

การใช้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ร่วมกับการตกตะกอนทางเคมี
เพื่อกำจัดเซลล์สาหร่ายในระบบผลิตน้ำประปา

นายเฉลิมเกียรติ บุญลือ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

Application of Ultrasound with chemical coagulation
for algae removal in water treatment process

Mr. Chalermkiat Boonlue

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 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การใช้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ร่วมกับการตกตะกอนทางเคมีเพื่อ กำจัดเซลล์สาหร่ายในระบบผลิตน้ำประปา
โดย	นาย เฉลิมเกียรติ บุญลือ
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศวีระวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร. อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร. อัจฉริยา สุริยะวงศ์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขวัญเนตร สมบัติสมภพ)

เฉลิมเกียรติ บุญลือ : การใช้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ร่วมกับการตกตะกอนทางเคมีเพื่อ
กำจัดเซลล์สาหร่ายในระบบผลิตน้ำประปา.(APPLICATION OF ULTRASOUND
WITH CHEMICAL COAGULATION FOR ALGAE REMOVAL IN WATER
TREATMENT PROCESS.) อ. ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ. ดร. อรอนงค์ ลามปรีสุทธิ,
156 หน้า.

ปัญหาอุทกภัยที่เพิ่มขึ้น กำลังเป็นปัญหาต่อคุณภาพน้ำในทะเลสาบและอ่างเก็บน้ำทั่วโลก ซึ่งเป็นแหล่งน้ำดิบใน
กระบวนการผลิตน้ำประปา ปริมาณสาหร่ายที่มากจะรบกวนต่อระบบผลิตน้ำประปา โดยสาหร่ายบางชนิดทำให้
เกิดสี กลิ่นและรสที่ผิดปกติ รวมทั้งอุดตันในระบบทราयरอง จึงต้องเพิ่มการใช้สารเคมีช่วยในการตกตะกอนมาก
ขึ้น งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาค้นคว้าความเป็นไปได้ โดยการใช้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ร่วมกับการตกตะกอนทางเคมี
เพื่อกำจัดสาหร่ายสีเขียวในน้ำ ทำการศึกษาค้นคว้าผลของระยะเวลาของการให้คลื่นเสียงที่เหมาะสมในการกำจัดเซลล์
สาหร่าย โดยศึกษาการยับยั้งสาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* sp. และสายพันธุ์ *Scenedesmus* sp.
ทำการให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ ที่ความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ ความเข้มพลังงานที่ 100 วัตต์ ทดลองโดยให้คลื่น
เสียงอัลตราซาวด์ ที่เวลาแตกต่างกัน พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 30 วินาที สามารถลดปริมาณสาหร่ายสีเขียวสาย
พันธุ์ *Chlorella vulgaris* sp. ได้ร้อยละ 41 และที่สภาวะเดียวกันพบว่า สามารถลดปริมาณสาหร่ายสีเขียวสาย
พันธุ์ *Scenedesmus* sp. ได้ ร้อยละ 70.2 ที่เวลา 10 วินาที เมื่อนำสาหร่ายสีเขียวทั้ง 2 ชนิดผสมกัน (mixed
culture) พบว่าสามารถลดปริมาณเซลล์สาหร่ายได้สูงสุดร้อยละ 45.4 ที่เวลา 30 วินาที เทียบกับน้ำตัวอย่างที่ไม่
ผ่านกระบวนการให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ จากนั้นทำการทดลองเพื่อหาระดับพลังงานที่เหมาะสมต่อการ
ตกตะกอน พบว่าที่ระดับพลังงาน 60 วัตต์มีประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุด โดยพบว่าสามารถลดปริมาณเซลล์
สาหร่ายสายพันธุ์ *Scenedesmus* sp. ได้สูงสุด ร้อยละ 71.67 *Chlorella vulgaris* sp. ได้ร้อยละ 51.60 และ
สาหร่ายผสม 58.22 เมื่อทำการตกตะกอนทางเคมีร่วม พบว่าประสิทธิภาพการตกตะกอนสาหร่ายสีเขียวสาย
พันธุ์ *Chlorella vulgaris* sp. *Scenedesmus* sp. และ mixed culture เพิ่ม ร้อยละ 30.84 21.71 และ 41.26
ตามลำดับ โดยไม่ทำให้เซลล์สาหร่ายแตก ความเข้มข้นของเซลล์สาหร่ายเพิ่มขึ้นต่างกัน 10 เท่า จะทำให้
ประสิทธิภาพการบำบัดลดลงประมาณร้อยละ 10 ซึ่งอาจสรุปได้ว่าปริมาณเซลล์สาหร่ายที่เพิ่มสูงขึ้น มีผลต่อ
ประสิทธิภาพการบำบัดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่อนิติ
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่อ อ. ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก
ปีการศึกษา2555.....ลายมือชื่อ อ. ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5370537921: MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: ULTRASOUND / ALGAE BLOOM / CHEMICAL COAGULATION /
CAVITATION

CHALERMKIAT BOONLUE:APPLICATION OF ULTRASOUND WITH CHEMICAL
COAGULATION FOR ALGAE REMOVAL IN WATER TREATMENT PROCESS.

ADVISOR: ON-ANONG LARPPARISUDTHI, Ph.D., 156 pp.

Eutrophication is a problem found in lake and reservoir of which raw water is used to make tap water. Large amount of algae can interfere water treatment process by creating peculiar smell and taste and by clogging sand-filter. As a result, higher amount of coagulant or chlorine is demanded to inhibit the growth of algae. This research is aimed to study the possibility of using sonication with chemical coagulation to eliminate green algae in raw water and to determine the suitable duration of the treatment. The results showed that removal of *Chlorella vulgaris sp.* was the most at 41 percent when treated for 30 seconds with the sonication at the frequency of 40 KHz and the intensity of 100 watts. At the same condition of sonication, 70.2 percent of *Scenedesmus sp.* was most effectively eliminated when treated for 10 seconds. For the mixed culture algae, it was found that the most removal was 45.4 percent when treated for 30 seconds, comparing with (untreated sample). To determine the suitable power intensity for green algae removal, from the results, the most removal efficiency was found at 60 watt for both individual algae as well as for the mixture. Removal of green algae by ultrasound were 71.67 percent, 51.60 percent and 58.22 percent for *Scenedesmus sp.*, *Chlorella sp.*, and the mixture respectively. When enhance the removal with coagulation, the results showed that the removal of *Chlorella vulgaris sp.*, *Scenedesmus sp.* and mixed culture additionally increased by 30.84 percent, 21.71 percent, and 41.26 percent respectively without breaking the cell. The removal efficiency was decreased 10 percent when concentration of algae increased 10 times. It could be concluded that an increasing of algae had a small effect on removal efficiency.

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

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

Academic Year :2012.....Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากหลายท่าน ซึ่งผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้ความรู้ ให้คำปรึกษาและแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่กรุณาให้คำแนะนำ ตรวจสอบ และแก้ไขวิทยานิพนธ์ ให้มีความสมบูรณ์ รวมทั้งขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์วิทยาลัย ทุกท่านที่กรุณาอบรมและถ่ายทอดความรู้

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนเงินทุนในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อนุเคราะห์สาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาม่าใช้ในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยเทคโนโลยีและวิทยาศาสตร์ (วว) ที่อนุเคราะห์สาหร่ายสายพันธุ์ เซนีเดสมีส

และท้ายที่สุดขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ของผู้เขียนวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้การสนับสนุนส่งเสริมและเป็นกำลังใจเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 กระบวนการผลิตน้ำประปา.....	4
2.2 สาหร่าย.....	7
2.2.1 สาหร่ายสีน้ำตาลแกมทอง.....	9
2.2.2 สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน.....	11
2.2.3 สาหร่ายสีเขียว.....	12
2.3 ผลกระทบของสาหร่ายต่อกระบวนการผลิตน้ำประปา.....	16
2.3.1 สาหร่ายที่เกาะนิ่งกับที่.....	17
2.3.2 สาหร่ายที่ลอยอย่างอิสระ.....	17
2.4 วิธีการกำจัดสาหร่ายในระบบผลิตน้ำประปา.....	19
2.4.1 การควบคุมในแหล่งน้ำดิบ.....	20
2.4.2 การควบคุมในระบบผลิตน้ำประปา.....	20
2.5 การสร้างและรวมตะกอนทางเคมี (Chemical coagulation and flocculation)..	22
2.5.1 อนุภาคในน้ำ.....	22
2.5.2 หลักการของกระบวนการตกตะกอนทางเคมี.....	23
2.5.3 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการตกตะกอนทางเคมี.....	23

2.5.4 ผลของพีเอชที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนทางเคมี.....	24
2.6 การทดลองด้วยเครื่อง Jar test.....	25
2.7 อัลตราซาวด์ (Ultrasound).....	26
2.7.1 แหล่งกำเนิดคลื่นอัลตราซาวด์.....	28
2.7.2 การออกแบบระบบอัลตราซาวด์.....	31
2.8 ประเภทของเครื่องอัลตราซาวด์.....	32
2.8.1 อ่างอัลตราซาวด์.....	32
2.8.2 ระบบอัลตราซาวด์แบบโพรบ.....	34
2.9 ปฏิกิริยาการเกิดคาวิเทชัน (Cavitation).....	35
2.10 ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดจากคลื่นอัลตราซาวด์.....	37
2.10.1 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างของเหลวกับของเหลว.....	37
2.10.2 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างผิวของแข็งกับของเหลว.....	38
2.11 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดฟองอากาศคาวิเทชัน.....	39
2.11.1 ความถี่ (Frequency)	39
2.11.2 ความหนืดของสารละลาย (Solvent Viscosity).....	39
2.11.3 แรงตึงผิวหน้าของสารละลาย (Solvent Surface Tension).....	39
2.11.4 ความดันไอของสารละลาย (Solvent Vapour Pressure).....	39
2.11.5 อุณหภูมิ (Temperature).....	40
2.11.6 ความเข้ม (Intensity).....	40
2.12 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	40
บทที่ 3 แผนการทดลองและดำเนินการวิจัย.....	46
3.1 แผนการวิจัย.....	46
3.2 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี.....	49
3.3 ตัวแปรในการทดลอง.....	49
3.4 พารามิเตอร์.....	51
3.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	51
3.5.1 การเตรียมน้ำตัวอย่างสำหรับยั่งเคราะห์.....	51
3.5.2 วิเคราะห์น้ำตัวอย่างปนเปื้อนเซลล์สำหรับยั่งจากโรงประปา.....	53

3.5.3	ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	53
3.5.3.1	ศึกษาผลของปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟต.....	53
3.5.3.2	ศึกษาผลของปริมาณปูนขาว.....	55
3.5.3.3	ศึกษาผลของระยะเวลา.....	57
3.5.3.4	ศึกษาผลของระยะเวลาร่วมกับการตกตะกอนทางเคมี.....	58
3.5.3.5	ศึกษาผลของพลังงานเสียง.....	59
3.5.3.6	ศึกษาผลของพลังงานเสียงร่วมกับการตกตะกอนทางเคมี.....	60
3.5.3.7	ศึกษาผลของระยะเวลาและพลังงานเสียงร่วมกับการตกตะกอนทางเคมี.....	61
3.5.3.8	ศึกษาความเข้มข้นของปริมาณสาหร่ายต่อการกำจัด.....	62
3.5.3.9	การทดลองตกตะกอนสาหร่ายเทียบกับเวลา.....	63
3.5.3.10	ผลของการตกตะกอนทางเคมีในการกำจัดสาหร่าย ในน้ำดิบจากโรงประปา.....	65
3.5.3.11	ศึกษาผลของระยะเวลาในการกำจัดสาหร่าย ในน้ำดิบจากโรงประปา.....	66
3.5.3.12	ศึกษาผลของพลังงานเสียงในการกำจัดสาหร่าย ในน้ำดิบจากโรงประปา.....	67
3.5.3.13	ศึกษาการใช้คลื่นเสียงร่วมการตกตะกอนทางเคมี ในการกำจัดสาหร่ายน้ำดิบจากโรงประปา.....	68
3.5.3.14	ศึกษาการกำจัดสาหร่ายในอ่างอัลตราซาวด์ 120 ลิตร.....	69
3.5.3.15	ศึกษาการเจริญเติบโตของสาหร่ายหลังอัลตราซาวด์.....	69
บทที่ 4	ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....	70
4.1	วิเคราะห์พลังงานของคลื่นเสียงอัลตราซาวด์.....	70
4.2	ผลของปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟต (Alum).....	71
4.3	ผลของปริมาณปูนขาว (lime).....	75
4.4	ผลของระยะเวลาการให้คลื่นเสียง.....	76
4.5	ผลของระยะเวลาการให้คลื่นเสียงร่วมกับการเติม Alum.....	80

	หน้า
4.6 ผลของพลังงานเสียง.....	83
4.7 ผลของพลังงานเสียงโดยเติม Alum.....	86
4.8 ผลของระยะเวลา ใช้พลังงานเสียงที่เหมาะสมโดยเติมAlum.....	91
4.9 ผลศึกษาความเข้มข้นของสาหร่าย.....	94
4.10 ผลการทดลองตกตะกอนเซลล์สาหร่ายเทียบกับเวลาการตกตะกอน.....	94
4.11 ผลประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยใช้คลื่นอัลตราซาวด์ร่วมกับการ ตกตะกอนทางเคมีจากน้ำปนเปื้อนสาหร่ายจากโรงผลิตน้ำประปา.....	99
4.12 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยการตกตะกอนทางเคมีจากน้ำ ปนเปื้อนสาหร่ายจากโรงผลิตน้ำประปา.....	101
4.13 ผลของประสิทธิภาพของระยะเวลาในการใช้คลื่นอัลตราซาวด์ เพื่อกำจัด สาหร่ายจากน้ำปนเปื้อนสาหร่ายจากโรงผลิตน้ำประปา.....	102
4.14 ผลของพลังงานในการใช้คลื่นอัลตราซาวด์ เพื่อกำจัดสาหร่ายจากน้ำปนเปื้อน สาหร่ายจากโรงผลิตน้ำประปา.....	103
4.15 ผลของการกำจัดสาหร่ายโดยใช้คลื่นอัลตราซาวด์ร่วมกับการตกตะกอนทาง เคมีจากน้ำตัวอย่างปนเปื้อนสาหร่ายจากโรงผลิตน้ำประปา.....	103
4.16 ผลของการกำจัดสาหร่ายในอ่างอัลตราซาวด์ขนาด 120 ลิตร.....	105
4.17 ผลของการเจริญเติบโตของเซลล์สาหร่ายที่ผ่านการอัลตราซาวด์.....	106
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและเสนอแนะ.....	109
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	109
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	110
รายการอ้างอิง.....	111
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์ตัวอย่าง.....	117
ภาคผนวก ข ข้อมูลการทดลอง.....	129
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	156

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงกลุ่มของสารร้ายที่เป็นสาเหตุการอุดตันทวารกรอง.....	15
2.2 ชนิดของอนุภาคในน้ำ พื้นที่ผิวและระยะเวลาในการตกตะกอน.....	22
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการตรวจวัดพารามิเตอร์.....	51
4.1 แสดงระดับพลังงานของคลื่นเสียงอัลตราซาวด์.....	70

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แม่น้ำเจ้าพระยาและจุดสูบน้ำในการผลิตน้ำประปาในกรุงเทพฯ	5
2.2 แผนผังการผลิตน้ำประปา.....	6
2.3 เซลล์สาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ <i>Chlorella vulgaris</i> sp.....	14
2.4 สาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ <i>Scenedesmus</i> sp.....	14
2.5 สาหร่ายที่ส่งกระทบต่อระบบประปา.....	19
2.6 ลักษณะประจุไฟฟ้า 2 ชั้นรอบอนุภาค.....	23
2.7 แผนภูมิแสดงความสามารถในการละลายของอะลูมิเนียม.....	25
2.8 Jar Test.....	26
2.9 การเคลื่อนที่ของคลื่นจากพลังงานของเสียง.....	27
2.10 คลื่นความถี่ของอัลตราซาวด์ในช่วงต่างๆ.....	27
2.11 แก๊สทราเนสดีวเซอร์.....	28
2.12 ลิควิดทราเนสดีวเซอร์.....	29
2.13 แมกนีโตสตรีกทีฟทราเนสดีวเซอร์.....	29
2.14 พีโซอิเล็กตริกทราเนสดีวเซอร์.....	30
2.15 อัลตราซาวด์แบบอ่าง.....	32
2.16 อ่างอัลตราซาวด์แบบคัพฮอร์น.....	33
2.17 ลักษณะของฮอร์นรูปแบบต่างๆ.....	34
2.18 ระบบอัลตราซาวด์แบบโพรบ.....	34
2.19 การพัฒนาและการยุบตัวของฟองอากาศควิเทชั่น.....	35
2.20 การเกิดฟองอากาศในตัวกลางเนื่องจากคลื่นอัลตราซาวด์.....	36
2.21 ฟองอากาศควิเทชั่นยุบตัวในของเหลว.....	37
2.22 การเกิด Hydrogen Peroxide, H ₂ O ₂ ในน้ำ จากการยุบตัวของฟองอากาศ.....	38

รูปที่	หน้า
2.23 การแตกของฟองอากาศในสารละลายที่ได้รับคลื่นอัลตราซาวด์ทำให้เกิด คลื่นกระแทกขนาดเล็กพุ่งเข้าสู่พื้นผิวของแข็ง.....	38
3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	48
3.2 ขั้นตอนการเตรียมน้ำตัวอย่างสำหรับที่เลี้ยงในห้องปฏิบัติการ.....	52
3.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์น้ำตัวอย่างปนเปื้อนเซลล์สำหรับจากโรงประปา.....	53
3.4 ขั้นตอนการทดลองหาปริมาณ Alum ที่เหมาะสมในการกำจัดสาหร่าย.....	54
3.5 การทดลองหาปริมาณ lime ที่เหมาะสมในการกำจัดสาหร่าย.....	56
3.6 การศึกษาผลของระยะเวลาการให้คลื่นเสียง.....	57
3.7 การศึกษาผลของระยะเวลาโดยเติม Alum.....	58
3.8 การศึกษาผลของพลังงาน.....	59
3.9 การศึกษาผลของพลังงานโดยเติม Alum.....	60
3.10 ขั้นตอนการศึกษาค่าผลของระยะเวลา ใช้พลังงานที่เหมาะสมโดยเติม Alum.....	61
3.11 การศึกษาผลของความเข้มข้นเซลล์สาหร่ายที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย.....	62
3.12 การทดลองตกตะกอนเซลล์สาหร่าย 3 แบบโดยทำการเก็บตัวอย่างเทียบกับเวลา.....	64
3.13 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยการตกตะกอนทางเคมี จากน้ำตัวอย่างปนเปื้อนสาหร่ายจากโรงผลิตน้ำประปา.....	65
3.14 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยใช้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ร่วมกับ การตกตะกอนทางเคมีจากน้ำตัวอย่างปนเปื้อนสาหร่ายจากโรงผลิตน้ำประปา.....	66
3.15 การศึกษาประสิทธิภาพของพลังงานต่อการกำจัดสาหร่ายโดยใช้คลื่น เสียงอัลตราซาวด์ จากน้ำตัวอย่างปนเปื้อนสาหร่ายจากโรงผลิตน้ำประปา.....	67
3.16 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยใช้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ร่วมกับ การตกตะกอนทางเคมี จากน้ำตัวอย่างปนเปื้อนสาหร่ายจากโรงผลิตน้ำประปา.....	68
3.17 อ่างอัลตราซาวด์ ขนาด 120 ลิตร.....	69
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Alum กับจำนวนเซลล์สาหร่าย.....	71
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Alum กับประสิทธิภาพการกำจัดเซลล์สาหร่าย.....	72

รูปที่	หน้า
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Alum กับ pH ที่เปลี่ยนแปลง.....	72
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Alum กับปริมาณ Alkalinity.....	74
4.5 แผนภูมิความสามารถในการตกตะกอน.....	74
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Alum กับปริมาณเซลล์สาหร่าย สายพันธุ์ <i>Chlorella vulgaris</i> sp.....	75
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Alum กับ pH.....	76
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการให้คลื่นเสียงกับปริมาณเซลล์ สาหร่ายสีเขียว 3 กลุ่ม.....	77
4.9 ลักษณะเซลล์สาหร่ายก่อน (A) และหลังการอัลตราซาวด์ (B).....	78
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการให้คลื่นเสียงกับปริมาณคลอโรฟิลล์เอ.....	79
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการให้คลื่นเสียงกับ ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย.....	79
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Alum ระยะเวลาการให้คลื่นเสียง ที่ 10 วินาทีระดับพลังงาน 60 วัตต์ กับประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย	81
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Alum ระยะเวลาการให้คลื่นเสียง ที่ 30 วินาที ระดับพลังงาน 60 วัตต์ กับประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย	82
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Alum ระยะเวลาการให้คลื่นเสียง ที่ 60 วินาที ระดับพลังงาน 60 วัตต์ กับประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย	83
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับพลังงานต่างๆกับปริมาณสาหร่ายสายพันธุ์.....	84
4.16 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ.....	85
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับพลังงานต่างๆ ระยะเวลาการให้คลื่นเสียง ที่ 30 วินาที กับประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย.....	86
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Alum ระยะเวลาการให้คลื่นเสียง 30 วินาที ระดับพลังงาน 60 วัตต์กับปริมาณสาหร่ายสายพันธุ์ <i>Chlorella vulgaris</i> sp.	87

รูปที่	หน้า
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Alum ระยะเวลาการให้คลื่นเสียง 30 วินาที ระดับพลังงาน 60 วัตต์กับปริมาณสาหร่ายสายพันธุ์ <i>Scenedesmus sp.</i>	88
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Alum ระยะเวลาการให้คลื่นเสียง 30 วินาที ระดับพลังงาน 60 วัตต์กับปริมาณสาหร่ายผสม.....	89
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Alum ระยะเวลาการให้คลื่นเสียง 30 วินาที ระดับพลังงาน 60 วัตต์ (0.0035 W/ml) กับ ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย.....	89
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Alum ระยะเวลาการให้คลื่นเสียง 30 วินาที ระดับพลังงาน 80 วัตต์กับประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย.....	90
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการให้คลื่นเสียงที่เวลาต่างๆ ระดับพลังงาน 60 วัตต์ ปริมาณ Alum 40 mg/l กับ ปริมาณสาหร่าย สายพันธุ์ <i>Chlorella vulgaris sp.</i>	91
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการให้คลื่นเสียงที่เวลาต่างๆ ระดับพลังงาน 60 วัตต์ ปริมาณ Alum 40 mg/l กับปริมาณสาหร่าย สายพันธุ์ <i>Scenedesmus sp.</i>	92
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการให้คลื่นเสียงที่เวลาต่างๆ ระดับพลังงาน 60 วัตต์ ปริมาณ Alum 40 mg/l กับปริมาณสาหร่าย ผสม.....	92
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการให้คลื่นเสียงที่เวลาต่างๆ ระดับพลังงาน 60 วัตต์ ปริมาณ Alum 40 mg/lกับประสิทธิภาพการกำจัด.....	93
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นสาหร่ายกับ ปริมาณสาหร่ายผสม.....	94
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการตกตะกอน ระยะเวลาการให้ คลื่นเสียง 30 วินาที ระดับพลังงาน 60 วัตต์กับปริมาณสาหร่าย.....	95

รูปที่	หน้า
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการตกตะกอน ปริมาณ Alum 40 mg/l กับปริมาณสาหร่าย.....	96
4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการตกตะกอน ปริมาณ Alum 40 mg/l ระยะเวลาให้คลื่นเสียง 30 วินาที กับ ปริมาณสาหร่าย	97
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการตกตะกอนกับปริมาณของสาหร่าย <i>Chlorella sp.</i> ที่ผ่านการให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์.....	98
4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการตกตะกอนกับปริมาณของสาหร่าย <i>Scenedesnus sp.</i> ที่ผ่านการตกตะกอนทางเคมี.....	98
4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการตกตะกอนกับปริมาณสาหร่ายผสมที่ผ่านการให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ร่วมกับการตกตะกอนทางเคมี.....	99
4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Alum กับความขุ่น.....	100
4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Alum กับค่าความเป็นด่าง (Alkalinity).....	100
4.36 สาหร่ายในน้ำดิบประปาสามเสน.....	101
4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Alum กับประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย.....	102
4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการให้คลื่นเสียงที่ระดับพลังงาน 60 วัตต์ กับประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย	102
4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับพลังงาน ระยะเวลาการให้คลื่นเสียง 30 วินาที กับประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย	103
4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Alum ที่ระดับพลังงาน 60 วัตต์ ระยะเวลาการให้คลื่นเสียง 30 วินาที กับประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย.....	104
4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการให้คลื่นเสียง ที่ระดับพลังงาน 100 วัตต์ กับประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย.....	105
4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับ ปริมาณสาหร่ายสายพันธุ์ <i>Chlorella vulgaris sp.</i>	107

รูปที่	หน้า
4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับ ปริมาณสาหร่ายสายพันธุ์ <i>Scenedesmus sp.</i>	107
4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับ ปริมาณสาหร่ายผสม.....	108

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การดำรงชีวิตของคนและสัตว์ย่อมขึ้นอยู่กับอาหารและน้ำเป็นปัจจัยสำคัญ ปัจจุบันน้ำสะอาดตามแหล่งน้ำธรรมชาติ หาได้ค่อนข้างยาก สำหรับชุมชนใหญ่จึงจำเป็นต้องใช้น้ำประปาในการอุปโภคบริโภค กระบวนการผลิตน้ำประปาเป็นการนำน้ำดิบซึ่งได้มาจากแม่น้ำ ลำคลอง อ่างเก็บน้ำ หรือบ่อบาดาล ทำให้สะอาดปราศจากโรคภัยอันตรายต่อผู้บริโภค โดยสิ่งเจือปนต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำจะต้องแยก หรือถูกกำจัดออกไป ให้มีคุณภาพตามเกณฑ์มาตรฐานที่ได้กำหนดไว้และส่งถึงมือผู้ใช้น้ำโดยระบบเส้นท่อ หากแหล่งตึบที่นำมาผลิตในน้ำประปาเสื่อมโทรมจะส่งผลกระทบต่อระบบผลิตน้ำประปาเป็นอย่างมาก

ปัญหายูโทรฟิเคชันหรือที่เรียกกันว่าปัญหาพีชน้ำเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว กำลังกลายเป็นปัญหาคุกคามต่อคุณภาพน้ำในทะเลสาบและอ่างเก็บน้ำทั่วโลกซึ่งเป็นแหล่งน้ำดิบในกระบวนการผลิตน้ำประปา ปริมาณสาหร่ายที่มากเกินไปจะรบกวนต่อระบบผลิตน้ำประปา โดยสาหร่ายบางชนิดทำให้เกิดสี กลิ่นและรสที่ผิดปกติ รวมทั้งอุดตันในระบบทรายกรอง จึงต้องเพิ่มการใช้สารเคมีช่วยในการตะกอน (Coagulant) มากขึ้น แต่พบว่าการใช้สารเคมีช่วยในการตกตะกอนบางชนิดกระตุ้นการปล่อยสาร Microcystin จากสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน ซึ่งเป็นสารพิษที่ก่อให้เกิดมะเร็ง โดยองค์การอนามัยโลก (WHO) กำหนดให้มีสาร Microcystin ไม่เกิน 1 ไมโครกรัมต่อลิตร นอกจากนี้อาจใช้วิธีการเติมสารเคมีเพื่อควบคุมการเจริญเติบโตของสาหร่ายโดยปกติสารเคมีที่นิยมเติมเช่น คลอรีน ไอโซน คลอรีนไดออกไซด์ โปแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต แต่การเติมสารกลุ่มคลอรีนในกระบวนการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน (Chlorination) ในระบบผลิตน้ำประปา อาจทำให้เกิด DBPs (Disinfection-by products) ซึ่งเป็นสารกลุ่มก่อมะเร็ง

ปัญหาน้ำท่วมใหญ่ ในประเทศไทย พ.ศ. 2554 พบว่าปัญหาสาหร่ายปนเปื้อนในน้ำดิบที่จะนำมาผลิตน้ำประปาในกรุงเทพมหานคร มีปริมาณสาหร่ายที่สูงกว่าปกติมาก เป็นสาเหตุให้การผลิตน้ำประปาต้องปิดเปิดการจ่ายน้ำเป็นเวลา เนื่องจากเกิดการอุดตันของเซลล์สาหร่ายในระบบผลิตน้ำประปา (การประปาส่วนภูมิภาค, 2554)

จากงานวิจัยจำนวนหนึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้อัลตราซาวด์สามารถยับยั้งปัญหา ยูโทรฟิเคชัน โดยเมื่อให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ลงในของเหลวหรือสารละลายจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านเคมี ซึ่งจะทำลายโครงสร้างของสาหร่าย ส่งผลต่อเจริญเติบโตของสาหร่าย

พร้อมทั้งยังส่งผลให้เซลล์สาหร่ายตกตะกอน และเมื่อมีการนำคลื่นเสียงอัลตราซาวด์ร่วมกับการตกตะกอนทางเคมีจะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายออกจากน้ำเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาความเป็นไปได้และสภาวะที่เหมาะสม ในการประยุกต์ใช้คลื่นอัลตราซาวด์ร่วมกับการใช้สารเคมีช่วยในการตกตะกอนเพื่อการจัดเซลล์สาหร่ายในน้ำ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการใช้คลื่นอัลตราซาวด์ร่วมกับการตกตะกอนทางเคมีเพื่อกำจัดสาหร่ายสีเขียวในน้ำประปา
2. ศึกษาผลของพลังงานและระยะเวลาของการให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ ความเข้มข้นของสาหร่าย ปริมาณสารเคมีช่วยตกตะกอนต่อการกำจัดสาหร่าย เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ ณ ห้องปฏิบัติการการวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. ศึกษาการใช้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ร่วมกับการตกตะกอนทางเคมี เพื่อกำจัดสาหร่ายออกจากน้ำในถังปฏิกรณ์แบบที่ละเท (Batch Reactor)
2. ใช้น้ำตัวอย่างสาหร่ายสังเคราะห์สีเขียวสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris sp. Scenedesmus sp.* และน้ำดิบที่ปนเปื้อนเซลล์สาหร่ายจากโรงผลิตน้ำประปา
3. ศึกษาผลของพลังงานต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยใช้ความถี่ 40 กิโลเฮิรตซ์ ในการกำจัดสาหร่ายออกจากน้ำ
4. ศึกษาผลของระยะเวลาในการเดินระบบ 8 ช่วงเวลา ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายออกจากน้ำ
5. ศึกษาความเข้มข้นของสาหร่ายที่ความเข้มข้น 5×10^8 10^9 10^{10} เซลล์ต่อลิตร ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายออกจากน้ำ
6. ศึกษาผลของปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟตและปูนขาวในการตกตะกอนของสาหร่าย ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายออกจากน้ำ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมของการใช้อัลตราซาวด์ร่วมกับการตกตะกอนทางเคมี ในการกำจัดเซลล์สาหร่ายสีเขียวออกจากน้ำ
2. ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมของการใช้พลังงาน และระยะเวลาของการให้คลื่นเสียง อัลตราซาวด์ ความเข้มข้นของสาหร่าย ปริมาณสารเคมีช่วยตกตะกอนต่อการกำจัดสาหร่าย
3. แนวทางในการกำจัดเซลล์สาหร่ายออกจากน้ำประปาโดยลดปริมาณการใช้สารเคมีหรือช่วยเร่งการตกตะกอนของเซลล์สาหร่ายในน้ำโดยใช้ปริมาณสารเคมีที่เท่าเดิม

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการผลิตน้ำประปา (ทันดาว ทองตัน, 2545 อ้างถึงใน การประปานครหลวง, 2542. และ ฝ่ายวางแผนการผลิตและควบคุมคุณภาพ, 2545)

น้ำประปาในประเทศไทยผลิตจากแหล่งน้ำดิบธรรมชาติ ที่ได้รับการป้องกันเป็นพิเศษ ไม่ให้มีการปนเปื้อนสารพิษทุกชนิด โดยความหมายของน้ำประปา พระบาทสมเด็จพระจุลจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว รัชกาลที่ 5 ทรงบัญญัติขึ้นจากคำในภาษาอังกฤษคำว่า “water supply” หมายถึง น้ำสะอาด ดังนั้นน้ำประปาจึงต้องผ่านกระบวนการเพื่อทำให้น้ำสะอาดที่เหมาะสมต่อการอุปโภคบริโภคของประชาชน

การประปาใช้น้ำดิบจาก 2 แหล่งหลักๆ คือ แม่น้ำเจ้าพระยา ที่เหนือวัดสำแล จังหวัดปทุมธานี ผ่านคลองประปา 1 ขุดขึ้นในสมัยรัชกาลที่ 5 แล้วเสร็จในรัชกาลที่ 6 และแหล่งที่ 2 คือ แม่น้ำท่าจีน จังหวัดนครปฐม ผ่านคลองประปา 2 ขุดขึ้นในรัชกาลปัจจุบัน ในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2545

แหล่งน้ำดิบทั้ง 2 แหล่ง ได้รับการคุ้มครองไม่ให้เกิดการปนเปื้อนมลพิษ โดยมติคณะรัฐมนตรีเห็นชอบตามมติคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม กำหนดเขตอนุรักษ์แหล่งน้ำดิบที่เข้าคลองประปาทั้งสอง ห้ามตั้งโรงงานอุตสาหกรรมที่มีน้ำทิ้งประกอบด้วยสารพิษทุกชนิด ห้ามตั้งโรงงานอุตสาหกรรมที่มีน้ำทิ้งเกินวันละ 50 ลูกบาศก์เมตร ให้ควบคุมน้ำทิ้งชุมชนตามมาตรฐานน้ำทิ้งจากอาคารและพื้นที่เขตอนุรักษ์ แหล่งน้ำดิบเป็นเขตควบคุมอาคารภายใต้พระราชบัญญัติควบคุมอาคาร ให้ดูแลกิจกรรมการเกษตรที่ก่อให้เกิดน้ำเสีย เช่น การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำและการทำฟาร์ม ให้กรมชลประทานและหน่วยงานที่มีหน้าที่ดูแลคลองในพื้นที่ปรับปรุงและควบคุมการระบายน้ำจากคลองอื่นซึ่งอาจมีความสกปรกปนเปื้อนสูงจนมีผลต่อคุณภาพน้ำดิบ

คลองประปา 1 ส่งน้ำดิบผ่านโรงงานผลิตน้ำ 3 แห่ง คือ โรงประปาผลิตน้ำบางเขน สามเสน และธนบุรี ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.1

4) เครื่องกรองน้ำ

เป็นเครื่องกรองชนิดกรองเร็ว (Rapid sand filter) มี 12 ถัง เป็นถังเหล็กทรงกระบอก มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 5.2 เมตร บรรจุทรายหนา 1 เมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.9-1 มิลลิเมตร มีกรวดเล็กน้อย ภายใต้ชั้นกรวดมีหัวกรองทำด้วยทองเหลือง อัตราการกรอง (Filtration rate) ประมาณ 9.6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ดำรงกรองด้วยการพ่นลมแบบล้างย้อน (Back-washing) ทุก 16-60 ชั่วโมง ทั้งนี้การล้างย้อนอาจขึ้นกับคุณภาพน้ำที่เข้าระบบ

5) โรงจ่ายคลอรีน

ตั้งอยู่ตอนบนของถังน้ำใส เครื่องจ่ายคลอรีนมีหน้าที่จ่ายคลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อโรค โดยใช้คลอรีนในรูปแบบก๊าซบรรจุในถัง ขนาด 70 กิโลกรัม

6) ถังน้ำใส

ทำด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก ขนาด 36×54×3 ลูกบาศก์เมตร ความจุประมาณ 5,700 ลูกบาศก์เมตร อยู่ใต้ระดับพื้นดินครึ่งหนึ่ง แบ่งเป็น 2 ตอน สามารถเปิดกั้นแต่ละตอนเพื่อการทำ ความสะอาด หลังจากนั้นจะสูบน้ำประปาไปยังบ้านเรือนประชาชน ตามท่อที่ทำด้วยเหล็กฉาบสังกะสี มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5-2.5 นิ้ว ในขั้นตอนการผลิตน้ำประปา ตั้งแต่จุดสูบน้ำดิบจนถึงท่อประปา ใช้เวลาในการกักเก็บน้ำในระบบ (Retention time) ประมาณ 2 ชั่วโมง สาหร่ายที่พบในระบบส่วนมากจึงมาจากคลองส่งน้ำดิบ และมีสาหร่ายหลายชนิดที่สามารถเจริญได้ดีในระบบ ซึ่งมักเป็นสาหร่ายที่ยึดเกาะพื้นผิวอุปกรณ์ภายในในระบบ สาหร่ายที่มักพบเป็นปัญหาในระบบการผลิต ทำให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ต่างๆ ลดลง โดยปัญหาที่มักพบ คือ ทำให้พื้นผิวของระบบบำบัด เป็นเมือก จึงต้องทำความสะอาดบ่อยขึ้น ลดประสิทธิภาพของถังตกตะกอน เนื่องจากแรงลอยตัวของสาหร่าย อีกทั้งยังอุดตันระบบการกรอง ทำให้ท่อส่งน้ำอุดตัน เนื่องจากสาหร่ายบางชนิดเจริญเติบโตได้ดีแม้มีแสงน้อย และนอกจากนี้สาหร่ายบางชนิดทำให้เกิดสี กลิ่น และรส ที่ไม่พึงประสงค์ (การประปานครหลวง, 2543)

2.2 สาหร่าย (Algae) (ยูวดี พีรพรพิศาล, 2546)

สาหร่าย (Algae) เป็นสิ่งมีชีวิตที่พบทั่วไปในธรรมชาติ โดยเฉพาะในน้ำทั้งน้ำจืด น้ำเค็ม และน้ำกร่อย นอกจากนี้ยังพบในดิน น้ำพุร้อน หรือแม้แต่อาศัยพึ่งพาร่วมกับสิ่งมีชีวิตชนิดอื่น เช่น รา หรือปะการังบางชนิด สาหร่ายจัดเป็นพืชชั้นต่ำที่มีโครงสร้างไม่สลับซับซ้อน เนื่องจากสาหร่ายไม่มีส่วนที่เป็นราก ลำต้น หรือใบ แม้ว่าสาหร่ายบางชนิดจะมีลักษณะคล้ายพืชชั้นสูง จึงเรียก ลักษณะของสาหร่ายว่า ทัลลัส (Thallus) ซึ่งมักเป็นสาหร่ายที่มีขนาดใหญ่ โดยจัดสาหร่ายเป็นพืช

เนื่องจากสาหร่ายมีรงควัตถุที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสงคือ คลอโรฟิลล์ ทำให้สามารถสร้างอาหารเองได้

สาหร่ายมีรูปร่างและขนาดที่มีความหลากหลาย เช่น ชนิดที่มีขนาดเล็กที่สุดอาจมีขนาดใกล้เคียงกับแบคทีเรีย คือ มีขนาดเพียง 0.2-2 ไมครอน ส่วนที่มีขนาดใหญ่ คือ Kelp ที่พบในเฉพาะมหาสมุทรแปซิฟิก อาจมีขนาดยาวถึง 200 ฟุต ส่วนรูปร่างสาหร่ายจะมีรูปร่างที่แตกต่างกัน เช่น รูปแบบกลม แบน ทรงกระบอก เป็นแฉก เป็นเหลี่ยม หรือเป็นรูปดาว เป็นต้น สาหร่ายสามารถแบ่งได้โดยดูจากลักษณะของเซลล์ เช่นสาหร่ายเซลล์เดี่ยว (Unicellular) และสาหร่ายหลายเซลล์ (Multicellular) เป็นเส้นสาย (Filament) หรือเป็นกลุ่มเซลล์ (Colony) แบ่งจากการเคลื่อนที่ คือ สาหร่ายที่เคลื่อนที่ได้และเคลื่อนที่ไม่ได้

การแพร่กระจายของสาหร่ายขึ้นอยู่กับที่อยู่อาศัยของสาหร่าย (Habitat) สาหร่ายที่มีอยู่ในน้ำไหลเอื่อย จะมีรูปร่างและชนิดต่างจากชนิดที่มีน้ำไหลรุนแรง เช่น ในน้ำตมมักพบสาหร่ายสีเขียว เช่น *Ulothrix* สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน เช่น *Rivularia* สาหร่ายสีแดง เช่น *Batrachospermum* และ *Demanina* ส่วนในน้ำนิ่ง ชนิดของสาหร่ายขึ้นอยู่กับแสง อุณหภูมิ และความอุดมสมบูรณ์ของสารอินทรีย์ (ทันดาว ทองตัน, 2545 อ้างถึงใน ยุวดี พีรพรพิศาล, 2532)

การจำแนกสาหร่ายแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ๆ โดยใช้รงควัตถุภายในเซลล์ ในการจำแนกสาหร่าย สามารถแบ่งออกได้เป็น 9 กลุ่ม (Divisions) (ยุวดี พีรพรพิศาล, 2546)

- 1) Division Cyanophyta (สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน)
- 2) Division Chlorophyta (สาหร่ายสีเขียว)
- 3) Division Chrysophyta (สาหร่ายสีน้ำตาลแกมทอง)
- 4) Division Euglenophyta (Euglenoids)
- 5) Division Charophyta (สาหร่ายไฟ หรือ Stoneworts)
- 6) Division Phaeophyta (สาหร่ายสีน้ำตาล)
- 7) Division Pyrrophyta (สาหร่ายสีเหลืองแกมน้ำตาล)
- 8) Division Cryptophyta (Cryptomanads)
- 9) Division Rhodophyta (สาหร่ายสีแดง)

โดยมากจะพบสาหร่ายใน 3 กลุ่มหลักๆที่ทำให้เกิดปัญหาในระบบผลิตน้ำประปา ได้แก่

- 1) Division Chrysophyta (สาหร่ายสีน้ำตาลแกมทอง)
- 2) Division Cyanophyta (สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน)
- 3) Division Chlorophyta (สาหร่ายสีเขียว)

จากการศึกษาตัวอย่างน้ำที่เก็บจากกระบวนการผลิตโรงผลิตน้ำประปาสามเสน พบสาหร่าย 3 ดิวิชันหลัก ที่พบมากในกระบวนการผลิตน้ำประปา ได้แก่ ดิวิชัน Cyanophyta Chrysophyta และ Chlorophyta โดยนำข้อมูลเฉพาะน้ำดิบมาคำนวณ พบจำนวนสาหร่ายทั้งหมด 581,847 หน่วย โดยสาหร่ายดิวิชัน Chrysophyta หรือกลุ่มสาหร่ายสีน้ำตาลแกมทอง มีจำนวนมากที่สุด คือร้อยละ 71.00 ของสาหร่ายทั้งหมด คลาสที่พบมากที่สุดคือ Bacillariophyceae หรือกลุ่มไดอะตอม สกุลที่พบมากที่สุดคือ *Nitzschia* sp. พบจำนวน 183,770 เซลล์ คิดเป็นร้อยละ 31.6 สกุลที่พบรองลงมาคือ *Cymbella* sp. จำนวน 82,966 เซลล์ คิดเป็นร้อยละ 13.3 ของสาหร่ายทั้งหมด (ทันดาว ทองตัน, 2545)

2.2.1 สาหร่ายสีน้ำตาลแกมทอง หรือ Golden-Brown Algae (Division Chrysophyta)

เป็นดิวิชันใหญ่ที่รวมเอาสาหร่ายสีเขียวแกมเหลือง (Yellow-Green Algae) และสาหร่ายกลุ่มไดอะตอม (Diatom) เข้าไว้ด้วยกัน มีทั้งพวกที่สามารถเคลื่อนที่ได้ ได้แก่ พวก phytoflagellate และพวกที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ ได้แก่ พวกไดอะตอม (diatom) คลาส Bacillariophyceae ซึ่งสาหร่ายสีน้ำตาลแกมทองประกอบด้วยแพลงก์ตอนทั้งหมด 9 คลาส (Class) ได้แก่

1. Class Bacillariophyceae
2. Class Chrysophyceae
3. Class Dictyochophyceae
4. Class Prymnesiophyceae
5. Class Dinophyceae
6. Class Cryptophyceae
7. Class Raphidophyceae
8. Class Xanthophyceae
9. Class Eustigmatophyceae

สาหร่ายสีน้ำตาลแกมทองมีลักษณะสำคัญ คือ

1. รวงควัตถุอยู่ในคลอโรพลาสต์ คือ คลอโรฟิลล์ เอ และบางชนิดมีคลอโรฟิลล์ซี แคโรทีน ได้แก่ เบต้า-แคโรทีน (β -Carotene) และเอปซีลอน-แคโรทีน (ϵ -Carotene) แซนโทฟิลล์ ได้แก่ ฟูโคแซนทิน (Fucoxanthin) ไดอะโตแซนทิน (Diatoxanthin) และไฟโคบิลิโปรตีน ปริมาณของแคโรทีนอยด์และแซนโทฟิลล์มีมากกว่าคลอโรฟิลล์ จึงทำให้สีของคลอโรพลาสต์มีสีตั้งแต่ สีเหลือง สีเขียวแกมเหลือง สีเขียวมะกอก สีเหลืองแกมน้ำตาล สีน้ำตาลแกมทอง และสีน้ำตาลอ่อน เป็นต้น
2. ผนังเซลล์เป็นเนื้อเดียวกัน หรือเป็นแผ่น บางกลุ่มไม่มีผนังกันเซลล์มีแต่เยื่อหุ้มเซลล์
3. อาหารสะสมมีทั้งแป้ง (อยู่ในรูป Chrysolaminarin หรือ Leucosin) และไขมัน
4. เซลล์มีลักษณะรูปร่างที่แตกต่างกัน อาจมีรูปร่าง รี กลม ทรงกระบอก หรือรูปกระสวย บางกลุ่มมีรูปร่างเฉพาะ เช่น ไดอะตอม คือมีลักษณะเป็น 2 ฝาครอบกันพอดี

สำหรับสาหร่ายกลุ่มไดอะตอม อยู่ในคลาส Bacillariophyceae เป็นองค์ประกอบสำคัญของกลุ่มประชากรสาหร่าย พบได้ทั้งในน้ำจืดและน้ำเค็ม อยู่เป็นเซลล์เดี่ยวหรือกลุ่มเซลล์ เซลล์ปกติไม่พบหนวด ผนังเซลล์ของไดอะตอมมีลักษณะพิเศษ ประกอบไปด้วย ฟรุสตุล (Frustule) ที่เป็นซิลิกาล้อมด้วยสารที่เป็นเมือก (Mucilagenous) ฟรุสตุล มี 2 ฝา คือฝาบน (Epitheca) และฝาล่าง (Hypotheca) และมีวงศาตรอบฝาทั้งสอง เรียกว่า Girdle Band อนุกรมวิธานของไดอะตอม จำแนกโดยใช้รูปร่าง จำนวนและตำแหน่งของคลอโรพลาสต์ รวมทั้งรูปร่างของเซลล์ โครงสร้างและลวดลายบนฝา (Striae) ที่มีลวดลายแตกต่างกันมากมาย โดยมี 2 อันดับ (order) คือ Centric Diatom และ Pennate Diatom

กลุ่มของไดอะตอมในระบบนิเวศ แบ่งเป็น 3 กลุ่มคือ

1. Euplanktonic Diatom เป็นกลุ่มที่เป็นแพลงก์ตอนตลอดเวลา ส่วนมากเป็น Centric Diatom มักก่อให้เกิดปัญหาบลูมในฤดูใบไม้ผลิและฤดูใบไม้ร่วงในทะเลสาบและมหาสมุทรในเขตอบอุ่น และในฤดูร้อนในเขตรละติจูดที่สูงกว่า
2. Benthic Diatom สาหร่ายกลุ่มนี้ส่วนใหญ่เป็น Pennate Diatom เป็นสาหร่ายที่จับกับสิ่งที่ยึดน้ำเป็นกลุ่มแรก การขับเมือกของไดอะตอมและแบคทีเรีย ทำให้เกิดฟิล์มบางๆ

บนพื้นผิวของสิ่งที่มีน้ำ เป็นการเตรียมพื้นผิวให้กับสาหร่ายอื่นๆ การเกาะผิวอาจใช้ ฝาข้างหนึ่งแนบติดกับพื้นผิว หรือเกาะโดยเมือกเหนียวๆก็ได้

3. Meroplanktonic Diatom เป็นแพลงก์ตอนชั่วคราว ส่วนมากเป็น Pennate Diatom ที่เกาะพื้นผิวอย่างหลวมๆ เมื่อถูกรบกวนจะกระจายตัวแขวนลอยในน้ำ

ในระบบผลิตน้ำประปา สาหร่ายที่สร้างกลิ่นและรสเป็นปัญหาในกระบวนการผลิตน้ำ เช่น สกุล *Synura* ผลิตกลิ่นแฉะกวาดิบ และรสขม สกุล *Dinobryon*, *Uroglenopsis* และ *Peridinium* ผลิตกลิ่นคาวปลาอย่างแรง *Synedra* ผลิตกลิ่นอับ หรือสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน สกุล *Anabaena* *Anacystis* และ *Aphanizomenon* ผลิตกลิ่นคล้ายเล้าหมู *Gomphosphaeria*, *Cylindrospermum* และ *Rivularia* ผลิตกลิ่นหญ้า (ทันดาว ทองตัน, 2545 อ้างถึงใน อภารัตน์ มหาพันธ์, 2541)

สาหร่ายที่เป็นสาเหตุของการอุดตันของระบบกรองน้ำด้วยทราย ทำให้ช่วงเวลากการกรองสั้นลงมักเป็นสาหร่ายกลุ่มไดอะตอม เช่น *Asterionella*, *Fragilaria*, *Tabellaria*, *Aulacoseira* (*Melosira*) และ *Synedra*

2.2.2 สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (Cyanobacteria)

จัดเป็นพวกเดียวกับแบคทีเรีย (Prokaryotic cell) เนื่องจากเป็นสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียวที่ไม่มีเยื่อหุ้มนิวเคลียส แต่สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมี คลอโรฟิลล์ เอ จึงสามารถสังเคราะห์แสงได้ ซึ่งไม่พบในแบคทีเรีย

สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินพบได้ทุกที่ ส่วนใหญ่พบในน้ำจืด แต่ก็สามารถเจริญได้ในน้ำทะเล และน้ำกร่อย แม้กระทั่งในน้ำพุร้อน หิมะหรือแม้แต่ในทะเลทราย เนื่องจากสาหร่ายเหล่านี้ทนต่อสภาวะแห้งแล้งได้ดีกว่าสาหร่ายกลุ่มอื่นๆ โดยมีลักษณะที่สำคัญ คือ

1. มีรงควัตถุในการสังเคราะห์แสง ได้แก่ คลอโรฟิลล์ เอ (Chlorophyll A) แคโรทีนอยด์ ไฟโคบิลิโปรตีนโดยรงควัตถุไม่อยู่ในพลาสติด แต่กระจายเป็นอิสระในไซโตพลาสซึม
2. มีผนังเซลล์ 2 ชั้น คล้ายแบคทีเรียชนิดแกรมลบ ด้านนอกของผนังเซลล์ มีลักษณะเป็นเมือกใส เรียกว่า Sheath
3. ไม่มีหนวด (Flagella) แต่จะเคลื่อนที่แบบเลื่อนไหล (Gliding movement) มีทั้งแบบถอยหน้าถอยหลัง แกว่งซ้ายขวา เคลื่อนไหวเป็นคลื่น หรือหมุนเป็นเกลียว
4. ไม่มีการสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศ

5. สามารถตรึงไนโตรเจนจากอากาศและเซลล์สามารถเปลี่ยนสีได้ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความยาวของคลื่นแสง ความเข้มของแสงหรือปริมาณธาตุอาหาร แต่จะพบในบางชนิดเท่านั้น
6. อาหารสะสมคือ แป้งไซยาโนฟิซิน (Cyanophycin starch) ซึ่งเป็นคาร์โบไฮเดรตในรูปแกรนูล (Granules) กระจายอยู่ทั่วไปในโครโมพลาสซึม นอกจากนี้ยังมีไกลโคเจน แกรนูล และหยดน้ำมัน

สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินพบได้ทั้งที่เป็นเซลล์เดี่ยว (Unicellular) และกลุ่มเซลล์ (Colony) แบบพาลเมลลา (Palmella) หรือแบบเส้นสาย (Filamentous) โดยจะพบในรูปแบบเส้นสายมากที่สุด คือ *Oscillatoria* โดยมีการเรียงตัวของเซลล์เป็นแถว เรียกว่า Trichome รอบๆ Trichome จะมี Sheath หุ้ม จึงเรียกว่า Filament ในบางสกุลมีเซลล์มีผนังหนาอยู่ระหว่างเซลล์ปกติ เรียกว่า Heterocyst เช่นสกุล *Anabaena* และ *Anabaenopsis* เส้นสายของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน มีทั้งที่เป็นแบบแตกแขนงและไม่แตกแขนง และการแตกแขนงมีทั้งที่เป็นแขนงแท้และแขนงเทียม

สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินหลายชนิดมีการเติบโตและขยายพันธุ์อย่างรวดเร็ว (Algae bloom) จนทำให้แหล่งน้ำเปลี่ยนสี เมื่อมีปริมาณมากจะทำให้สัตว์น้ำตาย น้ำมีกลิ่นเหม็น สารเคมีบางชนิดทำให้น้ำมีกลิ่นและรสเปลี่ยนแปลง เช่น จีออสมิน (Geosmin) และสาร 2-methylisorneol (2-MIB) และสาหร่ายบางชนิดยังสร้างสารพิษ (Toxins) เช่น *Microcystis* และ *Anabaena* สารพิษนี้มีผลในการทำลายตับและระบบประสาท สามารถทำให้คนถึงแก่ความตาย ถ้าได้ดื่มน้ำที่มีสารพิษเหล่านี้

นอกจากนี้ถ้าได้สัมผัสกับน้ำที่มีการบลูมของสาหร่ายบางชนิดจะทำให้ผิวหนังอักเสบคันและบวม เช่น *Anabaena spp.*, *Oscillatoria agardhii*, *Oscillatoria rubescens*, *Lyngbya majuscula* หรือ *Gloeotrichia echinulata* (ลัดดา วงศ์รัตน์, 2544)

2.2.3 สาหร่ายสีเขียว (Green Algae)

สาหร่ายสีเขียวมีลักษณะเซลล์เหมือนพืชชั้นสูง (Eucaryotic cell) พบทั่วไปในน้ำจืด น้ำกร่อย และน้ำทะเล หรือแม้แต่บนดิน มีลักษณะสำคัญดังนี้

1. รงควัสดุสีเขียว เนื่องจากไม่ถูกบดบังด้วยรงควัตถุอื่น มีส่วนประกอบเหมือนพืชชั้นสูง คือ มีคลอโรฟิลล์ เอ (Chlorophyll A) คลอโรฟิลล์ บี (Chlorophyll B) แคโรทีน และ

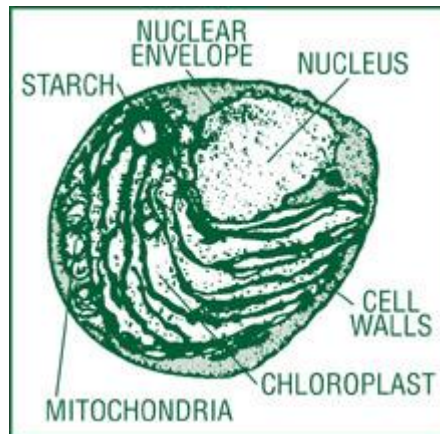
แซนไซฟิลล์ รัศมีอยู่ภายในคลอโรพลาสต์ โดยที่คลอโรพลาสต์มีเยื่อหุ้ม 2 ชั้น มีรูปร่างแตกต่างกัน เช่นรูปถ้วย (Cup-shaped) รูปวงรอบเซลล์ (Girdle-shaped) เป็นตาข่าย (Reticulate) เป็นรูปเกลียว (Spiral) รูปดาว (Stellate) หรือเป็นแถบข้างเซลล์ (Parietal) และมีจำนวน 1 อันขึ้นไป

2. อาจมีหรือไม่มีผนังเซลล์ โดยทั่วไปมีผนังเซลล์ 2 ชั้น
3. มีหรือไม่มีหนวด จะพบหนวดในกลุ่มที่เคลื่อนที่ได้ โดยพบตั้งแต่ 1 เส้นหรือมากกว่า หนวดไม่มีขน (Tubular hair) อาจพบเกล็ด (Scale) บนหนวดได้
4. อาหารสะสมมีทั้งแป้งและไขมัน ส่วนมากอยู่ในรูปของแป้ง ที่ประกอบด้วย อะไมโลส (Amylose) และอะไมโลเพกติน (Amylopectin) สร้างจากไฟรีนอยด์ซึ่งอยู่ในหรือบนคลอโรพลาสต์
5. สืบพันธุ์ได้ทั้งแบบอาศัยเพศและไม่อาศัยเพศ

ในประเทศไทย ได้มีรายงานการสำรวจสาหร่าย ดำเนินการโดยสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ทำการสำรวจและสุ่มเก็บตัวอย่างสาหร่ายจากแหล่งน้ำจืดในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล โดยทำการเก็บตัวอย่างสาหร่ายใน 6 จังหวัด 23 อำเภอ จำนวน 300 ตัวอย่าง พบสาหร่าย 4 ดิวิชัน 16 ลำดับ 38 วงศ์ 91 สกุล 230 ชนิด (เฉพาะที่สามารถจำแนกได้ชัดเจน) พบสกุลของสาหร่ายที่แพร่กระจายในแหล่งน้ำสูงกว่าร้อยละ 20 มี 4 สกุลหลัก คือ *Chlorella*, *Phormidium*, *Scenedesmus* และ *Oscillatoria* พบในแหล่งน้ำของเขตกรุงเทพและปริมณฑลมากกว่า 25 แห่ง เนื่องจากเป็นสาหร่ายสกุลนี้มีความสามารถในการปรับตัวสูงต่อความเข้มข้นของอาหารสารอินทรีย์ในช่วงกว้างและมีแนวโน้มว่าจะเป็นสกุลที่เป็นสาเหตุของการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วในแหล่งน้ำ (อาภารัตน์ มหาพันธ์ และคณะ, 2543) ตัวอย่างสาหร่ายที่ก่อให้เกิดปัญหายูโทรฟิเคชัน

1. สาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* sp.

ลักษณะสาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* sp. แสดงดังรูปที่ 2.3 ลักษณะเป็นเซลล์เดี่ยว มีขนาดเล็กกว่า 10 μm ภายในโครงสร้างเซลล์ไม่พบแก๊สเวคูลิโอ มีผนังเซลล์ที่หนาและแข็งแรง

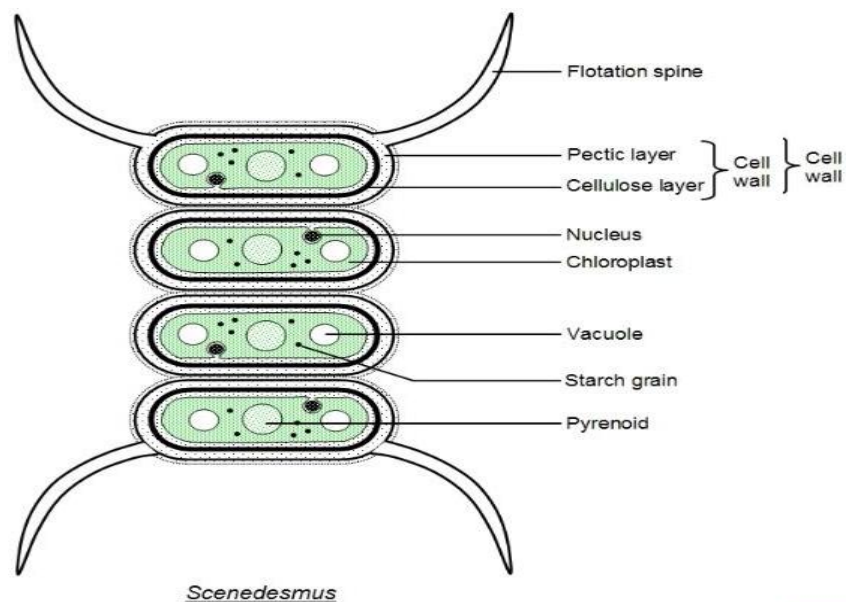


รูปที่ 2.3 เซลล์สาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris sp.*

ที่มา : (Natural healing store, 2013 : online)

2. สาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Scenedesmus sp.*

ลักษณะสาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Scenedesmus sp.* แสดงดังรูปที่ 2.4 ลักษณะเป็นเซลล์เดี่ยว มีขนาดใหญ่ประมาณ 20 μm ภายในโครงสร้างเซลล์พบ Flotation spine ใช้ในการพยุงเซลล์ให้ลอยตัวอยู่ในน้ำ มีผนังเซลล์ที่บางและแข็งแรงน้อย



รูปที่ 2.4 สาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Scenedesmus sp.*

ที่มา : (Algae bodies, 2013 : online)

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาปัญหาที่เกิดจากสาหร่ายในกระบวนการตกตะกอน พบว่าเมื่อสาหร่ายสีเขียวมีปริมาณมากขึ้น จะเกิดการจับตัวของตะกอนทำให้ประสิทธิภาพการตกตะกอน

ลดลง คือ ตะกอนมีขนาดใหญ่ ทั้งนี้จะมีความหนาแน่นต่ำ จึงทำให้ตกตะกอนได้ช้า ทำให้ต้องใช้สารส้มในการตกตะกอนมากขึ้น และประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นลดลง (ทันดาว ทองตัน, 2545 อ้างถึงใน Phalla, 1997)

ตารางที่ 2.1 แสดงกลุ่มของสาหร่ายที่เป็นสาเหตุการอุดตันทรางกรอง (ทันดาว ทองตัน, 2545 อ้างถึงใน Amporn Kankanlaung, 2000)

กลุ่มของสาหร่าย	ชนิดของสาหร่าย
สาหร่ายสีน้ำตาลแกมทอง (Chrysophyta)	<i>Asterionella Formosa</i> <i>Cyclotella meneghiniana</i> <i>Cymbella ventricosa</i> <i>Diatoma vulare</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> <i>Tabellaria fenestrata</i> <i>Tabellaria flocculosa</i>
สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (Cyanophyta)	<i>Anabaena flos-aquae</i> <i>Anacystis dimidiata</i> หรือ <i>Chroococcus turgidus</i> <i>Gloeotrichia echinulata</i> <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 porticalis</i> <i>Ulothrix variabilis</i> <i>Zygnema insine</i>

2.3 ผลกระทบของสาหร่ายต่อกระบวนการผลิตน้ำประปา

สาหร่ายสามารถทำให้เครื่องกรองทรายอุดตันได้ ก่อให้เกิดปัญหาเรื่องรสและกลิ่น นอกจากนี้ยังสามารถทำให้ pH ความขุ่น สี และความเป็นด่าง (Alkalinity) ของน้ำเปลี่ยนแปลงไปได้ สาหร่ายที่สะสมและเติบโตบนชั้นของผิวทรายกรอง มีลักษณะเป็นฟิล์มบางๆ ซึ่งจะทำให้อัตราการไหลผ่านชั้นกรองลดลง แต่ก็อาจมีประโยชน์บ้างในแง่ที่สามารถเพิ่มออกซิเจนให้กับน้ำที่ไหลผ่านชั้นกรอง ก่อให้เกิดการย่อยสลายของสารอินทรีย์ในเครื่องกรองสถานะที่ไม่มีออกซิเจนได้ เรียกเมือกของสาหร่ายพืชน้ำและสัตว์น้ำอื่นๆที่อยู่บนชั้นผิวทรายกรองว่า ผิวกรอง (Filter skin) หรือ Schmutzdecke เมื่อเกิดปัญหาการอุดตันทำให้การล้างย้อน (Back wash) ซึ่งจะต้องทำบ่อยครั้งขึ้นสิ้นเปลืองเวลาและน้ำ รวมทั้งต้องเปลี่ยนทรายกรองบ่อยขึ้น ถ้าสาหร่ายมากจะรบกวนกระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) ทำให้การตกตะกอนของฟล็อก (Floc) ในถังตกตะกอนไม่ได้ผลดีเท่าที่ควร (พิชญกุล สงวนนวล, 2543)

สาหร่ายในถังตกตะกอนแบ่งได้สองประเภท ได้แก่ สาหร่ายที่เกาะนิ่งกับที่ (Attached algae) และสาหร่ายที่ลอยอย่างอิสระ (Floating algae หรือ Planktonic algae) ซึ่งในบางครั้งอาจมีสัตว์ขนาดเล็กอาศัยอยู่รวมกับโคลนของสาหร่ายด้วย เมื่อโคลนของสาหร่ายเจริญเติบโตจนมี

ขนาดใหญ่พอจะผลัดตัวเองออกจากผนังและเกาะรวมกันเป็นตะกอนซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้บ่อกรองอุดตัน นอกจากนี้ยังมีสาหร่ายที่ทำให้เกิดกลิ่นได้เช่น *Anabaena* sp. ซึ่งจะผลิตและปล่อยสารที่มีกลิ่นลงสู่น้ำประปา สารเหล่านี้มีขนาดเล็กมาก ทำให้สามารถผ่านสารกรองไปได้และทำให้เกิดกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์แก่น้ำประปา

2.3.1 สาหร่ายที่เกาะนิ่งกับที่ (Attached Algae) (เจตจันทร์ เศรษฐสิทธิ์, 2553)

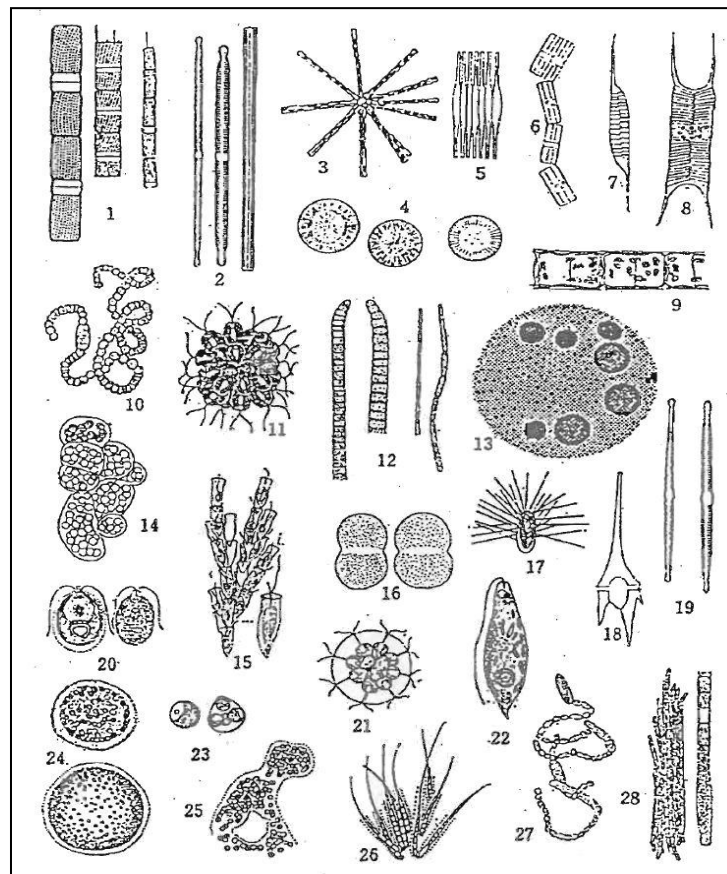
สาเหตุสำคัญที่ทำให้มีสาหร่ายเกาะในถังตกตะกอน คือไม่มีการเติมคลอรีนเริ่มต้น (prechlorination) หรือมีการเติมปริมาณคลอรีนในปริมาณที่น้อยมาก สาหร่ายมักเจริญเติบโตเป็นโคโลนีโดยอาจเจริญเป็นชั้นบนผนังหรือเจริญเป็นเส้นสายยาวพริ้วไปตามกระแส น้ำ โดยขึ้นส่วนทั้งหมดของสาหร่ายถือเป็นสิ่งสกปรกในกระบวนการผลิตน้ำประปา ผลกระทบของสาหร่ายต่อกระบวนการผลิตน้ำประปา คือเมื่อโคโลนีของสาหร่ายเจริญจนมีขนาดใหญ่มากพอจะผลัดตัวเองจากผนังลงไปเกาะบนผิวชั้นทรายกรอง หรือรวมตัวกันเป็นก้อนตะกอน ซึ่งทั้งหมดเป็นสาเหตุของการอุดตันของชั้นกรองทราย

2.3.2 สาหร่ายที่ลอยอย่างอิสระ (Floating algae หรือ Planktonic algae)

สาหร่ายที่ลอยอย่างอิสระแบ่งเป็นสองประเภทคือ ประเภทที่หนึ่ง และประเภทที่สอง สาหร่ายที่ลอยอย่างอิสระประเภทที่หนึ่ง สามารถเจริญเติบโตในน้ำ แต่กรณีที่น้ำดิบมีความขุ่นสูง แสงอาทิตย์บางส่วนจะถูกดูดกลืนโดยอนุภาคดินหรือโคลนที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ ทำให้สาหร่ายไม่อาจเกิดกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงได้ เป็นผลให้ไม่สามารถเจริญเติบโต ในทางกลับกันถ้ามีความใส (หลังจากผ่านถังตกตะกอนแล้ว) แสงอาทิตย์สามารถส่องผ่านได้มากขึ้น ทำให้สาหร่ายมีการเจริญขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยบริเวณที่พบสาหร่ายเจริญมากที่สุดคือ ก้นถังตกตะกอน ผลกระทบของสาหร่ายที่ลอยตัวอย่างอิสระประเภทที่หนึ่งต่อระบบผลิตน้ำประปา เช่นเมื่อสาหร่ายผ่านการตกตะกอนและการกรองได้ จะผ่านเข้าสู่กระบวนการเติมคลอรีน สาหร่ายที่เป็นแพลงก์ตอนนี้เมื่อสัมผัสคลอรีนจะตายและปล่อยสารที่ทำให้เกิดกลิ่น เช่น จีออสมิน (Geosmin) ออกมา ทำให้เกิดกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ในน้ำประปา

สาหร่ายที่ลอยอย่างอิสระประเภทที่สอง สาหร่ายกลุ่มนี้มักเจริญแล้วมาเกาะรวมกับแผ่นฟิล์มที่ลอยเคลือบบนผิวหน้า น้ำ มองด้วยตาเปล่ามีลักษณะเป็นเมือกสีเขียว สาหร่ายประเภทที่สองได้แก่ *Coccomyxa* sp. และ *Tetraspora* sp. เป็นต้น สาหร่ายกลุ่มนี้มีขนาดเซลล์ประมาณ 5-15 ไมโครเมตร มีศักยภาพในการเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็วและสามารถต้านทานคลอรีนได้มากกว่าสาหร่ายที่ลอยอย่างอิสระประเภทที่หนึ่ง สาหร่ายที่ส่งผลกระทบต่อระบบประปา ดังแสดงในรูปที่ 2.5 แบ่งสาหร่ายที่ส่งผลกระทบต่อระบบผลิตน้ำประปา 4 กลุ่ม คือ

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



รูปที่ 2.5 สาหร่ายที่ส่งผลกระทบต่อระบบประปา

ที่มา : Konno (1999)

2.4 วิธีการกำจัดสาหร่ายในระบบผลิตน้ำประปา

การเจริญเติบโตของสาหร่ายกลายเป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำในทะเลสาบ อ่างเก็บน้ำ ซึ่งเป็นแหล่งน้ำดิบที่นำมาใช้ในกระบวนการผลิตน้ำประปา เมื่อมีสาหร่ายมากจะ ก่อให้เกิดปัญหาต่อรสและกลิ่น เกิดการอุดตันบริเวณทรายกรอง สิ้นเปลืองปริมาณสารเคมีช่วยในการตกตะกอน (Coagulant dose) เพื่อการควบคุมการเจริญเติบโตของสาหร่ายจะใช้สารเคมี เช่น คลอรีน (Chlorine) โอโซน (Ozone) คลอรีนไดออกไซด์ (Chlorine dioxide) โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium permanganate) เป็นตัวยับยั้งการเจริญเติบโตและทำลายเซลล์สาหร่าย แต่สารเคมีช่วยในการตกตะกอนบางชนิด กระตุ้นการปล่อยสารพิษ (Microcystin) จากสาหร่าย ลงในน้ำประปา โดยองค์การอนามัยโลก (WHO) ได้กำหนดสารพิษชนิดนี้ให้มีในน้ำอุปโภคบริโภคไม่เกิน 1 ไมโครกรัมต่อลิตร นอกจากนี้แล้วยังพบว่าสารฆ่าเชื้อโรคบางชนิด ก่อให้เกิดมลพิษขั้นที่สองในน้ำ (DBPs: Disinfection by products) เช่น สารไตรฮาโลมีเทน (THMs) สารฮาโลอะซีติกแอซิด (HAAs) ซึ่งเป็นสารที่สามารถก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์ (Heng, 2009)

วิธีการควบคุมการเจริญเติบโตของสาหร่ายมีหลายวิธี ทั้งการควบคุมในแหล่งน้ำดิบและการควบคุมในระบบผลิตน้ำประปา (ทันตาว ทองตัน, 2545)

2.4.1 การควบคุมในแหล่งน้ำดิบ

1) ทางกายภาพ เช่น การใช้เครื่องจักรตักออก การใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เพื่อปิดกั้นแสง การขูดลอกตะกอนที่ทับถมอยู่บริเวณก้นอ่างเก็บน้ำดิบ การใช้คลื่นเสียง (Ultrasonic radiation) เพื่อกำจัดสาหร่าย

2) ทางเคมี เป็นวิธีการใช้สารฆ่าสาหร่าย (Algicides) ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมโดยสารที่ใช้กันมาก เช่น คอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) การใช้ด่างทับทิมหรือสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4) ก็ได้ผลเช่นกัน ในการเลือกสารฆ่าสาหร่ายที่ดีควรเลือกสารที่สามารถฆ่าเฉพาะสาหร่ายชนิดที่ต้องการได้ โดยไม่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตชนิดอื่นๆ ในแหล่งน้ำ ไม่ทำให้คุณภาพน้ำต่ำลง ไม่สะสมในแหล่งน้ำ มีราคาถูกลงและใช้งานง่ายไม่เป็นอันตราย

3) ทางชีวภาพ เช่น การใช้โปรโตซัว แพลงก์ตอนสัตว์ การใช้ปลา ในการลดปริมาณสาหร่าย แต่ต้องไม่มีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตอื่นซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีใหม่และยังไม่สามารถใช้งานจริงในอ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่ได้

4) ควบคุมการปล่อยน้ำทิ้งสู่แหล่งน้ำ ปล่อยน้ำทิ้งสู่แหล่งน้ำตามมาตรฐานน้ำทิ้งชุมชนและโรงงานอุตสาหกรรมโดยควบคุมปริมาณสารอาหารที่จำเป็นในการเติบโตของสาหร่าย เช่น ฟอสเฟต ไนเตรท ไม่ให้มีค่ามากเพียงพอต่อการเติบโตของสาหร่าย

5) การป้องกันการแบ่งชั้นของน้ำ (Destratification) โดยการเป่าอากาศลงในน้ำ ให้น้ำที่เย็นกว่าจากด้านล่างอ่างเก็บน้ำเคลื่อนที่มาที่ผิวน้ำเป็นการลดปริมาณสาหร่ายได้อีกทางหนึ่ง

2.4.2 การควบคุมในระบบผลิตน้ำประปา

1) ทางกายภาพ

- การเลือกตำแหน่งรับน้ำ (Water intake) โดยเลือกตำแหน่งให้อยู่ต่ำกว่าพื้นผิวน้ำ เนื่องจากสาหร่ายส่วนใหญ่มีอากาศอยู่ในส่วนบนของน้ำ

- การตักสาหร่าย โดยตักสาหร่ายที่ลอยขึ้นในถังกรองทรายและถังตกตะกอน เนื่องจากสาหร่ายบางชนิดสร้างฟองอากาศ

- การขัดบ่อ

- การบังแสงแดด โดยการหาวัสดุครอบถังบำบัด เป็นการช่วยลดปัจจัยในการเจริญเติบโตของสาหร่ายได้ทางหนึ่ง

2) ทางเคมี

- การเพิ่มค่า pH เพื่อปรับสภาพน้ำให้ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย ที่เมืองลากอส ประเทศไนจีเรีย ทำการปรับค่า pH ของน้ำในถังตกตะกอนจาก 6 เป็น 8 สามารถป้องกันการเจริญเติบโตของสาหร่ายเส้นใย เช่น *Spicgyra* ได้

- การใช้คลอรีน (Prechlorination) ในการฆ่าเชื้อโรค โดยผสมคลอรีนในถังตกตะกอนก่อนนำน้ำผ่านถังกรองทราย ความเข้มข้นของคลอรีนที่สูงขึ้นทำให้สาหร่ายลดจำนวนได้มาก แต่ข้อเสีย คือ เมื่อคลอรีนทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์จากการย่อยสลายของสาหร่าย ทำให้เกิดสารไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethanes) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง จึงได้มีการกำหนดจากองค์การป้องกันสภาวะแวดล้อมของประเทศสหรัฐอเมริกา (Environmental protection agency: USEPA) ให้มีปริมาณสารไตรฮาโลมีเทนในน้ำประปาได้ไม่เกิน 100 ไมโครกรัมต่อลิตร

- 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

2.5 การสร้างและรวมตะกอนทางเคมี (Chemical coagulation and flocculation)

(มัลลิกา ปัญญาคะโป, 2552)

Coagulation เป็นกระบวนการที่เติมสารเคมีเพื่อทำลายเสถียร (Destabilize) อนุภาคคอลลอยด์ (Colloidal particle) ทำให้อนุภาคสามารถเคลื่อนที่เข้าใกล้กันได้ จนสามารถเกิดการรวมตัวกันเป็นอนุภาคใหญ่ขึ้นสามารถตกตะกอนได้เร็วขึ้น อุปกรณ์สำคัญในกระบวนการนี้คือเครื่องกวนเร็ว

Flocculation เป็นกระบวนการต่อจาก Coagulation มีจุดประสงค์ให้อนุภาคเกาะตัวกัน โดยมีตะกอนเมือก้อนเป็นตัวเชื่อม ทั้งนี้ต้องมีการกวนช้าเพื่อให้อนุภาคและเมือก้อนสัมผัสกันได้ดีขึ้น

2.5.1 อนุภาคในน้ำ

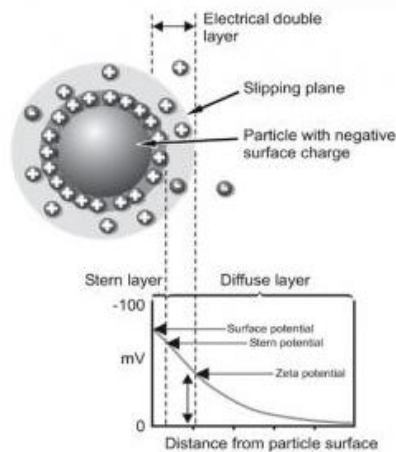
ตารางที่ 2.2 แสดงอนุภาคขนาดต่างๆในน้ำ พื้นที่ผิว และเวลาที่ใช้ในการตกตะกอนเป็นระยะทาง 1 ฟุต ซึ่งคำนวณจากอนุภาคทรงกลมที่มีความถ่วงจำเพาะ 2.65 จากตารางเห็นได้ว่าอนุภาคขนาดใหญ่มีพื้นที่ผิวดำและใช้เวลาในการตกตะกอนน้อย อนุภาคขนาดเล็กจะใช้เวลาในการตกตะกอนสูง โดยทั่วไปพื้นที่ผิวอนุภาคมีประจุลบ ดังนั้นยิ่งอนุภาคขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวมากก็ยิ่งมีประจุมาก ทำให้แต่ละอนุภาคเกิดการผลักกันและไม่รวมตัวกันจึงใช้เวลาในการตกตะกอนนานมาก ดังนั้นถ้าต้องการกำจัดอนุภาคเหล่านี้ต้องเติมสารเคมีเพื่อช่วยในการสะเทินประจุที่ผิวอนุภาคทำให้อนุภาคสามารถรวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่และใช้เวลาในการตกตะกอนที่สั้นลง

ตารางที่ 2.2 ชนิดของอนุภาคในน้ำ พื้นที่ผิวและระยะเวลาในการตกตะกอน (มัลลิกา ปัญญาโคโป , 2552)

ประเภทของอนุภาค	เส้นผ่าศูนย์กลาง (มม.)	พื้นที่ผิว	เวลาที่ใช้ในการตกตะกอน เป็นระยะทาง 1 ฟุต
กรวด	10	0.487 ตร.นิ้ว	0.3 วินาที
ทรายหยาบ	1	3.87 ตร.นิ้ว	3 วินาที
ทรายละเอียด	0.1	48.7 ตร.นิ้ว	38 วินาที
ซิลท์	0.01	2.38 ตร.ฟุต	33 นาที
แบคทีเรีย	0.001	32.8 ตร.ฟุต	55 ชั่วโมง
คอลลอยด์	0.0001	2.8 ตร.หลา	230 วัน

2.5.2 หลักการของกระบวนการตกตะกอนทางเคมี (Chemical Coagulation and flocculation)

หลักการรวมตะกอนมี 2 ขั้นตอน ได้แก่ขั้นแรก คือ Coagulation เป็นการเติมสารเคมีที่มีประจุบวกดังรูปที่ 2.6 เพื่อสะเทินประจุที่ผิวของแข็งและลดแรงผลักระหว่างอนุภาค ขั้นตอนนี้ต้องทำการกวนเร็ว ด้วยเวลาสั้นเพื่อให้สารเคมีผสมกับน้ำและช่วยในการสะเทินประจุ ขั้นที่สองคือ Flocculation เป็นการทำให้อนุภาคที่สะเทินแล้วรวมตัวกันเกิดเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งเรียกว่า ฟล็อก (Floc) จะเกิดตะกอนที่มีโครงสร้างเมือกวุ้น ซึ่งจะช่วยเป็นแกนให้อนุภาคต่างๆ ยึดเกาะทำให้การตกตะกอนเกิดขึ้นได้ดี ขั้นตอนนี้ต้องอาศัยการกวนช้า ด้วยเวลาที่นานกว่าขั้นตอนแรก เพื่อให้อนุภาคมีโอกาสมาสัมผัสกันและยึดเกาะกับเมือกวุ้น จากนั้นจึงนำน้ำเข้าสู่ถังตกตะกอนเพื่อแยกอนุภาคและน้ำออกจากกัน

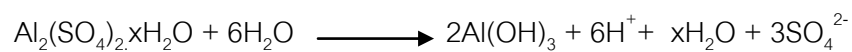


รูปที่ 2.6 ลักษณะประจุไฟฟ้า 2 ชั้นรอบอนุภาค
ที่มา : Despharma (2011)

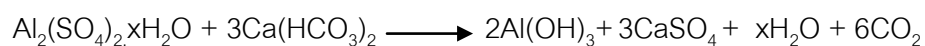
2.5.3 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการตกตะกอนทางเคมี

สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการ Chemical coagulation and flocculation ได้แก่ สารส้ม (Aluminum sulphate หรือ Alum: $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$ หรือ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ สาร Ferric Sulphate, $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ และสารช่วยรวมตะกอน (Coagulation aid) เช่น สาร Polyelectrolyte

1. เมื่อเติมสารส้ม (Aluminum sulphate, Alum, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$ หรือ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ลงในน้ำจะเกิดปฏิกิริยาดังนี้



จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิด H^+ ขึ้น ทำให้ pH ของน้ำลดลงเรื่อยๆ ส่งผลให้ไม่สามารถเกิด $2\text{Al}(\text{OH})_3$ ได้อีก ถ้าน้ำมีสภาพต่าง (Alkalinity) จะทำให้เกิดปฏิกิริยาดังสมการต่อไปนี้

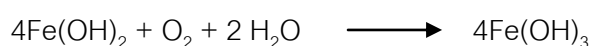
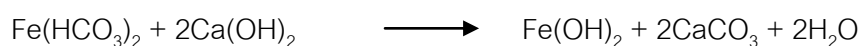


ตะกอน

จากปฏิกิริยาจะไม่เกิด H^+ ทำให้สามารถเกิด $\text{Al}(\text{OH})_3$ ต่อไปได้ ซึ่งสารนี้จะเกาะกันเป็นสายโพลีเมอร์ซึ่งช่วยในการรวมตะกอน ถ้าน้ำมีสภาพต่างไม่พอต้องเติมสารเพิ่มสภาพต่าง เช่น ปูนขาว ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) โซดาแอช (Na_2CO_3)

2. สาร Ferrous sulphate และ ปูนขาว (Lime)

การใช้สาร Ferrous sulphate ต้องใช้ร่วมกับปูนขาวและต้องมีการเติมออกซิเจนด้วย ไม่เช่นนั้นจะไม่เกิด $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ซึ่งเป็นตะกอนฟลู้นช่วยในกระบวนการ Flocculation ดังปฏิกิริยา

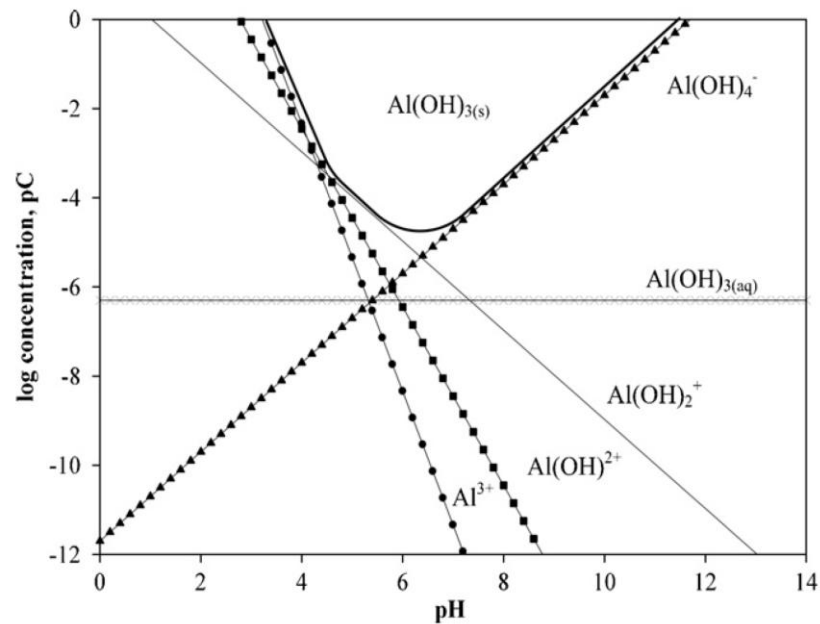


ตะกอน

2.5.4 ผลของ pH ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนทางเคมี

ชนิดและความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของอะลูมิเนียม จะแปรผันตาม pH ของน้ำ ดังรูปที่ 2.7 พบว่า Al^{3+} จะมีความเข้มข้นสูงสุดเมื่อ pH ของน้ำมีค่าต่ำกว่า 4 และที่ pH ของน้ำมีค่า 5-6 ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส คือ $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ และ $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ ในส่วนของ $\text{Al}(\text{OH})_3$ พบว่าเกิดขึ้นมากในช่วง pH 5.2-8.8 และที่ pH ของน้ำมีค่าสูงกว่า 9 จะพบ $\text{Al}(\text{OH})_4^-$

ผลิตภัณฑ์หลักที่สภาวะ pH ของน้ำเป็นกรด—กลาง (6-7) พบว่า $\text{Al}(\text{OH})_3$ และไอออนคอมเพล็กซ์ซึ่งมีอะลูมิเนียมอะตอมเดียวที่มีประจุบวก (Cationic monomeric specie) เช่น $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ และ $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ 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 ไอออนคอมเพล็กซ์เหล่านี้และผลิตภัณฑ์ที่มีประจุบวก (Positively charged precipitate) ซึ่งเกิดจาก $\text{Al}(\text{OH})_3$ ดูดซับไอออนคอมเพล็กซ์ที่มีประจุบวก สามารถทำลายเสถียรภาพอนุภาคด้วยกลไกการทำลายประจุ (charge neutralization) กับอนุภาคซึ่งมีประจุลบโดยการดูดติดผิวของอนุภาค ทำให้อนุภาคสูญเสียเสถียรภาพและพร้อมที่จะรวมตัวเป็นฟล็อก



รูปที่ 2.7 แผนภูมิแสดงความสามารถในการละลาย (Solubility diagram) ของอะลูมิเนียม (มัลลิกา ปัญญาคะโป, 2552)

2.6 การทดลองด้วยเครื่อง Jar test

การทำ Jar test เป็นการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ Chemical Coagulation and flocculation โดยการปรับเปลี่ยนปัจจัยต่างๆ มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการ ได้แก่ ชนิด ปริมาณของสาร Coagulant pH สภาพต่าง ความเร็วในการกวนเร็วและการกวนช้า อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบคืออุปกรณ์ Jar test ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งประกอบไปด้วยใบพัดจำนวน 4 ถึง 6 ชุด ซึ่งสามารถปรับความเร็วรอบในการกวนได้ ด้านหลังมีไฟส่องสว่างเพื่อสังเกตลักษณะของตะกอนและการตกตะกอน ในการหาสภาวะที่เหมาะสมจะใช้บีกเกอร์หรือภาชนะอื่นๆ ที่เหมาะสมจำนวน 4 ถึง 6 ใบ แล้วแต่จำนวนชุดของใบพัดที่มี บรรจุน้ำตัวอย่างในภาชนะ 1 ลิตร ทำการทดลองโดยแปรค่าปัจจัยใดปัจจัยหนึ่ง ส่วนปัจจัยอื่นๆ ให้คงที่ ทำการทดลองกวนเร็ว กวนช้าด้วยเวลาที่กำหนด ยกใบพัด และปล่อยให้ตกตะกอนตามเวลาที่กำหนด สังเกตลักษณะการตกตะกอน เก็บตัวอย่างน้ำส่วนบนทดสอบวัดค่าความขุ่นหรือพารามิเตอร์อื่นๆ ตามต้องการ

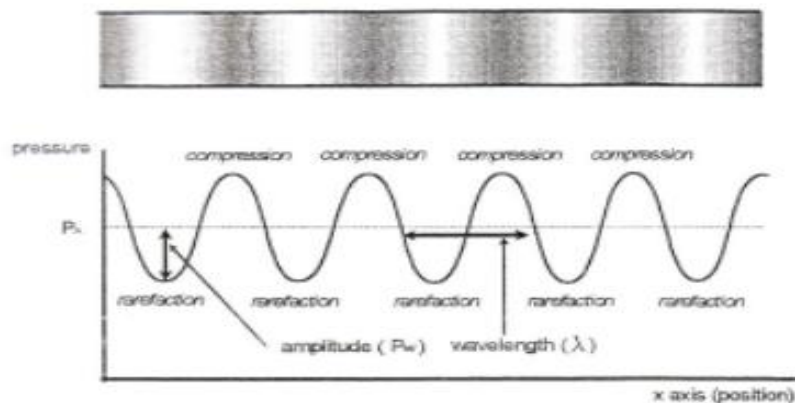


รูปที่ 2.8 Jar Test

2.7 อัลตราซาวด์ (Ultrasound) (Mason, 1999)

คลื่นอัลตราซาวด์ (Ultrasound waves) คือพลังงานคลื่นเสียงที่เกิดจากการสั่น 20,000 ครั้งต่อวินาทีหรือสูงกว่า หรือหมายถึงคลื่นความดัน (Pressure waves) ที่มีความถี่ (Frequency) สูงกว่าคลื่นเสียงปกติที่มนุษย์ได้ยิน คือมากกว่ากว่า 20 กิโลเฮิร์ตซ์ (20 kHz)

คลื่นเสียงอัลตราซาวด์เป็นคลื่นเสียงในช่วงความถี่สูงที่มนุษย์ไม่สามารถได้ยิน โดยทั่วไปแล้วคลื่นเสียง (Sound) เกิดจากการสั่นสะเทือนของตัวกลางที่ยืดหยุ่น (Elastic medium) ลักษณะที่เป็นคลื่นตามยาว (Longitudinal waves) แต่คลื่นเสียงที่ผ่านเข้าไปในตัวกลางที่เป็นของแข็ง อาจอยู่ในลักษณะที่เป็นคลื่นตามยาวหรือคลื่นตามขวาง (Transverse waves) การเคลื่อนที่ของคลื่นจากพลังงานของเสียงแสดงดังรูปที่ 2.9



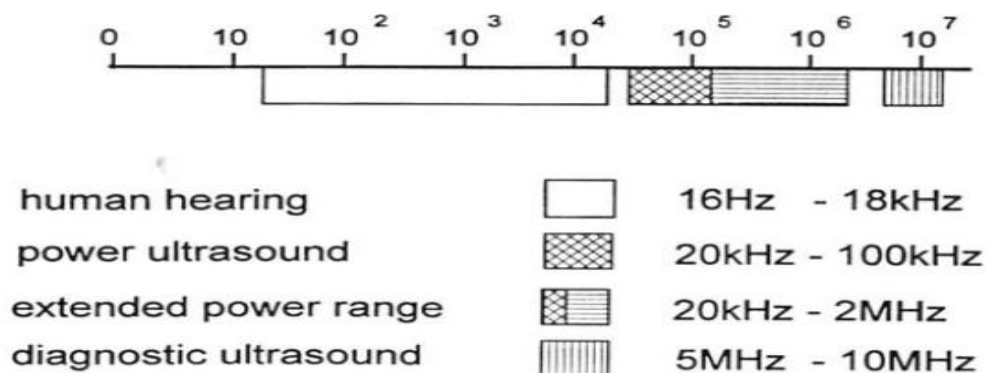
รูปที่ 2.9 การเคลื่อนที่ของคลื่นจากพลังงานของเสียง

ที่มา : Mason (1999)

ในการใช้ประโยชน์จากคลื่นอัลตราซาวด์ พบว่ามีการใช้อัลตราซาวด์ในการเดินเรือเพื่อหาความลึก และวัตถุในมหาสมุทร นอกจากนี้ยังมีการพัฒนามาใช้ในกระบวนการทางด้านอุตสาหกรรม เช่น การใช้อัลตราซาวด์ในการเชื่อม การทำความสะอาดวัสดุ การตัดชิ้นงาน และยังมีใช้อัลตราซาวด์ในด้านการแพทย์ เช่น ในการตรวจวินิจฉัยโรค และการตรวจการตั้งครรภ์ โดยสามารถแบ่งการใช้งานคลื่นอัลตราซาวด์เป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. การใช้อัลตราซาวด์กำลังต่ำความถี่สูง (Low Power And High Frequency)
2. การใช้อัลตราซาวด์กำลังสูงความถี่ต่ำ (High Power And Low Frequency)

ช่วงคลื่นความถี่ของอัลตราซาวด์แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 คลื่นความถี่ของอัลตราซาวด์ในช่วงต่างๆ

ที่มา : Mason (1999)

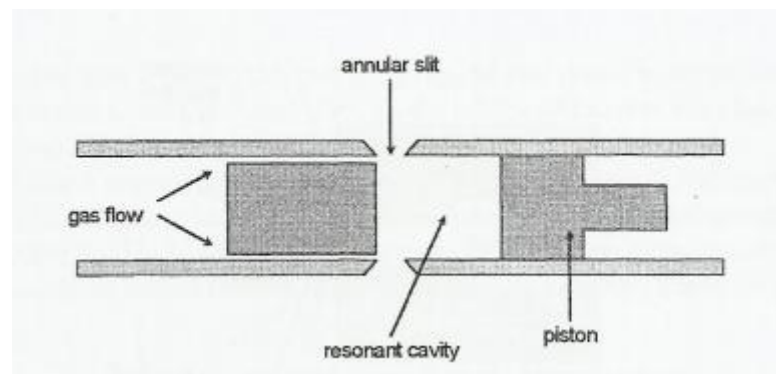
การใช้อัลตราซาวด์ทำให้เกิดผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกลและทางเคมี เนื่องจากการปล่อยคลื่นเสียงอัลตราซาวด์ จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ควิวเทชั่น (Cavitation) โดยความถี่ปกติที่ใช้ทั่วไปอยู่ในช่วงความถี่ 20-40 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นความถี่ที่สร้างขึ้นได้จากอุปกรณ์อัลตราซาวด์ทั่วไป โดยใช้ในกระบวนการทำความสะอาด และการขึ้นรูปพลาสติก เป็นต้น

2.7.1 แหล่งกำเนิดคลื่นอัลตราซาวด์ (Mason, 1999) , (ธีรพร, 2547)

แหล่งกำเนิดคลื่นอัลตราซาวด์หรือ อัลตราซาวด์ทรานส์ดิวเซอร์ (Transducer) นั้นเป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานกลหรือพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานคลื่นเสียงความถี่สูง โดยทั่วไปแบ่งทรานส์ดิวเซอร์ได้เป็น 4 ประเภทหลัก ได้แก่

1. แก๊สทรานส์ดิวเซอร์ (Gas Driven Transducer)

การให้กำเนิดคลื่นอัลตราซาวด์ของทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้ ทำได้โดยฉีดแก๊สความดันสูงภายในวัตถุทรงกระบอกที่ผลิตจากทองเหลือง มีเส้นรอบวงภายใน 2 มิลลิเมตร ภายในมีวัตถุของแข็งวิ่งผ่านไปมา ทำให้เกิดการรบกวนการไหลของแก๊สและเกิดเสียงขึ้น เมื่อวัตถุทรงกระบอกหมุนแก๊สที่พุ่งออกมาจากหัวฉีดแก๊สจะเกิดการไหลเวียนสลับกันอย่างรวดเร็วระหว่างพื้นที่ผิวของของแข็ง ระดับเสียงจะขึ้นอยู่กับความเร็วในการหมุนของวัตถุทรงกระบอก ลักษณะของทรานส์ดิวเซอร์แก๊สทรานส์ดิวเซอร์ แสดงดังรูปที่ 2.11

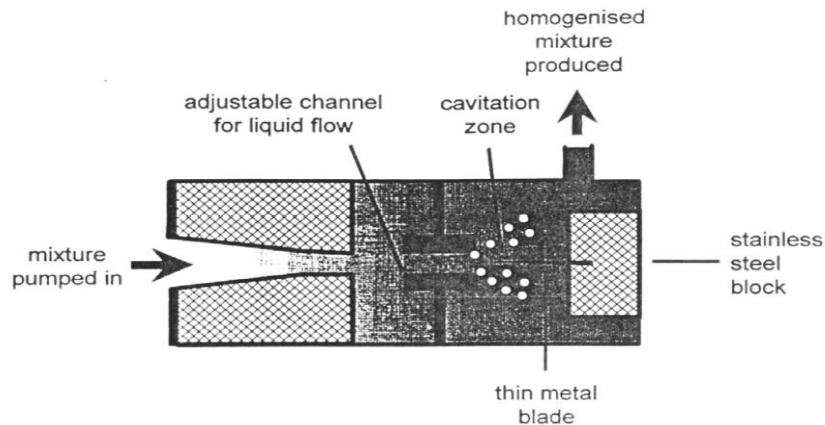


รูปที่ 2.11 แก๊สทรานส์ดิวเซอร์

ที่มา : Mason (1999)

2. ลิกวิดทรานส์ดิวเซอร์ (Liquid Driven Transducer)

การให้กำเนิดคลื่นอัลตราซาวด์ของทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้ ทำได้โดยการบังคับของเหลวให้เคลื่อนที่ผ่านออริฟิส (Orifice) โดยการเกิดควิเทชันนั้นเกิดจากการที่ของเหลวเคลื่อนไปกระทบกับแผ่นโลหะขนาดบาง (Thin blade) ซึ่งวางอยู่ในทิศทางการเคลื่อนที่ของของเหลว ทำให้แผ่นโลหะนั้นเกิดการสั่นไปมา เมื่อเกิดการสั่นแต่ละครั้งจะทำให้ผิวหน้าของแผ่นโลหะเกิดการปะทะกับของเหลวเป็นผลทำให้เกิดคลื่นความดันขึ้น และทำให้เกิดปรากฏการณ์ควิเทชันขึ้นภายในของเหลวนั้น การเกิดคลื่นความดันสลับกับควิเทชันเป็นผลให้ของเหลวเกิดการผสมกันได้ดีมากขึ้น ลักษณะของทรานส์ดิวเซอร์แบบลิกวิดทรานส์ดิวเซอร์ แสดงดังรูปที่ 2.12

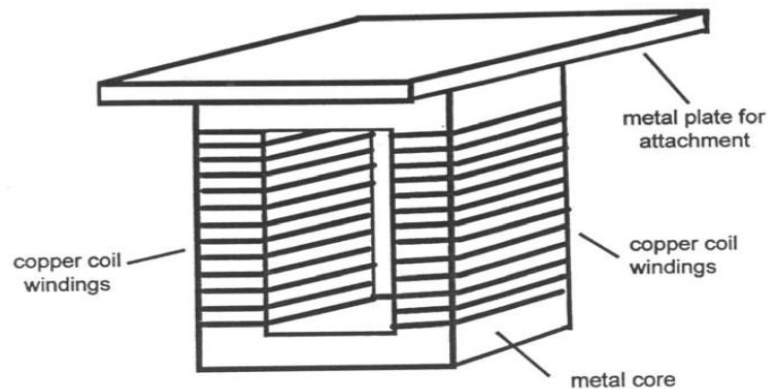


รูปที่ 2.12 ลิควิดทรานส์ดิวเซอร์

ที่มา: Mason (1999)

3. แมกนีโตสตริกทีฟทรานส์ดิวเซอร์ (Magnetostrictive Transducer)

ทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล โดยใช้คุณสมบัติแมกนีโตสตริกชัน (Magnetostriction) ซึ่งเป็นผลมาจากการที่สารเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic materials) เช่น นิกเกิล หรือ เหล็ก ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของมิติหรือขนาดเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก (Magnetic field) ลักษณะของทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้คล้ายกับโซลินอยด์ (Solenoid) ที่ใช้สารเฟอร์โรแมกเนติกเป็นแกน โดยแกนดังกล่าวประกอบขึ้นจากแผ่นนิกเกิลหรือนิกเกิลอัลลอย (Nickel alloy) ขนาดบางวางซ้อนกันหลายชั้นโดยรูปที่ง่ายที่สุดจะมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าด้วยลวดทองแดงในแต่ละด้านที่อยู่ตรงกันข้ามกันดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แมกนีโตสตริกทีฟทรานส์ดิวเซอร์

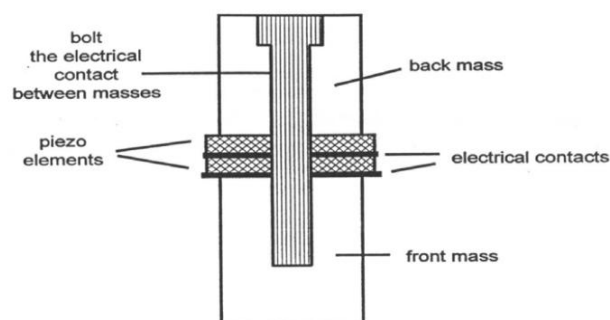
ที่มา: Mason (1999)

เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ขดลวด จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า แมกนีโตสตรีกชั่น คือเกิดการหดของแกนที่ผลิตจากสารเฟอร์โรแมกเนติก ทำให้ขนาดของทรานส์ดิวเซอร์ลดลง และเมื่อหยุดให้กระแสไฟฟ้าจะทำให้แกนหรือทรานส์ดิวเซอร์กลับมามีขนาดเท่าเดิม ดังนั้นการให้และหยุดกระแสไฟฟ้าแก่แกนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาดอย่างต่อเนื่องและทำให้เกิดการสั่นที่ต้องการขึ้นได้ โดยอาจออกแบบทรานส์ดิวเซอร์ให้มีขนาดที่เหมาะสมเพื่อให้ได้การสั่นและความถี่ของคลื่นที่ต้องการได้

ข้อเสียของทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้คือ สามารถสร้างคลื่นอัลตราซาวด์ได้ที่มีความถี่ต่ำกว่า 100 กิโลเฮิร์ตซ์ ระบบที่มีประสิทธิภาพเพียง 60 เปอร์เซ็นต์ โดยมากจะสูญเสียพลังงานไฟฟ้าไปในรูปของความร้อน ดังนั้นระบบนี้จึงมักจะต้องใช้การหล่อเย็นภายนอกควบคู่ไปด้วย ข้อดีของระบบนี้คือมีโครงสร้างที่แข็งแรงทนทาน

4. พิโซอิเล็กตริกทรานส์ดิวเซอร์ (Piezoelectric Transducer)

ทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้เป็นที่นิยมใช้กันทั่วไปในการทำให้เกิดคลื่นอัลตราซาวด์โดยการใช้เซรามิก (Ceramics) ที่มีส่วนผสมของสารพิโซอิเล็กตริก (Piezoelectric materials) เช่น แบเรียมไทเทเนต (Barium titanate) หรือเลดเมตาไนโอเบต (Lead metaniobate) สารพิโซเซรามิก ดังกล่าวนิยมใช้ในเครื่องอัลตราซาวด์ที่ใช้หัวส่งสกรูที่ติดอยู่ให้หลุดออกเพื่อทำความสะอาด มักใช้กับระบบโพรบ (Probe systems) โดยจะมีลักษณะเป็นแผ่นกลมที่มีรูอยู่ตรงกลาง ทรานส์ดิวเซอร์เซรามิกนี้จะมีความเปราะบางแตกหักง่าย ดังนั้นจึงต้องใช้แท่งโลหะมาประกบทั้งด้านหน้าและด้านหลัง ช่วยป้องกันการแตกหักและอันตรายความเสียหายที่เกิดจากความร้อนส่วนเกิน โดยทำหน้าที่เป็นตัวรับความร้อน โดยทั่วไปโครงสร้างของทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้จะประกบกันโดยใช้แผ่นพิโซเซรามิกสองชนิดเรียกว่า Sandwich ซึ่งจะทำให้การสั่นสะเทือนเพิ่มมากขึ้นกว่าการใช้เพียงชนิดเดียว พิโซอิเล็กตริกทรานส์ดิวเซอร์ แสดงดังรูปที่ 2.14 โดยทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้จะมีประสิทธิภาพสูงกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ และสามารถปรับใช้ได้ทุกช่วงคลื่นอัลตราซาวด์



รูปที่ 2.14 พิโซอิเล็กตริกทรานส์ดิวเซอร์

ที่มา : Mason (1999)

2.7.2 การออกแบบระบบอัลตราซาวด์

ระบบอัลตราซาวด์ที่ใช้ลิควิดทรานส์ดีฟเซออร์นั้นเป็นระบบที่ง่ายที่สุดและมีความทนทาน แต่ในการใช้งานจะขึ้นอยู่กับความเร็วในการบีบของเหลวให้เคลื่อนที่ผ่านรูขนาดเล็กไปยังแผ่นโลหะขนาดบาง ดังนั้นการประยุกต์ใช้งานของระบบอัลตราซาวด์ที่ใช้ลิควิดทรานส์ดีฟเซออร์ได้แก่ การผสม (Mixing) และกระบวนการโฮโมจีไนส์เซชัน (Homogenization) ทำให้กระบวนการดังกล่าวมีประสิทธิภาพดีขึ้น ในปัจจุบันอุปกรณ์ส่วนใหญ่ที่ใช้เป็นตัวให้กำเนิดคลื่นอัลตราซาวด์มักจะเป็นระบบที่ใช้ไฟฟ้าเพื่อทำให้เกิดคลื่นเสียง เช่น พิโซอิเล็กตริก แมกนีโตสตริกทีฟทรานส์ดีฟเซออร์ แต่หลังจากที่แหล่งกำเนิดคลื่นจะต้องมีอุปกรณ์ที่ใช้ในการส่งถ่ายคลื่นอัลตราซาวด์ไปยังของเหลว โดยสรุปแล้วระบบอัลตราซาวด์จะต้องมีอุปกรณ์ที่สำคัญและจำเป็นอยู่ 3 ส่วนได้แก่

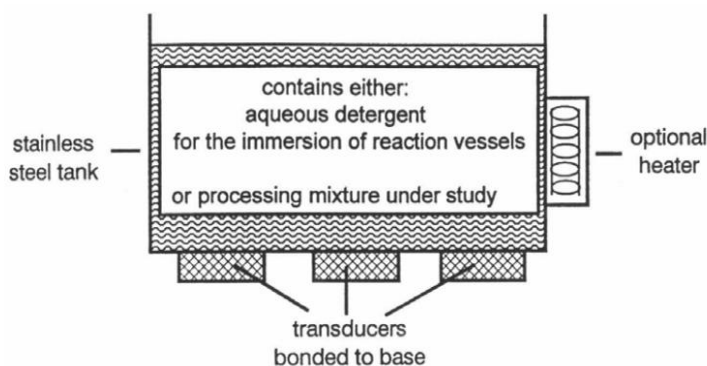
1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) โดยการเปลี่ยนกระแสไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นกระแสสลับที่มีความถี่ที่ต้องการโดยทรานส์ดีฟเซออร์
2. ทรานส์ดีฟเซออร์ ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงไปเป็นการสั่นเนื่องจากพลังงานกล ทรานส์ดีฟเซออร์ที่นิยมในปัจจุบันคือชนิดพิโซอิเล็กตริก โดยที่รูปร่างและขนาดของทรานส์ดีฟเซออร์ที่นำมาประกบกันจะขึ้นอยู่กับความถี่ที่ต้องการใช้งานและพลังงานของทรานส์ดีฟเซออร์แต่ละชนิดจะแปรผกผันกับกำลังสองของความถี่ ดังนั้นในการประยุกต์ใช้พลังงานอัลตราซาวด์จึงมักใช้ในช่วงความถี่ต่ำ โดยตัวทรานส์ดีฟเซออร์จะอยู่ติดกับบูสเตอร์ (Booster) หรือฮอร์น (Horn) ด้านบนและเชื่อมต่อกับระบบส่งถ่ายพลังงาน
3. ระบบส่งถ่ายพลังงาน (Delivery systems) ซึ่งจะทำหน้าที่ส่งถ่ายพลังงานจากการสั่นสะเทือนไปยังของเหลว ในกรณีที่ใช้อัลตราซาวด์แบบอ่าง (Ultrasonic bath) ตัวทรานส์ดีฟเซออร์จะอยู่ตรงบริเวณฐานด้านล่างของตัวอ่างหรือถังและส่งถ่ายพลังงานโดยตรงไปยังของเหลวที่อยู่ภายในอ่าง สำหรับระบบที่ต้องการพลังงานที่สูงขึ้น จะใช้วิธีขยายสัญญาณหรือพลังงานและส่งถ่ายไปยังของเหลว โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่าฮอร์น เป็นโลหะที่มีรูปร่างแตกต่างกันและจะติดอยู่กับตัวทรานส์ดีฟเซออร์ โดยตัวฮอร์นทำจากวัสดุที่ทำให้เกิดขนาดของความยาวคลื่นครึ่งหนึ่งหรือเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนเท่าตัวของความยาวคลื่นเสียง หลังจากใช้งานเป็นเวลานานจะทำให้บริเวณส่วนปลายของฮอร์นเกิดการกัดกร่อนและมีผลต่อความยาวของฮอร์นโดยทำให้สั้นลง จึงนิยมใช้ส่วนปลายฮอร์นชนิดที่ถอดได้ มีลักษณะเป็นเกลียวสามารถเปลี่ยนได้ง่าย

2.8 ประเภทของเครื่องอัลตราซาวด์ (Ultrasonic Reactor)

เครื่องอัลตราซาวด์ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในปัจจุบันมีความแตกต่างกันตรงที่การออกแบบแหล่งกำเนิดไฟฟ้า แหล่งกำเนิดคลื่นและตัวเครื่องหรือเซลล์ที่ใช้ร่วมกับแหล่งกำเนิดคลื่น โดยสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิด ดังนี้

2.8.1 อ่างอัลตราซาวด์ (Ultrasonic Bath)

อ่างอัลตราซาวด์เป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายและมีการนำมาใช้เป็นเวลานาน โดยเฉพาะในห้องปฏิบัติการเนื่องจากมีราคาไม่แพงเมื่อเปรียบเทียบกับระบบแบบโพรบ โดยทั่วไปทรานส์ดีวเซอร์จะติดอยู่กับบริเวณฐานด้านล่างและความถี่ที่ใช้งานส่วนใหญ่ประมาณ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ อัลตราซาวด์ชนิดอ่างแสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 อัลตราซาวด์แบบอ่าง

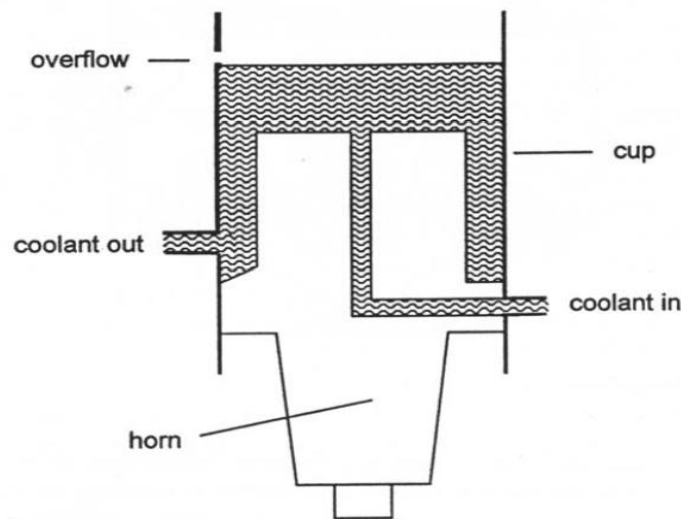
ที่มา: Mason (1999)

สำหรับอ่างอัลตราซาวด์นั้นพลังงานสูงสุดที่สร้างได้จะอยู่บริเวณระดับความสูงระดับหนึ่งตลอดตามความลึกของอ่าง ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดคลื่นจากการสะท้อนของคลื่นอัลตราซาวด์ที่ถูกสร้างขึ้นตรงบริเวณรอยต่อระหว่างอากาศและของเหลว ซึ่งแยกโดยระยะทางที่เทียบเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นเสียงของของเหลวภายในอ่าง สำหรับน้ำ มีค่า $\lambda = 37$ มิลลิเมตร ที่ความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ ดังนั้นถ้าระดับน้ำในอ่างลดลงต่ำกว่าค่า λ จะมีผลทำให้ไม่สามารถทำให้เกิดคลื่นเสียงที่มีพลังงานสูงได้

อ่างอัลตราซาวด์นั้นมีอุปกรณ์เสริมประเภทต่างๆที่นำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้ดีขึ้น เช่น อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ (Thermostatically controlled heating) อุปกรณ์กระจายคลื่น (Frequency sweeps) ที่ทำให้ควิเทชั่นเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ อุปกรณ์ปรับ

ระดับพลังงาน สวิตช์เปิดปิดแบบจังหวะหรือนาฬิกาจับเวลา เป็นต้น อ่างอัลตราซาวด์ทั่วไปมักจะให้พลังงานต่ำ เพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายจากควิเทชั่นที่เกิดขึ้นตรงบริเวณผนังด้านในของอ่าง นอกจากนั้นของเหลวที่เติมในอ่างมักมีปริมาณมากทำให้ปริมาณพลังงานมีค่าลดลง

รูปแบบของอ่างอัลตราซาวด์อีกประเภทหนึ่งเรียกว่า คัพฮอร์น (Cup Horn) ดังรูปที่ 2.14 จัดว่าเป็นอ่างอัลตราซาวด์ที่สร้างพลังงานได้สูงมาก ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณผิวหน้าที่เกิดคลื่นอัลตราซาวด์ซึ่งติดอยู่กับทรานส์ดีวเซอร์จะสัมผัสโดยตรงกับของเหลวและลักษณะการทำให้เกิดพลังงานหรือคลื่นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่เกี่ยวข้องและระดับของของเหลวซึ่งมีความสำคัญมาก

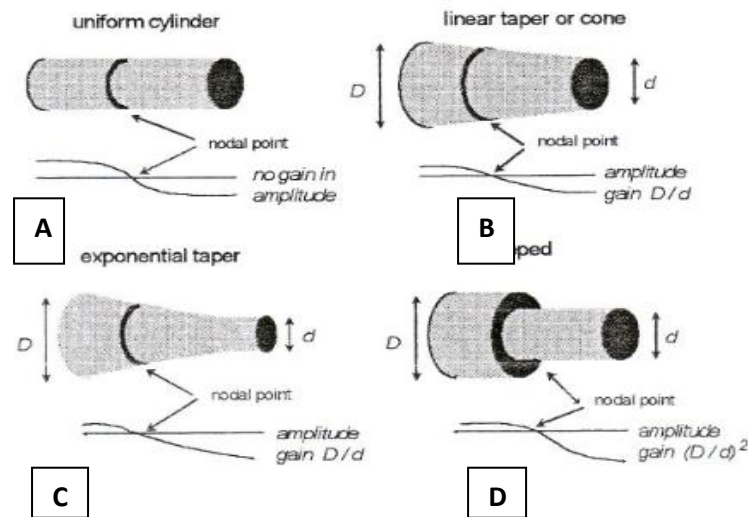


รูปที่ 2.16 อ่างอัลตราซาวด์แบบคัพฮอร์น

ที่มา: Mason (1999)

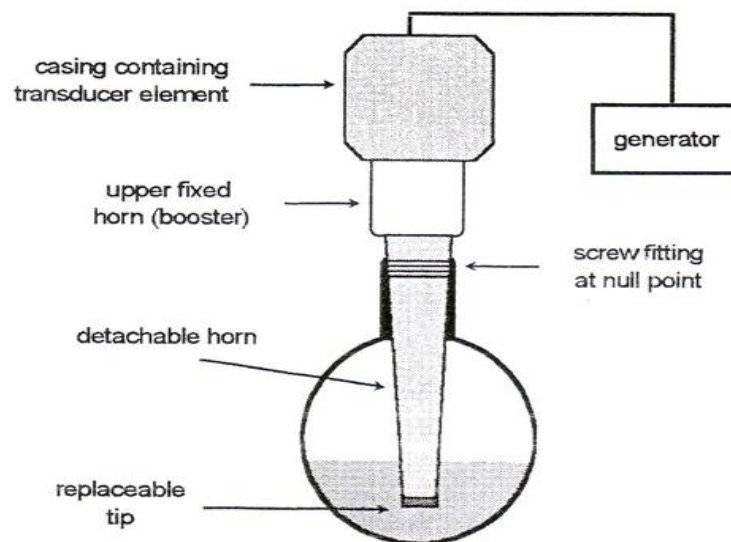
2.8.2 ระบบอัลตราซาวด์แบบโพรบ (Ultrasonic Probe Systems)

ในการขยายพลังงานหรือคลื่นเสียงที่เกิดจากทรานส์ดีวเซอร์ ปกติทั่วไปจะนำทรานส์ดีวเซอร์มาต่อเข้ากับอุปกรณ์ที่เรียกว่า ฮอร์น (Horn) ลักษณะของฮอร์นจะมีความแตกต่างกันดังรูปที่ 2.15 โดยฮอร์นส่วนใหญ่จะให้ขนาดของความยาวคลื่นครึ่งหนึ่งหรือเป็นพหุคูณกับความยาวของคลื่นเสียงของวัสดุที่นำมาผลิต ระบบอัลตราซาวด์ แสดงดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.17 ลักษณะของฮอร์นรูปแบบต่างๆ

ที่มา : Mason (1999)



รูปที่ 2.18 ระบบอัลตราซาวด์แบบไพโรบ

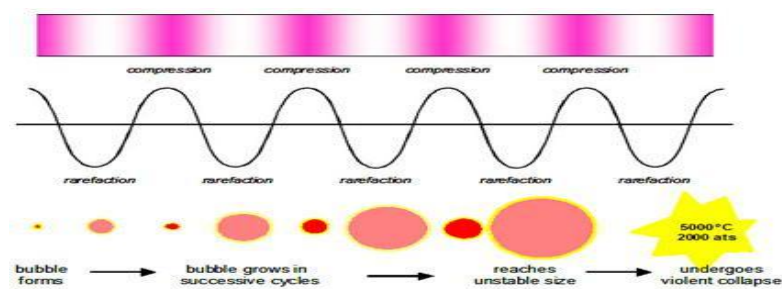
ที่มา : Mason (1999)

แอมพลิจูดที่ถูกสร้างขึ้นจากระบบนี้จะขึ้นอยู่กับรูปร่างของฮอร์น สำหรับฮอร์นที่มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอก (Uniform cylinder) นั้นแอมพลิจูดจะไม่มีเปลี่ยนแปลง แต่ฮอร์นจะทำหน้าที่ขยายหรือเพิ่มการส่งถ่ายพลังงานเสียง ขนาดความยาวคลื่นที่ได้จากตัวขยาย (Amplifier) สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางของผิวหน้าตัดของฮอร์น ระหว่าง 2 พื้นก็คือ Driven Face (D) และ Emitting Face (d) ตัวอย่างเช่นฮอร์นที่มีรูปร่างเป็น Exponential หรือ Linear tapered (ดังรูปที่ 2.17 (B),(C)) จะมีอัตราส่วน D/d ในขณะที่ฮอร์นที่มี

ลักษณะเป็น Stepped (รูปที่ 2.17 (D)) จะมีอัตราส่วนเท่ากับ $(D/d)^2$ ซึ่งจะเห็นว่าฮอว์นแบบ Stepped จะมีความสามารถในการขยายสัญญาณได้สูงกว่าเสมอ แต่เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงความเสียหายจากความเค้นภายในตัววัตถุ (Internal stress) อัตราส่วนระหว่าง D/d จะต้องไม่สูงเกินไป ในทางปฏิบัติขนาดของพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากแหล่งกำเนิดพลังงานนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญสองส่วน ได้แก่ คุณสมบัติของวัตถุที่ใช้ในการผลิตทรานส์ดิวเซอร์นั้น นิยมใช้วัสดุที่สามารถยืดหยุ่นและกลับคืนตัวได้ดี เช่นไทเทเนียม (Titanium) หรืออะลูมิเนียมอัลลอย (Aluminium alloy) ซึ่งวัสดุทั้งสองชนิดมีความทนต่อการล้าเนื่องมาจากแรงกล แต่อะลูมิเนียมอัลลอยนั้นไม่เหมาะสมที่จะสัมผัสกลับของเหลวที่เกิดปฏิกิริยาควิเทชั่น เนื่องจากถูกกัดกร่อนได้ง่าย จึงเหมาะสมที่จะใช้ไทเทเนียมในการผลิตฮอว์นแทน สำหรับพื้นผิวที่ปลดปล่อยคลื่นนั้น พบว่าพื้นที่ขนาดเล็กจะให้ประสิทธิภาพสูงกว่า แต่แอมพลิจูดที่สูงจะทำให้เกิดฟองอากาศขึ้นที่บริเวณพื้นผิวน้ำจากปฏิกิริยาควิเทชั่นซึ่งจะรบกวนการส่งต่อพลังงานไปยังของเหลวตัวกลาง

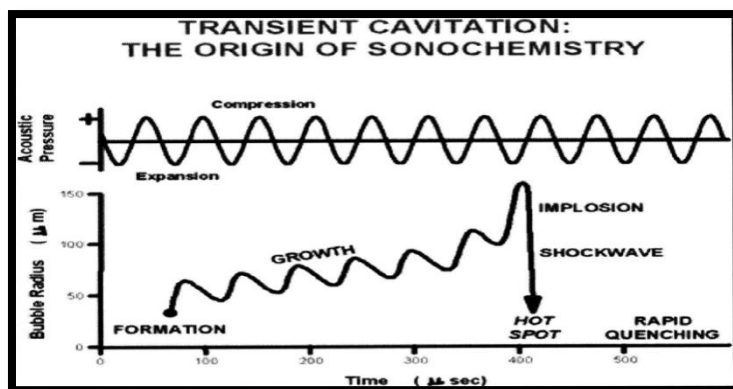
2.9 ปรากฏการณ์ควิเทชั่น (Cavitation)

ปรากฏการณ์ควิเทชั่นเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในตัวกลาง หรือสารละลายที่ได้รับคลื่นอัลตราซาวด์ โดยทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านเคมีและกายภาพ จากการเกิดแก๊ส ซึ่งการที่ฟองแก๊สเกิดขึ้น เมื่อโครงสร้างของของเหลวที่ได้รับคลื่นอัลตราซาวด์ซึ่งมีทั้งการบีบอัด (Compress) และคลายตัว (Rarefaction) เข้าไปมาจำนวนหลายพันรอบต่อวินาที ทำให้เกิดฟองอากาศขึ้นดังรูปที่ 2.19 และฟองอากาศที่เกิดขึ้นภายในของเหลวนี้อาจสัมผัสกับแรงสั่นที่เกิดจากคลื่นอัลตราซาวด์เป็นระยะและเกิดการแลกเปลี่ยนแก๊สระหว่างนั้น (ธีรพร, 2547 อ้างถึงใน Atchley, 1998) เป็นผลให้ฟองแก๊สมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งแตกในที่สุด แสดงดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.19 การพัฒนาและการยุบตัวของฟองอากาศควิเทชั่น

ที่มา: Mason (1999)



รูปที่ 2.20 การเกิดฟองอากาศในตัวกลางเนื่องจากคลื่นอัลตราซาวด์
ที่มา: ธีรพร (2547) อ้างถึงใน Suslick (1994)

คาวิตेशनสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่คาวิตेशनแบบถาวร (Stable cavitation) และคาวิตेशनแบบชั่วคราว (Transient cavitation) (Mason, 1999) ซึ่งแต่ละแบบจะมีผลทำให้พฤติกรรมหรือลักษณะฟองอากาศที่ได้รับคลื่นอัลตราซาวด์แตกต่างกันออกไป โดยคาวิตेशनแบบถาวรจะเกิดขึ้นเมื่อฟองอากาศหรือฟองแก๊สเกิดการสั่นแกว่ง (Oscillate) เมื่อได้รับคลื่นอัลตราซาวด์เป็นจำนวนหลายรอบของการสั่นแต่ไม่เกิดการแตกของฟองดังกล่าว ซึ่งฟองอากาศหรือฟองแก๊สนี้อาจเพิ่มขนาดถึงขนาดเรโซแนนซ์ (Resonance size) เป็นขนาดของฟองแก๊สที่มีความถี่ธรรมชาติเท่ากับกับความถี่ในการสั่นแบบบังคับ ส่วนคาวิตेशनแบบชั่วคราวนั้นเกิดขึ้นในระยะบีบอัดของฟองอากาศ ในของเหลวที่ได้รับความเครียด (Tension stress) ที่เกิดขึ้นขณะเริ่มเกิดการขยายตัวของฟองอากาศ ซึ่งมีผลทำให้เกิดการแตกตัวของฟองแก๊สอย่างรวดเร็วหรืออาจเกิดจากฟองแก๊สเกิดการสั่นแกว่งและขยายขนาดเพิ่มขึ้นในลักษณะคงที่ในระยะหนึ่งก่อนที่จะแตกอย่างรวดเร็วเมื่อฟองอากาศหรือฟองแก๊สขยายขนาดขึ้นถึงขนาดจำเพาะ (ธีรพร, 2547 อ้างถึงใน Frizzell, 1988)

ในสภาวะที่ฟองอากาศหรือฟองแก๊สแตกนั้น พบว่าทำให้เกิดอุณหภูมิสูงขึ้นถึง 5,000 เคลวิน (K) และความดันสูงถึง 2,000 atm (Mason, 1999) ในบริเวณที่เกิดคลื่นกระแทก (Shock waves) ทั้งนี้เนื่องจากในระหว่างเกิดการขยายและหดตัวของฟองอากาศนั้น จะเกิดสมดุลขึ้นระหว่างความดันไอน้ำภายในและภายนอกฟองอากาศและพื้นผิวของฟองอากาศขณะขยายตัวจะมีมากกว่าพื้นที่ผิวของฟองอากาศขณะหดตัว จึงเป็นผลให้การซึมผ่านของแก๊สในขณะที่เกิดการขยายตัวเกิดขึ้นได้มากกว่าและฟองอากาศนี้จะขยายตัวเพิ่มขึ้น เมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้นโดยอัตราส่วนของอัตราการซึมผ่านของแก๊สในขณะฟองอากาศขยายตัวต่ออัตราการซึมผ่านของแก๊ส

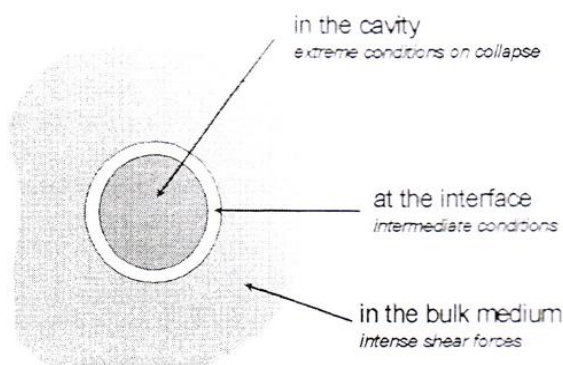
ในขณะที่ถูกบีบอัดจะเพิ่มมากขึ้นในแต่ละรอบ จนกระทั่งฟองแก๊สมีขนาดเรโซแนนซ์ ซึ่งทำให้ช่องว่างภายในฟองแก๊สมีขนาดโตขึ้นอย่างรวดเร็วภายในหนึ่งรอบของการสั่น และเนื่องจากพลังงานที่ได้รับจากคลื่นอัลตราซาวด์ไม่เพียงพอในการคงสถานะของแก๊สหรือไอ จึงทำให้เกิดการควบแน่น (Condensation) ขึ้นในทันที โดยโมเลกุลที่ควบแน่นนั้นจะชนกันอย่างรุนแรง ทำให้เกิดคลื่นกระแทกขึ้นและเกิดจุดหรือบริเวณเล็กๆ ที่มีอุณหภูมิและความดันที่สูงมาก และเป็นที่ยืนยันว่าปรากฏการณ์นี้เป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญที่เกิดในระหว่างที่ของเหลวได้รับคลื่นอัลตราซาวด์ ซึ่งทันทีที่ฟองอากาศหรือฟองแก๊สแตกจะเกิดการปลดปล่อยพลังงานที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยาเคมีทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ใหม่แตกต่างไปจากสภาวะปกติ (ธีรพร, 2547 อ้างถึงใน Suslick, 1998)

2.10 ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดจากคลื่นอัลตราซาวด์

รูปแบบของปฏิกิริยาเคมีในระบบที่เกิดขึ้นเมื่อได้รับคลื่นอัลตราซาวด์ แบ่งเป็น 2 แห่งคือ

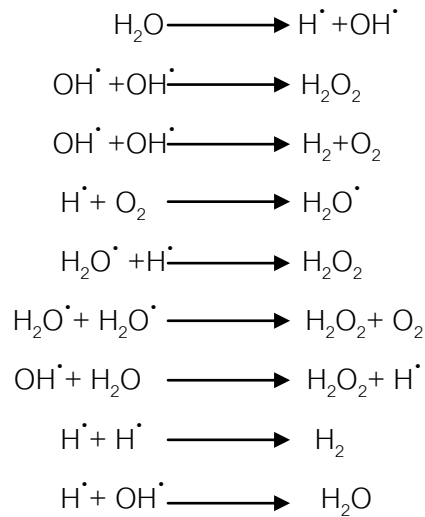
2.10.1 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างของเหลวกับของเหลว

เมื่อทำการปล่อยคลื่นอัลตราซาวด์จะทำให้เกิดฟองอากาศคาวิเทชันขึ้นในระบบ โดยกลไกทางเคมีที่เกิดขึ้นในของเหลวจะเกิดขึ้นหลังจากเกิดการยุบตัวหรือแตกตัวของฟองก๊าซ ดังรูปที่ 2.21 เมื่อฟองก๊าซแตกตัวจะทำให้เกิดแรงดันสูง ทำให้โมเลกุลของน้ำแตกตัวเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH^\cdot) และไฮโดรเจนเรดิคัล (H^\cdot) เป็นตัวออกซิไดซ์ที่ดี หลังการแตกตัวของฟองอากาศคาวิเทชัน ไฮดรอกซิลเรดิคัลจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับน้ำได้เป็นผลิตภัณฑ์คือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen Peroxide, H_2O_2) ดังรูปที่ 2.22 ซึ่งตัวออกซิไดซ์เหล่านี้สามารถช่วยในการสลายตัวของสารอินทรีย์ในน้ำ และแรงเฉือนหรือแรงดันที่เกิดขึ้นจากการยุบตัวของฟองอากาศยังสามารถทำลายพันธะเคมีของสารปนเปื้อนในน้ำได้



รูปที่ 2.21 ฟองอากาศคาวิเทชันยุบตัวในของเหลว

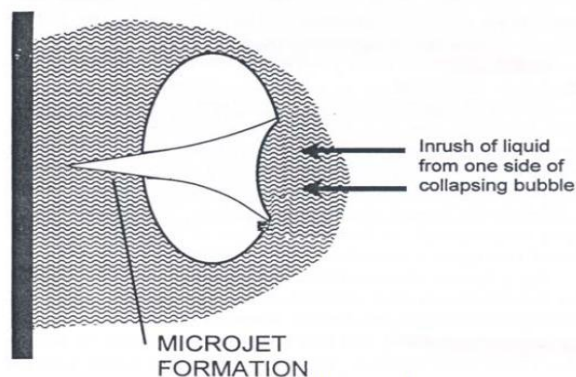
ที่มา: Mason (1999)



รูปที่ 2.22 การเกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ในน้ำ จากการยุบตัวของฟองอากาศ
ที่มา: Mason (1999)

2.10.2 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างผิวของแข็งกับของเหลว

ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นจะคล้ายกับปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างของเหลวกับของเหลวแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย คือในกรณีที่ฟองคาวิตซ์เกิดการยุบตัวหรือแตกตัวบริเวณข้างๆผิวของของแข็งที่กั้นระหว่างของเหลว เมื่อฟองอากาศคาวิตซ์ยุบตัวจะทำให้เกิด ลีควิดเจต (Liquid Jet) ดังรูปที่ 2.23 ลักษณะเป็นของเหลวที่พุ่งอย่างรวดเร็ว มีความเร็วมากกว่า 100 เมตรต่อวินาที บริเวณผิวของของแข็งจะเกิดความดันสูง ทำให้อัลตราซาวด์สามารถใช้ในการทำความสะอาดได้ดี



รูปที่ 2.23 การแตกของฟองอากาศในสารละลาย
ที่ได้รับคลื่นอัลตราซาวด์ทำให้เกิดคลื่นกระแทกขนาดเล็กพุ่งเข้าสู่พื้นผิวของแข็ง
ที่มา: Mason (1999)

2.11 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดฟองอากาศคาวิเทชัน (Mason, 1999)

2.11.1 ความถี่ (Frequency)

เมื่อมีการเพิ่มความถี่ ทำให้ช่วงเวลาส่วนขยายของคลื่นสั้นลง ดังนั้นเพื่อให้ได้พลังงานคาวิเทชันของระบบที่เท่ากัน ต้องมีการเพิ่มพลังงานหรือแอมพลิจูด หรืออาจกล่าวได้ว่า เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นระบบก็ต้องการพลังงานที่มากขึ้น เพื่อให้ได้พลังงานคาวิเทชันที่ระดับเดียวกัน เช่นที่ความถี่ 400 กิโลเฮิร์ตซ์ ต้องการพลังงานที่มากกว่า 10 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 10 เท่า เพื่อทำให้เกิดคาวิเทชันในน้ำ เมื่อความถี่เพิ่มถึงระดับเมกะเฮิร์ตซ์ (MHz) จึงเป็นการยากมากที่จะทำให้เกิดคาวิเทชันในของเหลว

2.11.2 ความหนืดของสารละลาย (Solvent Viscosity)

การเกิดฟองอากาศคาวิเทชันในบริเวณช่องว่างของโมเลกุลสารละลายจะเกิดได้ยากขึ้น หากสารละลายนั้นมีความหนืดสูง

2.11.3 แรงตึงผิวหน้าของสารละลาย (Solvent Surface Tension)

การเกิดฟองอากาศคาวิเทชันที่ผิวของเหลว แก๊สจะเกิดขึ้นได้ง่ายเมื่อสารละลายมีแรงตึงผิวต่อหน่วยพื้นที่ต่ำ เพราะเป็นการลดค่าพลังงานต่ำสุดในการเกิดคาวิเทชันลดลง

2.11.4 ความดันไอของสารละลาย (Solvent Vapour Pressure)

ในระหว่างช่วงขยายของการเกิดคาวิเทชัน ไอน้ำของของเหลวรอบๆจะผ่านเข้าไปในโพรงคาวิเทชัน ซึ่งในของเหลวที่มีความดันไอลดต่ำการเกิดไอของสารเข้าไปในฟองจะน้อย ทำให้การเกิดคาวิเทชันยากกว่าสารที่มีความดันไอสสูง แต่สิ่งที่ระบบต้องการคือพลังงานที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแตกตัวของคาวิเทชัน ซึ่งในของเหลวที่มีความดันไอสสูงการเกิดไอระเหยผ่านเข้าไปในคาวิเทชันเกิดได้ง่าย แต่การแตกของคาวิเทชันเกิดเป็นพลังงานน้อยกว่า

2.11.5 อุณหภูมิ (Temperature)

เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทำให้ความดันไอของตัวกลางเพิ่มขึ้น ทำให้การเกิดคาวิเทชันง่ายขึ้น แต่พลังงานก็ลดลง แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นใกล้จุดเดือด จะเกิดฟองคาวิเทชันจำนวนมากพร้อมกัน ซึ่งฟองเหล่านี้จะทำหน้าที่ขัดขวางการถ่ายทอดพลังงานอัลตราซาวด์จากแหล่งกำเนิดสู่ของเหลว

2.11.6 ความเข้ม (Intensity)

ความเข้มของพลังงานมีส่วนสัมพันธ์กันกับการสั่นแอมพลิจูดของคลื่นอัลตราซาวด์ที่ปล่อยออกมา เมื่อมีการเพิ่มความเข้มของพลังงานจะทำให้การเกิดฟองคาวิเทชันเพิ่มขึ้น สำหรับความถี่จะมีความเข้มต่ำสุดที่ทำให้เกิดคาวิเทชันได้ เมื่อให้พลังงานอัลตราซาวด์มากขึ้นจะทำให้มีฟองคาวิเทชันเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ซึ่งฟองที่เกิดขึ้นจะขัดขวางการถ่ายทอด

พลังงาน รวมถึงเมื่อแอมพลิฟิเคชันมีขนาดใหญ่จะทำให้ทรานสคริปต์ของเหลวสัมผัสกันไม่ตลอดรอบของการสั้น ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานมากขึ้น และเมื่อการเพิ่มแอมพลิฟิเคชันทำให้การยืด-หดของทรานสคริปต์มีมากขึ้น ซึ่งอาจทำให้ทรานสคริปต์เสียหายได้

2.12 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้คลื่นอัลตราซาวด์ในการกำจัดสาหร่าย

Lee และคณะ (2002) ทำการทดลองให้คลื่นอัลตราซาวด์กับปรากฏการณ์แอลจีบูม ในทะเลสาบเซ็นบา (Lake Senba) ในญี่ปุ่น ปริมาณน้ำในทะเลสาบ 365,000 ลูกบาศก์เมตร โดยการจุ่มโพรบอัลตราซาวด์ 1 เมตร ใช้คลื่นอัลตราซาวด์โพรบ 10 โพรบ ที่ความถี่ 200 กิโลเฮิร์ตซ์ ความเข้มพลังงาน 0.1 วัตต์ต่อลิตร พบว่าเมื่อทำการอัลตราซาวด์ผ่านไปปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ลดลง

Ahn และคณะ (2003) ทำการศึกษาโดยให้คลื่นอัลตราซาวด์ในการยับยั้งสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน โดยใช้ความเข้มพลังงาน 630 วัตต์ ความถี่ 22 กิโลเฮิร์ตซ์ เป็นเวลา 10 วัน พบว่าเมื่ออัลตราซาวด์ผ่านไป 3 วัน ความเข้มข้นสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินที่ปนเปื้อนในน้ำจาก 66 เปอร์เซ็นต์ ลดลงเหลือเพียง 0.3 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ลดลงจาก 111.3 ไมโครกรัมต่อลิตร เหลือเพียง 32.5 ไมโครกรัมต่อลิตร

Hao และคณะ (2004) ศึกษากลไกการยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินด้วยกลไกของควาเวชัน โดยกระบวนการให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่ายสปิริulina (Spirulina) พบว่าเมื่อทำการให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์มีผลทำให้เซลล์สาหร่ายถูกทำลายและสามารถฆ่าเซลล์สาหร่ายได้ เวลาการอัลตราซาวด์ที่เท่ากันคือ 5 นาที และพลังงานคลื่นเสียงที่เท่ากัน 40 วัตต์ ความถี่ 20 200 กิโลเฮิร์ตซ์ และความถี่ 1.7 เมกะเฮิร์ตซ์ พบประสิทธิภาพการลดประมาณสาหร่ายคือ 44 69 และ 63 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

Inman (2004) ศึกษาการใช้คลื่นอัลตราซาวด์ในการลดปริมาณสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (Blue-Green Algae) สาหร่ายสีเขียว (Chlorophyceae) ไดอะตอม (Bacillariophyceae) พบว่าการให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ที่พลังงานต่ำ (20 วัตต์) ความถี่ต่ำ (28 กิโลเฮิร์ตซ์) สามารถลดปริมาณไดอะตอม 60 เปอร์เซ็นต์ และสาหร่ายสีเขียว 41 เปอร์เซ็นต์ โดยทำการทดสอบกับบ่อ

ตกตะกอนแบบขนาน ขนาด 300 ตารางเมตร ใช้พลังงานอัลตราซาวด์ 40 วัตต์ ความถี่ 28 กิโลเฮิร์ตซ์ พบว่าน้ำที่ออกจากระบบตกตะกอนมีปริมาณสาหร่ายลดลง โดยวัดจากปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ที่ลดลง

Tang และคณะ (2004) ศึกษาผลกระทบต่อน้ำแก๊สแควคิลโอของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินจากการให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ ที่ความถี่ 1.7 เมกกะเฮิร์ตซ์ พบว่าที่ความถี่ 1.7 เมกกะเฮิร์ตซ์ พลังงานคลื่นเสียงที่ต่ำ มีผลต่อกลไกภายในเซลล์ของสาหร่ายและยังเป็นการยับยั้งการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของไซยาโนแบคทีเรียในแหล่งน้ำ การให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ทำให้เกิดคาวิเทชัน (Cavitation) เมื่อคาวิเทชันแตกจะมีผลทำลายแก๊สแควคิลโอ (Gas-Vacuoles) และเนื้อเยื่อของเซลล์สาหร่ายทำให้เซลล์แตก นอกจากนี้ยังทำให้เกิดเวดดิคอล ซึ่งเป็นตัวยับยั้งและทำลายกระบวนการสังเคราะห์แสงของเซลล์สาหร่าย ซึ่งเป็นผลทำให้มีความสามารถในการควบคุมสาหร่ายในแหล่งน้ำ

Ma และคณะ (2005) ศึกษาอิทธิพลการใช้อัลตราซาวด์ที่ทำให้เซลล์สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินแตกและปล่อยสารพิษไมโครซิสติน (Microcystins) ลงสู่แหล่งน้ำ จากการเติบโตอย่างรวดเร็วของสาหร่าย โดยองค์การอนามัยโลก (WHO) ได้กำหนดความเข้มข้นสารพิษที่มาจากสาหร่าย *Microcystis* *Anabaena* *Oscillatoria* และ *Nostoc* ที่สามารถปล่อยสารพิษไมโครซิสติน (Microcystins) ให้อยู่ในระดับไม่เกิน 1 ไมโครกรัมต่อลิตรในน้ำดื่ม พบว่าสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินจะปล่อยสารพิษไมโครซิสตินประมาณ 10 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเซลล์สาหร่ายแตก ทำให้มีสารพิษลงสู่แหล่งน้ำ ทำการทดลองโดยใช้สารละลาย Microcystins 400 มิลลิกรัม ความเข้มข้นไมโครซิสติน 2 ไมโครกรัมต่อลิตร ทดสอบในห้องปฏิบัติการ ศึกษาความแตกต่างด้านพลังงานของอัลตราซาวด์ ที่ 0 30 60 และ 90 วัตต์ ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ระยะเวลา 5 นาที พบว่าพลังงานมีผลกระทบต่ออัตราการลดลงของสารพิษเพียงเล็กน้อยในทุกช่วงพลังงาน ในทางตรงกันข้ามกับพบว่าที่พลังงาน 60 และ 90 วัตต์ กลับมีผลทำให้สารพิษลดลง 12 และ 4 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ทำการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมโดยใช้เวลาที่ 1 5 10 20 และ 30 นาทีที่ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ พลังงาน 30 วัตต์ พบว่าหลังจากการอัลตราซาวด์ ลดปริมาณความเข้มข้นของเซลล์สาหร่าย 65 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นทดสอบพลังงานของอัลตราซาวด์ ที่ 0 30 60 และ 90 วัตต์ ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ระยะเวลาอัลตราซาวด์ที่ 1 5 10 และ 20 นาที พบว่าหลังการให้คลื่นเสียงผ่านไป

5 นาที ทำให้ความเข้มข้นของสาหร่ายลดลง ในทุกช่วงพลังงาน ที่พลังงาน 30 60 และ 90 วัตต์ ความเข้มข้นลดลง 18.1 50.2 และ 62.6 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

ทดสอบความถี่ที่เหมาะสมต่อการทดสอบความถี่ที่ 20 150 410 กิโลเฮิร์ตซ์ และ 1.7 เมกกะเฮิร์ตซ์ พบว่าประสิทธิภาพการลดความเข้มข้นของสารพิษไมโครซิสติน (Microcystins) ลดลง 53.7 70.6 65.2 และ 52.9 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ความถี่ที่เหมาะสมคือ 150 กิโลเฮิร์ตซ์ จากการศึกษาพบสภาวะที่เหมาะสมคือ ความถี่ 150 กิโลเฮิร์ตซ์ ระยะเวลาการให้คลื่นเสียงประมาณ 5 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการสลายตัวของสารพิษ

Mahvi และ Dehghani (2005) ทำการทดลองใช้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์กับการบลูมของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินในน้ำผิวดินธรรมชาติ ใช้ความถี่ 42 กิโลเฮิร์ตซ์ ความเข้ม 0.07 วัตต์ต่อลิตร ปริมาณน้ำตัวอย่าง 400 700 และ 1000 มิลลิลิตร ตามลำดับ ทดสอบที่ระยะเวลาอัลตราซาวด์ 30 60 90 120 และ 150 วินาที พบว่าเวลาอัลตราซาวด์ 2.5 นาที มีประสิทธิภาพการบำบัดสาหร่ายสูงสุด 100 เปอร์เซ็นต์

Zhang และคณะ (2006 a) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (*Microcystis aeruginosa*) โดยการให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ ทำการทดลองโดยใช้พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์ 80 วัตต์ โดยใช้ความถี่ที่ 20 80 150 410 และ 1,320 กิโลเฮิร์ตซ์ พบว่าคลื่นอัลตราซาวด์ที่ 80 กิโลเฮิร์ตซ์ พลังงาน 80 วัตต์ เวลา 5 นาที ทำให้สีของคลอโรฟิลล์ เอ ลดลงอย่างชัดเจน และที่พลังงาน 32 48 64 และ 80 วัตต์ ความถี่ 80 กิโลเฮิร์ตซ์ มีผลทำให้ค่าคงที่ของปฏิกิริยาการลดปริมาณเซลล์สาหร่าย เพิ่มขึ้นเป็น 0.007 0.013 0.018 และ 0.023 ต่อนาที ตามลำดับ โดยคลื่นอัลตราซาวด์ที่พลังงานและความถี่สูงขึ้น จะเร่งการเกิดคาวิเทชันและทำให้เซลล์สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินแตก ปล่อยสาร *Microcystin* ซึ่งเป็นสารพิษเพิ่มขึ้นในน้ำ ดังนั้น พลังงานและความถี่ต่ำประมาณ 48 วัตต์ ความถี่ 80 กิโลเฮิร์ตซ์ ทำให้เกิดการยุบตัวของแก๊สแควคิโอจากปรากฏการณ์คาวิเทชัน มีผลให้เซลล์สาหร่ายตกตะกอน

Zhang และคณะ (2006 b) ศึกษาการใช้คลื่นอัลตราซาวด์ในการทำลายกระบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน ในสาธิตารัฐประชาชนจีน โดยมีความเข้มข้นเซลล์สาหร่าย 10^9 เซลล์ต่อลิตร pH 7.6 ปริมาตรตัวอย่างเซลล์สาหร่าย 250 มิลลิลิตร ความถี่ 25 กิโลเฮิร์ตซ์ พลังงานคลื่น 0.32 วัตต์ต่อมิลลิลิตร พบว่าเมื่อให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ผ่านไป 5 นาที

เซลล์สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (*M. aeruginosa*) สูญเสียการลอยตัวและตกตะกอนออกจากน้ำ ตัวอย่าง ทำให้ความเข้มข้นของเซลล์สาหร่ายลดลง 10.8 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับตัวอย่างน้ำที่ไม่มีการให้คลื่นเสียง

การอัลตราซาวด์ยังทำให้ความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์ เอ ลดลง 21.3 เปอร์เซ็นต์ และไฟโคไซยานิน (Phycocyanins) ซึ่งเป็นแอนเทนนา คอมเพล็กซ์ (Antenna complex) เป็นส่วนของกระบวนการสังเคราะห์แสง ของสาหร่ายที่ความยาวคลื่นแสง 470-650 นาโนเมตร ลดลง 43.8 เปอร์เซ็นต์ หลังการอัลตราซาวด์การลดของเซลล์สาหร่ายเกิดจากกระบวนการยุบตัวแตกตัวของคาวิตีชั่นแก๊ส ทำให้เซลล์สาหร่ายตายและยับยั้งแอนเทนนา คอมเพล็กซ์ ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย ทำให้สาหร่ายหยุดการเจริญเติบโต การให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ที่ความเข้มและความถี่ดังกล่าวยังมีประสิทธิภาพในการลดการปล่อยสารพิษไมโครซิสติน (Microcystins) จากสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน เนื่องจากไม่ทำให้เซลล์สาหร่ายแตก

Zhang และคณะ (2009) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน ชนิด *Microcystis aeruginosa* โดยการให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ร่วมกับการตกตะกอนทางเคมี (Coagulation) ใช้สารโพลีอลูมินัม คลอไรด์ (PAC) เป็นสารเคมีช่วยในการตกตะกอนโดยทำการทดลองใช้ M-Solution aeruginosa และตัวอย่างน้ำผิวดินในสถานัฐประชาชนจีน การใช้ อัลตราซาวด์เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการลดปริมาณของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน เมื่อมีการเติมสารเคมีช่วยตกตะกอน (Coagulant) ความเข้มข้น 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายเพียง 35 เปอร์เซ็นต์ เมื่อให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ 5 วินาที ร่วมกับการใช้สารเคมีตกตะกอนทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายเป็น 67 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเพิ่มปริมาณสารตกตะกอนทางเคมีเพิ่มเป็น 3 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับการให้คลื่นเสียง 60 วินาที จะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายเพิ่มขึ้นเป็น 92.5 เปอร์เซ็นต์ โดยช่วงเวลาที่เหมาะสมในการให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ 5 วินาที โดยสาหร่ายจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 1 ถึง 5 วินาที ความเข้มของพลังงาน 47.2 วัตต์ต่อตารางเมตร โดยทำการทดลองเช่นเดียวกับตัวอย่างน้ำผิวดินและสาหร่ายหลายชนิดพบว่า การให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ร่วมกับการตกตะกอนทางเคมี มีประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่าย

Heng และคณะ (2009) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (*Microcystis aeruginosa*) โดยใช้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ร่วมกับการตกตะกอนทางเคมี โดยทำการทดลอง

กับน้ำตัวอย่างจากแม่น้ำ Luan ในสาธารณรัฐประชาชนจีน มีเซลล์สาหร่าย $3,090 \times 10^4$ เซลล์ต่อลิตร ใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ (Ferric chloride) เป็นสารช่วยในการตกตะกอนทางเคมี (Coagulant) ศึกษาในห้องปฏิบัติการโดยใช้อัลตราซาวด์พลังงาน 60 วัตต์ ความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ เป็นเวลา 15 วินาที พบว่าการให้คลื่นเสียงเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดเซลล์สาหร่ายจากที่ใช้สารเคมีตกตะกอนเพียงอย่างเดียวอีก 12.4 เปอร์เซ็นต์ พบว่าที่ความถี่ต่ำ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ พลังงาน 60 วัตต์จะทำให้เซลล์สาหร่ายรวมตัวและตกตะกอนออกจากน้ำตัวอย่าง ในขณะที่ความถี่ 120 กิโลเฮิร์ตซ์ จะให้ผลด้านลบต่อการตกตะกอนเนื่องจากความถี่ดังกล่าวจะทำให้เซลล์สาหร่ายแตก

Joyce และคณะ (2010) ทำการทดลองให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์กับสาหร่าย *Microcystis Aeruginosa* ที่แขวนลอย พบว่าการลดลงของสาหร่ายขึ้นอยู่กับความถี่และความเข้มของพลังงานเสียง ที่ความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ ความเข้ม 0.021 วัตต์ต่อลิตร ปริมาณน้ำตัวอย่าง 200 มิลลิลิตร เวลาการอัลตราซาวด์ 30 นาที ช่วยทำให้เซลล์สาหร่ายรวมตัวและที่ความถี่ 580 กิโลเฮิร์ตซ์ ความเข้ม 0.0490 วัตต์ต่อลิตร เวลา 30 นาที มีประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายที่สูง 47.36 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสม

Srisuksomwong และคณะ (2011) ทำการทดลองให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์กับการบลูมของสาหร่ายในบ่อเลี้ยงปลาธรรมชาติ สาหร่ายที่เด่นที่สุดคือสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินโดย พบร้อยละ 80 ในน้ำตัวอย่าง โดยใช้ความถี่ 29 43 108 200 และ 1000 กิโลเฮิร์ตซ์ ความเข้ม 0.015 วัตต์ต่อลิตร ปริมาณน้ำตัวอย่าง 200 มิลลิลิตร เวลา 30 60 120 240 และ 600 วินาที พบว่าที่ความถี่ 200 กิโลเฮิร์ตซ์ เวลา 30 วินาที มีประสิทธิภาพการบำบัดสาหร่ายที่สูงถึง 93.9 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังพบว่าที่ความถี่ 200 กิโลเฮิร์ตซ์ เวลา 600 วินาที มีประสิทธิภาพในการลดสารพิษ Microcystin จากสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน 80.8 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับความถี่ 108 กิโลเฮิร์ตซ์ ในเวลาที่เท่ากัน มีประสิทธิภาพในการลดกลิ่นเหม็นของสาร Microcystin 72.3 เปอร์เซ็นต์

Wu และคณะ (2011) ศึกษาผลกระทบจากการให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ต่อสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน พบว่าประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับความถี่ ความเข้มพลังงาน และระยะเวลาการให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ คาบเวลาที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดแรงเฉือนทำลายผนังเซลล์และแก๊สวาคิโอภายในเซลล์ ทำให้ยับยั้งการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายเป็นการควบคุมปริมาณเซลล์ พบว่าที่ความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ความเข้ม 0.0466 วัตต์ต่อลิตร ปริมาณน้ำตัวอย่าง 400 มิลลิลิตร

เวลาการให้คลื่นเสียง 30 นาที ลดเซลล์สาหร่ายลดลงเพียง 3.31 เปอร์เซ็นต์ และที่ความถี่ 864 กิโลเฮิรตซ์ความเข้ม 0.0929 วัตต์ต่อลิตร เวลา 30 นาที มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินสูงขึ้นเป็น 61.11 เปอร์เซ็นต์

บทที่ 3

แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale) เพื่อศึกษาการใช้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ร่วมกับการตกตะกอนทางเคมี ทำการทดลองแบบที่ละเท (Batch Reactor) ทดลองใช้อัลตราซาวด์ประเภทอ่าง โดยใช้ความถี่ของคลื่นเสียงอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ ระดับพลังงานที่แตกต่างกันร่วมกับการใช้สารเคมีช่วยรวมตะกอน (Coagulant) ภายใต้ อุณหภูมิห้อง ทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการ อาคารภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายในน้ำ ซึ่งมีขั้นตอนในการทดลอง ดังนี้

1. วิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของน้ำสาหร่ายเลี้ยงในห้องปฏิบัติการ โดยพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นเซลล์สาหร่าย ความเข้มข้นคลอโรฟิลล์ เอ pH อุณหภูมิ
2. วิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายและศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการกำจัดสาหร่ายจากน้ำโดยกระบวนการใช้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ร่วมกับการตกตะกอนทางเคมี ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำ ได้แก่
 - 2.1 การทดลองจะใช้อัลตราซาวด์แบบอ่าง โดยกำหนดความถี่ที่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์
 - 2.2 ให้พลังงานของคลื่นเสียงในระดับที่ต่างกัน คือ 0 60 80 100 120 150 และ 200 วัตต์
 - 2.3 เวลาในการเดินระบบ 8 ค่า คือ 0 5 10 30 วินาที 1 10 30 นาที
 - 2.4 ความเข้มข้นของสารส้ม ($Al_2(SO_4)_3$) 7 ค่า คือ 0 20 30 40 50 70 และ 90 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - 2.5 ความเข้มข้นปูนขาว (CaO) ที่เติม 7 ค่า คือ 0 6.6 9.9 13.2 16.5 23.1 และ 29.7 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - 2.6 อัตราการกวนเร็วผสม 100 รอบต่อนาที
 - 2.7 อัตราการกวนช้าผสม 30 รอบต่อนาที
 - 2.8 ความเข้มข้นเซลล์สาหร่าย 3 ค่า คือ 5×10^5 10^6 และ 10^{10} เซลล์ต่อลิตร
 - 2.9 pH

2.10 ความขุ่นของน้ำจากโรงผลิตน้ำประปา

2.11 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ

ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองที่ 1 ศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของสาหร่ายที่เลี้ยงในห้องปฏิบัติการ และตัวอย่างน้ำจากโรงผลิตน้ำประปา

การทดลองที่ 2 ผลของปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟต (Alum) ร่วมกับการเติมปูนขาว ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายที่เลี้ยงในห้องปฏิบัติการ

การทดลองที่ 3 ศึกษาผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายที่เลี้ยงในห้องปฏิบัติการ

การทดลองที่ 4 ศึกษาระยะเวลาในการให้คลื่นเสียงที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายที่เลี้ยงในห้องปฏิบัติการ

การทดลองที่ 5 ศึกษาประสิทธิภาพการใช้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ที่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ เปรียบเทียบกับการใช้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ร่วมกับการตกตะกอนทางเคมีเพื่อกำจัดสาหร่ายจากน้ำตัวอย่างสาหร่ายที่เลี้ยงในห้องปฏิบัติการ

การทดลองที่ 6 ศึกษาความเข้มข้นของสาหร่ายที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายที่เลี้ยงในห้องปฏิบัติการ

การทดลองที่ 7 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายร่วมกับการตกตะกอนทางเคมีจากน้ำตัวอย่างปนเปื้อนสาหร่ายจากโรงผลิตน้ำประปา

- พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัด ได้แก่ ความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์ เอ pH อุณหภูมิ ความเข้มของแสง ปริมาณสาหร่าย ปริมาณสารเคมีช่วยในการตกตะกอน และความขุ่น การดูดกลืนแสง วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผล

แผนผังขั้นตอนการดำเนินการวิจัย แสดงรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.2 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.2.1 ตัวอย่างน้ำที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1.1 น้ำสาหร่ายเลี้ยงในห้องปฏิบัติการ

น้ำตัวอย่างสาหร่ายที่ใช้ในการวิจัย เป็นสาหร่ายสายพันธุ์

Chlorella vulgaris sp. *Scenedesmus* sp. และสาหร่ายผสม

3.2.1.2 น้ำจากโรงผลิตน้ำประปา

น้ำตัวอย่างที่ปนเปื้อนสาหร่ายจากโรงผลิตน้ำประปา

3.2.2 อาหารเลี้ยงสาหร่าย (ภาคผนวก ก สูตรอาหาร ก -1)

3.2.3 อุปกรณ์และสารเคมี

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ

- 1) อุปกรณ์เพาะเลี้ยงสาหร่าย
 - หลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent Lamp)
 - เครื่องเติมออกซิเจน
 - ถังน้ำขนาด 5 ลิตร
- 2) อุปกรณ์ในการหาสภาวะที่เหมาะสมของปริมาณสารเคมีช่วยตกตะกอนสาหร่าย
 - เครื่องกวนผสม (Jar tests)
- 3) อุปกรณ์ให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ร่วมกับการตกตะกอนทางเคมี
 - อ่างอัลตราซาวด์ (Ultrasonic Bath) ความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์
 - เครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- 4) อุปกรณ์วิเคราะห์ผลการทดลอง
 - เครื่องวัด pH (pH meter)
 - เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง
 - เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
 - กล้องจุลทรรศน์ (Microscope)
 - เทอร์โมคัปเดออร์ (Thermocouple)
 - สไลด์นับเซลล์สาหร่าย (counting chamber)

- เครื่องแก้ว (Laboratory glassware)
- กระดาษกรอง (Filter paper) ยี่ห้อ Whatman รุ่น GF/F 0.7 μm
- เครื่องเขย่าสาร
- เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge)
- เครื่องวัดความขุ่น (Turbidity meter)
- เครื่อง UV/visible spectrophotometer

สารเคมี

- อะลูมิเนียมซัลเฟต ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$) 54-59% Ajax Finechem
- ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ($\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) >99% Ajax Finechem
- ไดโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (K_2HPO_4) >99% Ajax Finechem
- แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) >99% Ajax Finechem
- ไอรอน อีดีทีเอ (Fe EDTA) 14% labchem
- แมกนีเซียมซัลเฟต ($\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$) >99.5% Qrec
- โพแทสเซียมไนเตรต (KNO_3) >99% Ajax Finechem
- แมงกานีสคลอไรด์ ($\text{MnCl}_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$) >99% Ajax Finechem
- คอปเปอร์ซัลเฟต ($\text{CuSO}_4 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$) >99% Qrec
- ซิงค์ซัลเฟต ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$) >99% Ajax Finechem
- แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) >96% Ajax Finechem

3.3 ตัวแปรในการทดลอง

ตัวแปรควบคุม

- ปริมาตรอ่างอัลตราซาวด์
- ปริมาตรน้ำสาหร่ายที่เลี้ยงในห้องปฏิบัติการ 1 ลิตร
- ความถี่คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ 40 กิโลเฮิรตซ์

ตัวแปรอิสระ

- ความเข้มข้นของเซลล์สาหร่าย 5×10^8 10^9 และ 10^{10} เซลล์ต่อลิตร
- ความเข้มข้นของสารส้ม ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) 6 ค่า คือ 0 20 30 40 50 70 และ 90 มิลลิกรัมต่อลิตร

- ความเข้มข้นปูนขาว (CaO) ที่เติม 6 ค่า คือ 0 6.6 9.9 13.2 16.5 23.1 และ 29.7 มิลลิกรัมต่อลิตร
- พลังงานของคลื่นเสียงในระดับที่แตกต่างกัน คือ 0 60 80 100 120 150 และ 200 วัตต์
- เวลาในการเดินระบบ 8 ค่า คือ 0 5 10 30 วินาที 1 10 30 นาที

ตัวแปรตาม

- ปริมาณเซลล์สาหร่ายที่ลดลง
- ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ
- ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย

3.4 พารามิเตอร์

เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ในงานวิจัยแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการตรวจวัดพารามิเตอร์

พารามิเตอร์	เครื่องมือและอุปกรณ์
pH	pH meter
อุณหภูมิ	Thermocouple
ความเข้มข้นเซลล์สาหร่าย	counting chamber
ปริมาณสารเคมีช่วยในการตกตะกอน	Jar test
ปริมาณพลังงาน	Thermocouple
ความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์ เอ	UV/visible spectrophotometer
ความขุ่น	Turbidity meter
ปริมาณสาหร่ายจากน้ำดิบ	Dry cell

3.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.5.1 การเตรียมน้ำตัวอย่างสาหร่ายที่เลี้ยงในห้องปฏิบัติการ

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

รวดเร็ว (Logarithmic pharse) ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สาหร่ายในช่วงเวลาดังกล่าวมาใช้ในการทดลอง

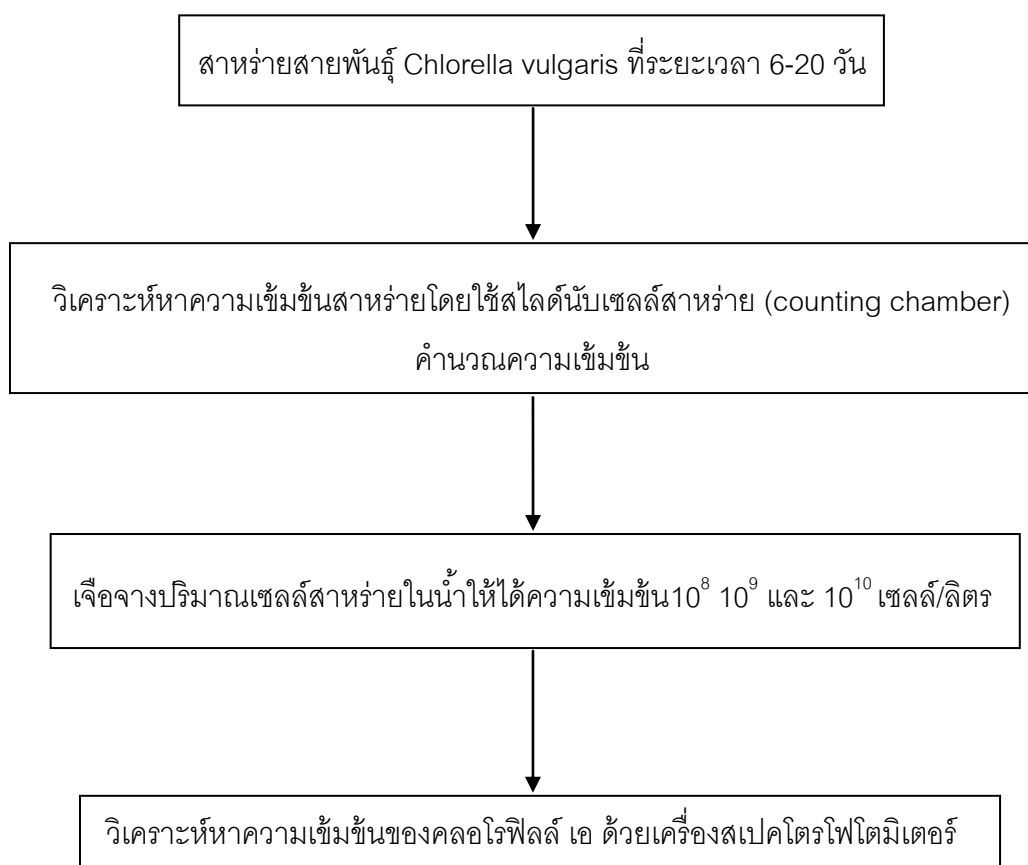
2) นำน้ำสาหร่ายที่เลี้ยงในห้องปฏิบัติการ ในช่วงเวลา 6-20 วัน มาวิเคราะห์หาความเข้มข้นเซลล์สาหร่ายใช้สไลด์นับเซลล์สาหร่าย (counting chamber) โดยวิธีการนับเซลล์สาหร่ายและคำนวณความเข้มข้นสาหร่าย

3) เจือจางปริมาณเซลล์สาหร่ายในน้ำให้ได้ความเข้มข้น 10^8 10^9 และ 10^{10} เซลล์/ลิตร

4) ทำการวัดอุณหภูมิ เริ่มต้น

5) ทำการวัด pH เริ่มต้น

4) นำน้ำสาหร่ายที่เลี้ยงในห้องปฏิบัติการ จากการเพาะเลี้ยงในช่วงเวลา 6-20 วัน มาวิเคราะห์หาความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์ เอ ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างน้ำสาหร่ายที่เลี้ยงในห้องปฏิบัติการ ดังรูปที่ 3.2

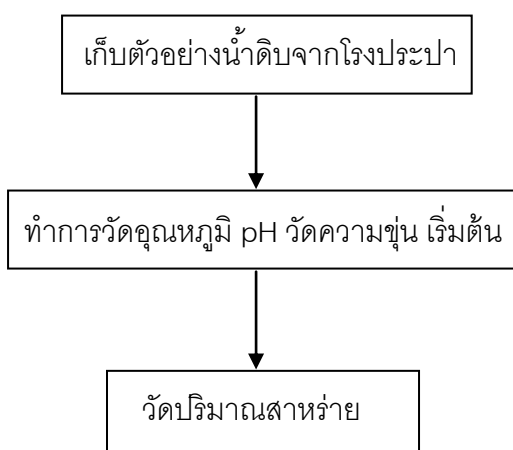


รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมน้ำตัวอย่างสาหร่ายที่เลี้ยงในห้องปฏิบัติการ

3.5.2 วิเคราะห์น้ำตัวอย่างปนเปื้อนเซลล์สาหร่ายจากโรงประปา

- 1) ทำการวัดอุณหภูมิ เริ่มต้น
- 2) ทำการวัดpH เริ่มต้น
- 3) วัดความขุ่น
- 4) วัดปริมาณสาหร่าย

ขั้นตอนการวิเคราะห์น้ำตัวอย่างปนเปื้อนเซลล์สาหร่ายจากโรงประปาดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์น้ำตัวอย่างปนเปื้อนเซลล์สาหร่ายจากโรงประปา

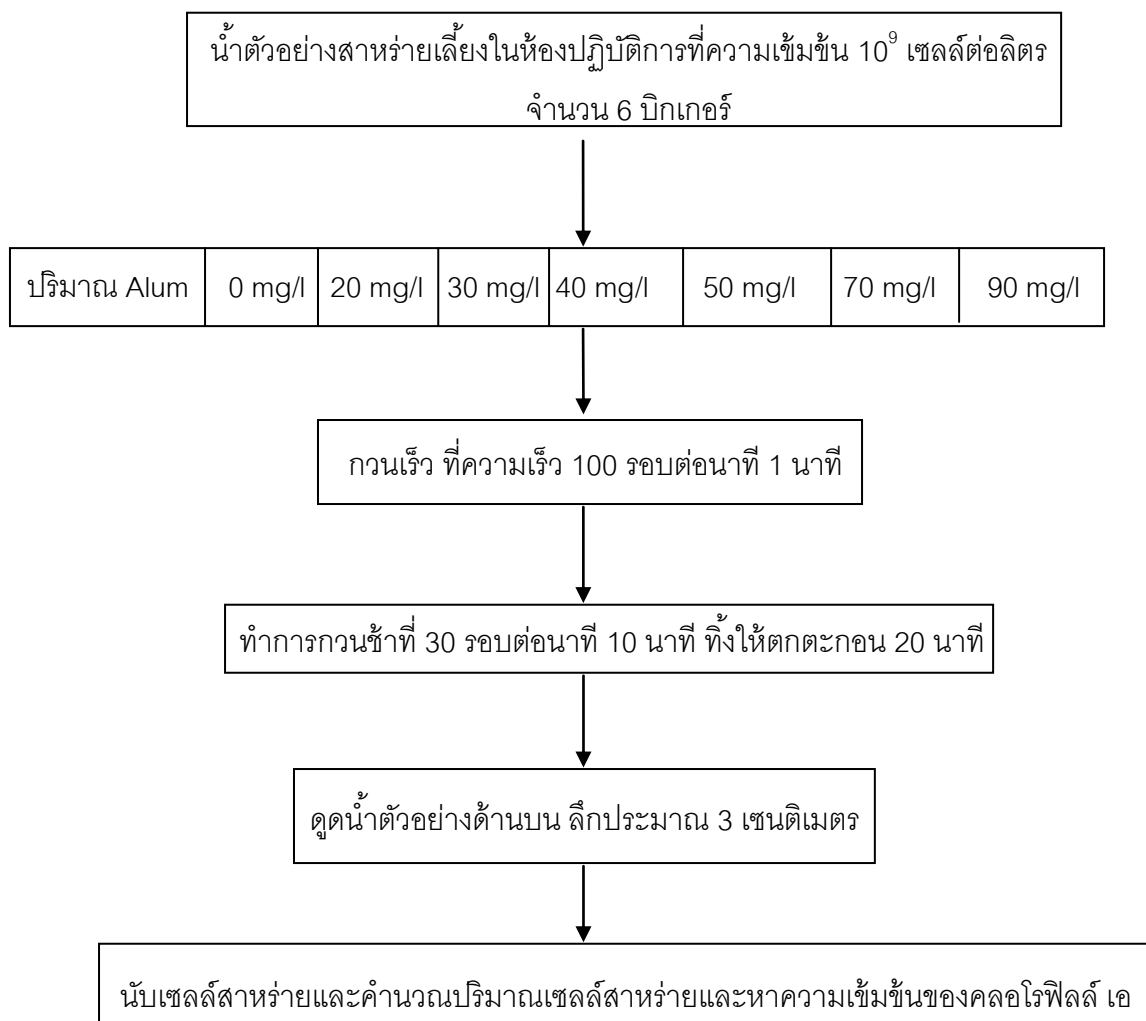
3.5.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

3.5.3.1 ผลของปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟต (Alum) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายเลี้ยงในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมในการกำจัดสาหร่ายออกจากน้ำ

วิธีการทดลอง

1. เตรียมน้ำตัวอย่างสาหร่าย ที่ความเข้มข้น 10^9 เซลล์ต่อลิตร
2. เติม Alum ที่ความเข้มข้นต่างกัน เริ่มต้นที่ 0 20 30 40 50 70 และ 90 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. กวนเร็วโดยใช้เครื่องกวนผสม (Jar test) กวนเร็วที่ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที่ นาน 1 นาที
4. กวนช้าโดยผสมที่ความเร็วรอบ 30 รอบ/นาที่ นาน 10 นาที
5. ทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 20 นาที

6. เก็บน้ำตัวอย่างด้านบนลึกประมาณ 3 เซนติเมตรจากผิวน้ำ 10 มิลลิลิตร มาวิเคราะห์ความเข้มข้นเซลล์สาหร่าย
 7. วิเคราะห์หาความปริมาณความเข้มข้นเซลล์สาหร่ายโดยใช้สไลด์นับเซลล์สาหร่าย และคำนวณปริมาณเซลล์สาหร่าย
 8. วิเคราะห์หาความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์ เอ
 9. นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปผล เพื่อหาปริมาณ Alum ที่เหมาะสมในการกำจัดสาหร่ายและนำไปใช้ในการทดลองต่อไป
- ขั้นตอนการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.4



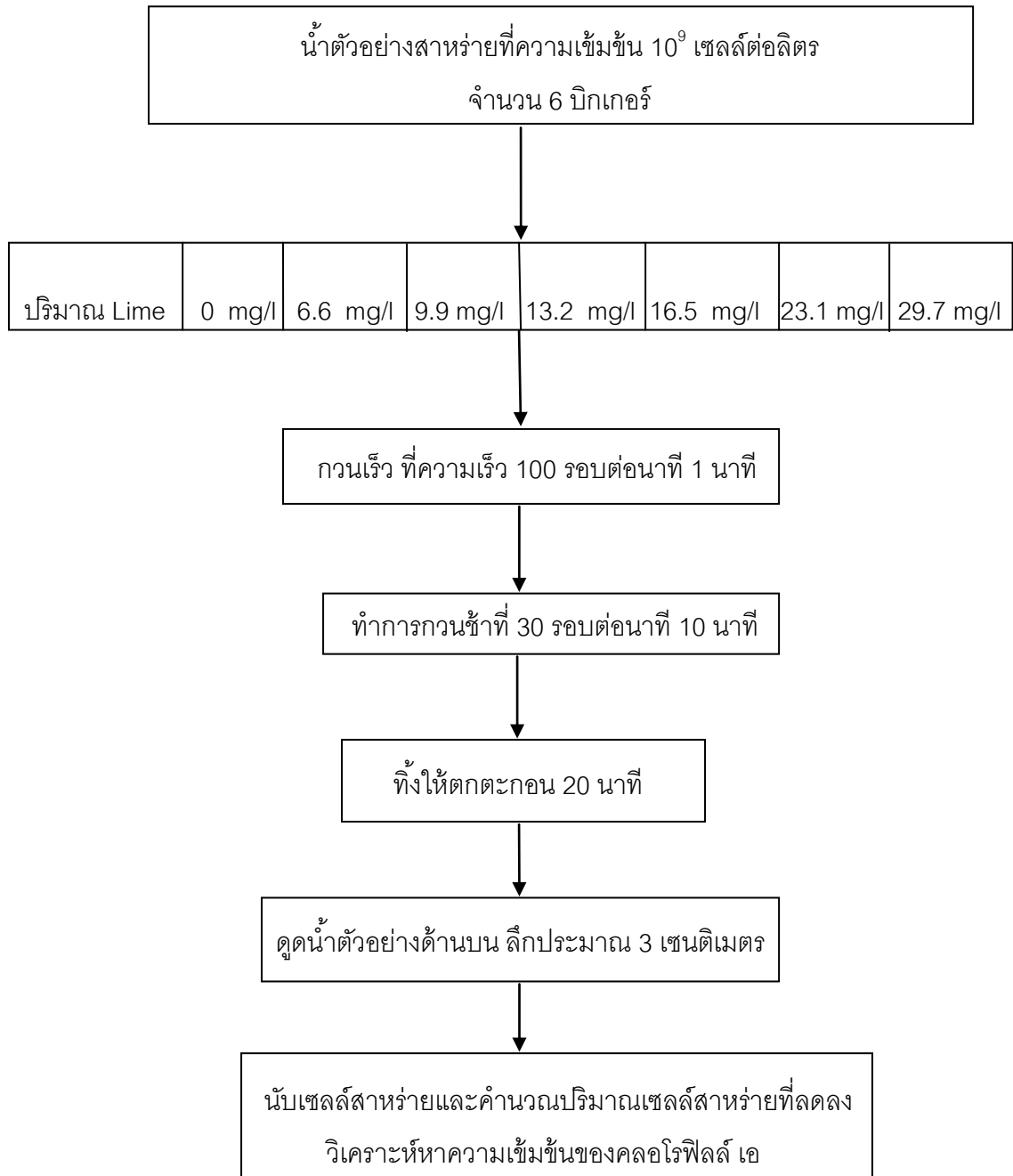
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการทดลองหาปริมาณ Alum
ที่เหมาะสมในการกำจัดสาหร่ายจากน้ำ สาหร่ายที่เลี้ยงในห้องปฏิบัติการ

3.5.3.2 ผลของปริมาณปูนขาว (lime) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายที่เลี้ยงในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมในการกำจัด

วิธีการทดลอง

1. เตรียมน้ำตัวอย่างสาหร่าย ที่ความเข้มข้น 10^9 เซลล์ต่อลิตร
2. เติม Alum ปริมาณที่เหมาะสม
3. ความเข้มข้น Lime ที่เติม 6 ค่า คือ 0 6.6 9.9 13.2 16.5 23.1 และ 29.7 มิลลิกรัมต่อลิตร
4. กวนเร็วโดยใช้เครื่องกวนผสม (Jar test) กวนเร็วที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที นาน 1 นาที
5. กวนช้าโดยผสมที่ความเร็วรอบ 30 รอบต่อนาที นาน 10 นาที
6. ทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 20 นาที
7. เก็บน้ำตัวอย่างด้านบนลึกประมาณ 3 เซนติเมตรจากผิวน้ำ 10 มิลลิลิตร มาวิเคราะห์ความเข้มข้นเซลล์สาหร่าย
8. วิเคราะห์หาความปริมาณความเข้มข้นเซลล์สาหร่ายโดยใช้สไลด์นับเซลล์สาหร่าย และคำนวณปริมาณเซลล์สาหร่าย
9. วิเคราะห์หาความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์ เอ
10. นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปผล เพื่อหาปริมาณ Lime ที่เหมาะสมในการกำจัดสาหร่ายและนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

ขั้นตอนการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.5

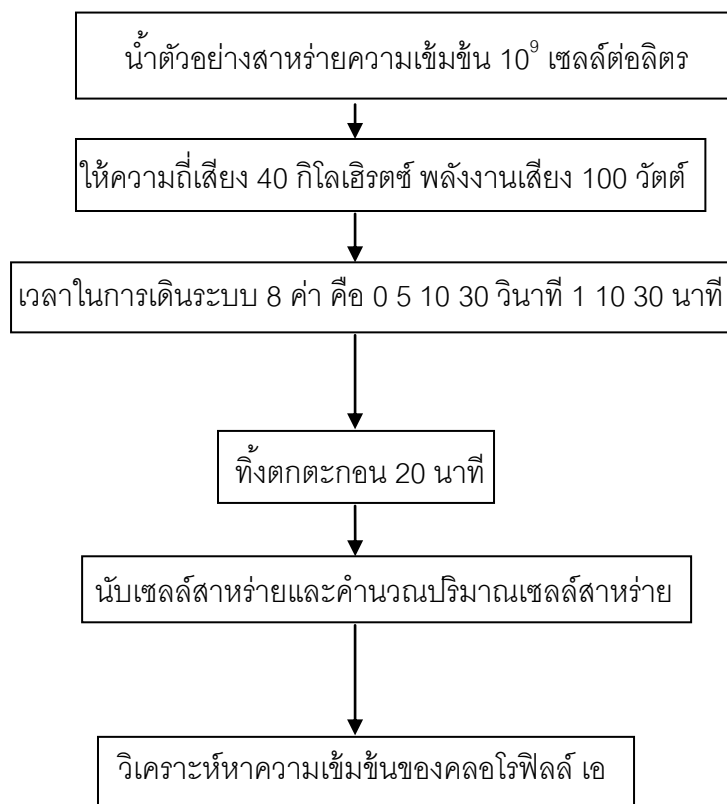


รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการทดลองหาปริมาณ lime ที่เหมาะสมในการกำจัดสาหร่ายจากน้ำ
สาหร่ายที่เลี้ยงในห้องปฏิบัติการ

3.5.3.3 ศึกษาผลของระยะเวลาการให้คลื่นเสียงที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายที่เลี้ยงในห้องปฏิบัติการ ขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.6

วิธีการทดลอง

1. นำน้ำตัวอย่างสาหร่ายความเข้มข้น 10^9 เซลล์ต่อลิตร
2. ใส่ตัวอย่างลงในอ่างอัลตราซาวด์
3. ให้ความถี่เสียง 40 กิโลเฮิร์ตซ์ พลังงานเสียง 100 วัตต์
4. เวลาในการเดินระบบ 7 ค่า คือ 0 5 10 30 วินาที 1 10 30 นาที
5. ทิ้งตกตะกอน 20 นาที
6. นำน้ำตัวอย่างสาหร่ายมาวิเคราะห์หาความปริมาณความเข้มข้นเซลล์สาหร่ายโดยใช้สไลด์นับเซลล์สาหร่าย และคำนวณปริมาณเซลล์สาหร่าย
7. นำน้ำตัวอย่างสาหร่ายสังเคราะห์วิเคราะห์หาความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์ เอ

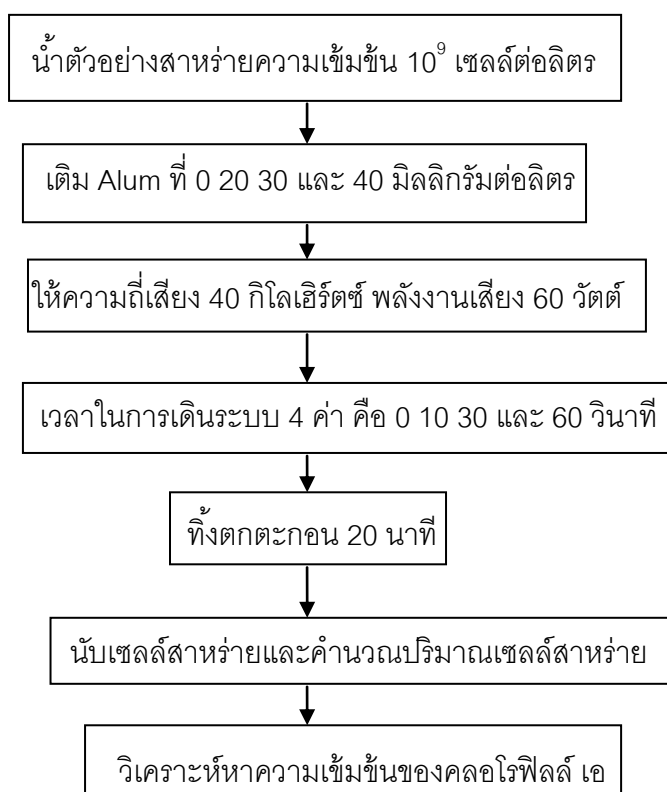


รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการศึกษาผลของระยะเวลาที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายที่เลี้ยงในห้องปฏิบัติการ

3.5.3.4 ศึกษาผลของระยะเวลา โดยเติม Alum และปูนขาวที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายที่เลี้ยงในห้องปฏิบัติการ ขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.7

วิธีการทดลอง

1. นำน้ำตัวอย่างสาหร่ายความเข้มข้น 10^9 เซลล์ต่อลิตร
2. ใส่ตัวอย่างลงในอ่างอัลตราซาวด์
3. เติมปริมาณ Alum ที่ 0 20 30 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร
4. ให้ความถี่เสียง 40 กิโลเฮิร์ตซ์ พลังงานเสียง 60 วัตต์
5. เวลาในการเดินระบบ 4 ค่า คือ 0 10 30 และ 60 วินาที
6. ทิ้งตกตะกอน 20 นาที
7. นำน้ำตัวอย่างสาหร่ายสังเคราะห์มาวิเคราะห์หาความปริมาณความเข้มข้นเซลล์สาหร่ายโดยใช้สไลด์นับเซลล์สาหร่าย และคำนวณปริมาณเซลล์สาหร่าย
8. นำน้ำตัวอย่างสาหร่ายสังเคราะห์วิเคราะห์หาความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์ เอ

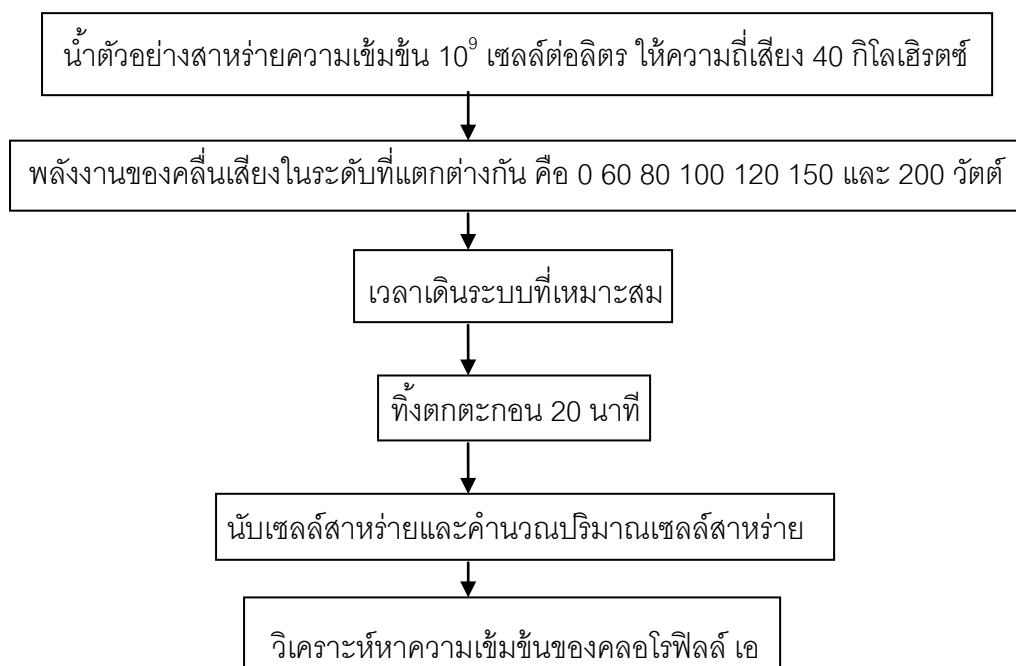


รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการศึกษาผลของระยะเวลาโดยเติม Alum ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายที่เลี้ยงในห้องปฏิบัติการ

3.5.3.5 ศึกษาผลของพลังงานเสียงที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายที่เลี้ยงในห้องปฏิบัติการ ขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.8

วิธีการทดลอง

1. นำน้ำตัวอย่างสาหร่ายความเข้มข้น 10^9 เซลล์ต่อลิตร
2. ใส่ตัวอย่างลงในอ่างอัลตราซาวด์
3. ให้ความถี่เสียง 40 กิโลเฮิรตซ์
4. ให้พลังงานของคลื่นเสียงในระดับที่แตกต่างกัน คือ 0 60 80 100 120 150 และ 200 วัตต์
5. เวลาในการเดินระบบที่เหมาะสมจากการทดลองเรื่องระยะเวลา
6. ทิ้งตกตะกอน 20 นาที
7. นำน้ำตัวอย่างสาหร่ายสังเคราะห์มาวิเคราะห์หาความปริมาณความเข้มข้นเซลล์สาหร่ายโดยใช้สไลด์นับเซลล์สาหร่าย และคำนวณปริมาณเซลล์สาหร่ายที่ลดลง
8. นำน้ำตัวอย่างสาหร่ายสังเคราะห์วิเคราะห์หาความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์ เอ ที่ลดลง

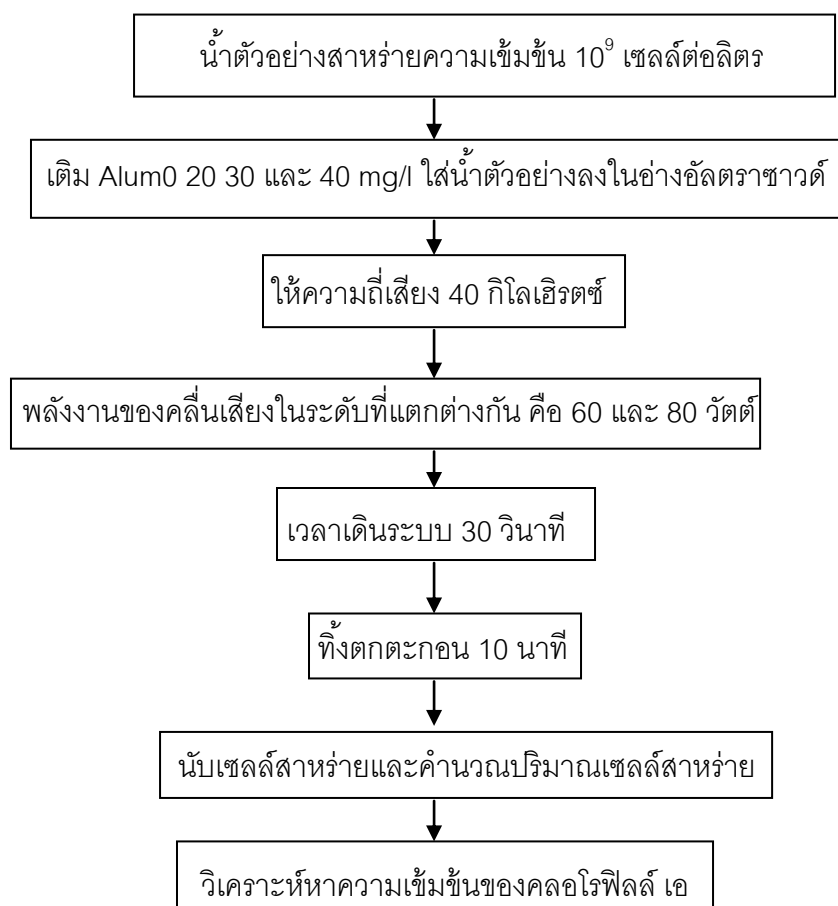


รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการศึกษาผลของพลังงานที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายที่เลี้ยงในห้องปฏิบัติการ

3.5.3.6 ศึกษาผลของพลังงานเสียงโดยเติม Alum ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด สหรัยจากน้ำสหรัยที่เลี้ยงในห้องปฏิบัติการ ขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.9

วิธีการทดลอง

1. นำน้ำตัวอย่างสหรัยความเข้มข้น 10^9 เซลล์ต่อลิตร
2. เติมปริมาณ Alum 0 20 30 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. ใส่น้ำตัวอย่างลงในอ่างอัลตราซาวด์ ให้ความถี่เสียง 40 กิโลเฮิร์ตซ์
4. ให้พลังงานของคลื่นเสียงในระดับที่แตกต่างกัน คือ 60 และ 80 วัตต์
5. เวลาในการเดินระบบ 30 วินาที
6. ทิ้งตกตะกอน 20 นาที
7. วิเคราะห์หาความปริมาณความเข้มข้นเซลล์สหรัยโดยใช้สไลด์นับเซลล์ สหรัย และคำนวณปริมาณเซลล์สหรัย

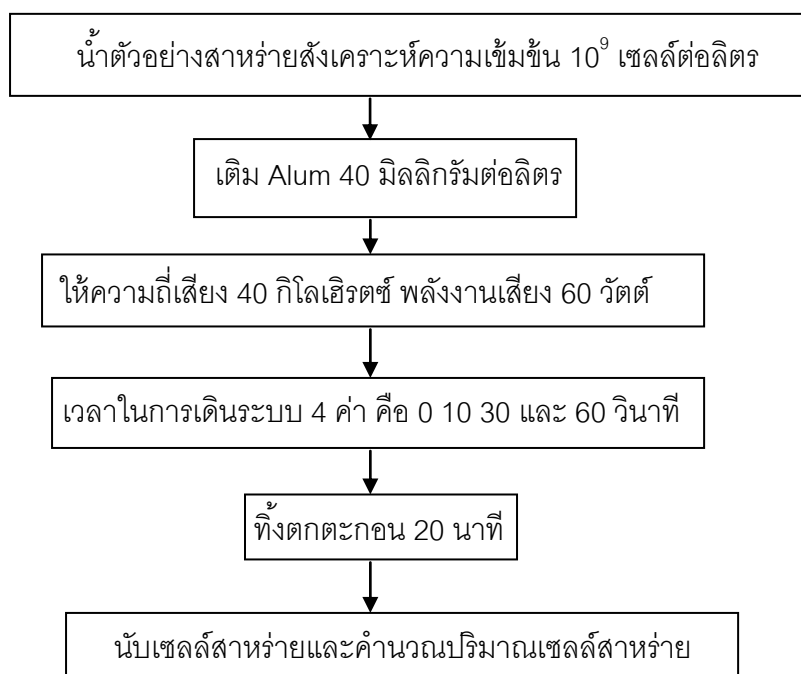


รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการศึกษาค้นคว้าผลของพลังงานโดยเติม Alum ที่มีผลต่อ ประสิทธิภาพการกำจัดสหรัยจากน้ำสหรัยสังเคราะห์

3.5.3.7 ศึกษาผลของระยะเวลา ใช้พลังงานเสียงที่เหมาะสมโดยเติม Alum ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายที่เลี้ยงในห้องปฏิบัติการ ขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.10

วิธีการทดลอง

1. นำน้ำตัวอย่างสาหร่ายความเข้มข้น 10^9 เซลล์ต่อลิตร
2. ใส่น้ำตัวอย่างลงในอ่างอัลตราซาวด์ให้ความถี่เสียง 40 กิโลเฮิรตซ์
3. เติมปริมาณ Alum 40 มิลลิกรัมต่อลิตร
4. ให้พลังงานของคลื่นเสียง 60 วัตต์
5. เวลาในการเดินระบบ 4 ค่า คือ 0 10 30 และ 60 วินาที
6. ทิ้งตกตะกอน 20 นาที
7. นำน้ำตัวอย่างสาหร่ายสังเคราะห์มาวิเคราะห์หาความปริมาณความเข้มข้นเซลล์สาหร่ายโดยใช้สไลด์นับเซลล์สาหร่าย และคำนวณปริมาณเซลล์สาหร่าย

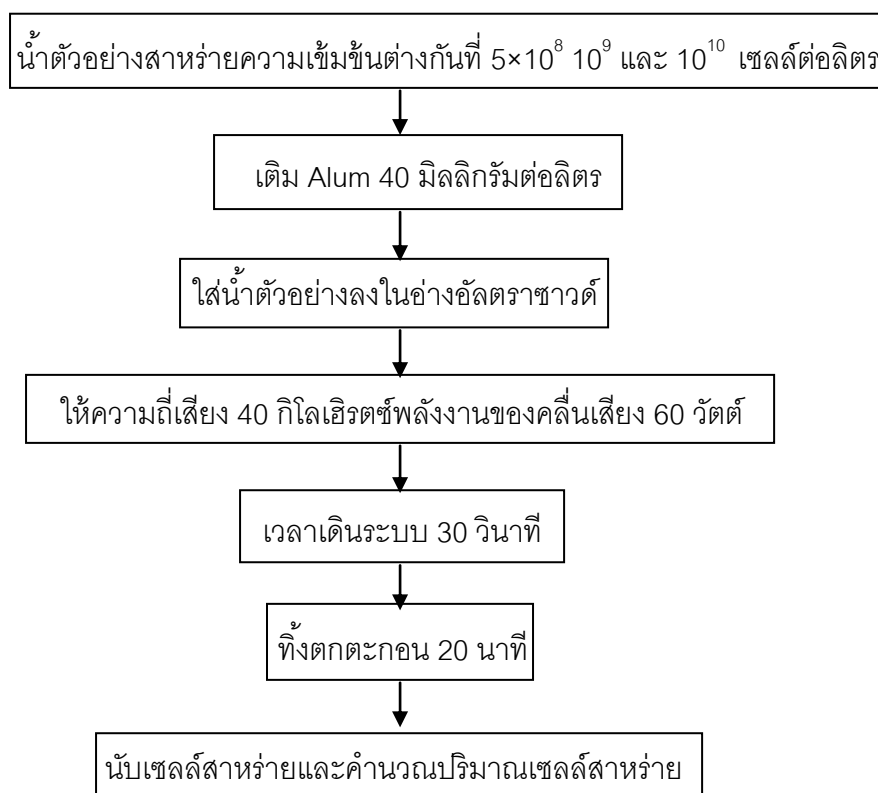


รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการศึกษาผลของระยะเวลา ใช้พลังงานที่เหมาะสมโดยเติม Alum

3.5.3.8 ศึกษาความเข้มข้นของสาหร่ายที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายเลี้ยงในห้องปฏิบัติการ ดังรูปที่ 3.11

วิธีการทดลอง

1. นำน้ำตัวอย่างสาหร่ายสังเคราะห์ความเข้มข้นต่างกันที่ 5×10^8 10^9 และ 10^{10} เซลล์ต่อลิตรใส่น้ำตัวอย่างลงในอ่างอัลตราซาวด์ ความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์
2. เติม Alum 40 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. ให้พลังงานของคลื่นเสียง 60 วัตต์
4. เวลาในการเดินระบบ 30 วินาที
5. ทิ้งตกตะกอน 20 นาที
6. นำน้ำตัวอย่างสาหร่ายสังเคราะห์มาวิเคราะห์หาความปริมาณความเข้มข้นเซลล์สาหร่ายโดยใช้สไลด์นับเซลล์สาหร่าย และคำนวณปริมาณเซลล์สาหร่าย
7. นำน้ำตัวอย่างสาหร่ายสังเคราะห์วิเคราะห์หาความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์ เอ



รูปที่ 3.11 ขั้นตอนการศึกษาผลของความเข้มข้นเซลล์สาหร่ายต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายเลี้ยงในห้องปฏิบัติการ

3.5.3.9 ทำการทดลองตกตะกอนเซลล์สาหร่าย 3 แบบการทดลอง โดยทำการเก็บตัวอย่างเทียบกับเวลา

1) การใช้คลื่นอัลตราซาวด์เพียงอย่างเดียว

วิธีการทดลอง

1. นำน้ำตัวอย่างสาหร่ายสังเคราะห์ความเข้มข้น 10^9 เซลล์ลิตร
2. ใส่น้ำตัวอย่างลงในอ่างอัลตราซาวด์
3. ให้ความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ พลังงานเสียง 60 วัตต์
4. ทิ้งให้ตกตะกอน 20 นาที เก็บตัวอย่างทุก 5 นาที
5. นับเซลล์สาหร่ายและคำนวณปริมาณเซลล์สาหร่าย

2) การใช้ Alum ในการตกตะกอน

วิธีการทดลอง

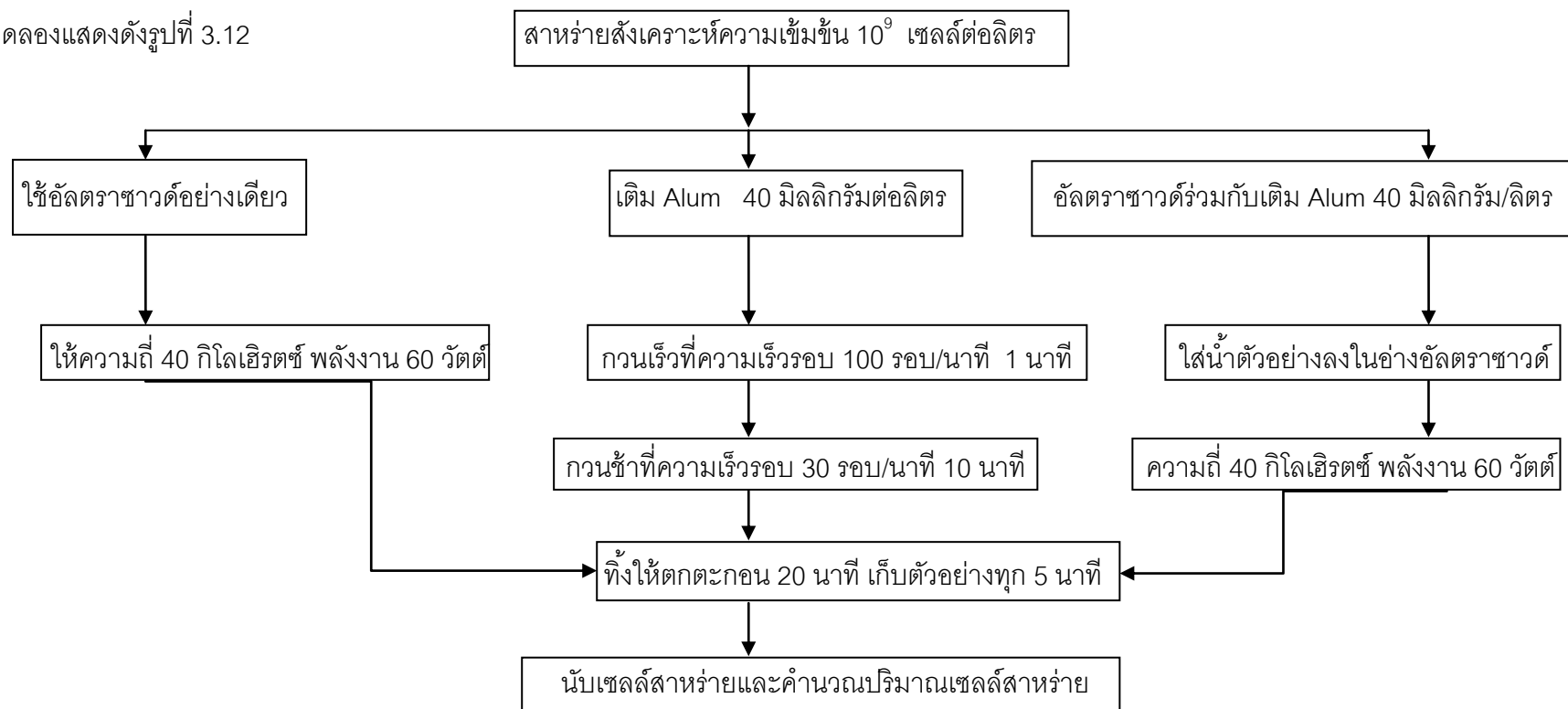
1. นำน้ำตัวอย่างสาหร่ายสังเคราะห์ความเข้มข้น 10^9 เซลล์ลิตร
2. เติมปริมาณ Alum 40 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. กวนเร็วที่ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที นาน 1 นาที
4. กวนช้าที่ความเร็วรอบ 30 รอบ/นาที นาน 10 นาที
5. ทิ้งให้ตกตะกอน 20 นาที เก็บตัวอย่างทุก 5 นาที
6. นับเซลล์สาหร่ายและคำนวณปริมาณเซลล์สาหร่าย

3) การใช้คลื่นอัลตราซาวด์ ร่วมกับ Alum ในการตกตะกอนสาหร่าย

วิธีการทดลอง

1. นำน้ำตัวอย่างสาหร่ายสังเคราะห์ความเข้มข้น 10^9 เซลล์ต่อลิตร
2. ใส่น้ำตัวอย่างลงในอ่างอัลตราซาวด์
3. เติมปริมาณ Alum 40 มิลลิกรัมต่อลิตร
4. ให้ความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ พลังงานเสียง 60 วัตต์
5. ทิ้งให้ตกตะกอน 20 นาที เก็บตัวอย่างทุก 5 นาที
6. นับเซลล์สาหร่ายและคำนวณปริมาณเซลล์สาหร่าย

การทดลองแสดงดังรูปที่ 3.12

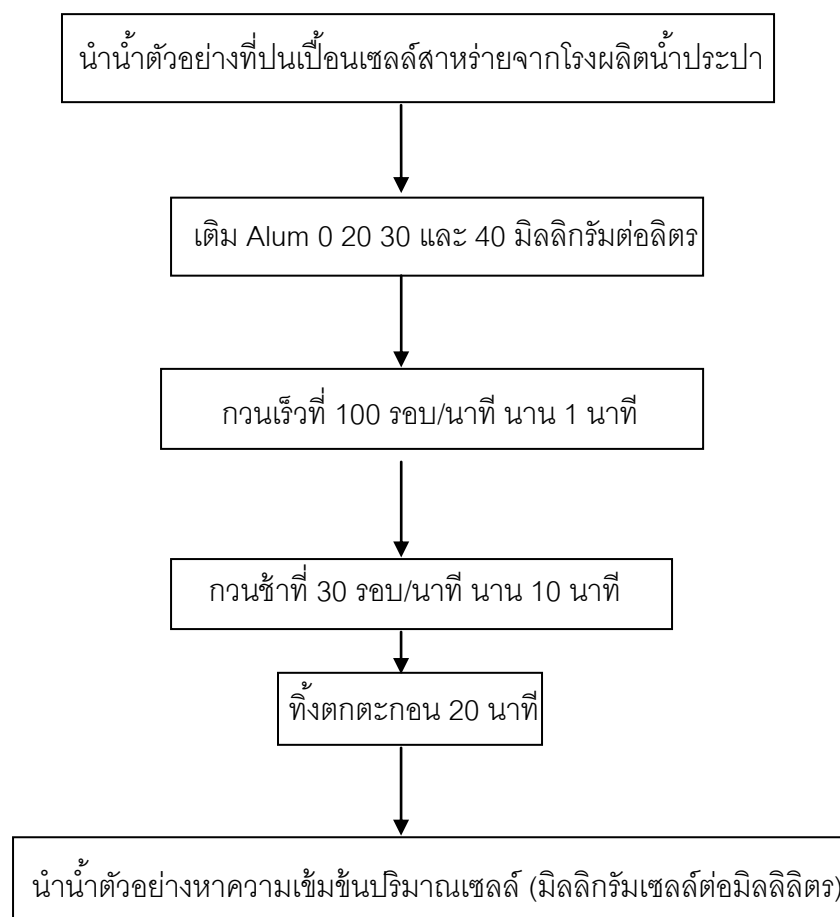


รูปที่ 3.12 การทดลองตกตะกอนเซลล์สำหรับ 3 แบบโดยทำการเก็บตัวอย่างเทียบกับเวลา

3.5.3.10 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยการตกตะกอนทางเคมีจากน้ำตัวอย่างปนเปื้อนสาหร่ายจากโรงผลิตน้ำประปา ดังรูปที่ 3.13

วิธีการทดลอง

1. นำน้ำตัวอย่างที่ปนเปื้อนเซลล์สาหร่ายจากโรงผลิตน้ำประปา
2. เติม Alum 0 20 30 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. กวนเร็วที่ 100 รอบ/นาที นาน 1 นาที
4. กวนช้าที่ 30 รอบ/นาที นาน 10 นาที
5. ทิ้งตกตะกอน 20 นาที
6. นำน้ำตัวอย่างหาความเข้มข้นปริมาณเซลล์ (มิลลิกรัมเซลล์ต่อมิลลิลิตร)

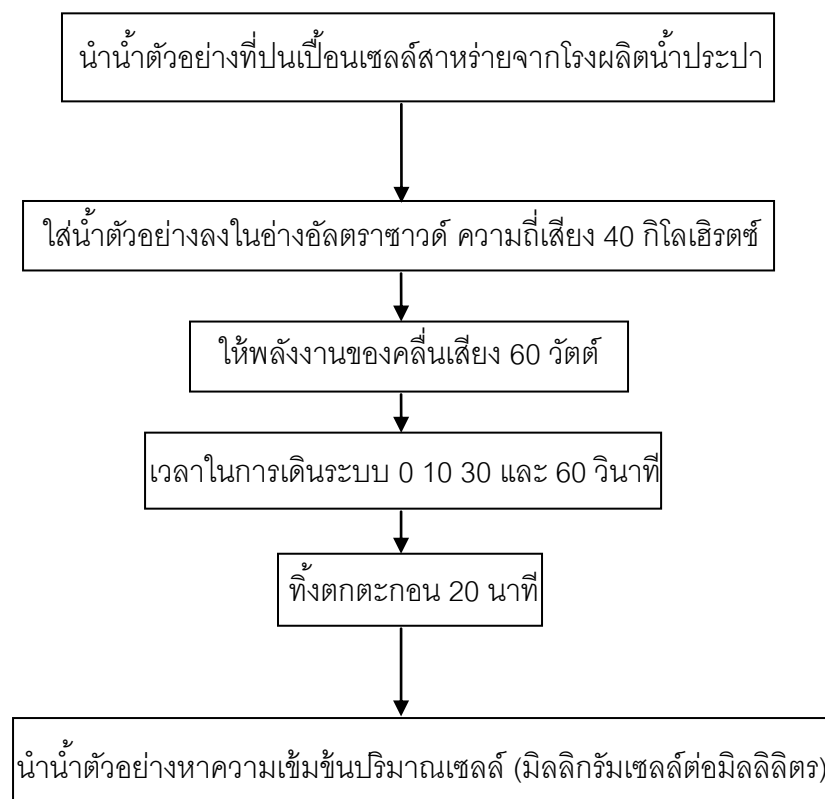


รูปที่ 3.13 ขั้นตอนการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยการตกตะกอนทางเคมีจากน้ำตัวอย่างปนเปื้อนสาหร่ายจากโรงผลิตน้ำประปา

3.5.3.11 ศึกษาประสิทธิภาพของระยะเวลาในการใช้คลื่นอัลตราซาวด์ เพื่อกำจัดสาหร่ายจากน้ำตัวอย่างปนเปื้อนสาหร่ายจากโรงผลิตน้ำประปา ดังรูปที่ 3.14

วิธีการทดลอง

1. นำน้ำตัวอย่างที่ปนเปื้อนเซลล์สาหร่ายจากโรงผลิตน้ำประปา
2. ใส่ตัวอย่างลงในอ่างอัลตราซาวด์
3. ให้ความถี่เสียง 40 กิโลเฮิร์ตซ์
4. ให้พลังงานของคลื่นเสียง 60 วัตต์
5. เวลาในการเดินระบบ 0 10 30 และ 60 วินาที
6. ทิ้งตกตะกอน 20 นาที
7. นำน้ำตัวอย่างหาความเข้มข้นปริมาณเซลล์ (มิลลิกรัมเซลล์ต่อมิลลิลิตร)

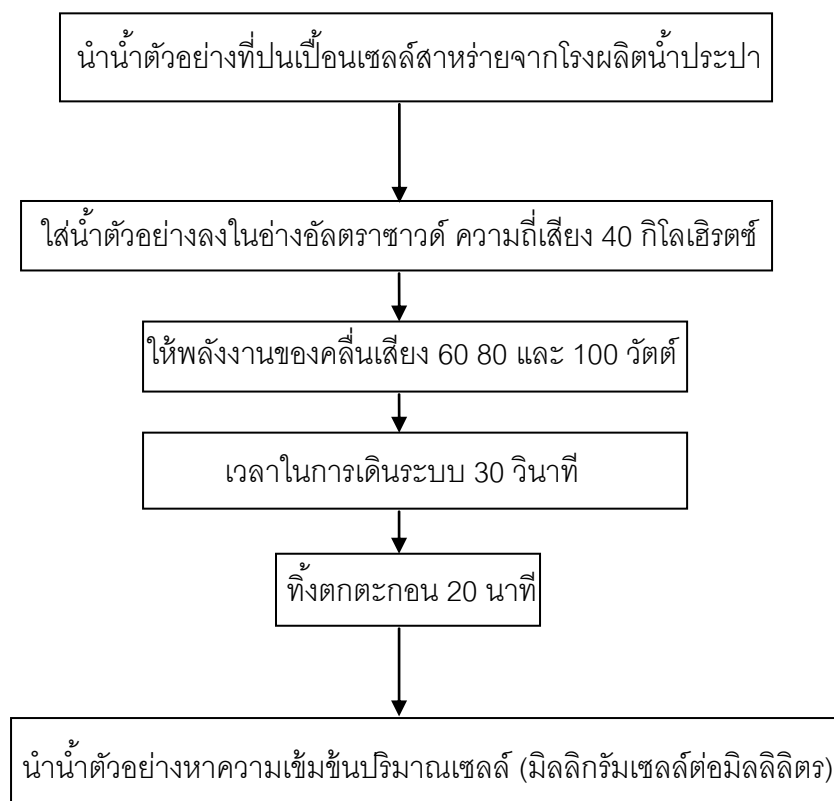


รูปที่ 3.14 ขั้นตอนการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยใช้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ร่วมกับการตกตะกอนทางเคมีจากน้ำตัวอย่างปนเปื้อนสาหร่ายจากโรงผลิตน้ำประปา

3.5.3.12 ศึกษาประสิทธิภาพของพลังงานในการใช้คลื่นอัลตราซาวด์ เพื่อกำจัดสาหร่ายจากน้ำตัวอย่างปนเปื้อนสาหร่ายจากโรงผลิตน้ำประปา ดังรูปที่ 3.15

วิธีการทดลอง

1. นำน้ำตัวอย่างที่ปนเปื้อนเซลล์สาหร่ายจากโรงผลิตน้ำประปา
2. ใส่ตัวอย่างลงในอ่างอัลตราซาวด์
3. ให้ความถี่เสียง 40 กิโลเฮิร์ตซ์
4. ให้พลังงานของคลื่นเสียง 60 80 และ 100 วัตต์
5. เวลาในการเดินระบบ 30 วินาที
6. ทิ้งตกตะกอน 20 นาที
7. นำน้ำตัวอย่างหาความเข้มข้นปริมาณเซลล์ (มิลลิกรัมเซลล์ต่อมิลลิลิตร)

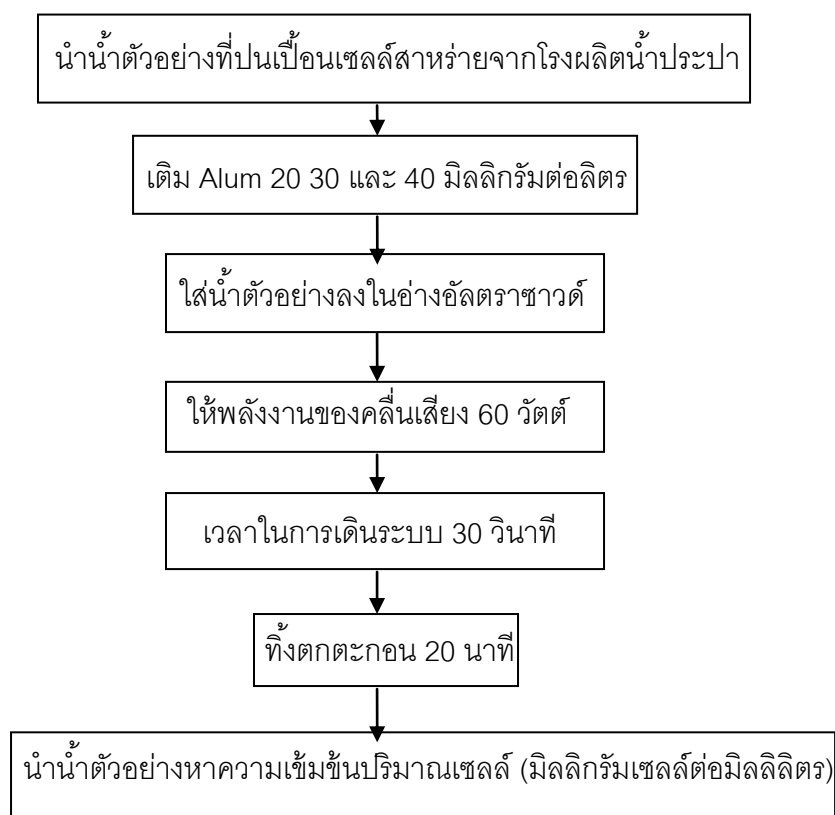


รูปที่ 3.15 ขั้นตอนการศึกษาประสิทธิภาพของพลังงานต่อการกำจัดสาหร่ายโดยใช้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ จากน้ำตัวอย่างปนเปื้อนสาหร่ายจากโรงผลิตน้ำประปา

3.5.3.13 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยใช้คลื่นอัลตราซาวด์ร่วมกับการตกตะกอนทางเคมีจากน้ำตัวอย่างปนเปื้อนสาหร่ายจากโรงผลิตน้ำประปา ดังรูปที่ 3.16

วิธีการทดลอง

1. นำน้ำตัวอย่างที่ปนเปื้อนเซลล์สาหร่ายจากโรงผลิตน้ำประปา
2. เติม Alum ที่ 20 30 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. ใส่น้ำตัวอย่างลงในอ่างอัลตราซาวด์
4. ให้ความถี่เสียง 40 กิโลเฮิรตซ์
5. ให้พลังงานของคลื่นเสียง 60 วัตต์
6. เวลาในการเดินระบบ 30 วินาที
7. ทิ้งตกตะกอน 20 นาที
8. นำน้ำตัวอย่างหาความเข้มข้นปริมาณเซลล์ (มิลลิกรัมเซลล์ต่อมิลลิลิตร)



รูปที่ 3.16 ขั้นตอนการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยใช้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ร่วมกับการตกตะกอนทางเคมี จากน้ำตัวอย่างปนเปื้อนสาหร่ายจากโรงผลิตน้ำประปา

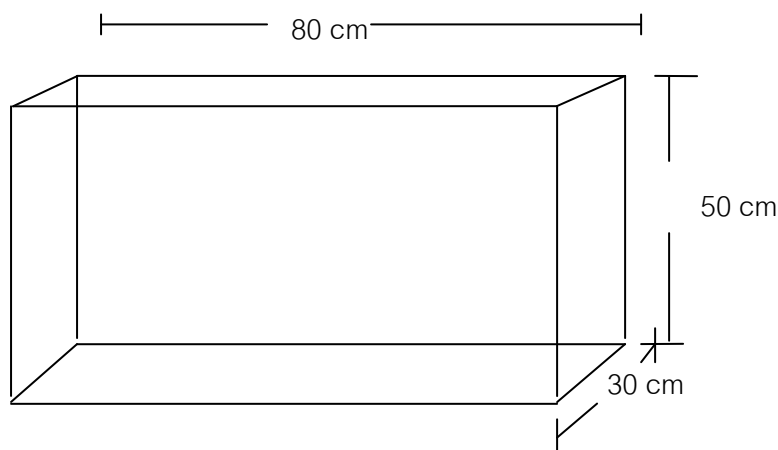
3.5.3.14 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายในอ่างอัลตราชาวด์ขนาด 30×80×50

เซนติเมตร

ดังรูปที่ 3.17

วิธีการทดลอง

1. นำสาหร่ายที่เลี้ยงในห้องปฏิบัติการ ความเข้มข้น 10^9 เซลล์ต่อลิตร
2. ใส่น้ำตัวอย่างลงในอ่างอัลตราชาวด์ 30 ลิตร
3. ใช้คลื่นเสียงอัลตราชาวด์ความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ พลังงานที่ 100 วัตต์
4. เวลาในการเดินระบบที่ 0 5 10 15 20 25 และ 30 นาที
5. ตรวจสอบนับเซลล์สาหร่าย



รูปที่ 3.17 อ่างอัลตราชาวด์ ขนาด 120 ลิตร

3.5.3.15 ศึกษาการเจริญเติบโตของเซลล์สาหร่ายที่ผ่านการอัลตราชาวด์ในอ่างอัลตราชาวด์ขนาด 30×80×50 เซนติเมตร

วิธีการทดลอง

2. นำเซลล์สาหร่ายที่ผ่านการอัลตราชาวด์จากหัวข้อ 3.5.3.14 จำนวน 1 ลิตร
3. เซลล์สาหร่ายเริ่มต้น 5×10^5 เซลล์ต่อมิลลิลิตร
4. ใสลงในถังเลี้ยงสาหร่ายที่เติมอาหารเลี้ยงสาหร่าย ปริมาตร 3 ลิตร
5. เลี้ยงสาหร่าย 7 วัน นับเซลล์สาหร่าย เปรียบเทียบกับสาหร่ายที่ไม่ผ่านการอัลตราชาวด์

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

4.1 วิเคราะห์พลังงานของคลื่นเสียงอัลตราซาวด์

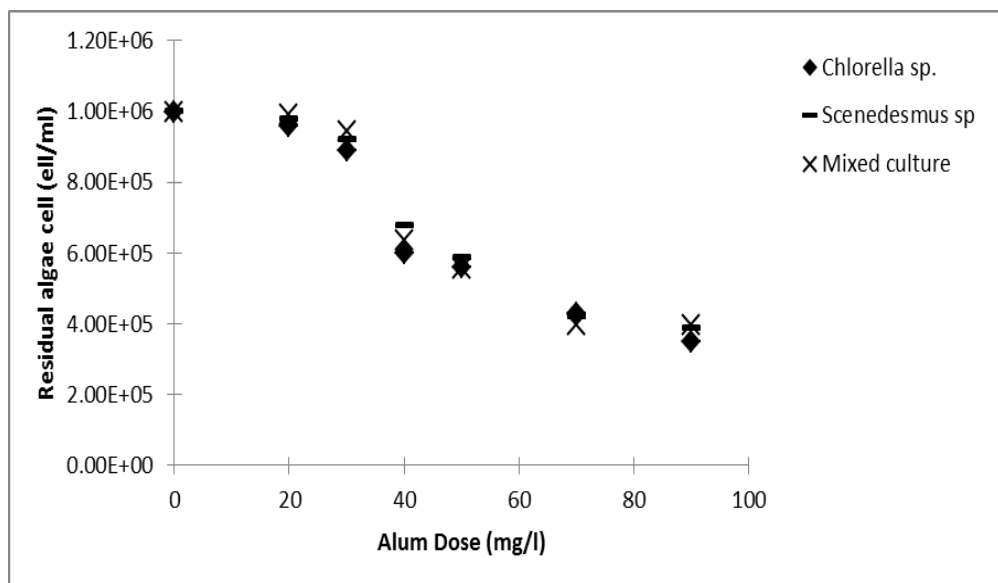
ผลของระดับพลังงานของคลื่นเสียงอัลตราซาวด์ แสดงดังตารางที่ 4.1 จากตารางแสดงให้เห็นว่าเมื่อให้ระดับพลังงานของคลื่นเสียงอัลตราซาวด์เข้าในระบบที่ 60 วัตต์ จะได้ระดับพลังงานเข้าทำปฏิกิริยาในระบบจริงเท่ากับ 0.0035 วัตต์ต่อมิลลิลิตร และเมื่อให้ระดับพลังงานเข้าระบบสูงขึ้นที่ 80 100 120 150 และ 200 วัตต์ พบว่าระดับพลังงานที่เข้าทำปฏิกิริยาในระบบจริงมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเป็น 0.007 0.01 0.014 0.014 และ 0.017 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาระดับพลังงานของถังอัลตราซาวด์ขนาด 10 ลิตร (น้ำตัวอย่าง 4 ลิตร) และถังอัลตราซาวด์ขนาด 120 ลิตร (น้ำตัวอย่าง 3 ลิตร) ที่ระดับพลังงานเข้าระบบที่เท่ากันคือ 100 วัตต์ พบว่าพลังงานที่เข้าทำปฏิกิริยาจริงของถังขนาด 10 ลิตร มีค่าเท่ากับ 0.01 วัตต์ต่อมิลลิลิตร ในขณะที่ถังขนาด 120 ลิตร มีระดับพลังงานที่เข้าทำปฏิกิริยาจริงเท่ากับ 0.0023 วัตต์ต่อมิลลิลิตร ที่ระดับพลังงานแตกต่างกันเนื่องจากถังขนาด 10 ลิตร ประกอบด้วยทรานส์ดิวเซอร์ที่เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นเสียง 4 ตัว ทำให้มีระดับพลังงานในถังสูง ในขณะที่ถังขนาด 120 ลิตร มีทรานส์ดิวเซอร์ 1 ตัวและมีปริมาณน้ำมากกว่าถังขนาดเล็กอยู่ 26 ลิตร อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ระดับพลังงานเข้าสู่ระบบจริงมีค่าน้อยกว่าถังขนาด 10 ลิตร

ตารางที่ 4.1 ระดับพลังงานของคลื่นเสียงอัลตราซาวด์

Power input (watt)	Power output (watt)	Intensity (watt/ml)
60	14	0.0035
80	28	0.0070
100	42	0.010
120	56	0.014
150	56	0.014
200	70	0.017
100 (ถึง 120 ลิตร)	70	0.0023

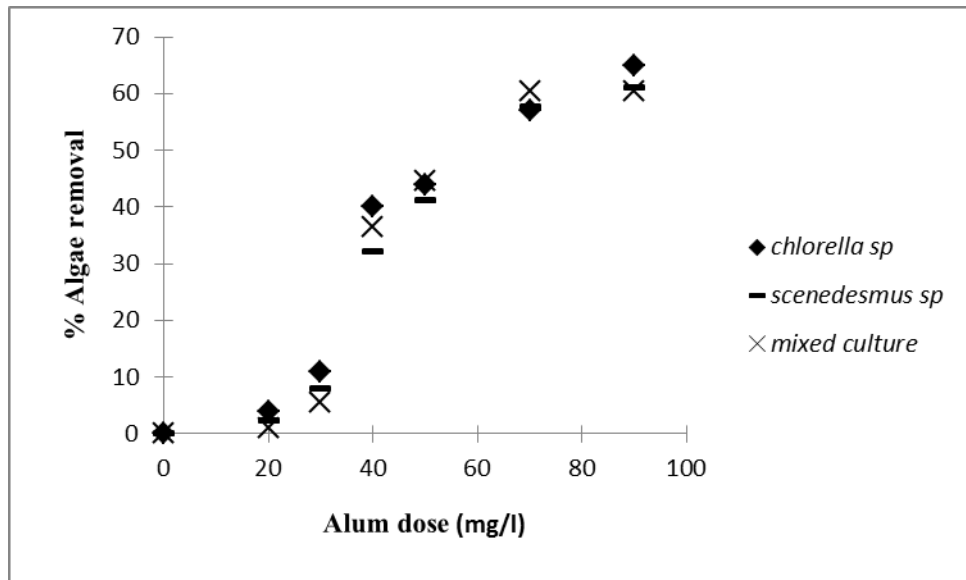
4.2 ผลของปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟต (Alum) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายเลี้ยงในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมในการกำจัดสาหร่ายออกจากน้ำ

การทดลองนี้เพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายของปริมาณ Alum ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1 จากผลการทดลองพบว่าแนวโน้มของสาหร่ายทั้ง 3 กลุ่มตัวอย่าง มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน คือเมื่อมีการเพิ่มปริมาณ Alum มากขึ้นทำให้เซลล์สาหร่ายลดลง โดยการลดลงของสาหร่ายทั้ง 3 กลุ่มตัวอย่าง เนื่องจากการเติม Alum เป็นการเพิ่มประมาณผลึก Alum ซึ่งเป็นการทำลายเสถียรของอนุภาคของสาหร่าย ทำให้สาหร่ายสามารถเข้าใกล้และจับกลุ่มได้ดี เป็นการเพิ่มน้ำหนักให้สาหร่ายสามารถตกตะกอนได้ง่ายและรวดเร็ว



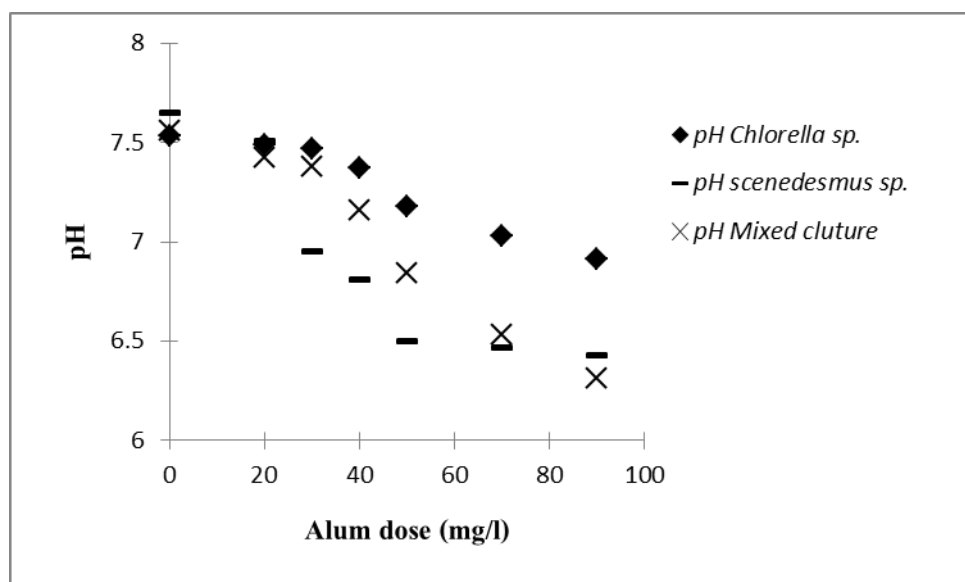
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Alum กับจำนวนเซลล์สาหร่าย

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัด แสดงดังรูปที่ 4.2 อาจแบ่งได้เป็น 3 ช่วง คือช่วงประสิทธิภาพต่ำ เป็นช่วงที่ใช้ปริมาณ Alum น้อย ที่ความเข้มข้น Alum 20 และ 30 mg/l as $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ มีประสิทธิภาพการกำจัดเพียงร้อยละ 1 ถึง 10 เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในช่วงที่ความเข้มข้น Alum 40 และ 50 mg/l as $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ มีประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 40 และ 44 และเมื่อทำการพิจารณาประสิทธิภาพช่วงที่ความเข้มข้น 70 และ 90 mg/l as $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ พบว่าช่วงปลายเป็นช่วงที่มีประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดคือร้อยละ 60 ถึง 65



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Alum กับประสิทธิภาพการกำจัดเซลล์สาหร่าย

อย่างไรก็ตามการใช้ Alum เป็นสารช่วยในการตกตะกอน จะทำให้ pH ของน้ำลดลง โดยที่ Alum 1 mg/l as $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ จะทำปฏิกิริยากับค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) 0.45 mg/l as $CaCO_3$ ดังนั้นในการทดลองนี้จึงทำการตรวจวัด pH หลังจากการตกตะกอนด้วย Alum เพื่อให้การตกตะกอนมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ผลของ pH ที่เปลี่ยนไปหลังจากตกตะกอนด้วย Alum แสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ Alum ของสาหร่ายทั้ง 3 กลุ่มตัวอย่าง มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน คือเมื่อปริมาณ Alum เพิ่มสูงขึ้น pH ของน้ำมีแนวโน้มค่อยๆลดลง

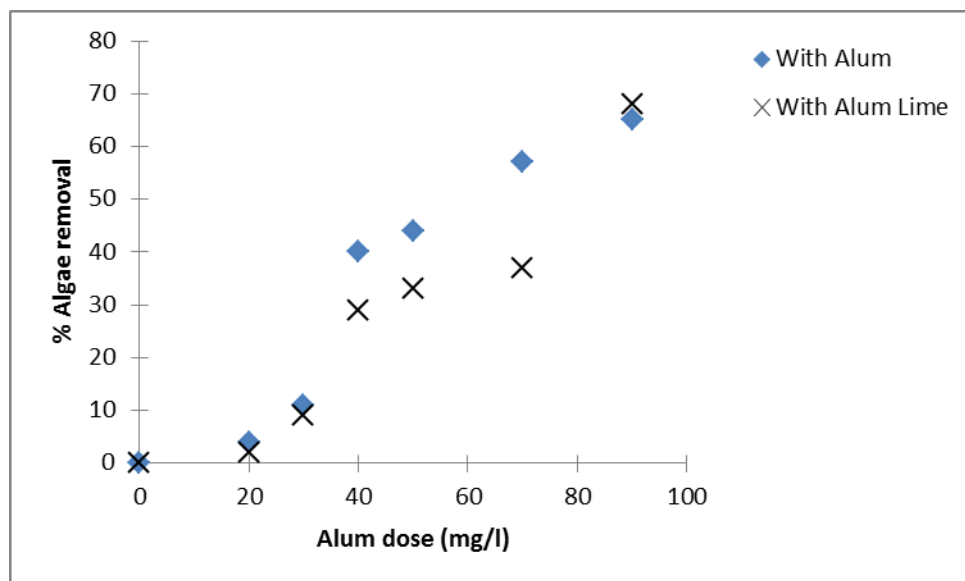


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Alum กับ pH ที่เปลี่ยนแปลง

จากผลการตรวจวัด pH ของน้ำตัวอย่างหลังผ่านการตกตะกอนด้วย Alum พบว่า pH อยู่ในช่วง 6 ถึง 8 และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงมากนัก ซึ่ง pH ในช่วงนี้เหมาะสมต่อการตกตะกอนอนุภาคในน้ำ เมื่อพิจารณาจาก pH ที่ช่วง 6 ถึง 8 และปริมาณ Alum 40 mg/l as $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ที่ใช้ในการทดลองกับแผนภูมิความสามารถในการตกตะกอนแสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่าเป็นการตกตะกอนแบบ Sweep floc โดยการตกตะกอนแบบ Sweep floc เป็นการทำลายเสถียรของอนุภาค ทำให้อนุภาคเข้าใกล้กันและรวมกลุ่มตกตะกอน นอกจากนี้การตกตะกอนแบบ Sweep floc จะทำให้เกิดผลึกของ Alum ช่วยเพิ่มน้ำหนักให้อนุภาคจะทำให้การตกตะกอนมีประสิทธิภาพสูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณ Alum ที่ใช้กับประสิทธิภาพการแยกสสารห่วย ปริมาณ Alum ที่มากขึ้นจาก 50 mg/l as $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ เป็น 90 mg/l as $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น โดยประสิทธิภาพแตกต่างกันร้อยละ 20 ดังนั้นจากการทดลองจึงทำการเลือกปริมาณ Alum ที่ระดับความเข้มข้นช่วงกลาง เมื่อทำการพิจารณาระหว่างความเข้มข้น Alum ที่ 40 และ 50 mg/l as $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ พบว่าประสิทธิภาพแตกต่างกันเพียงร้อยละ 4 แต่กลับใช้ปริมาณ Alum สูงกว่าถึง 10 mg/l as $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ดังนั้นจากการทดลองการตกตะกอนทางเคมี โดยใช้ Alum เป็นสารเคมีช่วยในการตกตะกอน จึงเลือกปริมาณ Alum ที่ 40 mg/l as $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ จากนั้นทำการพิจารณาผลของความเป็นด่าง (Alkalinity) ที่มีในน้ำตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 4.4 โดยค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) ก่อนการตกตะกอน ในน้ำตัวอย่างมีค่าประมาณ 48 mg/l as CaCO_3 และหลังจากการตกตะกอนพบว่าปริมาณ Alkalinity ลดลงไปในช่วงประมาณ 4 mg/l as CaCO_3 ถึง 27 mg/l as CaCO_3 โดยพบว่าค่าความเป็นด่างที่ความเข้มข้น Alum ที่ 40 mg/l as $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ มีค่าความเป็นด่างเหลือ 40.5 mg/l as CaCO_3 ซึ่งเมื่อเทียบกับปริมาณค่าความเป็นด่างของน้ำเริ่มต้นพบว่าลดลงเพียง 8 mg/l as CaCO_3 ตรงกันข้ามที่ประสิทธิภาพการกำจัดสูงที่ความเข้มข้น Alum 90 mg/l as $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ มีค่าความเป็นด่างเหลือเพียง 21 mg/l as CaCO_3 โดยใช้ค่าความเป็นด่างในน้ำไปถึง 27 mg/l as CaCO_3 จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้ปริมาณ Alum ที่ความเข้มข้นสูง เนื่องจากที่ความเข้มข้น Alum สูงทำให้ปริมาณค่าความเป็นด่างลดลงมาก แสดงให้เห็นว่าน้ำนั้นมี Buffer capacity น้อย ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นว่าที่ Alum 40 mg/l as $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ มีประสิทธิภาพการกำจัด โดยไม่ส่งผลต่อคุณภาพน้ำหลังจากการบำบัดมากนัก

4.3 ผลของปริมาณปูนขาว (lime) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายที่เลี้ยงในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมในการกำจัด

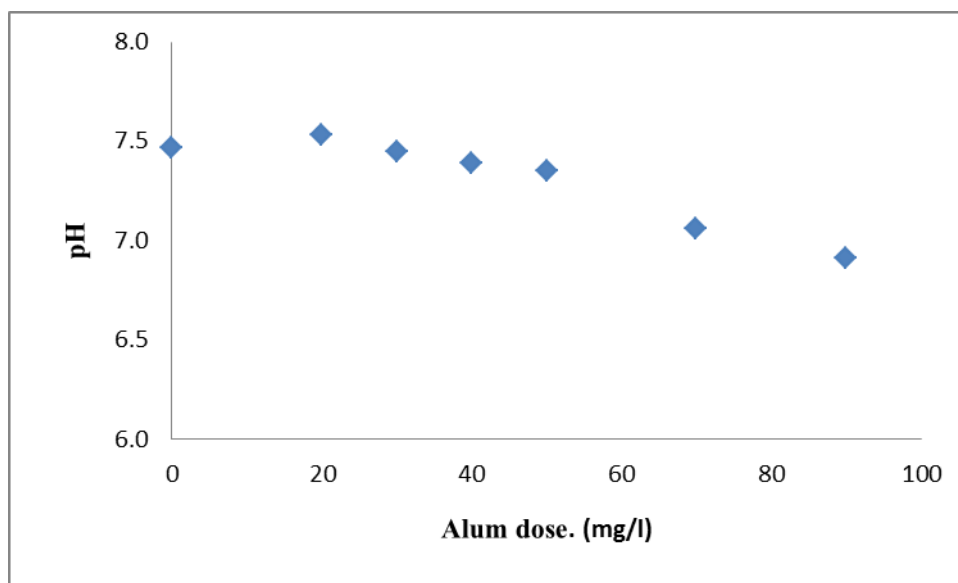
ผลการตกตะกอนเซลล์สาหร่ายโดยเติม Alum และ Lime เปรียบเทียบประสิทธิภาพกับการตกตะกอนเซลล์สาหร่ายโดยการเติม Alum อย่างเดียว แสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยการเติม Alum และ Lime มีผลให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนเซลล์สาหร่ายน้อยกว่าการเติม Alum เพียงอย่างเดียว อาจเป็นไปได้ว่าในช่วงความเข้มข้น Alum 20 ถึง 70 mg/l as $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ มีปริมาณค่าความเป็นด่างเพียงพอต่อการตกตะกอนอยู่แล้ว เมื่อทำการเพิ่มปริมาณต่างให้กับน้ำจึงทำให้ Al^{3+} ทำปฏิกิริยากับความเป็นด่างในน้ำมากกว่าที่จะทำปฏิกิริยาในการทำลายเสถียรอนุภาคของสาหร่ายทำให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนลดลง



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Alum กับปริมาณเซลล์สาหร่ายสายพันธุ์

Chlorella vulgaris sp.

พบว่าเมื่อทำการเติมปูนขาว เพื่อเพิ่มปริมาณค่าความเป็นด่างให้กับน้ำตัวอย่างทำให้ pH ของน้ำเพิ่มสูงขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.7 เมื่อเทียบกับการตกตะกอนที่ไม่มีการเติมปูนขาวร่วมด้วย อันเนื่องมาจาก Alum ได้ทำปฏิกิริยากับค่าความเป็นด่างของน้ำตัวอย่างที่มีเพียงพออยู่แล้ว ดังนั้นจึงไม่ต้องเพิ่มปริมาณปูนขาวให้ค่าความเป็นด่างให้กับน้ำอีก ทั้งนี้หากมีการเพิ่มปริมาณปูนขาวที่มากขึ้น จะทำให้ pH ของน้ำตัวอย่างเพิ่มสูงขึ้น ไม่เหมาะสมต่อการตกตะกอน พร้อมทั้งยังทำให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนลดลง พบว่า Alum ที่ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร เติมน้ำปูนขาว 13.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนลดลงร้อยละ 10



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Alum และ Lime กับ pH

จากการทดลองจึงทำการเลือกความเข้มข้น Alum 40 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการตกตะกอนเซลล์สาหร่าย และไม่ต้องเพิ่มปริมาณค่าความเป็นด่างให้กับน้ำตัวอย่างอีก เนื่องจากปริมาณความเป็นด่างในน้ำตัวอย่างเพียงพอต่อการตกตะกอนทางเคมี ด้วย Alum อยู่แล้ว และพบว่าปริมาณ Alum ที่ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำหลังการบำบัด ดังนั้นจึงไม่ทำการศึกษาปริมาณ Lime ต่อการตกตะกอนอีกต่อไป

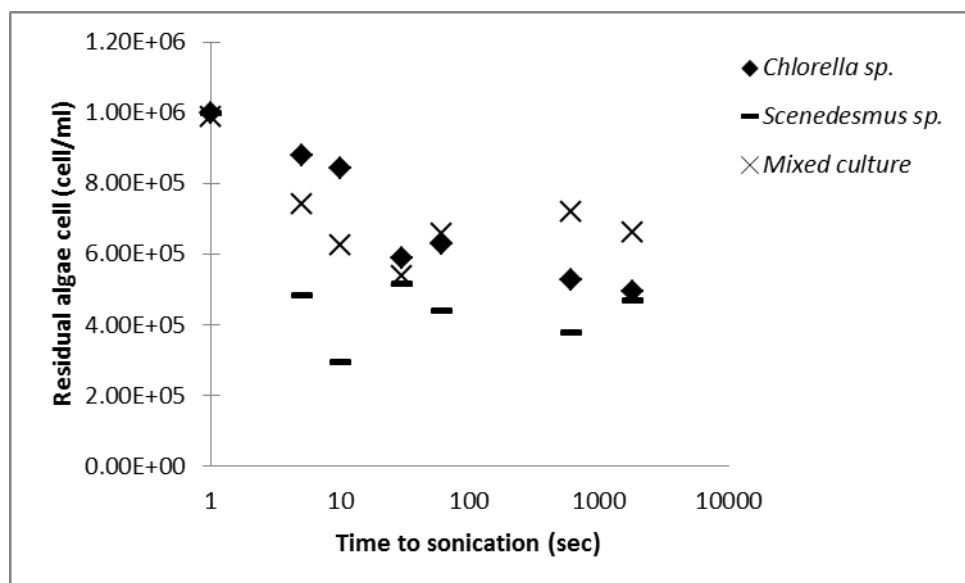
4.4 ผลของระยะเวลาการให้คลื่นเสียงที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายที่เลี้ยงในห้องปฏิบัติการ

ผลของระยะเวลาการให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ของสาหร่าย 3 กลุ่มตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่าสาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* sp. เมื่อให้เวลาในการสัมผัสระยะเวลาสั้นๆ ที่ระยะเวลา 30 วินาที ส่งผลให้เซลล์สาหร่ายตกตะกอนและแยกออกจากน้ำ จากความเข้มข้นเริ่มต้น 10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร เหลือเพียง 5.9×10^5 เซลล์ต่อมิลลิลิตร เมื่อทำการให้เวลาสัมผัสที่ยาวนานขึ้นที่ 1 นาทีหรือมากกว่าจะส่งผลในด้านลบต่อการตกตะกอน เนื่องจากพบว่าที่ระยะเวลาการสัมผัสยาวนานขึ้นจะทำให้เซลล์สาหร่ายไม่รวมตัว ทั้งยังทำให้เซลล์สาหร่ายแตก แสดงดังรูปที่ 4.9

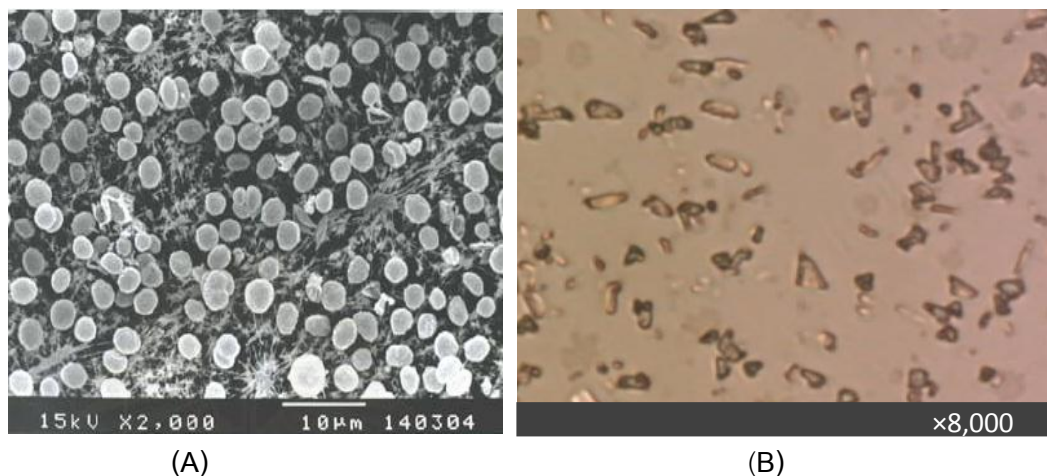
เมื่อพิจารณาผลของการให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์เทียบกับระยะเวลา โดยทดลองกับสาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Scenedesmus* sp. พบว่าเมื่อให้ระยะเวลาในการสัมผัสสั้นๆ ที่ระยะเวลา

10 วินาที ส่งผลให้เซลล์สาหร่ายตกตะกอนและแยกออกจากน้ำได้ดี จากความเข้มข้นเริ่มต้น 10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร เหลือเพียง 3×10^5 เซลล์ต่อมิลลิลิตร เมื่อทำการให้เวลาสัมผัสที่ยาวนานมากขึ้น จะส่งผลในด้านลบต่อการตกตะกอน เนื่องจากพบว่าที่ระยะเวลาการสัมผัสที่ยาวนานขึ้นจะทำให้เซลล์สาหร่ายไม่รวมตัว ทั้งยังทำให้เซลล์สาหร่ายแตกเช่นเดียวกับสาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* sp.

จากนั้นทำการทดลองโดยการนำสาหร่ายสีเขียวทั้ง 2 ชนิด (mixed culture) ผสมกัน เมื่อพิจารณาผลของการให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์เทียบกับเวลาของสาหร่ายผสม พบว่าเมื่อให้เวลาในการสัมผัสน้อย ที่ระยะเวลา 30 วินาที จากความเข้มข้นเริ่มต้น 10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร เหลือเพียง 5.4×10^5 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ส่งผลให้เซลล์สาหร่ายตกตะกอนและแยกออกจากน้ำ ทั้งนี้เนื่องจากตัวอย่างเป็นส่วนผสมระหว่างสาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Scenedesmus* sp. และสาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* sp. พบว่าเวลาที่เหมาะสมคือ 30 วินาที อาจเนื่องจากที่ระยะเวลา 10 วินาที สาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Scenedesmus* sp. ได้ตกตะกอนออกจากน้ำไปก่อน และยังคงเหลือสาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* sp. ซึ่งสามารถตกตะกอนได้ดีในช่วง 30 วินาที ส่งผลต่อการตกตะกอนสาหร่ายผสม ซึ่งจะทำให้การตกตะกอนของสาหร่ายผสมเป็นช่วงเวลาเดียวกันกับปริมาณสาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* sp. เนื่องจากความแตกต่างของเซลล์ของสาหร่ายทั้ง 2 ชนิด

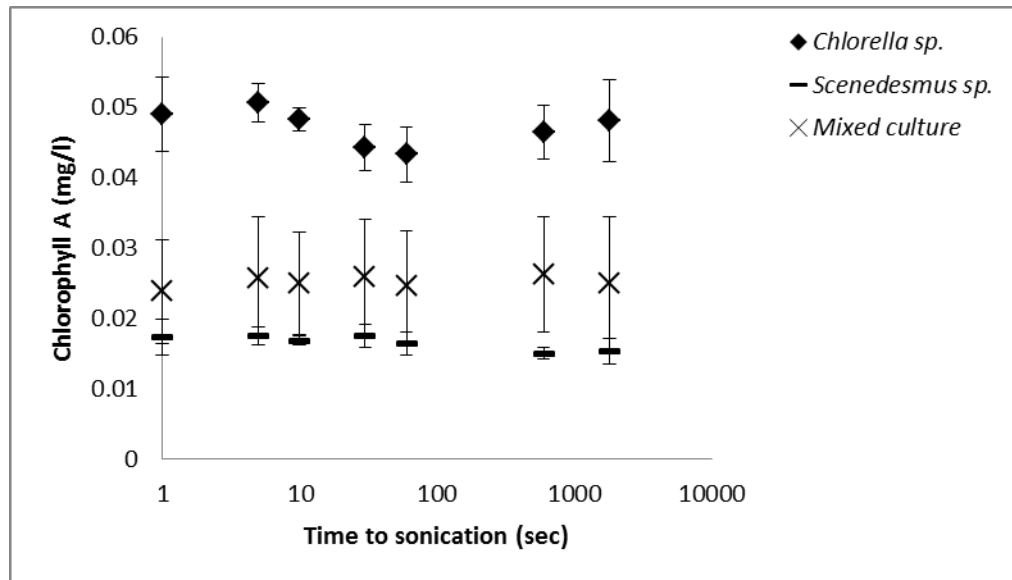


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการให้คลื่นเสียงกับปริมาณเซลล์สาหร่ายสีเขียว 3 กลุ่ม



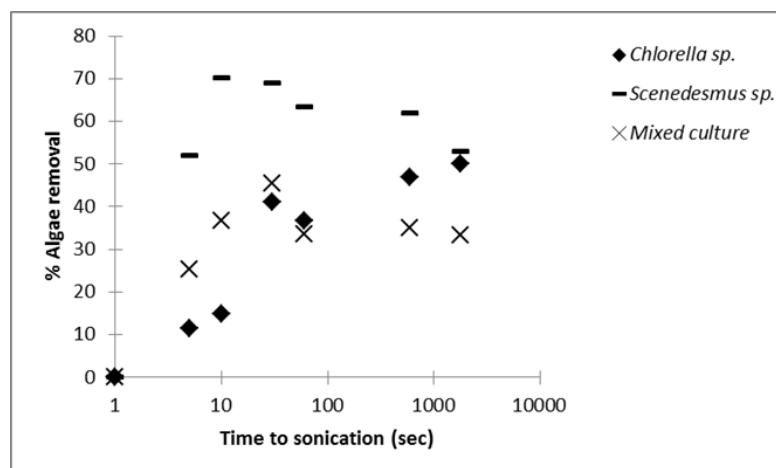
รูปที่ 4.9 ลักษณะเซลล์สาหร่าย *Chlorella vulgaris sp.* ก่อน (A) และหลังการอัลตราซาวด์ (B)

เมื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ทั้งหมด ในน้ำตัวอย่างที่ผ่านการให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ที่ระยะเวลาต่าง ๆ โดยผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 4.10 จากผลการทดลองพบว่าปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ทั้งหมดในน้ำตัวอย่างของสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris sp.*, *Scenedesmus sp.* และสาหร่ายผสม มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงแคบ ๆ ซึ่งแตกต่างจากจำนวนสาหร่ายที่ลดลง โดยปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ในน้ำตัวอย่าง ไม่แสดงความสัมพันธ์กับปริมาณสาหร่าย อาจจะเนื่องจากการวัดปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ด้วยวิธี Spectrophotometric ไม่สามารถวัดปริมาณความแตกต่างของปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ที่มีความเข้มข้นต่างกันน้อย ๆ ได้ และเมื่อเซลล์สาหร่ายแตกคลอโรฟิลล์ ที่อยู่ภายในเซลล์ก็ยังคงอยู่ในตัวอย่างน้ำ ในขณะที่ไม่สามารถมองเห็นเป็นเซลล์สมบูรณ์ที่จะถูกนับในการนับปริมาณสาหร่าย ดังนั้นในการทดลองนี้จึงอาจไม่สามารถใช้ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ทั้งหมด เป็นตัวบ่งชี้ปริมาณเซลล์สาหร่ายในการทดลองนี้ได้



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการให้คลื่นเสียงกับปริมาณคลอโรฟิลล์เอ

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัด แสดงดังรูปที่ 4.11 พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 30 วินาที สามารถลดปริมาณสาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* sp. ได้ร้อยละ 41 และที่สภาวะเดียวกันพบว่า สามารถลดปริมาณสาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Scenedesmus* sp. ได้สูงสุด ร้อยละ 70.2 ที่เวลา 10 วินาที จากนั้นทำการทดลองโดยการนำสาหร่ายสีเขียวทั้ง 2 ชนิด (mixed culture) ผสมกัน พบว่าสามารถลดปริมาณเซลล์สาหร่ายได้สูงสุดร้อยละ 45.4 ที่เวลา 30 วินาที เทียบกับประสิทธิภาพการกำจัดในน้ำตัวอย่างที่ไม่ผ่านกระบวนการให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ ที่มีประสิทธิภาพการตกตะกอนเท่ากับร้อยละ 0 ถึง 1 เท่านั้น



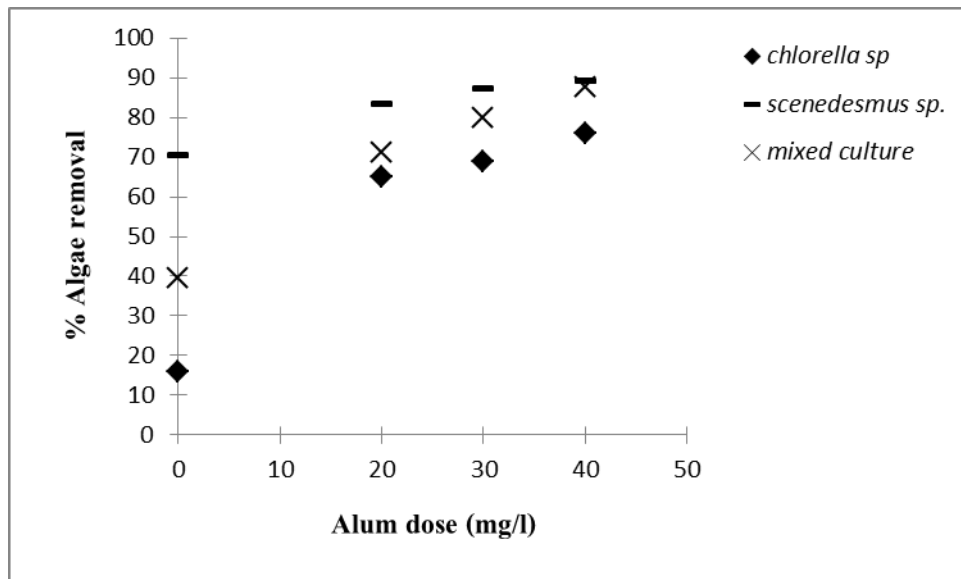
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการให้คลื่นเสียงกับประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย

จากผลการทดลอง ประสิทธิภาพที่แตกต่างกันระหว่างสาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* sp. และสายพันธุ์ *Scenedesmus* sp. อาจเนื่องจากความแตกต่างของโครงสร้างภายในเซลล์สาหร่ายทั้งสองชนิด สาเหตุที่สาหร่ายสายพันธุ์ *Scenedesmus* sp. มีการตกตะกอนเร็วกว่าสาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* sp. เนื่องจากสาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Scenedesmus* sp. มีโครงสร้างของผนังเซลล์ที่บางและขนาดของเซลล์ที่ใหญ่กว่าทำให้ฟองแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าทำลายเซลล์ได้ง่าย และพบว่าหากภายในเซลล์ประกอบด้วยแก๊สแวกิวโอล (Gas-Vacuoles) และเนื้อเยื่อของเซลล์สาหร่ายทำให้เซลล์แตก นอกจากนี้ยังทำให้เกิดเวคิวโอล ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้และทำลายกระบวนการสังเคราะห์แสงของเซลล์สาหร่าย (Tang และคณะ, 2004) สำหรับสาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* sp. นั้น องค์ประกอบภายในเซลล์ไม่พบแก๊สแวกิวโอล (Rajasekhar และคณะ, 2012) จึงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายของสาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* sp. มีประสิทธิภาพต่ำกว่าสาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Scenedesmus* sp. นอกจากนี้การให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์เป็นระยะเวลาที่ยาวนานขึ้นจะส่งผลในด้านลบต่อการตกตะกอน พบว่าระยะเวลาการให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ที่ยาวนานนั้น จะทำให้เซลล์สาหร่ายแตก ซึ่งเป็นสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการกำจัดสาหร่ายในน้ำ ทั้งนี้เนื่องจากสาหร่ายบางสายพันธุ์เมื่อเซลล์แตกหรือฉีกขาดจะมีการปล่อยสารพิษที่อยู่ในเซลล์ลงในน้ำ ดังนั้นระยะเวลาเดินระบบที่ยาวนานเกินไป จึงไม่เหมาะสมต่อการที่จะนำการอัลตราซาวด์ มาประยุกต์ใช้ในระบบผลิตน้ำประปา

จากการทดลองจึงทำการเลือกระยะเวลาสัมผัส 30 วินาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการตกตะกอนเซลล์สาหร่าย เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

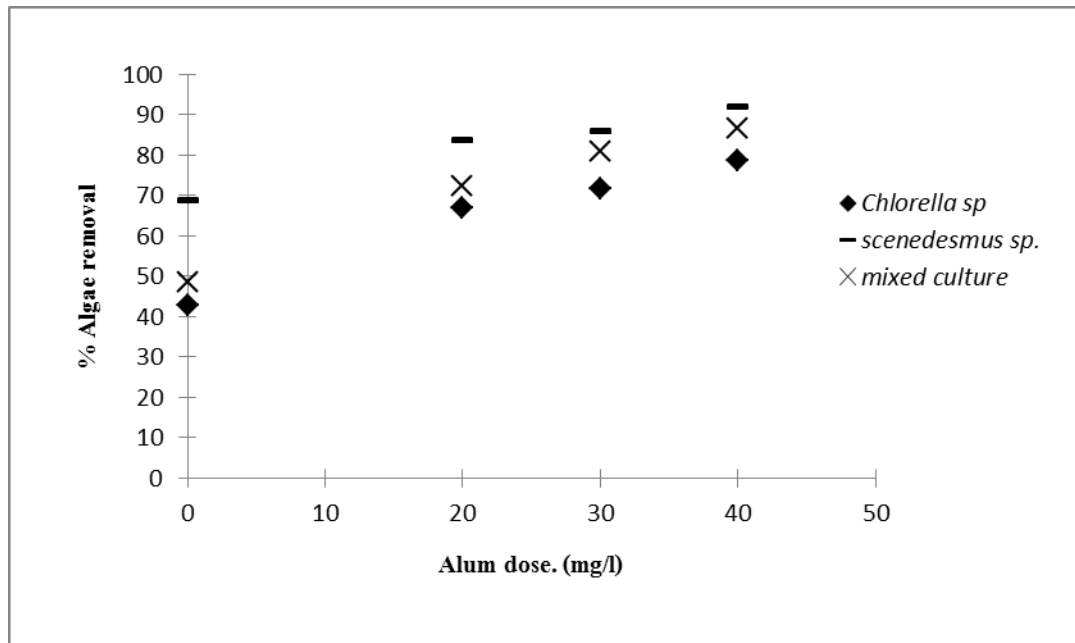
4.5 ผลของระยะเวลาการให้คลื่นเสียงร่วมกับการเติม Alum ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายที่เลี้ยงในห้องปฏิบัติการ

เมื่อทำการทดลองศึกษาผลของระยะเวลา โดยเติม Alum โดยมีระยะเวลาการสัมผัสที่เวลา 10 วินาที พลังงาน 60 วัตต์ (0.0035 W/ml) ปริมาณ Alum ที่ 20 30 และ 40 mg/l as $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ แสดงดังรูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพการกำจัดเซลล์สาหร่ายสูงสุดที่ความเข้มข้น Alum 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งประสิทธิภาพ *Scenedesmus* sp. สูงที่สุดร้อยละ 89.21 สาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* sp. ร้อยละ 76.00 และสาหร่ายผสมร้อยละ 87.50 เทียบกับประสิทธิภาพการกำจัดในน้ำตัวอย่างที่ไม่ผ่านกระบวนการให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์และเติม Alum ที่มีประสิทธิภาพการตกตะกอนเท่ากับร้อยละ 0 ถึง 1 เท่านั้น



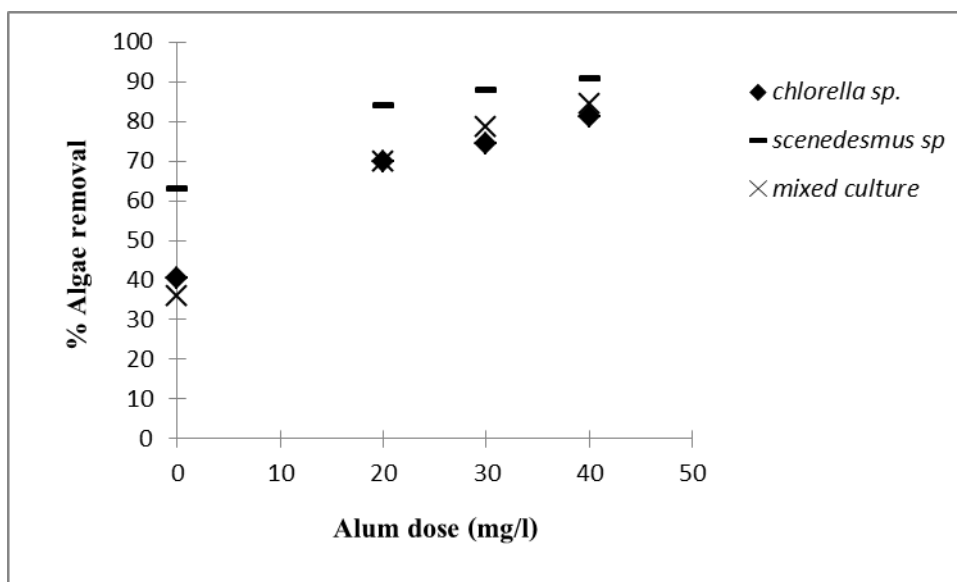
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Alum ระยะเวลาการให้คลื่นเสียงที่ 10 วินาที ระดับพลังงาน 60 วัตต์ (0.0035 W/ml) กับประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย

เมื่อทำการทดลองศึกษาผลของระยะเวลา โดยเติม Alum พิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย ทั้ง 2 สายพันธุ์และสาหร่ายผสม ที่ระยะเวลาการสัมผัสที่เวลา 30 วินาที พลังงาน 60 วัตต์ (0.0035 W/ml) ปริมาณ Alum ที่ 20 30 และ 40 mg/l as $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ แสดงดังรูปที่ 4.13 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดเซลล์สาหร่ายสูงสุดที่ความเข้มข้น Alum 40 mg/l as $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ ซึ่งให้ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายสายพันธุ์ *Scenedesmus sp.* สูงที่สุดร้อยละ 91.91 สาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris sp.* ร้อยละ 78.64 และสาหร่ายผสมร้อยละ 86.66 เทียบกับประสิทธิภาพการกำจัดในน้ำตัวอย่างที่ไม่ผ่านกระบวนการให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์และเติม Alum ที่มีประสิทธิภาพการตกตะกอนเท่ากับร้อยละ 0 ถึง 1 เท่านั้น



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Alum ระยะเวลาการให้คลื่นเสียงที่ 30 วินาที ระดับพลังงาน 60 วัตต์ (0.0035 W/ml) กับประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย

เมื่อทำการทดลองศึกษาผลของระยะเวลา โดยเติม Alum ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย ทั้ง 2 สายพันธุ์และสาหร่ายผสม ที่ระยะเวลาการสัมผัสที่เวลา 1 นาที พลังงาน 60 วัตต์ (0.0035 W/ml) ปริมาณ Alum ที่ 20 30 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงดังรูปที่ 4.14 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดเซลล์สาหร่ายสูงสุดที่ความเข้มข้น Alum 40 mg/l as $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ ซึ่งให้ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายสายพันธุ์ *Scenedesmus sp.* สูงที่สุดร้อยละ 91.00 สาหร่ายสาพันธุ์ *Chlorella vulgaris sp.* ร้อยละ 81.13 และสาหร่ายผสมร้อยละ 84.46 เทียบกับประสิทธิภาพการกำจัดในน้ำตัวอย่างที่ไม่ผ่านกระบวนการให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์และเติม Alum ที่มีประสิทธิภาพการตกตะกอนเท่ากับร้อยละ 0 ถึง 1 เท่านั้น



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Alum ระยะเวลาการให้คลื่นเสียงที่ 60 วินาที ระดับพลังงาน 60 วัตต์ (0.0035 W/ml) กับประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย

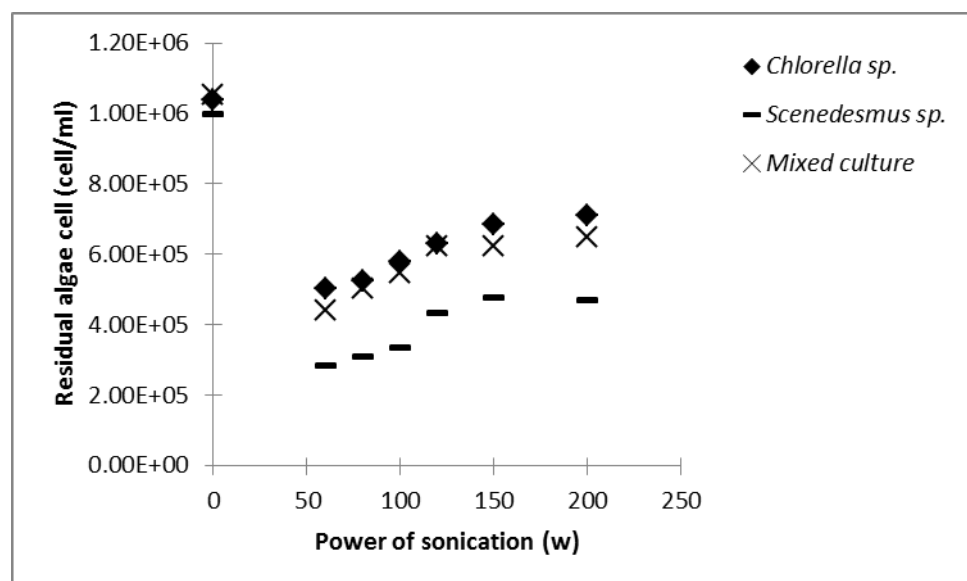
จากการทดลองจึงทำการเลือกระดับพลังงานที่เหมาะสม คือ 60 วัตต์ (0.0035 W/ml) ที่ระยะเวลาสัมผัส 10 วินาที ปริมาณความเข้มข้น Alum 40 mg/l as $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ เป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการตกตะกอนเซลล์สาหร่าย เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

4.6 ผลของพลังงานเสียงที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายที่เลี้ยงในห้องปฏิบัติการ

ทำการศึกษาผลของพลังงานเสียงต่อการตกตะกอน ผลจากการทดลองการตกตะกอนสาหร่ายสีเขียว 3 กลุ่มตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 4.15 พบว่าที่ระดับพลังงานเสียงที่ 60 วัตต์ (0.0035 W/ml) สามารถตกตะกอนเซลล์สาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* sp. ได้ดี สามารถลดเซลล์สาหร่ายจากความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร เหลือประมาณ 5×10^5 เซลล์ต่อมิลลิลิตร โดยพบว่าที่ระดับพลังงานนี้ สามารถทำให้เซลล์สาหร่ายรวมตัวและตกตะกอน และเมื่อให้ระดับพลังงานที่สูงขึ้นพบว่าการตกตะกอนเซลล์สาหร่ายไม่มีผลการเปลี่ยนแปลงมากนัก อีกทั้งการเพิ่มระดับพลังงานที่สูงขึ้นยังส่งผลในด้านลบต่อการตกตะกอนเซลล์สาหร่าย โดยพบว่าเซลล์สาหร่ายจะไม่รวมกลุ่ม และที่ระดับพลังงานสูงเกิน 100 วัตต์ (0.01 W/ml) ขึ้นไปพบว่าทำให้เซลล์สาหร่ายแตก ไม่เหมาะสมต่อการตกตะกอนสาหร่ายในน้ำ เนื่องจากการให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ที่ระดับพลังงานสูงขึ้นไปจะสร้างฟองแก๊สคาวิเทชันที่มากขึ้น และเร่งการเกิดปฏิกิริยา ทำให้ที่ระดับพลังงานสูงขึ้นไปจะทำให้เซลล์สาหร่ายแตก (Heng และคณะ, 2009)

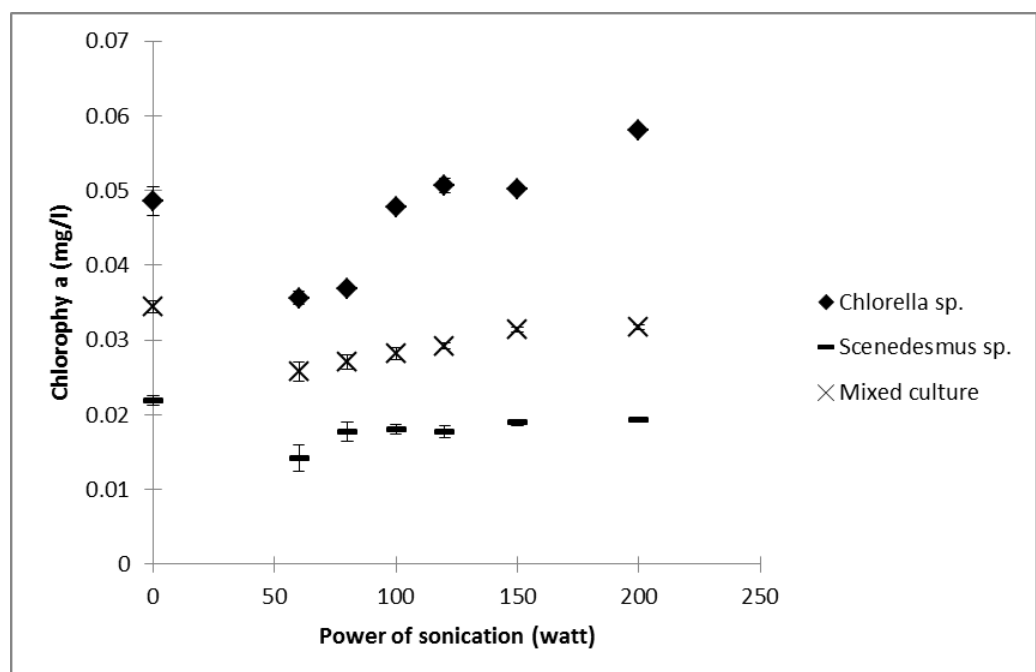
ผลจากการทดลองการตกตะกอนเซลล์สาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Scenedesmus* sp. พบว่าที่ระดับพลังงานเสียงที่ 60 วัตต์ (0.0035 W/ml) สามารถตกตะกอนเซลล์สาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Scenedesmus* sp. ได้ดี สามารถลดเซลล์สาหร่ายจากความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร เหลือประมาณ 3×10^5 เซลล์ต่อมิลลิลิตร โดยพบว่าที่ระดับพลังงานต่ำนี้สามารถทำให้เซลล์สาหร่ายรวมตัวและตกตะกอน และเมื่อให้ระดับพลังงานที่สูงขึ้นพบว่าการตกตะกอนเซลล์สาหร่ายไม่มีผลการเปลี่ยนแปลงมากนัก อีกทั้งการเพิ่มระดับพลังงานที่สูงขึ้นยังส่งผลในด้านลบต่อการตกตะกอนเซลล์สาหร่าย โดยพบว่าเซลล์สาหร่ายไม่สามารถเข้าใกล้และจับกลุ่มกันได้ และที่ระดับพลังงานสูงเกิน 100 วัตต์ (0.01 W/ml) ขึ้นไปพบว่าทำให้เซลล์สาหร่ายแตกไม่เหมาะสมต่อการตกตะกอนสาหร่ายในน้ำ เช่นเดียวกับสาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* sp.

ทำการศึกษาผลของพลังงานเสียงต่อการตกตะกอน จากการทดลองการตกตะกอนพบว่าที่ระดับพลังงานเสียงที่ 60 วัตต์ (0.0035 W/ml) สามารถตกตะกอนเซลล์สาหร่ายผสมได้ดี สามารถลดเซลล์สาหร่ายจากความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร เหลือประมาณ 4.5×10^5 เซลล์ต่อมิลลิลิตร โดยพบว่าที่ระดับพลังงานต่ำนี้สามารถทำให้เซลล์สาหร่ายรวมตัวและตกตะกอน และเมื่อให้ระดับพลังงานที่สูงขึ้นพบว่าการตกตะกอนเซลล์สาหร่ายไม่มีผลการเปลี่ยนแปลงมากนัก อีกทั้งการเพิ่มระดับพลังงานที่สูงขึ้นยังส่งผลในด้านลบต่อการตกตะกอนเซลล์สาหร่าย



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับพลังงานต่างๆกับปริมาณสาหร่าย

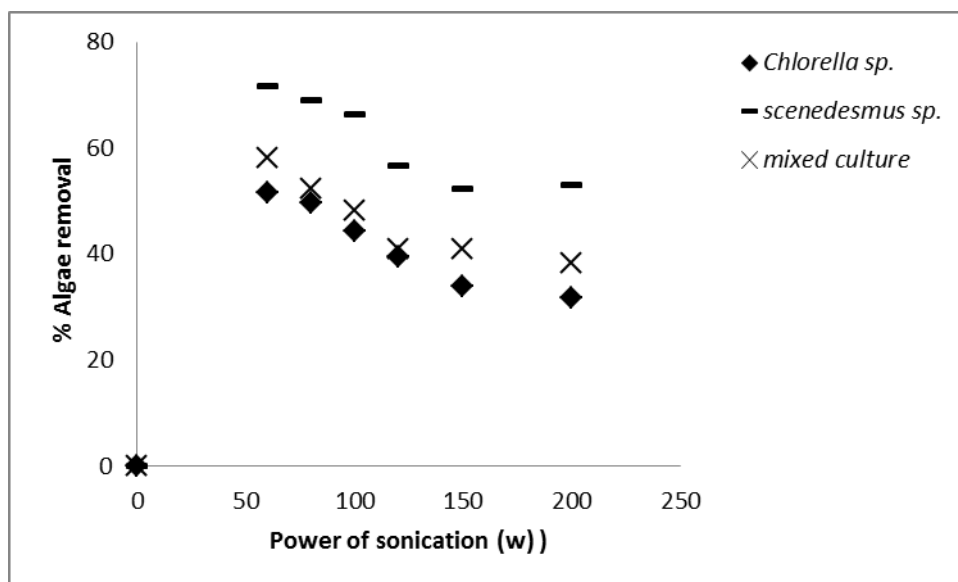
เมื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ทั้งหมด ในน้ำตัวอย่างที่ผ่านการให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ที่ระดับพลังต่าง ๆ โดยผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 4.16 จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ทั้งหมดในน้ำตัวอย่างของสาหร่าย 2 สายพันธุ์และสาหร่ายผสม มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงแคบ ๆ ซึ่งแตกต่างจากจำนวนสาหร่ายที่ลดลง โดยปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ในตัวอย่างน้ำ ไม่แสดงความสัมพันธ์กับปริมาณสาหร่าย อาจจะเป็นเนื่องจากการวัดปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ด้วยวิธี Spectrophotometric ไม่สามารถวัดปริมาณความแตกต่างของปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ที่มีความเข้มข้นต่างกันน้อย ๆ ได้ และเมื่อเซลล์สาหร่ายแตกคลอโรฟิลล์ ที่อยู่ในเซลล์ก็ยังคงอยู่ในตัวอย่างน้ำ ในขณะที่ไม่สามารถมองเห็นเป็นเซลล์สมบูรณ์ที่จะถูกนับในการนับปริมาณสาหร่าย ดังนั้นในการทดลองนี้จึงไม่สามารถใช้ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ทั้งหมดเป็นตัวบ่งชี้ปริมาณเซลล์สาหร่ายในการทดลองนี้ได้ ดังนั้นในการทดลองต่อไปจึงไม่ทำการวัดปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ต่อไปเนื่องจากการลดของปริมาณเซลล์ไม่สัมพันธ์กับปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ



รูปที่ 4.16 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ

ประสิทธิภาพการกำจัด ดังแสดงดังรูปที่ 4.17 พบว่าเมื่อให้พลังงานคลื่นเสียงอัลตราซาวด์ที่แตกต่างกัน ที่พลังงาน 60 วัตต์ (0.0035 W/ml) สามารถลดปริมาณสาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* sp. ได้ร้อยละ 51.60 และที่สภาวะเดียวกันพบว่า สามารถลดปริมาณสาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Scenedesmus* sp. ได้สูงสุด ร้อยละ 71.67 ที่พลังงาน 60 วัตต์ (0.0035 W/ml)

จากนั้นทำการทดลองโดยการนำสาหร่ายสีเขียวทั้ง 2 ชนิด (mixed culture) ผสมกัน พบว่าสามารถลดปริมาณเซลล์สาหร่ายได้สูงสุดร้อยละ 58.22 ที่พลังงาน 60 วัตต์ (0.0035 W/ml) เทียบกับน้ำตัวอย่างที่ไม่ผ่านกระบวนการให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ ที่มีประสิทธิภาพการตกตะกอนเท่ากับร้อยละ 0 ถึง 1 เท่านั้น

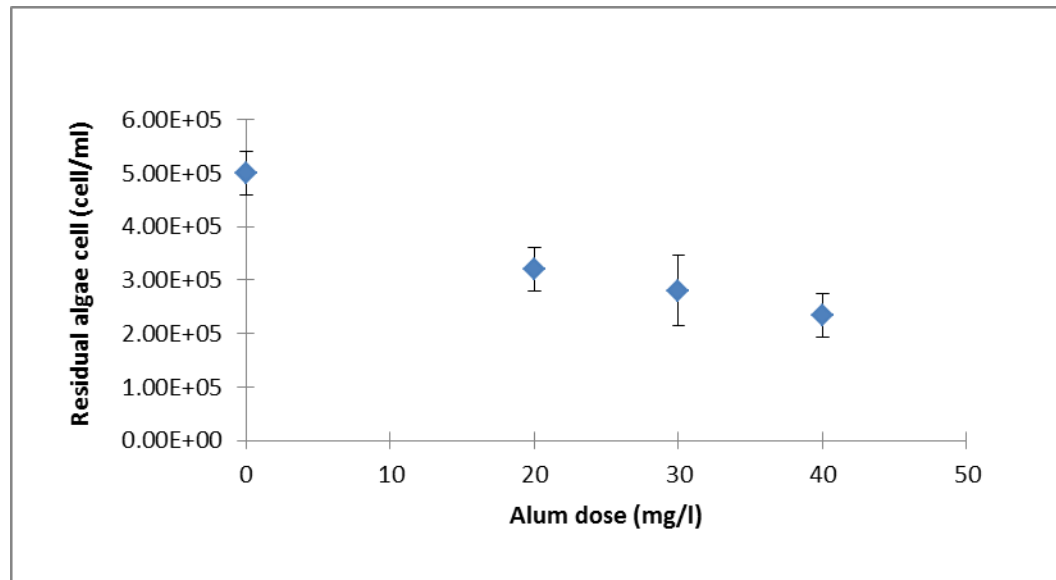


รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับพลังงานต่างๆ ระยะเวลาการให้คลื่นเสียง 30 วินาที กับประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย

จากการทดลองจึงทำการเลือกระดับพลังงานที่เหมาะสม คือ 60 วัตต์ (0.0035 W/ml) ที่ระยะเวลาสัมผัส 30 วินาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการตกตะกอนเซลล์สาหร่าย ดังนั้นจึงใช้สภาวะนี้เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

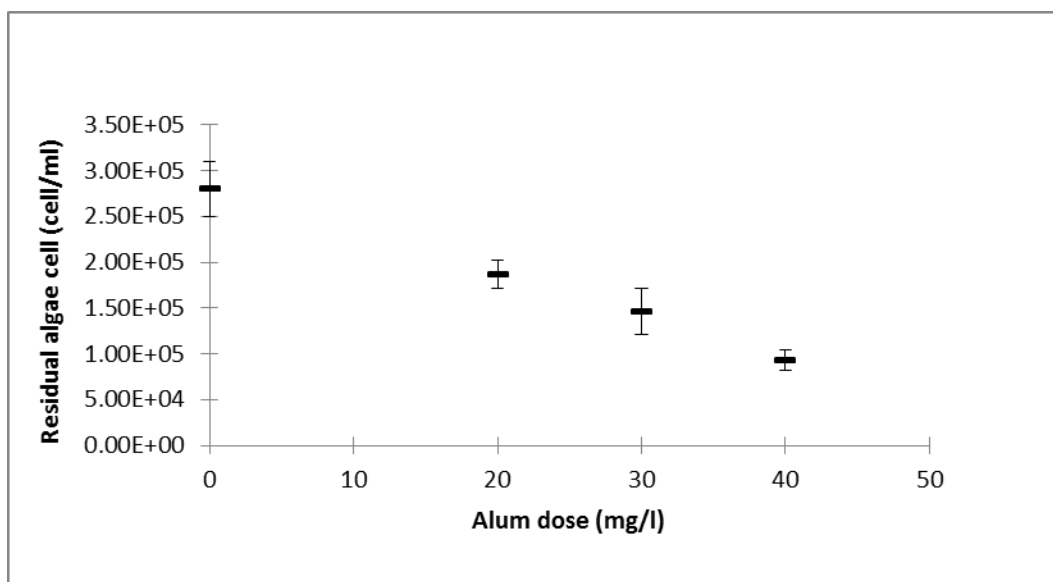
4.7 ผลของพลังงานเสียงโดยเติม Alum ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายที่เลี้ยงในห้องปฏิบัติการ

จากการทดลองพบว่าที่ระยะเวลาการสัมผัส 30 วินาที ระดับพลังงาน 60 วัตต์ (0.0035 W/ml) ความเข้มข้น Alum ที่ 40 mg/l as $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ แสดงดังรูปที่ 4.18 สามารถลดปริมาณเซลล์สาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* sp. ได้ดีสามารถลดเซลล์สาหร่ายจากความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร เหลือประมาณ 2.3×10^5 เซลล์ต่อมิลลิลิตร



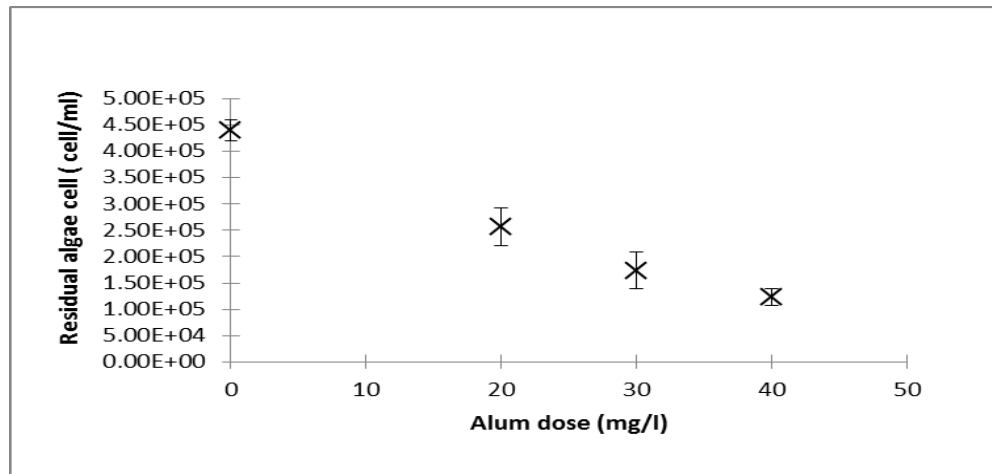
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Alum ระยะเวลาการให้คลื่นเสียง 30 วินาที ระดับพลังงาน 60 วัตต์ (0.0035 W/ml) กับ ปริมาณสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* sp.

จากการทดลองพบว่าที่ระยะเวลาการสัมผัส 30 วินาที ระดับพลังงาน 60 วัตต์ (0.0035 W/ml) ความเข้มข้น Alum ที่ 40 mg/l as $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ สามารถลดปริมาณเซลล์สาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Scenedesmus* sp. ได้ดี แสดงดังรูปที่ 4.19 สามารถลดเซลล์สาหร่ายจากความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร เหลือประมาณ 10^5 เซลล์ต่อมิลลิลิตร เมื่อเทียบกับสาหร่ายที่ไม่ผ่านกระบวนการกำจัด ที่ระยะเวลาและระดับพลังงานดังกล่าวทำให้เกิดการตกตะกอน และไม่พบว่ามีเซลล์สาหร่ายแตกต่างจากระยะเวลาและระดับพลังงานดังกล่าว



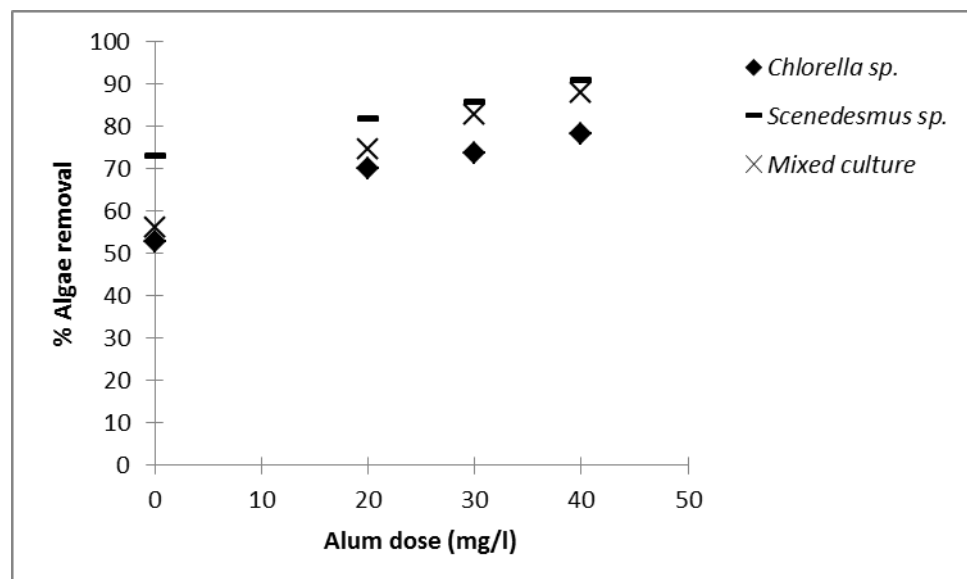
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Alum ระยะเวลาการให้คลื่นเสียง 30 วินาที ระดับพลังงาน 60 วัตต์ (0.0035 W/ml) กับ ปริมาณสาหร่ายสายพันธุ์ *Scenedesmus sp.*

เมื่อทำการทดลองกับสาหร่ายผสม พบว่าที่ระยะเวลาการสัมผัส 30 วินาที ระดับพลังงาน 60 วัตต์ (0.0035 W/ml) ความเข้มข้น Alum ที่ 40 mg/l as $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ สามารถลดปริมาณ เซลล์สาหร่ายสีเขียวผสมได้ดี แสดงดังรูปที่ 4.20 สามารถลดเซลล์สาหร่ายจากความเข้มข้นเริ่มต้น ประมาณ 10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตรต่อมิลลิลิตร เหลือประมาณ 1.5×10^5 เซลล์ต่อมิลลิลิตร เช่นกัน กับสาหร่ายทั้ง 2 สายพันธุ์ เมื่อเทียบกับสาหร่ายที่ไม่ผ่านกระบวนการกำจัด ที่ระยะเวลาและระดับ พลังงานดังกล่าวทำให้เกิดการตกตะกอน และไม่พบว่ามีเซลล์สาหร่ายแตกจากระยะเวลาและ ระดับพลังงานดังกล่าว



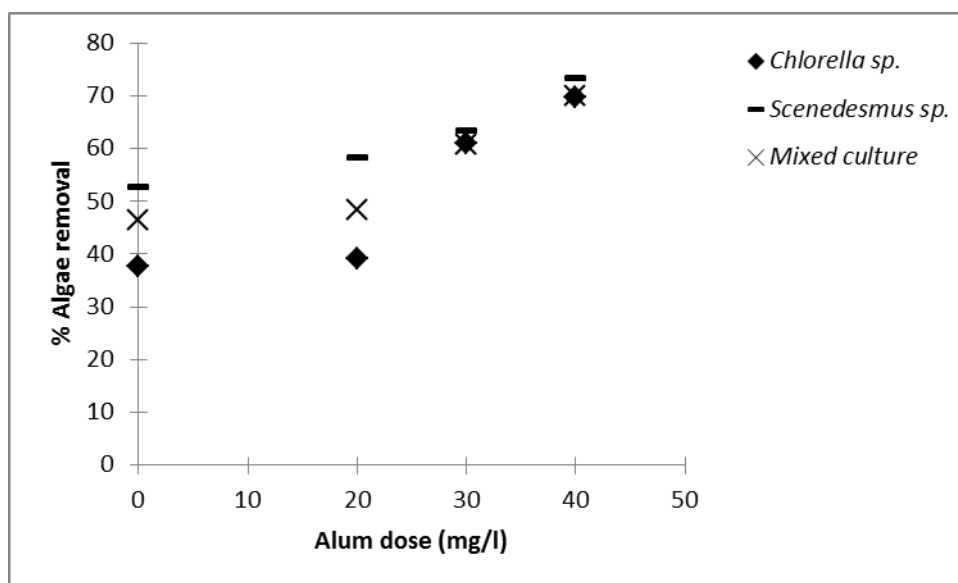
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Alum ระยะเวลาการให้คลื่นเสียง 30 วินาที ระดับพลังงาน 60 วัตต์ (0.0035 W/ml) กับ ปริมาณสาหร่ายผสม

ประสิทธิภาพการกำจัดแสดงดังรูปที่ 4.21 พบว่าเซลล์สาหร่ายทั้ง 3 ตัวอย่าง ลดลงได้ดีที่ระยะเวลาการสัมผัส 30 วินาที ระดับพลังงาน 60 วัตต์ (0.0035 W/ml) ความเข้มข้น Alum ที่ 40 mg/l as $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ สามารถลดปริมาณเซลล์สาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* sp. ได้ร้อยละ 75.66 ลดปริมาณเซลล์สาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Scenedesmus* sp. ได้ร้อยละ 87.33 และสามารถลดปริมาณเซลล์สาหร่ายผสมได้ร้อยละ 83.66 เมื่อเทียบกับตัวอย่างสาหร่ายที่ไม่ผ่านกระบวนการกำจัด ที่มีประสิทธิภาพการตกตะกอนเพียงร้อยละ 0 ถึง 1



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Alum ระยะเวลาการให้คลื่นเสียง 30 วินาที ระดับพลังงาน 60 วัตต์ (0.0035 W/ml) กับ ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย

ประสิทธิภาพการกำจัดแสดงดังภาพที่ 4.22 พบว่าเซลล์สาหร่ายทั้ง 3 ตัวอย่าง ลดลงได้ดี ระยะเวลาการสัมผัส 30 วินาที ระดับพลังงาน 80 วัตต์ (0.007 W/ml) ความเข้มข้น Alum ที่ 40 mg/l as $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ สามารถลดปริมาณเซลล์สาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* sp. ได้ร้อยละ 69 ลดปริมาณเซลล์สาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Scenedesmus* sp. ได้ร้อยละ 71.33 และสามารถลดปริมาณเซลล์สาหร่ายผสมได้ร้อยละ 70 เมื่อเทียบกับตัวอย่างสาหร่ายที่ไม่ผ่านกระบวนการกำจัด

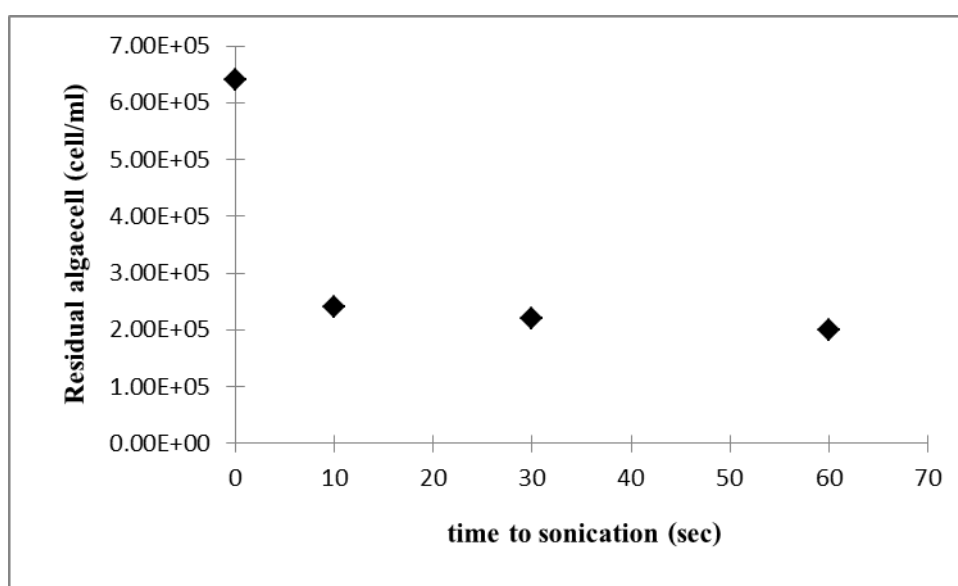


รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Alum ระยะเวลาการให้คลื่นเสียง 30 วินาที ระดับพลังงาน 80 วัตต์ (0.007 W/ml) กับ ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย

จากการทดลองจึงทำการเลือกระดับพลังงานที่เหมาะสม คือ 60 วัตต์ (0.0035 W/ml) ที่ ระยะเวลาสัมผัส 30 วินาที ปริมาณความเข้มข้น Alum 40 mg/l as $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ เป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการตกตะกอนเซลล์สาหร่าย เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Heng และคณะ (2009) ที่ว่าที่ความถี่ 40 kHz ระดับพลังงาน 60 วัตต์ พบว่าที่เวลา 30 วินาที เป็นสภาวะที่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเซลล์สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินได้ดี

4.8 ผลของระยะเวลาใช้พลังงานเสียงที่เหมาะสมโดยเติม Alum ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายที่เลี้ยงในห้องปฏิบัติการ

จากผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.23 พบว่าปริมาณเซลล์สาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* sp. ลดลงรวดเร็วในช่วงระยะเวลาสัมผัส 10 ถึง 30 วินาที เริ่มต้นประมาณ 10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร เหลือประมาณ 2.4×10^5 เซลล์ต่อมิลลิลิตร และ 2.2×10^5 เซลล์ต่อมิลลิลิตร และเมื่อให้ระยะเวลาที่ยาวนานขึ้นนาน 1 นาที พบว่าปริมาณเซลล์สาหร่ายไม่เกิดการรวมกลุ่มและไม่ช่วยในการตกตะกอนเพิ่ม แต่ในช่วงระยะเวลาสัมผัสนาน 1 นาที พบว่าเริ่มมีการแตกของเซลล์สาหร่าย *Chlorella vulgaris* sp. ซึ่งส่งผลในด้านลบต่อการตกตะกอน

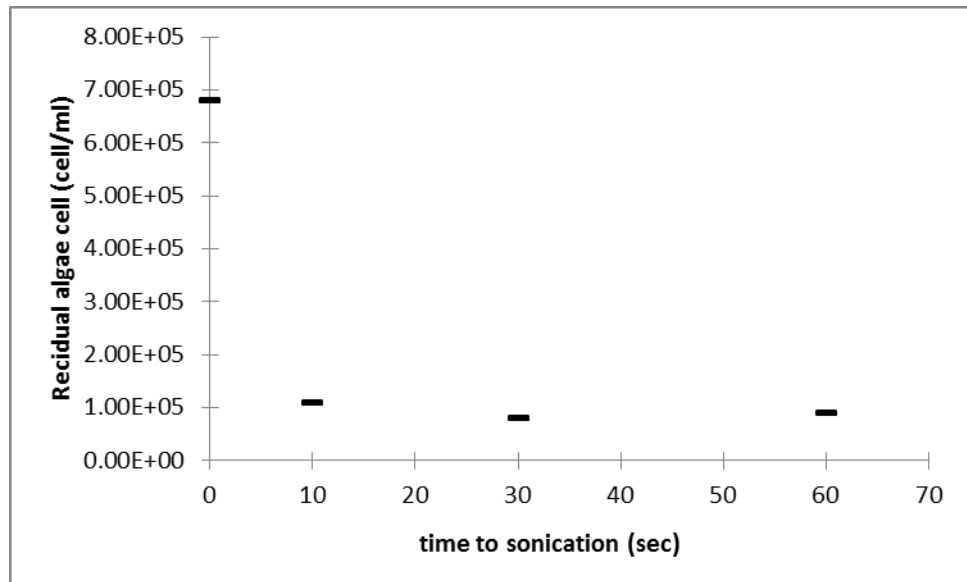


รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการให้คลื่นเสียงที่เวลาต่างๆ

ระดับพลังงาน 60 วัตต์ (0.0035 W/ml) ปริมาณ Alum 40 mg/l กับ ปริมาณสาหร่าย

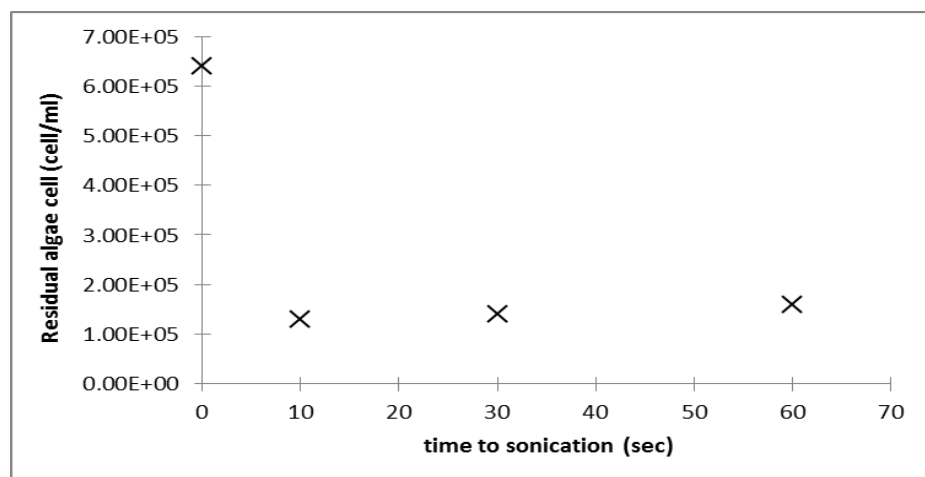
สายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* sp.

จากการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.24 พบว่าปริมาณเซลล์สาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Scenedesmus* sp. ลดลงรวดเร็วที่ระยะเวลาสัมผัส 10 วินาที เริ่มต้นประมาณ 10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร เหลือประมาณ 10^5 เซลล์ต่อมิลลิลิตร และเมื่อให้ระยะเวลาที่ยาวนานขึ้นในช่วงระยะเวลา 30 วินาที ถึง 1 นาที พบว่าปริมาณเซลล์สาหร่ายมีการลดลงอีกเล็กน้อย แต่ในช่วงระยะเวลาสัมผัสนาน 1 นาที พบว่าเซลล์เริ่มมีการแตกของเซลล์สาหร่าย *Scenedesmus* sp. ซึ่งส่งผลในด้านลบต่อการตกตะกอน



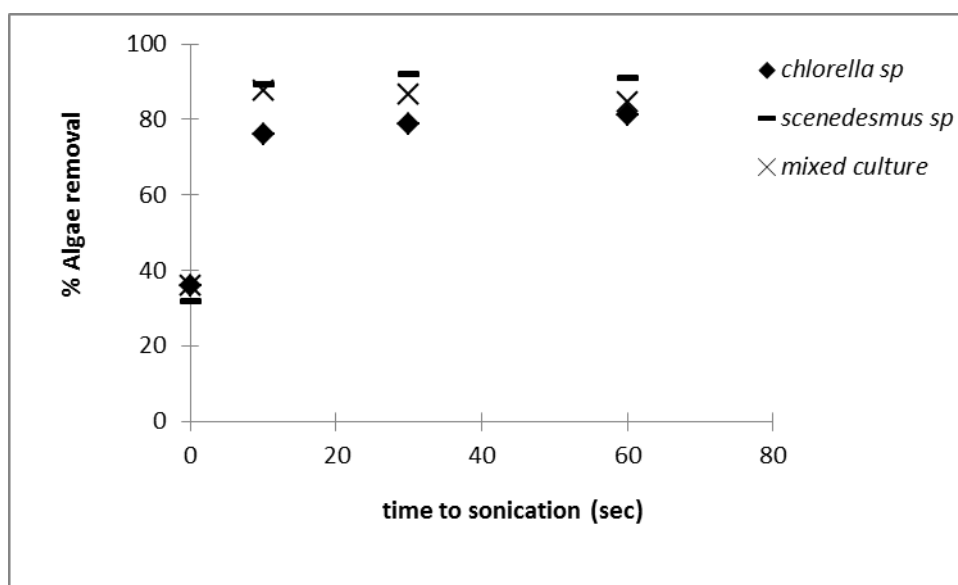
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการให้คลื่นเสียงที่เวลาต่างๆ ระดับพลังงาน 60 วัตต์ (0.0035 W/ml) ปริมาณ Alum 40 mg/l กับปริมาณสาหร่ายสายพันธุ์ *Scenedesmus sp.*

จากการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.25 พบว่าปริมาณเซลล์สาหร่ายผลลดลงรวดเร็วในช่วงระยะเวลาสัมผัส 10 ถึง 30 วินาที เริ่มต้นประมาณ 10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร เหลือประมาณ 1.5×10^5 เซลล์ต่อมิลลิลิตร และเมื่อให้ระยะเวลาที่ยาวนานขึ้นนาน 1 นาที พบว่าปริมาณเซลล์สาหร่ายไม่เกิดการรวมกลุ่มและในช่วงระยะเวลาสัมผัสนาน 1 นาที พบว่าเซลล์สาหร่ายเริ่มมีการแตกของเซลล์สาหร่ายผสม ซึ่งส่งผลในด้านลบต่อการตกตะกอน



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการให้คลื่นเสียงที่เวลาต่างๆ ระดับพลังงาน 60 วัตต์ (0.0035 W/ml) ปริมาณ Alum 40 mg/l กับ ปริมาณสาหร่ายผสม

ประสิทธิภาพการกำจัดแสดงดังรูปที่ 4.26 พบว่าเซลล์สาหร่ายทั้ง 3 ตัวอย่าง ลดลงได้ดี ระยะเวลาการสัมผัส 10 วินาที ระดับพลังงาน 60 วัตต์ (0.0035 W/ml) ความเข้มข้น Alum ที่ 40 mg/l as $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ สามารถลดปริมาณเซลล์สาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* sp. ได้สูงสุดร้อยละ 78 ลดปริมาณเซลล์สาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Scenedesmus* sp. ได้ร้อยละ 89 และสามารถลดปริมาณเซลล์สาหร่ายผสมได้ร้อยละ 87 เมื่อเทียบกับตัวอย่างสาหร่ายที่ไม่ผ่านกระบวนการกำจัด ที่ระยะเวลาการสัมผัสที่ 1 นาที พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดลดลงเล็กน้อย เนื่องจากเซลล์สาหร่ายไม่เกิดการรวมตัวและตกตะกอน

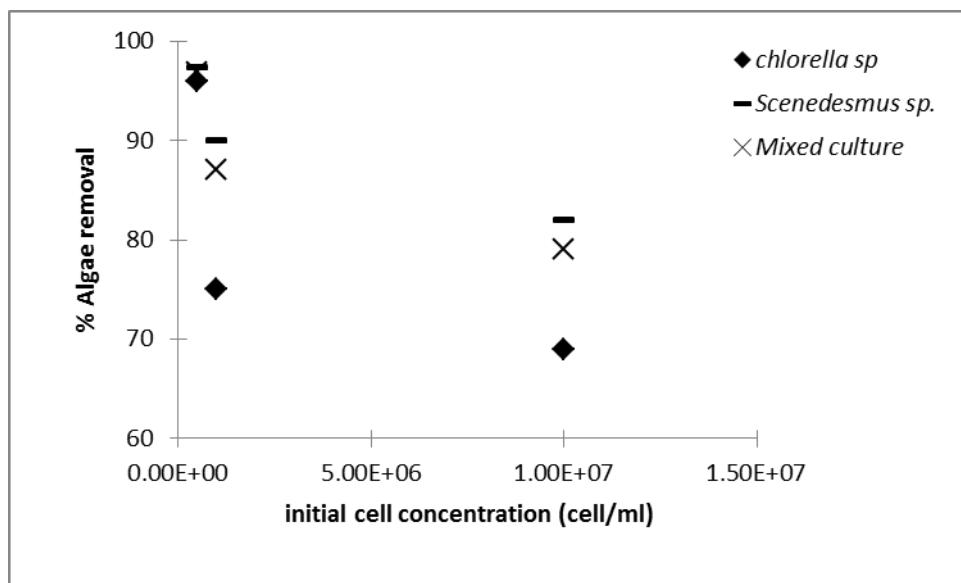


รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการให้คลื่นเสียงที่เวลาต่างๆ ระดับพลังงาน 60 วัตต์ (0.0035 W/ml) ปริมาณ Alum 40 mg/l กับ ประสิทธิภาพการกำจัด

ดังนั้นที่ระยะเวลาการสัมผัส 10 วินาที ระดับพลังงาน 60 วัตต์ (0.0035 W/ml) ความเข้มข้น Alum ที่ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอนเซลล์สาหร่ายออกจากน้ำ

4.9 ศึกษาผลความเข้มข้นของสาหร่ายที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายเลี้ยงในห้องปฏิบัติการ

ประสิทธิภาพการกำจัดแสดงดังรูปที่ 4.27 พบว่าเซลล์สาหร่ายทั้ง 3 ตัวอย่าง ปริมาณเซลล์สาหร่ายสี่ตัวอย่างทั้ง 3 ตัวอย่างมีแนวโน้มเดียวกันคือ เมื่อปริมาณเซลล์สาหร่ายเริ่มต้นมีน้อยที่ 5×10^5 เซลล์ต่อมิลลิลิตร จะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูง และเมื่อเทียบกับความเข้มข้นของเซลล์สาหร่ายเพิ่มขึ้นต่างกัน 10 เท่า จะทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลงประมาณร้อยละ 10 ซึ่งอาจสรุปได้ว่าปริมาณเซลล์สาหร่ายที่เพิ่มสูงขึ้นในช่วง 10^9 ถึง 10^{10} เซลล์ต่อมิลลิลิตร มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



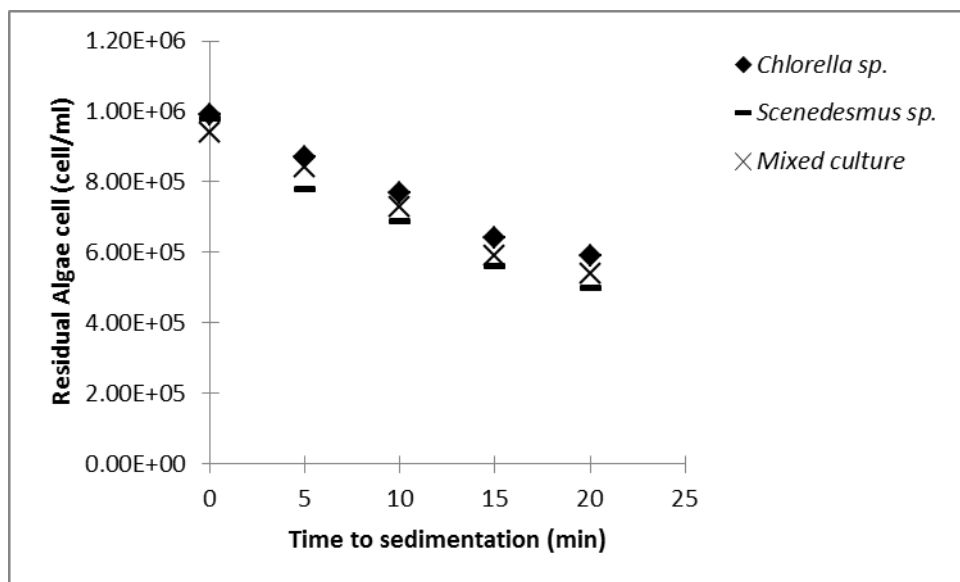
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นสาหร่ายกับ ประสิทธิภาพการกำจัด

4.10 การทดลองตกตะกอนเซลล์สาหร่ายโดยทำการเก็บตัวอย่างเทียบกับเวลาการตกตะกอน

การใช้คลื่นอัลตราซาวด์เพียงอย่างเดียว ใสน้ำตัวอย่างลงในอ่างอัลตราซาวด์ ให้ความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ พลังงานเสียง 60 วัตต์ (0.0035 W/ml) ทิ้งให้ตกตะกอน 20 นาที เก็บตัวอย่างทุก 5 นาที นับเซลล์สาหร่ายและคำนวณปริมาณเซลล์สาหร่าย

จากการทดลองพบว่าแนวโน้มของสาหร่ายทั้ง 2 ชนิดและสาหร่ายผสม มีแนวโน้มเช่นกันคือเมื่อระยะเวลาการตกตะกอนที่ยาวนานขึ้น ปริมาณเซลล์สาหร่ายมีแนวโน้มค่อยๆ ลดลงตาม

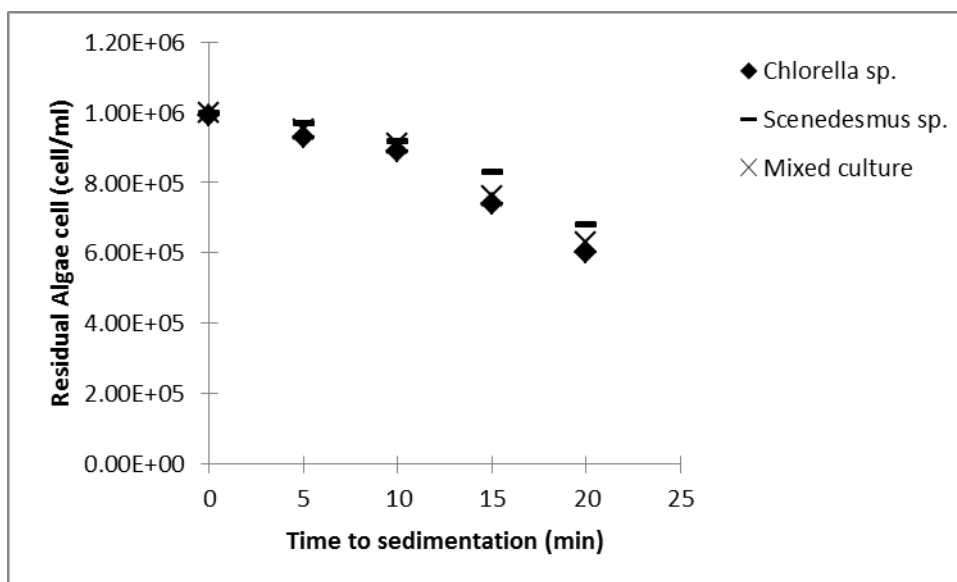
เวลาการตกตะกอน แสดงดังรูปที่ 4.28 หลังจากผ่านกระบวนการอัลตราซาวด์ทำให้สาหร่ายสูญเสียสภาพการลอยตัวในน้ำตัวอย่าง



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการตกตะกอน ระยะเวลาการให้คลื่นเสียง 30 วินาที ระดับพลังงาน 60 วัตต์ (0.0035 W/ml) กับปริมาณสาหร่าย

การใช้ Alum ในการตกตะกอน เติมปริมาณ Alum ในปริมาณที่ 40 mg/l as $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ กวนเร็วที่ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที นาน 1 นาที กวนช้าที่ความเร็วรอบ 30 รอบ/นาที นาน 10 นาที ทิ้งให้ตกตะกอน 20 นาที เก็บตัวอย่างทุก 5 นาที นับเซลล์สาหร่ายและคำนวณปริมาณเซลล์สาหร่าย

จากการทดลองพบว่าแนวโน้มของสาหร่ายทั้ง 2 ชนิดและสาหร่ายผสม มีแนวโน้มเช่นกัน คือเมื่อทำการตกตะกอนด้วยเคมี หลังจากผ่านกระบวนการตกตะกอนทางเคมีทำให้เซลล์สาหร่ายรวมตัวเป็นกลุ่ม (floc) ระยะเวลาการตกตะกอนที่ยาวนานขึ้น ปริมาณเซลล์สาหร่ายมีแนวโน้มค่อยๆ ลดลงตามเวลาการตกตะกอน แสดงดังรูปที่ 4.29 นอกจากนี้สำหรับสาหร่ายพันธุ์ *Scenedesmus sp.* ซึ่งสามารถลอยตัวกลับขึ้นมาได้ เนื่องจากเซลล์ของสาหร่ายชนิดนี้มีหนวดช่วยในการหมุนตัว (Flotation spine) เพื่อลอยตัวในน้ำ หลังจากที่มีการเติมสารเคมีและทิ้งให้ตกตะกอน

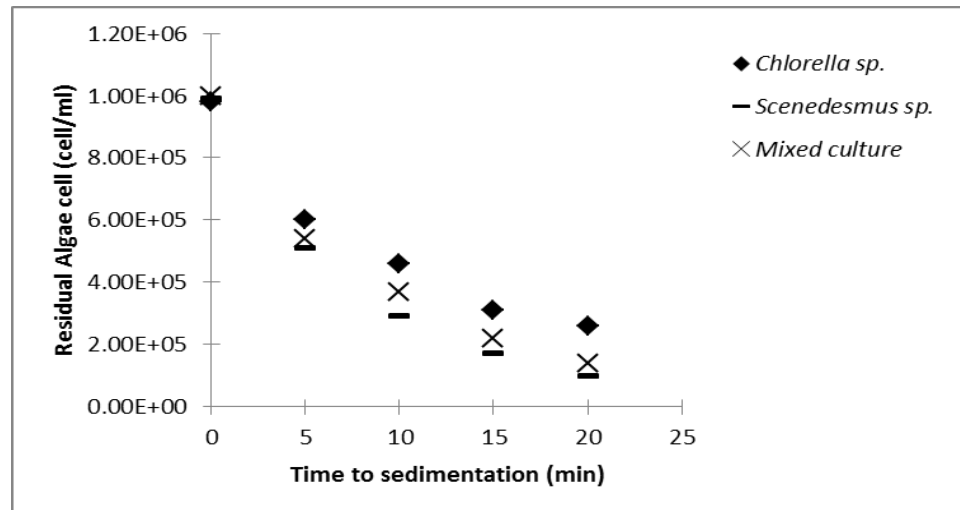


รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการตกตะกอน ปริมาณ Alum 40 mg/l กับปริมาณสาหร่าย

การใช้คลื่นอัลตราซาวด์ ร่วมกับ Alum ในการตกตะกอนสาหร่าย ใสน้ำตัวอย่างลงในอ่างอัลตราซาวด์เติมปริมาณ Alum ในปริมาณที่เหมาะสมให้ความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ พลังงานเสียง 60 วัตต์ (0.0035 W/ml) ที่ให้ตกตะกอน 20 นาที เก็บตัวอย่างทุก 5 นาทีนับเซลล์สาหร่ายและคำนวณปริมาณเซลล์สาหร่าย

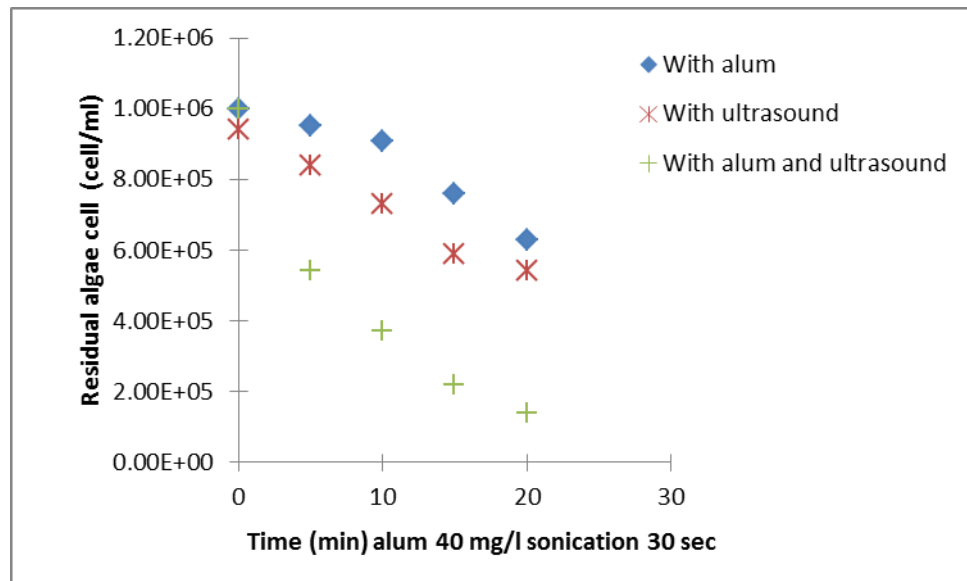
จากการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.30 พบว่าแนวโน้มของสาหร่ายทั้ง 2 ชนิดและสาหร่ายผสมมีแนวโน้มเช่นกัน คือหลังจากผ่านกระบวนการตกตะกอนทางเคมีทำให้เซลล์สาหร่ายรวมตัวเป็นกลุ่ม หลังจากผ่านกระบวนการอัลตราซาวด์ทำให้สาหร่ายสูญเสียสภาพการลอยตัวในน้ำตัวอย่าง ระยะเวลาการตกตะกอนที่ยาวนานขึ้นปริมาณเซลล์สาหร่ายมีแนวโน้มค่อยๆลดลงตามเวลาการตกตะกอน

นอกจากนี้สำหรับสาหร่ายพันธุ์ *Scenedesmus sp.* ซึ่งสามารถลอยตัวกลับขึ้นมาได้หลังจากที่มีการเติมสารเคมีและทิ้งให้ตกตะกอน พบว่าเมื่อทำการตกตะกอนร่วมกับการใช้อัลตราซาวด์นั้น สาหร่ายไม่มีการลอยตัวขึ้นหลังจากตกตะกอน ซึ่งการกลับขึ้นมาลอยนี้อาจจะทำให้เกิดปัญหาได้สำหรับระบบการผลิตน้ำประปา เนื่องจากตะกอนที่ลอยขึ้นมาอาจจะผ่านไปกับน้ำใสแล้วติดอยู่ในระบบกรองได้



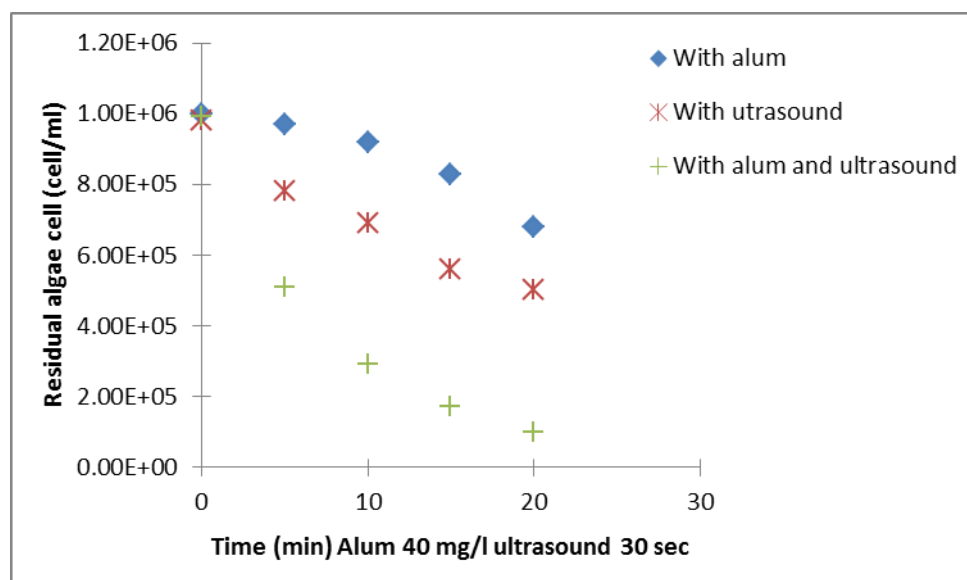
รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการตกตะกอน ปริมาณ Alum 40 mg/l เวลาการให้คลื่นเสียง 30 วินาที กับ ปริมาณสาหร่าย

จากการทดลองพบว่าแนวโน้มของสาหร่ายทั้ง 2 ชนิดและสาหร่ายผสม มีแนวโน้มเช่นกัน คือการทดลองโดยใช้ Alum ในการตกตะกอน มีแนวโน้มการตกตะกอนลดลงอย่างช้าๆ ตามระยะเวลาการตกตะกอน เซลล์สาหร่ายที่ผ่านกระบวนการตกตะกอนทางเคมีทำให้เซลล์สาหร่ายรวมตัวเป็นกลุ่ม (floc) และตกตะกอน ทั้งนี้การตกตะกอนของสาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Scenedesmus sp.* มีการตกตะกอนที่ช้า เนื่องจากภายในเซลล์ของสาหร่ายชนิดนี้มี Flotation spine ใช้ในการหมุนตัวลอยในน้ำ หรืออาจมีแก๊สแวกคิลโอช่วยในการพองตัวให้ลอยได้ดีในน้ำ เมื่อเทียบกับเซลล์สาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris sp.* ที่ภายในเซลล์ไม่พบองค์ประกอบของ Flotation spine และแก๊สแวกคิลโอภายในเซลล์ ทำให้เซลล์สาหร่ายชนิดนี้ตกตะกอนได้ดีกว่าสาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Scenedesmus sp.* เมื่อพิจารณาเซลล์หลังจากหลังจากผ่านกระบวนการอัลตราซาวด์ โดยสาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Scenedesmus sp.* จะถูกทำลายได้ง่ายเนื่องจากผนังเซลล์ที่บางและขนาดเซลล์ที่ใหญ่ทำให้เซลล์อ่อนแอ สูญเสียสภาพการลอยตัวในน้ำ ตัวอย่าง ทำให้ระยะเวลาการตกตะกอนของสาหร่ายสั้นลง ในขณะที่สาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris sp.* จะเคลื่อนที่เข้าใกล้กันและจับเป็นกลุ่ม และค่อยๆตกตะกอน จากนั้นทำการทดลองโดยใช้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ร่วมกับการตกตะกอนทางเคมีพบว่าทำให้ระยะเวลาในการตกตะกอนสั้นลง เนื่องจากกระบวนการอัลตราซาวด์ ทำให้เซลล์สาหร่ายสูญเสียการลอยตัว และเมื่อใช้ Alum เป็นสารช่วยรวมตะกอนด้วย จะทำให้สาหร่ายทั้งสองชนิดตกตะกอนได้เร็วขึ้น และประสิทธิภาพการกำจัดที่สูงขึ้น การตกตะกอนเซลล์สาหร่ายแสดงดังรูปที่ 4.31 4.32 และ 4.33



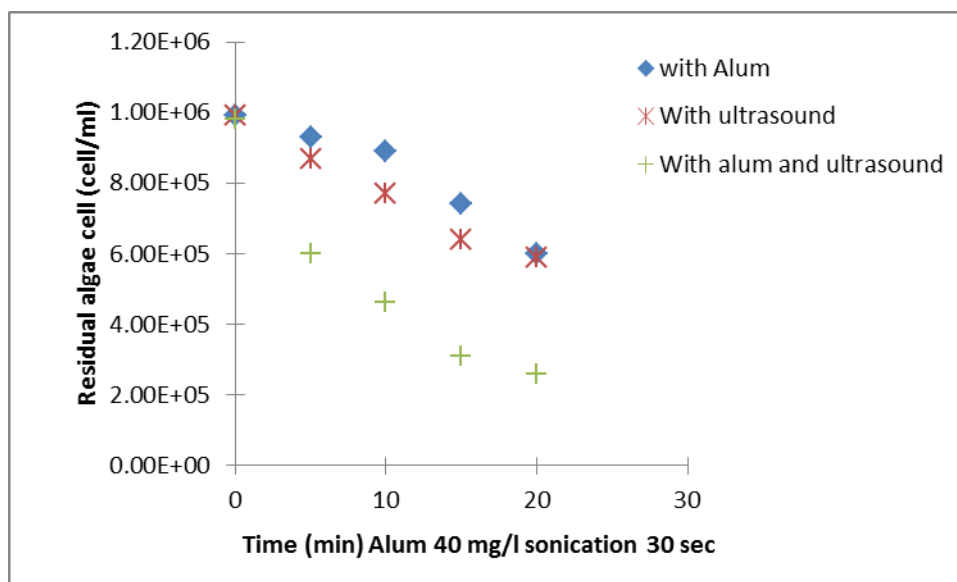
รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการตกตะกอนกับ

ปริมาณของสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella sp.* ที่ผ่านการให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์



รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการตกตะกอนกับ

ปริมาณของสาหร่ายพันธุ์ *Scenedesmus sp.* ที่ผ่านการตกตะกอนทางเคมี

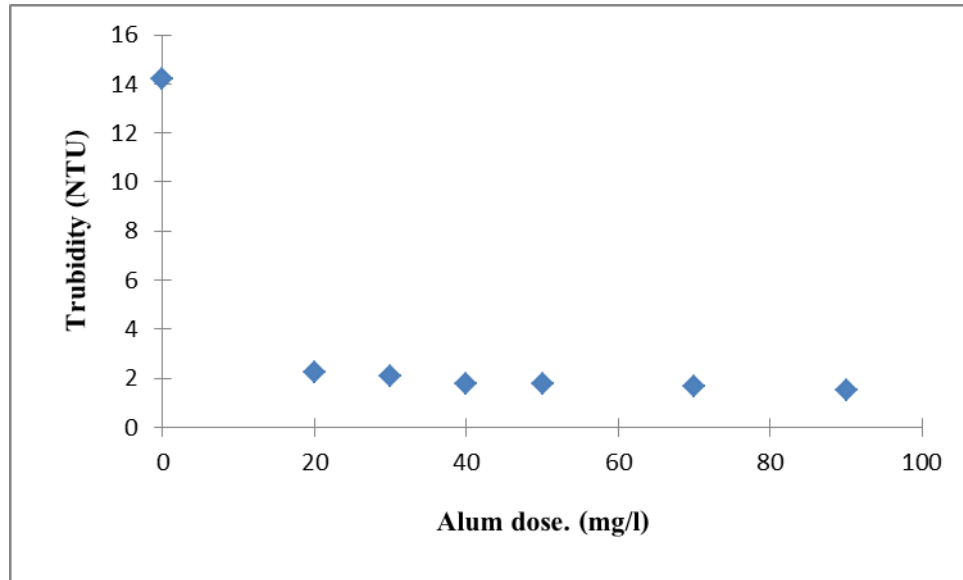


รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการตกตะกอนกับปริมาณสาหร่ายผสมที่ผ่านการให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ร่วมกับการตกตะกอนทางเคมี

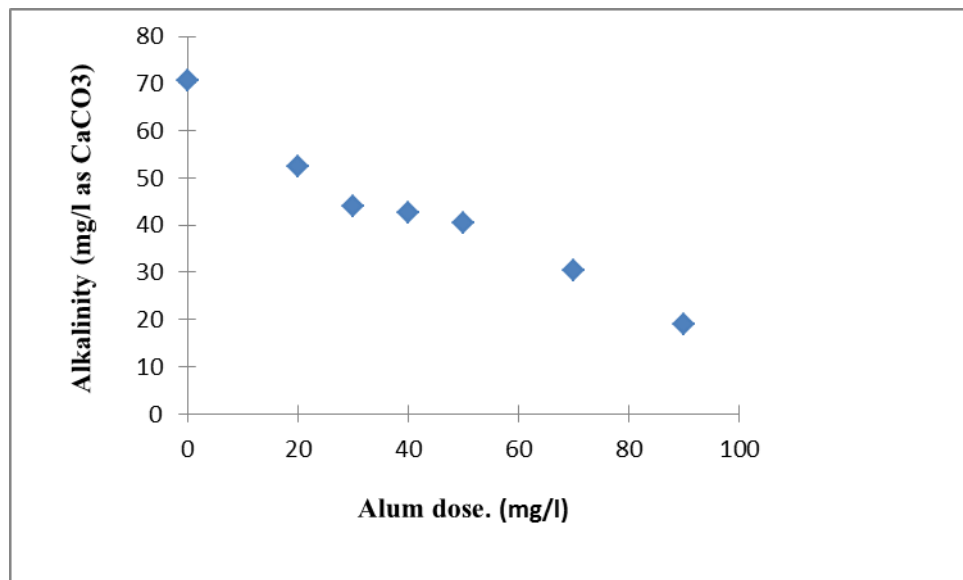
4.11 ผลของการกำจัดสาหร่ายโดยใช้คลื่นอัลตราซาวด์ร่วมกับการตกตะกอนทางเคมีจากน้ำตัวอย่างปนเปื้อนสาหร่ายจากโรงผลิตน้ำประปา

การทดลองนี้ใช้น้ำตัวอย่างที่ปนเปื้อนเซลล์สาหร่ายจากโรงผลิตน้ำประปา ทำการตรวจวัดคุณภาพน้ำดิบที่เข้าโรงผลิตน้ำประปาสามเสน พบว่าน้ำดิบมี pH ประมาณ 7.24 อุณหภูมิน้ำดิบประมาณ 30.3 องศาเซลเซียส ความขุ่นน้ำดิบประมาณ 14.26 NTU ค่าความเป็นด่าง (alkalinity) ประมาณ 70 mg/l as CaCO_3

จากนั้นทำการหาปริมาณ Alum ใช้ในการตกตะกอน เพื่อกำจัดความขุ่นในน้ำดิบ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.34 พบว่าน้ำดิบมีความขุ่นเข้าน้อย จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้ปริมาณ Alum เป็นสารช่วยในการรวมตะกอน ที่ 20 ถึง 40 mg/l as $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ สามารถกำจัดความขุ่นในน้ำเหลือเพียง 2.2 ถึง 1.7 NTU เมื่อพิจารณาปริมาณความเข้มข้น Alum 70 และ 90 mg/l as $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ พบว่าปริมาณความขุ่นเหลือเพียง 1.7 ถึง 1.4 NTU จากรูปที่ 4.40 แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้น Alum ที่ 20 ถึง 40 mg/l as $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ สามารถลดปริมาณความขุ่นได้ร้อยละ 88.08 สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Heng และคณะ, 2009) พบว่าความขุ่นน้ำดิบหลังการตกตะกอนทางเคมีด้วย ฟอริคคอลลอยด์ (FeCl_3) ความขุ่นลดลงร้อยละ 85.6 เมื่อพิจารณาค่าความเป็นด่างหลังจากตกตะกอนด้วย Alum ที่ 20 ถึง 40 mg/l as $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ พบว่าปริมาณความเป็นด่างลดลงเหลือ 52.5 ถึง 42.5 mg/l as CaCO_3 จากความเข้มข้นเริ่มต้น 70.5 mg/l as CaCO_3 ดังรูปที่ 4.35

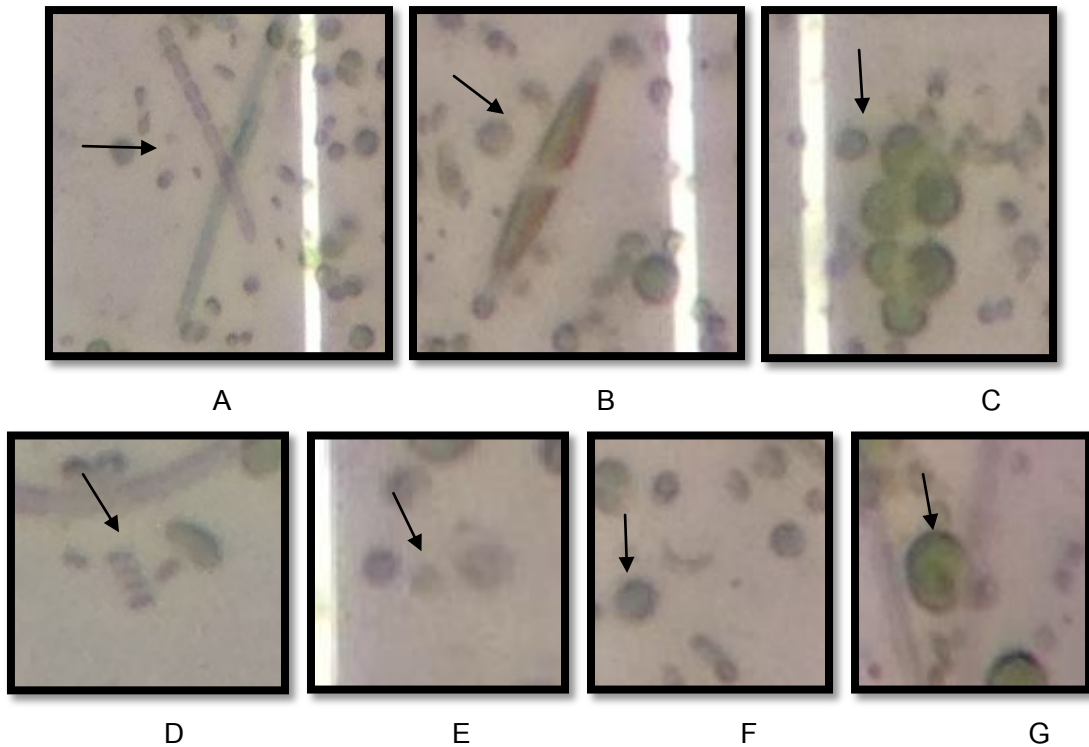


รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Alum กับความขุ่น



รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Alum กับค่าความเป็นด่าง (Alkalinity)

เมื่อนำน้ำดิบจากโรงผลิตน้ำประปาสามเสน เลี้ยงด้วยอาหาร N8 และให้แสงตลอดเวลาเป็นเวลา 7 วัน พบว่าสาหร่ายที่พบมาก คือสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *cyanobacteria* (*Blue-green Algae*) สาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* sp. *Monoraphidium* sp. *Botryococcus* sp. *Scenedesmus* sp. และ *Chlamydomonas* sp. และสาหร่ายกลุ่มไดอะตอม *Navicula* sp. แสดงดังรูปที่ 4.36 จากนั้นทำการทดลองตกตะกอนเซลล์สาหร่ายในตัวอย่างน้ำดิบ



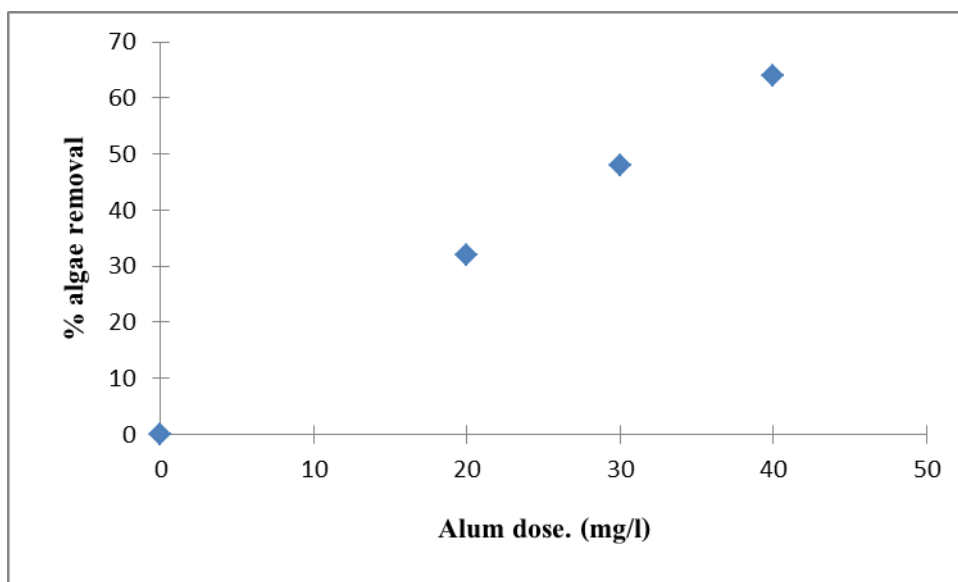
รูปที่ 4.37 สาหร่ายในน้ำดิบประปาสามเสน (กำลังขยาย 40 เท่า)

(A) cyanobacteria (B) *Navicula* sp. (C) *Botryococcus* sp. (D) *Scenedesmus* sp.

(E) *Chlorella vulgaris* sp. (F) *Monoraphidium* sp. (G) *Chlamydomonas* sp.

4.12 ผลของการกำจัดสาหร่ายโดยการตกตะกอนทางเคมีจากน้ำตัวอย่างปนเปื้อนสาหร่ายจากโรงผลิตน้ำประปา

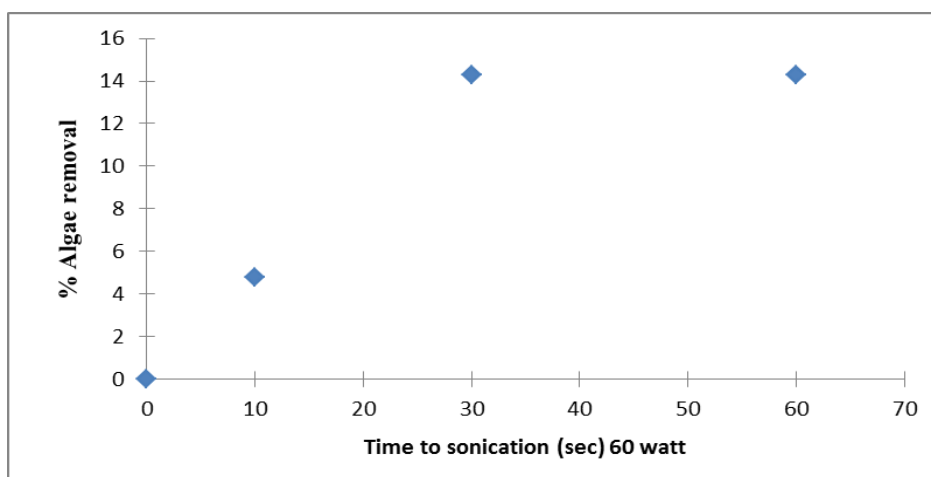
โดยน้ำตัวอย่างเซลล์สาหร่ายเริ่มต้น 0.025 มิลลิกรัมเซลล์ต่อมิลลิลิตร ทำการเติม Alum ที่ความเข้มข้น 0 20 30 และ 40 mg/l as $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ พบว่าที่ความเข้มข้น Alum 40 mg/l as $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ สามารถกำจัดเซลล์สาหร่ายในน้ำเหลือเพียง 0.009 มิลลิกรัมเซลล์ต่อมิลลิลิตร คิดประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 64 แสดงดังรูปที่ 4.38



รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Alum กับประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย

4.13 ผลของระยะเวลาในการใช้คลื่นอัลตราซาวด์ เพื่อกำจัดสาหร่ายจากน้ำตัวอย่างปนเปื้อนสาหร่ายจากโรงผลิตน้ำประปา

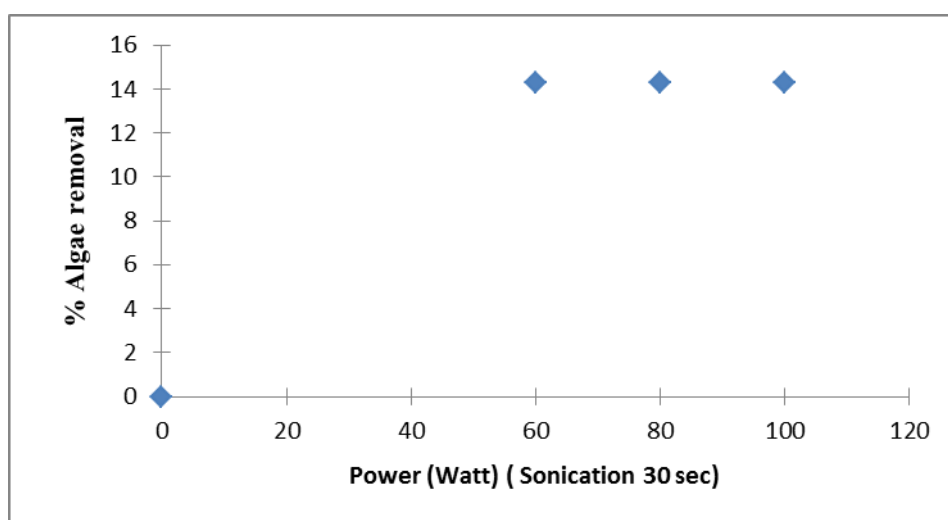
จากนั้นทำการทดลองตกตะกอนเซลล์สาหร่ายในตัวอย่างน้ำดิบ โดยน้ำตัวอย่างเซลล์สาหร่ายเริ่มต้น 0.021 มิลลิกรัมเซลล์ต่อมิลลิลิตร ทำการให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ที่ระยะเวลา 0 10 30 และ 60 วินาที ระดับพลังงาน 60 วัตต์ (0.0035 W/ml) ที่เวลา 30 วินาทีสามารถกำจัดเซลล์สาหร่ายในน้ำเหลือเพียง 0.018 มิลลิกรัมเซลล์ต่อมิลลิลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 14.28 แสดงดังรูปที่ 4.39



รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการให้คลื่นเสียงที่ระดับพลังงาน 60 วัตต์ (0.0035 W/ml) กับประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย

4.14 ผลของพลังงานในการใช้คลื่นอัลตราซาวด์ เพื่อกำจัดสาหร่ายจากน้ำตัวอย่างปนเปื้อนสาหร่ายจากโรงผลิตน้ำประปา

จากนั้นทำการทดลองตกตะกอนเซลล์สาหร่ายในตัวอย่างน้ำดิบ โดยน้ำตัวอย่างเซลล์สาหร่ายเริ่มต้น 0.021 มิลลิกรัมเซลล์ต่อมิลลิลิตร ทำการให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ที่ระยะเวลา 30 วินาที ระดับพลังงาน 60 80 และ 100 วัตต์ (0.01 W/ml) ที่ระดับพลังงาน 60 วัตต์ (0.0035 W/ml) สามารถกำจัดเซลล์สาหร่ายในน้ำเหลือเพียง 0.018 มิลลิกรัมเซลล์ต่อมิลลิลิตร คิดประสิทธิผลการกำจัดร้อยละ 14.28 แสดงดังรูปที่ 4.40

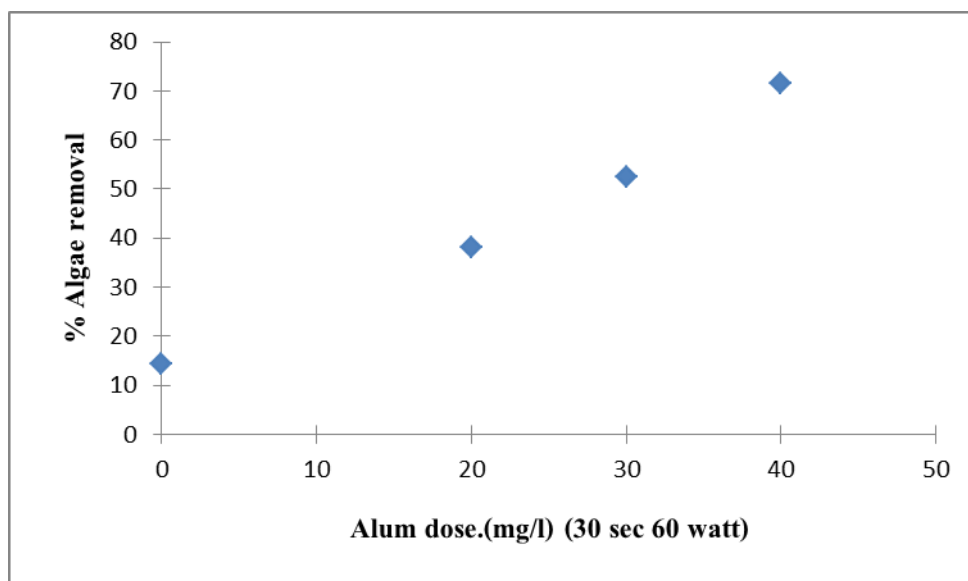


รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับพลังงาน ระยะเวลาการให้คลื่นเสียง 30 วินาที กับประสิทธิผลการกำจัดสาหร่าย

4.15 ผลของการกำจัดสาหร่ายโดยใช้คลื่นอัลตราซาวด์ร่วมกับการตกตะกอนทางเคมีจากน้ำตัวอย่างปนเปื้อนสาหร่ายจากโรงผลิตน้ำประปา

จากนั้นทำการทดลองตกตะกอนเซลล์สาหร่ายในตัวอย่างน้ำดิบ โดยน้ำตัวอย่างเซลล์สาหร่ายเริ่มต้น 0.021 มิลลิกรัมเซลล์ต่อมิลลิลิตร ทำการให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ที่ระยะเวลา 30 วินาที ระดับพลังงาน 60 วัตต์ (0.0035 W/ml) ปริมาณ Alum ที่ 0 20 30 และ 40 mg/l as $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ แสดงดังรูปที่ 4.41 โดยพบว่าที่ระยะเวลาการให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ที่ระยะเวลา 30 วินาที ระดับพลังงาน 60 วัตต์ (0.0035 W/ml) ปริมาณความเข้มข้น Alum ที่ 40 mg/l as $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ สามารถกำจัดเซลล์สาหร่ายในน้ำเหลือเพียง 0.006 มิลลิกรัมเซลล์ต่อมิลลิลิตร คิดประสิทธิผลการกำจัดร้อยละ 71.42 ผลที่ได้ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ (Heng และ คณะ, 2009) พบว่าประสิทธิผลการกำจัดสาหร่ายในน้ำดิบ เมื่อทำการให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์

ร่วมกับการตกตะกอนทางเคมี ทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้นเป็นร้อยละ 83.5 ที่ระดับพลังงาน 60 วัตต์ (0.0035 W/ml) ความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ เป็นเวลา 15 วินาที



รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Alum ที่ระดับพลังงาน 60 วัตต์ (0.0035 W/ml) ระยะเวลาการให้คลื่นเสียง 30 วินาที กับประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย

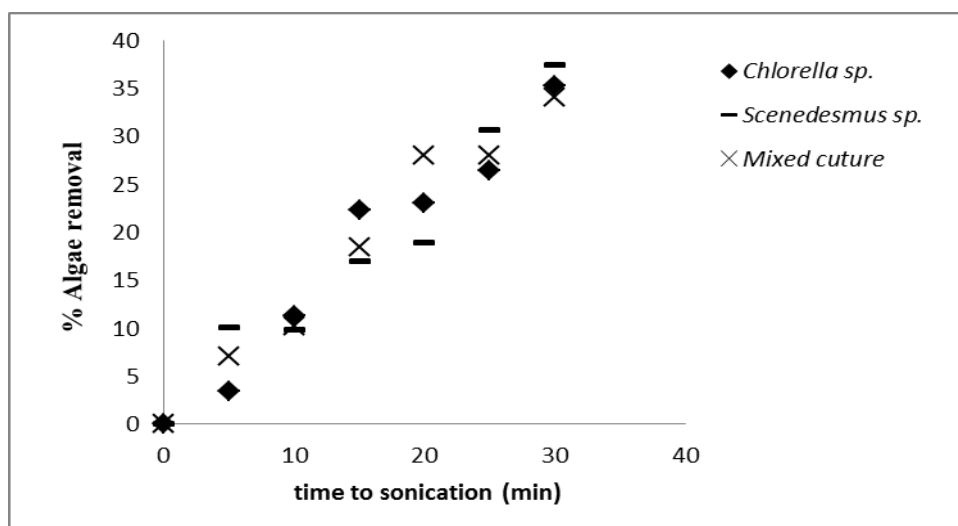
จากการทดลองพบว่าที่เวลา 30 วินาทีการให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ ระดับพลังงาน 60 วัตต์ (0.0035 W/ml) ปริมาณความเข้มข้น Alum ที่ 40 mg/l as $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ เป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการตกตะกอนสาหร่ายในระบบผลิตน้ำประปา เนื่องจากที่เวลา 30 วินาที ความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ ระดับพลังงาน 60 วัตต์ (0.0035 W/ml) ช่วยในการตกตะกอนทำให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนทางเคมีเพิ่มสูงขึ้น พร้อมทั้งยังสามารถควบคุมปริมาณสารอินทรีย์ให้ลดลงได้ และที่เวลา 10 วินาที ความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ ระดับพลังงาน 120 วัตต์ (0.014 W/ml) ส่งผลด้านลบต่อการตกตะกอน เนื่องจากสภาวะดังกล่าวจะทำให้เซลล์สาหร่ายแตก ไม่เหมาะสมเนื่องจากจะทำให้สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินปล่อยสารพิษไมโครซิสติน (Microcystin) ลงสู่แหล่งน้ำ ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง (Heng และคณะ, 2009) ทั้งนี้ยังพบว่าที่ระดับพลังงาน 60 วัตต์ (0.0035 W/ml) และ 90 วัตต์ สามารถลดปริมาณสารพิษไมโครซิสตินลงร้อยละ 12 และ 4 ตามลำดับ (Ma และคณะ, 2005)

4.16 ผลของการกำจัดสาหร่ายในอ่างอัลตราซาวด์ขนาด 30×80×50 เซนติเมตร

การทดลองนี้ได้ทำการทดลองกับสาหร่าย 3 ตัวอย่าง คือสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* sp., *Scenedesmus* sp. และสาหร่ายผสม ที่ความเข้มข้น 10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร น้ำสาหร่ายที่เลี้ยงในห้องปฏิบัติการ ใส่น้ำตัวอย่างลงในอ่างอัลตราซาวด์ 30 ลิตร ใช้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ความถี่ 40 กิโลเฮิรตซ์ ระดับพลังงาน 100 วัตต์ (0.0023 W/ml) เวลาในการเดินระบบ 0 5 10 15 20 25 และ 30 นาที ตรวจนับเซลล์สาหร่าย

จากการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.42 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดเซลล์สาหร่ายทั้ง 3 กลุ่มตัวอย่าง มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการสัมผัสของคลื่นเสียงอัลตราซาวด์ พบว่าที่ระยะเวลา 30 นาที สาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Scenedesmus* sp. สามารถตกตะกอนได้ดีที่สุด รองลงมาคือสาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* sp. และสาหร่ายผสม ประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 37.40 35.22 และ 33.96 ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการศึกษาระยะเวลาการให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ความถี่ 40 กิโลเฮิรตซ์ ระดับพลังงาน 100 วัตต์ ในถังขนาด 10 ลิตร กับถังขนาด 120 ลิตร ที่ความถี่และกำลังวัตต์ที่เท่ากัน พบว่าในถังขนาด 10 ลิตร ให้ประสิทธิภาพการกำจัด *Scenedesmus* sp. *Chlorella vulgaris* sp. และ Mixed culture สูงกว่าถังขนาด 120 ลิตร ร้อยละ 42.8 5.88 และ 11.44 ตามลำดับ เนื่องจากระดับพลังงานของถังขนาด 10 ลิตร มีระดับพลังงานที่สูงกว่าถังขนาด 120 ลิตร ประมาณ 0.0077 W/ml แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายขึ้นกับระดับพลังงานของคลื่นเสียงอัลตราซาวด์

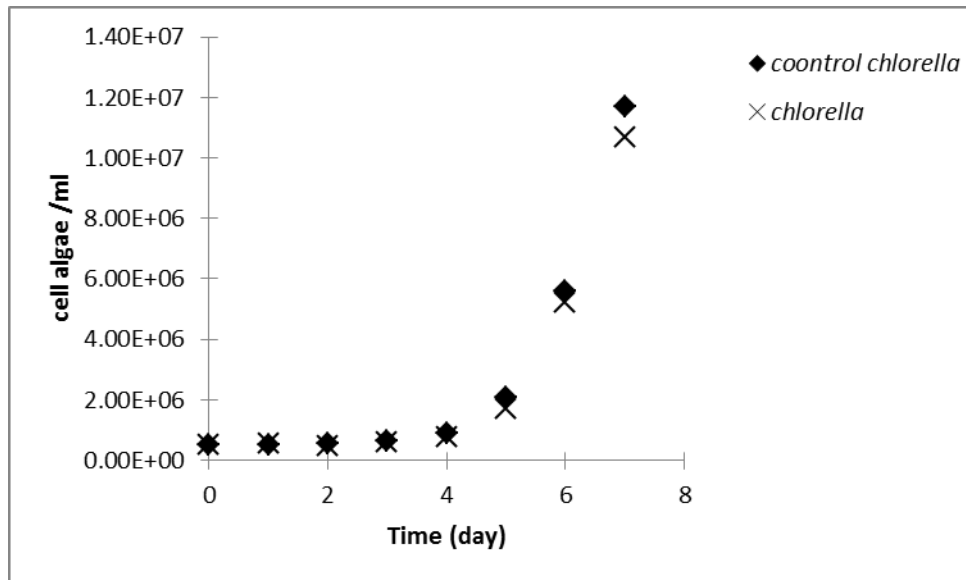


รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระยะเวลาการให้คลื่นเสียง ที่ระดับพลังงาน 100 วัตต์ (0.01 W/ml) กับประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย

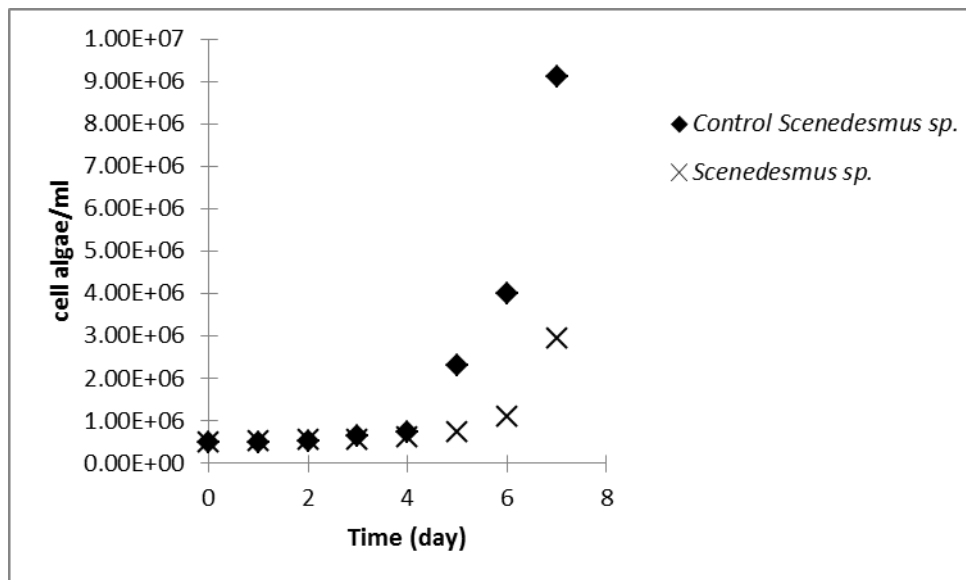
4.17 ผลของการเจริญเติบโตของเซลล์สาหร่ายที่ผ่านการอัลตราซาวด์ในอ่างอัลตราซาวด์ขนาด 30×80×50 เซนติเมตร

การทดลองนี้ได้ทำการทดลองกับสาหร่าย 3 ตัวอย่าง คือสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* sp., *Scenedesmus* sp. และสาหร่ายผสม ที่ความเข้มข้น 10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร นำเซลล์สาหร่ายที่ผ่านการอัลตราซาวด์จากหัวข้อ 4.10 จำนวน 1 ลิตร เซลล์เริ่มต้น 5×10^5 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ใส่ลงในถังเลี้ยงสาหร่ายที่เติมอาหารเลี้ยงสาหร่าย ปริมาตร 3 ลิตร เลี้ยงสาหร่าย 7 วัน นับเซลล์สาหร่าย เปรียบเทียบกับสาหร่ายที่ไม่ผ่านการอัลตราซาวด์

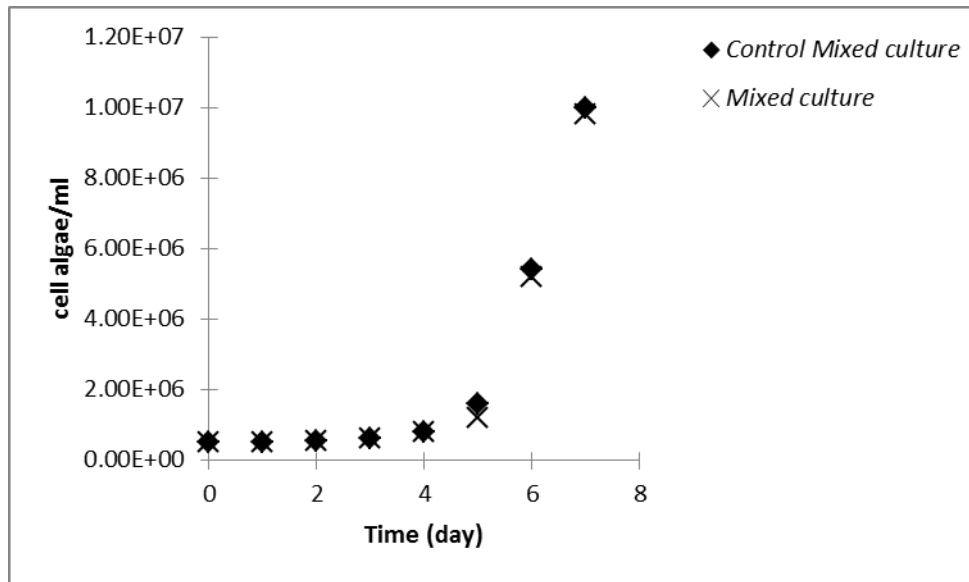
ผลการทดลองเลี้ยงสาหร่ายที่ผ่านกระบวนการอัลตราซาวด์ พบว่าสาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* sp. และสาหร่ายผสม มีการเจริญเติบโตไม่แตกต่างกับน้ำตัวอย่างที่ไม่ผ่านกระบวนการให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ แสดงดังรูปที่ 4.43 และ 4.45 เนื่องจากการอัลตราซาวด์จะส่งผลให้สาหร่ายสายพันธุ์นี้รวมกลุ่มและตกตะกอน ซึ่งไม่ได้ทำลายโครงสร้างภายในเซลล์ของสาหร่าย เนื่องจากสาหร่ายสาพันธุ์นี้มีผนังเซลล์ที่หนายากต่อการทำลายโดยฟองแก๊สคาวิเทชัน อีกทั้งสาหร่ายนี้ไม่มีแก๊สแควคิลโอที่ไวต่อการทำลายของฟองแก๊สคาวิเทชัน (Rajasekhar และคณะ, 2012) พิจารณาสาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Scenedesmus* sp. แสดงดังรูปที่ 4.44 พบว่าสาหร่ายถูกทำลายโครงสร้างภายในได้ง่ายเนื่องจากมีผนังเซลล์บางและมีขนาดใหญ่ต่อการทำลายโดยฟองแก๊สคาวิเทชัน เนื่องจากฟองแก๊สคาวิเทชันทำให้ไฟโคไซยานิน (Phycocyanins) ลดลง ซึ่งเป็นแอนเทนน่า คอมเพล็กซ์ (Antenna complex) เป็นส่วนของกระบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายที่ความยาวคลื่นแสง 470 ถึง 650 นาโนเมตร ลดลง 44.8 เปอร์เซ็นต์ หลังการอัลตราซาวด์การลดของเซลล์สาหร่าย เกิดจากกระบวนการยุบตัวแตกตัวของคาวิเทชันแก๊ส ทำให้เซลล์สาหร่ายตายและยับยั้งแอนเทนน่า คอมเพล็กซ์ ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย ทำให้สาหร่ายหยุดการเจริญเติบโต Zhang และคณะ, (2006) ซึ่งอัตราการเจริญเติบโตจะเจริญเติบโตกลับในน้ำได้น้อยกว่าเมื่อเทียบกับเซลล์สาหร่ายที่ไม่ผ่านกระบวนการอัลตราซาวด์ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Rajasekhar และคณะ, (2012) ที่ว่าเมื่อทำการให้ระดับพลังงานคลื่นเสียงอัลตราซาวด์ และระยะเวลาการสัมผัสที่นานขึ้น สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเซลล์สาหร่าย เมื่อโครงสร้างเซลล์สาหร่ายแตกตัวไม่สามารถที่จะฟื้นคืนสภาพและเจริญเติบโตต่อไปได้ พบว่าเมื่อให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ที่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ระยะเวลาสัมผัสนาน 5 นาที ระดับพลังงาน 0.32 วัตต์ต่อมิลลิลิตร ทำการเลี้ยงสาหร่าย 7 วัน เซลล์สาหร่ายเพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 13 เมื่อเทียบกับสาหร่ายที่ไม่ผ่านกระบวนการให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์



รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับ ปริมาณสาหร่าย
สายพันธุ์ *Chlorella vulgaris sp.*



รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับ ปริมาณสาหร่าย
สายพันธุ์ *Scenedesmus sp.*



รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับ ปริมาณสาหร่ายผสม

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาการใช้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ร่วมกับการตกตะกอนทางเคมีเพื่อกำจัดเซลล์สาหร่ายในระบบผลิตน้ำประปา สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ผลของปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟต (Alum) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายเลี้ยงในห้องปฏิบัติการ ความเข้มข้น Alum ที่ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการตกตะกอนเซลล์สาหร่าย และไม่ต้องเพิ่มปริมาณค่าความเป็นด่างให้กับน้ำตัวอย่างอีก
2. ผลของระยะเวลาที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายที่เลี้ยงในห้องปฏิบัติการ ทำการเลือกระยะเวลาสัมผัส 30 วินาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการตกตะกอนเซลล์สาหร่าย
3. ผลของพลังงานเสียงที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายที่เลี้ยงในห้องปฏิบัติการ ระดับพลังงานที่เหมาะสม คือ 60 วัตต์ (0.0035 W/ml)
4. ที่เวลาการให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ยาวนานเกิน 1 นาที จะทำให้เซลล์สาหร่ายแตก
5. ที่เวลาการให้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ยาวนานเกิน 100 วัตต์ จะทำให้เซลล์สาหร่ายแตก
6. ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยใช้คลื่นอัลตราซาวด์ร่วมกับการตกตะกอนทางเคมีจากน้ำตัวอย่างปนเปื้อนสาหร่ายจากโรงผลิตน้ำประปา น้ำดิบจากโรงผลิตน้ำประปาสามเสนปนเปื้อนเซลล์สาหร่ายใน 3 ดิวิชันหลักๆ คือสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *cyanobacteria* (Blue-green Algae) สาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* sp. *Monoraphidium* sp. *Botryococcus* sp. *Scenedesmus* sp. และ *Chlamydomonas* sp. และสาหร่ายกลุ่มไดอะตอม *Navicula* sp. ที่เวลา 30 วินาทีการให้คลื่นเสียง

อัลตราซาวด์ ระดับพลังงาน 60 วัตต์ (0.0035 W/ml) ปริมาณความเข้มข้น Alum ที่ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการตกตะกอนสาหร่ายในระบบผลิตน้ำประปา

7. ศึกษาการเจริญเติบโตของเซลล์สาหร่ายที่ผ่านการอัลตราซาวด์ในอ่างอัลตราซาวด์ สาหร่ายที่มีแก๊สแวกิลไอเป็นองค์ประกอบภายในเซลล์ จะเจริญเติบโตได้ช้าหลังผ่านการบำบัด
8. หากต้องการติดตั้งระบบกำจัดสาหร่ายด้วยกระบวนการใช้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ร่วมกับการตกตะกอนทางเคมี ควรติดตั้งระบบนี้หลังจากกระบวนการตกตะกอนทางเคมี (Coagulation and Flocculation) เนื่องจากจะทำให้ประสิทธิภาพสูงสุดร้อยละ 90.1 โดยพบว่าถ้าหากติดตั้งระบบอัลตราซาวด์ก่อนระบบตกตะกอนทางเคมีจะให้ประสิทธิภาพเพียงร้อยละ 87.5 และเมื่อติดตั้งระบบอัลตราซาวด์ร่วมกับการตกตะกอนทางเคมีจะมีประสิทธิภาพการกำจัดเพียงร้อยละ 74

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ตัวแปรต่างๆ ที่ทำการศึกษา เช่น ปริมาณ Alum ปริมาณ Lime ระยะเวลาการให้คลื่นเสียง และระดับพลังงาน ตัวแปรเหล่านี้เป็นตัวแปรควบคุม ประสิทธิภาพการกำจัด ดังนั้นควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของตัวแปรที่ใช้ออกแบบระบบ ในการใช้งานสำหรับระบบผลิตน้ำประปาจริง
2. ในกรณีหากมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการวัดปริมาณสาหร่าย อาจค้นคว้าหาวิธีการวัดปริมาณเซลล์สาหร่ายด้วยวิธีอื่น นอกจากการนับเซลล์โดยตรง เนื่องจากเป็นวิธีที่นิยม สะดวกง่ายต่อการดำเนินการแต่ก็อาจเกิดข้อผิดพลาดขึ้นได้เนื่องจากการนับเซลล์
3. ในกรณีหากมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการวัดปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของสาหร่ายที่มีจำนวนเซลล์แตกต่างกันน้อย ไม่ควรใช้วิธีการวัดโดยใช้ Spectrophotometer เนื่องจากวิธีนี้จะไม่สามารถบ่งบอกความแตกต่างของจำนวนเซลล์น้อยๆได้ ดังนั้นควรใช้วิธีการวัดโดยใช้ HPLC หรือ Spectrofluorometer ซึ่งจะสามารถบ่งบอกปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ น้อยๆ ได้ดีกว่าวิธี Spectrophotometric

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- การประปานครหลวง. 2543. โรงผลิตน้ำสามเสน-ธนบุรี. กรุงเทพมหานคร. อ้างถึงใน ทันดาว ทองตัน. 2545. สาหร่ายในกระบวนการผลิตน้ำประปาที่โรงผลิตน้ำประปาสามเสน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- การประปานครหลวง. 2553. แผนที่สังเขปแสดงที่ตั้งแหล่งน้ำดิบและโรงผลิตน้ำ. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.mwa.co.th>. [2554, กันยายน 25]
- การประปาส่วนภูมิภาค. 2552. ขั้นตอนการผลิตน้ำประปา. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.pwa.co.th/service/treatment.html>. [2554, กันยายน 25]
- การประปาส่วนภูมิภาค. 2553. ปริมาณสาหร่ายที่สูงขึ้นส่งผลกระทบต่อระบบผลิตน้ำประปา. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.pwa.co.th>. [2554, ตุลาคม 22]
- เจตจันทร์ เศรษฐสิทธิ์. มุมมอง-ตอบ เรื่องสาหร่าย. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.mwa.co.th/download/prd01/article/micro/weed%20faq.pdf>. [2554, พฤศจิกายน 12]
- ทันดาว ทองตัน. 2545. สาหร่ายในกระบวนการผลิตน้ำประปาที่โรงผลิตน้ำประปาสามเสน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธีรพร กงบังเกิด, 2547. การใช้คลื่นอัลตราซาวด์ในกระบวนการแปรรูปอาหาร. กระบวนการแปรรูปอาหาร. มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- ฝ่ายวางแผนการผลิตและควบคุมคุณภาพน้ำ. 2545. อ้างถึงใน ทันดาว ทองตัน. 2545. สาหร่ายในกระบวนการผลิตน้ำประปาที่โรงผลิตน้ำประปาสามเสน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พิษณุพล สงวนนวล. 2543. การศึกษากระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศที่ละลายน้ำเพื่อกำจัดสาหร่ายออกจากน้ำดิบ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มัลลิกา ปัญญาคะโป. 2552. การบำบัดน้ำและน้ำเสียด้วยวิธีทางกายภาพและวิธีทางเคมี. นครปฐม: ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยศิลปากร.

ยูวดี พีรพรพิศาล. 2532. สาหร่าย: Algae. เชียงใหม่: ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยเชียงใหม่. อ้างถึงใน ทันดาว ทองตัน. 2545. สาหร่ายในกระบวนการการผลิตน้ำประปาที่โรงผลิตน้ำประปาสามเสน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ยูวดี พีรพรพิศาล. 2546. สาหร่ายวิทยา. เชียงใหม่: ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ลัดดา วงศ์รัตน์, 2543. แพลงก์ตอนพืช-Phytoplankton. พิมพ์ครั้งที่ 2. ภาควิชาชีววิทยาประมง คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อภาภรณ์ มหาจันทร์, 2541. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับสาหร่าย. ศูนย์เก็บรักษาและรวบรวมข้อมูลจุลินทรีย์ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. (เอกสารไม่ตีพิมพ์) อ้างถึงใน ทันดาว ทองตัน. 2545. สาหร่ายในกระบวนการผลิตน้ำประปาที่โรงผลิตน้ำประปาสามเสน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อภาภรณ์ มหาจันทร์ และคณะ. 2543, สาหร่ายในแหล่งน้ำจืดเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล:

1. องค์ประกอบของชนิด. วารสารการวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 15 มกราคม-เมษายน: 3-20.

ภาษาอังกฤษ

- Ahn, C.-Y., Park, M.-H., Joung, S.-H., Kim, H.-S., Jang, K.-Y., and Oh, H.-M. 2003. Growth inhibition of cyanobacteria by ultrasonic radiation. Laboratory and enclosure studies. 37: 3031-3037
- Ai, W., Guo, S., Qin, L., and Tang, Y. 2008. Development of a ground-based space micro-algae photo-bioreactor. Advances in space research. 41 : 742-747
- Algae bodies, Algae-building bodies from balls. [Online]. 2013. Available on: URL: http://cronodon.com/BioTech/Algal_Bodies.html. [2013, Mar 18]
- Despharma, Working mechanism. [Online]. 2011. Available on: URL: <http://www.despharma.com/research/working-mechanism>. [2011, Dec 15]
- Frizzell, L. A. 1988. Biological effects of acoustic cavitation. In ultrasounds its chemical physical and biological effects. pp. 287-303. New York : VCH Publishers อ้างถึงใน วีรพร กงบังเกิด, 2548. การใช้คลื่นอัลตราซาวด์ในกระบวนการแปรรูปอาหาร. กระบวนการแปรรูปอาหาร. มหาวิทยาลัยนครสวรรค์.
- Hao, H., Wu, M., Chen, Y., Tang, J., and Wu, Q. 2003. Cavitation mechanism in cyanobacterial growth inhibition by ultrasonic irradiation. Colloids and Surfaces. 33: 151-156
- Heng, L., Jun, N., Wen-jie, H., and Guibai, L. 2009. Algae removal by ultrasonic irradiation coagulation. Desalination. 239: 191-197
- Joyce, E.M., Wu, X., and Mason, T.J. 2010. Effect of ultrasonic frequency and power on algae suspensions. Journal of environmental science and health. 45: 863-866
- 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) อ้างถึงใน ทันดาว ทองตัน. 2545. สาหร่ายในกระบวนการผลิตน้ำประปาที่โรงผลิตน้ำประปาสามเสน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สุขภาพและสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Konno, H. 1999. Some issues caused by algae on waterworks in Thailand. Report of research. Department of civil eng.: Tohoku institute of technology.

- Lee, T.J., Nakano, K., Matsumura, M., 2002. A novel strategy for cyanobacterial bloom control by ultrasonic irradiation. Water Science Technology. 46: 207-215
- Ma, B., Chen, Y., Hao, H., Wu, M., Wang, B., Lv, H., and Zhang, G. 2005. Influence of ultrasonic field on microcystins produced by bloom-forming algae. Colloids and Surfaces. 41: 197-201
- Mahvi, A.H., Dehghani M.H. 2005. Evaluation of ultrasonic technology in removal of algae from surface water. Pakistan journal of biological sciences 8, 10: 1457-1459
- Mason, T.J. 1999. Sonochemistry. New York: Oxford University : 1-63
- 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.
- Natural healing store, Algae. [Online]. 2013. Available on: URL: <http://www.tuberose.com>. [2013, March 18]
- Phalla, C. 1997. Problems of water purification caused by algae and their counter measures. Masters thesis of engineering. Asia institute of technology. อ้างถึงใน พันดาว ทองตัน. 2545. สาหร่ายในกระบวนการผลิตน้ำประปาที่โรงผลิตน้ำประปาสามเสน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Rajasekhar. P., Fan. L., Nguyen. T., and Roddick. F. 2012. A review of the use of sonication to control cyanobacterial bloom. Water research. 46 : 4319-4329
- Srisuksomwong, P., N. Whangchai, Y. Yagita, K. Okada, Y. Peerapompisal and N. Nomura, 2011. Effects of ultrasonic irradiation on degradation of microcystin in fish ponds. Int. J. Agric. Biol., 11: 67-70
- Strickland, J.D.H. and Parsons, T.R. 1972. A practical handbook of sea-water analysis. Journal of the Fisheries Research Board of Canada.

- Suslick, K. S. 1993. The chemistry of ultrasound. The year book of science & the future. Encyclopedia Britannica Chicago. อ้างถึงใน ธีรพร กงบังเกิด, 2548. การใช้คลื่นอัลตราซาวด์ในกระบวนการแปรรูปอาหาร. กระบวนการแปรรูปอาหาร. มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- Tang, J.W., Wu, Q.Y., Hao, H.W., Chen, Y., and Wu, M. 2003. Effect of 1.7 MHz ultrasound on a gas-vacuolate cyanobacterium and a gas-vacuole negative cyanobacterium. Colloids and Surfaces. 36: 115-121.
- Kikuchi, T., Uchida, T., 2011. Calorimetric method for measuring high ultrasonic power using water as a heating material. Advanced metro for ultrasound in medicine.
- Wu, X., Joyce, E.M., and Mason, T.J. 2011. The effects of ultrasound on cyanobacteria. Harmful Algae. 10: 738-743.
- Zhang, G., Zhang, P., Wang, B., and Liu, H. 2006 a. Ultrasonic frequency effects on the removal of *Microcystis aeruginosa*. Ultrasonics Sonochemistry. 13: 446-450
- Zhang, G., Zhang, P., Liu, H., and Wang, B. 2006 b. Ultrasonic damages on cyanobacterial photosynthesis. Ultrasonics Sonochemistry. 13: 501-505
- Zhang, G., Zhang, P., and Fan, M. 2009. Ultrasound-enhanced coagulation for *Microcystis aeruginosa* removal. Ultrasonics Sonochemistry. 16: 334-338

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
การวิเคราะห์ตัวอย่าง

การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris*

การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* (พิษณุพล สงวนนวล, 2543)

น้ำสาหร่ายสังเคราะห์ในงานวิจัยนี้ ใช้สาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* sp. และสาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Scenedesmus* sp. ในการสังเคราะห์ โดยได้รับความอนุเคราะห์จาก ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก-1 สูตรอาหาร N-8

สารเคมี	ปริมาณ (มก. ต่อน้ำ 1000 มล.)
$\text{Na}_2\text{HPO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	260.0
K_2HPO_4	740.0
Fe EDTA	10.0
$\text{MgSO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	50.0
KNO_3	1000.0
Trace element*	1.0
Distilled water	1000.0
Trace element*	ปริมาณ (กรัม ต่อลิตร)
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$	3.58
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	12.98
$\text{CuSO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	1.83
$\text{ZnSO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	3.20
Distilled water	1000.0

วิธีการเพาะเลี้ยง

นำหัวเชื้อ (Seed) สาหร่าย 2 สายพันธุ์ ออกมาตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 1 วัน จากนั้นถ่ายหัวเชื้อสาหร่ายลงในภาชนะที่บรรจุน้ำ อาหาร (N8) โดยใช้หัวเชื้อ 1 ส่วน ในน้ำ 10 ส่วน ภาชนะที่ใช้เลี้ยงสาหร่ายในงานวิจัยนี้คือ ถังน้ำขนาด 5 ลิตร เพาะเลี้ยงในสภาวะได้รับแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ตลอดเวลา และมีท่ออากาศจากเครื่องปั๊มอากาศจ่ายอากาศให้กับสาหร่ายที่เลี้ยงไว้ในถังแต่ละใบ

วิธีการนับเซลล์สาหร่าย

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 มม.^2 และมีความลึก 0.100 มม. โดยตัวอย่างของ Haemocytometer counting chamber และพื้นที่ตารางสำหรับนับเซลล์สาหร่าย แสดงดังรูปที่ ก.1 และ ก.2



รูปที่ ก.1 Haemocytometer counting chamber

วิธีการใช้ Haemocytometer counting chamber

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

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

- 2) ถ้าเซลล์สาหร่ายทับเส้นให้เลือกลักษณะใดแบบหนึ่งต่อไปนี้
- ทับเส้นแนวนอน และเส้นแนวขวาให้นับ (ซ้าย-ล่าง ไม่นับ)
 - ทับเส้นแนวกลาง และเส้นแนวซ้ายให้นับ (ขวา-บน ไม่นับ)

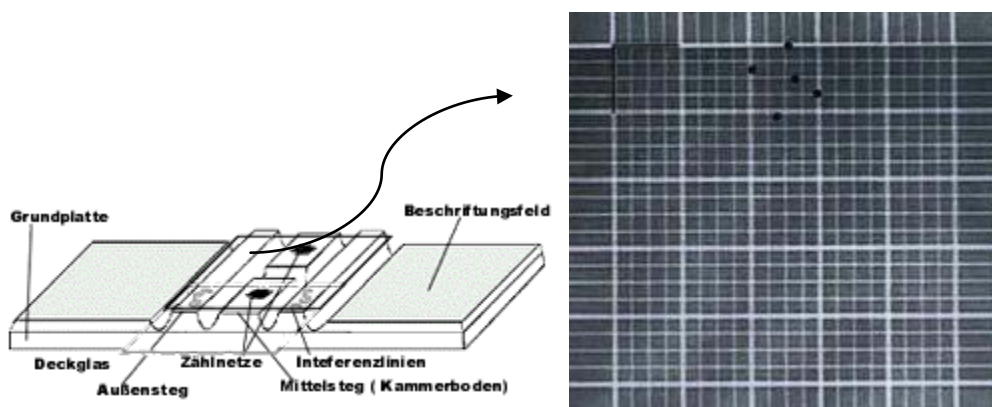
8. ทำการนับจำนวนเซลล์สาหร่ายทั้ง 2 ตาราง (สมมติทำการนับได้ n และ m เซลล์)

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

หรือคำนวณปริมาณสาหร่ายจากสูตร

$$\text{ความเข้มข้นสาหร่าย/มล.} = \frac{CC \times 1000 \text{ มม.}^3}{AA \times DD \times FF}$$

- เมื่อ C = จำนวนสาหร่ายที่นับได้
 A = พื้นที่ของ grids; 0.04 มม.²
 D = ความลึกของพื้นที่ที่นับ; 0.1 มม.
 F = จำนวนช่องหรือตารางที่นับ



รูปที่ ก.2 พื้นที่ตารางสำหรับนับเซลล์สาหร่าย

ตัวอย่างการนับเซลล์สำหรับ

ในตารางเล็กๆ 16 ตารางในตารางใหญ่

หมายเลข 1 นับสำหรับได้

50 เซลล์

หมายเลข 2 นับสำหรับได้

28 เซลล์

หมายเลข 3 นับสำหรับได้

42 เซลล์

หมายเลข 4 นับสำหรับได้

71 เซลล์

หมายเลข 5 นับสำหรับได้

35 เซลล์

หมายเลข 6 นับสำหรับได้

43 เซลล์

หมายเลข 7 นับสำหรับได้

54 เซลล์

หมายเลข 8 นับสำหรับได้

19 เซลล์

หมายเลข 9 นับสำหรับได้

22 เซลล์

ดังนั้น ใน 9 ตารางใหญ่ นับสำหรับได้ $50 + 28 + 42 + 71 + 35 + 43 + 54 + 19 + 22 = 364$
เซลล์

เนื้อที่ในตารางใหญ่แต่ละตาราง = $16/400$ ตารางมิลลิเมตร

ดังนั้น $9 \times 16/400$ ตารางมิลลิเมตรมีสำหรับ = 354 เซลล์

ใน 1 ตารางมิลลิเมตรมีสำหรับ $\frac{364 \times 1 \times 400}{9 \times 16} = \frac{145600}{144} = 1011$ เซลล์

Media มีความลึก = 0.1 มิลลิเมตร

ใน 1×0.1 ลูกบาศก์มิลลิเมตรมีสำหรับ = 1011 เซลล์

ใน 1 ลูกบาศก์มิลลิเมตรมีสำหรับ $\frac{1011 \times 1}{1 \times 0.1} = 10110$ เซลล์

ใน 1 มล. (ลบ.ซม.) จะมีสำหรับ 10110×10^3 เซลล์

การวิเคราะห์คลอโรฟิลล์ เอ

การวิเคราะห์คลอโรฟิลล์ เอ ด้วยวิธี Spectrophotometric (Strickland and pasons, 1972)

คลอโรฟิลล์เป็นรงควัตถุสังเคราะห์แสงที่มีสีเขียว คลอโรฟิลล์พบในแพลงก์ตอนพืชมีหลายชนิด แต่ที่รู้จักกันโดยทั่วไปคือ คลอโรฟิลล์เอ สูตรโครงสร้างทางเคมี คือ $C_{55}H_{72}O_5N_4Mg$ คลอโรฟิลล์จะละลายได้ดีในไขมันแต่ไม่ละลายน้ำ คลอโรฟิลล์ เอ เป็นรงควัตถุสังเคราะห์แสงที่พบมากในแพลงก์ตอนพืชที่ยังมีชีวิตทุกชนิด จึงนิยมใช้คลอโรฟิลล์ เอ บ่งชี้ถึงปริมาณแพลงก์ตอนพืชในแหล่งน้ำ ฟิโอฟิติน เอ (Phaeophytin a) เป็นคลอโรฟิลล์ เอ ที่สลายตัวไปแล้ว ในการวิเคราะห์หาคลอโรฟิลล์ เอ นั้นฟิโอฟิติน เอ สามารถรบกวนการวิเคราะห์ค่าคลอโรฟิลล์ เอ ได้ เพราะสามารถดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นช่วงเดียวกันกับคลอโรฟิลล์ เอ ดังนั้นเมื่อวัดคลอโรฟิลล์ เอ ควรทำการวิเคราะห์ฟิโอฟิติน เอ ด้วย

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (Spectrophotometric)
2. Clinical centrifuge
3. Tissue grinder มีส่วนประกอบด้วยคือ grinding tube และตัวบดอัด (pestle) ซึ่ง grinding tube จะต้องมีก้นกลม
4. Centrifuge tube เป็น test tube ที่มีเกลียวสำหรับปิดฝา ความจุ 15 มิลลิลิตร
5. Cuvette ขนาด 1 เซนติเมตร
6. ชุดกรอง ประกอบด้วย Vacuum pump และแผ่นกรองชนิด membrane หรือ glass fiber เช่น แผ่นกรอง GF/F หรือแผ่นกรอง Cellulose acetate

น้ำยาเคมีและวิธีเตรียม

1. สารละลายแมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) ซึ่งแมกนีเซียมคาร์บอเนต 1 กรัม ลงในน้ำกลั่น 100 มล.
2. สารละลายอะซีโตน ความเข้มข้น 90 เปอร์เซ็นต์ (90% Acetone) ผสมอะซีโตน 9 ส่วน ต่อ น้ำ 1 ส่วน (v/v) ในขวดวัดปริมาตร เก็บในขวดสีชา ป้องกันแสง
3. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก เจือจางกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นปริมาตร 10 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร

Blank และ Reference cell

1. ใช้สารละลายอะซีโตนความเข้มข้น 90 %

- วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร (ใช้ปรับค่าการรบกวนเนื่องจากความขุ่น ที่ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร นั้นจะไวต่อการเปลี่ยนแปลงของความขุ่นอันเกิดจากการนำอะซีโตน)

ขั้นตอนการวิเคราะห์

- กรองน้ำตัวอย่าง 100 มิลลิลิตร ผ่านแผ่นกรอง ขนาดรูพรุนประมาณ 0.5 ไมครอนเมตร ด้วยเครื่องกรองน้ำสุญญากาศที่แรงดัน 650 มม.ปรอท
- ขณะกรองตัวอย่างน้ำหยดสารละลายแมกนีเซียมคาร์บอเนต 2-3 หยด จากนั้นนำแผ่นกรองที่ได้ไปสกัดคลอโรฟิลล์ (หากไม่สามารถนำไปวิเคราะห์ได้ทันที ให้พับแผ่นกรองแล้วห่อด้วยแผ่นฟอยล์ นำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ -20 องศา เซลเซียส สามารถเก็บได้นาน 2 ถึง 3 สัปดาห์)
- นำแผ่นกรองในข้อ 1 มาบดด้วยเครื่องบดเนื้อเยื่อ (Tissue grinder) ก่อนบดเติมสารละลายอะซีโตน ความเข้มข้น 90 % ลงไปพอประมาณ ทิ้งไว้ 10 นาที จากนั้นบดแผ่นกรองให้ละเอียด เทสารละลายที่ได้ลงในหลอดฝาเกลียว
- ปรับปริมาตร 5 ถึง 10 มิลลิลิตร ด้วยสารละลายอะซีโตน 90% เก็บในที่มืดอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 12 ชม
- นำสารละลายที่อยู่ในหลอดเกลียวมาปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 4000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที นำสารละลายส่วนใสมาหาปริมาตรที่แน่นอน
- นำสารละลายส่วนใสที่ได้ปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 4000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาทีอีกครั้ง
- วัดค่าการดูดกลืนแสง โดยเทสารละลายลงใน Cuvette เหยอย่างช้าๆระวังตะกอนขุ่น วัดที่ความยาวคลื่น 750, 663, 645 และ 630 นาโนเมตร
- เมื่อวัดค่าการดูดกลืนแสงเสร็จ เติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 2 หยด ผสมให้เข้ากัน ทิ้งไว้ 4 ถึง 5 นาที จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 663 และ 750 นาโนเมตรอีกครั้ง
- คำนวณปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ

วิธีการวัดพลังงานอัลตราซาวด์ (Kikuchi and Uchida, 2011)

การวัดพลังงานอัลตราซาวด์โดยการวัดพลังงานความร้อน (Calorimetric method) ในน้ำที่ผ่านการอัลตราซาวด์
เครื่องมือและอุปกรณ์

1. อ่างอัลตราซาวด์
2. เครื่องวัดอุณหภูมิ Thermocouple
3. ทรานส์ดีวเซอร์

ขั้นตอนการวิเคราะห์

1. โดยทำการวัดอุณหภูมิเริ่มต้นที่ยังไม่ทำการให้คลื่นอัลตราซาวด์
2. ทำการอัลตราซาวด์
3. วัดอุณหภูมิของน้ำที่เปลี่ยนไป โดยทั่วไปจะวัดอุณหภูมิของน้ำจนวนกระทั่งอุณหภูมิค่อนข้างคงที่

วิธีการคำนวณ

การคำนวณความเข้มข้นน้ำสาหร่ายสังเคราะห์

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

N_1 = ความเข้มข้นน้ำสาหร่ายสายสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* (เซลล์/ลิตร)

N_2 = ความเข้มข้นน้ำสาหร่ายสังเคราะห์ที่ต้องการ (เซลล์/ลิตร)

V_1 = ปริมาตรน้ำสาหร่ายเข้มข้นสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* (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)

การคำนวณหาปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ

$$\text{คลอโรฟิลล์เอ (mg/m}^3\text{)} = \frac{[11.64(\text{abs}663) - 2.16(\text{abs}645) - 0.10(\text{abs}630)] \times \text{vol}_1}{\text{VOL}_2}$$

เมื่อ vol_1 = ปริมาณสารละลายอะซีโตนที่ใช้สกัด (ลิตร)

VOL_2 = ปริมาณน้ำตัวอย่างที่ใช้กรอง (ลูกบาศก์เมตร)

Abs 630, 645, 663 = ค่า abs ที่ปรับแก้ด้วยค่า abs 750 แล้ว

การคำนวณพลังงานอัลตราซาวด์

$$P = \frac{\Delta T}{t_x} C \times M$$

$$\Delta T = T_{\text{after}} - T_{\text{before}}$$

เมื่อ

ΔT = อุณหภูมิน้ำที่เปลี่ยนไป

T_x = เวลาในการเดินระบบอัลตราซาวด์

C = ค่าคงที่ความร้อนของน้ำ ($3.18 \text{ Jg}^{-1}\text{K}^{-1}$)

M = ปริมาณน้ำ

การหาปริมาณเซลล์สำหรับแห้ง (W. Ai และคณะ, 2008)

การหาปริมาณเซลล์แห้งของสาหร่าย เป็นการหาปริมาณเซลล์สาหร่ายที่มีจำนวนมาก หรือมีปริมาณสาหร่ายหลายสายพันธุ์ที่ไม่สามารถแยกเป็นจำนวนเซลล์สาหร่ายได้อย่างชัดเจนได้ เครื่องมือและอุปกรณ์

1. กระจกกรอง GF/C ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.7 mm
2. ชุดเครื่องกรอง
3. เครื่องดูดอากาศ
4. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง
5. โถดูดความชื้น

ขั้นตอนการวิเคราะห์

1. อบกระจกกรอง GF/C ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.7 mm อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส
2. ชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง หา นน. ก่อนกรอง
3. ใช้ตัวอย่างน้ำปั่นเป็อนสาหร่าย 100 ml
6. กรองผ่านเครื่องกรองด้วยกระจกกรอง GF/C ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.7 mm
4. อบกระจกกรองที่กรองผ่านเซลล์สาหร่าย เข้าอบที่ อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส
5. นำกระจกกรองใส่ในโถดูดความชื้น เป็นเวลา 1 วัน
6. ชั่งหา นน. หลังกรองผ่านเซลล์สาหร่ายเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง

วิธีการคำนวณเซลล์สาหร่าย

$$\text{ปริมาณเซลล์สาหร่าย (มิลลิกรัมเซลล์ต่อมิลลิลิตร)} = \frac{\text{นน หลังกรอง(มก.)} - \text{นน ก่อนกรอง(มก.)}}{\text{ปริมาณน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)}}$$

การหาปริมาณค่าความเป็นด่าง

การหาค่าความเป็นด่างทดสอบโดยใช้วิธี Titration method กับกรดที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน โดยการเปลี่ยนสีของอินดิเคเตอร์ (indicator) โดยใช้ phenolphthalein ($C_{20}H_{14}O_4$) และ Methyl Orange ($C_{14}H_{14}N_3NaO_3S$) เป็นอินดิเคเตอร์

น้ำยา

1. Standard H_2SO_4 0.01 N
2. Phenolphthalein indicator
3. Methyl Orange indicator

วิธีวิเคราะห์

1. นำน้ำตัวอย่างปริมาตร 100 ml
2. หยดสารละลาย 0.1 M sodium thiosulfate ลงไปขวดละ 1 หยด (0.05 ml) เพื่อทำลายคลอรีน
3. หยด Phenolphthalein indicator 3 หยด สีชมพูที่เกิดขึ้น ไตเทรท จนสีชมพูหายไปบันทึกปริมาณกรด
4. เติม Methyl Orange indicator 3 หยด สีเหลืองที่เกิดขึ้น ไตเทรท จนสีเหลืองเปลี่ยนเป็นสีส้มบันทึกปริมาณกรด

การคำนวณ Alkalinity

ค่า Alkalinity รายงานปริมาณมิลลิกรัมต่อลิตรของ $CaCO_3$ โดยคำนวณจาก

$$\text{Alkalinity as } CaCO_3 = \frac{A \times N \times 50,000}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (ml)}}$$

โดย A = ปริมาตรของสารละลายกรดมาตรฐานที่ใช้ในการไตเทรท (มล.)

N = ความเข้มข้นของกรดที่ใช้ในการไตเทรท (N)

การเตรียมสารส้มน้ำ

จาก $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ มีเนื้อความบริสุทธิ์อยู่ 56.5 % ต้องการเตรียมสารส้มน้ำ 1%

(ในน้ำ 1 ลิตรมีสารส้มอยู่ 10 กรัม)

คำนวณปริมาณสารส้มให้ได้ความเข้มข้น 1 %

$$\text{ปริมาณสารส้มที่ต้องการ} = \frac{10 \times 100}{56.5} = 17.7 \text{ กรัม}$$

นั่นคือเมื่อนำสารส้มผง 17.7 กรัม ละลายน้ำ 1 ลิตร จะได้สารส้มน้ำ 10 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

หมายความว่าในสารส้มน้ำ 1 ลิตร มี $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ อยู่ 10 กรัม ดังนั้นในน้ำ 1 ลิตร

$$\text{จะมีเนื้อ Alum (Al}_2\text{)} = \frac{10 \times 54}{666.7} = 0.80 \text{ กรัมต่อลิตร}$$

ดังนั้นจากการทดลองเลือกใช้ Alum ที่

ปริมาณ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ (mg/l)	20	30	40	50	70	90
ปริมาณเนื้อ Alum (Al_2) (g/L)	0.016	0.024	0.032	0.04	0.056	0.072

ภาคผนวก ข
ข้อมูลการทดลอง

ข้อมูลการทดลองที่ 4.2 ผลของปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟต (Alum) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายเลี้ยงในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมในการกำจัดสาหร่ายออกจากน้ำ

ตารางที่ ข.1 ผลของปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟตต่อการกำจัดสาหร่าย *Chlorella vulgaris* sp.

alum	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Average	SD
0	100	102	98	100	2
20	96	94	98	96	2
30	89	88	90	89	1
40	60	64	56	60	4
50	56	52	60	56	4
70	43	46	40	43	3
90	35	32	38	35	3

ตารางที่ ข.2 ผลของปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟตต่อการกำจัดสาหร่าย *Scenedesmus* sp.

alum	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Average	SD
0	100	99	102	100	1.3
20	98	96	100	98	2.0
30	92	87	98	92	5.3
40	68	64	72	68	4.0
50	59	56	62	59	3.0
70	42	44	41	42	1.7
90	39	37	41	39	2.0

ตารางที่ ข.3 ผลของปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟตต่อการกำจัดสาหร่ายผสม

alum	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Average	SD
0	100	102	98	100	2
20	99	99	99	99	0
30	95	97	92	95	2.5
40	64	66	61	64	2.5
50	56	53	58	56	2.5
70	40	37	42	40	2.5
90	40	36	43	40	3.5

ตารางที่ ข.4 ผลของปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟตต่อค่าความเป็นด่าง (Alkalinity)

Alkalinity(mg/caco3)	Alum
48	0
44	20
42.5	30
40.5	40
33	50
27	70
21	90

ข้อมูลการทดลองที่ 4.3 ผลของปริมาณปูนขาว (lime) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายที่เลี้ยงในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมในการกำจัด

ตารางที่ ข.5 ผลของปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟตต่อการกำจัดสาหร่าย *Chlorella vulgaris* sp.

alum	Lime	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Average	SD
0	0	100	102	98	100	2
20	6.6	98	99	97	98	1
30	9.9	91	87	95	91	4
40	13.2	71	76	66	71	5
50	16.5	67	69	65	67	2
70	23.1	63	62	64	63	1
90	29.7	32	35	29	32	3

ตารางที่ ข.6 ผลของปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟตและ Lime ต่อ pH

pH	alum	Lime
7.47	0	0
7.53	20	6.6
7.45	30	9.9
7.39	40	13.2
7.35	50	16.5
7.06	70	23.1
6.91	90	29.7

ข้อมูลการทดลอง 4.4 ผลของระยะเวลาการให้คลื่นเสียงที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย
จากน้ำสาหร่ายที่เลี้ยงในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ ข.7 ผลของระยะเวลาการให้คลื่นเสียงต่อการกำจัดสาหร่าย *Chlorella vulgaris* sp.

Time (Sec)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Average	SD
0	109	102	89	100	10
5	92	84	88	88	4
10	72	98	83	84	13
30	78	43	56	59	18
60	72	52	65	63	10
600	49	57	52	53	4
1800	46	55	48	50	5

ตารางที่ ข.8 ผลของระยะเวลาการให้คลื่นเสียงต่อการกำจัดสาหร่าย *Scenedesmus* sp.

Time (Sec)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Average	SD
0	106	99	95	100	6
5	58	47	40	48	9
10	28	31	30	30	2
30	29	31	33	31	2
60	38	37	35	37	2
600	40	35	39	38	3
1800	52	41	48	47	6

ตารางที่ ข.9 ผลของระยะเวลาการให้คลื่นเสียงต่อการกำจัดสาหร่ายผสม

Time (Sec)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Average	SD
0	100	98	99	99	1
5	62	82	78	74	11
10	54	69	65	63	8
30	43	62	57	54	10
60	64	67	66	66	2
600	66	65	62	64	2
1800	60	72	66	66	6

การวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของสาหร่ายทั้ง 3 กลุ่มตัวอย่าง

ตัวอย่างวิธีการคำนวณ

$$\text{คลอโรฟิลล์เอ (mg/m}^3) = \frac{[11.64(0.452) - 2.16(0.165) - 0.10(0.095)] \times 10^3}{100}$$

$$= 48.95 \text{ mg/m}^3 = 0.04895 \text{ mg/L}$$

เมื่อ vol_1 = ปริมาณสารละลายอะซีโตน 10 มล. (0.01L)

VOL_2 = ปริมาตรน้ำตัวอย่างที่ใช้กรอง 100 มล. (10^{-4} m^3)

Abs 630, 645, 663 = ค่า abs ที่ปรับแก้ด้วยค่า abs 750 แล้ว

$$663 = 0.452$$

$$645 = 0.165$$

$$630 = 0.095$$

ตารางที่ ข.10 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของสาหร่ายทั้ง 3 กลุ่มตัวอย่าง

Chlorella sp (mg/l)	Scenedesmus sp(mg/l)	Mixed culture (mg/l)
0.049	0.017	0.023
0.050	0.017	0.025
0.048	0.016	0.024
0.044	0.017	0.025
0.043	0.016	0.024
0.046	0.014	0.026
0.048	0.015	0.025

ตารางที่ ข.11 ค่าการดูดคลื่นแสงที่ 663 645 และ 630 นาโนเมตร ของสาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* sp.

การดูดคลื่นแสงที่ 663

ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Average
0.406	0.461	0.491	0.452
0.443	0.482	0.481	0.468
0.434	0.445	0.46	0.446
0.386	0.403	0.438	0.409
0.370	0.397	0.434	0.400
0.398	0.425	0.465	0.429
0.393	0.451	0.492	0.445

การดูดคลิ่นแสงที่ 645

ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Average
0.185	0.147	0.163	0.165
0.179	0.161	0.176	0.172
0.172	0.158	0.164	0.164
0.164	0.14	0.148	0.150
0.161	0.135	0.147	0.147
0.165	0.145	0.172	0.160
0.175	0.147	0.174	0.165

การดูดคลิ่นแสงที่ 630

ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Average
0.101	0.088	0.096	0.095
0.106	0.095	0.107	0.102
0.104	0.096	0.103	0.101
0.097	0.085	0.092	0.091
0.093	0.083	0.092	0.089
0.107	0.086	0.101	0.098
0.100	0.091	0.104	0.098

ตารางที่ ข.12 ค่าการดูดคลิ่นแสงที่ 663 645 และ 630 นาโนเมตร ของสาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์

Scenedesmus sp.

การดูดคลิ่นแสงที่ 663

ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Average
0.138	0.185	0.161	0.161
0.174	0.151	0.162	0.162
0.163	0.15	0.157	0.156
0.147	0.177	0.162	0.162
0.138	0.169	0.154	0.153
0.131	0.146	0.139	0.138
0.125	0.158	0.142	0.141

การดูดคลื่นแสงที่ 645

ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Average
0.054	0.071	0.062	0.062
0.068	0.059	0.063	0.063
0.068	0.057	0.062	0.062
0.056	0.069	0.062	0.062
0.057	0.072	0.064	0.064
0.05	0.055	0.052	0.052
0.051	0.06	0.056	0.055

การดูดคลื่นแสงที่ 630

ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Average
0.035	0.045	0.04	0.040
0.043	0.039	0.041	0.041
0.047	0.036	0.042	0.041
0.036	0.044	0.04	0.040
0.038	0.051	0.045	0.044
0.032	0.036	0.034	0.034
0.034	0.040	0.037	0.037

ตารางที่ ข.13 ค่าการดูดคลื่นแสงที่ 663 645 และ 630 นาโนเมตร ของสารห่วยสีเขียวสายพันธุ์

ผสม

การดูดคลื่นแสงที่ 663

ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Average
0.151	0.289	0.221	0.220
0.159	0.318	0.238	0.238
0.163	0.299	0.231	0.231
0.163	0.315	0.239	0.239
0.155	0.301	0.228	0.228
0.166	0.319	0.243	0.242
0.144	0.319	0.232	0.231

การดูดคลื่นแสงที่ 645

ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Average
0.056	0.110	0.083	0.083
0.06	0.119	0.089	0.089
0.062	0.112	0.087	0.087
0.061	0.118	0.089	0.089
0.06	0.114	0.087	0.087
0.062	0.120	0.091	0.091
0.056	0.121	0.088	0.088

การดูดคลื่นแสงที่ 630

ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Average
0.033	0.068	0.05	0.050
0.035	0.071	0.053	0.053
0.037	0.068	0.053	0.052
0.036	0.073	0.054	0.054
0.037	0.071	0.054	0.054
0.037	0.073	0.055	0.055
0.034	0.074	0.054	0.054

ข้อมูลการทดลองที่ 4.5 ผลของระยะเวลาการให้คลื่นเสียงร่วมกับการเติม Alum ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายที่เลี้ยงในห้องปฏิบัติการ ตารางที่ ข.14 ผลของระยะเวลาการให้คลื่นเสียงที่ 10 วินาที ร่วมกับการเติม Alum ต่อ การกำจัดสาหร่าย

Alum (mg/l)	Power (Watt)	Time (Sec)	Chlorella ($\times 10^4$ cell/ml)	Scenedesmus ($\times 10^4$ cell/ml)	Mixed ($\times 10^4$ cell/ml)
0	60	10	84	30	63
20	60	10	35	17	30
30	60	10	31	13	21
40	60	10	24	11	13

ตารางที่ ข.15 ผลของระยะเวลาการให้คลื่นเสียงที่ 30 วินาที ร่วมกับการเติม Alum ต่อ การกำจัดสาหร่าย (ปริมาณเซลล์ $\times 10^4$ cell/ml)

Alum (mg/l)	Power (Watt)	Time (sec)	Chlorella	Scenedesmus	Mixed
0	60	30	59	31	54
20	60	30	34	16	29
30	60	30	29	14	20
40	60	30	22	8	14

ตารางที่ ข.16 ผลของระยะเวลาการให้คลื่นเสียงที่ 60 วินาที ร่วมกับการเติม Alum ต่อ การกำจัดสาหร่าย (ปริมาณเซลล์ $\times 10^4$ cell/ml)

Alum (mg/l)	Power (Watt)	Time (sec)	Chlorella	Scenedesmus	Mixed
0	60	60	63	37	66
20	60	60	32	16	31
30	60	60	27	12	22
40	60	60	20	9	16

ข้อมูลการทดลองที่ 4.6 ผลของพลังงานเสียงที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำ
สาหร่ายที่เลี้ยงในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ ข.17 ผลของพลังงานเสียง ต่อ การกำจัดสาหร่าย *Chlorella vulgaris* sp.

(ปริมาณเซลล์ $\times 10^4$ cell/ml)

Power (Watt)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Average	SD
0	110	96	106	104	7
60	48	52	51	50	2
80	53	47	57	52	5
100	56	60	58	58	2
120	62	63	64	63	1
150	69	66	71	69	3
200	72	67	74	71	4

ตารางที่ ข.18 ผลของพลังงานเสียง ต่อ การกำจัดสาหร่าย *Scenedesmus* sp.

(ปริมาณเซลล์ $\times 10^4$ cell/ml)

Power (Watt)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Average	SD
0	97	104	99	100	4
60	26	32	27	28	3
80	28	34	31	31	3
100	30	35	36	34	3
120	45	41	44	43	2
150	47	45	51	48	3
200	45	49	47	47	2

ตารางที่ ข.19 ผลของพลังงานเสียง ต่อ การกำจัดสาหร่ายผสม (ปริมาณเซลล์ $\times 10^4$ cell/ml)

Power (Watt)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Average	SD
0	97	112	107	105	8
60	42	46	44	44	2
80	44	51	56	50	6
100	54	58	52	55	3
120	62	67	58	62	5
150	59	63	65	62	3
200	65	67	63	65	2

ตารางที่ ข.20 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของสาหร่ายทั้ง 3 กลุ่มตัวอย่าง

Chlorella sp (mg/l)	Scenedesmus sp(mg/l)	Mixed culture (mg/l)
0.048	0.021	0.034
0.035	0.014	0.025
0.036	0.017	0.027
0.047	0.018	0.028
0.050	0.017	0.029
0.050	0.018	0.031
0.058	0.019	0.031

ตารางที่ ข.21 ค่าการดูดกลืนแสงที่ 663 645 และ 630 นาโนเมตร ของสาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์

Chlorella vulgaris sp.

การดูดกลืนคลื่นแสงที่ 663

ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Average
0.464	0.431	0.454	0.449
0.32	0.334	0.332	0.328
0.337	0.34	0.342	0.339
0.442	0.44	0.444	0.442
0.464	0.478	0.465	0.469
0.464	0.462	0.464	0.463
0.535	0.541	0.535	0.537

การดูดกลืนคลื่นแสงที่ 645

ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Average
0.173	0.168	0.171	0.170
0.118	0.121	0.119	0.119
0.125	0.121	0.121	0.122
0.165	0.168	0.164	0.165
0.173	0.171	0.182	0.175
0.172	0.169	0.156	0.165
0.200	0.202	0.197	0.199

การดูดกลืนคลื่นแสงที่ 630

ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Average
0.105	0.121	0.098	0.108
0.071	0.086	0.074	0.077
0.076	0.088	0.072	0.078
0.101	0.11	0.098	0.103
0.107	0.114	0.102	0.107
0.104	0.111	0.097	0.104
0.122	0.125	0.114	0.120

ตารางที่ ข.22 ค่าการดูดกลืนแสงที่ 663 645 และ 630 นาโนเมตร ของสาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์

Scenedesmus sp.

การดูดกลืนคลื่นแสงที่ 663

ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Average
0.201	0.196	0.207	0.201
0.115	0.132	0.143	0.13
0.179	0.165	0.157	0.167
0.186	0.171	0.177	0.178
0.167	0.163	0.154	0.161
0.172	0.168	0.174	0.171
0.174	0.172	0.175	0.173

การดูดกลืนคลื่นแสงที่ 645

ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Average
0.071	0.068	0.072	0.070
0.041	0.038	0.041	0.040
0.079	0.082	0.075	0.078
0.175	0.102	0.08	0.119
0.040	0.056	0.048	0.048
0.041	0.044	0.044	0.043
0.040	0.041	0.037	0.039

การดูดกลืนคลื่นแสงที่ 630

ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Average
0.030	0.032	0.030	0.030
0.230	0.048	0.063	0.113
0.054	0.056	0.051	0.053
0.050	0.052	0.05	0.050
0.040	0.043	0.042	0.041
0.041	0.044	0.044	0.043
0.040	0.044	0.04	0.041

ตารางที่ ข.23 ค่าการดูดกลืนแสงที่ 663 645 และ 630 นาโนเมตร ของสาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์

ผสม

การดูดกลืนคลื่นแสงที่ 663

ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Average
0.308	0.322	0.314	0.314
0.224	0.244	0.232	0.233
0.244	0.256	0.243	0.247
0.267	0.253	0.266	0.262
0.278	0.268	0.272	0.272
0.294	0.288	0.294	0.292
0.296	0.290	0.294	0.293

การดูดกลืนคลื่นแสงที่ 645

ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Average
0.096	0.101	0.099	0.098
0.067	0.057	0.071	0.065
0.084	0.077	0.082	0.081
0.121	0.098	0.094	0.104
0.124	0.098	0.121	0.114
0.121	0.114	0.117	0.117
0.107	0.102	0.114	0.107

การดูดกลืนคลื่นแสงที่ 630

ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Average
0.065	0.067	0.071	0.067
0.044	0.044	0.052	0.046
0.053	0.056	0.061	0.056
0.055	0.057	0.062	0.058
0.057	0.062	0.064	0.061
0.057	0.061	0.063	0.060
0.062	0.066	0.067	0.065

ข้อมูลการทดลองที่ 4.7 ผลของพลังงานเสียง 30 วินาที โดยเติม Alum ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายที่เลี้ยงในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ ข.24 ผลของพลังงานเสียง 60 วัตต์ ที่เวลา 30 วินาที โดยเติม Alum ต่อ การกำจัดสาหร่าย *Chlorella vulgaris* sp. (ปริมาณเซลล์ $\times 10^4$ cell/ml)

Alum	Time	watt	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Average	SD
0	30	60	46	50	54	50	4
20	30	60	32	28	36	32	4
30	30	60	21	29	34	28	6
40	30	60	19	24	27	23	4

ตารางที่ ข.25 ผลของพลังงานเสียง 60 วัตต์ ที่เวลา 30 วินาที โดยเติม Alum ต่อ การกำจัดสาหร่าย *Scenedesmus* sp. (ปริมาณเซลล์ $\times 10^4$ cell/ml)

Alum	Time	Watt	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Average	SD
0	30	60	26	32	27	28	3
20	30	60	17	20	19	18	1
30	30	60	12	17	15	14	2
40	30	60	8	10	10	9	1

ตารางที่ ข.26 ผลของพลังงานเสียง 60 วัตต์ ที่เวลา 30 วินาที โดยเติม Alum ต่อ การกำจัดสาหร่ายผสม(ปริมาณเซลล์ $\times 10^4$ cell/ml)

alum	time	watt	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Average	SD
0	30	60	42	46	44	44	2
20	30	60	26	22	29	25	3
30	30	60	17	21	14	17	3
40	30	60	12	14	11	12	1

ตารางที่ ข.27 ผลของพลังงานเสียงที่เวลา 80 วัตต์ โดยเติม Alum ต่อ การกำจัดสาหร่าย

Chlorella vulgaris sp. (ปริมาณเซลล์ $\times 10^4$ cell/ml)

Alum	Time	Watt	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Average	SD
0	30	80	68	65	62	62	3
20	30	80	61	65	57	61	4
30	30	80	32	46	39	39	7
40	30	80	27	31	33	30	3

ตารางที่ ข.28 ผลของพลังงานเสียงที่เวลา 80 วัตต์ โดยเติม Alum ต่อ การกำจัดสาหร่าย

Scenedesmus sp. (ปริมาณเซลล์ $\times 10^4$ cell/ml)

Alum	Time	Watt	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Average	SD
0	30	80	97	47	47	47	0
20	30	80	47	36	42	42	0.2
30	30	80	32	41	37	37	0.2
40	30	80	21	34	31	29	2

ตารางที่ ข.29 ผลของพลังงานเสียงที่เวลา 80 วัตต์ โดยเติม Alum ต่อ การกำจัดสาหร่ายผสม

(ปริมาณเซลล์ $\times 10^4$ cell/ml)

Alum	Time	Watt	Mixed	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Average	SD
0	30	80	53	49	57	53	4
20	30	80	54	49	52	52	3
30	30	80	42	37	39	39	3
40	30	80	26	31	33	30	4

ข้อมูลการทดลองที่ 4.8 ผลของระยะเวลา ใช้พลังงานเสียงที่ 60 วัตต์โดยเติม Alum ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายที่เลี้ยงในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ ข.30 ผลของระยะเวลา ใช้พลังงานเสียงที่ 60 วัตต์โดยเติม Alum ต่อ การกำจัดสาหร่าย (ปริมาณเซลล์ $\times 10^4$ cell/ml)

Time (sec)	Alum	Watt	Chlorella	Scenedesmus	Mixed
0	40	0	60	68	64
10	40	60	24	11	13
30	40	60	22	8	14
60	40	60	20	9	16

ข้อมูลการทดลองที่ 4.9 ศึกษาความเข้มข้นของสาหร่ายที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำสาหร่ายเลี้ยงในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ ข.31 ความเข้มข้นของสาหร่ายที่มีผล ต่อ การกำจัดสาหร่าย (ปริมาณเซลล์ $\times 10^4$ cell/ml)

Alum	watt	Time	Initial cell	Chlorella	Scenedesmus	Mixed
40	60	30	50	20	10	10
40	60	30	100	25	10	13
40	60	30	1000	310	180	210

ข้อมูลการทดลองที่ 4.10 การทดลองตกตะกอนเซลล์สาหร่ายโดยทำการเก็บตัวอย่างเทียบกับเวลาการตกตะกอน

ตารางที่ ข.32 การตกตะกอนเซลล์สาหร่ายโดยการตกตะกอนทางเคมีเทียบกับเวลาการตกตะกอน (ปริมาณเซลล์ $\times 10^4$ cell/ml)

Time (min)	Alum	Chlorella	Scenedesmus	Mixed
0	40	99	100	100
5	40	93	97	95
10	40	89	92	91
15	40	74	83	76
20	40	60	68	63

ตารางที่ ข.33 การตกตะกอนเซลล์สาหร่ายโดยใช้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์เทียบกับเวลาการตกตะกอน (ปริมาณเซลล์ $\times 10^4$ cell/ml)

Time (min)	Time to sonication	chlorella	Scenedesmus	Mixed
0	30	99	98	94
5	30	87	78	84
10	30	77	69	73
15	30	64	56	59
20	30	59	50	54

ตารางที่ ข.34 การตกตะกอนเซลล์สาหร่ายโดยใช้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ร่วมกับการตกตะกอนทางเคมีเทียบกับเวลาการตกตะกอน (ปริมาณเซลล์ $\times 10^4$ cell/ml)

Time (min)	Time to sonication	Alum	Chlorella	Scenedesmus	Mixed
0	30	40	98	99	100
5	30	40	60	51	54
10	30	40	46	29	37
15	30	40	31	17	22
20	30	40	26	10	14

ข้อมูลการทดลองที่ 4.11 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยใช้คลื่นอัลตราซาวด์ร่วมกับการตกตะกอนทางเคมีจากน้ำตัวอย่างปนเปื้อนสาหร่ายจากโรงผลิตน้ำประปา

ตารางที่ ข.35 pH น้ำดิบโรงผลิตน้ำประปาสามเสน

pH ₁	pH ₂	pH ₃	Average	SD
7.19	7.25	7.29	7.24	0.05

ตารางที่ ข.36 คุณหมุน้ำดิบโรงผลิตน้ำประปาสามเสน

Temperature (1)	Temperature (2)	Temperature (3)	Average	SD
30.3	30.3	30.4	30.3	0.05

ตารางที่ ข.37 ความขุ่น น้ำดิบโรงผลิตน้ำประปาสามเสน

Turbidity(1)	Turbidity(2)	Turbidity(3)	Average	SD
NTU	NTU	NTU		
14.5	14.1	14.2	14.2	0.20

ค่าความเป็นด่างน้ำดิบโรงผลิตน้ำประปาสามเสนหลังตกตะกอนทางเคมี

ตัวอย่างการคำนวณ

$$\text{Alkalinity as CaCO}_3 = \frac{14.1 \times 0.01 \times 50000}{100}$$

$$= 70.5 \text{ mg/l as CaCO}_3$$

โดย A = ปริมาตรของสารละลายกรดมาตรฐานที่ใช้ 14.1 มล.

N = ความเข้มข้นของกรด 0.01 N

ตารางที่ ข.38 ค่าความเป็นด่างน้ำดิบโรงผลิตน้ำประปาสามเสนหลังตกตะกอนทางเคมี

Alum	Acid	N	Volume	Alkalinity
0	14.1	0.01	100	70.5
20	10.5	0.01	100	52.5
30	8.8	0.01	100	44.0
40	8.5	0.01	100	42.5
50	8.1	0.01	100	40.5
70	6.1	0.01	100	30.5
90	3.8	0.01	100	19.0

ตารางที่ ข.39 ค่าความขุ่นน้ำดิบโรงผลิตน้ำประปาสามเสนหลังตกตะกอนทางเคมี

Alum	Turbidity(1) NTU	Turbidity(2) NTU	Average
0	14.3	14.1	14.2
20	2.2	2.29	2.245
30	2.11	2.11	2.11
40	1.77	1.76	1.765
50	1.75	1.83	1.79
70	1.67	1.71	1.69
90	1.41	1.57	1.49

ข้อมูลการทดลองที่ 4.12 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยการตกตะกอนทางเคมีจากน้ำตัวอย่างปนเปื้อนสาหร่ายจากโรงผลิตน้ำประปา

ตารางที่ ข.40 ปริมาณสาหร่ายน้ำดิบโรงผลิตน้ำประปาสามเสนหลังตกตะกอนทางเคมี

Alum	นน.กระดาศกรอง ก่อน	นน.กระดาศกรอง - หลัง	นน. หลัง - ก่อน	mg/ml
0	0.3528	0.3553	0.0025	0.025
20	0.2589	0.2606	0.0017	0.017
30	0.2479	0.2492	0.0013	0.013
40	0.3552	0.3561	0.0009	0.009

ข้อมูลการทดลองที่ 4.13 ศึกษาประสิทธิภาพของระยะเวลาในการใช้คลื่นอัลตราซาวด์ เพื่อกำจัด
สาหร่ายจากน้ำตัวอย่างปนเปื้อนสาหร่ายจากโรงผลิตน้ำประปา

ตารางที่ ข.41 ปริมาณสาหร่ายน้ำดิบโรงผลิตน้ำประปาสามเสนหลังการอัลตราซาวด์

เวลา (วินาที)	นน.กระดาศก่อนกรอง	นน.กระดาศหลังกรอง	นน. หลัง - ก่อน	mg/ml
0	0.2615	0.2636	0.0021	0.021
10	0.3741	0.3761	0.002	0.02
30	0.2843	0.2861	0.0018	0.018
60	0.2929	0.2947	0.0018	0.018

ข้อมูลการทดลองที่ 4.14 ศึกษาประสิทธิภาพของพลังงานในการใช้คลื่นอัลตราซาวด์ เพื่อกำจัด
สาหร่ายจากน้ำตัวอย่างปนเปื้อนสาหร่ายจากโรงผลิตน้ำประปา

ตารางที่ ข.42 ปริมาณสาหร่ายน้ำดิบโรงผลิตน้ำประปาสามเสนหลังการอัลตราซาวด์

watt	นน.กระดาศก่อนกรอง	นน.กระดาศหลังกรอง	นน. หลัง - ก่อน	mg/ml
0	0.2615	0.2636	0.0021	0.021
60	0.2867	0.2885	0.0018	0.018
80	0.2604	0.2622	0.0018	0.019
100	0.3116	0.3134	0.0018	0.019

ข้อมูลการทดลองที่ 4.15 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยใช้คลื่นอัลตราซาวด์ร่วมกับการตกตะกอนทางเคมีจากน้ำตัวอย่างปนเปื้อนสาหร่ายจากโรงผลิตน้ำประปา ตารางที่ ข.43 ปริมาณสาหร่ายน้ำดิบโรงผลิตน้ำประปาสามเสนหลังการอัลตราซาวด์ร่วมกับการตกตะกอนทางเคมี

Alum	เวลา (วินาที)	นน.กระดาศก่อนกรอง	นน.กระดาศหลังกรอง	นน.หลัง-ก่อน	mg/ml
0	30	0.2615	0.2636	0.0021	0.021
20	30	0.2622	0.2635	0.0013	0.013
30	30	0.2846	0.2856	0.001	0.01
40	30	0.2936	0.2942	0.0006	0.006

ข้อมูลการทดลองที่ 4.16 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายในอ่างอัลตราซาวด์ขนาด 30×80×50 เซนติเมตร

ตารางที่ ข.44 การตกตะกอนเซลล์สาหร่ายโดยใช้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ถึง 120 ลิตร สาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* sp. (ปริมาณเซลล์×10⁴ cell/ml)

Time (min)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Average	SD
0	100	110	108	106	5.2
5	98	103	106	102	4.0
10	94	96	92	94	2.0
15	82	79	86	82	3.5
20	79	84	82	81	2.5
25	75	78	81	78	3.0
30	64	73	69	68	4.5

ตารางที่ ข.45 การตกตะกอนเซลล์สาหร่ายโดยใช้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ถึง 120 ลิตร
สาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Scenedesmus sp.* (ปริมาณเซลล์ $\times 10^4$ cell/ml)

Time	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Average	SD
0	98	107	102	102	4.5
5	96	92	88	92	4.0
10	94	92	91	92	1.5
15	87	83	85	85	2.0
20	82	81	86	83	2.6
25	73	71	69	71	2
30	66	62	64	64	2

ตารางที่ ข.46 การตกตะกอนเซลล์สาหร่ายโดยใช้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ถึง 120 ลิตร
สาหร่ายสีเขียวพืชม (ปริมาณเซลล์ $\times 10^4$ cell/ml)

Time	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Average	SD
0	104	109	102	105	3.6
5	99	96	98	97	1.5
10	94	93	96	94	1.5
15	84	88	85	85	2.0
20	75	79	73	75	3.0
25	72	78	77	75	3.2
30	67	69	72	69	2.5

ข้อมูลการทดลองที่ 4.17 ศึกษาการเจริญเติบโตของเซลล์สาหร่ายที่ผ่านการอัลตราซาวด์ในอ่างอัลตราซาวด์ขนาด 30×80×50 เซนติเมตร

ตารางที่ ข.47 แสดงจำนวนการเจริญเติบโตของสาหร่าย 3 กลุ่มตัวอย่าง ที่ผ่านการอัลตราซาวด์เทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการอัลตราซาวด์

(ปริมาณเซลล์ cell/ml)

Day	<i>Chlorella sp</i>	Ultrasound	<i>Scenedesmus sp.</i>	Ultrasound	Mixed culture	Ultrasound
0	500000	500000	500000	500000	500000	500000
1	520000	540000	490000	510000	530000	520000
2	540000	490000	530000	560000	560000	540000
3	660000	610000	630000	550000	640000	640000
4	890000	780000	720000	620000	820000	790000
5	2100000	1700000	2300000	730000	1600000	1200000
6	5600000	5200000	4000000	1100000	5400000	5200000
7	11700000	10700000	9120000	2925000	10000000	9800000

ข้อมูลการวัดระดับพลังงานคลื่นเสียงอัลตราซาวด์

ตัวอย่างการคำนวณ

$$P = 0.000833 \times 4.18 \times 4000 = 14 \text{ watt} = 0.0035 \text{ watt/ml}$$

$$\Delta T = 26.9 - 26.8 = \frac{1}{180-60} = 0.000833$$

$$M = 4000 \text{ ml} \times 1 \text{ (ความหนาแน่นน้ำ g/ml)} = 4000 \text{ g}$$

เมื่อ

ΔT = อุณหภูมิที่เปลี่ยนไป

T_x = เวลาในการเดินระบบอัลตราซาวด์

C = ค่าคงที่ความร้อนของน้ำ ($4.18 \text{ Jg}^{-1}\text{K}^{-1}$)

M = ปริมาตรน้ำ 4 ลิตร

ตารางที่ ข. 48 ข้อมูลการวัดระดับพลังงานคลื่นเสียงอัลตราซาวด์ถึงขนาด 10 ลิตร

Time (sec)	30	60	180	300	350
Watt	30	60	180	300	350
0	26.7	26.7	26.7	26.7	26.7
60	26.8	26.8	26.9	27.1	27.1
80	26.8	26.9	27.1	27.1	27.1
100	27	27.1	27.4	27.5	27.5
120	27.2	27.3	27.7	27.8	27.8
150	27.5	27.7	28.1	28.8	29.1
200	28.1	29.4	30.9	31.2	32.1

ตารางที่ ข. 48 ข้อมูลการวัดระดับพลังงานคลื่นเสียงอัลตราซาวด์ถึงขนาด 120 ลิตร

Time (sec)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
Temp (°C)	28.6	28.6	28.6	28.6	28.7	28.7	28.7	28.7	28.7	28.7	28.8	28.8	28.8

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเฉลิมเกียรติ บุญลือ เกิดเมื่อวันที่ 15 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2530 จังหวัดขอนแก่น สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ในปีการศึกษา 2552 และเข้าศึกษาต่อในคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553