



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การควบคุมปริมาณสาหร่ายในระบบผลิตน้ำประปาด้วยความถี่เรโซแนนซ์  
กรณีศึกษา: โรงงานผลิตน้ำประปา บางเขน การประปานครหลวง

Algae Control in Water Treatment System by Resonance Frequency

Case Study: Bangkhen Water Treatment Plant Metropolitan Waterworks Authority

นามผู้วิจัย นายปรวีร์ นาคะกุล

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์มณฑล ฐานุตตมวงศ์, Ph.D. )

หัวหน้าภาควิชา

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์มงคล ดำรงค์ศรี, Dr.Ing. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การควบคุมปริมาณสาหร่ายในระบบผลิตน้ำประปาด้วยความถี่เรโซแนนซ์  
กรณีศึกษา : โรงงานผลิตน้ำประปา บางเขน การประปานครหลวง

Algae Control in Water Treatment System by Resonance Frequency

Case Study: Bangkhen Water Treatment Plant Metropolitan Waterworks Authority

โดย

นายปรวีร์ นาคะกุล

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2552

ปรวีร์ นาคะกุล 2552: การควบคุมปริมาณสาหร่ายในระบบผลิตน้ำประปาด้วยความถี่  
เรโซแนนซ์ กรณีศึกษา: โรงงานผลิตน้ำประปา บางเขน การประปานครหลวง  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชา  
วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์มณฑล ฐานุดตมวงศ์,  
Ph.D. 74 หน้า

โรงงานผลิตน้ำบางเขน ซึ่งสามารถผลิตน้ำประปาได้มากกว่าวันละ 3.6 ล้านลูกบาศก์เมตร ดำเนินการ  
ตลอด 24 ชั่วโมง โดยใช้น้ำดิบจากแม่น้ำเจ้าพระยาส่งตามคลองประปายังโรงงานผลิตน้ำประปา บางเขนซึ่ง  
มีระยะทางไกล จึงมีปัจจัยต่างๆเร่งการเจริญเติบโตของสาหร่าย ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพน้ำดิบที่นำมาผลิต  
น้ำประปา คือ สี กลิ่น และรสชาติของน้ำเปลี่ยนไป นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดปัญหาในขั้นตอนการผลิต  
น้ำประปา ทำให้ลดประสิทธิภาพในกระบวนการ โคแอกกูเลชันและ ฟล็อกกูเลชัน ชั้นทรายกรองเสื่อมคุณภาพ  
เร็วกว่าปกติ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการควบคุมปริมาณสาหร่ายในระบบผลิต  
น้ำประปาด้วยการใช้ความถี่เรโซแนนซ์ร่วมกับการใช้คลอรีน โดยมุ่งเน้นการลดปริมาณการเติมคลอรีนก่อน  
การบำบัด เพื่อควบคุมการเกิดสารประกอบไตรฮาโลมีเทนที่อาจส่งผลต่อผู้บริโภค รวมถึงวิเคราะห์คุณสมบัติ  
ทางกายภาพและทางเคมีของน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อใช้ความถี่เรโซแนนซ์ และปริมาณการใช้สารสร้างตะกอน  
(สารส้ม) ในการกำจัดความขุ่น

จากผลการศึกษารูปได้ว่าการใช้ความถี่เรโซแนนซ์เพื่อควบคุมปริมาณสาหร่ายในตัวอย่างน้ำดิบของ  
โรงงานผลิตน้ำประปา บางเขน สามารถลดปริมาณการเติมคลอรีนได้ 0.5 มิลลิกรัมต่อน้ำดิบหนึ่งลิตรและผล  
การเปรียบเทียบคุณสมบัติของน้ำดิบที่ใช้ความถี่เรโซแนนซ์ร่วมกับการเติมคลอรีนที่ความเข้มข้น 1.5 มิลลิกรัม  
ต่อลิตร กับน้ำดิบที่มีการเติมคลอรีนที่ความเข้มข้น 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตรเพียงอย่างเดียว พบว่าน้ำดิบมีค่าความ  
ขุ่น การนำไฟฟ้า ความเป็นด่างและพีเอชเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 2.74 %, 1.31 %, 1.39 % และ 0.01 ตามลำดับ  
ผลของคุณสมบัติน้ำดิบที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการใช้ความถี่เรโซแนนซ์ ทำให้ต้องใช้ปริมาณสารส้มเพิ่มขึ้น  
1 % เพิ่มขึ้น 5 mg/l เพื่อให้ได้คุณภาพน้ำตามมาตรฐาน (ความขุ่นน้อยกว่า 5 NTU)

Porrawee Nakakul 2009: Algae Control in Water Treatment System by Resonance Frequency  
Case Study: Bangkhen Water Treatment Plant Metropolitan Waterworks Authority.  
Master of Engineering (Environmental Engineering), Major Field: Environmental Engineering,  
Department of Environmental Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor  
Monthon Thanuttamavong, Ph.D. 74 pages.

The Bangkhen Water Treatment Plant Metropolitan Waterworks Authority which produces water at a force of 3.6 million cubic meters/ day is in progress for 24 hours a day. As the raw water supply from Chao Phraya River is far away from the plant there are many factors to encourage algae to bloom in the water. Due to an algae bloom problem, the water supply constitutes some negative impact on the raw water quality and water treatment process. The purpose of this research was to study the efficiency of algae growth inhibition of Resonance frequency with chlorine by focusing on reducing the dose of chlorine before treatment to control the chlorine by-product. And to analyze changing of the physical and chemical qualifications of the water after contact resonance frequency and effect of resonance frequency with the coagulant (Alum).

The result showed that using Resonance frequency to inhibit algae growth in raw water of the Bangkhen Water Treatment Plant can reduce chlorine concentration 0.5 mg/litre of raw water treatment process that uses 2 mg/l of solid chlorine 5.15%. Furthermore turbidity, conductivity, alkalinity and pH had more values of using 2 mg/l of solid chlorine 2.74 %, 1.31 %, 1.39 % and 0.01. According to the changing of raw water qualification, the concentration of Alum 1% is increase 5 mg/l.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

\_\_\_ / \_\_\_ / \_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มณฑล ฐานุตตมวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา  
วิทยานิพนธ์หลักที่ได้ช่วยเหลือในการวางแผนงานวิจัย คอยช่วยเหลือให้คำแนะนำต่างๆในงานวิจัย  
แก้ไขข้อบกพร่องต่างๆจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ และขอขอบคุณอาจารย์และ  
ผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่มาร่วมในการสอบปากเปล่าขั้นสุดท้ายพร้อมทั้งให้คำแนะนำและชี้แนะ  
ปรับปรุงงานวิจัยชิ้นนี้ ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่านที่ถ่ายทอด  
วิชาความรู้ และเจ้าหน้าที่จากภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่านที่อำนวยความสะดวก

ขอขอบคุณ คุณสมศักดิ์ ปีสานานนท์ โรงงานผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวง ที่  
เอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์และสารเคมีต่างๆรวมถึงให้คำแนะนำต่างๆทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ดี  
ขอขอบคุณ คุณ Kamol Sirichan และคุณ Peter Evans ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องสร้างความถี่  
เรโซแนนซ์และอำนวยความสะดวกต่างๆ

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ และคุณแม่ ที่ให้การสนับสนุน ให้คำแนะนำ และให้การดูแล  
อย่างดีเสมอมา และขอขอบคุณไปถึงผู้มีพระคุณทุกท่านที่ไม่ได้เอ่ยชื่อนามไว้ ณ ที่นี้

ปรวีร์ นาคะกุล  
มิถุนายน 2552

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	28
อุปกรณ์	28
วิธีการ	29
ผลและวิจารณ์	32
สรุปและข้อเสนอแนะ	58
สรุป	58
ข้อเสนอแนะ	60
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	61
ภาคผนวก	62
ภาคผนวก ก มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปานครหลวง	63
ภาคผนวก ข คุณภาพน้ำของโรงงานผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวง	67
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	74

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ระดับของศักยภาพการก่อมะเร็งของสาร Chlorine by-products บางชนิด	23
2	คุณสมบัติเบื้องต้นของน้ำดิบ	32
3	ปริมาณสารส้ม (1 %) เพื่อตกตะกอนคอลลอยด์ในน้ำดิบ	49
4	ปริมาณสารส้ม (1 %) เพื่อตกตะกอนคอลลอยด์ที่เกิดภายหลังการใช้ความถี่ เรโซแนนซ์	50
5	ปริมาณสารส้ม (1%) เพื่อตกตะกอนคอลลอยด์ที่เกิดขึ้นภายหลังการใช้ แคลเซียมไฮโปคลอไรท์เข้มข้น 2 mg/l เพื่อควบคุมปริมาณสาหร่าย	50
6	ปริมาณสารส้ม (1 %) เพื่อตกตะกอนคอลลอยด์ที่เกิดภายหลังการใช้ความถี่ เรโซแนนซ์ร่วมกับแคลเซียมไฮโปคลอไรท์เข้มข้น 2 mg/l เพื่อควบคุม ปริมาณสาหร่าย	51
ตารางผนวกที่		
ก1	มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปานครหลวง	64
ข1	ชนิดและปริมาณสาหร่ายในน้ำดิบของโรงงานผลิตน้ำบางเขน	68
ข2	ปริมาณสาหร่ายในน้ำดิบที่ก่อให้เกิดการอุดตันบ่อกรอง ของโรงงานผลิตน้ำบางเขน	68

### สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ข3	ปริมาณสาหร่าย Melosira ในน้ำดิบของโรงงานผลิตน้ำบางเขน	69
ข4	ปริมาณสาหร่าย Oscillatoria ในน้ำดิบของโรงงานผลิตน้ำบางเขน	69
ข5	ปริมาณสาหร่าย Cyclotella ในน้ำดิบของโรงงานผลิตน้ำบางเขน	70
ข6	ปริมาณสาหร่าย Synedra ในน้ำดิบของโรงงานผลิตน้ำบางเขน	70
ข7	ปริมาณสาหร่าย Nitzschia ในน้ำดิบของโรงงานผลิตน้ำบางเขน	71
ข8	ปริมาณสาหร่าย Chlorella ในน้ำดิบของโรงงานผลิตน้ำบางเขน	71
ข9	ค่าความขุ่นของน้ำดิบของโรงงานผลิตน้ำบางเขน	72
ข10	ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำดิบของโรงงานผลิตน้ำบางเขน	72
ข11	ค่าความเป็นด่างของน้ำดิบของโรงงานผลิตน้ำบางเขน	73
ข12	ค่าพีเอชของน้ำดิบของโรงงานผลิตน้ำบางเขน	73

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	สาหร่าย <i>Melosira</i> sp.	6
2	สาหร่าย <i>Oscillatoria</i> sp.	7
3	สาหร่าย <i>Cyclotella</i> sp.	8
4	สาหร่าย <i>Synedra</i> sp.	9
5	สาหร่าย <i>Lyngbya</i> sp.	10
6	สาหร่าย <i>Nitzschia</i> sp.	11
7	สาหร่าย <i>Anabaena</i> sp.	12
8	สาหร่าย <i>Chlorella</i> sp.	13
9	สาหร่าย <i>Euglena</i> sp.	14
10	สเปกตรัมการแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	26
11	การทำงานของความถี่เรโซแนนซ์	26
12	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ORP และความเข้มข้นของคลอรีนในน้ำสะอาดที่มี ค่าพีเอช 7	27
13	ขั้นตอนของการทำการศึกษา	31
14	แสดงสัดส่วนเฉลี่ยของสาหร่ายแต่ละชนิดในน้ำดิบของโรงงานผลิตน้ำ บางเขน	33
15	แสดงการควบคุมปริมาณสาหร่ายโดยใช้คลอรีน	35
16	แสดงการควบคุมปริมาณสาหร่ายโดยใช้ความถี่เรโซแนนซ์ร่วมกับคลอรีน	36
17	แสดงการควบคุมปริมาณสาหร่ายโดยใช้ความถี่เรโซแนนซ์ เปรียบเทียบกับการ การควบคุมปริมาณสาหร่ายโดยใช้คลอรีน	37
18	แสดงอัตราการลดปริมาณสาหร่ายโดยใช้ความถี่เรโซแนนซ์ เปรียบเทียบกับการ การควบคุมปริมาณสาหร่ายโดยใช้คลอรีน	38
19	แสดงการควบคุมปริมาณสาหร่าย <i>Oscillatoria</i> sp. โดยใช้ความถี่เรโซแนนซ์ เปรียบเทียบกับการควบคุมปริมาณสาหร่ายโดยใช้คลอรีน	39

### สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
20	แสดงการควบคุมปริมาณสาหร่าย <i>Melosira</i> sp. โดยใช้ความถี่เรโซแนนซ์ เปรียบเทียบกับ การควบคุมปริมาณสาหร่ายโดยใช้คลอรีน	40
21	แสดงการควบคุมปริมาณสาหร่าย <i>Cyclotella</i> sp. โดยใช้ความถี่เรโซแนนซ์ เปรียบเทียบกับ การควบคุมปริมาณสาหร่ายโดยใช้คลอรีน	40
22	แสดงการควบคุมปริมาณสาหร่าย <i>Synedra</i> sp. โดยใช้ความถี่เรโซแนนซ์ เปรียบเทียบกับ การควบคุมปริมาณสาหร่ายโดยใช้คลอรีน	41
23	แสดงการควบคุมปริมาณสาหร่าย <i>Nitzschia</i> sp. โดยใช้ความถี่เรโซแนนซ์ เปรียบเทียบกับ การควบคุมปริมาณสาหร่ายโดยใช้คลอรีน	41
24	แสดงการควบคุมปริมาณสาหร่าย <i>Chlorella</i> sp. โดยใช้ความถี่เรโซแนนซ์ เปรียบเทียบกับ การควบคุมปริมาณสาหร่ายโดยใช้คลอรีน	42
25	แสดงการเปลี่ยนแปลงความขุ่นของน้ำเมื่อใช้ความถี่เรโซแนนซ์ เปรียบเทียบ กับน้ำดิบ และน้ำดิบใส่คลอรีน	43
26	แสดงการเปลี่ยนแปลงความนำไฟฟ้าของน้ำเมื่อใช้ความถี่เรโซแนนซ์ เปรียบเทียบกับน้ำดิบ และน้ำดิบใส่คลอรีน	44
27	แสดงการเปลี่ยนแปลงความเป็นต่างของน้ำเมื่อใช้ความถี่เรโซแนนซ์ เปรียบเทียบกับน้ำดิบ และน้ำดิบใส่คลอรีน	46
28	แสดงการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดเป็นด่างของน้ำเมื่อใช้ความถี่เร โซแนนซ์ เปรียบเทียบกับน้ำดิบ และน้ำดิบใส่คลอรีน	48
29	ปริมาณสารส้ม (1%) ที่ใช้ในการตกตะกอนคอลลอยด์	52

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

kg	=	กิโลกรัม (kilogram)
mg /l	=	มิลลิกรัมต่อลิตร
ml	=	มิลลิลิตร
mV	=	มิลลิโวลต์
NTU	=	Nephelometric Turbidity Unit
ORP	=	oxidation-reduction potential
PAC	=	โพสิออคูมินัมคลอไรด์
sp.	=	species
$\mu\text{mho /cm}$	=	ไมโครซีเมนต์/เซนติเมตร
$^{\circ}\text{C}$	=	องศาเซลเซียส

การควบคุมปริมาณสาหร่ายในระบบผลิตน้ำประปาด้วยความถี่เรโซแนนซ์  
กรณีศึกษา : โรงงานผลิตน้ำประปา บางเขน การประปานครหลวง

**Algae Control in Water Treatment System by Resonance Frequency**  
**Case Study: Bangkhen Water Treatment Plant Metropolitan Waterworks**  
**Authority**

คำนำ

โรงงานผลิตน้ำบางเขน ซึ่งสามารถผลิตน้ำประปาได้มากกว่า 3.6 ล้านลูกบาศก์เมตร /วัน ดำเนินการตลอด 24 ชั่วโมง ผลิตน้ำบริโภคน้ำและอุปโภคให้แก่ประชากรในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล โดยใช้น้ำดิบจากแม่น้ำเจ้าพระยาส่งผ่านคลองประปาตะวันออกจนถึงโรงงานผลิตน้ำระยะทางประมาณ 20 กิโลเมตร จึงใช้ระยะเวลาในการเดินทางยาวนานส่งผลให้มีหลายปัจจัยในการเร่งการเจริญเติบโตของสาหร่าย เช่น แสงแดดและสารอาหารต่างๆ เมื่อสาหร่ายเพิ่มจำนวนขึ้นจะส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพน้ำ คือน้ำเปลี่ยนสี ก่อเกิดกลิ่นเหม็นและรสชาติเปลี่ยน นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดปัญหาในกระบวนการผลิตน้ำประปา ทำให้ลดประสิทธิภาพในกระบวนการ Coagulation และ Flocculation ขึ้นทราขกรองเสื่อมคุณภาพเร็วกว่าปกติ

ปัจจุบันทางการประปาได้แก้ปัญหาเรื่องการเพิ่มขึ้นของสาหร่ายในน้ำดิบ โดยวิธี Pre-Chlorination ก่อนเข้าถังตกตะกอน และ Intermediate Chlorination ก่อนเข้าบ่อกรอง ปริมาณการใช้คลอรีนในแต่ละเดือนจะไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับคุณภาพน้ำดิบที่เข้าระบบในช่วงเดือนธันวาคมถึงเดือนกุมภาพันธ์ในน้ำดิบจะมีสารอาหารและแสงแดดเหมาะต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายจึงต้องเพิ่มการใช้คลอรีนเพิ่มขึ้น โดยคลอรีนอิสระ (Free Residual Chlorine) ที่ตรวจพบในน้ำประปามีค่าอยู่ในเกณฑ์แนะนำขององค์การอนามัยโลก ปี 2004 (WHO 2004) คืออยู่ในช่วง 0.2 – 1 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งไม่มีผลต่อสุขภาพ ปริมาณคลอรีนที่จะมีผลต่อสุขภาพ คือ สูงกว่า 5 มิลลิกรัม/ลิตร โดยจะมีผลต่อเนื้อเยื่อทางเดินหายใจและเนื้อเยื่อทางเดินอาหารทำให้เกิดการระคายเคือง คลอรีนอิสระในปริมาณดังกล่าวก่อให้เกิดสาร Trihalomethane หรือ สารก่อมะเร็ง ดังนั้นช่วงฤดูที่มีการใช้คลอรีนในการแก้ปัญหาสาหร่ายในปริมาณสูงๆจะเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดสารก่อมะเร็งในน้ำ

ในการศึกษาครั้งนี้จะศึกษาผลการควบคุมปริมาณสารร้ายจากการใช้ความถี่เรโซแนนซ์ โดยเครื่อง Computerised Water Conditioner จะทำการกำหนดรูปแบบและสร้างอนุกรมคลื่น จากนั้นจึงทำการส่งสัญญาณไปยังตัวนำคลื่นและสร้างคลื่นวิทยุรอบเส้นท่อซึ่งมีน้ำไหลผ่าน คลื่นนี้จะทำให้น้ำมีศักยภาพการให้และการรับอิเล็กตรอน (Oxidation - reduction potential, ORP) สูงขึ้นโดยมีค่าสูงกว่าคลอรีน, โอโซนและโบรมีน ดังนั้นเมื่อเราทำการใส่คลอรีนลงไป คลอรีนจะสามารถทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของน้ำได้มากขึ้น ทำให้สามารถลดความเข้มข้นของคลอรีนลงมาได้ในการควบคุมสารร้ายได้ในปริมาณมาก การใช้ความถี่เรโซแนนซ์ในการกำจัดสารร้ายนี้อาจจะเป็นแนวทางเลือกในการแก้ปัญหาสารร้ายที่เกิดขึ้นในระบบการผลิตน้ำประปาของการประปานครหลวงต่อไป

### วัตถุประสงค์

1. ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพกระบวนการกำจัดสาหร่ายในระบบผลิตน้ำประปา ระหว่างการใช้ความถี่เรโซแนนซ์ และการใช้คลอรีน
2. ศึกษาปริมาณของคลอรีนที่เหมาะสมเมื่อใช้ร่วมกับความถี่เรโซแนนซ์
3. ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำที่ผ่านความถี่เรโซแนนซ์

### ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาสถานะใช้งานของ วิธีการลดปริมาณสาหร่ายโดยการใช้ความถี่เรโซแนนซ์ ในระดับห้องปฏิบัติการ
2. ศึกษาโดยใช้น้ำผิวดินจากต่อน้ำดิบของโรงงานผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวง
3. ศึกษาผลของการตกตะกอนเมื่อใช้ความถี่เรโซแนนซ์ ร่วมกับสารช่วยการตกตะกอน (สารส้ม)
4. ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำที่ผ่านความถี่เรโซแนนซ์ ได้แก่ ความขุ่น พีเอช การนำไฟฟ้า ความเป็นด่าง
5. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการลดปริมาณสาหร่ายที่ก่อให้เกิดการอุดตันบ่อกรองระหว่างการ ใช้ความถี่เรโซแนนซ์และการใช้คลอรีน

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เพื่อเป็นแนวทางเลือกในการบำบัดสาหร่ายในน้ำดิบแทนวิธีการใช้สารเคมีแบบดั้งเดิม

## การตรวจเอกสาร

### 1. กระบวนการผลิตน้ำประปา

ระบบผลิตน้ำประปาเป็นระบบที่มีหน้าที่ปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบจากแหล่งกำเนิดต่างๆ ได้แก่ น้ำผิวดิน และน้ำใต้ดิน ทั้งทางด้านกายภาพ เคมี และชีวภาพ เพื่อให้ น้ำดิบที่ผ่านเข้าระบบผ่านคุณภาพตามมาตรฐานที่กำหนด โดยกระบวนการผลิตน้ำประปานั้นจะแตกต่างกันตามคุณภาพของน้ำดิบ ซึ่งระบบมาตรฐาน(Conventional Water Treatment Process) นั้นจะประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

1.1 การบำบัดขั้นต้น(Pre-Treatment of water) ได้แก่ การกรองโดยใช้ตะแกรงเพื่อกำจัดเศษวัสดุที่ลอยมากับน้ำดิบ การเติมอากาศเพื่อเพิ่มออกซิเจนในน้ำและยังช่วยกำจัด เหล็ก แมงกานีสที่ละลายอยู่ในน้ำ การเติมคลอรีนขั้นต้น(pre-chlorination) มีจุดประสงค์เพื่อกำจัดสิ่งมีชีวิตต่างๆที่อยู่ในน้ำดิบเพื่อลดปัญหาการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ สาหร่าย และสัตว์น้ำขนาดเล็กในระบบประปา ซึ่งขั้นตอนที่กล่าวมาเหล่านี้อาจมีหรือไม่มีก็ได้ ขึ้นอยู่กับคุณภาพของน้ำดิบ

1.2 การรวมตะกอนทางเคมี(chemical coagulation and flocculation) โดยการเติมสารสร้างตะกอนชนิดต่างๆ ได้แก่ สารส้ม (Aluminium Sulfate or Alum,  $Al_2(SO_4)_3$ ) สาร Ferric Chloride สาร Polyaluminum Chloride (PAC) และสาร Polymer

โดยกระบวนการกวนเร็ว (Coagulation) เพื่อให้สารตกตะกอนสัมผัสกับน้ำและสารแขวนลอยในน้ำอย่างทั่วถึง และกระบวนการกวนช้า (Flocculation) เพื่อให้กลุ่มของสารแขวนลอยที่สัมผัสกับสารตกตะกอนแล้ว (floc) มาอยู่รวมตัวกันจนมีอนุภาคใหญ่ขึ้น

1.3 การตกตะกอน (Sedimentation) เพื่อให้กลุ่มของสารแขวนลอยที่สัมผัสกับสารตกตะกอนแล้ว (floc) ตกตะกอนแยกออกจากน้ำ

1.4 การกรอง (filtration) เพื่อแยกเอาของแข็งที่มีขนาดเล็กจนไม่สามารถตกตะกอนได้ออกจากน้ำเพื่อให้ น้ำมีความขุ่นต่ำตามมาตรฐานกำหนด

1.5 การฆ่าเชื้อโรค (disinfection) เพื่อฆ่าเชื้อโรค และควบคุมปริมาณสาหร่ายเพื่อไม่ให้คุณภาพน้ำต่ำกว่ามาตรฐาน โดยปริมาณคลอรีนที่ใส่ต้องไม่น้อยจนไม่สามารถฆ่าเชื้อโรคได้ และไม่มากจนส่งผลต่อผู้บริโภค

## 2. ชนิดของสาหร่ายที่เป็นปัญหาต่อระบบประปา โรงงานผลิตน้ำบางเขน

เป็นที่ทราบกันว่าสาหร่ายนั้นส่งผลเสียต่อระบบผลิตน้ำประปาและคุณภาพน้ำโดยตรง น้ำดิบที่โรงงานผลิตน้ำบางเขนใช้ในการผลิตน้ำประปานั้นมาจากแม่น้ำเจ้าพระยา ซึ่งมีสาหร่ายปะปนอยู่หลายชนิด โดยมีสาหร่ายจำนวน 9 ชนิดที่มีจำนวนมากและส่งผลต่อระบบผลิตน้ำประปา และทำให้คุณภาพน้ำต่ำกว่ามาตรฐาน ดังนั้นทางโรงงานผลิตน้ำบางเขนจึงมีการเฝ้าระวังสาหร่ายเหล่านี้เป็นพิเศษ สาหร่าย 9 ชนิดนี้ก่อปัญหาและมีลักษณะโดยทั่วไป ดังนี้

### 2.1 Melosira

เป็นสาหร่ายที่ก่อให้เกิดการอุดตันต่อชั้นทรายกรองในระบบประปา จึงทำให้ระบบการกรองเสื่อมประสิทธิภาพเร็วกว่าปกติ มีลักษณะเป็นสายโซ่ ประกอบด้วยเซลล์รูปกลม รูปไข่ หรือทรงกระบอก เซลล์เรียงต่อเป็นเส้นตรง โดยใช้แผ่นเมือกบนผิวหน้าฝาของเซลล์ที่อยู่ติดกัน และกัน ลวดลายบนฝาอาจเป็นรู หรือเป็นรูสลับกับลายรูปหลายเหลี่ยมอาจมีหรือไม่มีอินเตอร์คาลา รีแบนด์ ถ้ามีจะมีหลายแผ่นซึ่งไม่หนามาก คลอโรพลาสต์เป็นแผ่นกลม หรือเป็นจุดขนาดไม่เท่ากัน มีจำนวนมากและอยู่กันบริเวณขอบเซลล์ นิวเคลียสอยู่กลางเซลล์ สร้างออกซิสปอร์โดยการที่ฝา 2 ฝา แยกห่างจากกัน มีการสร้าง resting spore พบทั้งน้ำจืดและน้ำทะเล (ถัดดา, 2542)

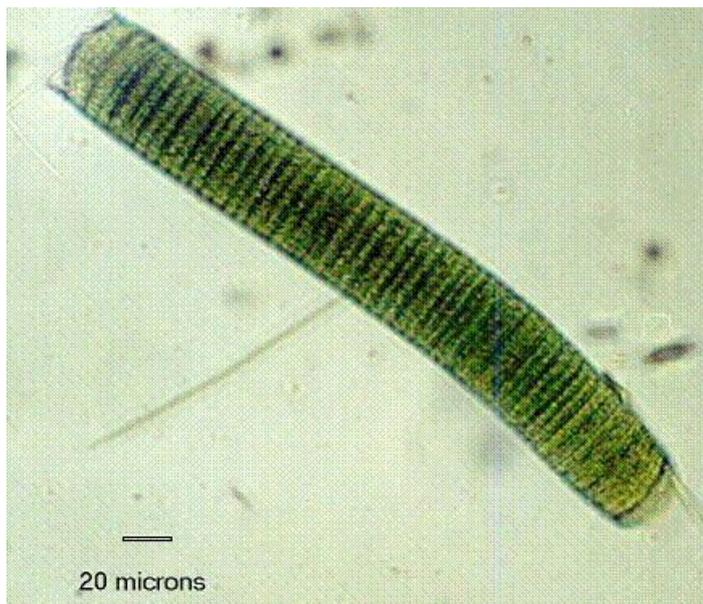


ภาพที่ 1 สาหร่าย Melosira

ที่มา: Michigan Technology University (2009)

## 2.2 Oscillatoria

เป็นสาหร่ายที่ก่อให้เกิดการอุดตันต่อชั้นทรายกรองในระบบประปา จึงทำให้ระบบการกรองเสื่อมประสิทธิภาพเร็วกว่าปกติ มีลักษณะเป็นสายเส้นเดี่ยวๆ หรืออยู่รวมเป็นกลุ่มหนาแน่นแต่ละสายไม่แตกแขนง ทรย์โคมประกอบด้วยเซลล์แถวเดียวเรียงต่อกันเป็นสาย โดยมีความกว้างของเซลล์สม่ำเสมอตลอดสาย (ถัดดา, 2542)

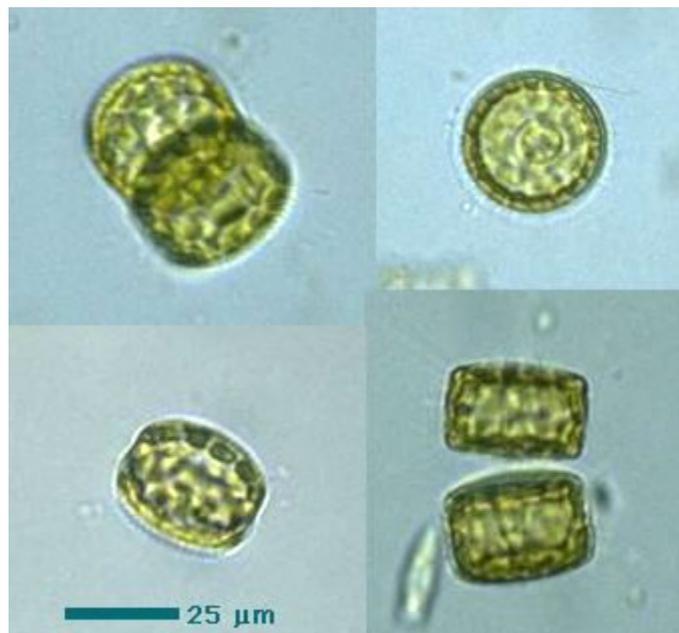


ภาพที่ 2 สาหร่าย Oscillatoria

ที่มา: Kentucky Division of Water Organization (2009)

### 2.3 Cyclotella

เป็นสาหร่ายที่ก่อให้เกิดการอุดตันต่อชั้นทรายกรองในระบบประปา จึงทำให้ระบบการกรองเสื่อมประสิทธิภาพเร็วกว่าปกติ มีลักษณะคือ เซลล์มักอยู่เดี่ยวๆ เซลล์รูปกลมทางด้านขาล้ว รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าทางด้านเกอเดิล หน้าฝาไม่เรียบแต่มีลักษณะเป็นลูกคลื่น ลายบนฝาแบ่งออกเป็น 2 วง กึ่งกลางฝามีลวดลายแบบร่างแห มีคุ่มหรือเป็นจุด ขอบฝามี struted process 1 ก้าน และ labiates process 1 ก้าน (ลัดดา, 2542)

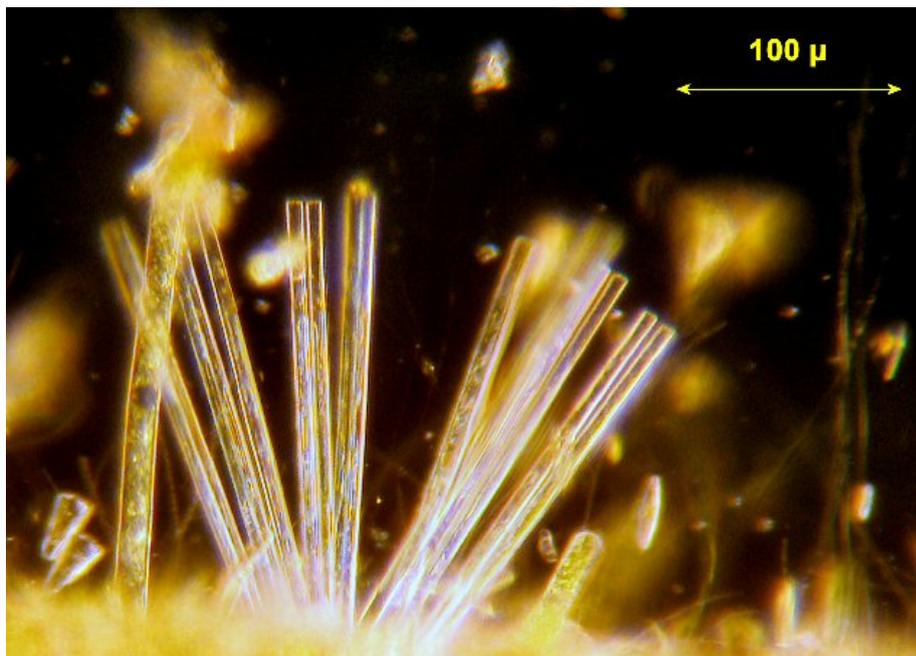


ภาพที่ 3 สาหร่าย *Cyclotella*

ที่มา: Japan Science and Technology Corporation (2009)

#### 2.4 Synedra

นอกจาก *Synedra* sp. จะเป็นสาหร่ายที่ก่อให้เกิดการอุดตันต่อชั้นทรายกรองในระบบประปาแล้ว ยังก่อให้เกิดรสและกลิ่นในน้ำ อันส่งผลให้คุณภาพน้ำประปาด่ำลง ไม่เหมาะต่อการบริโภค มีลักษณะคือ เซลล์จะอยู่เดี่ยวๆ หรือเป็นกลุ่มเซลล์รูปพัดหรือเป็นสายตรงเมื่อมองจากด้านบนแล้ว ฝาเป็นรูปรียาวค้ำยเข้ม ปลายทั้งสองอาจแหลมเล็กกว่าส่วนอื่นหรือพองออกเล็กน้อย เมื่อมองจากด้านเกอเดิลเซลล์เป็นรูปสี่เหลี่ยมที่มีด้านยาวยาวกว่าด้านกว้างมากและปลายตัดตรง ลวดลายบนฝาเป็นเส้นตั้งต้นจากขอบทั้งสองด้านหรือเป็นเส้นพาดขวางตลอดความกว้างของฝาราฟิเทียมเป็นเส้นแนวแกนอะพิคัล กึ่งกลางฝาอาจมีพื้นที่ใสๆ หรือไม่มีคลอโรพลาสต์เป็นแผ่นขนาดเล็กจำนวนมาก (ลัดดา, 2542)

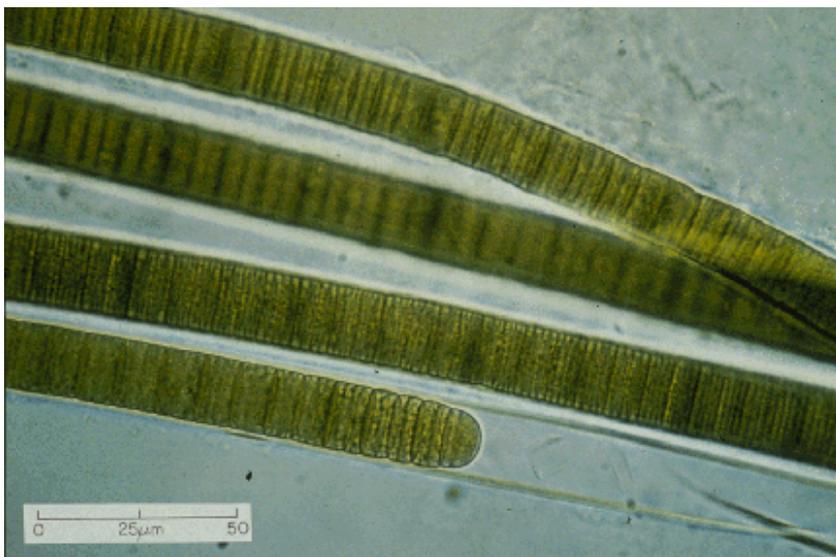


ภาพที่ 4 สาหร่าย Synedra

ที่มา: Piotr Rotkiewicz (2009)

## 2.5 Lyngbya

เป็นสาหร่ายที่ก่อให้เกิดการอุดตันต่อชั้นทรายกรองในระบบประปา มีลักษณะทั่วไป คล้าย Oscillatoria แต่จะมีซีทหนาหุ้มอยู่ ซีทอาจใสไม่มีสี หรือมีสีเช่นสีน้ำตาลปนเหลืองหรือดำ ทุกเซลล์ในทรย์โครมจะมีขนาดเท่ากันตลอด สืบพันธุ์โดยการสร้างสปอร์โมโน ซึ่งเมื่อสร้างขึ้นมาแล้ว จะยังคงอยู่ภายในซีท และจะถูกคั้นให้หลุดออกจากซีทเพื่อเจริญเป็นเส้นสายใหม่ โดย Lyngbya พบทั่วไปทั้งน้ำจืด น้ำกร่อย น้ำเค็ม และที่ชุ่มชื้นทั่วไป (ลัดดา, 2542)

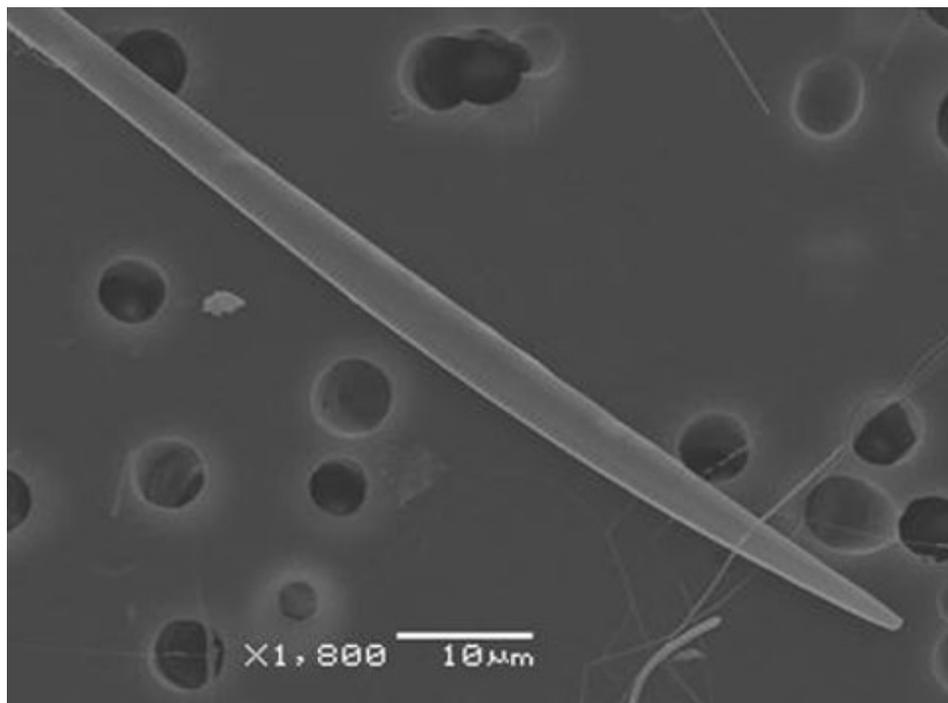


ภาพที่ 5 สาหร่าย Lyngbya

ที่มา: Cushman Foundation (2009)

#### 2.6 Nitzschia sp.

เป็นสาหร่ายที่ก่อให้เกิดการอุดตันต่อชั้นทรายกรองในระบบประปา มีลักษณะทั่วไปคือ เซลล์มักอยู่เดี่ยวๆ หรืออาจอยู่กันเป็นโคโลนีรูปดาว หรืออยู่ในท่อเมือก รูปเข็ม หรือ โค้งแบบตัวเอส เซลล์รูปรีแบบข้าว ปลายเซลล์มักแหลม สันบนเซลล์อยู่กึ่งกลางฝาทั้งสองฝา เมื่อตัดขวางเซลล์ (x-section) ฝามีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน ฉะนั้น สันที่อยู่ฝาบบนจะอยู่เยื้องกับสันที่อยู่บนฝาล่าง ราฟีอยู่ในสัน และบนราฟีมีฟิวเล (fibulae) เรียงกัน ลายบนเซลล์เป็นเส้นพาดขวางเซลล์และขนานกัน บริเวณกึ่งกลางเซลล์ในแนวตั้งมักใส เรียกว่า สเตอรัม คลอโรพลาสต์เป็นแถบสั้นๆ 2 แถบ อยู่เยื้องกันตรงกลางมีไพรินอยด์หรือเป็นแผ่นกลมจำนวนมาก (Hasle, 1976)



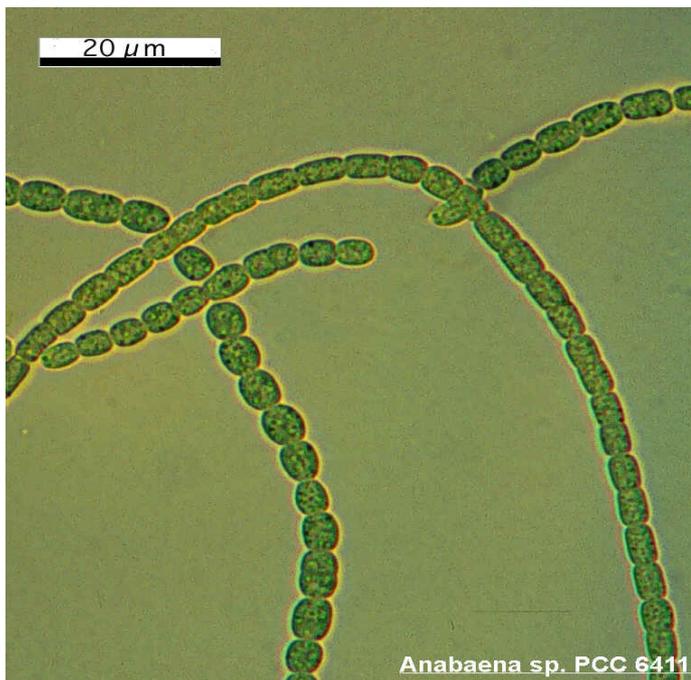
ภาพที่ 6 สาหร่าย Nitzschia

ที่มา: College of Chaleston (2009)

## 2.7 Anabaena

เป็นสาหร่ายที่ทำให้เกิดสี กลิ่น และรสชาติของน้ำเปลี่ยน ซึ่งทำให้น้ำไม่เหมาะแก่การอุปโภค และ บริโภค มีลักษณะโดยทั่วไปคือ มีทรีย์โคมชนิดเดี่ยวๆ มีซิพหุ้ม เส้นสายตรงหรือบิดเป็นเกลียว ในบางชนิดเซลล์มีรูปร่างแบนแบบถังเบียร์ กลม หรือรูปสี่เหลี่ยม มีเฮเทอโรซิสต์อยู่ระหว่างเซลล์ปกติ สืบพันธุ์โดยการสร้างอะคีนีตอยู่ภายในเส้นสาย

สกุลนี้เป็นแพลงก์ตอนในน้ำจืด มักทำให้เกิดการบลูมเป็นครั้งคราว บางชนิดผลิตสารพิษที่เรียกว่า แอนาโทอกซิน (anatoxin) ซึ่งเป็นสารพิษประเภท neurotoxin (ลัดดา, 2542)

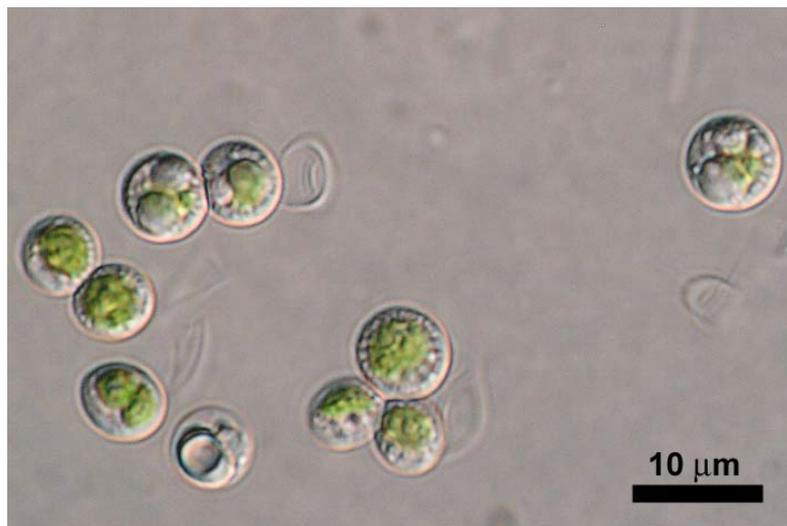


ภาพที่ 7 สาหร่าย Anabaena

ที่มา: Instituto de Bioquímica Vegetal y Fotosíntesis (2009)

## 2.8 Chlorella

เป็นสาหร่ายที่ก่อให้เกิดการอุดตันต่อชั้นทรายกรองในระบบประปา มีลักษณะทั่วไปคือ เซลล์อยู่เดี่ยวๆ หรืออาจอยู่รวมกันเป็นกระจุก เซลล์รูปร่างกลมรี ขนาดต่างกันทั้งที่พบในที่เดียวกัน คลอโรพลาสต์รูปถ้วยหรือเป็นแผ่นอยู่ริมเซลล์ อาจมีหรือไม่มีพริโนยด์ สืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศแบ่งเซลล์จนได้จำนวน 4 หรือ 8 ซึ่งยังคงรวมกันอยู่ในผนังเซลล์พ่อแม่ (ลัดดา, 2542)



ภาพที่ 8 สาหร่าย Chlorella

ที่มา: Institute of Botany Section of Plant Ecology of Prague (2009)

## 2.9 Euglena

เป็นสาหร่ายที่พบในน้ำที่ปนเปื้อนด้วยน้ำเสีย มีลักษณะทั่วไปคือ เป็นสาหร่ายสกุลที่มีคลอโรพลาสต์ จัดเป็น colored หรือ photographic form คลอโรพลาสต์ที่มีรูปร่างหลายแบบ เช่น เป็นรูปโด่งกลม รูปรีบีน ซึ่งมิชอบเรียบหรือเป็นจัก คลอโรพลาสต์มีหรือไม่มีไพริโนยด์อาจมีแต่แกน (core) หรือไม่มีซีทหุ้ม ไพริโนยด์ รูปร่างของคลอโรพลาสต์ใช้ในการจำแนกชนิดได้ และคอนแทรกไทล์เวคิวโอล (แม้แต่ชนิดที่พบในทะเล) ส่วนใหญ่เซลล์กลม เพลลิวเคลของเซลล์ค่อนข้างแข็งจนถึงอ่อนนุ่ม มีการเคลื่อนไหวแบบยูกลีโนยด์ canal opening แบบ subapical เซลล์ว่ายน้ำเป็นอิสระ มักอยู่เดี่ยวๆ (ลัดดา, 2542)



ภาพที่ 9 สาหร่าย Euglena

ที่มา: Marine Biological Research Institute of Japan (2009)

### 3. ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย

สาหร่ายแต่ละประเภทมีพฤติกรรมแตกต่างกัน จึงจำเป็นต้องศึกษาเพื่อเข้าใจถึงปัจจัยในการเจริญเติบโตของสาหร่าย เพื่อจุดประสงค์ในการควบคุมคุณภาพน้ำเพื่อลดปัจจัยเหล่านี้

#### 3.1 แสงสว่าง (Illumination)

แสงเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย สาหร่ายแต่ละประเภทจะมีความต้องการความเข้มแสงที่ไม่เท่ากัน โดยขึ้นอยู่กับชนิดของรงควัตถุในสาหร่ายนั้นๆ เช่น สาหร่ายสีน้ำเงินแกมเขียวบางชนิดมีรงควัตถุ Phycobiliproteins โดยรงควัตถุนี้ประกอบด้วย allophycocyanin (สีน้ำเงิน) phycocyanin (สีน้ำเงิน) และ phycoerythrin (สีแดง) (Bazir and Bryant, 1982) โดยรงควัตถุเหล่านี้จะเก็บแสงสีเขียว สีเหลือง และสีส้ม ในช่วง 500-600 นาโนเมตร (Ingrid and Jamie, 1999)

### 3.2 ความขุ่นของน้ำ (Turbidity)

ความขุ่นของน้ำหมายถึงน้ำที่มีสารห้อยแขวน เช่น อินทรีย์สาร อนินทรีย์สาร แพลงตอน และสิ่งมีชีวิตเล็กๆ (microscopic organism) ซึ่งขัดขวางทางเดินของแสงที่ผ่านน้ำนั้น สารพวกนี้จะทำให้เกิดการกระจัดกระจาย (scattered) และดูดกลืน (absorbed) ของแสงแทนที่จะปล่อยให้แสงผ่านไปเป็นเส้นตรง (กรรณิการ์, 2549) โดยปริมาณของสาหร่ายที่อยู่ในน้ำขึ้นอยู่กับความขุ่นของน้ำเป็นหลัก โดยหากช่วงเวลาใดที่น้ำมีความขุ่นสูงจะพบสาหร่ายน้อยมาก หรืออาจไม่พบเลย ทั้งนี้เนื่องจากความขุ่นมีผลต่อการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย หากน้ำมีความขุ่นสูงทำให้แสงแดดส่องลงไปได้ไม่มาก จึงทำให้สาหร่ายสังเคราะห์แสงได้ต่ำ ดังนั้นการเจริญเติบโตจึงลดน้อยตามไปด้วย (ศิริประภา, 2546) ความขุ่นของน้ำมักนิยมนำมาวัดเป็นหน่วยความขุ่น FTU (Formazin Turbidity Unit) หรือ JUT (Jackson Turbidity Unit) และ NTU (Nephelometric Turbidity Unit) (ไมตรี และ จารุวรรณ, 2538)

### 3.3 อุณหภูมิ (Temperature)

สาหร่ายน้ำจืดเกือบทุกชนิดเจริญเติบโตได้ดีที่ระดับอุณหภูมิตั้งแต่ 15-25 °C ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 30 °C สาหร่ายจะตาย สาหร่ายน้ำเค็มชอบอุณหภูมิระหว่าง 5-15 °C และจะตายเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 20 °C แต่มีสาหร่ายบางชนิดสามารถทนอุณหภูมิสูงๆ ได้ดี เช่น *Anacystis nidulans* ซึ่งทนอุณหภูมิสูงกว่า 30 °C ได้ แต่ต้องควบคุมอุณหภูมิในการเลี้ยงให้คงที่ตลอดเวลา (ลัดดา, 2543)

### 3.4 ความเป็นกรดเป็นด่าง (pH)

เป็นปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งเพราะสาหร่ายแต่ละชนิดมีความต้องการ pH ในระดับที่แตกต่างกัน ซึ่งความเป็นกรดเบสที่เหมาะสมกับสิ่งมีชีวิตในน้ำจะมีค่าอยู่ในช่วง 6.0-8.0 โดยทั่วไปสาหร่ายส่วนมากจะเติบโตได้ดีในน้ำที่มีสภาพเป็นด่าง (ลัดดา, 2543)

### 3.5 ธาตุอาหาร(Nutrient)

ธาตุอาหารเป็นปัจจัยสำคัญในการเจริญเติบโตของสาหร่าย ซึ่งอาหารหรือธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับสาหร่าย สามารถแบ่งออกได้เป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มธาตุอาหารหลัก (macronutrient) และกลุ่มธาตุอาหารรอง (micronutrient) ธาตุอาหารหลัก คือ ธาตุอาหารที่ประกอบเป็นโครงสร้างของสาหร่าย ประกอบด้วย คาร์บอน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส แคลเซียม แมกนีเซียม ซัลเฟอร์ และโปแตสเซียม ธาตุอาหารรอง คือ ธาตุอาหารที่เป็นส่วนประกอบของโมเลกุลที่จำเป็น เช่น เอนไซม์ เป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตหรือเป็นส่วนประกอบของโมเลกุลของเอนไซม์บางชนิด ธาตุอาหารหลักที่เป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็วของสาหร่าย ได้แก่ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส โดยเราจะสามารถสังเกตได้จากแหล่งน้ำที่อยู่ในสภาวะ eutrophic โดยสามารถอนุมานได้ว่ามีปริมาณไนโตรเจน และฟอสฟอรัสสูงนั้นจะมีการเจริญเติบโตของสาหร่ายอย่างรวดเร็ว

สำหรับไนโตรเจนซึ่งมีความสำคัญรองจากคาร์บอนในแง่ปริมาณ ปริมาณไนโตรเจนของพืชมีปริมาณร้อยละ 7-10 ของน้ำหนักแห้งของเซลล์ ยกเว้นไดอะตอม ซึ่งมีปริมาณไนโตรเจนน้อยกว่าสาหร่ายกลุ่มอื่น เนื่องจากชลิกาเป็นธาตุที่สำคัญของผนังเซลล์ไดอะตอม ในสาหร่ายที่ขาดไนโตรเจนจะสร้างสารประกอบคาร์บอน เช่น น้ำมัน หรือแป้ง มาทดแทนสาหร่ายสามารถใช้ไนโตรเจนทั้งในรูปอนินทรีย์และอินทรีย์ อีกทั้งยังสามารถใช้ไนโตรเจนในรูปของแก๊สได้อีกด้วย แต่มีสาหร่ายบางชนิดเท่านั้น ได้แก่ สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินที่สามารถตรึงไนโตรเจนจากอากาศได้ ไนโตรเจนในรูปสารอนินทรีย์ได้แก่เกลือ 3 ชนิด คือ ไนเตรต ไนไตรท์ และแอมโมเนีย ถ้าแหล่งไนโตรเจนอยู่ในรูปของเกลือแอมโมเนียเพียงอย่างเดียวจะทำให้ระดับ pH ของอาหารลดต่ำอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นอันตรายต่อสาหร่าย ไนไตรท์เป็นสารละลายอนินทรีย์ซึ่งพืชหลายชนิดต้องการใช้ในปริมาณไม่เกิน 1 มิลลิโมลล์ ถ้ามากกว่านี้จะทำให้เกิดอันตราย ส่วนสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนที่พืชนำไปใช้ได้แก่ ยูเรีย เอไมด์ (amide) กลูตามีน (glutamine) และแอสพาราจีน (asparagine) ซึ่งจัดว่าเป็นแหล่งไนโตรเจนที่ดี ส่วนสารอินทรีย์ไนโตรเจนชนิดอื่น ได้แก่ กรดอะมิโน (โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรดไกลซีน เซรีนอะลามีน) กรดกลูตามิก และกรดแอสพาร์ติกนั้น สาหร่ายต้องการเพื่อการเติบโต ซึ่งจะแตกต่างกันตามชนิด ถ้าสาหร่ายขาดไนโตรเจนจะมีผลต่อการสังเคราะห์ด้วยแสงและปริมาณรงควัตถุหรือสารสี (pigments) ของเซลล์ รวมทั้งทำให้กิจกรรมของเอนไซม์บางชนิดลดลงด้วย

ฟอสฟอรัสเป็นธาตุที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช เพราะมีส่วนเกี่ยวข้องกับกระบวนการต่างๆของเซลล์ โดยเฉพาะกระบวนการถ่ายเทพลังงาน และกระบวนการสร้างกรดนิวคลีอิก แม้ว่าแหล่งน้ำธรรมชาติจะมีปริมาณสารอินทรีย์ฟอสฟอรัสสูงกว่าอนินทรีย์ฟอสฟอรัส แต่พืชต้องการฟอสฟอรัสในรูปสารอนินทรีย์มากกว่า ฉะนั้นสารอินทรีย์ฟอสฟอรัสจึงจัดว่าเป็นแหล่งเบื้องต้นของฟอสฟอรัสที่จะแตกตัวเป็นสารอนินทรีย์ ได้แก่ ฟอสฟอรัส ออโรฟอสเฟต หรือ ฟอสเฟต โดยอาศัยเอนไซม์เรียกว่าฟอสฟาเทสหรือฟอสโฟเอสทาเรสในปริมาณ 20 ไมโครกรัมต่อลิตร ทั้งนี้ปริมาณอาจสูงกว่าหรือต่ำกว่านี้ก็ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำ ระดับ pH และปริมาณธาตุอาหารชนิดอื่น ได้แก่ โซเดียม โปแตสเซียม หรือแมกนีเซียม ถ้าสาหร่ายขาดฟอสฟอรัสจะมีผลเสียต่อการเจริญเติบโต หรือปริมาณ โปรตีน รงควัตถุ ชนิดคลอโรฟิลล์-เอ RNA และ DNA จะลดลง แต่แป้งหรือคาร์โบไฮเดรตกลับเพิ่มขึ้นซึ่งมีผลทำให้รูปร่างเซลล์เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม (ลัดดา, 2543)

มีการทดสอบเกี่ยวกับอัตราส่วนระหว่างไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของสาหร่าย สำหรับสาหร่ายที่มีเยื่อหุ้มเซลล์จะมีอัตราส่วนไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสที่เหมาะสมคือ 16-23 โมเลกุลไนโตรเจนต่อ 1 โมเลกุลฟอสฟอรัส และ สำหรับสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินจะมีอัตราส่วนไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสที่เหมาะสมคือ 10-16 โมเลกุลไนโตรเจนต่อ 1 โมเลกุลฟอสฟอรัส (Schreurs, 1992)

#### 4. วิธีการวัดมวลชีวภาพและการเจริญเติบโตของสาหร่าย (Growth and Biomass Measurements)

##### 4.1 การนับเซลล์ (Cell Counts) (ลัดดา, 2543)

เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากในการวัดการเจริญเติบโตของสาหร่ายบริสุทธิ์ อุปกรณ์ที่ใช้คือกล้องจุลทรรศน์หัวกลับ (Inverted Microscope) และสไลด์นับเซลล์ (Counting Slide or Counting Chamber) สไลด์มีหลายชนิดให้เลือกใช้ตามความหนาแน่นของตัวอย่างและขนาดของเซลล์ในตัวอย่างที่นับ ชนิดที่นิยมใช้คือ Sedgwick-Rafter Counting Chamber ความจุ 1 มิลลิลิตร Palmer Maloney Chamber ความจุ 0.1 มิลลิลิตร และสไลด์นับเม็ดเลือด (Haematometer หรือ Haemocytometer) ความจุ 0.004 มิลลิลิตร ก่อนการนับเซลล์โดยการใส่สไลด์นับเซลล์ควรรล้างสไลด์ให้สะอาดแล้วเช็ดให้แห้ง ตัวอย่างที่จะนับควรคงด้วยน้ำยาฟอร์มาลิน 4 เปอร์เซ็นต์ หรือน้ำยา Lugol) เสียก่อน หยดตัวอย่างบนสไลด์ ครอบคลุมแผ่นกระจก (Cover

Glass) โดยเร็วและระวังไม่ให้มีฟองอากาศในช่องใส่ตัวอย่าง รอให้เซลล์ตกตะกอนบนสไลด์ซึ่งใช้เวลาประมาณ 4-6 นาที ก่อนนับควรตรวจดูด้วยกำลังขยายต่ำเพื่อสำรวจว่าเซลล์มีการกระจายตัวสม่ำเสมอดีหรือไม่ หรือความหนาแน่นของเซลล์มากจนนับไม่สะดวก เพื่อจะได้เตรียมสไลด์นับเสียใหม่ อุปกรณ์นับเซลล์อีกชนิดหนึ่ง เรียกว่า เครื่องนับ โคลเตอร์ (Coulter Counter) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่นิยมใช้นับเซลล์ของสาหร่ายชนิดไม่เป็นเส้น แต่เซลล์ที่นับควรมีรูปร่างกลม เพราะเครื่องมือชนิดนี้ไม่สามารถตรวจสอบเซลล์รูปร่างชนิดอื่นได้ แม้ว่าอุปกรณ์ชนิดนี้ทำงานได้รวดเร็วแต่ราคาแพงและผู้ใช้ต้องระมัดระวังในการใช้ รวมทั้งต้องหมั่นทำความสะอาดเครื่องอยู่เสมอเพื่อให้เครื่องทำงานได้อย่างถูกต้อง

#### 4.2 การวัดการกระจายของแสงหรือความขุ่น (Light Scattering or Turbidity)

เป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุดในการวัดการเจริญเติบโตของเชื้อสาหร่ายบริสุทธิ์ ข้อดีของวิธีนี้คือ วัดง่ายและสะดวก ข้อมูลที่ได้เป็นค่าของมวลชีวภาพ (Biomass) ที่เพิ่มขึ้นโดยวัดจากน้ำหนักแห้ง อุปกรณ์ที่ใช้เรียกว่า Colorimeter หรือ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ถ้าจำนวนเซลล์ไม่หนาแน่นนักจำนวนเซลล์จะมีความสัมพันธ์แบบเรขาคณิตกับความเข้มของแสง กล่าวคือ ความเข้มของแสงจะลดลงเมื่อจำนวนเซลล์เพิ่มขึ้น

#### 4.3 การวัดน้ำหนักแห้ง (Dry Weight Measurement)

เหมาะกับสาหร่ายชนิดที่ไม่ใช่เซลล์เดี่ยวที่นับจำนวนเซลล์ไม่ได้ ฉะนั้นจึงนิยมใช้กับสาหร่ายชนิดที่เป็นเส้น วิธีวัดจะวัดทุกวันแล้วนำผลมาพล็อตกราฟ เริ่มการวัดโดยเก็บตัวอย่างจากภาชนะเลี้ยง ก่อนเก็บควรกวนตัวอย่างให้เข้ากันดีเสียก่อน กรองสาหร่ายออกจากน้ำโดยการปั่นให้ตกตะกอน (Centrifugation) รินน้ำใส่ๆ ช้างบนออก นำตัวอย่างไปอบให้แห้ง ถ้าใช้เครื่องกรอง (Membrane Filter) ควรล้างสาหร่ายบนแผ่นกรองให้สะอาดปลอดจากเกลือหรือสิ่งปนเปื้อนด้วยสารอาหารอย่างเจือจางหรือน้ำกลั่นที่เป็นกลางไม่ควรล้างสาหร่ายน้ำเค็มด้วยน้ำกลั่นเพราะจะทำให้เซลล์แตก อุณหภูมิที่ใช้ออบแห้งประมาณ 70 - 110 องศาเซลเซียส นานประมาณ 10-12 ชั่วโมง หรือจนกว่าน้ำหนักจะคงที่ นำแผ่นกรองออกจากตู้อบแล้วนำไปใส่โถดูดความชื้น (Desiccator) นาน 15-30 นาที (ถ้าใส่แผ่นกรองหรือเยื่อกรองในหลอดแก้วควรนำ หลอดแก้วเข้าตู้อบพร้อมตัวอย่างด้วย) รายงานผลเป็นน้ำหนักแห้งต่อปริมาตรหรือพื้นที่ของน้ำที่ทำ การเก็บตัวอย่างสาหร่าย

#### 4.4 การวัดคลอโรฟิลล์ (Chlorophyll Determination)

เป็นวิธีวัดมวลชีวภาพที่รวดเร็ว มีวิธีวัดดังนี้ เริ่มแรกให้เก็บตัวอย่างจากภาชนะเลี้ยงกรองเซลล์หรือแยกเซลล์ออกโดยการปั่นให้ตกตะกอน ต่อจากนั้นจึงสกัดสารสี(Pigment) โดยเติมสารละลายเคมี ชนิดที่นิยมใช้มีหลายชนิด ได้แก่ อะซิโตน เมทานอล อีเธอร์ เมื่อสกัดสารสีออกจากเซลล์แล้วให้กรองอีกครั้งหนึ่งเพื่อกำจัดตะกอนหรือสิ่งปนเปื้อนออกให้หมด นำสารละลายที่กรองได้ใส่ในหลอดแก้วที่สะอาดสำหรับวัดค่าคลอโรฟิลล์ เซลล์สาหร่ายแต่ละชนิดมีค่าคลอโรฟิลล์ที่แตกต่างกันไป ซึ่งแบ่งออกได้ 3 ชนิด คือ คลอโรฟิลล์ เอ บี และ ซี ทั้งนี้ผู้วัดต้องเลือกใช้ความยาวคลื่นแสงให้เหมาะสมกับชนิดสาหร่ายที่จะวัด สูตรการคำนวณค่าคลอโรฟิลล์แต่ละชนิดมีดังนี้

$$Ca \text{ (mg/l)} = 11.85OD664 - 1.54OD647 - 0.08OD630$$

$$Cb \text{ (mg/l)} = 21.03OD647 - 5.43OD664 - 2.66OD630$$

$$Cc \text{ (mg/l)} = 24.52OD630 - 7.60OD647 - 1.67OD664$$

(APHA, AWWA and WEF, 1992)

### 5. บทบาทของสาหร่ายในระบบประปา

#### 5.1 ก่อให้เกิดการอุดตันต่อระบบการกรอง

สาหร่ายเป็นปัจจัยสำคัญซึ่งทำให้ชั้นทรายกรองเกิดการอุดตัน ส่งผลให้อายุของชั้นทรายกรองสั้นลง ทำให้ต้องมีการล้างย้อนของชั้นทรายกรองบ่อยขึ้นเพื่อให้ระบบการกรองกลับมามีประสิทธิภาพเหมือนเดิม ทำให้ต้องสูญเสียปริมาณน้ำสะอาดที่ใช้ล้างชั้นกรองมากขึ้น สาหร่ายจึงทำให้กระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำช้าลง และสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมากขึ้น นอกจากนี้การใช้สารเคมีจะทำให้เม็ดทรายจับตัวกัน ยากต่อการล้างอีกด้วย

ส่วนมากแล้วถังกรองจะถูกก่อสร้างกลางแจ้งซึ่งมีปัจจัยที่ทำให้สาหร่ายสามารถเจริญเติบโตได้อย่างเต็มที่ ได้แก่ แสงแดด อุณหภูมิ และธาตุอาหาร โดยระบบการตกตะกอนนั้นไม่สามารถกำจัดธาตุอาหารที่ละลายมากับน้ำได้ 100 เปอร์เซ็นต์ จึงทำให้สาหร่ายสามารถเข้ามาเจริญเติบโตในถังกรองได้

สาหร่ายซึ่งสะสมและเจริญเติบโตที่ผิวบนของชั้นทรายกรอง โดยบางชนิดจะเติบโตและจับตัวกันเป็นร่างแห และบางชนิดจะจับตัวกันเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ ผิวชั้นเมื่อจะค่อยๆทำให้อัตราการไหลผ่านชั้นกรองลดลง แต่ก็อาจมีประโยชน์ในแง่ที่สามารถเพิ่มออกซิเจนให้กับน้ำที่ไหลผ่าน ก่อให้เกิดการย่อยสลายอินทรีย์สารภายในเครื่องกรอง โดยแบคทีเรียในสภาวะที่มีการย่อยสลายโดยใช้ออกซิเจน (Aerobic Condition) เมื่อกของสาหร่ายและพืชน้ำ สัตว์น้ำอื่นๆ ที่อยู่บนผิวของชั้นทรายกรอง เรียกว่า ผิวกรอง (Gilbert, 1950)

## 5.2 ครอบคลุมการทำงานของกระบวนการสร้างตะกอนและกระบวนการตกตะกอน

การที่สาหร่ายสามารถเพิ่มหรือลดพีเอชของน้ำได้ทำให้ต้องมีการปรับปริมาณการใช้สารเคมีในการตกตะกอน ขณะที่มีการสังเคราะห์แสง พีเอชของน้ำอาจเพิ่มขึ้นจาก 7 เป็น 10 ได้ ปริมาณสารเคมีที่ใช้ปกติย่อมไม่เพียงพอที่จะลดพีเอชให้ถึงจุดที่จะทำให้เกิดตะกอนทำให้อินทรีย์สารเคมีเพิ่มขึ้น

## 5.3 คุณภาพน้ำประปาที่ผลิตได้ต่ำกว่ามาตรฐาน

ในกระบวนการผลิตน้ำประปาที่ไม่มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณสาหร่ายทำให้มีสาหร่ายปนเปื้อนในน้ำประปา ทำให้น้ำประปามีสี กลิ่น และรส

## 5.4 ทำให้น้ำเป็นพิษ

การสลายตัวของไซยาโนแบคทีเรียปริมาณมากๆ ในเครื่องกรอง และสารพิษจากสาหร่าย ซึ่งผ่านเข้าสู่ระบบส่งจ่ายน้ำอาจเป็นสาเหตุของโรคทางเดินอาหาร (Gastro-Intestinal Disturbances) (U.S., 1976) สาหร่ายชนิด *Anabaena* ทำให้เกิดอาการคัน เมื่อร่างกายไปสัมผัส *Microcystis* และ *Lunbya contoria* เป็นต้นเหตุของโรคภูมิแพ้ที่เรียกว่า hay fever (Nelson, 1941)

### 5.5 ก่อให้เกิดการอุดตันของท่อส่งน้ำ ในระบบจ่ายน้ำ

ถ้าระบบผลิตน้ำไม่สามารถกำจัดสาหร่ายออกไปได้ หรือเกิดสาหร่ายขึ้น ภายหลังกระบวนการผลิตน้ำ จะก่อให้เกิดการอุดตันของท่อส่งน้ำในระบบจ่ายน้ำได้ เนื่องจากการจับตัวของสาหร่ายเป็นกลุ่ม หรือเป็นชั้นเมือก (Slime Layer)

### 5.6 ก่อให้เกิดการกัดกร่อน

การที่สาหร่ายก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งทางกายภาพ และทางเคมีของน้ำ ก่อให้เกิดการกัดกร่อนอาจโดยตรง ณ ที่เกิดหรือทางอ้อม อาจก่อให้เกิดการกัดกร่อนโลหะ หรือแม้แต่คอนกรีต (ศิริประภา, 2546)

## 6. การฆ่าเชื้อโรคโดยการใช้คลอรีนและการเกิดสารตกค้าง

กระบวนการฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาที่นิยมใช้ ได้แก่ กระบวนการเติมคลอรีนเนื่องจากเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดเป็นวิธีที่มีราคาถูกด้วย คลอรีนที่ใช้ อาจเป็นรูปของก๊าซหรือสารประกอบคลอรีนก็ได้ อย่างไรก็ตามสิ่งที่ต้องคำนึงถึงเป็นอย่างมากคือการเติมคลอรีนจะก่อให้เกิดสารตกค้างประเภทต่างๆ ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่

6.1 สารตกค้างที่มีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อโรค (disinfectant residuals) ได้แก่ คลอรีนอิสระ (free chlorine) คลอรามิน (chloramines)

6.2 สารตกค้างประเภทสารอนินทรีย์ (inorganic by-products) ตัวอย่างของสารกลุ่มนี้ ได้แก่ คลอเรตไอออน คลอไรต์ไอออน เป็นต้น

6.3 สารตกค้างประเภท halogenated organic by-products ตัวอย่างของสารกลุ่มนี้ ได้แก่ สารประกอบกลุ่ม trihalomethanes กลุ่ม haloacetic acids กลุ่ม haloacetonitriles กลุ่ม halokeholes กลุ่ม chlorophenols เป็นต้น สารตกค้างกลุ่มนี้เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารอินทรีย์ธรรมชาติ ในน้ำกับคลอรีนซึ่งเติมในกระบวนการฆ่าเชื้อโรค

WHO (2000) รายงานว่าสารตกค้างประเภท halogenated organic by-products กลุ่มที่มีความเข้มข้นสูงสุดคือสารประกอบกลุ่มไตรฮาโลมีเทน US-EPA (1999) รายงานว่าสารตกค้างจากกระบวนการเติมคลอรีนบางชนิดเป็นสารก่อมะเร็ง (carcinogen) ในระดับต่าง ๆ กัน และสารตกค้างประเภท halogenated organic by-products บางชนิดยังมีผลต่อมนุษย์ถึงความสามารถในการสืบพันธุ์ การคลอด ระบบหมุนเวียนโลหิต และอาจส่งผลกระทบต่ออวัยวะภายใน เช่น ตับ ไต เป็นต้น (มัลลิกา และ ผ่องศรี, 2550)

**ตารางที่ 1** ระดับของศักยภาพการก่อมะเร็งของสาร Chlorine by-products บางชนิด

สารตกค้าง	ระดับของศักยภาพในการก่อมะเร็ง
Chloroform	B2
Bromodichloromethane	B2
Dibromochloromethane	C
Bromoform	B2
Monochloroacetic acid	-
Dichloroacetic acid	B2
Trichloroacetic acid	C
Dibromoacetonitrile	C
Trichloroacetonitrile	-
2-Chlorophenol	D
2,4-Dichlorophenol	D
Chlorate	-
Chlorite	D
Bromate	B2
Chlorine Dioxide	D

**หมายเหตุ** ระดับของการก่อมะเร็งมีดังนี้

ระดับ A	เป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์
ระดับ B	สามารถก่อมะเร็งในมนุษย์
ระดับ C	อาจจะก่อมะเร็งในมนุษย์
ระดับ D	หลักฐานไม่เพียงพอที่จะระบุว่าเป็นสารก่อมะเร็ง
ระดับ E	ไม่ปรากฏว่าเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์

**ที่มา:** US-EPA (1999)

## 7. ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดสารตกค้างจากคลอรีน

### 7.1 สารอินทรีย์ธรรมชาติ (Natural organic matter, NOM)

ในน้ำดิบสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำดิบซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเกิดสารประกอบ Chlorine by – products สารอินทรีย์ฮาโลเจนเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำกับคลอรีนซึ่งเดิมในกระบวนการฆ่าเชื้อโรค โดยหากในน้ำดิบยังมีปริมาณสารอินทรีย์อย่างมาก สารอินทรีย์เหล่านี้จะเป็นสารตั้งต้นที่เพิ่มแนวโน้มในการเกิดสารประกอบกลุ่มไตรฮาโลมีเทน (THMs )

### 7.2 โบรไมด์ไอออน (Bromide ion, Br)

โบรไมด์ไอออนปะปนอยู่ในน้ำดิบเป็นปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดสารตกค้างกลุ่มนี้ เนื่องจากโบรไมด์ไอออนนี้จะถูกออกซิไดส์เกิดเป็น โบรมेटไอออน โบรมีนอิสระ(Free bromine) และกรด hypobromous ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ในน้ำก่อให้เกิดสารตกค้างที่มีโบรมีนเป็นส่วนประกอบ (มัลลิกา และ ผ่องศรี, 2550)

### 7.3 ปริมาณคลอรีนที่เติม (Chlorine dosage)

ปริมาณคลอรีนที่เติมจะมีผลต่อชนิดและความเข้มข้นของสารตกค้าง โดยเมื่อความเข้มข้นคลอรีนที่เติมเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความเข้มข้นของสารตกค้างสูงขึ้น (มัลลิกา และ ผ่องศรี, 2550)

### 7.4 อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิจะส่งผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนกับสารอินทรีย์ให้เร็วขึ้น ดังนั้นจึงส่งผลให้ปริมาณไตรฮาโลมีเทนเพิ่มขึ้นด้วย (มัลลิกา และ ผ่องศรี, 2550)

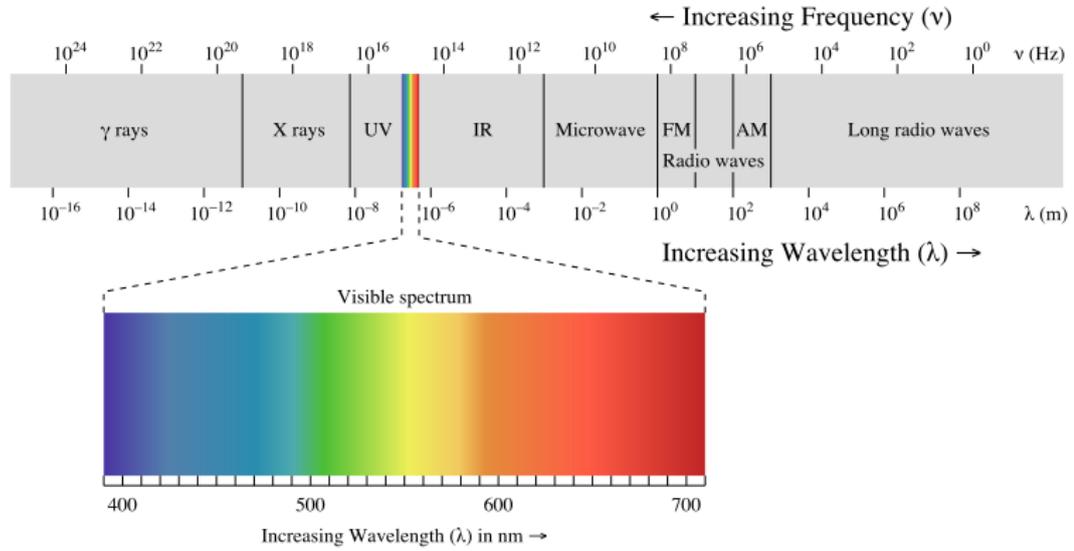
### 7.5 ระยะเวลาสัมผัสสาร (Chlorine contact time)

งานวิจัยหลายชิ้นพบว่าเมื่อระยะเวลาสัมผัสสารเพิ่มมากขึ้นจะเกิดสารไตรฮาโลมีเทนเพิ่มขึ้น โดยหลังจากการเติมคลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อในน้ำ จะเกิดสารไตรฮาโลมีเทนขึ้นอย่างรวดเร็วใน 4 ชั่วโมงแรก ปฏิกิริยาจะเกิดอย่างสมบูรณ์หลังจากเวลาผ่านไป 20 ชั่วโมง

## 8. ความถี่เรโซแนนซ์ (Resonance Frequency)

เรโซแนนซ์ คือปรากฏการณ์การสั่นพ้องของคลื่นจนมีแอมพลิจูดสูงขึ้นไปกว่าความถี่ใดๆ เรียก ระบบการสั่นสะเทือนนี้ว่าความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งความถี่ของการสั่นหรือแกว่งจะไม่เปลี่ยนแปลง แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด แม้แต่คลื่นที่มีช่วงการสั่นน้อยก็สามารถเกิดเป็นคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงได้ เนื่องจากระบบมีการสะสมพลังงานการสั่นสะเทือนหากวัตถุมีการสั่นสะเทือนเล็กน้อยการสั่นสะเทือนจะมีความถี่เท่ากับความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) โดยปรากฏการณ์เรโซแนนซ์สามารถเกิดขึ้นได้ทุกชนิดของการสั่นสะเทือนและทุกชนิดคลื่น ได้แก่ การสั่นพ้องทางกล (Mechanical resonance), การสั่นพ้องทางคลื่นเสียง (Acoustic resonance), การสั่นพ้องทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic resonance), การสั่นพ้องทางคลื่นปรมาณู (Nuclear Magnetic Resonance), การสั่นพ้องของอิเล็กตรอน (Electron Spin Resonance) และการสั่นพ้องทางการแผ่รังสี (Resonance of quantum wave function)

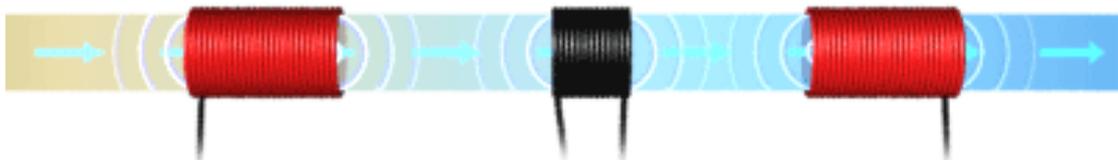
โดยเครื่องมือการสร้างความถี่เรโซแนนซ์ในการศึกษาครั้งนี้จะทำการแปลงกระแสไฟฟ้าออกเป็นสัญญาณวิทยุและส่งอนุกรมคลื่นเหล่านี้ผ่านท่อซึ่งมีกระแสน้ำไหลผ่าน ซึ่งคลื่นไฟฟ้านี้จะสามารถแบ่งชนิดได้ตามความถี่ของคลื่น(หรือความยาวคลื่น) จากสเปกตรัมดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 สเปกตรัมการแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ที่มา: Wikipedia (2009)

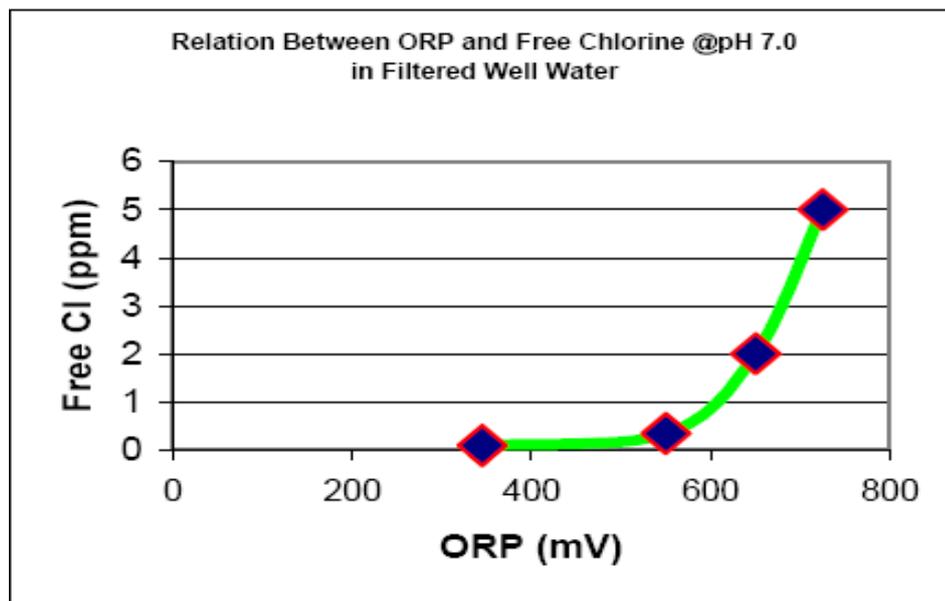
การผ่านอนุกรมคลื่นวิทยุลงในกระแสน้ำนั้นทำให้เกิดการสร้าง  $\text{OH}^\cdot$  (hydroxyl),  $\text{O}$  (atomic oxygen),  $\text{H}_2\text{O}_2$  (hydrogen peroxide) และ  $\text{O}_2$  (molecular oxygen) จากโมเลกุลของน้ำ คลื่นนี้จะทำให้น้ำมีศักยภาพการให้และการรับอิเล็กตรอน (Oxidation - reduction potential, ORP) สูงขึ้นโดยมีค่าสูงกว่าคลอรีน, โอโซนและโบรมีน ดังนั้นเมื่อเราทำการใส่คลอรีนลงไป คลอรีนจะสามารถทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของน้ำได้มากขึ้น ทำให้สามารถลดความเข้มข้นของคลอรีนลงมาได้ แต่มีความจำเป็นที่จะต้องควบคุมพีเอชให้อยู่ในช่วง 7.2 ถึง 7.6 เนื่องจากพีเอชสูงๆจะทำให้ประสิทธิภาพของคลอรีนลดลงจากการลดลงของค่า ORP



ภาพที่ 11 การทำงานของความถี่เรโซแนนซ์

ที่มา: Water Industry Alliance (2009)

การวัดค่า ORP จะวัดในหน่วยมิลลิโวลต์ (millivolts) ผลลัพธ์ของค่า ORP นี้สามารถวัดออกมาเป็นผลบวกหรือผลลบก็ได้ โดยจะให้ค่าสุทธิของอิเล็กตรอนที่อยู่ในน้ำหากค่า ORP ยังมีค่าสูงศักยภาพในการฆ่าเชื้อโรคจะยิ่งสูงขึ้น ค่า ORP สำหรับแหล่งน้ำที่สามารถบริโภคได้ควรมีค่าไม่เกิน 700 มิลลิโวลต์



ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ORP และความเข้มข้นของคลอรีนในน้ำสะอาดที่มีค่าพีเอช 7

ที่มา: University of California (2009)

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

1. น้ำดิบและสาหร่ายจากโรงงานผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวง
2. สารเคมี
  - 2.1 คลอรีนผง  $\text{Ca}(\text{OCl})_2$
  - 2.2 สารส้ม  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$
  - 2.3 โซเดียมไฮโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ )
  - 2.4 กรดไฮโดรคลอริก (HCl)
  - 2.5 Phenolphthalein Indicator
3. เครื่องมือ
  - 3.1 ถังไฟเบอร์กลาสขนาด 500 ลิตร
  - 3.2 อุปกรณ์สร้างความถี่เรโซแนนซ์ Hydrosmart Digital 20
  - 3.3 ท่อ PVC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร
  - 3.4 เครื่องสูบน้ำขนาด 6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง
  - 3.5 เครื่องวัดความขุ่น (Turbidimeter)
  - 3.6 เครื่องชั่งไฟฟ้าละเอียด (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง)
  - 3.7 เครื่องวัดค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH meter)
  - 3.8 ชุดทดสอบจาร์เทส (Jar test)
  - 3.9 เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermometer)
  - 3.10 เครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้า (Conductivity meter)
  - 3.11 ไมโครปิเปต (Micropipet) ขนาด 100-1000 ไมโครลิตร
  - 3.12 ไมโครปิเปต (Micropipet) ขนาด 1000-5000 ไมโครลิตร
  - 3.13 เครื่องแก้วมาตรฐาน

## วิธีการ

1. วิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้น และปริมาณสารละลายของน้ำดิบจากโรงงานผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวง โดยทำการวิเคราะห์หาค่า ความขุ่น pH Alkalinity Conductivity และปริมาณสารละลาย โดยการศึกษารายละเอียดในแหล่งน้ำแต่ละแหล่ง ทำการวิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์

2. ศึกษาประสิทธิภาพของค่าความถี่เรโซแนนซ์

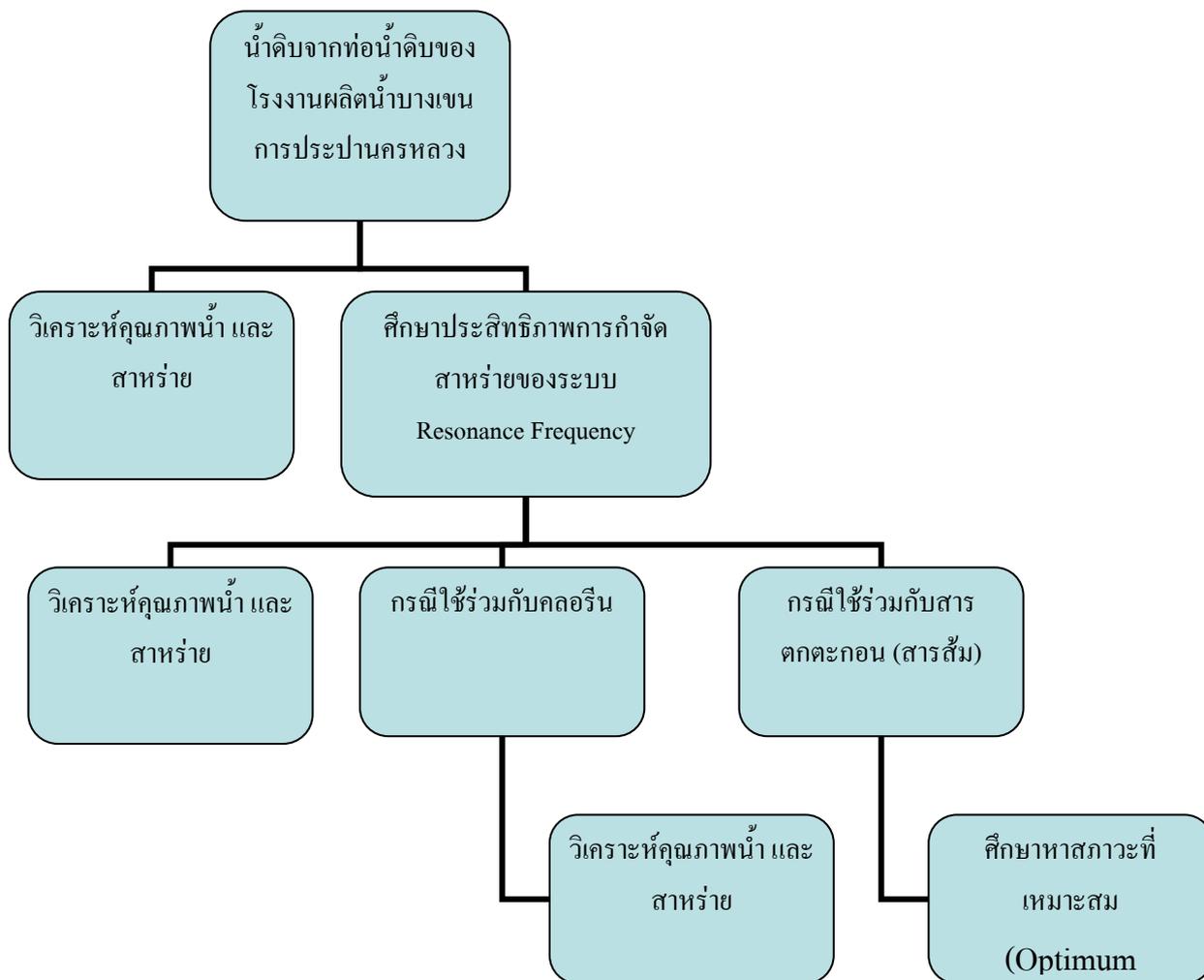
2.1 ศึกษาผลของค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่มีต่อคุณภาพน้ำ และปริมาณสารละลาย ใช้น้ำดิบและสารละลายจากท่อน้ำดิบของโรงงานผลิตน้ำบางเขน โดยให้น้ำดิบผ่านความถี่เรโซแนนซ์ จากนั้นจึงทำการนำตัวอย่างที่ได้มาทำการวิเคราะห์ ความขุ่น ปริมาณคลอรีนอิสระ พีเอช การนำไฟฟ้า ความเป็นด่าง และปริมาณสารละลาย

โดยนำน้ำดิบมาใส่ไว้ในถังไฟเบอร์ขนาด 500 ลิตร ใส่คลอรีนผง  $\text{Ca}(\text{OCl})_2$  ที่ความเข้มข้น 0.0 – 2.0 mg/l พร้อมทั้งกวนให้เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ จากนั้นสูบน้ำผ่านความถี่เรโซแนนซ์จนครบอนุกรมของคลื่นไปไว้ในถังขนาด 500 ลิตร อีกใบหนึ่ง จากนั้นตั้งทิ้งไว้ในที่ๆ ไม่มีแสงแดดส่องถึงเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ตามมาตรฐานของการประปา ทำการหยุดปฏิกิริยาทันที (After complete mixing) ด้วยสารละลายสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต (10 %)

2.2 ศึกษาผลของการตกตะกอนเมื่อใช้ความถี่เรโซแนนซ์ร่วมกับสารสร้างตะกอน(สารส้ม) โดยทดลองหาปริมาณสารส้มที่เหมาะสมในการตกตะกอนคอลลอยด์หลังผ่านความถี่เรโซแนนซ์

ตกตะกอนคอลลอยด์ที่เกิดขึ้นภายหลังการใช้ความถี่เรโซแนนซ์และคลอรีน ในการกำจัดสารละลาย ด้วยสารส้ม  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  ทำการทดลองเพื่อหาปริมาณสารตกตะกอนที่เหมาะสม โดยการเติม สารส้ม 1 % ค่า pH ตามสภาวะจริงไม่ทำการปรับค่า pH ทำการกวนโดยใช้เครื่องมือจาร์เทสต์ (Jar test) เร็วในอัตราความเร็ว 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 1 นาทีแล้วเปลี่ยนมากวนช้า 50 รอบ/นาที เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเปลี่ยนความเร็วรอบในการกวนช้าเป็น 20 รอบ/นาที เป็นเวลา 5

นาที่ แล้วตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 5 นาที ในสภาวะอุณหภูมิห้อง (25-30 °C) ทำการวิเคราะห์ pH, Turbidity และAlkalinity ก่อนและหลังเติมสารส้ม 1 %



ภาพที่ 13 ขั้นตอนการทำการศึกษา

## ผลและวิจารณ์

จากการศึกษาการควบคุมปริมาณสาหร่ายในน้ำดิบของระบบผลิตน้ำประปาโรงงานผลิตน้ำบางเขน โดยการศึกษาประสิทธิภาพการลดปริมาณสาหร่ายเมื่อใช้คลอรีนที่ความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการใช้คลอรีนร่วมกับความถี่เรโซแนนซ์ รวมถึงการหาปริมาณที่เหมาะสมของคลอรีนเมื่อใช้ร่วมกับความถี่เรโซแนนซ์ มีผลการทดลองดังต่อไปนี้

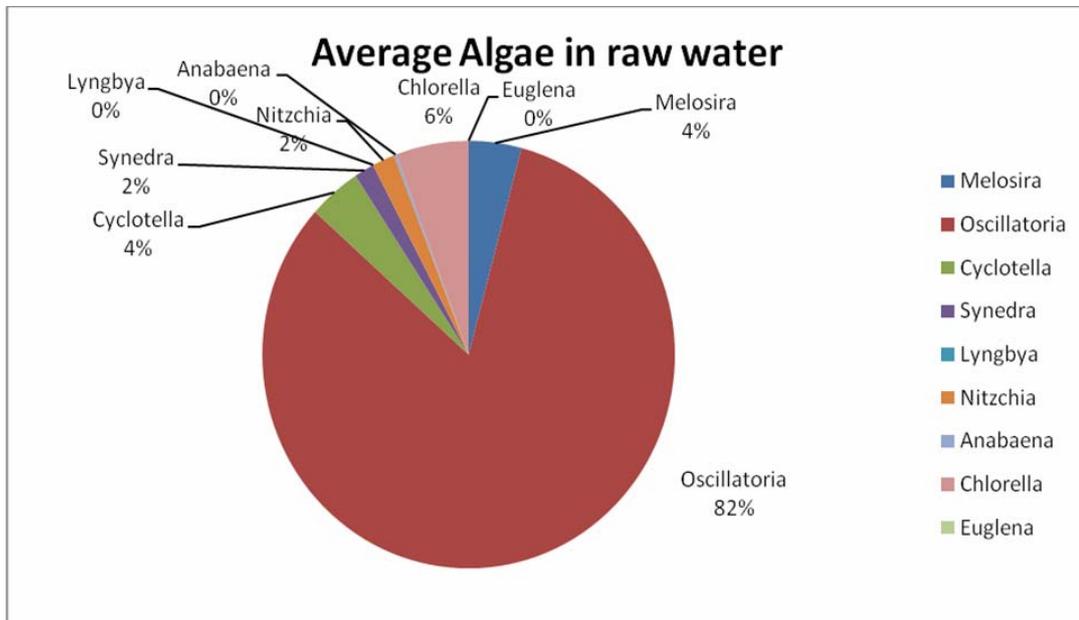
### 1. คุณสมบัติเบื้องต้นของน้ำดิบ

#### ตารางที่ 2 คุณสมบัติเบื้องต้นของน้ำดิบ

Parameter	Sample						
	unit	10/02/52	24/02/52	3/03/52	12/03/52	19/03/52	24/03/52
Algae	unit/100ml	1080	800	4640	1720	3880	1680
Turbidity	NTU	18.80	9.33	23.50	19.90	27.90	24.00
Conductivity	$\mu\text{mho/cm}$	309	286	292	292	283	295
pH		6.25	6.06	6.61	6.67	5.93	4.06
Alkalinity	mg/l	110.80	88.80	105.00	104.40	93.20	99.20

จากการเก็บตัวอย่างน้ำ ของโรงงานผลิตน้ำบางเขนเพื่อทำการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของน้ำดิบจำนวน 10 ครั้ง ซึ่งเป็นการสุ่มเก็บตัวอย่างเพื่อเป็นตัวแทนคุณภาพน้ำในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนเมษายนเนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่น้ำดิบมีปริมาณสาหร่ายสูง

สาหร่ายที่ก่อปัญหาต่อโรงงานผลิตน้ำบางเขนมี 9 ชนิดซึ่งบางชนิดมีจำนวนมากและส่งผลกระทบต่อระบบผลิตน้ำประปา และทำให้คุณภาพน้ำต่ำกว่ามาตรฐาน ดังนั้นทางโรงงานผลิตน้ำบางเขนจึงมีการเฝ้าระวังสาหร่ายเหล่านี้เป็นพิเศษ ซึ่งสัดส่วนเฉลี่ยของสาหร่ายแต่ละชนิดในน้ำดิบแสดงดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 แสดงสัดส่วนเฉลี่ยของสาหร่ายแต่ละชนิดในน้ำดิบของโรงงานผลิตน้ำบางเขน

ปรากฏการณ์การเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของสาหร่ายนั้น มักจะมีปัจจัยมาจาก ความเข้มแสง อุณหภูมิ ความขุ่นของน้ำ ความเป็นกรดเป็นด่างที่เหมาะสม และสารอาหารในน้ำที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งปัจจัยดังกล่าวนี้จะแปรผันไปตามฤดูกาลที่เปลี่ยนไป และคุณภาพน้ำของแหล่งน้ำ ซึ่งพบว่าสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินจะสามารถเจริญเติบโตได้ดีที่สุด

โดยระยะทางในการส่งน้ำดิบของโรงงานผลิตน้ำบางเขนมีระยะทางไกลจึงทำให้น้ำสัมผัสกับแสงแดดเป็นเวลานานจึงทำให้สาหร่ายได้รับแสงในปริมาณที่มีความเข้มของแสงอย่างเพียงพอและเหมาะสม สามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานในขบวนการเมตาบอลิซึมต่างๆ ได้ดีทำให้สาหร่ายเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว

น้ำดิบของโรงงานผลิตน้ำบางเขนใช้แหล่งน้ำดิบจากแม่น้ำเจ้าพระยาโดยคุณภาพน้ำดิบจะเปลี่ยนแปลงไม่มากโดยมีค่า pH อยู่ในช่วง 6.0-8.0 และความเป็นกรดเบสที่เหมาะสมกับสิ่งมีชีวิตในน้ำจะมีค่าอยู่ในช่วง 6.0-8.0 ด้วย จึงทำให้สาหร่ายสามารถเจริญเติบโตได้ดี

อุณหภูมิ (Temperature) มีผลต่อการเจริญเติบโต การสืบพันธุ์และการละลายน้ำของ ก๊าซออกซิเจน Perkins (1974) กล่าวว่าอุณหภูมิมีอิทธิพลต่ออัตราเมตาโบลิซึมของแพลงก์ตอน โดยที่ระดับผิวน้ำที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจะมีอัตราเมตาโบลิซึมของแพลงก์ตอนสูงกว่าในชั้นน้ำด้านล่าง (ปฐมพร, 2551) สาหร่ายน้ำจืดเกือบทุกชนิดเจริญเติบโตได้ดีที่ระดับอุณหภูมิตั้งแต่ 15-25 °C ซึ่งอุณหภูมิของโรงงานผลิตน้ำบางเขนในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนเมษายนอยู่ในช่วง 20-35 °C จึงทำให้สาหร่ายสามารถเจริญเติบโตได้ดี

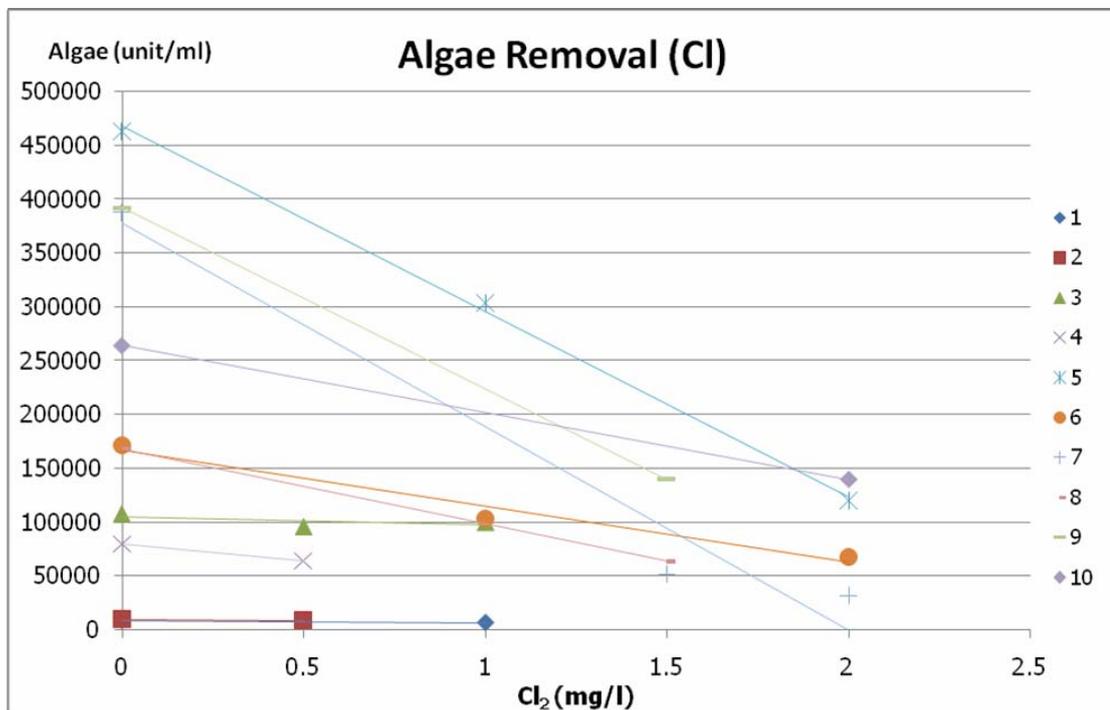
ความขุ่นของน้ำดิบของโรงงานผลิตน้ำบางเขนมีค่าอยู่ระหว่าง 16-40 NTU ซึ่งความขุ่นของน้ำซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของสาหร่ายนั้นจะต้องน้อยกว่า 50 NTU ดังนั้น ความขุ่นของน้ำดิบของโรงงานผลิตน้ำบางเขนจึงเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย

ปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างที่ทำให้สาหร่ายสามารถเจริญเติบโตได้ดี คือปริมาณสารอาหารใน แหล่งน้ำแต่จากการที่แหล่งน้ำไหลผ่านหมู่บ้าน แหล่งชุมชน รวมทั้งแหล่งกสิกรรม แม้จะมีการ ป้องกันการเทสิ่งปฏิกูลลงในแหล่งคลองประปาก็ตาม แต่เมื่อฝนตกจะเกิดการชะเอาธาตุอาหารจาก ชุมชนลงสู่แหล่งน้ำส่งผลให้มีการปนเปื้อนของธาตุอาหารต่างๆ ที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของ สาหร่าย

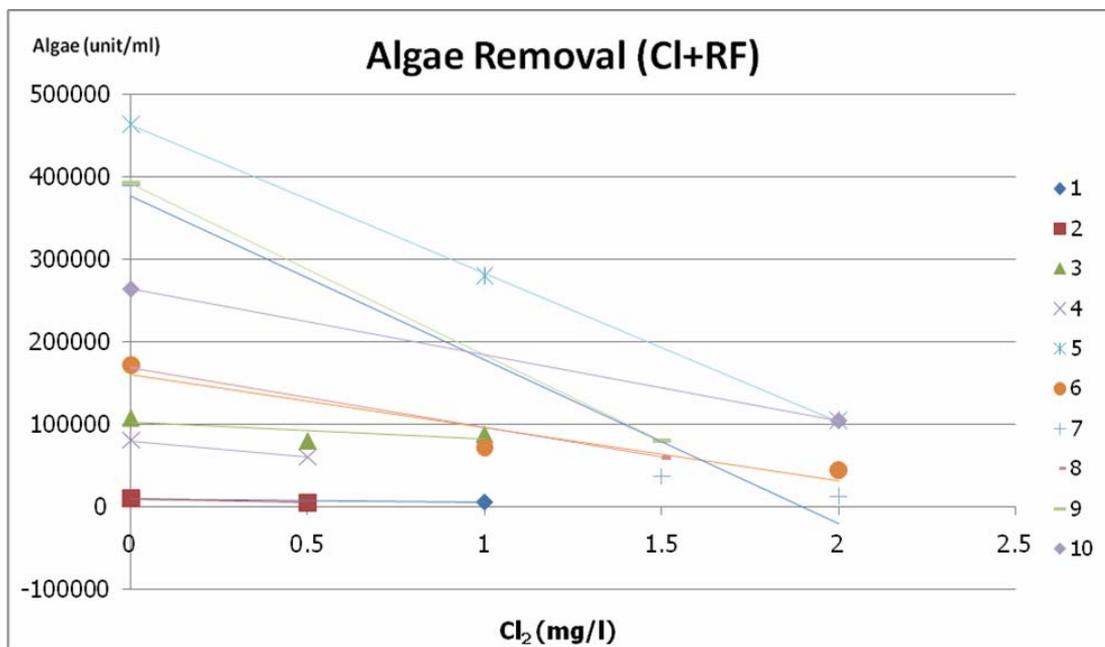
## 2. ศึกษาประสิทธิภาพของการลดปริมาณสาหร่ายโดยใช้ความถี่เรโซแนนซ์

### 2.1 ศึกษาผลของความถี่เรโซแนนซ์ ที่มีต่อปริมาณสาหร่าย

ในขั้นตอนนี้นี้ขั้นต้นจะเก็บตัวอย่างน้ำดิบจากโรงงานผลิตน้ำบางเขน ซึ่งยังไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพใดๆ โดยทำการทดลองตามสภาพความปกติของน้ำดิบ นำน้ำดิบมาใส่ไว้ในถังไฟเบอร์ขนาด 500 ลิตร ใส่คลอรีนที่ความเข้มข้น 0.0 – 2.0 mg/l พร้อมทั้งกวนให้เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ จากนั้นสูบน้ำผ่านความถี่เรโซแนนซ์จนครบอนุกรมของคลื่น ไปไว้ในถังขนาด 500 ลิตร อีกใบหนึ่ง จากนั้นตั้งทิ้งไว้ในที่ๆ ไม่มีแสงแดดส่องถึงเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ตามมาตรฐานของการประปา ทำการหยุดปฏิกิริยาทันที (After complete mixing) ด้วยสารละลายสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (10 %) เปรียบเทียบจำนวนเซลล์ของสาหร่ายก่อนการบำบัด และ ภายหลังการบำบัด โดยการใช้คลอรีน และการใช้คลอรีนร่วมกับความถี่เรโซแนนซ์ แสดงผลการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสาหร่าย ดังภาพที่ 15 และ 16

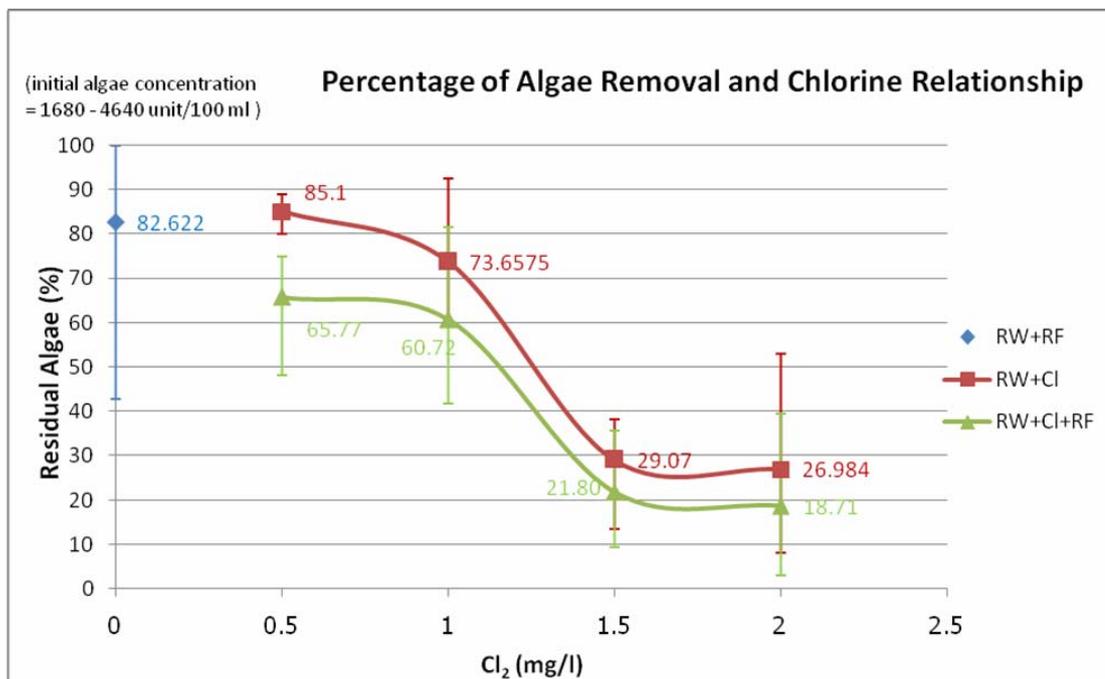


ภาพที่ 15 แสดงการควบคุมปริมาณสาหร่ายโดยใช้คลอรีน



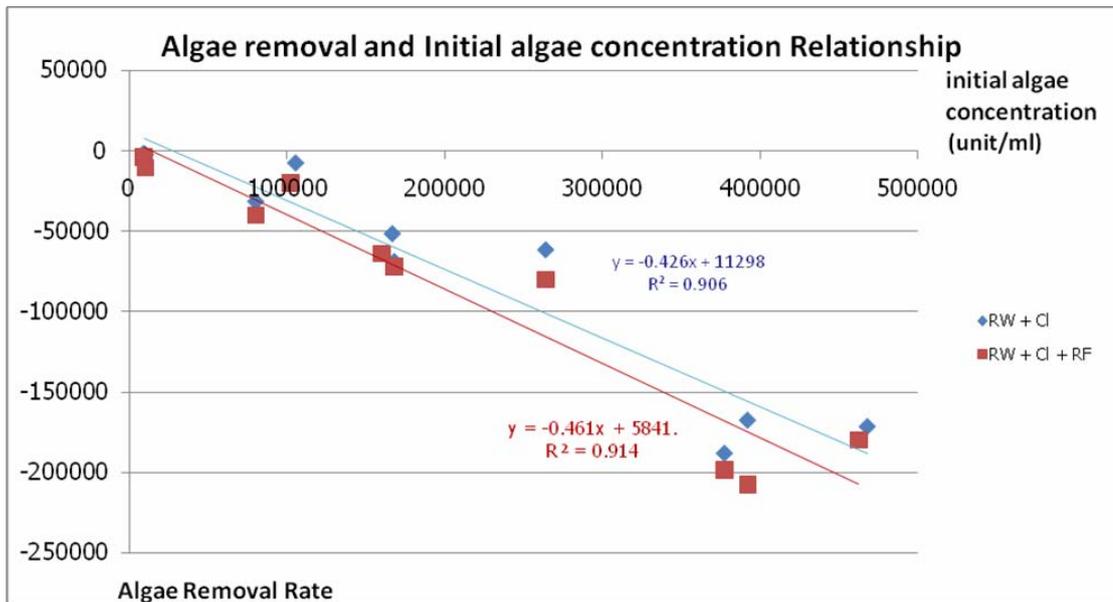
ภาพที่ 16 แสดงการควบคุมปริมาณสาหร่ายโดยใช้ความถี่เรโซแนนซ์ร่วมกับคลอรีน

เมื่อเปรียบเทียบจำนวนเซลล์ของสาหร่ายก่อนการและภายหลังการบำบัดโดยกำหนดให้ปริมาณสาหร่ายที่ปะปนอยู่ในน้ำดิบที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการบำบัดใดๆเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ แสดงผลการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของสาหร่ายคงเหลือ ดังภาพที่ 17



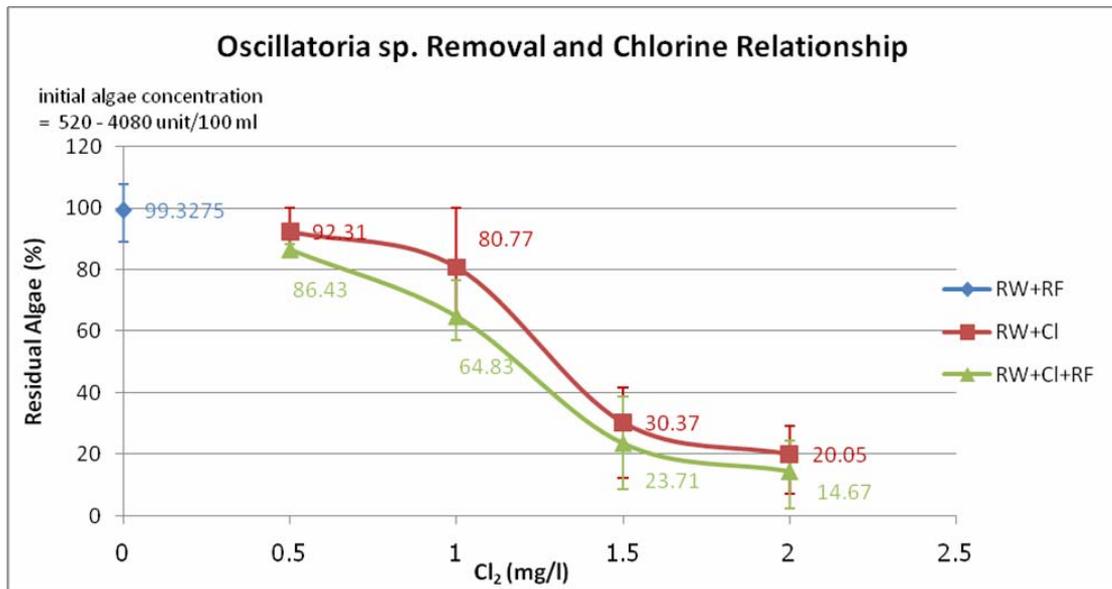
ภาพที่ 17 แสดงการควบคุมปริมาณสาหร่ายโดยใช้ความถี่เรโซแนนซ์ เปรียบเทียบกับการควบคุมปริมาณสาหร่ายโดยใช้คลอรีน

ผลจากการทดลองใช้ความถี่เรโซแนนซ์ร่วมกับคลอรีนที่ความเข้มข้นต่างๆ พบว่าสามารถลดปริมาณสาหร่ายได้ดีกว่าการใช้คลอรีนในการควบคุมปริมาณสาหร่ายเพียงอย่างเดียว โดยหากเพิ่มปริมาณคลอรีนให้สูงขึ้นระบบจะยังมีประสิทธิภาพในการควบคุมปริมาณสาหร่ายได้ดีขึ้น และประสิทธิภาพการกำจัดจะเพิ่มขึ้นหากมีสาหร่ายจำนวนมาก แสดงการเปรียบเทียบอัตราการกำจัดสาหร่ายโดยใช้คลอรีนและการใช้ความถี่เรโซแนนซ์ ดังภาพที่ 18



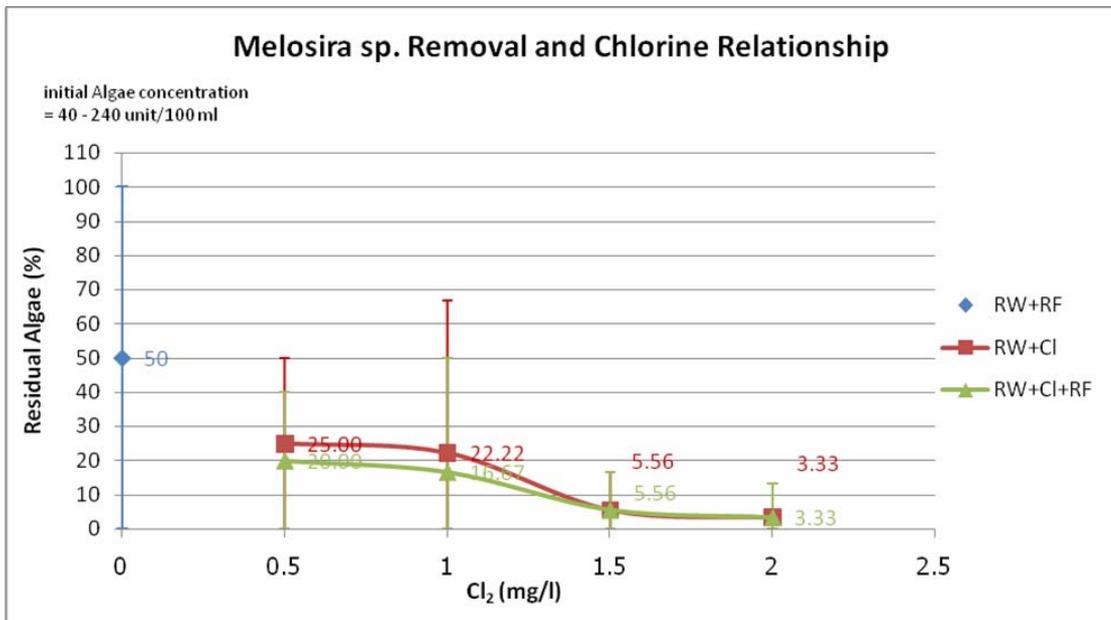
ภาพที่ 18 แสดงอัตราการลดปริมาณสาหร่ายโดยใช้ความถี่เรโซแนนซ์ เปรียบเทียบกับการควบคุมปริมาณสาหร่ายโดยใช้คลอรีน

โดยความถี่เรโซแนนซ์จะทำให้น้ำมีศักย์ภาพการให้และการรับอิเล็กตรอน (Oxidation - reduction potential, ORP) สูงขึ้น ดังนั้นเมื่อเราทำการใส่คลอรีนลงไป คลอรีนจะสามารถทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของน้ำได้มากขึ้นจึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมปริมาณสาหร่ายและการใช้ความถี่เรโซแนนซ์จะมีประสิทธิภาพมากกับสาหร่าย *Oscillatoria* sp. ซึ่งเป็นสาหร่ายชนิดที่มีจำนวนมากที่สุดในน้ำดิบ โดยกำหนดให้ปริมาณสาหร่ายที่ปะปนอยู่ในน้ำดิบที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการบำบัดใดๆเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ แสดงผลการเปลี่ยนแปลงจำนวนสัดส่วนของสาหร่ายคงเหลือ ดังภาพที่ 19

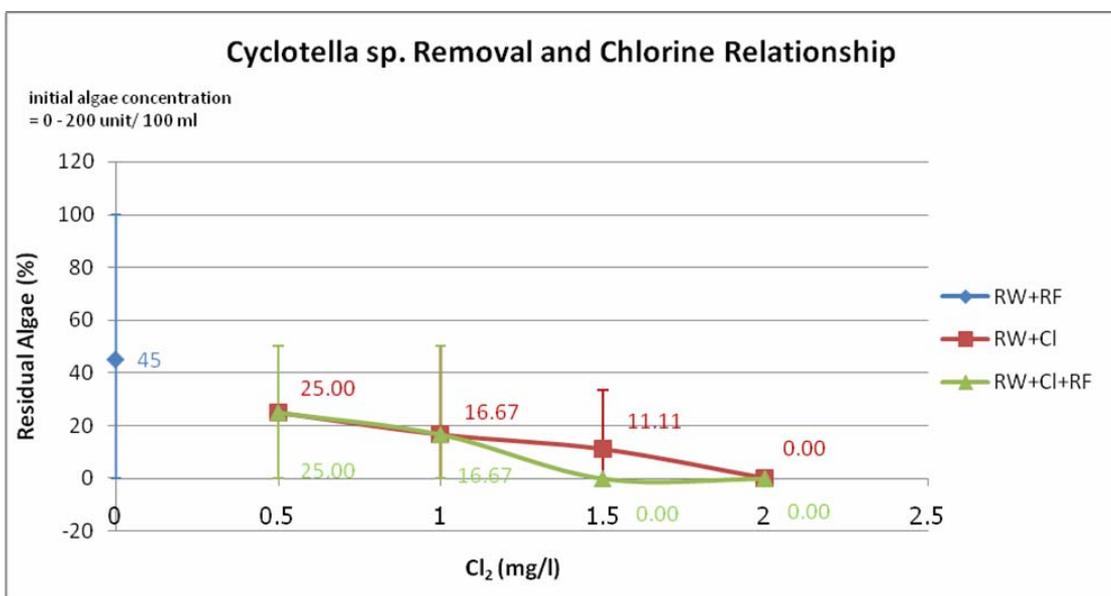


ภาพที่ 19 แสดงการควบคุมปริมาณสาหร่าย *Oscillatoria* sp. โดยใช้ความถี่เรโซแนนซ์ เปรียบเทียบกับการควบคุมปริมาณสาหร่ายโดยใช้คลอรีน

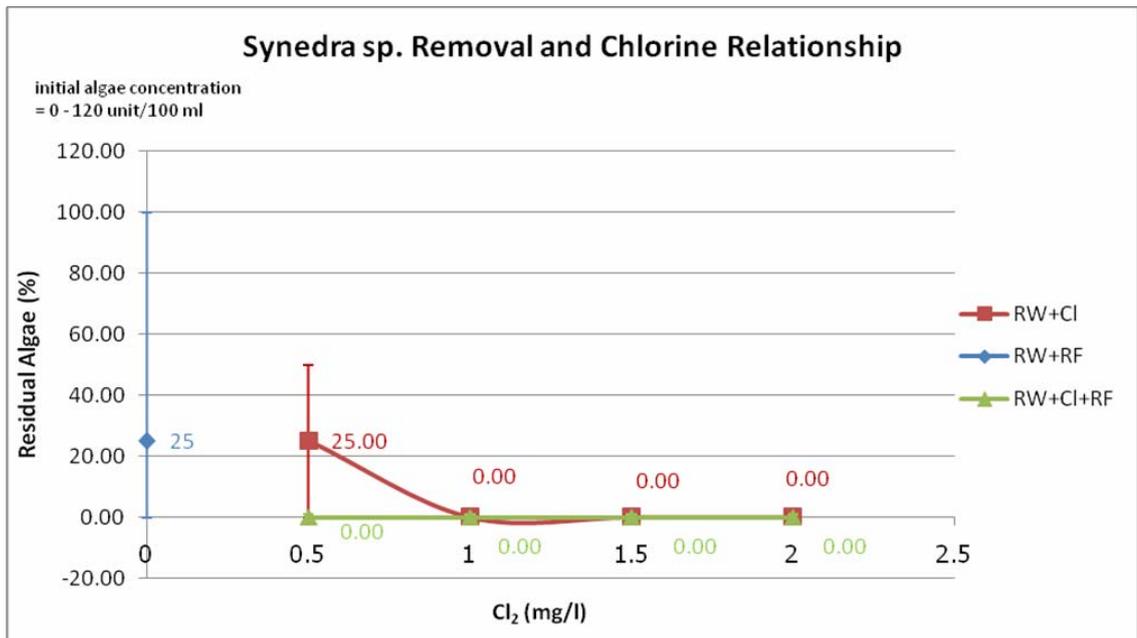
สำหรับสาหร่ายชนิดอื่นๆก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกับสาหร่าย *Oscillatoria* sp. กล่าวคือเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของคลอรีนลงในน้ำดิบก็จะสามารถลดปริมาณสาหร่ายได้มากขึ้น และหากนำน้ำที่มีการเติมคลอรีนมาผ่านความถี่เรโซแนนซ์ การลดปริมาณสาหร่ายก็จะยิ่งมีประสิทธิภาพสูงขึ้น แต่เนื่องจากปริมาณสาหร่ายชนิดอื่นๆมีปริมาณน้อย ดังนั้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของคลอรีนเพียงเล็กน้อยก็จะสามารถกำจัดสาหร่ายได้ทั้งหมด โดยกำหนดให้ปริมาณสาหร่ายที่ปะปนอยู่ในน้ำดิบที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการบำบัดใดๆเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงผลการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของสาหร่ายคงเหลือ ภาพที่ 20, 21, 22, 23 และ 24



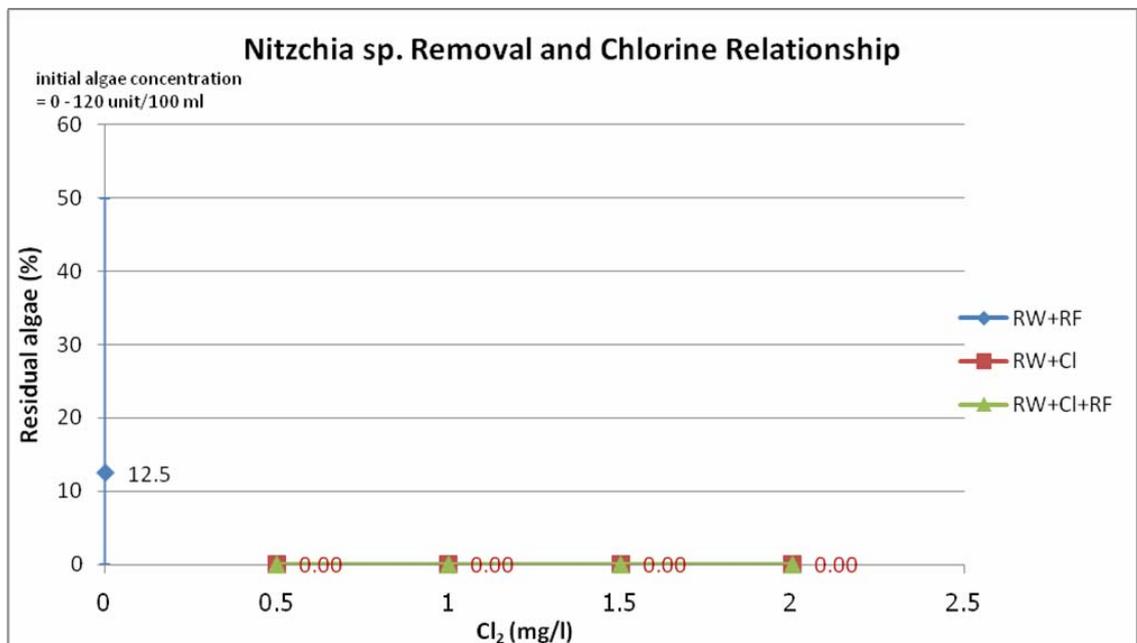
ภาพที่ 20 แสดงการควบคุมปริมาณสาหร่าย *Melosira* sp. โดยใช้ความถี่เรโซแนนซ์ เปรียบเทียบกับการควบคุมปริมาณสาหร่ายโดยใช้คลอรีน



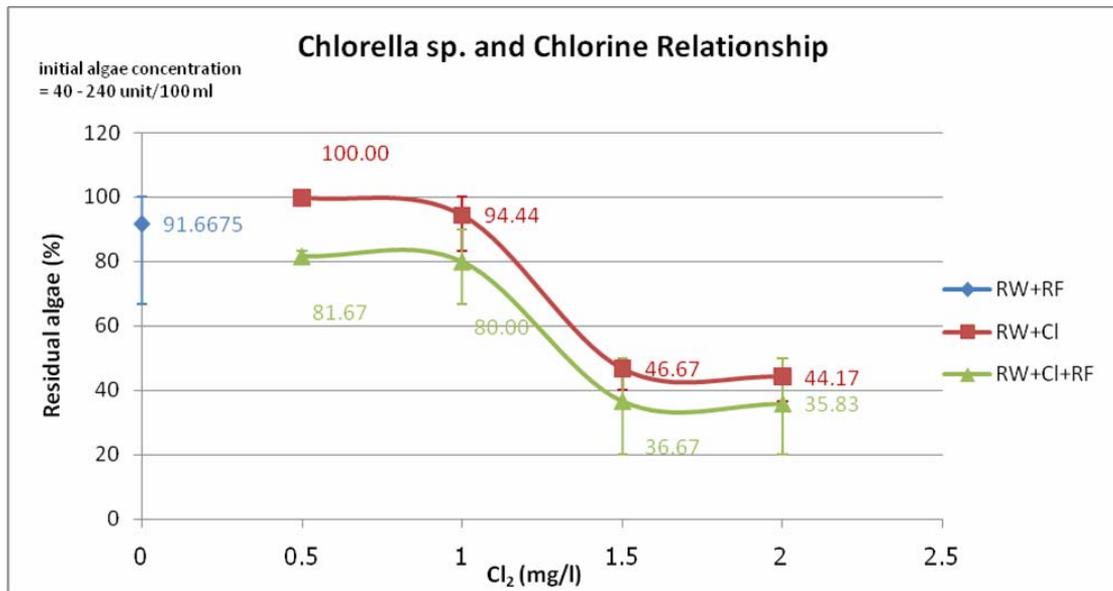
ภาพที่ 21 แสดงการควบคุมปริมาณสาหร่าย *Cyclotella* sp. โดยใช้ความถี่เรโซแนนซ์ เปรียบเทียบกับการควบคุมปริมาณสาหร่ายโดยใช้คลอรีน



ภาพที่ 22 แสดงการควบคุมปริมาณสาหร่าย Synedra sp. โดยใช้ความถี่เรโซแนนซ์ เปรียบเทียบกับการควบคุมปริมาณสาหร่ายโดยใช้คลอรีน



ภาพที่ 23 แสดงการควบคุมปริมาณสาหร่าย Nitzschia sp. โดยใช้ความถี่เรโซแนนซ์ เปรียบเทียบกับการควบคุมปริมาณสาหร่ายโดยใช้คลอรีน

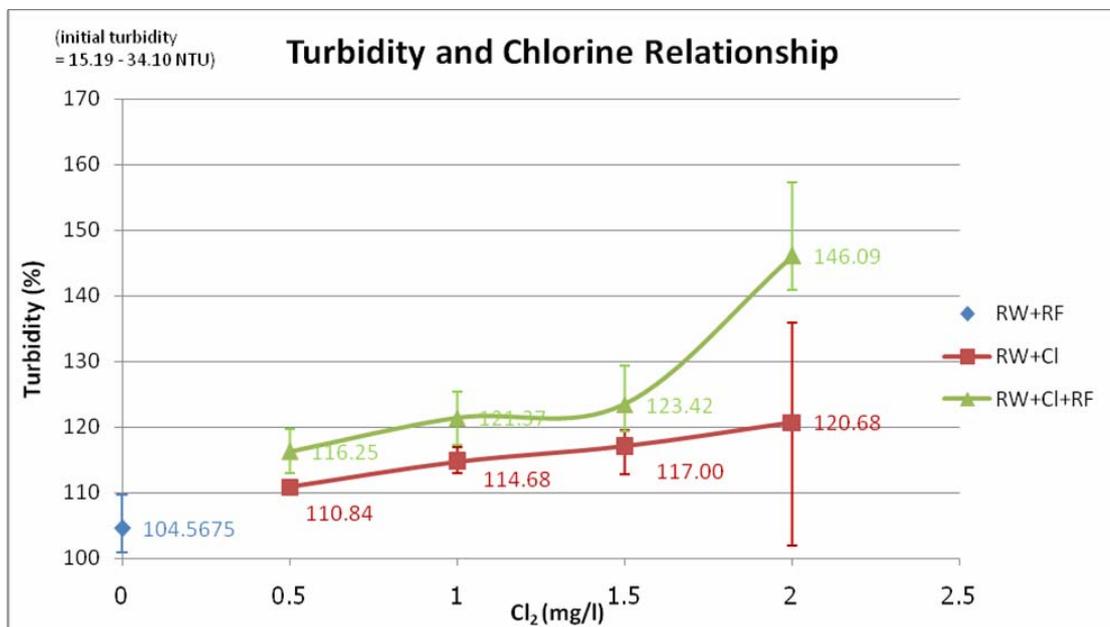


ภาพที่ 24 แสดงการควบคุมปริมาณสาหร่าย Chlorella sp. โดยใช้ความถี่เรโซแนนซ์ เปรียบเทียบกับการควบคุมปริมาณสาหร่ายโดยใช้คลอรีน

2.2 ศึกษาผลของความถี่เรโซแนนซ์ ที่มีต่อปริมาณคุณภาพน้ำ (ความขุ่น ความนำไฟฟ้า ความเป็นต่าง และความเป็นกรดเป็นด่าง)

1. ความขุ่นของน้ำเมื่อผ่านความถี่เรโซแนนซ์

หลังจากนำน้ำดิบมาใส่คลอรีนที่ความเข้มข้นต่างๆ สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงความขุ่นได้ ดังภาพที่ 25

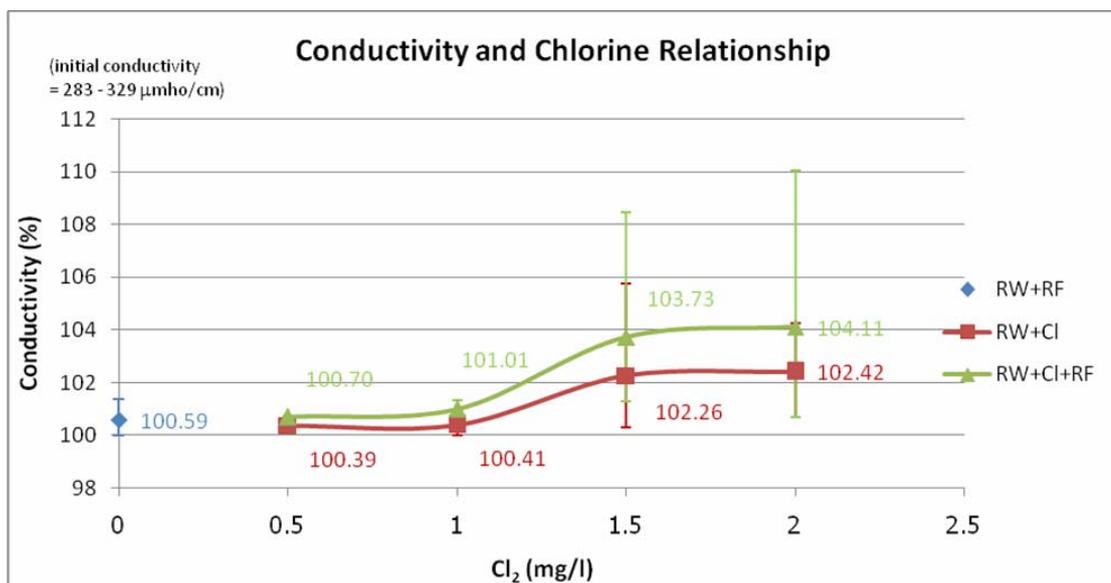


ภาพที่ 25 แสดงการเปลี่ยนแปลงความขุ่นของน้ำเมื่อใช้ความถี่เรโซแนนซ์ เปรียบเทียบกับน้ำดิบ และน้ำดิบใส่คลอรีน

สำหรับการทดลองใช้คลอรีนที่ความเข้มข้นต่างๆร่วมกับความถี่เรโซแนนซ์แล้ว พบว่าร้อยละความขุ่นคงเหลือของน้ำหลังจากใส่คลอรีนผง(แคลเซียมไฮโปคลอไรท์)เพิ่มขึ้น เนื่องจากเซลล์ของสาหร่ายที่ตายเนื่องจากปริมาณคลอโรฟิลล์ถูกออกซิไดซ์ กลายเป็นอนุภาคคอลลอยด์ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ และเมื่อใช้ความถี่เรโซแนนซ์ร่วมกับคลอรีนที่ความเข้มข้นต่างๆพบว่าความขุ่นของน้ำเพิ่มขึ้นมากกว่าการใส่คลอรีนผง(แคลเซียมไฮโปคลอไรท์) เพียงอย่างเดียว เนื่องจากความถี่เรโซแนนซ์ช่วยให้คลอรีนทำปฏิกิริยากับน้ำได้ดีขึ้น จึงมีประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายได้สูงขึ้น

## 2. การเปลี่ยนแปลงความนำไฟฟ้าของน้ำเมื่อผ่านความถี่เรโซแนนซ์

หลังจากนำน้ำดิบมาใส่คลอรีนที่ความเข้มข้นต่างๆ สามารถสังเกตผลการเปลี่ยนแปลงความนำไฟฟ้าได้ ดังภาพที่ 26

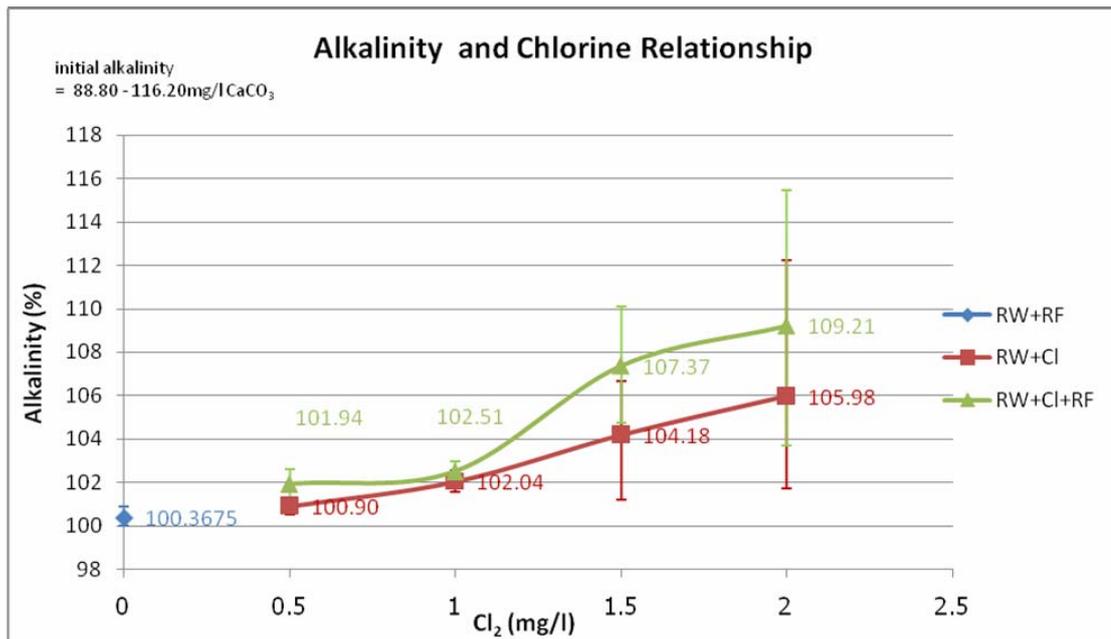


ภาพที่ 26 แสดงการเปลี่ยนแปลงความนำไฟฟ้าของน้ำเมื่อใช้ความถี่เรโซแนนซ์ เปรียบเทียบกับน้ำดิบ และน้ำดิบใส่คลอรีน

สำหรับการทดลองใช้คลอรีนที่ความเข้มข้นต่างๆร่วมกับความถี่เรโซแนนซ์แล้ว พบว่าร้อยละความนำไฟฟ้าของน้ำหลังจากใช้ความถี่เรโซแนนซ์มีความเปลี่ยนแปลง โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของคลอรีน จะส่งผลให้น้ำมีค่าความนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และเมื่อใช้ความถี่เรโซแนนซ์ร่วมกับคลอรีนที่ความเข้มข้นต่างๆ พบว่าน้ำจะมีค่าความนำไฟฟ้าสูงกว่าน้ำดิบที่ใส่คลอรีนเพียงอย่างเดียวที่ความเข้มข้นนั้นๆ

หากมีการเติมคลอรีนลงในน้ำ ค่าความนำไฟฟ้า (conductivity) ของน้ำย่อมต้องมีค่าเพิ่มขึ้น และหากเพิ่มความเข้มข้นของคลอรีนมากขึ้น ค่าความนำไฟฟ้าก็จะเพิ่มสูงขึ้นไปอีก ซึ่งจากผลการทดสอบ เมื่อนำน้ำที่เติมคลอรีนที่ความเข้มข้นต่างๆมาผ่านความถี่เรโซแนนซ์ ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำจะเพิ่มขึ้นสูงกว่าน้ำที่เติมคลอรีนเพียงอย่างเดียว จึงสามารถสรุปได้ว่าความถี่เรโซแนนซ์ทำให้อัตราค่าความนำไฟฟ้าสูงขึ้นด้วย

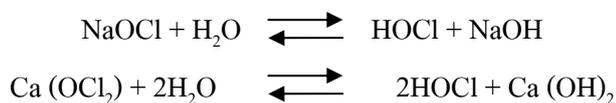
3. การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นด่างของน้ำเมื่อผ่านความถี่เรโซแนนซ์  
หลังจากนำน้ำดิบมาใส่คลอรีนที่ความเข้มข้นต่างๆ สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงค่า  
ความเป็นด่างของน้ำได้ ภาพที่ 27



ภาพที่ 27 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเป็นด่างของน้ำเมื่อใช้ความถี่เรโซแนนซ์ เปรียบเทียบกับน้ำดิบ และน้ำดิบใส่คลอรีน

สำหรับการทดลองใช้คลอรีนที่ความเข้มข้นต่างๆร่วมกับความถี่เรโซแนนซ์แล้ว พบว่าร้อยละความเป็นด่างของน้ำหลังจากใช้ความถี่เรโซแนนซ์ร่วมกับคลอรีนที่ความเข้มข้นต่างๆมีความเปลี่ยนแปลง คือ หากเพิ่มความเข้มข้นของคลอรีนมากขึ้น ค่าความเป็นด่างของน้ำก็จะเพิ่มมากขึ้น และเมื่อใช้ความถี่เรโซแนนซ์ร่วมกับคลอรีนที่ความเข้มข้นต่างๆ พบว่าน้ำจะมีค่าความเป็นด่างสูงกว่าน้ำดิบที่ใส่คลอรีนเพียงอย่างเดียวที่ความเข้มข้นนั้นๆ

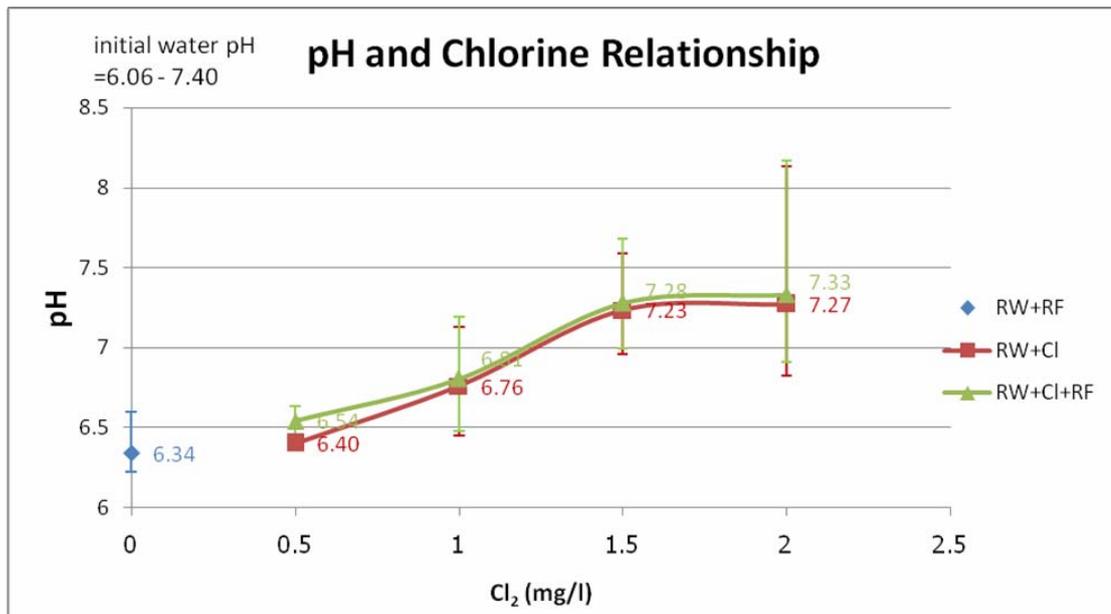
คลอรีนในรูปของเกลือ เช่น โซเดียมหรือแคลเซียมไฮโปคลอไรต์นั้น เมื่อละลายน้ำจะแตกตัวให้คลอไรต์ไอออนดังสมการ ดังนี้



การใช้คลอรีนน้ำและผง เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้คลอรีนก๊าซ จะเห็นว่า การใช้คลอรีนน้ำและผงจะทำให้แนวโน้มของค่า pH เป็นไปในทางที่สูงขึ้น เนื่องจากสมการเคมีมีค่าคงที่ต่างกัน แต่การใช้คลอรีนก๊าซจะทำให้แนวโน้มของค่า pH ในน้ำต่ำลงเนื่องจากมีกรดเกิดขึ้น (Zillich, 1972)

ในการทดสอบนี้ใช้คลอรีนผง  $\text{Ca}(\text{OCl})_2$  ดังนั้นเมื่อเติมคลอรีนลงในน้ำจะส่งผลให้มีสารละลายต่างในน้ำเพิ่มมากขึ้น ค่าความเป็นด่างของน้ำจึงสูงขึ้นตาม และเมื่อนำน้ำมาผ่านความถี่เรโซแนนซ์ซึ่งช่วยให้คลอรีนทำปฏิกิริยากับน้ำได้ดีขึ้น ค่าความเป็นด่างสูงกว่าน้ำดิบที่ใส่คลอรีนเพียงอย่างเดียว

4. การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดเป็นด่างของน้ำเมื่อผ่านความถี่เรโซแนนซ์ หลังจากนำน้ำดิบมาใส่คลอรีนที่ความเข้มข้นต่างๆ สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นด่างของน้ำได้ ดังภาพที่ 28



ภาพที่ 28 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดเป็นด่างของน้ำเมื่อใช้ความถี่เรโซแนนซ์ เปรียบเทียบกับน้ำดิบ และน้ำดิบใส่คลอรีน

สำหรับการทดลองใช้คลอรีนที่ความเข้มข้นต่างๆร่วมกับความถี่เรโซแนนซ์แล้ว พบว่าความเป็นกรดเป็นด่างของน้ำหลังจากใช้ความถี่เรโซแนนซ์ร่วมกับคลอรีนที่ความเข้มข้นต่างๆมีความเปลี่ยนแปลง คือ หากเพิ่มความเข้มข้นของคลอรีนมากขึ้น ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของน้ำก็จะเพิ่มมากขึ้นและเมื่อใช้ความถี่เรโซแนนซ์ร่วมกับคลอรีนที่ความเข้มข้นต่างๆ พบว่าน้ำจะมีค่าความเป็นกรดเป็นด่างสูงกว่าน้ำดิบที่ใส่คลอรีนเพียงอย่างเดียวที่ความเข้มข้นนั้นๆ

เช่นเดียวกับค่าความเป็นด่างของน้ำ กล่าวคือเมื่อใส่คลอรีนลงไปจะส่งผลให้มีสารละลายต่างในน้ำเพิ่มมากขึ้น ค่า pH ของน้ำจึงสูงขึ้นตาม และเมื่อนำน้ำมาผ่านความถี่เรโซแนนซ์ซึ่งทำให้คลอรีนทำปฏิกิริยากับน้ำได้ดีขึ้น ค่า pH สูงกว่าน้ำดิบที่ใส่คลอรีนเพียงอย่างเดียว

### 3. ศึกษาผลของต่อการตกตะกอนเมื่อใช้ความถี่เรโซแนนซ์ร่วมกับสารตกตะกอน (สารส้ม)

ตกตะกอนคอลลอยด์ที่เกิดขึ้นภายหลังการใช้ความถี่เรโซแนนซ์และคลอรีนในการกำจัดสาหร่าย ด้วยสารส้ม  $Al_2(SO_4)_3$  ทำการทดลองเพื่อหาปริมาณสารตกตะกอนที่เหมาะสม โดยการเติมสารส้ม 1 % ค่า pH ตามสถานะจริงไม่ทำการปรับค่า pH ทำการกวนโดยใช้เครื่องมือจาร์เทสต์ (Jar test) เร็วในอัตราความเร็ว 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 1 นาทีแล้วเปลี่ยนมากวนช้า 50 รอบ/นาที เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเปลี่ยนความเร็วรอบในการกวนช้าเป็น 20 รอบ/นาที เป็นเวลา 5 นาที แล้วตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 5 นาที ในสถานะอุณหภูมิห้อง ( $25-30^{\circ}C$ ) ทำการวิเคราะห์ pH, Turbidity และ Alkalinity ก่อนและหลังเติมสารส้ม 1 % แสดงผลการหาปริมาณสารส้มที่ใช้ในการตกตะกอน ดังแสดงผลดังตารางที่ 4, 5 และ 6

ตารางที่ 3 ปริมาณสารส้ม (1 %) เพื่อตกตะกอนคอลลอยด์ในน้ำดิบ

Alum dose (mg/l)	Turbidity (NTU)	pH	Alkalinity (as $CaCO_3$ )
0	50.50	7.57	107.6
20	6.50	7.48	101.4
25	5.30	7.42	99.2
30	3.47	7.31	96.8
35	2.95	7.26	94
40	2.30	7.21	92.6
45	2.08	7.19	91.8

ตารางที่ 4 ปริมาณสารส้ม (1 %) เพื่อตกตะกอนคอลลอยด์ที่เกิดภายหลังการใช้ความถี่เรโซแนนซ์

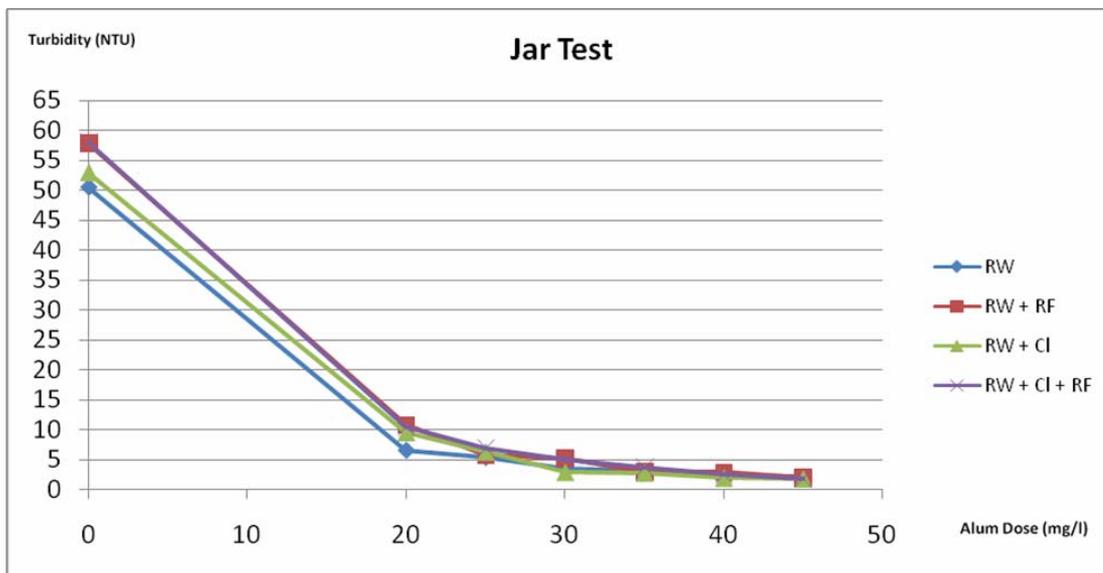
Alum dose (mg/l)	Turbidity (NTU)	pH	Alkalinity (as CaCO <sub>3</sub> )
0	57.90	8.67	105.8
20	10.70	8.62	102.8
25	5.62	8.57	100.6
30	5.12	8.45	97.8
35	2.84	8.39	92.8
40	2.81	8.34	91.4
45	1.90	8.27	90.4

ตารางที่ 5 ปริมาณสารส้ม (1%) เพื่อตกตะกอนคอลลอยด์ที่เกิดขึ้นภายหลังการใช้แคลเซียมไฮโปรคลอไรท์เข้มข้น 2 mg/l เพื่อควบคุมปริมาณสาหร่าย

Alum dose (mg/l)	Turbidity (NTU)	pH	Alkalinity (as CaCO <sub>3</sub> )
0	52.90	7.59	108.6
20	9.56	7.47	103.4
25	6.31	7.40	99.2
30	2.92	7.31	96.8
35	2.81	7.24	94.2
40	1.94	7.21	92.6
45	1.82	7.19	91.8

ตารางที่ 6 ปริมาณสารส้ม (1 %) เพื่อตกตะกอนคอลลอยด์ที่เกิดภายหลังจากใช้ความถี่เรโซแนนซ์ ร่วมกับแคลเซียมไฮโปคลอไรท์เข้มข้น 2 mg/l เพื่อควบคุมปริมาณสาหร่าย

Alum dose (mg/l)	Turbidity (NTU)	pH	Alkalinity (as CaCO <sub>3</sub> )
0	58	7.81	106.4
20	10.4	7.66	102.6
25	6.83	7.59	101.6
30	4.94	7.56	97.6
35	3.62	7.53	93.8
40	2.55	7.50	93.2
45	1.74	7.48	92.8



ภาพที่ 29 ปริมาณสารส้ม (1%) ที่ใช้ในการตกตะกอนคอลลอยด์

ผลการทดลองเมื่อใช้สารส้มในการตกตะกอนคอลลอยด์ที่เกิดขึ้นภายหลังจากการใช้ความถี่เรโซแนนซ์และคลอรีนที่ความเข้มข้น 0 และ 2 mg/l ที่ความขุ่นเริ่มต้นประมาณ 50-58 NTU เมื่อมีการเติมสารส้มที่ความเข้มข้น 20 - 45 mg/l พบว่าสารส้มที่ความเข้มข้น 30 mg/l สามารถลดความขุ่นของน้ำลงได้จนเหลือน้อยกว่า 5 NTU (มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปานครหลวง, 2547) และเมื่อเติมสารส้มที่ความเข้มข้นมากขึ้นพบว่าความขุ่นมีปริมาณลดลงเป็นสัดส่วนผกผันความเข้มข้นของสารส้ม ที่เพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของการตกตะกอนคอลลอยด์ที่เกิดขึ้นภายหลังจากการใช้ความถี่เรโซแนนซ์และคลอรีนที่ความเข้มข้น 0 และ 2 mg/l พบว่าที่ความเข้มข้นของสารส้ม 20-30 mg/l น้ำที่ผ่านความถี่เรโซแนนซ์จะมีความขุ่นสูงกว่าน้ำที่ไม่ได้ผ่านความถี่เรโซแนนซ์ แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารส้มมากกว่า 30 mg/l น้ำที่ผ่านความถี่เรโซแนนซ์จะมีความขุ่นต่ำกว่าน้ำที่ไม่ได้ผ่านความถี่เรโซแนนซ์

เนื่องจากภายหลังจากการใช้คลอรีนร่วมกับความถี่เรโซแนนซ์ในการกำจัดสาหร่าย ปรากฏว่าเกิดความขุ่นในปริมาณมาก (เกิดจากเซลล์ของสาหร่ายที่ตายเนื่องจากปริมาณคลอโรฟิลล์ถูกออกซิไดซ์ กลายเป็นอนุภาคคอลลอยด์ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ)

ความเข้มข้นของสารส้มในช่วง 20-30 mg/l เห็นได้ว่าความขุ่นของน้ำที่ใส่คลอรีนจะมีความขุ่นสูงกว่าน้ำดิบ เนื่องจากคลอรีนช่วยให้เซลล์สาหร่ายแตกตัวจึงส่งผลให้น้ำมีความขุ่นเพิ่มขึ้น และพบว่าน้ำดิบที่ผ่านความถี่เรโซแนนซ์จะมีความขุ่นสูงกว่าน้ำดิบที่ไม่ผ่านความถี่เรโซแนนซ์เนื่องจากความถี่เรโซแนนซ์ช่วยทำให้คลอรีนที่ใส่ลงไปอยู่ในรูปคลอรีนอิสระนานขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายจึงดีขึ้นด้วย ที่ความเข้มข้นของสารส้ม 35 mg/l ขึ้นไป พบว่าน้ำที่ผ่านความถี่เรโซแนนซ์จะมีความขุ่นต่ำสุดเนื่องจากเซลล์สาหร่ายที่แตกตัวแล้วซึ่งมีขนาด  $10^{-6} - 10^{-4}$  m (มันลิน, 2542) เป็นขนาดที่เหมาะสมสำหรับการสร้างโอกาสในการสัมผัสกันทำให้ได้กลุ่มตะกอนที่แน่นและตกตะกอนรวดเร็ว (ฉวีวัฒน์, 2546) จึงสามารถทำให้การตกตะกอนสาหร่ายมีประสิทธิภาพดีขึ้น

## การคำนวณต้นทุนการใช้สารเคมีร่วมกับความถี่โร้แซนแซนในระบบประปา

### 1. การคำนวณต้นทุนสารเคมีในการปรับปรุงคุณภาพน้ำของโรงงานผลิตน้ำบางเขน

#### 1.1 คำนวณค่าใช้จ่ายของคลอรีนผง $\text{Ca}(\text{OCl})_2$

ทฤษฎีการแตกตัวของแคลเซียมไฮโปคลอไรต์



Molecular weight	126.98	36	104.90
	126.98/104.90	36/104.90	104.90/104.90
	= 1.21	= 0.34	= 1

ความเข้มข้นของคลอรีนผง  $\text{Ca}(\text{OCl})_2$  ที่ขายตามท้องตลาดเท่ากับ 65 % (W/W)  
 หมายถึงคลอรีนผง 100 กรัม มีเนื้อ  $\text{Ca}(\text{OCl})_2$  65 กรัม  
 จากสมการถ้าต้องการไฮโปคลอไรต์ (HOCl) 1 กรัม ต้องเตรียมจาก  $\text{Ca}(\text{OCl})_2 = 1.54$  กรัม  
 ดังนั้นการเตรียมไฮโปคลอไรต์ (HOCl) 1 กรัม ต้องเตรียมจาก  $\text{Ca}(\text{OCl})_2 = (1.54 \times 100)/65$   
 $= 2.37$  กรัม

คลอรีนผง  $\text{Ca}(\text{OCl})_2$  เข้มข้น 65% ที่ขายตามท้องตลาดราคา 58.85 บาท/กิโลกรัม  
 โรงงานผลิตน้ำบางเขนใช้คลอรีนในการกำจัดเชื้อโรคและควบคุมปริมาณสาหร่ายเข้มข้น 2 mg/l  
 โดยมีกำลังการผลิตน้ำประปา = 3600000 ลบ.ม./วัน  
 โรงงานผลิตน้ำบางเขนมีการใช้คลอรีนทั้งหมด = 17064 กิโลกรัม /วัน  
 ดังนั้นค่าใช้จ่ายในการใช้คลอรีนของโรงงานผลิตน้ำบางเขนมีค่า = 1004216.4 บาท /วัน

## 1.2 คำนวณค่าใช้จ่ายของสารส้ม

ราคาสารส้มที่ขายกันตามท้องตลาดราคา	4.432 บาท / กิโลกรัม
โรงงานผลิตน้ำบางเขนใช้สารส้มในการตกตะกอนคอลลอยด์เข้มข้น โดยเฉลี่ย 30 mg/l โดยมีกำลังการผลิตน้ำประปา	= 3600000 ลบ.ม / วัน
โรงงานผลิตน้ำบางเขนมีการใช้สารส้มทั้งหมด	= 108000 กิโลกรัม / วัน
ดังนั้นค่าใช้จ่ายในการใช้คลอรีนของโรงงานผลิตน้ำบางเขนมีค่า	= 478656 บาท / วัน
ค่าใช้จ่ายในการใช้สารเคมีในการปรับปรุงคุณภาพน้ำทั้งหมดของโรงงานผลิตน้ำบางเขนมีค่า	
	$1004216.4 + 478656 = 1482872.4$ บาท / วัน

## 2. การคำนวณต้นทุนสารเคมีในการปรับปรุงคุณภาพน้ำเมื่อใช้ความถี่เรโซแนนซ์

### 2.1 คำนวณค่าใช้จ่ายของคลอรีนผง $\text{Ca}(\text{OCl})_2$

ทฤษฎีการแตกตัวของแคลเซียมไฮโปคลอไรต์



Molecular weight	126.98	36	104.90
	126.98/104.90	36/104.90	104.90/104.90
	= 1.21	= 0.34	= 1

ความเข้มข้นของคลอรีนผง  $\text{Ca}(\text{OCl})_2$  ที่ขายตามท้องตลาดเท่ากับ 65 % (W/W)

หมายถึงคลอรีนผง 100 กรัม มีเนื้อ  $\text{Ca}(\text{OCl})_2$  65 กรัม

จากสมการถ้าต้องการไฮโปคลอไรต์ (HOCl) 1 กรัม ต้องเตรียมจาก  $\text{Ca}(\text{OCl})_2 = 1.54$  กรัม

ดังนั้นการเตรียมไฮโปคลอไรต์ (HOCl) 1 กรัม ต้องเตรียมจาก  $\text{Ca}(\text{OCl})_2 = (1.54 \times 100) / 65$   
 $= 2.37$  กรัม

คลอรีนผง  $\text{Ca}(\text{OCl})_2$  เข้มข้น 65% ที่ขายตามท้องตลาดราคา 58.85 บาท/กิโลกรัม

เมื่อใช้ความถี่เรโซแนนซ์ มีการใช้คลอรีนในการกำจัดเชื้อโรคและควบคุมปริมาณสาหร่ายเข้มข้น  
 $= 1.5 \text{ mg/l}$

โดยมีกำลังการผลิตน้ำประปา  $= 3600000$  ลบ.ม./วัน

โรงงานผลิตน้ำบางเขนมีการใช้คลอรีนทั้งหมด  $= 12798$  กิโลกรัม /วัน

ดังนั้นค่าใช้จ่ายในการใช้คลอรีนของโรงงานผลิตน้ำบางเขนมีค่า  $= 753162.3$  บาท /วัน

## 2.2 คำนวณค่าใช้จ่ายของสารส้ม

ราคาสารส้มที่ขายกันตามท้องตลาดราคา	4.432 บาท / กิโลกรัม
เมื่อใช้ความถี่เรโซแนนซ์ จะมีการใช้สารส้มในการตกตะกอนคอลลอยด์เข้มข้น โดยเฉลี่ย 35 mg/l โดยโรงงานผลิตน้ำบางเขนมีกำลังการผลิตน้ำประปา	= 3600000 ลบ.ม / วัน
โรงงานผลิตน้ำบางเขนมีการใช้สารส้มทั้งหมด	= 126000 กิโลกรัม / วัน
ดังนั้นค่าใช้จ่ายในการใช้คลอรีนของโรงงานผลิตน้ำบางเขนมีค่า	= 558432 บาท / วัน

ค่าใช้จ่ายในการใช้สารเคมีในการปรับปรุงคุณภาพน้ำทั้งหมดของโรงงานผลิตน้ำบางเขนมีค่า

$$753162.3 + 558432 = 1311594.3 \text{ บาท / วัน}$$

เนื่องจากหลังจากการใช้ความถี่เรโซแนนซ์ค่าความเป็นกรดเป็นด่างมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย จึงไม่จำเป็นต้องมีการปรับค่าความเป็นกรดเป็นด่าง

สรุปว่าเมื่อใช้ความถี่เรโซแนนซ์ร่วมกับการปรับปรุงคุณภาพน้ำ สามารถลดค่าใช้จ่ายของโรงงานผลิตน้ำบางเขนได้

$$171278.1 \text{ บาท / วัน}$$

หรือ 0.0475 บาท/ ลบ.ม

(หมายเหตุ: เป็นราคาของสารเคมียังไม่รวมค่าอุปกรณ์และสิ่งก่อสร้างต่างๆ)

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

การทดลองการใช้ความถี่เรโซแนนซ์ในการควบคุมปริมาณสาหร่ายในระบบผลิตน้ำประปาของโรงงานผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวง สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. จากผลการทดลองการใช้ความถี่เรโซแนนซ์และคลอรีนในการควบคุมปริมาณสาหร่าย พบว่าเมื่อใช้ความถี่เรโซแนนซ์ร่วมกับคลอรีนผง  $\text{Ca}(\text{OCl})_2$  สามารถลดปริมาณสาหร่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพ พิจารณาจากจำนวนเซลล์สาหร่ายที่ลดลง โดยเมื่อใช้ความถี่เรโซแนนซ์ร่วมกับคลอรีนที่ความเข้มข้น 1.5 mg/l จะมีประสิทธิภาพในการควบคุมปริมาณสาหร่ายดีกว่าการใช้คลอรีนที่ความเข้มข้น 2 mg/l เพียงอย่างเดียว 5.18 %
2. จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของน้ำดิบทั้งทางกายภาพและทางเคมี พบว่ามีน้ำดิบที่ใช้ความถี่เรโซแนนซ์ร่วมกับคลอรีนที่ความเข้มข้น 1.5 mg/l จะมีค่าความขุ่น การนำไฟฟ้า และความเป็นค่าเฉลี่ยสูงกว่าน้ำดิบที่ใส่คลอรีนเข้มข้น 2 mg/l เพียงอย่างเดียว 2.74 %, 1.31 % และ 1.39 % ตามลำดับ นอกจากนี้ค่าพีเอชเฉลี่ยของน้ำดิบที่ใช้ความถี่เรโซแนนซ์ร่วมกับคลอรีนที่ความเข้มข้น 1.5 mg/l จะมีค่าสูงกว่าน้ำดิบที่ใส่คลอรีนเข้มข้น 2 mg/l เพียงอย่างเดียวเท่ากับ 0.01 ซึ่งไม่เกินมาตรฐานน้ำดิบในการผลิตน้ำประปาของการประปาฯ นครหลวง จึงสามารถสรุปได้ว่าน้ำดิบที่ใช้ความถี่เรโซแนนซ์ร่วมกับคลอรีนที่ความเข้มข้น 1.5 mg/l มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำดิบที่ใส่คลอรีน 2 mg/l ซึ่งเป็นปริมาณคลอรีนที่ใช้ควบคุมสาหร่ายในกระบวนการผลิตน้ำประปาของการประปาฯ นครหลวง
3. ผลของการตกตะกอนเมื่อใช้ความถี่เรโซแนนซ์ ร่วมกับสารสร้างตะกอน สารส้ม 1% ที่ใช้ในการตกตะกอนคอลลอยด์ พบว่าน้ำดิบที่ใช้คลอรีนร่วมกับความถี่เรโซแนนซ์จะส่งผลให้ความขุ่นของน้ำสูงขึ้นจึงต้องมีการใช้ปริมาณสารส้มเพิ่มขึ้น 5 mg/l เพื่อให้ได้คุณภาพน้ำตามมาตรฐาน (ความขุ่นน้อยกว่า 5 NTU)

4. การใช้ความถี่เรโซแนนซ์จะช่วยลดปริมาณการใช้คลอรีนในการควบคุมปริมาณสาหร่ายในระบบประปาได้ ทำให้โรงงานผลิตน้ำบางเขนสามารถลดค่าใช้จ่ายในการใช้คลอรีนลงได้ และลดความเสี่ยงในการเกิดสาร Chlorine by-products ซึ่งมีศักยภาพในการก่อมะเร็งต่อผู้บริโภค

### ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาการใช้ความถี่เรโซแนนซ์ร่วมกับคลอรีนชนิดอื่นๆ เช่น คลอรีนเหลว (NaOCl) หรือสารประกอบคลอรีนชนิดอื่นๆ เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการใช้คลอรีน และเพื่อลดความเสี่ยงต่อผู้บริโภคที่ต้องพบกับผลกระทบจากสาร THMs
2. ควรมีการศึกษาการใช้ความถี่เรโซแนนซ์ร่วมกับสารสร้างตะกอนชนิดอื่นๆ เช่น PAC และ เฟอร์ริกคลอไรด์ ฯลฯ และปริมาณที่เหมาะสมในการตกตะกอนคอลลอยด์ที่เกิดขึ้น เพื่อหาชนิดของสารตกตะกอนที่เหมาะสมสำหรับการใช้ร่วมกับความถี่เรโซแนนซ์และน้ำดิบของโรงงานผลิตน้ำบางเขนมากที่สุด
3. ควรมีการศึกษาคุณสมบัติของน้ำทั้งทางกายภาพและทางเคมีของน้ำที่ผ่านความถี่เรโซแนนซ์และมีการสัมผัสกับสารเคมีอื่นๆ ที่ใช้ในการปรับคุณภาพของน้ำ เช่น ปูนขาว ซึ่งใช้ในการปรับพีเอชของน้ำ เป็นต้น

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรรมธิการ สิริสิงห. 2549. เคมีของน้ำ น้ำโสโครกและการวิเคราะห์. ครั้งที่ 4. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม, กรุงเทพฯ.

ปฐมพร พูลสวัสดิ์. 2551. การใช้คลอรีนไดออกไซด์และคลอรีนเพื่อกำจัดสาหร่ายในกระบวนการผลิตน้ำประปาของโรงไฟฟ้าวังน้อย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

มันสิน ตัณฑุลเวศม์. 2527. วิศวกรรมการประปา เล่ม 2. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.

ลัดดา วงศ์รัตน์. 2543. คู่มือการเลี้ยงแพลงก์ตอน. ภาควิชาวิทยาประมง, คณะประมง, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ศิริประภา ศรีเดช. 2546. การกำจัดสาหร่ายโดยระบบผลิตน้ำประปาที่ใช้ถังกรองแบบเม็ดพลาสติก ลอยร่วมกับไมโครฟิลเตรชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

มัลลิกา ปัญญาคะโป และ ผ่องศรี เผ่าภูรี. 2550. รายงานการวิจัยเรื่องการผลิตสารไตรฮาโลมีเทนในน้ำประปา กรณีตัวอย่างระบบประปาของเทศบาลนครนครปฐม. ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยศิลปากร, กรุงเทพฯ.

**ภาคผนวก**

ภาคผนวก ก  
มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปานครหลวง

ตารางผนวกที่ ก1 มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปานครหลวง  
(ตามข้อเสนอแนะขององค์การอนามัยโลก ปี 2549)

พารามิเตอร์	หน่วย (units)	ค่าแนะนำ (Guideline Value)
1. คุณสมบัติทางแบคทีเรีย (Bacteriological quality)		
โคลิฟอร์มแบคทีเรีย (Total coliform bacteria)	พบ-ไม่พบ/100 ml	
แบคทีเรียชนิด อีโคไล (E. coli)	พบ-ไม่พบ/100 ml	ไม่พบ/100 ml
2. คุณสมบัติทางเคมี-ฟิสิกส์ (Physical and Chemical quality)		
สี ปรากฏ (Apperance colour)	True colour unit	15
ความขุ่น (Turbidity)	NTU	5
รส และ กลิ่น (Taste and odour)	-	ไม่เป็นที่รังเกียจ
สารหนู (Arsenic)	mg/l	0.01
แคดเมียม (Cadmium)	mg/l	0.003
โครเมียม (Chromium)	mg/l	0.05
ไซยาไนด์ (Cyanide)	mg/l	0.07
ตะกั่ว (Lead)	mg/l	0.01
ปรอท (Mercury)	mg/l	0.001
เซลีนียม (Selenium)	mg/l	0.01
ฟลูออไรด์ (Fluoride)	mg/l	1.5
คลอไรด์ (Chloride)	mg/l	250
ทองแดง (Copper)	mg/l	2
เหล็ก (Iron)	mg/l	0.3
แมงกานีส (Manganese)	mg/l	0.4
อลูมิเนียม (Aluminium)	mg/l	0.1
โซเดียม (Sodium)	mg/l	200

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

พารามิเตอร์	หน่วย (units)	ค่าแนะนำ (Guideline Value)
ซัลเฟต (Sulfate)	mg/l	250
สังกะสี (Zinc)	mg/l	3
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide)	mg/l	0.05
ปริมาณมวลสารที่ละลายทั้งหมด (Total dissolved solids)	mg/l	1,000
ไนเตรทในรูปไนเตรท (Nitrate as NO <sub>3</sub> -)	mg/l	50
ไนไตรท์ในรูปไนไตรท์ (Nitrite as NO <sub>2</sub> -)	mg/l	3
คลอรีนอิสระคงเหลือ (Free residual chlorine)	mg/l	> 0.2
เบนซีน (Benzene)	µg/l	10
คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbon Tetrachloride)	µg/l	4
ไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane)	µg/l	20
หนึ่ง, สอง-ไดคลอโรอีเทน (1,2-Dichloroethane)	µg/l	30
เบนโซไพรีน (Benzo[a]pyrene)	µg/l	0.7
ไมโครซิสติน-แอลอาร์ (Microcystin- LR)	µg/l	1
3. สารเคมีที่ใช้ป้องกันและกำจัด		
ศัตรูพืช(Pesticides)		
อัลดรินและดีลดริน (Aldrin/Dieldrin)	µg/l	0.03
คลอเดน (Chlordane)	µg/l	0.2
ดีดีที (DDT)	µg/l	1

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

พารามิเตอร์	หน่วย (units)	ค่าแนะนำ (Guideline Value)
สอง,สี่-ดี (2,4-D)	µg/l	30
เฮปตาคลอและเฮปตาคลออีพอกไซด์ (Heptachlor and Heptachlor epoxide)	µg/l	0.03
เฮกซะคลอโรเบนซีน (Hexachlorobenzene)	µg/l	1
ลินแดน (Lindane)	µg/l	2
เมททอกซีคลอ (Methoxychlor)	µg/l	20
เพนตาคลอโรฟีโนล (Pentachlorophenol)	µg/l	9
4. ไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethanes) sum of the ratio	-	1
คลอโรฟอร์ม (Chloroform , CHCl <sub>3</sub> )	µg/l	200
โบรโมไดคลอโรมีเทน (Bromodichloromethane , CHBrCl <sub>2</sub> )	µg/l	60
ไดโบรโมคลอโรมีเทน (Dibromochloromethane , CHBr <sub>2</sub> Cl)	µg/l	100
โบรโมฟอร์ม (Bromoform , CHBr <sub>3</sub> )	µg/l	100
5. กัมมันตภาพรังสี (Radioactive)		
ความเข้มรังสีแอลฟา (Gross alpha activity)	Bq/l	0.5
ความเข้มรังสีเบต้า (Gross beta activity)	Bq/l	1

หมายเหตุ : การประปานครหลวงพิจารณาวิเคราะห์รายการที่มีผลต่อสุขภาพและความน่าดื่มมาใช้  
ที่มา: การประปานครหลวง (2552)

**ภาคผนวก ข**

คุณภาพน้ำของโรงงานผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวง

ตารางที่ ข1 ชนิดและปริมาณสาหร่ายในน้ำดิบของโรงงานผลิตน้ำบางเขน

ชนิดสาหร่าย	จำนวน (หน่วย/ml.)		วิธีการวิเคราะห์
	8 ม.ค. 2552	20 ม.ค. 2552	
Cyanophyta (Blue green algae)	478	230	Counting chamber
Chlorophyta (Green algae)	8164.5	9726	Counting chamber
Bacillariophyta (Diatoms)	182	78.5	Counting chamber
Euglenophyta (Euglenoids)	18	7	Counting chamber
Phyrrhophyta	5.5	7	Counting chamber
Cryptophyta	3	1	
Total	8851	10049.5	

ตารางผนวกที่ ข2 ปริมาณสาหร่ายในน้ำดิบที่ก่อให้เกิดการอุดตันบ่อกรอง  
ของโรงงานผลิตน้ำบางเขน

วันที่ทำการทดลอง	จำนวน (หน่วย/100 ml.)	วิธีการวิเคราะห์
10 ก.พ. 2552	1080	Counting chamber
24 ก.พ. 2552	800	Counting chamber
3 มี.ค. 2552	4640	Counting chamber
12 มี.ค. 2552	1720	Counting chamber
19 มี.ค. 2552	3880	Counting chamber
24 มี.ค. 2552	1680	Counting chamber
1 เม.ย. 2552	3920	Counting chamber
8 เม.ย. 2552	2640	Counting chamber

**ตารางผนวกที่ ข3** ปริมาณสาหร่าย *Melosira* ในน้ำดิบของโรงงานผลิตน้ำบางเขน

วันที่ทำการทดลอง	จำนวน (หน่วย/100 ml.)	วิธีการวิเคราะห์
10 ก.พ. 2552	0	Counting chamber
24 ก.พ. 2552	0	Counting chamber
3 มี.ค. 2552	240	Counting chamber
12 มี.ค. 2552	160	Counting chamber
19 มี.ค. 2552	240	Counting chamber
24 มี.ค. 2552	40	Counting chamber
1 เม.ย. 2552	80	Counting chamber
8 เม.ย. 2552	80	Counting chamber

**ตารางผนวกที่ ข4** ปริมาณสาหร่าย *Oscillatoria* ในน้ำดิบของโรงงานผลิตน้ำบางเขน

วันที่ทำการทดลอง	จำนวน (หน่วย/100 ml.)	วิธีการวิเคราะห์
10 ก.พ. 2552	680	Counting chamber
24 ก.พ. 2552	520	Counting chamber
3 มี.ค. 2552	4080	Counting chamber
12 มี.ค. 2552	1120	Counting chamber
19 มี.ค. 2552	3240	Counting chamber
24 มี.ค. 2552	1440	Counting chamber
1 เม.ย. 2552	3560	Counting chamber
8 เม.ย. 2552	2160	Counting chamber

ตารางผนวกที่ ข5 ปริมาณสาหร่าย *Cyclotella* ในน้ำดิบของโรงงานผลิตน้ำบางเขน

วันที่ทำการทดลอง	จำนวน (หน่วย/100 ml.)	วิธีการวิเคราะห์
10 ก.พ. 2552	160	Counting chamber
24 ก.พ. 2552	0	Counting chamber
3 มี.ค. 2552	80	Counting chamber
12 มี.ค. 2552	200	Counting chamber
19 มี.ค. 2552	120	Counting chamber
24 มี.ค. 2552	40	Counting chamber
1 เม.ย. 2552	40	Counting chamber
8 เม.ย. 2552	200	Counting chamber

ตารางผนวกที่ ข6 ปริมาณสาหร่าย *Synedra* ในน้ำดิบของโรงงานผลิตน้ำบางเขน

วันที่ทำการทดลอง	จำนวน (หน่วย/100 ml.)	วิธีการวิเคราะห์
10 ก.พ. 2552	0	Counting chamber
24 ก.พ. 2552	0	Counting chamber
3 มี.ค. 2552	80	Counting chamber
12 มี.ค. 2552	40	Counting chamber
19 มี.ค. 2552	120	Counting chamber
24 มี.ค. 2552	0	Counting chamber
1 เม.ย. 2552	0	Counting chamber
8 เม.ย. 2552	80	Counting chamber

**ตารางผนวกที่ ข7 ปริมาณสาหร่าย Nitzschia ในน้ำดิบของโรงงานผลิตน้ำบางเขน**

วันที่ทำการทดลอง	จำนวน (หน่วย/100 ml.)	วิธีการวิเคราะห์
10 ก.พ. 2552	0	Counting chamber
24 ก.พ. 2552	80	Counting chamber
3 มี.ค. 2552	0	Counting chamber
12 มี.ค. 2552	40	Counting chamber
19 มี.ค. 2552	80	Counting chamber
24 มี.ค. 2552	120	Counting chamber
1 เม.ย. 2552	40	Counting chamber
8 เม.ย. 2552	0	Counting chamber

**ตารางผนวกที่ ข8 ปริมาณสาหร่าย Chlorella ในน้ำดิบของโรงงานผลิตน้ำบางเขน**

วันที่ทำการทดลอง	จำนวน (หน่วย/100 ml.)	วิธีการวิเคราะห์
10 ก.พ. 2552	240	Counting chamber
24 ก.พ. 2552	200	Counting chamber
3 มี.ค. 2552	160	Counting chamber
12 มี.ค. 2552	120	Counting chamber
19 มี.ค. 2552	80	Counting chamber
24 มี.ค. 2552	40	Counting chamber
1 เม.ย. 2552	200	Counting chamber
8 เม.ย. 2552	120	Counting chamber

ตารางผนวกที่ ๙ ค่าความขุ่นของน้ำดิบของโรงงานผลิตน้ำบางเขน

วันที่ทำการทดลอง	ความขุ่น (NTU)
8 ม.ค. 2552	34.10
10 ก.พ. 2552	16.30
24 ก.พ. 2552	16.33
3 มี.ค. 2552	18.50
12 มี.ค. 2552	15.90
19 มี.ค. 2552	24.90
24 มี.ค. 2552	23.30
1 เม.ย. 2552	16.50
8 เม.ย. 2552	21.80

ตารางผนวกที่ ๑๐ ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำดิบของโรงงานผลิตน้ำบางเขน

วันที่ทำการทดลอง	ความนำไฟฟ้า ( $\mu\text{mho/cm}$ )
8 ม.ค. 2552	329
10 ก.พ. 2552	309
24 ก.พ. 2552	286
3 มี.ค. 2552	292
12 มี.ค. 2552	292
19 มี.ค. 2552	283
24 มี.ค. 2552	295
1 เม.ย. 2552	308
8 เม.ย. 2552	295

ตารางผนวกที่ ข11 ค่าความเป็นด่างของน้ำดิบของโรงงานผลิตน้ำบางเขน

วันที่ทำการทดลอง	ความเป็นด่าง (mg/l CaCO <sub>3</sub> )
8 ม.ค. 2552	116.20
10 ก.พ. 2552	110.80
24 ก.พ. 2552	88.80
3 มี.ค. 2552	105.00
12 มี.ค. 2552	104.40
19 มี.ค. 2552	93.20
24 มี.ค. 2552	99.20
1 เม.ย. 2552	101.40
8 เม.ย. 2552	101.60

ตารางผนวกที่ ข12 ค่าพีเอชของน้ำดิบของโรงงานผลิตน้ำบางเขน

วันที่ทำการทดลอง	ค่าพีเอช
8 ม.ค. 2552	7.09
10 ก.พ. 2552	6.25
24 ก.พ. 2552	6.06
3 มี.ค. 2552	6.61
12 มี.ค. 2552	6.67
19 มี.ค. 2552	6.93
24 มี.ค. 2552	7.05
1 เม.ย. 2552	7.27
8 เม.ย. 2552	7.40

## ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายปรวีร์ นาคะกุล
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 21 พฤศจิกายน 2528
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	ปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	วิศวกร 3
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	การประปานครหลวง
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	