

การพัฒนาระบบหัวฉีดไอโซนเวนจูรีสำหรับการบำบัดน้ำกลับมาใช้ใหม่เพื่อเพาะเลี้ยง
สาหร่ายสไปรูลินา



ณัฐพล ไชยวงศ์

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2565

การพัฒนาระบบหัวฉีดไอโซนเวนจูรีสำหรับการบำบัดน้ำกลับมาใช้ใหม่เพื่อเพาะเลี้ยง
สาหร่ายสไปรูลินา



ณัฐพล ไชยวงศ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

สำนักบริหารและพัฒนานิชาการ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การพัฒนาระบบหัวฉีดไอโซนเวนจูรีสำหรับการบำบัดน้ำกลับมาใช้ใหม่เพื่อเพาะเลี้ยง
สาหร่ายสไปรูลินา

ณัฐพล ไชยวงศ์

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ จตุรงค์กล้าเลิศ)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนวิวัฒน์ นิต์ศน์วิจิตร)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(รองศาสตราจารย์ ดร.จตุรภัทร วาฤทธิ์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หยาดฝน ทนงการกิจ)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐนิน โอภาสพัฒนกิจ)

รองอธิการบดี

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ชื่อเรื่อง	การพัฒนาระบบหัวฉีดโอโซนเวนจูรี่สำหรับการบำบัดน้ำกลับมาใช้ใหม่ เพื่อเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา
ชื่อผู้เขียน	นายณัฐพล ไชยวงศ์
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ จตุรงค์กล้าเลิศ

บทคัดย่อ

โอโซนถูกนำมาใช้ในภาคอุตสาหกรรมอาหารเพื่อฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน เนื่องจากมีสลายตัวเป็นออกซิเจนที่รวดเร็ว ไม่มีสารตกค้าง ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย แต่ด้วยเหตุผลในการใช้งานของอุตสาหกรรม ซึ่งโอโซนที่ละลายในน้ำมีระยะเวลาการสลายตัว และข้อจำกัดของการสร้างระดับความเข้มข้นที่จะนำไปใช้งานได้ ดังนั้นในการศึกษานี้จึงพัฒนาระบบหัวฉีดเวนจูรี่สำหรับผลิตน้ำโอโซนที่สามารถสร้างความเข้มข้นที่สูง และมีระยะเวลาการสลายตัวที่นานขึ้น ซึ่งเปรียบเทียบกับระบบหัวฉีดฟิวเซอร์แบบเดิม ผลการศึกษาพบว่าระบบหัวฉีดเวนจูรี่สามารถผลิตน้ำโอโซน ได้ดีกว่าในน้ำเย็น โดยมีค่าความเข้มข้นของน้ำโอโซน เวลาที่ใช้ในการสร้างปฏิกิริยา เวลาที่สลายตัว และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรเป็น 2.8 mg/l 20 min 50 min และ 0.198 min^{-1} ตามลำดับ น้ำโอโซนถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งจากการเก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูลินาโดยสามารถลดอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำและขจัดสีของน้ำได้ 85.65% และ 69.35% จลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาของการลดอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำถูกแสดงออกได้ดีในรูปแบบจำลองอันดับหนึ่ง โดยมีค่าคงที่เท่ากับ $6.50 \times 10^{-3} \text{ L/g-min}$ ด้วยการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งด้วยวิธีการดังกล่าว ทำให้สามารถนำน้ำที่บำบัดกลับมาใช้ต่อได้ โดยพบว่าเป็นแนวทางที่เหมาะสมในการควบคุมการเกิดการปนเปื้อนจากการนำน้ำเก่ามาใช้ งาน และยังช่วยลดต้นทุนการผลิตในเรื่องการใช้น้ำอีกด้วย

คำสำคัญ : ระบบหัวฉีดโอโซนเวนจูรี่, ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตร, การบำบัดน้ำ

Title	DEVELOPMENT OF OZONE VENTURI INJECTION SYSTEM (OVIS) WITH RECYCLING WATER TREATMENT FOR SPIRULINA CULTIVATION
Author	Mr. Natthapon Chaivong
Degree	Master of Engineering in Food Engineering
Advisory Committee Chairperson	Associate Professor Dr. Somkiat Jaturonglumlert

ABSTRACT

Ozone has been used for many food industries to disinfect water due to its oxidizing potential. Since it decomposes quickly into molecular oxygen, leaving no residue, it has important advantages for use. This causes existing industry up-to date is still using ozone gas in several treatments due to ozone has a decompose time and the concentration is limited to several treatments. Therefore, in this study ozone venturi injection system was developed to produce ozonated water with higher concentration and longer decompose time by compared with diffuser system (conventional method). The findings showed that the ozone venturi injection system was achieved in cool water with concentration of ozonated water, reaction time, decomposition time and volumetric mass transfer coefficient were 2.8 mg/l, 20 min, 50 min and 0.198 min^{-1} respectively. Ozonated water could be applied to treat wastewater from spirulina harvesting by reduction dissolved organic carbon and appearance color of water about 85.65% and 69.35%. The kinetics reaction of dissolved organic carbon was based on first-order model and had a constant factor is $6.50 \times 10^{-3} \text{ L/g-min}$. In order to improve water treatment, it is necessary to both subject the reused water to appropriate treatment to find effective way to control contaminants and reduce investment cost from water resource.

Keywords : Ozone venturi injection system, Volumetric mass transfer coefficient, Water treatment



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นผลงานที่ผู้วิจัยได้ทุ่มเทความตั้งใจ สติปัญญา กำลังกายและกำลังใจ จนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี โดยได้รับความอนุเคราะห์ คำแนะนำและความช่วยเหลือ จากบุคคลหลายฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งขอขอบพระคุณท่านรองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ จตุรงค์กล้าเลิศ ซึ่งเป็นประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้สละเวลาอันมีค่า ให้ความรู้ คำแนะนำ และคำปรึกษา ตลอดจนให้ความดูแลและเอาใจใส่เป็นอย่างดี จนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี จึงขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้เป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.จตุรภัทร วาฤทธิ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนวัฒน์ นิทัศน์วิจิตร ที่กรุณาได้รับเป็นกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ ความรู้ คำปรึกษาในด้านต่าง ๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณ คุณอาจารย์ ชำราชากรและเจ้าหน้าที่ของสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและสาขาวิชา วิศวกรรมอาหาร ที่คอยให้กำลังใจและคำแนะนำดี ๆ เสมอ และที่ให้ความช่วยเหลือ เพื่อให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ นักศึกษาปริญญาตรีและปริญญาโท ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ และเป็นกำลังใจในการทำงานวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ คุณแม่เบญจพร คำมุง ที่ให้การเลี้ยงดูอบรม ส่งเสริมการศึกษา เป็นกำลังใจที่ดี ให้การสนับสนุนทั้งในด้านการเรียนและการดำเนินชีวิต ให้คำปรึกษา จนทำให้ผู้จัดทำโครงการประสบความสำเร็จในการเรียน

ท้ายที่สุดนี้ ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์เล่มนี้คงเป็นประโยชน์สำหรับผู้อ่านไม่มากนักน้อยต่อไป

ณัฐพล ไชยวงศ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 การตรวจเอกสาร.....	4
2.1 โอโซน (Ozone).....	4
2.3 ระบบหัวฉีดเวนจูรี (Venturi).....	10
2.4 การถ่ายเทมวลของโอโซนในน้ำ (Mass transfer of ozonated water).....	13
2.5 การใช้ประโยชน์จากโอโซนในภาคอุตสาหกรรม (Ozone for industrial).....	15
2.6 สาหร่ายสไปรูลินา (Spirulina plantensis).....	16
2.7 การใช้โอโซนในการบำบัดน้ำเสีย (Ozone wastewater treatment).....	20
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	30
3.1 วัสดุและอุปกรณ์.....	30

3.2 การดำเนินงาน	31
1. การวัดความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำ	31
2. การศึกษาการสร้างน้ำโอโซน	33
3. การศึกษาการใช้โอโซนในการบำบัดน้ำหลังการเก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูลินา	38
4. การศึกษาการใช้น้ำหลังการบำบัดด้วยโอโซนเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา	40
3.3 งบประมาณที่ใช้ในการวิจัย	41
3.4 สถานที่ดำเนินการวิจัย	41
3.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	42
3.6 แผนการดำเนินงาน	43
บทที่ 4 ผลการศึกษาและวิจารณ์	44
4.1 การศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของโอโซนละลายในน้ำ	44
1. การศึกษาการสร้างน้ำโอโซนโดยระบบการกระจายฟองด้วยดิฟฟิวเซอร์ (Diffuser)	44
2. การศึกษาการสร้างน้ำโอโซนโดยระบบหัวฉีดเวนจูรี (Venturi)	46
3. การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของโอโซนละลายในน้ำ	49
4. การศึกษาผลของอุณหภูมิน้ำต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของโอโซนในน้ำ	52
4.2 การศึกษาการใช้โอโซนในการบำบัดน้ำหลังการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา	56
1. การศึกษาการบำบัดน้ำหลังการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาโดยระบบการกระจายฟองด้วยดิฟฟิวเซอร์	56
2. การศึกษาการบำบัดน้ำหลังการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาโดยระบบหัวฉีดเวนจูรี	58
4.3 การศึกษาการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาโดยใช้น้ำหลังผ่านการบำบัดด้วยโอโซน	62
1. การศึกษาอัตราส่วนของน้ำใหม่สารอาหารใหม่ต่อหัวเชื้อสาหร่ายเก่าที่เหมาะสม	63
2. การศึกษาการใช้น้ำทิ้งหลังการบำบัดด้วยโอโซนในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา	69
3. การวิเคราะห์การใช้พลังงานเบื้องต้น	74
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	78

บรรณานุกรม.....	80
ภาคผนวก.....	84
ภาคผนวก ก ภาพการดำเนินงาน	85
ภาคผนวก ข บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	90
ประวัติผู้วิจัย.....	103



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 คุณสมบัติของโอโซนเทียบกับออกซิเจน	4
ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ของคลอรีนเทียบกับโอโซนละลายในน้ำ	5
ตารางที่ 3 ครึ่งชีวิตของโอโซนก๊าซและโอโซนละลายในน้ำเทียบกับอนุมูลอิสระ	6
ตารางที่ 4 ความสามารถในการละลายน้ำของโอโซน.....	7
ตารางที่ 5 รายละเอียดการวิเคราะห์โอโซนละลายในน้ำด้วย.....	31
ตารางที่ 6 การสร้างน้ำโอโซนโดยระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์.....	34
ตารางที่ 7 อัตราการสลายตัวของน้ำโอโซนที่สร้างโดยระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์	35
ตารางที่ 8 การสร้างน้ำโอโซนโดยระบบหัวฉีดเวนจูรี่.....	36
ตารางที่ 9 อัตราการสลายตัวของน้ำโอโซนที่สร้างโดยระบบหัวฉีดเวนจูรี่.....	37
ตารางที่ 10 การสร้างน้ำโอโซนโดยอนุมูลอิสระของน้ำที่แตกต่างกัน.....	38
ตารางที่ 11 อัตราการสลายตัวของน้ำโอโซนที่อนุมูลอิสระของน้ำที่แตกต่างกัน.....	38
ตารางที่ 12 การตรวจสอบคุณภาพน้ำหลังการบำบัดด้วยโอโซน.....	39
ตารางที่ 13 การตรวจสอบการเจริญเติบโตของสาหร่ายสีไปรุลินา.....	40
ตารางที่ 14 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของระบบการกระจายฟองดีฟิวเซอร์.....	49
ตารางที่ 15 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของระบบการหัวฉีดเวนจูรี่.....	50
ตารางที่ 16 ผลของอนุมูลอิสระต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของโอโซนละลายในน้ำ.....	55
ตารางที่ 17 คุณภาพน้ำหลังการบำบัดโดยระบบการกระจายฟองด้วยโอโซนดีฟิวเซอร์.....	57
ตารางที่ 18 คุณภาพน้ำหลังการบำบัดโดยระบบหัวฉีดโอโซนเวนจูรี่.....	59
ตารางที่ 19 อัตราจลนพลศาสตร์ของการลด DOC ตามจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งและอันดับสอง ...	62
ตารางที่ 20 วิเคราะห์การใช้พลังงานของระบบการบำบัดน้ำทิ้งหลังการเก็บเกี่ยว.....	75
ตารางที่ 21 การประหยัดน้ำในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสีไปรุลินา.....	76



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 ลักษณะการเกิดก๊าซโอโซนโดยปรากฏการณ์โคโรนาดีสชาร์จ.....	1
ภาพที่ 2 ลักษณะการแตกตัวของออกซิเจนกลายเป็นก๊าซโอโซน.....	7
ภาพที่ 3 ระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์.....	10
ภาพที่ 4 ลักษณะของหัวฉีดเวนจูรี่.....	11
ภาพที่ 5 ระบบหัวฉีดเวนจูรี่.....	12
ภาพที่ 6 การถ่ายเทมวลสารตามทฤษฎี Two film theory.....	14
ภาพที่ 7 Spectrophotometer HANNA HI801.....	31
ภาพที่ 8 การสร้างน้ำโอโซนโดยระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์.....	34
ภาพที่ 9 การสร้างน้ำโอโซนโดยระบบหัวฉีดเวนจูรี่.....	36
ภาพที่ 10 แผนภาพการดำเนินงานวิจัย.....	42
ภาพที่ 11 ความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำโดยระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์ ที่ก๊าซ โอโซน Dose 10,000 ppm.....	45
ภาพที่ 12 ความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำที่โดยระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์ ที่ก๊าซ โอโซน Dose 15,000 ppm.....	45
ภาพที่ 13 ความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำโดยระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์ ที่ก๊าซ โอโซน Dose 20,000 ppm.....	46
ภาพที่ 14 ความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำโดยระบบหัวฉีดเวนจูรี่ ที่ก๊าซโอโซน Dose 10,000 ppm.....	47
ภาพที่ 15 ความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำโดยระบบหัวฉีดเวนจูรี่ ที่ก๊าซโอโซน Dose 15,000 ppm.....	48
ภาพที่ 16 ความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำโดยระบบหัวฉีดเวนจูรี่ ที่ก๊าซโอโซน Dose 20,000 ppm.....	48

ภาพที่ 17 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของการสร้างน้ำโอโซน โดยระบบการกระจายฟองดีฟิวเซอร์และระบบหัวฉีดเวนจูรี	52
ภาพที่ 18 ความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำ ณ อุณหภูมิ 27-30 °C และ15-18 °C ที่ก๊าซโอโซน Dose 10,000	53
ภาพที่ 19 ความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำ ณ อุณหภูมิ 27-30 °C และ15-18 °C ที่ก๊าซโอโซน Dose 15,000 ppm.....	53
ภาพที่ 20 ความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำ ณ อุณหภูมิ 27-30 °C และ15-18 °C ที่ก๊าซโอโซน Dose 20,000 ppm.....	54
ภาพที่ 21 การใช้โอโซนในการบำบัดน้ำหลังการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา	56
ภาพที่ 22 อินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำที่ลดลงของระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์ เทียบกับระบบหัวฉีดเวนจูรี.....	60
ภาพที่ 23 %DOC Removal ของระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์เทียบกับระบบหัวฉีดเวนจูรี	60
ภาพที่ 24 สีปรากฏของน้ำจากการบำบัดโดยระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์ เทียบกับระบบหัวฉีดเวนจูรี	61
ภาพที่ 25 ผลของ (A) จลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง (B) จลนพลศาสตร์อันดับสอง	61
ภาพที่ 26 อัตราส่วนของน้ำใหม่สารอาหารใหม่ต่อหัวเชื้อสาหร่ายเก่า.....	63
ภาพที่ 27 การเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลินาโดยใช้น้ำใหม่สารอาหารใหม่ ร่วมกับหัวเชื้อสาหร่ายใหม่ (Control).....	64
ภาพที่ 28 การเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลินาโดยใช้น้ำใหม่สารอาหารใหม่ 80% ร่วมกับหัวเชื้อสาหร่ายเก่า 20% (80:20).....	64
ภาพที่ 29 การเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลินาโดยใช้น้ำใหม่สารอาหารใหม่ 70% ร่วมกับหัวเชื้อสาหร่ายเก่า 30% (70:30).....	65
ภาพที่ 30 การเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลินาโดยใช้น้ำใหม่สารอาหารใหม่ 60% ร่วมกับหัวเชื้อสาหร่ายเก่า 40% (60:40).....	65
ภาพที่ 31 การเพิ่มขึ้นของอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำโดยใช้น้ำใหม่สารอาหารใหม่ ร่วมกับหัวเชื้อสาหร่ายใหม่ (Control).....	66

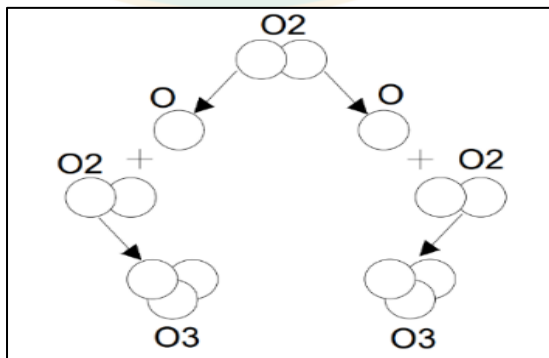
ภาพที่ 32 การเพิ่มขึ้นของอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำโดยใช้น้ำใหม่สารอาหารใหม่ 80% ร่วมกับหัวเชื้อสาหร่ายเก่า 20% (80:20).....	67
ภาพที่ 33 การเพิ่มขึ้นของอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำโดยใช้น้ำใหม่สารอาหารใหม่ 70% ร่วมกับหัวเชื้อสาหร่ายเก่า 30% (70:30).....	67
ภาพที่ 34 การเพิ่มขึ้นของอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำโดยใช้น้ำใหม่สารอาหารใหม่ 60% ร่วมกับหัวเชื้อสาหร่ายเก่า 40% (60:40).....	68
ภาพที่ 35 การใช้น้ำทิ้งหลังการบำบัดด้วยโอโซนในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา	69
ภาพที่ 36 ผลของการเพาะเลี้ยงด้วยน้ำที่ต่างกันต่อความหนาแน่นเซลล์ของสาหร่ายสไปรูลินา.....	70
ภาพที่ 37 ผลของการเพาะเลี้ยงด้วยน้ำที่ต่างกันต่ออัตราการเติบโตของสาหร่ายสไปรูลินา (μ , Day ⁻¹)	71
ภาพที่ 38 ผลของการเพาะเลี้ยงด้วยน้ำที่ต่างกันต่อชีวมวลสาหร่ายสไปรูลินาสอด (W , g _w /L).....	72
ภาพที่ 39 ผลของการเพาะเลี้ยงด้วยน้ำที่ต่างกันต่อชีวมวลสาหร่ายสไปรูลินาแห้ง (B , g _D /L).....	72
ภาพที่ 40 ผลของการเพาะเลี้ยงด้วยน้ำที่ต่างกันต่อผลผลิตสาหร่ายสไปรูลินาแห้ง (P_x , g/L-Day) ..	73
ภาพที่ 41 การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาด้วยระบบถังปิดอัจฉริยะ.....	76
ภาพที่ 42 เครื่องกำเนิดโอโซน (A) เครื่องกำเนิดโอโซน 7 g/hr. และภาชนะขนาด 0.3 m ³ (B) เครื่องกำเนิดโอโซน 5 g/hr.	86
ภาพที่ 43 ระบบสร้างน้ำโอโซน (A) ระบบหัวฉีดเวนจูรี่ (B) ระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์	86
ภาพที่ 44 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำ.....	87
ภาพที่ 45 การบำบัดน้ำทิ้งหลังการเก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูลินา	87
ภาพที่ 46 การวิเคราะห์ค่าสีปรากฏของน้ำหลังการบำบัด	88
ภาพที่ 47 การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาด้วยน้ำหลังการบำบัดด้วยโอโซน.....	88
ภาพที่ 48 การวิเคราะห์การเจริญเติบโตของสาหร่ายด้วย Photopette	89
ภาพที่ 49 ตรวจสอบเซลล์สาหร่ายสไปรูลินา สำหรับใช้ในการเพาะเลี้ยง	89

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันในอุตสาหกรรมมีความต้องการใช้น้ำโอโซนมากขึ้น เนื่องจากประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อ และยังสามารถสลายตัวเป็นออกซิเจนได้ในเวลาที่สั้นแต่ด้วยโอโซนนั้นมีประสิทธิภาพในการละลายในน้ำที่ต่ำ ซึ่งขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยทั้งปริมาณน้ำ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อุณหภูมิ รวมถึงแรงดัน โดยโอโซนหรือไตรออกซิเจน (Trioxigen, O_3) ถูกพบครั้งแรกในปี พ.ศ. 2383 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมัน ชื่อว่า C. F. Schonbein ต่อมาปี พ.ศ. 2431 ได้จดลิขสิทธิ์ชื่อว่า “ก๊าซโอโซน” โดยโอโซนเป็นสารออกซิไดซ์ที่มีความสามารถสำหรับการฆ่าเชื้อ การยับยั้งไวรัส การกำจัดกลิ่น การฟอก และการย่อยสลายสารอินทรีย์ โอโซนเป็นก๊าซที่ไม่เสถียรทำให้โอโซนสามารถสลายตัวเป็นออกซิเจนได้ หลักการผลิตโอโซนนั้นสามารถทำได้โดยการทำลายพันธะของออกซิเจนโดยใช้พลังงานเพื่อทำให้ออกซิเจนจาก 2 อะตอม (O_2) เหลือ 1 อะตอม (O) และทำให้ออกซิเจนจับกันกับอะตอมของออกซิเจนอื่น ๆ เพื่อเป็นโอโซน (O_3) ดังแสดงในภาพที่ 1 อย่างไรก็ตามการใช้ประโยชน์จากกระบวนการผลิตน้ำโอโซนนี้ถูกจำกัดด้วยความสามารถในการละลายของโอโซนที่ค่อนข้างต่ำ นอกจากนี้ยังมีสารประกอบบางชนิดที่ไม่สามารถออกซิไดซ์ได้ง่าย ๆ เช่น แอมโมเนีย และสารกำจัดศัตรูพืช จึงมีการใช้ความเข้มข้นก๊าซโอโซน (Dose) ที่มากขึ้นเพื่อชดเชยความสามารถในการละลายของโอโซนในน้ำ (Ozonated water, Ow) ที่ต่ำ แต่สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่ามีการใช้โอโซนไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร ซึ่งนำไปสู่กระบวนการผลิตน้ำโอโซนที่มีต้นทุนสูง นอกจากนี้การใช้โอโซนในปริมาณที่มากเกินไปส่งผลให้เกิดโบรเมต ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งที่เป็นผลข้างเคียงที่เป็นอันตรายจากปฏิกิริยาของโอโซน (Siegler, 2011; ปิยะวิทย์, 2563)



ภาพที่ 1 ลักษณะการเกิดก๊าซโอโซนโดยปรากฏการณ์โคโรนาดีสชาร์จ

ที่มา: (ปิยะวิทย์, 2563)

ก๊าซโอโซนสามารถละลายลงในน้ำเพื่อผลิตน้ำโอโซน โดยโอโซนสามารถละลายน้ำได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ และค่า pH ต่ำ โดยทั่วไปมีอยู่ 2 วิธี วิธีแรกคือ วิธีการกระจายฟอง (Diffuser) ซึ่งใช้อุปกรณ์ที่มีรูพรุนสำหรับทำให้ก๊าซแตกออกเป็นฟองเล็ก ๆ เพื่อให้ฟองค่อย ๆ ลอยขึ้นไปทางด้านบนของผิวน้ำ และละลายเป็นน้ำโอโซน วิธีที่สองคือ วิธีหัวฉีดเวนจูรี (Venturi) ซึ่งต้องใช้ความต่างของแรงดันเพื่อสร้างสุญญากาศเพื่อดูดก๊าซโอโซนเข้าสู่เวนจูรี ปฏิกิริยาการสลายตัวของโอโซนในทางเคมีเกิดขึ้นได้ 2 แบบ คือ ปฏิกิริยาการสลายตัวทางอ้อม และปฏิกิริยาการสลายตัวทางตรง โดยในการสลายตัวของโอโซนนั้นขึ้นกับอุณหภูมิ และค่า pH ยิ่งอุณหภูมิสูงและค่า pH ที่สูงจะยิ่งส่งผลให้การสลายตัวของโอโซนในน้ำเร็วยิ่งขึ้น (Galdeano et al., 2018; Zainuddin et al., 2017)

อุตสาหกรรมปัจจุบันนิยมนำโอโซนมาใช้ทั้งรูปแบบก๊าซ และของเหลว หนึ่งในการใช้งานของอุตสาหกรรมที่มีการนำโอโซนมาใช้ คือการบำบัดน้ำเสียเพื่อบำบัดก่อนปล่อยสู่ธรรมชาติรวมถึงการบำบัดเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ เพื่อลดของเสียในกระบวนการผลิต และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการทำลายระบบนิเวศน์ โดยผู้วิจัยสังเกตเห็นปัญหาจากผู้ประกอบการธุรกิจเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา เมื่อมีการเลี้ยงสาหร่ายไปจนถึงรอบการเก็บเกี่ยวแล้วจะมีการกรองเนื้อสาหร่ายเพื่อนำเนื้อสาหร่ายไปแปรรูป ส่งผลให้เกิดน้ำทิ้งหลังการกรองเอาเนื้อสาหร่ายที่มีปริมาณมาก หากไม่มีการจัดการที่ดีจะทำให้เกิดของเสีย (Defect waste) ในกระบวนการเก็บเกี่ยวสาหร่ายปริมาณมาก ส่งผลต่อต้นทุนในการเพาะเลี้ยง และยังส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม จึงมีแนวคิดในการใช้โอโซนในการบำบัดน้ำเสียหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิตสาหร่ายสไปรูลินา เพื่อนำกลับมาใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายซ้ำ

งานวิจัยนี้จะกล่าวถึงการพัฒนาวิธีการสร้างน้ำโอโซนโดยระบบหัวฉีดเวนจูรี ในการบำบัดน้ำเสียหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิตของสาหร่ายสไปรูลินาเพื่อนำกลับมาใช้เพาะเลี้ยงสาหร่ายอีกครั้ง โดยศึกษาผลกระทบจากปัจจัยต่าง ๆ ในการสร้างน้ำโอโซน ซึ่งเลือกปัจจัยที่ส่งผลกระทบในการผลิตน้ำโอโซนคือ ค่าความเข้มข้นของก๊าซโอโซน ปริมาตรของน้ำ และอุณหภูมิของน้ำในการผลิตน้ำโอโซน ทำการศึกษาการสร้างน้ำโอโซนโดยวิเคราะห์ความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำ (Ozonated water, Ow) และคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตร (Volumetric mass transfer coefficient, k_La) รวมถึงการประยุกต์ใช้ระบบการสร้างน้ำโอโซนในการบำบัดน้ำทิ้งหลังการเก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูลินา โดยจะทำการวิเคราะห์อินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (Dissolved organic carbon, DOC) ที่ลดลง ค่าสีปรากฏของน้ำ (Appearance color of water, APW) และศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยา

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความสามารถในการสร้างน้ำไอโซนโดยระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์ (Diffuser) และระบบหัวฉีดเวนจูรี (Venturi)
2. เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตร (Volumetric mass transfer coefficient, k_La) ของไอโซนในน้ำ โดยระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์ (Diffuser) และระบบหัวฉีดเวนจูรี (Venturi)
3. เพื่อบำบัดน้ำเสียหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิตของสาหร่ายสไปรูลินาด้วยไอโซนและนำกลับไปใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาซ้ำ

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงความสามารถในการสร้างน้ำไอโซนโดยระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์ (Diffuser) และระบบหัวฉีดเวนจูรี (Venturi)
2. ทราบถึงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตร (Volumetric mass transfer coefficient, k_La) ของไอโซนในน้ำ โดยระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์ (Diffuser) และระบบหัวฉีดเวนจูรี (Venturi)
3. ทราบถึงประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียด้วยไอโซนและทราบถึงคุณสมบัติของน้ำหลังการบำบัดเพื่อใช้เพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาซ้ำ

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1. เครื่องกำเนิดไอโซนขนาด 5 g/hr. 1 เครื่อง
2. ระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์ขนาด 4” 1 ตัว
3. ระบบหัวฉีดเวนจูรีขนาด 1.5” 1 ตัว
4. น้ำเสียหลังการเก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูลินา

บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

2.1 โอโซน (Ozone)

โอโซน

โอโซน คือ สารชนิดหนึ่งที่ถูกผลิตจากออกซิเจนซึ่งมีอยู่โดยใช้พลังงานไฟฟ้า หรือรังสีอัลตราไวโอเล็ต เปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีของออกซิเจนจาก 2 อะตอม (O_2) ให้เป็น 3 อะตอม (O_3) ใน 1 โมเลกุล โดยก๊าซโอโซน (O_3) ที่มีสมบัติ ที่เรียกว่า “Deodorize sewer gases” โอโซนสามารถละลายน้ำได้ดีมากที่อุณหภูมิต่ำ จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในรูปแบบที่เป็นสารละลายโอโซน ที่มีสมบัติเป็นสารฆ่าเชื้อโรคในน้ำที่เรียกว่า Polluted water disinfectant (สืบตระกูล, 2557; สุพิชฌาย์, 2550)

คุณสมบัติ

โอโซน (O_3) เป็นออกซิเจนในรูปแบบอัลโลทรอปิก (O_2) กล่าวคือประกอบด้วยอะตอมเดียวกัน แต่รวมกันในรูปแบบที่ต่างกันความแตกต่าง คือการมีออกซิเจน 3 อะตอม ในขณะที่ออกซิเจนทั่วไปมีเพียง 2 อะตอม มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ($MW = 48$) ซึ่งมีอะตอมของออกซิเจนสามจัดเรียงเป็นโซ่ โอโซนเป็นหนึ่งในสารออกซิแดนซ์ที่มีพลังมากกว่าที่รู้จักกันและด้วยเหตุนี้จึงมีความสามารถในการฆ่าเชื้อโรค และทำให้ปราศจากเชื้อได้ โดยคุณสมบัติของโอโซนเทียบกับออกซิเจนแสดงดังตารางที่ 1 (Siegler, 2011)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของโอโซนเทียบกับออกซิเจน

คุณสมบัติ	โอโซน (O_3)	ออกซิเจน (O_2)
สูตรโมเลกุล	O_3	O_2
น้ำหนักโมเลกุล	48 g/mol	32 g/mol
สี	ฟ้าอ่อน	ไม่มีสี
กลิ่น	กลิ่นหลังเกิดฝนตก	ไม่มีกลิ่น
จุดเดือด	-111.3 °C	-183 °C
ความหนาแน่น	2.141 kg/m ³	1.429 kg/m ³
การละลายในน้ำ (LO_3/LH_2O)	0.64 (190 mg/l)	0.049 (14.6 mg/l)

ที่มา: (Siegler, 2011)

คุณสมบัติอีกประการหนึ่งของโอโซนคือความสามารถในการดูดซับรสชาติ และกลิ่นในน้ำ โดยโอโซนจะทำลายสารประกอบอินทรีย์ที่ก่อให้เกิดกลิ่นได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ยังมีประโยชน์ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำ เช่น เหล็ก และแมงกานีส ในสภาวะปกติความดัน และอุณหภูมิโอโซนจะไม่เสถียรในทางตรงกันข้ามระดับความเสถียรจะมากขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ โอโซนเป็นสารฆ่าเชื้อที่เหนือกว่าสารเคมีฆ่าเชื้ออื่น ๆ โดยพบว่าโอโซนเมื่อเทียบกับคลอรีนมีฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์ที่รุนแรงและรวดเร็วกว่า ดังแสดงในตารางที่ 2 (Siegler, 2011)

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ของคลอรีนเทียบกับโอโซนละลายในน้ำ

การเกิดปฏิกิริยาในน้ำ	คลอรีน (NaOCl)	โอโซน (O ₃)
ศักยภาพในการออกซิเดชัน (โวลต์)	1.36	2.07
ฆ่าเชื้อโรค		
-แบคทีเรีย	ปานกลาง	สูง
-ไวรัส	ปานกลาง	สูง
เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม	ไม่	ใช่
การกำจัดสี	ดี	ดีมาก
การก่อเมเร็ง	เป็นไปได้	เป็นไปได้
การออกซิเดชันสารอินทรีย์	ปานกลาง	สูง
การตกตะกอนขนาดเล็ก	ไม่มี	ปานกลาง
ผลของ pH	ส่งผล	ส่งผลเล็กน้อย
ครึ่งชีวิตในน้ำ	2-3 ชั่วโมง	20 นาที
อันตรายจากการปฏิบัติงาน		
-ความเป็นพิษต่อผิวหนัง	สูง	ปานกลาง
-ความเป็นพิษจากการสูดดม	สูง	สูง
ความซับซ้อน	สูง	สูง
ต้นทุน	ต่ำ	สูง
ผลต่อสภาพอากาศ	ไม่มี	ส่งผล

ที่มา: (Siegler, 2011)

จะเห็นว่าคลอรีนเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของสารฆ่าเชื้อที่ใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร แต่มีอันตรายแฝงอยู่ ซึ่งเกิดเมื่อคลอรีนทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ในน้ำ อันตรายเหล่านี้เป็นที่รู้ดีในชื่อสารก่อมะเร็ง แต่โอโซนเมื่อโอโซนทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์จะไม่ก่อให้เกิดอันตรายแฝงพิษ นอกจากนี้คลอรีนจำเป็นต้องมีการขนส่ง และจัดเก็บสารเคมีที่อาจเป็นอันตรายอีกด้วย

โอโซนมีครึ่งชีวิตในสถานะก๊าซนานกว่าในสารละลายในน้ำ โอโซนในน้ำบริสุทธิ์จะสลายตัวเป็นออกซิเจนได้ค่อนข้างเร็ว และยิ่งในน้ำที่ไม่บริสุทธิ์จะยิ่งสลายตัวเร็วขึ้น ความสามารถในการละลายของโอโซนสูงกว่าออกซิเจนอย่างมากที่อุณหภูมิ 0 - 30 °C และละลายได้มากขึ้นในน้ำที่เย็น การสลายตัวของโอโซนเร็วขึ้นเมื่ออุณหภูมิของน้ำสูงขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 3 (Siegler, 2011)

ตารางที่ 3 ครึ่งชีวิตของโอโซนก๊าซและโอโซนละลายในน้ำเทียบกับอุณหภูมิ

โอโซนก๊าซ		โอโซนละลายในน้ำ	
อุณหภูมิ (°C)	ครึ่งชีวิต	อุณหภูมิ (°C)	ครึ่งชีวิต
-50 °C	3 เดือน	15 °C	30 นาที
-35 °C	18 วัน	20 °C	20 นาที
-25 °C	8 วัน	25 °C	15 นาที
20 °C	3 วัน	30 °C	12 นาที
120 °C	1.5 ชั่วโมง	35 °C	8 นาที
250 °C	1.5 วินาที	-	-

ที่มา: (Siegler, 2011)

ความสามารถในการละลายของโอโซน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำและความเข้มข้นของโอโซนในเฟสก๊าซ โดยความสามารถในการละลายในน้ำของโอโซนที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ความสามารถในการละลายน้ำของโอโซน

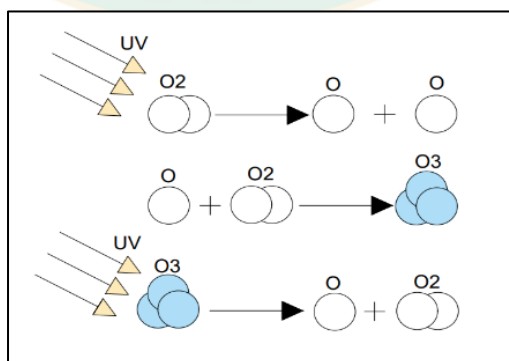
อุณหภูมิ (°C)	ความสามารถในการละลายน้ำของโอโซน ($\text{LO}_3/\text{LH}_2\text{O}$)
0	0.640
15	0.456
27	0.270
40	0.112
60	0

ที่มา: (Siegler, 2011)

จากข้อมูลในตารางความเข้มข้นของน้ำโอโซนขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโอโซนในเฟสของก๊าซ ความดันของก๊าซและอุณหภูมิของน้ำ รวมไปถึงเทคนิคในการผสมของเหลวกับก๊าซ

ลักษณะเด่น และการสลายตัวของโอโซน

โอโซนเป็นสารที่เกิดขึ้นได้ในธรรมชาติในชั้นบรรยากาศสตราโทสเฟียร์ (Stratosphere) โดยรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet ray: UV) ทำให้ก๊าซออกซิเจนแตกตัวจาก 2 อะตอม เป็นก๊าซโอโซน ดังแสดงในภาพที่ 2 โดยก๊าซโอโซนเกิดขึ้นเมื่ออะตอมที่แตกตัวรวมกับโมเลกุลของออกซิเจนซึ่งต่อกันด้วยปฏิกิริยาโฟโตเคมีคอล (Photochemical reaction) ทำให้โอโซนสามารถสลายตัวอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้โอโซนจะสามารถเกิดโดยวิธีข้างต้นแล้วยังสามารถเกิดจากกระบวนการโคโรนาดีสชาร์จ (Corona discharge) ซึ่งเกิดขึ้นเวลาเกิดฟ้าร้อง ฟ้าผ่า ระหว่างฝนตก โดยเกิดแรงเคลื่อนทางไฟฟ้าในอากาศสูงมาก ทำให้ก๊าซออกซิเจนแตกตัวจาก 2 อะตอมเป็น 1 อะตอม และรวมกับก๊าซออกซิเจนโมเลกุลอื่นเกิดเป็นก๊าซโอโซน (ปิยะวิทย์, 2563)



ภาพที่ 2 ลักษณะการแตกตัวของออกซิเจนกลายเป็นก๊าซโอโซน

ที่มา: (ปิยะวิทย์, 2563)

1. ลักษณะเด่นของโอโซน

- 1.1 สลายตัวเร็ว เนื่องจากโอโซนมีความไม่คงตัว (Unstable) และไม่สามารถเก็บบรรจุใส่ภาชนะใด ๆ ได้ (ยกเว้นเก็บในสภาวะอุณหภูมิต่ำ)
- 1.2 มีกลิ่นคล้ายกลิ่นฝนตกใหม่ ๆ หากมีความเข้มข้นของโอโซนสูงกลิ่นจะฉุน
- 1.3 สถานะทั่วไปเป็นก๊าซ
- 1.4 มีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อที่รุนแรงมาก (Potential bactericidal disinfection) ทั้งในน้ำและอากาศ
- 1.5 เป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรง (Potential oxidizing agent) จึงสามารถทำปฏิกิริยากับทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์

2. การสลายตัวของโอโซน

การสลายตัวของโอโซนนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ทั้ง pH อุณหภูมิสูง และรังสีอัลตราไวโอเล็ต โดยปฏิกิริยาของการสลายตัวของโอโซนในทางเคมีเกิดขึ้นได้ 2 แบบ คือ ปฏิกิริยาสลายตัวทางอ้อม (Indirect reaction) และปฏิกิริยาการสลายตัวทางตรง (Direct reaction) (ปิยะวิทย์, 2563) ดังนี้

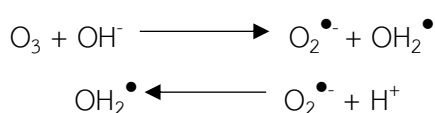
2.1 ปฏิกิริยาการสลายตัวทางอ้อมของโอโซน

ปฏิกิริยาการสลายตัวทางอ้อมจะมีการรวมตัวกับอนุมูลหรือเรดิคัล (Radicals) การสลายตัวของโอโซนจะเกิดขึ้น 2 ขั้น คือ ขั้นแรก เกิดจากตัวเร่งเริ่มต้น (Initiators) เช่น ไฮดรอกซิลไอออน ขั้นที่สอง เป็นการออกซิเดชันไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl radicals: OH) โดยกลไกการสลายตัวของโอโซนสามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วนดังต่อไปนี้

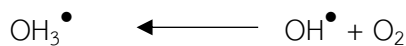
1. ขั้นเริ่มต้น (Initiation)
2. ขั้นการเกิดสายโซ่ของเรดิคัล (Radical chain)
3. ขั้นสุดท้าย (Termination step)

โดยสามารถสรุปปฏิกิริยาการสลายตัวทั้ง 3 ส่วน ได้ดังนี้

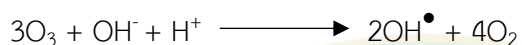
ขั้นเริ่มต้น



ขั้นสายโซ่ของเรดิคอลล



ขั้นสุดท้าย



2.2 ปฏิกริยาการสลายตัวทางตรงของโอโซน

ปฏิกริยาการสลายตัวทางตรงจะเกิดขึ้น ถ้าในน้ำไม่มีตัวเริ่มปฏิกริยาลูกโซ่ (Initiate chain reaction) หรือ ตัวหยุดการเกิดปฏิกริยาลูกโซ่ (Termination chain reaction) เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วหรือความเข้มข้นของสารตัวจับที่ช่วยให้เกิดกลไกปฏิกริยาออกซิเดชัน (Scavengers mechanism of oxidation) เพิ่มขึ้น

3. การสร้างน้ำโอโซน

3.1 หลักการสร้างก๊าซโอโซนจากพลังงานไฟฟ้า : ปรากฏการณ์ โคโรนา ดิสชาร์จ (Corona discharge phenomena ; CD ozone)

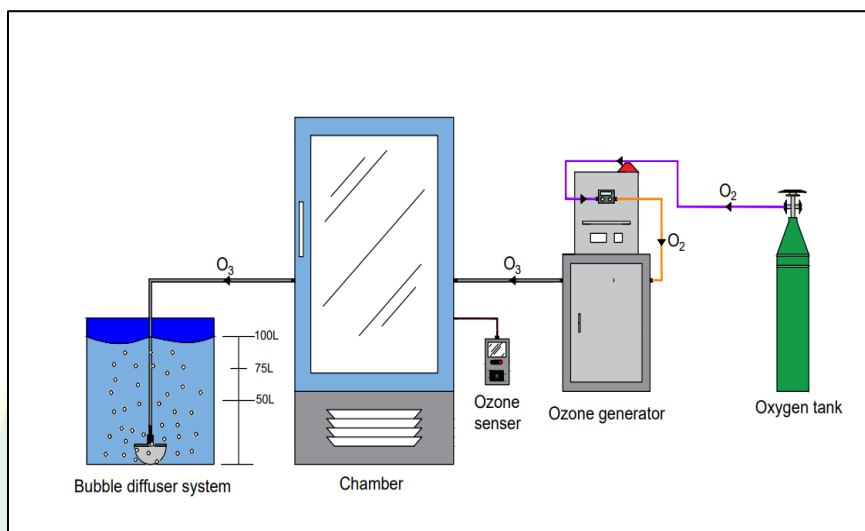
เป็นการให้ก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์ผ่านเข้าไปในสนามไฟฟ้า (Electrical field) ที่มีความถี่ ตั้งแต่ 50 Hz – 1,000 Hz ขึ้นไป บริเวณ Discharge gap ซึ่งเกิดจากการผลิต กระแสไฟฟ้าที่บริเวณ Dielectric surface ณ สนามไฟฟ้ามีผลให้ก๊าซออกซิเจนในอากาศแตกกระจายออกเป็นอะตอมของ ออกซิเจน (O) รวมตัวกับก๊าซออกซิเจนโมเลกุลอื่น ได้เป็นก๊าซโอโซนออกมา (ปิยะวิทย์, 2563)

3.2 วิธีการผสมก๊าซโอโซนในน้ำ

ระบบการสร้างน้ำโอโซนมี 2 วิธี ที่นิยมคือ ระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์ และระบบ หัวฉีดเวนจูรี่ โดยรายละเอียดแสดงดังต่อไปนี้

- ระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์ ระบบนี้จะดันก๊าซโอโซนจากเครื่องกำเนิดโอโซนผ่าน ดีฟิวเซอร์ลงสู่ น้ำ ซึ่งขนาดฟองที่ได้จะขึ้นอยู่กับขนาดรูพรุนของดีฟิวเซอร์ที่ใช้ โดยข้อดี ของระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์นั้นมีราคาถูก แต่ประสิทธิภาพในการละลายน้ำ ของก๊าซโอโซนนั้นจะต่ำ และหากใช้ไปนาน ๆ อาจเกิดการอุดตันบริเวณตัวกระจายฟอง โดยวิธีนี้ทำได้โดยนำสายยางและดีฟิวเซอร์ต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดโอโซน โดยให้ตัวกระจายฟอง

แบบตีฟิวเซอร์อยู่กึ่งกลางของกันถึง ภาชนะสำหรับใส่น้ำควรเป็นภาชนะทรงสูงเพื่อให้โอโซนมีเวลาในการละลายในน้ำให้มากที่สุด วิธีนี้อาจมีการสูญเสียโอโซนระหว่างกระบวนการ โดยรูปแบบการผลิตโอโซนละลายในน้ำด้วยระบบการกระจายฟองด้วยตีฟิวเซอร์แสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ระบบการกระจายฟองด้วยตีฟิวเซอร์

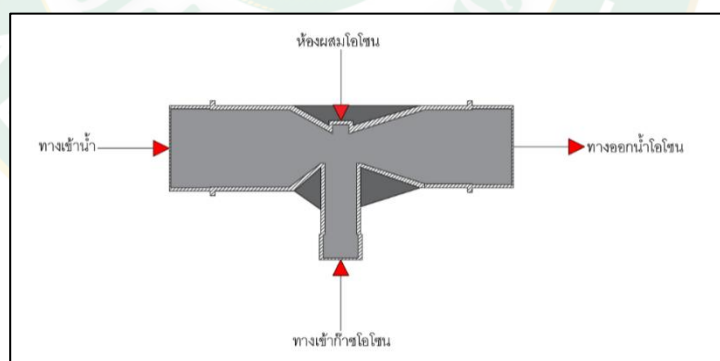
- ระบบหัวฉีดเวนจูรี หรือ ระบบดูดโอโซน ระบบนี้จะใช้เวนจูรีเป็นตัวดูดก๊าซโอโซนละลายในน้ำ โดยอาศัยหลักการของการสร้างความดันแตกต่างเพื่อให้เกิดสุญญากาศ ทำให้สามารถดูดก๊าซโอโซนในปริมาณที่ต้องการได้ แต่ต้องขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านเวนจูรีและความดันที่แตกต่างกันที่เหมาะสมของเวนจูรีแต่ละขนาด โดยวิธีการใช้หัวฉีดเวนจูรีนั้นจะให้ขนาดฟองที่เล็กมาก ประสิทธิภาพในการละลายโอโซนในน้ำสูงกว่าระบบการกระจายฟองด้วยตีฟิวเซอร์ โดยระบบนี้มีข้อเสียคือมีราคาที่สูง ทั้งระบบการติดตั้งและค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ โดยระบบหัวฉีดเวนจูรีนี้ในการติดตั้งใช้งานต้องคำนึงถึงขนาดและแรงดันของเครื่องสูบน้ำที่เหมาะสมกับขนาดของเวนจูรี และเลือกขนาดถังผสมโอโซนเวลาที่สัมผัสกับน้ำตามความเหมาะสม

2.3 ระบบหัวฉีดเวนจูรี (Venturi)

ระบบหัวฉีดเวนจูรี หรือ กระบวนการเติมอากาศโดยใช้เวนจูรี (Aeration process) คือ กระบวนการถ่ายเทก๊าซไปสู่ของเหลวโดยใช้เวนจูรี เพื่อเพิ่มปริมาณก๊าซละลายในของเหลวให้สูงขึ้น

เพื่อให้นำไปใช้งาน เช่นกระบวนการเติมออกซิเจนลงในน้ำเพื่อเพิ่มอากาศที่ใช้ในการหายใจของสัตว์น้ำ หรือกระบวนการละลายโอโซนลงในน้ำเพื่อช่วยในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ที่อยู่ในน้ำหรือเพื่อสร้างน้ำโอโซนสำหรับฆ่าเชื้อโรคในผักและผลไม้ เป็นต้น

ระบบหัวฉีดเวนจูรี เป็นอีกทางเลือกสำหรับการถ่ายเทมวลสารของก๊าซโอโซนลงสู่น้ำด้วยขนาดการใช้งานที่มีให้เลือกหลากหลายรวมถึงประสิทธิภาพในการกระจายตัวของโอโซนในน้ำได้ดี ซึ่งระบบหัวฉีดเวนจูรี ขึ้นพื้นฐานประกอบด้วยหัวฉีดเวนจูรี ป้อนน้ำเพื่อขับเคลื่อนน้ำในกระบวนการผ่านเวนจูรีและให้แรงดันสำหรับกระบวนการถ่ายโอนมวลของก๊าซโอโซน และถังสำหรับกักเก็บน้ำโอโซนเพื่อนำไปใช้งาน โดยเวนจูรีจะสร้างสุญญากาศ โดยการไหลของเหลวผ่านท่อเวนจูรี ทำให้ความดันในท่อที่เป็นช่องแคบลดต่ำกว่าในส่วนอื่น ๆ ของท่อ ซึ่งการไหลของกระแสน้ำความเร็วสูงผ่านช่องทางเข้าของก๊าซทำให้เกิดสุญญากาศทำให้เกิดการดูดก๊าซ ความสามารถในการดูดก๊าซขึ้นอยู่กับความดันแตกต่างของหัวฉีด ยิ่งน้ำมีความเร็วสูงและความดันลดลงมากความสามารถในการดูดก๊าซก็จะยิ่งมากขึ้น ในระบบโอโซนป้อนน้ำจะขับเคลื่อนน้ำผ่าน เวนจูรีซึ่งจะสร้างแรงดูดที่ดึงก๊าซโอโซนที่ผลิตโดยเครื่องกำเนิดโอโซน ก๊าซโอโซนผสมกับน้ำที่ไหลผ่านเวนจูรีจากนั้นส่งลงไปยังถังสำหรับการผสมและกักเก็บสำหรับการใช้งาน ประสิทธิภาพของระบบการถ่ายเทมวลในระบบหัวฉีดเวนจูรีนี้จะลดลงหากความดันแตกต่างน้อยกว่าปริมาตรก๊าซที่ต้องการส่งไปยังเวนจูรี ซึ่งส่งผลให้ปริมาณโอโซนที่อยู่ในน้ำต่ำ (ปฎิวัติ และคณะ, 2561) โดยลักษณะของเวนจูรีแสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ลักษณะของหัวฉีดเวนจูรี

น้ำจะผ่านเข้ามาผสมกับก๊าซโอโซนทางช่องน้ำเข้าเมื่อน้ำผ่านห้องผสมโอโซนความเร็วของน้ำจะเพิ่มขึ้นเพราะขนาดของห้องผสมโอโซนจะเล็กลงเมื่อเทียบกับช่องทางเข้าแรงดันภายในห้องผสมโอโซนจะลดลงตามความเร็วที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีการเคลื่อนที่ของของไหล ของ Bernoulli ดังสมการที่ (1) สมการนี้อธิบายว่า งานที่ทำบนปริมาตรหนึ่งหน่วยของของไหล โดยของไหลรอบ ๆ จะเท่ากับผลรวมของพลังงานจลน์ ที่เปลี่ยนไปกับพลังงานศักย์ที่เปลี่ยนไป ต่อหนึ่งหน่วย

ปริมาตรซึ่งเกิดขึ้นระหว่างการไหล และในขณะเดียวกันอากาศที่อยู่ในห้องผสมโอโซนจะถูกน้ำที่เคลื่อนที่ผ่านดูดไปด้วย ทำให้เกิดสุญญากาศบางส่วน (Partial Vacuum) ขึ้นภายในห้องผสมโอโซน ก๊าซโอโซนจะไหลเข้าไปผสมกับน้ำในห้องผสมโอโซนทันที เนื่องจากแรงดันภายในห้องผสมโอโซนต่ำกว่าแรงดันข้างนอกห้องผสมโอโซน

$$P_1 + \rho gh_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \rho gh_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (1)$$

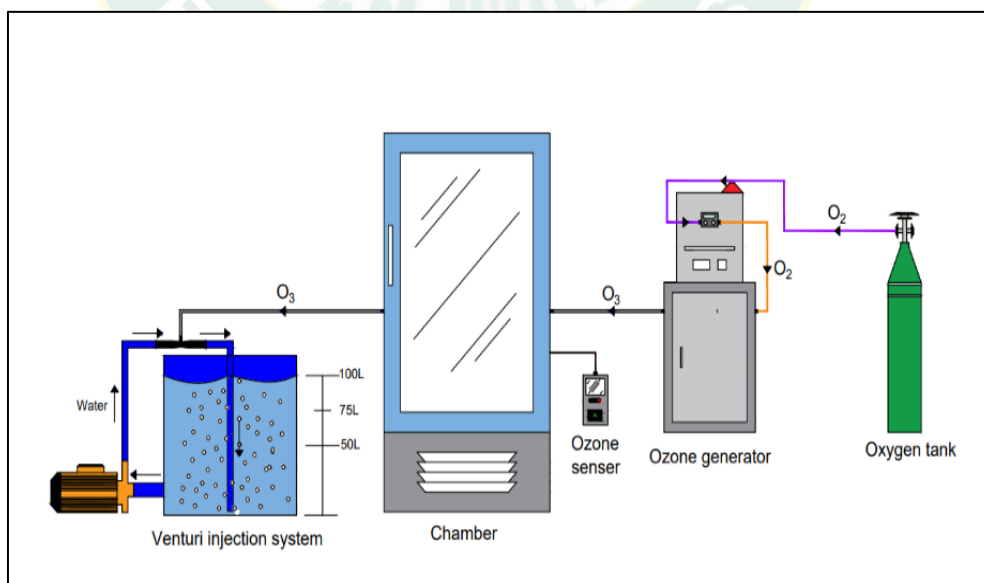
เมื่อ P_1, P_2 คือ ความดันของของไหล

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล

h_1, h_2 คือ ความสูงของท่อสายกระแสจากระดับอ้างอิง

v_1, v_2 คือ ความเร็วของของไหล

หัวฉีดเวนจูรี สามารถผสมก๊าซโอโซนกับน้ำได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการผสมก๊าซโอโซนแบบอื่น ๆ โดยทั่วไปประสิทธิภาพในการผสมสูงถึง 95% ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำ ปริมาณก๊าซโอโซน แรงดันในระบบ (แรงดันสูงโอโซนผสมน้ำได้ดี) อุณหภูมิน้ำ (อุณหภูมิต่ำโอโซนผสมลงน้ำได้ดี) ความเข้มข้นของก๊าซโอโซน และระยะเวลาที่ก๊าซโอโซนผสมกับน้ำเป็นหลัก โดยระบบการผลิตน้ำโอโซนด้วยระบบหัวฉีดเวนจูรีแสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ระบบหัวฉีดเวนจูรี

โดยปริมาณการผลิตโอโซนที่เหมาะสมของเครื่องผลิตโอโซนสามารถคำนวณจากสมการที่ (2)

$$\text{ปริมาณการผลิตโอโซนที่เหมาะสม} = \text{ความเข้มข้นของโอโซน} \times \text{อัตราการไหลของน้ำ} \quad (2)$$

เมื่อ ปริมาณการผลิตโอโซนที่เหมาะสม หน่วยเป็น g/hr.

ความเข้มข้นของโอโซน คือระดับความเข้มข้นของโอโซนที่ต้องการ ppm

อัตราการไหลของน้ำ คือ อัตราการไหลของน้ำระบบหมุนเวียน m^3/s

ที่มา: (บริษัท โพร-เทค-ชาयน์ จำกัด, 2564)

2.4 การถ่ายเทมวลของโอโซนในน้ำ (Mass transfer of ozonated water)

การถ่ายโอนมวลของโอโซนในน้ำเป็นกระบวนการที่ก๊าซโอโซนละลายเป็นน้ำ ในการศึกษาี้จะกล่าวถึงระบบที่ก๊าซโอโซนละลายเป็นน้ำ การถ่ายเทมวลของโอโซนทำได้โดยการทำให้ก๊าซโอโซนระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์ลงสู่ น้ำ หรือโดยการผสมโอโซนกับน้ำด้วยแรงดันโดยใช้ระบบหัวฉีดเวนจูรี โดยน้ำโอโซนถูกใช้ในการบำบัดน้ำและอื่น ๆ โดยในการใช้งานครั้งแรกเริ่มนั้นได้ใช้การกระจายฟองด้วยหัวกระจายฟองเป็นวิธีหลักในการถ่ายเทมวลโอโซน

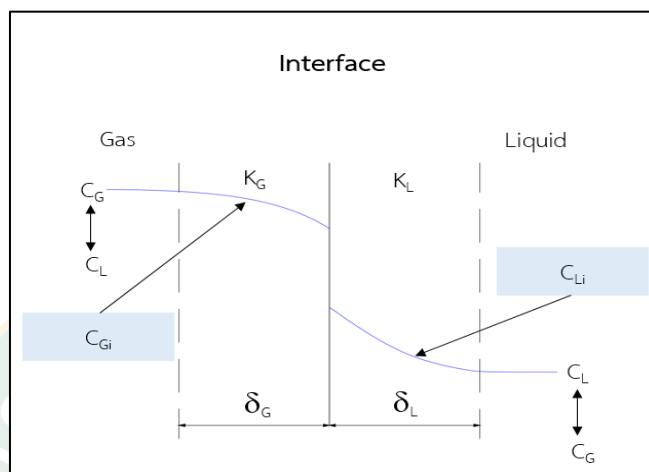
ขั้นตอนของการถ่ายเทโอโซนจากสถานะก๊าซไปสู่สถานะของเหลว

1. การทำให้เกิดการสัมผัสระหว่างก๊าซโอโซนกับน้ำ โดยใช้เทคนิคการกระจายฟองด้วยระบบต่าง ๆ ทั้งหัวทราย ดีฟิวเซอร์ หรือระบบเวนจูรี เพื่อให้ขนาดของฟองของก๊าซโอโซนมีขนาดเล็กลง ส่งผลให้พื้นที่สัมผัสระหว่างก๊าซโอโซนกับน้ำมีมากขึ้น

2. เมื่อโอโซนสัมผัสกับน้ำ โอโซนที่มีความเข้มข้นจึงละลายในน้ำ ซึ่งเคลื่อนผ่านชั้นกลางระหว่างก๊าซกับน้ำ ตามทฤษฎี “Two film theory” โดย ทฤษฎีนี้อธิบายถึงการถ่ายเทสารระหว่างสถานะก๊าซและของเหลว โดยการซึมผ่านชั้นกลาง ระหว่างก๊าซกับของเหลวซึ่งชั้นกลางถูกพิจารณาออกเป็นสองชั้น คือ ชั้นกลางของก๊าซ และชั้นกลางของของเหลว ปัจจัยที่ผลต่อการละลายหรือซึมผ่านชั้นกลาง (Rice, 1997; นราพงศ์, 2563) ได้แก่

- ความสามารถในการละลาย
- ความดันย่อยของก๊าซ
- ความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิ
- ปริมาณสารเจือปน (Impurities) ในของเหลว เช่น ค่าความเค็ม และของแข็งแขวนลอย

โดยการถ่ายเทสารจากสถานะก๊าซไปสู่สถานะของเหลว โดยมีความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของสารในรูปของก๊าซและของเหลวเป็นตัวขับเคลื่อนทำให้สารในสถานะก๊าซที่มีความเข้มข้นสูงนั้นซึมผ่านชั้นกลางทั้งสองและละลายกลายเป็นของเหลวที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า ดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 การถ่ายเทมวลสารตามทฤษฎี Two film theory

ที่มา: (นราพงศ์, 2563)

3. โอโซนที่ละลายในน้ำ บริเวณพื้นที่สัมผัสระหว่างก๊าซโอโซนกับน้ำ จะมีความเข้มข้นมากกว่า บริเวณอื่น ๆ จึงเกิดการแพร่จากบริเวณพื้นที่สัมผัสไปสู่บริเวณอื่น ๆ ของน้ำจนกระทั่งมีความเข้มข้นของโอโซนละลายสม่ำเสมอทุกบริเวณในน้ำ และมีความเข้มข้นถึงจุดอิ่มตัวในที่สุด

การถ่ายเทมวลของโอโซน

การถ่ายเทก๊าซโอโซน คือ กระบวนการถ่ายเทโอโซนจากสถานะก๊าซไปสู่สถานะของเหลว ซึ่งอัตราเร็วของการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของโอโซนในสถานะของเหลวเข้าใกล้สภาวะสมดุล อนุกรม และความดันบรรยากาศขณะนั้น โดยสามารถประเมินอัตราการถ่ายเทโอโซนได้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (Volumetric mass transfer coefficient, $k_L a$) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3) (Chawla et al., 2007; Karamah et al., 2010; Magara et al., 1995)

$$\frac{dC}{dt} = k_L a (C_s - C) \quad (3)$$

เมื่อ $\frac{dC}{dt}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นต่อเวลา หน่วยเป็น mg/l-s

K_L คือ ค่าประสิทธิภาพถ่ายเทมวลผ่านของเหลว (The liquid-side mass transfer coefficient) หน่วยเป็น m/s

a คือ พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะระหว่างก๊าซกับของเหลว หน่วยเป็น m^2/m^3

C_s คือ ความเข้มข้นของก๊าซ ณ สภาวะสมดุล หน่วยเป็น mg/l

C คือ ความเข้มข้นของก๊าซ ณ เวลาใด ๆ หน่วยเป็น mg/l

2.5 การใช้ประโยชน์จากโอโซนในภาคอุตสาหกรรม (Ozone for industrial)

โอโซนซึ่งเป็นทางเลือกใหม่ในการนำไปใช้ทั้งในระดับครัวเรือนและระดับอุตสาหกรรม ซึ่งประโยชน์ของโอโซนนั้นคือเป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรงในการกำจัดกลิ่น สี หรือเชื้อจุลินทรีย์ต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยเหตุผลที่โอโซนนั้นเป็นสารที่สะอาด ส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมน้อยและสามารถสลายตัวเองกลายเป็นออกซิเจนได้ง่ายเนื่องจากไม่มีความเสถียร จึงเป็นที่นิยมในการนำมาใช้ประโยชน์ โดยโอโซนนั้นสามารถใช้ประโยชน์ได้ทั้งในรูปแบบของก๊าซโอโซนและน้ำโอโซน การใช้งานโอโซนในรูปแบบของก๊าซเช่นการรมลำไยสดด้วยโอโซนเพื่อยืดอายุการเก็บรักษา การรมโอโซนในผลไม้เพื่อชะลอการสุก การรมโอโซนเพื่อกำจัดกลิ่นอับในเสื้อผ้าและรองเท้า และในปัจจุบันยังมีการนำมาใช้ในการรมเอกสารและอุปกรณ์ต่าง ๆ ในสำนักงานเพื่อฆ่าเชื้อโรคเนื่องจากสถานการณ์การระบาดของเชื้อ covid-19 และการใช้งานโอโซนในรูปแบบน้ำ ได้แก่ การใช้โอโซนในการบำบัดน้ำเสีย การใช้น้ำโอโซนในการทำให้ปลาหมึกเนื้อที่ขาวสว่างขึ้น การใช้น้ำโอโซนในการฟอกสีผ้า การใช้โอโซนในการฆ่าเชื้อโรคในเครื่องมือแพทย์ และที่นิยมมากที่สุดในปัจจุบันคงหนีไม่พ้นการผลิตน้ำโอโซนเพื่อนำมาใช้กำจัดยาฆ่าแมลงรวมถึงเชื้อจุลินทรีย์ต่าง ๆ ที่มากับผักและผลไม้ ถึงโอโซนจะมีประโยชน์มากมายแต่ด้วยต้นทุนในการใช้โอโซนนั้นค่อนข้างสูง และในการผลิตน้ำโอโซนให้มีประสิทธิภาพนั้นยังสามารถทำได้ยาก โดยจากข้างต้นจะยกตัวอย่างการนำโอโซนไปใช้ประโยชน์ในภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ ดังนี้ (Ikeura et al., 2011; Chen et al., 2013; Lu et al., 2020)

1. อุตสาหกรรมอาหารทะเล

อาหารทะเล ใช้โอโซน เพื่อฆ่าเชื้อในผลิตภัณฑ์อาหารทะเล และปรับปรุงคุณภาพ ทราบกันดีว่าโอโซนมีการสลายตัวที่ง่าย และสามารถกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ได้ดี โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันของโอโซนเกิดขึ้นเร็วมาก ซึ่งโอโซนทำหน้าที่ในการออกซิไดซ์ได้ดีกว่าคลอรีน เนื่องจากคลอรีนเลือกออกซิไดซ์ระบบเอนไซม์บางชนิด ในขณะที่โอโซนทำหน้าที่ออกซิไดซ์ได้มากกว่าคลอรีน นอกจากนี้โอโซนที่ยังมีลักษณะเป็นสารออกซิไดซ์ที่ดีกว่าจึงสามารถป้องกันการก่อตัวของเชื้อราและการเน่าเสีย นอกจากนี้ยังสามารถกำจัดกลิ่น และสามารถยืดอายุการเก็บรักษา โดยความเข้มข้นที่แนะนำคือตั้งแต่ 2.5 ถึง 3

ppm ที่ 1 °C ถึง 3 °C และมีความชื้นสัมพัทธ์ 90% ความเข้มข้นที่สูงขึ้นจะทำให้ไขมันออกซิไดซ์ทำให้เกิดกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ได้

2. อุตสาหกรรมผักและผลไม้

ปัจจุบันผู้คนนี้มีความกังวลอย่างมากเกี่ยวกับความปลอดภัยของผักและผลไม้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเกี่ยวกับวิธีการกำจัดเชื้อโรคจากผลไม้สด คลอรีนเป็นสารฆ่าเชื้อที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการกำจัดสารตกค้างรวมถึงเชื้อโรคในผักและผลไม้ แต่ด้วยความปลอดภัยด้านสิ่งแวดล้อมและสุขภาพ และยังมีข้อควรระวังเกี่ยวกับผลจากการหลงเหลือของคลอรีน เพื่อปรับปรุงความปลอดภัยของอาหาร จึงมีการวิจัยและตรวจสอบแล้วว่าโอโซนสามารถใช้แทนที่สารฆ่าเชื้อแบบเดิมได้ โอโซนได้รับการตรวจสอบประสิทธิภาพ สำหรับการควบคุมโรคหลังการเก็บเกี่ยวและการยืดอายุการเก็บรักษา โอโซนมีหลากหลายทั้งสามารถบำบัดน้ำและบำบัดอากาศที่ใช้ในการจัดการคุณภาพหลังการเก็บเกี่ยว ตัวอย่างเช่นการลดสลายเอทิลีน วิธีหนึ่งในการควบคุมความปลอดภัยของผักและผลไม้สด คือการล้างผักและผลไม้โดยใช้น้ำที่มีโอโซน เพื่อลดจำนวนจุลินทรีย์บนพื้นผิว

นอกจากการใช้งานอุตสาหกรรมข้างต้นแล้วยังมีการใช้งานแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหารอื่น ๆ เช่นอุตสาหกรรมนม อุตสาหกรรมสัตว์ปีก อุตสาหกรรมเนื้อแดง และอื่น ๆ

2.6 สาหร่ายสไปรูลินา (*Spirulina plantensis*)

สาหร่ายสไปรูลินา

สาหร่ายสไปรูลินา (*Spirulina plantensis*) หรือ สาหร่ายเกลียวทอง เป็นสาหร่ายสีน้ำเงินแกมเขียวที่มีโปรตีนสูง ประกอบไปด้วยวิตามินและแร่ธาตุที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิต ในขั้นตอนของการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาในระดับอุตสาหกรรมมี 2 ระบบ คือ ระบบเปิด และ ระบบปิด สำหรับการลงทุนในระดับอุตสาหกรรมที่ต้องการควบคุมคุณภาพ เพื่อขยายเซลล์ให้มีคุณภาพตั้งแต่การเลี้ยงในบ่ออนุบาลจนเติบโตเต็มที่ และทำการเก็บเกี่ยวเพื่อนำไปแปรรูปผลิตภัณฑ์มูลค่าสูงที่ต้องการมาตรฐานอาหารปลอดภัย และมาตรฐานอาหารอินทรีย์ ควรเลือกระบบปิดซึ่งจะสามารถควบคุมคุณภาพการผลิตได้ สำหรับในพื้นที่จำกัดมาก ๆ มีการนำสาหร่ายสไปรูลินามาเพาะเลี้ยงในระบบถัง Tank system บน อาคารสูง เพื่อให้สังเคราะห์แสงบนดาดฟ้า โดยสามารถเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาได้ปริมาณมากในพื้นที่น้อย (เพ็ญรัตน์ และ โฉมยง, 2544)

การจัดลำดับทางด้านอนุกรมวิธานของสาหร่ายสไปรูลินา

สามารถจัดอนุกรมวิธานของสาหร่ายสไปรูลินา ได้ดังนี้

Kingdom	Monera
Division	Cyanophyta
Class	Cyanophyceae
Order	Oscillatoriales
Family	Oscillatoriaceae
Genus	Spirulina
Species	Spirulina platensis

ลักษณะทางชีววิทยาของสาหร่ายสไปรูลินา

สาหร่ายสไปรูลินาจัดอยู่ในกลุ่มสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน เนื่องจากมีคลอโรฟิลล์ช่วยในการสังเคราะห์แสง หรืออาจเรียกได้ว่าเป็นแบคทีเรียประเภทไซยาโนแบคทีเรีย (Cyanobacteria) เป็นสิ่งมีชีวิตประเภทโพรคาริโอต ลักษณะทั่วไปประกอบด้วยเซลล์หลาย ๆ เซลล์เรียงต่อกันเป็นสาย บิดเป็นเกลียวคล้ายเกลียวของสปริง ไม่แตกแขนงเรียกว่า ไตรโคม มีลักษณะรูปทรงกระบอกตลอดสาย มีปลายทั้งสองข้างโค้งมน ผนังเซลล์ประกอบด้วยสารมิวโคโพลิเมอร์ (Mucopolymer) เพคติก (Pectic) โพลีแซคคาไรด์ (Polysaccharide) ไม่พบสารประกอบของเซลลูโลส ไม่มีเมือก ห่อหุ้มด้วยเมมเบรน ซึ่งเป็นข้อดีที่ทำให้ไม่มีจุลินทรีย์ชนิดอื่น ๆ มาเกาะ (เพ็ญรัตน์ และโฉมยง, 2544)

สาหร่ายสไปรูลินามีการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศโดยการขาดออกเป็นท่อน ซึ่งแต่ละท่อนจะแบ่งเซลล์ใหม่ทำให้ไตรโคมยืดยาวออก การเคลื่อนที่ของสาหร่ายสไปรูลินาเป็นแบบบิดหมุนเป็นเกลียวคล้ายควงสว่านและเป็นคลื่นซึ่งทำให้เส้นสายเลื่อนไหลไปได้

วัฏจักรของสาหร่ายสไปรูลินา

การสืบพันธุ์สาหร่ายสไปรูลินามีการสืบพันธุ์แบบเดียว คือการแบ่งตัวที่กึ่งกลางออกเป็นสองท่อนที่ กึ่งกลางไตรโคม (Trichome) ไม่มีการสร้างเฮเทอโรซิสต์ (Heterocyst) และสปอร์ (Spore) โดยเริ่มจากเส้นสายไตรโคมที่โตเต็มที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นเซลล์พิเศษที่เรียกว่า นิเครเดีย (Necredia) หลังจากนั้น นิเครเดียจะแตกออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ หลายเส้นสายแต่ละเส้นสายจะประกอบไปด้วย 2-4 เซลล์ จะเรียกนิเครเดียที่ แตกเป็นสายนี้ว่า ฮอร์โมโกเนีย (Hormogonia) ในไซโตพลาสซึมของเซลล์มีแกรนูลอยู่น้อย และเซลล์มีสีน้ำเงินแกมเขียวค่อนข้างซีด เมื่อจำนวนเซลล์ในฮอร์โมโกเนียเพิ่มมากขึ้นจากการแบ่งตัว แกรนูลในไซโตพลาสซึม จะเพิ่มมากขึ้น เซลล์มีสีสดใสขึ้น ไตรโคมมี

ความยาวเพิ่มขึ้น และปลายทั้งสองด้านของฮอริโมโกเนียจะค่อย ๆ ม้วนเป็นเกลียว โดยเรียกวีธีเพิ่มจำนวนเซลล์นี้ว่า Cell division หรือ Binary fission ที่พบในพวกแบคทีเรีย โดยจะแบ่งออกได้เป็น 5 ระยะ (เพ็ญรัตน์ และ โฉมยง, 2544) ได้แก่

1. **ระยะปรับตัว (Lag of inductional phase)** เป็นระยะที่เซลล์ปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมใหม่ เช่น แสง อุณหภูมิ และธาตุอาหาร ฯลฯ ระยะนี้สาหร่ายไม่มีการแบ่งเซลล์ ดังนั้นการสาหร่ายจะปรับตัวให้เข้า สภาพแวดล้อม ในระยะนี้จะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของเซลล์ และความสมบูรณ์ของอาหารที่

2. **ระยะเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential phase)** เป็นระยะที่สาหร่ายเจริญเติบโตและขยายพันธุ์ได้ อย่างรวดเร็ว การเจริญเติบโตในระยะนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณสารอาหาร และคุณสมบัติเชิงฟิสิกส์เคมีของ สิ่งแวดล้อม

3. **ระยะเฉื่อย (Phase of declining relative growth)** เป็นช่วงที่เจริญเติบโตช้าลง เพราะขาดแคลน ธาตุอาหารเนื่องจากจำนวนเซลล์ที่มีความหนาแน่นมากเกินไป

4. **ระยะคงที่ (Stationary phase)** เป็นระยะที่การเจริญเติบโตของสาหร่ายหยุดนิ่ง เนื่องจากขาด อาหารลดน้อยลง และเกิดสารพิษจากกระบวนการเมตาบอริซึม (Metabolism) หรือการสลายตัวของเซลล์เพิ่มมากขึ้น

5. **ระยะตาย (Death phase)** เป็นระยะที่เซลล์เกิดการหยุดการเจริญเติบโตโดยสิ้นเชิง เนื่องจากขาด อาหารหมดลง เซลล์จะเริ่มตายและอัตราการตายจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ อย่างรวดเร็ว

ปัจจัยที่มีผลต่อการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา

- ปริมาณสารอาหาร สารอาหารที่มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย คือ
 - ไนโตรเจน มีความสำคัญรองมาจากคาร์บอนในด้านของปริมาณสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินสามารถตรึงไนโตรเจนจากอากาศได้ ไนโตรเจนในรูปของสารอนินทรีย์ ได้แก่ ไนเตรท ไนไตรท์ และแอมโมเนีย
 - ฟอสฟอรัส จะพบอยู่ในรูปของ Orthophosphates และในรูปสารอินทรีย์
 - โพแทสเซียม เป็นแร่ธาตุที่สาหร่ายต้องการถ้าลดปริมาณโพแทสเซียมลงจะทำให้การสังเคราะห์แสงของสาหร่ายลดต่ำลงด้วยแต่การหายใจจะเพิ่มขึ้น
- ปริมาณแสง สาหร่ายสไปรูลินาจะเจริญเติบโตด้วยการสังเคราะห์ด้วยแสง จึงจำเป็นต้องใช้แสงซึ่งแสงที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่าย คือ แสงแดด โดยแสงแดดที่เหมาะสมที่สุดอยู่ในช่วง 35 ถึง 45 Klux

3. อุณหภูมิ อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญของสาหร่ายสไปรูลีนาไม่ควรต่ำกว่า 20°C และไม่สูงกว่า 37 °C โดยพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญจะอยู่ในช่วง 30 ถึง 35°C
4. แหล่งคาร์บอน แหล่งคาร์บอนในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของสาหร่ายมาจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีอยู่ในอากาศเพียง 0.4% อาจพอต่อความต้องการของสาหร่ายในสภาพที่เจริญตามปกติ แต่ในสภาพที่ต้องการผลผลิตปริมาณมากจะต้องเพิ่มก๊าซนี้ลงในอาหารเลี้ยง โดยทั่วไปคือการเติม NaHCO_3
5. ค่า pH โดยค่า pH ที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงควรอยู่ในช่วง 9 ถึง 11 ถ้า pH ต่ำกว่านี้ ควรปรับด้วย NaOH โดยค่าของ pH จะมีผลต่อการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และเกลืออื่น ๆ
6. การหมุนเวียนน้ำ มีผลทำให้เซลล์สาหร่ายที่อยู่ด้านล่างได้ขึ้นมารับแสง หรือทำให้สารอาหารที่มีการเติมลงไปใหม่ละลายไปทั่วภาชนะที่ใช้เลี้ยง
7. ความเข้มข้นของสาหร่ายเริ่มต้น ควรอยู่ในช่วง 225 ถึง 250 มิลลิกรัมน้ำหนักแห้งต่อลิตร หรือทำการตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสง (OD) ด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ช่วงคลื่น 560 นาโนเมตร เป็น 0.1 ขึ้นไปจึงจะเหมาะต่อการนำมาเพาะเลี้ยง

การคำนวณหาชีวมวล (Biomass) อัตราการเจริญเติบโต (Growth rate) และผลผลิต (Productivity)

การตรวจวัดหาการเจริญเติบโตของสาหร่ายโดยทำการวัดค่าความหนาแน่นเซลล์ด้วยค่า OD (Optical Density) ด้วยเครื่อง WPA Spectrophotometer รุ่น S1200 ที่ความยาวคลื่น 680 นาโนเมตร การคำนวณหาชีวมวลของสาหร่ายสไปรูลีนาสด (Wet Biomass weight, W) ในหน่วย g_w/L กับค่าชีวมวลของสาหร่ายสไปรูลีนาแห้ง (Dry Biomass weight, B) ในหน่วย g_d/L จะมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นเซลล์ดัง สมการที่ 4 และ สมการที่ 5 การคำนวณหาอัตราเจริญเติบโต (Growth rate : μ , Day^{-1}) จะมีความสัมพันธ์ต่อ อัตราการเจริญเติบโตในแต่ละวัน ดังแสดงใน สมการที่ 6 และการคำนวณหาผลผลิต (Productivity : P_x , $\text{g}/\text{L}\text{-Day}$) จะมีความสัมพันธ์ต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าชีวมวลในแต่ละวันต่อวันที่เปลี่ยนแปลง ดังแสดงใน สมการที่ 7 (ระพีพรรณ, 2549; สมเกียรติ และคณะ, 2562)

$$W = 5.8667 \times OD_{680} + 2.5563; R^2 = 0.9663 \quad (4)$$

$$B = 0.5867 \times OD_{680} + 0.2556; R^2 = 0.9663 \quad (5)$$

$$\mu = \frac{\ln(W_2/W_1)}{\Delta t} \quad (6)$$

$$Px = \frac{\Delta W}{\Delta t} \quad (7)$$

เมื่อ OD_{680} คือ ค่าความหนาแน่นเซลล์ ที่ความยาวคลื่น 680 นาโนเมตร

W คือ ค่าชีวมวลของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (g_w/L)

B คือ ค่าชีวมวลของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินแห้ง (g_D/L)

W_1 คือ ค่าชีวมวลเริ่มต้น (g_w/L)

W_2 คือ ค่าชีวมวลที่วันใด ๆ (g_w/L)

t คือ จำนวนวันที่ทดลอง (Day)

ΔW คือ การเปลี่ยนแปลงของค่าชีวมวลตั้งแต่วันเริ่มต้น (g_w/L)

Δt คือ การเปลี่ยนแปลงวันตั้งแต่วันเริ่มต้น (Day)

2.7 การใช้โอโซนในการบำบัดน้ำเสีย (Ozone wastewater treatment)

น้ำเสีย หมายถึง น้ำหรือของเหลวที่มีสิ่งเจือปนต่าง ๆ ในปริมาณสูงจนกระทั่งเป็นน้ำที่ไม่ต้องการ

สีของน้ำเสีย

สีที่พบในน้ำแบ่งเป็น 2 ชนิดคือ

1. สีแท้ หมายถึง สีที่เกิดจากสารต่าง ๆ ในน้ำและละลายกลายเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำโดยสารที่มีผลกระทบต่อ การเกิดสีแท้ส่วนใหญ่คือสารอินทรีย์ซึ่งย่อยสลายยาก
2. สีปรากฏ หมายถึง สีที่เกิดจากสารแขวนลอยในน้ำที่สะท้อนแสงปรากฏให้เห็นแก่สายตา

การกำจัดสี

ปัญหาหลักอย่างหนึ่งคือความต้องการในการลดสีของน้ำเสีย การปล่อยน้ำทิ้งที่มีสีเจือปน แม้ว่าจะไม่เป็นพิษแต่ก็ทำให้แหล่งน้ำดูหน้ารังเกียจ และน้ำสียังขัดขวางการเดินทางของแสงลงสู่แหล่งน้ำซึ่งส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ โดยการกำจัดสีนั้นยังยากแก่การบำบัดออกด้วยวิธีการตกตะกอน นอกจากนี้ยังมีการนำโอโซนไปใช้กำจัดสีในน้ำเสีย โดยจะทำให้พันธะของโมเลกุลที่ทำให้เกิดสี แตกออกกลายเป็นโมเลกุลขนาดเล็กและสีจะหายไป โดยสามารถแยกสลายโมเลกุลของสีที่มีความยาวมาก ให้มีขนาดสั้นลง ทำให้สีของน้ำเสียลดลง ซึ่งโอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง มีประสิทธิภาพสูงในการทำลายสีในน้ำได้ประมาณ 20 เท่าของการละลายในน้ำของออกซิเจน สามารถกำจัดสีแท้จริงทำลายโครงสร้างโมเลกุลแบบโครงสร้างแบบโซ่ของสารอินทรีย์ ความสามารถในการกำจัดสีมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการสัมผัสกับโอโซนให้นานขึ้น (ภัทรพล, 2560)

กลิ่นในน้ำเสีย

ส่วนใหญ่มาจากสารที่ทำให้เกิดกลิ่นซึ่งมีหลายชนิดมักเป็นพวกสารอินทรีย์ที่ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds : VOCs) ซึ่งปนเปื้อนมาจากกระบวนการผลิต

เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสีย

เทคโนโลยีที่ใช้ในการกำจัดสีและกลิ่นในน้ำเสียมีอยู่หลายวิธีได้แก่

1. การใช้กระบวนการกรองด้วยเยื่อแผ่นกรอง จะต้องควบคุมระดับความดันน้ำ อัตราการไหลของน้ำ ค่าความเป็นกรดต่างและอุณหภูมิ
2. การใช้เทคโนโลยีทางกายภาพและเคมี มีข้อจำกัดเนื่องจากมีการใช้สารเคมีใน การกำจัด นอกจากจะสิ้นเปลืองแล้วตะกอนที่เกิดขึ้นมีปริมาณมากและเป็นการเพิ่มสารเคมีในสิ่งแวดล้อม
3. การใช้โอโซน เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงซึ่งเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่ก็ต้อง ควบคุม อุณหภูมิ ความดัน ความเป็นกรดต่าง

ดังนั้นการเลือกเทคโนโลยีที่เหมาะสมกับน้ำเสียแต่ละประเภทต้องคำนึงถึงลักษณะน้ำเสีย ปริมาณน้ำเสีย ประสิทธิภาพ ค่าใช้จ่าย ฯลฯ ในทางปฏิบัติควรมีการนำน้ำเสียมาทดสอบก่อนเพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสม สำหรับวิธีการเติมโอโซน โอโซนใช้ในการกำจัดกลิ่นในน้ำดื่ม ตลอดจนการ ใช้โอโซนในการย่อยสลายสารประกอบสี โอโซนเป็นสารออกซิแดนท์ที่ดีกว่า

คลอรีนและพบว่ากลไกที่ได้จากการออกซิเดชันน้ำเสียที่มีสี ไม่ทำให้เกิดมลพิษจากสารพวก Chlorinated organics (ภัทรพล, 2560)

ลักษณะของน้ำที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสีย

ในการบำบัดน้ำเสียให้เป็นน้ำที่สะอาดก่อนนำกลับมาใช้ใหม่หรือปล่อยสู่แม่น้ำลำคลอง โดยอาศัยกรรมวิธีต่าง ๆ เพื่อลดหรือทำลายความสกปรกที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำ ได้แก่ ไขมัน น้ำมัน สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ สารพิษ รวมทั้งเชื้อโรคต่าง ๆ ให้หมดไปหรือให้เหลือน้อยที่สุด ซึ่งจะทำให้แหล่งน้ำนั้นไม่เน่าเสีย หรือแม้กระทั่งให้มีคุณภาพดีขึ้นจนสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ เนื่องจากน้ำเสียมีแหล่งที่มาแตกต่างกันจึงทำให้มีปริมาณ และความสกปรกของน้ำเสียแตกต่างกันไปด้วยในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำเสียจำเป็นต้องเลือก วิธีการที่เหมาะสมสำหรับกรรมวิธีในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำเสียซึ่งมีหลายวิธี โดยสามารถแบ่งขั้นตอนในการบำบัดออกได้ดังนี้

(1) หน่วยบำบัดขั้นเตรียมการ (Pretreatment) เป็นการกำจัดของแข็งขนาดใหญ่ที่ไม่ละลายน้ำออกด้วยตะแกรงเพื่อไม่ให้ปนเปื้อนอุปสรรคในการบำบัดขั้นต่อไป

(2) หน่วยบำบัดขั้นต้น (Primary Treatment) เพื่อลดมวลสารที่อยู่ในรูปของสารแขวนลอยและมวลสารที่เกิดการลอยอยู่ที่ผิวน้ำ ซึ่งสามารถลดปริมาณของสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำไปได้เพียงบางส่วน แต่มวลสารที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปมาก คือ มวลสารที่อยู่ในรูปของสารแขวนลอยด้วยกระบวนการตกตะกอน (Precipitation) หรือกระบวนการสร้างตะกอน (Coagulation-Flocculation)

(3) หน่วยบำบัดขั้นที่สอง (Secondary Treatment) เป็นกระบวนการปรับสภาพของน้ำดิบหรือน้ำเสีย เพื่อลดสารแขวนลอยที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำหน่วยบำบัดแบบนี้ มักเป็นหน่วยบำบัดทางชีวภาพ โดยอาศัยจุลินทรีย์ ย่อยสลายสารอินทรีย์และจะทำให้น้ำเสียมี ปริมาณของแข็งแขวนลอยต่ำ เช่น การเติมอากาศเพื่อให้จุลินทรีย์เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำ

(4) หน่วยบำบัดขั้นที่สาม (Tertiary Treatment) หรือเรียกว่าการบำบัดขั้นสูง (Advance Treatment) เป็นหน่วยบำบัดที่ต้องการนำน้ำเอากลับมาใช้ใหม่ โดยมีคุณภาพที่ดีขึ้นอีก เช่น น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว ยังคงมีสีและความขุ่น หรือสารอาหารบางอย่างตกค้างอยู่ จึงจำเป็นที่จะต้องมีการบำบัดเพิ่มเติมเพื่อให้ได้ คุณภาพน้ำที่ดีขึ้น โดยส่วนใหญ่จะเป็นการตกตะกอนสารแขวนลอย (Coagulation) หรือการตกตะกอนของแข็งที่ละลายในน้ำ (Precipitation) การดูดซับสารปนเปื้อน สี กลิ่น ด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) การแลกเปลี่ยนประจุในน้ำเสีย การกรองสิ่งปนเปื้อนขนาดเล็กด้วย การกรองขั้นสูง เช่น อัลตราฟิลเตรชัน ไมโครฟิลเตรชัน และการรีเวิร์สออสโมซิสแบบ

ผันกลับ การกำจัด สารอาหาร (Nutrient Removal Process) การฆ่าเชื้อโรค และการเติมโอโซน (Chlorination and Ozonation) (อานอบ, 2545)

การตรวจวัดคุณภาพน้ำ

การตรวจวัดคุณภาพของน้ำ ในการตรวจวัดคุณภาพของน้ำในด้านต่าง ๆ นั้น เพื่อให้แน่ใจว่า น้ำเสียหลังจากการบำบัดนั้นมีคุณภาพเป็นที่ยอมรับได้ทั้งในการนำกลับมาใช้ซ้ำหรือปล่อยสู่แหล่งน้ำ สาธารณะ ทั้งนี้ตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการแสดงให้เห็นคุณภาพน้ำที่เป็นที่หน้าพอใจในการนำกลับมาใช้นั้นมีมากมาย โดยในงานวิจัยนี้จะได้กล่าวถึงตัวแปรที่ใช้ชี้วัดคุณภาพน้ำหลังการบำบัด 6 ตัว ดังนี้ (วีรยุทธ, 2558)

อุณหภูมิ (Temperature)

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในแหล่งน้ำเกิดได้จากการที่มีแสงส่องผ่านลงไปแหล่งน้ำต่อมามีการเปลี่ยนแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานความร้อน อุณหภูมิมีความสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำมาก อุณหภูมิ น้ำและ อุณหภูมิอากาศ มีความสัมพันธ์กันโดยตรง และเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น การละลาย ของออกซิเจนจะลดลง และปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ จะบ่งบอกถึงความเหมาะสมต่อการดำรงชีวิต ของสิ่งมีชีวิต ค่า DO เป็นปัจจัยที่บ่งถึงการเปลี่ยนแปลงทางชีววิทยาอัตราการเกิด oxidation ทาง ชีวะวิทยา จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและความต้องการออกซิเจน ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย การละลายของออกซิเจนเป็นปัจจัยหลักต่อขีดจำกัดของความสามารถในการ purification ของ แหล่งน้ำธรรมชาติอัตราการละลายของออกซิเจนที่มีเกลือเจือปนจะน้อยกว่าน้ำสะอาดและเปลี่ยนแปลง ตาม ฤดูกาล เพราะฤดูกาลเปลี่ยน อุณหภูมิอากาศเปลี่ยน ส่งผลให้อุณหภูมิ น้ำเปลี่ยน ค่า DO เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิน้ำ

ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำ (pH)

ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) มาจากคำว่า Positive potential of the hydrogen ions เป็นค่าที่แสดงให้ ทราบว่าน้ำหรือสารละลายมีคุณสมบัติเป็นกรดหรือเป็นด่าง การวัดพีเอชของน้ำเป็นการวัดปริมาณ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน (H^+) ที่มีอยู่ในน้ำ ณ เวลานั้น และมีผลต่อการใช้ประโยชน์ของน้ำ ใน กิจกรรมต่าง ๆ ระดับความเป็นกรดต่างมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 14 โดยพีเอช 7 มีค่าเป็น กลาง คือ ไม่เป็นกรดและด่าง หากพีเอชมีค่าต่ำกว่า 7 แสดงว่าน้ำมีคุณสมบัติเป็นกรด แต่ถ้าพีเอชมีค่าสูงกว่า 7 ขึ้นไปแสดงว่าน้ำมีคุณสมบัติเป็นด่าง พีเอชของน้ำมีความสำคัญต่อการดำรงชีวิต

ของพืชและสัตว์ในแหล่งน้ำ สำหรับพืชที่เหมาสมต่อการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำมีค่าอยู่ระหว่าง 6.5 ถึง 8.5 และ น้ำชลประทานที่เหมาะสมสำหรับใช้เพาะปลูกพืชมีค่าอยู่ระหว่าง 6.5 ถึง 8.5

การนำไฟฟ้า (Electric Conductivity : EC)

การนำไฟฟ้าเป็นค่าที่บอกถึงความสามารถของตัวอย่างน้ำในการเป็นสื่อนำกระแสไฟฟ้า ซึ่งสื่อ นำกระแสไฟฟ้าในน้ำคือ ไอออน (ion) ของแร่ธาตุต่างๆ ซึ่งส่วนมากจะเป็นเกลือ อนินทรีย์ที่ละลายอยู่ใน น้ำ โดยมีหน่วยเป็นไมโครโมห์ต่อเซนติเมตร (micromhos/cm : $\mu\text{mhos/cm}$) หรือไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร (microsiemen/cm : $\mu\text{S/cm}$) ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ ผลรวมทั้งหมดของค่าความนำไฟฟ้าของแร่ธาตุทุกชนิดทั้งที่เป็นไอออนบวกและไอออนลบที่ละลายอยู่ใน ตัวอย่างน้ำและอุณหภูมิขณะที่ทำการวัด โดยปกติแล้ววัดเทียบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นมาตรฐาน

ค่าของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด (TDS)

เป็นค่าที่แสดงถึงปริมาณสารที่เหลืออยู่ในภาชนะหลังจากการระเหยน้ำออกจากตัวอย่างที่ผ่านการกรองของแข็งแขวนลอยทั้งหมดออกแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 103 °C – 105 °C โดยมีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในรูปเกลืออนินทรีย์ค่า TDS โดยประมาณคำนวณได้โดยคูณค่าความนำไฟฟ้าที่มีหน่วยเป็นไมโครโมห์ต่อเซนติเมตรด้วยแฟคเตอร์ที่อาจจะแปรผันในช่วง 0.55 – 0.9 สำหรับน้ำชลประทานใช้แฟคเตอร์ 0.64

$$\text{TDS} \cong 0.64 \times \text{EC} \times 106 \text{ มีหน่วยเป็น part per million (ppm) หรือ มิลลิกรัมต่อลิตร} \quad (8)$$

$$\text{TDS} \cong 0.00064 \times \text{EC} \times 106 \text{ มีหน่วยเป็น part per thousand (ppt) หรือ กรัมต่อลิตร} \quad (9)$$

TOC/DOC

TOC หรือ Total organic carbon หรือ อินทรีย์คาร์บอนรวม อธิบายถึงสารอินทรีย์ ที่พื้นฐานจะมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ซึ่งปนเปื้อนอยู่ในระบบน้ำ การปนเปื้อนสารอินทรีย์อาจเกิดจากแหล่งกำเนิดที่หลากหลาย เนื่องจาก สารอินทรีย์ เป็นสารประกอบ เช่น น้ำตาลซูโครส แอลกอฮอล์ บีโตรีเลียม พีวีซี และ สารกำจัดศัตรูพืช เป็นต้น โดยการวัดปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดในตัวอย่างที่สามารถถูก Oxidize ไปเป็น CO_2 ได้ โดยสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งตัวอย่างที่เป็นของเหลวและของแข็ง จะเห็นได้ว่า TOC นั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ POC หรือ Purgeable organic carbon คือ สารอินทรีย์คาร์บอนในตัวอย่างที่สามารถระเหยได้เมื่อทำปฏิกิริยา

กับกรด หรือ บางครั้งอาจเรียกว่า Volatile organic carbon และอีกส่วนคือ Non-Purgeable organic carbon คือสารอินทรีย์คาร์บอนในตัวอย่างส่วนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยากับกรดหรือเรียกอีกอย่าง คือ DOC หรือ Dissolved organic carbon หรือ ค่าของสารอินทรีย์คาร์บอนที่ละลายอยู่ในน้ำโดยสมการที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง DOC และ POC (Schunacher, 2002)

$$\text{TOC} = \text{DOC} + \text{POC} \quad (10)$$

ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนในน้ำภายในการเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาส่วนใหญ่มีที่มาจากเริ่มต้นจากอาหารสำหรับเพาะเลี้ยงสาหร่าย ส่งผลให้ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนรวมในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาสะสมมากขึ้นเรื่อย ๆ จากอาหารตกค้างที่สาหร่ายดูดซับไม่หมดและของเสียจากการเพาะเลี้ยง (Selvy, 2015) สารอินทรีย์เหล่านี้อาจอยู่ในรูปที่ละลายน้ำ เรียกว่าอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (Dissolved organic carbon : DOC) อีกส่วนหนึ่งจะเป็นของแข็งในรูปของตะกอนหรือเซลล์สาหร่ายที่ฝักขาดหรือมีขนาดเล็ก ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ เรียกตะกอนนี้ว่า ตะกอนอินทรีย์ (Purgeable organic carbon : POC) ทั้ง 2 ส่วนนี้เรียกรวมกันว่า Total organic carbon

ค่าสีปรากฏ (Apparent color of water)

สีปรากฏ หมายถึง สีที่มองเห็นจริงในน้ำโดยไม่มีการแยกเอาสารแขวนลอยออกไป เป็นสีที่เกิดจากสารที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำรวมกัน โดยในประเทศไทยกฎหมายเกี่ยวเนื่องกับสีของน้ำและเกณฑ์คุณภาพน้ำประปาได้จัดทำจากกรมอนามัย พ.ศ. 2563 ได้ระบบไว้ว่า สีปรากฏ หรือ Apparent color นั้นต้องมีค่าไม่เกิน 15 PCU โดยในปัจจุบันนี้มีเทคนิคในการวิเคราะห์สีที่หลากหลาย แต่มีอยู่ 2 วิธีในการวัดสีปรากฏของน้ำเสียที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและเป็นที่ยอมรับ (Florida LAKEWATCH, 2020) คือ

- การวัดสีด้วยวิธีการเปรียบเทียบทางสายตา (Visual comparison method) เป็นวิธีการเปรียบเทียบทางสายตาที่เป็นวิธีมาตรฐานโดยหน่วยงาน APHA (American public health association) เป็นการนำตัวอย่างน้ำมาเปรียบเทียบกับแถบสีมาตรฐานหรือสีของสารละลายมาตรฐานที่ทราบค่า

สีปรากฏ หน่วยโคบอลต์แพลตตินัม (Pt/Co) [ต้นทุนต่ำ]

สีแท้ หน่วยแพลทินัมโคบอลต์ลาก (Pt / Co) [ต้นทุนต่ำ]

- การวัดสีด้วยวิธีสเปกโตรโฟโตเมตริก (Spectrophotometric methods) วิธีการนี้ มักจะเหมาะสำหรับการตรวจวัดสีจริงเท่านั้น เนื่องจากมีความขุ่นของน้ำจากสารแขวนลอยอื่น ๆ ครอบคลุมการวิเคราะห์

ADMI หน่วย ADMI [ราคาปานกลาง]

Adams-Nickerson หน่วย Adams-Nickerson (ANU) [ราคาปานกลาง]

Bio-degradability หน่วย Adams-Nickerson (ANU) [ราคาสูง]



งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Brendan (2011) กล่าวถึงคุณสมบัติของโอโซนในด้านต่าง ๆ รวมไปถึงการนำโอโซนทั้งรูปแบบของก๊าซโอโซนและน้ำโอโซนไปใช้ประโยชน์ในระดับอุตสาหกรรม โดยก๊าซโอโซนนั้นมีน้ำหนักโดยมวลมากกว่าออกซิเจน มีจุดเดือดที่สูงกว่า มีความหนาแน่นมากกว่า และสามารถละลายน้ำได้ดีกว่าออกซิเจน และในด้านการนำไปใช้ประโยชน์โอโซนนั้นมีต้นทุนที่สูงเมื่อเทียบกับคลอรีน แต่ด้วยประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ต่าง ๆ และการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ และยังเป็นสารที่ไม่เป็นพิษ เนื่องจากมีระยะเวลาในการสลายตัวที่น้อยกว่าคลอรีน ในการนำไปใช้งานในภาคอุตสาหกรรมนั้น มีการนำไปใช้งานในการล้างผักและผลไม้ โดยความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำนั้นอยู่ที่ประมาณ 0.5 ppm และนอกจากการนำไปล้างผักหรือผลไม้ยังมีการใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องมือแพทย์เพื่อการฆ่าเชื้อ แทนการใช้คลอรีนหรือน้ำยาฆ่าเชื้อ แต่ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือการนำโอโซนไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียด้วยประสิทธิภาพในการออกซิไดซ์ที่สูงจึงสามารถฆ่าเชื้อโรคในน้ำได้ดี

ปิยะวิทย์ (2563) ศึกษาคุณสมบัติทางเคมี และกายภาพของโอโซน เพื่อประยุกต์ใช้ในการเพิ่มความขาวของเนื้อปลา โดยได้กล่าวถึงความเป็นมาของก๊าซโอโซนซึ่งถูกค้นพบครั้งแรกในปี พ.ศ. 2383 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมัน ชื่อว่า C. F. Schonbein ต่อมา ปีพ.ศ. 2431 ได้ทำการจดลิขสิทธิ์ให้ชื่อว่าก๊าซโอโซน (O_3) ที่มีสมบัติ ที่เรียกว่า Deodorize sewer gases และได้กล่าววว่าโอโซนสามารถละลายน้ำได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ และได้กล่าวถึงหลักการเกิดก๊าซโอโซน โดยรังสีอัลตราไวโอเล็ต และกระบวนการโคโรนาดีสชาร์จซึ่งแตกโมเลกุลของออกซิเจนให้ไปจับกับออกซิเจนอื่น ๆ กลายเป็นโอโซน นอกจากนี้ในบทความนี้จะกล่าวถึงการสลายตัวของโอโซน โดยวิธีทางตรงและทางอ้อม และวิธีการสร้างน้ำโอโซน ด้วย 2 วิธีที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายคือ ระบบกระจายฟองอากาศ โดยใช้หัวกระจายฟอง ซึ่งวิธีนี้มีต้นทุนที่ไม่สูงมากแต่ประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวลสารของโอโซนนั้นต่ำกว่าอีกวิธีคือวิธีการใช้หัวฉีดเวนจูรี่ซึ่งมีต้นทุนที่สูงแต่ให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวลสารที่ดีกว่าเนื่องจากสามารถทำให้ฟองอากาศมีขนาดเล็กระดับไมโครได้ด้วยแรงดันภายในเวนจูรี่ โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้น้ำโอโซนที่ผลิตได้มาใช้ในการล้างเนื้อปลาด้วยคุณสมบัติที่ส่งผลให้เนื้อปลามีความสว่างและขาวมากขึ้น โดยสังเกตจากการเพิ่มขึ้นของความขาว หรือ L^* และการลดลงของค่า a^* ที่จะทำให้เกิดความโปร่งแสง

Nur et al. (2017) ศึกษาการผลิตน้ำโอโซนโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำโอโซนโดยระบบการกระจายฟองโดยดีฟิวเซอร์และระบบหัวฉีดเวนจูรี่ และเครื่องกำเนิดโอโซนโดยใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ที่ความดันคงที่ 0.5 psi ในการทดลองสำหรับเทคนิคการผลิตน้ำโอโซนด้วยวิธีการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์นั้น ขนาดดีฟิวเซอร์มีอัตราการไหลสูงสุดที่ 1 L/min มีรูพรุนขนาด 80 ไมครอน ระดับน้ำสำหรับวิธีการนี้อยู่ที่ 0.5, 1, 3, 5 และ 10L โดยอุณหภูมิของน้ำอยู่ที่ 24 °C ถึง

26.5 °C ได้ข้อสรุปจากวิธีการนี้ได้ความเข้มข้นของโอโซนละลายน้ำมากที่สุด 10 ppm ที่ระดับน้ำ 5L และอัตราการสลายตัวของโอโซนในน้ำที่นานที่สุดคือ 50 นาที สำหรับน้ำ 3L ในส่วนของระบบหัวฉีด เวนจัวร์ใช้ เวนจัวร์ขนาด 3/4" ใช้ปั๊มหมุนเวียนน้ำ XILONG Submersibles รุ่น xl-370 เพื่อสร้างแรงดันสำหรับเวนจัวร์ โดยระดับน้ำในการทดลองด้วยวิธีนี้คือ 10 และ 35L ได้ข้อสรุปว่า ที่น้ำ 10L ได้ความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำที่ 20 ppm โดยใช้เวลาน้อยกว่าที่ 35L และยังมีเวลาในการสลายตัวที่นานกว่าโดยเวลาในการสลายตัวคือ 90 นาที จึงได้ข้อสรุปว่าวิธีการผลิตน้ำโอโซนด้วยระบบหัวฉีด เวนจัวร์สามารถผลิตน้ำโอโซนที่มีความเข้มข้น 20 ppm ใช้เวลาเพียง 20 นาที และมีอัตราการสลายตัวที่ช้าที่ 90 นาที สำหรับน้ำ 10L

ปฏิวดี และคณะ (2018) ศึกษาการใช้ไมโครบับเบิลร่วมกับการเติมอากาศด้วยระบบหัวฉีด เวนจัวร์ในการบำบัดน้ำ ในงานวิจัยนี้กล่าวถึงการใช้เครื่องบำบัดน้ำแบบไมโครบับเบิลโอโซนร่วมกับระบบเวนจัวร์และการออกแบบเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยจากการประยุกต์ใช้เครื่องบำบัดน้ำนี้ จะเป็นการดูน้ำกับอากาศผสมกับโอโซน เข้าไปปั่นในเครื่องสูบน้ำที่ความเร็วสูงแล้วฉีดผ่านหัวพ่นแบบเวนจัวร์ที่มีรูปร่างเป็นคอคอดเพื่อเพิ่มความเร็วของน้ำจนกระทั่งเกิดแรงดูดอากาศที่ผสมกับโอโซน ลงมาผสมกับน้ำทำให้เกิดการถ่ายเทออกซิเจนลงไปใต้น้ำ จากการทดลองระบบพร้อมนี้สามารถทำงานได้เป็นอย่างดี และผลจากการทดสอบปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 5.5 mg/L

Melicia (2018) ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิของน้ำและค่า pH ต่อความเข้มข้นและเวลาในการอิมตัวของโอโซน ในงานวิจัยนี้ได้กล่าวว่า อุณหภูมิที่สูงส่งผลต่อความเข้มข้นของน้ำโอโซน และการสลายตัวของโอโซนในน้ำ ค่า pH ที่สูงเกินไปส่งผลต่อความเข้มข้นของโอโซนในน้ำ และอัตราการสลายตัว ซึ่งอัตราการสลายตัวที่เร็ว และความเข้มข้นของน้ำโอโซน ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรค จึงมีแนวคิดในการเพิ่มประสิทธิภาพของโอโซนด้วยการศึกษาผลของอุณหภูมิที่ 8 °C และ 25 °C และ ค่า pH 3.0 และ 6.0 ของน้ำต่อระยะเวลาในการอิมตัวของโอโซน โดยความเข้มข้นของก๊าซโอโซนเริ่มต้นอยู่ที่ 13.3 ppm และ 22.3 ppm พบว่าเมื่ออุณหภูมิและค่า pH ลดลง และความเข้มข้นของก๊าซโอโซนเริ่มต้นที่สูงขึ้น ส่งผลให้ความเข้มข้นของความอิมตัวสูงสุดคือที่ pH 3.0 และ 8 °C คือ 4.50 และ 8.03 ppm ที่ความเข้มข้นของก๊าซโอโซนเริ่มต้น 13.3 และ 22.3 ppm ตามลำดับ

Eva et al. (2010) ศึกษาความสัมพันธ์การถ่ายโอนมวลของก๊าซโอโซน ($k_L a$, O_3) และการกักเก็บก๊าซ ตลอดจนการประเมินอิทธิพลของความเร็วของก๊าซที่มีต่อพารามิเตอร์ทั้งสองนี้ โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของโอโซนถูกคำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของโอโซนและออกซิเจน ($k_L a$, O_3 และ $k_L a$, O_2) โดยการศึกษาประเมินผลของการใช้ฟองอากาศขนาดไมโครเพื่อเพิ่มความสามารถในการละลายของโอโซนในน้ำซึ่งประเมินโดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล ($k_L a$, O_3) การกักเก็บก๊าซ (ϵ_G) และการประเมินการสลายตัวของโอโซน

โดยสรุปได้ว่า k_{La} ได้รับอิทธิพลอย่างมากจากอัตราการไหลของก๊าซ k_{La} เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของก๊าซที่อัตราการไหลของน้ำคงที่ k_{La} สำหรับฟองอากาศขนาดไมโครมีค่าสูงกว่าฟองอากาศทั่วไปถึง 2.45 เท่า และที่อัตราการไหลของน้ำคงที่ยิ่งอัตราการไหลของก๊าซมากเท่าไรการกักเก็บก๊าซก็จะยิ่งสูงมากขึ้นรวมถึงค่า pH ที่เพิ่มขึ้นของน้ำช่วยเร่งการสลายตัวของโอโซนที่ละลายในน้ำ

อานอบ (2543) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากคลองสำโรงด้วยโอโซน ซึ่งในงานวิจัยได้กล่าวถึงการศึกษาคุณสมบัติของโอโซนในการออกซิเดชันสารอินทรีย์และอนินทรีย์ รวมถึงคุณสมบัติในการฟอกสีของน้ำเสียให้ใสขึ้น และยังกล่าวถึงการศึกษาคุณสมบัติของน้ำ ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม และสังกะสี โดยพบว่าหลังผ่านการใช้โอโซนในการบำบัด 6 ชั่วโมง คุณภาพของน้ำตัวอย่างดีขึ้น

Hadiyanto (2019) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากยางโดยใช้รังสียูวี โอโซน และยูวี/โอโซน ซึ่งทั้ง 3 วิธีในการบำบัดนี้เป็นกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (AOPs) โดยในงานวิจัยได้กล่าวถึงสมการจลนพลศาสตร์ของความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD) ของการบำบัดน้ำเสีย นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา โดยพบว่าการใช้น้ำเสียที่บำบัดในอัตราส่วน 30% (v/v) เป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับ 50% (v/v) และ 80% (v/v) โดยมี OD_{max} 0.67 และอัตราการเจริญเติบโต (Growth rate) 0.3 Day^{-1} สำหรับสาหร่ายสไปรูลินาที่เพาะเลี้ยง 10 วัน

สมเกียรติ และคณะ (2562) กล่าวถึงการเสริมอัตราการถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไรซอคาร์บอนเตอรส์สำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา โดยในงานวิจัยนี้ได้กล่าวถึงการวัดการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลินาโดยใช้ Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 680 นาโนเมตร ในการวัดความหนาแน่นของเซลล์สาหร่าย (OD_{680}) ซึ่งเป็นวิธีวัดการเจริญเติบโตของสาหร่ายเบื้องต้น นอกจากนี้จะกล่าวถึงวิธีการคำนวณค่าชีวมวลสดและแห้ง อัตราการเจริญเติบโต และค่าผลิตผลเชิงมวลของสาหร่ายสไปรูลินาจากการคำนวณโดยใช้ความหนาแน่นของเซลล์ที่ทำการวัดจาก Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 680 นาโนเมตร นอกจากนี้ยังได้กล่าวถึงการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตร ในการถ่ายเทมวลสารของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลงสู่น้ำ

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

ในการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารของก๊าซไอโซนในการผลิตน้ำไอโซนมี การใช้อุปกรณ์สำหรับการทดลองดังต่อไปนี้

1. อุปกรณ์ในระบบหัวฉีดเวนจูรี

ถังเก็บน้ำ ความจุ 100 L	1 ถัง
ปั้มน้ำ ขนาด 2 HP	1 ตัว
หัวฉีดเวนจูรี ขนาด 1.5"	1 ตัว

อุปกรณ์ประกอบระบบอื่น ๆ (ท่อพีวีซี และวาล์วต่าง ๆ)
เครื่องกำเนิดไอโซนขนาด 5 g/hr.
2. อุปกรณ์ในระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์

ถังเก็บน้ำ ความจุ 100 L	1 ถัง
ตัวกระจายฟองดีฟิวเซอร์ ขนาด 4"	1 ตัว

สายยาง
เครื่องกำเนิดไอโซนขนาด 5 g/hr.
3. อุปกรณ์สำหรับตรวจวัด

มาตรอัตราการไหลแบบดิจิตอล (Flow Meter)	1 ตัว
เครื่องวัดความเป็นกรด – ด่าง (pH Meter)	1 ตัว
เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermo Meter)	1 ตัว
เครื่อง Spectrophotometer HANNA HI801	1 ตัว
เครื่องมือวัดค่าของแข็งละลายในน้ำ (TDS)	1 ตัว
เครื่องมือวัดค่าการนำไฟฟ้า (EC)	1 ตัว
เครื่องวัดอินทรีย์คาร์บอนรวม (TOC)	1 ตัว

3.2 การดำเนินงาน

การพัฒนาประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารของก๊าซโอโซนในการผลิตน้ำโอโซนนั้นจะเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการสร้างน้ำโอโซนด้วย 2 ระบบ คือระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์ และระบบหัวฉีดเวนจูรี โดยปัจจุบันระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์นั้นมีการใช้งานที่แพร่หลายมากกว่าระบบหัวฉีดเวนจูรีด้วยต้นทุนที่ถูกลงและง่ายต่อการติดตั้ง ซึ่งการทดลองนี้จะใช้น้ำประปาจากคณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เครื่องกำเนิดโอโซนที่มีกำลังผลิต 5 g/hr. อุณหภูมิของน้ำอยู่ที่ 27 °C–30 °C และค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ที่ 8 – 9 โดยในการทดลองจะแบ่งเป็น 4 ส่วนหลักๆ ดังนี้

1. การวัดความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำ

ในการวัดความเข้มข้นของโอโซนที่ละลายในน้ำนั้นจะใช้ Spectrophotometer HANNA HI801 ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 Spectrophotometer HANNA HI801

ตารางที่ 5 รายละเอียดการวิเคราะห์โอโซนละลายในน้ำด้วย

ช่วงการวัด	0.00 – 2.00 mg/L (as O ₃)
ค่าความละเอียด	0.01 mg/L
ค่าความถูกต้อง	±0.02 mg/L หรือ ±3% ของค่าที่อ่านได้ที่อุณหภูมิ 25 °C
แหล่งกำเนิดแสง	ส่องแสงที่ความยาวคลื่น 525 นาโนเมตร
ขนาดของหลอดแก้ว	22 มิลลิเมตร
วิธีการวิเคราะห์	Colorimetric DPD method

สารเคมีที่ใช้

HI 93757-0 Ozone Reagent

HI 93703-52-0 Glycine Powder

การวัดค่าสารตัวอย่างไอโซนที่ประกอบด้วยคลอรีน

$$\text{mg/l (O}_3\text{)} = A - B \quad (11)$$

เมื่อ A = ค่าที่ได้จากการวัด Standard Measurement

B = ค่าที่ได้จากการวัด Additional Measurement

ขั้นตอนการวิเคราะห์Standard Measurement

1. เลือกโปรแกรมวิเคราะห์ Ozone
2. เติมน้ำกลั่นในขวดแก้วขนาด 22 mm. 10 ml. และปิดฝา
3. นำหลอดแก้วใส่เครื่อง Spectrophotometer HANNA HI801
4. กด Zero
5. นำหลอดแก้วออก
6. นำสารตัวอย่างเติมลงในหลอดแก้วขนาด 22 mm. 10 ml.
7. เติมสาร HI 93757-0 Ozone Reagent และเขย่า
8. นำหลอดแก้วที่มีตัวอย่างใส่ลงในเครื่อง Spectrophotometer HANNA HI801
9. กดปุ่ม ◀ เพื่ออ่านค่า

Additional Measurement

1. เลือกโปรแกรมวิเคราะห์ Ozone
2. เติมน้ำกลั่นในขวดแก้วขนาด 22 mm. 10 ml. และปิดฝา
3. นำหลอดแก้วใส่เครื่อง Spectrophotometer HANNA HI801
4. กด Zero
5. นำหลอดแก้วออก
6. นำสารตัวอย่างเติมลงในหลอดแก้วขนาด 22 mm. 10 ml.
7. เติมสาร HI 93703-52-0 Glycine Powder และเขย่า

8. นำหลอดแก้วที่มีตัวอย่างใส่ลงในเครื่อง Spectrophotometer HANNA HI801

9. กดปุ่ม ◀ เพื่ออ่านค่า

เพื่อผลลัพธ์ที่ดีที่สุด: ทำการทดสอบ 3 ครั้งและหาค่าเฉลี่ย ตัวอย่างที่มีสีเข้มจะทำให้การจับคู่สีที่ตรงกันทำได้ยาก และควรทำการเจือจางก่อนการทดสอบอีกครั้งเพื่อให้ง่ายในการอ่านค่า

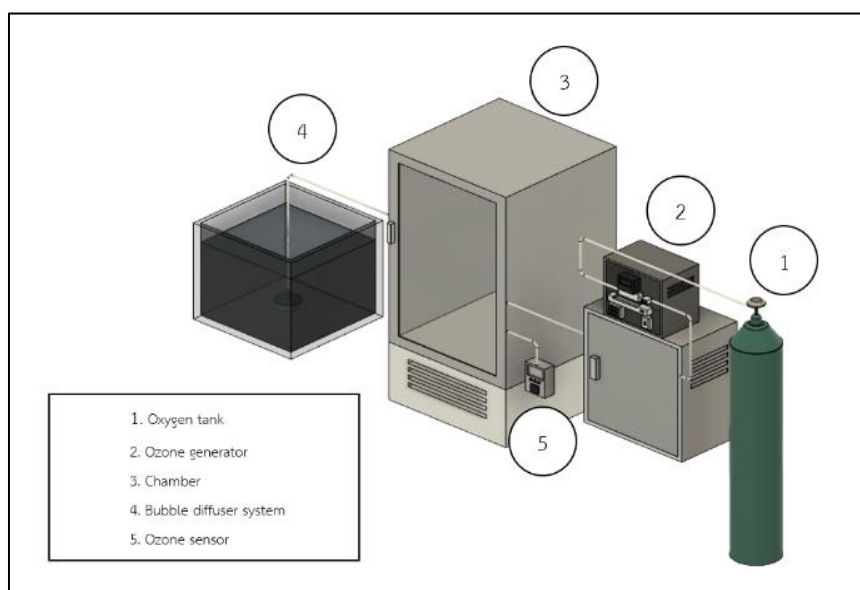
2. การศึกษาการสร้างน้ำไอโซน

การศึกษการสร้างน้ำไอโซน ซึ่งทำการเปรียบเทียบการสร้างน้ำไอโซนด้วย 2 ระบบ คือ ระบบการกระจายฟองด้วยดิฟฟิวเซอร์ (Diffuser) โดยใช้ดิฟฟิวเซอร์ขนาด 4” มีเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน 0.2 μm . และใช้ปั๊มสำหรับอัดอากาศเพื่อสร้างแรงดัน 2.5 – 3.0 PSIG ในการอัดก๊าซไอโซนผ่านหัวดิฟฟิวเซอร์ และระบบหัวฉีดเวนจูรี (Venturi) โดยใช้เวนจูรีขนาด 1.5” และใช้ปั๊มน้ำขนาด 2 แรงม้า โดยใช้แรงดันใช้แตกต่างกัน (ΔP) 2.5 – 3.0 PSIG

2.1 การสร้างน้ำไอโซนโดยระบบการกระจายฟองด้วยดิฟฟิวเซอร์ (Diffuser)

การสร้างน้ำไอโซนโดยระบบการกระจายฟองด้วยดิฟฟิวเซอร์นั้น จะดันก๊าซไอโซนจากเครื่องกำเนิดไอโซนผ่านดิฟฟิวเซอร์ลงสู่ถังน้ำด้วยแรงดัน 2.5 – 3 PSIG ซึ่งขนาดฟองที่ได้จะขึ้นอยู่กับขนาดรูพรุนของดิฟฟิวเซอร์ที่ใช้ซึ่งมีขนาดรูพรุน 0.2 μm . แสดงดังภาพที่ 8 โดยมีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

1. ขั้นตอนแรกเตรียมถังน้ำโดยเติมน้ำ 50 75 และ 100 L ตามลำดับ สำหรับการทดลอง ทำการวัดอุณหภูมิ และค่า pH ก่อนการเติมไอโซน
2. ต่อดิฟฟิวเซอร์เข้ากับสายยางที่ออกจากท่อที่ต่อจากตุ้มไอโซน และให้ดิฟฟิวเซอร์อยู่กึ่งกลางด้านล่างของถังน้ำ
3. เปิดวาล์วถังบรรจุก๊าซออกซิเจนเพื่อเข้าสู่เครื่องกำเนิดไอโซนและได้ก๊าซไอโซนในอัตรา 5 g/hr.
4. ปลปล่อยก๊าซไอโซนที่ได้จากเครื่องกำเนิดไอโซนในอัตรา 5 g/hr. เพื่อสร้างไอโซนที่มีความเข้มข้น 10,000 15,000 และ 20,000 ppm ตามลำดับ
5. ดูดไอโซนจากตุ้มไอโซนผ่านดิฟฟิวเซอร์ลงในน้ำโดยใช้พัดลมดูดอากาศ เป็นเวลา 5 10 15 20 25 และ 30 นาที ในแต่ละระดับน้ำ
6. ทำการสุ่มตัวอย่างน้ำที่มีการเติมไอโซนทุก ๆ 5 นาที จนครบ 30 นาที ในแต่ละระดับน้ำ เพื่อวัดความเข้มข้นของไอโซนละลายในน้ำ อุณหภูมิ และค่า pH
7. หยุดเครื่องกำเนิดไอโซนหลังจาก 30 นาที และทำการสุ่มตัวอย่างน้ำทุก ๆ 5 นาที จนครบ 30 นาที ในแต่ละระดับน้ำ เพื่อวัดอัตราการสลายตัวของไอโซนที่ละลายในน้ำ



ภาพที่ 8 การสร้างน้ำโอโซนโดยระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์

จากการออกแบบวิธีการทดลองข้างต้นของระบบการสร้างน้ำโอโซนโดยระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์ สามารถออกแบบตารางการเก็บข้อมูลในการทดลองได้ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การสร้างน้ำโอโซนโดยระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์

Volume/ Dose	Dose 10,000 ppm			Dose 15,000 ppm			Dose 20,000 ppm		
	Ow (mg/l)	pH	Temp. (°C)	Ow (mg/l)	pH	Temp. (°C)	Ow (mg/l)	pH	Temp. (°C)
50L	เก็บค่าทุกๆ 5 นาที ตั้งแต่ 0-30 นาที								
75L									
100L									

**หมายเหตุ Dose = CV ; โดย C = ความเข้มข้นของโอโซนในเฟสก๊าซ, V = ปริมาตรของภาชนะบรรจุก๊าซ
Ow = Ozonated water หรือ ความเข้มข้นของโอโซนละลายน้ำ

โดยตารางข้างต้นออกแบบเพื่อการเก็บข้อมูลการสร้างน้ำโอโซนโดยระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์ โดยพิจารณาตัวแปร 3 ตัวแปร คือความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำ ค่าความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมินี้ นอกจากนี้ยังออกแบบตารางดำเนินการตรวจวัดอัตราการสลายตัวของโอโซนที่ละลายในน้ำแสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 อัตราการสลายตัวของน้ำโอโซนที่สร้างโดยระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์

Volume/ Dose	Dose 10,000 ppm			Dose 15,000 ppm			Dose 20,000 ppm		
	Ow (mg/l)	pH	Temp. (°C)	Ow (mg/l)	pH	Temp. (°C)	Ow (mg/l)	pH	Temp. (°C)
50L	เก็บค่าทุกๆ 5 นาที ตั้งแต่ 0-30 นาที								
75L									
100L									

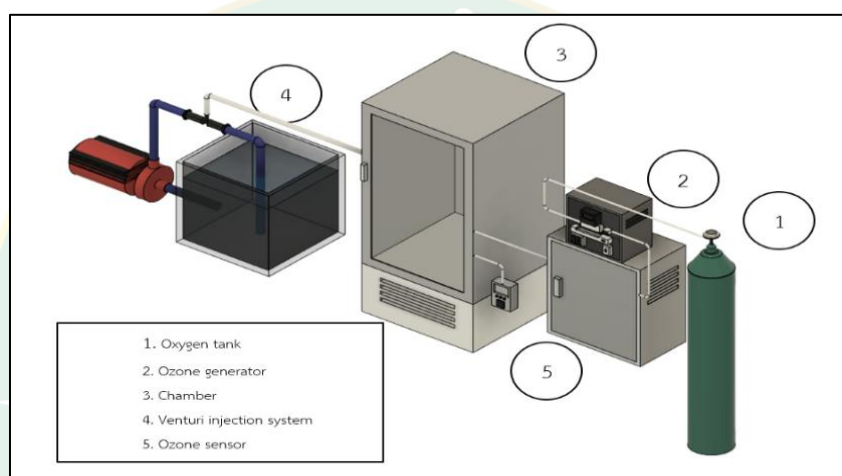
****หมายเหตุ** Dose = CV ; โดย C = ความเข้มข้นของโอโซนในเฟสก๊าซ, V = ปริมาตรของภาชนะบรรจุก๊าซ
Ow = Ozonated water หรือ ความเข้มข้นของโอโซนละลายน้ำ

2.2 การสร้างน้ำโอโซนโดยระบบหัวฉีดเวนจูรี (Venturi)

การสร้างน้ำโอโซนโดยระบบหัวฉีดเวนจูรีนั้นเป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับการถ่ายเทมวลสารของโอโซนละลายในน้ำ ระบบนี้จะใช้เวนจูรีขนาด 1.5” เป็นตัวดูดก๊าซโอโซนละลายในน้ำ โดยอาศัยหลักการของการสร้างความดันแตกต่างกันทำให้เกิดสุญญากาศ ทำให้สามารถดูดก๊าซโอโซนในปริมาณที่ต้องการได้ แต่ต้องขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านเวนจูรี และความดันที่แตกต่างกันที่เหมาะสมของเวนจูรีแต่ละขนาดโดยสำหรับเวนจูรีขนาด 1.5” ซึ่งมีแรงดันที่แตกต่างกันอยู่ที่ 2.5 – 3 PSIG ส่งผลให้เกิดแรงดูดของท่อเวนจูรีสำหรับดูดก๊าซโอโซนอยู่ที่ 1.66 L/min โดยวิธีการใช้หัวฉีดเวนจูรีนั้นจะให้ขนาดฟองที่เล็กมาก ประสิทธิภาพในการละลายโอโซนในน้ำสูง โดยการสร้างน้ำโอโซนด้วยระบบหัวฉีดเวนจูรีแสดงดังภาพที่ 9 โดยมีขั้นตอนในการดำเนินการทดลองดังนี้

1. ขั้นตอนแรกเตรียมน้ำโดยเติมน้ำ 50 75 และ 100 L ตามลำดับ (ระดับน้ำที่ต่ำเกินไปอาจส่งผลต่อการทำงานของปั้มน้ำจึงเริ่มการทดลองที่ระดับน้ำต่ำที่สุดที่ปั้มน้ำสามารถทำงานได้) สำหรับการทดลอง ทำการวัดอุณหภูมิ และค่า pH ก่อนการเติมโอโซน
2. ต่อสายยางที่ออกจากท่อที่ต่อจากตุ้มน้ำโอโซนกับทางเข้าก๊าซโอโซนของเวนจูรี และให้ท่ออยู่ที่กึ่งกลางด้านล่างของถังน้ำ
3. เปิดปั้มน้ำในระบบหัวฉีดเวนจูรีเพื่อสร้างแรงดันในเส้นท่อ
4. เปิดวาล์วถังบรรจุก๊าซออกซิเจนเพื่อเข้าสู่เครื่องกำเนิดโอโซนและได้ก๊าซโอโซนในอัตรา 5 g/hr.
5. ปล่อก๊าซโอโซนที่ได้จากเครื่องกำเนิดโอโซนในอัตรา 5 g/hr. เพื่อสร้างโอโซนที่มีความเข้มข้น 10,000 15,000 และ 20,000 ppm ตามลำดับ

6. ดูดโอโซนออกจากตู้อรมโอโซนด้วยระบบหัวฉีดเวนจูรีลงในน้ำ เป็นเวลา 5 10 15 20 25 และ 30 นาที ในแต่ละระดับน้ำ
7. ทำการสูมตัวอย่างน้ำที่มีการเติมโอโซนทุก ๆ 5 นาที จนครบ 30 นาที ในแต่ละระดับน้ำ เพื่อวัดความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำ อุณหภูมิ และค่า pH
8. หยุดการทำงานของปั้มน้ำหลังจากการดูดโอโซนลงในน้ำครบ 30 นาที ในแต่ละระดับน้ำ
9. หยุดเครื่องกำเนิดโอโซนหลังจาก 30 นาที และทำการสูมตัวอย่างน้ำทุก ๆ 5 นาที จนครบ 30 นาที ในแต่ละระดับน้ำ เพื่อวัดอัตราการสลายตัวของโอโซนที่ละลายในน้ำ



ภาพที่ 9 การสร้างน้ำโอโซนโดยระบบหัวฉีดเวนจูรี

จากการออกแบบวิธีการทดลองข้างต้นของระบบการสร้างน้ำโอโซนโดยระบบหัวฉีดเวนจูรี สามารถออกแบบตารางการเก็บข้อมูลในการทดลองได้ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 การสร้างน้ำโอโซนโดยระบบหัวฉีดเวนจูรี

Volume/ Dose	Dose 10,000 ppm			Dose 15,000 ppm			Dose 20,000 ppm		
	Ow (mg/l)	pH	Temp. (°C)	Ow (mg/l)	pH	Temp. (°C)	Ow (mg/l)	pH	Temp. (°C)
50L	เก็บค่าทุกๆ 5 นาที ตั้งแต่ 0-30 นาที								
75L									
100L									

**หมายเหตุ Dose = CV ; โดย C = ความเข้มข้นของโอโซนในเฟสก๊าซ, V = ปริมาตรของภาชนะบรรจุก๊าซ
Ow = Ozonated water หรือ ความเข้มข้นของโอโซนละลายน้ำ

โดยตารางข้างต้นออกแบบเพื่อการเก็บข้อมูลการสร้างน้ำโอโซนโดยระบบหัวฉีดเวนจูรีที่ระดับน้ำต่าง ๆ ซึ่งพิจารณาตัวแปร 3 ตัวแปร คือความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำ ค่าความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิ น้ำ นอกจากนี้ยังได้ออกแบบตารางดำเนินการตรวจวัดอัตราการสลายตัวของโอโซนที่ละลายในน้ำแสดงดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 อัตราการสลายตัวของน้ำโอโซนที่สร้างโดยระบบหัวฉีดเวนจูรี

Volume/ Dose	Dose 10,000 ppm			Dose 15,000 ppm			Dose 20,000 ppm		
	Ow (mg/l)	pH	Temp. (°C)	Ow (mg/l)	pH	Temp. (°C)	Ow (mg/l)	pH	Temp. (°C)
50L	เก็บค่าทุกๆ 5 นาที ตั้งแต่ 0-30 นาที								
75L									
100L									

****หมายเหตุ** Dose = CV ; โดย C = ความเข้มข้นของโอโซนในเฟสก๊าซ, V = ปริมาตรของภาชนะบรรจุก๊าซ
Ow = Ozonated water หรือ ความเข้มข้นของโอโซนละลายน้ำ

2.3 อุณหภูมิของน้ำที่แตกต่างในการสร้างน้ำโอโซน

การสร้างน้ำโอโซนโดยใช้น้ำที่มีอุณหภูมิต่างกัน โดยการทดลองเลือกใช้ระบบที่สามารถสร้างน้ำโอโซนได้มากที่สุดและมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรมากที่สุด ซึ่งจะใช้ปริมาตรน้ำ 50 L ในการสร้างน้ำโอโซน และเปลี่ยนอุณหภูมิน้ำสำหรับการสร้างน้ำโอโซน 2 ช่วง คืออุณหภูมิ น้ำปกติ (27-30 °C) และอุณหภูมิน้ำเย็น (15-18 °C) และทำการเปลี่ยนก๊าซโอโซน Dose 3 ระดับ คือ 10,000 15,000 และ 20,000 ppm ตามลำดับ โดยจะพิจารณาความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำ ความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิ ซึ่งสามารถออกแบบตารางการเก็บข้อมูลในการทดลองได้ดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 การสร้างน้ำไอโชนโดยอุณหภูมิของน้ำที่แตกต่างกัน

Temp./ Dose	Dose 10,000 ppm		Dose 15,000 ppm		Dose 20,000 ppm	
	Ow (mg/l)	pH	Ow (mg/l)	pH	Ow (mg/l)	pH
15-18 °C	เก็บค่าทุกๆ 5 นาที ตั้งแต่ 0-30 นาที					
27-30 °C						

****หมายเหตุ** Dose = CV ; โดย C = ความเข้มข้นของไอโชนในเฟสก๊าซ, V = ปริมาตรของภาชนะบรรจุก๊าซ
Ow = Ozonated water หรือ ความเข้มข้นของไอโชนละลายน้ำ

โดยตารางข้างต้นออกแบบเพื่อการเก็บข้อมูลการสร้างน้ำไอโชนโดยอุณหภูมิของน้ำที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังได้ออกแบบตารางดำเนินการตรวจวัดอัตราการสลายตัวของไอโชนที่ละลายในน้ำแสดงดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 อัตราการสลายตัวของน้ำไอโชนที่อุณหภูมิของน้ำที่แตกต่างกัน

Temp./ Dose	Dose 10,000 ppm		Dose 15,000 ppm		Dose 20,000 ppm	
	Ow (mg/l)	pH	Ow (mg/l)	pH	Ow (mg/l)	pH
15-18 °C	เก็บค่าทุกๆ 5 นาที ตั้งแต่ 0-30 นาที					
27-30 °C						

****หมายเหตุ** Dose = CV ; โดย C = ความเข้มข้นของไอโชนในเฟสก๊าซ, V = ปริมาตรของภาชนะบรรจุก๊าซ
Ow = Ozonated water หรือ ความเข้มข้นของไอโชนละลายน้ำ

3. การศึกษาการใช้ไอโชนในการบำบัดน้ำหลังการเก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูลินา

การใช้ไอโชนในการบำบัดน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา โดยระบบในการบำบัด 2 ระบบ คือระบบการกระจายฟองด้วยไอโชนดีฟิวเซอร์ และระบบหัวฉีดโอโซนเวนจัวร์ เพื่อนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียหลังการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา โดยตัวแปรที่สนใจในการศึกษาคุณภาพของน้ำหลังการบำบัด และวิธีการเก็บข้อมูลแสดงดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 การตรวจสอบคุณภาพน้ำหลังการบำบัดด้วยโอโซน

Time (min)	pH	Temp (°C)	TOC (mg/l)	TDS (ppm)	DOC (mg/l)	EC (ppm)	APW (PCU)	OD ₆₈₀
0								
30	เก็บค่าทุกๆ 30 นาที							
...								
n								

****หมายเหตุ** Dose = CV ; โดย C = ความเข้มข้นของโอโซนในเฟสก๊าซ, V = ปริมาตรของภาชนะบรรจุก๊าซ

APW = Apparent color หรือ ค่าสีปรากฏ

จากตารางข้างต้นได้ทำการตรวจวัดคุณภาพของน้ำหลังการบำบัดด้วยตัวแปรต่าง ๆ เช่น ค่าความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำ ค่า pH อุณหภูมิ ค่าอินทรีย์คาร์บอนรวม (TOC) ค่าสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (DOC) ค่าของแข็งละลายน้ำ (TDS) ค่าการนำไฟฟ้า (EC) และค่าสีปรากฏ จากการศึกษาได้กำหนดตัวแปรที่มีความสำคัญเพื่อบ่งบอกถึงความสามารถของโอโซนที่สามารถบำบัดน้ำได้ดีขึ้น โดยได้เลือกค่าอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (DOC) ในการบ่งบอกถึงคุณภาพน้ำหลังการบำบัด โดยจะใช้ %DOC Removal หรือ เปอร์เซ็นต์การลดลงของอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำเพื่อบ่งบอกถึงความสามารถของโอโซนในการบำบัดน้ำหลังการเก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูลินา โดยสามารถหาค่า %DOC Removal ได้ดังสมการที่ (12)

$$\% \text{DOC Removal} = \frac{\text{DOC}_i - \text{DOC}_0}{\text{DOC}_0} \times 100 \quad (12)$$

เมื่อ DOC_i = ค่าอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำหลังการบำบัด หน่วย mg/L

DOC_0 = ค่าอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำก่อนการบำบัด หน่วย mg/L

ซึ่งค่าปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนในน้ำตรวจวัดโดยใช้การไตเตรทตามวิธีมาตรฐาน วัดตามมาตรฐาน Standard Method 5310 C ด้วยเทคนิค Ultra violet-visible spectrophotometer ในหน่วย mg/l

ตัวแปรที่สำคัญอีกตัวที่ใช้บ่งบอกถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโอโซนและการลดลงของค่าอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำคือจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยา (Hadiyanto et al., 2019) โดยจะใช้การวิเคราะห์สมการที่ (13) และ (14) ตามลำดับ

$$\ln \frac{DOC_o}{DOC_i} = k \cdot t \quad (13)$$

$$\frac{1}{DOC_i} - \frac{1}{DOC_o} = k \cdot t \quad (14)$$

เมื่อ t คือเวลาในการบำบัด และค่า k คือค่าคงที่อัตราจลนพลศาสตร์

4. การศึกษาการใช้น้ำหลังการบำบัดด้วยโอโซนเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา

เมื่อมีการนำน้ำเสียหลังการเก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูลินาไปทำการบำบัดและตรวจสอบคุณสมบัติข้างต้นดังการทดลองที่ 3 แล้ว จึงนำน้ำหลังผ่านการบำบัดนั้นมาใช้เพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาเพื่อทดสอบว่าสามารถใช้เพาะเลี้ยงต่อไปได้โดยได้ออกแบบตารางเพื่อใช้สำหรับตรวจสอบการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลินาดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 การตรวจสอบการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลินา

Day	OD ₆₈₀	W (g/L)	μ (day ⁻¹)	Px (g/L day)	pH
1					
2					
.					
14					

**หมายเหตุ OD₆₈₀ = Optical Density หรือ ความหนาแน่นของเซลล์ที่ความยาวคลื่น 680 นาโนเมตร

W = Wet Biomass weight หรือ ชีวมวลสาหร่ายสไปรูลินาสด, μ = Growth rate หรือ อัตราการเจริญเติบโต และ Px = Biomass Productivity หรือ ผลผลิต

3.3 งบประมาณที่ใช้ในการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้คาดว่าจะใช้งบประมาณมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

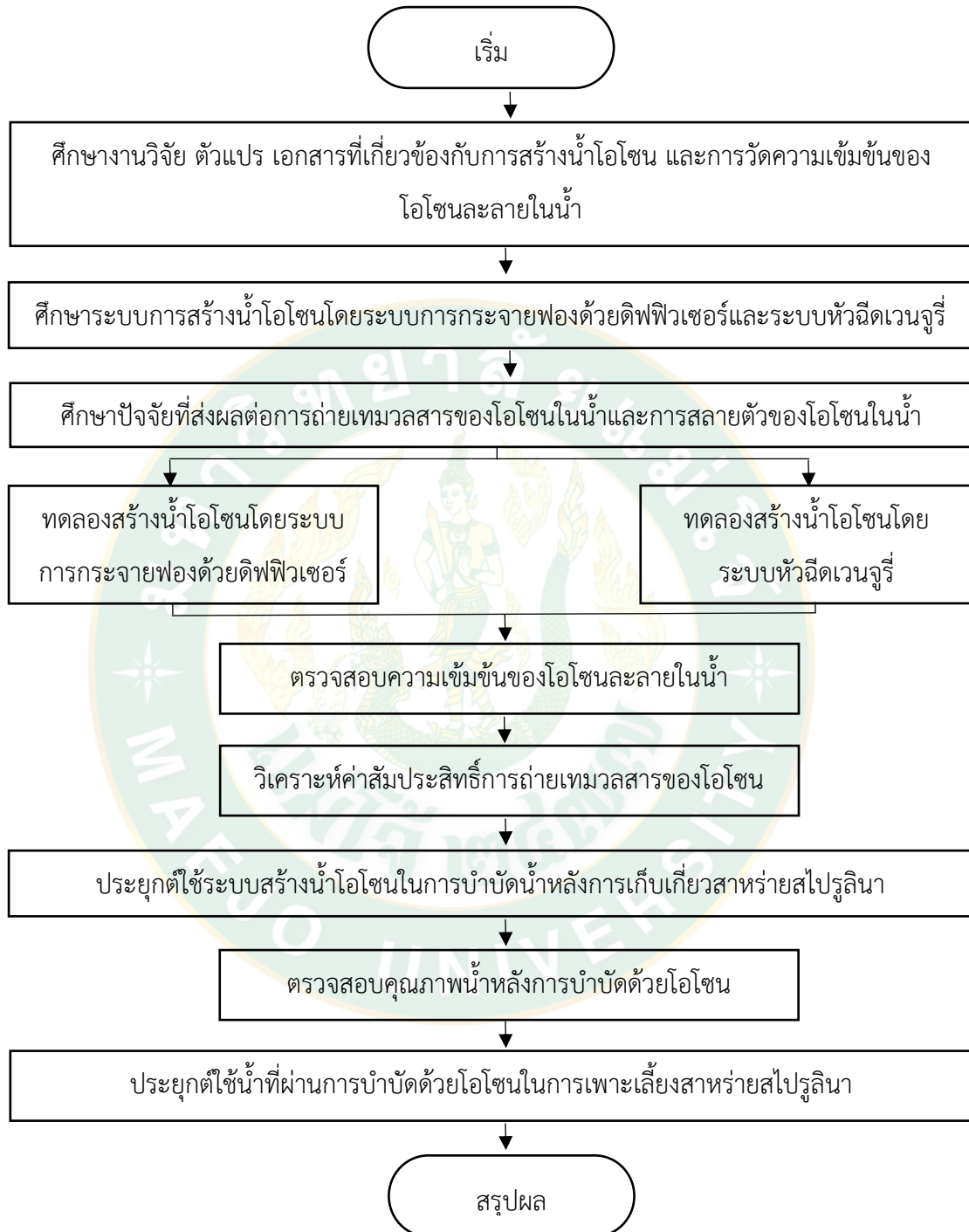
- ค่าหัวกระจายฟองดีฟิวเซอร์ 4”	4,500 บาท
- ค่าปั้มน้ำขนาด 2 HP	3,000 บาท
- ค่าหัวฉีดเวนจูรี่ 1.5”	1,000 บาท
- เครื่องกำเนิดโอโซนขนาด 5 g/hr.	5,500 บาท
- ค่าอุปกรณ์ประกอบระบบหัวฉีดเวนจูรี่ (ท่อ PVC และวาล์วต่าง ๆ)	1,000 บาท
- ค่าจ้างเหมาประกอบระบบหมุนเวียนน้ำในระบบหัวฉีดเวนจูรี่	2,000 บาท

งบประมาณรวม 17,000 บาท

3.4 สถานที่ดำเนินการวิจัย

ดำเนินการ ณ ห้องปฏิบัติการ คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้
จังหวัดเชียงใหม่

3.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน



ภาพที่ 10 แผนภาพการดำเนินงานวิจัย

3.6 แผนการดำเนินงาน

ระยะเวลาที่ใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้รวมทั้งสิ้น 12 เดือน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลา (เดือน)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1. ศึกษางานวิจัย ตัวแปร และ เอกสารที่เกี่ยวข้องกับการสร้างน้ำ โอโซน และการบำบัดน้ำเสียด้วย โอโซน	←→												
2. ศึกษาผลกระทบต่าง ๆ ที่มีผล ต่อการถ่ายเทมวลสารของโอโซนใน น้ำ	←→												
3. ดำเนินการตรวจสอบและ ปรับปรุงประสิทธิภาพในการถ่ายเท มวลสารของโอโซนในน้ำ			←→										
4. ประยุกต์ใช้ ระบบ ที่มี ประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวลสาร ของโอโซนในน้ำที่ดีที่สุดในการ บำบัดน้ำเสียหลังการเก็บเกี่ยว ผลผลิตของสาหร่าย และวิเคราะห์ ข้อมูล						←→							
5. สรุปผลการศึกษา								←→					
6. เขียนรายงาน										←→			

บทที่ 4

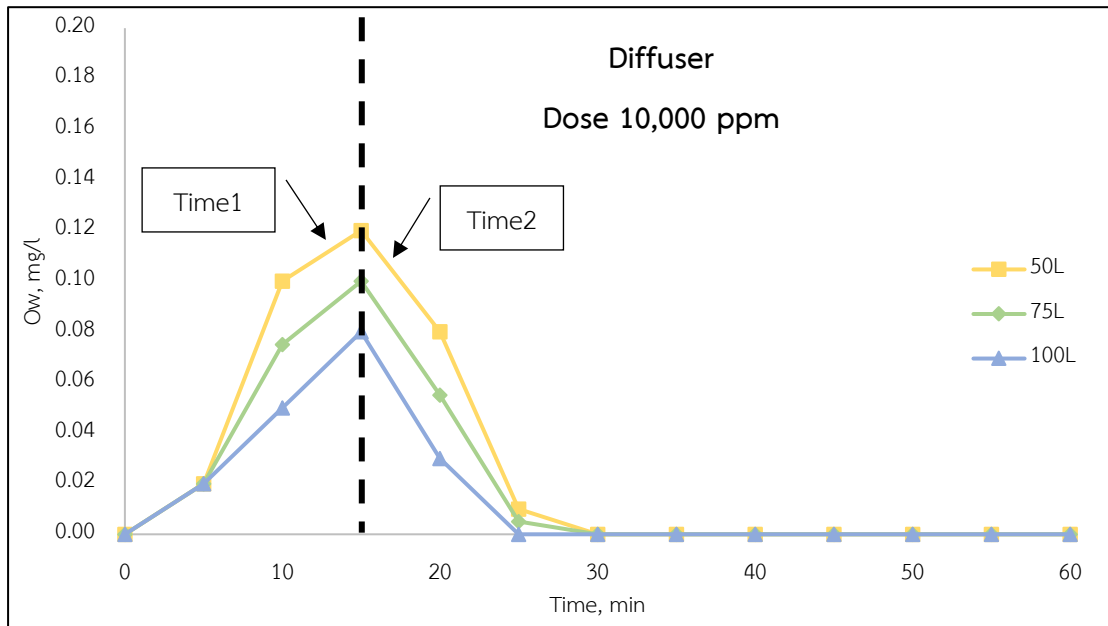
ผลการศึกษาและวิจารณ์

4.1 การศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของโอโซนละลายในน้ำ

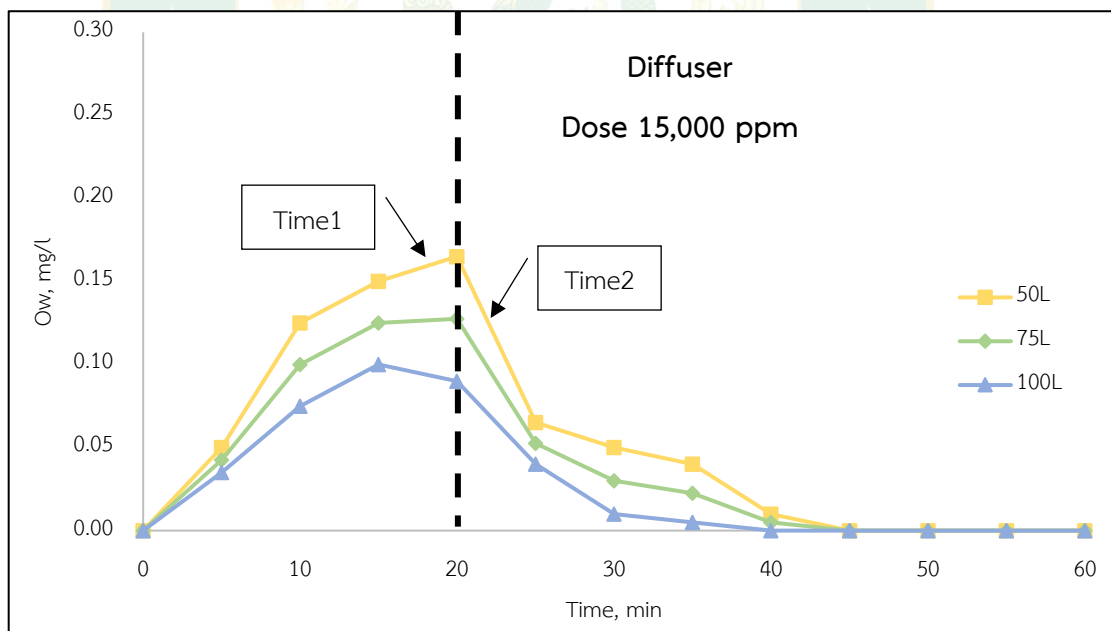
การศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของโอโซนละลายในน้ำ โดยศึกษาการสร้างน้ำโอโซน การสลายตัวของโอโซนในน้ำ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของโอโซนละลายในน้ำ ซึ่งใช้ระบบสร้างน้ำโอโซน 2 ระบบ คือ ระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์ โดยใช้ดีฟิวเซอร์ขนาด 4” มีเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน 0.2 μm . และใช้ปั๊มสำหรับอัดอากาศเพื่อสร้างแรงดัน 2.5 – 3.0 PSIG ในการอัดก๊าซโอโซนผ่านหัวดีฟิวเซอร์ และระบบหัวฉีดเวนจูรี โดยใช้เวนจูรีขนาด 1.5” และใช้ปั๊มน้ำขนาด 2 แรงม้า โดยใช้แรงดันใช้แตกต่างกัน (ΔP) 2.5 – 3.0 PSIG ผลการทดลองแสดงดังต่อไปนี้

1. การศึกษาการสร้างน้ำโอโซนโดยระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์ (Diffuser)

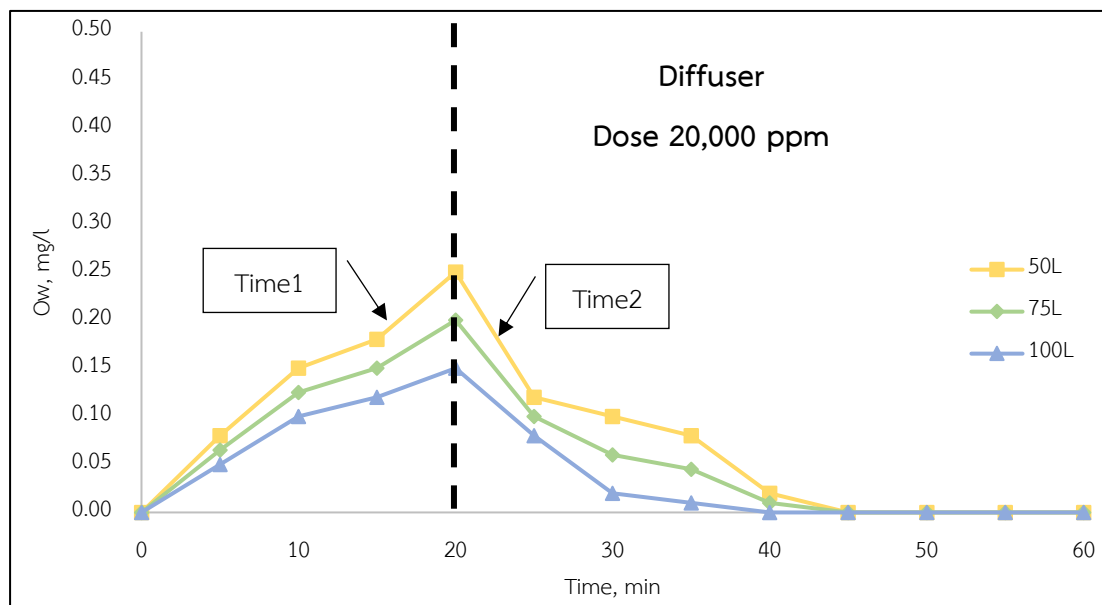
การศึกษาการสร้างน้ำโอโซนโดยระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์ ศึกษาการสร้างน้ำโอโซนโดยใช้หัวกระจายฟองดีฟิวเซอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 4 นิ้ว ระบบนี้จะดันก๊าซโอโซนจากเครื่องกำเนิดโอโซนผ่านดีฟิวเซอร์ลงสู่น้ำ ซึ่งขนาดฟองที่ได้จะขึ้นอยู่กับขนาดรูพรุนของดีฟิวเซอร์ที่ใช้ โดยในการสร้างน้ำโอโซนโดยระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์ โดยเริ่มจากการเติมน้ำถึงภาชนะปริมาตร 50 75 และ 100 L จากนั้นต่อหัวกระจายฟองดีฟิวเซอร์ ให้อยู่กึ่งกลางด้านล่างของภาชนะ จากนั้นสร้างความเข้มข้นของก๊าซโอโซน (Ozone concentration, Dose) 10,000 15,000 และ 20,000 ppm จากนั้นปล่อยก๊าซโอโซนแต่ละความเข้มข้นผ่านหัวกระจายฟองดีฟิวเซอร์ ซึ่งควบคุมอุณหภูมิในช่อง 27-30 °C ค่าความเป็นกรดต่างเริ่มต้นในช่วง 8-8.5 และทำการบันทึกข้อมูลทุก ๆ เวลา (Time) 5 นาที โดยข้อมูลที่ทำการบันทึก ได้แก่ ค่าความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำ (Ozonated water, O_w) เวลาที่ใช้ในการสร้างปฏิกิริยา (Reaction, Time1) เวลาที่สลายตัว (Decomposition, Time2) ดังแสดงในภาพที่ 11 12 และ 13



ภาพที่ 11 ความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำโดยระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์
ที่ก๊าซโอโซน Dose 10,000 ppm



ภาพที่ 12 ความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำที่โดยระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์
ที่ก๊าซโอโซน Dose 15,000 ppm



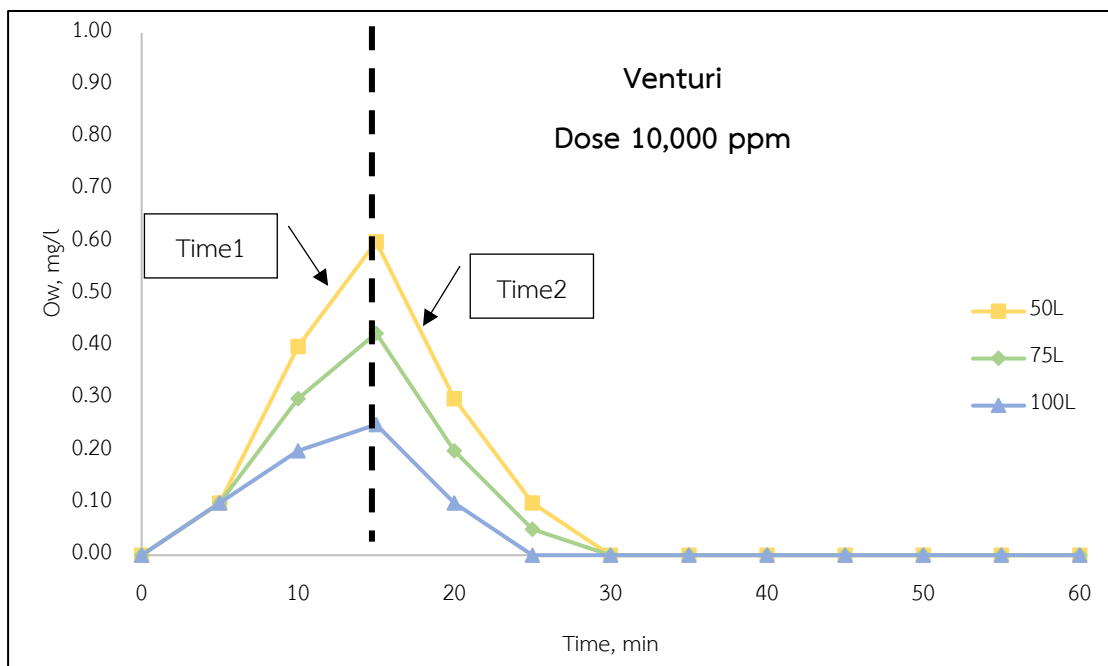
ภาพที่ 13 ความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำโดยระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์ ที่ก๊าซโอโซน Dose 20,000 ppm

จากภาพที่ 11, 12 และ 13 พบว่าการสร้างน้ำโอโซนโดยระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์สามารถสร้างน้ำโอโซนที่ก๊าซโอโซน Dose 10,000 ppm ปริมาตรน้ำ 50 L มีความเข้มข้นของโอโซนละลายในสูงที่สุด (Ow) คือ 0.12 mg/L เวลาที่ใช้ในการสร้างปฏิกิริยา (Reaction, Time1) 15 min เวลาที่สลายตัว (Decomposition, Time2) 15 min และที่ก๊าซโอโซน Dose 20,000 ppm ปริมาตรน้ำ 50 L มีความเข้มข้นของโอโซนละลายในสูงที่สุด (Ow) คือ 0.25 mg/L เวลาที่ใช้ในการสร้างปฏิกิริยา (Reaction, Time1) 15 min เวลาที่สลายตัว (Decomposition, Time2) 25 min ซึ่งจากการศึกษานี้จะได้ว่ายิ่งความเข้มข้นของก๊าซโอโซน (Dose) สูง และปริมาตรของน้ำที่ต่ำ ส่งผลให้ความเข้มข้นของน้ำโอโซนสูงขึ้น (Hadiyanto et al., 2019; Ohmi et al., 1992)

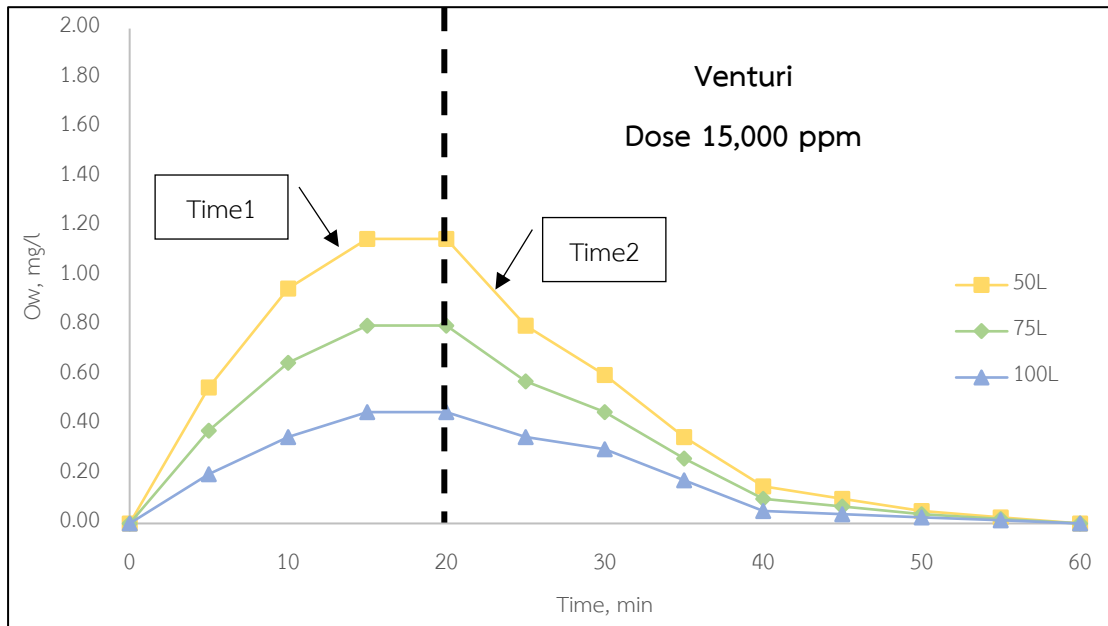
2. การศึกษาการสร้างน้ำโอโซนโดยระบบหัวฉีดเวนจูรี (Venturi)

การศึกษาการสร้างน้ำโอโซนโดยระบบหัวฉีดเวนจูรี ศึกษาการสร้างน้ำโอโซนโดยใช้หัวฉีดเวนจูรี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1.5 นิ้ว ระบบนี้จะใช้เวนจูรีเป็นตัวดูดก๊าซโอโซนละลายในน้ำ โดยอาศัยหลักการของการสร้างความดันแตกต่างเพื่อให้เกิดสุญญากาศ ทำให้สามารถดูดก๊าซโอโซนในปริมาณที่ต้องการได้ แต่ต้องขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านเวนจูรีและความดันที่แตกต่างกันที่เหมาะสมของเวนจูรีแต่ละขนาด โดยในการสร้างน้ำโอโซนโดยระบบหัวฉีดเวนจูรี โดยเริ่มจากการเติมน้ำถึงภาชนะปริมาตร 50, 75 และ 100 L จากนั้นต่อด้านดูดของเวนจูรีเข้ากับภาชนะที่ใช้สร้างโอโซน ความเข้มข้นต่างกัน และให้เวนจูรีอยู่กึ่งกลางด้านล่างของภาชนะ โดยสร้างก๊าซโอโซน Dose 10,000,

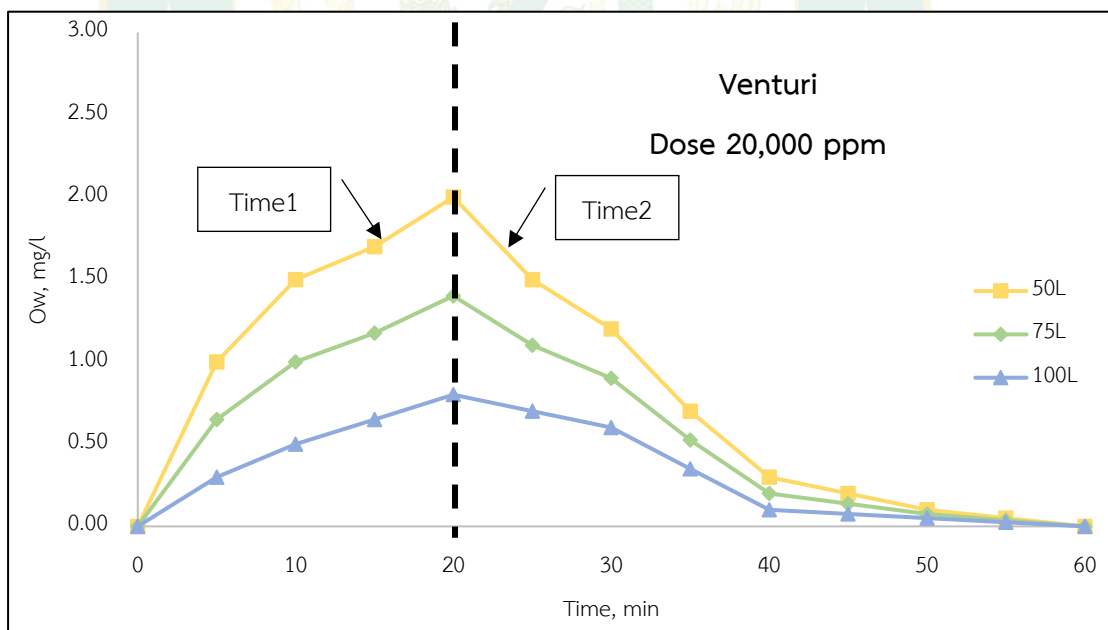
15,000 และ 20,000 ppm จากนั้นปล่อยก๊าซโอโซนแต่ละความเข้มข้นผ่านหัวฉีดเวนจูรี่ ซึ่งควบคุมอุณหภูมิน้ำในช่วง 27-30 °C ค่าความเป็นกรดต่างเริ่มต้นในช่วง 8-8.5 และทำการบันทึกข้อมูลทุก ๆ เวลา (Time) 5 นาที โดยข้อมูลที่ทำการบันทึก ได้แก่ค่าความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำ (Ozonated water, Ow) เวลาที่ใช้ในการสร้างปฏิกิริยา (Reaction, Time1) เวลาที่สลายตัว (Decomposition, Time2) ดังแสดงในภาพที่ 14 15 และ 16



ภาพที่ 14 ความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำโดยระบบหัวฉีดเวนจูรี่
ที่ก๊าซโอโซน Dose 10,000 ppm



ภาพที่ 15 ความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำโดยระบบหัวฉีดเวนจูรี
ที่ก๊าซโอโซน Dose 15,000 ppm



ภาพที่ 16 ความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำโดยระบบหัวฉีดเวนจูรี
ที่ก๊าซโอโซน Dose 20,000 ppm

จากภาพที่ 14, 15 และ 16 พบว่าการสร้างน้ำโอโซนโดยระบบหัวฉีดเวนจูรี สามารถสร้างน้ำโอโซนที่ก๊าซโอโซน Dose 10,000 ppm ปริมาณน้ำ 50 L มีความเข้มข้นของโอโซนละลายในสูงที่สุด

(Ow) คือ 0.60 mg/l เวลาที่ใช้ในการสร้างปฏิกิริยา (Reaction, Time1) 15 min เวลาที่สลายตัว (Decomposition, Time2) 15 min และที่ก๊าซโอโซน Dose 20,000 ppm ปริมาตรน้ำ 50 L มีความเข้มข้นของโอโซนละลายในสูงที่สุด (Ow) คือ 2.00 mg/l เวลาที่ใช้ในการสร้างปฏิกิริยา (Reaction, Time1) 20 min เวลาที่สลายตัว (Decomposition, Time2) 40 min ซึ่งจากการศึกษา นี้จะได้ว่ายิ่งความเข้มข้นของก๊าซโอโซน (Dose) สูง และปริมาตรของน้ำที่ต่ำ ส่งผลให้ความเข้มข้นของน้ำโอโซนสูงขึ้น (Hadiyanto et al., 2019; Ohmi et al., 1992)

3. การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของโอโซนละลายในน้ำ

การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของโอโซนละลายในน้ำ จากข้อมูลการศึกษาการสร้างน้ำโอโซนโดยระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์ และระบบหัวฉีดเวนจูร์ข้างต้นสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรของโอโซนละลายในน้ำ จากสมการที่ (3) ซึ่งผลการเปรียบเทียบของ ค่าความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำสูงสุดที่ (Ow) เวลาที่ใช้ในการสร้างปฏิกิริยา (Time1) เวลาที่สลายตัว (Time2) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรของโอโซนในน้ำ (k_{La1}) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรในการสลายตัวของโอโซนในน้ำ (k_{La2}) โดยตารางที่ 14 แสดงสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของระบบการกระจายฟองดีฟิวเซอร์

ตารางที่ 14 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของระบบการกระจายฟองดีฟิวเซอร์

Dose (ppm)	Volume (L)	Ow (mg/l)	Time1 (min)	Time2 (min)	k_{La1} (min ⁻¹)	k_{La2} (min ⁻¹)
10,000	50	0.12±0.02	15	15	0.098	0.196
	75	0.10±0.01	15	15	0.096	0.230
	100	0.08±0.01	15	10	0.087	0.249
15,000	50	0.15±0.01	20	25	0.111	0.134
	75	0.13±0.01	20	25	0.110	0.136
	100	0.10±0.01	15	20	0.110	0.190
20,000	50	0.25±0.01	15	25	0.139	0.108
	75	0.20±0.04	15	25	0.128	0.109
	100	0.15±0.01	15	20	0.124	0.125

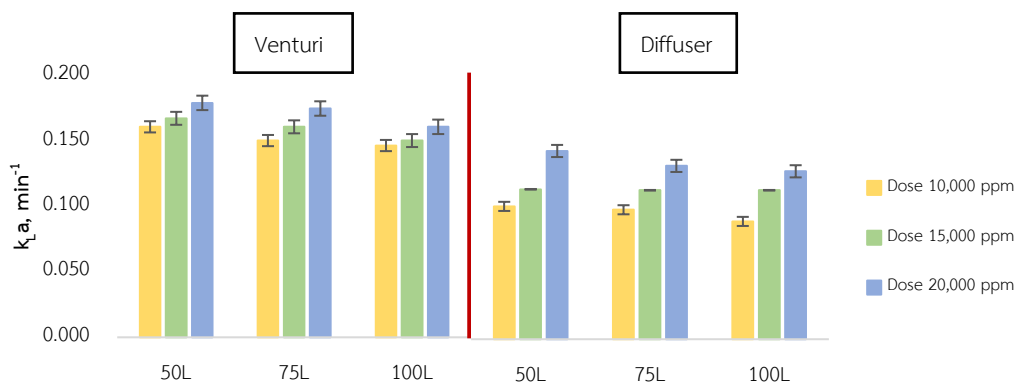
จากตารางที่ 14 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรในการสร้างน้ำโอโซนของระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์ที่ก๊าซโอโซน Dose 20,000 ppm มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรของโอโซนในน้ำ (k_{La1}) 0.139 min^{-1} ที่ปริมาตรน้ำ 50 L ซึ่งสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารในการสร้างน้ำโอโซนของระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์ที่ก๊าซโอโซน Dose 10,000 ppm ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรของโอโซนในน้ำ (k_{La1}) 0.098 min^{-1} ที่ปริมาตรน้ำ 50 L ซึ่งคิดเป็น 41.84% และมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรในการสลายตัวของโอโซนในน้ำ (k_{La2}) 0.196 min^{-1} ที่ก๊าซโอโซน Dose 10,000 ppm ซึ่งสูงกว่าที่ก๊าซโอโซน Dose 20,000 ppm มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรในการสลายตัวของโอโซนในน้ำ (k_{La2}) 0.108 min^{-1} ปริมาตรน้ำ 50 L เท่ากัน ซึ่งคิดเป็น 81.84% นอกจากนี้ที่ก๊าซโอโซน Dose 20,000 ppm ที่ปริมาตรน้ำ 50 L มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรของโอโซนในน้ำ (k_{La1}) มากกว่าที่ปริมาตรน้ำ 100 L คิดเป็น 12.10% โดยตารางที่ 15 แสดงสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของระบบหัวฉีดเวนจูรี

ตารางที่ 15 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของระบบการหัวฉีดเวนจูรี

Dose (ppm)	Volume (L)	Ow (mg/l)	Time1 (min)	Time2 (min)	k_{La1} (min^{-1})	k_{La2} (min^{-1})
10,000	50	0.60 ± 0.07	15	15	0.161	0.179
	75	0.40 ± 0.01	15	15	0.150	0.183
	100	0.20 ± 0.01	15	10	0.147	0.215
15,000	50	1.15 ± 0.06	15	20	0.167	0.104
	75	0.40 ± 0.02	15	20	0.161	0.106
	100	0.20 ± 0.01	15	15	0.150	0.109
20,000	50	2.00 ± 0.08	20	40	0.179	0.098
	75	1.40 ± 0.02	20	40	0.175	0.098
	100	0.80 ± 0.01	20	40	0.161	0.099

จากตารางที่ 15 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรในการสร้างน้ำไอโซนของระบบหัวฉีดเวนจูรีที่ก๊าซไอโซน Dose 20,000 ppm มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรของไอโซนในน้ำ (k_{La1}) 0.179 min^{-1} ที่ปริมาตรน้ำ 50 L ซึ่งสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารในการสร้างน้ำไอโซนของระบบหัวฉีดเวนจูรีที่ก๊าซไอโซน Dose 10,000 ppm มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรของไอโซนในน้ำ (k_{La1}) 0.161 min^{-1} ที่ปริมาตรน้ำ 50 L ซึ่งคิดเป็น 11.20% และมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรในการสลายตัวของไอโซนในน้ำ (k_{La2}) 0.179 min^{-1} ที่ก๊าซไอโซน Dose 10,000 ppm ซึ่งสูงกว่าที่ก๊าซไอโซน Dose 20,000 ppm มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรในการสลายตัวของไอโซนในน้ำ (k_{La2}) 0.098 min^{-1} ปริมาตรน้ำ 50 L เท่ากัน ซึ่งคิดเป็น 82.65% นอกจากนี้ที่ก๊าซไอโซน Dose 20,000 ppm ปริมาตรน้ำ 50 L มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรของไอโซนในน้ำ (k_{La1}) มากกว่าที่ปริมาตรน้ำ 100 L คิดเป็น 11.20%

จากตารางที่ 14, 15 พบว่าก๊าซไอโซน Dose (ppm) และปริมาตรน้ำ (L) ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรของไอโซนละลายในน้ำ (k_{La1}) เนื่องจากยิ่งปริมาตรน้ำที่น้อย และ Dose ของก๊าซไอโซนที่มาก ส่งผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของไอโซนละลายในน้ำมากขึ้น และยังส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรในการสลายตัวของไอโซนในน้ำ (k_{La2}) เนื่องจากยิ่งปริมาตรน้ำที่น้อย และ Dose ของก๊าซไอโซนที่มาก ส่งผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของไอโซนละลายในน้ำน้อยลง กล่าวคือการสลายตัวของไอโซนในน้ำช้าลงเมื่อเทียบกับปริมาตรน้ำที่มากขึ้นหรือ Dose ที่น้อยลง นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการสร้างน้ำไอโซนโดยระบบหัวฉีดเวนจูรี และระบบการกระจายฟองดีฟิวเซอร์ พบว่าระบบหัวฉีดเวนจูรีสามารถสร้างน้ำไอโซนที่มีความเข้มข้นสูงกว่าระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์ โดยที่ก๊าซไอโซน Dose 20,000 ppm ปริมาตรน้ำ 50 L สามารถสร้างน้ำไอโซนที่มีความเข้มข้นสูงที่สุด (Ow) 2.00 mg/L เวลาที่ใช้ในการสร้างปฏิกิริยา (Time1) 20 min เวลาที่สลายตัว (Time2) 40 min และค่า k_{La1} 0.179 min^{-1} ซึ่งมากกว่าระบบการกระจายฟองดีฟิวเซอร์ที่ก๊าซไอโซน Dose 20,000 ppm ปริมาตรน้ำ 50 L สามารถสร้างน้ำไอโซนที่มีความเข้มข้นสูงที่สุด (Ow) เพียง 0.25 ppm เวลาที่ใช้ในการสร้างปฏิกิริยา (Time1) 15 นาที เวลาที่สลายตัว (Time2) 25 นาที และค่า k_{La1} 0.139 min^{-1} นอกจากนี้ที่ก๊าซไอโซน Dose 20,000 ppm ปริมาตรน้ำ 50 L ระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์มีค่า k_{La2} 0.108 ซึ่งมากกว่าระบบหัวฉีดเวนจูรีที่มีค่าอยู่ที่ 0.098 กล่าวคือระบบหัวฉีดดีฟิวเซอร์ไอโซนละลายในน้ำสามารถสลายตัวได้รวดเร็วกว่าระบบหัวฉีดเวนจูรี



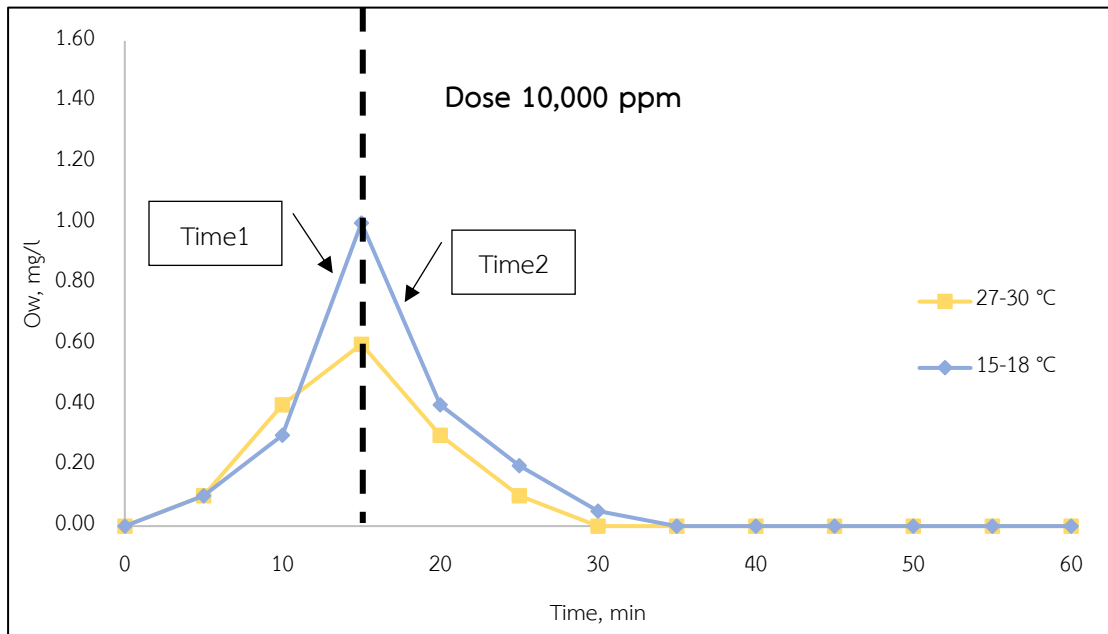
ภาพที่ 17 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของการสร้างน้ำไอโซน โดยระบบการกระจายฟองตีฟิวเซอร์และระบบหัวฉีดเวนจูรี่

จากข้อมูลดังตารางที่ 14 15 และภาพที่ 17 พบว่าระบบหัวฉีดเวนจูรี่สามารถสร้างน้ำไอโซนที่มีความเข้มข้นมากกว่าระบบการกระจายฟองด้วยตีฟิวเซอร์ 8 เท่า มีเวลาที่สลายตัวมากกว่า 1.6 เท่า และมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรที่ก๊าซไอโซน Dose และปริมาตรน้ำเท่ากันมากกว่าระบบการกระจายฟองด้วยตีฟิวเซอร์ 28.77%

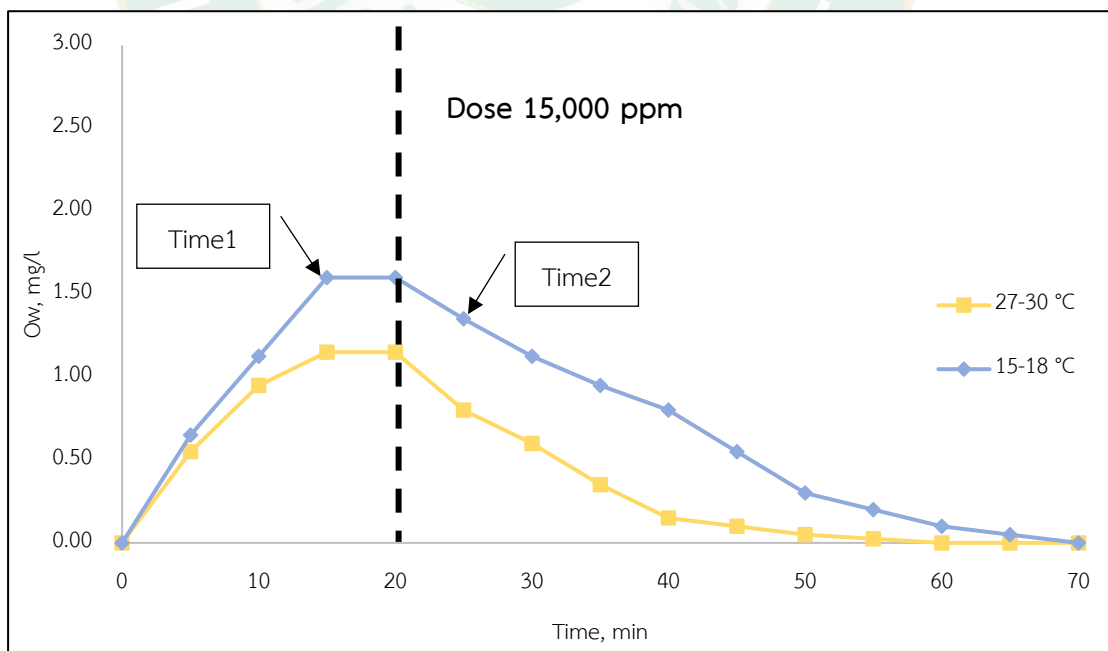
4. การศึกษาผลของอุณหภูมิน้ำต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของไอโซนในน้ำ

การศึกษาผลของอุณหภูมิน้ำต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของไอโซนละลายในน้ำ จากการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของไอโซนละลายในน้ำ โดยระบบการกระจายฟองด้วยตีฟิวเซอร์ และระบบหัวฉีดเวนจูรี่ จะได้ว่าระบบหัวฉีดเวนจูรี่สามารถสร้างน้ำไอโซนที่มีความเข้มข้นสูงกว่าระบบการกระจายฟองด้วยตีฟิวเซอร์ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรของไอโซนละลายในน้ำ (k_{La1}) สูงกว่า และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรในการสลายตัวของไอโซนในน้ำ (k_{La2}) ต่ำกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าที่ Dose ของก๊าซไอโซนที่สูง และปริมาตรน้ำที่ต่ำ จะส่งผลให้ความเข้มข้นของไอโซนละลายในน้ำสูง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรของไอโซนละลายในน้ำ (k_{La1}) สูง และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรในการสลายตัวของไอโซนในน้ำ (k_{La2}) ต่ำ จากข้อมูลนี้จึงได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิน้ำที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตร โดยจะเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตร ซึ่งใช้ระบบหัวฉีดเวนจูรี่ในการสร้างน้ำไอโซน ที่ปริมาตรน้ำ 50 L โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของก๊าซไอโซน (Dose) 3 ระดับคือ Dose 10,000 15,000 และ 20,000 ppm และเปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำ 2 ช่วงอุณหภูมิ คืออุณหภูมิน้ำปกติ (27-30 °C) และอุณหภูมิน้ำเย็น (15-18 °C) จากนั้นทำการบันทึกข้อมูล

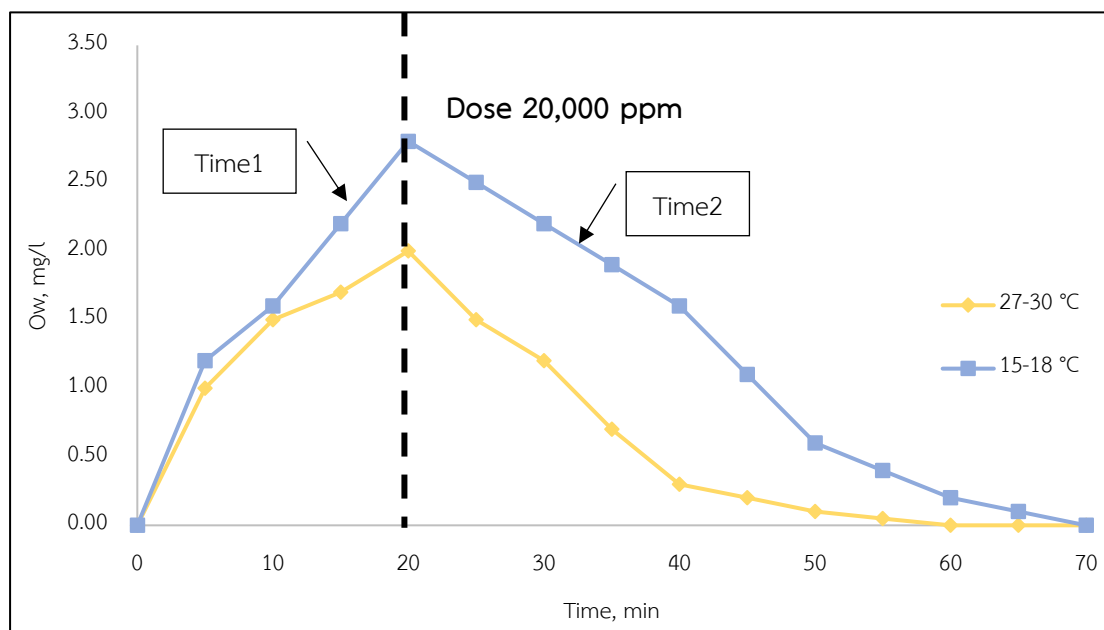
ทุก ๆ เวลา (Time) 5 นาที โดยข้อมูลที่ทำการบันทึก ได้แก่ค่าความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำ (Ozonated water, Ow) เวลาที่ใช้ในการสร้างปฏิกิริยา (Reaction, Time1) เวลาที่สลายตัว (Decomposition, Time2)ดังแสดงในภาพที่ 18, 19 และ 20



ภาพที่ 18 ความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำ ณ อุณหภูมิ 27-30 °C และ 15-18 °C ที่ก๊าซโอโซน Dose 10,000



ภาพที่ 19 ความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำ ณ อุณหภูมิ 27-30 °C และ 15-18 °C ที่ก๊าซโอโซน Dose 15,000 ppm



ภาพที่ 20 ความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำ ณ อุณหภูมิ 27-30 °C และ 15-18 °C ที่ก๊าซโอโซน Dose 20,000 ppm

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิ (Temperature, Temp.) ต่อความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำที่อุณหภูมิปกติ (27-30 °C) และอุณหภูมิน้ำเย็น (15-18 °C) ดังแสดงในภาพที่ 18, 19 และ 20 พบว่าที่อุณหภูมิน้ำปกติ ก๊าซโอโซน Dose 20,000 ppm สามารถสร้างน้ำโอโซนที่มีความเข้มข้นสูงสุด (Ow) 2.00 mg/l เวลาที่ใช้ในการสร้างปฏิกิริยา (Time1) 20 min เวลาที่สลายตัว (Time2) 40 min และอุณหภูมิน้ำเย็น ก๊าซโอโซน Dose 20,000 ppm สามารถสร้างน้ำโอโซนที่มีความเข้มข้นสูงสุด (Ow) 2.80 mg/l เวลาที่ใช้ในการสร้างปฏิกิริยา (Time1) 20 min เวลาที่สลายตัว (Time2) 50 min จะได้ว่าอุณหภูมิน้ำเย็นมีผลต่อความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำ โดยอุณหภูมิน้ำที่เย็นจะสามารถสร้างน้ำโอโซนที่มีความเข้มข้นสูงกว่าอุณหภูมิน้ำปกติ 40% และอุณหภูมิน้ำที่เย็นและความเข้มข้นของก๊าซโอโซน (Dose) ที่สูง โดยข้อมูลข้างต้นดังภาพที่กล่าวมาสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตร ได้ดังสมการที่ (3) แสดงดังตารางที่ 14

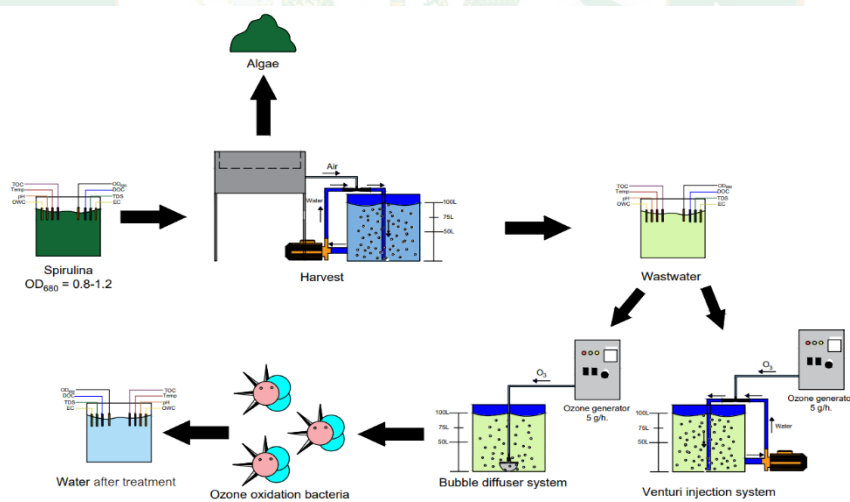
ตารางที่ 16 ผลของอุณหภูมิน้ำต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของโอโซนละลายในน้ำ

Dose (ppm)	Temp. (°C)	Ow (mg/l)	Time1 (min)	Time2 (min)	k_{a1} (min^{-1})	k_{a2} (min^{-1})
10,000	15-18 °C	1.00±0.09	15	20	0.193	0.148
	27-31 °C	0.60±0.07	15	15	0.161	0.179
15,000	15-18 °C	1.60±0.05	15	50	0.197	0.081
	27-31 °C	1.15±0.06	15	40	0.167	0.104
20,000	15-18 °C	2.80±0.02	20	50	0.198	0.073
	27-31 °C	2.00±0.08	20	40	0.179	0.098

จากตารางที่ 16 ซึ่งแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตร จากการศึกษผลของอุณหภูมิน้ำที่ต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของโอโซนละลายในน้ำ จะเห็นว่าการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของโอโซนละลายในน้ำที่อุณหภูมิปกติ (27-30 °C) และอุณหภูมิเย็น (15-18 °C) พบว่าที่น้ำอุณหภูมิต่ำสามารถสร้างน้ำโอโซนที่มีความเข้มข้นสูงกว่าน้ำอุณหภูมิปกติ และเวลาสลายตัวที่ยาวนานมากกว่าน้ำอุณหภูมิปกติ โดยที่ก๊าซโอโซน Dose 20,000 ppm สามารถสร้างน้ำโอโซนที่มีความเข้มข้นสูงที่สุด (Ow) 2.8 mg/l เวลาสลายตัว (Time2) 50 min และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรของโอโซนในน้ำ (k_{a1}) 0.198 min^{-1} ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรในการสลายตัวของโอโซนในน้ำ (k_{a2}) 0.073 min^{-1} สำหรับอุณหภูมิเย็น และอุณหภูมิปกติ สามารถสร้างน้ำโอโซนที่มีความเข้มข้นสูงที่สุด (Ow) 2.00 mg/l เวลาสลายตัว (Time2) 40 min และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรของโอโซนในน้ำ (k_{a1}) 0.179 min^{-1} ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรในการสลายตัวของโอโซนในน้ำ (k_{a2}) 0.098 min^{-1} ซึ่งจะได้ว่าที่อุณหภูมิเย็นมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรของโอโซนในน้ำ (k_{a1}) มากกว่าที่อุณหภูมิปกติ คิดเป็น 10.61% เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของโอโซนละลายในน้ำ (k_{a1}) เมื่ออุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณโอโซนละลายลดลงเนื่องจากโอโซนสลายตัวได้เร็วขึ้น (k_{a2} มีค่าสูงขึ้น) ความคงตัวของโอโซนรวมทั้งความเข้มข้นเริ่มต้นของโอโซน ขึ้นกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ หากต้องการน้ำโอโซนที่มีความเข้มข้นสูงมากขึ้นสามารถเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซโอโซน (Dose) ให้มากขึ้นหรือสามารถลดอุณหภูมิของน้ำให้ต่ำลงเพื่อเพิ่มความสามารถในการละลายน้ำของโอโซน (Bialoszewski et al., 2010; Galdeano et al., 2018)

4.2 การศึกษาการใช้โอโซนในการบำบัดน้ำหลังการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา

การศึกษาการใช้โอโซนในการบำบัดน้ำหลังการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา โดยการศึกษาได้ทำการบำบัดน้ำหลังการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาด้วยโอโซน ซึ่งน้ำหลังการเพาะเลี้ยงนี้ได้จากกระบวนการเก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูลินา ซึ่งปกติการเก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูลินาจะทำการกรองผ่านผ้าที่มีความละเอียด 20 μm . โดยเนื้อสาหร่ายจะอยู่ด้านบนผ้ากรอง และน้ำที่ผ่านการกรองจะลงสู่ถังพัก ซึ่งจากการศึกษาผลกระทบด้านความเข้มข้นของก๊าซโอโซน ปริมาณน้ำ และอุณหภูมิของน้ำที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของโอโซนละลายในน้ำ จึงได้มีแนวคิดในการประยุกต์ใช้ระบบการสร้างน้ำโอโซนโดยระบบหัวฉีดโอโซนเวนจูรี่ และระบบการกระจายฟองด้วยโอโซนดิฟฟิวเซอร์ เพื่อเปรียบเทียบกัน โดยจะใช้เครื่องกำเนิดโอโซนขนาด 5 g/hr. ปริมาณน้ำ 50 L และอุณหภูมิของน้ำเป็นอุณหภูมิปกติในช่วง 27-30 $^{\circ}\text{C}$ สำหรับการบำบัดน้ำทิ้งหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิตสาหร่ายสไปรูลินา โดยจะทำการตรวจสอบค่าอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (DOC) ในหน่วย mg/l และค่าสีปรากฏ (APW) ในหน่วย PCU รวมถึงจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาโดยเครื่องกำเนิดโอโซนขนาด 5 g/hr. ดังภาพที่ 21 ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงกระบวนการในการใช้โอโซนเพื่อกำจัดแบคทีเรีย รวมถึงสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำ



ภาพที่ 21 การใช้โอโซนในการบำบัดน้ำหลังการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา

1. การศึกษาการบำบัดน้ำหลังการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาโดยระบบการกระจายฟองด้วยดิฟฟิวเซอร์

การศึกษาการบำบัดน้ำหลังการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาโดยระบบการกระจายฟองด้วยโอโซนดิฟฟิวเซอร์ ซึ่งใช้น้ำหลังการเก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูลินา ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา

เมื่อที่ถึงรอบการเก็บเกี่ยว ($OD_{680} = 0.8-1.2$) จะทำการเก็บเกี่ยวโดยให้น้ำสาหร่ายกรองผ่านผ้ากรองขนาด $20 \mu m$. โดยเนื้อสาหร่ายจะอยู่ด้านบนผ้ากรองและน้ำสาหร่ายจะไหลผ่านผ้ากรองลงสู่ถังพัก จากนั้นนำน้ำหลังผ่านการกรองนี้ทำการตรวจวัดคุณภาพน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 17 จากนั้นทำการติดตั้งเครื่องกำเนิดโอโซนขนาด 5 g/hr . เข้ากับหัวกระจายฟองดีฟิวเซอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว และให้หัวกระจายฟองดีฟิวเซอร์อยู่กึ่งกลางด้านล่างของถังน้ำ จากนั้นทำการเปิดเครื่องกำเนิดโอโซนผ่านหัวกระจายฟองดีฟิวเซอร์ลงสู่น้ำ และตรวจวัดคุณภาพของน้ำหลังการบำบัดด้วยโอโซนทุก ๆ 30 นาที ดังแสดงในตารางที่ 17

ตารางที่ 17 คุณภาพน้ำหลังการบำบัดโดยระบบการกระจายฟองด้วยโอโซนดีฟิวเซอร์

Time (min)	pH	Temp. ($^{\circ}C$)	TOC (mg/l)	TDS (ppm)	DOC (mg/l)	EC ($\mu S/cm$)	APW (PCU)	OD680
0	11.20	27.30	64.40	3,168.00	56.40	4,950.00	584.00	0.293
30	11.30	27.20	51.20	3,008.00	48.00	4,700.00	448.00	0.271
60	10.40	27.00	49.60	2,656.00	44.80	4,150.00	368.00	0.263
90	10.37	27.20	44.80	2,080.00	41.60	3,250.00	358.00	0.253
120	10.06	27.30	43.20	1,760.00	40.00	2,750.00	344.00	0.236
150	10.03	27.20	43.20	1,616.00	35.20	2,525.00	304.00	0.228
180	10.00	27.30	40.00	1,440.00	33.60	2,250.00	280.00	0.221
210	9.96	27.40	40.00	1,354.00	33.60	2,115.63	272.00	0.217
240	9.53	27.40	40.00	1,312.00	33.60	2,050.00	256.00	0.220
270	9.48	27.40	39.20	1,336.00	32.80	2,087.50	252.00	0.218
300	9.43	27.40	38.40	1,360.00	32.00	2,125.00	248.00	0.215
330	9.35	27.45	37.60	1,344.00	31.20	2,100.00	240.00	0.211
360	9.27	27.50	36.80	1,328.00	30.40	2,075.00	232.00	0.206
390	9.29	27.55	36.00	1,304.00	29.60	2,037.50	216.00	0.201
420	9.30	27.60	35.20	1,280.00	28.80	2,000.00	200.00	0.195
450	9.28	28.25	34.40	1,224.00	28.00	1,912.50	196.00	0.191
480	9.26	28.90	33.60	1,168.00	27.20	1,825.00	192.00	0.186

จากการศึกษานี้ได้ทำการตรวจวัดคุณภาพน้ำก่อนและหลังการบำบัด ซึ่งตัวแปรที่ตรวจวัด ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ น้ำ อินทรีย์คาร์บอนรวม (TOC) ค่าของแข็งละลายน้ำ (TDS) ค่าอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (DOC) ค่าการนำไฟฟ้า (EC) และค่าความหนาแน่นเซลล์สำหรับ (OD₆₈₀) จากตัวแปรที่ทำการตรวจสอบคุณภาพน้ำทั้งหมดได้กำหนดตัวแปรที่มีความสำคัญเพื่อบ่งบอกถึงความสามารถของโอโซนที่สามารถบำบัดน้ำ โดยเลือกค่าอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (DOC) เนื่องจากปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนในน้ำในการเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาส่วนใหญ่มีที่มาเริ่มต้นจากอาหารสำหรับเพาะเลี้ยงสาหร่าย ส่งผลให้ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาสะสมมากขึ้นเรื่อย ๆ จากอาหารตกค้างที่สาหร่ายดูดซับไม่หมดและของเสียจากการเพาะเลี้ยง (Perkowsk et al., 1995; Ohmi et al., 1992) จากตารางที่ 15 พบว่าระบบการบำบัดน้ำโดยระบบการกระจายฟองโอโซนด้วยดีฟิวเซอร์ สามารถบำบัดน้ำให้มีค่าอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (DOC) ลดลง จาก 56.40 mg/l เหลือ 27.20 mg/l ในเวลา 8 ชั่วโมง ซึ่งการบ่งบอกถึงคุณภาพน้ำหลังการบำบัดจะใช้ของการลดอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำจะใช้ %DOC Removal หรือ เปอร์เซ็นต์การลดลงของอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ เพื่อบ่งบอกถึงความสามารถของระบบการกระจายฟองด้วยโอโซนดีฟิวเซอร์ในการบำบัดน้ำหลังการเก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูลินา โดยสามารถหาค่า %DOC Removal ได้ดังสมการที่ (12) โดยจะได้ว่าระบบบำบัดน้ำโดยระบบการกระจายฟองโอโซนด้วยดีฟิวเซอร์มีค่า %DOC Removal 51.77%

2. การศึกษาการบำบัดน้ำหลังการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาโดยระบบหัวฉีดเวนจูรี

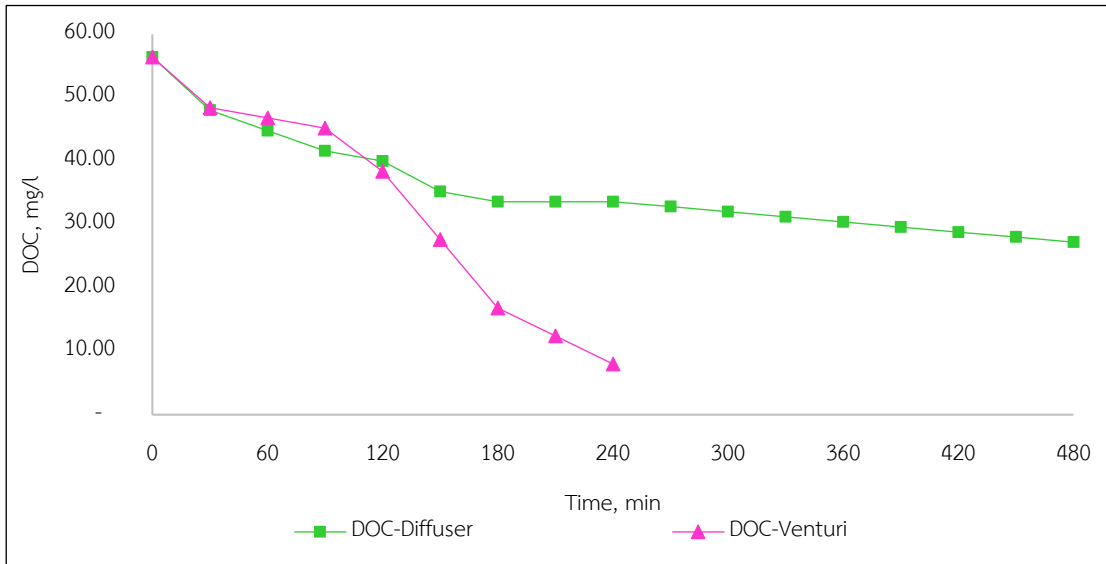
การศึกษาระบบบำบัดน้ำหลังการเก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูลินาโดยระบบหัวฉีดโอโซนเวนจูรี ซึ่งใช้น้ำหลังการเก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูลินา ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาเมื่อที่ถึงรอบการเก็บเกี่ยว (OD₆₈₀ = 0.8-1.2) จะทำการเก็บเกี่ยวโดยให้น้ำสาหร่ายกรองผ่านผ้ากรองขนาด 20 µm. โดยเนื้อสาหร่ายจะอยู่ด้านบนผ้ากรองและน้ำสาหร่ายจะไหลผ่านผ้ากรองลงสู่ถังพัก จากนั้นนำน้ำหลังผ่านการกรองนี้ทำการตรวจวัดคุณภาพน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 18 จากนั้นทำการติดตั้งเครื่องกำเนิดโอโซนขนาด 5 g/hr. เข้ากับด้านดูดของหัวฉีดเวนจูรี ซึ่งใช้หัวฉีดเวนจูรีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 นิ้ว ป้อนน้ำขนาด 2 HP จากนั้นให้หัวฉีดเวนจูรีอยู่กึ่งกลางด้านล่างของถังน้ำ จากนั้นทำการเปิดปั๊มน้ำเพื่อสร้างแรงดันในเส้นท่อเวนจูรี เพื่อดูดโอโซนจากเครื่องกำเนิดโอโซน และตรวจวัดคุณภาพของน้ำหลังผ่านการบำบัดด้วยโอโซนทุก ๆ 30 นาที ซึ่งตัวแปรที่ตรวจวัดได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ น้ำ อินทรีย์คาร์บอนรวม (TOC) ค่าของแข็งละลายน้ำ (TDS) ค่าอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (DOC) ค่าการนำไฟฟ้า (EC) และค่าความหนาแน่นเซลล์สำหรับ (OD₆₈₀) ดังแสดงในตารางที่ 18

ตารางที่ 18 คุณภาพน้ำหลังการบำบัดโดยระบบหัวฉีดโอโซนเวนจูรี

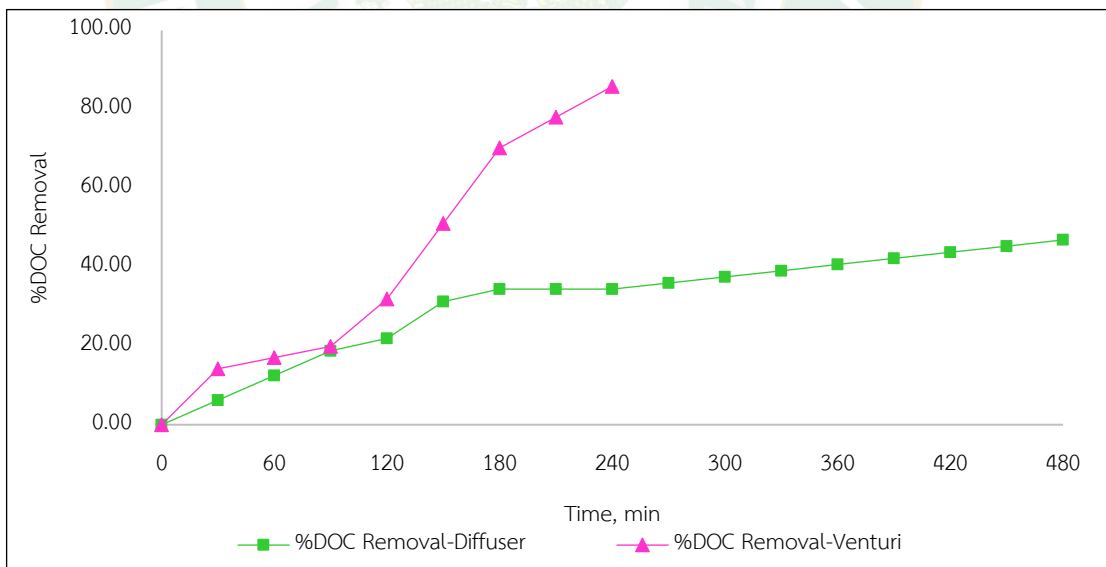
Time (min)	pH	T _{Water} (°C)	TOC (mg/l)	TDS (ppm)	DOC (mg/l)	EC (µS/cm)	APW (PCU)	OD680
0	11.20	28.60	64.40	3,128.00	56.40	4,887.50	584.00	0.238
30	10.37	30.60	61.20	2,744.00	48.40	4,287.50	428.00	0.235
60	9.77	32.60	59.60	2,664.00	46.80	4,162.50	362.00	0.233
90	9.73	34.30	58.00	2,648.00	45.20	4,137.50	224.00	0.206
120	9.70	35.80	45.60	1,600.00	38.40	2,500.00	203.00	0.132
150	9.40	36.80	45.20	1,540.00	27.60	2,406.25	196.00	0.125
180	9.10	37.80	44.80	1,480.00	16.80	2,312.50	189.00	0.118
210	8.98	38.95	32.40	1,313.00	12.40	2,051.56	184.00	0.112
240	8.85	40.10	20.00	1,146.00	8.00	1,790.63	179.00	0.106

จากตัวแปรที่ทำการตรวจสอบคุณภาพน้ำทั้งหมดได้กำหนดตัวแปรที่มีความสำคัญเพื่อบ่งบอกถึงความสามารถของโอโซนที่สามารถบำบัดน้ำ โดยเลือกค่าอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (DOC) ตารางที่ 18 พบว่าระบบการบำบัดน้ำทิ้งหลังการเก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูลินา โดยระบบหัวฉีดโอโซนเวนจูรี สามารถบำบัดน้ำให้มีค่าอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (DOC) ลดลง จาก 56.4 mg/l เหลือ 8.00 mg/l ในเวลา 4 ชั่วโมง โดยจะได้ว่าระบบบำบัดน้ำโดยระบบการหัวฉีดเวนจูรีมีค่า %DOC Removal 85.82% ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบการบำบัดน้ำทิ้งหลังการเก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูลินา โดยระบบการกระจายฟองด้วยโอโซนตีฟิวเซอร์ พบว่าระบบหัวฉีดโอโซนเวนจูรีสามารถบำบัดน้ำทิ้งหลังการเก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูลินาได้ดีกว่าระบบการกระจายฟองด้วยโอโซนตีฟิวเซอร์ ดังแสดงในภาพที่ 22 และ 23 ซึ่งภาพที่ 22 อธิบายถึงการลดลงของ DOC ของระบบการกระจายฟองด้วยโอโซนตีฟิวเซอร์ เทียบกับระบบหัวฉีดโอโซนเวนจูรี ซึ่งระบบหัวฉีดโอโซนเวนจูรีสามารถลด DOC ได้มากกว่าถึง 3.4 เท่าในเวลาที่สั้นกว่าครึ่งหนึ่งของระบบการกระจายฟองด้วยโอโซนตีฟิวเซอร์ และภาพที่ 23 แสดง %DOC Removal ของระบบการกระจายฟองด้วยโอโซนตีฟิวเซอร์ เทียบกับระบบหัวฉีดโอโซนเวนจูรี นอกจากนี้ภาพที่ 24 แสดงค่าสีปรากฏที่ลดลงจากการบำบัดน้ำทิ้งหลังการเก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูลินา โดยพบว่าระบบหัวฉีดโอโซนเวนจูรีสามารถขจัดสีปรากฏ (APW) จาก 584 PCU เหลือ 179 PCU คิดเป็น 69.35% ในเวลา 4 ชั่วโมง ในขณะที่ระบบการกระจายฟองด้วยโอโซนตีฟิวเซอร์สามารถขจัดสีปรากฏจาก 584 PCU เหลือ 192 PCU คิดเป็น 67.12% ในเวลา 8 ชั่วโมง จากข้อมูลข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าระบบหัวฉีดโอโซนเวนจูรีสามารถบำบัดน้ำทิ้งหลังการเก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูลินาได้ดีกว่า

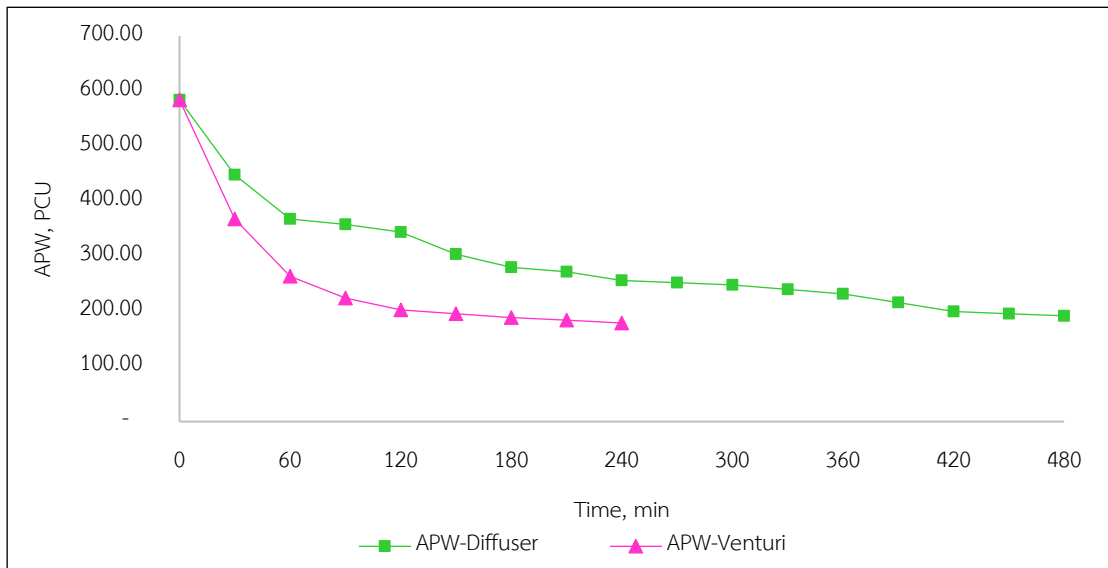
ระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์ โดยใช้เวลาในการบำบัดสั้นกว่า แต่ % DOC Removal มากกว่าถึง 1.8 เท่า และยังขจัด APW ได้ถึง 69.35% ในเวลาที่น้อยกว่า (Dodd et al., 2006)



ภาพที่ 22 อินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำที่ลดลงของระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์ เทียบกับระบบหัวฉีดเวนจูรี

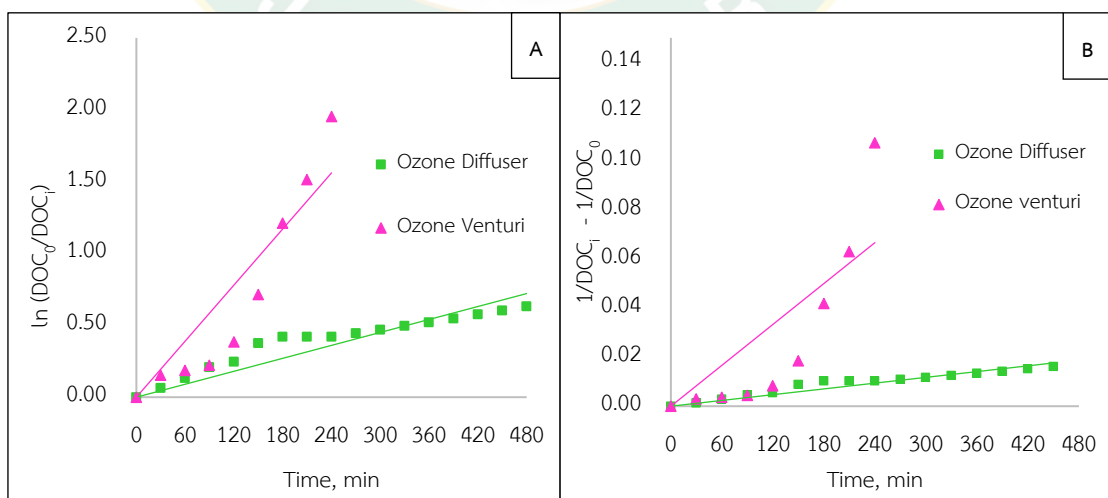


ภาพที่ 23 %DOC Removal ของระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์เทียบกับระบบหัวฉีดเวนจูรี



ภาพที่ 24 สีปรากฏของน้ำจากการบำบัดโดยระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์
เทียบกับระบบหัวฉีดเวนจูรี

จากการลดลงของ DOC จากการบำบัดน้ำทิ้งหลังการเก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูลินาด้วยระบบหัวฉีดโอโซนเวนจูรีและระบบการกระจายฟองด้วยโอโซนดีฟิวเซอร์ จะสามารถหาอัตราจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งและอันดับสอง ได้ดังภาพที่ 25 โดยจะเห็นว่าน้ำทิ้งหลังการเก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูลินาที่บำบัดด้วยระบบหัวฉีดโอโซนเวนจูรี มีค่าจลนพลศาสตร์ (k) สูงกว่าการบำบัดด้วยระบบการกระจายฟองด้วยโอโซนดีฟิวเซอร์ เมื่อเปรียบเทียบกับจลนพลศาสตร์ในอันดับเดียวกัน (Hadiyanto et al., 2019)



ภาพที่ 25 ผลของ (A) จลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง (B) จลนพลศาสตร์อันดับสอง

ตารางที่ 19 แสดงค่าจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง ของการขจัด DOC เมื่อใช้การบำบัดด้วยระบบ หัวฉีดโอโซนเวนจูรีและระบบหัวดีฟิวเซอร์ คือ 6.5×10^{-3} และ $1.5 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ ตามลำดับ เมื่อใช้ จลนพลศาสตร์อันดับสอง จะได้ 3.0×10^{-4} และ $4.0 \times 10^{-5} \text{ L/g-min}$ ตามลำดับ โดยค่า k ที่สูงหมายถึง การขจัด DOC ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นระบบหัวฉีดโอโซนเวนจูรี จึงสามารถขจัด DOC ได้ดีกว่า ระบบหัวดีฟิวเซอร์

ตารางที่ 19 อัตราจลนพลศาสตร์ของการลด DOC ตามจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งและอันดับสอง

Treatment	First-order kinetics		Second-order kinetics	
	R ²	k (min ⁻¹)	R ²	k (L/g-min)
Ozone Diffuser	0.8423	1.5×10^{-3}	0.9169	4.0×10^{-5}
Ozone Venturi	0.8508	6.5×10^{-3}	0.6718	3.0×10^{-4}

นอกจากนี้ในการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโอโซนและการลดลงของค่าอินทรีย์ คาร์บอนละลายน้ำนั้นสามารถใช้สมการจลนพลศาสตร์เพื่อทำนายค่าได้ โดยสามารถตัดสินใจเลือกได้ จากค่าสัมประสิทธิ์ของความเชื่อมั่น (R²) ดังแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งระบบหัวฉีดโอโซนเวนจูรี สามารถ ใช้สมการจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งทำนายได้ดีกว่า โดยมีค่า R² เท่ากับ 0.8508 ซึ่งสอดคล้องกับ งานวิจัยที่ผ่านมา ส่วนระบบหัวดีฟิวเซอร์ สามารถใช้สมการจลนพลศาสตร์อันดับสองทำนายได้ ดีกว่า โดยมีค่า R² เท่ากับ 0.9169

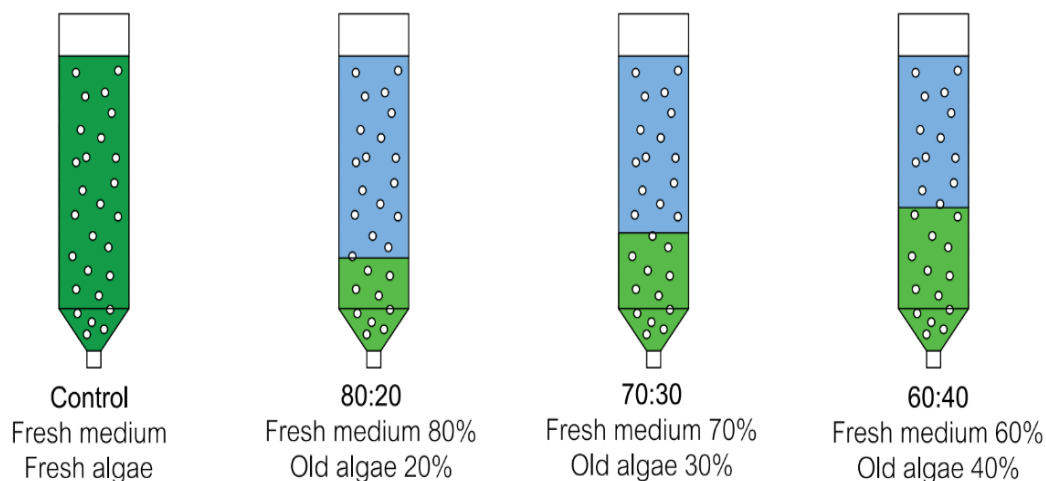
4.3 การศึกษาการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาโดยใช้น้ำหลังผ่านการบำบัดด้วยโอโซน

การศึกษาการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาโดยใช้น้ำทิ้งหลังผ่านการบำบัดด้วยโอโซน ปัจจุบัน อุตสาหกรรมเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินามีการใช้น้ำในการเพาะเลี้ยงในปริมาณมาก ซึ่งเมื่อถึงรอบ การเก็บเกี่ยวจะมีการกรองเนื้อสาหร่ายสไปรูลินาเพื่อนำไปแปรรูป และเมื่อทำการเก็บเกี่ยวสาหร่าย สไปรูลินาแล้วจะเกิดน้ำทิ้งหลังการเก็บเกี่ยวซึ่งเป็นของเสียในกระบวนการ และในบางครั้งมีการนำ น้ำทิ้งหลังการเก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูลินานี้ไปใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายโดยการเติมสารอาหารลงไป (ระพีพรรณ ฉลาดธัญญกิจ, 2549) แต่สามารถใช้ได้เพียง 2-3 รอบการเลี้ยง จึงมีแนวคิดในการใช้น้ำ หลังผ่านการบำบัดด้วยโอโซนในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาซ้ำ เพื่อลดต้นทุนการใช้น้ำ และลด ของเสียที่อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

1. การศึกษาอัตราส่วนของน้ำใหม่สารอาหารใหม่ต่อหัวเชื้อสาหร่ายเก่าที่เหมาะสม

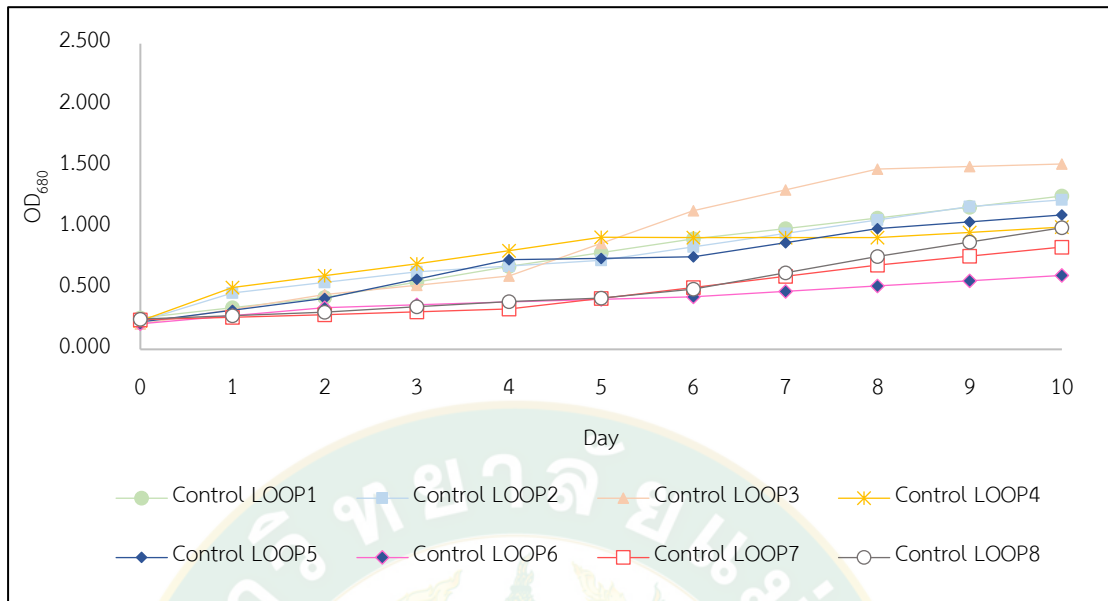
การศึกษาอัตราส่วนของสารอาหารใหม่ต่อหัวเชื้อเก่าที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา ดังแสดงในภาพที่ 26

ไปรูลินา ดังแสดงในภาพที่ 26

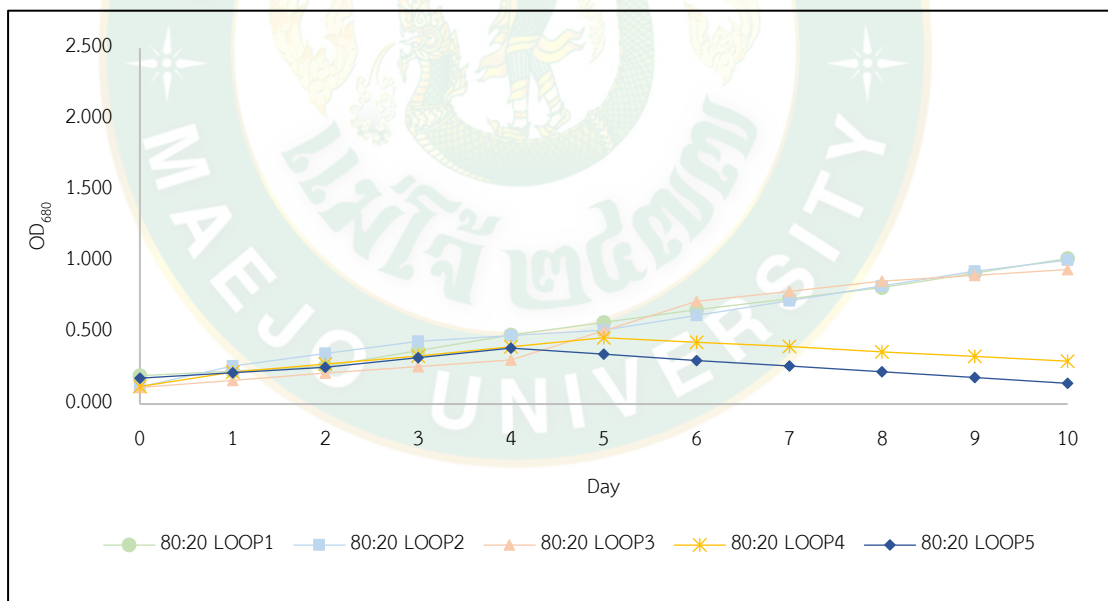


ภาพที่ 26 อัตราส่วนของน้ำใหม่สารอาหารใหม่ต่อหัวเชื้อสาหร่ายเก่า

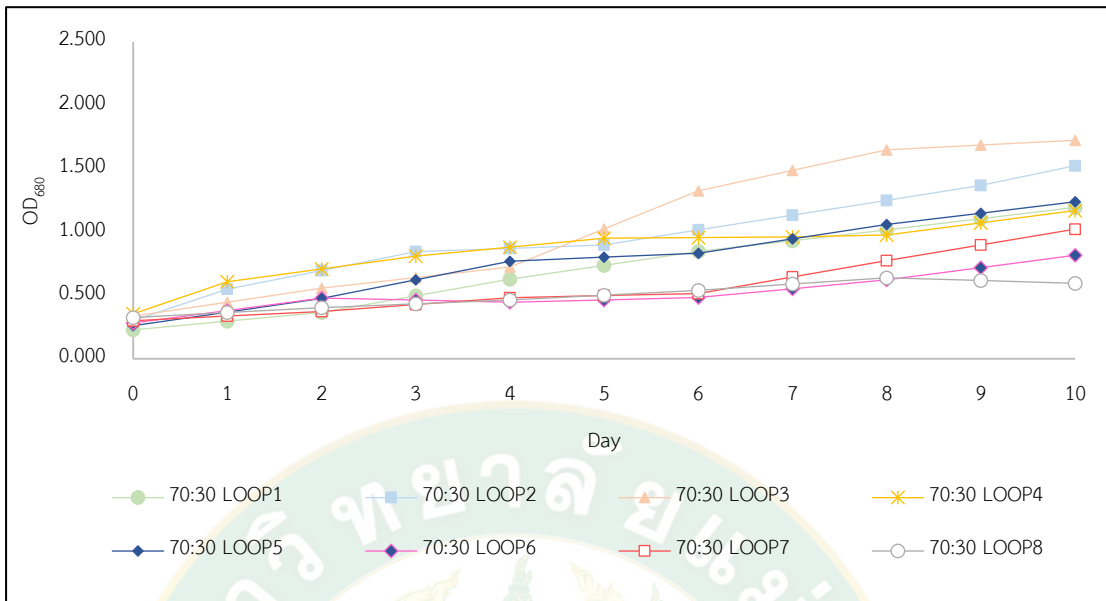
โดยการศึกษาอัตราส่วนของน้ำใหม่สารอาหารใหม่ต่อหัวเชื้อสาหร่ายเก่า จะทำการเพาะเลี้ยงในขวดขนาด 1 L บัวยสูตร Zarrouk's Medium หัวเชื้อสาหร่ายเริ่มต้นที่ความหนาแน่นเซลล์ (Optical density : OD_{680}) 0.2-0.3 โดยจะศึกษาการใช้น้ำใหม่สารอาหารใหม่ร่วมกับหัวเชื้อสาหร่ายใหม่ (Control) น้ำใหม่สารอาหารใหม่ 80% ร่วมกับหัวเชื้อสาหร่ายเก่า 20% (80:20) น้ำใหม่สารอาหารใหม่ 70% ร่วมกับน้ำหัวเชื้อสาหร่ายเก่า 30% (70:30) และน้ำใหม่สารอาหารใหม่ 60% ร่วมกับหัวเชื้อสาหร่ายเก่า 40% (60:40) โดยทุกการทดลองจะทดลองในสภาพแวดล้อมเดียวกันพร้อมกันทั้งหมด



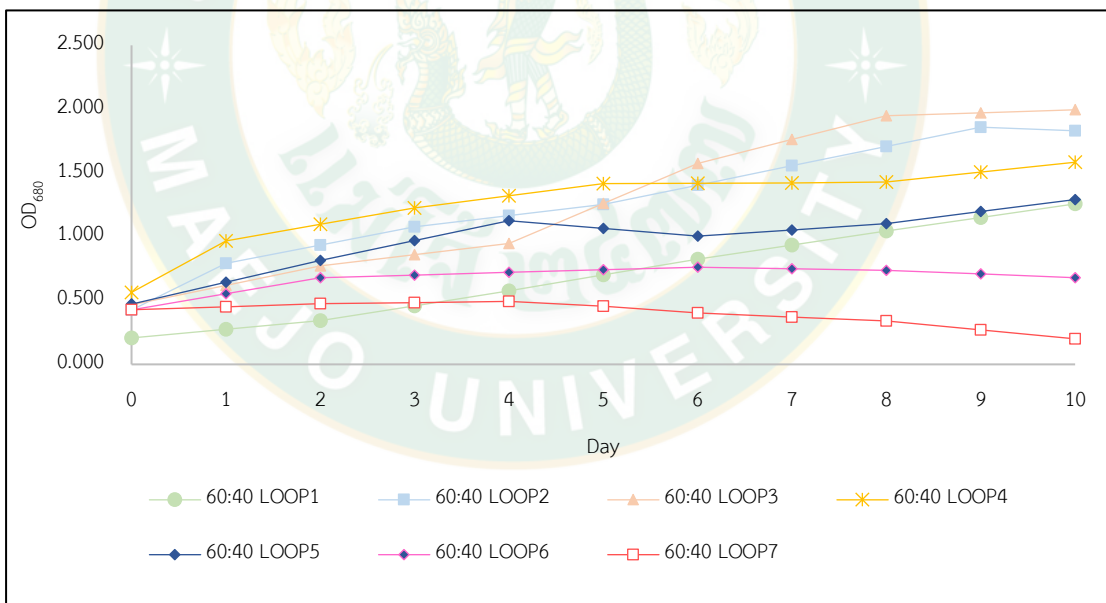
ภาพที่ 27 การเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลินาโดยใช้น้ำใหม่สารอาหารใหม่ ร่วมกับหัวเชื้อสาหร่ายใหม่ (Control)



ภาพที่ 28 การเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลินาโดยใช้น้ำใหม่สารอาหารใหม่ 80% ร่วมกับหัวเชื้อสาหร่ายเก่า 20% (80:20)



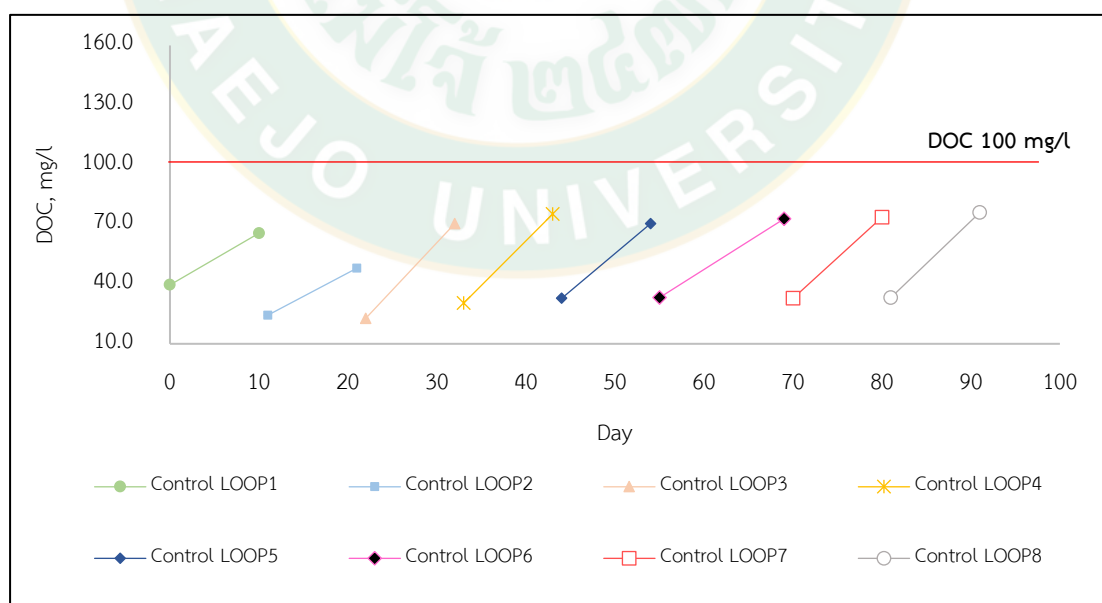
ภาพที่ 29 การเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลินาโดยใช้น้ำใหม่สารอาหารใหม่ 70% ร่วมกับหัวเชื้อสาหร่ายเก่า 30% (70:30)



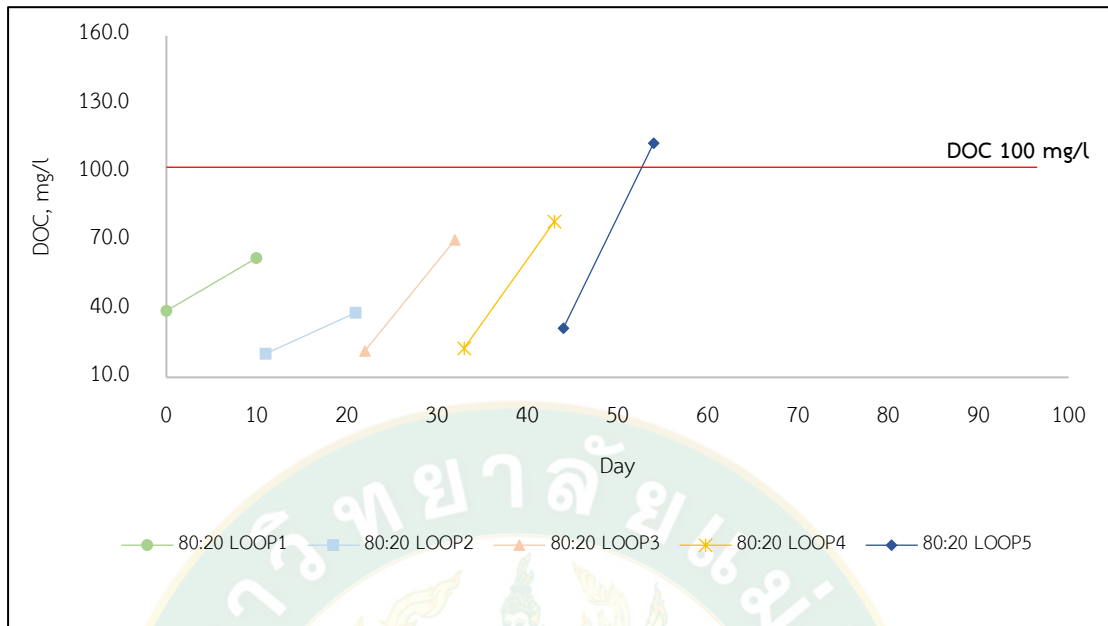
ภาพที่ 30 การเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลินาโดยใช้น้ำใหม่สารอาหารใหม่ 60% ร่วมกับหัวเชื้อสาหร่ายเก่า 40% (60:40)

จากการศึกษาอัตราส่วนของน้ำใหม่สารอาหารใหม่ต่อหัวเชื้อสาหร่ายเก่าที่เหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา พบว่า Control สาหร่ายสไปรูลินาสามารถเพาะเลี้ยงได้ต่อเนื่องมากกว่า 8 รอบการเลี้ยง เนื่องจากการใช้น้ำที่ใหม่สารอาหารใหม่ร่วมกับการเติมหัวเชื้อสาหร่ายที่

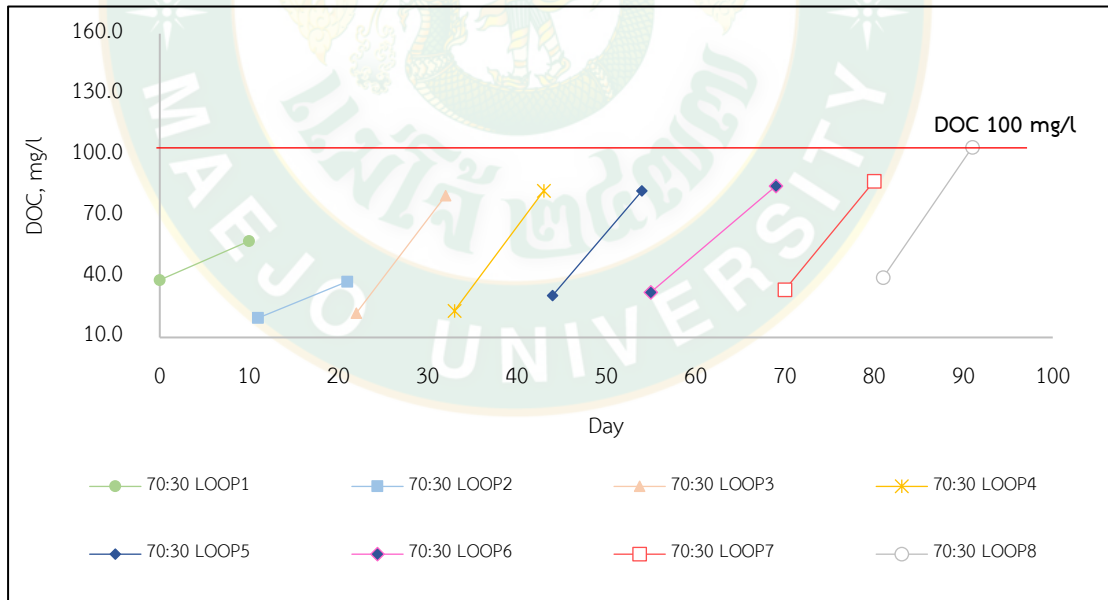
ใหม่และสะอาดตลอด ทำให้ความสกปรกระหว่างเพาะเลี้ยงมีน้อย จึงไม่ส่งผลต่อการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา ดังภาพที่ 27 ภาพที่ 28 แสดงอัตราส่วน 80:20 เริ่มมีการเจริญเติบโตที่ลดลงใน LOOP4 และสามารถเลี้ยงได้มากที่สุดเพียง 5 LOOP เนื่องจากอัตราส่วน 80:20 นั้นมีน้ำใหม่และสารอาหารใหม่ที่มากใกล้เคียงกับ Control แต่มีหัวเชื้อสาหร่ายเริ่มต้นที่น้อยทำให้ไม่สามารถเลี้ยงให้มีการเจริญเติบโตไม่ได้ดี และหัวเชื้อสาหร่ายที่น้อยซึ่งเป็นหัวเชื้อสาหร่ายเก่าทำให้เกิดความสกปรกสะสมร่วมกับการการเจริญเติบโตที่น้อยจึงไม่สามารถเจริญเติบโตได้ดีเท่าที่ควร ภาพที่ 29 แสดงอัตราส่วน 70:30 ซึ่งสามารถเลี้ยงได้ใกล้เคียงกับ Control แต่ใน LOOP8 นั้นเริ่มมีการเจริญเติบโตที่ลดลง และอัตราส่วน 60:40 สามารถเจริญเติบโตได้ดีจนถึง LOOP6 และเลี้ยงต่อได้มากที่สุดถึง LOOP7 เนื่องจากการเติมน้ำใหม่และสารอาหารใหม่ที่น้อย นอกจากนี้ยังมีปริมาณของหัวเชื้อสาหร่ายเก่าที่มากถึง 40% ทำให้เกิดความสกปรกและมีการเจริญเติบโตที่ต่ำ ดังภาพที่ 30 จากข้อมูลการเจริญเติบโตสาหร่ายสไปรูลินาข้างต้น จึงได้ทำการทดสอบคุณภาพน้ำที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายในแต่ละรอบ เนื่องจากการใช้หัวเชื้อสาหร่ายเก่าในการเพาะเลี้ยง ซึ่งอาจมีอินทรีย์คาร์บอนเจือปนและเกิดความสกปรกในการเพาะเลี้ยง โดยเลือกตัวแปรที่สนใจในการตรวจสอบคุณภาพน้ำ คือ อินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (DOC) ซึ่งจากปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนในน้ำภายในการเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาส่วนใหญ่มีที่มาจากอาหารสำหรับเพาะเลี้ยงสาหร่าย ส่งผลให้ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนสะสมมากขึ้นเรื่อย ๆ จากอาหารตกค้างและของเสียจากการเพาะเลี้ยง



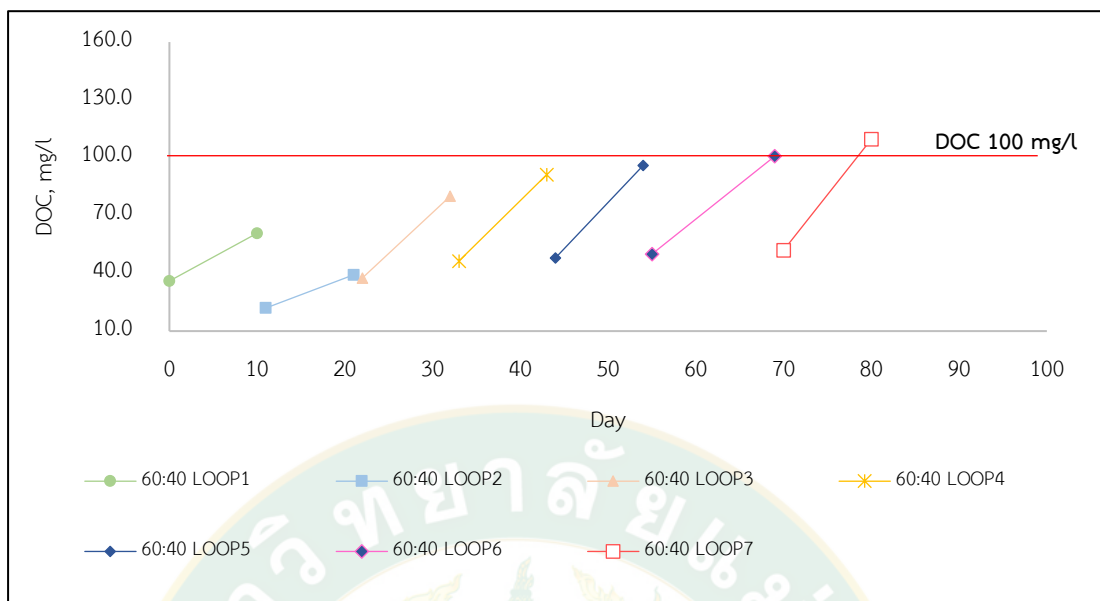
ภาพที่ 31 การเพิ่มขึ้นของอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำโดยใช้น้ำใหม่สารอาหารใหม่ร่วมกับหัวเชื้อสาหร่ายใหม่ (Control)



ภาพที่ 32 การเพิ่มขึ้นของอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำโดยใช้น้ำใหม่สารอาหารใหม่ 80% ร่วมกับหัวเชื้อสาหร่ายเก่า 20% (80:20)



ภาพที่ 33 การเพิ่มขึ้นของอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำโดยใช้น้ำใหม่สารอาหารใหม่ 70% ร่วมกับหัวเชื้อสาหร่ายเก่า 30% (70:30)



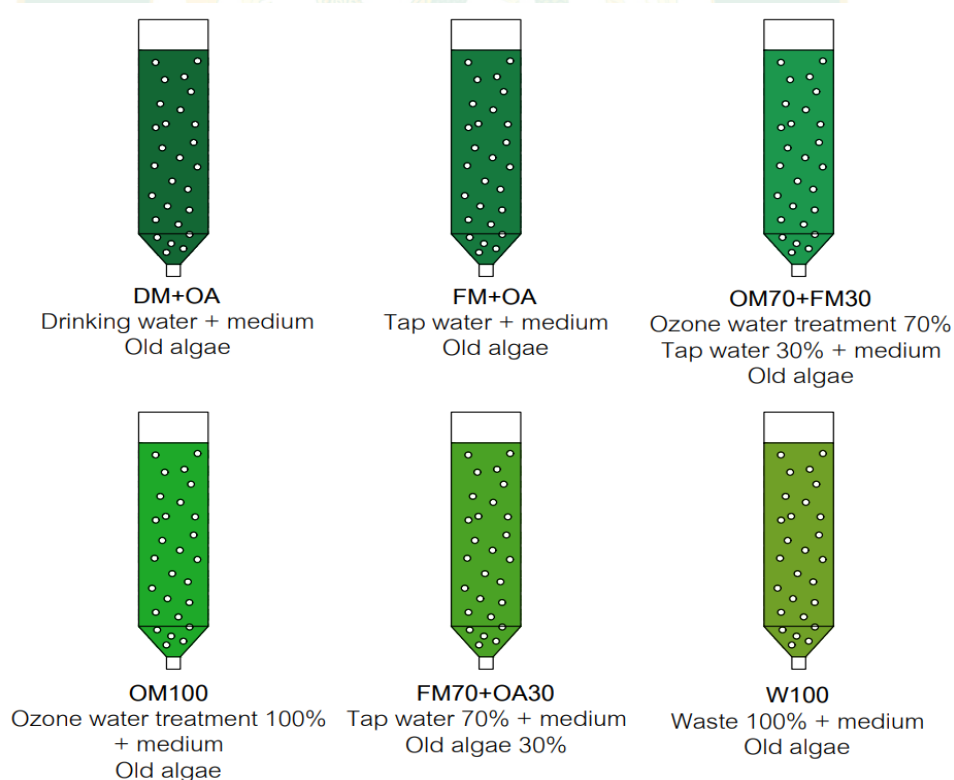
ภาพที่ 34 การเพิ่มขึ้นของอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำโดยใช้น้ำใหม่สารอาหารใหม่ 60% ร่วมกับหัวเชื้อสาหร่ายเก่า 40% (60:40)

จากข้อมูลการตรวจสอบคุณภาพน้ำ โดยพิจารณาอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (DOC) เพื่อตรวจสอบคุณภาพของน้ำที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา จากภาพที่ 31 พบว่า Control สาหร่ายเพาะเลี้ยงได้ต่อเนื่องมากกว่า 8 รอบการเลี้ยง เนื่องจากมีการใช้น้ำที่ใหม่สารอาหารใหม่ ร่วมกับการเติมหัวเชื้อสาหร่ายที่ใหม่ และสะอาดตลอดทำให้มีค่า DOC ไม่เกิน 75 mg/L ในทุกรอบ การเลี้ยง ภาพที่ 32 แสดงค่าอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำสำหรับอัตราส่วน 80:20 ซึ่งสามารถ เพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาได้มากที่สุดเพียง 5 LOOP เนื่องจาก 80:20 นั้นมีหัวเชื้อสาหร่ายเริ่มต้นที่ น้อยทำให้ไม่สามารถเลี้ยงให้มีการเจริญเติบโตได้ดีเท่าที่ควรและยังใช้หัวเชื้อสาหร่ายเก่าในการ เพาะเลี้ยง ซึ่งพบว่ามีค่า DOC สูงถึง 113 mg/L ใน LOOP5 ซึ่งถือว่ามีความสกปรกจากอินทรีย์ คาร์บอนที่สูงจนไม่สามารถเพาะเลี้ยงต่อได้ ภาพที่ 32 แสดงอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำในแต่ละรอบ การเลี้ยงสำหรับอัตราส่วน 70:30 สามารถเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาได้ใกล้เคียงกับ Control แต่ใน LOOP8 นั้นเริ่มมีการเจริญเติบโตที่ลดลงเนื่องจากเริ่มมีค่า DOC อยู่ที่ 104 mg/L ซึ่งถือว่ามีความ อินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำที่สูง และภาพที่ 33 แสดงอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำสำหรับอัตราส่วน 60:40 ซึ่งเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาได้มากที่สุดถึง LOOP7 เนื่องจากมีการเติมน้ำใหม่สารอาหาร ใหม่ที่น้อย และมีปริมาณของหัวเชื้อสาหร่ายเก่าที่มากทำให้เกิดความสกปรก โดยพบว่ามีค่า DOC 101 mg/L ตั้งแต่ LOOP6 และใน LOOP7 มีค่า DOC มากถึง 110 mg/L จากข้อมูลการเพาะเลี้ยง และข้อมูลคุณภาพน้ำ พบว่าสัดส่วนของน้ำใหม่สารอาหารใหม่ต่อหัวเชื้อสาหร่ายเก่าที่เหมาะสมคือ 70:30 ซึ่งสามารถเลี้ยงได้มากถึง 8 รอบการเลี้ยง (Yuan et al., 2019) โดยในการทดลองนั้นมี

อุณหภูมิในการทดลองอยู่ในช่วง 25-35 °C ค่า pH เริ่มต้นอยู่ในช่วง 8-9 และมีการควบคุมความเข้มแสงโดยใช้หลอดไฟ LED สีม่วง (แดง 3 น้ำเงิน 2) 30-45 kLux นอกจากนี้ยังมีการหมุนเวียนน้ำโดยใช้ฟองอากาศดันจากด้านล่างของภาชนะเพาะเลี้ยงเหมือนกัน

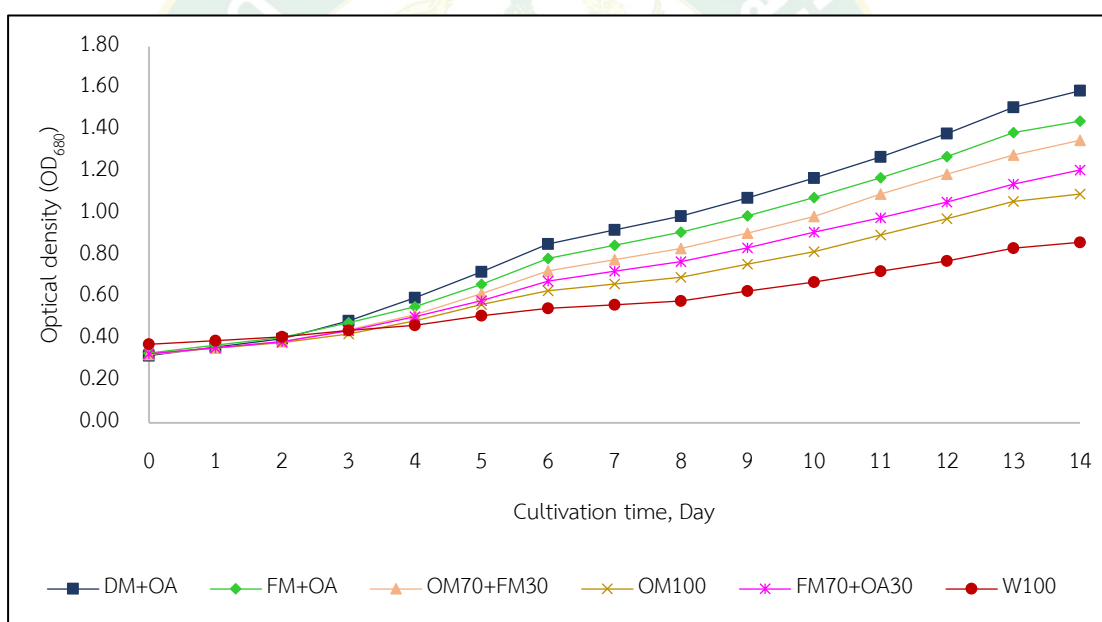
2. การศึกษาการใช้น้ำทิ้งหลังการบำบัดด้วยโอโซนในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา

การศึกษาการใช้น้ำทิ้งหลังการบำบัดด้วยโอโซนในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา จากการศึกษาทดลองก่อนหน้าได้ข้อสรุปด้านอัตราส่วนของน้ำใหม่สารอาหารใหม่ต่อหัวเชื้อสาหร่ายเก่าที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา พบว่าอัตราส่วน 70:30 สามารถเพาะเลี้ยงได้มากถึง 8 รอบการเลี้ยง จึงมีแนวคิดในการนำน้ำทิ้งหลังการเก็บเกี่ยวมาบำบัดด้วยโอโซน เพื่อลดของเสียจากกระบวนการเก็บเกี่ยว โดยการประยุกต์ใช้ระบบหัวฉีดโอโซนเวนจูรีในการบำบัดน้ำทิ้งหลังการเก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูลินา เพื่อลดอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (DOC) และค่าสีปรากฏของน้ำ (APW) เพื่อให้สามารถนำน้ำทิ้งหลังผ่านการบำบัดดังกล่าวกลับไปใช้เพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา ดังแสดงในภาพที่ 35

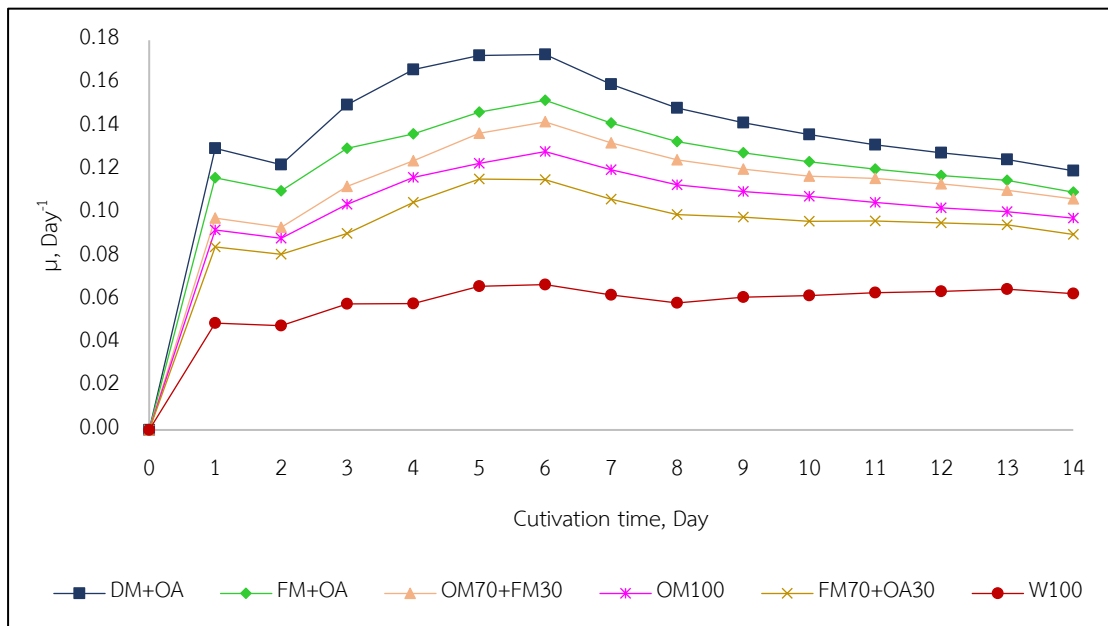


ภาพที่ 35 การใช้น้ำทิ้งหลังการบำบัดด้วยโอโซนในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา

โดยการทดลองนี้ได้เลือกใช้การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา (*Spirulina platensis*) ซึ่งควบคุมการเลี้ยงด้วยปุ๋ยสูตร Zarrouk's Medium โดยหัวเชื้อสาหร่ายเริ่มต้นที่ความหนาแน่นเซลล์ (Optical density : OD_{680}) 0.2-0.3 และมีการใช้น้ำที่แตกต่างกันดังภาพภาพ โดยน้ำดื่มที่เติมเต็มสารอาหาร (Drinking water + Medium : DM) น้ำประปาที่เติมสารอาหาร (Tap water + Medium : FM) น้ำทิ้งหลังการเก็บเกี่ยวสาหร่ายที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซน (Ozone water treatment + Medium : OM) น้ำทิ้งหลังการเก็บเกี่ยวสาหร่าย 100% (Waste water + Medium : W100) และหัวเชื้อสาหร่ายเก่า (Old algae : OA) โดยในการทดลองนั้นมีอุณหภูมิในการทดลองอยู่ในช่วง 25-35 °C ค่า pH เริ่มต้นอยู่ในช่วง 8-9 และมีการควบคุมความเข้มแสงโดยใช้หลอดไฟ LED สีม่วง (แดง 3 น้ำเงิน 2) 30-45 kLux นอกจากนี้ยังมีการหมุนเวียนน้ำโดยใช้ฟองอากาศดันจากด้านล่างของภาชนะเพาะเลี้ยงเหมือนกัน



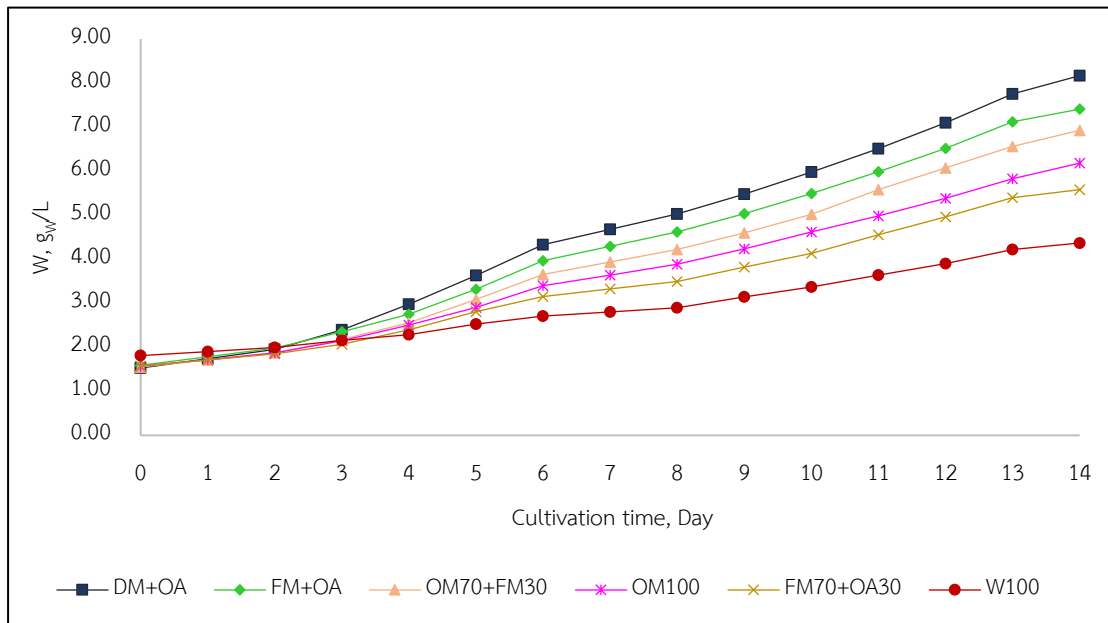
ภาพที่ 36 ผลของการเพาะเลี้ยงด้วยน้ำที่ต่างกันต่อความหนาแน่นเซลล์ของสาหร่ายสไปรูลินา



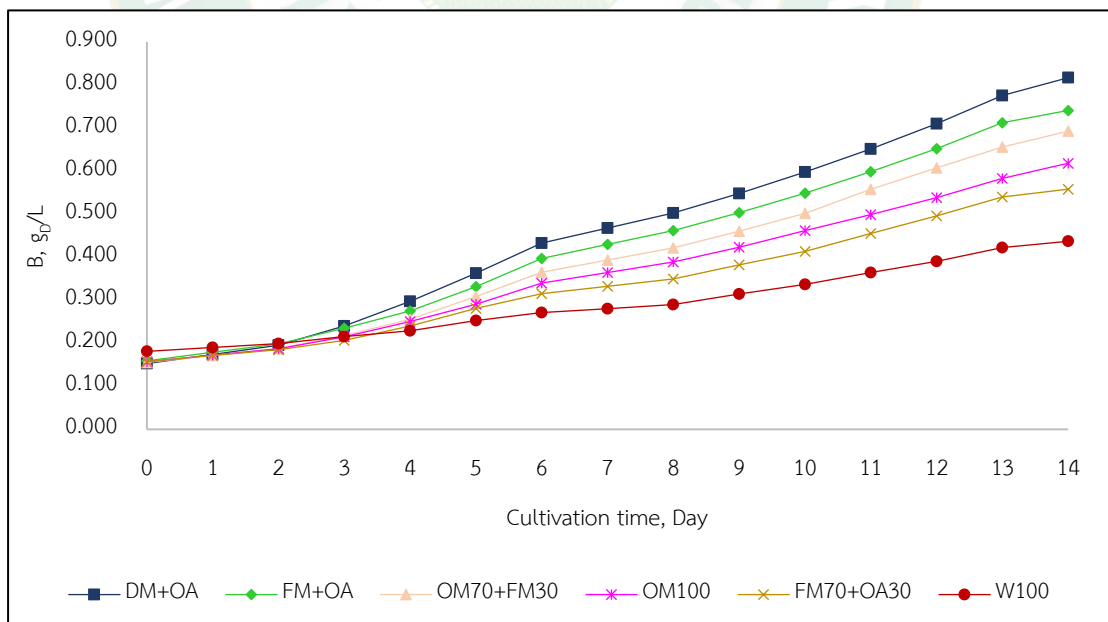
ภาพที่ 37 ผลของการเพาะเลี้ยงด้วยน้ำที่ต่างกันต่ออัตราการเติบโตของสายร่ายสไปรูลินา (μ , Day⁻¹)

จากการศึกษาการใช้น้ำทิ้งหลังการบำบัดด้วยโอโซนในการเพาะเลี้ยงสายร่ายสไปรูลินา โดยภาพที่ 36 แสดงการเจริญเติบโตของสายร่ายสไปรูลินา และภาพที่ 37 แสดงอัตราการเจริญเติบโตของสายร่ายสไปรูลินา (Growth rate) พบว่าการใช้น้ำดื่ม (DM+OA) ในการเพาะเลี้ยงสามารถทำให้สายร่ายเจริญเติบโตได้ดีที่สุด โดยอ้างอิงจากค่าความหนาแน่นเซลล์ (OD₆₈₀) และยังมีอัตราการเจริญเติบโต (Growth rate) ที่สูงที่สุด จากการเปรียบเทียบการทดลองที่สภาวะเดียวกัน และจะเห็นว่าน้ำเสียหลังการเก็บเกี่ยว (W100) ถึงแม้จะมีการเติมสารอาหารใหม่และเพิ่มหัวเชื้อสายร่ายลงไป แต่มีการเจริญเติบโตที่ต่ำ และมีอัตราการเจริญเติบโตที่น้อยกว่าทุกการทดลอง นอกจากนี้ น้ำประปา (FM+OA) นั้นให้ผลลัพธ์ในด้านอัตราการเจริญเติบโต และความหนาแน่นของเซลล์ที่สูง ใกล้เคียงกับการใช้น้ำดื่มในการเพาะเลี้ยง โดยอัตราการเจริญเติบโตของสายร่ายสไปรูลินาที่ใช้น้ำดื่มในการเพาะเลี้ยงนั้นมีค่าอยู่ที่ 0.12 Day⁻¹ และการใช้น้ำประปาในการเพาะเลี้ยงนั้นมีอัตราการเจริญเติบโตอยู่ที่ 0.11 Day⁻¹ ซึ่งน้ำเสียจากการเก็บเกี่ยวสายร่ายสไปรูลินาที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซน (OM100) เมื่อนำมาใช้ในการเพาะเลี้ยงสายร่ายสไปรูลินา พบว่ามีอัตราการเจริญเติบโต 0.098 Day⁻¹ ซึ่งมีอัตราการเจริญเติบโตหากใช้น้ำเสียจากการเก็บเกี่ยวสายร่ายสไปรูลินาที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนในการเพาะเลี้ยง 100% (OM100) จะทำให้อัตราการเจริญเติบโตของสายร่ายต่ำกว่าใช้น้ำประปา 10.9% ในขณะที่น้ำทิ้งจากการเก็บเกี่ยวสายร่ายสไปรูลินาที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนในอัตราส่วนที่เหมาะสมคือ 70% ร่วมกับน้ำประปาร่วมด้วย 30% (OM70+FM30) ก่อนการเติมสารอาหารและหัวเชื้อ

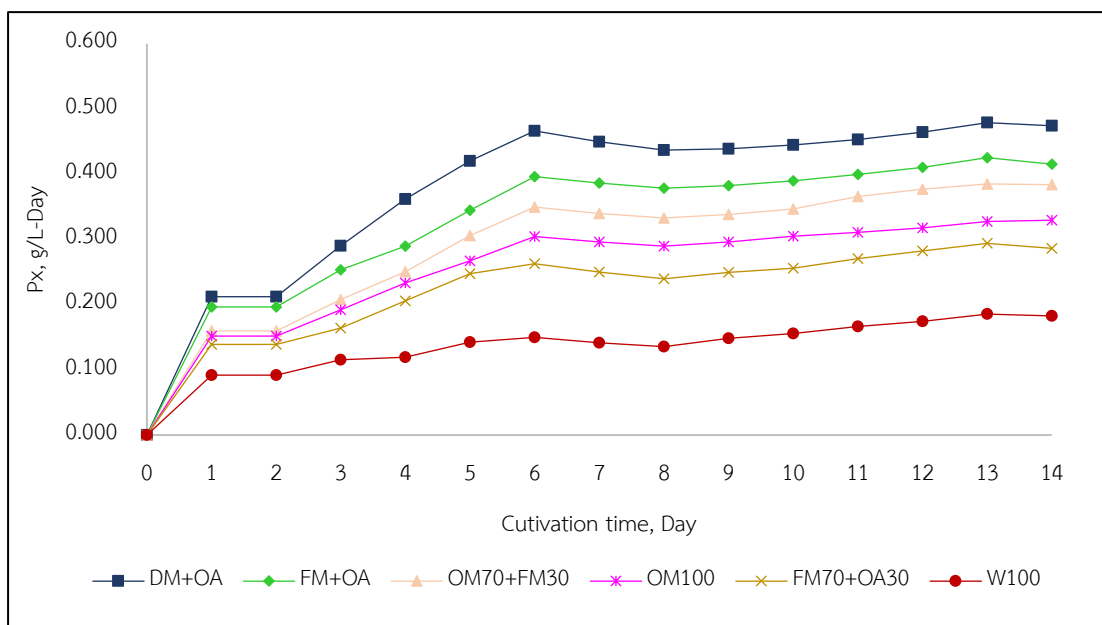
สาหร่าย ช่วยให้เราสามารถเพาะเลี้ยงสาหร่ายได้ใกล้เคียงกับการใช้น้ำประปา โดยมีอัตราการเจริญเติบโต 0.107 Day^{-1} ซึ่งน้อยกว่าการใช้น้ำประปาเพียงอย่างเดียวอยู่ที่ 2.8%



ภาพที่ 38 ผลของการเพาะเลี้ยงด้วยน้ำที่ต่างกันต่อชีวมวลสาหร่ายสไปรูลินาสด ($W, g_w/L$)



ภาพที่ 39 ผลของการเพาะเลี้ยงด้วยน้ำที่ต่างกันต่อชีวมวลสาหร่ายสไปรูลินาแห้ง ($B, g_D/L$)



ภาพที่ 40 ผลของการเพาะเลี้ยงด้วยน้ำที่ต่างกันต่อผลผลิตสาหร่ายสไปรูลินาแห้ง (Px, g/L-Day)

จากภาพที่ 38 39 และ 40 แสดงถึงผลของการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาด้วยน้ำที่ต่างกัน 6 ตัวอย่างต่อชีวมวลสาหร่ายสด (W , g_w/L) ชีวมวลสาหร่ายแห้ง (B , g_D/L) และผลผลิตของสาหร่ายสไปรูลินา (Px, g/L-Day) ตามลำดับ ซึ่งพบว่าการใช้น้ำดื่ม (DM+OA) ในการเพาะเลี้ยงสามารถทำให้ค่าชีวมวลสาหร่ายสด ค่าชีวมวลสาหร่ายแห้ง และค่าผลผลิตของสาหร่าย มีค่าสูงที่สุด โดยมีค่าอยู่ที่ 8.169 g_w/L 0.817 g_D/L และ 0.474 g/L-Day ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าการใช้น้ำประปา (FM+OA) ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา โดยมีค่าชีวมวลสาหร่ายสด ค่าชีวมวลสาหร่ายแห้ง และค่าผลผลิตของสาหร่าย 7.049 g_w/L 0.741 g_D/L และ 0.416 g/L-Day ตามลำดับ นอกจากนี้การใช้น้ำที่จากการเก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูลินาที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนในอัตราส่วนที่เหมาะสมคือ 70% ร่วมกับน้ำประปราร่วมด้วย 30% (OM70+FM30) มีความใกล้เคียงกับการใช้น้ำประปาในการเพาะเลี้ยง ซึ่งค่าชีวมวลสาหร่ายสด ค่าชีวมวลสาหร่ายแห้ง และค่าผลผลิตของสาหร่าย แตกต่างกันเพียง 6.96% 6.93% และ 8.33% ตามลำดับ โดยในการใช้งานจริงในระดับอุตสาหกรรมการใช้น้ำดื่มในการเพาะเลี้ยงอาจส่งผลกระทบต่อต้นทุนที่สูงจึงไม่เหมาะสมในการใช้งาน และปกติในการเพาะเลี้ยงนั้นจะใช้น้ำประปาในการเพาะเลี้ยง จึงสรุปได้ว่าการใช้น้ำที่จากการเก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูลินาที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนในอัตราส่วนที่เหมาะสมคือ 70% ร่วมกับน้ำประปราร่วมด้วย 30% (OM70+FM30) สามารถเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาได้ใกล้เคียงกับการใช้น้ำประปาเพียงอย่างเดียว และยังสามารถลดการใช้น้ำได้มากถึง 70% ส่งผลให้ต้นทุนในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายถูกลง และยังช่วยไม่ให้น้ำจากการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาเป็นปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมในอนาคต (Hadiyanto, 2018)

3. การวิเคราะห์การใช้พลังงานเบื้องต้น

การวิเคราะห์การใช้พลังงานเบื้องต้น เนื่องมาจากงานวิจัยการพัฒนาระบบหัวฉีดไอโซนเวนจูรี สำหรับการบำบัดน้ำกลับมาใช้ใหม่เพื่อเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา โดยในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาในระดับอุตสาหกรรมนั้นมีการใช้ปริมาณน้ำในการเพาะเลี้ยงที่สูง และเมื่อเก็บเกี่ยวผลผลิตจะเกิดน้ำทิ้งหลังการเก็บเกี่ยว ซึ่งผู้วิจัยได้สังเกตเห็นถึงความสูญเปล่าที่เกิดขึ้นจากการปล่อยน้ำทิ้ง จึงเกิดแนวคิดในการใช้ระบบหัวฉีดไอโซนเวนจูรีในการบำบัดน้ำเพื่อนำกลับมาเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาอีกครั้ง ซึ่งในกระบวนการบำบัดน้ำทิ้งหลังการเก็บเกี่ยวนี้มีการใช้พลังงานไฟฟ้า จึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบ วิเคราะห์และประเมินการใช้พลังงานเพื่อให้มีความประหยัด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน และเพื่อกำหนดรูปแบบการใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งการวิเคราะห์การใช้พลังงานในงานวิจัยนี้ได้ใช้สมการงานไฟฟ้า (Electric work) ซึ่งหมายถึง กำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้งานในหนึ่งหน่วยเวลา ดังแสดงในสมการที่ (15)

$$W(\text{kWh.}) = \frac{P(\text{W.}) \times t(\text{h.})}{1000} \quad (15)$$

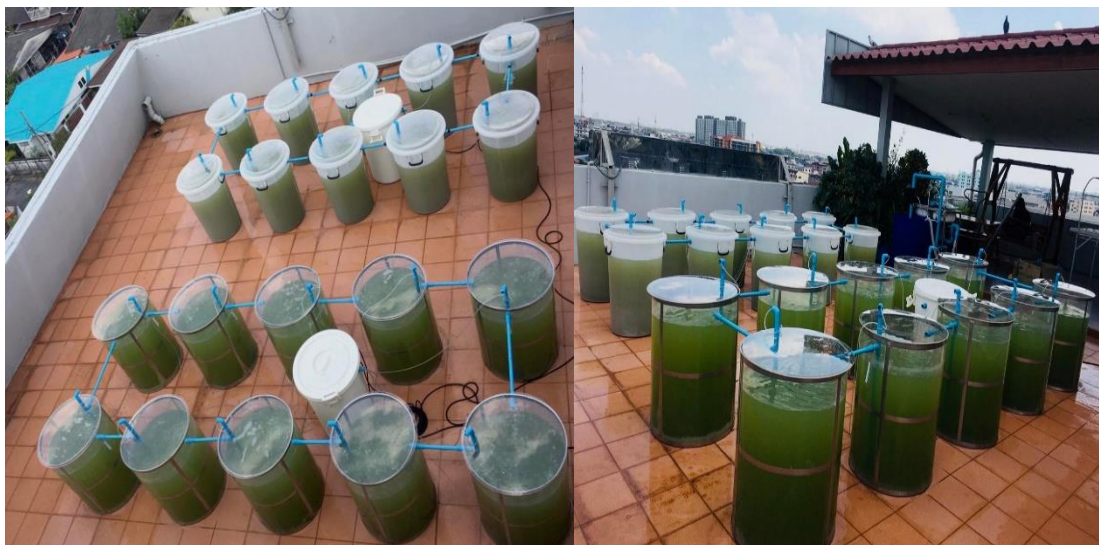
โดยที่ W คืองานไฟฟ้า หน่วย กิโลวัตต์, P คือกำลังไฟฟ้า หน่วย วัตต์ และ t คือเวลาที่ใช้งาน หน่วย ชั่วโมง

ตารางที่ 20 แสดงการวิเคราะห์การใช้พลังงานของระบบการบำบัดน้ำทิ้งหลังการเก็บเกี่ยว โดยเปรียบเทียบการใช้พลังงานของระบบการกระจายฟองด้วยไอโซนดิฟฟิวเซอร์ (Diffuser) ประกอบด้วยหัวกระจายฟองดิฟฟิวเซอร์แบบครึ่งวงกลมทำจากวัสดุไทเทเนียม เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว ป้อนลมสำหรับอัดก๊าซไอโซนผ่านดิฟฟิวเซอร์ และเครื่องกำเนิดไอโซน 5 g/hr. ระบบหัวฉีดไอโซนเวนจูรี (Venturi) ซึ่งประกอบด้วยหัวฉีดเวนจูรี 1.5 นิ้ว ป้อนน้ำ 1 แรงแม้ และเครื่องกำเนิดไอโซน 5 g/hr.

ตารางที่ 20 วิเคราะห์การใช้พลังงานของระบบการบำบัดน้ำทิ้งหลังการเก็บเกี่ยว

System	P W.	t h.	W kWh.	Treatment cost Baht.	Treatment System cost Baht.	%DOC Removal
Ozone Diffuser	0.16	8	1.28	4.48	10,000	51.77
Ozone Venturi	0.83	4	3.30	11.55	14,000	85.82

พบว่าระบบหัวฉีดโอโซนเวนจูรี่ มีการใช้พลังงานในการบำบัด 3.30 kWh. ซึ่งมากกว่าระบบการกระจายฟองด้วยโอโซนตีฟิวเซอร์ ที่มีการใช้พลังงาน 1.28 kWh. นอกจากนี้ยังมีต้นทุนของระบบสูงกว่า 40% แต่สามารถบำบัดน้ำโดยการกำจัด DOC ได้มากถึง 85.82% ในเวลา 4 ชั่วโมง ซึ่งใช้เวลาน้อยกว่าระบบการกระจายฟองด้วยโอโซนตีฟิวเซอร์ครึ่งหนึ่ง แต่ลด DOC ได้มากกว่า 51.77% หากต้องการ %DOC Removal ที่สูงใกล้เคียงกับระบบหัวฉีดโอโซนเวนจูรี่ อาจจะต้องใช้เวลาในการบำบัดนานขึ้นจาก 8 ชั่วโมงเป็น 12 – 16 ชั่วโมง ซึ่งจะทำให้มีการใช้พลังงานที่มากขึ้นจาก 1.28 kWh. เป็น 2.56 ซึ่งในภาคอุตสาหกรรมต้องการเวลาในการบำบัดในสัปดาห์เพื่อสามารถนำกลับไปใช้ซ้ำได้ทันที ดังนั้นระบบหัวฉีดโอโซนเวนจูรี่จึงเหมาะสมต่อการใช้งานมากกว่า และหากมีการใช้น้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลีนา จะสามารถลดต้นทุนด้านการใช้น้ำได้ โดยสาหร่ายยังคงมีอัตราการเจริญเติบโตใกล้เคียงกับการใช้น้ำประปา และสูงกว่าการใช้น้ำที่ไม่ผ่านการบำบัด ซึ่งได้ศึกษาการใช้น้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลีนาในระดับอุตสาหกรรม ณ บริษัท Thai PS Engineering จำกัด ซึ่งปัจจุบันได้ทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลีนาด้วยระบบถังปิดอัจฉริยะ (Smart close tank system) บริเวณดาตฟ้า โดยทำการเพาะเลี้ยง 2 ระบบ ซึ่ง 1 ระบบ ประกอบด้วยถังปิดอัจฉริยะสำหรับเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลีนา 10 ถัง ความจุ 200 L ดังแสดงในภาพที่ 38



ภาพที่ 41 การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาด้วยระบบถังปิดอัจฉริยะ

ซึ่งปกติจะทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายเป็นเวลา 12-14 วัน จึงทำการเก็บเกี่ยว ซึ่งในการเพาะเลี้ยงในแต่ละครั้งมีการใช้น้ำในปริมาณมากกว่า 4,000 L (4.0 m³) ซึ่งหากใช้น้ำทิ้งหลังการเก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูลินาที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนมาเพาะเลี้ยง จะสามารถลดการใช้น้ำได้ ดังแสดงในตารางที่ 20 ซึ่งเปรียบเทียบการใช้น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซน 100% การใช้น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซน 70% ร่วมกับการใช้น้ำประปา 30% และการใช้น้ำทิ้งที่ไม่ผ่านการบำบัด 100% ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา

ตารางที่ 21 การประหยัดน้ำในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา

	Growth rate Day ⁻¹	Reduce water use m ³	Save cost Baht/year.	Culture cycle LOOP
OM70+FM30	0.107	2.8	571.2	12
OM100	0.098	4.0	816.0	10
FM70+OA30	0.090	1.2	244.8	8
W100	0.063	4.0	816.0	3

จากตารางที่ 21 ซึ่งพบว่าหากมีการใช้น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซน 100% (OM100) หรือการใช้น้ำทิ้งที่ไม่ผ่านการบำบัด 100% (W100) ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา จะสามารถประหยัดน้ำได้ 100% ในการเพาะเลี้ยง แต่จะส่งผลให้อัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูลินามีค่าที่น้อย ซึ่งอาจส่งผลต่อคุณภาพ และปริมาณเนื้อสาหร่าย เนื่องจากการใช้น้ำทิ้งที่ไม่ผ่านการบำบัด จะมีสิ่งสกปรก สารอาหารตกค้าง จุลินทรีย์ หรือแบคทีเรีย ซึ่งการใช้น้ำทิ้งหลังการเก็บเกี่ยวสไปรูลินา ที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนร่วมกับน้ำประปาในอัตราส่วน 70:30 ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา ทำให้สาหร่ายมีอัตราการเจริญเติบโตใกล้เคียงกับการใช้น้ำประปา และสามารถลดการใช้น้ำได้ 70% หรือคิดเป็น 2.8 m³ และยังสามารถเพาะเลี้ยงได้มากถึง 12 รอบการเลี้ยง ในขณะที่การใช้น้ำทิ้งหลังการเก็บเกี่ยวสไปรูลินาที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา 100% มีอัตราการเจริญเติบโตที่ต่ำกว่า แต่สามารถประหยัดการใช้น้ำได้มากถึง 4 m³ และเลี้ยงได้มากถึง 10 รอบการเลี้ยง

ดังนั้นการใช้น้ำทิ้งหลังการเก็บเกี่ยวสไปรูลินาที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนร่วมกับน้ำประปาในอัตราส่วน 70:30 ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา ถึงแม้จะลดการใช้น้ำได้ 70% แต่สามารถเพาะเลี้ยงได้ 12 รอบการเลี้ยง หรือคิดเป็นเวลากว่า 6 เดือน โดยที่น้ำอีก 30% ที่เหลืออาจจะทำการบำบัดเช่นเดียวกันแต่นำไปใช้ประโยชน์ในด้านการทำความสะอาดสาหร่ายสไปรูลินาหลังการเก็บเกี่ยว หรือใช้ในการ ทำความสะอาดระบบเพาะเลี้ยง เป็นต้น

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

1. ระบบการสร้างน้ำไอโซนด้วยหัวฉีดเวนจูร์สามารถสร้างน้ำไอโซนที่มีความเข้มข้นสูงกว่าระบบหัวดีฟิวเซอร์ 8 เท่า และมีเวลาที่สลายตัวสูงมากกว่าถึง 1.6 เท่า นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตร (k_{La}) ที่ก๊าซไอโซน Dose และปริมาตรน้ำเท่ากัน ของระบบหัวฉีดเวนจูร์มากกว่าระบบหัวดีฟิวเซอร์ 28.77%

2. อุณหภูมิน้ำมีผลต่อความเข้มข้นของไอโซนละลายในน้ำ โดยพบว่าระบบหัวฉีดเวนจูร์สามารถสร้างน้ำไอโซนในช่วงอุณหภูมิน้ำเย็น (15-18 °C) ได้สูงกว่าน้ำอุณหภูมิปกติ (27-30 °C) คิดเป็น 40% นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตร (k_{La}) ที่ก๊าซไอโซน Dose และปริมาตรน้ำเท่ากัน ของอุณหภูมิน้ำเย็นมากกว่าอุณหภูมิปกติ 10.61%

3. ระบบหัวฉีดเวนจูร์นั้นสามารถลดอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (DOC) ลงได้มากถึง 85.86% และสามารถขจัดสีปรากฏของน้ำ (APW) 69.35% ในเวลา 4 ชั่วโมง ระบบหัวดีฟิวเซอร์ใช้เวลามากกว่า 2 เท่า แต่สามารถลด DOC ได้เพียง 52% และสามารถขจัดสีได้ 67.12%

4. อัตราส่วนน้ำใหม่สารอาหารใหม่ต่อหัวเชื้อสาหร่ายเก่าที่ 70:30 สามารถเพาะเลี้ยงได้มากที่สุด 8 รอบ ซึ่งมากกว่าอัตราส่วนที่ 60:40 และ 80:20 คิดเป็น 12.5% และ 37.5% ตามลำดับ

5. การใช้น้ำสาหร่ายหลังการเก็บเกี่ยวที่ผ่านการบำบัดด้วยไอโซนร่วมกับน้ำประปา ในอัตราส่วน 70:30 สามารถเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิनाได้ใกล้เคียงกับการใช้น้ำประปาในการเพาะเลี้ยง ซึ่งมีอัตราการเจริญเติบโต (Growth rate) 0.107 Day^{-1} แตกต่างจากการใช้น้ำประปาในการเพาะเลี้ยง 2.8% แต่สามารถลดต้นทุนการใช้น้ำได้ถึง 70%

ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร เนื่องจากในงานวิจัยข้างต้นได้พูดถึงผลด้านปริมาตรน้ำ ความเข้มข้นของก๊าซโอโซน อุณหภูมิ รวมถึงระบบที่ใช้ในการสร้างน้ำโอโซนที่ต่างกันต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารและความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำ แต่ไม่ได้กล่าวถึงผลของค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำต่อความเข้มข้นและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของโอโซนละลายในน้ำ

2. การบำบัดน้ำทิ้งหลังการเก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูลินาด้วยระบบหัวฉีดโอโซนเวนจูรี หากอุตสาหกรรมต้องการนำไปประยุกต์ใช้ เพื่อสามารถกำจัดอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ และขจัดสีปรากฏอย่างมีประสิทธิภาพ อาจมีการเพิ่มขนาดและจำนวนของเวนจูรี ขนาดของป้อนน้ำ (ต้องสอดคล้องกับขนาดและจำนวนของเวนจูรี) หรือใช้เครื่องกำเนิดโอโซนที่มีความเข้มข้นสูงมากขึ้น เพื่อให้สามารถบำบัดน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น



บรรณานุกรม

- เพ็ญรัตน์ หงษ์วิทยากร และ โฉมยง ไชยอุบล. 2544. การถ่ายทอดเทคโนโลยีในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาในเขตพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่และจังหวัดลำพูน. มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- นราพงศ์ หงส์ประสิทธิ์. 2563. การวิเคราะห์อุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่นจากของเสียประเภทยางในกระบวนการเติมอากาศ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- บริษัท โปร-เทค-ชาयน์ จำกัด. 2564. Venturi Injector. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.protechsci.com/?page_id=1044 (5 มกราคม).
- ปฎิวัติ บุญมา, ชาญณรงค์ หนูอินทร์ และประมุข อุณหเลขกะ. 2561. การประยุกต์ใช้ไมโครบับเบิลโอโซนร่วมกับระบบเติมอากาศแบบเวนจูรีในการบำบัดน้ำในคลองพระพิมลราชา ตลาดน้ำไทรน้อย อำเภอไทรน้อย จังหวัดนนทบุรี. RMUTSB ACADEMIC JOURNAL, 6(1), 45-54.
- ปิยะวิทย์ ทิพรส. 2563. โอโซน : สมบัติทางเคมีกายภาพและการประยุกต์ใช้เพิ่มความขาวผลัดภัณฑ์เนื้อปลา. วารสารสุทธิปริทัศน์, 23(70), 105-120.
- ภัทรพล กล้าเสือ. 2560. การบำบัดสีและกลิ่นของน้ำเสียจากห้องฟั่นสีด้วยโอโซน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- ระพีพรรณ ฉลาดธัญญกิจ. 2549. ต้นทุนและผลตอบแทนการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาของบริษัท กรีนไทมอนด์ จำกัด. สารนิพนธ์ปริญญาตรี. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- วีรยุทธ เชื้อนแก้ว. 2558. รายงานคุณภาพน้ำชลประทาน. สำนักงานชลประทานที่ 2 กรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- สมเกียรติ จตุรงค์กล้าเลิศ, ชนวัฒน์ นิตศน์วิจิตร, จตุรภัทร วาฤทธิ และจงกล พรหมยะ. 2562. การเสริมอัตราการถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชุดคาร์บอนเตอรส์สำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา. น. 53-59. ใน การประชุมวิชาการการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวล ครั้งที่ 18. โรงแรม กระบี่ฟร้อนท์ เบย์ รีสอร์ท จังหวัดกระบี่.
- สืบตระกูล วิเศษสมบัติ. 2557. โอโซน (Ozone). มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สุพิชฌาย์ วิจารณ์รงค์. 2550. ผลของโอโซนต่อประสิทธิภาพการขจัดสี. สารนิพนธ์ปริญญาตรี. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อานอบ คันตะชา. 2545. การศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากคลองลำโรงโวโยโอโซน. สำนักหอสมุดมหาวิทยาลัยทักษิณ.
- Amrish Chawla, Jon W. Bell and Marlene E. Janes. 2007. Optimization of Ozonated

- Water Treatment of Wild-Caught and Mechanically Peeled Shrimp Meat. **Journal of Aquatic Food Product Technology**, 16(2), 41-56.
- Ashley Selvy. 2015. **Impacts of ozone dose and empty bed contact time on total organic carbon removal through ozone-biological activated carbon treatment**. Thesis of Master Degree. University of Nevada.
- Brendan C. Siegler. 2011. **Ozone technology in the food industry**. Nova Science Publisher, Inc.
- Brian A. Schunacher. 2002. Methods for the Determination of Total Organic Carbon (TOC) In Soils and Sediments. **Ecological Risk Assessment Support Center Office of Research and Development**.
- Danni Yuan, Mimi Yao, Lan Wang, Yanhua Li, Yingchun Gong and Qiang Hu. 2019. Effect of recycling the culture medium on biodiversity and population dynamics of bio-contaminants in *Spirulina platensis* mass culture systems. **Algal Research**, 44, 1-10.
- Dariusz Bialoszewski, Ewa Bocian, Bozena Bukowska, Magdalena Czajkowska, Beata Sokol-Leszczynska and Stefan Tyski. 2010. Antimicrobial activity of ozonated water. **Medical Science Monitor**, 16(9), MT71-MT75.
- Eva F. Karamah, Setijo Bismo, Letti Annasari and Widodo W. Purwanto. 2010. Mass Transfer Study On Micro-Bubbles Ozonation In A Bubble Column. **International Journal of Chemical Engineering Research**, 2(2), 243-253.
- Florida LAKEWATCH. 2020. **A Beginner's Guide to Water Management - color**. Department of Fisheries and Aquatic Sciences Institute of Food and Agricultural Sciences University of Florida.
- H. Ikeura, F. Kobayashi and M. Tamaki. 2011. Removal Of Residual Pesticides In Vegetables Using Ozone Microbubbles. **Journal of Hazardous Material**, 181(1), 956-959.
- Hadiyanto Hadiyanto. 2018. Ozone Application for Tofu Waste Water Treatment and Its Utilisation for Growth Medium of Microalgae *Spirulina* sp. **E3S Web Conference**, 31, 1-4.
- Hadiyanto Hadiyanto, Marcelinus Christwardana, Detian Indah Pratiwi, Silviana Silviana,

- Muhammad Syarifudin and Adian Khoironi. 2019. Rubber wastewater treatment using UV, ozone, and UV/ozone and its effluent potency for microalgae *Spirulina platensis* cultivation medium. **Cogent Engineering**, 1-11.
- J.Y. Chen, Y.J Lin and W.C. Kuo. 2013. Pesticide Residue Removal From Vegetables By Ozonation. **Journal of Food Engineering**, 114(3), 404-411.
- Jan Perkowsk, Lech Kos and Stanislaw Ledakowicz. 1995. Application of Ozone in Textile Wastewater Treatment. **OZONE SCIENCE & ENGINEERING**, 18, 73-85.
- Melicia Cintia Galdeano, Allan Eduardo Wilhelm, Isabella Borges Goulart, Renata Valeriano Tonon, Otnie Freitas-Silva, Rogério Germani and Davy William Hidalgo Chávez. 2018. Effect of water temperature and pH on the concentration and time of ozone saturation. **Brazilian Journal of Food Technology**, 21, 1-7.
- Michael C. Dodd, Marc Olivier Buffle and Urs Von Gunten. 2006. Oxidation of Antibacterial Molecules by Aqueous Ozone: Moiety-Specific Reaction Kinetics and Application to Ozone-Based Wastewater Treatment. **Environ. Sci. Technol**, 40, 1969-1977.
- Nur Syahirah Zainuddin, Fuei Pien Chee, Jackson Hian Wui Chang and Jedol Dayou. 2017. Development and Operational Implementation of a Novel Method for Production of Ozonated Water **Transactions on Science and Technology**, 4(3), 218-223.
- Rip G. Rice. 1997. Applications of Ozone for Industrial Wastewater Treatment -- A Review. **OZONE SCIENCE & ENGINEERING**, 18(1), 477-515.
- T. Ohmi, T. Isagawa, T. Imaoka and I. Sugiyama. 1992. Ozone Decomposition in Ultrapure Water and Continuous Ozone Sterilization for a Semiconductor Ultrapure Water System. **Journal of The Electrochemical Society**, 139(11), 3336-3345.
- Y Magara, M Itoh and T Morioka. 1995. Application of ozone to water treatment and power consumption of ozone generating systems. **Progress in Nuclear Energy**, 29, 175-182.
- Zhiying Lu, Sarah Loftus, Jun Sha, Wenxuan Wang, Min S. Park, Xuezhi Zhang, Zackary I. Johnson and Qiang Hu. 2020. Water reuse for sustainable microalgae

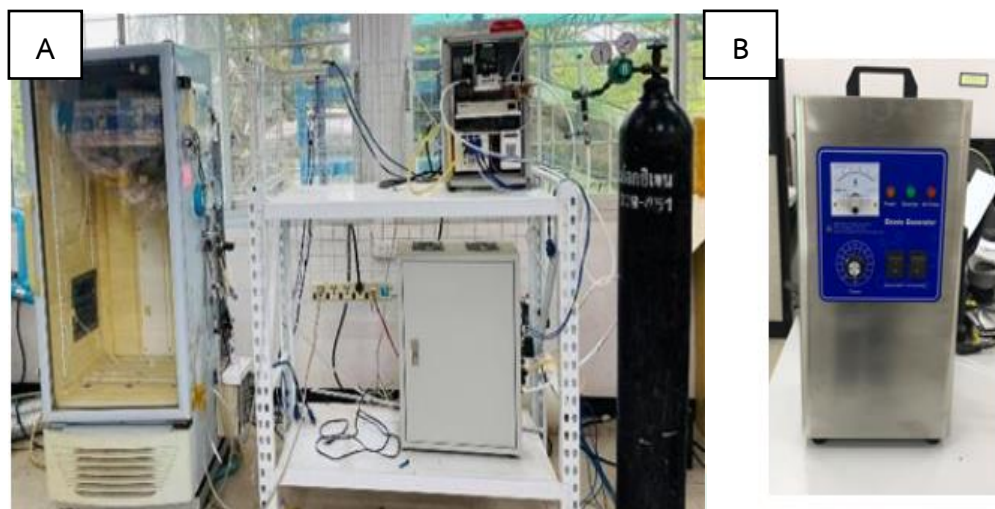
cultivation: Current knowledge and future directions. **Resources, Conservation & Recycling**, 161, 1-18.





ภาคผนวก





ภาพที่ 42 เครื่องกำเนิดโอโซน (A) เครื่องกำเนิดโอโซน 7 g/hr. และภาชนะขนาด 0.3 m³
(B) เครื่องกำเนิดโอโซน 5 g/hr.

โดย A คือเครื่องกำเนิดโอโซน 7 g/hr. พร้อมภาชนะสำหรับบรรจุก๊าซโอโซนเพื่อสร้างก๊าซโอโซน Dose ต่าง ๆ ใช้สำหรับการศึกษาการสร้างน้ำโอโซน

B คือเครื่องกำเนิดโอโซน 5 g/hr. สำหรับใช้ศึกษาการบำบัดน้ำด้วยโอโซน



ภาพที่ 43 ระบบสร้างน้ำโอโซน (A) ระบบหัวฉีดเวนจูรี่ (B) ระบบการกระจายฟองด้วยตีฟิวเซอร์



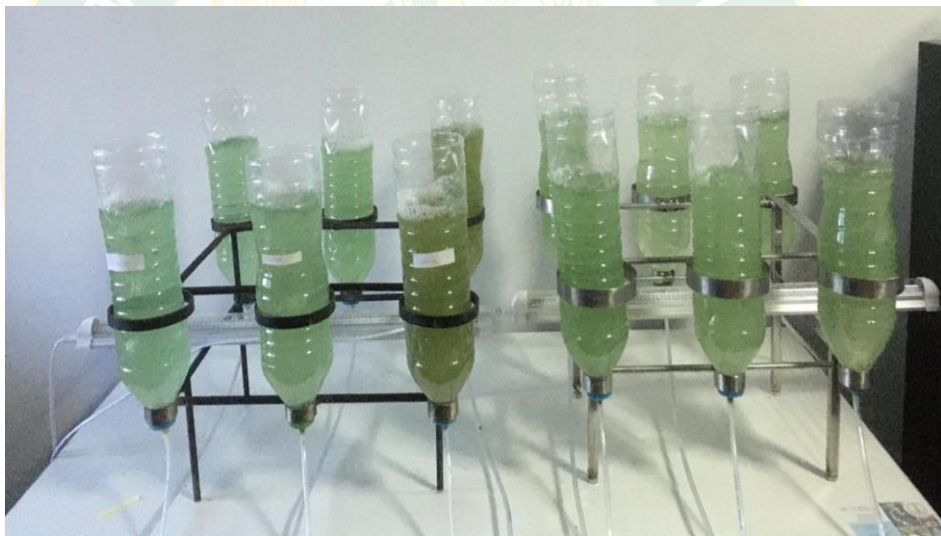
ภาพที่ 44 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำ



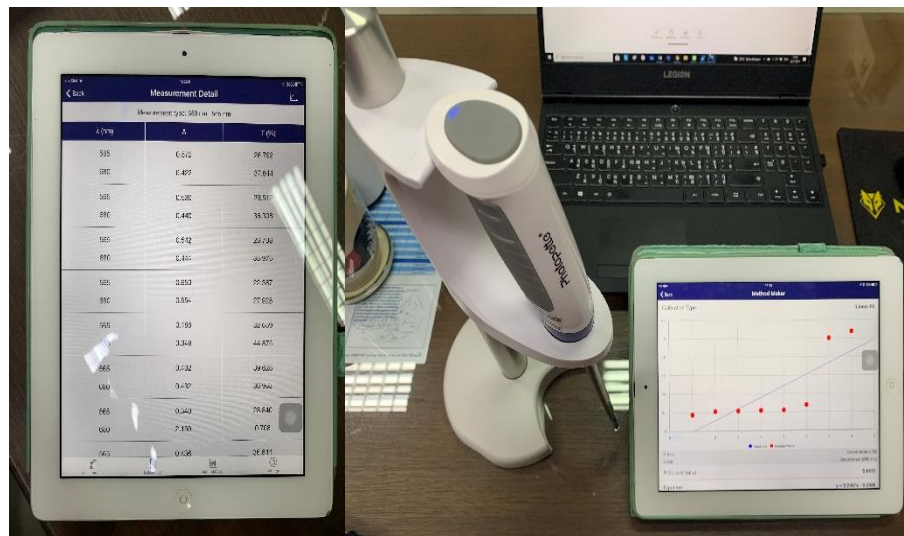
ภาพที่ 45 การบำบัดน้ำทิ้งหลังการเก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูลินา



ภาพที่ 46 การวิเคราะห์ค่าสีปรากฏของน้ำหลังการบำบัด



ภาพที่ 47 การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาด้วยน้ำหลังการบำบัดด้วยโอโซน



ภาพที่ 48 การวิเคราะห์การเจริญเติบโตของสาหร่ายด้วย Photopette



ภาพที่ 49 ตรวจสอบเซลล์สาหร่ายสไปรูลิना สำหรับใช้ในการเพาะเลี้ยง





วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 โทรศัพท์ (๐๕๓) ๙๔๔๑๗๗ ต่อ ๑๔-๑๕ โทรสาร (๐๕๓) ๒๑๗๒๘๗
 Engineering Journal Chiang Mai University, Thailand
 Tel. +66(53) 944176-7 ext. 14-15 Fax. +66(53) 217287

ที่ อว ๘๓๙๓(๑๔).๑(๕)/๑๐๗

๘ เมษายน ๒๕๖๕

เรื่อง ตอบรับบทความ

เรียน คุณณัฐพล ไชยวงศ์ คุณสมเกียรติ จตุรงค์ล้ำเลิศ คุณชนวัฒน์ นิตศน์วิจิตร และ คุณจตุรภัทร วาฤทธิ

ตามที่ ท่านได้ส่งบทความ เรื่อง “การพัฒนาระบบหัวฉีดโอโซนเวนจูรีสำหรับการบำบัดน้ำจากการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา (DEVELOPMENT OF OZONE VENTURI INJECTION SYSTEM (OVIS) FOR WATER TREATMENT FROM SPIRULINA CULTIVATION)” เพื่อเผยแพร่ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ นั้น

บรรณาธิการได้พิจารณาแล้ว มีความเห็นว่า บทความของท่านมีความเหมาะสมที่จะลงตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ปีที่ ๒๙ เล่มที่ ๑ มกราคม-เมษายน ๒๕๖๕ ซึ่งจะเผยแพร่ในเว็บไซต์ <https://research.eng.cmu.ac.th/engjcmu> ต่อไป

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

ขอแสดงความนับถือ

(รองศาสตราจารย์ ดร.พีรพงศ์ จิตเสีรัมย์)
 บรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

รับ



วารสารวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Engineering Journal
Chiang Mai University

การพัฒนาาระบบหัวฉีดโอโซนเวนจูรีสำหรับการบำบัดน้ำ
จากการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิना
DEVELOPMENT OF OZONE VENTURI
INJECTION SYSTEM (OVIS) FOR WATER TREATMENT
FROM SPIRULINA CULTIVATION

ณัฐพล ไชยวงศ์ สมเกียรติ จตุรงค์กล้าเลิศ* ชนวัฒน์ นิตน์วิจิตร และ จตุรภัทร วาฤทธิ์

Natthapon Chaivong, Somkiat Jaturonglumert*, Chanawat Nitatwichit and Jaturapatr Varith

คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

Faculty of Engineering and Agro-Industry, Maejo University, 50290, Thailand

*Corresponding author: yaidragon@mju.ac.th

บทคัดย่อ

โอโซนถูกนำมาใช้ในภาคอุตสาหกรรมอาหารเพื่อฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน เนื่องจากมีสลายตัวเป็นออกซิเจนที่รวดเร็ว ไม่มีสารตกค้าง ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ด้วยคุณสมบัติที่สามารถกำจัดสารอินทรีย์และอนินทรีย์ในน้ำของโอโซน แต่ด้วยเหตุผลในการใช้งานของอุตสาหกรรม ซึ่งโอโซนที่ละลายในน้ำมีระยะเวลาการสลายตัวและข้อจำกัดของการสร้างระดับความเข้มข้นที่จะนำไปใช้งานได้ ดังนั้นในการศึกษานี้จึงพัฒนาระบบหัวฉีดเวนจูรีสำหรับผลิตน้ำโอโซนที่สามารถสร้างความเข้มข้นที่สูง และมีระยะเวลาการสลายตัวที่นานขึ้น ซึ่งเปรียบเทียบกับระบบหัวฉีดฟิวเซอร์แบบเดิม ผลการศึกษาพบว่าระบบหัวฉีดเวนจูรีสามารถผลิตน้ำโอโซน ได้ดีกว่าในน้ำเย็น โดยมีค่าความเข้มข้นของน้ำโอโซนเวลาที่ใช้ในการสร้างปฏิกิริยา เวลาที่สลายตัว และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรเป็น 2.8 mg/l 20 min 50 min และ 0.198 min^{-1} ตามลำดับ น้ำโอโซนถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งจากการเก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูลิना โดยสามารถลดอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำและขจัดสีของน้ำได้ 85.65% และ 69.35% จลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาของการลดอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำถูกแสดงออกได้ดีในรูปแบบจำลองอันดับหนึ่ง โดยมีค่าคงที่เท่ากับ $6.50 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ ด้วยการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งด้วยวิธีการดังกล่าว ทำให้สามารถนำน้ำที่บำบัดกลับมาใช้ต่อได้ โดยพบว่าเป็นแนวทางที่เหมาะสมในการควบคุมการเกิดการปนเปื้อนจากการนำน้ำเก่ามาใช้งาน และยังช่วยลดต้นทุนการผลิตในเรื่องการใช้ซ้ำอีกด้วย

คำสำคัญ: ระบบหัวฉีดโอโซนเวนจูรี ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตร การบำบัดน้ำ

ณ. ไชยวงศ์ ส. จตุรงค์ล้ำเลิศ ช. นิตน์วิจิตร และ จ. วาฤทธิ

ABSTRACT

Ozone has been used for many food industries to disinfect water due to its oxidizing potential. Since it decomposes quickly into molecular oxygen, leaving no residue, it has important advantages for wastewater treatment thanks to its ability to remove organic and inorganic substances in water from ozone. This causes existing industry up-to date is still using ozone gas in several treatments due to ozone has a decompose time and the concentration is limited to several treatments. Therefore, in this study ozone venturi injection system was developed to produce ozonated water with higher concentration and longer decompose time by compared with diffuser system (conventional method). The findings showed that the ozone venturi injection system was achieved in cool water with concentration of ozonated water, reaction time, decomposition time and volumetric mass transfer coefficient were 2.8 mg/L, 20 min, 50 min and 0.198 min^{-1} respectively. Ozonated water could be applied to treat wastewater from spirulina harvesting by reduction dissolved organic carbon and appearance color of water about 85.65% and 69.35%. The kinetics reaction of dissolved organic carbon was based on first-order model and had a constant factor is $6.50 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$. To improve water treatment, it is necessary to both subject the reused water to appropriate treatment to find effective way to control contaminants and reduce investment cost from water resource.

Keywords: Ozone venturi injection system, Volumetric mass transfer coefficient, Water treatment

1. บทนำ

โอโซนหรือไตรออกซิเจน (Trioxigen, O_3) ถูกพบครั้งแรกในปี พ.ศ. 2383 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมัน ชื่อว่า C. F. Schonbein ต่อมา ปี พ.ศ. 2431 ได้จดสิทธิบัตรชื่อว่า “ก๊าซโอโซน” โดยโอโซนเป็นสารออกซิไดซ์ที่มีความสามารถสำหรับการฆ่าเชื้อ การยับยั้งไวรัส การกำจัดกลิ่น การฟอกสี และการย่อยสลายสารอินทรีย์ [1] โอโซนเป็นก๊าซที่ไม่เสถียรทำให้อโอโซนสามารถสลายตัวเป็นออกซิเจนได้ หลักการผลิตโอโซนนั้นสามารถทำได้โดยการทำลายพันธะของออกซิเจนโดยใช้พลังงานเพื่อทำให้ออกซิเจนจาก 2 อะตอม (O_2) เหลือ 1 อะตอม (O) และทำให้ออกซิเจนจับกันกับอะตอมของออกซิเจนอื่น ๆ เพื่อเป็นโอโซน (O_3) อย่างไรก็ตามการใช้ประโยชน์จากกระบวนการผลิตน้ำโอโซนนี้ถูกจำกัด ด้วยความสามารถในการละลายของโอโซนที่ค่อนข้างต่ำ [2-6] นอกจากนี้ยังมีสารประกอบบางชนิดที่ไม่สามารถออกซิไดซ์ได้ง่าย เช่น แอมโมเนีย และสารกำจัดศัตรูพืช [1,7] จึงมีการใช้ปริมาณโอโซนที่มากขึ้นเพื่อชดเชยความสามารถในการละลายของโอโซนในน้ำ (Ozonated water, Ow) ที่ต่ำ

แต่สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าการใช้โอโซนไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร ซึ่งนำไปสู่กระบวนการผลิตน้ำโอโซนที่มีต้นทุนสูง นอกจากนี้การใช้โอโซนในปริมาณที่มากเกินไปส่งผลให้เกิดโบรเมต ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งที่เป็นผลข้างเคียงที่เป็นอันตรายจากปฏิกิริยาของโอโซน

ก๊าซโอโซนสามารถละลายลงในน้ำเพื่อผลิตน้ำโอโซนโดยทั่วไปมีอยู่ 2 วิธี [7,13] วิธีแรกคือ วิธีหัวตีฟิวเซอร์ (Diffuser) ซึ่งใช้อุปกรณ์ที่มีรูพรุนสำหรับทำให้ออกซิเจนออกเป็นฟองเล็ก ๆ เพื่อให้ฟองค่อย ๆ ลอยขึ้นไปด้านบนของผิวน้ำ และละลายเป็นน้ำโอโซน วิธีที่สองคือ วิธีหัวฉีดเวนจูรี (Venturi) ซึ่งต้องใช้ความต่างของแรงดัน เพื่อสร้างสุญญากาศ และดูดก๊าซโอโซนเข้าสู่เวนจูรี ซึ่งมีปัจจัยหลักในการผลิตน้ำโอโซนให้มีความเข้มข้นสูง ได้แก่ ค่าความเข้มข้นของก๊าซโอโซน ปริมาตรของน้ำ อุณหภูมิของน้ำ และค่าความเป็นกรดต่าง [1,7]

ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการผลิตน้ำโอโซนคือ ค่าความเข้มข้นของก๊าซโอโซน ปริมาตรของน้ำ และอุณหภูมิของน้ำในการผลิตน้ำโอโซน โดยจะทำ

การเก็บข้อมูลความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำ (Ozonated water, Ow) และคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตร (Volumetric mass transfer coefficient, $k_L a$) เพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการสร้างน้ำโอโซน รวมถึงการประยุกต์ใช้ระบบการสร้างน้ำโอโซนในการบำบัดน้ำทิ้งหลังการเก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูลินา (Arthrospira or Spirulina platensis) ซึ่งจะมีน้ำทิ้งจากการเก็บเกี่ยวนี้ในปริมาณมาก หากนำกลับมาใช้ใหม่ (Water reused) มีความจำเป็นต้องบำบัดก่อนจะนำกลับมาใช้ซ้ำ เพื่อลดของเสียจากกระบวนการเพาะเลี้ยง โดยในการบำบัดจะทำการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ค่าอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (Dissolved organic carbon, DOC) ที่ลดลง ค่าสีปรากฏของน้ำ (Appearance color of water, APW) และศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยา

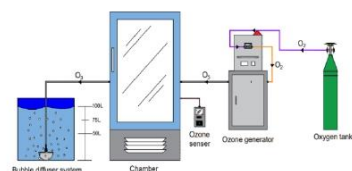
2. การวิธีการทดลอง

2.1 ขั้นตอนการทดลอง

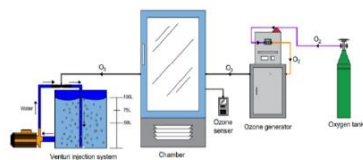
การวิจัยนี้ดำเนินการศึกษาการสร้างน้ำโอโซน โดยใช้สองวิธีที่แตกต่างกัน ประกอบด้วย ระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์ และระบบหัวฉีดเวนจูรี ดังแสดงในรูปที่ 1 และรูปที่ 2 ตามลำดับ การดำเนินการทดลองสำหรับการสร้างน้ำโอโซนทั้ง 2 ระบบ จะใช้ปริมาตรน้ำ (Volume) 50 75 และ 100 L เพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาตรน้ำต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของโอโซนละลายในน้ำ การดำเนินการทดลองที่ความเข้มข้นของก๊าซโอโซน (Ozone Concentration, Dose) 10,000 15,000 และ 20,000 ppm สำหรับการศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของก๊าซโอโซนต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของโอโซนละลายในน้ำ และการดำเนินการสร้างน้ำโอโซนด้วย 2 วิธีดังกล่าวที่อุณหภูมิ (Temperature, Temp.) ที่แตกต่างกัน คือช่วง 27-30 °C และ 15-18 °C สำหรับการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของโอโซนละลายในน้ำ สำหรับการทดลองใช้น้ำประปา ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (ค่า pH) อยู่ระหว่าง 8-8.5 โดยทำการศึกษาเวลาในการสร้าง และเวลาในการ

สลายตัวของโอโซนละลายในน้ำ รวมถึงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตร ดังสมการที่ (1) ทุก ๆ การทดลองจะถูกทำซ้ำสามครั้งและข้อมูลที่ได้อาจนำมาเฉลี่ยและวิเคราะห์ผลทางสถิติ

สำหรับระบบหัวดีฟิวเซอร์ ดังแสดงในรูปที่ 1 เครื่องผลิตโอโซนซึ่งใช้การแตกตัวของโมเลกุลออกซิเจนเป็นไอออนโดยกระบวนการโคโรนาดีสชาร์จ (Corona Discharge) เพื่อผลิตก๊าซโอโซนในอัตรา 5 g/hr หัวดีฟิวเซอร์แบบครึ่งทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4" ผลิตจากไทเทเนียม ซึ่งใช้ในการละลายก๊าซโอโซนลงในน้ำ โดยหัวดีฟิวเซอร์มีอัตราการไหลที่ประมาณ 6 m³/hr.



รูปที่ 1 แผนผังการสร้างน้ำโอโซน โดยระบบหัวดีฟิวเซอร์



รูปที่ 2 แผนผังการสร้างน้ำโอโซน โดยระบบหัวฉีดเวนจูรี

ส่วนรูปที่ 2 แสดงระบบหัวฉีดเวนจูรี ส่วนประกอบหลักของระบบนี้ ได้แก่ เครื่องผลิตโอโซนซึ่งใช้การแตกตัวของโมเลกุลออกซิเจนเป็นไอออนโดยกระบวนการโคโรนาดีสชาร์จ (Corona Discharge) เพื่อผลิตก๊าซโอโซนในอัตรา 5 g/hr หัวฉีดเวนจูรีใช้รุ่น Mazzei Injection Venturi Model-1585X ก๊าซโอโซนที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดโอโซนจะถูกดูดผ่านหัวฉีดเวนจูรี และกระจายลงในน้ำซึ่งจะรวมตัวเป็นน้ำโอโซน สำหรับบรรจุน้ำที่ใช้ในการกักเก็บน้ำโอโซนและบ่มน้ำ SUNNYCPM-200 อัตราการไหลสูงสุด

ณ. ไชยวงศ์ ส. จตุรงค์ล้ำเลิศ ข. นิตน์วีจิตร และ จ. วาฤทธิ

500 L/min ใช้เพื่อสร้างความแตกต่างของแรงดันเพื่อให้ก๊าซโอโซนผสมกับน้ำในหัวฉีดเวนจูรี

ในการวัดค่าความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำ (Ozonated water, Ow) โดยทำการวัด 3 ซ้ำ เพื่อนำไปหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, SD) ซึ่งในการวัด Ow ทำการวัดที่เวลาใด ๆ จน Ow อิ่มตัว และค่าสีปรากฏของน้ำ ใช้เครื่อง Spectrophotometer HANNA HI801 โดยทำการวิเคราะห์ด้วย Colorimetric DPD method [14]

กระบวนการถ่ายเทโอโซนจากสถานะก๊าซไปสู่สถานะของเหลว ซึ่งอัตราเร็วของการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของโอโซนในสถานะของเหลวเข้าใกล้สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิและความดันบรรยากาศขณะนั้น [9] โดยสามารถประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเชิงปริมาตร ($k_L a$) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (1)

$$\frac{dc}{dt} = k_L a(C_s - C_t) \quad (1)$$

เมื่อ C_s คือ ความเข้มข้น ณ สภาวะสมดุล หน่วยเป็น (mg/L) และ C_t คือ ความเข้มข้น ณ เวลาใด ๆ หน่วยเป็น (mg/L)

การดำเนินการประยุกต์ใช้ระบบการสร้างน้ำโอโซนในการบำบัดน้ำทิ้งหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิตสตรอว์สไปรูลินา โดยในการบำบัดได้เลือกใช้โอโซนเข้ามาช่วยในการบำบัดน้ำทิ้งนี้ เนื่องจากคุณสมบัติในการออกซิไดซ์การอินทรีย์ อนินทรีย์ และยังสามารถยับยั้งกลิ่น ฟอสฟอรัส รวมถึงกำจัดจุลินทรีย์ [3-5] ในการวิจัยนี้ได้ใช้สองวิธีในการบำบัดน้ำทิ้งหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิตของสตรอว์สไปรูลินา คือระบบหัวตีฟิวเจอร์ และระบบหัวฉีดโอโซนเวนจูรี โดยทดลองที่ระดับน้ำ 100 L อุณหภูมิมีน้ำอยู่ในช่วง 27-30 °C ค่าความเป็นกรดต่างก่อนการบำบัดอยู่ในช่วง 9-10 เครื่องกำเนิดโอโซน QLA-5G-P อัตราการผลิตโอโซน 5 g/hr และอัตราการไหล 16 L/min

โดยได้กำหนดตัวแปรที่มีความสำคัญเพื่อป้องกันความสามารถของโอโซนที่สามารถบำบัดน้ำได้ดีขึ้น โดยได้

เลือกค่าอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (Dissolved organic carbon, DOC) แล้วคำนวณค่า เปอร์เซ็นต์การลดลงของอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (%DOC Removal) เพื่อป้องกันความสามารถของโอโซนในการบำบัดน้ำหลังการเก็บเกี่ยวสตรอว์สไปรูลินา ได้ดังสมการที่ (2)

$$\% \text{DOC Removal} = \frac{\text{DOC}_0 - \text{DOC}_t}{\text{DOC}_0} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ DOC_0 คือ ค่าอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำเริ่มต้น (mg/L) และ DOC_t คือ ค่าอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำที่เวลาใด ๆ (mg/L) ซึ่งค่าปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนในน้ำตรวจวัดโดยใช้การไตเตรทตามวิธีมาตรฐาน วัดตามมาตรฐาน Standard Method 5310C ด้วยเทคนิค Ultra violet-visible spectrophotometer ในหน่วย mg/L [15]

ตัวแปรที่สำคัญอีกตัวที่ใช้ป้องกันอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโอโซนและการลดลงของค่าอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ คือจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยา (Kinetics, k) โดยจะใช้การวิเคราะห์ดังสมการที่ (3) แสดงจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง (First-order kinetics) และ (4) แสดงจลนพลศาสตร์อันดับสอง (Second-order kinetics) ตามลำดับ [11]

$$\ln \frac{\text{DOC}_0}{\text{DOC}_t} = k \cdot t \quad (3)$$

$$\frac{1}{\text{DOC}_t} - \frac{1}{\text{DOC}_0} = k \cdot t \quad (4)$$

เมื่อ t คือเวลาในการบำบัด และค่า k คือค่าคงที่อัตราจลนพลศาสตร์

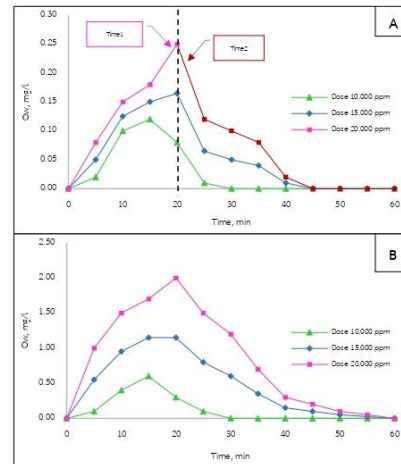
3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ผลการศึกษาเพื่อสร้างน้ำโอโซนจากปัจจัยทั้งค่าความเข้มข้นของก๊าซโอโซน ปริมาณของน้ำ และอุณหภูมิของน้ำในการผลิตน้ำโอโซน มีดังนี้

3.1 การศึกษาผลความเข้มข้นของก๊าซโอโซน (Ozone Concentration, Dose) ต่อค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรของโอโซนละลายในน้ำ

เมื่อเตรียมก๊าซโอโซนที่ความเข้มข้น 10,000 15,000 และ 20,000 ppm ซึ่งควบคุมอุณหภูมิในช่วง 27-30 °C ค่า pH เริ่มต้นในช่วง 8-8.5 และใช้ปริมาตรน้ำที่ 50 L โดยได้เปรียบเทียบการสร้างน้ำโอโซนของระบบหัวฉีดฟิวเจอร์และระบบหัวฉีดเวนจูรีสามารถแสดงในรูปที่ 5

ซึ่งพบว่าระบบหัวฉีดเวนจูรีสามารถสร้างน้ำโอโซนที่มีความเข้มข้นสูงกว่าระบบหัวฉีดฟิวเจอร์ โดยที่ความเข้มข้นของก๊าซโอโซน (Ozone Concentration, Dose) 20,000 ppm มีค่าความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำ (Ozonated water, Ow) เวลาที่ใช้ในการสร้างน้ำโอโซน (Reaction, Time1) เวลาที่สลายตัว (Decomposition, Time2) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรของโอโซนละลายน้ำ (k_{a1}) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรของการสลายตัวของโอโซนในน้ำ (k_{a2}) เป็น 2.0 mg/L 20 min 40 min 0.179 min^{-1} และ 0.098 min^{-1} ตามลำดับ



รูปที่ 5 ผลของค่า Dose ที่มีต่อค่าความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำสูงสุด (A) ระบบหัวฉีดฟิวเจอร์ (B) ระบบหัวฉีดเวนจูรีสำหรับ

ตารางที่ 1 ผลของความเข้มข้นของก๊าซโอโซนต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรของโอโซนละลายในน้ำ

System	Dose (ppm)	Ow (mg/L)	Time1 (min)	Time2 (min)	k_{a1} (min^{-1})	k_{a2} (min^{-1})
Diffuser	10,000	0.12±0.02	15	15	0.098	0.196
	15,000	0.15±0.01	20	25	0.111	0.134
	20,000	0.25±0.01	15	25	0.139	0.108
Venturi	10,000	0.60±0.07	15	15	0.161	0.179
	15,000	1.15±0.06	15	20	0.167	0.104
	20,000	2.00±0.08	20	40	0.179	0.098

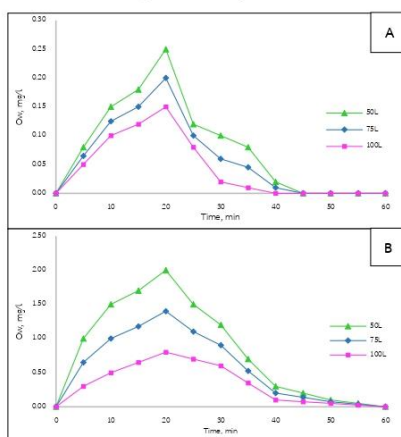
ตารางที่ 1 แสดงผลการเปรียบเทียบของ ค่า Ow Time1 Time2 k_{a1} และ k_{a2} สำหรับค่า Dose 20,000 ppm พบว่าระบบหัวฉีดเวนจูรีมีเปอร์เซ็นต์มากกว่าระบบหัวฉีดฟิวเจอร์เป็น 87.5 25.0 37.5 22.3 และ 10.2% ตามลำดับ ซึ่งโดยปกติการนำน้ำโอโซนไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ควรมีค่าระดับความเข้มข้นอยู่ที่ 0.5 mg/L เป็นต้นไป [1]

3.2 การศึกษาผลปริมาตรน้ำ (Volume) ต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรของโอโซนละลายในน้ำ

เมื่อเตรียมปริมาตรน้ำ 50 75 และ 100 L ซึ่งควบคุมอุณหภูมิในช่วง 27-30 °C ค่าความเป็นกรดต่างเริ่มต้นในช่วง 8-8.5 และใช้ก๊าซโอโซน Dose 20,000 ppm โดยได้

ณ. ไชยวงศ์ ส. จตุรงค์ล้ำเลิศ ช. บิณฑ์วิจิตร และ จ. วาฤทธิ

เปรียบเทียบการสร้างน้ำไอโซนมีโดยระบบหัวฉีดพิวเซอร์ และระบบหัวฉีดเวนจูรี ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ผลของปริมาณน้ำที่มีต่อค่าความเข้มข้นของไอโซนละลายในน้ำสูงสุด (A) ระบบหัวฉีดพิวเซอร์ (B) ระบบหัวฉีดเวนจูรี

ซึ่งพบว่าระบบหัวฉีดเวนจูรีสามารถสร้างน้ำไอโซนที่มีความเข้มข้นได้สูงกว่าระบบหัวฉีดพิวเซอร์ โดยมีค่าความเข้มข้นของไอโซนละลายในน้ำสูงสุดที่ (Ow) เวลาที่ใช้ในการสร้าง (Time1) เวลาที่สลายตัว (Time2) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรของไอโซนละลายน้ำ (k_{a1}) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรของการสลายตัวของไอโซนในน้ำ (k_{a2}) สำหรับปริมาณน้ำ (Volume) 50 L เป็น 2.0 mg/l 20 min 40 min 0.179 min^{-1} และ 0.098 min^{-1} ตามลำดับ

สำหรับตารางที่ 2 แสดงผลการเปรียบเทียบของค่า Ow Time1 Time2 k_{a1} และ k_{a2} สำหรับค่า Dose 20,000 ppm ระหว่างระบบหัวฉีดเวนจูรีที่มีเปอร์เซ็นต์มากกว่าระบบหัวฉีดพิวเซอร์เป็น 87.5 25.0 37.5 22.3 และ 10.2% ตามลำดับ ซึ่งค่า k_{a1} ที่สูงแสดงถึงการละลายน้ำของไอโซนอย่างมีประสิทธิภาพ และ k_{a2} ที่ต่ำบ่งบอกถึงการสลายตัวของไอโซนที่ยาวนาน

ตารางที่ 2 ผลของปริมาณน้ำต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรของไอโซนละลายในน้ำ

System	Volume (L)	Ow (mg/l)	Time1 (min)	Time2 (min)	k_{a1} (min^{-1})	k_{a2} (min^{-1})
Diffuser	50	0.25±0.01	15	25	0.139	0.108
	75	0.20±0.04	15	25	0.128	0.109
	100	0.15±0.01	15	20	0.124	0.125
Venturi	50	2.00±0.08	20	40	0.179	0.098
	75	1.40±0.02	20	40	0.175	0.098
	100	0.80±0.01	20	40	0.161	0.099

จากการศึกษาความเข้มข้นของก๊าซไอโซน (Dose) และปริมาณน้ำ (Volume) ต่อค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรของไอโซนละลายในน้ำ พบว่ายิ่งก๊าซไอโซน Dose สูงและปริมาณของน้ำที่น้อย จะสามารถสร้างน้ำไอโซนที่มีความเข้มข้นสูงมากกว่าที่ก๊าซไอโซน Dose น้อยและปริมาณน้ำมาก โดยจากการศึกษาข้างต้นจะเห็นว่าระบบการสร้างน้ำไอโซนด้วยระบบหัวฉีดเวนจูรีสามารถ

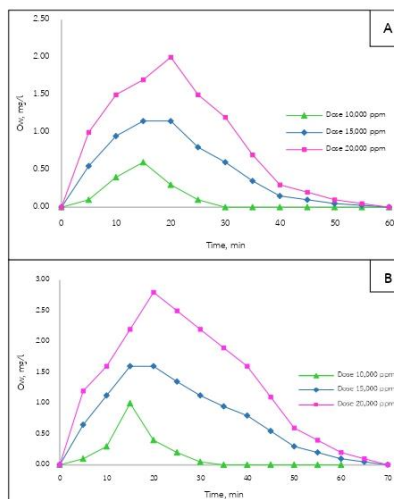
สร้างน้ำไอโซนที่มีความเข้มข้นสูงกว่าระบบหัวฉีดพิวเซอร์ 8 เท่า และมีเวลาที่สลายตัวมากกว่าถึง 1.6 เท่า

3.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิ น้ำ (Temperature, Temp.) ต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของโอโซนละลายในน้ำ

จากการทดลองก่อนหน้าจะได้ว่าระบบหัวฉีดเวนจูรีสามารถสร้างน้ำโอโซนที่มีความเข้มข้นสูงกว่าระบบหัวดีฟิวเซอร์ และมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรของโอโซนละลายในน้ำ (k_{a1}) สูงกว่าจากข้อมูลดังกล่าวจึงได้ทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรของโอโซนละลายในน้ำที่ปริมาตรน้ำ 50 L โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของก๊าซโอโซน (Dose) 3 ระดับคือ 10,000 15,000 และ 20,000 ppm และเปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำ (Temperature, Temp.) 2 ช่วงอุณหภูมิ คือน้ำอุณหภูมิปกติ (27-30 °C) และน้ำเย็น (15-18 °C) และเลือกใช้ระบบสร้างน้ำโอโซนที่สามารถสร้างน้ำโอโซนได้ความเข้มข้นสูงที่สุดจากการศึกษาที่ 3.1 และ 3.2 โดยรูปที่ 7 แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำสูงสุด

จากรูปที่ 7 พบว่าที่ก๊าซโอโซน Dose 20,000 ppm และปริมาตรน้ำ 50 L ผลของช่วงอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปส่งผลต่อความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำ และพบว่าระบบหัวฉีดเวนจูรีสามารถสร้างน้ำโอโซนที่น้ำอุณหภูมิปกติได้ความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำ (Ow) 2.0 mg/L เวลาที่ใช้ในการสร้าง (Time1) 20 min เวลาที่สลายตัว

(Time2) 40 min และน้ำโอโซนที่อุณหภูมิเย็น ได้ความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำ (Ow) 2.80 mg/L เวลาที่ใช้ในการสร้าง (Time1) 20 min เวลาที่สลายตัว (Time2) 50 min



รูปที่ 7 ผลของค่า Dose ที่มีต่อค่าความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำ (A) การสร้างน้ำโอโซนในน้ำอุณหภูมิปกติ (27-30 °C) และ (B) การสร้างน้ำโอโซนในอุณหภูมิเย็น (15-18 °C)

ตารางที่ 3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของโอโซนละลายในน้ำ

Temp. (°C)	Dose (ppm)	Ow (mg/L)	Time1 (min)	Time2 (min)	k_{a1} (min ⁻¹)	k_{a2} (min ⁻¹)
27-30 °C	10,000	0.60±0.07	15	15	0.161	0.179
	15,000	1.15±0.06	15	40	0.167	0.104
	20,000	2.00±0.08	20	40	0.179	0.098
15-18 °C	10,000	1.00±0.09	15	20	0.193	0.148
	15,000	1.60±0.05	15	50	0.197	0.081
	20,000	2.80±0.02	20	50	0.198	0.073

ณ. ไชยวงศ์ ส. จตุรงค์ล้ำเลิศ ช. นิตน์นวิจิตร และ จ. วาฤทธิ

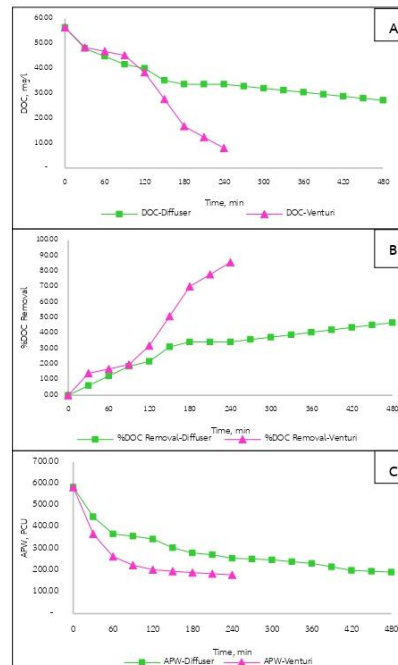
ตารางที่ 3 แสดงผลของอุณหภูมิน้ำต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรของโอโซนละลายในน้ำ (k_{a1}) ที่ก๊าซโอโซน Dose 20,000 ppm พบว่าระบบหัวฉีดเวนจูรีที่อุณหภูมิเย็น (15-18 °C) มีค่าเท่ากับ 0.198 min^{-1} จะสูงกว่าที่อุณหภูมิปกติ (27-30 °C) ที่มีค่าเพียง 0.179 min^{-1} คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่สูงกว่าประมาณ 9.6% นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรของการสลายตัวของโอโซนในน้ำ (k_{a2}) ที่ก๊าซโอโซน Dose 20,000 ppm พบว่าระบบหัวฉีดเวนจูรีที่อุณหภูมิเย็นมีค่าเท่ากับ 0.073 min^{-1} จะต่ำกว่าที่อุณหภูมิปกติที่มีค่าเพียง 0.098 min^{-1} ซึ่งที่อุณหภูมิเย็นสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมอาหารแช่เย็นได้ด้วย

3.4 การประยุกต์ใช้ระบบการสร้างน้ำโอโซนในการบำบัดน้ำทิ้งหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิตสาหร่ายสไปรูลินา

จากการศึกษาผลกระทบด้านความเข้มข้นของก๊าซโอโซน ปริมาณน้ำ และอุณหภูมิของน้ำที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของโอโซนละลายในน้ำ จึงได้มีแนวคิดในการประยุกต์ใช้ระบบการสร้างน้ำโอโซนโดยระบบหัวฉีดเวนจูรี และระบบหัวตีฟิวเซอร์ เพื่อเปรียบเทียบกัน โดยจะใช้เครื่องกำเนิดโอโซนขนาด 5 g/hr ปริมาณน้ำ 50 L และอุณหภูมิของน้ำเป็นอุณหภูมิปกติในช่วง 27-30 °C สำหรับการบำบัดน้ำทิ้งหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิตสาหร่ายสไปรูลินา โดยจะทำการตรวจสอบค่าอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (DOC) ในหน่วย mg/l และค่าสีปรากฏ (APW) ในหน่วย PCU รวมถึงจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยา

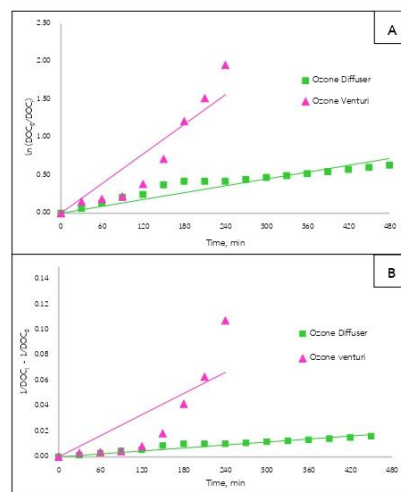
รูปที่ 8 แสดงผลของโอโซนในการบำบัดน้ำทิ้งหลังการเก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูลินา โดยจากรูปที่ 8(A) พบว่าการทดลองการสร้างน้ำโอโซนก่อนหน้า ที่ระบบหัวฉีดเวนจูรีสามารถสร้างน้ำโอโซนที่มีความเข้มข้นสูงกว่าระบบหัวตีฟิวเซอร์ และยังมีความเร็วที่สลายตัว ซึ่งยาวกว่าเพื่อนำไปใช้งาน จึงส่งผลให้ระบบหัวฉีดเวนจูรีสามารถบำบัดน้ำทิ้งจากสาหร่ายสไปรูลินาได้ดีกว่าระบบหัวตีฟิวเซอร์ โดยที่มีค่าอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (DOC) เริ่มต้นที่ 56.4 mg/l

เท่ากัน แต่ระบบหัวฉีดเวนจูรีนั้นสามารถลด DOC ลงได้มากถึง 85.86% ในเวลา 4 ชั่วโมง แต่ระบบการกระจายฟองด้วยตีฟิวเซอร์นั้นกลับใช้เวลามากกว่า 2 เท่าแต่สามารถลด DOC ได้เพียง 52% นอกจากนี้ระบบหัวฉีดเวนจูรียังสามารถขจัดสีปรากฏของน้ำ (APW) 69.35% ในเวลา 4 ชั่วโมง แต่อีกระบบสามารถขจัดสีได้ 67.12% ในเวลา 8 ชั่วโมง ดังรูปที่ 8(C) ซึ่งพบว่าสามารถนำน้ำหลังการบำบัดดังกล่าวกลับไปใช้เพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาต่อได้ โดยสามารถลดการปนเปื้อนลง (Contaminate) [11]



รูปที่ 8 ผลของโอโซนในการบำบัดน้ำทิ้งหลังการเก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูลินา (A) การลดลงของ DOC เทียบกับความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำที่เพิ่มขึ้น (B) เปอร์เซ็นต์การลดลงของ DOC (C) สีปรากฏของน้ำจากการบำบัด

จากการทดลองของ DOC การบำบัดด้วยระบบหัวฉีดโอโซนเวนจูรีและระบบหัวตีฟิวเซอร์ จะสามารถหาอัตราจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง (First-order kinetics) และอันดับสอง (Second-order kinetics) ได้ดังรูปที่ 9 โดยจะเห็นว่าน้ำทิ้งหลังการเก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูลินาที่บำบัดด้วยระบบหัวฉีดโอโซนเวนจูรี มีค่าจลนพลศาสตร์ (k) สูงกว่าการบำบัดด้วยระบบการกระจายฟองด้วยโอโซนตีฟิวเซอร์ เมื่อเปรียบเทียบกับจลนพลศาสตร์ในอันดับเดียวกัน



รูปที่ 9 ผลของจลนพลศาสตร์การเกิดปฏิกิริยา (A) แบบจำลองอันดับหนึ่ง (B) แบบจำลองอันดับสอง

จากตารางที่ 4 ค่าจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง ของการขจัด DOC เมื่อใช้การบำบัดด้วยระบบหัวฉีดโอโซนเวนจูรีและระบบหัวตีฟิวเซอร์ คือ 6.5×10^{-3} และ $1.5 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ ตามลำดับ เมื่อใช้จลนพลศาสตร์อันดับสอง จะได้ 3.0×10^{-4} และ $4.0 \times 10^{-5} \text{ L/g-min}$ ตามลำดับ โดยค่า k ที่สูงหมายถึงการขจัด DOC ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นระบบหัวฉีดโอโซนเวนจูรี จึงสามารถขจัด DOC ได้ดีกว่าระบบหัวตีฟิวเซอร์

นอกจากนี้ในการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโอโซนและการลดลงของค่าอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำนั้นสามารถใช้สมการจลนพลศาสตร์เพื่อทำนายค่าได้ โดยสามารถตัดสินใจเลือกได้จากค่าสัมประสิทธิ์ของความเชื่อมั่น (R^2) ดังแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งระบบหัวฉีดโอโซนเวนจูรี สามารถใช้สมการจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งทำนายได้ดีกว่า โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.8508 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [11] ส่วนระบบหัวตีฟิวเซอร์ สามารถใช้สมการจลนพลศาสตร์อันดับสองทำนายได้ดีกว่า โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9169

ตารางที่ 4 อัตราจลนพลศาสตร์ของการลด DOC ตามจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งและอันดับสอง

Treatment Method	First-order kinetics		Second-order kinetics	
	R^2	k (min^{-1})	R^2	k (L/g-min)
Ozone Diffuser	0.8423	1.5×10^{-3}	0.9169	4.0×10^{-5}
Ozone Venturi	0.8508	6.5×10^{-3}	0.6718	3.0×10^{-4}

4. สรุป

โดยจากการศึกษาพบว่าระบบการสร้างน้ำโอโซนด้วยหัวฉีดเวนจูรีสามารถสร้างน้ำโอโซนที่มีความเข้มข้นสูงกว่าระบบหัวตีฟิวเซอร์ 8 เท่า และมีเวลาที่สลายตัวสูงมากกว่า

ถึง 1.6 เท่า นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตร (k_{La}) ที่ก๊าซโอโซน Dose และปริมาตรน้ำเท่ากันของระบบหัวฉีดเวนจูรีมากกว่าระบบหัวตีฟิวเซอร์ 22.3% นอกจากนี้อุณหภูมิน้ำยังมีผลต่อความเข้มข้นของโอโซน

ณ. ไชยวงศ์ ส. จตุรงค์ล้ำเลิศ ช. นิตน์นวิจิตร และ จ. วาฤทธิ

ละลายในน้ำ โดยพบว่าระบบหัวฉีดเวเนเจอร์สามารถสร้างน้ำโอโซนที่ช่วงอุณหภูมิน้ำเย็น (15-18 °C) ได้สูงกว่าน้ำอุณหภูมิปกติ (27-30 °C) คิดเป็น 9.6% สำหรับการประยุกต์ใช้ระบบหัวฉีดโอโซนเวเนเจอร์ไปบำบัดน้ำทั้งจากการเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาเพื่อลดค่าอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (DOC) และค่าสีปรากฏของน้ำ (APW) ลงได้ทำให้สามารถนำหลังการบำบัดดังกล่าวกลับไปใช้เพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรู

ลินาต่อได้ ซึ่งเป็นการลดการปนเปื้อน ค่าต้นทุนในส่วนของน้ำเลี้ยง และลดการปลดปล่อยน้ำเสียสู่สิ่งแวดล้อมด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Colm O'Donnell, B.K. Tiwari, P.J. Cullen and Rip G. Rice. 2012. Ozone in food processing. Blackwell Publishing Inc.
- [2] ปฏิวัติ บุญมา, ชาญณรงค์ หนูอินทร์ และประมุข อุณหเลขกะ. 2561. การประยุกต์ใช้ไมโครบับเบิลโอโซนร่วมกับระบบเติมอากาศแบบเวเนเจอร์ในการบำบัดน้ำในคลองพระพิมลราชา ตลาดน้ำไทรน้อย อำเภไทรน้อย จังหวัดนนทบุรี. RMUTSB ACADEMIC JOURNAL, 6(1), 45-54.
- [3] ภัทรพล กล้าเสือ. 2560. การบำบัดสีและกลิ่นของน้ำเสียจากห้องฟาร์มด้วยโอโซน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [4] สมเกียรติ จตุรงค์ล้ำเลิศ, ชนวัฒน์ นิตน์นวิจิตร, จตุรภัทร วาฤทธิ และจกมล พรหมยะ. 2562. การเสริมอัตราการถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชุดคาร์บอนเตอร์สำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา. น. 53-59. ใน การประชุมวิชาการการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวล ครั้งที่ 18. โรงแรม กระบี่พร้อมท์ เบย์ รีสอร์ท จังหวัดกระบี่.
- [5] สุพิชฌาย์ วิจารณรงค์. 2550. ผลของโอโซนต่อประสิทธิภาพการขจัดสี. สารนิพนธ์ปริญญาตรี. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [6] อานอบ คันทะชา. 2545. การศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากคลองสำโรงด้วยโอโซน. สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยทักษิณ.
- [7] Brendan C. Siegler. 2011. Ozone technology in the food industry. Nova Science Publisher, Inc.
- [8] Brian A. Schunacher. 2002. Methods for the Determination of Total Organic Carbon (TOC) In Soils and Sediments. Ecological Risk Assessment Support Center Office of Research and Development.
- [9] Eva F. Karamah, Setijo Bismo, Letti Annasari and Widodo W. Purwanto. 2010. Mass Transfer Study On Micro-Bubbles Ozonation In A Bubble Column. International Journal of Chemical Engineering Research, 2(2), 243-253.
- [10] H. Ikeura, F. Kobayashi and M. Tamaki. 2011. Removal Of Residual Pesticides In Vegetables Using Ozone Microbubbles. Journal of Hazardous Material, 181(1), 956-959.
- [11] Hadiyanto Hadiyanto, Marcelinus Christwardana, Detian Indah Pratiwi, Silviana Silviana, Muhammad Syarifudin and Adian Khoironi. 2019. Rubber wastewater treatment using UV, ozone, and UV/ozone and its effluent potency for microalgae Spirulina platensis cultivation medium. Cogent Engineering, 1-11.

Engng.J.CMU.[2021] 28 [1]

- [12] Melicia Cintia Galdeano, Allan Eduardo Wilhelm, Isabella Borges Goulart, Renata Valeriano Tonon, Otnie Freitas-Silva, Rogério Germani and Davy William Hidalgo Chávez. 2018. Effect of water temperature and pH on the concentration and time of ozone saturation. *Brazilian Journal of Food Technology*, 21, 1-7.
- [13] Nur Syahirah Zainuddin, Fuei Pien Chee, Jackson Hian Wui Chang and Jedol Dayou. 2017. Development and Operational Implementation of a Novel Method for Production of Ozonated Water *Transactions on Science and Technology*, 4(3), 218-223.
- [14] APHA, AWWA, WEF. 1998. Standard methods for the examination of water and wastewater. In, 20th edition APHA, Washington.
- [15] พรรณธิพา ไชยมงคล, อัญศิภรณ์ จันทร์หอม, และสุรพงษ์ วัฒนะจีระ. 2551. การสำรวจลักษณะสารอินทรีย์ละลายน้ำของน้ำในกระบวนการผลิตน้ำประปาอ่างแก้ว มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. น. 14-19. ใน การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 6. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	ณัฐพล ไชยวงศ์
เกิดเมื่อ	23 มิถุนายน 2540
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2559 ศึกษามัธยมปลาย โรงเรียนสตรีศรีน่าน จังหวัดน่าน พ.ศ. 2563 ปริญญาตรี มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่

