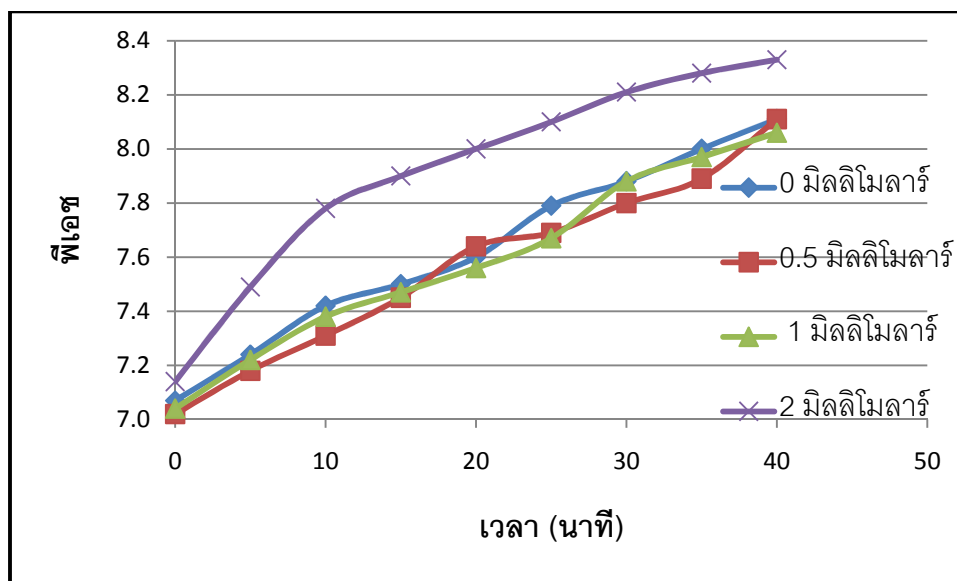


รูปที่ 4.30 ความนำไฟฟ้าของน้ำที่เติมโซเดียมคลอไรด์ 0-2 มิลลิโมลาร์



รูปที่ 4.31 ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ระยะเวลาในการเดินระบบ 40 นาที ที่ปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 0-2 มิลลิโมลาร์

อย่างไรก็ตาม กลไกการทำลายเสถียรภาพสาหร่ายด้วยสารสร้างตะกอนยังคงเป็นกลไกที่สำคัญในการกำจัดสาหร่ายจากน้ำ พิสูจน์ได้จากที่ระยะเวลาในการเดินระบบ 40 นาที ระบบที่เติมโซเดียมคลอไรด์ในช่วง 0.5-2 มิลลิโมลาร์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายใกล้เคียงกันที่ประมาณร้อยละ 99 และในการเดินระบบที่ไม่มีการเติมโซเดียมคลอไรด์ ที่ระยะเวลาในการเดิน



รูปที่ 4.32 พีเอชในระหว่างการเดินระบบด้วยหัวอะลูมิเนียม—หัวแกรไฟต์ ที่ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 0-2 มิลลิโมลาร์

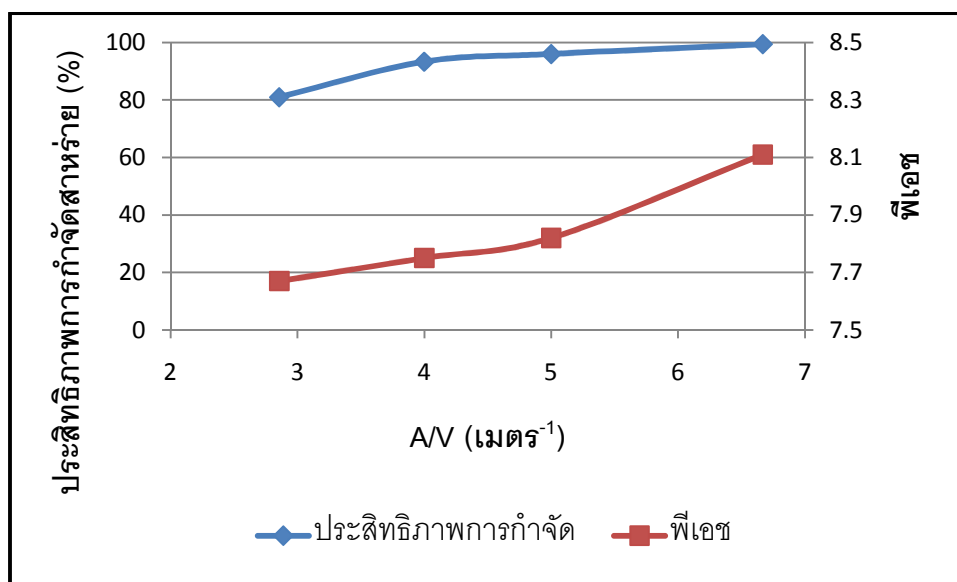
ระบบเท่ากันพบว่า มีประสิทธิภาพกำจัดสาหร่ายที่ประมาณร้อยละ 99 เช่นกัน ข้อดีของการเติมโซเดียมคลอไรด์นอกจากเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายในช่วงเริ่มต้นของปฏิบัติการอเล็กโทไลซิสแล้ว ยังช่วยในการลดค่าพลังงานไฟฟ้าในการเดินระบบ ดังนั้นการเดินระบบด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าที่ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 0.5 มิลลิโมลาร์ จึงมีความเหมาะสม โดยพิจารณาจากประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ต้องการ และ ความนำไฟฟ้าของน้ำหลังการบำบัดมีค่า 280 ไมโครซีเมนส์/ซม. ซึ่งใกล้เคียงกับน้ำประปาจากโรงผลิตน้ำประปา (300 ไมโครซีเมนส์/ซม.)

#### 4.7 ศึกษาผลของสัดส่วนระหว่างพื้นที่ทำปฏิกิริยาของหัวอิเล็กโทรดและปริมาณน้ำในถังปฏิบัติการ (AV) ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์

ผลกระทบของสัดส่วนระหว่างพื้นที่ทำปฏิกิริยาของหัวอิเล็กโทรดและปริมาณน้ำในถังปฏิบัติการ (AV) ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้ายังไม่สามารถสรุปได้แน่ชัด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าด้วยหัวอิเล็กโทรดชนิดอะลูมิเนียม—แกรไฟต์ โดยแปรผันสัดส่วนระหว่างพื้นที่ทำปฏิกิริยาของหัวอิเล็กโทรดและปริมาณน้ำในถังปฏิบัติการในช่วง 2.86-6.67 เมตร<sup>-1</sup> ใช้น้ำสาหร่ายสังเคราะห์ความเข้มข้น 10<sup>8</sup> เซลล์/ลิตร ที่มีพีเอช 7 และเติมโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์ ในการเดินระบบที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์/ตร.ม. และใช้ระยะเวลาในการเดินระบบ 40 นาที

จากรูปที่ 4.33 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายสูงขึ้นตามลำดับ เมื่อสัดส่วนระหว่างพื้นที่ทำปฏิกิริยาของขั้วอิเล็กโทรดและปริมาตรน้ำในถังปฏิกิริยา (AV) สูงขึ้น ที่ระยะเวลาในการเดินระบบ 40 นาที มีประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายร้อยละ 81.0 93.3 96.0 และ 99.4 เมื่อเดินระบบด้วย AV 2.86 4.00 5.00 และ 6.67 เมตร<sup>1</sup> ตามลำดับ ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายที่สูงขึ้นนั้น สัมพันธ์กับปริมาณของสารสร้างตะกอนที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน กล่าวคือ ความเข้มข้นของสารสร้างตะกอนในระบบจะสูงขึ้น เมื่อเดินระบบด้วย AV สูงขึ้น เนื่องจากเดินระบบโดยควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ทุกชุดการทดลอง ดังนั้นปริมาณสารสร้างตะกอนที่เกิดขึ้นจึงมีปริมาณเท่ากันซึ่งเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ ดังสมการที่ (4-17) เมื่อเดินระบบด้วย AV ต่ำ (ปริมาตรน้ำในถังปฏิกิริยาน้อยที่สุด) ส่งผลให้ปริมาณสารสร้างตะกอนที่เกิดขึ้นไม่เพียงพอต่อการทำลายเสถียรภาพสาหร่าย ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจึงลดลงซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ 4.5

พีเอชของน้ำหลังการบำบัดมีค่าสูงขึ้นตามลำดับ เมื่อเดินระบบด้วย AV สูงขึ้น ดังรูปที่ 4.33 พบว่าที่ระยะเวลาในการเดินระบบ 40 นาที พีเอชของน้ำหลังการบำบัดมีค่า 7.67 7.75 7.82 และ 8.11 เมื่อเดินระบบด้วย AV 2.86 4.00 5.00 และ 6.67 เมตร<sup>1</sup> ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณการผลิต OH<sup>-</sup> จากปฏิกิริยารีดักชันบริเวณขั้วแคโทดมีปริมาณคงที่ ดังนั้นในการเดินระบบด้วย AV ที่ 6.67 (ปริมาตรน้ำในถังปฏิกิริยาน้อยที่สุด) น้ำหลังการบำบัดจึงมีความเข้มข้นของ OH<sup>-</sup> สูงกว่าการเดินระบบด้วย AV อื่นๆ เป็นผลให้พีเอชของน้ำหลังการบำบัดมีค่าสูงที่สุด



รูปที่ 4.33 ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายและพีเอช ที่เดินระบบด้วย AV 2.86-6.67 เมตร<sup>-1</sup>



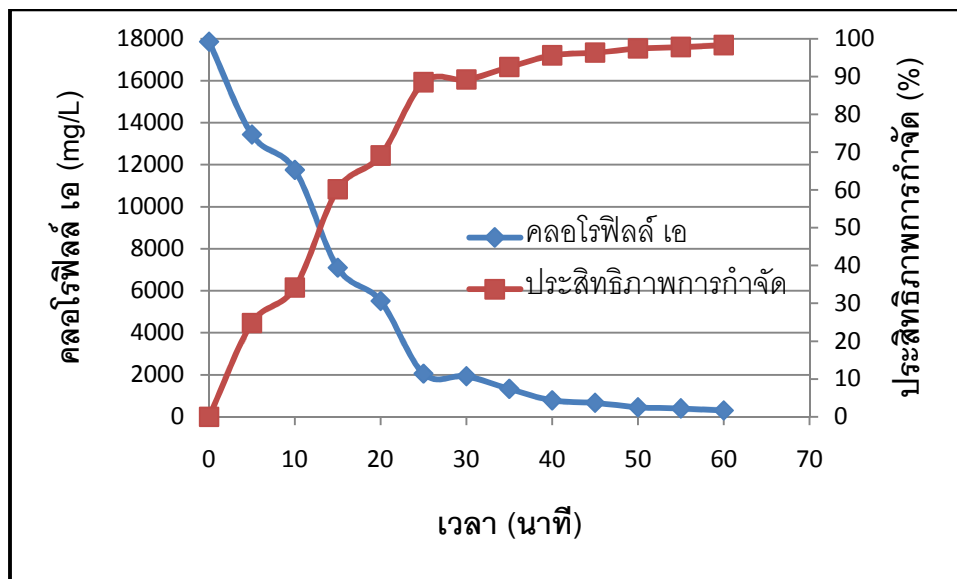
#### 4.8 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารรัยจากน้ำรีไซเคิลจากโรงผลิตน้ำประปา

เก็บตัวอย่างน้ำรีไซเคิลจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขน เมื่อวันที่ 7 มีนาคม 2554 โดยมีคุณสมบัติดังตารางที่ 4.8 มาใช้ในการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดสารรัยจากน้ำรีไซเคิลจากโรงผลิตน้ำประปา งานวิจัยนี้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารรัยโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าด้วยขั้วอิเล็กโทรดชนิดอะลูมิเนียม—แกรไฟต์ โดยใช้ น้ำรีไซเคิลที่มีพีเอช 7.55 และเติมโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์ ในการเดินระบบที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์/ตร.ม. และใช้ระยะเวลาในการเดินระบบ 60 นาที

ตารางที่ 4.8 คุณสมบัติของน้ำรีไซเคิลจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขน (7 มีนาคม 2554)

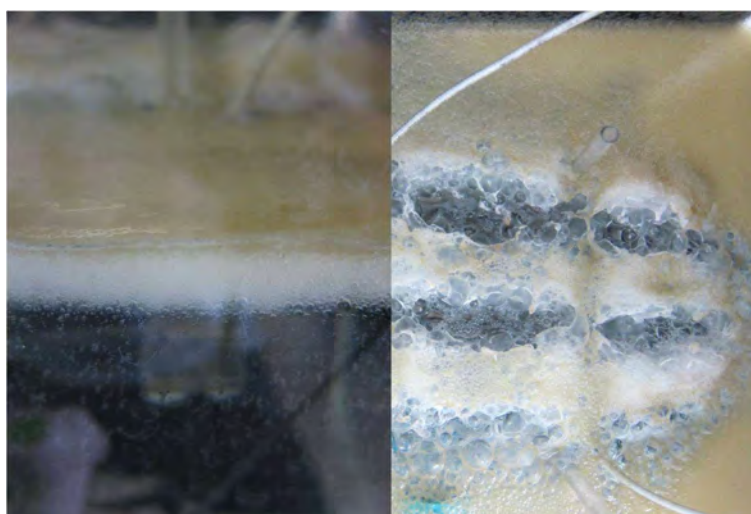
พารามิเตอร์	ลักษณะน้ำรีไซเคิล
อุณหภูมิ (°C)	28.4
พีเอช	7.55
คลอโรฟิลล์ เอ (mg/L)	17,854
ของแข็งแขวนลอย (mg/L)	15
ความนำไฟฟ้า ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	285.6
อะลูมิเนียมในน้ำ (mg/L)	0.44
ไตรฮาโลมีเทน (THMs)	
CHCl <sub>3</sub> (ppb)	5.01
CHBrCl <sub>2</sub> (ppb)	ตรวจไม่พบ
CHBr <sub>2</sub> Cl (ppb)	ตรวจไม่พบ
CHBr <sub>3</sub> (ppb)	ตรวจไม่พบ

ประสิทธิภาพการกำจัดสารรัยจากน้ำรีไซเคิลสูงขึ้นตามลำดับ เมื่อระยะเวลาในการเดินระบบสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.34 กล่าวคือ การลดลงของคลอโรฟิลล์ เอ แปรผันตามระยะเวลาในการเดินระบบที่สูงขึ้น โดยที่ระยะเวลาในการเดินระบบ 60 นาที มีประสิทธิภาพการกำจัดสารรัยร้อยละ 98.3 สารรัยในน้ำถูกทำลายเสถียรภาพจากการกร่อนตัวของขั้วแอโนด ซึ่งผลิต Al<sup>3+</sup> ลงสู่น้ำและเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในทันที สารประกอบเชิงซ้อนไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นเป็นสารสร้างตะกอนคุณภาพสูงสามารถทำลายเสถียรภาพสารรัยในน้ำ ส่งผลให้เกิดการรวมตัวเป็นฟล็อก ดังได้อธิบายในการทดลองที่ 4.4 นอกจากนี้สารรัยยังถูกทำให้เสื่อมสภาพจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของคลอรีนอิสระซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากก๊าซคลอรีนที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วแอโนด ดังได้อธิบายในการทดลองที่ 4.5



รูปที่ 4.34 คลอโรฟิลล์ เอ และประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำรีไซเคิล

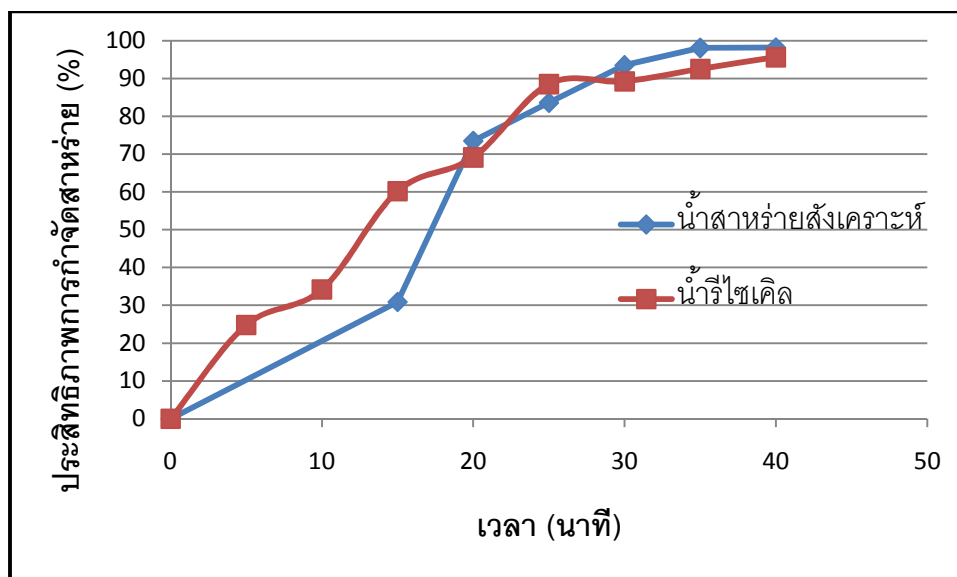
ในขณะเดียวกัน ฟองก๊าซออกซิเจนและไฮโดรเจนที่ผลิตขึ้นจากขั้วแอโนดและขั้วแคโทดตามลำดับ ดังปฏิกิริยาที่ (4-18) และ (4-2) จะยึดจับสาหร่ายที่สูญเสียเสถียรภาพลอยขึ้นสู่มิวน้ำ เกิดเป็นชั้นตะกอนลอยดังรูปที่ 4.35 และเมื่อเดินระบบไป 40 นาที พบว่าอัตราการเพิ่มของประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายมีค่าลดลง ในช่วงระยะเวลาในการเดินระบบ 40-60 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 2.7 ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์และน้ำรีไซเคิล โดยใช้ระยะเวลาในการเดินระบบ 40 นาที



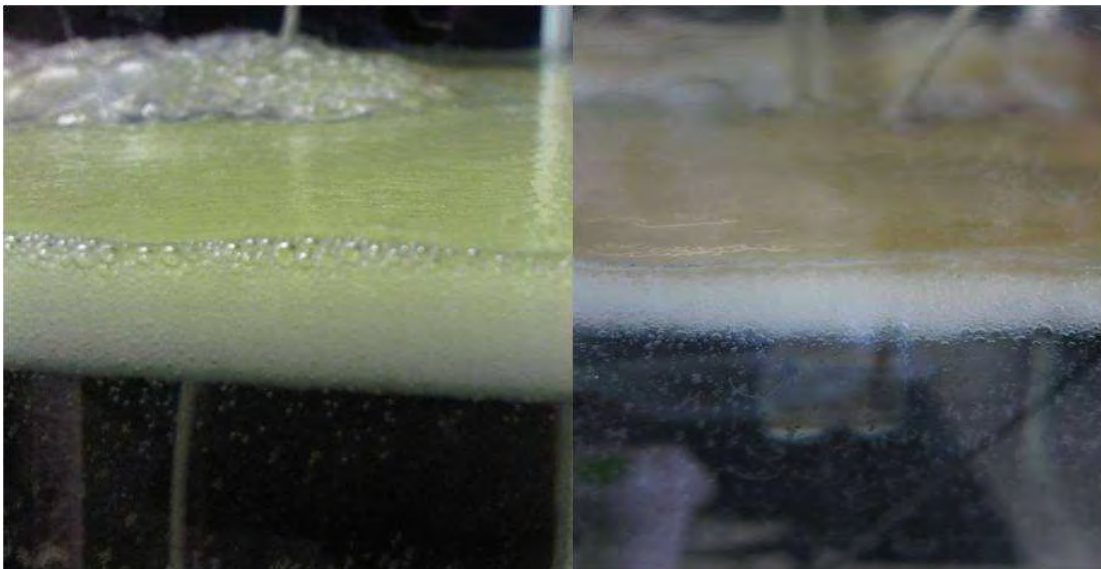
รูปที่ 4.35 ตะกอนลอยจากการกำจัดสาหร่ายจากน้ำรีไซเคิล

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์และน้ำรีไซเคิล ดังรูปที่ 4.36 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำทั้ง 2 ชนิด สูงขึ้นตามระยะเวลาในการเดินระบบที่สูงขึ้น โดยในช่วงเริ่มต้นของการเดินระบบ (0-15 นาที) พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำรีไซเคิลมีค่าสูงกว่าน้ำสาหร่ายสังเคราะห์ เนื่องจากน้ำรีไซเคิลมีการปนเปื้อนของแข็งแขวนลอย (Suspended solid; SS) จากรายงานของ Azarian และคณะ (2007) พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจะสูงขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสาหร่ายและ SS ของน้ำมีค่าสูงขึ้น กล่าวคือ ที่ความเข้มข้นสาหร่ายและ SS สูง สาหร่ายจะถูกทำลายเสถียรภาพและรวมตัวเป็นฟล็อกภายในระยะเวลาอันสั้น เนื่องจากเมื่อมีความเข้มข้นของสาหร่ายและ SS สูง จึงเป็นการเพิ่มโอกาสในการทำปฏิกิริยาของอนุภาค

ชั้นตะกอนลอยที่เกิดขึ้นในกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า เกิดจากการสะสมตัวของฟองก๊าซขนาดเล็กซึ่งยึดจับฟล็อกอยู่ที่ผิวของน้ำ จากรูปที่ 4.37 พบว่าสีของชั้นตะกอนลอยที่เกิดจากการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์และน้ำรีไซเคิลแตกต่างกัน โดยตะกอนลอยจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์และน้ำรีไซเคิล จะมีสีเขียวอ่อนจากสาหร่ายและสีน้ำตาลตามลำดับ สีน้ำตาลของตะกอนลอยจากการกำจัดสาหร่ายจากน้ำรีไซเคิลนั้น พิสูจน์ให้เห็นว่ากระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าสามารถกำจัดอนุภาคแขวนลอยต่างๆ ในน้ำ เช่น อนุภาคของดิน ซึ่งก่อให้เกิดสีน้ำตาลในตะกอนลอย โดยที่ระยะเวลาในการเดินระบบ 40 นาที พบว่ามีของแข็งแขวนลอยในน้ำคงเหลือ 12 มก./ลิตร หรือมีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยร้อยละ 20



รูปที่ 4.36 ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์และน้ำรีไซเคิล

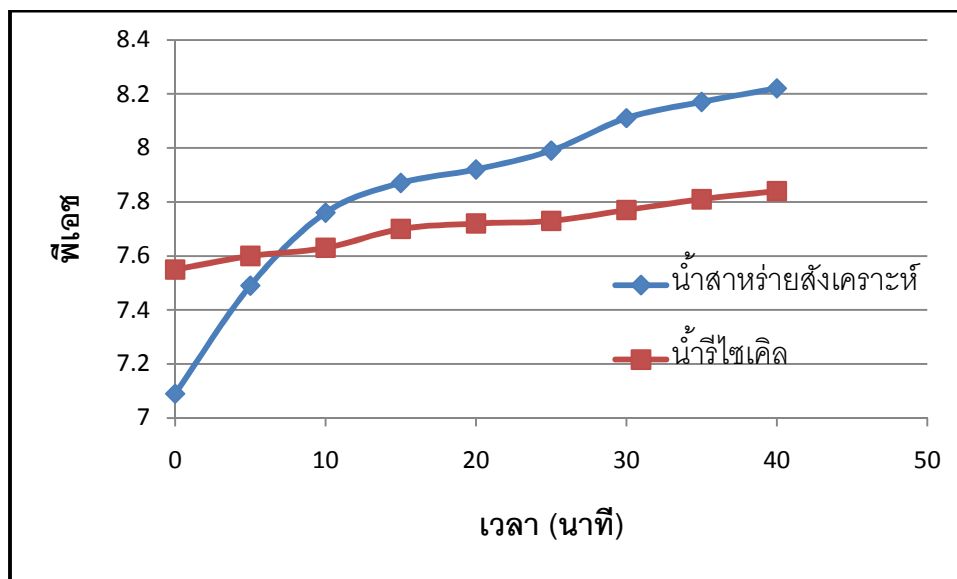


รูปที่ 4.37 ตะกอนลอยจากการกำจัดสาหร่ายจากน้ำ (ก) น้ำสาหร่ายสังเคราะห์ (ข) น้ำรีไซเคิล

การเปลี่ยนแปลงพีเอชของน้ำระหว่างการเดินระบบเป็นผลมาจากปฏิกิริยารีดอกซ์บริเวณขั้วแคโทด ดังสมการที่ (4-2)  $\text{OH}^-$  ถูกผลิตขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาในการเดินระบบ ดังนั้นพีเอชของน้ำหลังการบำบัดจึงมีค่าสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.38 พบว่าพีเอชของน้ำในระหว่างการเดินระบบด้วยน้ำสาหร่ายสังเคราะห์มีอัตราการเพิ่มสูงกว่าการเดินระบบด้วยน้ำรีไซเคิล กล่าวคือ น้ำรีไซเคิลมีความจุบัฟเฟอร์ (Buffer capacity) สูงกว่าน้ำประปาซึ่งใช้ในการเตรียมน้ำสาหร่ายสังเคราะห์ โดยพีเอชระหว่างการเดินระบบด้วยน้ำรีไซเคิลมีค่าสูงขึ้นเพียง 0.29 หน่วย และ 1.13 หน่วย สำหรับการเดินระบบด้วยน้ำสาหร่ายสังเคราะห์

คลอรีนอิสระจากปฏิกิริยาออกซิเดชันบริเวณขั้วแอโนดสามารถก่อให้เกิดสารพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรค (Disinfection by-products; DBPs) ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารอินทรีย์กับคลอรีนอิสระ จากผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas chromatography) พบว่าน้ำรีไซเคิลหลังการบำบัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าที่มีการเติมโซเดียมคลอไรด์ 0.5 มิลลิโมลาร์ ไม่ส่งผลให้  $\text{CHCl}_3$  ในน้ำมีค่าสูงขึ้น โดย  $\text{CHCl}_3$  ของน้ำหลังการบำบัดมีค่า 4.25 ไมโครกรัม/ลิตร ผ่านเกณฑ์มาตรฐานขององค์การอนามัยโลก (ต่ำกว่า 300 ไมโครกรัม/ลิตร) (WHO, 2008)

คุณสมบัติของน้ำหลังการบำบัดและค่าใช้จ่ายในการเดินระบบซึ่งประกอบด้วยปริมาณขั้วอะลูมิเนียมกร่อนตัว ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเดินระบบ และปริมาณการเติมโซเดียมคลอไรด์สรุปได้ดังตารางที่ 4.9 และจากงานวิจัยนี้ พบว่ากระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้ามีประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายสูงเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอื่นๆ แสดงดังตารางที่ 4.10



รูปที่ 4.38 พีเอชในระหว่างการเดินระบบด้วยน้ำสำหรับยาล้างเครื่องและน้ำรีไซเคิล

ตารางที่ 4.9 คุณสมบัติของน้ำรีไซเคิลหลังการบำบัดและค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ

พารามิเตอร์	น้ำหลังการบำบัด
ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย (%)	95.6
ประสิทธิภาพเชิงกระแส (%)	137
พีเอช	7.84
ซัลเฟตในน้ำ (กรัม)	0.61 (0.047 บาท) <sup>ก</sup>
อะลูมิเนียมในน้ำ (มก./ลิตร)	0.86
คลอโรฟอร์ม (CHCl <sub>3</sub> ) (ไมโครกรัม/ลิตร)	4.25
ค่าพลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์ชั่วโมง/ลบ.ม.)	0.91 (1.52 บาท) <sup>ข</sup>
โซเดียมคลอไรด์ (กรัม)	0.44 (3.81x10 <sup>-5</sup> บาท) <sup>ค</sup>
ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ/ลบ.ม. (บาท)	4.66

<sup>ก</sup> อะลูมิเนียมราคา 2,534.50 ดอลลาร์สหรัฐ/ตัน (London Metal Exchange, 2011: online)

<sup>ข</sup> อัตราแลกเปลี่ยน 30.1651 บาท/ดอลลาร์สหรัฐ (ธนาคารแห่งประเทศไทย, 2554: ออนไลน์)

<sup>ค</sup> ค่าพลังงานไฟฟ้า 1.6660 บาท/หน่วย (ประเภทที่ 4 กิจการขนาดใหญ่)  
(การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2554: ออนไลน์)

<sup>ง</sup> เกลือราคา 1,300 บาท/1.5 ตัน (กรมการค้าภายใน, 2554: ออนไลน์)

ตารางที่ 4.10 ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายของแต่ละกระบวนการ

กระบวนการ	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	ผู้วิจัย
กระบวนการตกตะกอนทางเคมีและกระบวนการ ตกตะกอน (Coagulation and sedimentation)	90.5	Zhao และคณะ (2010)
กระบวนการทำให้ลอย (Flotation)	28.5	พิชญ์ สงวนนวล (2543)
กระบวนการตกตะกอนทางเคมีและกระบวนการ ทำให้ลอย (Coagulation and flotation)	82.4	
กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation)	>99.9	การวิจัยนี้
กระบวนการทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า (Electroflotation)	50	Alfajara และคณะ (2002)

จากการทดลองสรุปได้ว่า กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่มีศักยภาพสูงในการกำจัดสาหร่ายจากน้ำ โดยที่ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายสูงสุดสามารถกำจัดสาหร่ายทั้งหมดจากน้ำ สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสาหร่ายที่ได้จากงานวิจัยนี้คือ การเดินระบบด้วยขั้วอิเล็กโทรดชนิดอะลูมิเนียม—แกรไฟต์ ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์/ตร.ม. ระยะเวลาในการเดินระบบ 40 นาที และเติมโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์ ที่สภาวะดังกล่าว มีประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำรีไซเคิลร้อยละ 95.6 พีเอชหลังการบำบัด 7.84 ต้องการค่าพลังงานไฟฟ้า 0.91 กิโลวัตต์ชั่วโมง/ลบ.ม. และมีค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ 4.66 บาท/ลบ.ม.

## บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาการนำน้ำรีไซเคิล (Recycled water) ซึ่งเป็นน้ำทิ้งจากโรงผลิตน้ำประปา เพื่อการนำมาใช้เป็นแหล่งน้ำดิบทดแทนแหล่งน้ำดิบจากธรรมชาติ โดยศึกษาถึงประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

5.1.1 ขั้วอิเล็กโทรดชนิดอะลูมิเนียม—แกรไฟต์ มีคุณสมบัติเหมาะสมในการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้ามากกว่าขั้วอิเล็กโทรดชนิดทองแดง—แกรไฟต์ โดยขั้วอิเล็กโทรดชนิดอะลูมิเนียม—แกรไฟต์ สามารถกำจัดสาหร่ายทั้งหมดจากน้ำและน้ำหลังการบำบัดมีคุณสมบัติเหมาะสมแก่การนำไปใช้ในกระบวนการผลิตน้ำประปา

5.1.2 การเดินระบบด้วยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูง เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายและช่วยลดระยะเวลาในการเดินระบบให้สั้นลง แต่อย่างไรก็ตาม การควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม ควรคำนึงถึงคุณสมบัติของน้ำหลังการบำบัด ได้แก่ ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย พีเอชของน้ำและค่าพลังงานไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้พบว่า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าด้วยขั้วอิเล็กโทรดชนิดอะลูมิเนียม—แกรไฟต์ คือ 20 แอมแปร์/ตร.ม.

5.1.3 การเพิ่มการกวนผสมจากภายนอกส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายต่ำลง และสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าสูงขึ้น ในงานวิจัยนี้พบว่า อัตราการกวนผสมที่เหมาะสมเกิดจากปฏิกริยาอิเล็กโทรไลซิส ซึ่งมีความสมดุลระหว่างประสิทธิภาพในการสร้างฟล็อกของสาหร่ายและประสิทธิภาพในการทำให้ลอยด้วยฟองก๊าซ ดังนั้นการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า จึงไม่จำเป็นต้องเพิ่มการกวนผสมจากภายนอก

5.1.4 ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าในสภาวะเป็นกรด—กลาง มีประสิทธิภาพสูงกว่าการกำจัดสาหร่ายในสภาวะเป็นด่าง กล่าวคือ ที่สภาวะเป็นกรด—กลาง เกิดกลไกการทำลายเสถียรภาพสาหร่ายแบบทำลายประจุซึ่งต้องการอะลูมิเนียมปริมาณต่ำ แต่ในสภาวะเป็นด่าง มีความต้องการปริมาณอะลูมิเนียมสูงขึ้น เพื่อใช้ในการทำลาย

เสถียรภาพสาหร่ายผ่านกลไกการตกตะกอนแบบกวาด อย่างไรก็ตาม กลไกการทำลายเสถียรภาพสาหร่ายทั้ง 2 แบบ เป็นกลไกที่มีความสำคัญต่อกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

5.1.5 การกำจัดสาหร่ายจากน้ำที่มีการปนเปื้อนของสาหร่ายสูงโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ระยะเวลาในการเดินระบบจะแปรผันตรงกับปริมาณสาหร่ายที่สูงขึ้น

5.1.6 ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าสูงขึ้น เมื่อความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ในระบบสูงขึ้น ปฏิกริยาของคลอรีนอิสระและสนามไฟฟ้าสามารถทำให้สาหร่ายเสื่อมสภาพ และการเติมโซเดียมคลอไรด์สามารถช่วยลดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเดินระบบ

5.1.7 กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่มีศักยภาพสูงในการกำจัดสาหร่ายจากน้ำ มีสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสาหร่ายจากน้ำรีไซเคิลคือ การเดินระบบด้วยขั้วอิเล็กโทรดชนิดอะลูมิเนียม—แกรไฟต์ ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์/ตร.ม. ระยะเวลาในการเดินระบบ 40 นาที และเติมโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์ ที่สภาวะดังกล่าวมีประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำรีไซเคิลร้อยละ 95.6 พีเอชหลังการบำบัด 7.84 และมีค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ 4.66 บาท/ลบ.ม.

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การนำผลการวิจัยการกำจัดสาหร่ายจากน้ำรีไซเคิลโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าในระดับห้องปฏิบัติการ ไปขยายขนาดของถังปฏิกริยาให้สามารถนำไปใช้งานในโรงผลิตน้ำประปาได้จริง จะสามารถนำน้ำรีไซเคิลมาใช้เป็นแหล่งน้ำดิบในการผลิตน้ำประปาทดแทนแหล่งน้ำจากธรรมชาติได้ โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายได้แก่ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ระยะเวลาในการเดินระบบ และพีเอชเริ่มต้นของน้ำรีไซเคิล

2. การนำผลการวิจัยการกำจัดสาหร่ายจากน้ำรีไซเคิลโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบทีละเท ไปพัฒนาให้สามารถเดินระบบแบบไหลต่อเนื่องได้นั้น จะเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้งานจริง

3. ควรมีระบบกวาดตะกอนลอยบริเวณผิวน้ำเพื่อลดปริมาณสารแขวนลอยที่อาจหลุดออกจากระบบ และควรมีถังตกตะกอนต่อจากถังปฏิกริยาเพื่อป้องกันตะกอนที่หลุดออกมาไม่ให้เข้าสู่กระบวนการผลิตน้ำประปาต่อไป



## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- กรมการค้าภายใน. 2554. ราคาเกลือ. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.dit.go.th/samutsa-khon/content.aspMdeptid=85&catid=103> [2554, มีนาคม 9].
- การประปานครหลวง. 2549. น้ำระบายจากระบบผลิตและน้ำนำกลับปี พ.ศ. 2549. กรุงเทพฯ: การประปานครหลวง. (เอกสารไม่ตีพิมพ์)
- การประปานครหลวง. 2552. รายงานผลวิเคราะห์ชนิดและปริมาณสารห่วยที่ก่อให้เกิดปัญหาอุดตันบ่อกรอง (Filter clogging) โดยเก็บตัวอย่างเมื่อวันที่ 15 มิถุนายน 2552. กรุงเทพฯ: การประปานครหลวง. (เอกสารไม่ตีพิมพ์)
- การประปาส่วนภูมิภาค. 2552. ขั้นตอนการผลิตน้ำประปา. [ออนไลน์]. (ม.ป.ป.). แหล่งที่มา: <http://www.pwa.co.th/service/treatment.html> [2552 พฤศจิกายน 1].
- การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. 2554. ค่าพลังงานไฟฟ้า. [ออนไลน์]. (ม.ป.ป.). แหล่งที่มา: <http://www.eppo.go.th/power/pw-Rate-PEA.html#4> [2554, มีนาคม 9].
- ณัฐพล กลีวัฒน์. 2552. การบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลโดยการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าที่มีการเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์หลายเซลล์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ทันดาว ทองตัน. 2545. สารห่วยในกระบวนการผลิตน้ำประปาที่โรงผลิตน้ำประปาสามเสน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธนาคารแห่งประเทศไทย. 2554. อัตราแลกเปลี่ยน. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.bot.or.th/Thai/Pages/BOTDefault.aspx> [2554], มีนาคม 9].
- บานเย็น จันทราฤทธิกุล. 2534. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณและการแพร่กระจายของสารห่วยกับการใช้ประโยชน์ที่ดิน บริเวณลุ่มน้ำมูล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ปริเมธ เจริญพคุณ. 2545. การกำจัดไนเตรทในน้ำทิ้งชุมชนด้วยไฟฟ้าเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.

- พิษณุพล สงวนนวล. 2543. การศึกษากระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศที่ละลายน้ำเพื่อกำจัด  
 สหราชอาณาจักรจากน้ำดิบ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตัณฑุลเวศน์. 2542. วิศวกรรมประปา. เล่มที่ 2. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่ง  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตัณฑุลเวศน์. 2543. คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรม  
 สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มานิตย์ อัครอารีย์ และธิดา เพชรมณี. 2534. ปัจจัยบางประการที่มีผลต่อการเพิ่มจำนวนของคลอ  
 เรลลาในห้องปฏิบัติการ. เอกสารวิชาการฉบับที่ 5/2534. สงขลา: สถานีวิทยการ  
 เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งจังหวัดสงขลา.
- ยูวดี พีรพรพิศาล. 2532. สหราชอาณาจักร: Algae. เชียงใหม่: ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และ  
 เทคโนโลยีมหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- รัตนา จิระรัตนานนท์. 2541. กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นสังเคราะห์. วิทยานิพนธ์ปริญญา  
 มหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระ  
 จอมเกล้าธนบุรี.
- ลัดดา วงศ์รัตน์. 2540. คู่มือการเลี้ยงแพลงก์ตอน. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์  
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วรรณรัตน์ วัฒนชัย. 2547. กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสำหรับน้ำเสียปนเปื้อนโลหะหนัก  
 จากโรงงานประกอบรถยนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรม  
 สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วรรณวรรณ เทียงวรรณกานต์. 2546. การกำจัดสีข้อมรีแอกทีฟโดยการนำกระบวนการรวมตะกอน  
 ด้วยไฟฟ้าและการตกตะกอนทางเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชา  
 วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศังกรม์ คงเจาะ. 2548. การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกหนังในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้า.  
 วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์  
 มหาวิทยาลัย.
- สาวิตรี ตาสุดิน. 2552. การกำจัดความขุ่นจากน้ำผิวดินด้วยอะลูมิเนียมคลอไรด์ไฮดรอกไซด์. วิทยานิพนธ์  
 ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์  
 มหาวิทยาลัย.

- อภิรดี สุนทรภา. 2549. การนำกลับคืนจากน้ำเสียโดยใช้วิธีการตกตะกอนทางเคมีและวิธีทางไฟฟ้าเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อัญชลี ศรีรังสรรค์. 2551. การบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อภาภรณ์ มหาพันธ์. 2541. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับสาหร่าย. กรุงเทพฯ: ศูนย์เก็บรักษาและรวบรวมข้อมูลจุลินทรีย์ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. (เอกสารไม่ตีพิมพ์)
- อินทิรา หาญพงษ์พันธ์. 2539. เคมีทั่วไปสำหรับนิสิตวิศวกรรมศาสตร์. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เอกรัฐ มีวาสนา. 2552. การกำจัดไขมันและน้ำมันจากน้ำเสียโรงงานผลิตเครื่องสำอางด้วยระบบแยกด้วยไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

## ภาษาอังกฤษ

- Alfafara, C.G. 2002. Operating and scale-up factors for the electrolytic removal of algae from eutrophied lakewater. Journal of Chemical Technology and Biotechnology. 77: 871-876.
- Arroyo, M.G., Pérez-Herranz, V., Montañés, M.T., Farcía-Antón, J., and Guiñón, J.L. 2009. Effect of pH and chloride concentration on the removal of hexavalent chromium in a batch electrocoagulation reactor. Journal of Hazardous Materials. 169: 1127-1133.
- Azarian, G.H., Mesdaghinia, A.R., Vaezi, F., Nabizadeh, R., and Nematollahi, D. 2007. Algae removal by electro-coagulation process, Application for treatment of the effluent from an industrial wastewater treatment plant. Iranian Journal of Public Health. 36: 57-64.
- Becker, E. W. 1993. Microalgae biotechnology and microbiology. England: Cambridge university press.
- Bold, H.C. 1985. Introduction to the Algae. London: Prence Hill.
- Brock, T.D., Smith, D.W., and Madigan, M. T. 1984. Biology of microorganisms. U.S.A.: Prentice-hall.
- Brown, T.E., and Richardson, F.L. 1963. The effect of growth environment on the physiology of algae: Light intensity. Journal of Phycology. 5: 38-54.
- Buttner, J.K., Soderberg, R.W., and Terlizzi, D.E. 1993. NRAC Fact Sheet No. 170 USA: University of Massachusetts.
- Caizares, P., Martnez, F., Jimnez, C., Lobato, J., and Rodrigo, M.A. 2006. Coagulation and electrocoagulation of wastes polluted with dyed. Environmental Science & Technology. 40: 6418-6424.
- Carrier, X., Marceau, E., Lambert, J.F., and Che, M. 2007. Transformations of  $\gamma$ -alumina in aqueous suspensions: 1. Alumina chemical weathering studied as a function of pH. Journal of Colloid and Interface Science. 308: 429-437.
- Chen, G. 2004. Electrochemical technologies in wastewater treatment. Separation and Purification Technology. 38: 11-41.

- Chen, X., Chen, G., and Yue, P.L. 2000. Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation. Separation and Purification Technology. 19: 65-76.
- Cudennec, Y., and Lecrf, A. 2001. The transformation of Cu(OH)<sub>2</sub> into CuO, revisited. Solid State Sciences. 5: 1471-1474.
- Darley, W.M. 1982. Algal biology a physiological approach. In Wikinson, J. F. (ed.), Basic microbiology, pp. 21-53. London: Blackwell scientific publication.
- Divakaran, R., and Pillai, V.N.S. 2002. Flocculation of algae using chitosan. Journal of Applied Phycology. 14: 419-422.
- Devlin, R.M., and Barker, A.V. 1971. Photosynthesis. London: Litton educational publication.
- Drees, K.P., Abbaszadegan, M., and Mairer, R.M. Comparative electrochemical inactivation of bacteria and bacteriophage. Water Research. 37: 2291-2300.
- Drikas, M., Chow, C. W. K., House, J., and Burch, M. D. 2001. Using coagulation, flocculation and settling to remove toxic cyanobacteria. Journal of the American Water Works Association. 93: 100-111.
- Du, X., Wang, Y., Su, X., and Li, J. 2009. Influence of pH value on the microstructure and phase transformation of aluminum hydroxide. Powder Technology. 192: 40-46.
- Edzwald, J.K., and Wingler, B.J. 1990. Chemical and physical aspects of dissolved air-flotation for the removal of algae. Aqua. 39: 24-35.
- Essadki, A.H., et al. 2008. Electrocoagulation/electroflotation in an external-loop airlift reactor—Application to the decolorization of textile dye wastewater: A case study. Chemical Engineering and Processing. 47: 1211-1223.
- Friedrich, H. 1962. Ion exchange. New York: Magraw-hill.
- Gao, S., et al. 2010a. Electro-coagulation-flotation process for algae removal. Journal of Hazardous Materials. 177: 336-343.
- Gao, S., Du, M., Yang, J., Yang, J., and Nan, J. 2010b. Effects of chloride ions on electro-coagulation-flotation process with aluminum electrodes for algae removal. Journal of Hazardous Materials. 182: 827-834.

- Ghernaout, D., Badis, A., Kellil, A., and Ghernaout, B. 2008. Application of electrocoagulation in *Escherichia coli* culture and two surface waters. Desalination. 219: 118-215.
- Ghosh, D., Solanki, H., and Purkait, M.K. 2008. Removal of Fe (II) from tap water by electrocoagulation technique. Journal of Hazardous Materials. 155: 135-143.
- Ghosh, D., Medhi, C.R., and Purkait, M.K. 2010. Treatment of drinking water containing iron using electrocoagulation. International Journal of Environmental Engineering. 2: 212-227.
- Gladue, R.L. 1991. Heterotrophic microalgae production: Potential for application to aquaculture feeds. In rotifer and microalgae culture system. Proceeding of a U.S.-Asia workshop. Honolulu. The oceanic institute.
- Gomes, J.A.G., et al. 2007. Arsenic removal by electrocoagulation using combined Al-Fe electrode system and characterization of products. Journal of Hazardous Materials. 139: 220-231.
- Hanagata, N., Takeuchi, T., Fukuju, Y., Barnes, D.J., and Karube, I. 1992. Tolerance of microalgae to high CO<sub>2</sub> and high temperature. Phytochemistry. 31: 3345-3348.
- Henderson, R., Parsons, S.A., and Jefferson, B. 2008. The impact of algal properties and pre-oxidation on solid-liquid separation of algae. Water Research. 42: 1827-1845.
- Hirata, S., Hayashitani, M., Taya, M., and Tone, S. 1996. Technical note carbon dioxide fixation in batch culture of *Chorella* sp. using a photobioreactor with a sunlight-collection device. Journal of Fermentation and Bioengineering. 81: 470-472.
- Hu, C.Y., Lo, S.L., and Kuan, W.H. 2003. Effects of co-existing anions on fluoride removal in electrocoagulation (EC) process using aluminum electrodes. Water research. 37: 1127-1133.
- Ilhan, F., Kurt, U., Apaydin, O., and Gonullu, M. 2008. Treatment of leachate by electrocoagulation using aluminum and iron electrodes. Journal of Hazardous Materials. 154: 381-389.
- Jiang, J. and Graham, N. J. D. 1998. Preliminary evaluation of the performance of new pre-polymerised inorganic coagulants for lowland surface water treatment. Water Science and Technology. 37(2): 121-128.

- Jun, H.B., Lee, Y.J., Lee, B.D., and Knappe, D.R.U. 2001. Effectiveness of coagulants and coagulant aids for the removal of filter-clogging *Synedra*. Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua. 50: 135–148.
- Jiang, J., Graham, N. J. D., and Harward, C. 1993. Comparison of polyferric sulphate with other coagulants for the removal of algae-derived organic matter. Water Science and Technology. 27: 221–230.
- Johnson, D., Farley, M.R., Youngman, R.E., Yadav, N.P., and West, J.T. 1977. Removal of algae by various unit process: Technical report TR45. UK: Water Research Centre.
- Kankanlaung, A. 2000. Study of algae in raw water sources of phenom penh water supply authority and problems caused by algae in phum prek water supply. Report on JICA third country expert September. (Mimeographed)
- Kaplan, D.S., Richmond, A.E., Dubinsky, Z., and Aaronson, S. 1986. Algal nutrition. In Richmond, A. (ed.), Handbook of microalgal mass culture, pp. 147-198. Boca raton: CRC press.
- Kempeneers, S., Menxel, F.V., and Gille, L. 2001. A decade of large scale experience in dissolved air flotation. Water Science and Technology. 43: 27–34.
- Kiliç, M.G., Hosten, Ç., and Demirci, S. 2009. A parametric comparative study of electrocoagulation and coagulation using ultrafine quartz suspensions. Journal of Hazardous Materials. 171: 247-252.
- Klute, R., and Neis, U. 1983. Coagulation of algae and subsequent removal by filtration and flotation. Water Supply. 1: 1157–1162.
- Kobyas, M., Demirbas, E., Can, O.T., and Bayramoglu, M. 2003. Treatment of the textile wastewater by combined electrocoagulation. Chemosphere. 62: 181-187.
- Kodama, M., Ikemoto, H., and Miyachi, S. 1993. A new species of highly CO<sub>2</sub>-tolerant growing marine microalgae suitable for high-density culture. Journal of Marine Biotechnology. 1: 2-25.
- Konno, H. 1999. Some issues caused by algae on waterworks in Thailand. Report of research. Department of civil eng.: Tohoku institute of technology.

- Larue, O., and Vorobiev, E. 2003. Floc size estimation in iron induced eletrocoagulation and coagulation using sedimentation data. International Journal of Mineral Processing. 71: 1-15.
- Liu, J.C., Chen, Y.M., and Ju, Y. 1999. Separation of algal cells from water by column flotation. Seperation Science and Technology. 34: 2259–2272.
- Lobban, C.S., and Harrison, P.J. 1994. Seawood ecology and physiology. England: Cambridge university press.
- London Metal Exchange. 2011. LME Aluminium. [online]. Available from: <http://www.lme.com/aluminium.asp> [2011, March 9].
- London Metal Exchange. 2010. LME Copper. [online]. Available from: <http://www.lme.com/copper.asp> [2011, March 9].
- Merzouk, B., Gourich, B., Sekki, A., Madani, K., and Chibane, M. 2009. Removal turbidity and separation of heavy metals using electrocoagulation-electroflotation technique. Journal of Hazardous Materials. 164: 215-222.
- Mohan, N., Rao, P.H., P., Kumar, R.R., Sivasankaran, S., and Sivasubramanian, V. 2009. Studies on mass cultivation of *Chlorella vulgaris* and effective harvesting of biomass by low-cost methods. Journal of Algal Biomass Utilization. 1: 29-39.
- Mollah, M.Y.A., et al. 2004. Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. Journal of Hazardous Materials. 114: 199-210.
- Mouedhen, G., Feki, M., Wery, M.D.P., and Ayedi, H.F. 2008. Behavior of aluminum electrodes in electrocoagulation process. Journal of Hazardous Materials. 150: 124-135.
- Muruganathan, M., Raju, G. B., and Prabhakar, S. 2004. Removal of sulfide, sulfate and sulfite ions by electrocoagulation. Journal of Hazardous Materials. 109: 37-44.
- Ogbonna, J.C., Masui, H., and Tanaka, H. 1997. Sequential heterotrophic autotrophic cultivation an efficient method of producing *Chorella* biomass for health food and animal feed. Journal of Applied Phycology. 9: 359-366.
- Prasad, R.K., 2010. Degradation of biopolymeric pigments in distillery spentwash by electrocoagulation using copper anodes: statistical and canonical analysis. Environmental Chemistry Letters. 8: 149-155.



- Petrusevski, B., Vlaski, A., Van Breenham, A.N., and Alaerts, G.J. 1993. Influence of algal species and cultivation conditions on algal removal in direct filtration. Water Science and Technology. 27: 211–220.
- Poleman, E., Pauw, N.D., and Jeurissen, B. 1997. Potential of electrolytic flocculation for recovery of micro-algae. Resources, Conservation and Recycling. 19: 1-10.
- Ricordel, C., Darchen, A., and Hadjiev, D. 2010. Electrocoagulation-electroflotation as a surface water treatment for industrial uses. Separation and Purification Technology. 74: 342-347.
- Schiff, J.A. 1962. Sulfer. In Lewin, R. A. (ed.), Physiology and biochemistry of algae, pp. 239-244. London: Academic press.
- Shen, Q., et al. 2011. Enhanced algae removal by drinking water treatment of chlorination coupled with coagulation. Desalination. 217: 236-240.
- Stagman, G. 1940. Die bedeutung der spurenelemente für *Chlorella*. Journal of Botany. 35: 385-422.
- Strickland, J.D.H. and Parsons, T.R. 1972. A practical handbook of sea-water analysis. Journal of the Fisheries Research Board of Canada. 167: 331 pp.
- Szerenos, B.K., Bialuk, I., and Maleszewski, S. 2004. Enhancement of photosynthetic O<sub>2</sub> evolution in *Chlorella vulgaris* under high light and increased CO<sub>2</sub> concentration as a sign of acclimation to phosphate deficiency. Plant Physiology and Biochemistry. 42: 403-409.
- Tezcan Un, U., Koparal, A.S., and Ogutveren, U.B. 2009. Electrocoagulation of vegetable oil refinery wastewater using aluminum electrodes. Journal of Environmental Management. 90: 428-433.
- Trompette, J.L., and Vergnes, H. 2009. On the crucial influence of some supporting electrolytes during electrocoagulation in the presence of aluminum electrodes. Journal of Hazardous Materials. 163: 1282-1288.
- Vlaski, A., van Breemen, A. N., and Alaerts, G. J. 1996. Optimisation of coagulation conditions for the removal of cyanobacteria by dissolved air flotation or sedimentation. Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA. 45: 253-261.

- Vonshak, A. 1997. Spirulina platensis (Arthrospira): Physiology, cell-biology and biotechnology. Taylor&Francis.
- Walker, J.B. 1953. Inorganic micronutrient requirement of *Chlorella*. I. Requirements for calcium (or strontium), copper and molybdenum. Archives of Biochemistry and Biophysic. 46: 1-11.
- Warburg, O. 1948. Schwermetalle aks Wirkungsgruppen von fermenten. Burlin: Springer.
- Weaver, J.C., and Chizmadzhev, Y.A. 1996. Theory of electroporation: A review. Bioelectrochemistry and Bioenergetics. 41: 135-160.
- WHO. 2008. Guidelines for Drinking-water Quality, Third Edition Incorporating the First and Second Addenda. Geneva: WHO Press.
- Wiessner, W. 1962. Inorganic micronutrients. In Lewin, R. A. (ed.), Physiology and bichemistry of algae, pp. 239-244. London: Academic press.
- Yildiz, Y.S., Kopalal, A.S., and Keskinler, B. 2008. Effect of initial pH and supporting electrolyte on the treatment of water containing high concentration of humic substances by electrocoagulation. Chemical Engineering Journal. 138: 63-72.
- Yilmaz, A.E., Boncukcuglu, R., and Kocakerim, M.M. 2007. A quantitative comparison between electrocoagulation and chemical coagulation for boron removal from boron-containing solution. Journal of Hazardous Materials. 149: 475-481.
- Yousef, M., and Robert, S. 2000. Electrocoagulation (EC)-science and application. Journal of Hazardous Materials. 84: 29-41.
- Zhao, X., Zhang, Y., Li, X., Liu, C., and Zhu, L. 2010. Algae removal efficiencies of AS/PDMDAAC coagulants. Journal of the American Water Works Association. 102: 119-128.

1

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

ผลการทดลองทุกชุดการทดลอง

**ตารางที่ ก.1** ผลการทดลองการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์โดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าด้วยขั้วอิเล็กโทรดชนิดอะลูมิเนียม—แกรไฟต์ (ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์/ตร.ม. ความหนาแน่นสาหร่าย 10<sup>8</sup> เซลล์/ลิตร พีเอชเริ่มต้น 7)

เวลา (นาที)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	อุณหภูมิ (°C)	พีเอช	ความนำไฟฟ้า (μS/cm)	คลอโรฟิลล์ เอ (mg/L)
0	2	17.4	30.1	7.07	254.9	4,593.6743
5	2	12.9	30.2	7.24	249.6	20,224.2904
10	2	12.8	30.3	7.42	244.3	12,674.0224
15	2	12.9	30.5	7.50	237.9	3,328.7417
20	2	13.1	30.6	7.60	231.7	1,100.6811
25	2	13.3	30.8	7.79	226.1	495.0832
30	2	13.5	30.9	7.88	221.1	184.6565
35	2	13.8	31.0	8.00	216.7	89.4021
40	2	14.0	31.2	8.11	212.3	27.0797
45	2	14.3	31.3	8.28	208.0	19.6288
50	2	14.5	31.4	8.30	204.1	13.2987
55	2	14.8	31.6	8.32	200.1	7.5979
60	2	15.0	31.8	8.37	195.1	3.4728

ตารางที่ ก.2 ผลการทดลองการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์โดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าด้วยขั้วอิเล็กโทรดชนิดทองแดง—แกรไฟต์  
(ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์/ตร.ม. ความหนาแน่นสาหร่าย 10<sup>8</sup> เซลล์/ลิตร พีเอชเริ่มต้น 7)

เวลา (นาที)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	อุณหภูมิ (°C)	พีเอช	ความนำไฟฟ้า (μS/cm)	คลอโรฟิลล์ เอ (mg/L)
0	2	11.8	29.1	7.05	256.0	10,894.9478
5	2	12.4	29.2	7.27	253.2	21,787.7501
10	2	12.7	29.2	8.50	247.7	19,472.9343
15	2	12.9	29.3	9.26	244.8	7,408.9240
20	2	13.2	29.5	9.62	241.8	3,798.8613
25	2	13.4	29.5	9.85	240.4	1,385.7175
30	2	13.4	29.6	10.05	243.5	596.3894
35	2	13.6	29.8	10.21	252.4	419.7823
40	2	13.7	29.8	10.30	260.1	135.8927
45	2	13.9	29.9	10.38	268.7	65.0428
50	2	14.1	30.0	10.44	277.6	64.3129
55	2	14.3	30.1	10.50	286.1	48.3409
60	2	14.4	30.2	10.55	294.3	42.8607

**ตารางที่ ก.3** ผลการทดลองการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์โดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าด้วยขั้วอิเล็กโทรดชนิดอะลูมิเนียม—แกรไฟต์ (ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 30 แอมแปร์/ตร.ม. ความหนาแน่นสาหร่าย 10<sup>8</sup> เซลล์/ลิตร พีเอชเริ่มต้น 7)

เวลา (นาที)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	อุณหภูมิ (°C)	พีเอช	ความนำไฟฟ้า (µS/cm)	คลอโรฟิลล์ เอ (mg/L)
0	3	19.9	30.2	7.06	257.8	2,628.4280
5	3	18.1	30.4	7.33	250.8	8,485.1333
10	3	18.4	30.7	7.56	241.6	6,454.3314
15	3	18.8	30.9	7.82	235.5	1,709.5639
20	3	19.2	31.2	8.02	226.8	293.7853
25	3	19.7	31.4	8.20	222.4	85.9512
30	3	20.2	31.8	8.35	215.6	18.9739
35	3	20.6	32.0	8.42	210.1	6.1006
40	3	21.1	32.3	8.48	205.2	2.5333
45	3	21.6	32.6	8.55	199.2	5.1183
50	3	22.0	32.9	8.58	194.2	4.0843
55	3	22.5	33.3	8.63	187.1	3.5673
60	3	23.0	33.6	8.65	183.7	0.9823

**ตารางที่ ก.4** ผลการทดลองการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์โดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าด้วยขั้วอิเล็กโทรดชนิดอะลูมิเนียม—แกรไฟต์ (ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 40 แอมแปร์/ตร.ม. ความหนาแน่นสาหร่าย 10<sup>8</sup> เซลล์/ลิตร พีเอชเริ่มต้น 7)

เวลา (นาที)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	อุณหภูมิ (°C)	พีเอช	ความนำไฟฟ้า (µS/cm)	คลอโรฟิลล์ เอ (mg/L)
0	4	25.4	29.8	7.03	255.5	2,485.7102
5	4	22.8	30.2	7.43	250.3	9,622.3523
10	4	22.0	30.5	7.75	249.8	6,454.3314
15	4	21.4	30.9	7.93	239.6	244.0240
20	4	21.3	31.3	8.23	236.5	15.9753
25	4	21.4	31.6	8.45	232.2	2.7918
30	4	21.9	32.1	8.67	227.8	1.2408
35	4	22.4	32.4	8.79	218.6	1.7578
40	4	23.0	32.9	8.91	209.8	2.0163
45	4	23.9	33.3	8.98	198.7	1.7201
50	4	24.9	33.8	9.06	186.6	1.3845
55	4	26.1	34.3	9.17	173.8	1.1559
60	4	27.6	34.9	9.29	158.1	1.4119



**ตารางที่ ก.5** ผลการทดลองการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์โดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าด้วยขั้วอิเล็กโทรดชนิดอะลูมิเนียม—แกรไฟต์ (ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์/ตร.ม. ความหนาแน่นสาหร่าย 10<sup>8</sup> เซลล์/ลิตร พีเอชเริ่มต้น 7 ระยะเวลาในการเดินระบบ 30 นาที)

ความเร็วรอบ (rpm)	เวลา (นาที)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	อุณหภูมิ (°C)	พีเอช	ความนำไฟฟ้า (µS/cm)	คลอโรฟิลล์ เอ (mg/L)
0	0	2	18.6	28.1	6.98	250.2	3,542.5099
	30	2	14.3	28.4	7.83	220.2	142.4018
200	0	2	17.5	27.9	6.99	252.3	2,972.2589
	30	2	14.4	28.1	7.88	223.0	413.7800
400	0	2	15.3	27.7	7.05	255.2	3,110.4530
	30	2	14.1	28.1	7.72	227.6	719.6375
600	0	2	16.0	27.7	7.00	251.0	3,208.4027
	30	2	14.2	28.3	7.63	220.0	2,403.3824

**ตารางที่ ก.6** ผลการทดลองการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์โดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าด้วยขั้วอิเล็กโทรดชนิดอะลูมิเนียม—แกรไฟต์ (ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์/ตร.ม. ความหนาแน่นสาหร่าย 10<sup>8</sup> เซลล์/ลิตร พีเอชเริ่มต้น 6)

เวลา (นาที)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	อุณหภูมิ (°C)	พีเอช	ความนำไฟฟ้า (μS/cm)	คลอโรฟิลล์ เอ (mg/L)
0	2	16.9	27.9	6.07	269.7	4,859.0762
5	2	13.4	28.1	6.29	265.7	11,846.1244
10	2	13.0	28.2	6.57	264.5	13,868.2665
15	2	12.9	28.3	6.75	262.1	3,175.8873
20	2	13.0	28.4	6.84	256.2	849.1965
25	2	13.0	28.5	7.00	250.5	154.9073
30	2	13.1	28.7	7.14	244.2	99.8589
35	2	13.2	28.9	7.19	242.4	56.3507
40	2	13.3	29.0	7.34	241.9	25.8649
45	2	13.5	29.1	7.51	240.6	14.3440
50	2	13.7	29.2	7.78	233.0	10.8066
55	2	13.8	29.3	7.99	226.8	4.7036
60	2	14.0	29.5	8.14	224.2	1.0884

**ตารางที่ ก.7** ผลการทดลองการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์โดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าด้วยขั้วอิเล็กโทรดชนิดอะลูมิเนียม—แกรไฟต์ (ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์/ตร.ม. ความหนาแน่นสาหร่าย 10<sup>8</sup> เซลล์/ลิตร พีเอชเริ่มต้น 8)

เวลา (นาที)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	อุณหภูมิ (°C)	พีเอช	ความนำไฟฟ้า (μS/cm)	คลอโรฟิลล์ เอ (mg/L)
0	2	14.10	27.9	8.00	255.7	8,641.9135
5	2	15.20	28.0	8.84	255.6	13,706.0061
10	2	13.60	28.2	9.04	255.3	9,017.5916
15	2	13.30	28.2	9.08	252.0	7,937.8654
20	2	13.30	28.3	9.09	244.9	4,188.7614
25	2	13.30	28.5	9.10	242.8	2,826.7008
30	2	13.40	28.6	9.14	240.6	2,419.7185
35	2	13.60	28.8	9.15	237.9	1,290.0994
40	2	13.70	28.9	9.17	236.3	639.1127
45	2	13.80	29.1	9.19	233.1	166.5815
50	2	14.00	29.2	9.21	230.6	63.6909
55	2	14.20	29.3	9.23	226.7	24.7677
60	2	14.50	29.4	9.25	222.5	12.7641

**ตารางที่ ก.8** ผลการทดลองการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์โดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าด้วยขั้วอิเล็กโทรดชนิดอะลูมิเนียม—แกรไฟต์ (ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์/ตร.ม. ความหนาแน่นสาหร่าย  $10^7$  เซลล์/ลิตร พีเอชเริ่มต้น 7)

เวลา (นาที)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	อุณหภูมิ (°C)	พีเอช	ความนำไฟฟ้า ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	คลอโรฟิลล์ เอ (mg/L)
0	2	19.8	29.2	7.01	243.2	481.2753
5	2	14.4	29.5	7.09	235.4	775.5000
10	2	14.1	29.5	7.35	227.6	415.9783
15	2	14.3	29.7	7.53	219.8	234.1236
20	2	14.5	29.8	7.64	213.4	61.5489
25	2	14.8	30.0	7.81	208.5	30.6062
30	2	15.2	30.1	7.92	202.3	6.1266
35	2	15.5	30.3	7.99	197.1	3.8257
40	2	15.8	30.4	8.08	193.5	1.4992
45	2	16.2	30.5	8.17	188.6	0.7238
50	2	16.6	30.8	8.22	184.6	0.4654
55	2	16.9	30.9	8.29	176.5	0.3691
60	2	17.3	31.1	8.33	173.6	0.2252

**ตารางที่ ก.9** ผลการทดลองการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์โดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าด้วยขั้วอิเล็กโทรดชนิดอะลูมิเนียม—แกรไฟต์ (ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์/ตร.ม. ความหนาแน่นสาหร่าย 10<sup>9</sup> เซลล์/ลิตร พีเอชเริ่มต้น 7)

เวลา (นาที)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	อุณหภูมิ (°C)	พีเอช	ความนำไฟฟ้า (μS/cm)	คลอโรฟิลล์ เอ (mg/L)
0	2	17.9	30.3	7.08	256.6	14,411.9954
5	2	13.5	30.5	7.15	250.0	46,405.7649
10	2	13.1	30.7	7.37	244.9	22,338.5929
15	2	13.1	30.8	7.58	239.4	19,171.8852
20	2	13.3	31.0	7.73	234.2	8,611.0808
25	2	13.4	31.1	7.91	229.6	5,147.4603
30	2	13.6	31.2	7.93	226.8	2,597.0704
35	2	13.8	31.3	8.04	223.8	1,663.2596
40	2	14.0	31.5	8.11	219.2	1,030.8900
45	2	14.2	31.6	8.2	216.0	840.7958
50	2	14.4	31.8	8.24	212.2	200.6006
55	2	14.6	31.9	8.32	208.5	151.5998
60	2	14.9	32.1	8.37	205.7	118.5963

ตารางที่ ก.10 ผลการทดลองการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสังเคราะห์โดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าด้วยขั้วอิเล็กโทรดชนิดอะลูมิเนียม—แกรไฟต์ (ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์/ตร.ม. ความหนาแน่นสาหร่าย  $10^8$  เซลล์/ลิตร พีเอชเริ่มต้น 7 และโซเดียมคลอไรด์ 0.5 มิลลิโมลาร์)

เวลา (นาที)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	อุณหภูมิ (°C)	พีเอช	ความนำไฟฟ้า ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	คลอโรฟิลล์ เอ (mg/L)
0	2	13.4	28.0	7.02	327.0	4,212.1283
5	2	11.5	28.1	7.18	318.0	7,337.5225
10	2	11.4	28.1	7.31	311.0	9,373.3134
15	2	11.4	28.2	7.45	304.0	2,910.5806
20	2	11.5	28.4	7.64	299.0	1,116.2140
25	2	11.6	28.4	7.69	294.0	689.1352
30	2	11.7	28.4	7.80	291.0	272.7434
35	2	11.8	28.5	7.89	285.5	78.9459
40	2	11.9	28.5	8.11	280.4	76.2575

**ตารางที่ ก.11** ผลการทดลองการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์โดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าด้วยขั้วอิเล็กโทรดชนิดอะลูมิเนียม—แกรไฟต์ (ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์/ตร.ม. ความหนาแน่นสาหร่าย  $10^8$  เซลล์/ลิตร พีเอชเริ่มต้น 7 และไซเดียมคลอไรด์ 1 มิลลิโมลาร์)

เวลา (นาที)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	อุณหภูมิ (°C)	พีเอช	ความนำไฟฟ้า ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	คลอโรฟิลล์ เอ (mg/L)
0	2	11.4	28.5	7.04	386	1,386.2063
5	2	9.7	28.5	7.22	380	5,308.5819
10	2	9.5	28.6	7.38	371	4,321.5255
15	2	9.5	28.7	7.47	369	755.4824
20	2	9.5	28.7	7.56	362	314.3102
25	2	9.6	28.7	7.67	357	67.1325
30	2	9.6	28.7	7.88	353	42.8593
35	2	9.7	28.7	7.97	349	24.4364
40	2	9.8	28.7	8.06	347	17.2678

**ตารางที่ ก.12** ผลการทดลองการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์โดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าด้วยขั้วอิเล็กโทรดชนิดอะลูมิเนียม—แกรไฟต์ (ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์/ตร.ม. ความหนาแน่นสาหร่าย  $10^8$  เซลล์/ลิตร พีเอชเริ่มต้น 7 และโซเดียมคลอไรด์ 2 มิลลิโมลาร์)

เวลา (นาที)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	อุณหภูมิ (°C)	พีเอช	ความนำไฟฟ้า ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	คลอโรฟิลล์ เอ (mg/L)
0	2	10.6	28.1	7.14	522	2,380.5007
5	2	7.6	28.2	7.49	512	4,138.6626
10	2	7.5	28.2	7.78	505	4,375.9914
15	2	7.5	28.3	7.90	498	987.0047
20	2	7.6	28.3	8.00	493	211.1945
25	2	7.6	28.5	8.10	491	92.5689
30	2	7.6	28.5	8.21	482	51.8293
35	2	7.6	28.5	8.28	479	25.0228
40	2	7.7	28.6	8.33	473	11.1672



ตารางที่ ก.13 ผลการทดลองการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายสังเคราะห์โดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าด้วยขั้วอิเล็กโทรดชนิดอะลูมิเนียม—แกรไฟต์ (ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์/ตร.ม. ความหนาแน่นสาหร่าย  $10^8$  เซลล์/ลิตร พีเอชเริ่มต้น 7 โซเดียมคลอไรด์ 0.5 มิลลิโมลาร์)

A/V ( $m^{-1}$ )	เวลา (นาที)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	อุณหภูมิ ( $^{\circ}C$ )	พีเอช	ความนำไฟฟ้า ( $\mu S/cm$ )	คลอโรฟิลล์ เอ (mg/L)
2.86	0	2	13.4	30.1	7.02	327.0	4,212.1283
	40	2	11.9	28.2	8.11	280.4	76.2575
4.00	0	2	12.3	31.7	7.09	331.0	4,464.5018
	40	2	11.4	32.3	7.82	293.9	179.0888
5.00	0	2	11.6	31.8	7.00	329.0	6,040.2920
	40	2	11.5	32.0	7.75	305.0	403.9838
6.67	0	2	12.2	31.7	7.09	314.0	3,799.7949
	40	2	11.0	31.6	7.67	294.2	722.6109

ตารางที่ ก.14 ผลการทดลองการกำจัดสาหร่ายจากน้ำรีไซเคิลโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าด้วยขั้วอิเล็กโทรดชนิดอะลูมิเนียม—แกรไฟต์ (ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์/ตร.ม. พีเอชเริ่มต้น 7 โซเดียมคลอไรด์ 0.5 มิลลิโมลาร์)

กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	เวลา (นาที)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	อุณหภูมิ (°C)	พีเอช	ความนำไฟฟ้า ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	คลอโรฟิลล์ เอ (mg/L)
2	0	11.3	32.1	7.55	349.0	17,853.5093
2	5	9.9	32.2	7.60	342.0	13,434.7362
2	10	9.9	32.4	7.63	334.0	11,753.9950
2	15	9.9	32.5	7.70	328.0	7,099.4957
2	20	10.1	32.6	7.72	323.0	5,516.6227
2	25	10.2	32.7	7.73	315.0	2,057.4532
2	30	10.2	32.8	7.77	313.0	1,933.2440
2	35	10.4	32.9	7.81	308.0	1,333.4723
2	40	10.5	33.1	7.84	305.0	788.4767
2	45	10.6	33.1	7.89	300.0	668.0674
2	50	10.7	33.4	7.91	296.3	459.8198
2	55	10.8	33.5	7.93	290.7	400.7526
2	60	10.8	33.5	8.01	286.9	307.5633

ภาคผนวก ข

การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris*

### การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* (พิษณุพล สงวนนวล, 2543)

น้ำสาหร่ายสังเคราะห์ในงานวิจัยนี้ ใช้สาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* ในการสังเคราะห์ โดยได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข.1 สูตรอาหาร N-8

สารเคมี	ปริมาณ (มก.)/น้ำ 1000 มล.
Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	260.0
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	740.0
CaCl <sub>2</sub>	10.0
Fe EDTA	10.0
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	50.0
KNO <sub>3</sub>	1000.0
Trace element*	1.0
Distilled water	1000.0
Trace element*	
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ·18H <sub>2</sub> O	3.58
MnCl <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	12.98
CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O	1.83
ZnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	3.20
Distilled water	1000.0

### วิธีการเพาะเลี้ยง

นำหัวเชื้อ (Seed) สาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* ออกมาตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 1 วัน จากนั้นถ่ายหัวเชื้อสาหร่ายลงในภาชนะที่บรรจุน้ำอาหาร (N8) โดยใช้หัวเชื้อ 1 ส่วน ในน้ำ 10 ภาชนะที่ใช้เลี้ยงสาหร่ายในงานวิจัยนี้ คือ ขวดรูปชมพู่ขนาด 5 ลิตร เพาะเลี้ยงในสภาวะที่ได้รับแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ตลอดเวลา และมีที่อากาศจากเครื่องปั๊มอากาศจ่ายอากาศให้กับสาหร่ายที่เลี้ยงไว้ในขวดรูปชมพู่แต่ละใบ ดังรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 การเลี้ยงสาหร่ายที่ใช้ในการทดลอง

ภาคผนวก ค

วิธีการนับเซลล์สำหรับราย

## วิธีการนับเซลล์สาหร่าย

การวัดความเข้มข้นสาหร่ายโดยวิธีการนับเซลล์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากในการศึกษาเกี่ยวกับการเจริญเติบโตหรือปริมาณสาหร่าย เนื่องด้วยเป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็ว โดยในการนับเซลล์สาหร่ายจะใช้ Haemocytometer counting chamber ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการนับเซลล์เม็ดเลือดแดง จึงสามารถประยุกต์มาใช้ในการนับจำนวนสาหร่ายเซลล์เดียว เช่น *Chlorella vulgaris* ซึ่งมีขนาดเซลล์ใกล้เคียงกับเซลล์เม็ดเลือดแดง

Haemocytometer counting chamber ในงานวิจัยนี้เป็นชนิด Neubauer improved bright-line ซึ่งทราบขนาดของช่องที่แน่นอน คือ  $0.0025 \text{ มม.}^2$  และมีความลึก  $0.100 \text{ มม.}$  โดยตัวอย่างของ Haemocytometer counting chamber และพื้นที่ตารางสำหรับนับเซลล์สาหร่ายแสดงดังรูปที่ ค.1 และ ค.2



รูปที่ ค.1 Haemocytometer counting chamber

## วิธีการใช้ Haemocytometer counting chamber

1. หยดตัวอย่างสาหร่ายที่ต้องการนับจำนวนลงไป 1 หยด ในช่องใส่ตัวอย่าง (Load port) ของสไลด์ Hemacytometer ที่มีกระจกปิดสไลด์ปิดอยู่ ตัวอย่างสาหร่ายจะกระจายไปทั่วตารางสี่เหลี่ยม
2. วางสไลด์ Hemacytometer ทิ้งไว้ 1 นาที เพื่อให้เซลล์สาหร่ายจมลงสู่พื้นสไลด์
3. วางสไลด์ Hemacytometer บนแท่นกล้องจุลทรรศน์ ปรับกล้อง และเริ่มกำลังขยายจากต่ำไปสูง
4. นับเซลล์สาหร่ายบนช่องสี่เหลี่ยมตรงกลาง (25 ช่องใหญ่ ซึ่งภายในมีตารางขนาดเล็กจำนวน 16 ช่อง)

หมายเหตุ : 1) ถ้าจำนวนเซลล์สาหร่ายหนาแน่นสูง อาจสุ่มนับ 5 ช่อง แต่ผลที่ได้ต้องคูณ 5 หรือ สุ่มนับ 10 ช่อง ผลที่ได้ต้องคูณ 2.5

- 2) ถ้าเซลล์สาหร่ายทับเส้นให้เลือกนับแบบใดแบบหนึ่งต่อไปนี้

- ทับเส้นแนวนอน และเส้นแนวขวาให้ทับ (ซ้าย-ล่าง ไม่นับ)
- ทับเส้นแนวกลาง และเส้นแนวซ้ายให้ทับ (ขวา-บน ไม่นับ)

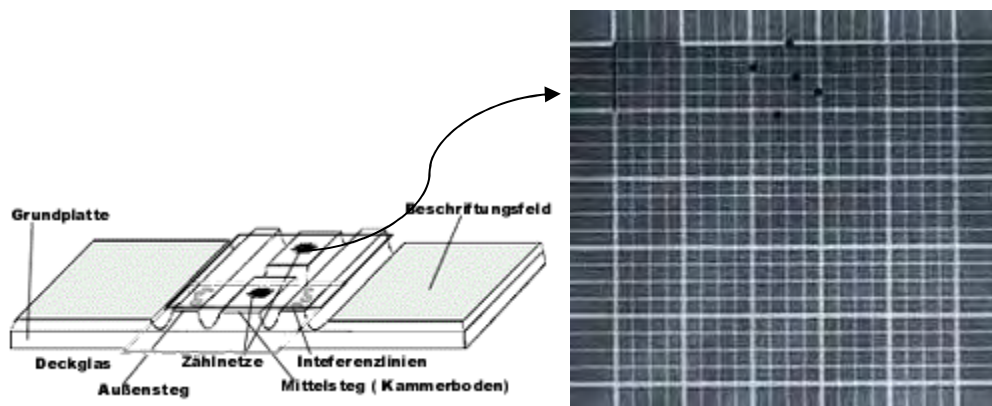
5. ทำการนับจำนวนเซลล์สำหรับยั้ง 2 ตาราง (สมมุติทำการนับได้  $n$  และ  $m$  เซลล์)

$$\text{ความเข้มข้นสาหร่าย} = \frac{n+m}{2} \times 10^4 \text{ เซลล์/มล.}$$

หรือคำนวณปริมาณสาหร่ายจากสูตร

$$\text{ปริมาณ มล.}^{-1} = \frac{C \times 1000 \text{ มม.}^3}{A \times D \times F}$$

เมื่อ	C	=	จำนวนสาหร่ายที่นับได้
	A	=	พื้นที่ของ grids; 0.04 มม. <sup>2</sup>
	D	=	ความลึกของพื้นที่ที่นับ; 0.1 มม.
	F	=	จำนวนช่องหรือตารางที่นับ



รูปที่ ค.2 พื้นที่ตารางสำหรับนับเซลล์สาหร่าย



ภาคผนวก ง

วิธีวัดคลอโรฟิลล์ เอ

### วิธีวัดคลอโรฟิลล์ เอ (Stickland and Parson, 1972)

1. นำน้ำตัวอย่าง 200 มล. ซึ่งเก็บโดยการเปิดจากวาล์วที่อยู่สูงจากกันดั้มปฏิบัติการ 5 ซม. ทุก 5 นาที มาใส่ภาชนะทรงสูงแล้วตั้งทิ้งไว้เพื่อให้เกิดการลอยตัวหรือตกตะกอนเป็นเวลา 20 นาที
2. ดูดน้ำส่วนใสจากกึ่งกลางความสูงของภาชนะจนได้ปริมาตร 100 มล.
3. ตวงน้ำส่วนใสด้วยกระบอกตวงปริมาตร 50 มล. นำไปกรองผ่านกระดาษขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม. (0.7 ไมครอน) ด้วยเครื่องกรองน้ำสุญญากาศที่แรงดัน 650 มม.ปรอท จำนวน 2 ซ้ำ
4. นำกระดาษกรองที่ผ่านการกรองแล้วมาห่อด้วยกระดาษฟอยด์ขนาด 5 X 5 ซม. โดยเขียนรายละเอียดของตัวอย่างกำกับไว้และเก็บในถุงพลาสติก จากนั้นนำไปเก็บในตู้เย็นอุณหภูมิ -20 - -80 องศาเซลเซียส
5. นำกระดาษกรองที่แช่เย็นมาตัดเป็น 4 ส่วน และใส่ลงในหลอดทดลอง ทำการสกัดคลอโรฟิลล์ เอ ด้วยอะซีโตนซึ่งมีความเข้มข้น 90% ปริมาตร 10 มล.
6. นำหลอดทดลองไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าสาร (Sonicate) เป็นเวลา 8 นาที
7. พักหลอดทดลองทิ้งไว้เป็นเวลา 4-6 ชั่วโมง
8. นำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องเซนทริฟิวจ์ (Centrifuge) ที่ความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที เป็นเวลา 15 นาที
9. ตรวจวัดปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ด้วยเครื่องสเปกโตรฟลูออโรมิเตอร์ โดยทำการวัดตัวอย่างทั้งในสภาวะปกติและในสภาวะเป็นกรด (0.1 N HCl 2 หยด)

ภาคผนวก จ

วิธีการคำนวณ

### การคำนวณความเข้มข้นน้ำสาหร่ายสังเคราะห์

$$V_1 = \frac{N_2 V_2}{N_1}$$

$N_1$	=	ความเข้มข้นน้ำสาหร่ายสายพันธุ์ <i>Chlorella vulgaris</i> (เซลล์/ลิตร)
$N_2$	=	ความเข้มข้นน้ำสาหร่ายสังเคราะห์ที่ต้องการ (เซลล์/ลิตร)
$V_1$	=	ปริมาตรน้ำสาหร่ายเข้มข้นสายพันธุ์ <i>Chlorella vulgaris</i> (มล.)
$V_2$	=	ปริมาตรน้ำสาหร่ายสังเคราะห์ที่ต้องการ (มล.)

### การคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย

$$\text{Algae removal (\%)} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100$$

Algae removal (%)	=	ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย (%)
$C_0$	=	ความเข้มข้นสาหร่ายเริ่มต้น (เซลล์/ลิตร)
$C_t$	=	ความเข้มข้นสาหร่ายที่เวลาใดๆ (เซลล์/ลิตร)

### การคำนวณหาความเข้มข้นคลอโรฟิลล์ เอ

$$\text{Chlorophyll a (mg/m}^3\text{)} = F_s \frac{(r)}{(r-1)} (R_b - R_a) \frac{V_e}{V_s}$$

เมื่อ

$$F_s = \frac{C_a}{R_s}$$

$$r = \frac{R_b}{R_a}$$

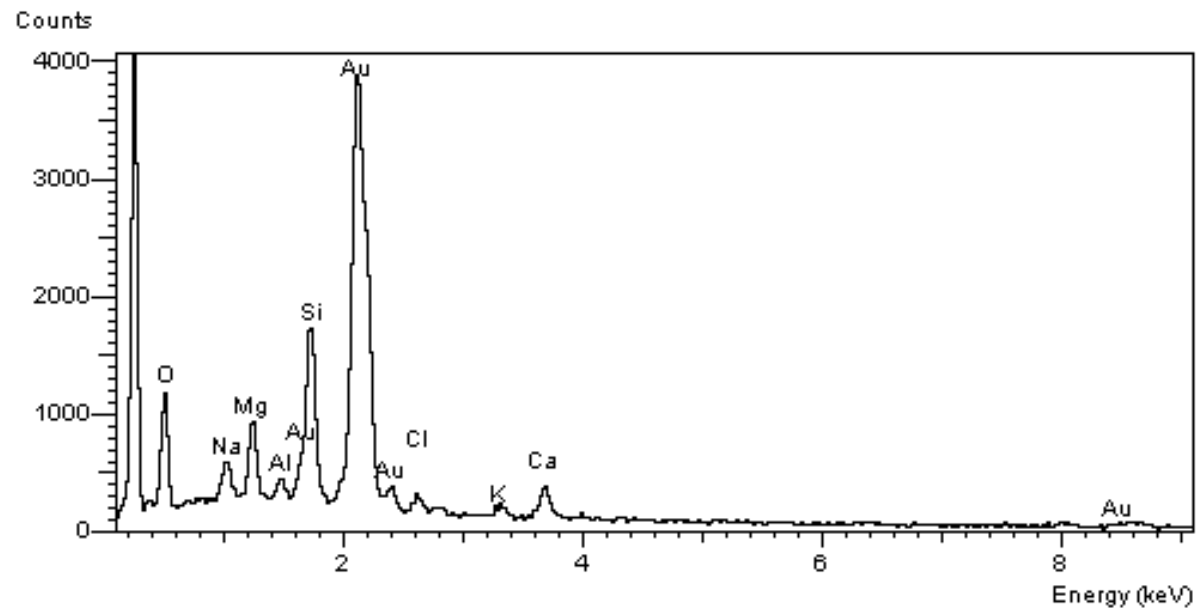
Chlorophyll a	=	ความเข้มข้นคลอโรฟิลล์ เอ (มก./ลบ.ม.)
$F_s$	=	ค่าปรับแก้เครื่องสเปคโตรฟลูออโรมิเตอร์
$R_b$	=	ค่าฟลูออเรสเซนซ์ที่ทำการวัดได้ก่อนหยุดกรด

- $R_a$  = ค่าฟลูออเรสเซนซ์ที่ทำการวัดได้หลังหยุดกรด
- $r$  = อัตราส่วนระหว่างค่าฟลูออเรสเซนซ์ที่ทำการวัดได้ก่อนหยุดกรดและหลังหยุดกรด
- $V_e$  = ปริมาตรอะซิโตนที่ใช้สกัด (มล.)
- $V_s$  = ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (มล.)

ภาคผนวก จ

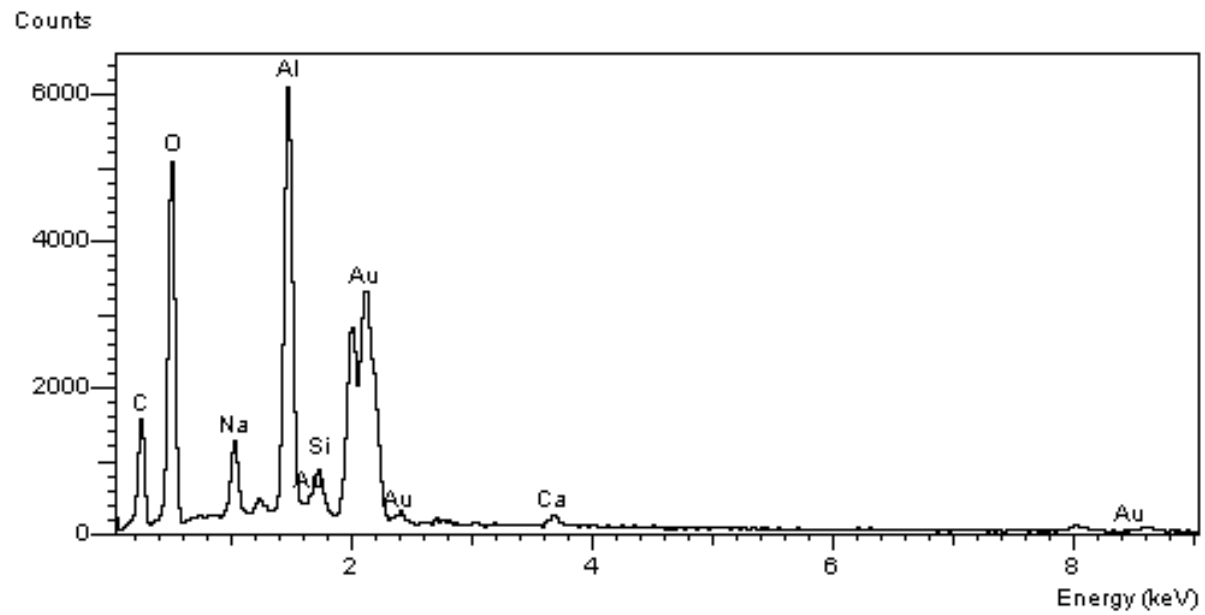
วิเคราะห์องค์ประกอบของตะกอนลอย

ฉ.1



ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของเซลล์สาหร่ายโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM-EDS)

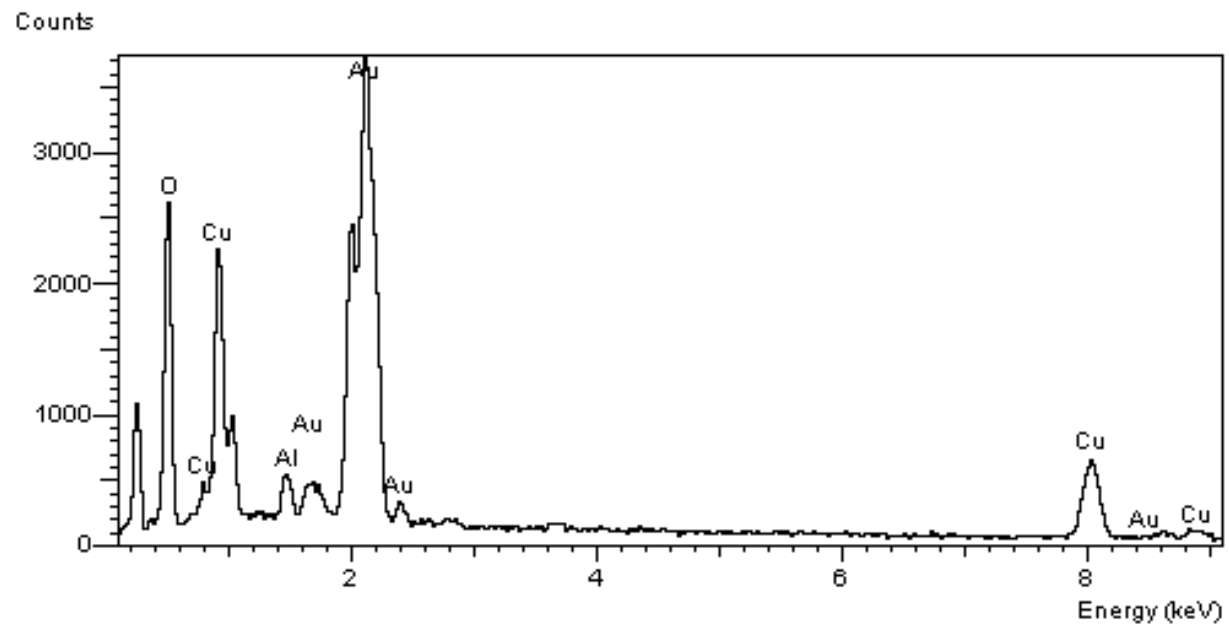
จ.2



ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM-EDS)

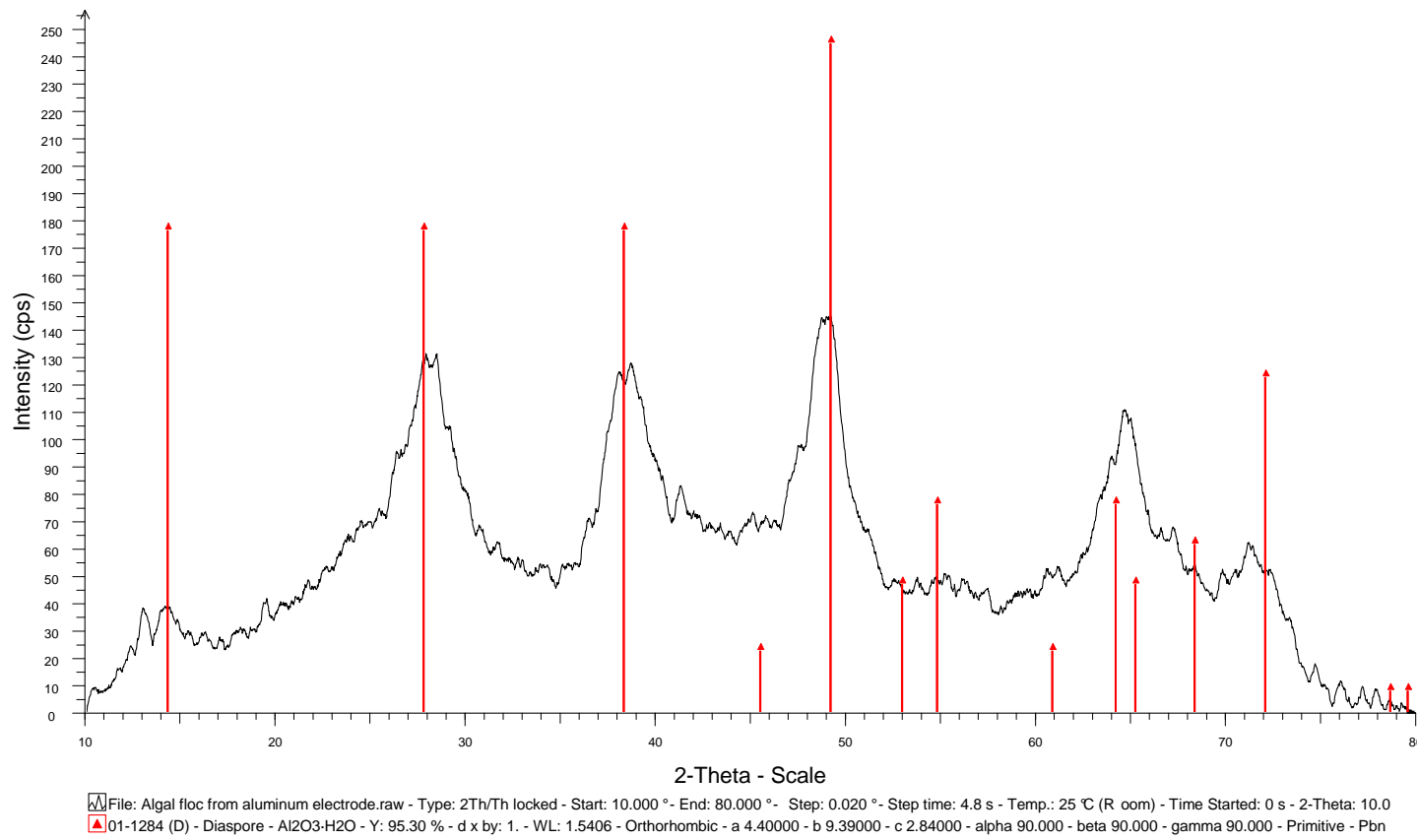


ฉ.3



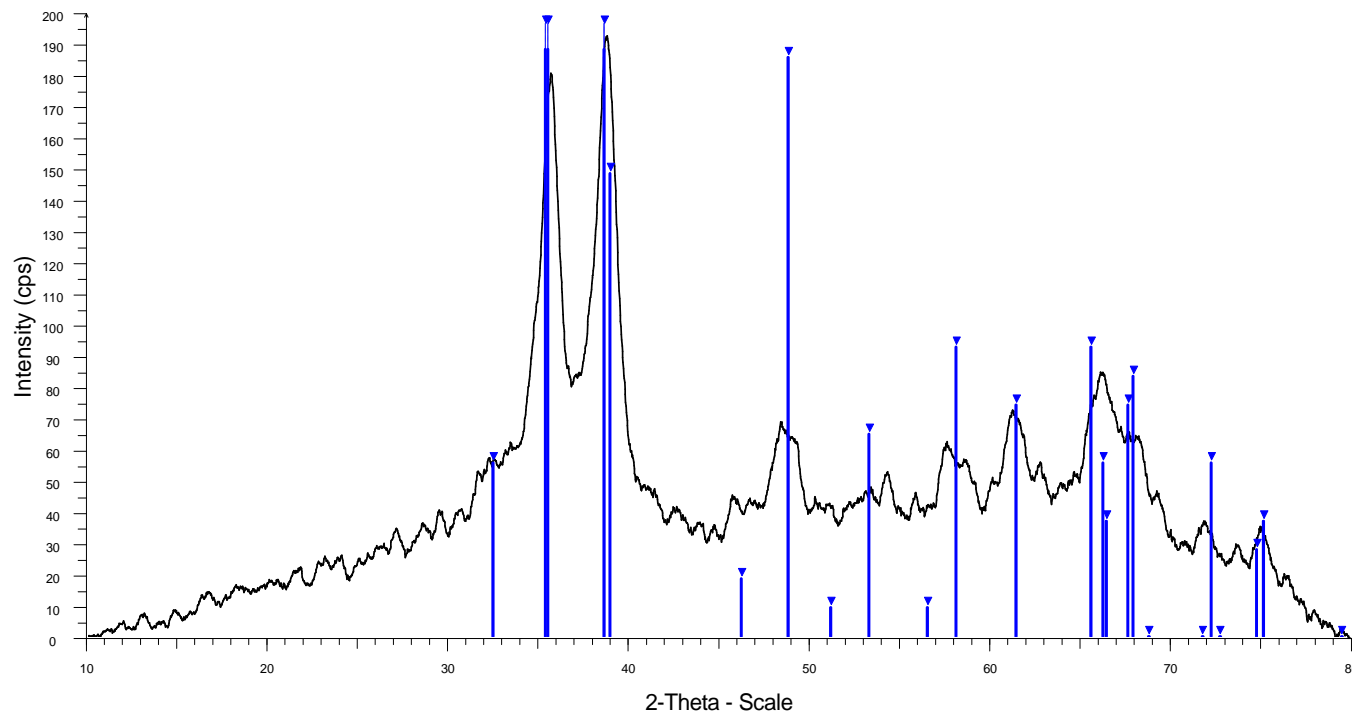
ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์โดยวิเคราะห์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM-EDS)

จ.4



ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกและเฟสของ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(Diaspore) โดยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-Ray diffraction)

ฉ.5



File: Cu(OH)2 Algal flocc.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 10.000 ° - End: 80.000 ° - Step: 0.020 ° - Step time: 1.2 s - Temp.: 25 °C (Room)  
80-0076 (C) - Copper Oxide - CuO - Y: 266.66 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Monoclinic - a 4.67970 - b 3.43140 - c 5.13620 - alpha 90.000 -

ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกและเฟสของ CuO (Copper Oxide) โดยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-Ray diffraction)

ภาคผนวก ช

วิเคราะห์องค์ประกอบในน้ำ

ซ.1



สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน) (สวอ)  
The Gem and Jewelry Institute of Thailand (Public Organization) (GIT)

### รายงานผลการวิเคราะห์ / Assay Report

เลขที่ / No ASI1012-006 Issue No. 0007511  
วันที่รับของ 13/12/10 วันที่วิเคราะห์ 14/12/10  
ลักษณะของวัตถุ / Specimen characteristic สารละลาย  
น้ำหนักก่อนวิเคราะห์ / Weight before assaying - g  
น้ำหนักหลังวิเคราะห์ / Weight after assaying - g  
รายละเอียด / Description Cu  
วิธีการวิเคราะห์ / Method of Assaying ICP (Inductively Couple Plasma)

ผลการวิเคราะห์ / Result

ธาตุ / element	มีลลกรัม/ลิตร	หมายเหตุ / remark
Cu (Copper)	1.40	

  
(จักรพันธ์ สุวรรณวิจิตร)

ผู้รับรอง/Approved

  
(มนเฑพงษ์ วาควรี)

ผู้ตรวจสอบ/Assayer

ผลการวิเคราะห์ปริมาณทองแดงในน้ำหลังการบำบัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า  
(ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์/ตร.ม. ระยะเวลาในการเดินระบบ 40 นาที)

ซ.2



สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน) (สวอ)  
The Gem and Jewelry Institute of Thailand (Public Organization) (GIT)

### รายงานผลการวิเคราะห์ / Assay Report

เลขที่ / No ASI1103-020 Issue No. 0007878  
วันที่รับของ 11/03/11 วันที่วิเคราะห์ 16/03/11  
ลักษณะของวัตถุ / Specimen characteristic Solution  
น้ำหนักก่อนวิเคราะห์ / Weight before assaying - g  
น้ำหนักหลังวิเคราะห์ / Weight after assaying - g  
รายละเอียด / Description No. 0  
วิธีการวิเคราะห์ / Method of Assaying ICP (Inductively Couple Plasma)

#### ผลการวิเคราะห์ / Result

ธาตุ / element	ppm	หมายเหตุ / remark
Al (Aluminium)	0.44	

(จักรพันธ์ สุวรรณวิจิตร)

ชิตารัตน์ เมืองไทย

(ชิตารัตน์ เมืองไทย)

ผู้รับรอง/Approved

ผู้ตรวจสอบ/Assayer

ผลการวิเคราะห์ปริมาณอะลูมิเนียมในน้ำรีไซเคิลโดยเครื่องวัดปริมาณธาตุ (ICP)

ซ.3



สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน) (สวอ)  
The Gem and Jewelry Institute of Thailand (Public Organization) (GIT)

### รายงานผลการวิเคราะห์ / Assay Report

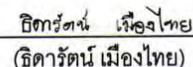
เลขที่ / No ASI1103-021 Issue No. 0007878  
วันที่รับของ 11/03/11 วันที่วิเคราะห์ 16/03/11  
ลักษณะของวัตถุ / Specimen characteristic Solution  
น้ำหนักก่อนวิเคราะห์ / Weight before assaying - g  
น้ำหนักหลังวิเคราะห์ / Weight after assaying - g  
รายละเอียด / Description No. 40  
วิธีการวิเคราะห์ / Method of Assaying ICP (Inductively Couple Plasma)

#### ผลการวิเคราะห์ / Result

ธาตุ / element	ppm	หมายเหตุ / remark
Al (Aluminium)	0.86	

  
(จักรพันธ์ สุวรรณจิตร)

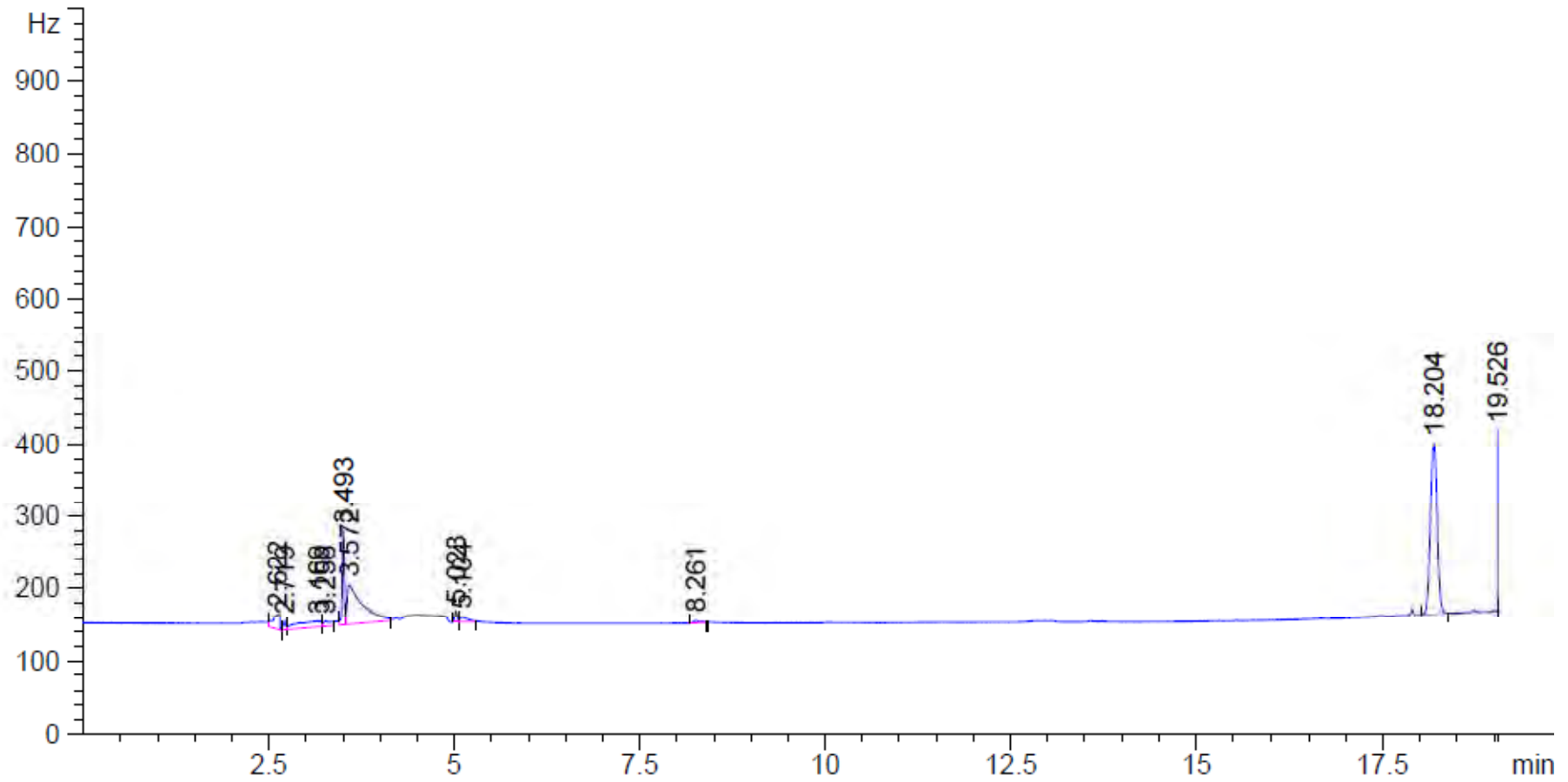
ผู้รับรอง/Approved

  
(ธิดารัตน์ เมืองไทย)

ผู้ตรวจสอบ/Assayer

ผลการวิเคราะห์ปริมาณอะลูมิเนียมในน้ำรีไซเคิลหลังการบำบัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์/ตร.ม. ระยะเวลาในการเดินระบบ 40 นาที เติมน้ำเติมคลอรีน 0.5 มิลลิโมลาร์)

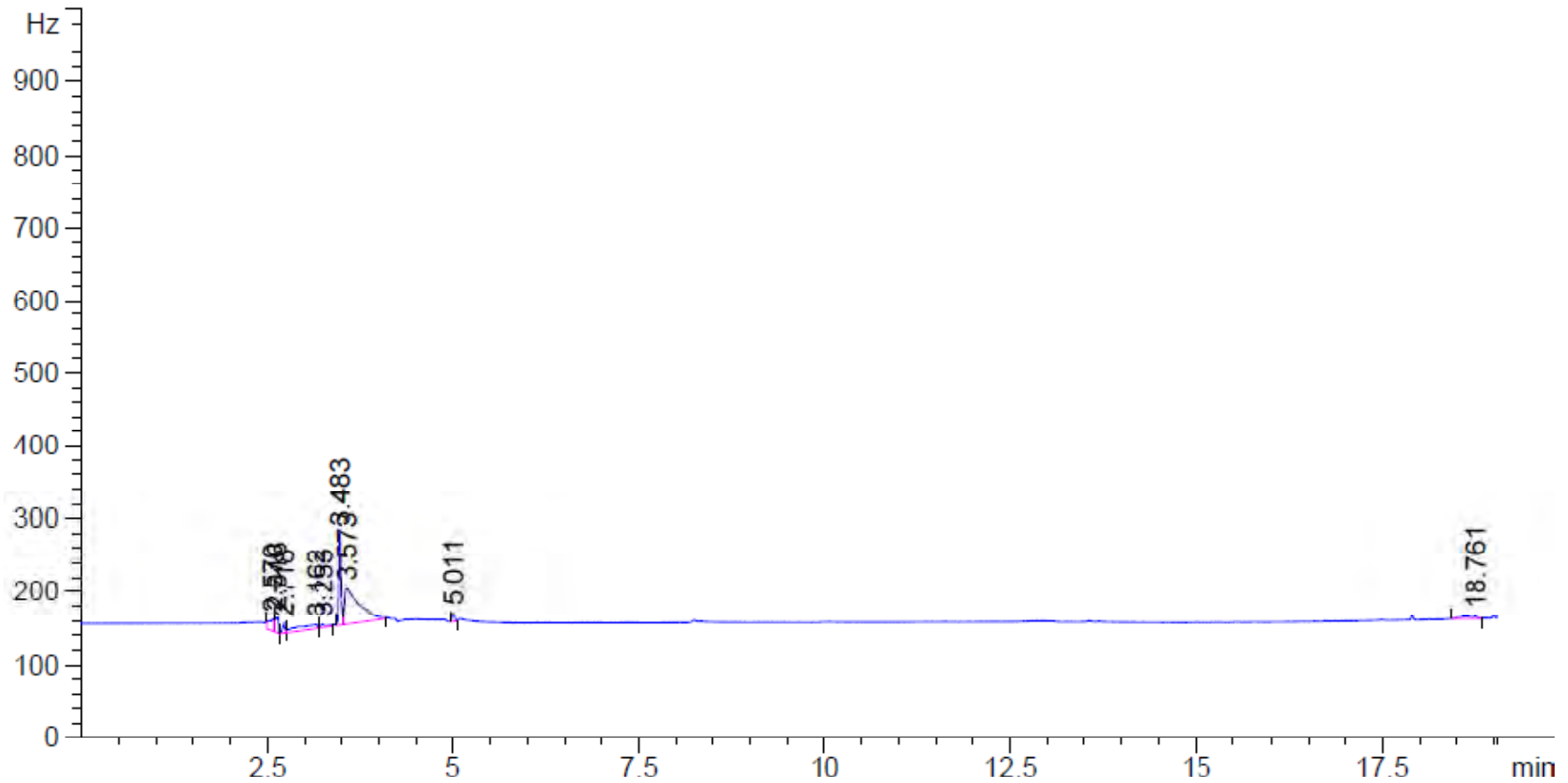
ที่ 4.



ผลการวิเคราะห์ THMs ในน้ำรีไซเคิล พบ  $\text{CHCl}_3$  5.01 ไมโครกรัม/ลิตร ทำการวิเคราะห์โดยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas chromatography)



พ. 5



ผลการวิเคราะห์ THMs ในน้ำรีไซเคิลที่ผ่านการบำบัด (ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์/ตร.ม. ระยะเวลาในการเดินระบบ 40 นาที เติมน้ำเติมคลอรีน 0.5 มิลลิโมลาร์) พบ  $\text{CHCl}_3$  4.25 ไมโครกรัม/ลิตร ทำการวิเคราะห์โดยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas chromatography)

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกานต์ ตุ่มศรี เกิดเมื่อวันที่ 13 เมษายน พ.ศ. 2529 ที่จังหวัดเพชรบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) จากสาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ในปีการศึกษา 2550 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ.2551

การเผยแพร่วิทยานิพนธ์

[1] Tumsri, K. and Chavalparit, C. "Optimizing Electrocoagulation-electroflotation Process for Algae Removal" Proceeding of 2011 2<sup>nd</sup> International Conference on Environmental Science and Technology. Febuary 26-28, 2011, Peninsula Excelsior Hotel, Singapore.

[2] Tumsri, K., Chamnanmor, R., and Chavalparit, C. "Algae Removal from Recycled Water by Electrocoagulation-electroflotation Process" Proceeding of 2011 International Conference on Environmental Quality Concern, Control and Conservation. May 20-21, 2011, National Kaohsiung Marine University, Kaohsiung, Taiwan