

การศึกษาความเป็นไปได้ในการลดการใช้สารเคมีควบคุมจุลินทรีย์ในห่อหล่อเย็นของ

โรงงานผลิตโอเลฟินส์



นายเอกลักษณ์ เข็มเพชร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 University Graduate School.

FEASIBILITY STUDY OF BIOCIDES REDUCTION FOR COOLING TOWER OF
OLEFINS PLANT

Mr. Akkalak Kempechara



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

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 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาความเป็นไปได้ในการลดการใช้สารเคมีควบคุม จุลินทรีย์ในท่อหล่อเย็นของโรงงานผลิตโอเลฟินส์
โดย	นายเอกลักษณ์ เข้มเพชร
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร. จิรโชติ ภัทรนาวิก

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุธา ขาวเขียว)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร. จิรโชติ ภัทรนาวิก)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. วศิมณ เรืองเล็ก)

เอกลักษณ์ เข้มเพชร : การศึกษาความเป็นไปได้ในการลดการใช้สารเคมีควบคุม จุลินทรีย์ในหอหล่อเย็นของโรงงานผลิตโอเลฟินส์. (FEASIBILITY STUDY OF BIOCIDES REDUCTION FOR COOLING TOWER OF OLEFINS PLANT) อ.ที่ปรึกษา วิทยาลัยนานาชาติ: ผศ. ดร. ปฏิภาณ ปัญญาพกุล, อ.ที่ปรึกษาวิทยาลัยนานาชาติ: ดร. จิโรชติ ภัทรนาวิก, 127 หน้า.

ระบบหล่อเย็นเป็นกระบวนการสำคัญในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีเพื่อกำจัดความร้อนส่วนเกินในระบบ ปัญหาที่พบในการเดินระบบหล่อเย็นส่วนใหญ่ได้แก่การกัดกร่อน การเกิดตะกอน และการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ดังนั้นภาคอุตสาหกรรมมักแก้ไขปัญหาเหล่านี้ด้วยการเติมสารเคมี เพิ่มเติมเข้าไปในน้ำหล่อเย็นเพื่อยับยั้งปัญหาต่างๆ ดังกล่าว ซึ่งส่งผลทำให้ปริมาณของแข็งละลายน้ำในระบบสูงขึ้นและความเข้มข้นของอ็อกซิเจนบางชนิดที่เป็นค่าควบคุมของระบบหล่อเย็นมีค่าสูงขึ้น เช่น แคลเซียม คลอไรด์ ความกระด้าง และซิลิกา เป็นต้น โดยเฉพาะคลอไรด์ อ็อกซิเจนจากสารเคมีที่ใช้ควบคุมจุลินทรีย์ (Biocide) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารประกอบคลอรีน ทำให้ต้องเพิ่มอัตราการระบายน้ำทิ้งเพื่อควบคุมความเข้มข้นของคลอไรด์อ็อกซิเจน อีกทั้งยังทำให้เกิดสารพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรคอื่นๆ (Disinfection By Products; DBPs) วนเวียนอยู่ในระบบหล่อเย็น ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือศึกษาการประยุกต์ใช้กระบวนการที่ไม่ใช้สารเคมีได้แก่ โอโซนและอัลตราโซนิก เพื่อควบคุมการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในน้ำหล่อเย็นโดยทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการและใช้น้ำหล่อเย็นจริงจากโรงงานโอเลฟินส์แห่งหนึ่ง รวมถึงศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ จากผลการทดลองพบว่าโอโซน 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตรและอัลตราโซนิก แบบอ่างกำลัง 22 วัตต์ต่อลิตร เวลาสัมผัส 10 และ 20 นาที ตามลำดับ สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่ายในหอหล่อเย็นได้อย่างน้อย 6 วัน แต่โอโซนมีอัตราการกัดกร่อนเหล็กกล้า ค่อนข้างสูง ซึ่งสามารถใช้การออกแบบเชิงวิศวกรรมเพื่อลดปัญหาการกัดกร่อนได้ ค่าไฟฟ้าในการเดินระบบของอัลตราโซนิก โอโซนและการใช้สารเคมี เท่ากับ 20.12 5.71 และ 2.00 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ค่าลงทุนต่อหน่วยของการใช้โอโซนและอัลตราโซนิกเท่ากับ 14,520 และ 10,358 บาทต่ออัตราการผลิต 1 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ตามลำดับ

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยาลัยนานาชาติ

ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยาลัยนานาชาติ

5470474021 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: COOLING TOWER / OLEFINS / OZONE / ULTRASOUND / TOTAL DISSOLVED SOLID

AKKALAK KEMPECHARA: FEASIBILITY STUDY OF BIOCIDES REDUCTION FOR COOLING TOWER OF OLEFINS PLANT. ADVISOR: ASST. PROF. PATIPARN PUNYAPALAKUL, Ph.D., CO-ADVISOR: JIRACHOTE PHATTARANAWIK, Ph.D., 127 pp.

Cooling tower is widely used for cooling down fluid system in petrochemical industries. In order to maintain the cooling facilities and heat exchanging efficiency, many chemicals such as scale and corrosion inhibitors including biocides are added into the cooling make up water. However, those chemicals can cause the decreasing of reuse cycle of cooling water due to the limitation of TDS and some specific ion species consist of chloride, calcium, hardness and silica. Moreover, chlorinated biocides might increase the risk from disinfection by-products. The aim of this study is to evaluate the possibility to replace the chemical biocide usage in cooling water makeup system by chemical free processes (ozonation and ultrasonic processes). The experiments were conducted in laboratory scale with the real makeup water and cooling water from one private olefins plant. The feasibility study of using these chemical free processes was evaluated base on appropriate operation condition. From the obtained data, it could be observed that mixed culture algae (from real cooling water) can be deactivated and inhibited the growth rates at least 6 day by ozonation at 0.01 mg/l and/or at ultrasonic power intensities 22 Watt/L. The most effective exposure times for algae deactivation were 10 and 20 min for ozonation and ultrasonic, respectively. However, the corrosion rate on mild steel was high but engineering design could be applied to solve this problem. Operation cost (just in case of electricity) of ultrasonic, ozone and chemical process were 20.12, 5.71 and 2.00 bath/m³, respectively. Investment cost of ozone and ultrasonic system is 14,520 and 10,358 bath per 1 m³/day of cooling water, respectively.

Department: Environmental Engineering Student's Signature

Field of Study: Environmental Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2013 Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ ดร. จิรโชติ ภัทรนาวิก อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมผู้สละเวลาให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางการปฏิบัติหลักการในการดำเนินงานวิจัยและแก้ไขสิ่งบกพร่องมาตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัยซึ่งเป็นส่วนสำคัญอย่างมากในการทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเอียร ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนรองศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล และ ดร. วศิมน เรืองเล็ก ที่ได้ให้คำชี้แนะ และแก้ไขจนวิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณห้องปฏิบัติการน้ำดีและห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และห้องปฏิบัติการชีววิทยา ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ที่เป็นประโยชน์อย่างมากต่อการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณธนิต สิงห์บุญพงศ์ คุณวัชรีย์ จาดไร่ชิง คุณวีระศักดิ์ จงเฟื่องปริญญา คุณกนกวรรณ ศรีนิตี คุณประหยัด อุ่มจารสา ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คุณรามนรี เนตรวิเชียร เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เป็นส่วนหนึ่งในงานวิจัย คอยให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในระหว่างทำงานวิจัย จนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ นส.กฤติกา วัฒนวิสุทธิ์ นส.ลักษิกา กองวิเชียร นายชินวัฒน์ ไตรศุภโชค

นส. ฉมนรี สุขเกษม นส. รัตติกานต์ ฉ่ำทรัพย์ นายดิษยพงศ์ หกสุวรรณ นายเฉลิมเกียรติ บุญลือ นส. กัตตินาฏ สกุลสวัสดิพันธ์ นายธนากร อ้อมุกตากุล และนส. ดาราธิป เพ็ชรพรหม และนส. รัชันัน ชำนาญหอม ที่คอยช่วยเหลือ เป็นกำลังใจ และดูแลกันและกันในช่วงการทำงานวิจัย

และสุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา พี่ และญาติทุกท่าน โดยเฉพาะน้องที่ให้การสนับสนุนในทุกเรื่องและแรงผลักดันแก่ผู้วิจัยตลอดมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่ 1	1
บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2	4
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 กรณีศึกษาโรงงานผลิตโอเลฟินส์.....	4
2.2 หอหล่อเย็น.....	11
2.3 ไอโซน.....	25
2.4 อัลตราโซนิก (Ultrasound)	32
2.5 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	37
2.6 แนวคิดในการออกแบบการทดลอง.....	42
2.7 การใช้งานประยุกต์ใช้จริง	43
บทที่ 3	48
ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย	48
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี.....	48
3.2 แผนการวิจัย.....	49
3.3 วิธีการทดลอง	61
บทที่ 4	67

ผลการทดลองและวิจารณ์	67
4.1 ลักษณะและองค์ประกอบของน้ำประปาและน้ำหล่อเย็น	67
4.2 ผลของการใช้ไอโซนต่อแบคทีเรียและสาหร่ายในน้ำหล่อเย็น	72
4.3 ผลการวิเคราะห์อัตราการกัดกร่อนของโลหะจากการใช้ไอโซนในน้ำหล่อเย็น	76
4.4 ผลของการใช้อัลตราโซนิกต่อสาหร่ายและแบคทีเรียในน้ำหล่อเย็น	80
4.5 วิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์	84
บทที่ 5	92
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	92
5.1 สรุปผลการวิจัย	92
5.2 ข้อเสนอแนะ	93
รายการอ้างอิง	95
ภาษาไทย	96
ภาษาอังกฤษ	97
ภาคผนวก	101
ภาคผนวก ก	102
ภาคผนวก ข	106
ภาคผนวก ค	107
ภาคผนวก ง	110
ภาคผนวก จ	111
ภาคผนวก ฉ	115
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	127

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ควบคุมการโบลว์ดาวน์	10
ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของวัฏจักรความเข้มข้นและน้ำทดแทนที่ลดได้	16
ตารางที่ 2.3 ค่าแนะนำของอัตราการกัดกร่อนในโลหะชนิดต่างๆ	24
ตารางที่ 2.4 ค่าครึ่งชีวิตของไอโซนที่อุณหภูมิต่างๆ	25
ตารางที่ 2.5 ความสามารถในการออกซิไดซ์ของไอโซนกับสารออกซิแดนท์ต่างๆ.....	26
ตารางที่ 2.6 ความสามารถการละลายน้ำของไอโซนที่อุณหภูมิต่างๆ	29
ตารางที่ 2.7 ปริมาณไอโซนในการทำปฏิกิริยากับตัวรีดิวซ์ 1 มก./ล.....	30
ตารางที่ 2.8 ข้อดีและข้อเสียของไอโซน	31
ตารางที่ 2.9 การใช้อัตราชาวต์ร่วมกับไบโอไซด์.....	40
ตารางที่ 2.10 อัตราการกัดกร่อนของแต่ละชุดทดลอง.....	41
ตารางที่ 2.11 ขนาดของเครื่องไอโซนที่แนะนำกับหohl่อเย็นแต่ละขนาด	44
ตารางที่ 3.1 รายละเอียดวิธีวิเคราะห์ของพารามิเตอร์ต่างๆ.....	51
ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ศึกษาในการทดลองที่ 2	52
ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ศึกษาในการทดลองที่ 3	55
ตารางที่ 3.4 ตัวแปรที่ศึกษาในการทดลองที่ 4	58
ตารางที่ 3.5 ตัวอย่างการประเมินราคาและความเป็นไปได้เศรษฐศาสตร์	60
ตารางที่ 3.6 สรุปแผนการทดลอง	66
ตารางที่ 4.1 ลักษณะโดยทั่วไปของน้ำประปา.....	68
ตารางที่ 4.2 ลักษณะโดยทั่วไปของน้ำหohl่อเย็น	69
ตารางที่ 4.3 รายการคำนวณสมดุคคโลไรต์ในหohl่อเย็น	70
ตารางที่ 4.4 สรุปผลการทดลองการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและทองแดง	80
ตารางที่ 4.5 วัสดุที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนของไอโซน	86
ตารางที่ 4.6 สรุปค่าออกแบบและค่าใช้จ่ายในการประยุกต์ไอโซนและอัลตราโซนิก.....	91
ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของไอโซนและอัลตราโซนิก	91
ตารางที่ 5.1 การประเมินค่าใช้จ่ายเบื้องต้น.....	93

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 แนวคิดในการออกแบบการทดลอง.....	2
รูปที่ 2.1 ตัวอย่างกระบวนการผลิตโอเลฟินส์จากแนฟทา (Naptha) ด้วยวิธี Stream cracking.....	6
รูปที่ 2.2 ผังทิศทางไหลของน้ำในโรงงาน	7
รูปที่ 2.3 ระบบผลิตน้ำประปา.....	8
รูปที่ 2.4 ผังทิศทางการไหลระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำ	8
รูปที่ 2.5 ผังทิศทางการไหลระบบหล่อเย็น	10
รูปที่ 2.6 หลักการทำงานของหอหล่อเย็น.....	11
รูปที่ 2.7 หอหล่อเย็นแบบธรรมชาติ (Natural draft cooling tower).....	12
รูปที่ 2.8 หอหล่อเย็นแบบบังคับทางลม (Forced draft)	13
รูปที่ 2.9 หอหล่อเย็นแบบชักนำลม (Induced draft) แบบ Counter flow.....	13
รูปที่ 2.10 หอหล่อเย็นแบบชักนำลม (Induced draft) แบบCross flow	14
รูปที่ 2.11 สมดุลน้ำของระบบหล่อเย็น	15
รูปที่ 2.12 การเกิดตะกรันของหินปูนที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	20
รูปที่ 2.13 ผลึกของหินปูน (CaCO_3).....	20
รูปที่ 2.14 ปฏิกิริยาการกัดกร่อน.....	21
รูปที่ 2.15 การกัดกร่อนแบบกัลวานิก	22
รูปที่ 2.16 การกัดกร่อนแบบเป็นหลุม	23
รูปที่ 2.17 การกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยคลอไรด์.....	23
รูปที่ 2.18 การเปรียบเทียบการกัดกร่อนแบบต่างๆ โดยการใช้คูปอง (Coupon).....	24
รูปที่ 2.19 การสลายตัวของไอโซนในแม่น้ำ	26
รูปที่ 2.20 อัลตราโซนิกแบบอ่าง	32
รูปที่ 2.21 อ่างอัลตราโซนิกแบบคัพฮอร์น (Cup Horn)	33
รูปที่ 2.22 ระบบอัลตราโซนิกแบบโพรบ	34
รูปที่ 2.23 การเกิดฟองอากาศคาวิเทชัน	34
รูปที่ 2.24 แสดงความแข็งแกร่งของคาวิเทชันเปรียบเทียบกับความถี่	35
รูปที่ 2.25 การแตกของฟองอากาศในสารละลายที่ได้รับคลื่นอัลตราโซนิก	37
รูปที่ 2.26 ทางเลือกที่ 1 แนวคิดการออกแบบไอโซน	42
รูปที่ 2.27 ทางเลือกที่ 2 แนวคิดการออกแบบอัลตราโซนิก	43
รูปที่ 2.28 ผังทิศทางการไหลของระบบไอโซนในหอหล่อเย็น	44
รูปที่ 2.29 การใช้ไอโซนกับหอหล่อเย็นในสถานที่จริง	45
รูปที่ 2.30 ผังทิศทางการไหลและรายละเอียดเครื่องอัลตราโซนิกแบบความถี่สูง	46
รูปที่ 2.31 ผังการจัดวางเครื่องอัลตราโซนิกแบบฟูลลอย.....	47

	หน้า
รูปที่ 3.1 สรุปแผนการทดลอง.....	50
รูปที่ 3.2 ผังทิศทางการไหลการทดลองที่ 2.....	53
รูปที่ 3.3 แผนผังการจัดวางอุปกรณ์ในการทดลองที่ 2	53
รูปที่ 3.4 แผนผังการทดลองการใช้โอโซนกับสาหร่ายสายพันธุ์ <i>Chlorella vulgaris</i>	54
รูปที่ 3.5 แผนผังการทดลองการใช้โอโซนกับสาหร่ายในน้ำหล่อเย็น	54
รูปที่ 3.6 แผนผังสรุปการดำเนินการทดลองที่ 3.....	56
รูปที่ 3.7 การจัดวางอุปกรณ์ของชุดการทดลองที่ 4.....	58
รูปที่ 3.8 แผนการทดลองการใช้อัลตราโซนิกกับสาหร่ายในน้ำหล่อเย็น	59
รูปที่ 3.9 แผนการทดลองการใช้อัลตราโซนิกกับสาหร่ายสายพันธุ์ <i>Chlorella vulgaris</i>	59
รูปที่ 3.10 เครื่อง Ion Chromatography (IC).....	61
รูปที่ 3.11 อุปกรณ์ในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย	62
รูปที่ 3.12 อุปกรณ์ในการวิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรีย.....	63
รูปที่ 3.13 การวิเคราะห์ความเข้มข้นโอโซนด้วยการใช้สารละลายอินดิโก	63
รูปที่ 3.14 เครื่องกำเนิดโอโซน	64
รูปที่ 3.15 เครื่องอัลตราโซนิกแบบอ่าง	64
รูปที่ 3.16 แผ่นโลหะทดสอบการกัดกร่อน	65
รูปที่ 3.17 แผนผังการทดลองการกัดกร่อนของโลหะ	65
รูปที่ 4.1 แผนผังสมดุลคลอไรต์ในหอหล่อเย็น.....	69
รูปที่ 4.2 ความเข้มข้นโอโซนละลายน้ำที่เวลา 0-60 นาที.....	71
รูปที่ 4.3 ผลของการใช้สารเคมีควบคุมสาหร่ายในน้ำหล่อเย็น.....	72
รูปที่ 4.4 ผลของการใช้โอโซนต่อสาหร่ายสายพันธุ์ <i>Chlorella vulgaris</i>	73
รูปที่ 4.5 ผลของการใช้โอโซนต่อสาหร่ายในน้ำหล่อเย็น เวลาสัมผัส 1-10 นาที	74
รูปที่ 4.6 ผลของการใช้โอโซนต่อสาหร่ายในน้ำหล่อเย็น เวลาสัมผัส 10-30 นาที	74
รูปที่ 4.7 ผลของการใช้โอโซนแบคทีเรียในน้ำหล่อเย็น	75
รูปที่ 4.8 น้ำหนักที่หายไปต่อรอบของการล้างของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ	77
รูปที่ 4.9 น้ำหนักที่หายไปต่อรอบของการล้างของทองแดง	78
รูปที่ 4.10 ผลของการใช้อัลตราโซนิกต่อสาหร่ายสายพันธุ์ <i>Chlorella vulgaris</i>	80
รูปที่ 4.11 ผลของการใช้อัลตราโซนิกต่อสาหร่ายในน้ำหล่อเย็น เวลาสัมผัส 5-20 นาที.....	81
รูปที่ 4.12 ผลของการใช้อัลตราโซนิกต่อสาหร่ายในน้ำหล่อเย็น เวลาสัมผัส 10-30 นาที	82
รูปที่ 4.13 ผลของการใช้อัลตราโซนิก 22 วัตต์ต่อลิตร ต่อแบคทีเรียในน้ำหล่อเย็น	83
รูปที่ 4.14 ผลของการใช้อัลตราโซนิก 88 วัตต์ต่อลิตร ต่อแบคทีเรียในน้ำหล่อเย็น	83
รูปที่ 4.15 ผังทิศทางการไหลของระบบโอโซน	87
รูปที่ 4.16 การออกแบบเชิงแนวคิด (Conceptual design).....	88
รูปที่ 4.17 ผังทิศทางการไหลของระบบอัลตราโซนิก.....	90

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมปิโตรเคมีประกอบด้วยกระบวนการต่างๆ ที่ต้องให้น้ำในปริมาณมาก เช่น กระบวนการผลิต ระบบหม้อไอน้ำ ระบบหล่อเย็น และการใช้น้ำในการอุปโภคในโรงงาน ซึ่งกระบวนการที่มีการใช้น้ำสูงสุดคือระบบหล่อเย็น

หล่อเย็นเป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีที่มีกระบวนการผลิต ซึ่งต้องมีทั้งการให้ความร้อนเพื่อให้โมเลกุลของสารตั้งต้นแตกตัว และลดอุณหภูมิเพื่อแยกสารผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ น้ำถือเป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่นิยมใช้มากที่สุดเนื่องจากหาได้ง่าย และมีราคาถูกกว่าตัวกลางชนิดอื่นๆ การเดินระบบของหล่อเย็นนั้นมักประสบปัญหาหลักๆ คือ เรื่องการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ การเกิดตะกอน และการกัดกร่อน ส่วนมากภาคอุตสาหกรรมจะแก้ปัญหาเหล่านี้ด้วยการเติมสารเคมี ซึ่งต้องใช้สารเคมีจำนวนมาก ทำให้ค่าของแข็งละลายน้ำในระบบสูงขึ้น และอาจตกค้างออกไปกับน้ำทิ้งของโรงงานทำให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมได้

หล่อเย็นเป็นระบบเปิดที่มีทั้งแสงแดด น้ำ อากาศ และสิ่งปนเปื้อนต่างๆ ที่มากับอากาศ เป็นสถานะที่เอื้ออำนวยต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้เป็นอย่างดี จุลินทรีย์ในหล่อเย็นที่พบทั่วไปมีทั้งแบคทีเรีย สาหร่าย และรา การแก้ไขปัญหาการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ส่วนมากมักนิยมใช้สารเคมีฆ่าเชื้อโรคเป็นหลัก ยกตัวอย่างเช่น คลอรีน โซเดียมไฮโปคลอไรท์ และโบรไมน์ เป็นต้น การเติมสารเคมีส่วนมากจะเติมอย่างต่อเนื่อง และเติมให้มีปริมาณตกค้างเพื่อป้องกันการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และเมื่อใช้ไประยะหนึ่งต้องมีการเพิ่มความเข้มข้นหรือเปลี่ยนสารเคมีเพื่อไม่ให้จุลินทรีย์ปรับตัวให้ทนต่อสารฆ่าเชื้อโรคได้ อีกทั้งสารเคมีที่เติมเข้าไปยังสามารถทำให้ปริมาณของแข็งละลายน้ำในระบบเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งทำให้ต้องเพิ่มการระบายน้ำทิ้งเพื่อควบคุมความเข้มข้นของของแข็งละลายน้ำไม่ให้เกินค่าที่กำหนด (ป้องกันการเกิดตะกอนและการกัดกร่อน) โดยคลอรีนเป็นหนึ่งในพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมการระบายน้ำทิ้ง ซึ่งการใช้คลอรีนในระบบหล่อเย็นส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของคลอรีนทำให้ระบบต้องระบายน้ำเพิ่มขึ้นเพื่อรักษาสมดุล นอกจากนี้สารพลอยได้อื่นๆ ที่เกิดจากการใช้สารเคมีฆ่าเชื้อโรค เช่น การเกิดไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethane; THM) หรือสารพลอยได้อื่นๆ จากการฆ่าเชื้อโรคอื่นๆ (Disinfection By Product; DBP) ก็เป็นปัญหาที่ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้น ดังนั้นการศึกษาความเป็นไปได้ของกระบวนการอื่นๆ เพื่อทดแทนการใช้สารเคมี โดยที่ระบบยังคงมีเสถียรภาพอย่างต่อเนื่อง รวมถึงความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์จึงเป็นเป้าหมายหลักของงานวิจัยนี้

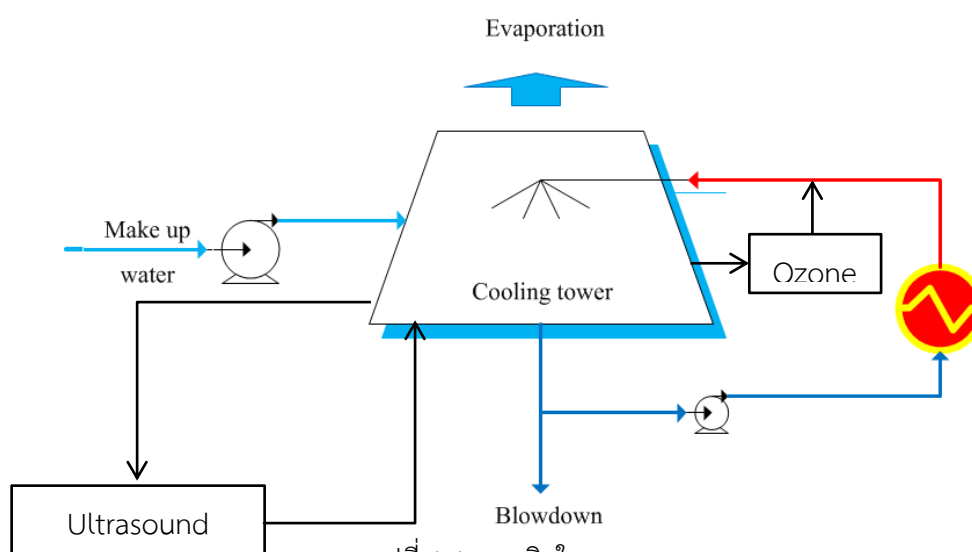
โอโซนเป็นสารที่มีอำนาจการออกซิไดซ์สูงมากจึงสามารถทำปฏิกิริยากับจุลินทรีย์ในน้ำได้รวดเร็วกว่าคลอรีน โอโซนสลายตัวในเวลาประมาณ 20 นาที จึงไม่มีสารตกค้างออกไปกับน้ำทิ้ง และที่สำคัญคือไม่เพิ่มของแข็งละลายน้ำให้กับระบบน้ำหล่อเย็น ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้ทำให้โอโซนมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาประยุกต์ใช้เพื่อทดแทนการเติมสารเคมีเพื่อควบคุมจุลินทรีย์ในน้ำหล่อเย็น แต่ด้วยอำนาจ

การออกซิไดซ์สูงทำให้โอโซนสามารถกัดกร่อนโลหะในระบบได้ และอุณหภูมิของน้ำที่สูงขึ้นทำให้การละลายน้ำของโอโซนลดลง โอโซนจึงไม่เหมาะกับระบบที่น้ำหล่อเย็นมีอุณหภูมิสูงมากกว่า 40 องศาเซลเซียส (Energy, 1995) และการสลายตัวได้ง่ายของโอโซนทำให้ต้องมีการเติมโอโซนอย่างต่อเนื่อง

คลื่นอัลตราโซนิกก่อให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กที่เกิดจากการบีบอัดและคลายตัวเข้าไปเข้ามาเรียกว่า คาวิเทชัน (Cavitation) ส่งผลให้แก๊สแควคิวโกลในเซลล์สาหร่ายแตกตัว ทำให้สาหร่ายตกตะกอน แต่ไม่ทำให้เซลล์สาหร่ายแตก และเกิดแรงเฉือน สามารถทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ทำให้สาหร่ายตาย (Wu, Joyce, & Mason, 2012) การตกตะกอนลงของสาหร่ายนั้น สามารถกำจัดสาหร่ายออกจากระบบน้ำหล่อเย็นได้โดยไม่ทำให้ของเหลวในเซลล์สาหร่ายถูกปล่อยออกมา ซึ่งอาจเพิ่มค่าของแข็งละลายน้ำหรืออาจเป็นสารที่มีความเป็นพิษในสาหร่ายบางชนิด

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้โอโซนและ/หรืออัลตราโซนิกเพื่อทดแทนการใช้สารเคมีสำหรับควบคุมจุลินทรีย์ในหอหล่อเย็น ซึ่งเป็นแหล่งที่มาของค่าของแข็งละลายน้ำที่เป็นตัวกำหนดปริมาณการใช้น้ำในหอหล่อเย็น ดังนั้นถ้าสามารถลดการใช้สารเคมีลงได้จะสามารถเพิ่มจำนวนรอบการใช้น้ำในหอหล่อเย็นขึ้นได้ ผลที่ได้รับคือปริมาณการใช้น้ำทดแทนในหอหล่อเย็นก็จะลดลงตามไปด้วย แนวคิดในการออกแบบการทดลองแบ่งการใช้เทคโนโลยีออกเป็น 2 ทางเลือก ดังแสดงในรูปที่ 1.1 คือการใช้โอโซนเพื่อใช้ในการยับยั้งการเจริญเติบโตของน้ำก่อนเข้าหอหล่อเย็นด้วยการออกซิไดซ์ให้เซลล์สาหร่ายเสียหายแล้วตายในที่สุด และอีกทางเลือกหนึ่งคือการใช้อัลตราโซนิก โดยปรากฏการณ์คาวิเทชันทำให้แก๊สแควคิวโกลของเซลล์สาหร่ายแตก แล้วเซลล์สาหร่ายแยกตัวออกจากน้ำ

โดยออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาผลของเวลาสัมผัสและความเข้มข้นของโอโซน กำลังที่ใช้และเวลาสัมผัสของการใช้อัลตราโซนิกที่แตกต่างกันซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่าย เพื่อเป็นข้อมูลในการพิจารณาและออกแบบระบบเพื่อใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรมต่อไป



รูปที่ 1.1 แนวคิดในการออกแบบการทดลอง

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาแหล่งที่มาและแนวทางการลดของแข็งละลายน้ำในหอหล่อเย็น เพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่

1.2.2 ศึกษาผลของเวลาสัมผัสโอโซนและความเข้มข้นที่มีต่อการยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่ายในหอหล่อเย็น

1.2.3 ศึกษาผลของพลังงานและเวลาสัมผัสของคลื่นอัลตราโซนิก ความเข้มข้นของสาหร่ายที่มีผลต่อการกำจัดและการยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่ายในหอหล่อเย็น

1.2.4 ศึกษาความเป็นไปได้ทางเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ รวมทั้งวิเคราะห์ศักยภาพในการใช้โอโซนและอัลตราโซนิกเพื่อทดแทนการใช้สารเคมีในการควบคุมจุลินทรีย์ในหอหล่อเย็น

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ณ ห้องปฏิบัติการวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ใช้ตัวอย่างน้ำหล่อเย็นจากโรงงานผลิตโอเลฟินส์แห่งหนึ่งทางภาคตะวันออก โดยกำหนดขอบเขตต่างๆ ดังนี้

1.3.1 ศึกษาคุณสมบัติและองค์ประกอบของน้ำประปาและน้ำในระบบหล่อเย็นของโรงงาน

1.3.2 ศึกษาเวลาสัมผัสโอโซน ที่มีต่อการยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่าย ในถังปฏิกริยาแบบที่ละเท (Batch Reactor)

1.3.3 ศึกษาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและทองแดงจากการใช้โอโซน

1.3.4 ศึกษาผลของพลังงาน และระยะเวลาในการสัมผัสต่อประสิทธิภาพการกำจัดและการยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่ายในหอหล่อเย็นโดยใช้ความถี่ 40 กิโลเฮิร์ต ในถังปฏิกริยาแบบที่ละเท (Batch Reactor)

1.3.5 ประเมินความเป็นไปได้ทางเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ รวมทั้งวิเคราะห์ศักยภาพในการใช้โอโซนและอัลตราโซนิกเพื่อทดแทนสารเคมีควบคุมจุลินทรีย์ในหอหล่อเย็นเมื่อเปรียบเทียบกับระบบเดิม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 แนวทางการใช้สารเคมีเพื่อควบคุมจุลินทรีย์และเพิ่มรอบการใช้น้ำในหอหล่อเย็น

1.4.2 ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมในการใช้โอโซนเพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่ายในหอหล่อเย็น

1.4.3 ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมในการใช้คลื่นอัลตราโซนิกเพื่อกำจัดและการยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่ายในหอหล่อเย็น

1.4.4 ประเมินความเป็นไปได้เชิงเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ในการใช้โอโซนและอัลตราโซนิกในการควบคุมการเจริญเติบโตของสาหร่ายในหอหล่อเย็น

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากปัญหาการขาดแคลนน้ำของภาคตะวันออกของประเทศไทย ซึ่งบริเวณนี้เป็นที่ตั้งของโรงงานอุตสาหกรรมจำนวนมาก ทำให้โรงงานอุตสาหกรรมตื่นตัวกับการลดการใช้น้ำภายในโรงงานมากขึ้น ทั้งนี้การลดใช้สารเคมีในกระบวนการเพื่อนำน้ำมาใช้ซ้ำและ/หรือนำกลับมาใช้ใหม่ก็แนวทางเป็นการลดการใช้น้ำอีกทางหนึ่ง ดังนั้นการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจึงเริ่มต้นที่การศึกษาเพื่อเลือกกระบวนการที่มีปริมาณการใช้น้ำและสารเคมีที่ทำให้การลดการใช้น้ำที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการลดลงของแข็งละลายน้ำของโรงงาน เมื่อเลือกกระบวนการแล้วจึงทำการศึกษาระบบการเพื่อทดแทนการใช้น้ำที่ใช้ในกระบวนการเดิม รวมทั้งการศึกษาทั้งข้อดีและข้อเสีย ความเป็นไปได้ทางเทคนิคและทางเศรษฐศาสตร์

2.1 กรณีศึกษาโรงงานผลิตโอเลฟินส์

ปิโตรเคมี (Petrochemical) หมายถึงสารอินทรีย์เคมี (Organic chemical) ประเภทไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) ที่ผลิตจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม (Petroleum) ซึ่งเป็นสารประกอบระหว่างไฮโดรเจนกับคาร์บอนที่เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติ เช่น น้ำมันดิบ (Crude oil) ที่เป็นของเหลวของหนัก และของแข็ง แก๊สธรรมชาติ (Natural gas) ที่อยู่ในสถานะแก๊ส และที่อยู่ใต้ผิวโลกซึ่งเมื่อขึ้นสู่ผิวโลกแล้วกลายเป็นของเหลวคือ แก๊สธรรมชาติเหลว (Condensate) เป็นต้น

2.1.1 ผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตโอเลฟินส์ (กระทรวงพลังงาน, 2550)

อุตสาหกรรมปิโตรเคมี แบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ ได้ตั้งนี้อุตสาหกรรมปิโตรเคมีขั้นต้น (Upstream Petrochemical Industry) อุตสาหกรรมปิโตรเคมีขั้นกลาง (Intermediate Petrochemical Industry) และอุตสาหกรรมปิโตรเคมีขั้นปลาย (Downstream Petrochemical Industry) โดยผลิตภัณฑ์จากอุตสาหกรรมขั้นต้นจะกลายเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมขั้นต่อไป ซึ่งตัวอย่างผลิตภัณฑ์ในกลุ่มโอเลฟินส์ (Olefins group) ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีขั้นต้นมีดังนี้ (กระทรวงพลังงาน, 2550)

1) เอทิลีน (Ethylene) เป็นผลิตภัณฑ์ขั้นต้นที่สำคัญที่สุดของอุตสาหกรรมปิโตรเคมีขั้นต้น เนื่องจากมีความต้องการใช้มากที่สุด เอทิลีนสามารถนำไปผลิตเม็ดพลาสติก เช่น โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low density Polyethylene; LDPE) โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High density Polyethylene; HDPE) โพลีไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride; PVC) เป็นต้น

2) โพรพิลีน (Propylene) เป็นผลิตภัณฑ์ขั้นต้นที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งของอุตสาหกรรมปิโตรเคมีขั้นต้น โพรพิลีนสามารถนำไปผลิตเม็ดพลาสติก เช่น โพลีโพรพิลีน (Polypropylene) ไนลอน 6,6 (Nylon 6,6) และผลิตภัณฑ์อื่นๆ เช่น บิวทิลแอลกอฮอล์ (Butyl alcohol) อะครีโลไนไตรล (Acrylonitrile) เป็นต้น

3) มิกซ์ซีลี (Mixed C₄) ใช้ในการผลิตสารเพิ่มค่าออกเทนของเชื้อเพลิงรถยนต์ Methyl Tertiary Butyl Ether (MTBE) และยังเป็นสารตั้งต้นในการผลิตยางสังเคราะห์ประเภทต่างๆ เช่น ยางบิวทาไดอิน (Butadiene Rubber; BR) ยางสไตรีน-บิวทาไดอิน (Styrene-Butadiene Rubber; SBR) เป็นต้น

2.1.2 กระบวนการผลิตโอเลฟินส์

วัตถุดิบหลักในการผลิตโอเลฟินส์คือ อีเทน (Ethane) โพรเพน (Propane) แก๊สแอลพีจี (LPG) และแนฟทา (Naphtha) กระบวนการหลักในการผลิตคือการแตกตัวโมเลกุลของวัตถุดิบคือ การทำให้โมเลกุลใหญ่ๆ มีขนาดเล็กลง และขั้นตอนต่อไปคือการเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลเพื่อให้ได้สารผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ตัวอย่างกระบวนการผลิตโอเลฟินส์จากแนฟทาแสดงในรูปที่ 2.1 และรายละเอียดของกระบวนการผลิตมีดังนี้

1) กระบวนการแตกโมเลกุลของวัตถุดิบ

ก. กระบวนการแตกโมเลกุลด้วยความร้อนและไอน้ำ (Thermal steam cracking) เรียกสั้นๆ ได้ว่า Stream cracking เป็นการแตกตัวโมเลกุลของวัตถุดิบด้วยความร้อน โดยเริ่มให้ความร้อนเบื้องต้น (Preheating) ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส แล้วส่งเข้าไปในท่อที่มีขนาดเล็กที่มีขนาดประมาณ 25-125 มิลลิเมตร และยาวประมาณ 12-25 เมตร ให้ความร้อนให้มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 750-900 องศาเซลเซียส โมเลกุลจะแตกตัวเป็นโมเลกุลขนาดเล็ก แล้วทำให้เย็นลงที่อุณหภูมิประมาณ 550-650 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปเพิ่มความดันแล้วแยกสารผลิตภัณฑ์ต่อไป (Ren และคณะ, 2006) ผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีขั้นต้นที่สำคัญคือ เอทิลีนและโพรพิลีน นอกจากนี้ยังได้ผลิตภัณฑ์ร่วม เช่น มิกซ์ซีลี ไพโรไลซิส แก๊สโซลีน (Pyrolysis gasoline) ที่สามารถนำไปแยกได้เป็น เบนซีน โทลูอิน และไซลีน

ข. กระบวนการแตกโมเลกุลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic cracking) ใช้สำหรับวัตถุดิบ เช่น แก๊สออยล์และน้ำมันเตา ซึ่งมีโมเลกุลใหญ่และแตกตัวได้ยาก จึงต้องมีตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เข้าช่วย ตัวอย่างเช่น กระบวนการการแตกโมเลกุลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Fluid Catalytic cracking; FCC) โดยมีน้ำมันเบนซินและดีเซลเป็นผลิตภัณฑ์หลัก ส่วนผลพลอยได้จากกระบวนการคือ โพรพิลีนจากกระบวนการเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุล (Reforming)

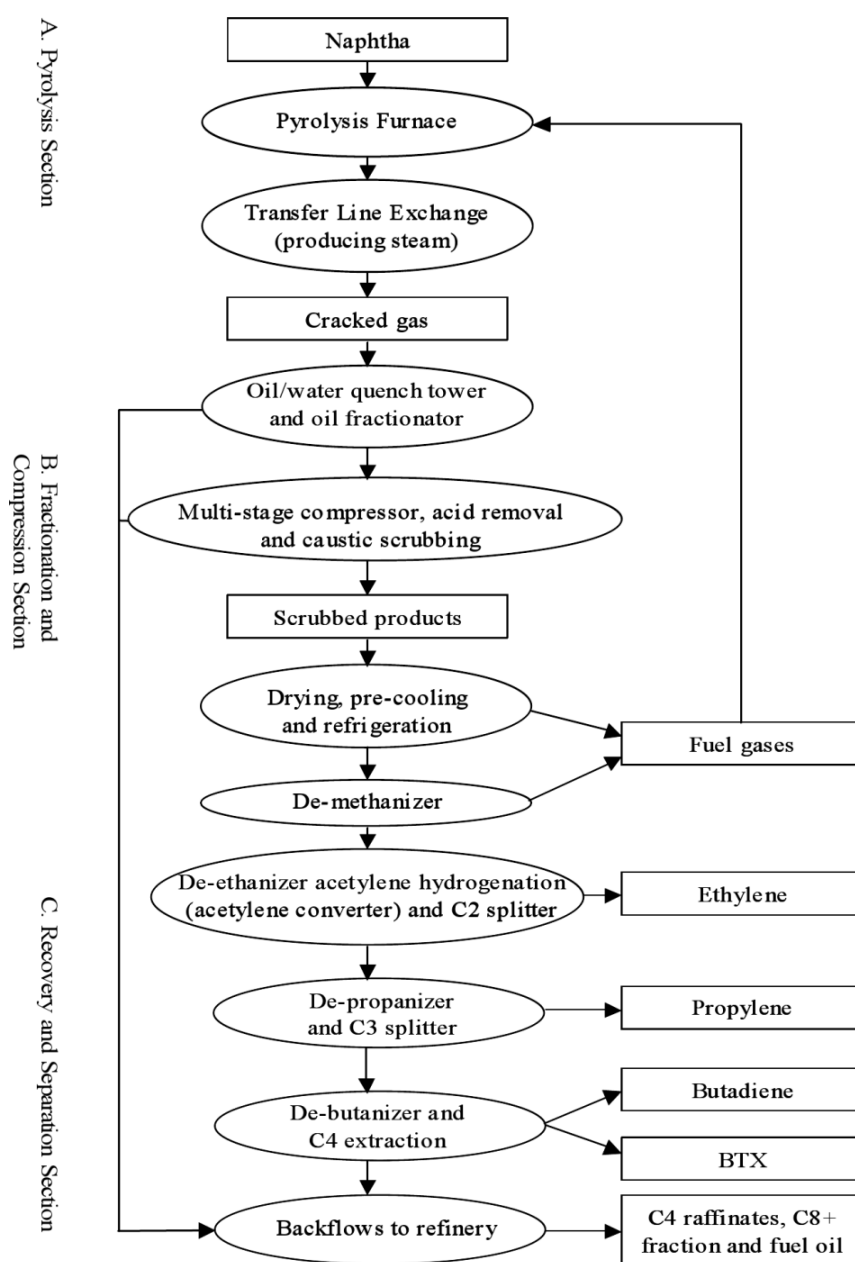
2) การเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลอาจใช้ความร้อน ความดัน และ/หรือตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าร่วม เพื่อให้ได้สารผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธีดังนี้

ก. Dehydrogenation คือ กระบวนการดึงไฮโดรเจนออกจากโครงสร้างของไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว เพื่อเปลี่ยนให้เป็นไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว เช่น กระบวนการ Dehydrogenation ของ Cyclohexane เพื่อเปลี่ยนเป็นสารอะโรมาติกส์

ข. Dehydrocyclization คือ กระบวนการดึงไฮโดรเจนออกจากโครงสร้างของไฮโดรคาร์บอนที่เป็นโมเลกุลโซ่ตรง เพื่อเปลี่ยนเป็นสารอะโรมาติกส์

ค. Dealkylation คือ กระบวนการดึงกลุ่ม Alkyl ออก เช่น การดึง Alkyl ออกจากโทลูอีน และไซลีนเพื่อให้ได้เบนซีน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาหรือไม่ก็ได้

ง. Transalkylation หรือ Disproportionation คือ กระบวนการที่สาร 2 โมเลกุลแตกตัวและรวมตัวกันในเวลาเดียวกัน แล้วให้สารใหม่ 2 โมเลกุลที่มีขนาดโมเลกุลที่เล็กกว่า หรือใหญ่กว่าเดิม เช่น กระบวนการ Transalkylation ของโทลูอีน เพื่อให้ได้เบนซีนและไซลีน

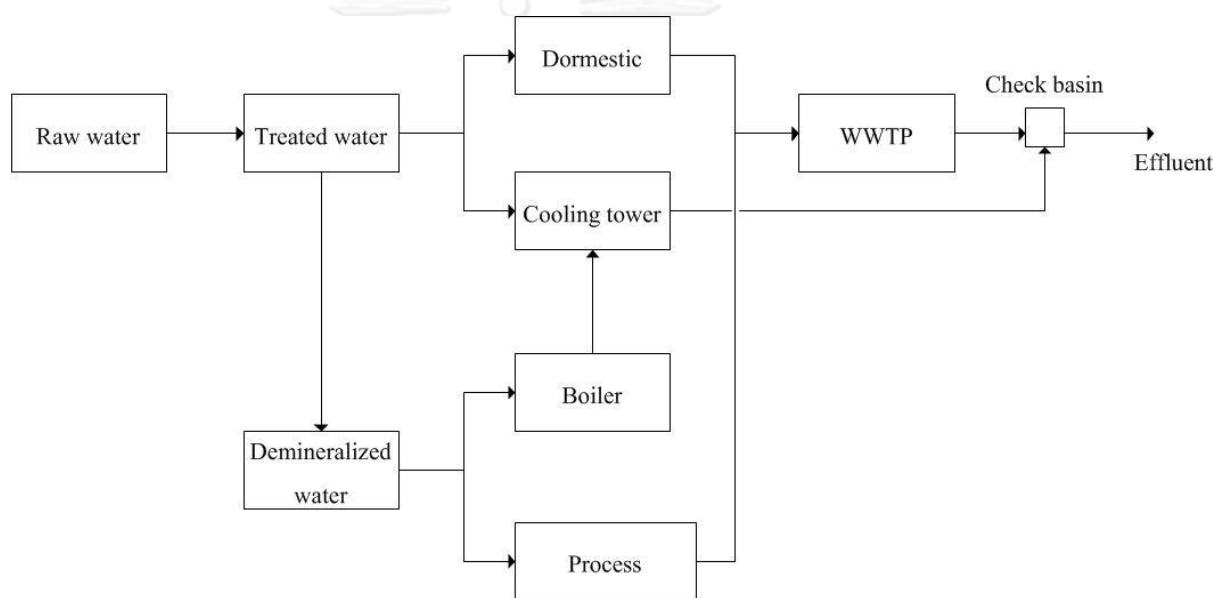


รูปที่ 2.1 ตัวอย่างกระบวนการผลิตโอเลฟินส์จากแนฟทา (Naphtha) ด้วยวิธี Stream cracking

ที่มา: (Ren, 2006)

2.1.3 การใช้น้ำในโรงงาน

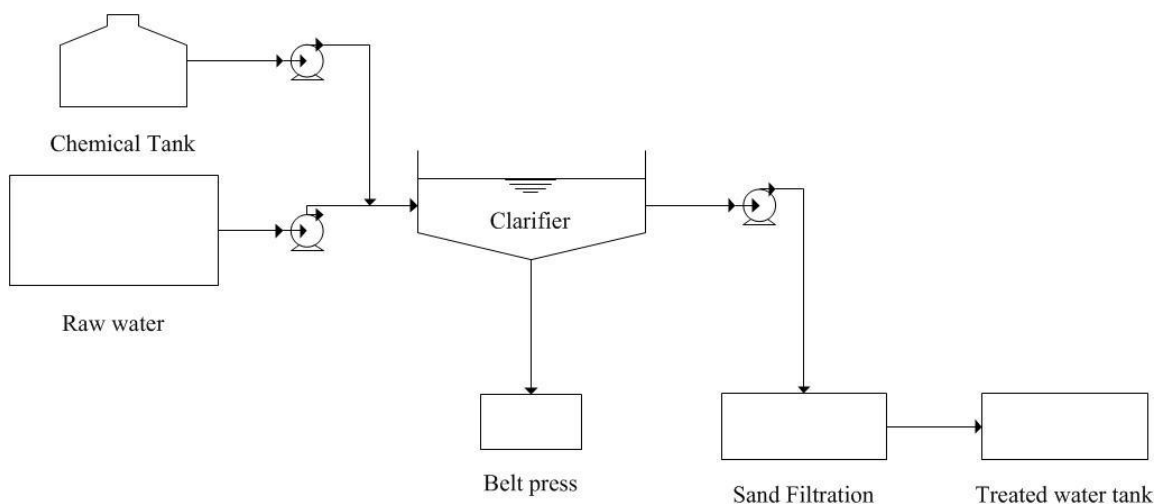
ผังทิศทางการไหลของน้ำโรงงานแสดงในรูปที่ 2.2 โดยน้ำดิบ (Raw water) จะถูกนำมาผลิตเป็นน้ำประปา (Treated water) จากนั้นน้ำประปานั้นนำไปใช้ในระบบสาธารณูปโภค (Domestic) ระบบหล่อเย็น (Cooling tower) และนำมาปรับปรุงคุณภาพ (Demineralization) ให้มีความบริสุทธิ์เพื่อนำไปใช้ในระบบหม้อไอน้ำ (Boiler) และกระบวนการผลิต (Process) โดยไอน้ำที่ควบแน่นแล้ว (Condensate) จากหม้อไอน้ำจะถูกส่งไปใช้เป็นน้ำทดแทน (Make up) ในหล่อเย็น ส่วนน้ำเสียจากกระบวนการผลิตจะถูกส่งมาบำบัดที่ระบบบำบัดน้ำเสีย (Wastewater treatment plant; WWTP) น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วจะนำมาผสมกับน้ำโบล์ดาวน์ (Blowdown) จากระบบหล่อเย็น ผ่านการตรวจวัดคุณภาพน้ำ (Check basin) แล้วทิ้งออกไปนอกโรงงาน



รูปที่ 2.2 ผังทิศทางการไหลของน้ำในโรงงาน
ที่มา: ข้อมูลจากโรงงาน

2.1.4 ระบบผลิตประปา

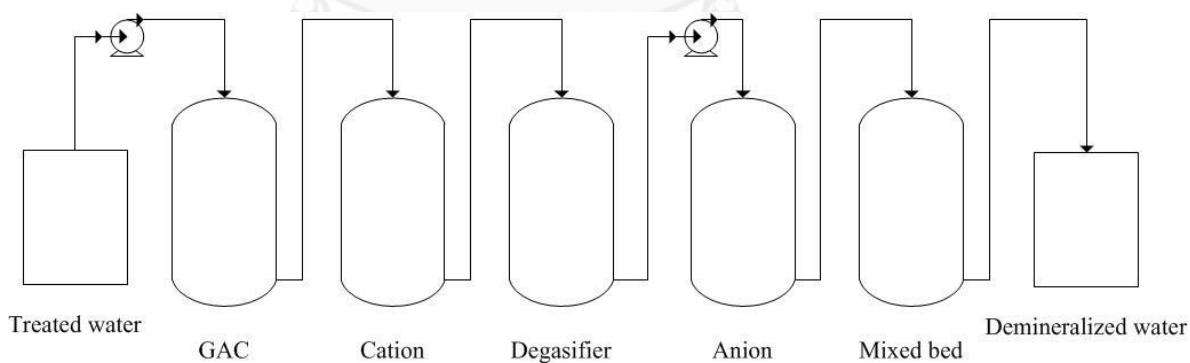
ระบบผลิตน้ำประปาเป็นการนำน้ำดิบมากำจัดของแข็งแขวนลอยและฆ่าเชื้อโรค มีกำลังการผลิตประมาณ 1,000–1,200 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ผังทิศทางการไหลระบบผลิตน้ำแสดงในรูปที่ 2.3 การกำจัดของแข็งแขวนลอย โดยน้ำดิบถูกนำมาเติมสารเคมีซึ่งประกอบด้วยสารส้ม (Alum) เป็นสารโคแอกกูแลนต์ (Coagulant) โพลีเมอร์เป็นโคแอกกูแลนต์ เอ็ด (Coagulant aid) สารเคมีในการฆ่าเชื้อโรคใช้โซเดียมไฮโปคลอไรท์ (NaOCl) กวนเร็วใช้ระบบกวนผสมในเส้นท่อ (Static Mixer) ส่วนกวนช้าและตกตะกอนด้วยถังตกตะกอนแบบโซลิด คอนแทคท์ (Solid contact) น้ำใสส่งไปกรองที่ถังกรองทราย ส่วนตะกอนถูกทำให้ข้นและรีดน้ำการเติมโพลีเมอร์ โดยใช้เครื่องรีดตะกอนแบบสายพานอัด (Belt press) แล้วนำไปกำจัดต่อไป



รูปที่ 2.3 ระบบผลิตน้ำประปา
ที่มา: ข้อมูลจากโรงงาน

2.1.5 ระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำ

กระบวนการผลิตและระบบหม้อไอน้ำต้องการน้ำที่มีความบริสุทธิ์มาก น้ำประปาจึงถูกนำมากำจัดอิมออนต่างๆ ที่ละลายในน้ำออก ผังทิศทางการไหลระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำ แสดงในรูปที่ 2.4 โดยกำลังการผลิตของระบบอยู่ที่ 200–220 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ส่วนประกอบของระบบมีดังนี้



รูปที่ 2.4 ผังทิศทางการไหลระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำ
ที่มา ข้อมูลจากโรงงาน

1) Activated carbon ทำหน้าที่หลักคือ การดูดซับคลอรีนออกจากน้ำประปา เพราะคลอรีนอาจทำให้เรซินเสียหายได้ เมื่อใช้ไประยะหนึ่งจะเกิดการอุดตันต้องทำการล้างย้อน (Back wash) กำจัดสิ่งอุดตันออกไป

2) Cation exchange resin ทำหน้าที่กำจัดไอออนประจุบวก (Cation) ที่ละลายในน้ำ เช่น แคลเซียม แมกนีเซียม โซเดียม เมื่อใช้ไประยะหนึ่งความจุเรซินจะเต็มแล้วไม่สามารถแลกเปลี่ยนประจุได้อีก จึงต้องทำการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration) ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เพื่อให้สามารถแลกเปลี่ยนประจุได้อีกครั้ง

3) Degasificaton ทำหน้าที่กำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ (มาจากกระบวนการกำจัดไอออนบวก) ออกจากน้ำ เพราะคาร์บอนไดออกไซด์จะละลายน้ำในรูปคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) ซึ่งจะทำให้ระบบกำจัดไอออนลบต้องรับภาระเพิ่มขึ้น

4) Anion exchange resin ทำหน้าที่กำจัดไอออนประจุลบ (Anion) ที่ละลายในน้ำ เช่น ไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) ซัลเฟต (SO_4) ซิลิกา และคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อใช้ไประยะหนึ่งความจุเรซินจะเต็มแล้วไม่สามารถแลกเปลี่ยนประจุได้อีก จึงต้องทำการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration) ด้วยเกลือแกง (NaCl) เพื่อให้สามารถแลกเปลี่ยนประจุได้อีกครั้ง

5) Mixed bed ทำหน้าที่กำจัดไอออนในน้ำที่หลุดออกมาจากรซินแลกเปลี่ยนบวกและลบ เพื่อให้มั่นใจว่าน้ำมีความบริสุทธิ์

2.1.6 ระบบหอหล่อเย็น

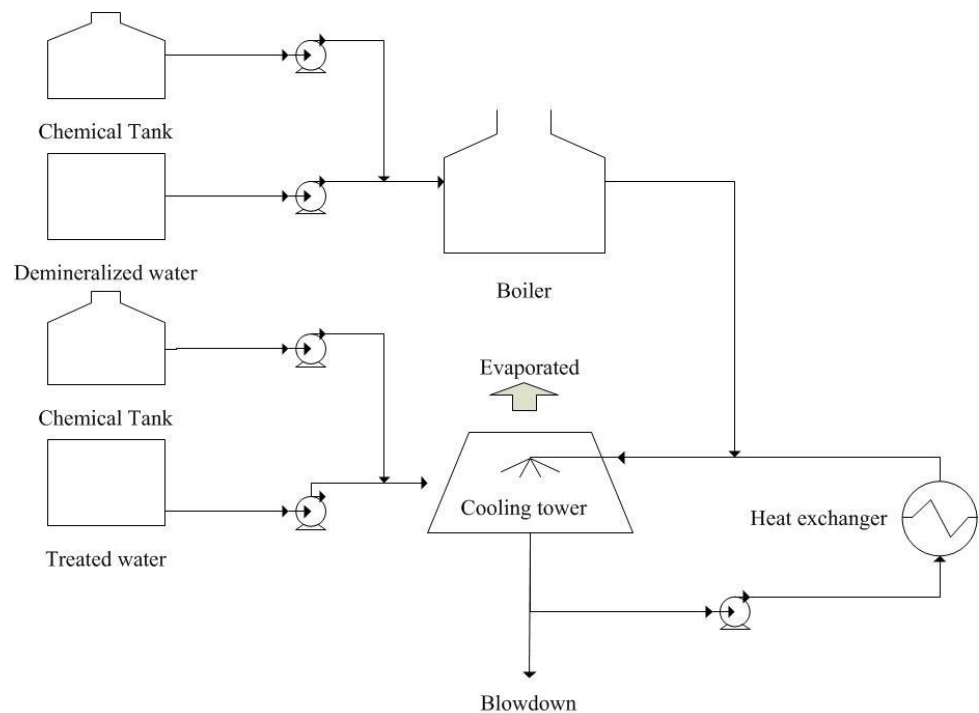
หอหล่อเย็นทำหน้าที่นำน้ำเย็นมาแลกเปลี่ยนความร้อนที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ปริมาณการใช้น้ำทดแทน (make up) อยู่ที่ประมาณ 700–800 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ซึ่งน้ำที่เข้ามาจาก 2 แหล่ง คือ น้ำประปา และไอน้ำควบแน่น (Condensate) จากหม้อไอน้ำ โดยน้ำที่สูญเสียหลักมาจากน้ำที่กลายเป็นไอ (Evaporation) และน้ำโบลด์าวน์ (Blowdown) เพื่อรักษาความเข้มข้นของสารละลายน้ำ โดยอุณหภูมิของน้ำหลังผ่านระบบหล่อเย็นประมาณ 30-32 องศาเซลเซียส จากน้ำร้อนที่เข้าระบบมีอุณหภูมิประมาณ 40-42 องศาเซลเซียส ผังทิศทางการไหลของระบบหล่อเย็นแสดงดังรูปที่ 2.5

1) การใช้สารเคมีในหอหล่อเย็น ในหอหล่อเย็นมักพบปัญหาที่พบ 3 ประเภท คือการกัดกร่อน การเกิดตะกอน และการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ สามารถแก้ไขปัญหเหล่านี้ได้ด้วยการเติมสารเคมี โดยสารเคมีที่ใช้แบ่งตามปัญหาที่เกิดขึ้น ดังนี้

ก. สารเคมีป้องกันการกัดกร่อน (Corrosion inhibitor) ใช้สารประกอบสังกะสี (Zinc) และฟอสเฟต (Phosphate) และควบคุมค่าพีเอชไว้ประมาณ 8.4

ข. สารเคมีป้องกันการเกิดตะกอน (Scale inhibitor) ใช้ Active polymer

ค. สารเคมีควบคุมการเจริญเติบโตของจุลชีพ (Biocide) ใช้โซเดียมไฮโปคลอไรท์ (NaOCl) และโบรมีน (Bromine)



รูปที่ 2.5 ผังทิศทางการไหลระบบหล่อเย็น

ที่มา: ข้อมูลจากโรงงาน

2) การควบคุมการโบล์ดาวน์ (Blowdown)

การแลกเปลี่ยนความร้อนในระบบหล่อเย็นทำให้น้ำระเหยกลายเป็นไอ ความเข้มข้นของไอออนในน้ำจึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นเพื่อควบคุมให้สมดุลความเข้มข้นของไอออนในน้ำหล่อเย็นอยู่ในสภาวะที่เหมาะสม จึงต้องโบล์ดาวน์เพื่อทิ้งน้ำที่ความเข้มข้นไอออนสูงออกไป แล้วเติมน้ำที่ความเข้มข้นไอออนต่ำกว่าเข้ามา ดังนั้นเพื่อให้เดินระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงต้องควบคุมความเข้มข้นของพารามิเตอร์ดังแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ควบคุมการโบล์ดาวน์

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่าควบคุม
แคลเซียม	มก./ล. ในหน่วยของแคลเซียม	150-200
ความกระด้างทั้งหมด	มก./ล. ในหน่วยของหินปูน	250-300
ซิลิกา	มก./ล.	80-100
คลอไรด์	มก./ล.	150-200

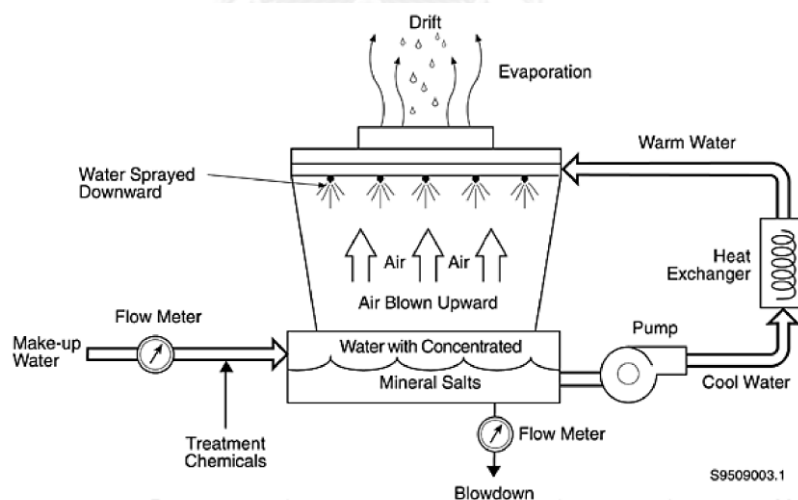
ที่มา: ข้อมูลจากโรงงาน

จากข้อมูลการใช้น้ำในกระบวนการต่างๆ ของโรงงานผลิตโอเลฟินส์พบว่าจากปริมาณน้ำประปาที่ผลิต 1,000-1,200 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ถูกนำไปใช้ในระบบหอหล่อเย็นถึง 700-800 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ระบบหอหล่อเย็นจึงเป็นกระบวนการที่ใช้น้ำมากที่สุดของโรงงาน อีกทั้งยังมีการใช้สารเคมีต่างๆ เพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำในระบบตลอดเวลา ซึ่งการใช้สารเคมีก็จะทำให้ของแข็งละลายน้ำในระบบสูงขึ้นไปด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้เลือกศึกษาความเป็นไปได้ในการลดสารเคมีในหอหล่อเย็น เนื่องจากเป็นหน่วยที่ใช้น้ำมากที่สุดของโรงงาน ซึ่งหากลดการใช้สารเคมีในส่วนนี้ได้ก็มีความเป็นไปได้ที่จะลดของแข็งละลายน้ำในโรงงานได้อย่างมีนัยสำคัญ

2.2 หอหล่อเย็น

น้ำเป็นตัวกลางที่นิยมใช้ในการระบายความร้อนมากที่สุด ในอุตสาหกรรมที่ต้องใช้ระบบระบายความร้อน เช่น เครื่องควบแน่นหรือเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอื่นๆ เครื่องอัดอากาศ เตาถลุงเหล็ก และระบบทำความเย็น เป็นต้น ในจำนวนตัวกลางที่ใช้ระบบบายความร้อน น้ำเป็นตัวกลางที่มีความนิยมมากที่สุด เนื่องจากหาได้ง่าย ราคาถูกกว่าตัวกลางชนิดอื่นและมีค่าความจุความร้อนสูง โดยค่าความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอ (Latent heat of evaporation) เท่ากับ 2,431 กิโลจูลต่อกิโลกรัม หรือ 1,000 บีทียูต่อปอนด์

2.2.1 หลักการทำงานของหอหล่อเย็น



รูปที่ 2.6 หลักการทำงานของหอหล่อเย็น

ที่มา: (Energy, 1995)

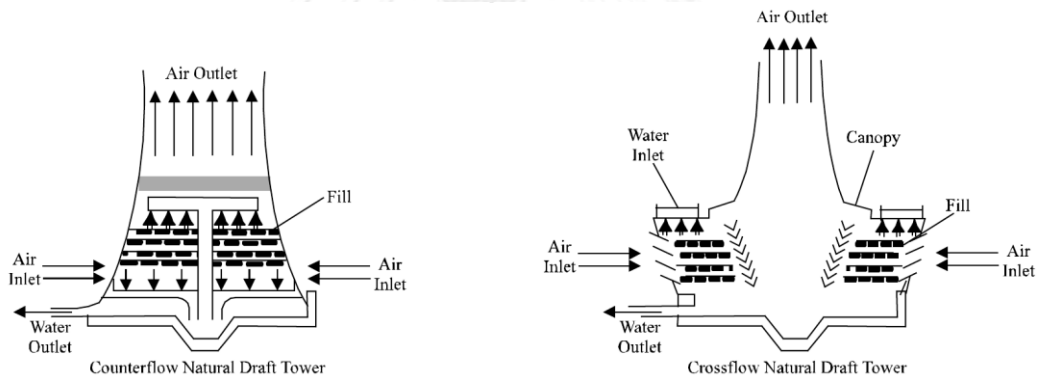
การทำงานของหอหล่อเย็นแสดงในรูปที่ 2.6 โดยการดึงน้ำเย็นมาผ่านตัวแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) เพื่อระบายความร้อนจากเครื่องจักร น้ำเย็นจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น กลายเป็นน้ำอุ่นแล้วถูกส่งกลับไปหอหล่อเย็น เพื่อนำมาฉีดยอกให้เป็นฝอยในทิศทางสวนทางกับอากาศที่เคลื่อนที่ขึ้น น้ำจะมีอุณหภูมิลดลงจากกระบวนการกลายเป็นไอ (Evaporation) แรงขับเคลื่อน

ที่ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนคือผลต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำร้อนและอุณหภูมิอากาศแวดล้อม แล้วน้ำเย็นก็จะถูกส่งไปแลกเปลี่ยนความร้อนหมุนเวียนอยู่ในระบบต่อไป (เอกชัย, 2552)

2.2.2 ชนิดของหอหล่อเย็น

1) หอหล่อเย็นแบบธรรมชาติ (Natural draft cooling tower)

หอหล่อเย็นแบบธรรมชาติ เป็นหอหล่อเย็นแบบเก่าที่สุดเป็นการระบายความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.7 หลักการทำงานคือการสูบน้ำร้อนขึ้นมาบนหอ และปล่อยผ่านหัวฉีด (Nozzle) ปล่อยให้ไหลลงมาที่ถังรองรับน้ำ (Basin) ด้านล่าง ส่วนที่ด้านข้างของหอนี้จะมีช่องลมที่บังคับให้ลมไหลผ่านหอน้ำมากที่สุด แล้วน้ำเย็นก็จะถูกส่งไปแลกเปลี่ยนความร้อนต่อไป ซึ่งต่อมาได้มีการติดตั้งตัวกลาง (Packing) เพื่อชะลอการไหลของน้ำ และเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างน้ำกับอากาศ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการระบายความร้อน และลดพื้นที่ของหอลงได้ โดยอัตราการสูญเสียน้ำเนื่องจากลมพัดมีค่าประมาณร้อยละ 0.2-1 ของอัตราน้ำหล่อเย็น อัตราสูญเสียน้ำเนื่องจากการกลายเป็นไอสูงถึงร้อยละ 0.85-1 ของอัตราน้ำหล่อเย็นต่อทุกๆ 10 องศาฟาเรนไฮต์ ($^{\circ}\text{F}$) ของอุณหภูมิที่ลดลง



รูปที่ 2.7 หอหล่อเย็นแบบธรรมชาติ (Natural draft cooling tower)

ที่มา (U.S.EPA, 1995)

2) หอหล่อเย็นแบบกล (Mechanical draft cooling tower)

หอหล่อเย็นแบบกล มีอัตราการระบายความร้อนสูงขึ้นกว่าหอหล่อเย็นแบบธรรมชาติ ทำให้มีขนาดเล็กลง การระบายความร้อนเกิดจากการกลายเป็นไอสูงถึงร้อยละ 85-95 ความร้อนที่เหลือเกิดจากการถ่ายเทความร้อนโดย Convection ให้กับอากาศโดยรอบ ดังนั้นอัตราการสูญเสียน้ำจากการกลายเป็นไอจะสูงถึงร้อยละ 0.85-1 ของอัตราน้ำหล่อเย็นต่อทุกๆ 10 องศาฟาเรนไฮต์ ของอุณหภูมิที่ลดลง โดยหอหล่อเย็นแบบกลแบ่งย่อยออกเป็น 2 แบบดังนี้

ก. แบบบังคับทางลม (Forced draft) ดังรูปที่ 2.8 เป็นแบบที่มีพัดลมที่ด้านล่างของหอบังคับให้ลมไหลสวนกับน้ำที่โปรยลงมาจากด้านบนทำให้บำรุงรักษาได้ง่าย



รูปที่ 2.8 หอหล่อเย็นแบบบังคับทางลม (Forced draft)

ที่มา: (Standford, 2003)

ข. แบบชักนำลม (Induced draft) ดังรูปที่ 2.9 และรูปที่ 2.10 มีพัดลมติดตั้งที่ด้านบนเพื่อเป่าลมออกภายนอก โดยน้ำจะไหลสวนกับทิศทางลม (Counter flow) ส่วนมากจะมีการติดตั้งตัวกลางที่เป็นพีวีซีเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส พบว่าตัวกลางขนาด 1 เมตร จะเท่ากับ 10 เมตรของหอหล่อเย็นที่ไม่มีตัวกลาง แต่ต้องระวังไม่ให้ตัวกลางนี้ถูกแสงแดด เพราะจะทำให้สาหร่ายเจริญเติบโตบนตัวกลาง ส่วนแบบน้ำไหลขวางทิศทางลม (Cross flow) อากาศจะไหลมาจากด้านข้างแล้วไหลขึ้นไปตามแนวตั้งด้วยพัดลม ส่วนน้ำจะจากด้านบนสวนกับอากาศลงมาด้านล่างโดยหอหล่อเย็นชนิดนี้นิยมใช้ในโรงเหล็ก



รูปที่ 2.9 หอหล่อเย็นแบบชักนำลม (Induced draft) แบบ Counter flow

ที่มา: (Standford, 2003)



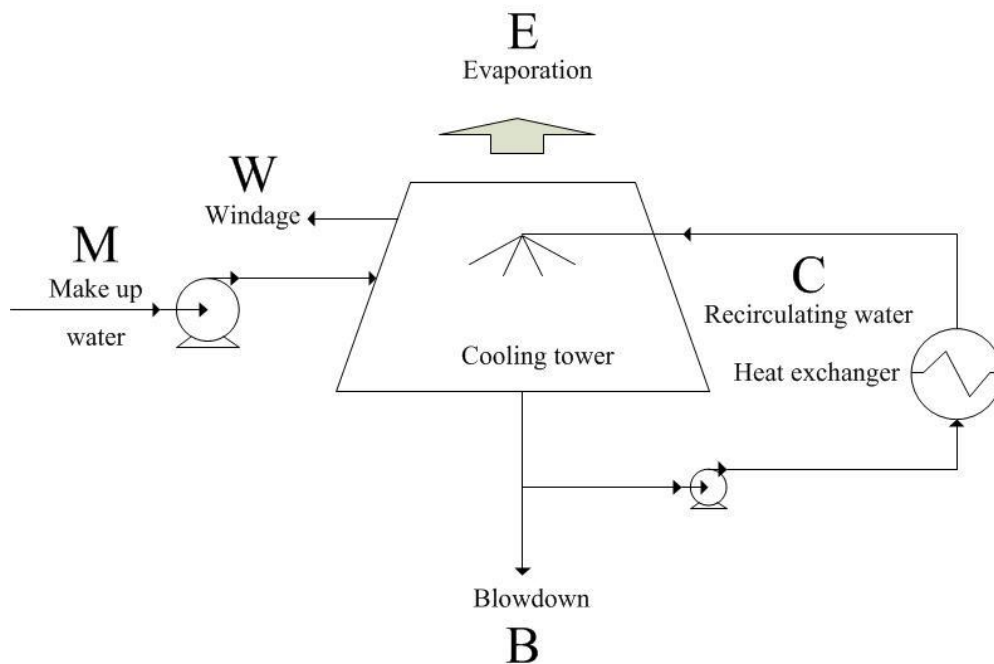
รูปที่ 2.10 หอหล่อเย็นแบบชักนำลม (Induced draft) แบบ Cross flow

ที่มา: (Standford, 2003)

2.2.3 สมดุลของระบบน้ำหล่อเย็น

น้ำในหอหล่อเย็นที่มีการหมุนเวียนแบบเปิด แบ่งออกเป็น 6 ชนิด ดังนี้ (มันสิน ตันกุลเวศม์, ไพพรรณ พรประภา และมันรัช ตันกุลเวศม์, 2554)

- 1) น้ำทดแทน (Make up water) คือน้ำที่ใช้เติมให้กับหอหล่อเย็น เพื่อทดแทนปริมาณน้ำที่สูญเสียไปของระบบ โดยทั่วไปอัตราการเติมน้ำทดแทนจะเท่ากับร้อยละ 6-10 ของอัตราการหมุนเวียนของน้ำหล่อเย็น
- 2) น้ำหล่อเย็น (Cooling water) คือน้ำที่หมุนเวียนอยู่ในระบบที่ใช้ในการระบายความร้อน
- 3) โบลว์ดาวน์หรือบลีดออฟ (Blowdown/bleed off) คือน้ำหล่อเย็นที่ระบายทิ้งเพื่อรักษาความเข้มข้นของน้ำหล่อเย็นไม่ให้สูงเกินไป ซึ่งเป็นน้ำทิ้งของระบบนั่นเอง
- 4) น้ำระเหย (Evaporation) คือน้ำหล่อเย็นที่ระเหยกลายเป็นไอในช่วงการระบายความร้อนออกจากหอหล่อเย็น
- 5) ละอองน้ำ (Drift) คือน้ำหล่อเย็นที่ถูกกระแสนลมพัดออกไปจากหอหล่อเย็นในรูปของละอองน้ำ โดยถือว่าน้ำส่วนนี้เป็นการโบลว์ดาวน์โดยไม่ตั้งใจ
- 6) น้ำดิบ คือแหล่งที่ใช้ผลิตน้ำทดแทน เช่น น้ำประปา น้ำผิวดินหรือน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว เป็นต้น



รูปที่ 2.11 สมดุลน้ำของระบบหล่อเย็น

สมดุลน้ำสายต่างๆ ของระบบหล่อเย็นแสดงในรูปที่ 2.11 จะเห็นได้ว่าน้ำเข้าระบบคือน้ำทดแทน ส่วนน้ำที่ออกจากระบบ คือ น้ำระเหย ละอองน้ำและน้ำโบลด์าวน์กำหนดให้

E = อัตราน้ำระเหย หน่วยเป็น ลูกบาศก์เมตร/วัน

B = อัตราโบลด์ทาวน์ หน่วยเป็น ลูกบาศก์เมตร/วัน

M = อัตราการเติมน้ำทดแทน หน่วยเป็น ลูกบาศก์เมตร/วัน

W = อัตราการสูญเสียน้ำที่เป็นละออง หน่วยเป็น ลูกบาศก์เมตร/วัน

C = อัตราการหมุนเวียนน้ำ หน่วยเป็น ลูกบาศก์เมตร/วัน

CC = วัฏจักรความเข้มข้น

น้ำที่เติมทดแทนจะเท่ากับน้ำที่สูญเสียไปจากการโบลด์ทาวน์ ละอองที่ถูกพัดพาไปและน้ำที่กลายเป็นไอ ดังนั้น

$$M = E+B+W \quad (2.1)$$

ในทางปฏิบัติอัตราการสูญเสียน้ำที่เป็นละออง (W) สำหรับหอหล่อเย็นแบบใหม่จะต่ำมาก เพื่อให้คำนวณได้ง่ายจึงสามารถตัดออกได้ การหาอัตราโบลด์ทาวน์หาได้ดังนี้

$$B = M/CC \quad (2.2)$$

$$\text{หรือ} \quad B = E/(CC-1) \quad (2.3)$$

2.2.4 วัฏจักรความเข้มข้น (Cycle of concentration)

หอหล่อเย็นที่มีการระบายความร้อน โดยน้ำเย็นถูกส่งไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ได้น้ำร้อนออกมาส่งไปที่หอหล่อเย็นเพื่อระบายความร้อนและถูกส่งกลับไปแลกเปลี่ยนความร้อนอย่างนี้ไปเรื่อยๆ ในช่วงที่น้ำระบายความร้อนให้อากาศจะเกิดการสูญเสียน้ำจากการระเหยกลายเป็นไอ ซึ่งไอน้ำที่ระเหยออกไปนั้นเป็นน้ำบริสุทธิ์ ดังนั้นความเข้มข้นของน้ำหล่อเย็นในระบบก็จะสูงขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้นวัฏจักรความเข้มข้น คืออัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของน้ำหล่อเย็นกับน้ำทดแทนเริ่มต้น หรือจำนวนรอบของความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นจากการใช้ระบายความร้อน แต่ไม่ใช่จำนวนรอบของการหมุนเวียนน้ำ วิธีการหาวัฏจักรความเข้มข้นสามารถหาได้โดยสมการดังนี้

$$\text{วัฏจักรความเข้มข้น} = \frac{\text{ความเข้มข้นของน้ำหล่อเย็น}}{\text{ความเข้มข้นของน้ำทดแทน}} \quad (2.4)$$

ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของวัฏจักรความเข้มข้นและน้ำทดแทนที่ลดได้

Initial concentration (CR _i)	New concentration (CR _n)										
	2	2.5	3	3.5	4	5	6	7	8	9	10
1.5	33%	44%	50%	53%	56%	58%	60%	61%	62%	62.5%	63%
2	-	17%	25%	30%	33%	38%	40%	42%	43%	43.8%	44%
2.5	-	-	10%	16%	20%	25%	28%	30%	31%	32.5%	33%
3	-	-	-	7%	11%	17%	20%	22%	24%	25%	26%
3.5	-	-	-	-	5%	11%	14%	17%	18%	20%	21%
4	-	-	-	-	-	6%	10%	13%	14%	16%	17%
5	-	-	-	-	-	-	4%	7%	9%	10%	11%
6	-	-	-	-	-	-	-	3%	5%	6%	7%
7	-	-	-	-	-	-	-	-	2%	4%	5%

ที่มา: (M Seneviratne, 2006)

ยกตัวอย่างเช่น การหล่อเย็นทำให้ค่าของแข็งละลายน้ำเพิ่มขึ้นจากเดิม 2.5 เท่า หมายถึงวัฏจักรความเข้มข้นเท่ากับ 2.5 เป็นต้น ดังนั้นหอหล่อเย็นที่มีวัฏจักรความเข้มข้นสูงขึ้นไปก็สามารถลดการใช้น้ำลงตามไปด้วย โดยความสัมพันธ์ของวัฏจักรความเข้มข้นและปริมาณน้ำที่ลดได้แสดงในตารางที่ 2.2

2.2.5 จุลินทรีย์ในหอหล่อเย็น

ระบบน้ำหล่อเย็นแบบเปิดมีการสัมผัสระหว่างน้ำกับอากาศภายนอกมีแสงแดดและธาตุอาหารต่างๆ ที่อยู่ในน้ำที่เติมเข้ามาหรือมาในรูปสารเคมีที่ใช้ในหอหล่อเย็น ทำให้มีเมือกหรือฟิล์มของจุลินทรีย์เกิดขึ้น โดยจุลินทรีย์ที่พบได้ทั่วไปได้แก่ แบคทีเรีย ฟังไจและสาหร่ายซึ่งสามารถควบคุมด้วยการเติมสารเคมีที่เป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์โดยเฉพาะ ซึ่งสารเคมีเหล่านี้เรียกรวมๆ ว่าไบโอไซด์ (Biocide) (มันสิน ตัณฑุลเวศม์ et al., 2554) จุลินทรีย์ที่ทั่วไปพบในหอหล่อเย็นตามที่รายงานในงานวิจัยต่างๆ มีดังนี้

(Christopher J. Nalepa & Terry M. Williams, 2010) และ (McCoy, 1980) แบคทีเรียเป็นจุลินทรีย์กลุ่มที่พบมากในหอหล่อเย็น มีทั้งแบบใช้อากาศและไม่ใช้อากาศ เช่น กลุ่มสร้างเมือก (*Pseudomonas Enterobacter Klebsiella* และ *Flavobacterium*) กลุ่มที่มีผลต่อสุขภาพ (*Legionella pneumophila*) กลุ่มรีดิวซ์ซัลเฟต (*Desulfovibrio* และ *Desfulomaculum*) กลุ่มรีดิวซ์เหล็ก (*Vibrio* และ *Shewanella*) กลุ่มสร้างกรด (*Thiobacillus Clostridium* และ *Enterobacter*) และกลุ่มเส้นใย (*Sphaerotolus* และ *Leptothrix*)

กลุ่มสิ่งมีชีวิตที่สังเคราะห์แสงได้ โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์และแสงแดดในการเจริญเติบโต ได้แก่ สาหร่ายสีเขียว (Green algae) ชนิดที่พบคือ *Chlorella Scenedesmus Chlorococcum Ulothrix* และ *Spirogyra* สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (Blue green algae) ชนิดที่พบคือ *Phormidium Anabaena Oscillatoria* และ *Anacystis* ซึ่งเป็นสาเหตุของเมือกที่อุดตันและเกาะติดผิวภายในหอหล่อเย็น

ปัญหาจากจุลินทรีย์ในหอหล่อเย็นมักมีปัญหาก็เกิดจากจุลินทรีย์ต่างๆ ซึ่งสามารถเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็วในหอหล่อเย็น ทั้งนี้เพราะสภาพแวดล้อมและมีตัวกลาง (คล้ายระบบ Trickle filter) ซึ่งเป็นที่อาศัยของจุลินทรีย์ได้เป็นอย่างดี จุลินทรีย์สามารถก่อให้เกิดปัญหาได้ทั้งการเกิดตะกอน การกัดกร่อน และฟาวลิง (Fouling) (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, ไพพรรณ พรประภา และ มันรักษ์ ตัณฑุลเวศม์, 2554)

1) ปัญหาที่เกิดจากสาหร่าย (Algae)

ปัญหาสาหร่ายในหอหล่อเย็นเป็นเรื่องที่เกิดขึ้นได้ง่าย เพราะสาหร่ายมีคลอโรฟิลล์ทำให้สามารถสังเคราะห์แสงเองได้ โดยมีวัตถุดิบเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และพลังงานจากแสงแดด เมื่อมีปริมาณมากขึ้นจะจับตัวกันเป็นแผ่นหรือเมือกคล้ายวุ้นอยู่บนโครงสร้างของหอหล่อเย็น หากปัญหานี้เกิดรุนแรง อาจขัดขวางการเคลื่อนที่ของอากาศและเป็นการเร่งให้เกิดสนิมกับวัสดุในหอหล่อเย็นได้

2) ปัญหาที่เกิดจากแบคทีเรีย (Bacteria)

แบคทีเรียอยู่ได้ทั่วไปในระบบหมุนเวียนน้ำทุกประเภท โดยในน้ำหมุนเวียนจะต้องมีแบคทีเรียอยู่ไม่มากนักน้อย แบคทีเรียที่สร้างปัญหาให้กับหอหล่อเย็น ได้แก่ แบคทีเรียแบบสร้างเมือก แบคทีเรียเหล็ก และซัลเฟตรีดิวซิงแบคทีเรีย แบคทีเรียเหล็ก (Iron bacteria) เป็นแบคทีเรีย

แบบใช้อากาศสามารถเปลี่ยนเหล็กเฟอร์รัส (Fe^{2+}) ให้เป็นเหล็กเฟอร์ริก (Fe^{3+}) ที่มีสีแดง เมื่อเจริญเติบโตในท่อหรือส่วนอื่นๆ ในหอหล่อเย็นจะเกิดเป็นเมือกหนาและเหนียว

แบคทีเรียแบบเมือก แบคทีเรียชนิดนี้จะเกาะติดอยู่บนผิวของวัสดุ ปัญหาที่เกิดจากแบคทีเรียแบบเมือกคือการเกิดฉนวนความร้อนกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน ทำให้เกิดการกัดกร่อนเป็นหลุม (Pitting) และขัดขวางการไหลของน้ำ

แบคทีเรียรีดิวซิงซัลเฟต (Sulfate reducing bacteria) เจริญเติบโตในสภาวะที่ไม่มีอากาศ จึงอาศัยรวมอยู่กับกลุ่มตะกอนที่ไม่มีการเคลื่อนไหว ปัญหาที่เกิดจากแบคทีเรียชนิดนี้คือการกัดกร่อน มาจากการเปลี่ยนซัลเฟตไปเป็นซัลไฟด์ ไฮโดรเจน และกรดซัลฟิวริก

2.2.6 สารเคมีควบคุมจุลินทรีย์ (Biocide) (Christopher J. Nalepa & Terry M. Williams, 2010)

ระบบน้ำหล่อเย็นแบบเปิดมีการสัมผัสระหว่างน้ำกับอากาศภายนอกทำให้มีเมือกหรือฟิล์มของจุลินทรีย์เกิดขึ้น โดยจุลินทรีย์ที่พบได้ทั่วไปได้แก่ แบคทีเรีย ราและสาหร่าย การควบคุมด้วยการเติมไบโอไซด์ซึ่งเป็นสารเคมีที่เป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์โดยเฉพาะ ไบโอไซด์แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือไบโอไซด์แบบออกซิไดซ์ (Oxidizing biocide) และไบโอไซด์แบบไม่ออกซิไดซ์ (Non oxidizing biocide) ซึ่งอาจให้ร่วมกันหรือใช้เพียงอย่างเดียวอย่างหนึ่ง ขึ้นอยู่กับชนิดของจุลินทรีย์หรือสภาพแวดล้อมของระบบ เช่น พีเอช อุณหภูมิ และเวลาสัมผัส เป็นต้น

1) ไบโอไซด์แบบออกซิไดซ์ (Oxidizing biocide)

ไบโอไซด์แบบออกซิไดซ์ มีคุณสมบัติการทำปฏิกิริยาที่รวดเร็วและรุนแรง ใช้ความเข้มข้นน้อย ทำให้ประหยัดสารเคมี อีกทั้งใช้ได้ผลดีในการควบคุมไบโอฟิล์ม แต่มีข้อเสียคืออาจทำให้เกิดการกัดกร่อนและไม่สามารถใช้ร่วมกับสารเคมี เช่น ฟอสฟอเนต เนื่องจากอาจทำปฏิกิริยากัน ตัวอย่างสารเคมีกลุ่มนี้ที่นิยมใช้กันทั่วไปมีดังต่อไปนี้

ก. สารประกอบคลอรีน (Chlorine base) การเติมเพื่อควบคุมจุลินทรีย์ ส่วนมากจะเติมให้ตกค้างประมาณ 0.2–1.0 พีพีเอ็ม (หนึ่งในล้านส่วน) สำหรับการเติมแบบต่อเนื่องหรือเติมแบบครั้งเดียวที่ความเข้มข้น 0.5–2.0 พีพีเอ็ม

ข. โบรไมน์ (Bromine) เมื่อเติมลงในน้ำจะอยู่ในรูปกรดไฮโดรโบรมัส (Hydrobromous) และไฮโดรเจนโบรไมด์ (Hydrogen bromide) เติมให้ตกค้างประมาณ 0.5–1.0 พีพีเอ็ม สำหรับการเติมแบบต่อเนื่องหรือเติมแบบครั้งเดียวที่ความเข้มข้น 1–4 พีพีเอ็ม

ค. คลอรีนไดออกไซด์ (Chlorine dioxide; ClO_2) เป็นแก๊สสีเหลืองอมเขียว มีกลิ่นฉุน มีอำนาจการออกซิไดซ์สูงกว่าคลอรีน 2.6 เท่า โดยปกติจะไม่ทำปฏิกิริยากับสารประกอบไนโตรเจนและสารอินทรีย์ สามารถใช้ได้กับพีเอชได้หลายช่วง เติมให้ตกค้างเพียง 0.1 พีพีเอ็ม สำหรับการเติมแบบต่อเนื่องหรือเติมแบบครั้งเดียวที่ความเข้มข้น 0.25–5 พีพีเอ็ม แต่คลอรีนไดออกไซด์จะสลายตัวได้ง่ายเมื่อมีแสงยูวี ทำให้มีการสูญเสียไปกับการระเหยของน้ำหล่อเย็น

ง. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide; H_2O_2) เป็นเหลวใสไม่มีสีที่มีการใช้อย่างกว้างขวางในการควบคุมจุลินทรีย์หรือป้องกันสิ่งสกปรกในหอหล่อเย็น โดยทั่วไปมีใช้ที่ความเข้มข้น 10–500 พีพีเอ็มในหน่วยของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สำหรับระบบที่มีสิ่งสกปรกมาก และใช้ 3–100 พีพีเอ็ม สำหรับการควบคุมจุลินทรีย์

จ. โอโซน (Ozone; O_3) เป็นแก๊สสีน้ำเงิน มีกลิ่นฉุน เนื่องจากมีอำนาจการปฏิกิริยาสูงจึงมีผลกระทบต่อสารเคมีชนิดอื่นได้ เช่น ฟอสฟอเนต และยังอาจกัดกร่อนอุปกรณ์ภายในหอหล่อเย็นได้ โดยทั่วไปเติมให้ตกค้างเพียง 0.05-0.2 พีพีเอ็ม ก็เพียงพอสำหรับการควบคุมจุลินทรีย์

2) ไบโอไซด์แบบไม่ออกซิไดซ์ (Non oxidizing biocide)

ไบโอไซด์แบบไม่ออกซิไดซ์ ส่วนมากอยู่ในรูปของของเหลว สามารถเก็บรักษาได้นานถึง 1 ปีหรือมากกว่า (หากเป็นแบบออกซิไดซ์จะไม่เกิน 6 เดือน) ทำปฏิกิริยาช้ากว่า แต่สามารถอยู่นานกว่าพบปัญหาการกัดกร่อนน้อยกว่า ข้อเสียคืออาจตกค้างไปกับน้ำทิ้ง ซึ่งเป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม และสามารถทำปฏิกิริยากับไบโอไซด์ที่มีประจุบวกได้

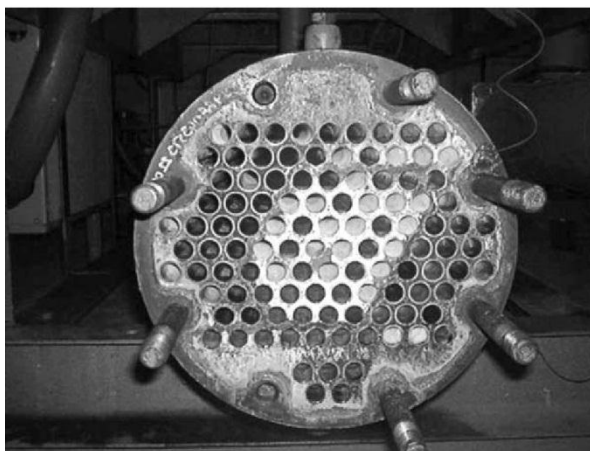
ก. อัลดีไฮด์ (Aldehydes) อยู่ในรูปของกลูตาอัลดีไฮด์ (Glutaraldehyde) ใช้กันอย่างแพร่หลายเพราะย่อยสลายง่ายและทำปฏิกิริยาได้เร็ว โดยเฉพาะกับซัลเฟตรีดิวซิงแบคทีเรีย (Sulfate reducing bacteria; SRB) รวมทั้ง *Legionella* ปกติมักใช้ที่ความเข้มข้น 20–100 พีพีเอ็ม สามารถใช้ได้ดีกับพีเอช ในช่วง 6.5-9.0 แต่จะถูกทำลายหากในน้ำมีแอมโมเนียและไพรมารี เอมีน (Primary amine)

ข. ออร์แกนโบรไมน์ (Organobromines) 2-Bromo-2-nitropropane-1,3-diol (BNPD) สามารถใช้ได้ดีกับแบคทีเรียแบบใช้อากาศและไม่ใช้อากาศ รวมทั้งซัลเฟตรีดิวซิงแบคทีเรีย มักใช้ที่ความเข้มข้น 20–100 พีพีเอ็ม ที่พีเอชต่ำกว่า 8.0 ส่วน 2,2-Dibromo-3-nitriopropionamide (DBNPA) เป็นไบโอไซด์ที่ทำปฏิกิริยาและย่อยสลายเร็ว ใช้ที่ความเข้มข้น 0.24–24 พีพีเอ็ม ถ้าพีเอชในน้ำสูงกว่า 8 จะสลายตัวเร็วขึ้น

ค. สารประกอบควอเตอรารี (Quaternary compound) สารเคมีในกลุ่มนี้ยกตัวอย่าง เช่น Alkyl ammonium quat ใช้ที่ความเข้มข้น 5–50 พีพีเอ็ม Tetrakis-hydroxymethyl-phosphonium sulfate (THPS) ใช้ที่ความเข้มข้น 20–100 พีพีเอ็ม Tributyltetradecyl-phosphonium chloride (TTPC) ใช้ที่ความเข้มข้น 5–30 พีพีเอ็ม และ polymeric quat ใช้ที่ความเข้มข้น 1.2–12 พีพีเอ็ม

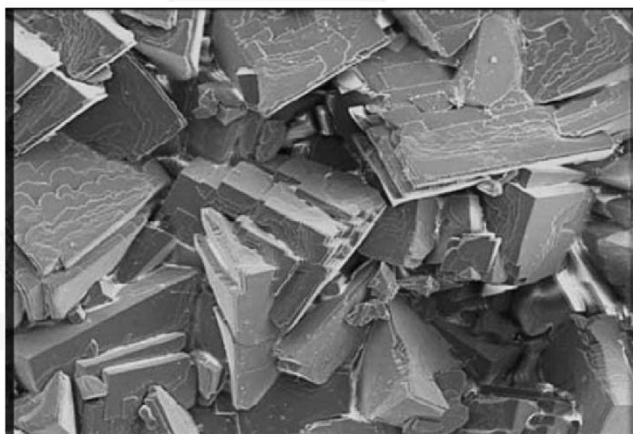
2.2.7 การเกิดตะกรัน

ตะกรันเกิดจากความเข้มข้นของสารในน้ำมีค่าสูงกว่าความสามารถในการละลายน้ำของมันเอง เมื่ออุณหภูมิที่สูงขึ้นความสามารถในการละลายน้ำก็จะลดลงไปด้วย ปัญหาสำคัญของการเกิดตะกรันคือการลดประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนดังรูปที่ 2.12 โดยตะกรันในระบบน้ำหล่อเย็นที่พบบ่อยคือ ตะกรันแคลเซียมคาร์บอเนต ตะกรันแคลเซียมฟอสเฟต ตะกรันแคลเซียมซัลเฟตและตะกรันที่เกิดจากซิลิกา



รูปที่ 2.12 การเกิดตะกรันของหินปูนที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน
ที่มา: (M Seneviratne, 2006)

1) แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ลักษณะผลึกแสดงในรูปที่ 2.13 เป็นปัญหาหลักของระบบหล่อเย็นเพราะแคลเซียม (Ca) และคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) เป็นไอออนที่พบทั่วไปในน้ำธรรมชาติ น้ำที่มีความกระด้างมากและอุณหภูมิสูงช่วยเร่งการเกิดตะกรัน ดังปฏิกิริยาเคมีดังนี้



รูปที่ 2.13 ผลึกของหินปูน (CaCO_3)
ที่มา: (M Seneviratne, 2006)

2) แคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) พบมากในรูปของยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ไม่เป็นปัญหามากเท่าแคลเซียมคาร์บอเนต เนื่องจากแคลเซียมซัลเฟตละลายน้ำได้มากกว่า 100 เท่าที่อุณหภูมิปกติ ดังนั้นในน้ำหล่อเย็นอาจพบซัลเฟตสูงแต่ไม่ทำให้เกิดตะกรัน

3) แคลเซียมอโรฟอสเฟต ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) ฟอสเฟตมักเป็นสารเคมีที่ใช้ในน้ำหล่อเย็น จึงอาจเกิดตะกรันแคลเซียมอโรฟอสเฟตได้ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การละลายน้ำ (K_{sp}) ต่ำ

4) สารประกอบซิลิเกตแม้ตะกอนแคลเซียมซิลิเกตและแมกนีเซียมซิลิเกตจะเกิดขึ้นยาก แต่หากเกิดแล้วไม่สามารถบำบัดได้ด้วยวิธีเคมีเพราะเป็นตะกอนที่แข็งมาก จึงควรควบคุมไม่ให้มีซิลิกาในน้ำหล่อเย็นเกิน 175 มก./ล. และผลคูณความเข้มข้นของแมกนีเซียมและซิลิกาไม่เกิน 35,000 ตะกอนซิลิเกตจะไม่เกิดขึ้น

2.2.8 ป้องกันการเกิดตะกอน

1) การเติมกรด

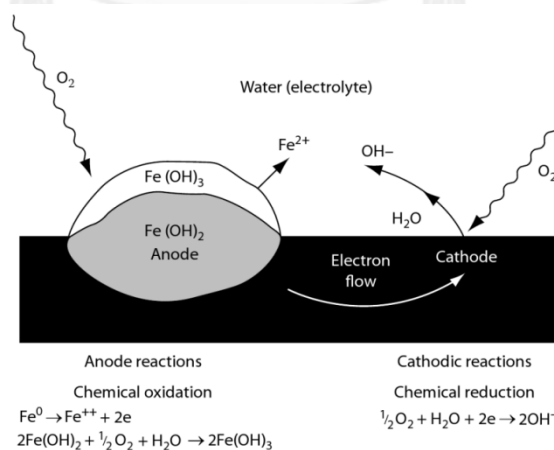
การเติมกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) หรือกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เป็นวิธีที่นิยมในการลดการเกิดตะกอนลัตพีเอซลงดังสมการซึ่งแคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) มีความสามารถในการละลายน้ำมากกว่าหินปูน 50 เท่า แต่อย่างไรก็ดีวิธีอาจทำให้เกิดตะกอนชนิดอื่นและปัญหาด้านความปลอดภัย



2) สารเคมียับยั้งการเกิดตะกอน

สารเคมีในกลุ่มนี้จะทำปฏิกิริยากับไมใช่แคลเซียมในน้ำจับตัวกันเป็นตะกอน เช่น EDTA NTA หรือยอมให้เกิดตะกอน แต่ทำให้ตะกอนน้ำไม่จับกับผิวโลหะซึ่งส่วนมากจะเป็นกลุ่มฟอสเฟตและโคโพลิเมอร์ เช่น aminomethyl phosphonate (AMP) หรือ polyacrylate เป็นต้น

2.2.9 การกัดกร่อน



รูปที่ 2.14 ปฏิกิริยาการกัดกร่อน

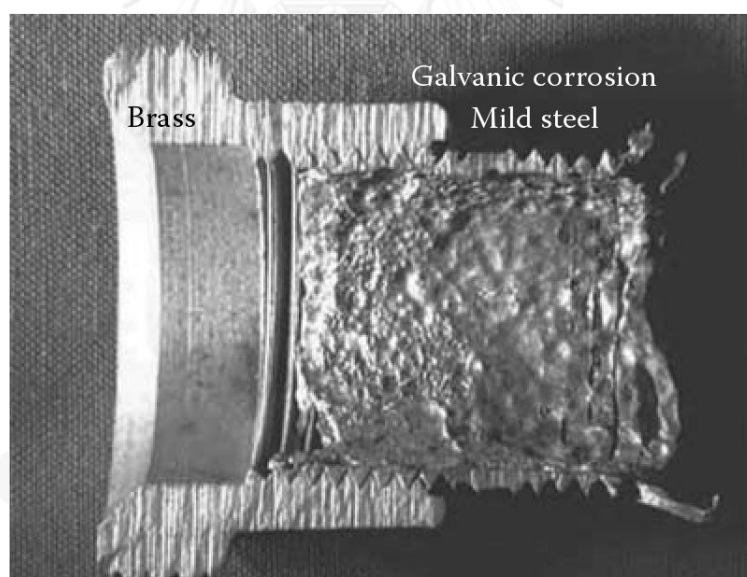
ที่มา: (Zahid Amjad, Robert W. Zuhl, & Strong Huang, 2010)

การกัดกร่อนเป็นการสลายตัวหรือสูญเสียเนื้อโลหะ ด้วยปฏิกิริยาทางเคมีหรือไฟฟ้าเคมี ซึ่งทำให้อุปกรณ์เสียหาย รูปที่ 2.14 แสดงการกัดกร่อนโดยมีขั้นตอน 4 ขั้นตอนดังนี้

1. ปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นที่ขั้วบวก เกิดการพุกร่อนของโลหะโดยการเปลี่ยนโลหะเป็นอิเล็กตรอนและไอออนบวก
2. การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนไปที่ขั้วลบ
3. ปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วลบเป็นการรับอิเล็กตรอนจากการพุกร่อน
4. การไหลของประจุไฟฟ้าจากขั้วลบไปขั้วบวกทำให้เซลล์ไฟฟ้าครบวงจร

โดยลักษณะการกัดกร่อนที่พบได้ทั่วไปในหอหล่อเย็น คือ การกัดกร่อนแบบกัลวานิก การกัดกร่อนแบบเป็นหลุมและการกัดกร่อนเนื่องจากแรงดัน

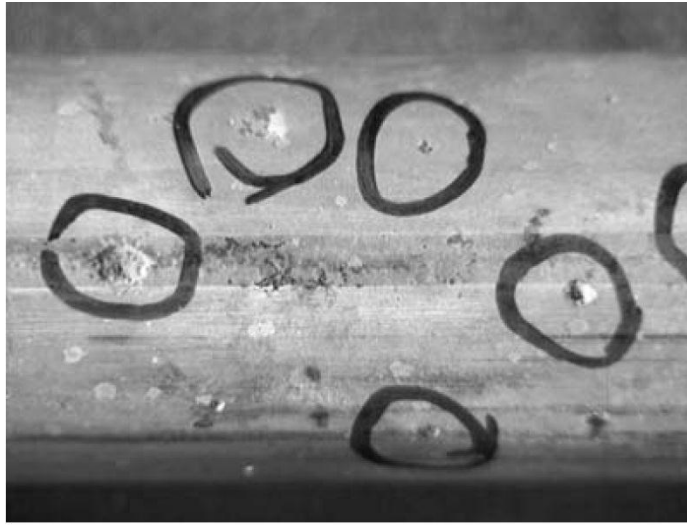
1) การกัดกร่อนแบบกัลวานิก (Galvanic Corrosion) เกิดในกรณีที่โลหะต่างชนิดเชื่อมต่อกันอยู่ในน้ำ เช่น ท่อเหล็กที่เชื่อมกับข้อต่อทองแดง ในลักษณะเช่นนี้ เหล็กจะเป็นขั้วบวก ส่วนทองแดงเป็นขั้วลบ ดังนั้นทองแดงจึงไม่ถูกกัดกร่อน ตัวอย่างการกัดกร่อนแบบกัลวานิกแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การกัดกร่อนแบบกัลวานิก

ที่มา: (Zahid Amjad et al., 2010)

2) การกัดกร่อนแบบเป็นหลุม (Pitting Corrosion) เกิดปริมาณความเข้มข้นของไอออนหรือออกซิเจนละลายในน้ำ ไม่เท่ากัน เช่น สังกะสีอยู่ในน้ำ แล้วการแตกตัวของไอออนในน้ำ ไม่เท่ากันทำให้เกิดเซลล์ไฟฟ้า จุดที่มีความเข้มข้นไอออนน้อยจะเกิดการกัดกร่อนตัวอย่างการกัดกร่อนแบบเป็นหลุมแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 การกัดกร่อนแบบเป็นหลุม
ที่มา: (Zahid Amjad et al., 2010)

3) การกัดกร่อนเนื่องจากแรงดัน (Stress Corrosion) เกิดจากการที่โลหะได้รับแรงกดดันจากภายนอก เช่น แรงดัน อุณหภูมิ ปริมาณคลอไรด์สูง ตัวอย่างการกัดกร่อนเนื่องจากแรงดัน แสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยคลอไรด์
ที่มา: (Zahid Amjad et al., 2010)

รูปที่ 2.18 เป็นการเปรียบเทียบการกัดกร่อนแบบต่างๆ โดยการใช้คูปอง (Coupon) วิเคราะห์การกัดกร่อน ตารางที่ 2.3 โดยแสดงค่าแนะนำของอัตราการกัดกร่อนของโลหะชนิดต่างๆ



รูปที่ 2.18 การเปรียบเทียบการกัดกร่อนแบบต่างๆ โดยการใช้คูปอง (Coupon)
ที่มา: (M Seneviratne, 2006)

ตารางที่ 2.3 ค่าแนะนำของอัตราการกัดกร่อนในโลหะชนิดต่างๆ

ชนิดโลหะ	อัตราการกัดกร่อน		หมายเหตุ
	ไมโครเมตร/ปี	10^{-3} นิ้ว/ปี	
เหล็กกล้า	0-50	0-2	อัตราการกัดกร่อนต่ำ
	50-75	2-3	อัตราการกัดกร่อนที่พบทั่วไปในระบบต่างๆ
	75-125	3-5	อัตราการกัดกร่อนปานกลาง
	>125	>5	อัตราการกัดกร่อนสูง
โลหะประกอบ	0-5	0-0.2	อัตราการกัดกร่อนที่พบทั่วไป
ทองแดง	5-12.5	0.2-0.5	อัตราการกัดกร่อนสูง
	>12.5	0.5	อัตราการกัดกร่อนสูงมาก
เหล็กกล้าไร้สนิม	0-25	0-1	อัตราการกัดกร่อนที่พบทั่วไป
	>25	1	อัตราการกัดกร่อนสูง

ที่มา: (M Seneviratne, 2006)

จากแก้ไขปัญหาจากการเดินระบบหล่อเย็นใช้สารเคมีเป็นหลัก โดยแบ่งปัญหาที่พบทั่วไปในหล่อเย็นคือ การเกิดตะกอน การกัดกร่อน และการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ สารเคมีที่ใช้คือ กลุ่มออร์โธสเฟต ฟอสเฟต และคลอรีน ตามลำดับ ซึ่งการใช้คลอรีนในการควบคุมการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์มีผลต่อการปริมาณการเพิ่มขึ้นของคลอไรด์ไอออน ซึ่งเป็นหนึ่งใน

อ็อกซิเจนในการบำบัดน้ำที่แสดงในตารางที่ 2.1 ดังนั้นหากสามารถใช้กระบวนการที่ลดและ/หรือไม่ใช้สารเคมีทดแทนการใช้คลอรีน ก็สามารถลดของแข็งละลายน้ำในน้ำลงได้และที่สำคัญทำให้มีความเป็นไปได้ที่จะสามารถเพิ่มรอบการใช้น้ำในระบบหล่อเย็นได้เนื่องจากสามารถลดปริมาณคลอรีนที่เป็นหนึ่งในอ็อกซิเจนที่ควบคุมการบำบัดน้ำ

โอโซนเป็นกระบวนการในการฆ่าเชื้อโรค ที่ใช้น้ำผลิตประปาและกระบวนการอื่นๆ โดยโอโซนมีประสิทธิภาพสูงกว่าคลอรีน อีกทั้งสามารถสลายตัวได้รวดเร็วไม่ตกค้างในระบบ ส่วนอัลตราโซนิกเป็นกระบวนการที่ใช้ในการทำมาความสะอาดชิ้นงานในอุตสาหกรรมทั่วไป มีข้อดีคือสามารถประยุกต์ใช้ในการควบคุมจุลินทรีย์ด้วยการใช้ทางกายภาพและเคมี งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้โอโซนและอัลตราโซนิกในการประยุกต์ใช้ทดแทนการใช้สารเคมีเพื่อควบคุมการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในหอหล่อเย็น

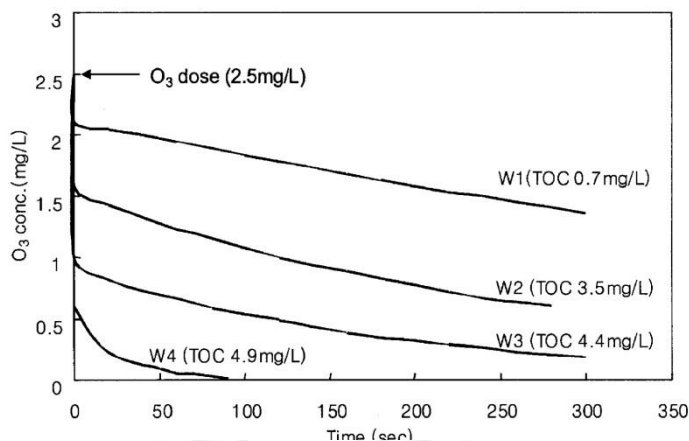
2.3 โอโซน

โอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง จึงมีการนำมาใช้ในระบบฆ่าเชื้อโรคอย่างแพร่หลาย โอโซนมีสูตรทางเคมีคือ O_3 จุดหลอมเหลวที่ -192.5 ± 4 องศาเซลเซียส จุดเดือดที่ -111.9 ± 0.3 องศาเซลเซียส (U.S.EPA, 1986) แก๊สโอโซนเป็นแก๊สที่ไม่คงตัว มีครึ่งชีวิต (Half life) ที่ตารางที่ 2.4 แสดงค่าครึ่งชีวิตของโอโซนที่อุณหภูมิต่างๆโดยจะสลายตัวเป็นออกซิเจนอย่างรวดเร็ว อุณหภูมิและสารละลายในน้ำเป็นตัวเร่งให้โอโซนสลายตัวเร็วขึ้น รูปที่ 2.19 แสดงการสลายตัวของโอโซนที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ในน้ำจากแม่น้ำต่างๆ ที่มีค่าพีเอช 7.2-7.5 ความกระด้าง 20-50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในหน่วยของหินปูน

ตารางที่ 2.4 ค่าครึ่งชีวิตของโอโซนที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิของน้ำ (องศาเซลเซียส)	ครึ่งชีวิตของโอโซนที่พีเอช 7 (นาที)
15	30
20	20
25	15
30	12
35	8
40	5

ที่มา: Rice (1981) อ้างถึงใน มั่นสิน ตันกุลเวศม์ (2554)



รูปที่ 2.19 การสลายตัวของโอโซนในแม่น้ำ

ที่มา: Park และคณะ (2000)

ตารางที่ 2.5 แสดงความสามารถของโอโซนในการออกซิไดซ์ได้สูงกว่าคลอรีนถึง 1.5 เท่า และสูงกว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ถึง 1.3 เท่า เนื่องจากอำนาจออกซิไดซ์สูงมากจึงสามารถออกซิไดซ์ (แย่งอิเล็กตรอน) จากสารต่างๆ เช่น อีออนต่างๆ ของสารอินทรีย์และจุลินทรีย์

ตารางที่ 2.5 ความสามารถในการออกซิไดซ์ของโอโซนกับสารออกซิแดนท์ต่างๆ

Compound	Oxidation potential (Volt)	Relative power of chlorine
Fluorine	3.06	2.25
Hydroxyl radical ($^{\circ}OH$)	2.80	2.05
Atomic oxygen	2.42	1.78
Ozone	2.07	1.52
Hydrogen peroxide	1.77	1.30
Perhydroxyl radical	1.70	1.25
Permanganate	1.67	1.23
Chlorine oxide	1.50	1.10
Hypochlorous acid	1.49	1.10
Chlorine	1.36	1.00
Bromine	1.09	0.80
Hydrogen peroxide	0.87	0.64
Iodine	0.64	0.40
Oxygen	0.40	0.29

ที่มา: (Lin & Yeh, 1993)

โอโซนเป็นสารฆ่าเชื้อโรคที่มีอำนาจสูงกว่าคลอรีนและสลายตัวได้ง่ายจึงไม่ตกค้างเป็นของแข็งละลายน้ำ ดังนั้นโอโซนจึงเป็นวิธีป้องกันและควบคุมการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ยังพบว่าโอโซนสามารถควบคุมปัญหาตะกรัน โดยการออกซิไดซ์ไบโอฟิล์มที่อยู่บนพื้นผิวของท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งทำให้การส่งถ่ายความร้อนได้ดีขึ้น

2.3.1 การผลิตโอโซน

การผลิตโอโซนด้วยไฟฟ้าแรงดันสูง (Corona discharge) การผลิตโอโซนโดยการส่งอากาศแห้งหรือออกซิเจนบริสุทธิ์ผ่านแท่งอิเล็กโทรด 2 แท่งที่มีความต่างศักย์ประมาณ 4,000–30,000 โวลต์ ซึ่งวางห่างกันเล็กน้อย เมื่อส่งไฟฟ้าแอมแปร์ต่ำแต่มีความต่างศักย์สูงจะเห็นแสงสีม่วงระหว่างขั้วอิเล็กโทรด ออกซิเจนจะเรียงตัวใหม่เป็นโอโซนดังสมการ



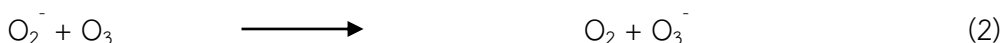
โดยความเข้มข้นของโอโซนที่ผลิตได้จากอากาศแห้งประมาณร้อยละ 1-2 (อากาศ 1 ลูกบาศก์เมตร ผลิตโอโซนได้ไม่เกิน 30 กรัม) แต่การใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์จะได้โอโซนที่มีความเข้มข้นประมาณร้อยละ 4-12 แต่ทั้งอากาศหรือออกซิเจนที่ใช้ต้องสะอาดและต้อง มีค่า Dew point -40 ถึง -80 องศาฟาเรนไฮต์ เพื่อป้องกันการกัดกร่อนอิเล็กโทรด

2.3.2 การสลายตัวของโอโซนในน้ำ (สุทธิรักษ์ 2546)

โอโซนเป็นแก๊สที่ไม่เสถียร โอโซนจะสลายตัวเป็นออกซิเจน โดยแตกตัวให้เรดิคัลต่างๆ ได้แก่ Hydroxyl radical ($^{\circ}\text{OH}$) HO_3 HO_4 และ Super oxide (O_2^-) เรดิคัลต่างๆ ที่เกิดขึ้นจะมีความว่องไวมากในการทำปฏิกิริยากับสารต่างๆ (Strong oxidant) Staehelin และคณะ (1984) ได้แสดงการย่อยสลายและการเปลี่ยนแปลงของโอโซนในน้ำเป็นดังนี้คือ ขั้นที่ 1 (Initiation step) ขั้นที่ 2-6 (Propagation steps) 1 ขั้นที่ 7 และ 8 (Break in chain reaction steps) ที่เป็นสาเหตุให้อิออนของไฮดรอกไซด์ เนื่องจากความเป็นต่างสูง มีกลไกดังสมการ

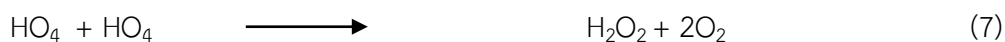


เมื่อได้ Superoxide radical ion (O_2^-) ซึ่งจะเป็นตัวเริ่มปฏิกิริยาสลายตัวของโอโซนในปฏิกิริยาลูกโซ่ต่อไป (propagation steps) ขั้น 2-6



ปฏิกิริยาดังกล่าวประกอบด้วยกลไกที่ต่อเนื่องกันเป็นลูกโซ่อันเนื่องมาจากไฮโดรเปอร์ออกซิลเรดิคัล (Hydroperoxyl radical; HO₂) จนหมดและไม่สร้างซูเปอร์ออกไซด์อออน (Superoxide ion; O₂⁻) ส่งผลให้โมเลกุลของโอโซนในน้ำมีความเสถียร เกิดเป็นขั้นหยุดปฏิกิริยาลูกโซ่ (Break chain reaction)

ขั้น 7-8



2.3.3 การทำลายจุลินทรีย์ของโอโซน

โอโซนจะเข้าทำลาย Cell envelope เอนไซม์ (Enzymes) และกรดนิวคลีอิก (Nucleic acid) ของจุลินทรีย์ (S., Moody, Jiang, & Chen, 1992.)

1) Cell envelopes และ Outer spore coat

โอโซนจะออกซิไดซ์พันธะคู่ของกรดไขมันอิ่มตัว ไกลโคโปรตีน (Glycoproteins) และไกลโคลิพิด (Glycolipid) ของ Cell envelopes ทำให้เซลล์เกิดการรั่ว สูญเสียการควบคุมการผ่านเข้าออกของสารต่างๆ ทำให้เซลล์แตกและตายอย่างรวดเร็ว งานวิจัยของ (Kradre & Yousef, 2001) พบว่าสารละลายแก๊สโอโซนทำให้ Outer spore coat ของ *Bacillus subtilis* แตกอย่างชัดเจน

2) เอนไซม์ (Enzymes)

การทำลายเอนไซม์เป็นกลไกสำคัญของโอโซน โดยโอโซนจะทำให้โปรตีนซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของเอนไซม์เสียสภาพ ไม่สามารถทำหน้าที่ได้ตามปกติ การทดลองของ (ศิริรักษ์, 2539) พบว่าโอโซนทำลายระบบเอนไซม์ Dehydrogenase ของเซลล์ *E. coli* ทำให้ระบบหายใจถูกระบบกวนและเซลล์ตายในที่สุด

3) Nucleic Material

โอโซนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของ DNA และ RNA หรือเกิดพันธะกับ RNA ทำให้การสังเคราะห์ DNA และ RNA ไม่สมบูรณ์ จากการทดลองใช้สารละลายโอโซนทำปฏิกิริยากับกรดนิวคลีอิก พบว่า Thymine มีความไวต่อโอโซนมากกว่า Cytosine และ Uracil จึงสันนิษฐานว่าโอโซนอาจทำลายกรดนิวคลีอิกได้

2.3.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการละลายน้ำของโอโซน (จิราภา, 2547)

งานวิจัยของ Kradre และ Yousef กล่าวถึงปัจจัยที่มีผลที่มีผลต่อการละลายน้ำของโอโซน ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของน้ำโอโซน (Kradre & Yousef, 2001) มีดังนี้

1) ความดันและอุณหภูมิ

การละลายของก๊าซในน้ำเป็นไปตามกฎของเฮนรี่ (Henry's law) ปริมาณแก๊สที่ละลายน้ำ ณ อุณหภูมิที่กำหนดเป็นไปตามอัตราส่วนของความดันและความสามารถในการละลายน้ำของโอโซน (Solubility ratio; Sr)

$$Sr = \frac{\text{โอโซนในน้ำ (มก./ล.)}}{\text{โอโซนในสถานะแก๊ส (มก./ล.)}}$$

ค่า Solubility ratio จะเพิ่มขึ้นหากอุณหภูมิลดลง โดยตารางที่ 2.6 แสดงความสามารถการละลายน้ำของโอโซนที่อุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ 2.6 ความสามารถในการละลายน้ำของโอโซนที่อุณหภูมิต่างๆ

Water temperature °C	Ozone concentration (ppm)		
	ATI sensor (Digital)	Hach-kit (Chemical)	Indigo-blue (Chemical)
0	1.61	NA*	1.64
5	1.35	1.35	1.41
10	1.19	1.15	1.21
15	0.64	0.65	0.64
20	0.52	0.50	0.53
25	0.46	0.50	0.53
30	0.38	0.35	0.39
35	0.14	0.15	0.14

ที่มา: (Chawla, 2006)

2) ขนาดของฟองอากาศ

การใช้ฟองอากาศโอโซน (bubbling O₃) การลดขนาดของฟองอากาศลงทำให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้น ดังนั้นโอโซนสามารถละลายน้ำได้มากขึ้น ซึ่งฟองที่เหมาะสมควรมีขนาดประมาณ 1-3 มิลลิเมตร

3) การกวนผสม

Schult (2000) พบว่าการกวนผสมมีผลต่อการละลายน้ำของโอโซนเป็นอย่างมาก ดังนั้นการออกแบบการกวนผสมจึงเป็นเรื่องที่ต้องให้ความสำคัญเพื่อให้โอโซนละลายน้ำได้ดีขึ้น (Schult, 2000)

4) ความบริสุทธิ์ของน้ำ

เนื่องจากสารอินทรีย์ในน้ำจะทำปฏิกิริยากับโอโซน ส่วนสารอนินทรีย์จะเร่งการสลายตัวของโอโซนทำให้โอโซนตกค้างในน้ำลดลง โดยตารางที่ 2.7 แสดงความต้องการโอโซนของสารต่างๆ ต่อตัวรีดิวซ์ 1 มก./ล.

ตารางที่ 2.7 ปริมาณโอโซนในการทำปฏิกิริยากับตัวรีดิวซ์ 1 มก./ล.

สารรีดิวซ์	หน่วย	ความต้องการโอโซน
เหล็ก	มก./มก.	0.14-0.5
แมงกานีส	มก./มก.	0.88
ซัลไฟด์	มก./มก.	2.2
สีธรรมชาติ	มก./มก.	0.1
กลีโคลและรอส	มก./มก.	0.05
ฟินอล	มก./มก.	2.0
TOC	มก./มก.	4.0
BOD	มก./มก.	2.0
COD	มก./มก.	2.0
แทนนิน	มก./มก.	1.5
ไนไตรต์	มก./มก.	2.0
ฆ่าเชื้อโรค	มก./ล	0.5

ที่มา: (มันสิน ตันกุลเวศม์, 2554)

5) ค่าพีเอช

ค่าพีเอชที่สูงจะทำให้อัตราการละลายน้ำของโอโซนลดลง ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคที่ค่าพีเอชสูงจะเกิดจากการสลายตัวของโอโซนเป็นอนุมูลต่างๆ เช่น ไฮดรอกซิลแรดิคัล เป็นต้น โดยการทดลองใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 0.01 M เป็นเวลา 15 วินาที ที่พีเอช 5-9 วัดความเข้มข้นด้วยวิธีอินดิโก (Indigo method) พบว่าที่พีเอช 5 โอโซนเสถียรมากที่สุด จากนั้นความเข้มข้นจะค่อยๆ ลดลงและไม่พบโอโซนในพีเอชบัฟเฟอร์ 9

2.3.5 ข้อดีและข้อเสียของการใช้โอโซน

โอโซนไม่เพียงแต่เป็นสารออกซิไดซ์ที่ดีเท่านั้น โอโซนยังถูกใช้ในการกำจัดเชื้อโรคที่มีประสิทธิภาพโดยไม่ต้องใช้สารเคมีใดๆ นอกจากนี้โอโซนยังถูกใช้ในจุดประสงค์ที่หลากหลาย เช่น การกำจัดสี การกำจัดกลิ่น การกำจัดรส การลดความขุ่น การกำจัดสารอินทรีย์ เป็นต้น ข้อดีและข้อเสียของโอโซนสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ข้อดีและข้อเสียของโอโซน

ข้อดี	ข้อเสีย
1) โอโซนมีความสามารถในการออกซิไดซ์มากกว่าคลอรีน และคลอรีนไดออกไซด์ใน การฆ่าเชื้อไวรัส แบคทีเรีย	1) ไอน้ำในอากาศจะรบกวนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ดังนั้นจึงควรทำให้แก๊สที่ป้อนเข้าเครื่องผลิตโอโซนปราศจากความชื้น
2) โอโซนสามารถออกซิไดซ์เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) และซัลไฟด์ (S^{2-}) ได้	2) การใช้งานโอโซนต้องทำการผลิตเพื่อนำมาใช้ในงานในทันที เนื่องจากโอโซนสลายตัวได้รวดเร็ว
3) โอโซนช่วยในการตกตะกอนและความขุ่นได้	3) โอโซนจะมีอัตราการสลายตัวเร็วขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น
4) โอโซนสามารถกำจัดสีและกลิ่นได้	4) เนื่องจากโอโซนเป็นสารที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์สูงมาก ดังนั้นโอโซนอาจออกซิไดซ์กับสารใดๆที่อยู่ในระบบ ดังนั้นในการเลือกใช้วัสดุจึงต้องเลือกวัสดุที่มีความสามารถทนต่อการถูกออกซิไดซ์ได้ดี
5) การสลายตัวของโอโซนจะกลายเป็นออกซิเจนไม่เพิ่มของแข็งละลายน้ำให้กับระบบ ทำให้สามารถเพิ่มวัฏจักรความเข้มข้นได้	5) โอโซนมีความเป็นพิษ จึงต้องให้ความสำคัญกับความปลอดภัยในการทำงาน
6) โอโซนสามารถลดการเกิดตะกอนในหล่อเย็น ทำให้ไม่ต้องหยุดระบบเพื่อกำจัดตะกอน	
7) โอโซนสามารถลดการกัดกร่อนได้ หากใช้ในอัตราส่วนที่เหมาะสม	

ที่มา: (สุทธิรักษ์ & 2546) และ (Chawla, 2006)

2.4 อัลตราโซนิก (Ultrasound)

คลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasound waves) (T. M. a. Mason & Peters, 2002) และเฉลิมเกียรติ บุญลือ (2556) คือพลังงานคลื่นเสียงที่ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ต ถึง 100 เมกะเฮิร์ต ซึ่งสูงกว่าความถี่คลื่นเสียงปกติที่มนุษย์ได้ยินการปล่อยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกจะทำให้เกิดคาวิเทชัน (Cavitation) ทำให้เกิดผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีโดยใช้คุณสมบัตินี้ในกระบวนการทำความสะอาดชิ้นงานและการควบคุมการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เป็นต้น

2.4.1 ประเภทของเครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic Reactor)

เครื่องอัลตราโซนิกที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในปัจจุบันมีความแตกต่างกันตรงที่การออกแบบแหล่งกำเนิดไฟฟ้า แหล่งกำเนิดคลื่นและตัวเครื่องหรือเซลล์ที่ใช้ร่วมกับแหล่งกำเนิดคลื่น โดยสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิด ดังนี้

1) อ่างอัลตราโซนิก (Ultrasonic Bath)

อัลตราโซนิกชนิดอ่างแสดงดังรูปที่ 2.20 เป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยจะมีทรานส์ดีวเซอร์ (อุปกรณ์กำเนิดคลื่นอัลตราโซนิก) ติดอยู่กับบริเวณฐานด้านล่างและความถี่ที่ใช้งานส่วนใหญ่ประมาณ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ สำหรับอ่างอัลตราโซนิกนั้นพลังงานสูงสุดที่สร้างได้จะอยู่บริเวณระดับความสูงระดับหนึ่งตลอดตามความลึกของอ่าง เนื่องจากการเกิดคลื่นจากการสะท้อนของคลื่นอัลตราโซนิกที่ถูกสร้างขึ้นตรงบริเวณรอยต่อระหว่างอากาศและของเหลว ซึ่งแยกโดยระยะทางที่เทียบเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นเสียงของของเหลวภายในอ่าง สำหรับน้ำ มีค่า $\lambda = 37$ มิลลิเมตรที่ความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ ดังนั้นถ้าระดับน้ำในอ่างลดลงต่ำกว่าค่า λ จะมีผลทำให้ไม่สามารถทำให้เกิดคลื่นเสียงที่มีพลังงานสูงได้



รูปที่ 2.20 อัลตราโซนิกแบบอ่าง

ที่มา: <http://www.google.co.th>

อ่างอัลตราโซนิกแบบคัพฮอร์น (Cup Horn) แสดงในรูปที่ 2.21 ซึ่งเป็นการรวมเอาข้อดีของอัลตราโซนิกแบบอ่างและแบบโพรบมารวมกันคือสามารถปรับเปลี่ยนกำลังได้และไม่ทำให้โลหะเสียหายเนื่องจากการทำปฏิกิริยา คัพฮอร์นจะถูกออกแบบให้มีรูตรงกึ่งกลางให้มีการไหลเวียนของสารทำความเย็นเพื่อควบคุมอุณหภูมิในระบบข้อเสียดังกล่าวของถังปฏิกิริยาที่ใช้จะถูกจำกัดด้วยขนาดคัพ



รูปที่ 2.21 อ่างอัลตราโซนิกแบบคัพฮอร์น (Cup Horn)

ที่มา: <http://www.google.co.th>

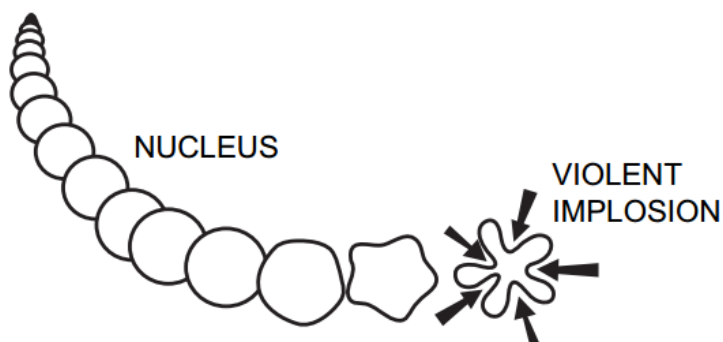
3) ระบบอัลตราโซนิกแบบโพรบ (Ultrasonic Probe Systems)

ในการขยายพลังงานหรือคลื่นเสียงที่เกิดจากทรานส์ดีวเซอร์ ปกติทั่วไปจะนำทรานส์ดีวเซอร์มาต่อเข้ากับอุปกรณ์ที่เรียกว่าฮอร์น (Horn) โดยฮอร์นส่วนใหญ่จะให้ขนาดของความยาวคลื่นครึ่งหนึ่งหรือเป็นพหุคูณกับความยาวของคลื่นเสียงของวัสดุที่นำมาผลิตระบบอัลตราโซนิกแสดงในรูปที่ 2.22 แอมพลิฟิเคชันที่ถูกรสร้างขึ้นจากระบบนี้จะขึ้นอยู่กับรูปร่างของฮอร์น สำหรับฮอร์นที่มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอก (Uniform cylinder) นั้นแอมพลิฟิเคชันจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ฮอร์นจะทำหน้าที่ขยายหรือเพิ่มการส่งถ่ายพลังงานเสียง ขนาดความยาวคลื่นที่ได้จากตัวขยาย (Amplifier) สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางของผิวหน้าตัดของฮอร์นระหว่าง 2 พื้นผิวที่คือ Driven Face (D) และ Emitting Face (d) แต่เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงความเสียหายจากความเค้นภายในตัววัสดุ (Internal stress) อัตราส่วนระหว่าง D/d จะต้องไม่สูงเกินไป ในทางปฏิบัติขนาดของพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากแหล่งกำเนิดพลังงานนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญสองส่วน ได้แก่ คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการผลิตทรานส์ดีวเซอร์นั้น นิยมใช้วัสดุที่สามารถยืดหยุ่นและกลับคืนตัวได้ดี เช่น ไทเทเนียม (Titanium) ซึ่งมีความทนต่อการล้าเนื่องมาจากแรงกล จึงใช้ไทเทเนียมในการผลิตฮอร์นแทน สำหรับพื้นผิวที่ปลดปล่อยคลื่นนั้น พบว่าพื้นที่ขนาดเล็กจะให้ประสิทธิภาพสูงกว่า แต่แอมพลิฟิเคชันที่สูงจะทำให้เกิดฟองอากาศขึ้นที่บริเวณพื้นผิวหน้าจากปฏิกิริยาควาวิเทชันซึ่งจะรบกวนการส่งต่อพลังงานไปยังของเหลวตัวกลาง



รูปที่ 2.22 ระบบอัลตราโซนิกแบบโพรบ
ที่มา : <http://www.google.co.th>

2.4.2 คาวิเทชัน (Cavitation)



รูปที่ 2.23 การเกิดฟองอากาศคาวิเทชัน
ที่มา: (Awad & Nagarajan, 2010)

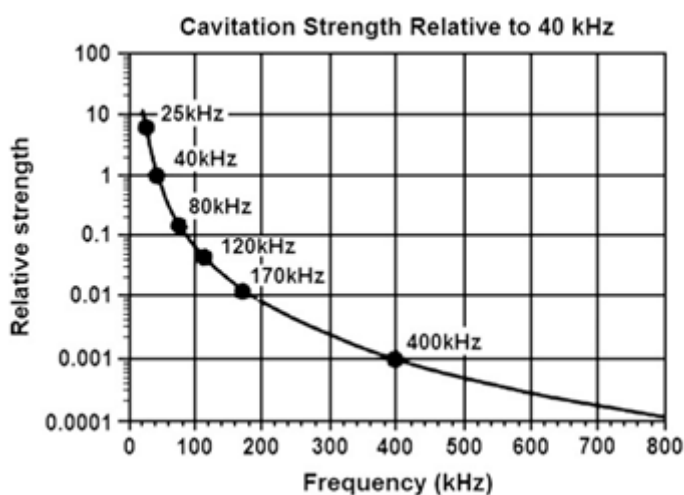
ปรากฏการณ์คาวิเทชันเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในตัวกลางหรือสารละลายที่ได้รับคลื่นอัลตราโซนิก โดยทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านเคมีและกายภาพ จากการเกิดแก๊สซึ่งการที่ฟองแก๊สเกิดขึ้น เมื่อโครงสร้างของของเหลวที่ได้รับคลื่นอัลตราโซนิกซึ่งมีทั้งการบีบอัด (Compress) และคลายตัว (Rarefaction) ทำให้ของเหลวแตกตัวและเกิดช่องว่างแล้วก่อตัวเป็นฟองอากาศคาวิเทชันขึ้นดังรูปที่ 2.23 การเกิดคาวิเทชันจะมีอย่างน้อย 3 ขั้นตอน คือ การเกิดฟองอากาศ (Nucleation) การขยายตัวของฟองอากาศ (growth) และการแตกตัวของฟองอากาศ (Violent collapse or implosion) โดยฟองอากาศจะมีขนาดประมาณ 50-150 ไมโครเมตร ที่อัลตราโซนิก 20 กิโลเฮิร์ต (Awad & Nagarajan, 2010)

2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดฟองอากาศควิเทชั่น

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดฟองอากาศประกอบด้วยความถี่ ความเข้ม ความหนืดของสารละลาย แรงตึงผิวของสารละลาย ความดันไอของสารละลายและอุณหภูมิ

1) ความถี่ (Frequency)

เมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่ทำให้ความยาวของช่วงบีบอัดและคลายตัวของคลื่นจะมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยโดยที่ความถี่ต่ำช่วงบีบอัดและคลายตัวของคลื่นจะยาว ทำให้เพื่อทำให้เกิดควิเทชั่นในน้ำได้ดี แต่ที่เมื่อความถี่สูง (ระดับเมกะเฮิรตซ์) ช่วงบีบอัดและคลายตัวของคลื่นจะสั้นมาก จึงเป็นการยากที่จะทำให้เกิดควิเทชั่น โดยรูปที่ 2.24 แสดงความแข็งแรงของควิเทชั่นเปรียบเทียบกับความถี่ (Awad & Nagarajan, 2010)



รูปที่ 2.24 แสดงความแข็งแรงของควิเทชั่นเปรียบเทียบกับความถี่

ที่มา: (Awad & Nagarajan, 2010)

2) ความเข้ม (Intensity)

ความเข้มของพลังงานต้องมีมากกว่าค่าพลังงานต่ำสุดในการเกิดควิเทชั่น โดยที่ความถี่ต่ำต้องการควิเทชั่นน้อยกว่าที่ความถี่สูง ซึ่งที่ความถี่ 20-40 กิโลเฮิรต ในน้ำที่อุณหภูมิห้องอากาศต้องการความเข้มของพลังงานเท่ากับ 0.3-1 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

3) ความหนืดของสารละลาย (Solvent Viscosity)

ในสารละลายที่มีความหนืดสูง จะทำให้การเกิดฟองอากาศควิเทชั่นจะเกิดได้ยากขึ้นเนื่องจากต้องใช้แรงจำนวนมาก

4) แรงตึงผิวหน้าของสารละลาย (Solvent Surface Tension)

สารละลายที่มีแรงตึงผิวต่ำสามารถลดค่าพลังงานต่ำสุดในการเกิดคาวีเทชันลดลง ดังนั้นฟองอากาศคาวีเทชันจะเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าสารละลายที่มีแรงตึงผิวสูง

5) ความดันไอของสารละลาย (Solvent Vapour Pressure)

สารที่มีความดันไอสูงจะทำให้เกิดคาวีเทชันได้ง่ายกว่าสารที่มีความดันไอต่ำ เนื่องจากในช่วงขยายของการเกิดคาวีเทชัน ไอของของเหลวที่มีความดันไอต่ำจะผ่านเข้าไปในโพรงคาวีเทชันได้ แต่ระบบต้องการพลังงานที่ได้จากการแตกตัวของคาวีเทชัน ซึ่งในของเหลวที่มีความดันไอสูงจะเกิดไอระเหยผ่านเข้าไปในโพรงคาวีเทชันเกิดได้ดีกว่า แต่การแตกตัวของคาวีเทชันให้พลังงานน้อยกว่า

6) อุณหภูมิ (Temperature)

เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความดันไอมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนความหนืด แรงตึงผิวและค่าพลังงานต่ำสุดในการเกิดคาวีเทชันลดลง ทำให้การเกิดคาวีเทชันง่ายขึ้น แต่พลังงานลดลง ซึ่งเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นใกล้จุดเดือด จะเกิดฟองคาวีเทชันจำนวนมาก โดยฟองจะขัดขวางการถ่ายทอดพลังงานจากแหล่งกำเนิดอัลตราโซนิกไปสู่ของเหลว

2.4.4 ปฏิริยาเคมีที่เกิดจากคลื่นอัลตราโซนิก

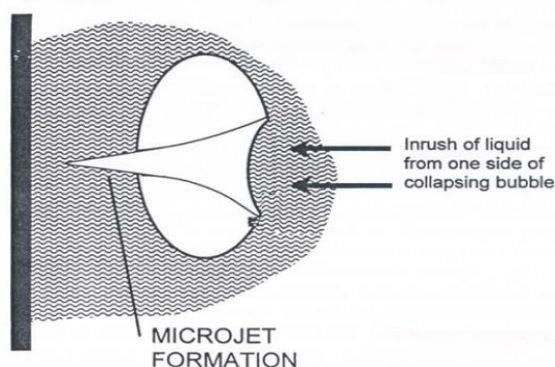
ปฏิริยาที่เกิดจากคลื่นอัลตราโซนิกแบ่งเป็น 2 ปฏิริยา คือ ปฏิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างของเหลวกับของเหลวซึ่งทำให้เกิดคาวีเทชันและปฏิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างผิวของแข็งกับของเหลวซึ่งทำให้เกิดลิควิดเจต (Liquid Jet) โดยมีรายละเอียดของปฏิริยาดังต่อไปนี้

1) ปฏิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างของเหลวกับของเหลว

เมื่อทำการปล่อยคลื่นอัลตราโซนิกจะทำให้เกิดฟองอากาศคาวีเทชันขึ้นในระบบ โดยกลไกทางเคมีที่เกิดขึ้นในของเหลวจะเกิดขึ้นหลังจากเกิดการยุบตัวหรือแตกตัวของฟองก๊าซ เมื่อฟองก๊าซแตกตัวจะทำให้เกิดแรงดันสูง ทำให้โมเลกุลของน้ำแตกตัวเป็น ไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH^\cdot) และไฮโดรเจนเรดิคัล (H^\cdot) เป็นตัวออกซิไดซ์ที่ดี หลังการแตกตัวของฟองอากาศคาวีเทชัน ไฮดรอกซิลเรดิคัลจะเกิดปฏิริยาทางเคมีกับน้ำได้เป็นผลิตภัณฑ์คือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen Peroxide, H_2O_2) ซึ่งตัวออกซิไดซ์เหล่านี้สามารถช่วยในการสลายตัวของสารอินทรีย์ในน้ำ และแรงเฉือนหรือแรงดันที่เกิดขึ้นจากการยุบตัวของฟองอากาศยังสามารถทำลายพันธะเคมีของสารปนเปื้อนในน้ำได้

2) ปฏิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างผิวของแข็งกับของเหลว

ปฏิริยาที่เกิดขึ้นจะคล้ายกับปฏิริยาที่เกิดระหว่างของเหลวกับของเหลวแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย คือในกรณีที่ฟองคาวีเทชันเกิดการยุบตัวหรือแตกตัวบริเวณข้างๆ ผิวของของแข็งที่กั้นระหว่างของเหลว เมื่อฟองอากาศคาวีเทชันยุบตัวจะทำให้เกิดลิควิดเจต (Liquid Jet) ดังรูปที่ 2.25 ลักษณะเป็นของเหลวที่พุ่งอย่างรวดเร็ว มีความเร็วมากกว่า 100 เมตรต่อวินาที บริเวณผิวของของแข็งจะเกิดความดันสูง ทำให้อัลตราโซนิกสามารถใช้ในการทำสะอาดได้ดี



รูปที่ 2.25 การแตกของฟองอากาศในสารละลายที่ได้รับคลื่นอัลตราโซนิก
ที่มา: (T. J. Mason, 1999)

2.4.5 การประยุกต์ใช้อัลตราโซนิก

อัลตราโซนิกทำให้เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันที่เป็นคุณลักษณะทางกายภาพ จากนั้นฟองอากาศคาวิเทชันจะทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี โดยโมเลกุลของน้ำแตกตัวเป็นไฮดรอกซิล แรดิคัล ไฮโดรเจนแรดิคัล และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ในงานวิจัยนี้จะเน้นการประยุกต์ใช้คุณสมบัติทางกายภาพของอัลตราโซนิกเป็นหลัก ซึ่งเป็นการใช้ปรากฏการณ์คาวิเทชันในการทำให้เซลล์ของสาหร่ายอ่อนแอและทำลายแก๊สแควคิวโอล (Gas vacuole) โดยใช้แรงเฉือนทำให้เซลล์สาหร่ายแตกตะกอนได้ (Walsby, 1992) ทั้งนี้ยังพบว่าการใช้อัลตราโซนิกสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของไซยาโนแบคทีเรีย (Cyanobacteria) โดยลดปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ทำให้ระบบการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายเสียหาย (Zhang, Zhang, Liu, & Wang, 2006b)

2.5 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

U.S.Department of Energy (1995) การทดลองใช้อิออนกับหอหล่อเย็นขนาด 10,000 ตัน (35,000 กิโลวัตต์) ใช้น้ำวันละ 553,000 ลิตร/วัน อัตราการโบว์ดาวน์ 254,000 ลิตร/วัน น้ำหมุนเวียนในระบบ 28,400 ลิตร/นาที่ อุณหภูมิน้ำร้อนและน้ำเย็นเท่ากับ 43.3 และ 32.2 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่าหลังจากใช้อิออนสามารถลดการใช้น้ำจาก 53,290,000 เป็น 35,690,000 แกลลอน/ปี และยังพบว่าลดการเติมสารเคมีและน้ำโบว์ดาวน์ได้ (Energy, 1995)

Viera และคณะ (1999) ทดลองใช้อิออนในห้องปฏิบัติการ โดยใช้น้ำหล่อเย็นสังเคราะห์ที่มี แคลเซียม โซเดียม แมกนีเซียม คลอไรด์ และซัลเฟต เท่ากับ 25 40 14 105 และ 53 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับโดยการใช้แบคทีเรีย *Pseudomonas fluorescent* และซัลเฟตรีดิวซิงแบคทีเรีย (Sulphate reducing bacteria; SRB) ผลการทดลองพบว่าอิออนที่ความเข้มข้น 0.1 และ 0.3 พีพีเอ็ม ที่เวลาสัมผัส 15 และ 30 นาที สามารถกำจัด *Pseudomonas fluorescent* ที่ความเข้มข้น 10^7 ซีเอฟยู/มิลลิลิตร ได้แต่ประสิทธิภาพในการกำจัดไบโอฟิล์มของ *Pseudomonas fluorescent*

และ SRB ได้เพียง 100 เท่า เท่านั้นแม้จะเพิ่มเวลาสัมผัสเป็น 60 นาทีปริมาณแบคทีเรียในไบโอฟิล์มก็ลดลงเพียง 10 เท่า โดยมีความเป็นไปได้ที่โอโซนมีประสิทธิภาพลดลงเมื่อใช้กับไบโอฟิล์มเป็น 3 ข้อ ดังนี้ 1) การออกซิไดซ์ที่สูงของโอโซนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและองค์ประกอบของ Exopolysaccharidic substance (EPS) 2) เกิดการอุดตันที่ชั้นในของไบโอฟิล์มจากการออกซิไดซ์ของโอโซน และ 3) ความหนาแน่นของจุลินทรีย์ภายในไบโอฟิล์มสูงจึงมีความต้านทานโอโซนมากกว่า (Viera, Guimet, De Mele, & Videla, 1999)

Mayer (2001) ทำการทดลองใช้โอโซนที่มีกำลังผลิต 10 กรัม/ชั่วโมง กับหอยหล่อเย็นขนาด 100 ตัน โดยนำน้ำจากในบ่อพัก มาสัมผัสกับโอโซนที่ความเข้มข้น 0.28 ถึง 0.60 มิลลิกรัม/ลิตร (วิเคราะห์ด้วยวิธีอินดิโก) ในท่อที่มีการกวนผสมด้วยการปล่อยให้ไหลผ่านท่อพีวีซีที่มีช่องอ 90 องศา แล้วส่งน้ำขึ้นไปพ่นลงมาจากด้านบนให้สัมผัสกับอากาศ เพื่อเป็นการกำจัดโอโซนที่ตกค้างออกไม่ให้เกิดการกัดกร่อนกับวัสดุในหอยหล่อเย็น ผลการทดลองวิเคราะห์จำนวนจุลินทรีย์ด้วยวิธี Plate count พบว่าที่เวลาเริ่มต้นเท่ากับ 720 ซีเอฟยู/มิลลิลิตร และเมื่อผ่านการสัมผัสโอโซนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง มีจำนวนจุลินทรีย์มีค่าน้อยมากจนไม่สามารถวัดได้ ส่วนการวิเคราะห์อัตราการกัดกร่อนด้วยทองแดง เหล็กชุบสังกะสีและเหล็กคาร์บอนต่ำ มีค่าเท่ากับ 0.0003565 0.0019876 และ 0.002905 นิ้ว/ปี (W. C. Mayer, 2001)

Bott (2004) ทำการทดลองใช้โอโซนร่วมกับอัลตราโซนิกเพื่อลดไบโอฟิล์มที่มาจาก *Pseudomonas fluorescens* ซึ่งเป็นแบคทีเรียแบบสร้างเมือกที่พบได้ทั่วไปในหอยหล่อเย็น การทดลองใช้แก้วทรงกระบอกทั้งหมด 6 กระบอกติดตั้งอัลตราโซนิกความถี่ 20 กิโลเฮิร์ต 2 กระบอก ใช้น้ำประปาที่ผ่านการกรองแล้วและควบคุมพีเอชไว้ที่ 7 ผลการทดลองโดยใช้อัลตราโซนิกอย่างเดียว เปิดวันละ 3 ครั้งครั้งละ 1 นาทีพบว่าสามารถลดการสะสมของไบโอฟิล์มได้ประมาณร้อยละ 70 ส่วนการทดลองโดยความหนาของไบโอฟิล์มเริ่มต้นประมาณ 50 ไมโครเมตร ใช้โอโซนอย่างเดียวโดยเติมน้ำที่มีความเข้มข้นโอโซน 2.8 มก./ล. เป็นเวลา 3 ชั่วโมง/วัน และใช้โอโซนร่วมกับอัลตราโซนิกที่เปิด 3 นาที/วัน เมื่อผ่านไป 4 สัปดาห์ พบว่าความหนาของไบโอฟิล์มของการใช้โอโซนและโอโซนร่วมกับอัลตราโซนิกเท่ากับ 49-111 และ 5-7 ไมโครเมตร ตามลำดับ (Bott, 2004)

Joyce และคณะ (2003) ทำการทดลองการฆ่าเชื้อโรคโดยใช้เวลาสัมผัส 15 นาที วิเคราะห์ด้วยวิธี Plate count เชื้อที่ใช้คือ *Bacillus subtilis* กับอัตราवादที่ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ต ความเข้ม 0.24 วัตต์/ตารางเซนติเมตร และ 38 กิโลเฮิร์ต ความเข้ม 0.18 วัตต์/ตารางเซนติเมตร ปริมาณ *Bacillus subtilis* 100 มิลลิลิตร พบว่าสามารถลดปริมาณลงปริมาณร้อยละ 80 ส่วนการใช้ความถี่ 512 กิโลเฮิร์ต ความเข้ม 0.071 วัตต์/ตร.ซม.และ 850 กิโลเฮิร์ต ความเข้ม 0.064 วัตต์/ตารางเซนติเมตรปริมาณ *Bacillus subtilis* 200 มิลลิลิตร พบว่ามีปริมาณ *Bacillus subtilis* เพิ่มขึ้นร้อยละ 50 และ 40 ตามลำดับ ผลการทดลองสรุปได้ว่าที่ความถี่ต่ำ (20 และ 38 กิโลเฮิร์ต) สามารถฆ่าเชื้อโรคได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนที่ความถี่สูง (512 และ 850 กิโลเฮิร์ต) จะช่วยลดการรวมกลุ่มได้ดี แต่ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคไม่ดี (E. Joyce, Phull, Lorimer, & Mason, 2003)

Meyer และ Sarkissian (2003) ทำการทดลองใช้โอโซนที่อัตราการผลิต 5 กรัม/ชั่วโมง กับหอยหล่อเย็นขนาด 100 ตันอัตราการหมุนเวียนน้ำ 43 แกลลอน/ชั่วโมงควบคุมพีเอชไว้ที่ 8.4 และวัฏจักรความเข้มข้น (Cycle of concentration) เท่ากับ 2.0-3.5 เพื่อควบคุมการเกิดตะกอน

และการกักกรองการกวนผสมโอโซนใช้ท่อพีวีซีและช่องอ 90 องศา หลังจากนั้นสูบน้ำที่สัมผัสโอโซนแล้วไปที่ด้านบนของหอหล่อเย็นเพื่อใช้โอโซนสลายตัวเป็นออกซิเจนเพื่อลดปัญหาการกักกรองน้ำเชื้อเริ่มต้นเท่ากับ 8,000 ซีเอฟยู/มิลลิลิตรวิเคราะห์ด้วยวิธี Heterotrophic Plate Count เก็บตัวอย่างทุก 2 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าที่เวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง มีปริมาณแบคทีเรียเท่ากับ 100 100 และ 200 ซีเอฟยู/มิลลิลิตร ตามลำดับและอัตราการกักกรองโดยใช้คูบองที่เป็นทองแดงเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและเหล็กเคลือบสังกะสีมีค่าเท่ากับ 0.000439 0.0000069 และ 0.0005101 นิ้ว/ปี ตามลำดับ (W. C. a. Mayer & Sarkissian, 2003)

Jyoti และ Pandit (2004) ศึกษาการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ Bore well ที่มีปริมาณแบคทีเรียวิเคราะห์ด้วยวิธี Heterotrophic plate count (HPC) มีค่าอยู่ในช่วง 1,000-8,000 ซีเอฟยู/มิลลิลิตร ด้วยวิธีอัลตราโซนิกแบบฮอร์นที่ความถี่ 22 กิโลเฮิร์ต ใช้ความเข้ม 240 วัตต์ อัลตราโซนิกแบบอ่างที่ความถี่ 20.5 กิโลเฮิร์ต ใช้ความเข้ม 120 วัตต์ โอโซนที่ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัม/ลิตร และการใช้อัลตราโซนิกแบบฮอร์นและแบบอ่างร่วมกับโอโซนพบว่าอัตราการฆ่าเชื้อโรคของการใช้อัลตราโซนิกแบบฮอร์น อัลตราซาวด์แบบอ่าง โอโซนอัลตราซาวด์แบบฮอร์นกับโอโซนและอัลตราโซนิกแบบอ่างกับโอโซน เท่ากับร้อยละ 55 70 60 98 และ 98 ตามลำดับ (Jyoti & Pandit, 2004a)

Zhang และคณะ (2006b) ทำการทดลองโดยใช้ *Microcystis aeruginosa* กับอัลตราโซนิกที่ความถี่ 25 กิโลเฮิร์ต ที่ความเข้ม 0.32 วัตต์/ตารางเซนติเมตร เวลาสัมผัส 5 นาที ผลการทดลองพบว่าสามารถลดความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์ PC absorbance และ Oxygen evolution rate ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ในการเจริญเติบโตของ *Microcystis aeruginosa* ได้ร้อยละ 21.3 44.8 และ 40.5 ตามลำดับ ถึงแม้ว่าจะไม่สามารถลดจำนวนของ *Microcystis aeruginosa* แต่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Zhang et al., 2006b)

Miao และ Tao (2009) ทำการทดลองใช้โอโซนในการกำจัดสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *Microcystis aeruginosa* ผลการทดลองพบว่าการใช้โอโซนที่ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัม/ลิตร ที่เวลา 30 และ 60 นาที สามารถลดปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ซึ่งเป็นตัวแทนของสาหร่ายที่มีชีวิตได้ร้อยละ 71.6 และ 75.3 ตามลำดับ ส่วนการใช้โอโซนที่ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัม/ลิตร เป็นเวลา 60 นาที สามารถลดปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ได้ร้อยละ 91.2 การเจริญเติบโตของสาหร่ายหลังจากการสัมผัสโอโซนเป็นเวลา 8 วัน พบว่า ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัม/ลิตร สาหร่ายค่อยๆ ฟื้นตัวและเจริญเติบโตได้ใหม่ ส่วนที่ความเข้มข้น 3 และ 5 มิลลิกรัม/ลิตร ไม่พบการเพิ่มขึ้นของคลอโรฟิลล์ นอกจากนี้ยังพบว่าค่า Dissolved Organic Carbon (DOC) ในน้ำที่มีสาหร่ายแขวนลอยอยู่ หลังจากสัมผัสโอโซนที่ความเข้มข้น 0 1 3 และ 5 มิลลิกรัม/ลิตร มีค่าเท่ากับ 0.34 1.03 1.98 และ 2.56 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ เนื่องจากโอโซนทำปฏิกิริยากับเยื่อหุ้มและผนังเซลล์แตกหรือเกิดรูพรุนทำให้สิ่งที่อยู่ในเซลล์ถูกปล่อยออกมา (Miao & Tao, 2009)

Joyce และ Mason (2008) ได้รวบรวมความก้าวหน้าในการใช้อัลตราโซนิกในการใช้ทดแทนและใช้ร่วมกับไบโอไซด์ชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.9 (E. M. Joyce & Mason, 2008)

ตารางที่ 2.9 การใช้อัตราชาวดัรร่วมกับไฮโดรโซนิก

จุลินทรีย์	ตัวกลาง	การบำบัด	ความถี่ (กิโลเฮิร์ต)	กำลัง (วัตต์)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	เวลา (นาที)
Listeria monocytogenes	Tryptic soy broth	Manothermosonication	20	450-	30-70	1-10
	UHT whole milk, rice pudding	Thermosonication	20-800	2,000	60	10
Saccharomyces cerevisiae	Water	Thermosonication	20	300	20-49	10-80
	Citrate phosphate buffer	Thermosonication	20	150-450	45-55	1-20
Staphylococcus aureus	Phosphate-buffered saline	Ultrasound combined with Ozone	40	150	25	1
	UHT milk	Thermosonication	20	150	11-56	8
Salmonella typhimurium	Whole liquid egg	Manothermosonication	20	150-	40	1
	Phosphate-buffered saline	Ultrasound combined with Ozone	40	450	25	1
Escherichia coli	Water	Ultrasound with dissolved gas (O ₂ , Ar)	20-1071	80-140	20-29	60
	Phosphate-buffered saline	Ultrasound combined with Ozone	40	150	25	1

Broekman และคณะ (2010) ใช้อัลตราโซนิกที่ความถี่ 1.5-2.0 เมกะเฮิร์ต ใช้ความเข้ม 10 วัตต์/ตารางเซนติเมตรและเวลาสัมผัส 1.5 วินาที ผลการทดลองในสถานที่ต่างๆ ดังนี้ หอหล่อเย็นในมหาวิทยาลัยที่มีการเติมไฮโดรโซนิก โดยมีอัตราการกัดกร่อนอยู่ที่ 0.002 นิ้ว/ปี และแบคทีเรียทั้งหมด 10^4 ซีเอฟยู/มิลลิลิตร หลังจากใช้อัลตราโซนิก 1 ปี สามารถลดการใช้ไฮโดรโซนิกได้ร้อยละ 30 แบคทีเรียทั้งหมดลดลงเหลือ 10^2 ซีเอฟยู/มิลลิลิตร และอัตราการกัดกร่อนเหลือ 0.0001 นิ้ว/ปี การนำมาใช้ที่หอหล่อเย็นในอุตสาหกรรมเคมี ซึ่งฟอสเฟต ซัลฟูริก และคลอรีนในการปรุงแต่งคุณภาพน้ำ หลังจากเปลี่ยนมาใช้อัลตราโซนิกร่วมกับสารป้องกันการกัดกร่อนและการเกิดตะกรันแบบย่อยสลายทางชีวภาพได้ พบว่าสามารถลดการใช้สารเคมีลงได้ร้อยละ 90

(ประมาณ 18,000 กิโลกรัม/ปี) อัตราการกักต่อนลดลงจาก 0.003-0.004 เหลือ 0.0023 นิ้ว/ปี (Broekman, Pohlmann, Beardwood, & de Meulenaer, 2010)

Wu และคณะ (2012) ทำการทดลองควบคุมสาหร่าย *Microcystisaeruginosa* โดยใช้อัตราชาวด์ พบว่าที่ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ต ความเข้ม 0.0403 วัตต์/ตารางเซนติเมตร 580 กิโลเฮิร์ต ความเข้ม 0.0041 วัตต์/ตารางเซนติเมตร 1,146 กิโลเฮิร์ต ความเข้ม 0.0018 วัตต์/ตารางเซนติเมตร สามารถลดสาหร่ายเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี Haemocytometry ได้ร้อยละ 39.25 24.55 และ 14.77 ตามลำดับ และวิเคราะห์ด้วยวิธี Optical density สามารถลดได้ร้อยละ 49.18 22.13 และ 8.33 ตามลำดับ (Wu et al., 2012)

Holm และคณะ (2008) ทำการทดลองใช้อัลตราโซนิกกับ Phytoplanktonic (*Pfiesteria piscicida Thalassiosira eccentric* และ *Anabaena flos-aquae*) Zooplankton (*Artemia sp. Brachiomas plicatilis B. calyciflorusl Philodina* และ *Ceriodaphnia dubia*) และแบคทีเรีย (*Cobetia marina Enterococcus avium Escherichia coli Vibrio cholera* และ *Bacillus globigii* (Spore)) พบว่าการใช้อัลตราโซนิกสามารถกำจัด Zooplankton ที่มีขนาดมากกว่า 10 ไมโครเมตร ได้ร้อยละ 90 ที่กำลังน้อยกว่า 20 จูลล์ต่อมิลลิลิตร เวลาสัมผัสน้อยกว่า 10 วินาที แต่หากใช้กำจัด Planktonic และแบคทีเรีย ให้ได้ร้อยละ 90 ต้องใช้อัลตราโซนิกกำลัง 80-1,240 จูลล์ต่อมิลลิลิตร เวลาสัมผัส 1-20 นาที หากใช้ในหน่วยต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร ของการใช้อัลตราโซนิกกับ Planktonic Zooplankton และแบคทีเรีย เท่ากับ 1.8-3.4 8-48 และ 25-280 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ตามลำดับ (Holm et al., 2008)

Keisher และ Balog (1992) ทำการทดลองกับหอยห่อเย็นจริงขนาด 1,000 ตัน ใช้โอโซนในอัตรา 7 ปอนด์ต่อวัน ของโรงงานผลิตสารเคมีแห่งหนึ่งรัฐแมริแลนด์ ทำการทดลอง 30 วัน ในแต่ละชุดการทดลอง ผลการทดลองของชุดทดลองที่ 1 2 และ 3 มีอัตราการกักต่อนดังแสดงในตารางที่ 2.10 (Keisher & Balog, 1992)

ตารางที่ 2.10 อัตราการกักต่อนของแต่ละชุดทดลอง

วัสดุ	อัตราการกักต่อน (นิ้วต่อปี)		
	ชุดการทดลองที่ 1	ชุดการทดลองที่ 1	ชุดการทดลองที่ 1
เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ	.001269	0.02057	0.00217
ทองแดง	0.00021	0.00025	0.00015

2.6 แนวคิดในการออกแบบการทดลอง

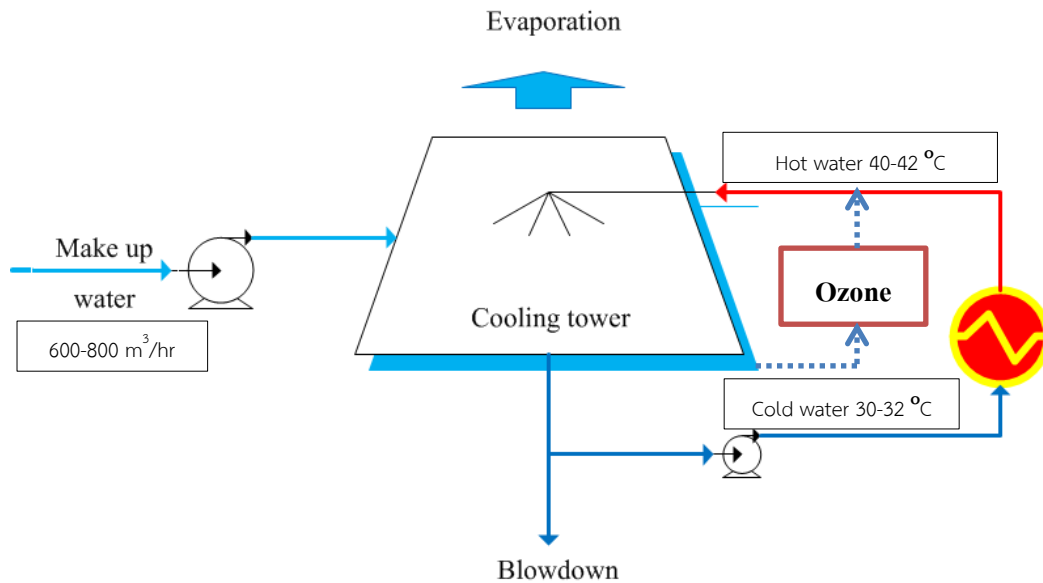
การออกแบบการทดลองในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดการใช้สารเคมีสำหรับควบคุมจุลินทรีย์ในหอหล่อเย็น ซึ่งการเติมไบโอไซด์เป็นการเพิ่มปริมาณของแข็งละลายน้ำให้กับระบบ อีกทั้งอาจทำให้เกิดไตรฮาโลมีเทนและสารพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรค จากการใช้สารประกอบคลอรีนเป็นไบโอไซด์ ดังนั้นการใช้กระบวนการอื่นๆ เพื่อทดแทนการใช้สารเคมี เช่น การใช้โอโซนที่สามารถสลายตัวเป็นออกซิเจนได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ไม่ตกค้างเป็นของแข็งละลายน้ำในระบบ อีกทั้งยังมีอำนาจการออกซิไดซ์สูงกว่าคลอรีน หรือการใช้อัลตราโซนิก โดยแรงเฉือนจากปรากฏการณ์คาวิเทชัน เป็นผลให้เซลล์สาหร่ายอ่อนแอ ระบบสังเคราะห์แสงเสียหาย และทำลายแก๊สแควคิวโอล ทำให้เซลล์สาหร่ายแตกออกจากระบบได้ ด้วยหลักการประยุกต์ใช้งานที่แตกต่างกันของโอโซนและอัลตราโซนิก จึงมีการออกแบบการติดตั้งในจุดที่แตกต่างกันดังนี้

ทางเลือกที่ 1 การใช้โอโซนเพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่ายรูปที่ 2.26 ทางเลือกที่ 1 แนวคิดการออกแบบโอโซนแสดงทางเลือกที่ 1 เลือกโอโซนใช้กับตำแหน่งที่ความเข้มข้นของสาหร่ายต่ำ คือ น้ำ ำ ปร ะ ภา หรือ น้ำ ำ หล ่อ เย ็น ที่ ป ็ อ น เ ้า ำ ส ู่ หอหล่อเย็น เพื่อกำจัดสาหร่ายที่มากับน้ำและยับยั้งการเจริญเติบโตที่จะเกิดขึ้นในรอบของการหมุนเวียนในหอหล่อเย็น โดยมีปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงดังนี้

1) การใช้โอโซนเพื่อออกซิไดซ์ให้เซลล์สาหร่ายแตก ทำให้ของเหลวที่อยู่เซลล์ (เช่น โซโตพลาสซึม) ถูกปล่อยออกมาจากเซลล์ (Miao & Tao, 2009) ซึ่งอาจทำให้สารที่เป็นพิษจากสาหร่ายถูกปล่อยออกมา และเพิ่มค่าของแข็งละลายน้ำให้กับระบบ

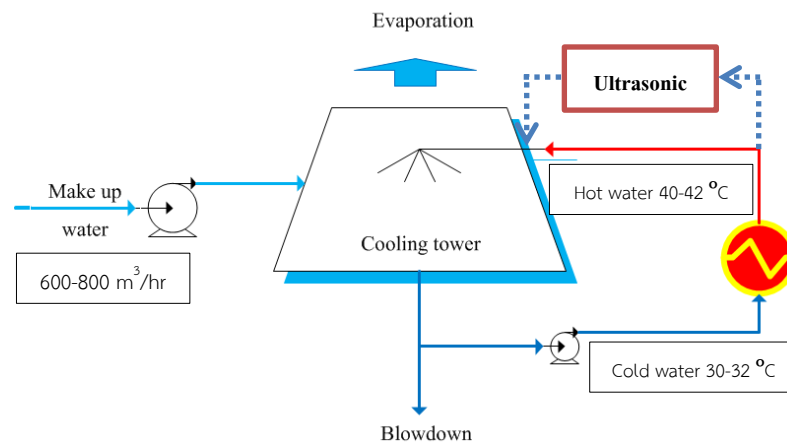
2) โอโซนมีอำนาจการออกซิไดซ์สูงจึงอาจทำให้มีผลกระทบกับสารเคมีอื่นๆ ที่ใช้ในหอหล่อเย็น

3) โอโซนสามารถกัดกร่อนโลหะในหอหล่อเย็นได้ ดังนั้นที่ปริมาณต่ำ ความเข้มข้นของโอโซนที่ใช้ก็จะต่ำตามไปด้วย ทำให้ลดอัตราการกัดกร่อนของโลหะได้



รูปที่ 2.26 ทางเลือกที่ 1 แนวคิดการออกแบบโอโซน

ทางเลือกที่ 2 การใช้อัลตราโซนิกเพื่อให้สาหร่ายตกแล้วแยกตัวออกจากน้ำหล่อเย็นรูปที่ 2.27 แสดงการใช้อัลตราโซนิกโดยเลือกใช้ในจุดที่ความเข้มข้นสาหร่ายสูง คือในช่วงการหมุนเวียนของน้ำหล่อเย็นในระบบ โดยใช้คาบเวทซ์ในการทำให้แก๊สแควคิวโวลเสียหาย แล้วสาหร่ายตกตะกอนออกจากน้ำ โดยที่เซลล์สาหร่ายไม่แตกและยับยั้งการเจริญเติบโตเนื่องเกิดการเสียหายของระบบการสังเคราะห์แสง



รูปที่ 2.27 ทางเลือกที่ 2 แนวคิดการออกแบบอัลตราโซนิก

2.7 การใช้งานประยุกต์ใช้จริง

เนื่องจากการพัฒนาเทคโนโลยีของทั้งไอโซนและอัลตราโซนิคจนมีการเริ่มใช้งานกับห่อหล่อเย็นในเชิงพาณิชย์ ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงยกตัวอย่างการประยุกต์ใช้ไอโซนและอัลตราโซนิคในระบบจริง เพื่อให้เห็นภาพการใช้งานได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น

2.7.1 ไอโซน

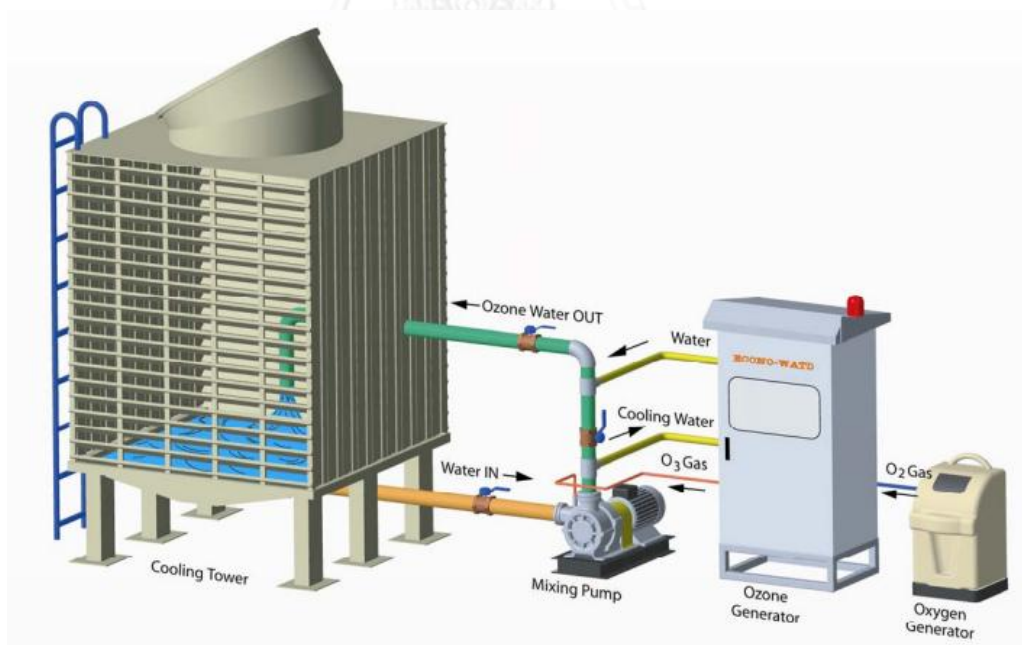
โดยการคำนวณความต้องการไอโซนที่ใช้ในห่อหล่อเย็นยังมีค่าออกแบบอื่นๆ ที่มาจากงานวิจัยและผู้ผลิตไอโซน เช่น (Tierney 2000) ใช้ค่าออกแบบที่ 3-5 กรัมต่อชั่วโมง ต่อ 100 ตันของห่อหล่อเย็น บริษัท แอคทีค ซายน์ จำกัด ใช้ไอโซน 10-15 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน และขนาดของเครื่องไอโซนที่แนะนำกับห่อหล่อเย็นแต่ละขนาดของบริษัท Innovation ideas จำกัด ตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 ขนาดของเครื่องโอโซนที่แนะนำกับหอหล่อเย็นแต่ละขนาด

ขนาดของหอหล่อเย็น (RT)	เครื่องโอโซนที่แนะนำ (กรัมต่อชั่วโมง)
50-100	5
200	10
300	15
400	20
600	30
1000	50
1,200	60

ที่มา: บริษัท Innovation ideas จำกัด

การใช้โอโซนในหอหล่อเย็นของบริษัท Econowatt จำกัด มีหลักการทำงานคือดึงน้ำบางส่วนออกมาบ่อกักน้ำมาสัมผัสโอโซนเพื่อฆ่าเชื้อโรคแล้วส่งน้ำกลับไปยังบ่อกัก วนไปเช่นนี้ต่อไปเรื่อยๆ ซึ่งประสิทธิภาพของระบบจะขึ้นกับการควบคุมผสมระหว่างน้ำกับโอโซน โดยผังทิศทางการไหลของระบบโอโซนและการใช้โอโซนกับหอหล่อเย็นแสดงในรูปที่ 2.28 และรูปที่ 2.29 ตามลำดับ



รูปที่ 2.28 ผังทิศทางการไหลของระบบโอโซนในหอหล่อเย็น

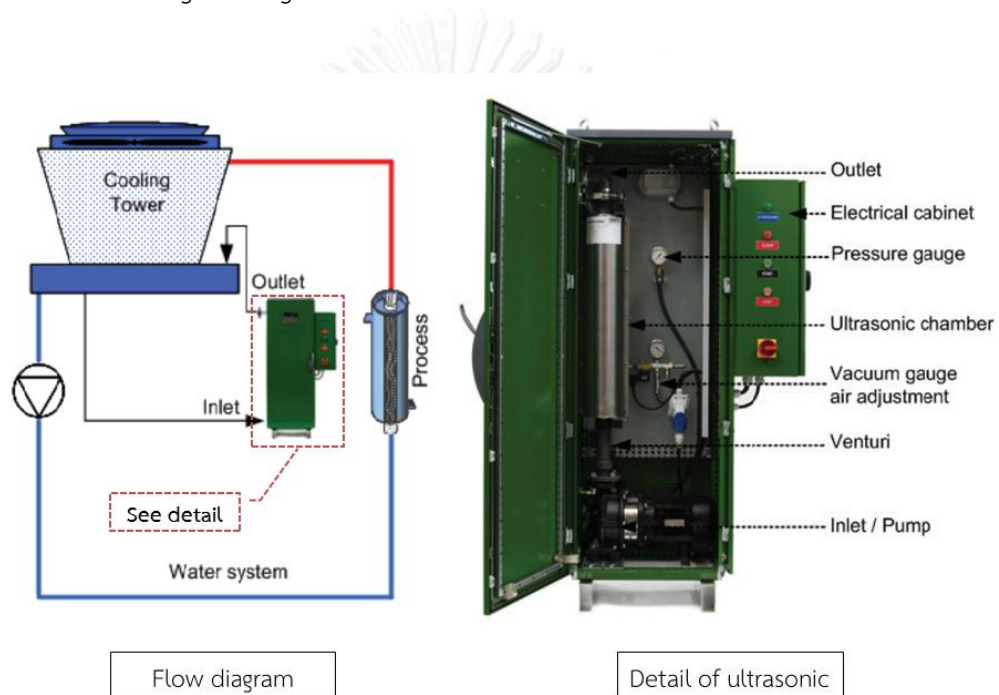
ที่มา: www.econowatt.co.th



รูปที่ 2.29 การใช้โอโซนกับหอหล่อเย็นในสถานที่จริง
ที่มา: www.econowatt.co.th

4.6.2 อัลตราโซนิก

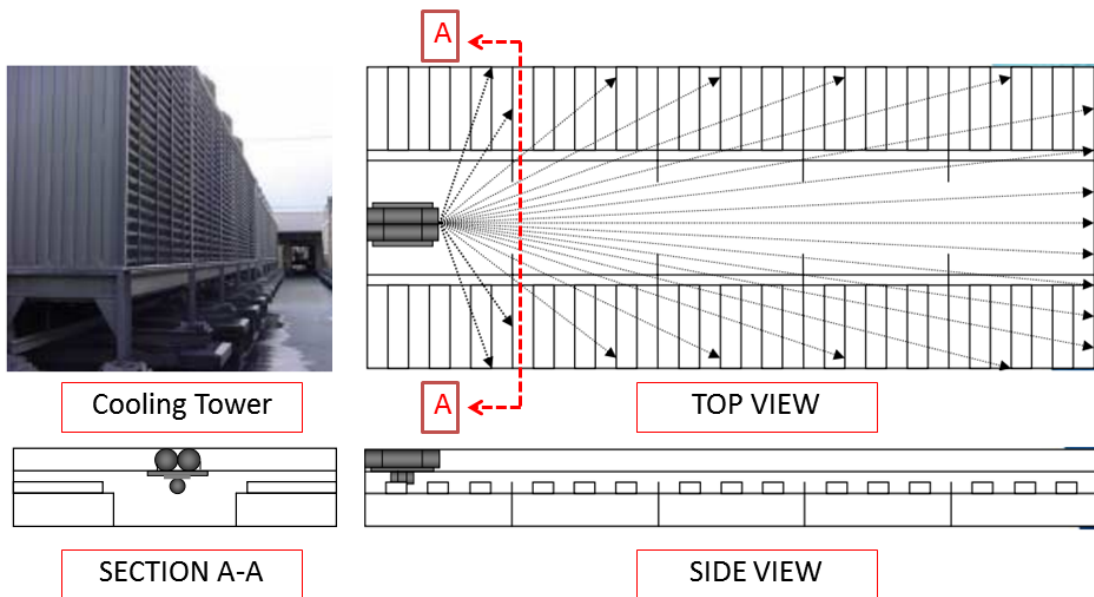
การประยุกต์ใช้อัลตราโซนิกกับหอหล่อเย็นจริงในเชิงพาณิชย์ยังไม่แพร่หลายมากนัก เมื่อเปรียบเทียบกับโอโซน ในหัวข้อนี้จึงยกตัวอย่างการใช้อัลตราโซนิกที่ความถี่สูง (1.5-2.0 เมกกะเฮิร์ต) และการใช้อัลตราโซนิกแบบพ่นลอยมาประยุกต์ใช้ทดแทนสารเคมีเพื่อควบคุมจุลินทรีย์ในหอหล่อเย็นจากงานวิจัยของ Broekman และคณะ (2010) และบริษัท Wintecs corporation consultant and engineering



รูปที่ 2.30 ผังทิศทางการไหลและรายละเอียดเครื่องอัลตราโซนิกแบบความถี่สูง
ที่มา: Broekman และคณะ (2010)

Broekman และคณะ (2010) โดยดึงน้ำบางส่วนจากบ่อพัก (Basin) มาสัมผัสอัลตราโซนิกที่ความถี่ 1.5-2.0 เมกกะเฮิร์ต ใช้กำลัง 10 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตรและเวลาสัมผัส 1.5 วินาที แล้วส่งน้ำกลับไปบ่อพัก พบว่าสามารถลดการใช้สารเคมีและอัตราการกัดกร่อนในหอหล่อเย็นลงได้ โดยผังทิศทางการไหลและรายละเอียดเครื่องอัลตราโซนิกแสดงในรูปที่ 2.30

Wintecs corporation consultant and engineering ได้นำอัลตราโซนิกแบบพ่นลอยยี่ห้อ LG รุ่น XL มาประยุกต์ใช้ทดแทนสารเคมีควบคุมจุลินทรีย์ในหอหล่อเย็น โดยมีการจัดวางอุปกรณ์ดังรูปที่ 2.31 พบว่าสามารถลดไบโอฟิล์ม (Biofilm) และค่าใช้จ่ายในส่วนของสารเคมีซึ่งในหอหล่อเย็นขนาดเล็กจะมีประสิทธิภาพดีกว่าหอหล่อเย็นขนาดใหญ่



รูปที่ 2.31 ผังการจัดวางเครื่องอัลตราโซนิกแบบหุ่นลอย
ที่มา: Wintecs corporation consultant and engineering

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์สำหรับการทดลอง

- เครื่องกำเนิดโอโซนกำลังผลิต 500 มิลลิกรัม/ชั่วโมง ยี่ห้อ Ozzon รุ่น OZ-655T
- เครื่องกำเนิดอัลตราโซนิกความถี่ 40 กิโลเฮิร์ต ยี่ห้อ J.Y. Tech รุ่น MS-4010
- ถังปฏิกรณ์ขนาด 4 ลิตร
- สายยางซิลิโคน
- เครื่องเติมอากาศ ยี่ห้อ Resun รุ่น AP-80

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

- สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ยี่ห้อ Thermo Fisher Scientific รุ่น Genesys 10 UV Scanning, Single cell holder
- เครื่องวัดพีเอช (pH meter) ยี่ห้อ Metler Toledo รุ่น Seveneasy
- Inductively coupled plasma (ICP) ยี่ห้อ Jorbin Yvon Horiba รุ่น Ultima 2 ICP-OES
- Ion Chromatography (IC) ยี่ห้อ Dionex รุ่น ICS -2500 25AD Absorbance Detector
- Laminar flow ยี่ห้อ Holten รุ่น HVR 2460
- Shaker ยี่ห้อ PNP รุ่น OS - 3
- Autoclave
- เครื่องวัดการนำไฟฟ้า (Portable Conductivities meter) ยี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น Orion star series
- เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ ANd รุ่น ARC120
- เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ OHAUS รุ่น Pioneer
- กล้องจุลทรรศน์ (Microscope) ยี่ห้อ Nikon รุ่น Eclipse E200
- เตอบที่ปรับอุณหภูมิได้ 70-100 องศาเซลเซียส ยี่ห้อ Binder รุ่น ED 53
- เครื่องแก้วต่างๆ เช่น ปิเปต ปีกเกอร์ ขวดรูปชมพู่ ฯลฯ

3.1.3 อาหารเลี้ยงเชื้อ (ภาคผนวก)

3.1.4 สารเคมี

- กรดฟอสฟอริก ยี่ห้อ Labscan
- กรดไฮโดรคลอริก ยี่ห้อ Labscan
- กรดซัลฟิวริก ยี่ห้อ QRëC
- กรดไนตริก ยี่ห้อ Labscan
- โปรแตสเซียมอินดิโกซิลโฟเนต ($C_{15}H_7N_2O_{11}S_3K_3$) ยี่ห้อ Sigma-Aldrich
- โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (NaH_2PO_4) ยี่ห้อ Univar

3.2 แผนการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale) เพื่อศึกษาการใช้โอโซนและคลื่นเสียงอัลตราโซนิก ทำการทดลองแบบทีละเท (Batch Reactor) โดยใช้เครื่องกำเนิดโอโซนแบบโคโรนาดีสชาร์จ (Corona discharge) ภายใต้อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และเครื่องกำเนิดคลื่นเสียงอัลตราโซนิกประเภทอ่าง โดยใช้ความถี่ของคลื่นเสียงอัลตราโซนิกที่ความถี่ 40 กิโลเฮิร์ต ระดับพลังงานที่แตกต่างกัน ตลอดการทดลองควบคุมอุณหภูมิให้เท่ากับอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำหล่อเย็นในโรงงาน ทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการ อาคารภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แผนการทดลองสรุปได้ดังต่อไปนี้ และแสดงดังรูปที่ 3.1

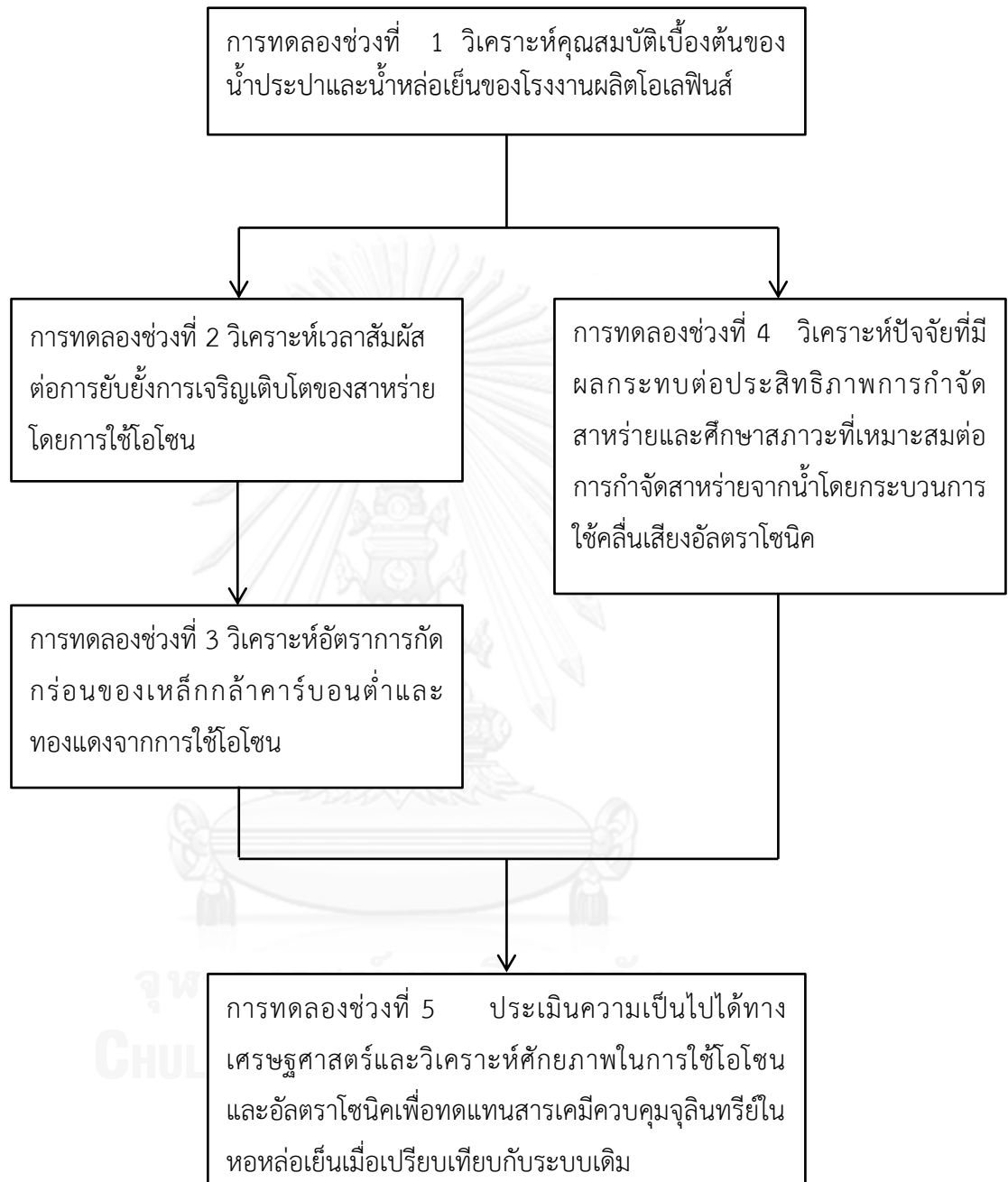
การทดลองช่วงที่ 1 วิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของน้ำประปาและน้ำหล่อเย็นของโรงงานผลิตโอเลฟินส์

การทดลองช่วงที่ 2 วิเคราะห์เวลาสัมผัสต่อการยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่ายโดยการใช้อโอโซน

การทดลองช่วงที่ 3 วิเคราะห์อัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและทองแดงจากการใช้อโอโซน

การทดลองช่วงที่ 4 วิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายและศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการกำจัดสาหร่ายจากน้ำโดยกระบวนการใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิก

การทดลองช่วงที่ 5 ประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์และวิเคราะห์ศักยภาพในการใช้อโอโซนและอัลตราโซนิกเพื่อทดแทนสารเคมีควบคุมจุลินทรีย์ในหอหล่อเย็นเมื่อเปรียบเทียบกับระบบเดิม



รูปที่ 3.1 สรุปแผนการทดลอง

3.2.1 การทดลองที่ 1

วิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของน้ำประปาและน้ำหล่อเย็น โดยทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและการวิเคราะห์ที่อ่อนไหวทั้งประจุบวกและประจุลบ เพื่อประเมินความเป็นไปได้เบื้องต้นในการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการเพิ่มจำนวนรอบการใช้น้ำและการประยุกต์ใช้ไอโซนกับน้ำหล่อเย็น ซึ่งไม่แนะนำให้ใช้ไอโซนกับ น้ำที่มีความกระด้างและซัลเฟตที่มีค่ามากกว่า 500 มิลลิกรัม หินปูน ต่อลิตร และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (Energy, 1995) รูปที่ 3.1 แสดงพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาและรายละเอียดวิธีวิเคราะห์ตามมาตรฐาน (American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), & (WEF), 2005)

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดวิธีวิเคราะห์ของพารามิเตอร์ต่างๆ

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์
ค่าพีเอช	pH meter
สภาพการนำไฟฟ้าของแข็งละลายน้ำ	Conductivity meter Dried at 180°C
ความเข้มข้นของเซลล์สำหรับย	Dry weight method
ปริมาณแบคทีเรีย	Plate count method
ไอโซน	Indigo colorimetric
แคลเซียม	Inductively coupled plasma (ICP)
แมกนีเซียม	Inductively coupled plasma (ICP)
โบแตสเซียม	Inductively coupled plasma (ICP)
โซเดียม	Inductively coupled plasma (ICP)
คลอไรด์	Ion Chromatography (IC)
ซัลเฟต	Ion Chromatography (IC)
ไนเตรต	Ion Chromatography (IC)
ฟอสเฟต	Ion Chromatography (IC)
ความเป็นต่าง	Titration method
คลอรีนตกค้าง	Test kit / DPD colorimetric method

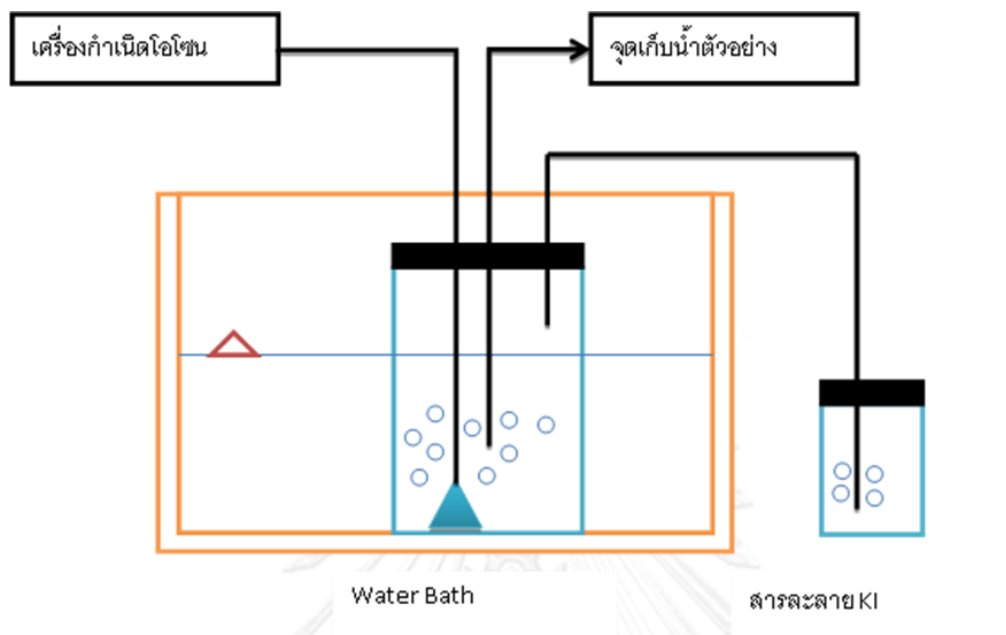
3.2.2 การทดลองที่ 2

การทดลองที่ 2 วิเคราะห์ผลกระทบของเวลาสัมผัสต่อการกำจัดแบคทีเรียและการยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่ายโดยใช้โอโซน จุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ สาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* เป็นสายพันธุ์ที่พบได้ทั่วไปในหอหล่อเย็น (McCoy, 1980) สาหร่ายและแบคทีเรียในน้ำหล่อเย็นจริง ซึ่งการทดลองนี้ทำการวิเคราะห์การเจริญเติบโตของสาหร่ายหลังการเติมโอโซน โดยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายได้มีการวิเคราะห์ความเข้มข้นของสาหร่ายที่เวลาต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบกับน้ำที่ไม่มีการเติมโอโซน ความเข้มข้นของโอโซนที่ใช้เท่ากับ 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร เวลาการสัมผัสในช่วง 0 ถึง 30 นาที ซึ่งเป็นเวลาสัมผัสที่สามารถลดประมาณสาหร่ายและแบคทีเรียได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากการศึกษาของ (Miao & Tao, 2009) และ (Viera et al., 1999)

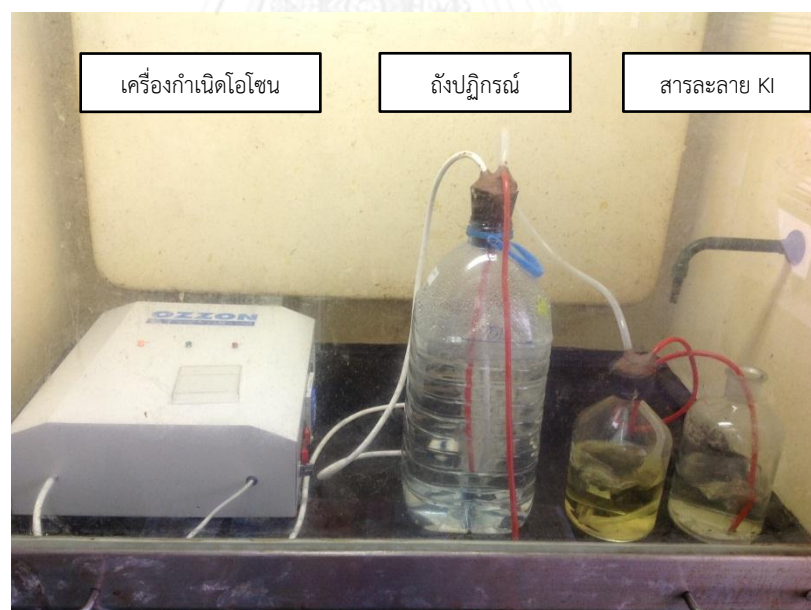
ระยะเวลาในการวิเคราะห์อัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายหลังเติมโอโซน ใช้ช่วงเวลาที่สาหร่ายมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว (Logarithmic phase) โดยช่วงเวลาที่มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของ *Chlorella vulgaris* ซึ่งสายพันธุ์ที่พบได้ทั่วไปในหอหล่อเย็นคือ 6-20 วัน ตามลำดับ ดังนั้นการทดลองนี้จึงเลือกใช้ช่วงเวลา 0-10 วัน วิเคราะห์อัตราการเจริญเติบโตทุกๆ 2 วัน และสูตรอาหารใช้ N-8 (Mandalam & Palsson, 1998) สำหรับการทดลองของสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* ส่วนการทดลองสาหร่ายในน้ำหล่อเย็นจริงไม่มีการเติมอาหาร ทำการทดลองในช่วงเวลา 0-6 วัน วิเคราะห์อัตราการเจริญเติบโตทุกๆ 2 วัน และส่วนการทดลองความสามารถในการกำจัดแบคทีเรียของโอโซนทำการวิเคราะห์ปริมาณของเซลล์เริ่มต้นและหลังจากสัมผัสโอโซนที่เวลาต่างๆ ทั้งนี้ พารามิเตอร์ที่ต้องควบคุมอื่นๆ คืออุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิเฉลี่ยในน้ำหล่อเย็นของโรงงาน โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาคือแผนผังทิศทางการไหลการ แผนผังการจัดวางอุปกรณ์ แผนผังการทดลองการใช้โอโซนกับสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* และสาหร่ายในน้ำหล่อเย็น แสดงในตารางที่ 3.2 รูปที่ 3.2 รูปที่ 3.3 รูปที่ 3.4 และ รูปที่ 3.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ศึกษาในการทดลองที่ 2

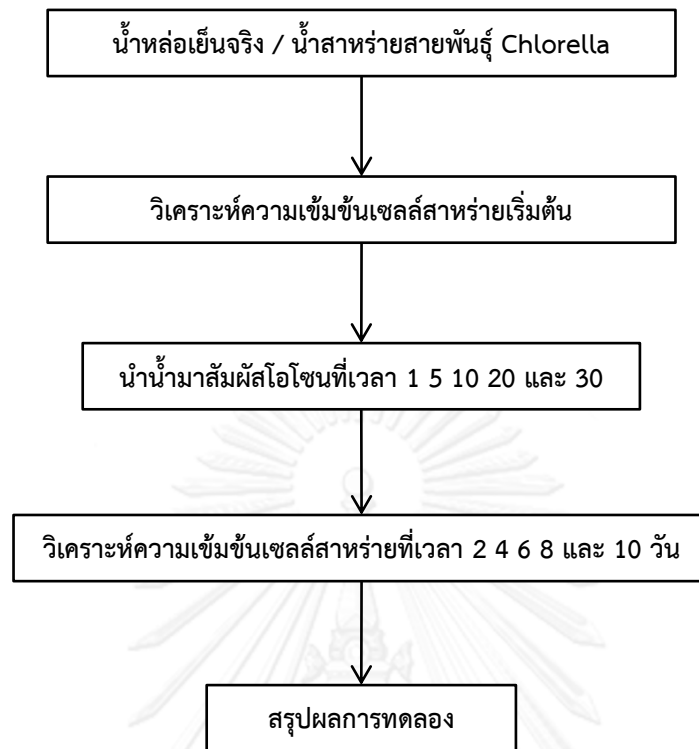
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
เวลาสัมผัสโอโซน	0 1 5 10 20 และ 30 นาที
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
อุณหภูมิ	30 องศาเซลเซียส
ความเข้มข้นของโอโซน	จากการทดลองที่ 3
ความเข้มข้นของโอโซนละลายน้ำ	0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์
ความเข้มข้นของเซลล์สาหร่าย	Dry weight method
ปริมาณแบคทีเรีย	Plate count method



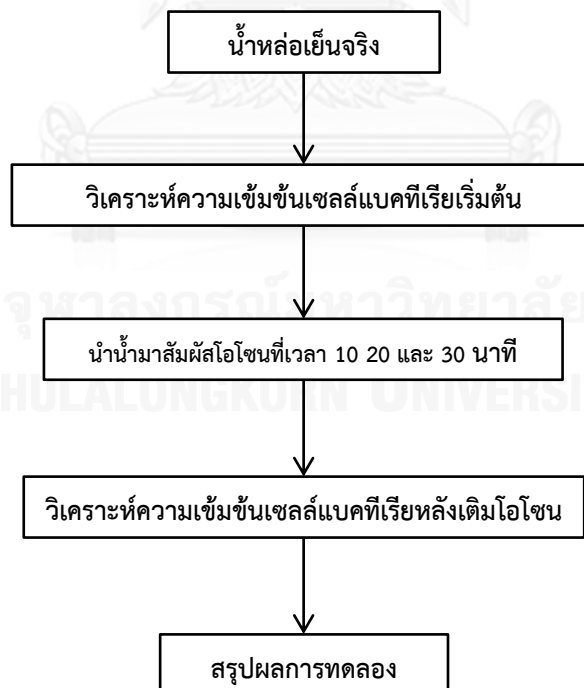
รูปที่ 3.2 ผังทิศทางการไหลการทดลองที่ 2



รูปที่ 3.3 แผนผังการจัดวางอุปกรณ์ในการทดลองที่ 2



รูปที่ 3.4 แผนผังการทดลองการใช้ไอโซนกับสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris*



รูปที่ 3.5 แผนผังการทดลองการใช้ไอโซนกับสาหร่ายในน้ำหล่อเย็น

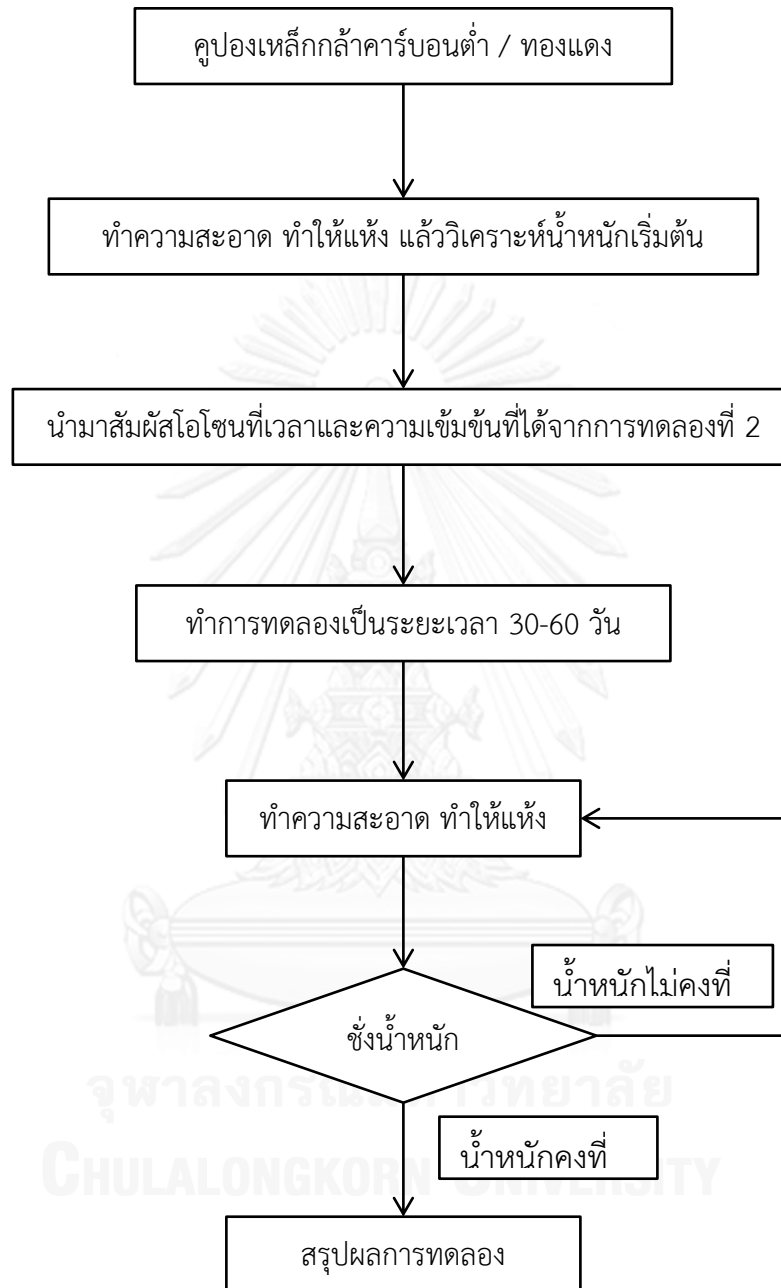
3.2.3 การทดลองที่ 3

การทดลองที่ 3 วิเคราะห์อัตราการกัดกร่อนของโลหะจากการใช้ไอโซนในการยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่าย เนื่องจากไอโซนมีอำนาจการออกซิไดซ์ที่รุนแรงและมีฤทธิ์กัดกร่อนโลหะ ดังนั้นการวิเคราะห์ความเข้มข้นและเวลาสัมผัสของไอโซนที่มีผลต่ออัตราการกัดกร่อนของโลหะที่มีในระบบ จึงมีความสำคัญอย่างมาก เพราะเป็นปัจจัยหนึ่งที่บ่งบอกความเป็นไปได้ในการใช้เทคโนโลยีนี้กับหอหล่อเย็นของโรงงาน

การวิเคราะห์อัตราการกัดกร่อนของโลหะในน้ำหล่อเย็นเนื่องจากการใช้ไอโซนใช้ระยะเวลาการทดลอง 60 วัน มาตรฐาน ASTM D4778-05 ((ASTM), 2008a) ที่กำหนดไว้ว่าต้องทำการทดลองในช่วง 30-60 วัน หรืออย่างน้อย 14 วัน การเตรียมและทำความสะอาดชิ้นงานก่อนและหลังการสัมผัสไอโซน ใช้วิธีตามมาตรฐาน ASTM G1-03 ((ASTM), 2008b) โดยรายละเอียดแสดงในภาคผนวก จ โลหะที่ใช้ในการทดลองได้แก่ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Mild steel) และทองแดง (Copper) ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ทั่วไปในหอหล่อเย็น (Choudhury, Hsieh, Vidic, & Dzombak, 2012) โดยความเข้มข้นและเวลาสัมผัสของไอโซนที่ใช้ในการทดลองนี้ได้จากการทดลองที่ 3 เลือกใช้ความเข้มข้นสูงสุดของไอโซนที่ละลายได้ในน้ำหล่อเย็น ซึ่งเท่ากับ 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนเวลาสัมผัสเลือกใช้เวลาที่เหมาะสมในการยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่าย ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองและแผนผังสรุปการทดลองแสดงในตารางที่ 3.3 และ รูปที่ 3.6

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ศึกษาในการทดลองที่ 3

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ค่าของแข็งละลายน้ำในน้ำหล่อเย็น	จากการทดลองที่ 2
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
อุณหภูมิ	30 องศาเซลเซียส
โลหะ	เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและทองแดง
ความเข้มข้นของไอโซน	จากการทดลองที่ 2
เวลาสัมผัสไอโซน	จากการทดลองที่ 2
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์
อัตราการกัดกร่อน	Weight loss measurement (ASTM G1-03)



รูปที่ 3.6 แผนผังสรุปการดำเนินการทดลองที่ 3

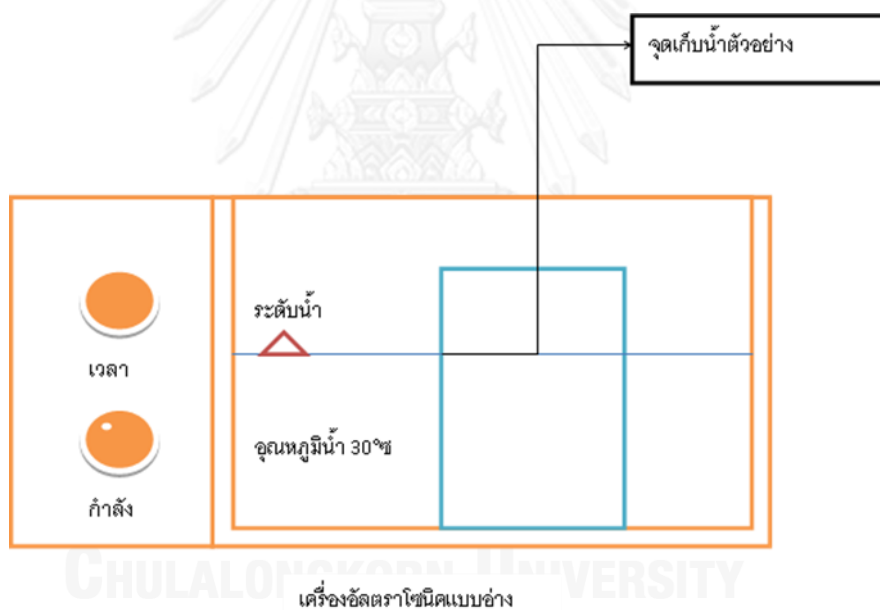
3.2.4 การทดลองที่ 4

การทดลองที่ 4 วิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมต่อการกำจัดแบคทีเรียและยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่ายในน้ำโดยกระบวนการใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิก การทดลองนี้ใช้น้ำหล่อเย็นที่มีการเจริญเติบโตของสาหร่ายมาสัมผัสคลื่นอัลตราโซนิกแบบอย่างความถี่ 40 กิโลเฮิร์ต ที่เวลาและกำลังที่แตกต่างกัน แล้วเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่าย จุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ สาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* เป็นสายพันธุ์ที่พบได้ทั่วไปในหอหล่อเย็น (McCoy, 1980) สาหร่ายและแบคทีเรียในน้ำหล่อเย็นจริง

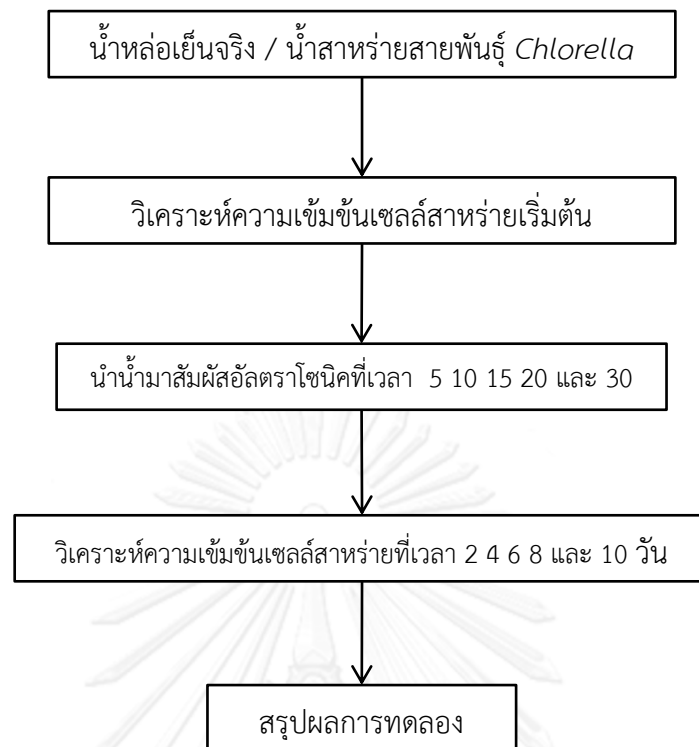
Joyce และ Mason (2008) ได้รวบรวมการใช้อัลตราโซนิกกับจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ โดยใช้เวลาในการสัมผัสในช่วง 1 ถึง 80 นาที ดังนั้นในการทดลองนี้จึงใช้เวลาสัมผัสในช่วง 0 ถึง 30 นาที (E. M. Joyce & Mason, 2008) ส่วนเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์การยับยั้งการเจริญเติบโตใช้เช่นเดียวกับการทดลองที่ 3 ระยะเวลาในการวิเคราะห์อัตราการเจริญเติบโตหลังสัมผัสอัลตราโซนิกใช้ช่วงเวลาที่สาหร่ายมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว (Logarithmic phase) โดยช่วงเวลาที่มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของ *Chlorella vulgaris* ซึ่งสายพันธุ์ที่พบได้ทั่วไปในหอหล่อเย็นคือ 6-20 วัน ตามลำดับ ดังนั้นการทดลองนี้จึงเลือกใช้ช่วงเวลา 0-10 วัน วิเคราะห์อัตราการเจริญเติบโตทุกๆ 2 วัน และสูตรอาหารใช้ N-8 (Mandalam & Palsson, 1998) สำหรับการทดลองของสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* ส่วนการทดลองสาหร่ายในน้ำหล่อเย็นจริงไม่มีการเติมอาหาร ทำการทดลองในช่วงเวลา 0-6 วัน วิเคราะห์อัตราการเจริญเติบโตทุกๆ 2 วัน และส่วนการทดลองความสามารถในการกำจัดแบคทีเรียของอัลตราโซนิกทำการวิเคราะห์ปริมาณของเซลล์เริ่มต้นและหลังจากสัมผัสอัลตราโซนิกที่เวลาต่างๆ ทันที พารามิเตอร์ที่ต้องควบคุมอื่นๆ คืออุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิเฉลี่ยในน้ำหล่อเย็นของโรงงาน การติดตั้งชุดทดลองแสดงในรูปที่ 3.7 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 3.4 โดยแผนการทดลองการใช้อัลตราโซนิกกับสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* และสาหร่ายในน้ำหล่อเย็น แสดงในรูปที่ 3.8 และ รูปที่ 3.9 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรที่ศึกษาในการทดลองที่ 4

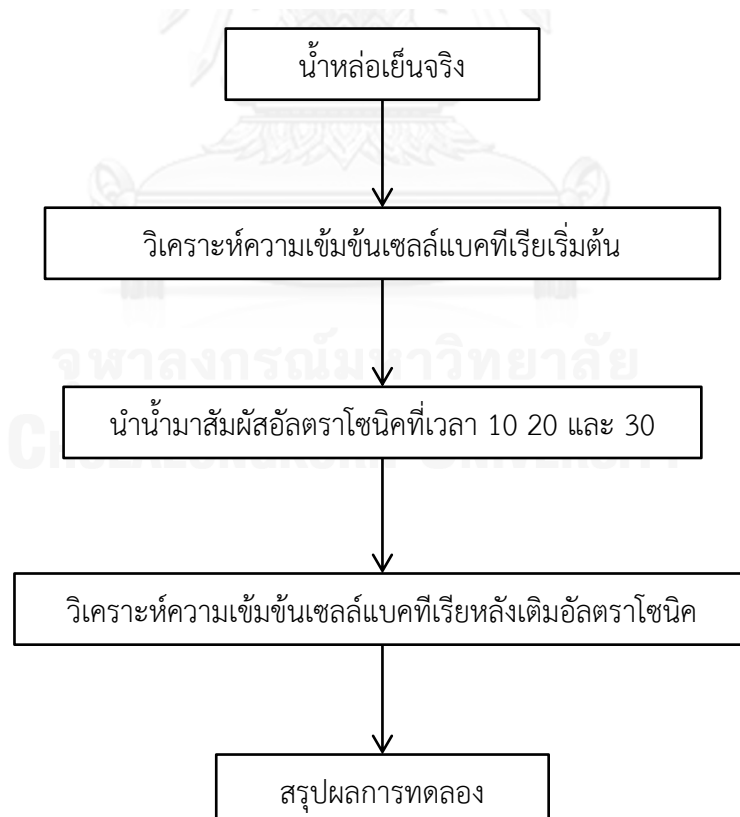
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
เวลาสัมผัสอัลตราโซนิก	0 1 5 10 15 20 และ 30 นาที
กำลังของอัลตราโซนิก	22 และ 88 วัตต์
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
อุณหภูมิ	30 องศาเซลเซียส
ความถี่ของคลื่นอัลตราโซนิก	40 กิโลเฮิร์ต
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์
ความเข้มข้นของเซลล์สาหร่าย	Dry weight method
ปริมาณแบคทีเรีย	Plate count method



รูปที่ 3.7 การจัดวางอุปกรณ์ของชุดการทดลองที่ 4



รูปที่ 3.9 แผนการทดลองการใช้อัลตราโซนิกกับสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris*



รูปที่ 3.8 แผนการทดลองการใช้อัลตราโซนิกกับสาหร่ายในน้ำหล่อเย็น

3.2.5 การทดลองที่ 5

การทดลองที่ 5 การประเมินราคาเบื้องต้นและความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์โดยประเมินราคาจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ ความเป็นไปได้เชิงเทคนิคและวิศวกรรม ประกอบด้วย ข้อดีและข้อเสียของระบบ วิธีการเดินระบบ และความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงานในการเดินระบบ ความเป็นไปได้เศรษฐศาสตร์ ประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งอุปกรณ์ ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ และค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง จากนั้นนำมาเปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายของระบบเดิม ปริมาณสารเคมี และน้ำที่ลดลง เพื่อประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ ตัวอย่างแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ตัวอย่างการประเมินราคาและความเป็นไปได้เศรษฐศาสตร์

รายละเอียด	หน่วย	ระบบเดิม	โอโซน	อัลตราโซนิก
การติดตั้งอุปกรณ์	บาท	ไม่มี	เครื่องกำเนิดโอโซน	เครื่องอัลตราโซนิก
การเดินระบบ	บาท/ปี	ค่าไฟฟ้า	ค่าไฟฟ้า	ค่าไฟฟ้า
ค่าสารเคมี				
- Biocide	กก./ปี	เท่าเดิม	ลดลงหรือไม่มี	ลดลงหรือไม่มี
- Scale inhibitor	กก./ปี	เท่าเดิม	เท่าเดิม	เท่าเดิม
- Corrosion inhibitor	กก./ปี	เท่าเดิม	เท่าเดิม	เท่าเดิม
ปริมาณการใช้น้ำ	ลบ.ม./ชม	600-800	คาดว่าจะลดลง	คาดว่าจะลดลง

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การวิเคราะห์ลักษณะน้ำประปาและน้ำหล่อเย็น

น้ำตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้รับการอนุเคราะห์น้ำประปาและน้ำหล่อเย็นจากระบบหล่อเย็นของโรงงานผลิตโอเลฟินส์แห่งหนึ่ง โดยน้ำตัวอย่างที่ได้รับมาจะถูกนำมาเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อรอการวิเคราะห์ต่อไป พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ประกอบด้วย อีออนบวก ประกอบด้วย โซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม อีออนลบ ประกอบด้วย คลอไรด์ ไนเตรต ซัลเฟต ไบคาร์บอเนต และฟอสเฟส ค่าของแข็งละลายน้ำ ค่าพีเอช และค่าการนำไฟฟ้า

วิธีการวิเคราะห์อีออนบวกในการทดลองนี้ใช้เครื่อง Inductively coupled plasma (ICP) ยี่ห้อ Jorbin Yvon Horiba รุ่น Ultima 2 ICP-OES อีออนลบใช้เครื่อง Ion Chromatography (IC) ยี่ห้อ Dionex รุ่น ICS -2500 25AD Absorbance Detector แสดงในรูปที่ 3.10 พีเอชใช้เครื่องวัดพีเอชแบบพกพายี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น Seveneasy ค่าการนำไฟฟ้าใช้เครื่องวัดการนำไฟฟ้าแบบพกพายี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น Orion star series ส่วนการวิเคราะห์ค่าของแข็งละลายน้ำและไบคาร์บอเนต ใช้วิธีตามทีระบุไว้ใน Standard method for the examination of water and wastewater (APHA, 2005) (American Public Health Association (APHA) et al., 2005)



รูปที่ 3.10 เครื่อง Ion Chromatography (IC)

3.3.2 จุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง

จุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองนี้แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ แบคทีเรียและสาหร่าย ซึ่งเป็นกลุ่มที่พบมากในระบบหล่อเย็น โดยสาหร่ายที่ใช้ในการทดลองนี้แบ่งเป็นสองประเภทคือ *Chlorella vulgaris* เป็นสาหร่ายที่พบได้ทั่วไปในระบบหล่อเย็น ในงานวิจัยนี้เลือกใช้อาหารเลี้ยงเชื้อแบบ N-8 และสาหร่ายแบบสายพันธุ์ผสม (Mixed culture algae) ที่มาจากน้ำหล่อเย็นจริงแต่ไม่มีการเติมอาหารเลี้ยงเชื้อ รูปที่ 3.11 แสดงอุปกรณ์ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายที่ใช้ในงานวิจัยซึ่งต้องมีการเติมอากาศและให้แสงตลอดเวลา ประกอบด้วยเครื่องเติมอากาศ ท่อลม หัวจ่ายอากาศและหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ วิเคราะห์ปริมาณสาหร่ายใช้วิธีน้ำหนักแห้ง (Dry weight method) ซึ่งรายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข (Ai, Guo, Qin, & Tang, 2008) และ (Krohn, McNeff, Yan, & Nowlan, 2011) โดยทำการวิเคราะห์ซ้ำ 3 ครั้งต่อ 1 การทดลอง แบคทีเรียที่ใช้ในการทดลองนี้ที่มาจากน้ำในระบบหล่อเย็นจริงการ และวิธีการวิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียในการทดลองนี้ใช้วิธีนับจำนวนแบคทีเรียในจานเพาะเชื้อ (Spread plate technique) (American Public Health Association (APHA) et al., 2005) รายละเอียดวิธีวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ค รูปที่ 3.12 แสดงอุปกรณ์ในการวิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรีย



รูปที่ 3.11 อุปกรณ์ในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย



รูปที่ 3.12 อุปกรณ์ในการในการวิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรีย

3.3.3 โอโซน

โอโซนที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นแบบโคโรนา ดิสชาร์จ (Corona discharge) ของยี่ห้อ Ozzon รุ่น OZ-655T ซึ่งสามารถทำความเข้มข้นได้ 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยความเข้มข้นของโอโซนที่ละลายในน้ำวิเคราะห์ด้วยวิธีอินดิโก (Indigo colorimetric method) ซึ่งเป็นวิธีมาตรฐานตามที่ระบุไว้ใน Standard method for the examination of water and wastewater (American Public Health Association (APHA) et al., 2005) รายละเอียดการวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ก



รูปที่ 3.13 การวิเคราะห์ความเข้มข้นโอโซนด้วยการใช้สารละลายอินดิโก

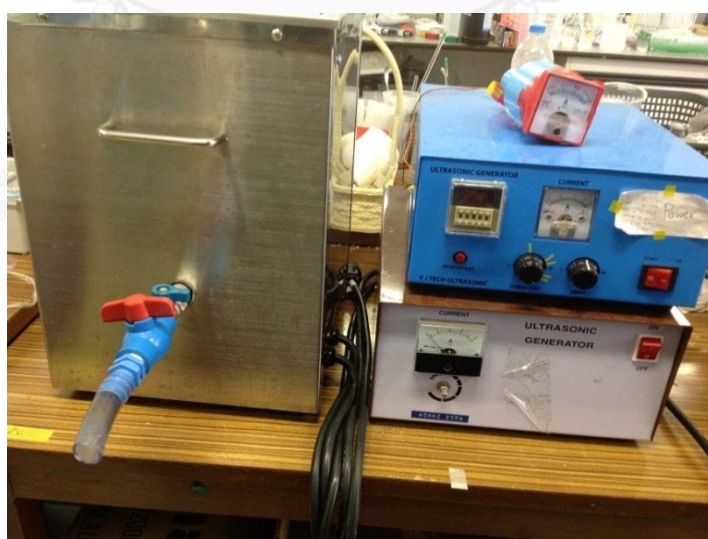
การทดลองนี้ใช้ถังปฏิกิริยาขนาด 4 ลิตร และใช้โปแตสเซียมไอโอไดน์ (Potassium iodine; KI) ความเข้มข้นร้อยละ 2 เพื่อดักจับแก๊สโอโซนส่วนเกินที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ เครื่องกำเนิดโอโซนแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 เครื่องกำเนิดโอโซน

3.3.4 อัลตราโซนิก

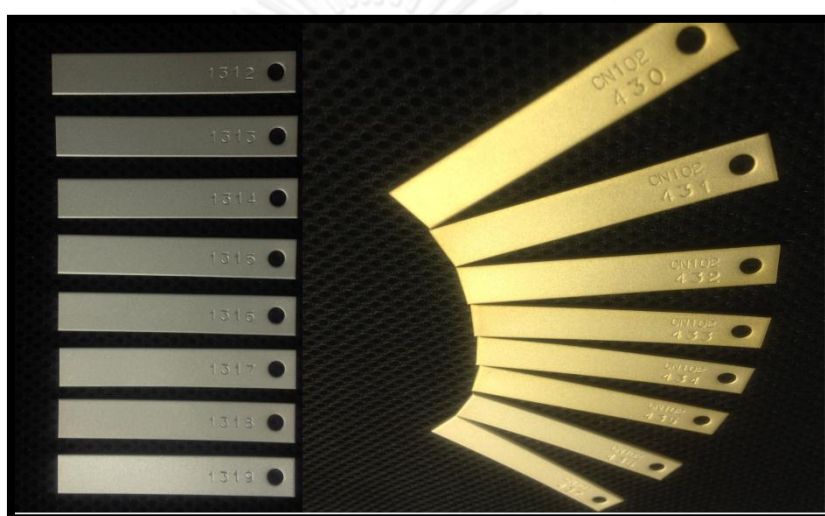
อัลตราโซนิกแบบอ่างเป็นเครื่องอัลตราโซนิกที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการทำความสะอาดหรือกิจกรรมอื่นๆ ในอุตสาหกรรมทั่วไป การทดลองนี้ใช้อัลตราโซนิกแบบอ่างยี่ห้อ J.Y. Tech รุ่น MS-4010 ที่มีปริมาตร 10 ลิตร ความถี่ 40 เฮิร์ต (Hertz) และทำกำลังไฟสูงสุดที่ 180 วัตต์ (Watt) รูปที่ 3.15 แสดงเครื่องอัลตราโซนิกแบบอ่าง



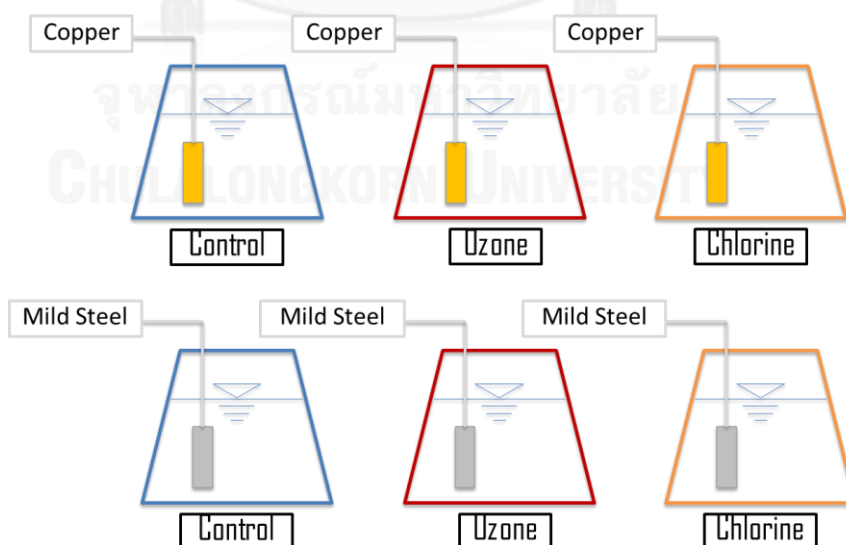
รูปที่ 3.15 เครื่องอัลตราโซนิกแบบอ่าง

3.3.5 แผ่นโลหะทดสอบการกัดกร่อน

โอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง ดังนั้นการนำโอโซนมาประยุกต์ใช้จึงต้องทำการทดสอบอัตราการกัดกร่อน อาจมีผลกระทบกับโลหะที่มีในระบบ โดยการทดลองนี้ใช้วิธีวิเคราะห์อัตราการกัดกร่อนโดยใช้วิธีวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM G1 – 03 ((ASTM), 2008b) ทำการทดสอบกับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Mild steel) และทองแดง (Copper) ซึ่งเป็นโลหะที่ใช้ทั่วไปในระบบท่อหล่อเย็น (Choudhury et al., 2012) จากบริษัท European Corrosion Supplies Limited รูปที่ 3.16 และรูปที่ 3.17 แสดงแผ่นโลหะทดสอบการกัดกร่อนแบบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและทองแดงและแผนผังการทดลองการกัดกร่อนของโลหะ ตามลำดับ



รูปที่ 3.16 แผ่นโลหะทดสอบการกัดกร่อน



รูปที่ 3.17 แผนผังการทดลองการกัดกร่อนของโลหะ

การทดลองในงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 5 ชุดการทดลอง โดยชุดการทดลองที่ 1 เป็นการวิเคราะห์ลักษณะของน้ำประปาและน้ำหล่อเย็นเพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการเลือกใช้เทคโนโลยีและพิสูจน์ว่าพารามิเตอร์ใดที่เป็นตัวควบคุมการโบลว์ดาวน์ของระบบหล่อเย็น ชุดการทดลองที่ 2 และ 3 เป็นการศึกษาความเข้มข้นและเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในใช้ไอโซนในการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และอัตราการกัดกร่อน ชุดการทดลองที่ 4 เป็นการศึกษากำลังและเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในใช้อัลตราโซนิกในการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ สุดท้ายชุดการทดลองที่ 5 เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์และทางเทคนิคในการประยุกต์ใช้ไอโซนและอัลตราโซนิกในหล่อเย็น โดยตารางที่ 3.6 แสดงสรุปแผนการทดลองทั้งหมดของงานวิจัยนี้

ตารางที่ 3.6 สรุปแผนการทดลอง

ลำดับที่	การทดลอง	จำนวนการทดลอง
1	วิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของน้ำประปาและน้ำหล่อเย็นของโรงงานผลิตโอเลฟินส์	3
2	วิเคราะห์เวลาสัมผัสต่อการยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่ายโดยการใช้อิโซน	2
3	วิเคราะห์อัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและทองแดงจากการใช้อิโซน	3
4	วิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายและศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการกำจัดสาหร่ายจากน้ำโดยกระบวนการใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิก	4
5	ประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์และวิเคราะห์ศักยภาพในการใช้อิโซนและอัลตราโซนิกเพื่อทดแทนสารเคมีควบคุมจุลินทรีย์ในหล่อเย็นเมื่อเปรียบเทียบกับระบบเดิม	-

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 ลักษณะและองค์ประกอบของน้ำประปาและน้ำหล่อเย็น

การศึกษาลักษณะทั่วไปของน้ำประปาและน้ำหล่อเย็นเพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้โอโซนกับระบบน้ำหล่อเย็น เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) ที่รุนแรง จึงมีอ็อกซิเจนในน้ำบางชนิดที่มีความต้องการโอโซน (Ozone demand) สูง ได้แก่ ซัลไฟด์และไนไตรท์ที่มีความต้องการโอโซนเท่ากับ 2.2 และ 2 มิลลิกรัมต่อมิลลิกรัม ตามลำดับ (มันสิน ตันตุลเวศม์ et al., 2554) ซึ่งในการศึกษาของ (Energy, 1995) ไม่แนะนำให้ใช้โอโซนกับ น้ำที่มีความกระด้างและซัลเฟตที่มีค่ามากกว่า 500 มิลลิกรัม หินปูน ต่อลิตร และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

ทั้งนี้การใช้ออกซิเจนในน้ำยังสามารถบอกสภาวะความคงตัวของน้ำว่ามีแนวโน้มที่จะกัดกร่อนหรือเกิดตะกอนและที่สำคัญคือเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้โอโซนและอัลตราโซนิกเพื่อลดการก่อตัวของระบบหากลดการใช้สารเคมีเพื่อควบคุมจุลินทรีย์เป็นหนึ่งในปัจจัยในการควบคุมการก่อตัวของ

4.1.1 ลักษณะโดยทั่วไปของน้ำประปาและน้ำหล่อเย็น

ผลวิเคราะห์ลักษณะน้ำประปาและน้ำหล่อเย็นแสดงในตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 ตามลำดับ พีเอชในน้ำประปาอยู่ในช่วง 7.0-7.4 โดยหลังจากปรับปรุงคุณภาพในเพื่อใช้ในระบบหล่อเย็นด้วยการเติมสารเคมีแล้วค่าพีเอชจะเพิ่มขึ้นมาในช่วง 8.0-8.5 เมื่อคำนวณค่า Langelier Saturation Index (LSI) เท่ากับ 0.68 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นั่นคือแคลเซียมในน้ำหล่อเย็นไม่มีเสถียรภาพและมีแนวโน้มที่จะตกตะกอนออกจากน้ำ หรือระบบมีแนวโน้มที่จะเกิดตะกอนมากขึ้น ซึ่งสภาวะนี้เป็นการป้องกันระบบหล่อเย็นจากการกัดกร่อน โดยค่า Langelier Saturation Index คำนวณได้ดังสมการ

$$\text{Langelier Saturation Index (LSI)} = \text{pH} - \text{pH}_s$$

เมื่อ pH คือ ค่าพีเอชของน้ำ

pH_s คือ ค่าพีเอชที่อิ่มตัวของแคลเซียมและแคลไซต์ โดยคำนวณได้ดังสมการ

$$\text{pH}_s = (9.3 + A + B) - (C + D)$$

เมื่อ $A = (\text{Log}_{10} [\text{ค่าของแข็งละลายน้ำ (TDS)}] - 1) / 10$

$B = -13.12 \times \text{Log}_{10} (\text{อุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียส} + 273) + 34.55$

$C = \text{Log}_{10} [\text{ค่าแคลเซียมในหน่วยของแคลเซียมคาร์บอเนต}] - 0.4$

$D = \text{Log}_{10} [\text{ค่าสภาพความเป็นด่างในหน่วยของแคลเซียมคาร์บอเนต}]$

พารามิเตอร์ในการควบคุมการโบว์ตาวนน้ำหล่อเย็นประกอบด้วย แคลเซียม คลอไรด์และไบคาร์บอเนต ที่กำหนดไว้ในช่วง 150-200 และ 250-300 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากข้อมูลผลวิเคราะห์ลักษณะของน้ำหล่อเย็นพบว่าแคลเซียมและไบคาร์บอเนต มีค่าเพียง 66-85 และ 203-229 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่คลอไรด์มีค่าอยู่ในช่วง 142-222 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งใกล้เคียงกับค่าควบคุมการโบว์ตาวนมากที่สุด จึงสามารถสรุปได้ว่าคลอไรด์เป็นพารามิเตอร์ที่ควบคุมการโบว์ตาวนในระบบหล่อเย็นนี้ โดยรอบการใช้งาน (Cycle of concentration; CC) อยู่ในช่วง 5-6 รอบ ดังนั้นหากสามารถลดการใช้คลอรีนในการควบคุมจุลินทรีย์ได้ จะสามารถลดการโบว์ตาวนในระบบลงและเพิ่มรอบการใช้งานได้

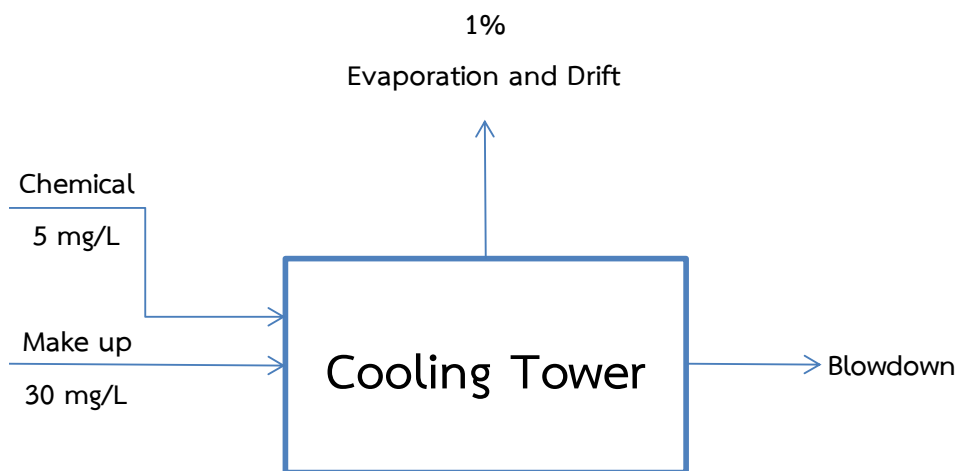
ตารางที่ 4.1 ลักษณะโดยทั่วไปของน้ำประปา

พารามิเตอร์	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
โซเดียม	มิลลิกรัมต่อลิตร	21	16	15	5.1	7
โพแทสเซียม	มิลลิกรัมต่อลิตร	12	11	10	9	8
แคลเซียม	มิลลิกรัมต่อลิตร	12	13	13	11	12
แมกนีเซียม	มิลลิกรัมต่อลิตร	3.6	2.5	2.1	2.6	3.1
คลอไรด์	มิลลิกรัมต่อลิตร	33	20	22	47	23
ไนเตรต	มิลลิกรัมต่อลิตร	ND	0.6	ND	ND	ND
ซัลเฟต	มิลลิกรัมต่อลิตร	28	21	76	74	23
ฟอสเฟต	มิลลิกรัมต่อลิตร	ND	0.015	ND	ND	ND
ไบคาร์บอเนต	มิลลิกรัม (หินปูน) ต่อลิตร	60	72	87.5	86	80
พีเอช	-	7.1	7.0	7.4	7.2	7.0
ของแข็งละลายน้ำ	มิลลิกรัมต่อลิตร	162	146	133	129	120
ค่าการนำไฟฟ้า	ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร	207	200	198	196	192

ตารางที่ 4.2 ลักษณะโดยทั่วไปของน้ำหล่อเย็น

พารามิเตอร์	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าควบคุม*
โซเดียม	มิลลิกรัมต่อลิตร	130	126	107	109	156	-
โพแทสเซียม	มิลลิกรัมต่อลิตร	75	66	55	48	61	-
แคลเซียม	มิลลิกรัมต่อลิตร	78	78	85	66	70	150-200
แมกนีเซียม	มิลลิกรัมต่อลิตร	24	24	20	22	21	-
คลอไรด์	มิลลิกรัมต่อลิตร	180	148	142	165	222	150-200
ไนเตรต	มิลลิกรัมต่อลิตร	39	4	40	11	11	-
ซัลเฟต	มิลลิกรัมลิตร	177	157	183	193	223	-
ฟอสเฟต	มิลลิกรัมต่อลิตร	-	3.6	11	17	26	-
ไบคาร์บอเนต	มิลลิกรัม (หินปูน) ต่อลิตร	225	225	203	229	213	250-300
พีเอช	-	8.1	8.0	8.4	8.5	8.1	-
ของแข็งละลายน้ำ	มิลลิกรัมต่อลิตร	1,024	919	1,050	884	915	-
ค่าการนำไฟฟ้า	ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร	1,268	1,240	1,207	1,220	1,170	-

*ข้อมูลจากโรงงาน



รูปที่ 4.1 แผนผังสมดุลคลอไรด์ในหอหล่อเย็น

ตารางที่ 4.3 รายการคำนวณสมมูลคลอไรด์ในหอยหล่อเย็น

รอบการใช้น้ำ	คลอไรด์	
	ไบโอไซด์	ไม่ใช่ไบโอไซด์
0	30	31
10	42	36
20	50	43
30	59	51
40	69	60
50	80	69
60	92	79
70	105	91
80	130	113
90	136	118
100	155	133
110	175	151
120	197	170
130	221	191
140	248	214
150	278	240

การศึกษาสมมูลของคลอไรด์ในระบบหอยหล่อเย็น (แสดงในรูปที่ 4.1) เพื่อวิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นเปรียบเทียบกันระหว่างการเติมสารเคมีและการไม่ใช่สารเคมี โดยใช้ค่าคลอไรด์ที่ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการระเหย (Evaporation) เท่ากับร้อยละ 1 และอัตราการเติมสารเคมีเพื่อควบคุมจุลินทรีย์ในระบบเท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร (มันสิน ตันจุลเวศม์ et al., 2554)

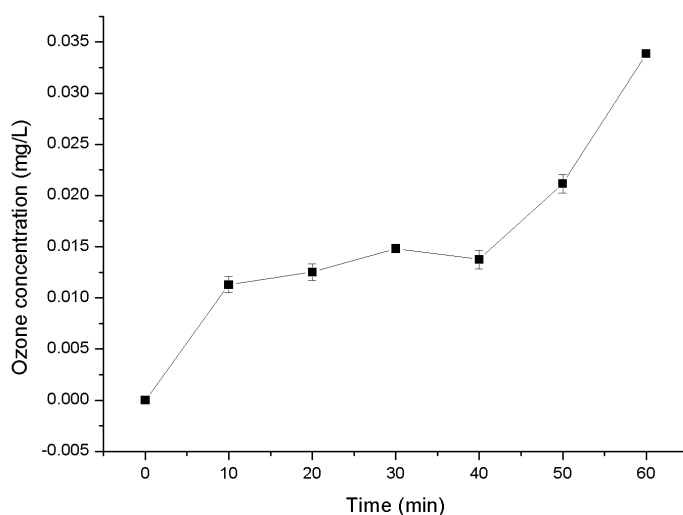
หากระบบไม่มีการเติมสารเคมีจะมีคลอไรด์เริ่มต้นเท่ากับ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อคำนวณพบว่าวัฏจักรความเข้มข้นมีค่าเท่ากับ 5 (คำนวณจากค่าคลอไรด์ที่ควบคุมไม่เกิน 150 มิลลิกรัมต่อลิตร) แต่หากมีการใช้คลอรีนโดยประเมินว่าเดิมที่ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้คลอไรด์เริ่มต้นเท่ากับ 35 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อคำนวณพบว่าวัฏจักรความเข้มข้นมีค่าเท่ากับ 4.3 การเพิ่มขึ้นของวัฏจักรความเข้มข้นคือการลดการใช้น้ำของระบบ

ยกตัวอย่างเช่น ที่น้ำทดแทน (M) เท่ากับ 600 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จะสามารถคำนวณปริมาณน้ำทดแทนได้ดังสมการที่ (2.2) คือ $B = M/CC$

ระบบที่วัฏจักรความเข้มข้น (CC) เท่ากับ 5 ต้องมีการโบลว์ดาวน์ (B) เท่ากับ 120 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง แต่หากระบบมีที่วัฏจักรความเข้มข้น (CC) เท่ากับ 4.3 ต้องมีการโบลว์ดาวน์ (B) เท่ากับ 139.5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

จากตารางที่ 4.3 พบว่าการใช้คลอรีนที่รอบการเวียนน้ำที่ 100 คลอไรด์จะถึงค่าที่กำหนด (150 มิลลิกรัมต่อลิตร) แต่หากไม่มีการใช้สารเคมีจะสามารถเวียนน้ำได้ถึงรอบที่ 110 ก่อนจะถึงค่าที่กำหนด ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าหากสามารถลดการใช้คลอรีนจะสามารถลดการใช้น้ำในหอหล่อเย็นได้ เนื่องจากการลดลงของอัตราการโบลว์ดาวน์ของระบบ ซึ่งการลดลงของอัตราการโบลว์ดาวน์เพราะว่าระบบสามารถเพิ่มรอบการเวียนน้ำได้มากขึ้น

4.1.2 ผลของการศึกษาความเข้มข้นของโอโซน



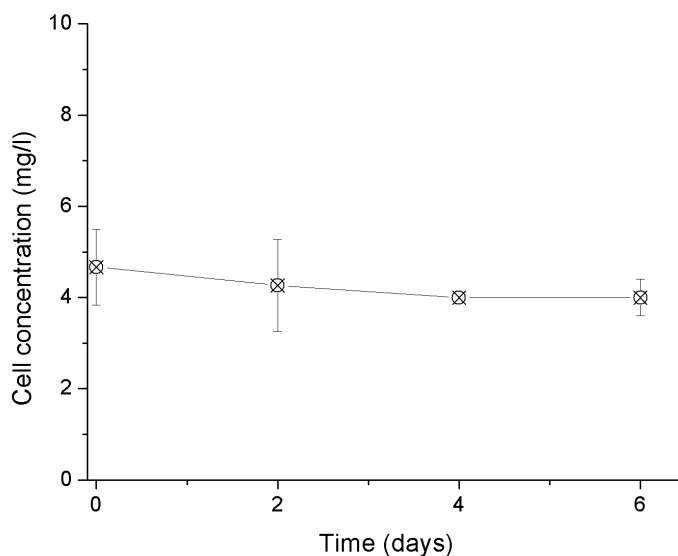
รูปที่ 4.2 ความเข้มข้นโอโซนละลายน้ำที่เวลา 0-60 นาที

การศึกษาผลความเข้มข้นของโอโซนละลายในงานวิจัยนี้วิเคราะห์ด้วยวิธีอินดิโก (Indigo method) วิเคราะห์ในน้ำปราศจากไอออน (Deionized Water) โดยเติมสารละลายอินดิโกและน้ำปราศจากไอออน ในอัตราส่วน 1 ต่อ 9 แล้วนำไปสัมผัสโอโซน จากนั้นวัดอัตราการดูดกลืนแสงที่ลดลงที่เวลาต่างๆ ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.2 พบว่าเครื่องผลิตโอโซนสามารถทำความเข้มข้นโอโซนได้ในช่วง 0.01-0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วงเวลาสัมผัสโอโซน 10-60 นาที ดังนั้นงานวิจัยนี้เลือกใช้ความเข้มข้นโอโซนในช่วงเวลา 10-30 นาที ซึ่งมีความเข้มข้นเท่ากับ 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.1.3 ผลของการใช้สารเคมีควบคุมจุลินทรีย์ในน้ำหล่อเย็น

สารเคมีที่ใช้ในการควบคุมจุลินทรีย์ในระบบน้ำหล่อเย็นคือ สารประกอบคลอรีน ซึ่งใช้โดยการเติมให้มีคลอรีนตกค้าง (Residual chlorine) ในระบบอยู่ตลอดเวลา การทดลองนี้วิเคราะห์การเจริญเติบโตของสาหร่ายโดยนำน้ำหล่อเย็นจากโรงงานโอเลฟินส์แห่งหนึ่งมาเติมอากาศ แล้ววิเคราะห์การเจริญเติบโตในระยะเวลา 6 วัน และการวิเคราะห์ปริมาณของแบคทีเรียเริ่มต้นและหลังจากการเติมคลอรีนในน้ำหล่อเย็น

ผลของการใช้สารประกอบคลอรีนในการควบคุมสาหร่ายในระบบหล่อเย็นแสดงในรูปที่ 4.3 พบว่าสารประกอบคลอรีนสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่ายในระยะเวลา 6 วัน โดยความเข้มข้นของเซลล์สาหร่ายวิเคราะห์ด้วยน้ำหนักแห้ง (Dry weight method) เริ่มต้นเท่ากับ 4.8 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นความเข้มข้นของเซลล์สาหร่ายลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงวันที่ 4 แล้วเริ่มคงที่ไปถึงวันที่ 6 นอกจากนี้ผลการทดลองพบว่าคลอรีนสามารถลดปริมาณแบคทีเรียวิเคราะห์ในจานเพาะเชื้อ (Spread plate technique) ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 50,000 ซีเอฟยูต่อมิลลิลิตร ให้เหลือ 500 ซีเอฟยูต่อมิลลิลิตร โดยใช้เวลาสัมผัส 30 นาที และคลอรีนตกค้าง 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

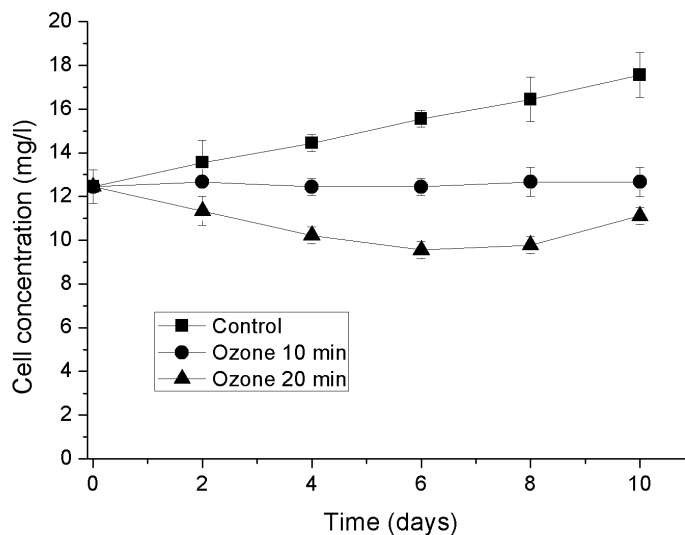


รูปที่ 4.3 ผลของการใช้สารเคมีควบคุมสาหร่ายในน้ำหล่อเย็น

4.2 ผลของการใช้โอโซนต่อแบคทีเรียและสาหร่ายในน้ำหล่อเย็น

การศึกษาการใช้โอโซนเพื่อทดแทนการใช้สารเคมีในการควบคุมจุลินทรีย์ในน้ำหล่อเย็นแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือการศึกษาผลของการใช้โอโซนต่อสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* ซึ่งเป็นสายพันธุ์ที่พบได้ทั่วไปในระบบหล่อเย็น การศึกษาผลของการใช้โอโซนต่อสาหร่ายที่พบในน้ำหล่อเย็นจริงและการศึกษาผลของการใช้โอโซนต่อแบคทีเรียที่พบในน้ำหล่อเย็นจริง

4.2.1 ผลของการใช้โอโซนต่อสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris*

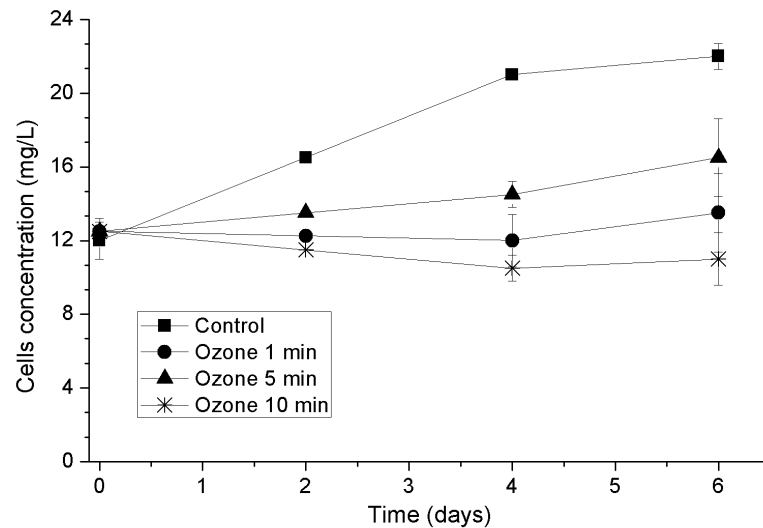


รูปที่ 4.4 ผลของการใช้โอโซนต่อสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris*

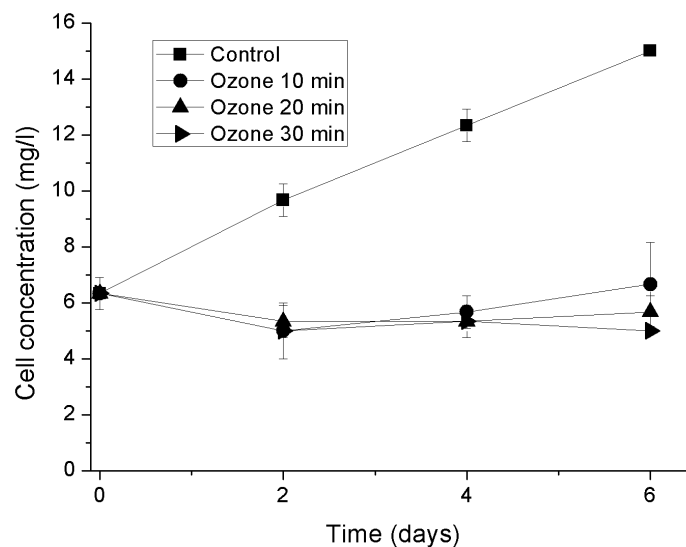
การทดลองใช้โอโซนเพื่อการยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* เป็นชุดการทดลองเบื้องต้นเพื่อศึกษาความสามารถในการยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่ายด้วยการใช้โอโซน เพื่อหาช่วงเวลาสัมผัสที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ในการทดลองการใช้โอโซนกับน้ำหล่อเย็นจริง อีกทั้งยังสามารถเป็นข้อมูลที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้โอโซนในหอหล่อเย็นในสถานะอื่นๆ เนื่องจากสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* เป็นสาหร่ายสีเขียวชนิดที่พบในหอหล่อเย็นทั่วไป

ผลการใช้โอโซนความเข้มข้นโอโซน 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร เวลาสัมผัส 10 และ 20 นาที ต่อการยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* ความเข้มข้นสาหร่ายเริ่มต้นวิเคราะห์ด้วยวิธีน้ำหนักแห้ง (Dry weight method) เท่ากับ 12.4 มิลลิกรัมต่อลิตร สาหร่ายถูกเลี้ยงด้วยอาหารเลี้ยงเชื้อชนิด N-8 ในถังปฏิกรณ์ที่มีการเติมอากาศและให้แสงด้วยหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ สามารถเจริญเติบโตได้อย่างต่อเนื่อง จนมีความเข้มข้นเท่ากับ 17.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 10 จากรูปที่ 4.4 พบว่าการใช้โอโซนความเข้มข้นโอโซน 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร เวลาสัมผัส 10 และ 20 นาที สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* ได้อย่างน้อย 10 วัน โดยเวลาสัมผัสโอโซน 10 นาที ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของเซลล์สาหร่ายอย่างมีนัยสำคัญในระยะเวลา 10 วัน และน้ำหล่อเย็นที่สัมผัสโอโซนเป็นเวลา 20 นาที พบว่าความเข้มข้นของสาหร่ายลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึง 9.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 6 และไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญจนถึงวันที่ 10 ของการทดลอง

4.2.2 ผลของการใช้โอโซนต่อสาหร่ายในน้ำหล่อเย็น



รูปที่ 4.5 ผลของการใช้โอโซนต่อสาหร่ายในน้ำหล่อเย็น เวลาสัมผัส 1-10 นาที



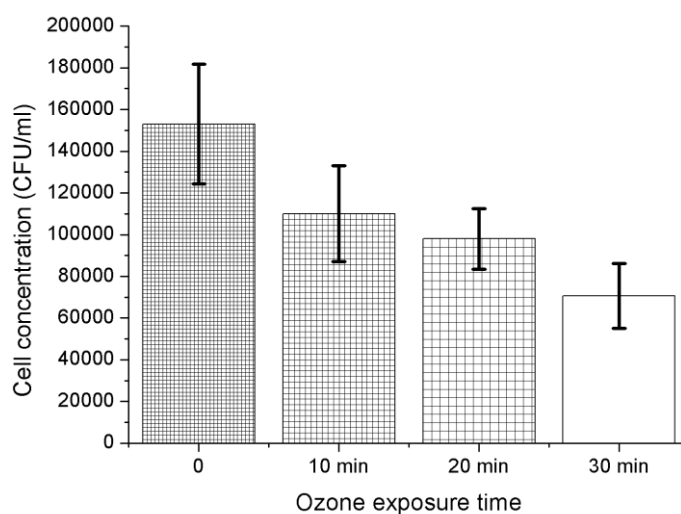
รูปที่ 4.6 ผลของการใช้โอโซนต่อสาหร่ายในน้ำหล่อเย็น เวลาสัมผัส 10-30 นาที

ผลของการใช้โอโซนกับการยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่ายในน้ำหล่อเย็นจริงจากโรงงาน โอเลฟินส์แห่งหนึ่ง ในระยะเวลา 6 วัน โดยความเข้มข้นของเซลล์สาหร่ายเริ่มต้นวิเคราะห์ด้วยวิธีน้ำหนักแห้ง (Dry weight method) เท่ากับ 6.5 มิลลิกรัมต่อลิตร สาหร่ายถูกเลี้ยงในถังปฏิกิริยาที่มีการเติมอากาศและให้แสงด้วยหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ตลอดเวลา สามารถเจริญเติบโตได้อย่างต่อเนื่อง จนมีความเข้มข้นเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 6 รูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6

แสดงการยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่ายด้วยโอโซนที่เวลาสัมผัส 10 นาที ความเข้มข้นโอโซน 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าเวลาสัมผัสที่ต่ำกว่า 10 นาที ไม่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่ายได้ แต่การเพิ่มเวลาสัมผัสเป็น 20 และ 30 นาที ไม่พบความแตกต่างของการเจริญเติบโตของสาหร่ายจากน้ำหล่อเย็นจริงอย่างมีนัยสำคัญ

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่ากลไกการฆ่าเชื้อโรคของโอโซนคือการออกซิไดซ์เยื่อหุ้มเซลล์แล้วทำให้เซลล์เสียหาย (Victorin, 1992 อ้างถึงใน (Guzel-Seydim, Greene, & Seydim, 2004) โดยใช้โอโซนความเข้มข้น 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร เวลาสัมผัส 10 นาที หรือสามารถแปลงเป็นหน่วยความเข้มข้นต่อเวลาสัมผัส (Concentration of disinfectant and contact time) ได้เท่ากับ 0.1 ซึ่งถือว่าต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ (Miao & Tao, 2009) ที่ใช้ CT เท่ากับ 30 และ 300 กำจัด *M.aeruginosa* ได้ร้อยละ 71.6 และ 92 ตามลำดับ งานวิจัยนี้ใช้ค่า CT ต่ำกว่าค่าที่ใช้ในงานอื่นๆ มาก เพราะความเข้มข้นของสาหร่ายที่น้อยกว่าและใช้โอโซนให้เซลล์สาหร่ายเสียหายเพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตไม่ได้วัดผลในการฆ่าเชื้อโรค

4.2.3 ผลของการใช้โอโซนแบบที่เรียในน้ำหล่อเย็น



รูปที่ 4.7 ผลของการใช้โอโซนแบบที่เรียในน้ำหล่อเย็น

แบคทีเรียในน้ำหล่อเย็นจริงมีปริมาณแบคทีเรียที่วิเคราะห์ด้วยวิธีจานเพาะเชื้อ (plate count method) อยู่ในช่วง 10^5 ซีเอฟยูต่อมิลลิลิตร เมื่อนำไปสัมผัสโอโซนความเข้มข้น 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เวลาสัมผัส 10 20 และ 30 นาที หรือในหน่วยของความเข้มข้นและเวลา (Concentration of disinfectant and contact time CT) เท่ากับ 0.1 0.2 และ 0.3 พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดแบคทีเรียได้ร้อยละ 28 36 และ 54 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 โดยนับว่ามีประสิทธิภาพต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ (Jyoti & Pandit, 2004b) ซึ่งใช้ค่า CT เท่ากับ 7.5 15 และ 30 สามารถลดปริมาณแบคทีเรียได้ร้อยละ 42 52 และ 60 ตามลำดับ และ Viera 1999 ใช้โอโซน CT เท่ากับ 4.2 สามารถกำจัด *P.fluorescens* ที่ความเข้มข้น 10^6 ซีเอฟยูต่อมิลลิลิตร ได้ทั้งหมด ทั้งนี้ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพอาจมีผลมาจากจำนวนเซลล์

แบคทีเรียเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลอง โดยการทดลองของ (Jyoti & Pandit, 2004b) ใช้จำนวนเซลล์อยู่ในช่วง 1,000-8,000 ซีเอฟยูต่อมิลลิลิตร และความแตกต่างของสายพันธุ์แบคทีเรียที่อยู่ในน้ำหล่อเย็นก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ควรศึกษาเพิ่มเติมในการวิจัยต่อไปเช่นกัน

จากผลการทดลองพบว่าการใช้ไอโซนความเข้มข้น 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร เวลาสัมผัส 10 นาที หรือคำนวณในหน่วย CT ได้เท่ากับ 0.1 สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* และสาหร่ายสายพันธุ์ผสมในน้ำหล่อเย็นได้ เป็นระยะเวลา 10 และ 6 วัน ตามลำดับ แต่ผลการใช้ไอโซน CT เท่ากับ 0.3 สามารถลดแบคทีเรียได้เพียงร้อยละ 60 กลไกที่ไอโซนใช้ในการทำลายจุลินทรีย์แบ่งออกได้เป็นสองกลไกหลักคือการออกซิไดซ์หมู่ซัลไฟไฮดริล (Sulfhydryl group) และกรดอะมิโน (Amino acid) ในเอนไซม์ (Enzyme) เปปไทด์ (Peptide) และโปรตีนให้สั้นลง และอีกกลไกคือการออกซิไดซ์กรดไขมันไม่ละลายน้ำ (Unsaturated fatty acid) ซึ่งจะทำให้เซลล์เสียหายแล้วของของเหลวในเซลล์รั่วออกมา (Victorin, 1992 อ้างถึงใน (Guzel-Seydim et al., 2004)

4.3 ผลการวิเคราะห์อัตราการกัดกร่อนของโลหะจากการใช้ไอโซนในน้ำหล่อเย็น

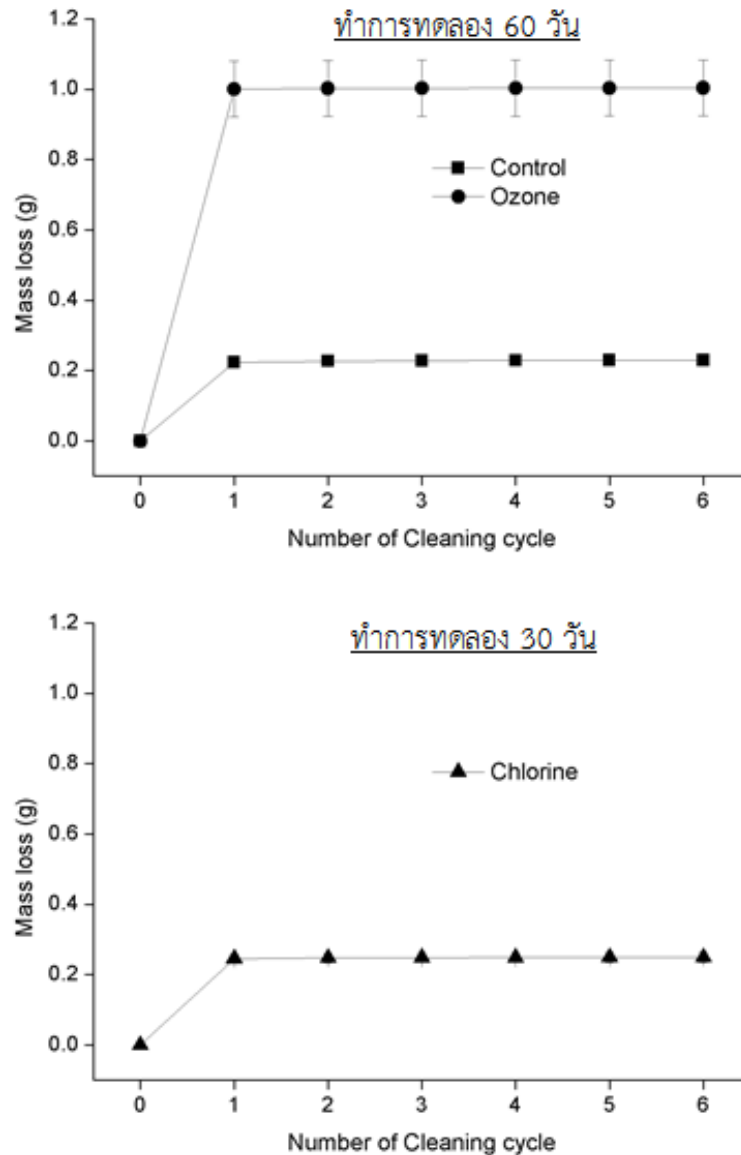
ไอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรงมากกว่าคลอรีนถึง 1.52 เท่า จึงมีความสามารถในการยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่ายในน้ำหล่อเย็นได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่อย่างไรก็ตามไอโซนยังสามารถกัดกร่อนวัสดุในระบบหล่อเย็นได้ ดังนั้นเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ไอโซนในระบบหล่อเย็นจึงต้องมีการวิเคราะห์อัตราการกัดกร่อนที่เกิดขึ้น โดยในการทดลองนี้ศึกษาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและทองแดง ซึ่งเป็นโลหะที่มีทั่วไปในระบบน้ำหล่อเย็น จำลองการทดลองโดยออกแบบให้ระบบเติมไอโซน 8 ชั่วโมงต่อวัน เปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่มีการเติมสารเคมี และชุดการทดลองที่เติมคลอรีน 1 ครั้งต่อวัน ระยะเวลา 60 วัน ซึ่งชุดการทดลองไอโซนและชุดการทดลองที่ไม่มีการเติมสารเคมีเท่ากับ 60 วัน ชุดการทดลองที่เติมคลอรีนเท่ากับ 30 วัน การคำนวณอัตราการกัดกร่อนสมการ

$$\text{อัตราการกัดกร่อน} = \frac{K \times W}{A \times T \times D}$$

โดยที่	K	คือ ค่าคงที่ หน่วยนิ้วต่อปี (ipy) ใช้ 3.45×10^3
	T	คือ เวลาสัมผัส (ชั่วโมง)
	A	คือ พื้นที่ (ตารางเซนติเมตร)
	W	คือ มวลที่หายไป (กรัม)
	D	คือ ความหนาแน่นของโลหะ (กรัม/ตารางเซนติเมตร)

โดยพื้นที่ของแผ่นโลหะทดสอบเท่ากับ 9.68 ตารางเซนติเมตร ความหนาแน่นของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและทองแดงเท่ากับ 7.86 และ 8.94 กรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ (ASTM G1-03)

4.3.1 อัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

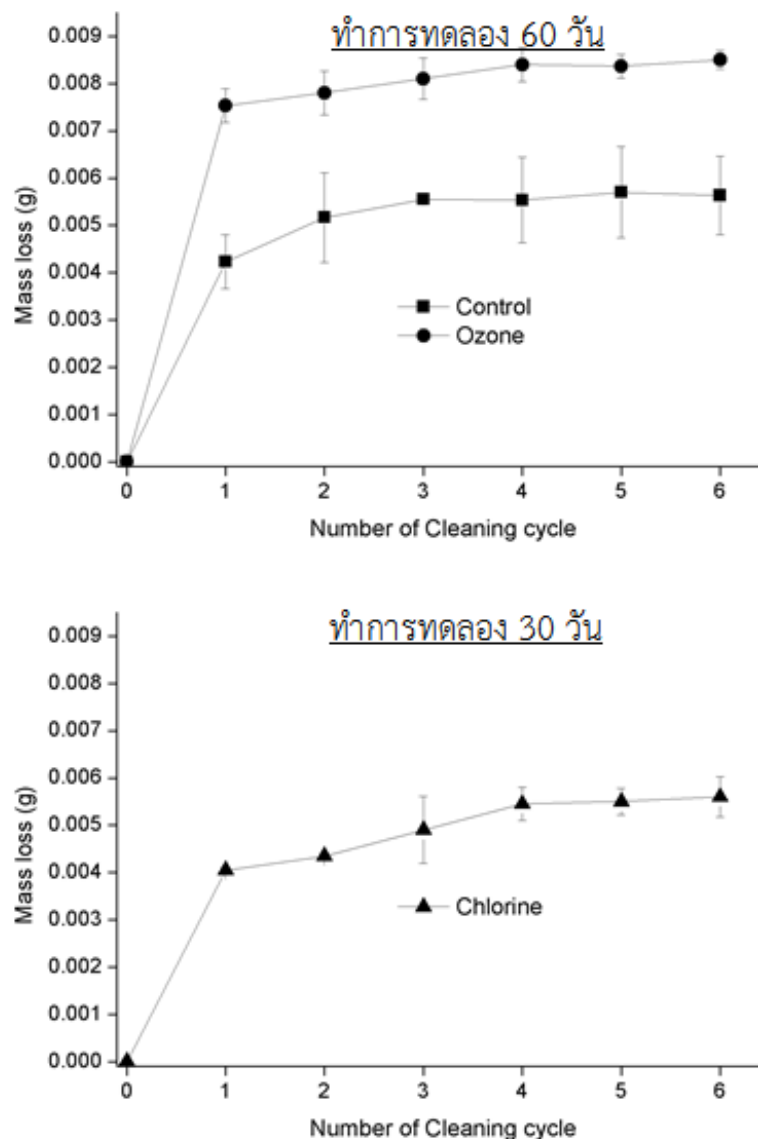


รูปที่ 4.8 น้ำหนักที่หายไปต่อรอบของการล้างของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

ผลการทดลองการศึกษาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำแสดงในรูปรูปที่ 4.8 โดยการล้างทำความสะอาดเพื่อกำจัดผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการกัดกร่อน (Corrosion products) ทั้งหมด 6 ครั้ง เพื่อกำจัดผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการกัดกร่อน (Corrosion product) ซึ่งต้องทำการล้างทำให้แห้งแล้วชั่งน้ำหนักจนน้ำหนักที่หายไปมีการลดลงอย่างคงที่ ดังนั้นมวลที่หายไป (W) เลือกใช้ค่าที่ได้จากการล้างครั้งที่ 1 สำหรับชุดการทดลองที่ไม่มีการเติมสารเคมีและชุดการทดลองที่เติมคลอรีน 1 ครั้งต่อวัน เลือกใช้ค่าที่ได้จากการล้างครั้งที่ 2 ชุดการทดลองที่เติมโอโซน 8 ชั่วโมงต่อวัน โดยที่เวลาทำการทดลองของชุดการทดลองที่ไม่มีการเติมสารเคมีและชุดการทดลองที่เติมโอโซน 8 ชั่วโมงต่อวัน เท่ากับ 60 วัน ส่วนชุดการทดลองที่เติมคลอรีน 1 ครั้งต่อวัน 30 วัน เมื่อคำนวณอัตราการกัดกร่อน

พบว่า อัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในชุดการทดลองที่ไม่มีการเติมสารเคมี ชุดการทดลองที่เติมคลอรีนและชุดการทดลองที่เติมโอโซนเท่ากับ 0.007 0.032 และ 0.015 นิ้วต่อปี ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าอัตราการกัดกร่อนของชุดการทดลองที่เติมคลอรีนมากกว่า ชุดการทดลองที่ไม่มีการเติมสารเคมีถึง 2 เท่า และอัตราการกัดกร่อนของชุดการทดลองที่เติมโอโซน 8 ชั่วโมงต่อวัน มีค่าสูงกว่าอัตราการกัดกร่อนที่ยอมรับได้ ซึ่งเท่ากับ 0.002-0.003 นิ้วต่อปี (Seneviratne, 2006)

4.3.2 อัตราการกัดกร่อนของทองแดง



รูปที่ 4.9 น้ำหนักที่หายไปต่อรอบของการล้างของทองแดง

ผลการทดลองการศึกษาอัตราการกัดกร่อนของทองแดงในระบบน้ำหล่อเย็นแสดงในรูปที่ 4.9 โดยการล้างทำความสะอาดเพื่อกำจัดผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการกัดกร่อน (Corrosion products) ทั้งหมด 6 ครั้ง เพื่อกำจัดผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการกัดกร่อน (Corrosion product) ซึ่งต้องทำการล้าง และทำให้แห้งแล้วซึ่งน้ำหนักจนน้ำหนักที่หายมีการลดลงอย่างคงที่ ดังนั้นมวลที่หายไป (W) เลือกใช้ ค่าที่ได้จากการล้างครั้งที่ 4 สำหรับชุดการทดลองที่มีการเติมไอโซน 8 ชั่วโมงต่อวัน และคลอรีน 1 ครั้งต่อวัน เลือกใช้การล้างครั้งที่ 1 สำหรับชุดการทดลองที่ไม่มีการเติมสารเคมี โดยที่เวลาทำการทดลองของชุดการทดลองที่ไม่มีการเติมสารเคมีและชุดการทดลองที่เติมไอโซน 8 ชั่วโมงต่อวัน เท่ากับ 60 วัน ส่วนชุดการทดลองที่เติมคลอรีน 1 ครั้งต่อวัน 30 วัน เมื่อคำนวณอัตราการกัดกร่อน พบว่าอัตราการกัดกร่อนของทองแดงในชุดการทดลองที่ไม่มีการเติมสารเคมี ชุดการทดลองที่เติมคลอรีน 1 ครั้งต่อวันและชุดการทดลองที่เติมไอโซน 8 ชั่วโมงต่อวัน เท่ากับ 0.00014 0.00021 และ 0.00022 นิ้วต่อปี ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าอัตราการกัดกร่อนของคลอรีน มากกว่าชุดไอโซนและชุดที่ไม่มีการเติมสารเคมี แต่อัตราการกัดกร่อนของชุดการทดลองที่เติมไอโซน 8 ชั่วโมงต่อวัน และชุดการทดลองที่เติมคลอรีน 1 ครั้งต่อวัน มีค่าสูงกว่าอัตราการกัดกร่อนที่ยอมรับได้ในหอหล่อเย็น ซึ่งเท่ากับ 0.0001-0.0002 นิ้วต่อปี (M Seneviratne, 2006)

จากผลการวิเคราะห์หัตถการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและทองแดง จากการใช้ไอโซน พบว่าอัตราการกัดกร่อนของไอโซนสูงกว่าอัตราการกัดกร่อนที่ยอมรับได้ในระบบหล่อเย็นทั่วไป ซึ่งใกล้เคียงกับผลการทดลองการใช้ไอโซนในหอหล่อเย็นของ (Keisher & Balog, 1992) พบว่ามีอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและทองแดงเท่ากับ 0.02057 และ 0.00025 นิ้วต่อปี ตามลำดับ แม้อัตราการกัดกร่อนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำมีค่าสูงมาก แต่อัตราการกัดกร่อนของทองแดงของการใช้ไอโซนและการใช้คลอรีนมีค่าใกล้เคียงกัน เท่ากับ 0.00022 และ 0.00021 นิ้วต่อปี ตามลำดับ ซึ่งเป็นอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (0.0001-0.0002 นิ้วต่อปี) โดยเป็นผลมาจากความสามารถต้านทานการกัดกร่อนของไอโซน เนื่องจากทองแดงเป็นวัสดุที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนของไอโซนได้ดี อีกทั้งการปรับปรุงคุณภาพน้ำ (makeup water) ก่อนเข้าระบบก็ได้มีการควบคุม Langlier Index ให้อยู่ในสถานะที่มีแนวโน้มที่จะเกิดตะกอนและการใช้สารเคมีป้องกันการกัดกร่อนสามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ส่วนหนึ่ง อย่างไรก็ตามโดยแม้อัตราการกัดกร่อนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำของไอโซนมีค่าสูงกว่าค่ายอมรับได้ แต่เนื่องจากไอโซนสามารถสลายตัวได้อย่างรวดเร็ว จึงสามารถนำน้ำหล่อเย็นบางส่วนที่สัมผัสไอโซนแล้ว วนกลับไปพ่นให้เป็นละอองผ่านหัวฉีดของหอหล่อเย็นให้ไอโซนสลายตัวเพื่อลดความเข้มข้นของไอโซนลงก่อนนำกลับไปแลกเปลี่ยนความร้อน (W. C. Mayer, 2001) หรือการเปลี่ยนวัสดุที่ต้องสัมผัสไอโซนในช่วงที่มีความเข้มข้นสูง ให้เป็นพีวีซีหรือเหล็กกล้าไร้สนิมก็สามารถลดอัตราการกัดกร่อนได้ (Energy, 1995) ดังนั้นไอโซนความเข้มข้น 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร เวลาการเดินระบบ 8 ชั่วโมงต่อวัน สามารถประยุกต์ใช้กับระบบน้ำหล่อเย็นเพื่อทดแทนการใช้สารเคมีเพื่อควบคุมจุลินทรีย์ได้ภายใต้เงื่อนไขสถานะด้านการป้องกันการกัดกร่อน

โดยตารางที่ 4.4 แสดงอัตราการกัดกร่อนจากชุดการทดลองที่ไม่มีการเติมสารเคมี ชุดการทดลองที่เติมคลอรีน 1 ครั้งต่อวันและชุดการทดลองที่เติมไอโซน 8 ชั่วโมงต่อวัน ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและทองแดง

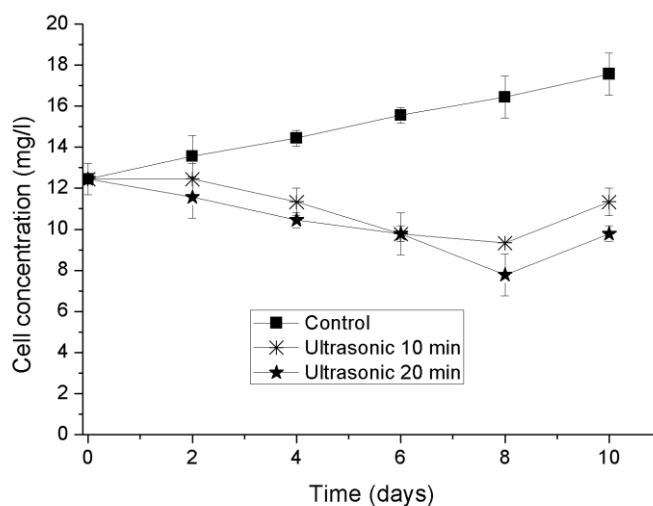
ตารางที่ 4.4 สรุปผลการทดลองการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและทองแดง

วัสดุทดสอบ	อัตราการกัดกร่อน (นิ้วต่อปี)		
	ไม่มีการเติมสารเคมี	คลอรีน	โอโซน
เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Mild steel)	0.007	0.032	0.015
ทองแดง (Copper)	0.00014	0.00021	0.00022

4.4 ผลของการใช้อัลตราโซนิกต่อสาหร่ายและแบคทีเรียในน้ำหล่อเย็น

การศึกษาการใช้อัลตราโซนิกเพื่อทดแทนการใช้สารเคมีในการควบคุมจุลินทรีย์ในน้ำหล่อเย็น แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ การศึกษาผลของการใช้อัลตราโซนิกต่อสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* ซึ่งเป็นสายพันธุ์ที่พบได้ทั่วไปในระบบหล่อเย็น การศึกษาผลของการใช้อัลตราโซนิกต่อสาหร่ายที่พบในน้ำหล่อเย็นจริง และการศึกษาผลของการใช้อัลตราโซนิกต่อแบคทีเรียที่พบในน้ำหล่อเย็นจริง

4.4.1 ผลของการใช้อัลตราโซนิกต่อสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris*



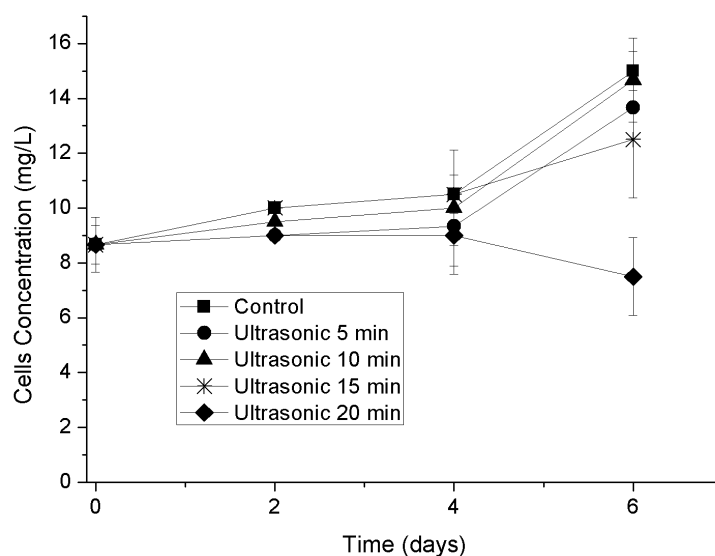
รูปที่ 4.10 ผลของการใช้อัลตราโซนิกต่อสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris*

สาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* เป็นสีเขียวที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน และไม่มีแก๊สแควิวอล (gas vacuoles) จากการวิจัยที่ผ่านมาของ (Tang, Wu, Hao, Chen, & Wu, 2004) และ (Ahn et al., 2007) พบว่าการใช้อัลตราโซนิกจะไม่มีประสิทธิภาพหากสาหร่ายนั้นไม่มีแก๊สแควิวอล แต่อย่างไรก็ตามอัลตราโซนิกยังสามารถสร้างลิวจิตเจ็ต (Liquid jet) ซึ่งเป็นการสลายตัวของฟองอากาศขนาดเล็กทำให้เกิดแรงเฉือนที่สามารถสร้างความเสียหายให้เยื่อหุ้มเซลล์และผนังเซลล์ของสาหร่ายได้ รูปที่ 4.10 แสดงความสามารถของอัลตราโซนิกในการยับยั้งการเจริญเติบโต

ของสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* โดยความเข้มข้นของเซลล์สาหร่ายวิเคราะห์ด้วยวิธี น้ำหนักแห้ง (Dry weight method) เริ่มต้นเท่ากับ 12.3 มิลลิกรัมต่อลิตร สาหร่ายในชุดควบคุม สามารถเจริญเติบโตได้อย่างต่อเนื่องจนมีความเข้มข้น 17.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 10 ส่วน สาหร่ายที่สัมผัสอัลตราโซนิกที่กำลัง 22 วัตต์ต่อลิตร เวลาสัมผัส 10 และ 20 นาที พบว่าความเข้มข้น ของเซลล์สาหร่ายลดลงอย่างต่อเนื่องในระยะเวลา 8 วัน จนมีความเข้มข้น 9.3 และ 7.8 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ หลังจากนั้นจึงเริ่มพบการกลับมาเจริญเติบโตของสาหร่าย

จากข้อมูลดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าอัลตราโซนิกที่กำลัง 22 วัตต์ต่อลิตร เวลาสัมผัส 10 นาที สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* ได้เป็นระยะเวลา 8 วัน และการเพิ่มเวลาสัมผัสเป็น 20 นาที ไม่มีผลต่อการยับยั้งการเจริญเติบโตอย่างมีนัยสำคัญ

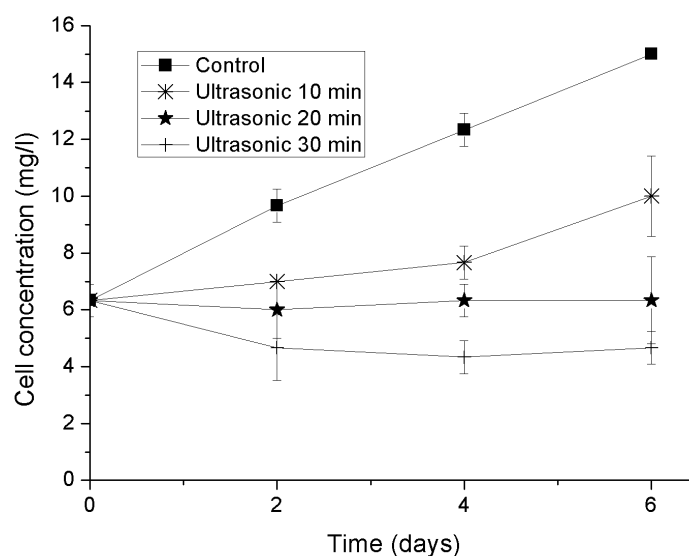
4.4.2 ผลของการใช้อัลตราโซนิกต่อสาหร่ายในน้ำหล่อเย็น



รูปที่ 4.11 ผลของการใช้อัลตราโซนิกต่อสาหร่ายในน้ำหล่อเย็น เวลาสัมผัส 5-20 นาที

รูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 แสดงผลของอัลตราโซนิกกำลัง 22 วัตต์ต่อลิตร เวลาสัมผัส 5-30 นาที ต่อสาหร่ายแบบสายพันธุ์ผสม (Mixed culture algae) ในน้ำหล่อเย็นจริง โดยความเข้มข้นของเซลล์สาหร่ายเริ่มต้นเท่ากับ 8.6 และ 7.3 มิลลิกรัมต่อลิตร สาหร่ายในชุดควบคุม สามารถเจริญเติบโตได้อย่างต่อเนื่องจนมีความเข้มข้น 15 และ 13.3 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าที่ เวลาสัมผัส 5-15 นาที ไม่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่ายแบบสายพันธุ์ผสมได้ ในเวลา 6 วัน แต่เมื่อเพิ่มเวลาสัมผัสเป็น 20 นาที ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักแห้ง อย่างมีนัยสำคัญ และที่เวลาสัมผัส 30 นาที พบการลดลงจากค่าน้ำหนักแห้งเริ่มต้นของปริมาณ สาหร่ายอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาสัมผัส 20 นาที

ดังนั้นการใช้อัลตราโซนิกกำลัง 22 วัตต์ต่อลิตร เวลาสัมผัส 20 นาที สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่ายแบบสายพันธุ์ผสมในน้ำหล่อเย็นจริงได้ ทั้งนี้หากเพิ่มเวลาสัมผัสก็จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการลดปริมาณสาหร่ายได้ เมื่อคำนวณกำลังของอัลตราโซนิกเป็นหน่วยกิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร ได้เท่ากับ 7.33 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งใกล้เคียงกับค่าใช้ในการกำจัด Phytoplankton ของ (Holm et al., 2008) ที่ต้องใช้กำลังอยู่ในช่วง 8-43 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร



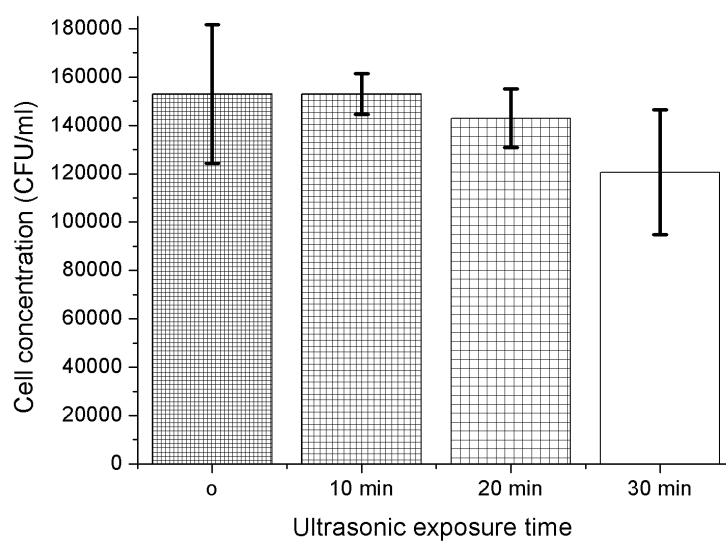
รูปที่ 4.12 ผลของการใช้อัลตราโซนิกต่อสาหร่ายในน้ำหล่อเย็น เวลาสัมผัส 10-30 นาที

4.4.3 ผลของการใช้อัลตราโซนิกต่อแบคทีเรียในน้ำหล่อเย็น

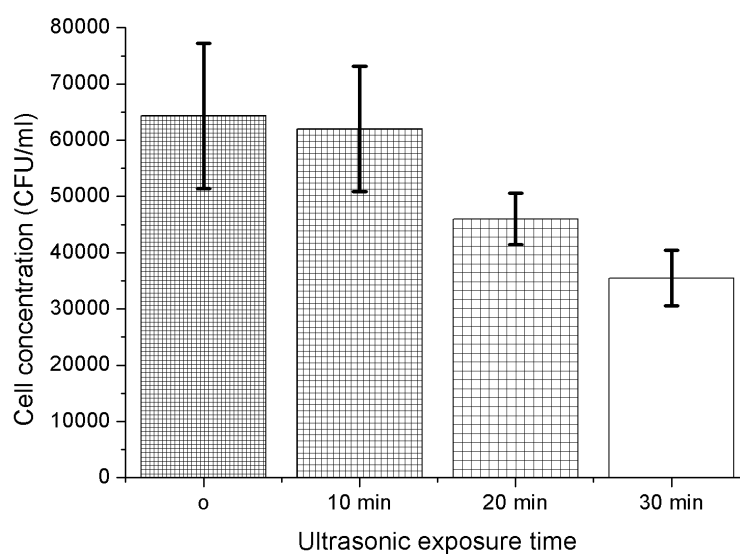
ผลของการใช้อัลตราโซนิกต่อแบคทีเรียในน้ำหล่อเย็น กำลัง 22 และ 88 วัตต์ต่อลิตร ที่เวลาสัมผัส 10-30 นาที แสดงในรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 ตามลำดับ โดยอัลตราโซนิกกำลัง 22 วัตต์ต่อลิตร ที่เวลาสัมผัส 20 และ 30 นาที พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดแบคทีเรียได้เพียงร้อยละ 7 และ 21 ตามลำดับ เมื่อเพิ่มกำลังขึ้นเป็น 88 วัตต์ต่อลิตร พบว่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 28 และ 45 ที่เวลาสัมผัส 20 และ 30 นาที ตามลำดับ แต่ปริมาณแบคทีเรียเริ่มต้นของทั้งสองชุดทดลองมีความแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของสูงสุดทั้งสองชุดทดลองนี้คือร้อยละ 45 ซึ่งถือว่าต่ำมากหากเปรียบเทียบกับระบบฆ่าเชื้อโรคแบบการใช้คลอรีน และยังต่ำกว่าประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรียด้วยโอโซนในชุดการทดลองก่อนหน้านี้ เมื่อคำนวณกำลังของอัลตราโซนิกเป็นหน่วย กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร ได้เท่ากับ 44 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร โดยการทดลองของ Holm และคณะ 2008 พบว่าหากต้องการประสิทธิภาพในการกำจัดแบคทีเรียได้ร้อยละ 90 ต้องใช้อัลตราโซนิกกำลัง 25-280 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของแบคทีเรียเนื่องจากมีโครงสร้างเซลล์ที่ต่างกัน

นอกจากนี้ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการใช้อัลตราโซนิก ได้แก่ขนาดของจุลชีพ โดยมีขนาดเล็กกว่าขนาดลิวทิจิต ลิวทิจิตจะไม่มีผลต่อเซลล์ที่มีขนาดเล็กกว่าลิวทิจิต (Doktycz

และ Suslick, 1990 อ้างถึงใน (Holm et al., 2008) เช่นตัวอย่างการทดลองของ Lu และคณะ 2002 (อ้างถึงใน Holm และคณะ 2008) พบว่าอัลตราโซนิกสามารถลดปริมาณ Silica Particle ขนาด 130 ไมโครเมตร ได้รวดเร็วกว่าขนาด 5 ไมโครเมตร หรือการใช้อัลตราโซนิกเพื่อกำจัด Nauplii copepod และ Rotifer ใช้กำลังเพียง 0.05 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร (Mason และคณะ, 2003) นอกจากนี้ความแตกต่างของโครงสร้างเซลล์ ส่งผลต่อการต้านทานอัลตราโซนิก (Wase และ Patel, 1985 อ้างถึงใน (Holm et al., 2008)



รูปที่ 4.13 ผลของการใช้อัลตราโซนิก 22 วัตต์ต่อลิตร ต่อแบคทีเรียในน้ำหล่อเย็น



รูปที่ 4.14 ผลของการใช้อัลตราโซนิก 88 วัตต์ต่อลิตร ต่อแบคทีเรียในน้ำหล่อเย็น

4.5 วิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์

จากการศึกษาลักษณะน้ำประปาที่ใช้เป็นน้ำเติมทดแทน (Make up) ก่อนการเติมสารเคมี เพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำก่อนเข้าระบบหอหล่อเย็นและน้ำหล่อเย็น พบว่ามีค่าคลอไรด์เฉลี่ย เท่ากับ 29 และ 172 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อคำนวณจำนวนวัฏจักรความเข้มข้น (Cycle of concentration) ของการใช้น้ำจากค่าคลอไรด์พบว่ามีความเท่ากับ 6 รอบ (ซึ่งใกล้เคียงกับค่าจำนวนรอบที่โรงงานใช้อยู่ที่ 5-6 รอบ) โดยเมื่อพิจารณาค่าคลอไรด์ที่กำหนดไว้สูงสุดเท่ากับ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าระบบสามารถมีวัฏจักรความเข้มข้นได้สูงสุดเท่ากับ 7 รอบ ดังนั้นหากเปลี่ยนจากการใช้สารเคมีเพื่อควบคุมจุลินทรีย์ในหอหล่อเย็นที่เป็นสารประกอบคลอรีน มาเป็นการใช้โอโซน หรืออัลตราโซนิกที่เป็นกระบวนการที่ไม่ใช้สารเคมี ซึ่งไม่ไปเพิ่มของคลอไรด์ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ควบคุมการโบลว์ดาวน์ในระบบ จะสามารถเพิ่มรอบของวัฏจักรความเข้มข้นได้น้อย 1 รอบ จากตารางที่ 2.2 พบว่าหากสามารถเพิ่มรอบการใช้น้ำจาก 5 รอบ เป็น 6 และ 7 รอบ สามารถลดการใช้ได้ร้อยละ 4 และ 7 ตามลำดับ เมื่อคำนวณจากอัตราการเติมน้ำทดแทนในระบบที่ 600-800 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง สามารถลดการใช้น้ำได้ 24-56 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง หรือ 576-1,344 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน

4.5.1 การใช้โอโซนกับน้ำหล่อเย็น

1) การสลายตัวของโอโซน

การทดลองการใช้โอโซนในหอหล่อเย็นพบว่าค่า CT ที่เหมาะสมในการใช้ยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่ายและแบคทีเรียในหอหล่อเย็นเท่ากับ 0.1 แต่เนื่องจากความเข้มข้นของโอโซนที่ใช้ในการทดลองนี้มีค่าต่ำเพียง 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงไม่ได้ทำการศึกษาการสลายตัวของโอโซน เมื่อนำไปประยุกต์ใช้กับระบบจริง ซึ่งอาจจะต้องใช้ความเข้มข้นที่สูงขึ้นแล้วลดเวลาสัมผัสลง เพื่อความยืดหยุ่นในการเดินระบบ โดยที่ควบคุมค่า CT ให้เท่ากับที่ได้จากการทดลอง ดังนั้นการศึกษ้อัตราการสลายตัวของโอโซนเพื่อให้ทราบว่าหลังจากหยุดเติมโอโซนไปแล้ว จะยังมีโอโซนตกค้างที่ยังมีความสามารถในฆ่าเชื้อโรคอยู่เพื่อลดอัตราการเติมโอโซนลงเพื่อให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ

รูปที่ 2.19 แสดงการสลายตัวในน้ำรีเวอร์สออสโมซิสและน้ำจากแม่น้ำ พบว่ามีค่าครึ่งชีวิต (Half life) ประมาณ 20 และ 5 นาที ตามลำดับ ซึ่งจะแตกต่างกันตามลักษณะและสิ่งเจือปนในน้ำ ซึ่งยังมีสิ่งเจือปนมากค่าครึ่งชีวิตก็จะสั้นขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นเพื่อให้มั่นใจว่าระบบจะสามารถเดินได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงควรเติมโอโซนให้มีความเข้มข้นและเวลาสัมผัสให้มีเท่ากับ CT (0.1) แต่ไม่ควรใช้โอโซนที่ความเข้มข้นสูงมากเกินไป เพราะจะทำให้มีผลกระทบต่ออัตราการกัดกร่อนในระบบ

2) ความปลอดภัยของการใช้โอโซน

โอโซนมีอำนาจการออกซิไดซ์สูง ดังนั้นโอโซนที่ไม่ละลายน้ำ (off gas) จึงอาจเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานได้ โดยความเข้มข้นโอโซนในพื้นที่ทำงานต้องไม่เกิน 0.01 พีพีเอ็ม ในเวลา 8

ชั่วโมง และหากความเข้มข้นสูงกว่า 0.6 พีพีเอ็ม ในเวลา 10 นาที อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อเจ้าหน้าที่ที่ปฏิบัติงานในบริเวณใกล้เคียงแต่เนื่องจากโอโซนมีกลิ่นฉุน จึงทำให้จุกจมูกมนุษย์สามารถรับรู้กลิ่นโอโซนที่ความเข้มข้นเพียง 0.001-0.05 พีพีเอ็ม ซึ่งต่ำกว่าค่าที่กำหนด 2-10 เท่า เช่นเดียวกับสารเคมีอันตรายทั่วไป อุปกรณ์ความปลอดภัยพื้นฐานที่ต้องเตรียมไว้สำหรับผู้ปฏิบัติงานควรมีดังนี้ (U.S.EPA, 1986)

ก) เครื่องช่วยหายใจและฝักบัวอาบน้ำฉุกเฉิน ควรจัดไว้ในพื้นที่ทำงาน เพื่อใช้ในกรณีที่แก๊สโอโซนเกิดการรั่วไหล

ข) คู่มือความปลอดภัยในการทำงานและวิธีใช้เครื่องช่วยหายใจ

ค) บันไดฉุกเฉินสำหรับเข้าไปซ่อมแซมโอโซนกรณีที่เกิดการรั่วไหล

ง) ระบบระบายอากาศ (Ventilation) ในกรณีที่มีการทำงานในพื้นที่ปิด

จ) เครื่องตรวจวัดโอโซน โดยแบ่งการทำงานออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้ การทำงานขั้นที่ 1 เมื่อความเข้มข้นของโอโซนในบรรยากาศ เท่ากับ 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร เปิดไฟสัญญาณและเสียงเตือน และขั้นตอนที่ 2 คือเมื่อความเข้มข้นของโอโซนในบรรยากาศ เท่ากับ 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ปิดการทำงานของเครื่องกำเนิดโอโซน แล้วเปิดไฟสัญญาณและเสียงเตือน

3) ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ

การประเมินค่าใช้จ่ายในการเดินระบบของการใช้โอโซน โดยเปรียบเทียบกับระบบการใช้สารเคมี ซึ่งจะมีค่าใช้จ่ายเฉพาะสารเคมีเท่ากับ 2.0 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ที่อัตราการเติมคลอรีน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบเบื้องต้นพบว่าค่าไฟฟ้าในการเดินระบบโอโซนความเข้มข้น 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร เวลาสัมผัส 10 นาที เท่ากับ 2.08 กิโลวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร หรือเท่ากับ 5.71 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งอ้างอิงจากค่าไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ซึ่งเท่ากับ 2.74 บาท กำลังไฟฟ้าของเครื่องโอโซนที่ 50 วัตต์ ทั้งนี้เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการเดินระบบลงสามารถแบ่งการเดินระบบออกเป็น 2 ช่วง คือช่วงที่ค่าไฟฟ้า on peak ส่วนหนึ่ง และ off peak ส่วนหนึ่ง ก็จะสามารถลดค่าไฟฟ้าในการเดินระบบลงได้

4) แนวคิดการออกแบบและรายการคำนวณ

การประยุกต์ใช้โอโซนที่มีความสามารถในการกัดกร่อนในหอหล่อเย็น ต้องเลือกใช้วัสดุที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนของโอโซนได้ดังแสดงในตารางที่ 4.5 โดยในการออกแบบเลือกใช้พีวีซีในส่วนที่น้ำหล่อเย็นและโอโซนต้องสัมผัสกัน ทั้งนี้เพื่อให้มั่นใจว่าอัตราการกัดกร่อนจะไม่ส่งผลกระทบต่อระบบ แนวคิดการออกแบบจึงเลือกการนำน้ำบางส่วนที่สัมผัสโอโซนแล้วไปวนเพื่อพ่นผ่านหัวฉีดของหอหล่อเย็นอีกครั้ง เพื่อให้โอโซนที่ละลายในน้ำหล่อเย็นสลายตัวก่อนที่จะวนไปผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) นอกจากนี้เนื่องจากโอโซนจะละลายน้ำได้น้อยลงหากอุณหภูมิในน้ำสูงขึ้น ดังนั้นน้ำที่จะมาสัมผัสโอโซนต้องเป็นน้ำที่ผ่านการหล่อเย็นมาแล้วจึงจะทำให้การใช้โอโซนมีประสิทธิภาพสูงสุด นอกจากนี้ระบบกรองเบื้องต้น (Pre-treatment) ยังมีความสำคัญในการใช้โอโซน เพื่อลดความขุ่นซึ่งเป็นที่อยู่อาศัยของเชื้อโรคและยังเพิ่มความต้องการโอโซนในระบบอีกด้วย

ตารางที่ 4.5 วัสดุที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนของโอโซน

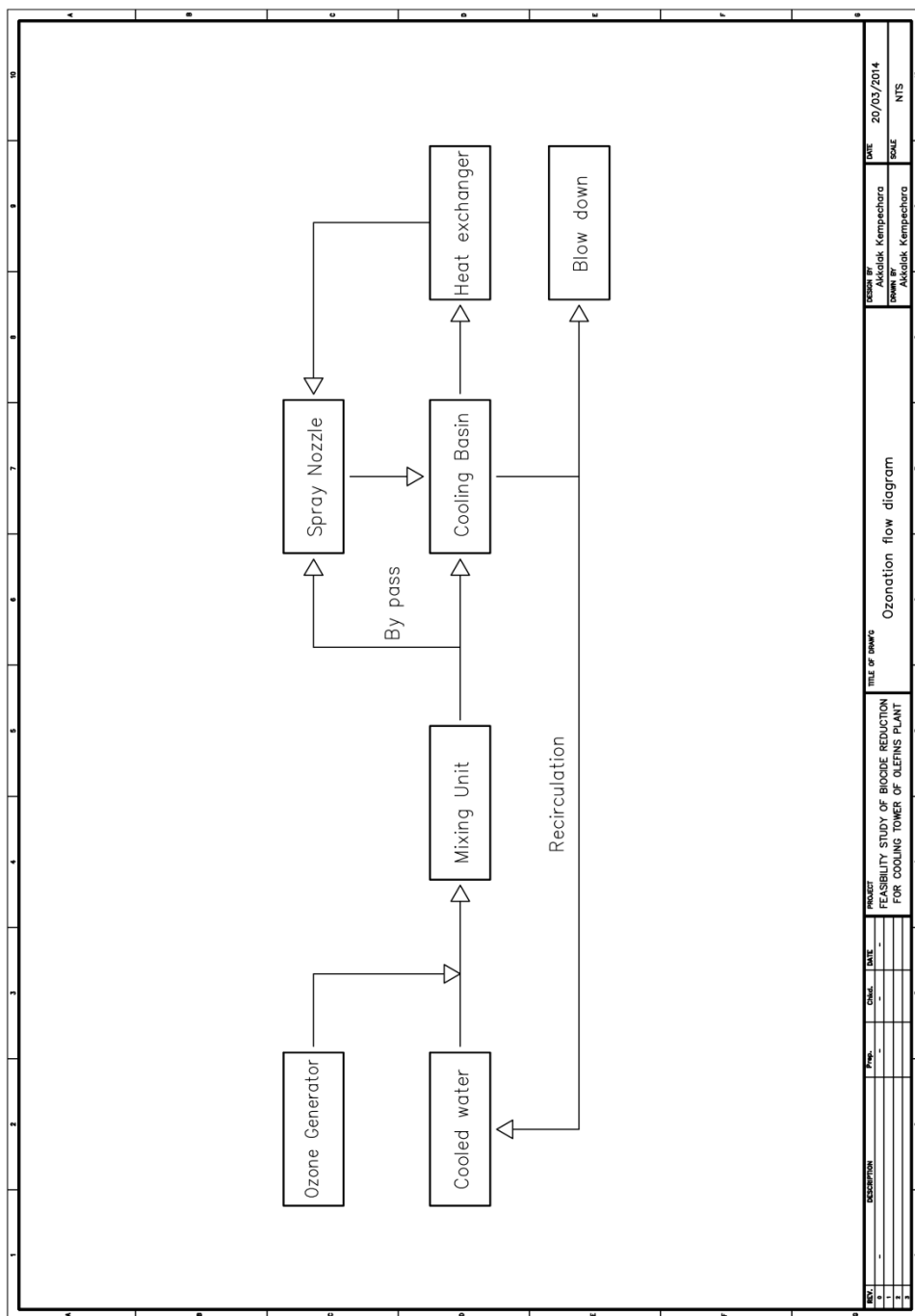
วัสดุ	ความต้านทานโอโซน
ทองแดง	ดีเยี่ยม
ซีพีวีซี (CPVC)	ดีเยี่ยม
อีพีดีเอ็ม (EPDM)	ดีเยี่ยม
ฟลูโอโรคาร์บอน (Fluorocarbon, FKM)	ดีเยี่ยม
โพลีคาร์บอเนต (Polycarbonate)	ดีเยี่ยม
โพลีเอเทอร์อีเทอร์คีโตน (Polyetherether Ketone)	ดีเยี่ยม
โพลียูรีเทน Polyurethane	ดีเยี่ยม
พีทีเอฟอี (PTFE)	ดีเยี่ยม
ซิลิโคน (Silicone)	ดีเยี่ยม
เหล็กกล้าไร้สนิม 316 (Stainless steel – 316)	ดีเยี่ยม
พลาสติก เอบีเอส (ABS plastic)	ดี
อะลูมิเนียม (Aluminum)	ดี
บรอนซ์ (Bronze)	ดี
โพลีโพรพิลีน (Polypropylene)	ดี
พีวีซี (PVC)	ดี
เหล็กกล้าไร้สนิม 316 (stainless steel – 304)	ดี

ที่มา www.coleparmer.com

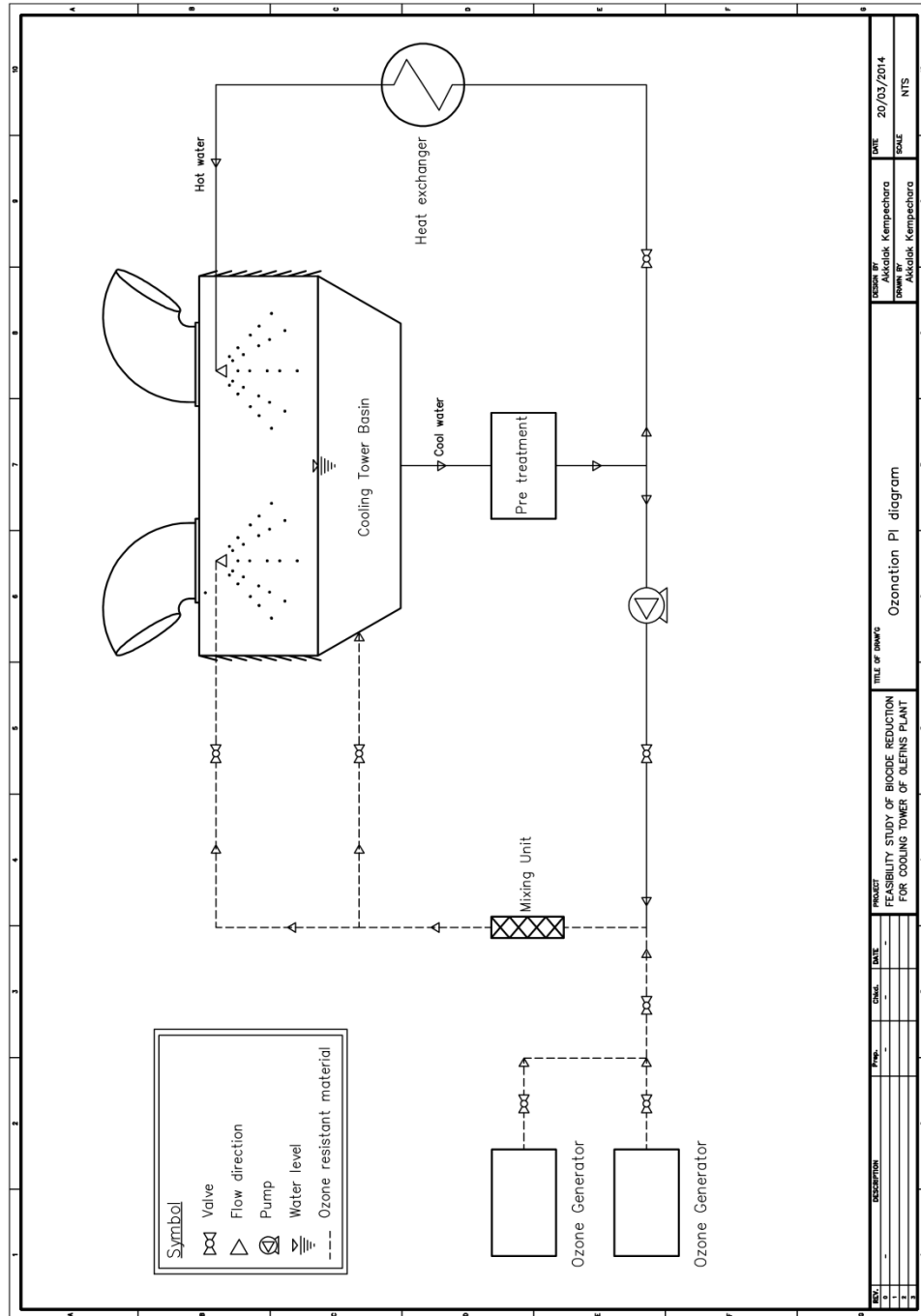
4) ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง

จากรายการคำนวณ (ภาคผนวก ฉ) พบว่าหอหล่อเย็นที่อัตราเติมน้ำเข้าระบบ 600-800 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง อัตราการเวียนน้ำในระบบ 36,000 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ออกแบบที่อัตราการไหล 5,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ต้องการโอโซนในอัตรา 2.08 กิโลวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร ดังนั้นเลือกใช้โอโซนขนาด 30 กรัมต่อชั่วโมง ที่กำลังไฟฟ้า 3.15 กิโลวัตต์ ซึ่งสามารถทำความเข้มข้นของโอโซนที่ละลายในน้ำได้ 3.6 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จำนวน 33 เครื่อง สำหรับการเดินระบบ 12 ชั่วโมงต่อวัน โดยราคาเครื่องโอโซนขนาด 30 กรัมต่อชั่วโมง มีราคาประมาณ 200,000-2,000,000 บาท ราคาติดตั้ง คิดเป็นร้อยละ 10 ของค่าอุปกรณ์ โดยราคาของการประยุกต์ใช้โอโซนทั้งสิ้นประมาณ 7,260,000-72,600,000 บาท ผังทิศทางการไหลของระบบและการออกแบบเชิงแนวคิด (Conceptual design) แสดงในรูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16

ดังนั้นค่าใช้จ่ายในการใช้โอโซนในการควบคุมจุลินทรีย์ในหอหล่อเย็น แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งโดยคำนวณเป็นเงินลงทุนต่อหน่วยเท่ากับ 1,452-14,520 บาทต่อลูกบาศก์เมตร และค่าเดินระบบ 5.71 บาทต่อลูกบาศก์เมตร คำนวณทดแทนประเมินจากค่าน้ำประปา ส่วนภูมิภาคสำหรับโรงงานที่มีการใช้น้ำมากกว่า 1,000 ลูกบาศก์เมตรต่อเดือน เท่ากับ 32 บาท จะได้ระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 1.4-13.7 ปี (คิดที่ประมาณน้ำที่ลดได้ 1,344 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน)



รูปที่ 4.15 ฟังก์ชันทางการไหลของระบบโอโซน



รูปที่ 4.16 การออกแบบเชิงแนวคิด (Conceptual design)

4.5.2 การใช้อัลตราโซนิกกับน้ำหล่อเย็น

1) ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ

การประเมินค่าใช้จ่ายในการเดินระบบของการใช้อัลตราโซนิก โดยเปรียบเทียบกับระบบการใช้สารเคมี ซึ่งจะมีค่าใช้จ่ายเฉพาะสารเคมีเท่ากับ 2.0 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ที่อัตราการเติมคลอรีน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบเบื้องต้นพบว่าค่าไฟฟ้าในการเดินระบบอัลตราโซนิก กำลัง 22 วัตต์ เวลาสัมผัส 20 นาที เท่ากับ 7.33 กิโลวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร หรือเท่ากับ 20.12 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งอ้างอิงจากค่าไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ซึ่งเท่ากับ 2.74 บาท ทั้งนี้เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการเดินระบบลงสามารถแบ่งการเดินระบบออกเป็น 2 ช่วง คือช่วงที่ค่าไฟฟ้า on peak ส่วนหนึ่ง และ off peak ส่วนหนึ่ง ก็จะสามารถลดค่าไฟฟ้าในการเดินระบบลงได้

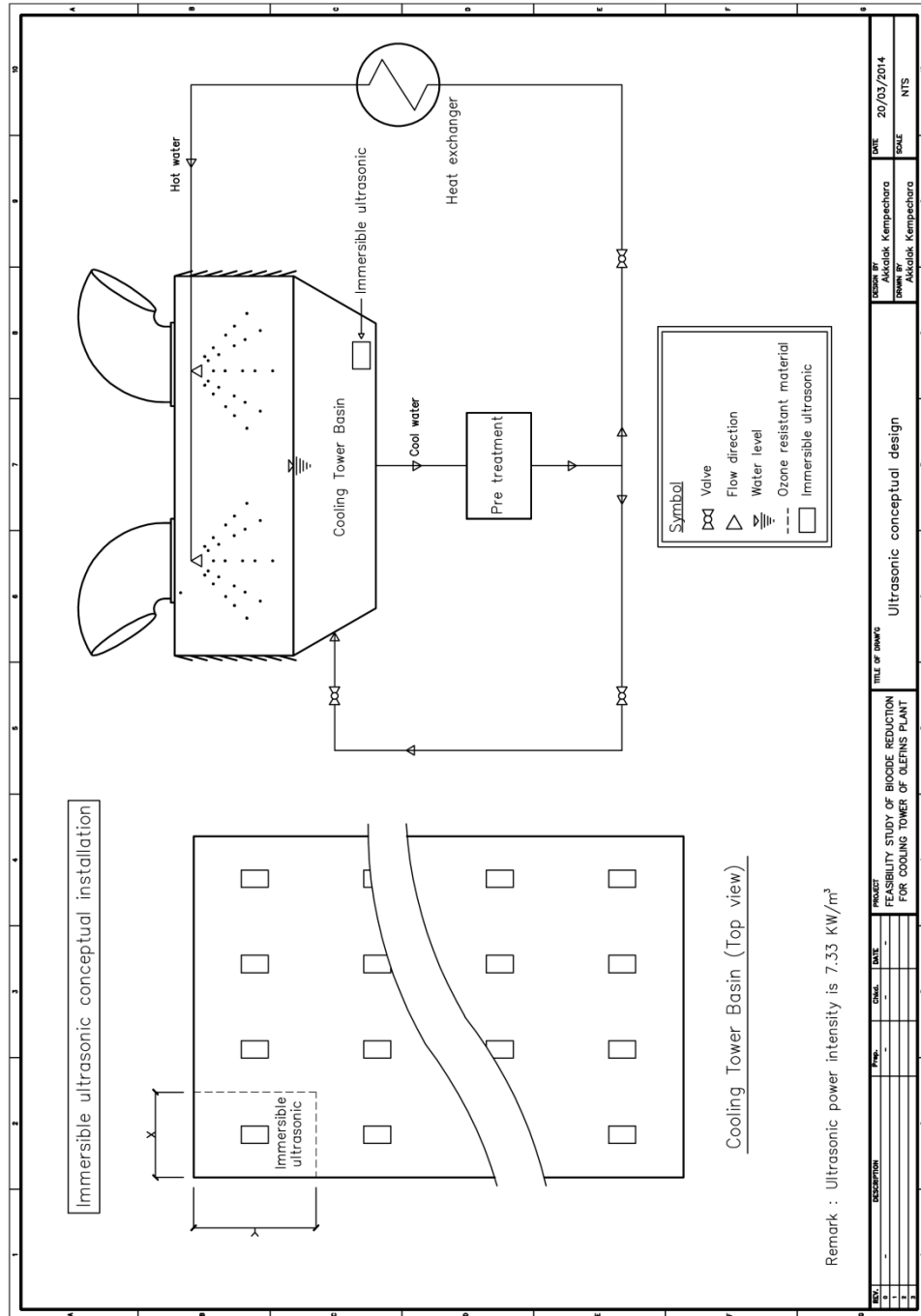
2) แนวคิดการออกแบบและรายการคำนวณ

การประยุกต์ใช้อัลตราโซนิกในหอหล่อเย็น การผลทดลองพบว่าระบบอัลตราโซนิกต้องการกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 7.33 กิโลวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร เพื่อให้ประหยัดพื้นที่และเหมาะสมกับระบบเดิมที่มีอยู่มากที่สุด จึงเลือกออกแบบโดยใช้อัลตราโซนิกแบบจุ่มน้ำ (Immersible ultrasonic) และใช้บ่อพักน้ำหล่อเย็น (Cooling tower basin) เป็นถังปฏิกิริยา โดยเครื่องอัลตราโซนิกจะถูกจัดวางกระจายในบ่อพักน้ำหล่อเย็นอย่างในระยะห่างเท่าๆ กันทุกเครื่องเพื่อป้องกันจุดอับ (Dead zone) ซึ่งทำให้การทำงานมีประสิทธิภาพสูงสุด แผนผังแนวคิดการออกแบบระบบอัลตราโซนิกแสดงในรูปที่ 4.17

3) ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง

จากรายการคำนวณที่แสดงภาคผนวก ข พบว่าหอหล่อเย็นที่อัตราเติมน้ำเข้าระบบ 600-800 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง อัตราการเวียนน้ำในระบบ 36,000 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ออกแบบที่อัตราการไหล 5,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ต้องการอัลตราโซนิกกำลัง 7.33 กิโลวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร ดังนั้นเลือกใช้เครื่องอัลตราโซนิกแบบจุ่ม (Ultrasonic immersion) ขนาด 2.4 กิโลวัตต์ จำนวน 214 เครื่อง สำหรับการเดินระบบ 12 ชั่วโมงต่อวัน โดยราคาเครื่องอัลตราโซนิกแบบจุ่มขนาด 2.4 กิโลวัตต์ มีราคาประมาณ 220,000 บาท ราคาติดตั้ง คิดเป็นร้อยละ 10 ของค่าอุปกรณ์ โดยราคาของการประยุกต์ใช้อัลตราโซนิกทั้งสิ้นประมาณ 51,788,000 บาท ผังทิศทางการไหลของระบบแสดงในรูปที่ 4.17

ดังนั้นค่าใช้จ่ายในการใช้อัลตราโซนิกในการควบคุมจุลินทรีย์ในหอหล่อเย็น แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งโดยคำนวณเป็นเงินลงทุนต่อลูกบาศก์เมตรเท่ากับ 10,358 บาท และค่าเดินระบบ 20.12 บาทต่อลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 4.17 ผังทิศทางการไหลของระบบอัลตราโซนิก

สรุปค่าออกแบบ รายการคำนวณค่าใช้จ่ายในการเดินระบบและค่าติดตั้งอุปกรณ์ในการประยุกต์โอโซนและอัลตราโซนิกในระบบจริงแสดงในตารางที่ 4.6 และการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของโอโซนและอัลตราโซนิก แสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.6 สรุปค่าออกแบบและค่าใช้จ่ายในการประยุกต์โอโซนและอัลตราโซนิก

รายละเอียด	โอโซน	อัลตราโซนิก
ค่าออกแบบ		
- ความเข้มข้น/กำลัง	0.01 มิลลิกรัม/ลิตร	22 วัตต์/ลิตร
- เวลาสัมผัส (นาท)	10	20
กำลังไฟฟ้าที่ใช้ (กิโลวัตต์/ลูกบาศก์เมตร)	2.08	7.33
ค่าเดินระบบ (บาท/ลูกบาศก์เมตร)	5.71	20.12
ค่าลงทุนต่อหน่วย (บาท/ลูกบาศก์เมตร)	1,452-14,520	10,358

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของโอโซนและอัลตราโซนิก

ข้อดี/ข้อเสีย	โอโซน	อัลตราโซนิก
ข้อดี	<ul style="list-style-type: none"> - ลดการใช้สารเคมี - ลดการใช้น้ำในหอหล่อเย็น - ลดค่าของแข็งละลายน้ำที่มาจากสารเคมีในหอหล่อเย็น - ลดการอุดตันของตัวกลางในหอหล่อเย็น - มีปัญหาการเกิดผลพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรค (DBPs) น้อยกว่าคลอรีน 	<ul style="list-style-type: none"> - ลดการใช้สารเคมี - ลดการใช้น้ำในหอหล่อเย็น - ลดค่าของแข็งละลายน้ำที่มาจากสารเคมีในหอหล่อเย็น - ไม่เพิ่มอัตราการกัดกร่อน - มีปัญหาการเกิดผลพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรค (DBPs) น้อยกว่าคลอรีน
ข้อเสีย	<ul style="list-style-type: none"> - อาจเกิดปัญหาการกัดกร่อนได้ - โอโซนมีความเป็นพิษจึงต้องให้ความสำคัญกับความปลอดภัยในการใช้งาน - โอโซนไม่เหมาะกับน้ำที่มีอนุมูลสูง - ต้องการระบบกรองเพื่อเป็นบำบัดน้ำเบื้องต้น เพื่อลดปริมาณการใช้โอโซน - ต้องการการบำรุงรักษามากกว่าการใช้คลอรีน 	<ul style="list-style-type: none"> - มีเสียงดังจากการเดินระบบ - ที่กำลังสูงและเวลาสัมผัสนาน อาจเพิ่มอนุมูลของน้ำหล่อเย็นได้ - ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบสูงมาก - ต้องการการบำรุงรักษามากกว่าการใช้คลอรีน - ต้องการการบำรุงรักษามากกว่าการใช้คลอรีน

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

- 1) ผลวิเคราะห์ลักษณะน้ำประปาและน้ำหล่อเย็น พบว่าพารามิเตอร์ในการควบคุมการทิ้งน้ำออกจากระบบคือ คลอไรด์และไบคาร์บอเนต ตามลำดับ โดยระบบมีศักยภาพในการใช้น้ำหมุนเวียนในระบบหล่อเย็นได้สูงสุดที่ 7 รอบ
- 2) น้ำหล่อเย็นหลังจากปรับสภาพในเพื่อใช้ในระบบหล่อเย็นแล้วจะเพิ่มขึ้นมาในช่วง 8.0-8.5 เมื่อคำนวณค่า Langelier Saturation Index (LSI) เท่ากับ 0.68 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นั้นระบบมีแนวโน้มที่จะเกิดตะกรัน ซึ่งสภาวะนี้เป็นการป้องกันระบบหล่อเย็นจากการกัดกร่อน
- 3) โอโซนความเข้มข้น 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร เวลาสัมผัส 10 นาที สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* และสาหร่ายจากน้ำหล่อเย็นที่ความเข้มข้น 6.5-12.5 มิลลิกรัมต่อลิตร (น้ำหนักแห้ง) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- 4) อัลตราโซนิกกำลัง 22 วัตต์ต่อลิตร เวลาสัมผัส 20 นาที สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* และสาหร่ายจากน้ำหล่อเย็นที่ความเข้มข้น 7.3-12.5 มิลลิกรัมต่อลิตร (น้ำหนักแห้ง) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- 5) โอโซนความเข้มข้น 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร และอัลตราโซนิกกำลัง 22 วัตต์ต่อลิตร เวลาสัมผัส 30 นาที ไม่สามารถลดปริมาณแบคทีเรียจากน้ำหล่อเย็นได้อย่างมีนัยสำคัญ
- 6) โอโซนสามารถประยุกต์ใช้ในระบบหอหล่อเย็นได้ แม้มีอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่สูงมาก และค่อนข้างสูงกัดกร่อนสำหรับทองแดง โดยออกแบบให้ใช้วัสดุที่ต้านทานโอโซนได้ดีในส่วนที่ต้องสัมผัสโอโซนโดยตรง รวมทั้งการโอโซนที่ไล่น้ำบางส่วนกลับไปฉีดพ่นลงมาใหม่ก็สามารถลดอัตราการกัดกร่อนลงได้
- 7) การเปลี่ยนจากการใช้สารเคมีเพื่อควบคุมจุลินทรีย์ได้มาเป็นการใช้โอโซนหรืออัลตราโซนิก จะสามารถเพิ่มรอบการใช้น้ำได้อย่างน้อย 1 รอบ ซึ่งสามารถเพิ่มรอบการใช้น้ำจาก 5 รอบ เป็น 6 และ 7 รอบ สามารถลดการใช้ได้ร้อยละ 4 และ 7 ตามลำดับ เมื่อคำนวณจากอัตราการเติมน้ำทดแทนในระบบที่ 600-800 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง สามารถลดการใช้น้ำได้ 24-56 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง หรือ 576-1,344 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน
- 8) การประเมินค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการประยุกต์ใช้พบว่าโอโซนและอัลตราโซนิก มีค่าลงทุนต่อหน่วยเท่ากับ 14,520 และ 10,358 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ และมีค่าเดินระบบดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 การประเมินค่าใช้จ่ายเบื้องต้น

อุปกรณ์	ความต้องการไฟฟ้า	ค่าไฟฟ้า	ค่าลงทุน
	(กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ลูกบาศก์เมตร)	(บาท/ลูกบาศก์เมตร)	(บาท/ลูกบาศก์เมตร)
โอโซน	2.08	5.71	14,520
อัลตราโซนิก	7.33	20.12	10,538

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) การศึกษาการยับยั้งการยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่ายและแบคทีเรีย โดยใช้โอโซนและอัลตราโซนิกในหอหล่อเย็น ของงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่เน้นเนื้อหาทางเทคนิคและการประเมินด้านเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น จึงอาจจะมีข้อมูลในส่วนของผลการทดลองที่ไม่ลงรายละเอียดมากนัก
- 2) ความเข้มข้นของโอโซนและเวลาสัมผัสในระบบจริงสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความเหมาะสม แต่ต้องควบคุมค่า CT ของระบบให้มีค่าเท่ากับ 0.1 เพื่อให้สามารถเดินระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ไม่ควรใช้โอโซนที่ความเข้มข้นสูงเกินไป เพราะอาจมีผลต่ออัตราการกัดกร่อนได้
- 3) การประยุกต์ใช้โอโซนในระบบจริงอาจมีข้อแตกต่างจากการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ เนื่องจากอัตราการไหล วิธีการผสม และลักษณะของน้ำที่แตกต่างกัน จึงต้องเพิ่มส่วนของการออกแบบเชิงวิศวกรรมเพื่อให้สามารถเดินระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- 4) การผสมผสมมีผลต่อประสิทธิภาพของโอโซน ดังนั้นการประยุกต์ในระบบจริง จึงต้องให้ความสำคัญในการออกแบบเชิงวิศวกรรมในเรื่องนี้เพื่อให้สามารถเดินระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- 5) ระบบการบำบัดน้ำเบื้องต้น (Pretreatment) ด้วยการกรองเป็นระบบที่มีความจำเป็นในการประยุกต์ใช้โอโซน เนื่องจากจะสามารถลดความต้องการโอโซนของระบบลงได้
- 6) การประยุกต์ใช้อัลตราโซนิกในระบบจริง ต้องประยุกต์ใช้อัลตราโซนิกแบบโพรบหรือแบบจุ่ม (Immersible) เพื่อให้มีความเหมาะสมกับสภาพในพื้นที่แตกต่างกัน
- 7) โอโซนตามกฎหมายต้องมีค่าไม่เกิน 0.1 ส่วนในล้านส่วนหรือไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในเวลา 1 ชั่วโมง และต้องไม่เกิน 0.07 ส่วนในล้านส่วน หรือไม่เกิน 0.15 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในเวลา 8 ชั่วโมง (ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 28 พ.ศ. 2550 เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศโดยทั่วไป)
- 8) การใช้อัลตราโซนิก อาจทำให้เกิดเสียงดังในพื้นที่ทำงาน ดังนั้นจะต้องมีการระมัดระวังไม่ให้เสียงดังเกิน 70 เดซิเบลเอ (ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 15 พ.ศ. 2540 เรื่อง กำหนดมาตรฐานระดับเสียงโดยทั่วไป)

- 9) การทดลองการกีดกร่อนควรมีการจำลองสภาวะให้ใกล้เคียงสภาวะจริง ทั้งในเรื่องอัตรา
การไหลและอุณหภูมิ ซึ่งมีผลต่อการกีดกร่อนในสภาวะจริง
- 10) การประเมินราคาในส่วนของความเป็นได้ทางเศรษฐศาสตร์ เป็นเพียงการประเมินราคา
เบื้องต้นโดยใช้ราคาจากผู้ขาย 1-2 ราย ดังนั้นเพื่อให้ได้ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งที่แท้จริงจึงควร
สอบถามราคาจากผู้ขายอีกครั้ง อีกทั้งการพัฒนาของเทคโนโลยีในอนาคตก็จะมีผลต่อ
การเปลี่ยนแปลงราคาเช่นกัน



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รายการอ้างอิง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาษาไทย

กรมวิทยาศาสตร์ทหารเรือ, กองวิเคราะห์และทดสอบ. (2553). "ผลวิเคราะห์น้ำจากอำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี " Retrieved 8/8/2555, 2555, from <http://www.navy.mi.th/waterworks/index.php?name=news&file=readnews&id=40>.

กระทรวงพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานและอนุรักษ์พลังงาน (2550). รายงานฉบับสมบูรณ์ (Final report) โครงการศึกษาเกณฑ์การใช้พลังงานในอุตสาหกรรมและอาคารต่างๆ (อุตสาหกรรมปิโตรเคมี).

การประปาส่วนภูมิภาค. (2555, 1/8/2555). "ตารางอัตราค่าน้ำประปา." from http://www.pwa.co.th/service/tariff_rate.html.

จิราภา เศรษฐจินตนิ (2547). การปรับปรุงคุณภาพทางจุลินทรีย์ของกึ่งกลาดำ Penaeus monodon ที่ตลาดกลางกุ้งจังหวัดสมุทรสาครโดยโอโซน. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เฉลิมเกียรติ บุญลือ (2546). การใช้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ร่วมกับการตกตะกอนทางเคมีเพื่อกำจัดเซลล์สาหร่ายในระบบผลิตน้ำประปา. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มันลิน ตันจุลเวศม์ ไพพรรณ พรประภา และมันรัช ตันจุลเวศม์ (2554). การปรุงแต่งคุณภาพน้ำ เล่ม 2 สำหรับระบบหม้อไอน้ำ ระบบน้ำหล่อเย็น ระบบประปา. กรุงเทพมหานคร, โรงพิมพ์บริษัทสันติศิริจำกัด.

ศิริรักษ์ เนตรรัตน์ (2539). การวิเคราะห์เงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการใช้การใช้ก๊าซโอโซนในการฆ่าเชื้อโรคที่ศูนย์บริการโลหิตแห่งชาติ สภากาชาดไทย. ปริญญามหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุทธิรักษ์ กาบแก้ว and (2546). การใช้โอโซนสำหรับฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปา. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เอกชัย อุดุธรรม (2552). หลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับกระบวนการนาโนฟิลเตรชันเพื่อการนำน้ำหล่อเย็นกลับมาใช้ใหม่. ปริญญามหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

กระทรวงพลังงาน, ก. (2550). รายงานฉบับสมบูรณ์ (Final report) โครงการศึกษาเกณฑ์การใช้พลังงานในอุตสาหกรรมและอาคารต่างๆ (อุตสาหกรรมปิโตรเคมี).

ภาษาอังกฤษ

- (ASTM), A. S. f. T. a. M. (2008a). ASTM Standard D4778-05, Standard test method for determination of corrosion and fouling tendency of cooling water under heat transfer conditions. Pennsylvania, USA American Society for Testing and Material (ASTM).
- (ASTM), A. S. f. T. a. M. (2008b). ASTM Standard G1-03, Standard practice for preparing, cleaning and evaluating corrosion test specimens. Pennsylvania, USA American Society for Testing and Material (ASTM).
- Ahn, C. Y., Joung, S. H., A. Choi, Kim, H. S., Jang, K. Y., & Oh, H. M. (2007). Selective control of cyanobacteria in eutrophic pond by a combined device of ultrasonication and water pumps. *Environmental Technology*, 28, 371-379.
- Ai, W., Guo, S., Qin, L., & Tang, Y. (2008). Development of a ground-based space micro-algae photo-bioreactor. *Advances in Space Research*, 41(5), 742-747. doi: 10.1016/j.asr.2007.06.060
- American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), & (WEF), a. W. E. F. (2005). Standard Method for the Examination of Water and Wastewater 21st edition, . Washington DC.
- Awad, S. B., & Nagarajan, R. (2010). Ultrasonic cleaning. *Developments in surface contamination and cleaning*. (pp. 225-280). USA: Elsevier Inc. .
- Bott, T. (2004). Ultrasound enhancement of biocide efficiency*1. *Ultrasonics Sonochemistry*, 11(5), 323-326. doi: 10.1016/s1350-4177(03)00159-7
- Broekman, S., Pohlmann, O., Beardwood, E. S., & de Meulenaer, E. C. (2010). Ultrasonic treatment for microbiological control of water systems. *Ultrason Sonochem*, 17(6), 1041-1048. doi: 10.1016/j.ultsonch.2009.11.011
- Chawla, A. S. (2006). *Application of ozonated water technology for improving quality and safety of peeled shrimp meat*. (Master of Science), Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College.
- Choudhury, M. R., Hsieh, M.-K., Vidic, R. D., & Dzombak, D. A. (2012). Corrosion management in power plant cooling systems using tertiary-treated municipal wastewater as makeup water. *Corrosion Science*, 61, 231-241. doi: 10.1016/j.corsci.2012.04.042

- Christopher J. Nalepa, & Terry M. Williams, a. (2010). Biocides: Selection and Application. In Z. AMJAD (Ed.), *THE SCIENCE AND TECHNOLOGY OF INDUSTRIAL WATER TREATMENT*. USA: Taylor & Francis Group.
- Energy, U. S. D. o. (1995). *Ozone Treatment for Cooling Towers New Energy and Water Saving Technology to Reduce Cooling Tower Operating Costs*. Washington D.C., USA.
- Guzel-Seydim, Z. B., Greene, A. K., & Seydim, A. C. (2004). Use of ozone in the food industry. *LWT - Food Science and Technology*, 37(4), 453-460. doi: 10.1016/j.lwt.2003.10.014
- Holm, E. R., Stamper, D. M., Brizzolara, R. A., Barnes, L., Deamer, N., & Burkholder, J. M. (2008). Sonication of bacteria, phytoplankton and zooplankton: Application to treatment of ballast water. *Marine Pollution Bulletin*, 56(6), 1201-1208. doi: 10.1016/j.marpolbul.2008.02.007
- Joyce, E., Phull, S. S., Lorimer, J. P., & Mason, T. J. (2003). The development and evaluation of ultrasound for the treatment of bacterial suspensions. A study of frequency, power and sonication time on cultured *Bacillus* species. *Ultrasonics Sonochemistry*, 10(6), 315-318. doi: 10.1016/s1350-4177(03)00101-9
- Joyce, E. M., & Mason, T. J. (2008). Sonication used as biocide a review: Ultrasound a greener alternative to chemical biocide? *Chemical today*, 26, 22-26.
- Jyoti, K. K., & Pandit, A. B. (2004a). Effect of cavitation on chemical disinfection efficiency. *Water Research*, 38(9), 2249-2258. doi: 10.1016/j.watres.2004.02.012
- Jyoti, K. K., & Pandit, A. B. (2004b). Ozone and cavitation for water disinfection. *Biochemical Engineering Journal*, 18(1), 9-19. doi: 10.1016/s1369-703x(03)00116-5
- Keisher, T., & Balog, D. (1992). *Field evaluation of ozone for control of corrosion and scale in a zero blowdown application*. Paper presented at the Association of water technologies, fifth Annual convention, 1992. , San Diego, California. .
- Kradre, M. A. a., & Yousef, A. E. (2001). Sporicidal action of ozone and hydrogenperoxide: a comparative study. *International Journal of Food Microbiology*, 71, 131-138.
- Krohn, B. J., McNeff, C. V., Yan, B., & Nowlan, D. (2011). Production of algae-based biodiesel using the continuous catalytic Mcgyan process. *Bioresour Technol*, 102(1), 94-100. doi: 10.1016/j.biortech.2010.05.035

- Lin, S. H., & Yeh, K. L. (1993). Looking to treat wastewater? Try ozone. *Chemical Engineering*, 100, 112-116.
- M Seneviratne. (2006). *A Practical Approach to Water Conservation for Commercial and Industrial Facilities*. . United Kingdom: Butterworth-Heinemann.
- Mandalam, R. K. a., & Palsson, B. O. (1998). Elemental balancing of biomass and medium composition enhances growth capacity in high-density *Chlorella vulgaris* cultures. *Biotechnology and Bioengineering*, 59, 608-611.
- Mason, T. J. (1999). *Sonochemistry*. New York: Oxford University.
- Mason, T. M. a., & Peters, D. (2002). *Practical Sonochemistry Power Ultrasound Uses and Applications*. West Sussex: Horwood Publishing Limited.
- Mayer, W. C. (2001). Cooling tower solution testing of a new ozonation system for cooling towers. *Water Quality Product*, April 2001, 40-41.
- Mayer, W. C. a., & Sarkissian, P. B. (2003). Bacteria control with ozone testing of the CTS treatment system prove reliable for cooling tower water. *Water Quality Product*, July 2003, 8-10.
- McCoy, J. W. (1980). *Microbiology of cooling water*. New York, USA: Chemical Publishing Co., Inc.
- Miao, H., & Tao, W. (2009). The mechanisms of ozonation on cyanobacteria and its toxins removal. *Separation and Purification Technology*, 66(1), 187-193. doi: 10.1016/j.seppur.2008.11.008
- Ren, T. P., M. and Blok, K. (2006). Olefins from conventional and heavy feedstocks: Energy use in steam cracking and alternative processes. *Energy*, 31(4), 425-451. doi: 10.1016/j.energy.2005.04.001
- S., H., Moody, M. W., Jiang, S., & Chen, H. (1992.). Bacteriocidal and mutagenetic effects of ozone on shrimp (*Penaeus monodon*) meat. *Journal of Food Science*, 57, 923-927.
- Schult, C. R. a. B., W.D. . (2000). The role of mixing in ozone dissolution systems. *Ozone-Science & Engineering*, 22, 329-350.
- Standford, H. W. (2003). *HVAC Water Chillers and Cooling Towers Fundamentals, Application, and Operation*. New York: Mercel Dekker Inc.
- Tang, J. W., Wu, Q. Y., Hao, W. H., Chen, Y., & Wu, M. (2004). Effect of 1.7 MHz ultrasonic on a gas-vacuolate cyanobacterium and a gas-vacuole negative cyanobacterium. *Colloids and Surfaces, B36*, 115-121.
- U.S.EPA. (1986). *DesignManual MunicipalWastewaterDisinfection*. Cincinnati,Ohio: U.S.Environmental ProtectionAgency.

- U.S.EPA. (1995). *Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume 1: Stationary Point and Area Sources*. North Carolina, USA: U.S. Environmental Protection Agency.
- Viera, M. R., Guiamet, P. S., De Mele, M. F. L., & Videla, H. A. (1999). Use of dissolved ozone for controlling planktonic and sessile bacteria in industrial cooling tower. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 44, 201-207.
- Walsby, A. E. (1992). *A control of gas-vacuolate cyanobacteria*. In: Sutcliffe, D.W., Jones, J.G. (Eds), *Eutrophication: Research and Application to Water Supply*. Ambleside United Kingdom.: Freshwater Biological Association.
- Wu, X., Joyce, E. M., & Mason, T. J. (2012). Evaluation of the mechanisms of the effect of ultrasound on *Microcystis aeruginosa* at different ultrasonic frequencies. *Water Res*, 46(9), 2851-2858. doi: 10.1016/j.watres.2012.02.019
- Zahid Amjad, Robert W. Zuhl, a., & Strong Huang. (2010). *THE SCIENCE AND TECHNOLOGY OF INDUSTRIAL WATER TREATMENT*. USA: Taylor & Francis Group.
- Zhang, G., Zhang, P., Liu, H., and , & Wang, B. (2006b). Ultrasonic damages on cyanobacterial photosynthesis. *Ultrasonics Sonochemistry*, 13, 501-506. doi: 10.1016/j.ultsonch.2005.11.001



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

การวัดโอโซนในน้ำด้วยวิธี Indigo colorimetric

1. พื้นฐานการวัด (General Discussion)

ก. หลักการพื้นฐาน (Principle)

โอโซนจะลดสีของอินดิโก (Indigo) อย่างรวดเร็วในสารละลายที่เป็นกรด โดยสามารถวัดได้จากค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลงเป็นสัดส่วนตามโอโซนที่เพิ่มขึ้น ค่าคงที่ของสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร มีค่า 0.42 ± 0.01 ต่อเซนติเมตรต่อมิลลิกรัมต่อลิตร ($\Delta \epsilon =$ ดกลืนแสงช่วงอัลตราไวโอเล็ตของโอโซนบริสุทธิ์ที่ $\epsilon = 2,950/M.cm$ ที่ความยาวคลื่น 258 นาโนเมตร

ข. สิ่งรบกวน (Interferences)

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และเปอร์ออกไซด์ของสารอินทรีย์จะลดสีของสารละลายอินดิโกได้ช้าๆ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะไม่รบกวนระบบในกรณีวัดความเข้มข้นโอโซนภายในเวลา 6 ชั่วโมงหลังเติมสารละลาย ส่วนเปอร์ออกไซด์ของสารอินทรีย์จะมีความสามารถทำปฏิกิริยาได้รวดเร็วกว่า การปรับแก้ค่าที่วัดได้เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องทำได้โดยวัดเทียบกับกรณีไม่ใช่ตัวอย่างเลย (Blank)

ถ้าไม่มีการปรับแก้ค่าที่วัดได้จะมีความผิดพลาดไปจากความเข้มข้นที่แท้จริง เช่น แมงกานีสที่ถูกออกซิไดซ์ที่มีความเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร คลอรีนก็ส่งผลกระทบต่อกรวัดเช่นกัน แต่สามารถป้องกันได้ด้วยกรดมาลินิก โบรไมน์สามารถมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของ Br^- โดย 1 โมลของ HOBr จะเทียบได้กับค่าโอโซน 0.4 โมล

ค. ช่วงความเข้มข้นที่สามารถวัดได้ (Minimum Detectable Concentration)

ความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถวัดได้ด้วยวิธีการใช้เครื่องวัดการดูดกลืนแสงคือ 2 ไมโครกรัมโอโซนต่อลิตร แต่ถ้าใช้สายตาในการสังเกตจะสามารถวัดได้เพียง 10 ไมโครกรัมโอโซนต่อลิตร

2. เครื่องมือและอุปกรณ์ (Apparatus)

ก. เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (Spectrophotometer) ที่สามารถวัดได้ที่ความยาวคลื่น 600 ± 5 นาโนเมตร

ข. หลอดแก้ว (Glass cylinder) สำหรับกรณีใช้สังเกตด้วยตาเปล่า ใช้หลอดแก้วขนาด 100 มิลลิเมตรที่มีก้นแบน

3. สารเคมี (Reagents)

ก. Indigo stock solution : เตรียมได้โดยผสมน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตรกับกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 1 มิลลิลิตร ในขวดวัดปริมาตรขนาด 1 ลิตร จากนั้นเติมโพแทสเซียมอินดิโกซัลโฟเนต (Potassium indigo trisulfonate; $C_{15}H_7N_2O_{11}S_3K_3$) ที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 80-85 แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร

เมื่อนำมาเจือจางในสัดส่วน 1 ต่อ 100 แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร จะมีค่าการดูดกลืน 0.20 ± 0.010 เซนติเมตร สารละลายที่เตรียมนี้จะอยู่ได้นาน 4 เดือน เมื่อเก็บในที่มืดและไม่ควรมานำมาใช้ถ้าทดสอบแล้วพบว่าค่าการดูดกลืนเมื่อเจือจางมีค่าน้อยกว่า 0.16 เซนติเมตร



รูปที่ ก.1 น้ำตัวอย่างและสารละลายอินดิโก

- ข. Indigo reagent 1 : เติมน indigo stock solution 20 มิลลิลิตร โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (Sodium dihydrogen phosphate; NaH_2PO_4) และกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 7 มิลลิเมตรลงไปในช่วงวัดปริมาตรขนาด 1 ลิตร ละลายด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร สารละลายนี้มีอายุการใช้งานประมาณหนึ่งสัปดาห์หรือทดสอบด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร แล้วต้องมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 ของค่าที่วัดได้ในครั้งแรก
- ค. Indigo reagent 2 : เตรียมด้วยวิธีเช่นเดียวกับข้อ ข. แต่เติมน indigo stock solution 100 มิลลิลิตร จากเดิม 20 มิลลิลิตร
- ง. กรดมาโลนิก (Malonic acid agent) เตรียมโดยละลายกรดมาโลนิก 5 กรัมในน้ำจนได้ปริมาตร 100 มิลลิเมตร
- จ. สารละลายไกลซีน (Glycine reagent) เตรียมโดยละลายไกลซีน 7 กรัมในน้ำจนได้ปริมาตร 100 มิลลิเมตร
4. ขั้นตอนการปฏิบัติ (Procedure)
- ก. กระบวนการการใช้ Spectrophotometer

1. ความเข้มข้นในช่วง 0.01 ถึง 0.10 มิลลิกรัมไอโซนต่อลิตร

เติมน indigo reagent 1 10 มิลลิลิตรในช่วงวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำตัวอย่างที่ต้องการวัดจนมีปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยมีขวดหนึ่งที่เติมน้ำกลั่นเพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบ (Blank) วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 ± 5 นาโนเมตร ภายในเวลา 4 ชั่วโมง โดยควรใช้เซลล์ขนาด 10 เซนติเมตร คำนวณความเข้มข้นไอโซนจะมีผลต่างระหว่างน้ำตัวอย่างกับตัวเปรียบเทียบ

2. ความเข้มข้นในช่วง 0.05 ถึง 0.50 มิลลิกรัมไอโชนต่อลิตร

ปฏิบัติตามขั้นตอนในข้อที่ 1 แต่ใช้ indigo reagent 2 10 มิลลิลิตรแทน และควรใช้เซลล์ขนาด 4 ถึง 5 เซนติเมตร

3. ความเข้มข้นมากกว่า 0.3 มิลลิกรัมไอโชนต่อลิตร

ใช้ indigo reagent 2 10 มิลลิลิตรแต่เจือจางน้ำตัวอย่างด้วยน้ำกลั่นก่อนนำมาวิเคราะห์ ในการตวงปริมาตรตัวอย่างใช้ปิเปตที่ทำด้วยแก้ว โดยชะด้วยสารตัวอย่างก่อนใช้และให้ปลายปิเปตอยู่ต่ำกว่าผิวน้ำ

4. การควบคุมสิ่งแวดล้อมระบบ

ถ้ามีคลอรีนในตัวอย่าง ให้ใส่สารละลายกรดมาโลนิกลงในขวดก่อนเติมสารตัวอย่างจนเต็ม แล้ววัดค่าการดูดกลืนภายใน 60 นาที



รูปที่ ก.2 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

ข. กระบวนการใช้การเปรียบเทียบกับตาเปล่า

1. ความเข้มข้นในช่วง 0.01 ถึง 0.10 มิลลิกรัมไอโชนต่อลิตร

เติม indigo reagent 1 10 มิลลิลิตรในหลอดแก้วขนาด 100 มิลลิลิตร 2 หลอด หลอดแรกเติมน้ำกลั่นเพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบ (Blank) ส่วนอีกหลอดเติมน้ำตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์จนมีปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากนั้นเปรียบเทียบสีของทั้ง 2 หลอด โดยมองการมองจากด้านบน รินสารละลายในหลอดเปรียบเทียบ โดยการเปรียบเทียบ นี้ควรทำภายในเวลา 4 หลังการเก็บตัวอย่าง

2. ความเข้มข้นมากกว่า 0.1 มิลลิกรัมไอโชนต่อลิตร

ทำตามขั้นตอนในข้อที่ 1 แต่เพิ่มน้ำที่ต้องการทดลองที่ต้องการวิเคราะห์ 30 หรือ 45 มิลลิลิตร จากนั้นจึงเติมน้ำจนได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

3. กรณีที่น้ำตัวอย่างมีแมงกานีส ไม่ควรใช้วิธีการเปรียบเทียบกับตาเปล่า

5. การคำนวณ (Calculation)

ก. กระบวนการการใช้ Spectrophotometer

$$\text{mgO}_3/\text{L} = \frac{100 * \Delta A}{f * b * V}$$

- โดย ΔA = ความแตกต่างระหว่างค่าการดูดกลืนของตัวอย่างกับตัวเปรียบเทียบ
 b = ความกว้างของเซลล์ (เซนติเมตร)
 V = ปริมาตรของตัวอย่าง (มิลลิลิตร) โดยทั่วไปมีค่า 90 มิลลิลิตร
 f = 0.42

ค่า f มาจากค่า sensitive factor ที่ 20,000/cm สำหรับการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตรต่อโมลของไอโอดีนที่เพิ่มเข้ามาต่อลิตร ซึ่งจะถูกวัดเทียบ (Calibrate) ด้วยการไทเทรชันแบบไอโอดิเมตริก (Iodometric)

ข. กระบวนการใช้การเปรียบเทียบด้วยตาเปล่า

$$\text{mgO}_3/\text{L} = \frac{(100 - V) * k}{100}$$

- โดย V = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน (มิลลิลิตร)
 k = Conversion factor สำหรับ indigo stock solution วัดเทียบวิเคราะห์โดยการวัดการดูดกลืนแสง มีค่าประมาณ 0.10 มิลลิกรัมไอโอดีนต่อลิตร เมื่อเจือจางที่สัดส่วน 1 ต่อ 100 ให้ค่าการดูดกลืนที่ 0.19 ต่อเซนติเมตร
 เมื่อเติมตัวอย่าง 45 หรือ 30 มิลลิลิตร ค่า Conversion factor จะเป็น 2k หรือ 3k ตามลำดับ

6. ความแม่นยำ (Precision and Bias)

- ก. กระบวนการใช้เครื่องวัดค่าดูดกลืนแสงเมื่อไม่มีสิ่งรบกวนระบบในการวิเคราะห์ ความผิดพลาดจะมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 5 โดยการทดลองในห้องปฏิบัติการอาจได้ความผิดพลาดน้อยกว่าร้อยละ 1 วิธีวิเคราะห์ที่อยู่บนพื้นฐานของความแตกต่างของค่าการดูดกลืนระหว่างตัวอย่างกับตั้งเปรียบเทียบ วิธีวิเคราะห์นี้ไม่เหมาะในการนำมาใช้กรณีสารตัวอย่างมีคลอรีนและแมงกานีส โดยที่สัดส่วนของแมงกานีสต่อไอโอดีนมีค่าน้อยกว่า 10 ต่อ 1 และความเข้มข้นไอโอดีนมากกว่า 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าที่วัดได้จะมีความผิดพลาดประมาณน้อยกว่าร้อยละ 20
- ข. กระบวนการใช้การเปรียบเทียบด้วยตาเปล่า วิธีวิเคราะห์นี้มีความเที่ยงเบนประมาณร้อยละ 1 ถึง 1.5 แต่ไม่เหมาะในการนำมาใช้กรณีมีแมงกานีสในตัวอย่างในสัดส่วนที่ใกล้เคียงกับไอโอดีน

ภาคผนวก ข

การวัดความเข้มข้นสาหร่ายด้วยวิธีน้ำหนักแห้ง(Dry weight method)

(Ai et al., 2008) และ (Krohn et al., 2011)

1. การเตรียมกระดาษกรอง

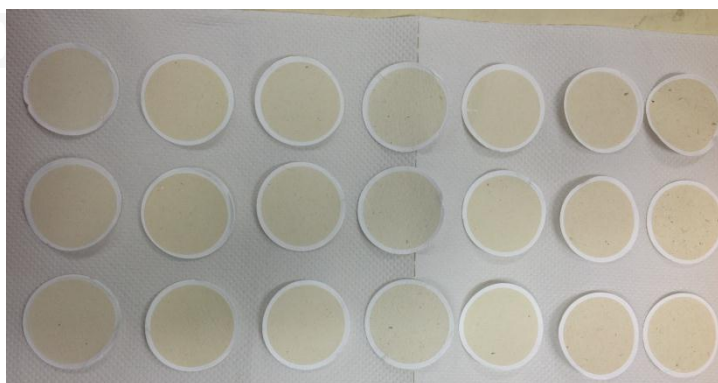
นำกระดาษกรองแบบ GF/C ขนาด 0.45 ไมครอน เส้นผ่าศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร มาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นในตู้ดูดความชื้นอย่างน้อย 1 คืน



รูปที่ ข.1 อุปกรณ์ในการกรอง

2. การวิเคราะห์น้ำหนักแห้ง

1. ชั่งน้ำหนักกระดาษกรองที่อบแล้ว
2. เตรียมน้ำตัวอย่าง 100-200 มิลลิลิตร แล้วกรองตัวอย่างผ่านปั๊มสุญญากาศ
3. นำกระดาษกรองไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นในตู้ดูดความชื้นอย่างน้อย 1 คืน
4. นำกระดาษกรองมาชั่งน้ำหนักอีกครั้ง
5. สรุปผลการทดลอง



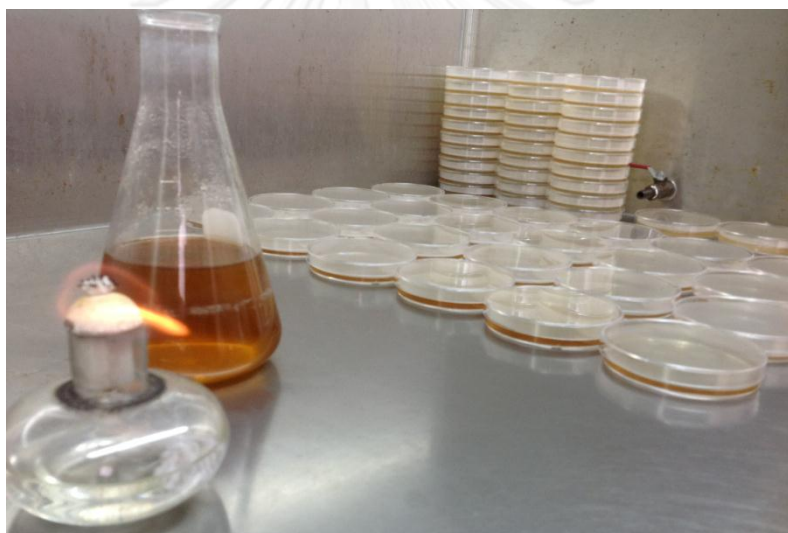
รูปที่ ข.2 สาหร่ายที่ผ่านการกรองแล้ว

ภาคผนวก ค

วิธีนับจำนวนแบคทีเรียในงานเพาะเชื้อ (Spread plate technique)

(American Public Health Association (APHA) et al., 2005)

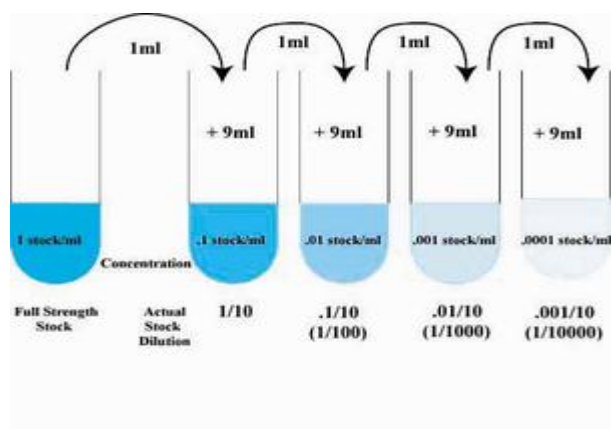
การนับจำนวนแบคทีเรียในงานเพาะเชื้อ Spread plate technique เป็นการแยกจุลินทรีย์ให้บริสุทธิ์ที่สามารถตรวจนับปริมาณได้โดยมีการเจือจางเป็นลำดับส่วน (Serial dilution) จากนั้นปิเปตตัวอย่างที่มีความเจือจางตามต้องการโดยวิธี aseptic technique ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตรใส่ตัวอย่างลงบนอาหารวุ้นแข็ง และทำการเกลี่ยตัวอย่างให้กระจายทั่วผิวหน้าอาหารด้วย Sterile spreader รูป L ที่ทำจากแท่งแก้ว โคโลนีของจุลินทรีย์จะเจริญบนอาหารวุ้นแข็งเท่านั้น วิธีการ Spread plate นี้ ง่ายและสะดวกกว่าวิธี Pour plate แต่ไม่เหมาะกับจุลินทรีย์พวกที่ไวต่อออกซิเจน



รูปที่ ค.1 การเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ (Medium agar)

วิธีการ spread plate

1. การเจือจางตัวอย่างแบบลำดับส่วนแบบ 10 เท่า น้ำเกลือไร้เชื้อความเข้มข้นร้อยละ 0.85 (เตรียมโดยใช้ โซเดียมคลอไรด์ 8.5 กรัม ในน้ำ 1 ลิตร แล้วนำไปเตรียมในหลอดทดลอง แต่ละหลอดเติมปริมาตร 9 มิลลิลิตร แล้วนำไปฆ่าเชื้อในตู้นิ่ง) เขย่าตัวอย่างให้เข้ากัน ดูน้ำตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลองที่มีน้ำเกลือ 9 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน จะได้น้ำตัวอย่างที่เจือจาง 10 เท่า ทำเช่นนี้ไปจนได้ความเข้มข้นที่ต้องการ ดังแสดงในรูปที่ ค.2



รูปที่ ค.2 แสดงการทำเจือจางลำดับส่วน

2. ใช้ปิเปตอันใหม่ดูดตัวอย่างที่มีเจือจางแล้ว จำนวน 0.1 มิลลิลิตร ที่ผสมเข้ากันดีแล้วใส่บนจานเพาะเชื้อ อาหารเลี้ยงเชื้อที่ใช้ในการทดลองคือ Nutrient broth
3. ใช้ Sterile spreader รูปตัวแอล เกลี่ยน้ำตัวอย่างบนผิวหน้าจานเพาะเชื้ออาหาร ให้กระจายทั่วทั้งจานก่อนนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส นาน 24-48 ชั่วโมง
4. สรุปลผลการทดลอง โดยสังเกตการเจริญเติบโต ลักษณะของโคโลนีและนับจำนวนโคโลนีบนจานเพาะเชื้อ ด้วยเครื่องมือนับโคโลนี



รูปที่ ค.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

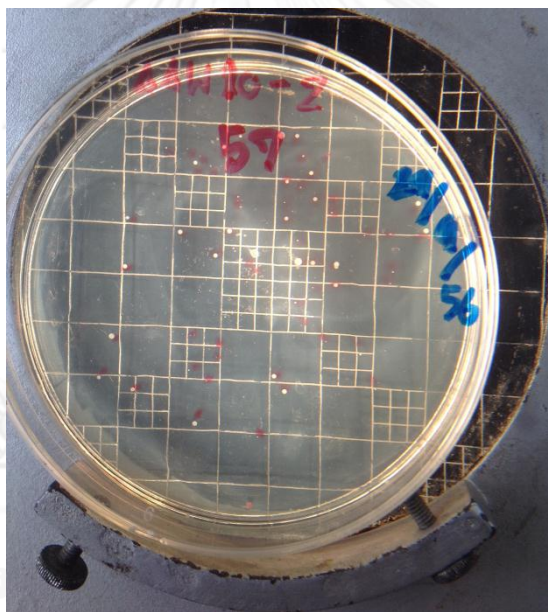
วิธีนับจำนวนโคโลนี ในการนับจำนวน โคโลนี ใช้เครื่องนับโคโลนี ซึ่งประกอบด้วยแสงและเลนส์สำหรับช่วยขยาย เวลานั้นควรทำเครื่องหมายบนจานตรงตำแหน่ง โคโลนี ที่นับแล้วเพื่อป้องกันการนับซ้ำ

จำนวนแบคทีเรียในตัวอย่างที่นำมาตรวจนับสามารถนำมาคำนวณได้ดังนี้

จำนวนแบคทีเรีย (1 มิลลิลิตร) = $\frac{\text{จำนวนโคโลนีบนจาน}}{\text{ความเจือจางของตัวอย่างที่นำมาทดสอบ}}$

เช่น ถ้าน้ำ 1 มิลลิลิตร นำไปทำให้เจือจาง 10,000 เท่า ($1:10^4$) เมื่อนำไปผสมกับอาหารวุ้นในจานและเมื่อนำไปเพาะปรากฏว่ามีโคโลนีเกิดขึ้น 250 โคโลนี

จำนวนแบคทีเรียในน้ำ 1 มิลลิลิตร = $\frac{250}{1/10^4}$ = 2,500,000 เซลล์



รูปที่ ค.4 การนับจำนวนโคโลนี

สิ่งสำคัญที่จะต้องคำนึงถึงคือ ถ้าจุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญในอาหารที่ใช้ เราก็ไม่สามารถนับจำนวนได้ซึ่งได้แก่ ไวรัส และแบคทีเรียเพาะยากบางชนิดจำนวนโคโลนี ที่ความเจือจางที่สูงควรน้อยกว่าจำนวนโคโลนี ที่ความเจือจางที่ต่ำลงมาประมาณ 10 เท่า เนื่องจากเราทำให้เจือจาง 10 เท่า ถ้าหากผลที่ออกมาคลาดเคลื่อนมากคือไม่เกิน 10 เท่า แสดงว่ามีความผิดพลาดเนื่องจากการที่ผสมเชื้อกับอาหารวุ้นไม่ดี หรือการทำเจือจางไม่ดี จำนวนโคโลนี ที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการคำนวณจำนวนโคโลนี ควรอยู่ระหว่าง 30 – 300 โคโลนี

ภาคผนวก ง

สูตรอาหารเลี้ยง N-8 medium
(Mandalam และ Palsson, 1998)

สูตรอาหาร N-8

สารเคมี	ปริมาณ (มิลลิกรัม)
$\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	260
K_2HPO_4	740
CaCl_2	10
FeEDTA	10
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	50
KNO_3	1000
Trace element	1
น้ำกลั่น	1000

สารเคมีสำหรับ Trace element

สารเคมี	ปริมาณ (มิลลิกรัม)
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$	3.58
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	12.98
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	1.83
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	3.20
น้ำกลั่น	1000

ภาคผนวก จ

การเตรียมวัสดุเพื่อวิเคราะห์อัตราการกัดกร่อนใช้วิธีตามมาตรฐาน ASTM G1-103

การเตรียมวัสดุและวิเคราะห์อัตราการกัดกร่อน

1. การเตรียมพื้นผิว (Surface preparation)

การเตรียมวัสดุเพื่อวิเคราะห์อัตราการกัดกร่อนใช้วิธีตามมาตรฐาน ASTM G1-103 (Standard practice for preparing, cleaning and evaluating corrosion test specimens) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- 1) วัสดุที่มีมุมแหลมคม จะเกิดกัดกร่อนบริเวณที่มีมุมแหลมอย่างรุนแรงมากกว่าบริเวณอื่น นั้นควรลบรอยแหลมคมเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการกัดกร่อน
- 2) หากมีสนิมหรือออกไซด์เกิดที่ผิวก่อนการทดสอบจำเป็นต้องล้างทำความสะอาดและกำจัดสนิมหรือออกไซด์ดังกล่าวออกไปก่อน
- 3) การตอกหมายเลขเพื่อระบุหมายเลขที่วัสดุมีข้อเสียคืออาจก่อให้เกิดการกัดกร่อนเฉพาะที่บริเวณที่ใกล้รอยตอกทำให้เกิดความความเค้น-ความเครียดสะสม ซึ่งจะทำให้ผลการทดลองคลาดเคลื่อนได้
- 4) เมื่อระบุหมายเลขเรียบร้อยแล้ว ต้องล้างทำความสะอาดวัสดุเพื่อกำจัดคราบน้ำมันด้วยสารละลายอินทรีย์หรือตัวทำละลายที่เป็นแอลกอฮอล์หรือเครื่องอัลตราโซนิก สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้เครื่องอัลตราโซนิก
- 5) ขั้นตอนสุดท้ายคือทำความสะอาดอีกครั้งเป่าให้แห้งแล้วนำไปเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนัก ด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ก่อนนำไปวิเคราะห์อัตราการกัดกร่อนในลำดับต่อไป

2. ขั้นตอนในการทำความสะอาดชิ้นงานภายหลังการทดสอบการกัดกร่อน (Methods for cleaning after testing)

ผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนสะสม (Corrosion products) จะเกิดขึ้นหลังการทดสอบการกัดกร่อนแล้วที่ เพื่อประเมินอัตราการกัดกร่อน (Corrosion rate) จำเป็นต้องชำระเอาผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนเหล่านี้ออกก่อน ซึ่งหลักการในอุดมคติควรขจัดเฉพาะผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อน (Corrosion products) ออกเท่านั้น โดยไม่ควรชำระเอาเนื้อวัสดุ (Substrate or base material) ออกไปด้วย เพราะมีผลกระทบโดยตรงต่อการประเมินอัตราการกัดกร่อนโดยเบื้องต้นอาจใช้วิธีทางกลช่วย เช่น ขูด (Scraping) เพื่อเอาผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนออกไปบางส่วนก่อน

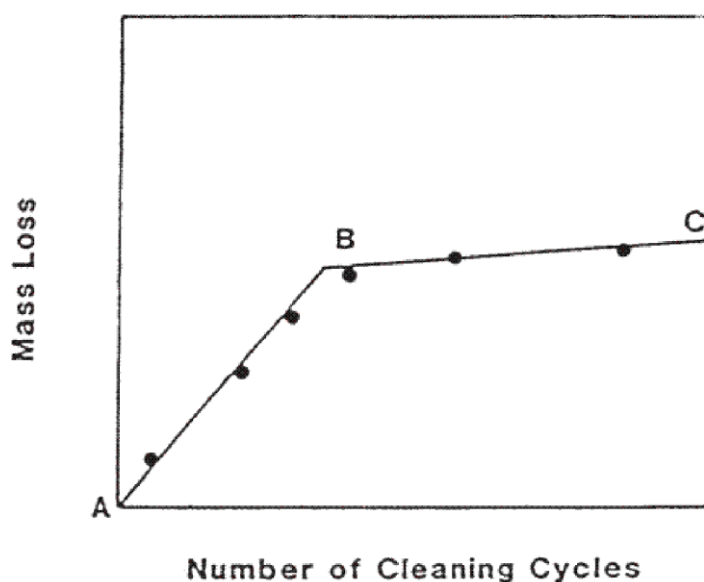


รูปที่ จ.1 ชิ้นงานหลังการทดสอบและการล้างด้วยวิธีเคมี



รูปที่ จ.2 ชิ้นงานหลังจากการทำความสะอาด

หลังจากนั้นนำวัสดุทดสอบไปชำระล้างผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนออกโดยใช้สารละลายตามมาตรฐาน ASTM G1-03 โดยจะใช้สารเคมีต่างกันตามโลหะแต่ละชนิดดังแสดงในตารางที่ จ.1 โดยต้องมีการล้างซ้ำหลายๆครั้งและภายหลังการล้างทุกครั้งต้องทำให้แห้ง แล้วชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักที่หายไปแล้วบันทึกผล จากนั้นนำค่าที่ได้ทั้งหมดมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่หายไปและจำนวนครั้งที่ล้างดังแสดงในรูปที่ จ.3 ซึ่งจะได้เส้นตรงสองเส้นคือ ช่วง AB และ BC น้ำหนักที่หายไปเนื่องจากการกัดกร่อนโดยประมาณคือจุด B ส่วนช่วง BC แทบจะเป็นเส้นตรง (มีน้ำหนักที่ใกล้เคียงที่) เพราะล้างผลิตภัณฑ์ที่ไถ่ลอกหมดแล้วหลังจากล้างผลิตภัณฑ์ออกหมดแล้วให้ล้างชิ้นงานให้สะอาดอีกครั้งแล้วเป่าให้แห้ง



รูปที่ จ.3 น้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานที่เกิดการกัดกร่อนและจำนวนรอบที่ล้างชิ้นงาน

สารละลายทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการชำระล้างผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนคือน้ำและสารเคมีต้องมีคุณภาพสูง (เกรดห้องปฏิบัติการ) เพื่อหลีกเลี่ยงการปนเปื้อนตัวอย่างของสารละลายที่ใช้ในการล้างผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนแสดงในตารางที่ จ.1

ตารางที่ จ.1 กระบวนการชำระล้างผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนด้วยวิธีทางเคมี

วัสดุ	สารละลาย	เวลาสัมผัส (นาที)	อุณหภูมิ(องศา เซลเซียส)	หมายเหตุ
ทองแดง และทองแดงผสม	กรดซัลฟิวริก (H ₂ SO ₄) 100 มล. ผสมน้ำกลั่นจนมี ปริมาตร 1 ล.	1-3	20 - 25	กำจัดอากาศที่ ละลายอยู่ใน สารละลายด้วย ก๊าซไนโตรเจนเพื่อ ลดความเสี่ยงต่อ การชะวัสดุ
เหล็ก และ เหล็กกล้า	กรดไฮโดรคลอริก (HCl) 500 มล. เฮกซะเมทิลีน เท ตะมีน (Hexamethylene tetramine) 3.5 กรัม	10	20 - 25	อาจต้องกวนแรง หรือใช้แปรงขัด และเพื่อให้แน่ใจว่า ชิ้นงานสะอาดอาจ ใช้เวลานานกว่าที่ กำหนด

3. การคำนวณ

อัตราการกัดกร่อนหาได้จากสมการนี้

$$\text{อัตราการกัดกร่อน} = \frac{K \times W}{A \times T \times D}$$

โดยที่ K คือ ค่าคงที่ การแปลงหน่วยอัตราการกัดกร่อนดังแสดงในตารางที่ ฌ2

T คือ เวลาสัมผัส (ชั่วโมง)

A คือ พื้นที่ (ตารางเซนติเมตร)

W คือ มวลที่หายไป (กรัม)

D คือ ความหนาแน่นของโลหะ (กรัม/ตารางเซนติเมตร)

ตารางที่ จ.2 ค่าคงที่การแปลงหน่วยอัตราการกัดกร่อน

หน่วยอัตราการกัดกร่อน	ค่าคงที่ของ K ในสมการ
Mills per year (mpy)	3.45×10^6
Inches per year (ipy)	3.45×10^8
Inches per month (ipm)	2.87×10^2
Millimetres per year (mm/y)	8.76×10^4
Micrometres per year (um/y)	8.76×10^7
picometres per year (pm/y)	2.78×10^6

ภาคผนวก ฉ

ผลการทดลอง

ตารางที่ ฉ1 ผลวิเคราะห์น้ำประปา

พารามิเตอร์	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
โซเดียม	มก./ล.	21	16	15	5.1	7
โพแทสเซียม	มก./ล.	12	11	10	9	8
แคลเซียม	มก./ล.	12	13	13	11	12
แมกนีเซียม	มก./ล.	3.6	2.5	2.1	2.6	3.1
คลอไรด์	มก./ล.	33	20	22	47	23
ไนเตรต	มก./ล.	-	0.6	-	-	-
ซัลเฟต	มก./ล.	28	21	76	74	23
ฟอสเฟต	มก./ล.	-	0.015	-	-	-
ไบคาร์บอเนต	มก. /ล.	60	72	87.5	86	80
พีเอช	-	7.1	7.0	7.4	7.2	7.0
ของแข็งละลายน้ำ	มก./ล.	162	146	133	129	120
ค่าการนำไฟฟ้า	มค.ซีเมนส์/ซม.	207	200	198	196	192

ตารางที่ ๑2 ผลวิเคราะห์น้ำหล่อเย็น

พารามิเตอร์	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
โซเดียม	มก./ล.	130	126	107	109	156
โพแทสเซียม	มก./ล.	75	66	55	48	61
แคลเซียม	มก./ล.	78	78	85	66	70
แมกนีเซียม	มก./ล.	24	24	20	22	21
คลอไรด์	มก./ล.	180	148	142	165	222
ไนเตรต	มก./ล.	39	4	40	11	11
ซัลเฟต	มก./ล.	177	157	183	193	223
ฟอสเฟต	มก./ล.	-	3.6	11	17	26
ไบคาร์บอเนต	มก. /ล.	225	225	203	229	213
พีเอช	-	8.1	8.0	8.4	8.5	8.1
ของแข็งละลายน้ำ	มก./ล.	1,024	919	1,050	884	915
ค่าการนำไฟฟ้า	มค.ซีเมนส์/ซม.	1,268	1,240	1,207	1,220	1,170

ตารางที่ ๑3 ผลของไอโซนละลายน้ำ

เวลาสัมผัสไอโซน (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	ไอโซนสะสม (มก./ล.)	ความเข้มข้นไอโซน (มก./ล.)
0	1.040	-	-
10	1.019	0.011	0.0011
20	0.995	0.013	0.0013
30	0.967	0.015	0.0015
40	0.941	0.014	0.0014
50	0.901	0.021	0.0021
60	0.837	0.034	0.0034

ตารางที่ ๑4 ผลของการใช้สารเคมีควบคุมสาหร่ายในน้ำหล่อเย็น

เวลา	ความเข้มข้นเซลล์ (มิลลิกรัม/ลิตร)
วันที่ 0	4.7
วันที่ 2	4.3
วันที่ 4	4.0
วันที่ 6	4.0

ตารางที่ ๑5 ผลของการใช้โอโซนต่อสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris*

เวลา	ความเข้มข้นเซลล์ (มิลลิกรัม/ลิตร)		
	ชุดควบคุม	โอโซน 10 นาที	โอโซน 20 นาที
วันที่ 0	12.3	12.3	12.3
วันที่ 2	13.6	12.7	11.3
วันที่ 4	14.6	12.6	10.4
วันที่ 6	15.6	12.4	9.6
วันที่ 8	16.4	12.7	9.8
วันที่ 10	17.6	12.7	11.1

ตารางที่ ๖ ผลของการใช้โอโซนต่อสาหร่ายในน้ำหล่อเย็น เวลาสัมผัส 1-10 นาที

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นเซลล์ (มิลลิกรัม/ลิตร)			
	วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 4	วันที่ 6
ชุดควบคุม	12.0	16.5	21.0	22.0
โอโซน 1 นาที	12.5	12.3	12.0	13.5
โอโซน 5 นาที	12.5	13.5	14.5	16.5
โอโซน 10 นาที	12.5	11.5	10.5	11.0

ตารางที่ ๗ ผลของการใช้โอโซนต่อสาหร่ายในน้ำหล่อเย็น เวลาสัมผัส 10-30 นาที

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นเซลล์ (มิลลิกรัม/ลิตร)			
	วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 4	วันที่ 6
ชุดควบคุม	6.3	8.0	9.8	13.3
โอโซน 10 นาที	6.3	5.7	5.2	6.7
โอโซน 20 นาที	6.3	5.8	5.2	5.7
โอโซน 30 นาที	6.3	5.7	5.1	5.7

ตารางที่ ๘8 ผลของการใช้ไอโซนแบคทีเรียในน้ำหล่อเย็น

เวลาสัมผัส (นาท)	ปริมาณแบคทีเรีย (ซีเอฟยู/มิลลิลิตร)	ร้อยละที่ลด
0	153,000	0
10	110,000	28
20	98,000	36
30	70,667	54

ตารางที่ ๘9 น้ำหนักที่หายไปของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

จำนวนรอบการล้าง	น้ำหนักที่หายไป (กรัม)		
	ชุดทดลองที่ไม่เติมสารเคมี	ชุดทดลองไอโซน	ชุดทดลองคลอรีน
0	0	0	0
1	0.22353	1.00033	0.2452
2	0.22693	1.00217	0.2478
3	0.22783	1.0026	0.2485
4	0.2287	1.00317	0.249
5	0.22927	1.00343	0.2493
6	0.22957	1.00367	0.2494

ตารางที่ ๘10 การคำนวณอัตราการกัดกร่อนโลหะของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

เหล็กกล้า	ชุดทดลองที่ไม่เติมสารเคมี	ชุดทดลองไอโซน	ชุดทดลองคลอรีน
เวลาสัมผัส (วัน)	60	60	30
พื้นที่ผิววัสดุ (ตร.ซม.)	9.68	9.68	9.68
ความหนาแน่น (ก/ตร.ซม.)	7.86	7.86	7.86
น้ำหนักที่หายไป (ก)	0.2235	1.0022	0.2452
ค่าคงที่	3450	3450	3450
อัตราการกัดกร่อน (นิ้ว/ปี)	0.0070	0.0316	0.0154

ตารางที่ ๑11 น้ำหนักที่หายไปของทองแดง

จำนวนรอบการล้าง	น้ำหนักที่หายไป (กรัม)		
	ชุดทดลองที่ไม่เติมสารเคมี	ชุดทดลองไอโซน	ชุดทดลองคลอรีน
0	0	0	0
1	0.00423	0.00753	0.004
2	0.00517	0.0078	0.0043
3	0.00555	0.0081	0.0049
4	0.00553	0.0084	0.0054
5	0.0057	0.00837	0.0055
6	0.00563	0.0085	0.0056

ตารางที่ ๑12 การคำนวณอัตราการกัดกร่อนโลหะของทองแดง

ทองแดง	ชุดทดลองที่ไม่เติมสารเคมี	ชุดทดลองไอโซน	ชุดทดลองคลอรีน
เวลาสัมผัส (วัน)	60	60	30
พื้นที่ผิววัสดุ (ตร.ซม.)	9.68	9.68	9.68
ความหนาแน่น (ก/ตร.ซม.)	8.94	8.94	8.94
น้ำหนักที่หายไป (ก)	0.0052	0.0075	0.0041
ค่าคงที่	3450	3450	3450
อัตราการกัดกร่อน (นิ้ว/ปี)	0.00014	0.00021	0.00022

ตารางที่ ๑13 ผลของการใช้อัลตราโซนิกต่อสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris*

เวลา	ความเข้มข้นเซลล์ (มิลลิกรัม/ลิตร)		
	ชุดควบคุม	อัลตราโซนิก 10 นาที	อัลตราโซนิก 20 นาที
วันที่ 0	12.3	12.3	12.3
วันที่ 2	13.6	12.4	11.6
วันที่ 4	14.6	11.1	10.7
วันที่ 6	15.6	9.8	9.8
วันที่ 8	16.4	9.3	7.8
วันที่ 10	17.6	11.3	9.8

ตารางที่ ๑14 ผลของการใช้อัลตราโซนิกต่อสาหร่ายในน้ำหล่อเย็น เวลาสัมผัส 5-20 นาที

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นเซลล์ (มิลลิกรัม/ลิตร)			
	วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 4	วันที่ 6
ชุดควบคุม	8.7	10.0	10.5	15.0
อัลตราโซนิก 5 นาที	8.7	9.0	9.3	13.7
อัลตราโซนิก 10 นาที	8.7	9.5	10.0	14.7
อัลตราโซนิก 15 นาที	8.7	10.0	10.5	12.5
อัลตราโซนิก 20 นาที	8.7	9.0	9.0	7.5

ตารางที่ ๑15 ผลของการใช้อัลตราโซนิกต่อสาหร่ายในน้ำหล่อเย็น เวลาสัมผัส 10-30 นาที

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นเซลล์ (มิลลิกรัม/ลิตร)			
	วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 4	วันที่ 6
ชุดควบคุม	6.3	8.0	9.8	13.3
อัลตราโซนิก 10 นาที	6.3	7.0	7.7	9.0
อัลตราโซนิก 20 นาที	6.3	6.2	6.2	6.3
อัลตราโซนิก 30 นาที	6.3	5.5	4.9	4.5

ตารางที่ ๑16 ผลของการใช้อัลตราโซนิก 22 วัตต์ต่อลิตร ต่อแบคทีเรียในน้ำหล่อเย็น

เวลาสัมผัส (นาที)	ปริมาณแบคทีเรีย (ซีเอฟยู/มิลลิลิตร)	ร้อยละที่ลด
0	153,000	0
10	153,000	0
20	143,000	7
30	120,667	21

ตารางที่ ๑17 ผลของการใช้อัลตราโซนิก 88 วัตต์ต่อลิตร ต่อแบคทีเรียในน้ำหล่อเย็น

เวลาสัมผัส (นาที)	ปริมาณแบคทีเรีย (ซีเอฟยู/มิลลิลิตร)	ร้อยละที่ลด
0	153,000	0
10	153,000	0
20	143,000	7
30	120,667	21

รายการคำนวณการออกแบบโอโซน

ข้อมูลพื้นฐานของระบบน้ำหล่อเย็น

อัตราการเติมน้ำทดแทน (make up flow)	600-800	ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง
อัตราการเวียนน้ำในระบบ (Recirculation flow)	36,000	ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง
สมมติขนาดอ่างเก็บน้ำ (Basin volume)		
ตามทฤษฎี เวลาเก็บกักอ่างเก็บน้ำเท่ากับ	8	นาที
ดังนั้น อ่างเก็บน้ำมีขนาด	4,800	ลูกบาศก์เมตร
เลือกใช้ ขนาดอ่างเก็บน้ำ	5,000	ลูกบาศก์เมตร

ค่าออกแบบระบบโอโซน

ค่า CT (Concentration of disinfectant and contact time)	0.1	มิลลิกรัม-นาที/ลิตร
ระยะเวลาการยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่าย	6	วัน
เลือกใช้	6	วัน

การออกแบบระบบโอโซน

ปริมาตรน้ำที่ใช้	5,000	ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง
ออกแบบ		
ระยะเวลาการยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่าย	6	วัน
อัตราการของระบบเท่ากับ	833	ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง
เลือกใช้ เวลาเดินระบบเท่ากับ	12	ชั่วโมง/วัน
ดังนั้น อัตราการไหลของระบบเท่ากับ	69.44	ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง
เลือกใช้	70	ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง
ความต้องการโอโซน		
เลือกใช้ เครื่องโอโซน 50 กรัม/ชั่วโมง ผลิตโอโซนได้	3.6	มิลลิกรัม/ลิตร
จากค่า CT ที่ต้องการเท่ากับ	0.1	

ดังนั้น	เครื่องโอโซน 50 ก/ชม รั้วอัตราการไหลได้	36	ลิตร/นาที
	หรือ	2.16	ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง
ความต้องการเครื่องผลิตโอโซน		32.4	เครื่อง
เลือกใช้		33	เครื่อง
เครื่องโอโซน 50 กรัม/ชั่วโมง ราคา		2,000,000	บาท
ดังนั้น	ค่าใช้จ่ายสำหรับเครื่องโอโซน	66,000,000	บาท
ค่าติดตั้งคิดเป็นร้อยละ 10		6,600,000	บาท
รวมเป็นค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น		72,600,000	บาท
คิดเป็นค่าลงทุนต่อหน่วย		14,520	บาท/ลูกบาศก์เมตร

รายการคำนวณการออกแบบอัลตราโซนิก

ข้อมูลพื้นฐานของระบบน้ำหล่อเย็น

อัตราการเติมน้ำทดแทน (make up flow)	600-800	ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง
อัตราการเวียนน้ำในระบบ (Recirculation flow)	36,000	ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง
สมมติขนาดอ่างเก็บน้ำ (Basin volume)		
ตามทฤษฎี เวลาเก็บกักอ่างเก็บน้ำเท่ากับ	8	นาที
ดังนั้น อ่างเก็บน้ำมีขนาด	4,800	ลูกบาศก์เมตร
เลือกใช้ ขนาดอ่างเก็บน้ำ	5,000	ลูกบาศก์เมตร

ค่าออกแบบระบบอัลตราโซนิก

Power intensity	7.33	กิโลวัตต์/ลูกบาศก์เมตร
ระยะเวลาการยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่าย	6	วัน
เลือกใช้	6	วัน

การออกแบบระบบอัลตราโซนิก

ปริมาตรน้ำที่ใช้ออกแบบ	5,000	ลูกบาศก์เมตร/วัน
ระยะเวลาการยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่าย	6	วัน
อัตราการของระบบเท่ากับ	833	ลูกบาศก์เมตร/วัน
เลือกใช้ เวลาเดินระบบเท่ากับ	12	ชั่วโมง/วัน
ดังนั้น อัตราการไหลของระบบเท่ากับ	69.44	ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง
เลือกใช้	70	ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง

ความต้องการกำลังไฟฟ้า

กำลังวัตต์ที่ต้องการ	7.33	กิโลวัตต์/ลูกบาศก์เมตร
ตั้งนั้น ความต้องการกำลังไฟฟ้า (Power intensity)	513	กิโลวัตต์
เลือกใช้ เครื่องอัลตราโซนิก ที่กำลังไฟฟ้า	2.40	กิโลวัตต์
ตั้งนั้น ต้องใช้เครื่องอัลตราโซนิก	213.8	เครื่อง
เลือกใช้	214	เครื่อง
เครื่องอัลตราโซนิก 2.4 กิโลวัตต์ ราคา	220,000	บาท
ตั้งนั้น ค่าใช้จ่ายสำหรับเครื่องอัลตราโซนิก	47,080,000	บาท
ค่าติดตั้งคิดเป็นร้อยละ 10	4,708,000	บาท
รวมเป็นค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น	51,788,000	บาท
<hr/>		
คิดเป็นค่าลงทุนต่อหน่วย	10,358	บาท/ลูกบาศก์เมตร

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเอกลักษณ์ เข้มเพชร เกิดเมื่อวันที่ 23 กันยายน พ.ศ. 2529 ที่จังหวัดอุบลราชธานี สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น เมื่อปีการศึกษา 2551 มีประสบการณ์การทำงาน 2 ปี ในตำแหน่งวิศวกรสิ่งแวดล้อม บริษัท แชน.อี. 68 คอนซัลติ้ง เอ็นจิเนียรส์ จำกัด เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่ภาควิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2554

ผลงานวิจัยส่วนหนึ่งจากวิทยานิพนธ์นี้ได้เผยแพร่ในงานประชุม "The 6th ASEAN Environmental Engineering Conference 2013" จัดขึ้นที่โรงแรมปทุมวันปริ้นเซส จังหวัดกรุงเทพมหานคร ประเทศไทย ในชื่อหัวข้อ Effects on ozone and ultrasonic on algae and bacteria deactivation in cooling water system เมื่อวันที่ 21-22 พฤศจิกายน 2556 และได้รับรางวัล Best paper award จากงานประชุมนี้

งานประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 13 จัดที่โรงแรมเดอะ ทวิน ทาวเวอร์ รong เมือง จังหวัดกรุงเทพมหานคร เมื่อวันที่ 26-28 มีนาคม 2557 ในหัวข้อ การศึกษาความเป็นไปได้ในการลดการใช้สารเคมีควบคุมจุลินทรีย์ในหอหล่อเย็นของโรงงานผลิตโอเลฟินส์



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY