



การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันด้วยวิธีโอโซน



อภिरตี ยิ่งประยูร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ศึกษา

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

2566

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันด้วยวิธีโอโซน



อภิรตี ยิ่งประยูร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ศึกษา

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

2566

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

Study of efficiency of wastewater treatment in palm oil industry by ozonation



APIRADEE YINGPRAYOON

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR MASTER DEGREE OF SCIENCE
IN PHYSICS EDUCATION
FACULTY OF SCIENCE
BURAPHA UNIVERSITY

2023

COPYRIGHT OF BURAPHA UNIVERSITY

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้พิจารณา
วิทยานิพนธ์ของ อภิรดี ยิ่งประยูร ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ศึกษา ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

.....

(ดร.อรรถพล เขยสุภเกตุ)

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิเชียร ศิริพรหม)

..... ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตรา เกตุแก้ว)

..... กรรมการ

(ดร.อรรถพล เขยสุภเกตุ)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิเชียร ศิริพรหม)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนัสถา รัตนนะ)

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. อุษาวดี ต้นติวรานุรักษ์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยบูรพา อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการ
การศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ศึกษา ของมหาวิทยาลัยบูรพา

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิทวัส แจ่มเอียด)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

61920215: สาขาวิชา: ฟิสิกส์ศึกษา; วท.ม. (ฟิสิกส์ศึกษา)

คำสำคัญ: น้ำเสียในอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน, โอโซน

อภิรดี ยิ่งประยูร : การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันด้วยวิธีโอโซน. (Study of efficiency of wastewater treatment in palm oil industry by ozonation) คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: อรรถพล เชยศุภเกตุ, วิเชียร ศิริพรหม ปี พ.ศ. 2566.

ในการวิจัยนี้สนใจที่ทำการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมปาล์ม น้ำมันด้วยวิธีโอโซน ร่วมกับอุปกรณ์สร้างฟองแบบหัวทรายทางการค้า เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการใช้ก๊าซโอโซนแทนการใช้สารเคมีในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย โดยจะทำการผลิตก๊าซโอโซนด้วยเครื่องผลิตก๊าซโอโซนแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ ที่มีก๊าซออกซิเจน หรืออากาศ เป็นก๊าซปฏิกิริยา ภายใต้การกำหนดสภาวะที่เหมาะสม เพื่อให้สามารถผลิตก๊าซโอโซนที่มีความเข้มข้นสูงที่สุด จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจน เป็นก๊าซปฏิกิริยา จะสามารถผลิตก๊าซโอโซนได้ความเข้มข้นสูงสุดที่ 15.77 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใต้สภาวะอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 11 ลิตรต่อ นาที และช่วงเวลาในการผลิตก๊าซโอโซนนาน 15 นาที แต่เมื่อใช้อากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยา จะสามารถผลิตก๊าซโอโซนได้ความเข้มข้นสูงสุดเพียง 13.80 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใต้สภาวะอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 11 ลิตรต่อ นาที และช่วงเวลาในการผลิตก๊าซโอโซนนาน 15 นาที

นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาเทคนิคการสร้างฟองก๊าซ ด้วยอุปกรณ์สร้างฟองแบบหัว ทรายทางการค้า ทั้งชนิดรูปทรงขนาดนาโนทางการค้า และชนิดรูปทรงขนาดไมโครทางการค้า เพื่อ กำหนดสภาวะในการสร้าง “อนุมูลอิสระ” ในรูปของอนุมูลอิสระกลุ่มที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ สำคัญ (reactive oxygen species : ROS) ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างน้ำกับฟองก๊าซ โอโซน ก่อให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิลหรือไฮดรอกซิลแรดดิคัล ซึ่งผลจากการศึกษาพบว่า เมื่อใช้ ออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา ทั้งหัวทรายชนิดรูปทรงขนาดนาโนทางการค้า และหัวทรายชนิดรูปทรง ขนาดไมโครทางการค้า สามารถสร้างอนุมูลอิสระ ROS ได้ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความเข้มข้นของค่า ศักย์ออกซิไดซ์ (Oxidation reduction potential :ORP) สูงสุดอยู่ที่ 821 มิลลิโวลต์ และ 820 มิลลิ โวลต์ สำหรับหัวทรายรูปทรงขนาดนาโนทางการค้าและไมโครทางการค้า ตามลำดับ แต่เมื่อใช้อากาศ เป็นก๊าซปฏิกิริยา สามารถสร้างอนุมูลอิสระ ROS ได้แตกต่างกัน โดยหัวทรายชนิดรูปทรงขนาดนาโน ทางการค้า มีค่าความเข้มข้นของ ORP สูงสุดอยู่ที่ 682 มิลลิโวลต์ ในขณะที่หัวทรายชนิดรูปทรง ขนาดไมโครทางการค้า มีค่าความเข้มข้นของ ORP สูงสุดอยู่เพียง 569 มิลลิโวลต์ จากนั้นเมื่อบำบัด น้ำเสียด้วยวิธีโอโซน ร่วมกับอุปกรณ์สร้างฟองแบบหัวทรายทางการค้า ชนิดรูปทรงขนาดนาโนทาง ทางการค้า โดยใช้ก๊าซออกซิเจน หรืออากาศ เป็นก๊าซปฏิกิริยา สำหรับการผลิตก๊าซโอโซนไปทดสอบกับ

ตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน พบว่าลักษณะสีของตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันมีลักษณะสีเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน และเมื่อพิจารณาคุณลักษณะทางเคมี พบว่าค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand : BOD) ลดลงมากกว่า 98% และค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand : COD) ลดลงมากกว่า 98% ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่าระบบบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนชั้นร่วมกับอุปกรณ์สร้างฟองแบบหัวทรายทางการค้า สามารถนำมาใช้บำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันได้อย่างมีประสิทธิภาพ



61920215: MAJOR: PHYSICS EDUCATION; M.Sc. (PHYSICS EDUCATION)

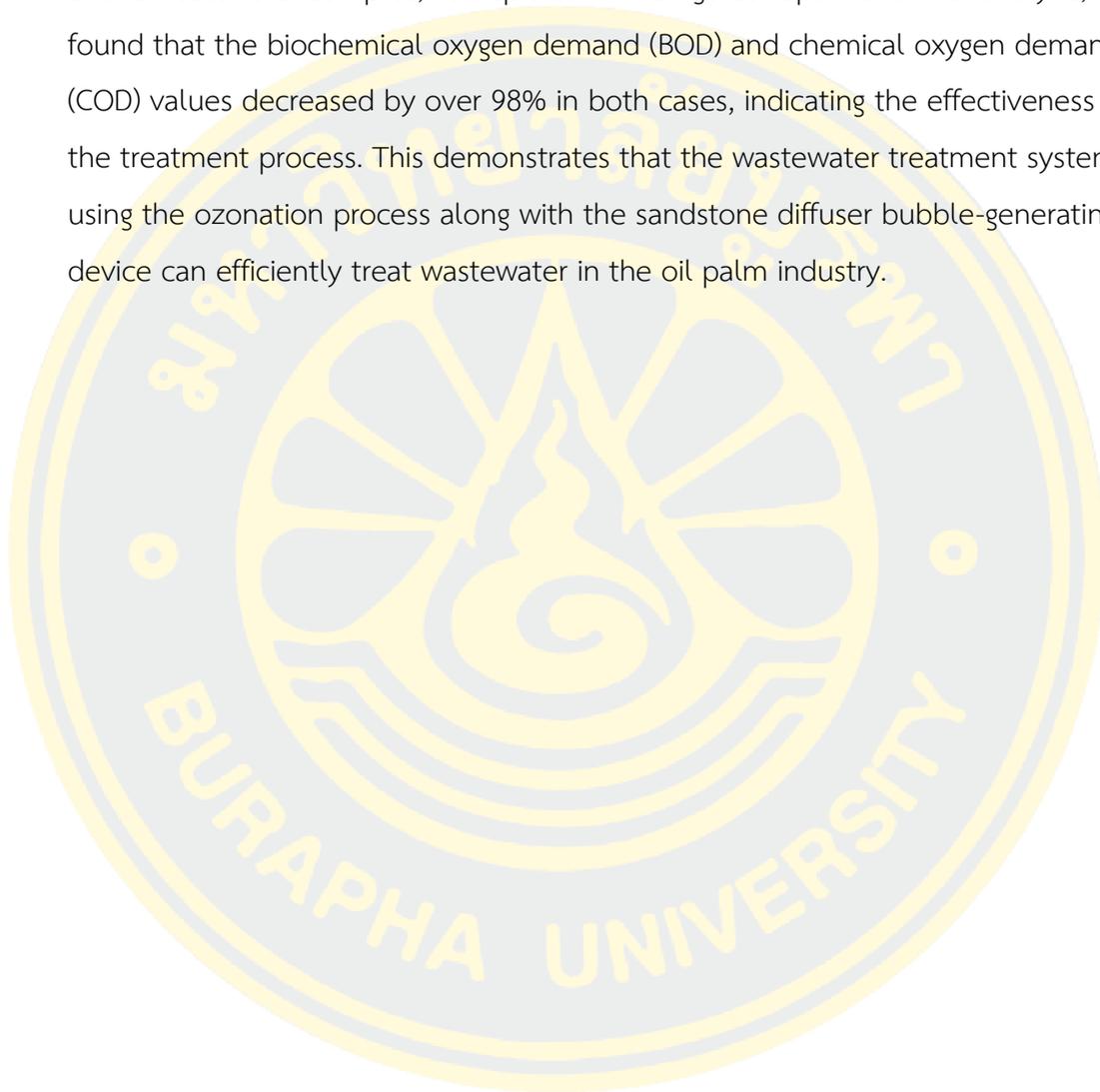
KEYWORDS: Ozonation process, AOPs, ROS

APIRADEE YINGPRAYOON : STUDY OF EFFICIENCY OF WASTEWATER TREATMENT IN PALM OIL INDUSTRY BY OZONATION. ADVISORY COMMITTEE: ATTAPOL CHOESUPPAKET, Ph.D. WICHIAN SIRIPROM, Ph.D. 2023.

In this study, the focus is on investigating the effectiveness of wastewater treatment from oil palm extraction plants using the ozonation process along with a bubble-generating device, specifically a sandstone diffuser. The aim is to assess the feasibility of using ozone gas in the wastewater treatment process instead of chemical agents. Ozone gas is produced using an ozonizer with the dielectric Barrier Discharge technique to generate ozone gas, utilizing oxygen and air as the reactive gases. The study found that when using oxygen gas as the working gas, the ozone gas concentration reached a maximum of 15.77 mg/L under conditions of an oxygen flow rate of 11 L/min and a production time of 15 minutes. However, when using air as the working gas, the maximum ozone gas concentration achieved was 13.80 mg/L under the same conditions.

Additionally, the study explored the technique of generating gas bubbles using an airstone, both with nano-sized and micron-sized pore configurations. This was done to create conditions for generating reactive oxygen species (ROS) in the form of free radicals, especially Hydroxyl radicals generated from the oxidation reaction between water and ozone gas bubbles. The results showed that when using oxygen as the reactive gas, both nano-sized and micron-sized pore airstones produced similar levels of ROS, with the highest oxidation-reduction potential (ORP) values reaching 821 mV and 820 mV, respectively. However, when using air as the reactive gas, the two airstone configurations showed different levels of ROS production, with the nano-sized pore airstone reaching a maximum ORP value of 682 mV, while the micron-sized pore airstone reached a maximum ORP value of only 569 mV.

Furthermore, when applying the ozonation process and airstone bubble-generating system to treat wastewater from oil palm extraction plants, using either oxygen or air as the reactive gas, the study observed a significant change in the color of the wastewater samples, as depicted in the figures. Upon chemical analysis, it was found that the biochemical oxygen demand (BOD) and chemical oxygen demand (COD) values decreased by over 98% in both cases, indicating the effectiveness of the treatment process. This demonstrates that the wastewater treatment system using the ozonation process along with the sandstone diffuser bubble-generating device can efficiently treat wastewater in the oil palm industry.



กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยเรื่อง การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันด้วยวิธีโอโซน สามารถดำเนินการจนประสบความสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์และสนับสนุนเป็นอย่างดีจาก ดร. อรรถพล เชยสุภเกตู ผศ.ดร.วิเชียร ศิริพรม ผศ.ดร.ธนัสถา รัตนะ ผศ.ดร.จิตรา เกตุแก้ว และอาจารย์ทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา ความรู้ ข้อคิด ข้อเสนอแนะ และปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนกระทั่งการวิจัยครั้งนี้สำเร็จเรียบร้อยด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ บริษัท สุขสมบูรณ์น้ำมันปาล์ม จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสีย และคุณธนศักดิ์ ณรังศรี ที่อำนวยความสะดวกในติดต่อและประสานงาน ในการเข้าเก็บตัวอย่างน้ำเสียสำหรับงานวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนร่วมงานทุกคนที่อำนวยความสะดวกและช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังว่างานวิจัยฉบับนี้คงเป็นประโยชน์สำหรับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง และผู้ที่สนใจศึกษาต่อไป

อภิรดี ยิ่งประยูร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ฌ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
บทที่ 2 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 การสกัดน้ำมันปาล์ม (Mill processing).....	3
2.2 การกลั่นบริสุทธิ์น้ำมันปาล์ม (Refine processing).....	5
2.3 การบำบัดน้ำเสีย.....	6
2.4 โอโซน.....	7
2.5 กระบวนการเกิดโอโซน.....	8
2.6 การผลิตโอโซนด้วยวิธีไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ.....	10
2.7 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ.....	11
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	12
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	15

3.1 ขั้นตอนการดำเนินการ	15
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	15
3.3 วิธีการทดลอง.....	17
3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล	20
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	22
4.1 ผลการศึกษารูปแบบและเงื่อนไขในการผลิตก๊าซโอโซนด้วยวิธีไดอิเล็กทริก แบรีเออร์ดีสชาร์จ โดยใช้ก๊าซออกซิเจน และอากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยา	23
4.1.1 ผลของอัตราการไหลในการผลิตก๊าซโอโซน เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา	23
4.1.2 ผลของอัตราการไหลในการผลิตก๊าซโอโซน เมื่อใช้อากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยา	25
4.1.3 ผลของเวลาในการผลิตก๊าซโอโซน เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา	29
4.1.4 ผลของเวลาในการผลิตก๊าซโอโซน เมื่อใช้อากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยา.....	31
4.2 ผลการศึกษาขนาดและปริมาณของฟองก๊าซโอโซน ที่สร้างจากอุปกรณ์สร้างฟองแบบหัวทราย ทางการค้า ในแต่ละรูปแบบ/เงื่อนไข	35
4.2.1 ลักษณะทางกายภาพของอุปกรณ์สร้างฟองอากาศ	35
4.2.2 การออกแบบสร้างและติดตั้งถังปฏิกรณ์อะคริลิกทรงกระบอก พร้อมอุปกรณ์สร้างฟอง แบบหัวทรายทางการค้า.....	36
4.2.3 สภาวะที่เหมาะสมในการสร้างฟองก๊าซโอโซน	37
4.2.3.1 ลักษณะทางกายภาพของฟองก๊าซโอโซน ที่มีก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา	38
4.2.3.2 ลักษณะทางกายภาพของฟองก๊าซโอโซน ที่มีอากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยา.....	43
4.2.4 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวอย่างน้ำ	48
4.2.4.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวอย่างน้ำ จากก๊าซโอโซนที่มีก๊าซ ออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา	48
4.2.4.2 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวอย่างน้ำ จากก๊าซโอโซนที่มีอากาศเป็น ก๊าซปฏิกิริยา.....	50

4.3 ประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันด้วยก๊าซโอโซน ร่วมกับอุปกรณ์ สร้างฟองแบบหัวทรายทางการค้า	53
4.3.1 ลักษณะทางกายภาพของน้ำเสียในอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันก่อนบำบัด	53
4.3.2 ลักษณะทางเคมีของน้ำเสียในอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันก่อนบำบัด	54
4.3.3 ลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน หลัง บำบัดด้วยระบบบำบัดที่ใช้ก๊าซโอโซน ที่มีก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกริยา ร่วมกับ อุปกรณ์สร้างฟองแบบหัวทรายชนิดรูพรุนขนาดนาโนทางการค้า.....	56
4.3.4 ลักษณะเคมีของตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน หลังบำบัดด้วย ระบบบำบัดที่ใช้ก๊าซโอโซน ที่มี ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกริยา ร่วมกับอุปกรณ์สร้าง ฟอง แบบหัวทราย ชนิดรูพรุนขนาดนาโนทางการค้า	58
4.3.5 ลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน หลัง บำบัดด้วยระบบบำบัดที่ใช้ก๊าซโอโซน ที่มีอากาศเป็นก๊าซปฏิกริยา ร่วมกับอุปกรณ์ สร้างฟองแบบหัวทรายชนิดรูพรุนขนาดนาโนทางการค้า	60
4.3.6 ลักษณะทางเคมีของตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน หลังบำบัดด้วย ระบบบำบัดที่ใช้ก๊าซโอโซน ที่มี ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกริยา ร่วมกับอุปกรณ์สร้าง ฟอง แบบหัวทราย ชนิด รูพรุนขนาดนาโน.....	62
บทที่ 5 สรุป อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ	65
บรรณานุกรม.....	68
ประวัติย่อของผู้วิจัย.....	71

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 คุณลักษณะของน้ำที่จกจากชั้นตอนต่างๆ ในการสกัดน้ำมันปาล์ม.....	6
ตารางที่ 2 เงื่อนไขของอัตราการไหลในการผลิตก๊าซไอโซนด้วยเครื่องผลิตก๊าซไอโซน แบบวิธีไดอิเล็กทริกแบรีเออร์ดีสชาร์จ.....	17
ตารางที่ 3 เงื่อนไขของเวลาในการผลิตก๊าซไอโซนด้วยเครื่องผลิตก๊าซไอโซนแบบวิธีไดอิเล็กทริก แบรีเออร์ดีสชาร์จ.....	18
ตารางที่ 4 รูปแบบและเงื่อนไขที่มีผลต่อขนาด และปริมาณของฟองก๊าซไอโซน.....	18
ตารางที่ 5 เงื่อนไขของอัตราการไหลในการผลิตก๊าซไอโซนด้วยเครื่องผลิตก๊าซไอโซน แบบวิธีไดอิเล็กทริกแบรีเออร์ดีสชาร์จ.....	23
ตารางที่ 6 ลักษณะทางกายภาพของสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ และความเข้มข้นของก๊าซไอโซน เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยาที่มีอัตราการไหลต่างกัน.....	24
ตารางที่ 7 ลักษณะทางกายภาพของสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ และความเข้มข้นของก๊าซไอโซน เมื่อใช้อากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยาที่มีอัตราการไหลต่างกัน.....	26
ตารางที่ 8 เงื่อนไขของเวลาในการผลิตก๊าซไอโซนด้วยเครื่องผลิตก๊าซไอโซนแบบวิธีไดอิเล็กทริกแบรีเออร์ดีสชาร์จ.....	29
ตารางที่ 9 ลักษณะสีของสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ก่อนและหลังเติมก๊าซไอโซน โดยใช้ ออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา ที่เวลาต่างๆ.....	30
ตารางที่ 10 ลักษณะสีของสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ก่อนและหลังเติมก๊าซไอโซน โดยใช้อากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยา ที่เวลาต่างๆ.....	32
ตารางที่ 11 รูปแบบและเงื่อนไขที่มีผลต่อขนาด และปริมาณของฟองก๊าซไอโซน.....	37
ตารางที่ 12 ลักษณะทางกายภาพของฟองก๊าซไอโซน ที่สร้างจากหัวทรายชนิดรูพรุนขนาดนาโนทาง การค้าและไม่โครทางการค้า.....	38
ตารางที่ 13 ลักษณะทางกายภาพของฟองก๊าซไอโซน ที่สร้างจากหัวทรายชนิดรูพรุนขนาดนาโนทาง การค้าและไม่โครทางการค้า.....	43

ตารางที่ 14 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวอย่างน้ำ ที่ผ่านการเกิดปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับฟอง ก๊าซไอโซน ที่มีก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา.....	48
ตารางที่ 15 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวอย่างน้ำ ที่ผ่านการเกิดปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับฟอง ก๊าซไอโซน ที่มีอากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยา.....	50
ตารางที่ 16 สมบัติทางเคมีของตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน ก่อนบำบัด.....	55
ตารางที่ 17 สมบัติทางกายภาพของตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน หลังบำบัด ด้วยก๊าซไอโซนที่มีก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา ร่วมกับอุปกรณ์สร้างฟอง แบบหัวทรายชนิดรูป ขนาดนาโนทางการค้า.....	57
ตารางที่ 18 สมบัติทางเคมีของตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน หลังบำบัด ด้วย ระบบบำบัดที่ใช้ก๊าซไอโซน ที่มีก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา ร่วมกับอุปกรณ์สร้างฟอง แบบหัว ทรายชนิดรูปขนาดนาโนทางการค้า.....	59
ตารางที่ 19 สมบัติทางกายภาพของตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน หลังบำบัด ด้วยก๊าซไอโซน ที่มีอากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยา ร่วมกับอุปกรณ์สร้างฟอง แบบหัวทรายชนิดรูป ขนาดนาโนทางการค้า.....	61
ตารางที่ 20 สมบัติทางเคมีของตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน หลังบำบัด ด้วย ระบบบำบัดที่ใช้ก๊าซไอโซน ที่มีอากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยา ร่วมกับอุปกรณ์สร้างฟอง แบบหัวทรายชนิด รูปขนาดนาโน.....	63
ตารางที่ 21 ลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันก่อนและ หลังหลังบำบัดด้วยระบบบำบัดที่ใช้ก๊าซไอโซน ที่มีก๊าซออกซิเจนหรืออากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยา ร่วมกับอุปกรณ์สร้างฟองแบบหัวทรายชนิดรูปขนาดนาโนทางการค้า.....	67

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 แผนผังกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม.....	4
ภาพที่ 2 เครื่องผลิตโอโซนด้วยวิธีไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จ	10
ภาพที่ 3 ภาพตามยาวโครงสร้างหลอดผลิตโอโซน	16
ภาพที่ 4 ภาพตามขวางโครงสร้างหลอดผลิตโอโซน.....	16
ภาพที่ 5 ไดอะแกรมของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงที่ต่อกับหลอดผลิตโอโซน.....	16
ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของก๊าซโอโซนกับอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน.....	25
ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของก๊าซโอโซนกับอัตราการไหลของอากาศ.....	27
ภาพที่ 8 เปรียบเทียบความเข้มข้นของโอโซนกับอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนและอากาศ ที่ใช้เป็น ก๊าซปฏิกิริยา	28
ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโอโซนกับเวลาในการผลิตก๊าซโอโซน เมื่อใช้ก๊าซ ออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา.....	31
ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของก๊าซโอโซนกับเวลาในการผลิตก๊าซโอโซน เมื่อใช้ อากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยา	33
ภาพที่ 11 เปรียบเทียบความเข้มข้นของโอโซนกับเวลาที่ใช้ในการผลิตก๊าซ เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนและ อากาศที่ใช้เป็นก๊าซปฏิกิริยา.....	34
ภาพที่ 12 ลักษณะทางกายภาพของหัวทราย ชนิดรูปทรงขนาดนาโนทางการค้า	35
ภาพที่ 13 ลักษณะทางกายภาพของหัวทรายชนิดรูปทรงขนาดไมโครทางการค้า	36
ภาพที่ 14 ถังปฏิกรณ์อะคริลิกทรงกระบอก	36
ภาพที่ 15 เปรียบเทียบความเข้มข้นของศักย์ออกซิไดซ์ (ORP) กับช่วงเวลาในการผลิตฟองก๊าซโอโซน ที่ใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา.....	49
ภาพที่ 16 เปรียบเทียบความเข้มข้นของ ORP กับช่วงเวลาในการผลิตฟองก๊าซโอโซน ที่ใช้อากาศเป็น ก๊าซปฏิกิริยา	51
ภาพที่ 17 ลักษณะทางกายภาพของน้ำเสียในอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันก่อนบำบัด.....	53



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน เป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมทางการเกษตรที่สำคัญของไทย และเป็นอุตสาหกรรมที่มีแนวโน้มการขยายตัวที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำมันปาล์มถูกนำไปใช้เป็นตัวเติมในอุตสาหกรรมอื่นๆ หลากหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมยา อุตสาหกรรมความงาม ยิ่งไปกว่านั้นในปัจจุบันภาครัฐยังสนับสนุนให้นำน้ำมันปาล์มไปผสมในเชื้อเพลิงได้อีกด้วย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2549; ธนวรรณ ตีลการย์, 2553) โดยน้ำมันปาล์มสามารถผลิตได้จากกระบวนการสกัดโดยใช้น้ำ จึงส่งผลให้เกิดน้ำเสียจากกระบวนการสกัดในปริมาณที่สูงมาก นอกจากนี้ น้ำเสียจากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน มักจะมีองค์ประกอบหลักเป็นสารอินทรีย์ ซึ่งเป็นตัวก่อให้เกิดปัญหาในด้านมลพิษและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและชุมชน ดังนั้นเราจำเป็นต้องหาวิธีจัดการสารอินทรีย์ในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน ซึ่งมีด้วยกันหลากหลายวิธี เช่น การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางกายภาพ การบำบัดด้วยวิธีการทางเคมี และการบำบัดด้วยวิธีการทางชีวภาพ

ทางผู้วิจัยมีความสนใจการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางกายภาพ โดยมีแนวคิดที่จะนำก๊าซโอโซนเข้ามาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน (น้ำเสียที่มีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบหลัก) เนื่องจากก๊าซโอโซนเป็นก๊าซที่มีความสามารถในการออกซิเดชัน (Oxidation capability) สูงกว่าสารเคมีชนิดอื่นๆ เช่น คลอรีน คลอรีนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต และการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต จึงส่งผลให้ก๊าซโอโซนสามารถทำปฏิกิริยากับสารชีวโมเลกุล และสารอินทรีย์ รวมถึงโลหะหนักได้เกือบทุกชนิด นอกจากนี้ ก๊าซโอโซน ยังมีคุณสมบัติเด่น คือ สามารถสลายตัวได้ง่าย จึงเป็นข้อได้เปรียบในด้านการไม่มีสารตกค้าง และเมื่อเกิดการสลายตัวจะสลายตัวเป็นก๊าซออกซิเจน ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการเพิ่มปริมาณออกซิเจนในน้ำ นอกจากนี้เมื่อเติมก๊าซโอโซนลงในน้ำ ก๊าซโอโซนจะทำปฏิกิริยากับน้ำ และเกิดกระบวนการสลายตัวของโอโซนในน้ำ ทำให้เกิดอนุมูลอิสระกลุ่มที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบสำคัญ (Reactive Oxygen Species : ROS) ซึ่งมีทั้งสารที่เป็นอนุมูลอิสระและไม่ใช่อนุมูลอิสระ และเป็นสารกระตุ้นทางเคมี (Promoter) ของปฏิกิริยาที่ก่อให้เกิดอนุมูลอิสระ เช่นอนุมูลไฮดรอกซิล หรือไฮดรอกซิลแรดดิคัล ($\cdot\text{OH}$) ซึ่งเป็นสารออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) สำหรับไฮดรอกซิลแรดดิคัลนั้นไวต่อการทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ (กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง : AOPs) โดยไฮดรอกซิลแรดดิคัล มีค่าศักย์ออกซิเดชันมากกว่าก๊าซโอโซน โดยมีค่าสูงถึง 2.80 โวลต์ (สำหรับโอโซน 2.07 โวลต์ และคลอรีน 1.36 โวลต์) แต่ไฮดรอกซิลแรดดิคัลที่เป็นสารออกซิไดซ์นั้น เกิดจาก

กระบวนการที่ทำให้ก๊าซโอโซนละลายน้ำ ซึ่งจำเป็นที่จะต้องทำให้ก๊าซโอโซนแพร่กระจายในน้ำและเพิ่มผิวสัมผัส (Interfacial area) กับน้ำให้มากที่สุด

ดังนั้นงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงมีความสนใจทำการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันด้วยกระบวนการโอโซนชั้น ร่วมกับอุปกรณ์สร้างฟองแบบหัวทรายทางการค้า เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการใช้ก๊าซโอโซนแทนการใช้สารเคมีในกระบวนการบำบัดน้ำเสียต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของการใช้ชุดกำเนิดฟองก๊าซโอโซนแต่ละรูปแบบและเงื่อนไขที่มีผลต่อขนาด และปริมาณของฟองอากาศของก๊าซโอโซน

1.2.2 เพื่อศึกษารูปแบบและเงื่อนไขในการผลิตก๊าซโอโซนที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันได้

1.3.2 เป็นแนวทางเลือกในการบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพและความปลอดภัยสูง

1.3.3 เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้สารออกซิไดซ์สำหรับกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง

(Advanced oxidation processes : AOPs) สำหรับผู้ที่สนใจ

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 น้ำเสียที่ใช้ทดลองเป็นน้ำเสียจากกระบวนการสกัดในอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน

1.4.2 รูปแบบและเงื่อนไขในการผลิตก๊าซโอโซน ได้แก่ อัตราการไหลของก๊าซปฏิกิริยา เวลาที่ใช้ในการผลิต และความเข้มข้นของก๊าซโอโซน

1.4.3 พารามิเตอร์น้ำเสียที่ศึกษา ได้แก่ ค่าศักย์ออกซิไดซ์ (ORP) ค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH) การนำไฟฟ้า (Conductivity) ความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี (BOD) และค่าปริมาณออกซิเจนที่จุลชีพใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (COD)

1.4.4 ก๊าซโอโซนผลิตด้วยวิธีไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ

บทที่ 2

แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การสกัดน้ำมันปาล์ม (Mill processing)

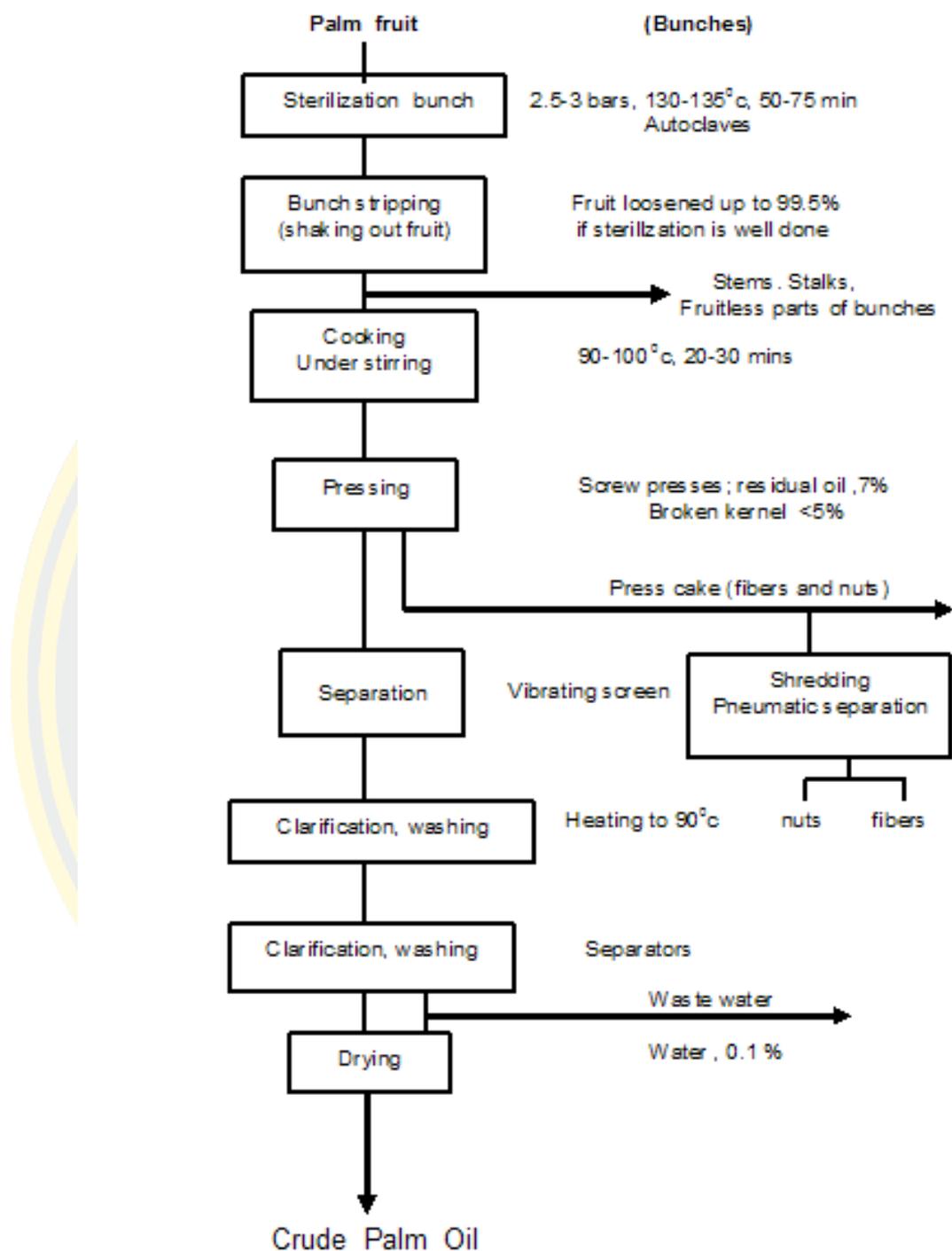
หลังจากการเก็บเกี่ยวทะลายปาล์มน้ำมัน จะมีการขนส่งผลผลิตเข้าสู่โรงงานอุตสาหกรรมที่สกัดน้ำมันปาล์ม ซึ่งมีกระบวนการสกัดน้ำมัน 2 แบบ คือ แบบมาตรฐาน (หีบน้ำมันแยก) และแบบหีบน้ำมันผสม ซึ่งหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีการสกัดน้ำมันแบบที่นิยมใช้โดยทั่วไปตามมาตรฐาน โดยการสกัดน้ำมันปาล์มแบบมาตรฐาน มีกระบวนการผลิต 4 ขั้นตอน คือ

1. การอบทะลายด้วยไอน้ำ (Sterilization) โดยการอบที่อุณหภูมิ 130 - 135 °C ใช้ความดัน 2.5 - 3 Bars นาน 50 - 75 นาที การอบทะลายจะช่วยหยุดปฏิกิริยาไลโปไลซิสที่ก่อให้เกิดกรดไขมันอิสระในผลปาล์ม และช่วยให้ผลปาล์มอ่อนนุ่มหลุดจากขั้วผลได้ง่าย

2. การแยกผล (Stripping) เป็นการส่งทะลายปาล์มเข้าเครื่องแยกผลปาล์มออกจากทะลาย สำหรับทะลายเปล่าจะถูกแยกออกไป จากนั้นนำผลปาล์มที่ได้ไปย่อยด้วยเครื่องย่อยผลปาล์มเพื่อให้ส่วนเปลือกแยกออกจากเมล็ด

3. การสกัดน้ำมัน (Oil extraction) อบโดยการนำส่วนเปลือกมาอบที่อุณหภูมิ 90 - 100 °C นาน 20 - 30 นาที หลังจากนั้นจึงผ่านเข้าเครื่องหีบแบบเกลียวอัดคู่ จะได้น้ำมันปาล์มดิบที่มีองค์ประกอบคือ น้ำมัน 66% น้ำ 24% และของแข็ง 10%

4. การทำความสะอาดน้ำมันปาล์มดิบ (Clarification) เป็นการนำน้ำมันปาล์มดิบที่ได้จากการสกัด ส่งไปยังถังกรองเพื่อแยกน้ำและของแข็งออกจากกัน จากนั้นนำเข้าเครื่องเหวี่ยงเพื่อทำความสะอาดอีกครั้ง ทำการไล่น้ำออกเพื่อทำให้ปาล์มแห้ง และส่งเข้าถังเก็บน้ำมันสำหรับรอกการกลั่นหรือจำหน่ายต่อไป น้ำมันปาล์มดิบที่ได้ จะแยกเป็นสองส่วน คือ ส่วนบนจะมีลักษณะเป็นของเหลวสีส้มแดง (Crude palm oil olein) ปริมาณประมาณ 30 - 50% ส่วนล่างมีลักษณะเป็นไขสีเหลืองส้ม (Crude palm oil stearin) ปริมาณประมาณ 50 - 70% สำหรับกากผลปาล์มจะถูกนำมาแยกเส้นใยออกจากเมล็ด และนำเมล็ดที่ได้มาอบแห้งและทำความสะอาด จากนั้นนำเข้าเครื่องกะเทาะเพื่อแยกกะลาออก และนำเมล็ดในมาอบแห้งโดยให้ความชื้นไม่เกิน 7% จากนั้นบรรจุลงในกระสอบเพื่อรอจำหน่าย หรือหีบน้ำมันต่อไป สำหรับน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันเมล็ดในปาล์มที่ได้จากกระบวนการสกัด สามารถส่งเข้าสู่โรงงานอุตสาหกรรมเพื่อทำให้บริสุทธิ์ หรือจะนำไปแยกส่วน (Fractionation) ก่อนก็ได้ ซึ่งจะได้น้ำมันปาล์มที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันไป



ภาพที่ 1 แผนผังกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม
(สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน), ม.ป.ป.)

2.2 การกลั่นบริสุทธิ์น้ำมันปาล์ม (Refine processing)

การกลั่นบริสุทธิ์น้ำมันปาล์ม เป็นกระบวนการที่ทำให้น้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันเมล็ดในปาล์มดิบ กลายเป็นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์และน้ำมันเมล็ดในปาล์มบริสุทธิ์พร้อมสำหรับการบริโภค ซึ่งกระบวนการกลั่น สามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีการ คือ

1. วิธีทางกายภาพ (Physical or steam refining) เป็นกระบวนการกำจัดกรดไขมันอิสระโดยการผ่านไอน้ำเข้าไปในน้ำมันร้อน แล้วกลั่นแยกเอากรดไขมันอิสระและสารที่ให้กลิ่นให้ระเหยออกไป จึงเป็นการกำจัดกลิ่นและทำให้ไขมันเป็นกลางพร้อมๆ กัน

2. วิธีทางเคมี (Chemical refining) เป็นกระบวนการกำจัดกรดไขมันอิสระโดยใช้สารเคมีที่นิยมคือ ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโซเดียมคาร์บอเนต ทำปฏิกิริยากับกรดไขมันอิสระในน้ำมัน ทำให้เกิดเป็นสบู่ จากนั้นแยกสบู่ออกโดยใช้วิธีการหมุนเหวี่ยง สำหรับความเข้มข้นของด่างที่ใช้ปริมาณมากหรือน้อยแปรผันไปตามปริมาณของกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์ม จากนั้นจึงให้ความร้อนแก่น้ำมันเพื่อเป็นการไล่น้ำให้ระเหยออก แล้วจึงนำน้ำมันมาฟอกสี และกำจัดกลิ่นด้วยไอน้ำ ก็จะได้น้ำมันปาล์มที่เรียกว่า Neutralized bleached and deodorized palm oil เป็นน้ำมันปาล์มที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์แล้ว โดยจะแยกเป็นสองส่วนคือ ส่วนล่างมีลักษณะเป็นไขและส่วนบนมีลักษณะเป็นน้ำมันมีสีเหลืองอ่อนถึงเหลืองเข้ม

จากกระบวนการผลิตข้างต้นจะเห็นได้ว่ามีน้ำเป็นส่วนประกอบของการผลิต จึงเป็นที่มาของน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน ซึ่งน้ำทิ้งจะมีมลสารในรูป COD BOD ของแข็งแขวนลอย และน้ำมันในระดับสูง มีสีน้ำตาลเข้มถึงน้ำตาลปนดำ pH 4 – 5 ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณลักษณะของน้ำทิ้งจากขั้นตอนต่างๆ ในการสกัดน้ำมันปาล์ม

พารามิเตอร์	น้ำทิ้งจากบ่อรวม	น้ำทิ้งจากหม้อฆ่าเชื้อ	น้ำทิ้งจากเครื่องแยกน้ำและกากสลัดจ์ออกจากน้ำมัน
สี	น้ำตาลปนดำ	น้ำตาล	น้ำตาลหรือน้ำตาลปนดำ
pH	4.05 – 4.62	4.84 – 5.35	4.61 – 4.89
BOD	54,750 – 60,000	22,800 – 41,985	21,000 – 45,375
COD	80,523 – 115,934	45,360 – 80,146	38,246 – 67,567
ความเป็นด่าง	68 – 200	3.75 – 1,576	86.5 – 480
ไขมัน	16 – 2,449	20.9 – 1,103	4.7
ของแข็งทั้งหมด	49,063 – 88,508	26,367 – 76,733	25,634 – 47,242
ของแข็งแขวนลอย	18,500 – 52,000	26,000 – 61,100	29,000 – 20,300
ไนโตรเจน			
- แอมโมเนีย	27 – 61	7.7 – 66.3	7.7 – 66.3
- ออร์แกนิก	551 – 1,172	22.4 – 1,287	518.5

หมายเหตุ : ค่าทุกค่ามีหน่วย mg/L ยกเว้นสีและ pH

(พูนสุข ประเสริฐสรรพ และคณะ, 2533)

2.3 การบำบัดน้ำเสีย

การบำบัดน้ำเสีย คือ การกำจัดหรือทำลายสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียให้หมดไป หรือเหลือน้อยที่สุดให้ได้มาตรฐานที่กำหนดและไม่ทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม น้ำเสียจากแหล่งต่างกันจะมีคุณสมบัติไม่เหมือนกัน ดังนั้นกระบวนการบำบัดน้ำจึงมีหลายวิธี

โดยระบบบำบัดน้ำเสียทั่วไปมี 3 วิธีคือ

1. กระบวนการทางเคมี (Chemical process)

เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยการแยกสารต่างๆ หรือสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียที่บำบัด เช่น โลหะหนัก สารพิษ สภาพความเป็นกรด ต่างสูงๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ด้วยการเติมสารเคมีต่างๆ ลงไปเพื่อให้เข้าไปทำปฏิกิริยาซึ่งจะมีประโยชน์ในการแยกสาร แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือ เมื่อเติมสารเคมีลงในน้ำเสียแล้ว ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและวิธีนี้จะมีค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมีค่อนข้างสูง ดังนั้นกระบวนการทางเคมีจะเลือกใช้ก็ต่อเมื่อน้ำเสียไม่สามารถบำบัดได้ด้วยกระบวนการทางกายภาพหรือชีวภาพ

2. กระบวนการทางชีววิทยา (Biological process)

เป็นการอาศัยหลักการใช้จุลินทรีย์ต่างๆ มาทำการย่อยสลายเปลี่ยนอินทรีย์สารไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และแอมโมเนีย เป็นการบำบัดน้ำเสียที่ดีที่สุดในแง่ของการลดปริมาณสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำ แต่หลักการนี้ต้องเลือกสภาวะแวดล้อมให้เหมาะกับการทำงานของจุลินทรีย์ โดยสัมพันธ์กับปริมาณของจุลินทรีย์ และเวลาที่ใช้ในการย่อยสลาย แบคทีเรียที่เลือกใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์แยกออกได้เป็น 2 ประเภท คือ แบคทีเรียที่ต้องใช้ออกซิเจน (Aerobic bacteria) ส่วนกลุ่มที่ 2 เป็นพวกไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic bacteria)

3. กระบวนการทางกายภาพ (Physical process)

เป็นการบำบัดน้ำเสียอย่างง่ายซึ่งจะแยกของแข็งที่ไม่ละลายน้ำออก วิธีนี้จะแยกตะกอนได้ประมาณ 50 - 65% ส่วนเรื่องการแยกความสกปรกในรูปของสารอินทรีย์ (BOD₅) ประมาณ 20 - 30% เท่านั้น วิธีการต่างๆ ในกระบวนการนี้มีหลายวิธี เช่น การดักด้วยตะแกรง (Screening) การตัดย่อย (Combination) การกวาด (Skimming) การทำให้ลอย (Floating) และการตกตะกอน (Sedimentation)

4. กระบวนการทางกายภาพ-เคมี (Physical-chemical process)

เป็นกระบวนการที่ต้องมีอุปกรณ์ช่วยมากกว่ากระบวนการที่กล่าวมา ซึ่งกระบวนการนี้จะใช้ในขั้นตอนสุดท้ายในการบำบัดน้ำเสีย ที่ผ่านกระบวนการในขั้นตอนอื่นแล้ว เช่น กระบวนการดูดซับด้วยถ่าน (Carbon adsorption) และการแลกเปลี่ยนประจุ

2.4 โอโซน

โอโซน (Ozone) เป็นสารอยู่ในสถานะก๊าซ ประกอบด้วยโมเลกุลของออกซิเจน 3 โมเลกุล ก๊าซโอโซนพบมากที่ระดับความสูงประมาณ 10 - 50 km เหนือผิวโลกในชั้นบรรยากาศสตราโตสเฟียร์ (Stratospheres) ช่วยลดอันตรายจากรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากดวงอาทิตย์ โดยโอโซนเข้มข้นจะมีสีฟ้าที่อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน (Standard temperature and pressure ; STP) เมื่ออุณหภูมิลดลงถึง -112 °C โอโซนจะเป็นของเหลวสีน้ำเงิน และเมื่ออุณหภูมิลดต่ำกว่า -193 °C ก็จะถูกกลายเป็นของแข็งสีดำ

โดยจากการศึกษาพบว่าก๊าซโอโซนเกิดขึ้นได้ 2 วิธี คือ เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และเกิดจากการที่มนุษย์สร้างขึ้น ซึ่งก๊าซโอโซนที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาตินั้นเราไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้เนื่องจากมีปริมาณน้อย แต่ก๊าซโอโซนที่เกิดจากการผลิตของมนุษย์นั้นมีปริมาณมากกว่าสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง ทั้งในรูปที่เป็นสารละลายในน้ำและในรูปของก๊าซ ซึ่งการใช้ประโยชน์จากก๊าซโอโซนนั้นจะนำเอาคุณสมบัติเด่นของก๊าซโอโซน 2 ข้อมาใช้ คือการที่ก๊าซโอโซน

มักจะอยู่ในสถานะที่ไม่คงตัว จึงเกิดเป็นอะตอมของออกซิเจนอิสระที่แตกตัวออกจากโมเลกุลของก๊าซโอโซน ทำให้ก๊าซโอโซนสามารถทำปฏิกิริยาได้กับสารเกือบทุกชนิด และคุณสมบัติเด่นอีกประการคือ เป็นสารฆ่าเชื้อ (Disinfectant) ที่รุนแรงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และคลอรีน (Cl_2) ซึ่งสามารถทำลายเชื้อจุลินทรีย์ได้ทุกชนิดขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซโอโซนและเวลาในการสัมผัสกับเชื้อจุลินทรีย์

2.5 กระบวนการเกิดโอโซน

โอโซนเกิดจากการรวมตัวของออกซิเจนโดยใช้พลังงานจาก Electric discharge รังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) การแผ่รังสีนิวเคลียร์ และปฏิกิริยาทางเคมี โดยมีปฏิกิริยาและเอนทัลปีดังสมการ 2.1 - 2.3



โดยเอนทัลปีของการผลิตโอโซนจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าอุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา และพลังงานขณะเกิดโอโซน จะเท่ากับพลังงานที่ปล่อยออกมา เมื่อเกิดการระเบิดเนื่องจากการสลายตัวอย่างรวดเร็ว

ก๊าซโอโซนที่เกิดจากการรวมตัวของออกซิเจนมี 2 รูปแบบ คือ

1. จากการรวมตัวของออกซิเจนอะตอมคู่ ดังสมการ 2.4



เป็นปฏิกิริยาชนิดดูดพลังงาน (Endothermic) ออกซิเจนอะตอมคู่จะรวมตัวกับออกซิเจนอะตอมเดี่ยวที่แตกออกจากโมเลกุลก๊าซออกซิเจน เกิดเป็นโมเลกุลของก๊าซโอโซน เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาแบบดูดพลังงาน สมดุลของปฏิกิริยาการเกิดโมเลกุลก๊าซโอโซนจะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

2. จากการรวมตัวของออกซิเจนอะตอมเดี่ยว



ในสถานะที่อุณหภูมิสูงมาก โมเลกุลออกซิเจนจะแตกตัวเป็นออกซิเจนอะตอมเดี่ยวในสัดส่วนที่มากขึ้น ส่งผลให้เกิดการรวมตัวเป็นโมเลกุลของโอโซนโดยตรง (สมการ 2.5) และในขณะเดียวกันก็เกิดการรวมตัวเป็นโมเลกุลของออกซิเจน (สมการ 2.6) และเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องเป็นโอโซน โดยโอโซนที่เกิดขึ้นสามารถสลายตัวกลับเป็นอะตอมออกซิเจน และโมเลกุลออกซิเจนได้

ดังนั้นความเข้มข้นของโอโซนที่เกิดขึ้น จะมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิจำกัดค่าหนึ่งเท่านั้น เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงกวานี้จะส่งผลให้โมเลกุลโอโซนเกิดการสลายตัวอย่างรวดเร็ว

การเกิดโมเลกุลของก๊าซออกซิเจน เนื่องจากการชนกันของออกซิเจนอะตอมเดี่ยว ($2O \rightarrow O_2$) เรียกว่า Double collision และการเกิดโมเลกุลของก๊าซโอโซน เนื่องจากการชนกันของออกซิเจนอะตอมเดี่ยวกับโมเลกุลของออกซิเจน เรียกว่า Triple collision ที่อุณหภูมิห้องและความดัน 1 บรรยากาศ Triple collision มีอัตราการเกิด $1/1000$ ของการเกิด Double collision จากทฤษฎีจลน์ของก๊าซจะเกิดการชนกันของอะตอมออกซิเจนเป็นจำนวน 6×10^9 ครั้งต่อวินาที และใน 1 วินาทีนี้จะเกิด Triple collision ได้เป็นโมเลกุลของก๊าซโอโซนเพียง 6×10^6 สมมติฐานของการเกิดโอโซนโดยวิธี Silent electric discharge (สมการ 2.8) เป็นไปตามสมการต่อไปนี้



M คือ ก๊าซผสมที่ปรากฏอยู่แต่ไม่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยา ในที่นี้คือโมเลกุลออกซิเจน อะตอมออกซิเจน และโมเลกุลโอโซน

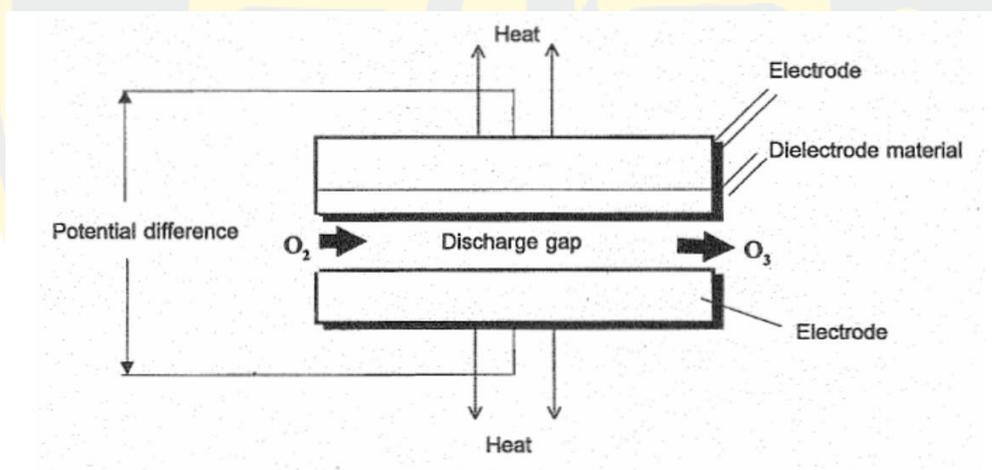
O_2^+ คือ โมเลกุลก๊าซออกซิเจนในสถานะ excited

สมการ 2.7 เริ่มต้นการเกิดออกซิเจนอะตอมเดี่ยวโดยอิเล็กตรอน (e^-) ที่เกิดจาก Electric discharge วิ่งเข้าชนโมเลกุลออกซิเจนด้วยความเร็วสูง แยกออกเป็นอะตอมออกซิเจน อิเล็กตรอนบางตัวที่หลุดออกจากอะตอมออกซิเจน จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าจนมีความเร็วสูง และเข้าชนโมเลกุลออกซิเจนเกิดการแตกตัวต่อเนื่อง อัตราการเกิดปฏิกิริยาตามสมการ 2.7 ขึ้นกับจำนวนอิเล็กตรอนหรือปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านช่องว่างอากาศที่เกิด Electric discharge เนื่องจากผิวอิเล็กโทรดที่ประกอบขึ้นเป็น Active volume ซึ่งเกิด Electric discharge ไม่เรียบสม่ำเสมอเป็นผลให้ภายใน Active volume เกิด Discharge column (บริเวณที่มีกระแสไหลผ่าน) เป็นช่วงๆ เรียก Discharge zone และบริเวณที่ไม่เกิด Discharge เรียก Free zone

ดังนั้นใน Active volume จะเกิดปฏิกิริยาตามสมการ 2.7 ทำให้เกิดออกซิเจนอะตอมเดี่ยวเฉพาะในช่วง Discharge zone เท่านั้น ในขณะที่ปฏิกิริยาตามสมการ 2.8 ซึ่งเป็นการสร้างโมเลกุลโอโซน และปฏิกิริยาตามสมการ 2.9 ซึ่งเป็นการสลายตัวของโอโซน สามารถเกิดได้ทั้งช่วง Discharge zone และ Free zone (วิเชียร ศิริพรหม, 2560)

2.6 การผลิตโอโซนด้วยวิธีไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จ

การผลิตโอโซนด้วยวิธีไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จ (Dielectric barrier discharge) มีหลักการคือ ประจุไฟฟ้าจะเกิดในช่องว่างสำหรับทำปฏิกิริยา (Discharge gap) ซึ่งอยู่ระหว่างแผ่นขั้วโลหะที่สมมาตรกัน 2 แผ่น หรืออาจเป็นช่องว่างวงแหวนซึ่งอยู่ระหว่างขั้วทรงกระบอก 2 ขนาดซ้อนกัน ขั้วแผ่นโลหะทั้ง 2 แผ่น หรือแผ่นใดแผ่นหนึ่งจะมี Dielectric layer คลุมอยู่ ซึ่งโดยปกติมักใช้กระจกแก้วใส เทคนิคนี้สามารถใช้ได้ทั้งที่ความดันบรรยากาศและที่ความดันไม่สูงมากนัก โดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงที่ความถี่ 50 หรือ 60 Hz พลาสมาจะถูกผลิตออกมามากมายในสถานะก๊าซ และถูกเรียกว่า micro discharge ซึ่งกระจายอยู่ทั่วช่องว่างระหว่างขั้วนั้น การแตกตัวเป็นประจุของก๊าซจะเกิดขึ้น (Ionization) ประจุจะเคลื่อนย้ายและสะสมอยู่ที่ผิวของกระจกแก้วซึ่งจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้า ซึ่งมีทิศตรงกันข้ามกับสนามไฟฟ้าขาเข้า ไม่กี่วินาทีสนามไฟฟ้าทั้งสองจะเกิดการสมดุลกันและหักล้างกันไปและเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ให้สูงขึ้น Micro discharge จะเกิดขึ้นมาใหม่อีกครั้งทันทีที่สนามไฟฟ้าพอเหมาะในช่องว่างนั้น ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 เครื่องผลิตโอโซนด้วยวิธีไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จ
(พิชญ์ศักดิ์ จันทร์กุล, 2551)

โดยสรุปแล้ว ไดอิเล็กทริกมีหน้าที่ 2 ประการ คือ จำกัดการเคลื่อนย้ายของประจุไปยังขั้วไม่ให้มากเกินไป ซึ่งเป็นการป้องกันการลัดวงจร อีกประการคือช่วยกระจายไมโครดีสชาร์จ ให้ทั่วช่องว่างระหว่างขั้วนั้น เพื่อให้ไอเล็กตรอนมีโอกาสสัมผัสกับอนุภาคของก๊าซให้ได้มากที่สุด เทคนิคนี้ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตโอโซนและกำจัดสารพิษพวก NO_x และ SO_x ออกจากก๊าซจากการเผาไหม้ เป็นต้น (พิชญ์ศักดิ์ จันทร์กุล, 2551)

2.7 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

การตรวจคุณภาพน้ำแบ่งออกเป็น 3 ด้าน คือ คุณภาพทางกายภาพ คุณภาพทางเคมี และคุณภาพทางชีวภาพ เพื่อให้เกิดความเข้าใจมากขึ้น จึงอธิบายความหมายของแต่ละพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์น้ำ ดังนี้

2.7.1 ค่าศักย์ออกซิไดซ์ (ORP)

ORP ย่อมาจาก Oxidation-reduction potential หมายถึง การวัดที่บ่งชี้ว่าภายในน้ำเกิดปฏิกิริยาออกซิไดซ์ (ให้อิเล็กตรอน) หรือปฏิกิริยารีดักชัน (การรับอิเล็กตรอน) เป็นการวัดความสามารถของน้ำและความสามารถในการแยกสารปนเปื้อนออก มีช่วง $-2,000$ ถึง $+2,000$ และมีหน่วยวัดเป็น มิลลิโวลต์ (mV)

2.7.2 ค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH)

pH เป็นค่าที่แสดงความเป็นกรดหรือด่างของน้ำ (น้ำดื่มควรมีค่า pH ระหว่าง 6.8 - 7.3) โดยทั่วไปน้ำที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรมมักจะมีค่า pH ต่ำกว่า 4.5 หมายถึง มีความเป็นกรดสูง มีฤทธิ์กัดกร่อน ขณะที่น้ำที่มาจากแหล่งชุมชนจะมีบัฟเฟอร์ในสภาพเบส ทำให้มีค่า pH ที่ไม่ต่ำเกินไป การเปลี่ยนแปลงของ pH จะส่งผลทำให้คุณสมบัติของน้ำเปลี่ยนไป และอาจส่งผลต่อความเป็นพิษของสารบางชนิด เช่น แอมโมเนีย เป็นต้น

2.7.3 การนำไฟฟ้า (Conductivity)

สภาพการนำไฟฟ้า บอกลถึงความสามารถของน้ำที่กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่าน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไอออนโดยรวมในน้ำ และอุณหภูมิขณะทำการวัดค่าการนำไฟฟ้า

2.7.4 ความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี (BOD)

BOD เป็นปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ต้องการใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำ น้ำที่มีคุณภาพดีควรมีค่า BOD ไม่เกิน 6 มิลลิกรัมต่อลิตร ถ้าค่า BOD สูงมาก แสดงว่าน้ำนั้นเน่ามาก แหล่งน้ำที่มีค่า BOD สูงกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จัดเป็นน้ำเน่าหรือน้ำเสีย มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำที่มาจากโรงงาน กำหนดไว้ว่า น้ำที่ก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ต้องมีค่า BOD ไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.7.5 ค่าปริมาณออกซิเจนที่จุลชีพใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (COD)

COD เป็นปริมาณออกซิเจนที่จุลชีพใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ คือค่าที่วัดถึงปริมาณทั้งหมดของออกซิเจนที่ใช้โดยจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ รวมไปถึงสารอินทรีย์ที่สามารถถูกออกซิไดซ์ได้ น้ำที่มีค่า COD สูง แสดงว่ามีการปนเปื้อนด้วยสารอินทรีย์สูง สกปรกมาก มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำที่มาจากโรงงาน กำหนดไว้ว่า น้ำที่ก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ต้องมีค่า COD ไม่เกิน 120 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กุนทรหายน ยามิรุเต็ง (2551) ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียและหาสภาวะที่เหมาะสมของการใช้โอโซนในการบำบัดน้ำเสียเบื้องต้นจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ที่มีปริมาณสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนและความเข้มข้นมาก ทำให้อยู่สลายด้วยจุลินทรีย์ยากขึ้น โดยอัตราการให้ก๊าซโอโซน เวลาในการทำปฏิกิริยา และ pH เป็นปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ ของแข็งแขวนลอยและสี ซึ่งพบว่าที่ pH 7 อัตราการให้ก๊าซโอโซน 4,000 มิลลกรัมต่อชั่วโมง เวลาในการทำปฏิกิริยา 15 นาที สัดส่วนของการย่อยสลายทางชีวภาพ (BOD_5/COD ratio) ของน้ำเสียเพิ่มขึ้น จาก 0.566 เป็น 0.903

จันทร์อนงค์ ฉายเหลี่ยม (2561) ศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงพยาบาลกรุงเทพภูเก็ตด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการนำน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดกลับมาใช้ใหม่ โดยทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ พบว่าที่ความเข้มข้นของปริมาณโอโซน 2 g O_3/g COD เวลาการสัมผัสโอโซน 60 นาที ประสิทธิภาพในการบำบัดสี ความขุ่น ความกระด้าง COD BOD_5 TKN TSS และ TDS คือ 59.80 39.00 16.80 59.10 66.30 60.80 30.60 และ 8.10% ตามลำดับ และประสิทธิภาพการบำบัดเชื้อโรคในกลุ่ม Total coliform bacteria Fecal coliform bacteria และ *E. Coli* มีค่าเท่ากับ 98.26 97.88 และ 99.63% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานน้ำทิ้งของประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม พ.ศ.2535 มาตรฐานน้ำใช้ใน Cooling tower และมาตรฐานแหล่งน้ำเพื่อการประปาของการประปานครหลวง พบว่าน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนสามารถนำกลับไปเป็นน้ำใช้ในระบบ Cooling tower ได้ รวมถึงสามารถนำไปใช้เป็นแหล่งน้ำดิบสำหรับโรงผลิตน้ำใช้ของโรงพยาบาลได้อีกทั้งยังช่วยลดค่าใช้จ่ายให้กับโรงพยาบาลอีกด้วย

นนทพงษ์ ภาณุคุณกิตติ (2548) ศึกษาการบำบัดสีของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ โดยกระบวนการโอโซนเนชั่น ทำการทดลองศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการบำบัดสี คือ pH ปริมาณโอโซน และระยะเวลาสัมผัสโอโซนของน้ำเสียก่อนและหลังผ่านระบบบำบัดน้ำเสีย ชนิดระบบตะกอนเร่ง พบว่าที่อุณหภูมิห้อง น้ำเสียบริเวณหลังผ่านระบบบำบัดน้ำเสียมีความเหมาะสมในการบำบัดโดยกระบวนการโอโซนเนชั่น โดยภาวะที่เหมาะสม คือ pH เท่ากับ 7.5 ± 0.5 อัตราการผลิตโอโซนเท่ากับ 9.0 กรัมต่อชั่วโมง และระยะเวลาสัมผัสโอโซน 30 นาที สามารถลดปริมาณสีในหน่วย PtCO และหน่วย ADMI ได้เท่ากับ 91.54 และ 95.46 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และลดปริมาณ COD BOD และ TOC ได้เท่ากับ 62.00 27.26 และ 37.98 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากสมการการถ่ายเทมวลสารภายใต้สภาวะดังกล่าวสามารถคำนวณค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทโอโซนในน้ำเสียได้ในช่วงระหว่าง 0.0022 ถึง 0.0038 นาที⁻¹ ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโอโซนในการทำปฏิกิริยา จาก

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบฟีนอลิกพบว่ากระบวนการโอโซนชั้นสามารถที่จะสลายโมเลกุลของสารประกอบฟีนอลิกได้ แต่ยังคงมีสารประกอบฟีนอลิกตกค้างอยู่ภายหลังจากกระบวนการโอโซนชั้น และกระบวนการโอโซนชั้นจะช่วยเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ โดยที่ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที อัตราส่วนระหว่าง BOD : COD มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.16 ถึง 0.31 และค่า K_T (Rate of biochemical oxidation) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.21 ถึง 0.35 ตามวิธีการของ Thomas slope method

ภัทรพล กล่ำเสื่อ (2560) ศึกษาการนำโอโซนมาบำบัดสีและกลิ่นของน้ำเสียจากห้องพ่นสี โดยทำการบำบัดน้ำเสียในระหว่างที่อยู่ในบ่อพักน้ำ โดยพบว่าโอโซนสามารถกำจัดสีและกลิ่นของน้ำเสียได้มากที่สุดที่ระยะเวลา 8 ชั่วโมง pH เพิ่มขึ้น 3.53% ในขณะที่ BOD COD TDS TSS ลดลง 14.39% 23.72% 32.58% และ 31.57% ตามลำดับ และมีการศึกษาสารอินทรีย์ที่ถูกบำบัดด้วยโอโซน จากการวิเคราะห์สารอินทรีย์ในน้ำเสียตัวอย่างด้วยเทคนิค FEEM พบว่าโอโซนสามารถบำบัดสารอินทรีย์ประเภทฮิวมิก (Humic acid) และกรดฟุลวิก (Fulvic acid) ได้เป็นอย่างดี ดังนั้นการใช้โอโซนบำบัดน้ำเสียก่อนเข้ากระบวนการบำบัดหลัก สามารถช่วยแก้ปัญหาเรื่องของกลิ่นได้เป็นอย่างดี

ศิริอร บุญญวนิช (2559) ศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนจากน้ำเสียอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีโอโซนชั้น ภายใต้การหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนด้วยเชื้อจุลินทรีย์ผสม จากการทดลองเบื้องต้นที่ศึกษาอิทธิพลของการเติมโอโซนต่อความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำเสีย พบว่า การเติมโอโซนสามารถเพิ่มการย่อยสลายทางชีวภาพได้ โดยทำให้ค่า BOD เพิ่มขึ้นและค่า COD ที่ลดลง อัตราส่วนระหว่างค่า BOD : COD ที่ดีที่สุดคือ 0.76 เมื่อเติมโอโซน 27 นาที สำหรับการทดลองผลิตก๊าซมีเทนโดยใช้น้ำเสียที่ไม่ผ่านการเติมโอโซนและน้ำเสียที่ผ่านการเติมโอโซน ภายใต้สภาวะ pH 7 อุณหภูมิ 37°C ตลอดระยะเวลาการหมัก 120 ชั่วโมง และผันแปรความเข้มข้นค่า COD ของน้ำเสีย 8 ความเข้มข้น ได้แก่ 3,000 6,000 10,000 15,000 20,000 25,000 32,000 และ 40,960 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ พบว่าน้ำเสียที่ไม่เติมโอโซนและเติมโอโซนที่ความเข้มข้นค่า COD 15,000 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถให้ผลิตผลก๊าซมีเทนสูงสุดเท่ากับ 177.8 มิลลิลิตรต่อกรัม $COD_{removed}$ (ไม่เติมโอโซน) และ 273.8 มิลลิลิตรต่อกรัม $COD_{removed}$ (เติมโอโซน) นอกจากนี้ในน้ำเสียที่มีความเข้มข้นค่า COD 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จะสามารถให้ปริมาณก๊าซมีเทนที่ผลิตได้สูงสุด (H_{max}) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 607.4 มิลลิลิตร (ไม่เติมโอโซน) และ 624.4 มิลลิลิตร (เติมโอโซน)

อานอบ คันทะชา (2543) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากคลองสำโรง อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา ด้วยโอโซน ทำการเก็บตัวอย่างน้ำจำนวน 4 ตัวอย่าง โดยมีการวัดพารามิเตอร์ต่างๆ ก่อนผ่านก๊าซโอโซน และเมื่อผ่านก๊าซโอโซนลงไปในตัวอย่งน้ำเสียจากคลองสำโรงเป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่าค่า pH และ DO เพิ่มขึ้น ส่วนค่าของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำ BOD ปริมาณตะกั่ว ปริมาณ

แคดเมียม และปริมาณสังกะสี ลดลง จะเห็นได้ว่าก๊าซโอโซนสามารถบำบัดน้ำเสียจากตัวอย่างน้ำในคลองสำโรงจนทำให้น้ำมีคุณภาพดีขึ้นจนเข้าสู่ค่ามาตรฐานที่กำหนดได้

Alfara *et al.* (2000) ศึกษาการใช้โอโซนในการกำจัดสารอินทรีย์ และกำจัดสีของ Polymeric pigment ในกลุ่ม Melanoidins จากโรงกลั่น พบว่าสามารถลดค่า COD ได้ 16% กำจัดสีได้ 80% เพิ่มสัดส่วน $BOD_5:COD$ ได้ 40% (จาก 0.3 เป็น 0.5) และลดมวลโมเลกุลของ Melanoidins ได้ 10% จะเห็นได้ว่าโอโซนช่วยกำจัดสีและเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ จึงเสนอว่าควรใช้ในกระบวนการบำบัดก่อนเข้าสู่ระบบ Anaerobic digestion ในระบบบำบัดน้ำเสียนี้ และประยุกต์ใช้กับน้ำเสียประเภทอื่น

Choi และคณะ (2004) ศึกษาการลด COD และสีของน้ำเสียที่เป็นกรดและสีย้อมปฏิกิริยาโดยใช้โอโซน พบว่าที่ pH มากกว่า 11 มีการลดลงของ COD และสี อัตราการไหลของก๊าซที่ไหลเข้าสูงและความเข้มข้นของโอโซนสูงให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า และมีการสังเกตการตกตะกอนเล็กน้อยภายใต้เงื่อนไขของการลด COD ที่ pH 11, 15 LPM ของอัตราการไหลของก๊าซที่ไหลเข้า และ 89.3 g/Nm^3 ของอัตราการไหลของโอโซน COD ของน้ำเสียจากสีย้อมกรดโบรมามินลดลงเหลือ 95 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจาก 90 นาที และ COD ของน้ำเสียจากสีย้อมปฏิกิริยาลดลงเหลือ 120 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจาก 120 นาที การกำจัดสีเสร็จสิ้นหลังจากทำปฏิกิริยา 30 นาที

Martinez และคณะ (2011) ศึกษาการใช้โอโซนในการบำบัดน้ำเสียเพื่อผลิตน้ำที่เหมาะสมสำหรับการชลประทาน โดยการวิเคราะห์การนำเข้าและส่งออกของเสียของโรงงานฆ่าเชื้อโอโซน อัตราการป้อนโอโซน และตรวจสอบความเพียงพอของกระบวนการบำบัดน้ำ พบว่าการบำบัดน้ำเสียด้วยโอโซนนั้นสามารถหยุดการทำงานของโคลิฟอร์มในอุจจาระได้ และสามารถลดจำนวนเชื้อโรคเหล่านี้ลงประมาณ 89% และยังรักษาคุณภาพของน้ำให้อยู่ในมาตรฐาน โดยกำจัด COD มากถึง 88% การกำจัด BOD_5 สูงสุด 68% และการกำจัดของแข็งแขวนลอยสูงถึง 75% จากผลของพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ในน้ำทิ้งที่มีโอโซน สรุปได้ว่าน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนเหมาะสำหรับการนำมาใช้ซ้ำในการชลประทานของพืชผลบริโภคสดตามแนวทางที่กำหนดไว้ในกฎหมายที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันด้วยก๊าซโอโซน ซึ่งเป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการด้วยถังปฏิกรณ์แบบกะ (Batch reactor) ร่วมกับชุดกำเนิดฟองก๊าซโอโซน ที่มีขนาดและปริมาณของฟองก๊าซโอโซน ตามแต่ละรูปแบบ/เงื่อนไขที่กำหนด รวมถึงปริมาณของก๊าซโอโซนที่ขึ้นอยู่กับรูปแบบ/เงื่อนไขในการผลิต ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน โดยค่าพารามิเตอร์คุณภาพน้ำทางด้านกายภาพและด้านเคมีต่างๆ จะถูกศึกษาและนำมาเปรียบเทียบคุณภาพกับค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำธรรมชาติของประเทศไทย ตามประกาศการนิคมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทยที่ 76/2560 เรื่อง กำหนดมาตรฐานทั่วไปในการระบายน้ำเสียลงสู่ระบบบำบัดน้ำเสียส่วนกลางในนิคมอุตสาหกรรม โดยจะทำการเปรียบเทียบคุณภาพของตัวอย่างน้ำเสียจากบ่อบำบัดของโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันทั้งก่อนและหลังการบำบัดด้วยระบบการบำบัดน้ำเสียที่ใช้ก๊าซโอโซนร่วมกับอุปกรณ์สร้างฟองแบบหัวทรายทางการค้า

3.1 ขั้นตอนการดำเนินการ

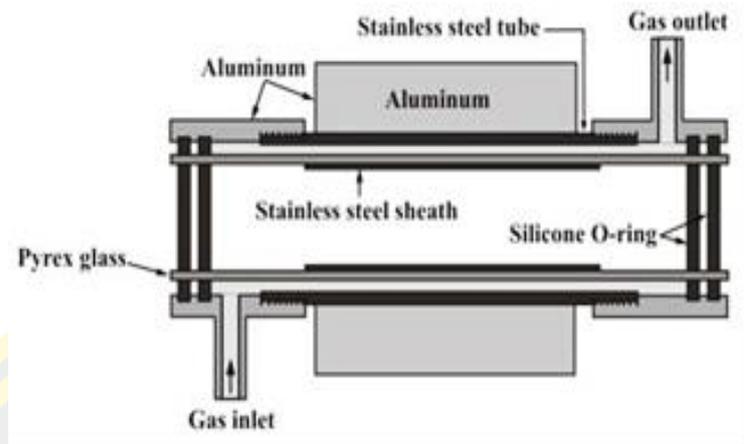
แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ

1. การศึกษารูปแบบและเงื่อนไขในการผลิตก๊าซโอโซน
2. การศึกษาผลของขนาดและปริมาณของฟองก๊าซโอโซน ที่สร้างจากอุปกรณ์สร้างฟองแบบหัวทรายทางการค้า ในแต่ละรูปแบบ/เงื่อนไข
3. การศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันด้วยระบบการบำบัดน้ำเสียที่ใช้ก๊าซโอโซน ร่วมกับอุปกรณ์สร้างฟองแบบหัวทรายทางการค้า

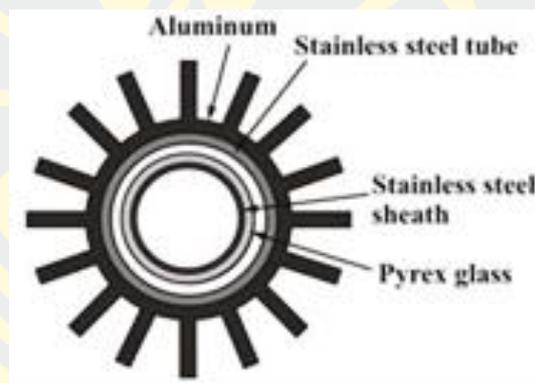
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย เป็นเครื่องผลิตโอโซนด้วยวิธีไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ

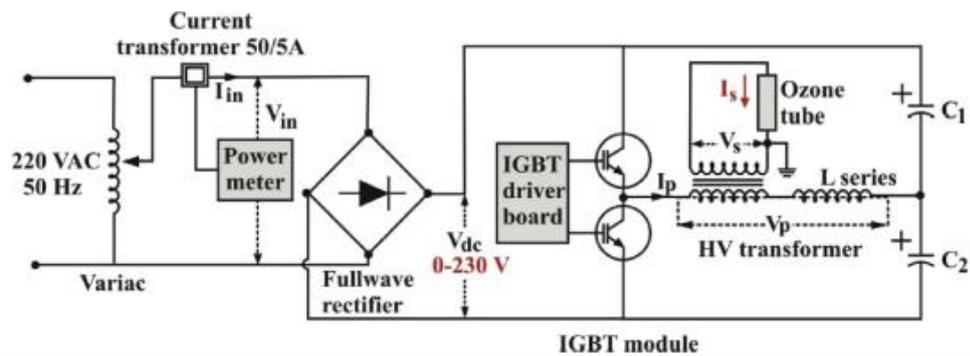
1. หลอดผลิตโอโซน (ภาพที่ 3 และ 4)
2. แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง เพื่อจ่ายไฟให้แก่หลอดผลิตโอโซน (ภาพที่ 5)



ภาพที่ 3 ภาพตามยาวโครงสร้างหลอดผลิตโอโซน



ภาพที่ 4 ภาพตามขวางโครงสร้างหลอดผลิตโอโซน



ภาพที่ 5 ไดอะแกรมของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงที่ต่อกับหลอดผลิตโอโซน

3.3 วิธีการทดลอง

การทดลองตอนที่ 1 การศึกษารูปแบบและเงื่อนไขในการผลิตก๊าซโอโซน

1. ผลิตก๊าซโอโซนด้วยเครื่องผลิตก๊าซโอโซนแบบวิธีไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ โดยใช้ก๊าซออกซิเจน และ อากาศ เป็นก๊าซปฏิกิริยา

2. ศึกษาผลของเงื่อนไขเรื่องอัตราการไหลในการผลิตก๊าซโอโซน โดยใช้รายละเอียดดังตารางที่ 2

3. ศึกษาผลของเงื่อนไขเรื่องช่วงเวลาในการผลิตก๊าซโอโซน โดยใช้รายละเอียดดังตารางที่ 3

4. วิเคราะห์ปริมาณโอโซนด้วยวิธีวิเคราะห์ Standard method number 2350E ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

4.1 เตรียมสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไอโอไดด์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร อย่างน้อย 500 มิลลิลิตร

4.2 นำสารละลายที่ได้ มาเติมน้ำแบ่ง 1 มิลลิลิตร และทำการไตเตรทด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.1 N จนถึงจุดยุติ จะได้สารละลายไม่มีสี

ตารางที่ 2 เงื่อนไขของอัตราการไหลในการผลิตก๊าซโอโซนด้วยเครื่องผลิตก๊าซโอโซนแบบวิธีไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ

เงื่อนไข	รายละเอียด
สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์	ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (%w/v) ปริมาตร 500 มิลลิลิตร (ml)
ชนิดของก๊าซ	ก๊าซออกซิเจน (ความบริสุทธิ์ 99.5%) และอากาศ
กำลังไฟฟ้า	300 วัตต์ (W)
อัตราการไหลของก๊าซปฏิกิริยา	2 5 8 11 และ 14 ลิตรต่อนาที (L/min)

ตารางที่ 3 เงื่อนไขของเวลาในการผลิตก๊าซโอโซนด้วยเครื่องผลิตก๊าซโอโซนแบบวิธีไดอิเล็กทริก
แบริเออร์ดีสชาร์จ

เงื่อนไข	รายละเอียด
ชนิดของก๊าซ	ก๊าซออกซิเจน (ความบริสุทธิ์ 99.5%) และอากาศ
อัตราการไหลของก๊าซปฏิกิริยา	11 ลิตรต่อนาที
กำลังไฟฟ้า	300 วัตต์
เวลาในการผลิตโอโซน	5 10 15 20 25 และ 30 นาที

การทดลองตอนที่ 2 ศึกษาผลของขนาดและปริมาณของฟองก๊าซโอโซน ที่สร้างจาก
อุปกรณ์สร้างฟองแบบหัวทรายทางการค้า ในแต่ละรูปแบบ/เงื่อนไข

1. ศึกษาลักษณะทางกายภาพของวัสดุรูปทรง
2. ดำเนินการออกแบบสร้างและติดตั้งถังปฏิกรณ์อะคริลิกทรงกระบอก พร้อมอุปกรณ์
สร้างฟองแบบหัวทรายทางการค้า ในแต่ละรูปแบบ/เงื่อนไข
3. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสร้างฟองก๊าซโอโซน ด้วยการแปรค่าช่วงเวลาของการ
ผลิตฟองก๊าซโอโซน โดยใช้รายละเอียดตามตารางที่ 4
4. ศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพของฟองก๊าซโอโซน
5. ศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวอย่างน้ำ ด้วยการตรวจวัดดัชนีคุณภาพน้ำ
ด้านต่าง ๆ โดยเครื่องวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ดังนี้
 - 5.1 ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity)
 - 5.2 ค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH)
 - 5.3 ค่าศักย์ออกซิไดซ์ (ORP)

ตารางที่ 4 รูปแบบและเงื่อนไขที่มีผลต่อขนาด และปริมาณของฟองก๊าซโอโซน

เงื่อนไข	รายละเอียด
ชนิดของก๊าซ	ก๊าซออกซิเจน (ความเข้มข้นออกซิเจนประมาณ 98%) และอากาศ (ความเข้มข้นออกซิเจนประมาณ 21%)
ลักษณะหัวทราย	ชนิดรูปทรงขนาดไมโครทางการค้าและนาโนทางการค้า
เวลาในการผลิตโอโซน	5 10 15 20 25 และ 30 นาที

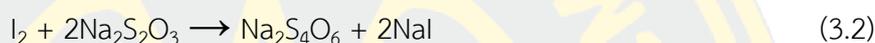
การทดลองตอนที่ 3 การศึกษาประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมปาล์ม น้ำมันด้วยก๊าซโอโซน ร่วมกับอุปกรณ์สร้างฟองแบบหัวทรายทางการค้า

1. เก็บตัวอย่างน้ำเสียจากบ่อบำบัดของโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันและกรองตัวอย่างน้ำเสียด้วยผ้าขาวบาง
2. วิเคราะห์คุณลักษณะของตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน
3. ดำเนินการออกแบบ สร้างและติดตั้งระบบการบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมปาล์ม น้ำมันด้วยก๊าซโอโซน ร่วมกับอุปกรณ์สร้างฟองแบบหัวทรายทางการค้า ตามรูปแบบและเงื่อนไขในการทดลองตอนที่ 2
4. ทำการทดลองบำบัดตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน ด้วยก๊าซโอโซน ร่วมกับอุปกรณ์สร้างฟองแบบหัวทรายทางการค้า ตามรูปแบบ/เงื่อนไขจากการทดลองตอนที่ 2 และรูปแบบ/เงื่อนไขในการผลิตก๊าซโอโซนจากการทดลองตอนที่ 1 ดังนี้
 - 4.1 นำตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน ใส่อุปกรณ์
 - 4.2 สร้างฟองก๊าซโอโซน ตามรูปแบบ/เงื่อนไขจากการทดลองตอนที่ 2
 - 4.3 ผลิตก๊าซโอโซน ตามรูปแบบ/เงื่อนไขจากการทดลองตอนที่ 1
 - 4.4 เดินระบบบำบัดน้ำเสียด้วยก๊าซโอโซน ร่วมกับอุปกรณ์สร้างฟองแบบหัวทรายทางการค้า ตามระยะเวลาต่างๆ
5. ศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของตัวอย่างน้ำเสีย ด้วยการตรวจวัดดัชนีคุณภาพน้ำด้านต่าง ๆ โดยเครื่องวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ดังนี้
 - 5.1 ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity)
 - 5.2 ค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH)
 - 5.3 ค่าศักย์ออกซิไดซ์ (ORP)
 - 5.4 ความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี (BOD)
 - 5.5 ค่าปริมาณออกซิเจนที่จุลชีพใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (COD)
6. ศึกษาประสิทธิภาพของระบบการบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันด้วยก๊าซโอโซน ร่วมกับอุปกรณ์สร้างฟองแบบหัวทรายทางการค้า ด้วยการนำผลการศึกษามาวิเคราะห์และทำการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำธรรมชาติของประเทศไทย ตามประกาศการนิคมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทยที่ 76/2560 เรื่อง กำหนดมาตรฐานทั่วไปในการระบายน้ำเสียลงสู่ระบบบำบัดน้ำเสียส่วนกลางในนิคมอุตสาหกรรม

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

1. การหาความเข้มข้นของไอโชนด้วยวิธีไอโอดิเมทรี (Iodometry)

การหาความเข้มข้นของไอโชนด้วยวิธีไอโอดิเมทรี สามารถหาได้จากปฏิกิริยาของไอโชนกับสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ เพื่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ไอโอดีน โดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร หลังจากนั้นทำการไทเทรตผลิตภัณฑ์ไอโอดีนที่ได้ด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟตความเข้มข้น 0.0188 โมลาร์ จนกระทั่งไอโอดีนถูกรีดิวซ์เป็นไอโอไดด์ ซึ่งเป็นสารละลายไม่มีสีที่จุดยุติ ดังสมการแสดงปฏิกิริยา



โดยสารเคมีที่ใช้ในการหาความเข้มข้นของไอโชน ได้แก่

1. โพแทสเซียมไอโอไดด์
2. ไอโอดีน
3. โซเดียมไทโอซัลเฟต
4. น้ำกลั่น (distilled water)

กำหนดให้

mol.[Na ₂ S ₂ O ₃]	แทน จำนวนโมล Na ₂ S ₂ O ₃
con.[Na ₂ S ₂ O ₃]	แทน ความเข้มข้นของ Na ₂ S ₂ O ₃
mol.[I ₂]	แทน จำนวนโมล I ₂
vol.[Na ₂ S ₂ O ₃]	แทน ปริมาตรของ Na ₂ S ₂ O ₃
mol.[O ₃]	แทน จำนวนโมล O ₃
con.[O ₃]	แทน ความเข้มข้นของ O ₃
Mw.[O ₃]	แทน มวลโมเลกุลของ O ₃

จะได้สมการดังนี้

$$mol.[O_3] = mol.[I_2] = \frac{1}{2} \times mol.[Na_2S_2O_3] \quad (3.3)$$

$$mol.[O_3] = mol.[I_2] = \frac{1}{2} \times \frac{con.[Na_2S_2O_3] \times vol.[Na_2S_2O_3]}{1000} \quad (3.4)$$

$$mol.[O_3] = mol.[I_2] = \frac{con.[O_3] \times vol.[O_3]}{1000} \quad (3.5)$$

หลังจากนั้นจึงคำนวณหาความเข้มข้นของโอโซนจาก

$$con.[O_3] = \frac{1}{2} \times \frac{con.[Na_2S_2O_3] \times vol.[Na_2S_2O_3]}{vol.[O_3]} \text{ mol / L} \quad (3.6)$$

$$con.[O_3] = \frac{1}{2} \times \frac{con.[Na_2S_2O_3] \times vol.[Na_2S_2O_3]}{vol.[O_3]} \times Mw.[O_3] \times 1000 \text{ mg / L} \quad (3.7)$$

2. การหาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย

การหาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย สามารถคำนวณได้จาก

$$\% \text{ Removal} = \frac{(\text{ความเข้มข้นของน้ำเสียก่อนการบำบัด} - \text{ความเข้มข้นของน้ำเสียหลังการบำบัด})}{\text{ความเข้มข้นของน้ำเสียก่อนการบำบัด}} \times 100$$

บทที่ 4

ผลการวิจัย

ในบทนี้กล่าวถึงผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันด้วยกระบวนการโอโซนชั้น ประกอบด้วย ผลการศึกษารูปแบบและเงื่อนไขในการผลิตก๊าซโอโซน ผลการศึกษาขนาดและปริมาณของฟองก๊าซโอโซน ที่สร้างจากอุปกรณ์สร้างฟองแบบหัวทรายทางการค้า ในแต่ละรูปแบบ/เงื่อนไข ภายใต้สภาวะต่าง ๆ และผลการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจาก จากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันด้วย สารออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) ที่เกิดจากสารกระตุ้นทางเคมี (Promoter) ประเภทอนุมูลอิสระกลุ่มที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบสำคัญ (Reactive Oxygen Species : ROS) เช่น Superoxide anion ($O_2^{\bullet-}$), Hydroxyl (HO^{\bullet}), Hydroperoxyl (HO_2^{\bullet}), Peroxyl (RO_2^{\bullet}), Alkoxyl (RO^{\bullet}), Carbonate ($CO_3^{\bullet-}$), Carbon dioxide ($CO_2^{\bullet-}$) โดยผลการทดลองที่จากการศึกษาสามารถแบ่งได้ 3 ส่วน คือ

- 1) ผลการศึกษารูปแบบและเงื่อนไขในการผลิตก๊าซโอโซนด้วยวิธีไดอิเล็กทริกแบริเออร์ ดิสชาร์จ โดยใช้ก๊าซออกซิเจน และอากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยา
- 2) ผลการศึกษาผลของขนาดและปริมาณของฟองก๊าซโอโซน ที่สร้างจากระบบบำบัดที่ใช้ก๊าซโอโซนร่วมกับอุปกรณ์สร้างฟองแบบหัวทรายทางการค้า ในแต่ละรูปแบบ/เงื่อนไขภายใต้สภาวะต่างๆ
- 3) ผลการศึกษาประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันด้วยด้วย สารออกซิไดซ์

4.1 ผลการศึกษารูปแบบและเงื่อนไขในการผลิตก๊าซโอโซนด้วยวิธีไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ โดยใช้ก๊าซออกซิเจน และอากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยา

ผลการศึกษารูปแบบและเงื่อนไขในการผลิตก๊าซโอโซน ภายใต้เงื่อนไขอัตราการไหลของก๊าซปฏิกิริยา ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 เงื่อนไขของอัตราการไหลในการผลิตก๊าซโอโซนด้วยเครื่องผลิตก๊าซโอโซนแบบวิธีไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ

เงื่อนไข	รายละเอียด
สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์	ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ปริมาตร 500 มิลลิลิตร
ชนิดของก๊าซ	ก๊าซออกซิเจน (ความบริสุทธิ์ 99.5%) และอากาศ
กำลังไฟฟ้า	300 วัตต์
อัตราการไหลของก๊าซปฏิกิริยา	2 5 8 11 และ 14 ลิตรต่อนาที

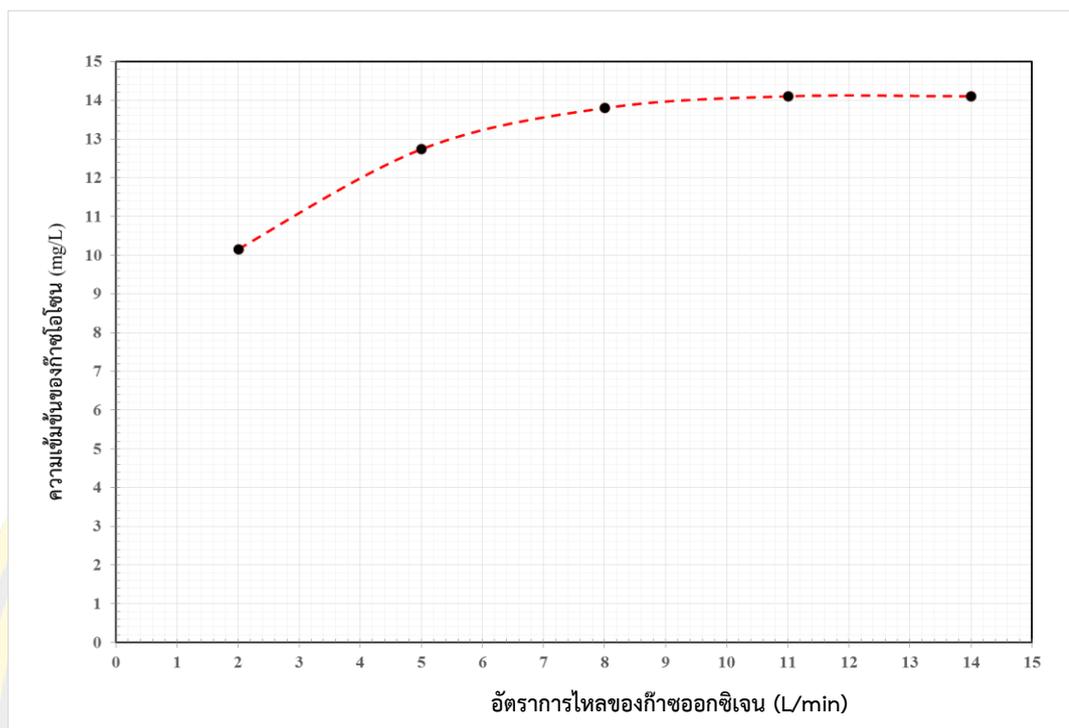
4.1.1 ผลของอัตราการไหลในการผลิตก๊าซโอโซน เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา

สำหรับการใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา ที่มีอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน เท่ากับ 2, 5, 8, 11 และ 14 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ และวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซโอโซน จากลักษณะสีของสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ โดยกำหนดความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร และใช้เวลาที่ใช้ในการป้อนก๊าซโอโซน 1 นาที พบว่าลักษณะสีของสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์สัมพันธ์กับความเข้มข้นของก๊าซโอโซน ตามอัตราการไหลของก๊าซปฏิกิริยา ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ลักษณะทางกายภาพของสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ และความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยาที่มีอัตราการไหลต่างกัน

ก๊าซปฏิกิริยา	ก่อนเติมไอโซน	อัตราการไหล (L/min)				
		2	5	8	11	14
ออกซิเจน (O ₂)						
ความเข้มข้นของก๊าซไอโซน (mg/L)	n.d.	10.16	12.74	13.80	14.11	14.11

จากตารางที่ 6 การเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์กับก๊าซไอโซนที่ผลิตได้จากก๊าซออกซิเจนที่มีอัตราการไหลต่างๆ จะสามารถสังเกตเห็นว่าลักษณะทางกายภาพของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์กับก๊าซไอโซนที่ผลิตได้ เกิดเป็นสารละลายที่มีสีน้ำตาลอมเหลืองในลักษณะที่มีความเข้มของสีน้ำตาลมากขึ้น เมื่ออัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเพิ่มขึ้น เมื่อทำการวัดหาความเข้มข้นของก๊าซไอโซนที่ผลิตได้ ด้วยวิธีไอโอโดเมทรี โดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ที่ทำปฏิกิริยากับก๊าซไอโซน (สารละลายสีน้ำตาลอมเหลือง) มาไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟตความเข้มข้น 0.0188 โมลาร์ จนกระทั่งไอโอดีนถูกรีดิวซ์เป็นไอโอไดด์ (สารละลายไม่มีสี) ที่จุดยุติ และนำปริมาณของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตมาคำนวณหาความเข้มข้นของก๊าซไอโซน จะพบว่าค่าความเข้มข้นของก๊าซไอโซนมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 2 ถึง 8 ลิตรต่อนาที จากนั้นจะมีแนวโน้มคงที่ในช่วงอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 11 ถึง 14 ลิตรต่อนาที ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอโซนกับอัตราการไหล โดยใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา ดังภาพที่ 6

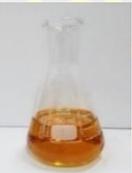
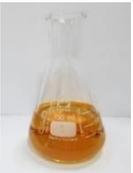


ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของก๊าซโอโซนกับอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน

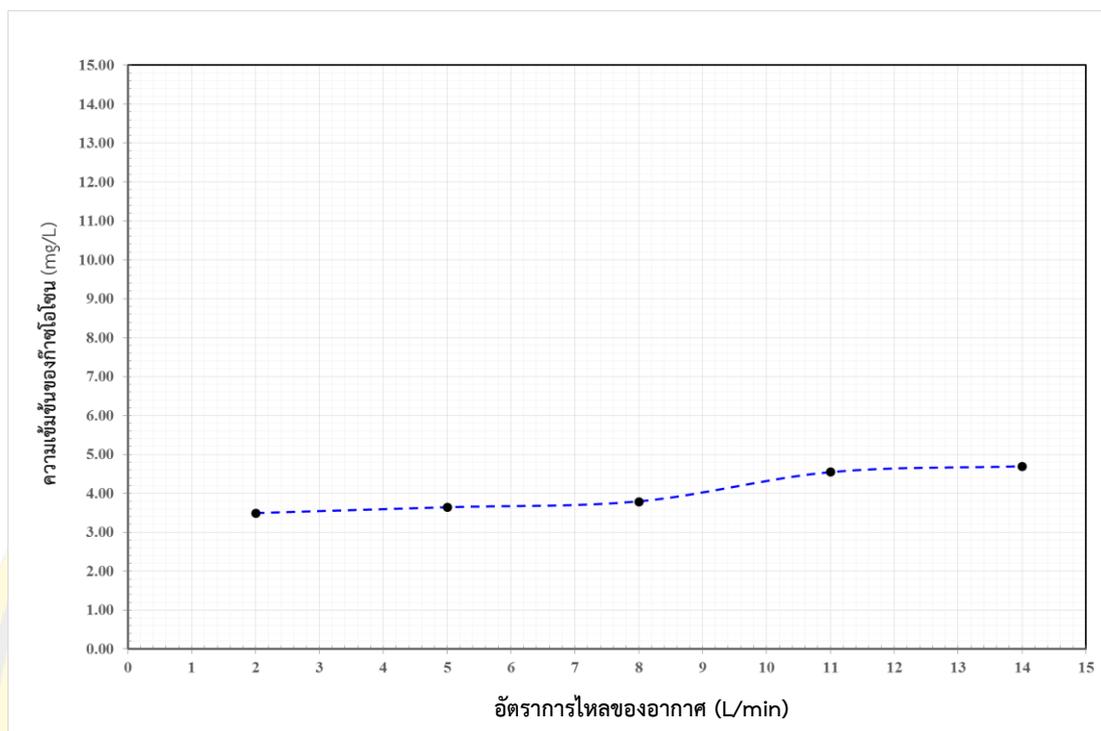
4.1.2 ผลของอัตราการไหลในการผลิตก๊าซโอโซน เมื่อใช้อากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยา

สำหรับการใช้อากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยา จะใช้อัตราการไหลของอากาศแบบเดียวกันกับอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน คือ 2, 5, 8, 11 และ 14 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ และวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซโอโซน จากลักษณะสีของสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ โดยกำหนดความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร และใช้เวลาที่ใช้ในการป้อนก๊าซโอโซน 1 นาที พบว่าลักษณะสีของสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์สัมพันธ์กับความเข้มข้นของก๊าซโอโซน ตามอัตราการไหลของอากาศ ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ลักษณะทางกายภาพของสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ และความเข้มข้นของก๊าซโอโซน เมื่อใช้อากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยาที่มีอัตราการไหลต่างกัน

ก๊าซ ปฏิกิริยา	ก่อน เติมโอโซน	อัตราการไหล (L/min)				
		2	5	8	11	14
อากาศ (Air)						
ความ เข้มข้น ของก๊าซ โอโซน (mg/L)	n.d.	3.49	3.64	3.79	4.55	4.70

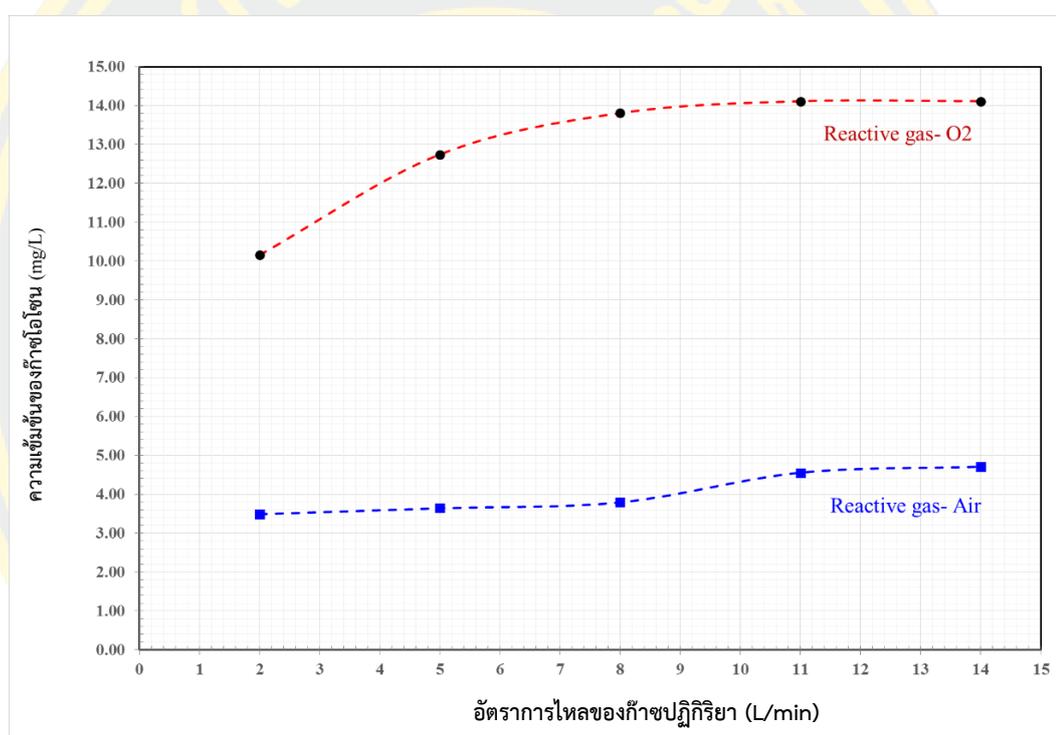
จากตารางที่ 7 การเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์กับก๊าซโอโซนที่ผลิตได้จากอากาศที่มีอัตราการไหลต่างๆ จะสามารถสังเกตเห็นว่าลักษณะทางกายภาพของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์กับก๊าซโอโซนที่ผลิตได้จากอากาศ เกิดเป็นสารละลายที่มีสีน้ำตาลอมเหลืองที่มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น และหลังจากทำการวัดหาความเข้มข้นของก๊าซโอโซนที่ผลิตได้ ด้วยวิธีไอโอโดเมทรี โดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ที่ทำปฏิกิริยากับก๊าซโอโซน (สารละลายสีน้ำตาลอมเหลือง) มาไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟตความเข้มข้น 0.0188 โมลาร์ จนกระทั่งไอโอดีนถูกรีดิวซ์เป็นไอโอไดด์ (สารละลายไม่มีสี) ที่จุดยุติ และนำปริมาณของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตมาคำนวณหาความเข้มข้นของก๊าซโอโซน จะพบว่าค่าความเข้มข้นของก๊าซโอโซนมีแนวโน้มที่ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นของก๊าซโอโซนกับอัตราการไหล โดยใช้อากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยา ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของก๊าซไอโซนกับอัตราการไหลของอากาศ

จากกราฟความสัมพันธ์การเปรียบเทียบความเข้มข้นของไอโซนกับอัตราการไหล เมื่อใช้ออกซิเจนและอากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยา ดังภาพที่ 8 จะเห็นได้ว่าค่าความเข้มข้นของก๊าซไอโซน เมื่อใช้ออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา ที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 2 ถึง 8 ลิตรต่อนาที ค่าความเข้มข้นของก๊าซไอโซนมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 10.16 ถึง 13.80 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นในช่วงอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 11 ถึง 14 ลิตรต่อนาที ค่าความเข้มข้นของก๊าซไอโซนจะมีแนวโน้มคงที่ โดยพบว่าเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 11 ลิตรต่อนาที ซึ่งมีระดับความเข้มข้น 14.11 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการวิจัยของ N. H. Nghi et al. (2019), ซึ่งได้แสดงให้เห็นว่าปริมาณออกซิเจนในกระบอกปฏิกรณ์ผลิตก๊าซไอโซน ส่งผลต่อประสิทธิภาพของก๊าซไอโซนที่ผลิตได้ ดังนั้นจะเห็นว่าเมื่ออัตราการไหลของก๊าซปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น จะทำให้มีปริมาณออกซิเจนมากขึ้น ดังนั้นความเข้มข้นของก๊าซไอโซนที่ผลิตได้จึงมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยอัตราการไหลของก๊าซปฏิกิริยาที่ 11 ลิตรต่อนาที จะมีปริมาณออกซิเจนเพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดเป็นก๊าซไอโซน และจะเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่อเทียบกันระหว่างการใช้อากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยา กับการใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา ซึ่งจะเห็นว่าค่าความเข้มข้นของก๊าซไอโซนที่ใช้อากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยาจะมีความเข้มข้นเพียง 4.70 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งน้อยกว่าค่าความเข้มข้นของก๊าซไอโซนที่ใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา ซึ่งมีความเข้มข้นถึง 14.11 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสูงกว่าประมาณ 4 เท่า

นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับปริมาณของออกซิเจนที่ต่างกันระหว่างอากาศกับก๊าซออกซิเจนทางการค้า โดยปริมาณออกซิเจนซึ่งเป็นส่วนประกอบในอากาศมีประมาณร้อยละ 21 และปริมาณก๊าซออกซิเจนทางการค้ามีออกซิเจนอยู่ที่ประมาณร้อยละ 99 ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ปริมาณออกซิเจนในกระบอกปฏิกรณ์ผลิตก๊าซโอโซนส่งผลต่อความเข้มข้นของก๊าซโอโซนที่ผลิตได้ ดังนั้นที่อัตราการไหลของก๊าซปฏิกิริยา (ก๊าซออกซิเจน/อากาศ) 11 ลิตรต่อนาที จึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำไปใช้เป็นเงื่อนไขในการศึกษา ผลของเวลาในการผลิตก๊าซโอโซน ภายใต้รูปแบบ/เงื่อนไขในการผลิตก๊าซโอโซน ตามรายละเอียดในตารางที่ 8



ภาพที่ 8 เปรียบเทียบความเข้มข้นของโอโซนกับอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนและอากาศที่ใช้เป็นก๊าซปฏิกิริยา

ตารางที่ 8 เงื่อนไขของเวลาในการผลิตก๊าซโอโซนด้วยเครื่องผลิตก๊าซโอโซนแบบวิธีไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ

เงื่อนไข	รายละเอียด
ชนิดของก๊าซ	ก๊าซออกซิเจน (ความบริสุทธิ์ 99.5%) และอากาศ
อัตราการไหลของก๊าซปฏิกิริยา	11 ลิตรต่อนาที
กำลังไฟฟ้า	300 วัตต์
เวลาในการผลิตก๊าซโอโซน	5 10 15 20 25 และ 30 นาที

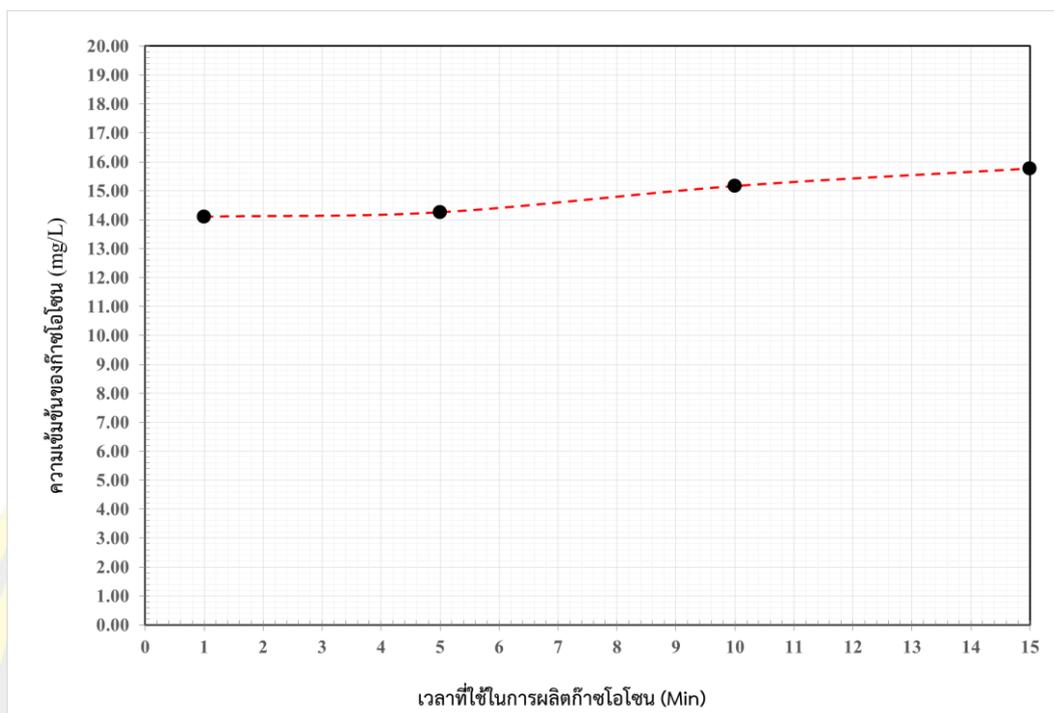
4.1.3 ผลของเวลาในการผลิตก๊าซโอโซน เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา

สำหรับเวลาที่ใช้ในการผลิตก๊าซโอโซน โดยใช้ก๊าซออกซิเจน เป็นก๊าซปฏิกิริยาจะใช้อัตราการไหลของก๊าซปฏิกิริยาในอัตรา 11 ลิตรต่อนาที ซึ่งเป็นสถานะที่เหมาะสมที่สุดจากผลการทดลองเกี่ยวกับอัตราการไหลของก๊าซปฏิกิริยาสำหรับผลิตก๊าซโอโซน สำหรับเงื่อนไขเวลาในการผลิตโอโซน จะใช้เวลา 1 5 10 และ 15 นาที ตามลำดับ ในการผลิตก๊าซโอโซน และวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซโอโซน จากลักษณะสีของสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ โดยกำหนดความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร พบว่าลักษณะสีของสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ มีลักษณะความเข้มของสีน้ำตาลมากขึ้น ตามช่วงเวลาที่ใช้ในการผลิตก๊าซโอโซน ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ลักษณะสีของสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ก่อนและหลังเติมก๊าซโอโซน โดยใช้ ออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา ที่เวลาต่างๆ

ก๊าซป้อน	ก่อน เติมโอโซน	เวลาที่ใช้ในการผลิตก๊าซโอโซน (min)			
		1	5	10	15
ออกซิเจน (O ₂)					
ความ เข้มข้น ของก๊าซ โอโซน (mg/L.)	n.d.	14.11	14.26	15.17	15.77

จากตารางที่ 9 การเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์กับก๊าซโอโซนที่ผลิตได้โดยใช้ช่วงเวลาในการผลิตต่างๆ จะสามารถสังเกตเห็นว่าลักษณะทางกายภาพของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์กับก๊าซโอโซนที่ผลิตได้ เกิดเป็นสารละลายที่มีสีน้ำตาลอมเหลืองที่มีลักษณะความเข้มของสีน้ำตาลที่เข้มข้น ตามช่วงเวลาที่เพิ่มขึ้น เมื่อทำการวัดหาความเข้มข้นของก๊าซโอโซนที่ผลิตได้ ด้วยวิธีไอโอดิเมทรี โดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ที่ทำปฏิกิริยากับก๊าซโอโซน (สารละลายสีน้ำตาลอมเหลือง) มาไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟตความเข้มข้น 0.0188 โมลาร์ จนกระทั่งไอโอดีนถูกรีดิวซ์เป็นไอโอไดด์ (สารละลายไม่มีสี) ที่จุดยุติ และนำปริมาณของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตมาคำนวณหาความเข้มข้นของก๊าซโอโซน จะพบว่าค่าความเข้มข้นของก๊าซโอโซนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในช่วง 10 นาที แต่หลังจากนั้นค่าความเข้มข้นของก๊าซโอโซนมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นของก๊าซโอโซนกับช่วงเวลาในการผลิตก๊าซโอโซน เมื่อใช้ออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโอโซนกับเวลาในการผลิตก๊าซโอโซน
เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา

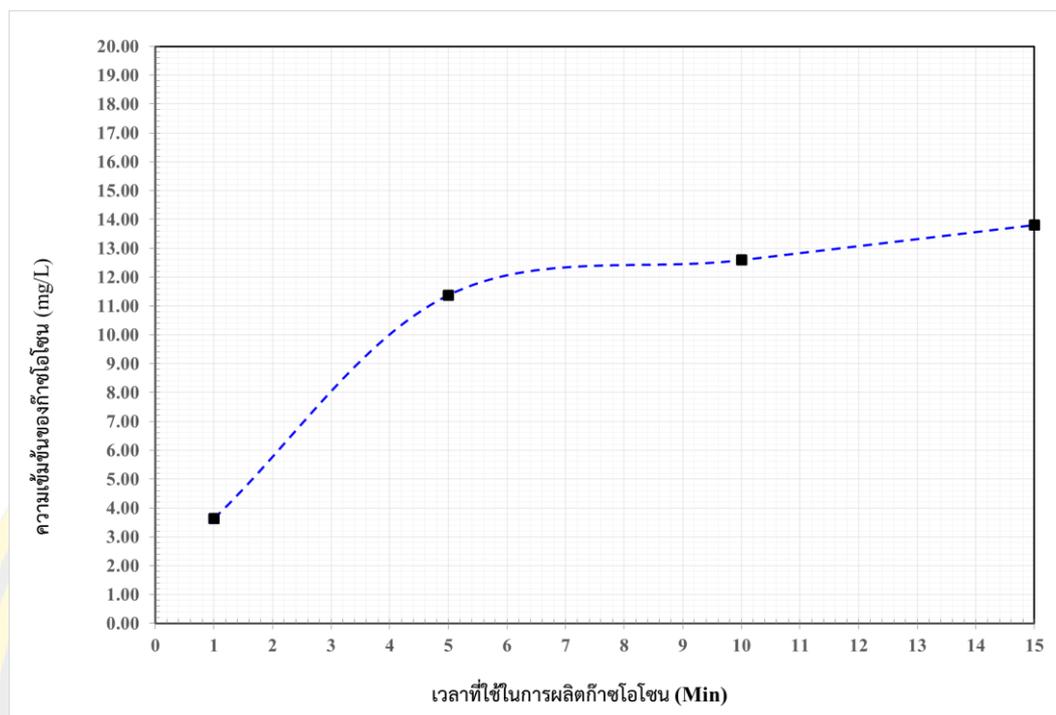
4.1.4 ผลของเวลาในการผลิตก๊าซโอโซน เมื่อใช้อากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยา

สำหรับเวลาที่ใช้ในการผลิตก๊าซโอโซน โดยใช้อากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยา จะใช้เงื่อนไขเดียวกับการผลิตก๊าซโอโซนที่ใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา คือ ใช้อัตราการไหลของก๊าซปฏิกิริยา 11 ลิตรต่อนาที และเงื่อนไขเวลาในการผลิตโอโซน 1 5 10 และ 15 นาที ตามลำดับ จากนั้นจึงวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซโอโซน จากลักษณะสีของสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ โดยกำหนดความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร พบว่าลักษณะสีของสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ สัมพันธ์กับความเข้มข้นของก๊าซโอโซน ตามช่วงเวลาที่ใช้ในการผลิตก๊าซโอโซน โดยลักษณะของสีจะมีการเปลี่ยนแปลงจากสีน้ำตาลอมเหลืองเป็นสีน้ำตาลเข้ม ดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ลักษณะสีของสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ก่อนและหลังเติมก๊าซไอโซน โดยใช้อากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยา ที่เวลาต่างๆ

ก๊าซป้อน	ก่อนเติมไอโซน	เวลาที่ใช้ในการผลิตก๊าซไอโซน (min)			
		1	5	10	15
อากาศ (Air)					
ความเข้มข้นของก๊าซไอโซน (mg/hr.)	n.d.	3.64	11.38	12.59	13.80

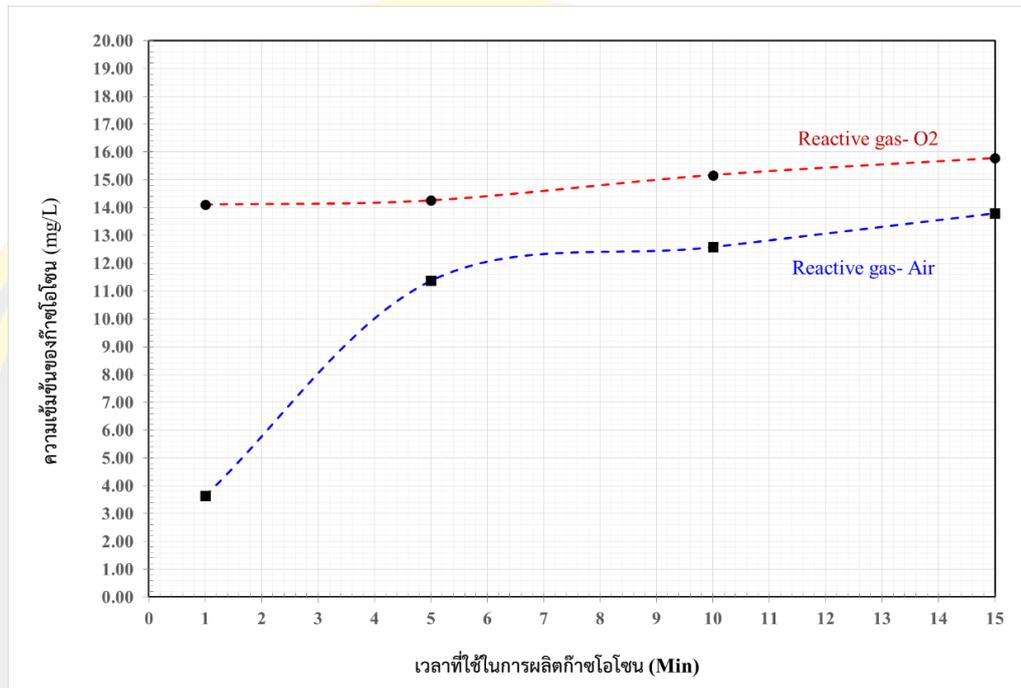
จากตารางที่ 10 การเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์กับก๊าซไอโซนที่ผลิตได้ภายใต้ช่วงเวลาต่างๆ สามารถสังเกตเห็นว่าลักษณะทางกายภาพของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์กับก๊าซไอโซนที่ผลิตได้ เกิดเป็นสารละลายที่มีสีน้ำตาลอมเหลือง และเมื่อช่วงเวลาที่ใช้ในการผลิตก๊าซไอโซนเพิ่มขึ้น สารละลายจะเปลี่ยนแปลงเป็นสีน้ำตาลเข้ม เมื่อทำการวัดหาความเข้มข้นของก๊าซไอโซนที่ผลิตได้ ด้วยวิธีไอโอดิเมทรี โดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ที่ทำปฏิกิริยากับก๊าซไอโซน (สารละลายสีน้ำตาลอมเหลือง) มาไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟตความเข้มข้น 0.0188 โมลาร์ จนกระทั่งไอโอดีนถูกรีดิวซ์เป็นไอโอไดด์ (สารละลายไม่มีสี) ที่จุดยุติ และนำปริมาณของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตมาคำนวณหาความเข้มข้นของก๊าซไอโซน จะพบว่าค่าความเข้มข้นของก๊าซไอโซนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในช่วง 10 นาที แต่หลังจากนั้น ค่าความเข้มข้นของก๊าซไอโซนมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวในรูปของกราฟความสัมพันธ์ ระหว่างความเข้มข้นของก๊าซไอโซนกับช่วงเวลาในการผลิตก๊าซไอโซน เมื่อใช้อากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยา ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของก๊าซไอโซนกับเวลาในการผลิตก๊าซไอโซน
เมื่อใช้อากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยา

จากการเปรียบเทียบความเข้มข้นของไอโซนกับเวลาที่ใช้ในการผลิตก๊าซไอโซน โดยใช้ก๊าซออกซิเจนและอากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยา ดังภาพที่ 11 จะเห็นได้ว่าค่าความเข้มข้นของก๊าซไอโซนจากการใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา ที่ช่วงเวลาน้อยกว่า 10 นาที ค่าความเข้มข้นของก๊าซไอโซนมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก 14.11 เป็น 15.77 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่เมื่อใช้อากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยา ค่าความเข้มข้นของก๊าซไอโซนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญโดยเพิ่มจาก 3.46 เป็น 13.80 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งจะเห็นได้ว่าช่วงเวลาที่ใช้ในการผลิตก๊าซไอโซน สัมพันธ์กับปริมาณความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน ตามรายงานของ G. P. Panta et al. (2021) ได้อธิบายไว้ว่าเมื่อปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้นจะไปเพิ่มการชนของกับโมเลกุลออกซิเจน ซึ่งทำให้สามารถผลิตก๊าซไอโซนได้มากขึ้น ทำให้มีความเข้มข้นสูงขึ้น โดยจะเห็นได้อย่างชัดเจนจากการใช้อากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยา เมื่อช่วงเวลาที่ใช้ในการผลิตก๊าซไอโซน เท่ากับ 1 นาที ค่าความเข้มข้นของก๊าซไอโซนที่ผลิตจากอากาศ คือ 3.46 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่เมื่อเพิ่มช่วงเวลาที่ในการผลิตก๊าซไอโซนให้มากขึ้นเป็น 15 นาที ทำให้ปริมาณโมเลกุลของออกซิเจนมีปริมาณมากขึ้น ทำให้เกิดการชนกันมากขึ้นและค่าความเข้มข้นของก๊าซไอโซนที่ผลิตได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 13.80 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าสูงขึ้นมากจนมีค่าใกล้เคียงกับค่าความเข้มข้นของก๊าซไอโซนที่ผลิตจากก๊าซออกซิเจนที่เวลา 10 นาที (15.77 มิลลิกรัมต่อลิตร) ดังนั้น ช่วงเวลาที่ใช้ในการ

ผลิตก๊าซโอโซนควรใช้ช่วงเวลาในการผลิตไม่น้อยกว่า 10 นาที สำหรับการใช้ออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา ส่วนการใช้อากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยา ควรใช้ช่วงเวลาในการผลิตไม่น้อยกว่า 15 นาที จึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด



ภาพที่ 11 เปรียบเทียบความเข้มข้นของโอโซนกับเวลาที่ใช้ในการผลิตก๊าซเมื่อใช้ออกซิเจนและอากาศที่ใช้เป็นก๊าซปฏิกิริยา

4.2 ผลการศึกษาขนาดและปริมาณของฟองก๊าซไอโซน ที่สร้างจากอุปกรณ์สร้างฟองแบบหัวทรายทางการค้า ในแต่ละรูปแบบ/เงื่อนไข

ผลการศึกษาขนาดและปริมาณฟองก๊าซไอโซน ที่สร้างจากอุปกรณ์สร้างฟองแบบหัวทรายทางการค้า ประกอบด้วย

1. ลักษณะทางกายภาพของอุปกรณ์สร้างฟองอากาศ
2. การออกแบบสร้างและติดตั้งถึงปฏิกรณ์อะคริลิกทรงกระบอก พร้อมอุปกรณ์สร้างฟองแบบหัวทรายทางการค้า
3. สภาวะที่เหมาะสมในการสร้างฟองก๊าซไอโซน
4. คุณลักษณะทางกายภาพของฟองก๊าซไอโซน
5. สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวอย่างน้ำ

4.2.1 ลักษณะทางกายภาพของอุปกรณ์สร้างฟองอากาศ

อุปกรณ์สร้างฟองแบบหัวทรายทางการค้า ที่ใช้ในการสร้างฟองก๊าซไอโซนในการทดลองนี้ เลือกใช้วัสดุพอร์ซเลนแบบหัวทรายทางการค้า เพื่อให้ก๊าซไอโซนที่ผลิตจากก๊าซปฏิริยา (ก๊าซออกซิเจน/อากาศ) เมื่อเคลื่อนที่ผ่านหัวทรายจะเกิดเป็นฟองก๊าซไอโซนขนาดเล็ก ซึ่งจะช่วยให้ก๊าซไอโซนสามารถลอยอยู่ในน้ำได้นานขึ้น ไม่ลอยขึ้นไปผิวน้ำอย่างรวดเร็วเหมือนฟองอากาศขนาดใหญ่ ซึ่งหัวทรายที่ใช้ มี 2 รูปแบบ คือ

1. หัวทรายชนิดรูพอร์ซเลนขนาดนาโนทางการค้า เพื่อสร้างฟองก๊าซไอโซนที่มีขนาดฟองนาโน โดยมีลักษณะทางกายภาพดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 ลักษณะทางกายภาพของหัวทราย ชนิดรูพอร์ซเลนขนาดนาโนทางการค้า

2. หัวทรายชนิดรูปทรงขนาดไมโครทางการค้า เพื่อสร้างฟองก๊าซไอโซนที่มีขนาดฟองไมโคร โดยมีลักษณะทางกายภาพดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 ลักษณะทางกายภาพของหัวทรายชนิดรูปทรงขนาดไมโครทางการค้า

- 4.2.2 การออกแบบสร้างและติดตั้งถังปฏิกรณ์อะคริลิกทรงกระบอก พร้อมอุปกรณ์สร้างฟองแบบหัวทรายทางการค้า



ภาพที่ 14 ถังปฏิกรณ์อะคริลิกทรงกระบอก

ซึ่งจะเห็นว่าถังปฏิกรณ์อะคริลิกเป็นรูปทรงกระบอก ทำจากอะคริลิกใสที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร และสูง 55 เซนติเมตร ภายในสามารถบรรจุน้ำได้ ประมาณ 6 ลิตร โดยมีอุปกรณ์สร้างฟองขนาดเล็กอยู่บริเวณจุดศูนย์กลาง เมื่อก๊าซโอโซนถูกส่งไปยังหัวทราย จะเกิดฟองก๊าซโอโซนขนาดเล็กพุ่งออกจากหัวทรายลอยขึ้นสู่น้ำด้านบน ซึ่งระหว่างฟองก๊าซโอโซนลอยขึ้นสู่น้ำจะเกิดการละลายลงในน้ำ

4.2.3 สภาวะที่เหมาะสมในการสร้างฟองก๊าซโอโซน

การศึกษารูปแบบและเงื่อนไขในการสร้างฟองก๊าซโอโซน ด้วยอัตราการไหลของ ก๊าซปฏิกิริยา (ก๊าซออกซิเจน/อากาศ) 11 ลิตรต่อนาที และภายใต้เงื่อนไข ที่แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 รูปแบบและเงื่อนไขที่มีผลต่อขนาด และปริมาณของฟองก๊าซโอโซน

เงื่อนไข	รายละเอียด
ชนิดของก๊าซ	ก๊าซออกซิเจน (ความเข้มข้นออกซิเจนประมาณ 98%) และอากาศ (ความเข้มข้นออกซิเจนประมาณ 21%)
ลักษณะหัวทราย	ชนิดรูพรุนขนาดไมโครและนาโน
เวลาในการผลิตโอโซน	5 10 15 20 25 และ 30 นาที

4.2.3.1 ลักษณะทางกายภาพของฟองก๊าซโอโซน ที่มีก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซ ปฏิกริยา

ตารางที่ 12 ลักษณะทางกายภาพของฟองก๊าซโอโซน ที่สร้างจากหัวทรายชนิดรูพรุนขนาดนาโนทางการค้าและไมโครทางการค้า

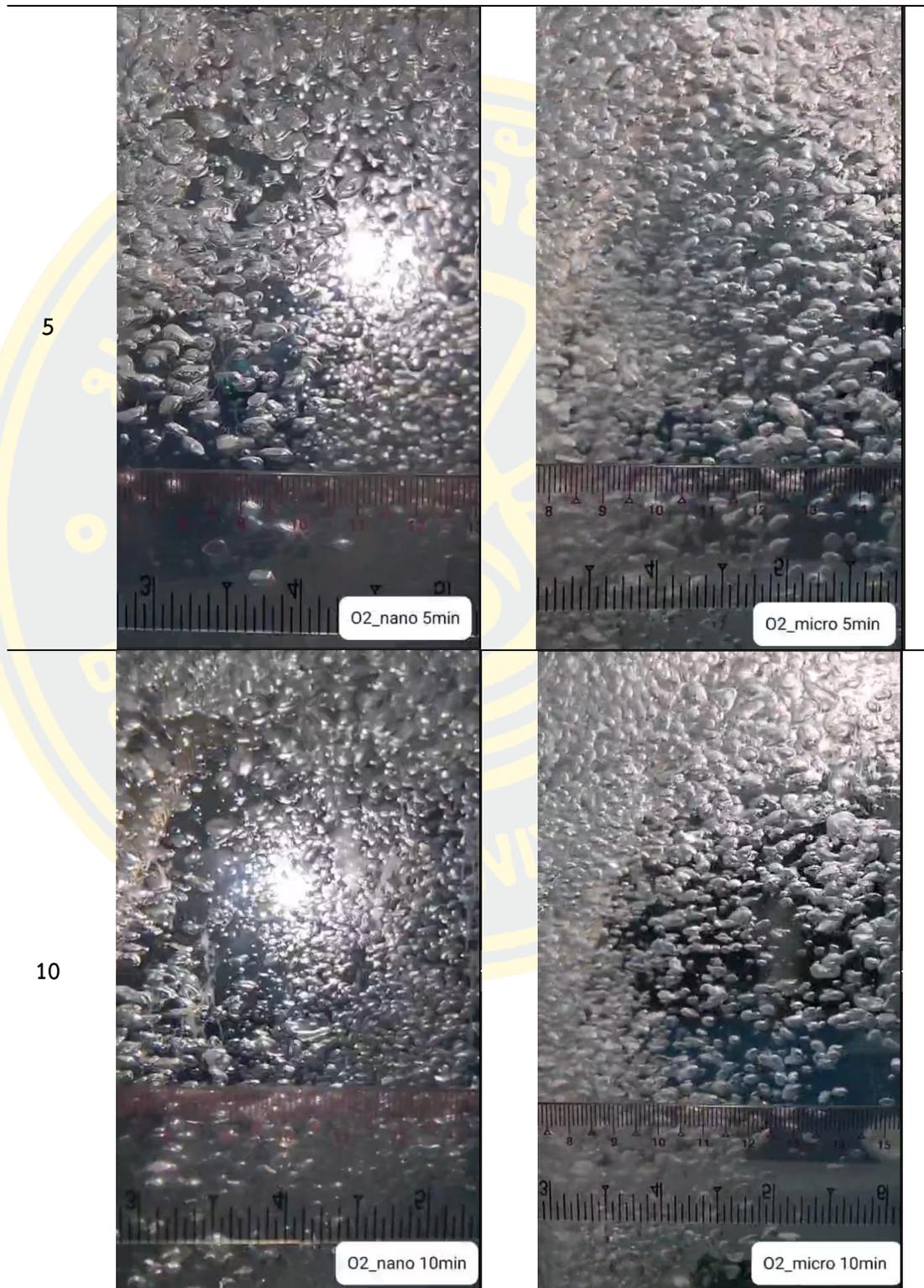
เวลา	ลักษณะทางกายภาพของฟองก๊าซโอโซน	
	หัวทรายชนิดรูพรุนขนาดนาโนทางการค้า	หัวทรายชนิดรูพรุนขนาดไมโครทางการค้า
0	 <p>O2_nano 0min</p>	 <p>O2_micro 0min</p>

ลักษณะทางกายภาพของฟองก๊าซโอโซน

เวลา

หัวทรายชนิดรูพรุนขนาดนาโนทางการค้า

หัวทรายชนิดรูพรุนขนาดไมโครทางการค้า



ลักษณะทางกายภาพของฟองก๊าซโอโซน

เวลา

หัวทรายชนิดรูพรุนขนาดนาโนทางการค้า

หัวทรายชนิดรูพรุนขนาดไมโครทางการค้า

15



20

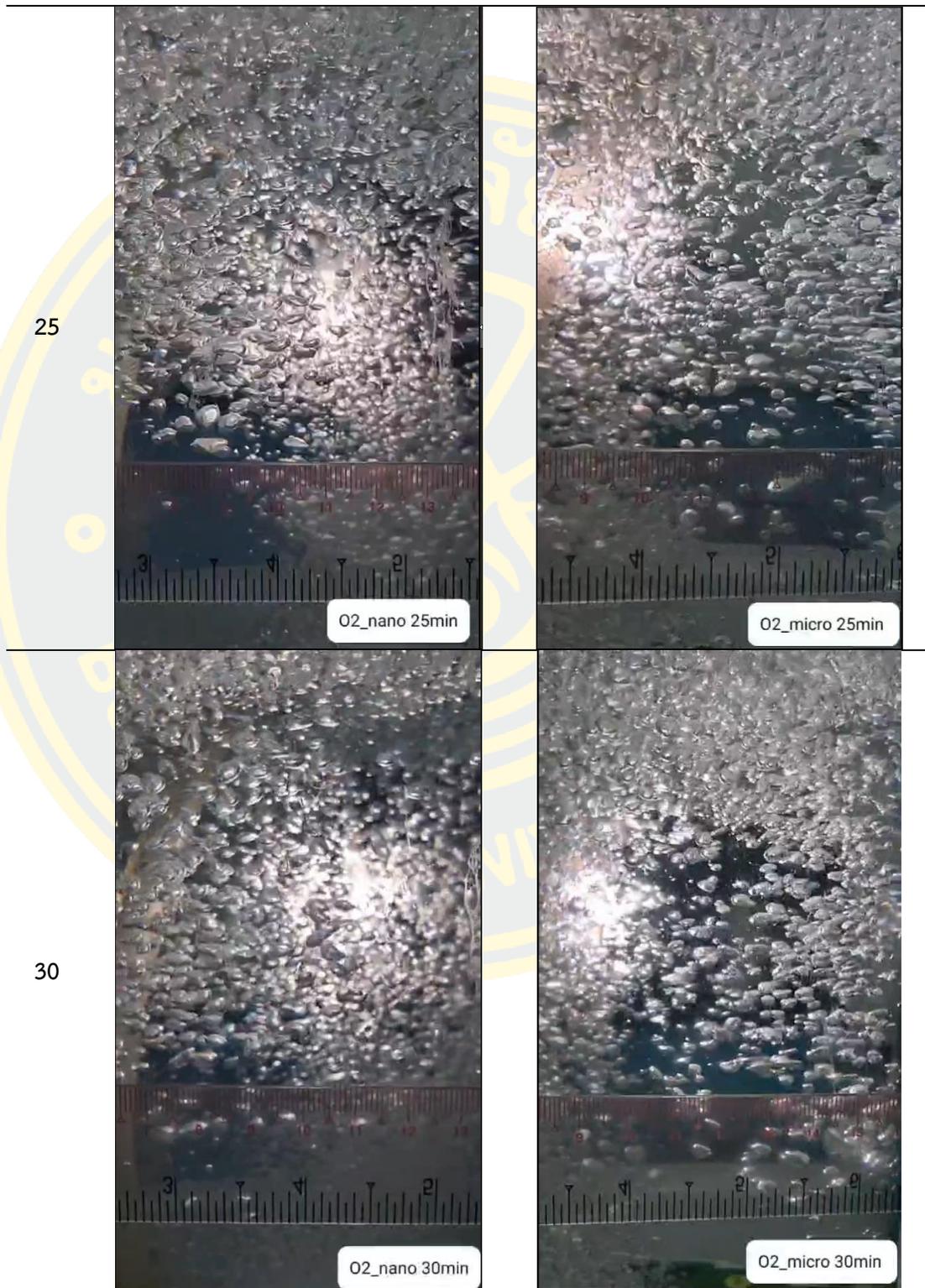


ลักษณะทางกายภาพของฟองก๊าซโอโซน

เวลา

หัวทรายชนิดรูพรุนขนาดนาโนทางการค้า

หัวทรายชนิดรูพรุนขนาดไมโครทางการค้า



จากการทดลองสร้างฟองก๊าซโอโซนจากหัวทรายชนิดรูพรุนขนาดไมโครทางการค้าและนาโนทางการค้า พบว่า เมื่อทำการปล่อยก๊าซโอโซนที่ผลิตจากการใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยาในน้ำ ด้วยเทคนิคการสร้างฟองผ่านหัวทรายชนิดรูพรุนขนาดไมโครทางการค้า และนาโนทางการค้า พบว่าสามารถทำให้เกิดฟองก๊าซโอโซน ที่มีขนาดต่างกัน โดยหัวทรายชนิดรูพรุนขนาดไมโครทางการค้า มีขนาดฟองที่ใหญ่กว่า แต่เมื่อเวลาในการผลิตฟองก๊าซโอโซนเพิ่มขึ้น เป็น 10 -20 นาที กลับพบว่าขนาดของก๊าซโอโซน มีขนาดเล็กลง เนื่องจากฟองก๊าซโอโซนเกิดการสะสมและลอยอยู่ในน้ำได้นานขึ้น จึงทำให้ฟองก๊าซโอโซนสามารถละลายน้ำได้มากขึ้น จึงทำให้ปริมาณฟองก๊าซโอโซนในน้ำมีปริมาณลดลง ซึ่งจะเห็นได้จากลักษณะการกระจายตัวของฟองก๊าซโอโซนที่มีการกระจายตัวน้อย แต่เมื่อเวลานานมากขึ้นเป็น 25-30 นาที ฟองก๊าซโอโซน กลับมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นและมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน รวมถึงมีปริมาณฟองก๊าซโอโซนเพิ่มขึ้น ซึ่งคาดว่าน่าจะเกิดจากการอิมตัวของสารออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) ในน้ำทำให้ฟองก๊าซโอโซนไม่สามารถละลายน้ำได้แล้ว ซึ่งลักษณะดังกล่าวสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนสำหรับกรณีของฟองก๊าซโอโซนที่สร้างจากหัวทรายชนิดรูพรุนขนาดไมโครทางการค้า

4.2.3.2 ลักษณะทางกายภาพของฟองก๊าซโอโซน ที่มีอากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยา

ตารางที่ 13 ลักษณะทางกายภาพของฟองก๊าซโอโซน ที่สร้างจากหัวทรายชนิดรูพรุนขนาดนาโนทางการค้าและไมโครทางการค้า

เวลา	ลักษณะทางกายภาพของฟองก๊าซโอโซน	
	หัวทรายชนิดรูพรุนขนาดนาโนทางการค้า	หัวทรายชนิดรูพรุนขนาดไมโครทางการค้า
0		

ลักษณะทางกายภาพของฟองก๊าซโอโซน

เวลา

หัวทรายชนิดรูพรุนขนาดนาโนทางการค้า

หัวทรายชนิดรูพรุนขนาดไมโครทางการค้า

5



10

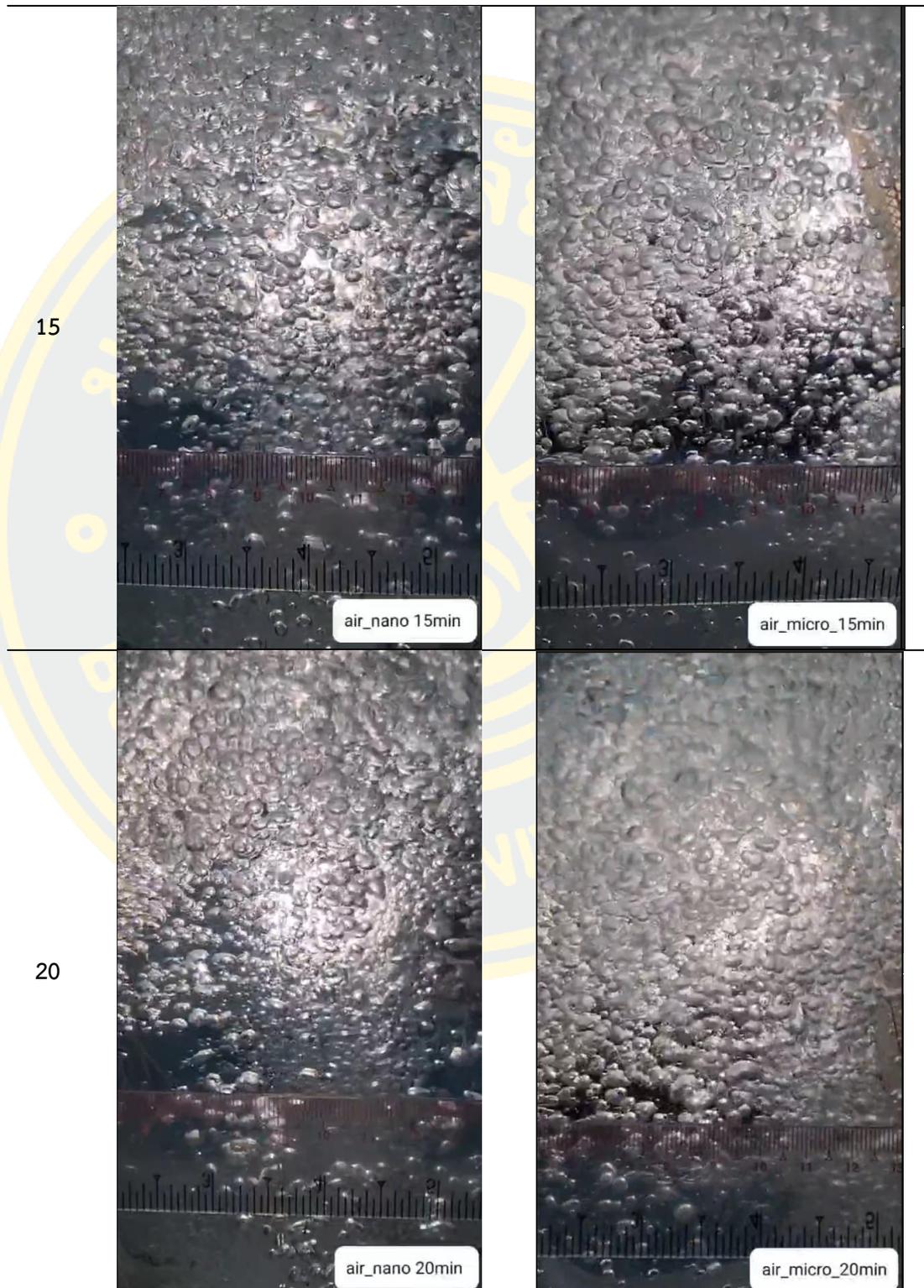


ลักษณะทางกายภาพของฟองก๊าซโอโซน

เวลา

หัวทรายชนิดรูพรุนขนาดนาโนทางการค้า

หัวทรายชนิดรูพรุนขนาดไมโครทางการค้า



ลักษณะทางกายภาพของฟองก๊าซโอโซน

เวลา

หัวทรายชนิดรูพรุนขนาดนาโนทางการค้า

หัวทรายชนิดรูพรุนขนาดไมโครทางการค้า

25



30



สำหรับการใช้อุปกรณ์สร้างฟองแบบหัวทรายชนิดรูปทรงขนาดไมโครทางการค้าและนาโนทางการค้า เพื่อสร้างฟองก๊าซโอโซน โดยใช้อากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยาในการผลิตก๊าซโอโซน พบว่าฟองก๊าซโอโซนมีขนาดแตกต่างกันเล็กน้อย โดยหัวทรายชนิดรูปทรงขนาดนาโนทางการค้า มีขนาดฟองที่เล็กกว่าเล็กน้อย และมีปริมาณฟองก๊าซโอโซนมากกว่า เนื่องจากขนาดฟองที่เล็กกว่าจึงทำให้ ลอยตัวขึ้นสู่อากาศได้ช้า ทำให้เกิดการสะสมและลอยอยู่ในน้ำได้นานขึ้น แต่เมื่อเวลาผ่านไป โดยเฉพาะในช่วงเวลา 10 -20 นาที ขนาดของก๊าซโอโซน กลับมีปริมาณฟองลดลงในลักษณะเดียวกับการใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา แต่เมื่อเวลานานมากขึ้นในช่วง 25-30 นาที ฟองก๊าซโอโซน กลับมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น และมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน รวมถึงมีปริมาณฟองก๊าซโอโซนเพิ่มขึ้น ซึ่งคาดว่าน่าจะเกิดจากการอิมตัวของสารออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) ในน้ำทำให้ฟองก๊าซโอโซนไม่สามารถละลายน้ำได้แล้ว ซึ่งจะเห็นลักษณะดังกล่าวได้อย่างชัดเจนสำหรับกรณีของฟองก๊าซโอโซนที่สร้างจากหัวทรายชนิดรูปทรงขนาดไมโครทางการค้า

4.2.4 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวอย่างน้ำ

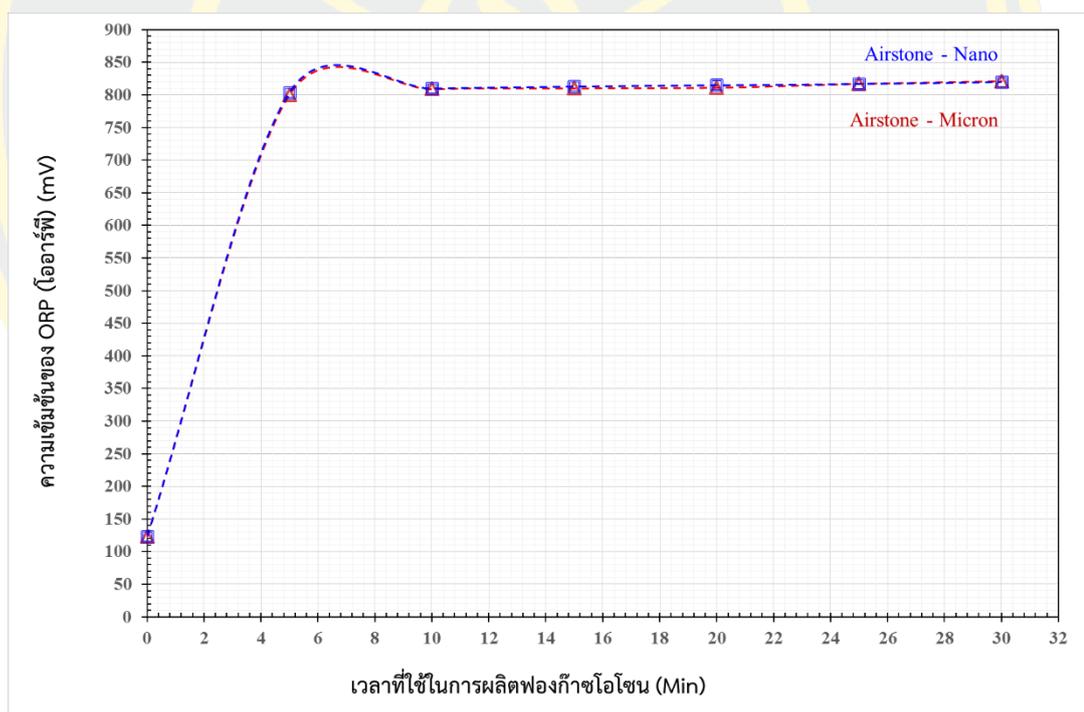
4.2.4.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวอย่างน้ำ จากก๊าซโอโซนที่มีก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา

ตารางที่ 14 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวอย่างน้ำ ที่ผ่านการเกิดปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับฟองก๊าซโอโซน ที่มีก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา

เวลา (min)	สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวอย่างน้ำ					
	หัวทรายชนิดรูพรุนขนาดนาโนทางการค้า			หัวทรายชนิดรูพรุนขนาดไมโครทางการค้า		
	ค่าศักย์ออกซิไดซ์ (ORP)	ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity)	ค่าของแข็งที่ละลายน้ำ (TDS)	ค่าศักย์ออกซิไดซ์ (ORP)	ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity)	ค่าของแข็งที่ละลายน้ำ (TDS)
0	123	271	173	121	273	172
5	804	232	131	800	251	138
10	810	239	132	809	254	135
15	813	245	135	810	253	136
20	815	244	135	811	257	132
25	817	240	133	817	260	137
30	820	248	135	821	254	138

จากตารางที่ 14 ด้วยเทคนิคการสร้างฟองก๊าซโอโซน ด้วยอุปกรณ์สร้างฟองแบบหัวทรายชนิดรูพรุนขนาดไมโครและนาโน พบว่าหัวทรายชนิดรูพรุนขนาดนาโนสามารถทำให้ฟองก๊าซโอโซนละลายน้ำได้ดีกว่าเล็กน้อย ซึ่งจะเห็นว่า จากการใช้อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน ในอัตรา 11 ลิตรต่อนาที จะสามารถสร้างก๊าซโอโซนที่มีค่าความเข้มข้น 14.11 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายในช่วงเวลาเพียง 1 นาที ดังนั้นในช่วง 10-20 นาทีแรกนั้นจะเกิดการละลายของฟองก๊าซโอโซนในน้ำ จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) ก่อให้เกิดสารออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) ประเภทอนุมูลไฮดรอกซิล หรือไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\bullet\text{OH}$) จากสารกระตุ้นทางเคมี (Promoter)

ของอนุมูลอิสระ ประเภทอนุมูลอิสระกลุ่มที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบสำคัญ (ROS) ซึ่งเป็นสารที่มีโมเลกุลที่มีอิเล็กตรอนโดดเดี่ยวไม่ครบคู่อยู่ 1 ตัว ทำให้เป็นโมเลกุลที่ไม่เสถียร พร้อมทั้งจะทำปฏิกิริยาด้วยการไปดึงอิเล็กตรอนจากโมเลกุลอื่น ๆ เพื่อให้ตัวมันเองเสถียรอยู่เสมอ สำหรับการเกิดสารออกซิไดซ์นั้นสามารถสังเกตได้จากค่าศักย์ออกซิไดซ์ (ORP) หรือค่าความสามารถของสารในการเกิดออกซิเดชันสุทธิและการรีดักชันของสารทั้งหมดที่มีอยู่ จากการทดลองพบว่าในสภาวะเริ่มต้น น้ำมีค่าศักย์ออกซิไดซ์ (ORP) เท่ากับ 123 มิลลิโวลต์ จากนั้นเมื่อเริ่มปล่อยฟองก๊าซโอโซน ฟองก๊าซโอโซนจะทำปฏิกิริยากับน้ำ และเกิดกระบวนการสลายตัวของโอโซนในน้ำ ทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลไอออน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ก่อให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิล หรือไฮดรอกซิลแรดดิคัล ($\bullet\text{OH}$) ทำให้ค่า ศักย์ออกซิไดซ์ (ORP) เพิ่มขึ้นเป็น 810 มิลลิโวลต์ และสามารถแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นของ ศักย์ออกซิไดซ์ (ORP) กับช่วงเวลาในการผลิตฟองก๊าซโอโซน เมื่อใช้ออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา ดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 เปรียบเทียบความเข้มข้นของศักย์ออกซิไดซ์ (ORP) กับช่วงเวลาในการผลิตฟองก๊าซโอโซนที่ใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา

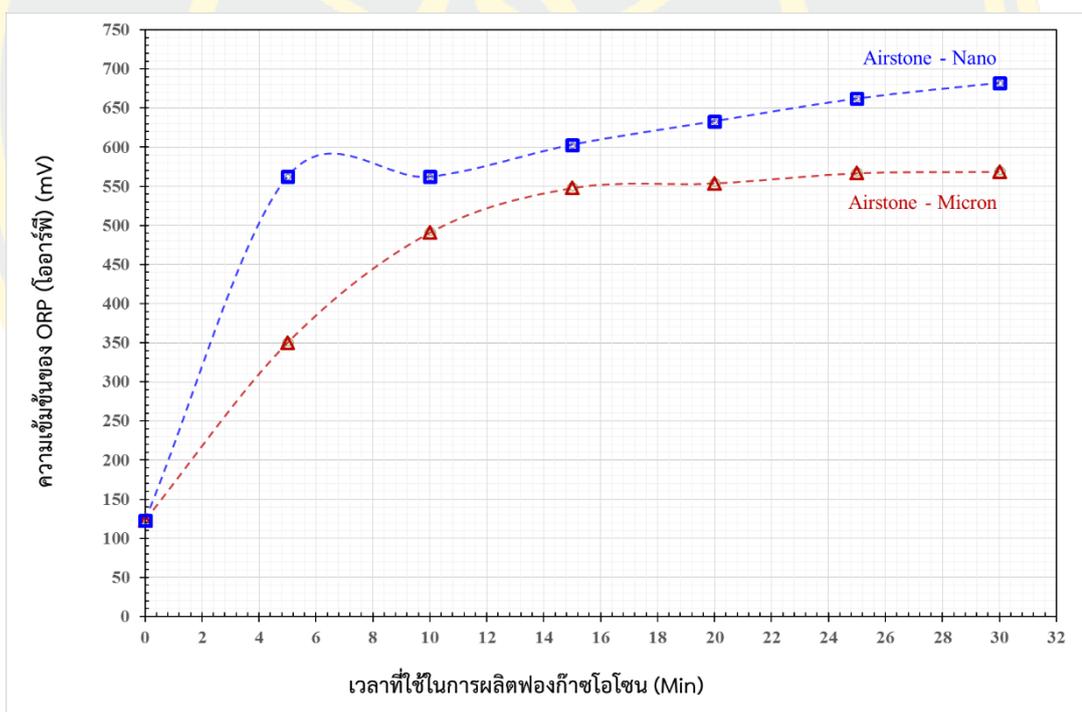
จากการเปรียบเทียบความเข้มข้นของ ศักย์ออกซิไดซ์ (ORP) เมื่อใช้ออกซิเจนเป็นก๊าซ ปฏิกริยาพบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 123 มิลลิโวลต์ เป็น 810 มิลลิโวลต์ ภายในช่วงเวลาในการผลิต ฟองก๊าซโอโซน 10-20 นาที ทั้งหัวทรายชนิดรูพรุนขนาดนาโนทางการค้า และหัวทรายชนิดรูพรุน ขนาดไมโครทางการค้า โดยอุปกรณ์สร้างฟองก๊าซโอโซนทั้ง 2 ชนิด สามารถสร้างอนุมูลไฮดรอกซิล หรือไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\bullet\text{OH}$) ได้ไม่แตกต่างกันซึ่งจะเห็นได้จาก ค่าของศักย์ออกซิไดซ์ (ORP) ที่มี ค่าใกล้เคียงกัน และมีแนวโน้มคงที่ เมื่อใช้เวลามากกว่า 15 นาทีเหมือนกัน ดังนั้น เวลาที่ใช้ในการ ผลิต อนุมูลไฮดรอกซิล หรือไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\bullet\text{OH}$) ควรใช้ช่วงเวลา 10-20 นาที จึงเป็นสภาวะ ที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้เกิดการละลายของฟองก๊าซโอโซนในน้ำภายใต้ปฏิกริยาออกซิเดชัน

4.2.4.2 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวอย่างน้ำ จากก๊าซโอโซนที่มีอากาศ เป็นก๊าซปฏิกริยา

ตารางที่ 15 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวอย่างน้ำ ที่ผ่านการเกิดปฏิกริยาระหว่างน้ำกับฟอง ก๊าซโอโซน ที่มีอากาศเป็นก๊าซปฏิกริยา

เวลา (min)	สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวอย่างน้ำ					
	หัวทรายชนิดรูพรุนขนาดนาโนทางการค้า			หัวทรายชนิดรูพรุนขนาดไมโครทางการค้า		
	ค่าศักย์ ออกซิไดซ์ (ORP)	ค่าการนำ ไฟฟ้า (Conductivity)	ค่าของแข็งที่ ละลายน้ำ (TDS)	ค่าศักย์ ออกซิไดซ์ (ORP)	ค่าการนำ ไฟฟ้า (Conductivity)	ค่าของแข็งที่ ละลายน้ำ (TDS)
0	123	271	173	123	273	172
5	562	228	121	350	280	154
10	562	221	128	491	283	157
15	603	233	121	548	293	159
20	603	231	129	554	297	158
25	662	243	130	567	294	154
30	682	248	129	569	306	160

จากการใช้อากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยา ที่อัตราการไหล 11 ลิตรต่อนาที จะสามารถสร้างก๊าซโอโซนที่มีค่าความเข้มข้น 12.59 มิลลิกรัมต่อลิตร ต้องใช้ช่วงเวลา 10 นาที ดังนั้นจากเทคนิคการสร้างฟองก๊าซโอโซน ด้วยอุปกรณ์สร้างฟองแบบหัวทรายชนิดรูพรุนขนาดไมโครทางการค้าและนาโนทางการค้า พบว่าหัวทรายชนิดรูพรุนขนาดนาโนทางการค้าสามารถทำให้ฟองก๊าซโอโซนละลายน้ำได้ดีกว่าเล็กน้อย ซึ่งจะเห็นว่า ในช่วง 10 นาที นั้นค่าศักย์ออกซิไดซ์ มีค่าเป็น 562 มิลลิโวลต์ สำหรับหัวทรายชนิดรูพรุนนาโนทางการค้า และ 491 มิลลิโวลต์ สำหรับหัวทรายชนิดรูพรุนไมโครทางการค้า โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจากสภาวะเริ่มต้น น้ำมีค่าศักย์ออกซิไดซ์ เท่ากับ 123 มิลลิโวลต์ และจะเห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไป 20 นาที ค่าศักย์ออกซิไดซ์มีแนวโน้มคงที่ สำหรับหัวทรายชนิดรูพรุนไมโคร โดยมีค่า 554 มิลลิโวลต์ สามารถแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของศักย์ออกซิไดซ์กับช่วงเวลาในการผลิตฟองก๊าซโอโซน เมื่อใช้อากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยา ดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 เปรียบเทียบความเข้มข้นของ ORP กับช่วงเวลาในการผลิตฟองก๊าซโอโซนที่ใช้อากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยา

จากการเปรียบเทียบค่าศักย์ออกซิไดซ์ เมื่อใช้อากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยา หัวทรายชนิดรูปวงรี ขนาดนาโนทางการค้า และหัวทรายชนิดรูปวงรีขนาดไมโครทางการค้า สามารถผลิตอนุมูลไฮดรอกซิล หรือไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\bullet\text{OH}$) ได้แตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยหัวทรายชนิดรูปวงรีขนาดไมโครทางการค้า สามารถผลิตอนุมูลไฮดรอกซิล หรือไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\bullet\text{OH}$) ได้น้อยกว่าและมีแนวโน้มที่จะสามารถผลิตได้เท่าเดิม แม้ช่วงเวลาจะเพิ่มขึ้น ซึ่งในทางตรงกันข้าม หัวทรายชนิดรูปวงรีขนาดนาโนทางการค้ายังมีแนวโน้มที่จะสามารถผลิตอนุมูลไฮดรอกซิล หรือไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\bullet\text{OH}$) ได้เพิ่มขึ้น ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ขนาดฟองก๊าซโอโซนมีผลต่อการละลายของฟองก๊าซโอโซนในน้ำ จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งก่อให้เกิดสารออกซิไดซ์อย่างชัดเจน ดังนั้นอุปกรณ์สร้างฟองแบบหัวทรายที่ควรนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันควรใช้หัวทรายชนิดรูปวงรีขนาดนาโนทางการค้า เนื่องจากสามารถสร้างสารออกซิไดซ์ ที่มีค่าศักย์ออกซิไดซ์ได้สูงสุด เท่ากับ 810 มิลลิโวลต์ เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยาในการผลิตก๊าซโอโซน ส่วนการใช้อากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยาในการผลิตก๊าซโอโซนจะสามารถมีค่าศักย์ออกซิไดซ์ได้สูงสุด เท่ากับ 682 มิลลิโวลต์

4.3 ประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันด้วยก๊าซโอโซนร่วมกับอุปกรณ์สร้างฟองแบบหัวทรายทางการค้า

การศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันด้วยอนุมูลอิสระกลุ่มที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบสำคัญ (ROS) จากระบบบำบัดที่ใช้ก๊าซโอโซนร่วมกับชุดสร้างฟองแบบหัวทรายทางการค้า ประกอบด้วย ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของน้ำเสียในอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันก่อนและหลังการบำบัด

4.3.1 ลักษณะทางกายภาพของน้ำเสียในอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันก่อนบำบัด

ตัวอย่างน้ำจากโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันเป็นน้ำทิ้งบ่อบำบัด ซึ่งลักษณะทางกายภาพที่สังเกตได้จะพบว่าน้ำเสียตัวอย่างมีลักษณะขุ่น และมีสีดำ นอกจากนั้นยังมีกลิ่นเหม็น โดยลักษณะทางกายภาพของน้ำเสียในอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันก่อนบำบัดสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 17



ภาพที่ 17 ลักษณะทางกายภาพของน้ำเสียในอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันก่อนบำบัด

4.3.2 ลักษณะทางเคมีของน้ำเสียในอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันก่อนบำบัด

เมื่อนำตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน มาทำการวัดคุณสมบัติทางด้านเคมี และทำการเปรียบเทียบกับประกาศการนิคมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทยที่ 76/2560 เรื่อง กำหนดมาตรฐานทั่วไปในการระบายน้ำเสียลงสู่ระบบบำบัดน้ำเสียส่วนกลางในนิคมอุตสาหกรรม ได้กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำเสียที่จะระบายลงสู่ระบบบำบัดน้ำเสียส่วนกลางในนิคมอุตสาหกรรมไว้ โดยค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 16



ตารางที่ 16 สมบัติทางเคมีของตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน ก่อนบำบัด

เวลา	สมบัติทางเคมีของตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน				
	ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity: µS/cm)	ค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH)	ค่าปริมาณของแข็ง ที่ละลายอยู่ในน้ำ (TDS : mg/L)	ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand : BOD : mg/L)	ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand : COD : mg/L)
ค่ามาตรฐานคุณภาพ น้ำทิ้งจากโรงงาน	ไม่เกิน 10,000	5.5-9.0	ไม่เกิน 3000	ไม่เกิน 500	ไม่เกิน 750
ตัวอย่างน้ำจาก โรงงานสกัดปาล์ม น้ำมันดิบ	5513.00	6.7	2756.00	2075.00	15578.16

จากข้อมูลพารามิเตอร์น้ำเสียของตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน เมื่อเทียบกับกำหนดมาตรฐานทั่วไปในการระบายน้ำเสียลงสู่ระบบบำบัดน้ำเสียส่วนกลางในนิคมอุตสาหกรรม พบว่ามีเพียงค่า BOD และ COD มีค่ามากกว่าเกณฑ์ของมาตรฐาน ตามประกาศการนิคมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทยที่ 76/2560 เรื่อง กำหนดมาตรฐานทั่วไปในการระบายน้ำเสียลงสู่ระบบบำบัดน้ำเสียส่วนกลางในนิคมอุตสาหกรรม ถึง 315% และ 1997 % ตามลำดับ

4.3.3 ลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน หลังบำบัดด้วยระบบบำบัดที่ใช้ก๊าซโอโซน ที่มีก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา ร่วมกับอุปกรณ์สร้างฟองแบบหัวทรายชนิดรูพรุนขนาดนาโนทางการค้า

ในกระบวนการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน ด้วยก๊าซโอโซน ที่มีก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา ร่วมกับอุปกรณ์สร้างฟอง แบบหัวทราย ชนิด รูพรุนขนาดนาโน จะทำการบำบัดด้วย อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน คือ 11 ลิตรต่อนาที และช่วงเวลาในการบำบัดจะเริ่มจาก สภาวะที่มี อนุมูลไฮดรอกซิล หรือไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\cdot\text{OH}$) สูงที่สุด ซึ่งสังเกตได้จาก ค่าศักย์ออกซิไดซ์ที่มีค่า 820 มิลลิโวลต์ ซึ่งจะต้องใช้เวลา 30 นาที หลังจากนั้นจะใช้ช่วงเวลาเพิ่มขึ้น 1 2 3 และ 4 ชั่วโมงตามลำดับ โดยลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานสกัดปาล์ม น้ำมันหลังบำบัดสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 17

ตารางที่ 17 สมบัติทางกายภาพของตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน หลังบำบัด ด้วยก๊าซโอโซนที่มีก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซขงปฏิกิริยา ร่วมกับอุปกรณ์สร้างฟอง แบบหัวทรายชนิดรูปวงกลมในแนวทงการค้ำ

ลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน

ก่อนบำบัด	หลังบำบัด	หลังบำบัด	หลังบำบัด	หลังบำบัด
30 นาที	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	3 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง
				
before	02_30min	02_1hr	02_2hr	02_3hr
				02_4hr

4.3.4 ลักษณะเคมีของตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน หลังบำบัดด้วยระบบบำบัดที่ใช้ก๊าซโอโซน ที่มี ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา ร่วมกับอุปกรณ์สร้างฟองแบบหัวทราย ชนิดรูปวงรีขนาดนาโนทางการค้า

เมื่อนำตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานสกัดปาล์มน้ำมันที่ผ่านการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของอนุมูลไฮดรอกซิล หรือไฮดรอกซิลแรดดิคัล ($\bullet\text{OH}$) มาทำการวัดคุณสมบัติทางด้านเคมี ตามประกาศการนิคมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทยที่ 76/2560 เรื่อง กำหนดมาตรฐานทั่วไปในการระบายน้ำเสียลงสู่ระบบบำบัดน้ำเสียส่วนกลางในนิคมอุตสาหกรรม โดยค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 18



ตารางที่ 18 สมบัติทางเคมีของตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน หลังบำบัด ด้วยระบบบำบัดที่ใช้ก๊าซโอโซน ที่มีก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกริยา ร่วมกับอุปกรณ์สร้างฟอง แบบหัวทรายชนิดรูปทรงนาโนในทางการค้า

เวลา	สมบัติทางเคมีของตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน					
	ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity: µS/cm)	ค่าความเป็น กรด - ด่าง (pH)	ค่าปริมาณของแข็งที่ ละลายอยู่ในน้ำ (TDS: mg/L)	ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand : BOD: mg/L)	ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand : COD : mg/L)	
ค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง จากโรงงาน	ไม่เกิน 10,000	5.5-9.0	ไม่เกิน 3000	ไม่เกิน 500	ไม่เกิน 750	
ตัวอย่างน้ำจากโรงงานสกัด ปาล์มน้ำมัน (ก่อนบำบัด)	5513.00	6.7	2756.00	2075.00	15578.16	
ตัวอย่างน้ำจากโรงงานสกัด ปาล์มน้ำมัน (หลังบำบัด)	1639.00	6.94	819.00	27.13	175.25	

จากข้อมูลพารามิเตอร์น้ำเสียของตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันหลังทำการบำบัดด้วยก๊าซโอโซน ที่มีก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา ร่วมกับอุปกรณ์สร้างฟองแบบหัวทราย ชนิดรูปพวงขนานนาโนทางการค้า เมื่อเทียบกับประกาศการนิคมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทยที่ 76/2560 เรื่อง กำหนดมาตรฐานทั่วไปในการระบายน้ำเสียลงสู่ระบบบำบัดน้ำเสียส่วนกลางในนิคมอุตสาหกรรม พบว่าทุก พารามิเตอร์มีค่าลดลง ดังนี้

- ค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH) เพิ่มขึ้น 3.58%
- ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายอยู่ในน้ำ (TDS) ลดลง 70.28%
- ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ลดลง 70.27%
- ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand : BOD) ลดลง 98.69%
- ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand : COD) ลดลง 98.87%

4.3.5 ลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน หลังบำบัดด้วยระบบบำบัดที่ใช้ก๊าซโอโซน ที่มีอากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยา ร่วมกับอุปกรณ์สร้างฟองแบบหัวทรายชนิดรูปพวงขนานนาโนทางการค้า

ในกระบวนการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน ด้วยก๊าซโอโซน ที่มีอากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยา ร่วมกับอุปกรณ์สร้างฟอง แบบหัวทราย ชนิด รูปพวงขนานนาโน จะทำการบำบัดด้วย อัตราการไหลของอากาศ คือ 11 ลิตรต่อนาที และช่วงเวลาในการบำบัดจะเริ่มจากสถานะที่มี อนุมูลไฮดรอกซิล หรือไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\bullet\text{OH}$) สูงที่สุด ซึ่งสังเกตได้จากค่าศักย์ออกซิไดซ์ที่มีค่า 682 มิลลิโวลต์ ซึ่งจะต้องใช้เวลา 30 นาที หลังจากนั้นจะใช้ช่วงเวลาเพิ่มขึ้น 1 2 3 และ 4 ชั่วโมงตามลำดับ เช่นเดียวกับสถานะของการใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา โดยลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันหลังบำบัดสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 19

ตารางที่ 19 สมบัติทางกายภาพของตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน หลังบำบัด ด้วยก๊าซโอโซน ที่มีอากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยา ร่วมกับอุปกรณ์สร้างฟอง แบบหัวทรายชนิดรูปขนาดนาโนทางการค้า

ลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน

ก่อนบำบัด	หลังบำบัด				
	30 นาที	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	3 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง
					
	air_30min	air_1hr	air_2hr	air_3hr	air_4hr

4.3.6 ลักษณะทางเคมีของตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน หลังบำบัดด้วยระบบบำบัดที่ใช้ก๊าซโอโซน ที่มี ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกริยา ร่วมกับอุปกรณ์สร้างฟอง แบบหัวทราย ชนิด รูปทรงแท่งนาโน

เมื่อนำตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานสกัดปาล์มน้ำมันที่ผ่านการทำปฏิกริยาออกซิเดชันของอนุมูลไฮดรอกซิล หรือไฮดรอกซิลแรดิคัล ($\bullet\text{OH}$) มาทำการวัดคุณสมบัติทางด้านเคมี ตามประกาศการนิคมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทยที่ 76/2560 เรื่อง กำหนดมาตรฐานทั่วไปในการระบายน้ำเสียลงสู่ระบบบำบัดน้ำเสียส่วนกลางในนิคมอุตสาหกรรมโดยค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 20



ตารางที่ 20 สมบัติทางเคมีของตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน หลังบำบัด ด้วยระบบบำบัดที่ใช้ก๊าซโอโซน ที่มีอากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยา ร่วมกับอุปกรณ์สร้างฟอง แบบหัวทรายชนิดพวงขนาดนาโน

เวลา	สมบัติทางเคมีของตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน					ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand : COD : mg/L)
	ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity: $\mu\text{S/cm}$)	ค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH)	ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายอยู่ในน้ำ (TDS: mg/L)	ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand : BOD: mg/L)	ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand : COD : mg/L)	
ค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงาน	ไม่เกิน 10,000	5.5-9.0	ไม่เกิน 3000	ไม่เกิน 500	ไม่เกิน 750	
ตัวอย่างน้ำจากโรงงาน สกัดปาล์มน้ำมัน (ก่อนบำบัด)	5513.00	6.7	2756.00	2075.00	15578.16	
ตัวอย่างน้ำจากโรงงาน สกัดปาล์มน้ำมัน (หลังบำบัด)	1476.00	7.78	739.00	29.50	285.60	

จากข้อมูลพารามิเตอร์น้ำเสียของตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันหลังทำการบำบัดด้วยก๊าซโอโซน ที่มี อากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยา ร่วมกับอุปกรณ์สร้างฟอง แบบหัวทราย ชนิดรูปวงรีขนาดนาโน เมื่อเทียบกับประกาศการนิคมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทยที่ 76/2560 เรื่อง กำหนดมาตรฐานทั่วไปในการระบายน้ำเสียลงสู่ระบบบำบัดน้ำเสียส่วนกลางในนิคมอุตสาหกรรมพบว่าทุก พารามิเตอร์มีค่าลดลง ดังนี้

- ค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH) เพิ่มขึ้น 16.12%
- ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายอยู่ในน้ำ (TDS) ลดลง 73.18%
- ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ลดลง 73.23%
- ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand : BOD) ลดลง 98.58%
- ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand : COD) ลดลง 98.167%

บทที่ 5

สรุป อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษารูปแบบและเงื่อนไขในการผลิตก๊าซโอโซนด้วยวิธีไดอิเล็กทริกแบริเออร์ ดิสชาร์จ โดยมีก๊าซออกซิเจน และ อากาศ เป็นก๊าซปฏิกิริยา พบว่าความเข้มข้นของก๊าซโอโซนที่ผลิตได้ จะสัมพันธ์กับลักษณะสีของสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ โดยใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยานั้น จะสามารถผลิตก๊าซโอโซนได้เข้มข้นมากกว่าการใช้อากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยาในทุก ๆ อัตราการไหลของก๊าซปฏิกิริยา จากผลการทดลองสามารถแสดงให้เห็นว่าที่อัตราการไหลของก๊าซปฏิกิริยา 11 ลิตรต่อนาที จะทำให้มีปริมาณก๊าซปฏิกิริยาออกซิเจนในกระบอกปฏิกรณ์ เพียงพอสำหรับผลิตก๊าซโอโซน จึงส่งผลให้ ความเข้มข้นของก๊าซโอโซน มีแนวโน้มคงที่ ดังนั้นที่ อัตราการไหลของก๊าซปฏิกิริยา 11 ลิตรต่อนาที จึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตก๊าซโอโซนสำหรับก๊าซปฏิกิริยาทั้งสองชนิด

สำหรับเงื่อนไขช่วงเวลาที่ใช้ในการผลิตก๊าซโอโซน พบว่าเมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา ความเข้มข้นของก๊าซโอโซนที่ผลิตได้โดยใช้อัตราการไหล 11 ลิตรต่อนาที มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 14.11 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 15.77 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามช่วงเวลาเพิ่มขึ้น ดังนั้นผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าช่วงเวลาที่ใช้ในการผลิตส่งผลต่อความเข้มข้นของก๊าซโอโซน สำหรับการใช้อากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยานั้น ความเข้มข้นของก๊าซโอโซนที่ผลิตได้จะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อช่วงเวลาที่ใช้ในการผลิตเพิ่มขึ้น โดยค่าความเข้มข้นของก๊าซโอโซนเพิ่มขึ้นจาก 3.46 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 13.80 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นจากคุณสมบัติของปริมาณออกซิเจนที่เป็นองค์ประกอบของก๊าซปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน และเมื่อช่วงเวลาที่ใช้ในการผลิตก๊าซโอโซน เวลาที่ใช้ในการผลิตก๊าซโอโซนของก๊าซออกซิเจน หรืออากาศที่ใช้เป็นก๊าซปฏิกิริยาจึงมีค่าแตกต่างกัน สำหรับการใช้ออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา ควรใช้ช่วงเวลาในการผลิตไม่น้อยกว่า 10 นาที ส่วนการใช้อากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยา ควรใช้ช่วงเวลาในการผลิตไม่น้อยกว่า 15 นาที จึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด

สำหรับอุปกรณ์สร้างฟองอากาศที่ใช้ในการสร้างฟองก๊าซโอโซน ในการทดลองนี้เลือกใช้วัสดุอุปกรณ์แบบหัวทรายทั้ง หัวทรายชนิดรูพรุนขนาดนาโนทางการค้า และหัวทรายชนิดรูพรุนขนาดไมโครทางการค้า เพื่อให้ก๊าซโอโซนที่เคลื่อนที่ผ่านหัวทราย จนเกิดเป็นฟองก๊าซโอโซนขนาดเล็ก ซึ่งจะทำให้ฟองก๊าซโอโซนเกิดการสะสมและลอยอยู่ในน้ำได้นานขึ้น นอกจากนั้นพบว่าก๊าซโอโซนขนาดเล็กยังช่วยทำให้การกระจายตัวของก๊าซโอโซนในน้ำซึ่งจะเป็นการช่วยเพิ่มอัตราการละลายของก๊าซโอโซน

ในน้ำได้ดีมากขึ้น และเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างน้ำกับฟองก๊าซโอโซนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะก่อให้เกิด “อนุมูลอิสระ” ในรูปของอนุมูลอิสระกลุ่มที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบสำคัญ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า เมื่อใช้ออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา ทั้งหัวทรายชนิดรูพรุนขนาดนาโนทางการค้า และหัวทรายชนิดรูพรุนขนาดไมโครทางการค้า สามารถสร้างอนุมูลอิสระ ซึ่งเป็นสารกระตุ้นของปฏิกิริยาที่ก่อให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิล หรือไฮดรอกซิลแรดดิคัล ($\cdot\text{OH}$) ได้ใกล้เคียงกัน โดยสามารถสังเกตได้จากค่าศักย์ออกซิไดซ์ ซึ่งมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 820 มิลลิโวลต์ ดังนั้นเวลาที่เหมาะสมสำหรับการสร้างอนุมูลอิสระกลุ่มที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ ควรใช้ช่วงเวลาในการผลิตไม่น้อยกว่า 15 นาที จึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด แต่สำหรับการใช้อากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยา หัวทรายชนิดรูพรุนขนาดนาโนทางการค้า และหัวทรายชนิดรูพรุนขนาดไมโครทางการค้า พบว่าค่าศักย์ออกซิไดซ์ มีค่าต่างกัน โดยหัวทรายชนิดรูพรุนขนาดนาโนทางการค้า สามารถสร้างอนุมูลอิสระได้มากกว่า โดยมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 682 มิลลิโวลต์ ในขณะที่หัวทรายชนิดรูพรุนขนาดไมโครทางการค้า มีค่าสูงสุดอยู่เพียง 569 มิลลิโวลต์ ซึ่งจะเห็นได้จากค่าศักย์ออกซิไดซ์ เมื่อใช้อากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยาจะพบว่าขนาดของรูพรุนส่งผลต่อประสิทธิภาพการสร้างอนุมูลอิสระที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ โดยขนาดรูพรุนนาโนทางการค้า สามารถสร้างอนุมูลอิสระที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่ารูพรุนขนาดไมโครทางการค้า ดังนั้นหัวทรายขนาดรูพรุนนาโนทางการค้าเป็นอุปกรณ์สร้างฟองก๊าซออกซิเจนที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ต่อไป

สำหรับการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน ด้วยระบบบำบัดที่ใช้ก๊าซโอโซน ที่มีก๊าซออกซิเจนหรืออากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยา ร่วมกับอุปกรณ์สร้างฟองแบบหัวทรายชนิดรูพรุนขนาดนาโนทางการค้านั้น พบว่าสามารถบำบัดบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานสกัดปาล์มน้ำมันมีลักษณะทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจนดังตารางที่ 21

ตารางที่ 21 ลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันก่อนและหลังบำบัดด้วยระบบบำบัดที่ใช้ก๊าซโอโซน ที่มีก๊าซออกซิเจนหรืออากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยา ร่วมกับอุปกรณ์สร้างฟองแบบหัวทรายชนิดรูปวงรีขนาดนาโนทางการค้า

ก๊าซปฏิกิริยา

ออกซิเจน	อากาศ
	

ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนหรืออากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยา พบว่าลักษณะสีของตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันมีลักษณะสีจางลงอย่างชัดเจน นอกจากนั้นสีของน้ำเสียมียุทธลักษณะสีที่จางลงมากกว่าการใช้อากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยาอย่างชัดเจน แต่เมื่อพิจารณาคุณลักษณะทางเคมี โดยเฉพาะค่า BOD และ COD ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่แสดงถึงความสกปรกของน้ำเสีย พบว่ามีประสิทธิภาพต่างกันเล็กน้อย โดยเมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand : BOD) ลดลง 98.69% และค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand : COD) ลดลง 98.87% ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการใช้อากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยาที่มีค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand : BOD) ลดลง 98.58% และค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand : COD) ลดลง 98.167% ตามลำดับ

บรรณานุกรม

- Alfajara, C., Migo, V., Amarante, J., Dallo, R., & Matsumura, M. (2000). Ozone treatment of distillery slop waste. *Water sciences and technology*, 42(3-4), 193-198.
DOI:<https://doi.org/10.2166/wst.2000.0379>
- Choi, J., Song, H. K., Lee, W., & al, e. (2004). Reduction of COD and color of acid and reactive dyestuff wastewater using ozone. *Korean J. Chem. Eng*, 21, 398-403.
DOI:<https://doi.org/10.1007/BF02705427>
- Martinez, S. B., Pérez-Parra, J., & Suay, R. (2011). Use of ozone in wastewater treatment to produce water suitable for irrigation. *Water Resour Manage*, 25, 2109-2124.
DOI:<https://doi.org/10.1007/s11269-011-9798-x>
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2549). การประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพเชิงเศรษฐกิจ
นิเวศน์; อุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม. กรุงเทพมหานคร.
- กุนทรหายน ยามิรุเต็ง. (2551). การบำบัดน้ำเสียเบื้องต้นจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยใช้วิธีโอโซน
ชั้น. (วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต), สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม,
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา.
- จันทร์อนงค์ ฉายเหลี่ยม. (2561). การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงพยาบาลด้วยกระบวนการโอโซนชั้นเพื่อการ
นำกลับมาใช้ใหม่. (วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต), สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการ
สิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา.
- ธนวรรณ ตีลกการย์. (2553). การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยใช้ระบบแผ่น
กั้นไร้อากาศ. (วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต), สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, คณะ
วิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- นนทพงษ์ ภาณุคุณกิตติ. (2548). การบำบัดน้ำทิ้งโรงงานเยื่อและกระดาษโดยกระบวนการโอโซนชั้น.
(วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต), สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- นิเวศวิทยาและสิ่งแวดล้อม สถาบันนวัตกรรมการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล. การบำบัดน้ำเสีย. เข้าถึง
ได้จาก [https://il.mahidol.ac.th/e-
media/ecology/chapter3/framechapter3_frame.htm](https://il.mahidol.ac.th/e-media/ecology/chapter3/framechapter3_frame.htm)
- พิชญ์ศักดิ์ จันทร์กุศล. (2551). ดิสชาร์จไฟฟ้าของพลาสมาโอโซนในเซอร์และการประยุกต์ใช้งาน.
(วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต), สาขาฟิสิกส์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา.

- พูนสุข ประเสริฐสรทรัพย์, เสาวลักษณ์ จิตบรรเจิดกุล, และ อรัญ หันพงษ์กิตติกุล. (2533). กระบวนการผลิตและการใช้ประโยชน์วัสดุเหลือทิ้งและคุณลักษณะน้ำทิ้งจากโรงงานน้ำมันปาล์ม. วารสารสงขลานครินทร์, 12(เมษายน-มิถุนายน 2533).
- ภัทรพล กล่ำเสื่อ. (2560). การบำบัดสีและกลิ่นของน้ำเสียจากห้องฟั่นสีด้วยโอโซน. (วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต), สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, ปทุมธานี.
- วิเชียร ศิริพรหม. (2560). การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการผลิตโอโซนด้วยวิธีไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ. ทุนอุดหนุนวิจัยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วิภาดา ศิริอนุสรณ์ศักดิ์. ความหมายของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำห้องปฏิบัติการเคมีและสิ่งแวดล้อม. เข้าถึงได้จาก
http://www3.rdi.ku.ac.th/cl/knowledge/water_testing.pdf
- ศิริอร บุญญวนิช. (2559). รายงานฉบับสมบูรณ์การปรับสภาพน้ำเสียอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการเติมโอโซนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทน. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพฯ.
- สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน). (ม.ป.ป.). ปาล์มน้ำมัน. เข้าถึงได้จาก
<http://www.arda.or.th/kasetinfo/south/palm/used/index.php>
- โสภารวรรณ รัตน์พันธุ์. (2547). การบำบัดและกำจัดสีของน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยเส้นใยเห็ด *Lentinus spp.* (วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต), สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา.
- อานอบ คันทะชา. (2543). การศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากคลองสำโรงด้วยโอโซน. (การวิจัยประยุกต์), ภาควิชาเคมี, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยทักษิณ, พัทลุง.

ประวัติย่อของผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล นางสาวอภิรตี ยิ่งประยูร
วัน เดือน ปี เกิด 8 ตุลาคม 2534
สถานที่เกิด
สถานที่อยู่ปัจจุบัน 18/2 หมู่ 9 ตำบลพลี อำเภอกาญจนดิษฐ์ จังหวัดจันทบุรี รหัสไปรษณีย์ 22190
ตำแหน่งและประวัติการทำงาน ครูโรงเรียนเฉลิมพระเกียรติสมเด็จพระศรีนครินทร์ระยอง ในพระราชูปถัมภ์สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี
ประวัติการศึกษา พ.ศ. 2558 กศ.บ. (การศึกษาบัณฑิต) การสอนวิทยาศาสตร์ (การสอนฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยบูรพา

