

# อิทธิพลของขนาดรูพรุนและระดับความเข้มข้นโอโซนต่อ ประสิทธิภาพการสร้างอนุมูลอิสระของออกซิเจน (ROS) ใน กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง

## Influence of Pore Size and Ozone Concentration on Reactive Oxygen Species (ROS) Generation Efficiency in Ozone-Based Advanced Oxidation Processes

วิเชียร ศิริพรหม<sup>1</sup> อภิรดี ยิ่งประยูร<sup>2</sup> และ อรรถพล เชยสุภเกตุ<sup>3\*</sup>  
Wichian Siriprom<sup>1</sup>, Apiradee Yingprayoon<sup>2</sup>  
and Attapol Choeysuppaket<sup>3\*</sup>

Received: 15 August 2025

Revised: 22 March 2026

Accepted: 24 March 2026

### บทคัดย่อ

ในการศึกษานี้ต้องการศึกษาผลกระทบของขนาดรูพรุนและระดับความเข้มข้นโอโซนที่มีต่อประสิทธิภาพในการสร้างอนุมูลอิสระของออกซิเจน (Reactive Oxygen Species: ROS) จากกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Processes: AOPs) โดยอาศัยการออกซิเดชันด้วยโอโซนสำหรับก๊าซโอโซนที่ใช้ในกระบวนการออกซิเดชันด้วยโอโซน (Ozone-Based Advanced Oxidation Processes: Ozone-Based AOPs) ถูกผลิตโดยเครื่องปฏิกรณ์ชนิดไดอิเล็กทริกแบรีเออร์ดีสชาร์จ (Dielectric Barrier Discharge: DBD) โดยใช้ก๊าซออกซิเจนและอากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยาภายใต้อัตราการไหล 11 ลิตรต่อนาที โดยใช้เวลา 15 นาทีในการผลิตก๊าซโอโซน ด้วยการใช้สนามไฟฟ้าแรงสูงเพื่อทำให้โมเลกุลออกซิเจนแตกตัวเป็นไอออน (Ionization)

<sup>1</sup> ภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นฐานและพลศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตศรีราชา ชลบุรี ประเทศไทย 20230

<sup>1</sup> Department of Basic Science and Physical Education, Faculty of Science at Si Racha, Kasetsart University Sriracha Campus, Chonburi, Thailand 20230

<sup>2</sup> โรงเรียนเฉลิมพระเกียรติสมเด็จพระศรีนครินทร์ ระยอง ประเทศไทย 21000

<sup>2</sup> Srinagarindra The Princess Mother School, Rayong, Thailand 21000

<sup>3</sup> ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ชลบุรี ประเทศไทย 20130

<sup>3</sup> Department of Physics, Faculty of Science, Burapha University, Chonburi, Thailand 20130

\* ผู้รับผิดชอบประสานงาน (Corresponding author) e-mail: attapol@go.buu.ac.th

และความเข้มข้นของก๊าซโอโซนที่ผลิตได้จะถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีไทเทรตไอโอดิเมตริก ผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยาจะมีความเข้มข้นของก๊าซโอโซนสูงสุดที่ 15.77 มิลลิกรัมต่อลิตร ขณะที่เมื่อใช้อากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยาจะมีความเข้มข้นของก๊าซโอโซนเพียง 4.70 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งแตกต่างกันถึงร้อยละ 235.5 นอกจากนี้เมื่อก๊าซโอโซนถูกกระจายลงไปในน้ำผ่านอุปกรณ์สร้างฟองที่มีรูพรุน (Porous Diffuser) เพื่อสร้างฟองก๊าซขนาดเล็ก (Fine Bubbles) จะทำให้เกิดอนุมูลอิสระของออกซิเจนภายใต้กระบวนการโอโซนชัน (Ozonation Process) และปฏิกิริยาโอโซนไลซิส (Ozonolysis) ที่อาจเกิดขึ้นกับสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำนอกจากนั้นเมื่อพิจารณาค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity: EC) และปริมาณของแข็งละลายน้ำ (Total Dissolved Solids: TDS) หลังจากกระจายก๊าซโอโซนลงในน้ำด้วยอุปกรณ์สร้างฟองพบว่าในกรณีก๊าซโอโซนที่มีความเข้มข้นสูง (ความเข้มข้น 15.77 มิลลิกรัมต่อลิตร) ซึ่งได้จากการที่ใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยาพบว่าได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกัน โดยค่าการนำไฟฟ้าและปริมาณของแข็งละลายน้ำมีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกัน ค่าการนำไฟฟ้าลดลงจาก 271 เป็น 248 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร และค่าปริมาณของแข็งละลายน้ำลดลงจาก 173 เป็น 135 มิลลิกรัมต่อลิตรสำหรับอุปกรณ์สร้างฟองที่มีรูพรุนระดับนาโน ส่วนอุปกรณ์สร้างฟองที่มีรูพรุนระดับไมโครมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกันโดยมีค่าการนำไฟฟ้าลดลงจาก 273 เป็น 254 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร และค่าปริมาณของแข็งละลายน้ำลดลงจาก 172 เป็น 138 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนในกรณีก๊าซโอโซนที่มีความเข้มข้นต่ำ (4.70 มิลลิกรัมต่อลิตร) ซึ่งเกิดจากการที่ใช้อากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยา พบว่าได้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนโดยอุปกรณ์สร้างฟองที่มีรูพรุนระดับนาโนยังคงมีค่าการนำไฟฟ้าและค่าปริมาณของแข็งละลายน้ำลดลงและอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกับกรณีที่ใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา ส่วนอุปกรณ์สร้างฟองที่มีรูพรุนระดับไมโครกลับมีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 273 เป็น 306 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตรและค่าปริมาณของแข็งละลายน้ำมีค่าลดลงเล็กน้อยจาก 172 เป็น 160 มิลลิกรัมต่อลิตร จากผลการทดลองที่แสดงให้เห็นว่าระดับความเข้มข้นของก๊าซโอโซนและขนาดรูพรุนของอุปกรณ์สร้างฟองส่งผลอย่างชัดเจนต่อประสิทธิภาพการสร้างอนุมูลอิสระของออกซิเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อก๊าซโอโซนที่มีความเข้มข้นต่ำ (4.70 มิลลิกรัมต่อลิตร) ซึ่งเกิดจากการที่ใช้อากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยาพบว่าอุปกรณ์สร้างฟองที่มีรูพรุนระดับนาโนจะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสร้างอนุมูลอิสระของออกซิเจนได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพสูงกว่าอุปกรณ์สร้างฟองที่มีรูพรุนระดับไมโคร

**คำสำคัญ:** โอโซน อนุมูลอิสระของออกซิเจน กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง

## ABSTRACT

In this study, the effects of pore size and ozone concentration on the efficiency of reactive oxygen species (ROS) generation via advanced oxidation processes (AOPs) based on ozone oxidation were investigated. The ozone gas used in the process was generated by a dielectric barrier discharge (DBD) reactor, with oxygen and air as feed gases at a flow rate of 11 L/min. Ozone generation was carried out for 15 minutes under a high-voltage electric field to induce the ionization of oxygen molecules. The resulting ozone concentration was determined using the iodometric titration method. The results showed that when oxygen was used as the feed gas, the maximum ozone concentration reached 15.77 mg/L, whereas

the use of air resulted in a significantly lower concentration of 4.70 mg/L, corresponding to a difference of 235.5%. When ozone was introduced into water through porous diffusers to generate fine bubbles, reactive oxygen species were produced through ozonation and ozonolysis reactions, particularly in the presence of organic compounds in the water. The oxidation–reduction potential (ORP) was measured to assess ROS generation efficiency. When oxygen was used as the feed gas, ORP values for both nano- and micro-porous diffusers increased significantly and reached similar maximum values of approximately 820 mV, indicating effective ROS production. In contrast, when air was used as the feed gas, distinct differences were observed. The micro-porous diffuser exhibited a gradual increase in ORP, reaching a maximum of 569 mV. Meanwhile, the nano-porous diffuser showed a rapid increase, attaining the same ORP level (569 mV) within 5 minutes and continuing to rise to a maximum of 682 mV. In addition, electrical conductivity (EC) and total dissolved solids (TDS) were evaluated after ozone was dispersed into water using porous diffusers. Under the condition of high ozone concentration (15.77 mg/L), obtained when oxygen was used as the feed gas, similar trends were observed for both diffuser types. EC and TDS decreased consistently in the same direction. For the nano-porous diffuser, EC decreased from 271 to 248  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , while TDS decreased from 173 to 135 mg/L. The micro-porous diffuser showed a similar pattern, with EC decreasing from 273 to 254  $\mu\text{S}/\text{cm}$  and TDS decreasing from 172 to 138 mg/L. In contrast, under the condition of low ozone concentration (4.70 mg/L), obtained when air was used as the feed gas, the results differed significantly. The nano-porous diffuser still resulted in decreases in both EC and TDS, with values similar to those observed when oxygen was used as the feed gas. However, the micro-porous diffuser exhibited an increase in EC from 273 to 306  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , while TDS decreased only slightly from 172 to 160 mg/L. The experimental results indicate that both ozone concentration and the pore size of the diffuser significantly influence the efficiency of reactive oxygen species (ROS) generation. This effect is particularly evident when low-concentration ozone (4.70 mg/L), produced using air as the feed gas, is applied. Under these conditions, nano-porous diffusers were found to enhance ROS generation more rapidly and effectively than micro-porous diffusers. Overall, the results demonstrate that both ozone concentration and diffuser pore size have a significant impact on the efficiency of ROS generation. This effect is mostly prominent at low ozone concentrations (4.70 mg/L), produced using air as the feed gas. Under these conditions, nano-porous diffusers were found to promote ROS generation more rapidly and effectively than micro-porous diffusers.

**Keywords:** Ozone; Reactive Oxygen Species (ROS); Generation in advanced Oxidation Processes (AOPs)

## บทนำ

การสร้างสารออกซิไดซ์ที่มีศักยภาพสูงจากกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Processes: AOPs) ได้รับความสนใจอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ซึ่งกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงประกอบด้วยเทคนิคหลากหลายรูปแบบ เช่น การใช้รังสีอัลตราไวโอเลต (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process), การใช้ปฏิกิริยาเฟนตัน (Fenton and Photo-Fenton Reactions), การใช้พลาสมาภายในของเหลว (Plasma-Based AOPs) แต่ที่ได้รับความนิยมอย่างมากในปัจจุบันคือกระบวนการออกซิเดชันด้วยโอโซน (Ozone Oxidation Process: Ozone-Based AOPs) [1, 2] กระบวนการออกซิเดชันด้วยโอโซนเป็นกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงที่ใช้ก๊าซโอโซนเป็นสารออกซิไดซ์หลักและเป็นสารตั้งต้นในการสร้างอนุมูลอิสระ (Free Radical) โดยเฉพาะอนุมูลอิสระของออกซิเจน (Reactive Oxygen Species: ROS) ซึ่งประกอบด้วยออกซิเจนที่มีอิเล็กตรอนไม่ครบคู่ (Single or Unpaired Electrons) และมักอยู่ในรูปแบบของอะตอมหรือโมเลกุลที่ไม่เสถียรเช่นซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน (Superoxide Anion: O<sub>2</sub><sup>-</sup>) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen Peroxide: H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) อนุมูลไฮดรอกซิล (Hydroxyl Radical: •OH) ซิงเกิลตออกซิเจน (Singlet Oxygen: <sup>1</sup>O<sub>2</sub>) อนุมูลอิสระพอรอกซิล (Peroxyl Radical: ROO•) และไฮโดรเปอร์ออกซิล (Hydroperoxyl Radical: HOO•) [3]

จากกระบวนการออกซิเดชันด้วยโอโซนที่ต้องใช้ก๊าซโอโซนเป็นสารออกซิไดซ์หลักและเป็นสารตั้งต้นในการสร้างอนุมูลอิสระเนื่องจากโอโซน (O<sub>3</sub>) เป็นสารออกซิไดซ์ที่มีค่าออกซิเดชันโพเทนเชียล (Oxidation Potential) 2.07 โวลต์ [4] ซึ่งมีศักยภาพสูงกว่าออกซิเจนที่มีค่าออกซิเดชันโพเทนเชียล 1.23 โวลต์ถึงร้อยละ 68.29 [5] ทำให้ก๊าซโอโซนเป็นตัวเลือกที่โดดเด่นในการฟอกสี (Bleaching) การฆ่าเชื้อในน้ำและอาหารโดยเฉพาะในกรณีที่ต้องการหลีกเลี่ยงการใช้สารเคมี เช่น คลอรีน ฯลฯ เนื่องจากการใช้สารเคมีอาจก่อให้เกิดสารตกค้างหรือผลผลิตพลอยได้ที่เป็นอันตราย [6] ประกอบกับคุณสมบัติเด่นของก๊าซโอโซน เมื่อละลายในน้ำจะเกิดกระบวนการแตกตัว (Decomposition) และสลายตัวเป็นก๊าซออกซิเจน (O<sub>2</sub>) ภายใต้กระบวนการโอโซนชัน (Ozonation Process) และสร้างอนุมูลอิสระของออกซิเจนที่มีปฏิกิริยาสูง เช่น อนุมูลไฮดรอกซิล (•OH) ที่มีออกซิเดชันโพเทนเชียลสูงถึง 2.80 โวลต์ [7] อย่างไรก็ตามด้วยข้อจำกัดของก๊าซโอโซนที่มีครึ่งชีวิตประมาณ 60 นาทีในบรรยากาศ และครึ่งชีวิตในน้ำที่สั้นเพียงประมาณ 20 นาที ทำให้กลายเป็นจุดเด่นของก๊าซโอโซนที่สามารถสลายตัวอย่างรวดเร็วทั้งในบรรยากาศและน้ำจนกลายเป็นก๊าซออกซิเจน จึงทำให้ไม่ก่อให้เกิดสารตกค้างหรือผลผลิตพลอยได้ที่เป็นอันตรายภายหลังเหมือนกับสารเคมี

อย่างไรก็ตามกระบวนการออกซิเดชันด้วยโอโซน ยังมีข้อจำกัดที่สำคัญในเรื่องของประสิทธิภาพการละลายน้ำของก๊าซโอโซนเนื่องจากมีอัตราการถ่ายเทมวล (Mass Transfer Rate) ที่ค่อนข้างต่ำส่งผลให้ปริมาณก๊าซโอโซนที่สามารถทำปฏิกิริยาออกซิเดชันได้มีปริมาณที่จำกัด ประกอบกับประสิทธิภาพการละลายของก๊าซโอโซนลงในน้ำที่อุณหภูมิห้อง (~25–30 องศาเซลเซียส) มีประสิทธิภาพอยู่ที่ประมาณ 20–30% และเมื่ออุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้นความสามารถในการละลายจะยิ่งลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากก๊าซโอโซนมีแนวโน้มหนีออกจากน้ำมากขึ้น ดังนั้นประสิทธิภาพการละลายของก๊าซโอโซนจึงเป็นข้อจำกัดที่สำคัญต่อการประยุกต์ใช้งาน

แม้ว่าในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีฟองอากาศขนาดเล็ก (Microbubble Technology) เพื่อเพิ่มอัตราการละลายของก๊าซโอโซนลงในน้ำ [8, 9] ซึ่งจากรายงานวิจัยของ Tamaki et al. [10] ที่ได้มีการนำเทคโนโลยีโอโซนไมโครบับเบิล (Ozone Microbubbles; OMCBs) ไปใช้ในการกำจัดสารกำจัด

ศัตรูพืชตกค้างในผักและผลไม้ (Fenitrothion; FT) ซึ่งผลการวิจัยพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสารตกค้างสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยสามารถลดสารตกค้างเหลือประมาณ 42–67% ภายใน 5–10 นาที นอกจากนั้น Sumikura et al. [9] ได้มีการนำเทคโนโลยีโอโซนไมโครบับเบิลไปใช้ในการฆ่าเชื้อและบำบัดน้ำเสียเพื่อการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งผลการวิจัยพบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการยับยั้งจุลินทรีย์ เช่น กลุ่มโคลิฟอร์มได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยสามารถลดปริมาณการใช้โอโซนลงได้เมื่อเทียบกับระบบโอโซนแบบดั้งเดิม เนื่องจากสามารถเพิ่มอัตราการละลายของก๊าซโอโซนได้สูงกว่าระบบการละลายแบบทั่วไปประมาณ 1.5–2.7 เท่า และยังช่วยยืดอายุการคงอยู่ของโอโซนในน้ำ (Half-Life) ได้ประมาณ 1.6 เท่า จะเห็นได้ว่าทั้งสองรูปแบบการประยุกต์ใช้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจากคุณสมบัติเด่นของฟองอากาศขนาดเล็ก ทำให้มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง (Large Interfacial Area) เวลาการลอยตัวนาน (Long Stagnation Time) ความเร็วการลอยตัวต่ำ (Low Rising Velocity) และแรงดันภายในสูง (High Internal Pressure) ซึ่งด้วยคุณสมบัติดังกล่าวจึงช่วยเพิ่มอัตราการละลายของก๊าซโอโซนลงในน้ำและส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน นอกจากนี้ฟองอากาศขนาดเล็กยังส่งผลโดยตรงต่อการเกิดอนุมูลอิสระ เช่น การสร้างแรงดันในตัวเอง (Self-Pressurization) การมีประจุลบที่ผิวฟอง (Negative Surface Charge) และสร้างอนุมูลอิสระ (Free Radical) เมื่อฟองอากาศเกิดการยุบตัว [8–10] ประกอบกับอนุมูลอิสระที่สร้างขึ้นมักจะมีแนวโน้มที่จะมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลข้างเคียงจึงทำให้โมเลกุลข้างเคียงสูญเสียหรือรับอิเล็กตรอนและกลายเป็นอนุมูลอิสระตัวใหม่ เป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ (Chain Reaction) อย่างต่อเนื่องซึ่งช่วยส่งเสริมการเกิดอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้น ดังนั้นจะเห็นว่าประสิทธิภาพการเกิดอนุมูลอิสระขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยทั้งปัจจัยทางฟิสิกส์และเคมี โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัจจัยเกี่ยวกับขนาดของฟองโอโซนซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญที่จะส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มอัตราการละลายของก๊าซโอโซนลงในน้ำ และประสิทธิภาพการเกิดอนุมูลอิสระ

ประกอบกับการศึกษาก่อนหน้านี้ได้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของเทคโนโลยีฟองขนาดเล็กในการเสริมประสิทธิภาพของกระบวนการออกซิเดชันไม่ว่าจะเป็นงานวิจัยของ Chamchoi et al. [11] ที่ได้รายงานถึงการใช้ก๊าซออกซิเจนในระบบผลิตโอโซน สามารถเพิ่มความเข้มข้นของโอโซนได้มากกว่าการใช้อากาศถึงสองเท่าและงานวิจัยของ Choeysuppak et al. [12] พบว่าการใช้เทคโนโลยีฟองอากาศขนาดเล็กร่วมกับโอโซนสามารถเพิ่มค่าโพเทนเชียลออกซิเดชัน-รีดักชันและประสิทธิภาพในการผลิตอนุมูลอิสระของออกซิเจนได้อย่างมีนัยสำคัญรวมถึงงานวิจัยของ Sumikura et al. และ Nur et al. [9, 13]

อย่างไรก็ตามแม้จะมีการศึกษาก่อนหน้านี้เกี่ยวกับการใช้เทคโนโลยีฟองอากาศขนาดเล็ก แต่ส่วนใหญ่เป็นการประยุกต์ใช้เพื่อช่วยเพิ่มอัตราการละลายของก๊าซโอโซนลงในน้ำ แต่ข้อมูลเชิงเปรียบเทียบระหว่างขนาดรูพรุนของอุปกรณ์สร้างฟองในระดับนาโนและไมโครภายใต้ระดับความเข้มข้นของก๊าซโอโซนต่าง ๆ ยังมีจำกัด ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความแม่นยำในการนำไปประยุกต์ใช้งานจากการใช้ก๊าซโอโซนเป็นแหล่งกำเนิดอนุมูลอิสระของออกซิเจนภายใต้กระบวนการออกซิเดชันด้วยโอโซน ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะศึกษาถึงอิทธิพลของขนาดรูพรุนของอุปกรณ์สร้างฟอง (Porous Diffuser) ที่จะช่วยเพิ่มอัตราการละลายของก๊าซโอโซนลงในน้ำ และระดับความเข้มข้นของโอโซน (Ozone Concentration) ที่คาดว่าจะช่วยส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสร้างอนุมูลอิสระของออกซิเจนมากขึ้นกว่าการใช้เทคโนโลยีฟองอากาศขนาดเล็กเพียงปัจจัยเดียว โดยจะศึกษาผ่านกลไกการเพิ่มขึ้นของค่าโพเทนเชียลออกซิเดชัน-รีดักชันและความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ทางเคมีของน้ำเช่นค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity: EC) และปริมาณของแข็งละลายน้ำ (Total Dissolved Solids: TDS) เพื่อเป็นข้อมูลเชิง

วิทยาศาสตร์สำหรับการประยุกต์ใช้ในด้าน การบำบัดน้ำเสีย การฆ่าเชื้อในระบบอุตสาหกรรม และด้าน สิ่งแวดล้อมอื่นๆ ในอนาคตต่อไป

### วิธีดำเนินการวิจัย

ก๊าซโอโซนถูกผลิตขึ้นโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ (Reactor) แบบไดอิเล็กทริกแบร์เรียร์ดิสชาร์จ (Dielectric Barrier Discharges: DBD) ที่ประกอบด้วยหลอดแก้วและขั้วไฟฟ้าสองขั้วเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันสูง (HV Transformer) ที่ควบคุมด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ (0–250 โวลต์) [11] ดังภาพที่ 1

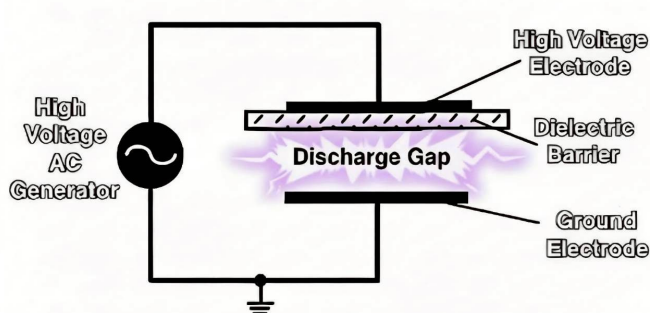
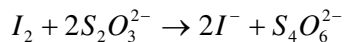
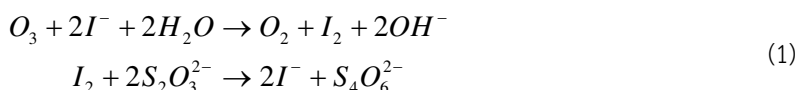


Figure 1 The Structure of a Dielectric Barrier Discharge (DBD) Reactor

สำหรับสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลิตก๊าซโอโซนจะใช้ก๊าซปฏิกิริยา (ก๊าซออกซิเจนและอากาศ) ที่ อัตราการไหล 11 ลิตรต่อนาที โดยมีช่วงเวลาแตกตัวของก๊าซออกซิเจนเพื่อเกิดไอออนไนเซชัน (Ionization) จนกลายเป็นพลาสมาคือ 15 นาที [12] ซึ่งเป็นสภาวะที่ปรับปรุงจากงานวิจัยของ Chamchoi et al. [11] ที่ ระบุว่าอัตราการไหล 10 ลิตรต่อนาทีและช่วงเวลาแตกตัวของก๊าซออกซิเจนนาน 10 นาทีเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตก๊าซโอโซน จากนั้นความเข้มข้นของก๊าซโอโซนที่ผลิตขึ้นจะถูกวิเคราะห์ด้วยวิธี ไทเทรตไอโอดิเมตริก (Iodometric Titration) ตามงานวิจัยของ Nur et al. [13] ที่เริ่มต้นด้วยการเติม โพแทสเซียมไอโอไดด์ ( $KI$ ) ปริมาณ 2.5 กรัมลงในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตรภายในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร ลำดับต่อไปเติมกรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$ ) ปริมาณ 1.0 มิลลิลิตรเพื่อให้สารละลายมีสถานะเป็นกรด จากนั้นทำการปล่อยก๊าซโอโซนให้ไหลผ่านสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ ซึ่งก๊าซโอโซนจะทำปฏิกิริยากับ ไอออนไอโอไดด์ ( $I^-$ ) ทำให้เกิดโมเลกุลไอโอดีน ( $I_2$ ) ที่มีสีเหลืองน้ำตาล หลังจากนั้นจึงเติมสารละลายแบ่ง ลงไปเพื่อให้สารละลายเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินเข้ม (มีไอโอดีนอิสระเกิดขึ้น) ในท้ายสุดจึงทำการไทเทรตด้วย โซเดียมไทโอซัลเฟต ( $Na_2S_2O_3$ ) ความเข้มข้น 0.158 โมลาร์ (M) จนสารละลายกลับมาใสอีกครั้งดังสมการ



และคำนวณความเข้มข้นของโอโซนดังสมการ [13]

$$O_3 \left( \frac{mg}{L} \right) = O_3 \left( \frac{mol}{L} \right) \times M_o \left( \frac{mg}{mol} \right) \times 1000 \quad (2)$$

เมื่อ  $M_o$  คือมวลโมเลกุล (Molecular Weight) ของโอโซน ซึ่งมีค่า 48 กรัม/โมล

สำหรับการสร้างอนุมูล ROS ด้วยกระบวนการไอโซเนชั่นนั้นจะเริ่มต้นด้วยการกระจายก๊าซไอโซนผ่านอุปกรณ์สร้างฟองที่มีรูพรุนขนาดนาโนและไมโคร ดังภาพที่ 2



(a)



(b)

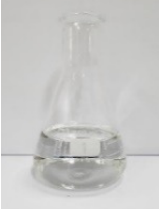
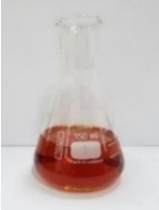
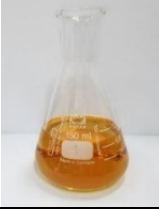
Figure 2 A porous diffuser with (a) nano-sized pores and (b) micro-sized pores

เพื่อประเมินประสิทธิภาพของการอนุมูลอิสระของออกซิเจนจะกระจายก๊าซไอโซนผ่านอุปกรณ์สร้างฟองทั้งสองขนาด (รูพรุนระดับนาโนและไมโคร) โดยแปรค่าช่วงเวลาและชนิดของก๊าซปฏิกิริยา (ก๊าซออกซิเจนและอากาศ) จากนั้นทำการวัดค่าโพเทนเชียลออกซิเดชัน-รีดักชันด้วยเครื่อง ORP Pen Meter ส่วนการตรวจวัดค่าการนำไฟฟ้า และปริมาณของแข็งละลายน้ำวัดด้วยเครื่องวัด Digital TDS/EC Pen Meter โดยจะทำการเก็บข้อมูลทุกๆ 5 นาที เป็นระยะเวลา 30 นาที

### ผลการวิจัย

สำหรับค่าความเข้มข้นของไอโซนที่ผลิตได้จากเครื่องปฏิกรณ์ชนิดไดอิเล็กทริกแบรีเออร์ดิซาร์จโดยใช้ก๊าซปฏิกิริยาต่างชนิดกัน (ก๊าซออกซิเจนและอากาศ) พบว่าความเข้มข้นของก๊าซไอโซนที่ผลิตได้มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยเมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยาจะสามารถผลิตก๊าซไอโซนได้ในความเข้มข้นที่สูงกว่าในกรณีที่ใช้อากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยา เนื่องจากในอากาศมีองค์ประกอบหลักเป็นก๊าซไนโตรเจนประมาณ 78% และมีออกซิเจนเพียงประมาณ 20% เท่านั้น ซึ่งสอดคล้องกับสีของสารละลายที่มีโพแทสเซียมไอโอไดด์ที่ใช้เป็นตัวบ่งชี้ โดยก๊าซไอโซนที่ผลิตจากก๊าซออกซิเจนจะมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลเข้ม ในขณะที่ก๊าซไอโซนที่ผลิตจากอากาศจะมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลอ่อน/สีส้ม และเมื่อทำการวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซไอโซนด้วยวิธีไทเทรตไอโอโดเมตริก พบว่าก๊าซไอโซนที่ผลิตจากก๊าซออกซิเจนมีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยอยู่ที่ 15.77 มิลลิกรัมต่อลิตร ขณะที่ก๊าซไอโซนที่ผลิตจากอากาศมีค่าความเข้มข้นเพียง 4.70 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับสีสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ เมื่อระดับความเข้มข้นของก๊าซไอโซนเพิ่มขึ้นสีของสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์จะมีสีเข้มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 1

**Table 1** Color characteristics of potassium iodide solution before and after ozone treatment, using oxygen and air as reactive gases.

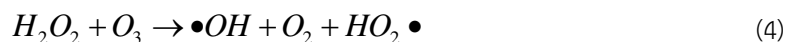
| Property                                      | Color of Potassium Iodide Solution                                                 | Ozone Concentration (mg/L) |
|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| before ozone exposure                         |   | ND                         |
| After ozone exposure (oxygen as the feed gas) |   | 15.77                      |
| After ozone exposure (air as the feed gas)    |  | 4.70                       |

ND indicates “Not Detected.”

เมื่อทำการศึกษาถึงประสิทธิภาพของการสร้างอนุมูลอิสระของออกซิเจนโดยเปรียบเทียบจากกระบวนการที่ใช้ ความเข้มข้นของก๊าซโอโซนที่ต่างกัน ร่วมกับอุปกรณ์สร้างฟองที่มีขนาดรูพรุนต่างกัน (รูพรุนระดับนาโนและไมโคร) ตามรายงานของ Andreozzi et al. [14] ซึ่งได้รายงานไว้ว่าเมื่อก๊าซโอโซนละลายลงในน้ำจะเกิดกระบวนการสลายตัวของก๊าซโอโซนหรือที่เรียกว่า “กระบวนการโอโซนขึ้น” ซึ่งไปกระตุ้นให้เกิดการสร้างอนุมูลอิสระจากกระบวนการสลายตัวของก๊าซโอโซนในน้ำ (Self-Decomposition in Water) ดังสมการ



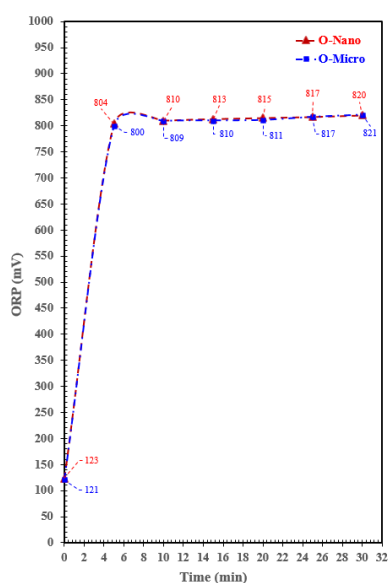
จากนั้นจึงเกิดปฏิกิริยาเปอร์ออกไซด์ (Peroxone :  $H_2O_2 + O_3$ ) ในขั้นตอนต่อไปดังสมการ



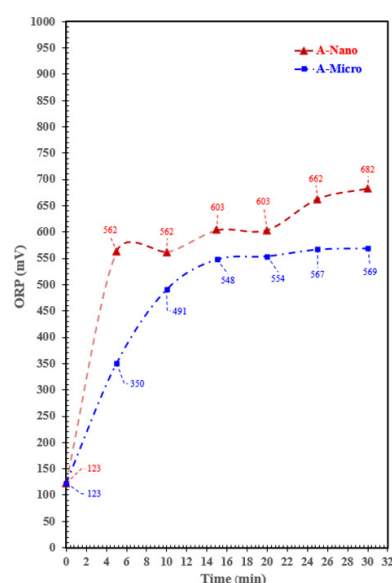
เมื่อเกิดอนุมูลไฮดรอกซิล ( $\bullet OH$ ) และอนุมูลไฮโดรเปอร์ออกซิล ( $HOO\bullet$ ) ขึ้นแล้วอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นดังกล่าวจะทำให้ปฏิกิริยากับโมเลกุลรอบข้างและสร้างอนุมูลอิสระของออกซิเจนอื่นๆต่อไป

ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าการสลายตัวของก๊าซโอโซนในน้ำจึงถือเป็นกลไกสำคัญในการสร้างอนุมูลอิสระของออกซิเจนซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Nur et al. [13] ที่ได้รายงานไว้ว่าความสามารถในการละลายของก๊าซโอโซนในน้ำ เป็นตัวกลางในการก่อตัวของอนุมูลอิสระของออกซิเจน โดยเฉพาะอนุมูลซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน ( $O_2^{\bullet -}$ ) ไฮโดรเปอร์ออกซิล และอนุมูลไฮดรอกซิล ซึ่งเมื่อพิจารณาผลจากการวัดค่าโพเทนเชียล

ออกซิเดชัน-รีดักชันดังที่แสดงในภาพที่ 3 และภาพที่ 4 พบว่าในสภาวะเริ่มต้นน้ำมีค่าโพเทนเชียลออกซิเดชัน-รีดักชันประมาณ 120 มิลลิโวลต์ และเมื่อเริ่มกระบวนการสร้างอนุมูลอิสระของออกซิเจนด้วยการกระจายก๊าซโอโซนที่ผลิตจากเครื่องปฏิกรณ์ชนิดไดอิเล็กทริกแบรีเออร์ดีสชาร์จ พบว่าการใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา เพื่อผลิตก๊าซโอโซนที่มีความเข้มข้น 15.77 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อปล่อยก๊าซโอโซนผ่านอุปกรณ์สร้างฟองทั้งสองขนาด (รูพรุนระดับนาโนและไมโคร) พบว่าภายในระยะเวลา 5 นาทีแรกค่าโพเทนเชียลออกซิเดชัน-รีดักชันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเป็นประมาณ 800 มิลลิโวลต์และมีแนวโน้มคงที่ในช่วงเวลาต่อมา โดยลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าโพเทนเชียลออกซิเดชัน-รีดักชันจากอุปกรณ์สร้างฟองทั้งสองขนาด (รูพรุนระดับนาโนและไมโคร) มีค่าใกล้เคียงกันดังข้อมูลที่แสดงในภาพที่ 3



**Figure 3** Correlation between oxidation–reduction potential and reaction time during the generation of reactive oxygen species by a nano/micro-porous bubble generator operating with oxygen gas.



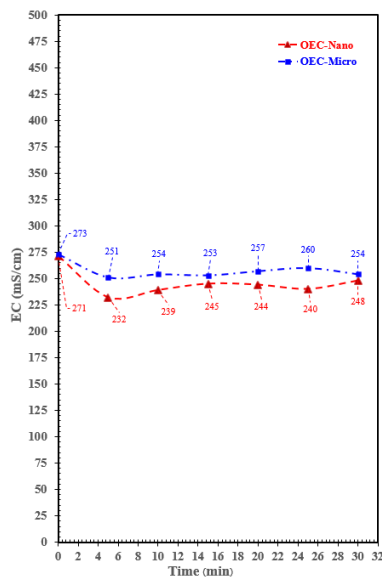
**Figure 4.** Correlation between oxidation–reduction potential and reaction time during the generation of reactive oxygen species by a nano/micro-porous bubble generator operating with air

ในทางตรงกันข้ามเมื่อใช้อากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยาเพื่อผลิตก๊าซโอโซนที่มีความเข้มข้นเฉลี่ยเพียง 4.70 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าในช่วง 5 นาทีแรกระบบที่ใช้อุปกรณ์สร้างฟองที่มีรูพรุนระดับนาโนมีค่าโพเทนเชียลออกซิเดชัน-รีดักชันเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 562 มิลลิโวลต์ ขณะที่ระบบที่ใช้อุปกรณ์สร้างฟองที่มีรูพรุนระดับไมโครกลับมีค่าโพเทนเชียลออกซิเดชัน-รีดักชันต่ำกว่าชัดเจน โดยมีค่าเพียงประมาณ 350 มิลลิโวลต์ดังข้อมูลที่แสดงในภาพที่ 4

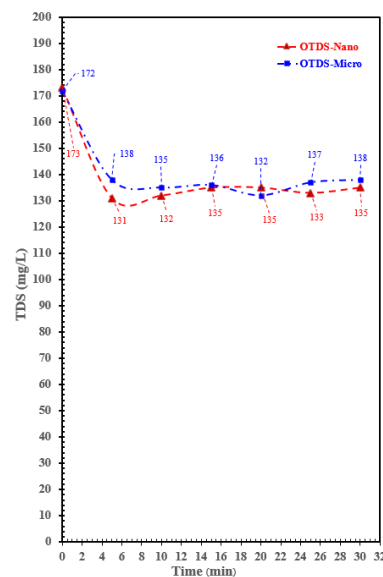
ทั้งนี้จากการเปรียบเทียบค่าโพเทนเชียลออกซิเดชัน-รีดักชันพบว่าระบบที่ใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยาสามารถสร้างอนุมูลอิสระของออกซิเจนได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดโดยไม่ขึ้นกับขนาดรูพรุนของ

อุปกรณ์สร้างฟอง ซึ่งในกรณีนี้อุปกรณ์สร้างฟองทั้งสองขนาด (รูปพุนระดับนาโนและไมโคร) ให้ค่าโพเทนเชียลออกซิเดชัน-รีดักชันใกล้เคียงกันที่ประมาณ 820 มิลลิโวลต์ ในกรณีที่ใช้อากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยาเพื่อผลิตก๊าซโอโซน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าขนาดของรูปพุนของอุปกรณ์สร้างฟองมีผลต่อประสิทธิภาพในการสร้างอนุมูลอิสระของออกซิเจนอย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่าอุปกรณ์สร้างฟองที่มีรูปพุนขนาดนาโนมีค่าโพเทนเชียลออกซิเดชัน-รีดักชันสูงกว่าอย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับสมมติฐานที่ว่าฟองขนาดเล็กจะสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซโอโซนกับน้ำและทำให้ก๊าซโอโซนสามารถละลายลงในน้ำได้ดีขึ้น จึงส่งผลให้มีการสร้างอนุมูลอิสระของออกซิเจนได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าหลังจากกระจายก๊าซโอโซนผ่านอุปกรณ์สร้างฟองที่มีรูปพุนขนาดนาโนเป็นเวลานาน 30 นาที ค่าโพเทนเชียลออกซิเดชัน-รีดักชันมีค่าสูงสุดคือ 682 มิลลิโวลต์ ในขณะที่อุปกรณ์สร้างฟองที่มีรูปพุนขนาดไมโครให้ค่าโพเทนเชียลออกซิเดชัน-รีดักชันสูงสุดเพียง 569 มิลลิโวลต์ ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่าต่ำสุดที่อุปกรณ์สร้างฟองที่มีรูปพุนขนาดนาโนทำได้ในช่วง 5 นาทีแรก (562 มิลลิโวลต์)

นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของน้ำจากค่าการนำไฟฟ้าซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับชนิดและปริมาณของไอออนที่ละลายอยู่ในน้ำ และปริมาณของแข็งละลายน้ำซึ่งแสดงถึงปริมาณของโมเลกุลหรือไอออนที่ละลายอยู่ในน้ำทั้งหมดจากการทดลอง พบว่าระบบที่ใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยาสามารถผลิตก๊าซโอโซนที่มีความเข้มข้น 15.77 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อกระจายลงในน้ำผ่านอุปกรณ์สร้างฟองทั้งสองขนาด (รูปพุนระดับนาโนและไมโคร) ทั้งค่าการนำไฟฟ้า และปริมาณของแข็งละลายน้ำมีแนวโน้มลดลงในระดับที่ใกล้เคียงกัน โดยอุปกรณ์สร้างฟองที่มีรูปพุนขนาดนาโนมีค่าการนำไฟฟ้าลดลงจาก 271 เป็น 248 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร และปริมาณของแข็งละลายน้ำมีแนวโน้มลดลงจาก 173 เป็น 135 มิลลิกรัมต่อลิตรดังภาพที่ 3 ส่วนอุปกรณ์สร้างฟองที่มีรูปพุนขนาดไมโครมีค่าการนำไฟฟ้าลดลงจาก 273 เป็น 254 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร และปริมาณของแข็งละลายน้ำมีแนวโน้มลดลงจาก 172 เป็น 138 มิลลิกรัมต่อลิตรดังภาพที่ 5 และภาพที่ 6



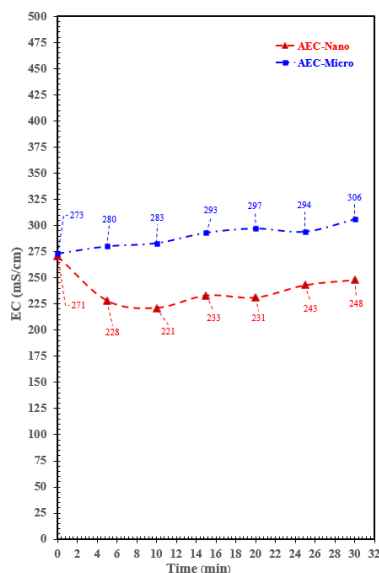
**Figure 5** Correlation between electrical conductivity and reaction time during the generation of reactive oxygen species by a nano/micro-porous bubble generator operating with oxygen gas.



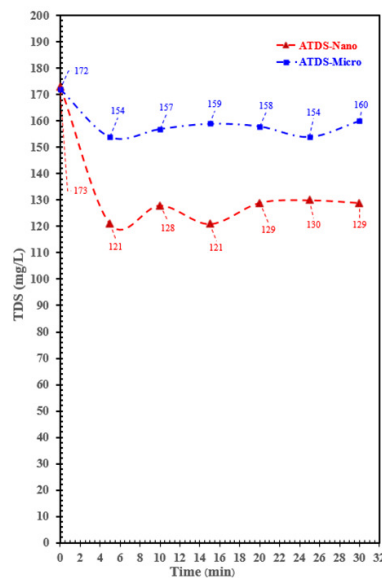
**Figure 6** Correlation between Total dissolved solids and reaction time during the generation of reactive oxygen species by a nano/micro-porous bubble generator operating with oxygen gas.

แต่ในกรณีที่ใช้อากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยาในการผลิตโอโซนจะสามารถผลิตก๊าซโอโซนที่มีความเข้มข้นเพียง 4.70 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งในกรณีนี้จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของก๊าซโอโซนมีค่าเพียง 4.70 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อกระจายลงในน้ำผ่านอุปกรณ์อุปกรณ์สร้างฟองทั้งสองขนาด (รูพรุนระดับนาโนและไมโคร) จึงส่งผลให้ทั้งค่าการนำไฟฟ้าและปริมาณของแข็งละลายน้ำที่ควรจะแปรผันในทิศทางเดียวกันเพราะค่าการนำไฟฟ้าเป็นค่าที่สะท้อนถึงไอออนที่นำไฟฟ้าในน้ำและไอออนเหล่านั้นล้วนเป็นองค์ประกอบหลักของปริมาณของแข็งละลายน้ำ แต่กลับพบว่าค่าการนำไฟฟ้าและปริมาณของแข็งละลายน้ำไม่ได้แปรผันในทิศทางเดียวกัน โดยอุปกรณ์สร้างฟองที่มีรูพรุนขนาดไมโครมีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 273 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตรเป็น 306 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ดังภาพที่ 7 ส่วนปริมาณของแข็งละลายน้ำมีค่าลดลงเล็กน้อยโดยมีค่าลดลงจาก 172 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็น 160 มิลลิกรัมต่อลิตรดังภาพที่ 8 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าการนำไฟฟ้าและปริมาณของแข็งละลายน้ำไม่ได้แปรผันในทิศทางเดียวกัน อาจมีสาเหตุจากการที่ใช้อากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยาในการผลิตก๊าซโอโซนนั้นอาจเกิดอนุมูลอิสระของไนโตรเจน (Reactive Nitrogen Species :RNS) ร่วมกับการเกิดอนุมูลอิสระของออกซิเจนเรียกว่าสารอนุมูลอิสระรวม (ROS/RNS) หรืออนุมูลอิสระของออกซิเจนและไนโตรเจน (Reactive Oxygen and Nitrogen Species :RONS) ซึ่งประกอบด้วยอนุมูลอิสระและอนุพันธ์ของออกซิเจนและไนโตรเจนรวมกัน เช่น ซูเปอร์ออกไซด์ อนุมูลไฮดรอกซิล อนุมูลอิสระไนตริกออกไซด์ ( $\bullet NO$ ) อนุมูลอิสระไนโตรเจนไดออกไซด์ ( $\bullet NO_2$ ) เปอร์ออกซินิตริต (Peroxynitrite,

$ONOO^-$ ) และไนตรัสออกไซด์ ( $HNO_2$ ) เป็นต้น เนื่องจากอากาศที่มีทั้งก๊าซไนโตรเจนและออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ



**Figure 7** Correlation between electrical conductivity (EC) and reaction time during the generation of reactive oxygen species (ROS) by a nano/micro-porous bubble generator operating with air as the feed gas.



**Figure 8** Correlation between total dissolved solids (TDS) and reaction time during the generation of reactive oxygen species (ROS) by a nano/micro-porous bubble generator operating with air as the feed gas.

### อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

ผลจากการศึกษาการผลิตอนุมูลอิสระของออกซิเจนจากกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยโอโซน ซึ่งก๊าซโอโซนถูกผลิตจากเครื่องปฏิกรณ์แบบไดอิเล็กทริกแบรีเออร์ ดิสชาร์จโดยใช้ก๊าซปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน (ก๊าซออกซิเจนและอากาศ) พบว่าความเข้มข้นของก๊าซโอโซนที่ผลิตจากการใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยานั้นมีความเข้มข้นสูงกว่าการใช้อากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยาอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang et al. และ Chamchoi et al. [6, 11] ที่ได้ระบุไว้ว่าเมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนในการผลิตก๊าซโอโซนความเข้มข้นของก๊าซโอโซนที่ผลิตจากก๊าซออกซิเจนจะมีความเข้มข้นสูงกว่าการใช้อากาศประมาณสองเท่า (อาจสูงถึง 8-9% โดยน้ำหนัก) สำหรับในการทดลองนี้ก๊าซโอโซนที่ผลิตจากก๊าซออกซิเจนมีค่าความเข้มข้นสูงกว่าการใช้อากาศถึงร้อยละ 235.5 โดยก๊าซโอโซนที่ผลิตจากก๊าซออกซิเจนมีค่าความเข้มข้น 15.77 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ก๊าซโอโซนที่ผลิตจากอากาศมีความเข้มข้นเพียง 4.70 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากในอากาศมีองค์ประกอบหลักเป็นก๊าซไนโตรเจนประมาณ 78% จึงส่งผลให้มีการยับยั้งการเกิดก๊าซโอโซนในระหว่างการโอโซนไนเซชัน เนื่องจากก๊าซไนโตรเจนมักจะ

ดูดซับพลังงานส่วนใหญ่จากระบบการคายประจุ ดังนั้นก๊าซออกซิเจนซึ่งมีความเข้มข้นสูงกว่าจึงสามารถผลิตก๊าซโอโซนได้ในความเข้มข้นที่สูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ โดยสามารถยืนยันถึงความแตกต่างของความเข้มข้นของก๊าซโอโซนที่ผลิตได้จากลักษณะสีของสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ซึ่งจะมีสีน้ำตาลเข้มเมื่อผลิตก๊าซโอโซนจากก๊าซออกซิเจน ในขณะที่ก๊าซโอโซนที่ผลิตจากอากาศจะมีสีที่จางกว่าคือเป็นน้ำตาลอ่อน/สีส้ม ในขั้นตอนของการสร้างอนุมูลอิสระของออกซิเจนด้วยการกระจายก๊าซโอโซนผ่านอุปกรณ์สร้างฟองที่มีรูพรุนระดับนาโนและไมโคร พบว่าความเข้มข้นของก๊าซโอโซนส่งผลต่อความสามารถในการละลายเข้าสู่หลอดคล็อกและเป็นไปตามกฎของเฮนรี (Henry's Law) ที่ระบุว่าปริมาณแก๊สที่ละลายอยู่ในของเหลว สภาวะสมดุลจะแปรผันตรงกับความดันย่อยเหนือของเหลว ดังนั้นก๊าซโอโซนที่มีความเข้มข้นสูงกว่าจึงสามารถละลายน้ำและเข้าสู่ภาวะสมดุล (Equilibrium) หรือสภาวะอิ่มตัว (Saturation) ได้รวดเร็วกว่าสังเกตได้จากกรณีที่ใช้ก๊าซออกซิเจนในการผลิตก๊าซโอโซน (ความเข้มข้นของโอโซนสูง) พบว่าค่าโพเทนเชียลออกซิเดชัน-รีดักชันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมีค่าสูงสุดประมาณประมาณ 820 มิลลิโวลต์ ในขณะที่ใช้อากาศในการผลิตก๊าซโอโซน (ความเข้มข้นของโอโซนต่ำ) จะมีค่าโพเทนเชียลออกซิเดชัน-รีดักชันสูงสุดเพียง 682 มิลลิโวลต์ และจะเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่อใช้อุปกรณ์สร้างฟองที่มีรูพรุนระดับไมโครในการกระจายก๊าซโอโซนลงในน้ำ พบว่าค่าโพเทนเชียลออกซิเดชัน-รีดักชันยังมีค่าต่ำลงโดยมีค่าเหลือเพียง 569 มิลลิโวลต์ นอกจากนั้นจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าก๊าซโอโซนที่ผลิตจากก๊าซออกซิเจน (ความเข้มข้นของโอโซนสูง) สามารถละลายเข้าสู่หลอดคล็อกด้วยกระบวนการการแพร่ (Diffusion) จนสามารถเข้าใกล้จุดอิ่มตัวในน้ำได้รวดเร็วกว่า โดยใช้ระยะเวลาเพียง 5 นาที ค่าโพเทนเชียลออกซิเดชัน-รีดักชันมีค่าเพิ่มขึ้นไปถึงระดับ 800 มิลลิโวลต์ แต่ในกรณีที่ใช้อากาศในการผลิตก๊าซโอโซน (ความเข้มข้นของโอโซนต่ำ) ค่าที่ได้คือ 562 มิลลิโวลต์ ดังนั้นเพื่อช่วยเพิ่มอัตราการละลายของก๊าซโอโซนลงในน้ำในกรณีที่ความเข้มข้นของโอโซนต่ำด้วยการใช้เทคโนโลยีฟองอากาศขนาดเล็ก พบว่าอุปกรณ์สร้างฟองทั้งสองขนาด (รูพรุนระดับนาโนและไมโคร) ให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยอุปกรณ์สร้างฟองที่มีรูพรุนระดับไมโครจะให้ค่าโพเทนเชียลออกซิเดชัน-รีดักชันสูงสุดเพียง 569 มิลลิโวลต์ ในขณะที่อุปกรณ์สร้างฟองที่มีรูพรุนระดับนาโนให้ค่าโพเทนเชียลออกซิเดชัน-รีดักชันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีค่าเทียบเท่ากับระดับสูงสุดของอุปกรณ์สร้างฟองที่มีรูพรุนระดับไมโคร (569 มิลลิโวลต์) ภายในเวลาเพียง 5 นาที และยังคงเพิ่มขึ้นต่อเนื่องจนมีค่าสูงสุดที่ 682 มิลลิโวลต์ สอดคล้องกับแนวคิดที่ว่าฟองที่มีขนาดเล็กมีคุณสมบัติที่เพิ่มประสิทธิภาพในการละลายก๊าซเนื่องจากมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงเมื่อเทียบกับฟองทั่วไปจึงทำให้เพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างก๊าซกับของเหลว และฟองที่มีขนาดเล็กกว่าจะลอยขึ้นสู่ผิวน้ำช้าลงดังนั้นฟองที่มีขนาดเล็กจึงมีเวลาคงอยู่ในสารละลายนานขึ้น ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทมวลเพิ่มขึ้นและทำให้ความสามารถในการละลายในน้ำดีขึ้น ด้วยเหตุนี้การผลิตอนุมูล ROS จึงมากขึ้น สอดคล้องกับงานของ Takahashi et al. และ Sumikura et al. [8, 9] ที่รายงานว่าฟองขนาดนาโนมีศักยภาพสูงกว่าฟองขนาดไมโครในการเพิ่มอัตราการละลายของโอโซน เนื่องจากฟองอากาศขนาดใหญ่จะลอยขึ้นไปยังพื้นผิวของเหลวอย่างรวดเร็วและเป็นจุดที่ฟองอากาศจะแตกออก กลไกดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในระดับผิวสัมผัสจากงานวิจัยของ Hu & Xia [16] เกี่ยวกับการสร้างแรงดันภายในฟองและศักย์ซีตา ( $\zeta$ -potential) ที่ผิวฟอง ดังนั้นผิวฟองโอโซนจากอุปกรณ์สร้างฟองที่มีรูพรุนขนาดนาโนจึงมีประจุลบสูงกว่าผิวฟองโอโซนจากอุปกรณ์สร้างฟองที่มีรูพรุนขนาดไมโคร ทำให้สามารถดึงดูดโมเลกุลน้ำและออกซิเจนที่มีขั้วเข้ามาอยู่รอบผิวฟองและเพิ่มโอกาสการเกิดปฏิกิริยากับโอโซน ส่งผลให้สามารถผลิตอนุมูล ROS ได้สูงกว่า จากค่าโพเทนเชียลออกซิเดชัน-รีดักชันที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนแสดงให้เห็นว่าภายใต้สภาวะโอโซนความเข้มข้นต่ำ ขนาดรูพรุนของอุปกรณ์สร้างฟองมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการสร้างอนุมูล

อิสระของออกซิเจน นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาค่าการนำไฟฟ้าและปริมาณของแข็งละลายน้ำพบว่ามีความสัมพันธ์กันในกรณีที่ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา ซึ่งอาจอธิบายได้ว่าเนื่องจากค่าการนำไฟฟ้าเป็นค่าที่สะท้อนถึงไอออนที่นำไฟฟ้าในน้ำและยังบ่งบอกประกอบหลักของปริมาณของแข็งละลายน้ำ ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของอนุมูลอิสระของออกซิเจนจึงส่งผลให้เกิดการออกซิไดซ์ไอออนหรือสารละลายที่มีประจุให้กลายเป็นสารประกอบใหม่ที่มีสถานะเป็นกลางทางไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น นอกจากนั้นอนุมูลอิสระของออกซิเจนยังทำให้เกิดการเปลี่ยนสารประกอบที่มีความสามารถละลายน้ำสูงให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความสามารถในการละลายน้ำลดลง ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าและปริมาณของแข็งละลายน้ำมีค่าลดลงซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nur et al. [13] ที่รายงานว่าเกิดการเกิดอนุมูลอิสระของออกซิเจนจากโอโซนไม่โครบับเบิลสามารถเปลี่ยนแปลงสภาพของสารละลายได้จริงโดยเฉพาะในระบบที่มีค่าโพเทนเชียลออกซิเดชัน-รีดักชันสูงกว่า 600 มิลลิโวลต์ ในทางกลับกันเมื่อใช้อากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยาพบว่าค่าการนำไฟฟ้ามีความสัมพันธ์เพิ่มขึ้นในขณะที่ปริมาณของแข็งละลายน้ำลดลงซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเกิดอนุมูลอิสระที่ต่างกัน เนื่องจากโอโซนที่ผลิตได้จากอากาศจะมีไนตริกออกไซด์และไนโตรเจนไดออกไซด์ปนอยู่ด้วย และเมื่อก๊าซไนตริกออกไซด์และก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์สัมผัสกับน้ำจะละลายน้ำและเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส เป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ (Chain Reaction) อย่างต่อเนื่องทำให้เกิดอนุมูล RONS เช่น อนุมูลอิสระไนตริกออกไซด์ อนุมูลอิสระไนโตรเจนไดออกไซด์ เปอร์ออกซินิตรีต และไนตรัสออกไซด์ เป็นต้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Choeysuppak et al. [12] ได้กล่าวไว้ว่าการนำไฟฟ้าของสารละลายสามารถเพิ่มได้เนื่องจากก๊าซโอโซนสามารถออกซิไดซ์สารในน้ำและสร้างไอออนประจุบวก ( $H^+$ ,  $NO_3^-$ ) ซึ่งเป็นตัวพาประจุในน้ำ ภายใต้กระบวนการโอโซนไลซิส (Ozonolysis)

จากผลการศึกษาจึงสามารถสรุปได้ว่า ผลการทดลองสอดคล้องกับทฤษฎีการถ่ายเทมวลและการละลายของก๊าซตามกฎของเฮนรีรวมถึงเป็นไปในแนวเดียวกับข้อมูลในงานวิจัยก่อนหน้านี้ โดยผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าในกรณีความเข้มข้นของก๊าซโอโซนต่ำขนาดรูพรุนของอุปกรณ์สร้างฟองจะมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการสร้างอนุมูลอิสระของออกซิเจน แต่ในกรณีที่ความเข้มข้นของก๊าซโอโซนสูงการสลายตัวของฟองก๊าซโอโซนในน้ำภายใต้กระบวนการแตกตัวและสลายตัวเป็นออกซิเจนพร้อมการสร้างอนุมูลอิสระของออกซิเจนจะทำให้สามารถเข้าสู่สภาวะอิ่มตัวอย่างรวดเร็ว จึงทำให้ขนาดรูพรุนของอุปกรณ์สร้างฟองไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการสร้างอนุมูลอิสระของออกซิเจนซึ่งเป็นข้อมูลที่สามารถนำไปเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำ เช่น การฆ่าเชื้อในระบบอุตสาหกรรม การบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันต่อไป โดยสามารถเลือกใช้สภาวะที่เหมาะสมการสร้างอนุมูลอิสระของออกซิเจนได้จากความเข้มข้นของก๊าซโอโซน ในกรณีที่ความเข้มข้นของก๊าซโอโซนต่ำควรมีเทคโนโลยีที่ช่วยเพิ่มอัตราการละลายของก๊าซโอโซนลงในน้ำ ซึ่งเทคโนโลยีฟองอากาศขนาดเล็กเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสร้างอนุมูลอิสระของออกซิเจนได้

## References

- [1] Nawrocki, J., et al. (2003). Catalytic Ozonation and Methods of Enhancing Molecular Ozone Reactions in Water Treatment. *Applied Catalysis B: Environmental*, 46, 639–669.
- [2] Gunten, U. V. (2003). Ozonation of Drinking Water: Part I. Oxidation Kinetics and Product Formation. *Water Research*, 37, 1443–1467.
- [3] Wangchai, K. (2020). *Reducing Contamination of Agricultural Products With Ozone*.

- Chiang Mai University. (in Thai)
- [4] Tanthulwet, M. (1996). *Water Supply Engineering* (Vol. 2). Chulalongkorn University. (in Thai)
  - [5] Egorova, G. V., et al. (2015). Ozone Solubility in Water. *Moscow University Chemistry Bulletin*, 70(5), 207–210.
  - [6] Wang, L. K., et al. (2004). *Physicochemical Treatment Processes* (Vol. 3). Humana Press.
  - [7] Hoigne, J., & Bader, H. (1983). Rate Constants of Reactions of Ozone With Organic and Inorganic Compounds in Water. *Water Research*, 17(2), 173–183.
  - [8] Takahashi, M., et al. (2007). Free-Radical Generation From Collapsing Microbubbles in the Absence of a Dynamic Stimulus. *Journal of Physical Chemistry*, 111, 1343–1347.
  - [9] Sumikura, M., et al. (2007). Ozone Micro-Bubble Disinfection Method for Wastewater Reuse System. *Water Science & Technology*, 56(5), 53–61.
  - [10] Tamaki, M., et al. (2011). Removal of Residual Pesticides in Vegetables Using Ozone Microbubbles. *Journal of Hazardous Materials*, 186, 956–959.
  - [11] Chamchoi, N., et al. (2022). The Comparison of Ozone Production With Oxygen Concentration and Feed Gas Flow Rate at Atmospheric Pressure. *Materials Today: Proceedings*, 65(7), 2336–2339.
  - [12] Choeysuppak, A., et al. (2023). The Comparison of Oxidation Efficiency of Reactive Oxygen Species (ROS): Pilot Scale of Microbubble Technologies With Oxygen Concentration. *Suranaree Journal of Science and Technology*, 30(6), 030163.
  - [13] Nur, M., et al. (2022). Degradation of Ciprofloxacin in Aqueous Solution Using Ozone Microbubbles: Spectroscopic, Kinetics, and Antibacterial Analysis. *Heliyon*, 8(8), e10137.
  - [14] Andreozzi, R., et al. (1999). Advanced Oxidation Processes (AOP) for Water Purification and Recovery. *Catalysis Today*, 53(1), 51–59.
  - [15] Zhang, J., et al. (2018). Synergistic Effect of Microbubbles and Activated Carbon on the Ozonation Treatment of Synthetic Dyeing Wastewater. *Separation and Purification Technology*, 201, 10–18.
  - [16] Hu, L., & Xia, Z. (2018). Application of Ozone Micro-Nano-Bubbles to Groundwater Remediation. *Journal of Hazardous Materials*, 342, 446–453.