



ประสิทธิภาพของการสร้างอนุมูลอิสระของออกซิเจน (ROS) ด้วยฟองโอโซน

Efficiency of Reactive Oxygen Species (ROS) Generation by Ozone Bubbles

วิเชียร ศิริพรหม^{1*}, อภิรดี ยิ่งประยูร² และ อรรถพล เชยสุภเกต³

Wichian Siriprom^{1*}, Apiradee Yingprayoon² and Attapol Choeysuppak³

¹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์, ภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นฐานและพลศึกษา, คณะวิทยาศาสตร์ ศรีราชา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

¹ Assistant Professor, Department of Basic Science and Physical Education, Faculty of Science at Si Racha, Kasetsart University Sriracha Campus

² อาจารย์, โรงเรียนเฉลิมพระเกียรติสมเด็จพระศรีนครินทร์, ระยอง

² Instructor, Srinagarindra The Princess Mother School, Rayong

³ อาจารย์, ภาควิชาฟิสิกส์, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา

³ Instructor, Department of Physics, Faculty of Science, Burapha University

*Corresponding author, E-mail: w.siriprom@hotmail.com

บทคัดย่อ

ในการศึกษานี้ ได้ทำการประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการสร้างอนุมูลอิสระของออกซิเจน (Reactive Oxygen Species: ROS) จากการออกซิเดชันด้วยโอโซน ในกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Processes; AOPs) ก๊าซโอโซนที่ใช้ในการออกซิเดชันถูกผลิตจากเครื่องปฏิกรณ์แบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ (Dielectric barrier discharge: DBD) ที่มีอัตราการไหล 11 ลิตรต่อ นาที และช่วงเวลาแตกตัวของออกซิเจนเป็นไอออน 15 นาติ โดยความเข้มข้นของก๊าซโอโซนที่ผลิตได้จะถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีไทเทรตไอโอดิเมตริก จากผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของก๊าซโอโซนมีค่า 15.77 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากนั้นเมื่อปล่อยก๊าซโอโซนผ่านอุปกรณ์สร้างฟอง stone diffuser ที่มีรูพรุนขนาดนาโนและไมโครพบว่าค่าโพเทนเชียลออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction Potential: ORP) ของรูพรุนทั้งสองขนาดมีค่าเพิ่มขึ้นจากประมาณ 120 มิลลิโวลต์ เป็นประมาณ 820 มิลลิโวลต์ อย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 5 นาติ อุปกรณ์สร้างฟองที่มีรูพรุนขนาดนาโน พบว่าเมื่อก๊าซโอโซนทำปฏิกิริยากับสารปนเปื้อนในน้ำ (แอมโมเนีย, ซัลไฟต์, คลอไรด์ ฯลฯ) ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าลดลงจาก 271 เป็น 248 ไมโครซีเมนส์ต่อ เซนติเมตร และปริมาณของแข็งละลายในน้ำลดลงจาก 173 เป็น 135 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่อุปกรณ์สร้างฟองที่มีรูพรุนขนาดไมโครมีค่าการนำไฟฟ้าลดลงจาก 273 เป็น 254 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร และปริมาณของแข็งละลายในน้ำลดลงจาก 172 เป็น 138 มิลลิกรัมต่อลิตร จากผลจากการทดลองแสดงให้เห็นอุปกรณ์สร้างฟองที่มีรูพรุนขนาดนาโนและไมโครสามารถสร้างอนุมูลอิสระของออกซิเจนได้ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: โอโซน, กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (AOPs), อนุมูลอิสระของออกซิเจน (ROS)



Abstract

This study evaluated the efficiency of reactive oxygen species (ROS) generation via ozone oxidation, a method within advanced oxidation processes (AOPs). The ozone gas used for the oxidation process was generated using a dielectric barrier discharge (DBD) reactor under optimal operating conditions, which included a flow rate of 11 liters per minute and an ionization time of 15 minutes. The concentration of the produced ozone gas was analyzed using iodometric titration, which revealed an ozone concentration of 15.77 mg/L.

Subsequently, ozone gas was introduced into the water through a porous stone diffuser with nano and micro sized pores. The results showed a rapid increase in oxidation-reduction potential (ORP), from approximately 120 mV to around 820 mV within 5 minutes for both pore sizes. When ozone reacted with contaminants in the water (e.g., ammonia, sulfide, chloride), the electrical conductivity decreased from 271 to 248 $\mu\text{S}/\text{cm}$, and the total dissolved solids (TDS) decreased from 173 to 135 mg/L. In contrast, the micro-porous diffuser resulted in a decrease in electrical conductivity from 273 to 254 $\mu\text{S}/\text{cm}$ and a reduction in TDS from 172 to 138 mg/L. The results reveal that both nano and microporous diffusers effectively assisted ROS generation, with no significant difference in efficiency.

Keywords: Ozone, Advanced Oxidation Process (AOPs), Reactive Oxygen Species (ROS)

บทนำ

กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Processes; AOPs) ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการย่อยสลายสารประกอบทางชีวภาพและสารมลพิษอินทรีย์ ด้วยการสร้างอนุมูลตัวกลางอิสระ (free radical mediated) ที่มีศักยภาพในการออกซิเดชันสูง เช่น อนุมูลไฮดรอกซิล (hydroxyl radical : $\bullet\text{OH}$) ที่มีศักยภาพออกซิเดชัน 2.80 โวลต์ (กานดา หวังชัย, 2563) สำหรับกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง มีด้วยกันหลากหลายกระบวนการ เช่น การออกซิเดชันด้วยโอโซน ปฏิกิริยาเฟนตัน และโฟโตเฟนตัน และกระบวนการออกซิเดชันแบบเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น (ภัชราภรณ์ สุวรรณวิทยา และ ภาณุมาศ พวงแก้ว, 2549) ซึ่งกระบวนการออกซิเดชันด้วยโอโซนเป็นกระบวนการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูงเนื่องจากเมื่อก๊าซโอโซนถูกเติมลงในเฟสของเหลวในรูปของฟองโอโซนนอกจากจะเพิ่มอัตราส่วนพื้นที่ผิวแล้วยังเป็นการเพิ่มการแพร่กระจายของฟองโอโซนมากขึ้น ทำให้การละลายฟองโอโซนเข้าไปในเฟสของเหลวสูงขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาของฟองโอโซนกับของเหลวนั้นเป็นปัจจัยที่สำคัญในการสร้างอนุมูลอิสระ (free radical) เช่น ซูเปอร์ออกไซด์ (O_2^-) และออกซิเจนซิงเกิลต์ ($^1\text{O}_2^*$) เป็นต้น ซึ่งด้วยกลไกต่าง ๆ เช่น



การสลายตัวของโอโซน การยุบตัวของฟองโอโซนรวมถึงปฏิกิริยาที่บริเวณพื้นผิว ล้วนเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดอนุมูลอิสระที่มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยเฉพาะอนุมูลอิสระของออกซิเจน (Reactive Oxygen Species; ROS) (อิธิป สุกุลเพือก, 2559 และ Luvita, Sugianto, & Bismo, 2022) จึงมีความน่าสนใจที่จะนำมาช่วยเพิ่มคุณภาพน้ำ เพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการฆ่าเชื้อ และทดแทนสารเคมีฆ่าเชื้อแบบเดิม สำหรับการสร้าง ROS จากกระบวนการ AOPs ด้วยการออกซิเดชันด้วยโอโซน จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสม เนื่องจากเมื่อฟองโอโซนสลายตัวจะกลายเป็นก๊าซออกซิเจน จึงไม่ทิ้งสารตกค้างที่เป็นพิษ จึงเป็นกระบวนการที่ปลอดภัยและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนั้นกระบวนการออกซิเดชันด้วยโอโซน ยังเป็นเทคโนโลยีที่ยอมรับโดยทั่วไปว่าเป็น GRAS (Generally Recognized as Safe) ซึ่งเป็นกระบวนการฆ่าเชื้อและทำความสะอาดที่มีการใช้กันในงานอุตสาหกรรมอาหาร (Silva, Alexandre, & Brandao, 2011)

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

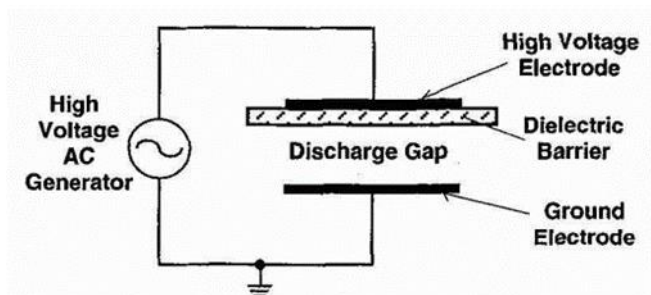
1. เพื่อศึกษาคุณลักษณะของฟองโอโซนที่สร้างจากอุปกรณ์สร้างฟอง Stone Diffuser
2. เพื่อประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการสร้าง ROS จากการออกซิเดชันด้วยโอโซน เพื่อเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพและเคมีของ ROS ที่สร้างจากอุปกรณ์สร้างฟองที่มีขนาดรูพรุนไม่โครและนาโน

แนวคิด ทฤษฎี กรอบแนวคิด

การผลิตก๊าซโอโซนโดยเครื่องปฏิกรณ์แบบไดอิเล็กทริกแบรีเออร์ดีสชาร์จ (Dielectric Barrier Discharges; DBD) เพื่อประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิต ROS จากกระบวนการออกซิเดชันด้วยโอโซน

1. การผลิตก๊าซโอโซนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบ DBD

กระบวนการ DBD เป็นที่รู้จักมานานกว่าศตวรรษ จากการทดลองเกี่ยวกับการคายประจุ ถูกทำการทดลองเป็นครั้งแรกโดยซีเมนส์ โดยลักษณะที่สำคัญของกระบวนการ DBD คือ สามารถใช้งานที่ความดันบรรยากาศ สำหรับเครื่องกำเนิดพลาสมาแบบ DBD ถูกนำมาใช้ครั้งแรกโดย Ernst Werner Von Siemens ในปี 1857 โดยใช้หลักการสะสม (Charge) และคายประจุ (Discharge) บนไดอิเล็กทริก ด้วยไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความต่างศักย์สูง สำหรับโครงสร้างหลักของเครื่องกำเนิดพลาสมาแบบ DBD ประกอบด้วย ขั้วอิเล็กโทรด แผ่นไดอิเล็กทริกและแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความต่างศักย์สูง โดยนำขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความต่างศักย์สูงและนำแผ่นไดอิเล็กทริกอย่างน้อยหนึ่งแผ่นวางคั่นระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดทั้งสอง (ทิพวิมล ไตรภูม, 2557) ดังแสดงในภาพที่ 1



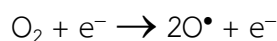
ภาพที่ 1 โครงสร้างของเครื่องปฏิกรณ์แบบไดอิเล็กทริกแบรีเออร์ดีสชาร์จ (DBD)

2. การสร้าง ROS โดยกระบวนการ AOPs

กระบวนการ AOPs เป็นกระบวนการที่นำสารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นตัวออกซิไดซ์ที่มีค่าความต่างศักย์สูงมาทำปฏิกิริยากับสิ่งสกปรกต่าง ๆ รวมทั้งจุลินทรีย์ และสารพิษต่าง ๆ โดยประสิทธิภาพของกระบวนการ AOPs ขึ้นอยู่กับการผลิตอนุมูลไฮดรอกซิล ($\cdot\text{OH}$) หรือสารในกลุ่มอนุมูลอิสระต่าง ๆ กระบวนการ AOPs สามารถเกิดได้จาก 2 วิธีการหลัก ประกอบด้วย กระบวนการเคมีแสง (Photochemical) และกระบวนการเคมี (Chemical Process) ซึ่งวิธีที่นิยมมากที่สุดในปัจจุบันที่พบคือ การใช้กระบวนการเคมี โดยใช้โอโซน (O_3) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และ สารเคมีเฟนต์ัน (Fenton's Reagent) เป็นสารตั้งต้นเพื่อผลิตอนุมูลไฮดรอกซิล (ทศพล พิมพ์รัตน์, 2562)

วิธีดำเนินการวิจัย

ก๊าซโอโซนถูกผลิตขึ้นโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ (Reactor) แบบ DBD ซึ่งประกอบด้วยหลอดแก้วและขั้วไฟฟ้าสองขั้วเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันสูง (HV Transformer) ที่ควบคุมด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ (0–250 โวลต์) สำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบ DBD เมื่อใช้ก๊าซปฏิกิริยา คือ ก๊าซออกซิเจน จากงานวิจัยของ Chamchoi, Siriprom, Teanchai and Jitchot (2022) ได้รายงานอัตราการไหล 10 ลิตรต่อนาที เป็นอัตราที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดแตกตัวของก๊าซออกซิเจนเป็นไอออน (Ionization) จนกลายเป็นพลาสมาภายในช่วงเวลา 10 นาที เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตก๊าซโอโซน (O_3) แต่ในการทดลองนี้ได้เลือกอัตราการไหล 11 ลิตรต่อนาที และช่วงเวลา 15 นาทีเป็นสภาวะสำหรับการผลิตก๊าซโอโซน ดังสมการ



(O_2 ถูกอิเล็กตรอนชนแตกเป็นอะตอมออกซิเจนอิสระ $\text{O}^\bullet$)

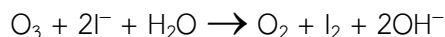


(M คือโมเลกุลอื่น ๆ เช่น N_2 หรือ O_2 ฯลฯ ซึ่งนำพาพลังงานส่วนเกินออกไป)

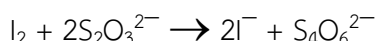
โดยความเข้มข้นของก๊าซโอโซนที่ผลิตขึ้นถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีไทเทรตไอโอดเมตริก (Iodometric Titration) ตามงานวิจัยของ Nur et al. (2022) โดยเริ่มต้นด้วยการเติมโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) ปริมาณ 2.5 กรัม ลงในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ภายในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร จากนั้นเติมกรดซัลฟูริก



(H₂SO₄) ปริมาณ 1.0 มิลลิลิตร เพื่อให้สารละลายมีสถานะเป็นกรด จากนั้นปล่อยก๊าซโอโซนที่เกิดขึ้นจากเครื่องปฏิกรณ์แบบ DBD ให้ไหลผ่านสารละลาย KI ซึ่งก๊าซโอโซนจะทำปฏิกิริยากับไอออนไอโอดีน (I⁻) ทำให้เกิดโมเลกุลไอโอดีน (I₂) ที่มีสีเหลืองน้ำตาล ดังสมการ



จากนั้นเติมสารละลายแ่งลงไป เพื่อให้สารละลายเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินเข้ม (มีไอโอดีนอิสระเกิดขึ้น) จากนั้นจึงทำการไทเทรตด้วยโซเดียมไทโอซัลเฟต (Na₂S₂O₃) ความเข้มข้น 0.158 โมลาร์ (M) จนสารละลายกลับมาใสอีกครั้งดังสมการ



และความเข้มข้นของโอโซนจะถูกคำนวณตามสมการ

$$O_3 \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = O_3 \left(\frac{\text{mol}}{\text{L}} \right) \times M_o \left(\frac{\text{mg}}{\text{mol}} \right) \times 1000$$

เมื่อ M_o คือ มวลโมเลกุล (molecular weight) ของโอโซน

สำหรับการสร้าง ROS จากกระบวนการ AOPs โดยใช้กระบวนการออกซิเดชันด้วยโอโซนจากการปล่อยก๊าซโอโซนผ่านอุปกรณ์สร้างฟอง Stone Diffuser ในน้ำ โดยสภาวะที่เหมาะสมในการสร้างฟองโอโซน จะศึกษาจากคุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมี ด้วยการแปรค่าช่วงเวลาในการสร้าง ROS ด้วยการตรวจวัดค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) และของแข็งที่ละลายอยู่ในน้ำ (Total Dissolved Solids; TDS) ด้วยเครื่อง Conductivity/TDS Meter และค่าโพเทนเชียลออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction Potential: ORP) ด้วยเครื่อง ORP Pen Meter ในช่วงเวลาทุก ๆ 5 นาที เป็นเวลานาน 30 นาที

ผลการวิจัย

เมื่อทำการผลิตก๊าซโอโซน โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบ DBD พบว่าอัตราการไหลของก๊าซปฏิกิริยา 11 ลิตรต่อนาที และช่วงเวลาแตกตัวของก๊าซออกซิเจนเป็นไอออน 15 นาที พบว่าค่าความเข้มข้นที่วัดด้วยวิธีไทเทรตไอโอดเมตริก มีค่า 15.77 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสอดคล้องกับสีของสารละลาย ที่มีโพแทสเซียมไอโอดีนลักษณะเป็นสีน้ำตาลเข้ม ดังแสดงในตารางที่ 1 จากการไทเทรตสารละลายด้วย โซเดียมไทโอซัลเฟต (Sodium Thiosulphate) พบว่าสีของสารละลายเปลี่ยนจากสีน้ำตาลเข้มกลับมาใสอีกครั้งและความเข้มข้นของโอโซนจะถูกคำนวณตามสมการ

$$O_3 \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = 3.285 \times 10^{-3} \left(\frac{\text{mol}}{\text{L}} \right) \times 48 \left(\frac{\text{mg}}{\text{mol}} \right) \times 1000 = 15.768 \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right)$$

ตารางที่ 1 ลักษณะสีของสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ก่อนและหลังเติมก๊าซโอโซน โดยใช้ออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา

คุณสมบัติ	สีของสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์	ความเข้มข้นของก๊าซโอโซน (mg/L)
ก่อนเติมก๊าซโอโซน		ND
หลังเติมก๊าซโอโซน		15.77

โดย ND (NOT Detected) หมายถึง ตรวจไม่พบ

ตารางที่ 2 ลักษณะทางกายภาพของฟองโอโซน ที่สร้างจากอุปกรณ์สร้างฟอง stone diffuser ที่มีขนาดรูพรุนนาโน

เวลา (นาท)	ลักษณะทางกายภาพของฟอง ก๊าซโอโซน	เวลา (นาท)	ลักษณะทางกายภาพของฟองก๊าซ โอโซน
0		15	

ตารางที่ 2 (ต่อ)

เวลา (นาทีก)	ลักษณะทางกายภาพของฟอง ก๊าซโอโซน	เวลา (นาทีก)	ลักษณะทางกายภาพของฟองก๊าซ โอโซน
5		20	
10		30	

ตารางที่ 3 ลักษณะทางกายภาพของฟองโอโซน ที่สร้างจากอุปกรณ์สร้างฟอง stone diffuser ที่มีขนาดรูพรุนไมโคร

เวลา (นาทีก)	ลักษณะทางกายภาพของฟอง ก๊าซโอโซน	เวลา (นาทีก)	ลักษณะทางกายภาพของฟองก๊าซ โอโซน
0		15	

ตารางที่ 3 (ต่อ)

เวลา (นาท)	ลักษณะทางกายภาพของฟอง ก๊าซโอโซน	เวลา (นาท)	ลักษณะทางกายภาพของฟองก๊าซ โอโซน
5		20	
10		30	

จากตารางที่ 2 และตารางที่ 3 เป็นการสร้าง ROS จากกระบวนการ AOPs ด้วยการออกซิเดชันด้วยโอโซน โดยปล่อยก๊าซโอโซนผ่านอุปกรณ์สร้างฟอง Stone Diffuser ที่มีรูพรุนขนาดนาโนและไมโครเพื่อสร้างฟองโอโซน พบว่าขนาดของฟองโอโซนจากอุปกรณ์สร้างฟองที่มีรูพรุนขนาดนาโน จะมีขนาดเล็กกว่าฟองก๊าซออกซิเจน และมีปริมาณความหนาแน่นของฟองน้อยกว่า ทำให้สามารถลอยอยู่ในน้ำได้นานขึ้น ดังนั้นฟองโอโซนจะสามารถละลายน้ำได้มากขึ้น แต่เมื่อเวลานานมากขึ้นในช่วง 20 และ 30 นาที ฟองโอโซนจะมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งน่าจะเกิดจากสภาวะอิ่มตัวของ ROS ในขณะที่ตารางที่ 3 เป็นการปล่อยก๊าซโอโซนผ่านอุปกรณ์สร้างฟองที่มีรูพรุนขนาดไมโคร พบว่าขนาดของฟองโอโซนมีขนาดใกล้เคียงกับฟองก๊าซออกซิเจน แต่เมื่อเวลานานมากขึ้นในช่วง 20 และ 30 นาที ฟองโอโซนจะมีปริมาณความหนาแน่นของฟองน้อยกว่า ซึ่งคาดว่าน่าจะเกิดจากการอิ่มตัวของ ROS เนื่องจากฟองโอโซนไม่สามารถละลายน้ำได้แล้วเช่นกัน และเมื่อพิจารณาพร้อมกับค่า ORP หรือค่าความสามารถของสารในการเกิดออกซิเดชันสุทธิและการรีดักชันของสารทั้งหมดที่มีอยู่ จากตารางที่ 4 พบว่าค่า ORP มีแนวโน้มที่จะมีค่าคงที่ ประมาณ 820 มิลลิโวลต์ โดยคุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมี ของ ROS ซึ่งประกอบด้วยค่าการนำไฟฟ้า และ ค่า ORP สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4



จากข้อมูลในตารางที่ 4 จะพบว่าในสภาวะเริ่มต้นน้ำมีค่า ORP ประมาณ 120 มิลลิโวลต์ จากนั้นเมื่อเริ่มปล่อยปล่อยก๊าซโอโซนผ่านอุปกรณ์สร้างฟอง ก๊าซโอโซนจะทำปฏิกิริยากับน้ำ และเกิดกระบวนการสลายตัวของก๊าซโอโซนในน้ำ และไปกระตุ้นน้ำให้เกิดไฮดรอกไซด์ไอออน ประเภท อนุมูลไฮดรอกซิล ซึ่งเป็นสารออกซิไดซ์ (Oxidizing Agent) เนื่องจากปฏิกิริยาของฟองโอโซนกับของเหลวนี้เป็นปัจจัยที่สำคัญในการสร้าง ROS ซึ่งสังเกตได้ว่าเมื่อเวลาผ่านไป ค่า ORP จะเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 800 มิลลิโวลต์ และมีแนวโน้มคงที่ นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาค่าการนำไฟฟ้าและค่าปริมาณของแข็งละลายอยู่ในน้ำพบว่า มีค่าลดลง ซึ่งสามารถบ่งชี้ได้ว่าเกิด ROS ทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่น ๆ ในน้ำจึงส่งผลทำให้ค่าการนำไฟฟ้าลดลงจาก 271 เป็น 248 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร สำหรับอุปกรณ์สร้างฟองที่มีรูพรุนขนาดนาโน ส่วนอุปกรณ์สร้างฟองที่มีรูพรุนขนาดไมโครลดลงจาก 273 เป็น 254 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ส่วนค่าปริมาณของแข็งละลายอยู่ในน้ำมีแนวโน้มลดลงเช่นกัน โดยมีค่าลดลงจาก 173 เป็น 135 มิลลิกรัมต่อลิตร และจาก 172 เป็น 138 มิลลิกรัมต่อลิตรสำหรับอุปกรณ์สร้างฟองที่มีรูพรุนขนาดนาโนและไมโครตามลำดับ

ตารางที่ 4 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของ ROS ที่สร้างจากอุปกรณ์สร้างฟอง stone diffuser ที่มีรูพรุนมีขนาดนาโนและไมโคร

เวลา (min)	รูพรุนขนาดนาโน			รูพรุนขนาดไมโคร		
	ORP (mV)	Conductivity (μ S/cm)	TDS (mg/L)	ORP (mV)	Conductivity (μ S/cm)	TDS (mg/L)
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

สรุปและอภิปรายผล

การผลิตก๊าซโอโซนโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบ DBD โดยใช้ก๊าซออกซิเจน เป็นก๊าซปฏิกิริยาที่อัตราการไหลของก๊าซปฏิกิริยา 11 ลิตรต่อนาที และช่วงเวลาแตกตัวของก๊าซออกซิเจนเป็นไอออน 15 นาที สามารถผลิตก๊าซโอโซนได้ที่ค่าความเข้มข้น 15.77 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อนำก๊าซโอโซนมาผลิต ROS โดยปล่อยผ่านอุปกรณ์สร้างฟองที่มีรูพรุนขนาดนาโนและไมโครพบว่าการสร้างฟองโอโซนจะช่วยให้อัตราการละลายของก๊าซโอโซนในน้ำได้ดีมากขึ้น โดยขนาดรูพรุนไม่ส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน



ระหว่างน้ำกับฟองโอโซนซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการสร้าง ROS โดยจะเห็นได้จากค่า ORP ซึ่งในน้ำปกติมีค่า 123 มิลลิโวลต์และ 121 มิลลิโวลต์ เมื่อมีการสร้าง ROS ค่า ORP ในน้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 820 มิลลิโวลต์และ 821 มิลลิโวลต์ สำหรับอุปกรณ์สร้างฟองรูพรุนมีขนาดนาโนและไมโครตามลำดับ โดยสถานะที่เหมาะสมในการผลิต ROS จากกระบวนการออกซิเดชันด้วยโอโซนคือการปล่อยก๊าซโอโซนผ่านอุปกรณ์สร้างฟองไม่น้อยกว่า 5 นาที

เอกสารอ้างอิง

- กานดา หวังชัย. (2563). การลดการปนเปื้อนของผลิตผลทางการเกษตรด้วยโอโซน (พิมพ์ครั้งที่ 1).
เชียงใหม่ : มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ทศพล พิมพ์รัตน์. (2562). การเพิ่มความปลอดภัยและรักษาคุณภาพของไควาระ (Raphanus sativus L.) โดยกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับโอโซน (UV-Ozone) (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพมหานคร.
- ทิพวิมล ไตรกุล. (2557). การพัฒนาเครื่องกำเนิดพลาสมาแบบไดอิเล็กทริกแบรีเออร์ดีสชาร์จ สำหรับเพิ่มอัตราการงอกของเมล็ดข้าวพันธุ์ปทุมธานี 80 (กข 31) (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพมหานคร.
- ภัชราภรณ์ สุวรรณวิทยา และภาณุมาศ พวงแก้ว. (2549). กระบวนการออกซิเดชันของฟีนอลด้วยโอโซนขั้นสูง. วิศวกรรมสาร มก., 20(59), 36-43.
- อธิป สกฤตผือก. (2559). อนุมูลอิสระและสารต้านอนุมูลอิสระ. ศูนย์การศึกษาต่อเนื่องทางเภสัชศาสตร์, 1(1), 1-12.
- Chamchoi, N., Siriprom, W., Teanchai, K., & Jitchot, N. (2022). The comparison of ozone production with oxygen concentration and feed gas flow rate at atmospheric pressure. *Materials Today Proceedings*, 65(7), 2336-2339.
- Luvita, V., Sugiarto, A.T., & Bismo, S. (2022). Characterization of dielectric barrier discharge reactor with nanobubble application for industrial water treatment and depollution. *Journal of South African. Journal of Chemical Engineering*, 40, 246-257.
- Nur, M., Verinda, S.B., Muniroh, M., Yulianto, E., Maharani, N., Gunawan, G., ... Usman, A. (2022). Degradation of ciprofloxacin in aqueous solution using ozone microbubbles: spectroscopic, kinetics, and antibacterial analysis. *Heliyon*, 8, e10137.
- Silva, C.L.M., Alexandre, E.M.C., & Brandao, T.R.S. (2011). Modelling microbial load reduction in foods due to ozone impact. *Procedia Food Science*, 1, 836-841.