Engng.J.CMU.(2019) 26 (2), 15-27

วารสารวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Engineering Journal
Chiang Mai University

การสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลในน้ำพลาสมา ด้วยระบบพลาสมาไกลดิงอาร์ก

Synthesis of Hydroxyl Radical in Plasma-activated Water by Gliding Arc Plasma

พฤติพงศ์ พฤติกัลป์* และ คมกฤต เล็กสกุล

Pruetipong Pruetikun* and Komkrit Leksakul

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 239 ต.สุเทพ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

Faculty of Engineering, Chiang Mai University, 239, Suthep, Muang, Chiang Mai, 50200, Thailand

*E-mail: piaro@windowslive.com, Tel.: 088-776-8646

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลในรูปน้ำพลาสมาด้วยระบบพลาสมา-ไกลดิงอาร์ก โดยเบื้องต้นได้ทดลองสร้างสภาวะพลาสมา แล้วทำการวัดแสงพลาสมาด้วยเครื่องออพติคัลอิมิสชันสเปกโทร-มิเตอร์ เพื่อยืนยันการเกิดอนุมูลไฮดรอกซิล จากนั้นจึงทดลองเปรียบเทียบการใช้น้ำกลั่นและไมโครบับเบิ้ลเป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิล รวมถึงศึกษาพฤติกรรมการคงอยู่ของอนุมูลไฮดรอกซิลในรูปไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ ท้ายสุดศึกษาหาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลโดยใช้แผนการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วน ผลการวัดแสงพลาสมาพบว่า มีค่าพีคที่ความยาวคลื่น 310 nm เกิดขึ้นสูง หมายถึง ระบบพลาสมาไกลดิงอาร์กสามารถสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลได้ และพบว่าการใช้ไมโครบับเบิ้ลเป็นวัตถุดิบสามารถสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลได้ดีกว่าน้ำกลั่น โดยการคงอยู่ของอนุมูลไฮดรอกซิลในรูปไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์มีแนวโน้มว่าความเข้มข้นลดลงตามเวลา ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลมีนัยสำคัญมีทั้งหมด 4 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนต ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า อัตราการจ่ายก๊าซอาร์กอน และอัตราส่วนการผสมก๊าซออกซิเจน

คำสำคัญ: อนุมูลไฮดรอกซิล ระบบพลาสมาไกลดิงอาร์ก น้ำพลาสมา ไมโครบับเบิ้ล

ABSTRACT

This research aimed to study the synthesis of hydroxyl radicals in form of plasma-activated water by gliding arc plasma. Initially, plasma experiments were conducted to confirm the occurrence of hydroxyl radical by using optical emission spectrophotometer, and then compared the use of distilled water and microbubble as raw material for the synthesis of hydroxyl radicals. Then, the existence of hydroxyl radicals in the form of hydrogen peroxide was studied. Finally, the factors that affect the synthesis of hydroxyl radical from are investigated by using fractional factorial experiments. Plasma measurements show that the peak at 310 nm occurs, meaning that the gliding arc plasma can synthesize hydroxyl radicals. It was found that the use of microbubble as a raw material could better synthesize hydroxyl radicals than distilled water. In addition, the existence of hydroxyl radical in the form of hydrogen peroxide is likely to decrease with time. Finally, the factors that affect the synthesis of hydroxyl radicals are amount of sodium bicarbonate, gap between electrodes, argon flow rate, and oxygenation ratio.

Keyword: Hydroxyl Radical, Gliding Arc Plasma, Plasma-activated Water, Microbubble

Received 6 November 2017
Revised 20 July 2017
Accepted 25 December 2017

1. บทนำ

ในประเทศไทย ประชากรส่วนใหญ่ที่ประกอบอาชีพเกษตรกรนิยมใช้สารกำจัดศัตรูพืช โดยการใช้สารดังกล่าวจะทำให้การเพาะปลูกมีประสิทธิภาพมากขึ้น แต่การใช้สารดังกล่าวจะทำให้เกิดสารพิษที่ตกค้างบนผักผลไม้ ซึ่งเมื่อบริโภคจะเกิดผลกระทบต่อสุขภาพทั้งในระยะสั้นและระยะยาว และยังส่งผลกระทบต่อการส่งออก โดยถูกบางประเทศกีดกันสินค้าที่มีสารพิษตกค้างเกินมาตรฐาน ทำให้ประเทศสูญเสียรายได้มหาศาล [1] ปัจจุบันการลดสารพิษตกค้างในระดับครัวเรือนสามารถทำได้โดยการล้างผักผลไม้ด้วยน้ำไหล หรือการแช่ในน้ำโดยเติมสารเคมีบางชนิด ได้แก่ น้ำส้มสายชู ด่างทับทิม ผงฟู น้ำเกลือ และไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ เป็นต้น ซึ่งวิธีดังกล่าวสามารถลดสารพิษตกค้างได้ดี เมื่อมีการขัดถูผิวและแช่ในระยะเวลาที่นานพอ [2] ซึ่งไม่เหมาะในระดับอุตสาหกรรม เนื่องจากใช้เวลานานและต้องใช้แรงงานในการขัดถู ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อรูปลักษณ์ภายนอก ส่งผลให้มูลค่าและอายุในการเก็บรักษาของสินค้าลดลง

ในปัจจุบันมีการพัฒนาแนวคิดการกำจัดสารพิษตกค้างบนผักผลไม้แบบใหม่ที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น คือ การผลิตสารอนุมูลอิสระ โดยเฉพาะอนุมูลไฮดรอกซิล แล้วนำไปสลายโมเลกุลสารพิษตกค้างบนผิวผักผลไม้ให้กลายเป็นสารที่ไม่เป็นพิษ หรือเป็นพิษน้อยจนไม่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภค [3] ซึ่งอนุมูลดังกล่าวสามารถทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ได้รวดเร็ว ไม่ทำให้สี หรือคุณสมบัติภายในของผักหรือผลไม้เปลี่ยนแปลง นอกจากนี้อนุมูลไฮดรอกซิลยังมีฤทธิ์ในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อโรคบางชนิดได้ [4]

สำหรับการสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลนั้นสามารถทำได้หลายวิธีการ เช่น วิธีการฉายรังสี วิธีปฏิกิริยาของเฟนตัน วิธีปฏิกิริยาการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง วิธีโอโซนออกซิเดชัน วิธีออกซิเดชันแบบเปียก วิธีการฉายคลื่นความถี่สูง และวิธีพลาสมาอุณหภูมิต่ำ เป็นต้น [5] โดยแต่ละวิธีก็มีข้อดีและข้อจำกัดต่าง ๆ ซึ่งเหมาะกับการใช้ประโยชน์ในแต่ละด้าน โดยสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบวิธีการการสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิล

วิธีการ	ข้อดี - ข้อจำกัด
วิธีการฉายรังสี	**ข้อดี** - ไม่ใช้สารเคมีอันตราย **ข้อจำกัด** - ประสิทธิภาพต่ำ
วิธีปฏิกิริยาของเฟนตัน	**ข้อดี** - ใช้พลังงานจากภายนอกน้อย **ข้อจำกัด** - กระบวนการไม่ต่อเนื่อง และต้องควบคุมสภาพความเป็นกรดของสารละลาย
วิธีปฏิกิริยาการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง	**ข้อดี** - มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคและลดสารตกค้างในน้ำ **ข้อจำกัด** - กระบวนการมีการผลิตสารเคมีอันตราย และไม่เหมาะกับวัตถุที่มีพื้นผิวซับซ้อน
วิธีโอโซนออกซิเดชัน	**ข้อดี** - ไม่ใช้สารเคมีอันตราย **ข้อจำกัด** - เกิดก๊าซโอโซนส่งผลต่อระบบหายใจ และมีประสิทธิภาพก็ต่อเมื่อใช้ร่วมกับเทคนิคอื่น
วิธีออกซิเดชันแบบเปียก	**ข้อดี** - ไม่ใช้สารเคมีอันตราย **ข้อจำกัด** - อุณหภูมิสารละลายสูง 173-375°C
วิธีการฉายคลื่นความถี่สูง	**ข้อดี** - ไม่ใช้สารเคมีอันตราย, มีประสิทธิภาพ **ข้อจำกัด** - อุปกรณ์มีกลไกซับซ้อน และอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ค่อนข้างสูง
วิธีพลาสมาอุณหภูมิต่ำ	**ข้อดี** - ไม่ใช้สารเคมีอันตราย และมีประสิทธิภาพ **ข้อจำกัด** - ใช้พลังงานไฟฟ้าค่อนข้างสูง

จากตารางพบว่าพลาสมาชนิดอุณหภูมิต่ำเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลได้มีประสิทธิภาพสะอาด และไม่ก่อให้เกิดสารตกค้างชนิดใหม่ [6] โดยที่สามารถควบคุมอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ได้ วิธีดังกล่าวจึงน่าจะเหมาะกับการใช้ลดสารพิษตกค้างบนผิวผลผลิตทางการเกษตร

สำหรับเทคโนโลยีพลาสมาอุณหภูมิต่ำนั้น แต่เดิมได้มีการศึกษาและพัฒนา นำมาใช้ในวงการต่าง ๆ ทั้งด้านการบำบัดน้ำเสียที่จะเกี่ยวข้องกับสารสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิล เพื่อมาสลายโมเลกุลสารเคมีที่มีความซับซ้อน

เช่น สีย้อม ให้โมเลกุลมีความซับซ้อนน้อยลง [7] หรือด้านการพัฒนาวัสดุชนิดใหม่ให้มีคุณสมบัติพิเศษ เช่น นำไฟฟ้าได้ดี น้ำหนักเบา มีความแข็งแรงสูง โดยจะเกี่ยวกับการสลายโมเลกุลให้มีขนาดเล็กลง เช่น การสังเคราะห์อนุภาคคาร์บอนนาโน [8] หรือด้านการแพทย์ที่มักจะเกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์อนุมูลของไฮดรอกซิลและไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ เพื่อนำมาฆ่าเชื้อแบคทีเรีย [9] หรือทำลายเซลล์มะเร็ง [10] ในปัจจุบันนักวิจัยเริ่มขยายขอบเขตการศึกษา โดยนำเทคโนโลยีพลาสมาอุณหภูมิต่ำมาประยุกต์ใช้ในด้านการเกษตรโดยจะสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลในรูปของเหลวที่เรียกว่าน้ำพลาสมา มาใช้ประโยชน์ เช่น การฆ่าเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus aureus* บนผิวสตรอเบอร์รี่ [11] หรือเพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราบางชนิดในเห็ด [4] และยังมีการสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลเพื่อสลายโมเลกุลของยาฆ่าแมลง เช่น ไดคลอร์วอส มาลาไทออน และเอนโดซัลแฟน [12] เป็นต้น

โดยพลาสมาอุณหภูมิต่ำสามารถออกแบบระบบได้หลายรูปแบบ ซึ่งพลาสมาไกลดิงอาร์กเป็นรูปแบบหนึ่งที่สามารถสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลในรูปน้ำพลาสมาได้ โดยมีจุดเด่น คือ สามารถสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลที่มีความเข้มข้นสูง โดยที่ใช้อุปกรณ์ราคาไม่แพงนัก และใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำกว่า รวมถึงสามารถพัฒนาเข้ากับระบบอุตสาหกรรมได้ง่ายกว่ารูปแบบอื่น [13] โดยปกติจะใช้น้ำกลั่นเป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลในรูปน้ำพลาสมา อย่างไรก็ตามได้มีการนำไมโครบับเบิ้ลมาใช้เป็นวัตถุดิบแทน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อ Escherichia coli ซึ่งพบว่าไมโครบับเบิ้ลมีส่วนช่วยเสริมประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย อีกทั้งยังช่วยลดการใช้พลังงานในการผลิตน้ำพลาสมาด้วย [14]

แม้ว่าเทคโนโลยีพลาสมาอุณหภูมิต่ำจะมีการศึกษามานานครอบคลุมหลากหลายสาขา แต่การศึกษาการใช้เทคโนโลยีพลาสมาอุณหภูมิต่ำทางด้านการเกษตรเป็นสิ่งใหม่สำหรับวงการพลาสมาอุณหภูมิต่ำ และกำลังเป็นที่สนใจในปัจจุบัน ซึ่งการศึกษาการนำวิธีพลาสมาไกลดิง-อาร์กมาใช้ร่วมกับไมโครบับเบิ้ล เพื่อสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลยังมีไม่มาก และยังไม่ได้มีการศึกษาหาปัจจัยของระบบที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลอย่างจริงจัง

ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาเพื่อพัฒนาการสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลด้วยระบบดังกล่าวให้ดีขึ้น เพื่อให้สามารถนำไปใช้ลดสารพิษตกค้างบนพืชผลการเกษตรได้อย่างมีประสิทธิภาพ และทราบแนวทางการพัฒนาในอนาคตได้

2. ทฤษฎีที่ใช้ในงานวิจัย

2.1 พลาสมาอุณหภูมิต่ำ (Non-Thermal Plasma)

พลาสมา คือ สถานะที่ 4 ของสสารซึ่งอยู่ในรูปของก๊าซมีประจุ เพียงบางส่วนหรือทั้งหมด ซึ่งสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท ได้แก่ พลาสมาชนิดอุณหภูมิสูง และพลาสมาชนิดอุณหภูมิต่ำ [6, 15, 16] สำหรับกระบวนการที่ต้องการสร้างอนุมูลอิสระเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ จะนิยมสร้างจากพลาสมาชนิดอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากสามารถควบคุมปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นได้ โดยไม่จำเป็นต้องมีกระบวนการการดับ และมีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานสูงกว่าพลาสมาชนิดอุณหภูมิสูง [17]

เทคโนโลยีพลาสมาชนิดอุณหภูมิต่ำจะเกี่ยวข้องกับการจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงดันสูงไปยังขั้วไฟฟ้า โดยกระทำผ่านตัวกลาง ซึ่งอาจเป็นก๊าซหรือของเหลวชนิดต่าง ๆ เพื่อให้เกิดการดิสชาร์จ จนสสารตัวกลางได้รับพลังงานเกิดการก่อตัวเป็นสปีชีส์ ซึ่งหมายถึงสสารในสถานะพลาสมาชนิดต่าง ๆ เช่น อิเล็กตรอน โฟตอน ไอออน โมเลกุล และอนุมูลอิสระ [18]

ปัจจุบันมีการนำพลาสมาชนิดอุณหภูมิต่ำมากระทำกับของเหลว ในรูปแบบการดิสชาร์จละอองน้ำหรือไอของของเหลว โดยมีข้อดีคือมีอัตราการแพร่ของสปีชีส์ลงสู่ของเหลวได้ดีขึ้น เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสถานะก๊าซและของเหลวมาก และช่วยลดการใช้พลังงานลง [18] โดยการดิสชาร์จรูปแบบดังกล่าวได้แก่ วิธีพลาสมา-

ไกลดิงอาร์ก ซึ่งมีจุดเด่น คือ ได้พลาสมาที่มีความหนาแน่นของสปีชีส์สูง ซึ่งทำให้เกิดสปีชีส์หลายชนิด และระบบไม่ซับซ้อน อุปกรณ์ราคาไม่แพง [13, 19] ระบบพลาสมาไกลดิงอาร์กมีหลักการ คือ การจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงดันสูงไปยังขั้วไฟฟ้าที่งอลู่ออกจากกันให้เกิดการอาร์กที่จุดที่แคบที่สุดของช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้า และเปลวอาร์กจะเคลื่อนไปตามการไหลของก๊าซ ซึ่งจะยาวขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้น โดยพลาสมาบริเวณดังกล่าวจะเป็นพลาสมาชนิดอุณหภูมิสูงจนถึงบริเวณ ๆ หนึ่งเป็นเส้นแบ่งระหว่างพลาสมาชนิดอุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ โดยจะเกิดการสูญเสียความร้อนและความไม่สมดุลด้านอุณหภูมิ บริเวณที่เป็นพลาสมาชนิดอุณหภูมิต่ำ ก๊าซที่ไหลอย่างต่อเนื่องจะผลักเปลวให้มีความยาวมากขึ้น ทำให้ระบบต้องการกำลังไฟฟ้ามากขึ้นเพื่อให้มีความเสถียร เมื่อความยาวเปลวยาวจนสุดความสามารถของแหล่งจ่ายจนไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้ได้ กำลังไฟฟ้าจะมีค่าลดลงและเปลวหดตัว และค่าแรงดันไฟฟ้าของระบบจะลดลงกลับมายังจุดแบ่งที่เริ่มเกิดเป็นพลาสมาชนิดอุณหภูมิต่ำ ซึ่งกระบวนการจะเกิดแบบพัลส์ ซึ่งใช้ระยะเวลาในการเกิด 10 ms ต่อหนึ่งรอบ [13, 17, 19]

2.2 กลไกการเกิดอนุมูลของไฮดรอกซิล

อนุมูลไฮดรอกซิล คือ รูปที่ไร้ประจุของไฮดรอกไซด์ไอออน โดยอนุมูลไฮดรอกซิลถือเป็นสารที่มีความไวในการเกิดปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์สูงมาก โดยมีฤทธิ์รองมาจากฟลูออรีน แต่มีประสิทธิภาพสูงกว่าโอโซน สามารถนำไปประโยชน์ในทางวิทยาศาสตร์หลายด้าน เช่น การบำบัดน้ำเสีย การทำให้พื้นผิวไร้เชื้อ การสลายโมเลกุลสารอินทรีย์ [5]

อนุมูลไฮดรอกซิลเกิดขึ้นจากการเติมโมเลกุลของน้ำในกระบวนการดิสชาร์จ ทำให้อิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงไปชนโมเลกุลของน้ำ จนเกิดการแตกตัว เกิดการไอออไนเซชัน [20] และการกระตุ้นแบบสั่นหรือแบบหมุน [18] ดังสมการที่ 1-7

ปฏิกิริยาการแตกตัว

$$H_2O + e^{-*} \rightarrow \cdot OH + H\cdot + e^- \quad (1)$$

ปฏิกิริยาการเกิดไอออน

$$H_2O + e^- \rightarrow \cdot H_2O^+ + 2e^- \quad (2)$$
$$H_2O^+ + H_2O \rightarrow H_3O^+ + \cdot OH \quad (3)$$

ปฏิกิริยาการกระตุ้นแบบสั่นหรือแบบหมุน

$$H_2O + e^- \rightarrow H_2O^* + e^- \quad (4)$$
$$H_2O^* + H_2O \rightarrow H_2O + H\cdot + \cdot OH \quad (5)$$
$$H_2O^* + H_2O \rightarrow H_2 + O\cdot + H_2O \quad (6)$$
$$H_2O^* + H_2O \rightarrow 2H\cdot + O\cdot + H_2O \quad (7)$$

อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากันเอง เพื่อให้กลับสู่รูปแบบที่เสถียรหรือมีครึ่งชีวิตที่ยาวกว่า เช่น ก๊าซไฮโดรเจน ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ และน้ำ ดังสมการที่ 8-10

$$H\cdot + H\cdot \rightarrow H_2 \quad (8)$$
$$\cdot OH + \cdot OH \rightarrow H_2O_2 \quad (9)$$
$$H\cdot + \cdot OH \rightarrow H_2O \quad (10)$$

อนุมูลไฮดรอกซิลมีกลไกการทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ คือ การดึงอะตอมของไฮโดรเจนออกจากโมเลกุลสารอินทรีย์เพื่อสร้างโมเลกุลน้ำ และอนุมูลสารอินทรีย์ชนิดอื่น การจับกับโมเลกุลนำไฟฟ้า กลายเป็นโมเลกุลที่มีพันธะที่ไม่อิ่มตัว และการปล่อยพลังงานโดยคายประจุอิเล็กตรอน จากรูปอนุมูลไฮดรอกซิลกลายเป็นไฮดรอกไซด์ด้วยการทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ [18]

การตรวจสอบยืนยันการเกิดอนุมูลไฮดรอกซิลสามารถทำได้จากการวัดแสงจากเปลวพลาสมาโดยวิธีออพติคัลอิมิสชันสเปกโทรมิเตอร์ แต่การวัดความเข้มข้นของอนุมูลไฮดรอกซิลโดยตรงค่อนข้างซับซ้อนกว่า เนื่องจากเครื่องมือมีราคาแพง และต้องมีความเชี่ยวชาญในการใช้เครื่องมือ วิธีการที่ได้รับความนิยมจึงเป็นวิธีการวัดทางอ้อมด้วยการดักจับอนุมูล [21] ซึ่งจะเป็นการประมาณอนุมูลไฮดรอกซิลด้วยความเข้มข้นสารเคมีที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างอนุมูลไฮดรอกซิลกับสารที่มีความไวในการทำปฏิกิริยากับอนุมูลไฮดรอกซิลสูง แต่ไม่ทำปฏิกิริยากับอนุมูลชนิดอื่น เช่น กรดเทเรฟทาลิก โดยเมื่อเติมสารดังกล่าวไปทำปฏิกิริยากับอนุมูลไฮดรอกซิลแล้วจะได้กรดไฮดรอกซิลเทเรฟทาลิก [22] ดังสมการที่ 11

$$C_6H_4(COOH)_2 + \cdot OH \rightarrow C_6H_4COOH_2OH \quad (11)$$

ซึ่งสารประกอบดังกล่าวมีฤทธิ์ดูดกลืนแสงยูวีที่ความยาวคลื่น 310 nm ตามปริมาณความเข้มข้นที่มีในสารละลาย [23]

2.3 ไมโครบับเบิ้ล (Microbubble)

ไมโครบับเบิ้ล คือ ฟองอากาศขนาดจุลภาค ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแต่ละฟองน้อยกว่า 100 ไมครอน ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวกลางที่ช่วยให้การเกิดปฏิกิริยาเคมีมีประสิทธิภาพมากขึ้น เนื่องจากไมโครบับเบิ้ลช่วยเพิ่มอัตราส่วนพื้นผิวสัมผัสระหว่างสถานะของเหลวและก๊าซต่อปริมาตรสูง ทำให้สามารถขนถ่ายมวลสารและความร้อนได้ดี ก่อให้เกิดผลลัพธ์ เช่น การแลกเปลี่ยนไอออน และการเกิดอนุมูลอิสระ โดยไมโครบับเบิ้ลจะมีขนาดเล็กลงจนหายไป จุดเด่นของไมโครบับเบิ้ลอีกอย่างหนึ่ง คือ มีความเร็วการลอยตัวขึ้นสู่ผิวของเหลวต่ำ ทำให้มีเวลาสำหรับการขนถ่ายมวลสารนานกว่าฟองอากาศขนาดใหญ่ จึงเป็นเหตุผลว่าการผลิตไมโครบับเบิ้ลให้มีขนาดยิ่งเล็กยิ่งดี [24-26]

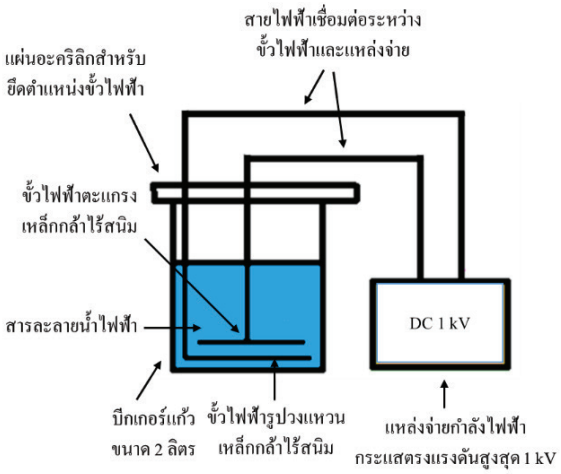
2.4 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบแผนการทดลอง คือ เทคนิคทางด้านสถิติรูปแบบหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการวางแผนการทดลองโดยเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของปัจจัยที่สนใจ แล้วนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางสถิติ เพื่อที่จะให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตาม ในกรณีที่ศึกษาปัจจัยจำนวนมากจะนิยมใช้การทดลองแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วน ซึ่งเป็นการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบปัจจัยมากกว่า 2 ปัจจัย แต่ไม่ทำการทดลองครบทุกกรณี โดยมีข้อดีคือช่วยลดการใช้ทรัพยากรได้อย่างมหาศาล ในขณะที่ยังคงแปลผลการทดลองได้มีประสิทธิภาพ [27]

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

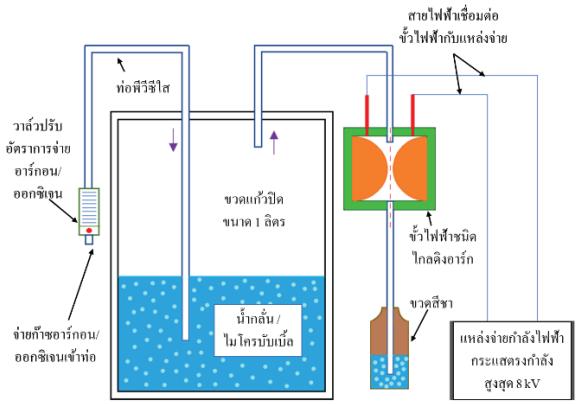
งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการพลาสมา ซึ่งตั้งอยู่ที่ชั้น 1 อาคารวิจัยและถ่ายทอดเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ซึ่งเป็นห้องทดลองปิดที่มีการควบคุมห้อง 25 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 50% แต่การวัดผลด้วยวิธีการดักจับอนุมูลจะนำสารละลายไปกระทำที่ภาควิชาจุลวิทยา ชั้น 8 อาคาร SCB2 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยระบบการสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลที่ทีมนักวิจัยมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ได้ออกแบบและพัฒนาขึ้นนั้นประกอบด้วย 2 ระบบ คือ ระบบการทำให้ตะกอนลอยด้วยไฟฟ้า และระบบพลาสมาไกลดิงอาร์ก ดังนี้

ระบบการทำให้ตะกอนลอยด้วยไฟฟ้า เป็นส่วนหนึ่งของระบบบำบัดน้ำเสียด้วยไฟฟ้า โดยจะเติมสารบางชนิดที่ทำหน้าที่ช่วยรวบรวมตะกอนที่ไม่ชอบน้ำ แล้วใช้พลังงานไฟฟ้าดิสชาร์จน้ำเสียให้เกิดฟองก๊าซขนาดไมครอนไปจับกับตะกอน ทำให้ตะกอนลอยตัวเพื่อคัดแยกทางกายภาพต่อไป [28] ซึ่งทางทีมผู้วิจัยอาศัยประโยชน์จากจุดนี้นำส่วนหนึ่งของระบบมาประยุกต์ในการผลิตไมโครบับเบิ้ล เพื่อเป็นวัตถุดิบสำหรับสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิล ซึ่งระบบประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม ตั้งไว้ห่างกันในระยะห่างที่เหมาะสมในบีกเกอร์ที่บรรจุสารละลายนำไฟฟ้า และต่อสายไฟเข้ากับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 1 kV (ยี่ห้อ EN Technologies รุ่น IDP-1010S ผลิตในประเทศเกาหลีใต้) ดังรูปที่ 1 เมื่อจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่เหมาะสม จะทำให้เกิดฟองอากาศในสารละลายปริมาณมากจนกลายเป็นไมโครบับเบิ้ล

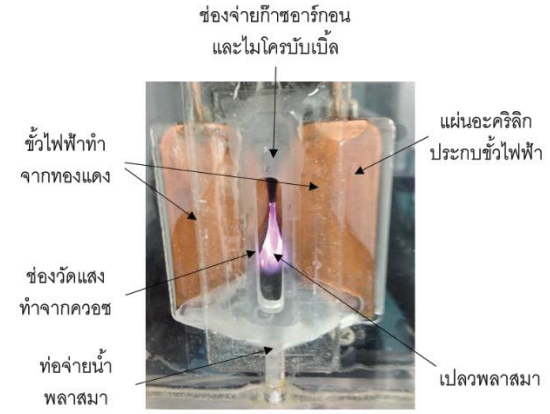


รูปที่ 1 ระบบการผลิตไมโครบับเบิ้ล
ด้วยวิธีการทำให้ตะกอนลอยด้วยไฟฟ้า

ระบบพลาสมาไกลดิงอาร์กที่แสดงดังรูปที่ 2 ประกอบด้วยส่วนวาล์วปรับก๊าซ ซึ่งเมื่อจ่ายก๊าซอาร์กอน ก๊าซอาร์กอนจะไหลไปตามท่อลงไปในขวดแก้วปิด ซึ่งอาจบรรจุน้ำกลั่นหรือไมโครบับเบิ้ลไว้ ด้วยแรงดันและการระเหยจะทำให้ละอองน้ำไหลออกไปยังขั้วไฟฟ้าไกลดิงอาร์กที่ต่อกับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงสุด 8 kV (ยี่ห้อ F/ART รุ่น IP44 ผลิตในประเทศอิตาลี)



รูปที่ 2 ระบบพลาสมาไกลดิงอาร์ก



รูปที่ 3 ขั้วไฟฟ้าไกลดิงอาร์ก

สำหรับขั้วไฟฟ้าในรูปที่ 3 ประกอบด้วยแผ่นขั้วทองแดงรูปทรงโค้ง 2 ขั้ว วางคู่ออกห่างกันโดยจุดที่ใกล้ที่สุดมีระยะห่าง 3 mm โดยมีแผ่นอะคริลิกประกบกันเพื่อทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้า และให้ขั้วไฟฟ้าเป็นระบบปิดให้ก๊าซไหลผ่านได้เท่านั้น โดยเมื่อเปิดแหล่งจ่ายไฟฟ้าจะเกิดการอาร์กที่บริเวณส่วนที่แคบที่สุดของขั้ว เมื่อก๊าซไหลผ่านจะทำให้เปลวมีขนาดยาวเกิดขึ้นเป็นพลาสมาโซนเมื่อละอองน้ำไหลผ่านบริเวณดังกล่าวจะเกิดปฏิกิริยาเคมีกลายเป็นน้ำพลาสมาไหลออกมา ซึ่งสามารถนำขวดสีชามารองรับได้

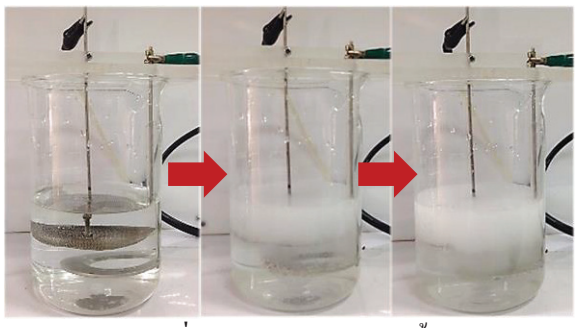
สำหรับการทดลองในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยการทดลองหลายส่วน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1 การศึกษาการสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลในรูปน้ำพลาสมาเบื้องต้น

ส่วนแรกของการทดลองเบื้องต้นผู้วิจัยต้องการยืนยันผลว่าระบบพลาสมาไกลดิงอาร์กที่พัฒนาขึ้นมานั้นสามารถสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลได้จริง จึงได้ทดลองสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลโดยใช้น้ำกลั่น (ยี่ห้อโพลสตาร์ ผลิตในประเทศไทย) เป็นวัตถุดิบเติมในขวดแก้วปริมาณ 600 mL โดยจะกำหนดค่ากำลังไฟฟ้า 460 W และปรับอัตราการจ่ายก๊าซอาร์กอนที่อัตรา 10 L/min แล้ววัดผลการทดลองด้วยเครื่องออพติคัลอิมิสชันสเปกโทรมิเตอร์ (ยี่ห้อ Avantes รุ่น AvaSpec-ULS2048CL-EVO ผลิตในประเทศเนเธอร์แลนด์) วัดแสงจากเปลวพลาสมาที่เกิดขึ้น โดยสามารถระบุสปีชีส์ที่เกิดขึ้นในสภาวะพลาสมาได้ จึงเป็นวิธีที่ใช้ยืนยันการเกิดอนุมูลไฮดรอกซิลที่ง่ายและสะดวก [29] โดยในระหว่างการเดินเครื่องพลาสมาไกลดิงอาร์ก ผู้วิจัยได้วัดแสงจากเปลวพลาสมาโดยต่อหัวโพรบรับแสงที่บริเวณช่องระหว่างขั้วไฟฟ้า กำหนดระยะเวลาการรวมแสงที่ 5 s และบันทึกค่าที่ได้

หลังจากยืนยันผลแล้ว ส่วนถัดมาผู้วิจัยต้องการทราบว่าการใช้ไมโครบับเบิ้ลเป็นวัตถุดิบแทนน้ำกลั่น ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลหรือไม่ และจะมีการคงอยู่ของอนุมูลเป็นอย่างไร ผู้วิจัยจึงทดลองเปรียบเทียบความแตกต่างกรณีใช้น้ำกลั่น และไมโครบับเบิ้ลเป็นวัตถุดิบ โดยในการผลิตไมโครบับเบิ้ลจะใช้วิธีการทำให้ตะกอนลอยด้วยไฟฟ้า ซึ่งเป็นวิธีการผลิตไมโครบับเบิ้ลที่สะดวกรวดเร็ว แต่จำเป็นต้องใช้สารละลายที่นำไฟฟ้าในการผลิต [28] ซึ่งผู้วิจัยได้ใช้สารโซเดียมไบคาร์บอเนต (ยี่ห้อ Mcgarrett ผลิตในประเทศไทย) ซึ่งเป็นสารเจือปนอาหารในการทำให้

น้ำกลั่นสามารถนำไฟฟ้าได้ โดยผู้วิจัยได้เติมสารโซเดียมไบคาร์บอเนต 4.2 g ลงในน้ำกลั่น 1 L หย่อนขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ขั้วลงไปในสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต โดยกำหนดระยะห่างขั้ว 4 เซนติเมตร จากนั้นต่อสายไฟฟ้าและตรวจสอบความเรียบร้อยของอุปกรณ์ จากนั้นจึงทำการเปิดสวิตช์เครื่อง กำหนดแรงดันไฟฟ้าที่ 45 V โดยเดินเครื่องเป็นระยะเวลา 10 min โดยเมื่อเริ่มเดินเครื่องจะเกิดฟองอากาศขนาดจุลภาคจำนวนมากจนกลายเป็นไมโครบับเบิ้ลภายในบีกเกอร์ ดังรูปที่ 4 เมื่อผลิตไมโครบับเบิ้ลเสร็จแล้วจึงนำไปผลิตน้ำพลาสมาเปรียบเทียบกับการใช้น้ำกลั่น โดยจะกำหนดเงื่อนไขการทดลองไว้เท่ากันทั้งสองกรณี คือ กำลังไฟฟ้า 460 W อัตราการจ่ายก๊าซอาร์กอน 10 L/min โดยทดลองซ้ำ 3 ครั้ง สำหรับการวัดผลการทดลองทั้ง 2 กรณี จะเปรียบเทียบด้วยการวัดความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ด้วยชุดทดสอบเพอร์ออกไซด์ (ยี่ห้อ QUANTOFIX® รุ่น Peroxide 25) ซึ่งเป็นวิธีวัดทางอ้อม เนื่องจากอนุมูลไฮดรอกซิลเป็นสารที่ไม่เสถียร มีการสลายตัวอยู่ตลอดเวลา ซึ่งสารไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เป็นรูปที่เสถียรที่เกิดจากอนุมูลไฮดรอกซิลทำปฏิกิริยากันเอง ดังสมการที่ 9 จึงสามารถใช้ประมาณแนวโน้มอนุมูลไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้นได้ โดยหากจุ่มแผ่นทดสอบลงในน้ำพลาสมาที่ประกอบด้วยไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ แผ่นทดสอบจะเปลี่ยนสีจากสีขาวเป็นสีน้ำเงิน ยิ่งสีน้ำเงินเข้มหมายถึงมีความเข้มข้นไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์สูง โดยที่มีสีมาตรฐานสำหรับเปรียบเทียบที่ข้างบรรจุภัณฑ์



รูปที่ 4 การผลิตไมโครบับเบิ้ล
ด้วยวิธีการทำให้ตะกอนลอยด้วยไฟฟ้า

หลังจากที่ทดลองเสร็จ ผู้วิจัยจึงเลือกวัตถุดิบมาทดลองสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลใหม่โดยใช้เงื่อนไขที่ดีกว่า ผลิตน้ำพลาสมาใส่ขวดแก้วประมาณ 5 mL แล้วตรวจวัดไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ทันทีที่ผลิตเสร็จ และตรวจวัดอย่างต่อเนื่องที่ระยะเวลา 2, 5, 10, 30, 60, 120 min โดยระหว่างการวัดซ้ำจะปิดฝาทุกครั้งหลังตรวจวัดเสร็จ และมีการบันทึกภาพแผ่นทดสอบด้วยทุกครั้ง

3.2 การทดลองเพื่อสมการทำนายความเข้มข้นของกรดไฮดรอกซิลเทเรฟทาลิก

ก่อนการทดลองคัดกรองปัจจัยที่มีนัยสำคัญจำเป็นต้องสร้างสมการสำหรับแปลงค่าการดูดกลืนแสงกรดไฮดรอกซิลเทเรฟทาลิกที่วัดด้วยวิธีการดักจับอนุมูลกลับเป็นค่าความเข้มข้นของกรดไฮดรอกซิลเทเรฟทาลิกในหน่วยหนึ่งส่วนในล้านส่วน (ppm) ก่อนที่จะนำไปวิเคราะห์ทางสถิติ

การทดลองเริ่มจากการเติมน้ำกลั่น 10 mL ลงในหลอดทดลองขนาดเล็ก แล้วเติมสารกรดไฮดรอกซิลเทเรฟทาลิกสำเร็จรูปเกรดมาตรฐาน (ยี่ห้อ Sigma-Aldrich ผลิตในประเทศสหรัฐอเมริกา) 1 mg ลงในหลอดทดลองดังกล่าว ซึ่งทำให้สารละลายกรดไฮดรอกซิลเทเรฟทาลิกมีความเข้มข้น 100 ppm จากนั้นจึงดูดสารละลายใส่คิวเวทแล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (ยี่ห้อ BOECO ผลิตในประเทศเยอรมัน) ที่ค่าความยาวคลื่น 310 nm โดยทำซ้ำ 3 ครั้ง จากนั้นจึงทำการเจือจางสารละลายโดยการเติมน้ำกลั่น และทดลองซ้ำที่ความเข้มข้น 50, 25, 10, 5 ppm ตามลำดับ จากนั้นจึงนำค่าเฉลี่ยของค่าดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่าง ๆ มาสร้างสมการ

3.3 การทดลองคัดกรองปัจจัยที่มีนัยสำคัญ

ในการทดลองศึกษาเพื่อหาปัจจัยที่มีนัยสำคัญนั้น ผู้วิจัยคัดเลือกปัจจัยมาทดสอบจากกระบวนการผลิตไมโครบับเบิ้ล 3 ปัจจัย คือ ปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนต ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า และระยะเวลาดิสชาร์จ และเป็นปัจจัยจากระบบไกลดิงอาร์ก 3 ปัจจัย คือ กำลังไฟฟ้า อัตราการจ่ายก๊าซอาร์กอน และอัตราส่วนการผสมก๊าซ

ออกซิเจน ผู้วิจัยใช้แผนการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วน ทดลองจริงหนึ่งในสี่ส่วนจากแฟกทอเรียลเต็มจำนวน โดยการทดลองมีทั้งสิ้น $2^{6-2} \times 2 = 32$ การทดลอง ซึ่งสามารถลดการใช้ทรัพยากรในการทดลองได้มาก ในขณะที่การวิเคราะห์ผลยังสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถแสดงรายละเอียดการทดลองและการกำหนดสัญลักษณ์ได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การออกแบบการทดลองเพื่อคัดกรองปัจจัยที่มีนัยสำคัญ

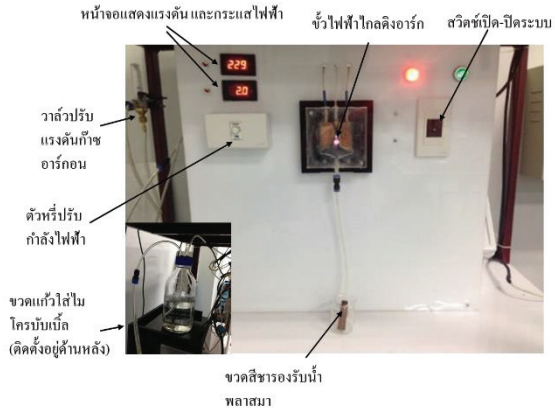
ปัจจัยที่สนใจศึกษา	ค่าพารามิเตอร์		หน่วย
	ค่าต่ำสุด (-)	ค่าสูงสุด (+)	
ระยะเวลา (A)	5	15	min
ปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนต (B)	2.1	4.2	g
ระยะห่างขั้วไฟฟ้า (C)	2	4	cm
อัตราการจ่ายอาร์กอน (D)	5	9	L/min
อัตราส่วนการผสมก๊าซออกซิเจน (E)	0	1	% Ar
กำลังไฟฟ้า (F)	270	460	W

ผู้วิจัยได้สร้างแผนการทดลองแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนด้วยโปรแกรม MINITAB โดยได้ตัวเลขแสดงคุณสมบัติของตารางออกแบบการทดลอง คือ Resolution IV (2_{IV}^{6-2}) ซึ่งหมายถึงผลกระทบหลักจะปะปนกับผลกระทบร่วมสามทาง และผลกระทบร่วมสองทางจะปนกันเอง ลำดับของการทดลองเป็นแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ และการทดลองมีระดับความเชื่อมั่นที่ 95%

การทดลองแต่ละเงื่อนไขเริ่มจากการเตรียมสารละลายกรดเทเรฟทาลิก ซึ่งไม่ละลายน้ำแต่จะละลายในเบสแก่ โดยเติมน้ำกลั่นลงในบีกเกอร์แก้ว 125 mL แล้วเติมสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ยี่ห้อ RCI Labscan ผลิตในประเทศญี่ปุ่น) 5 g แล้วจึงค่อย ๆ เติมกรดเทเรฟทาลิก (ยี่ห้อ Sigma-Aldrich ผลิตในประเทศสหรัฐอเมริกา) 8.3 g จากนั้นกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

จากนั้นจึงเตรียมตัวอย่างสำหรับใช้เทียบค่าดูดกลืนแสง โดยเติมน้ำกลั่นลงในบีกเกอร์แก้ว 1 L และเติมสารโซเดียมไบคาร์บอเนตตามเงื่อนไขการทดลอง กวนสารละลายจนเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นใช้ไมโครปิเปตดูดสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตและสารละลายกรดเทเรฟทาลิกมาใส่ในขวดสีชาในอัตราส่วน 1 : 1 ปิดฝาขวดและเขย่าให้เข้ากัน เก็บไว้ในที่พ้นแสง โดยทำการเตรียมตัวอย่างควบคุมจำนวน 5 ตัวอย่างต่อหนึ่งเงื่อนไข

ถัดมานำสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตที่เหลือมาผลิตไมโครบับเบิ้ล โดยกำหนดแรงดันไฟฟ้าที่ 45 V และเดินเครื่องเป็นระยะเวลาตามที่เงื่อนไขการทดลองกำหนดไว้ เสร็จแล้วจึงไมโครบับเบิ้ลลงในขวดแก้วปริมาณ 750 mL และนำไปต่อพ่วงกับระบบพลาสมาไกลดิงอาร์ก แล้วจึงเปิดวาล์วท่อจ่ายก๊าซอาร์กอนและออกซิเจน โดยปรับอัตราการจ่ายก๊าซตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ แล้วจึงทำการเปิดสวิตช์เครื่อง และปรับค่ากำลังไฟฟ้าตามเงื่อนไขการทดลอง โดยจะทำการอุ่นเครื่อง 5 min เมื่อครบเวลาแล้วจะนำท่อน้ำออกต่อกับขวดสีชา ผลิตจนได้ประมาณ 40% ของขวด จึงทำการปิดเครื่องและเขย่าสารให้เข้ากัน จากนั้นทำการทดสอบเพอร์ออกไซด์โดยการสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลในรูปน้ำพลาสมาสามารถแสดงกระบวนการได้รูปที่ 5 เสร็จแล้วจึงดูดน้ำพลาสมาจากขวดสีชาขวดเดิมใส่ขวดสีชาขวดใหม่ 3 mL และดูดสารละลายกรดเทเรฟทาลิกใส่ขวดสีชา 3 mL ปิดฝาและเขย่าให้เข้ากัน จากนั้นเขียนฉลากติดขวดและนำไปเก็บในกล่อง และนำอุปกรณ์ไปทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่น แล้วเช็ดด้วยแอลกอฮอล์ เพื่อให้พร้อมใช้งานในการทดลองเงื่อนไขถัดไป



รูปที่ 5 การสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลในรูปน้ำพลาสมาด้วยวิธีพลาสมาไกลดิงอาร์ก

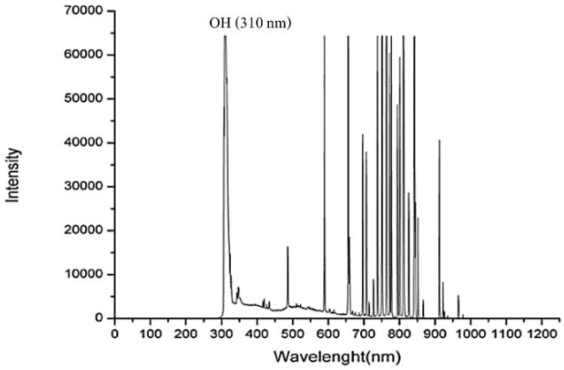
เมื่อทดลองเสร็จจึงนำตัวอย่างไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ภาควิชาจุลชีววิทยา ชั้น 8 อาคาร SCB2 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยในการวัดผู้วิจัยใช้วิธีวัดซ้ำ 1 เงื่อนไขเทียบกับ 5 ตัวอย่างควบคุม และการวัดเทียบกับสารละลายควบคุมจะวัดสารละลายครั้งละ 3 mL 2 ครั้ง โดยแต่ละครั้งจะทำการวัดซ้ำ 2 รอบ โดยสรุปแล้ว 1 เงื่อนไขการทดลองจะได้ค่าวัดทั้งหมด 5 x 2 x 2 = 20 ค่า ซึ่งจะนำค่าทั้ง 20 ค่านี้มาเฉลี่ยให้กลายเป็นค่าเดียว

หลังจากวัดค่าดูดกลืนแสงครบทุกเงื่อนไข จึงนำค่าวัดดังกล่าวไปหาค่าเฉลี่ย แล้วนำค่าเฉลี่ยของแต่ละเงื่อนไขไปแทนค่า y ในสมการ y = 0.0148x แล้วแก้สมการหาค่า x ออกมาเป็นความเข้มข้นของกรดไฮดรอกซิลเทเรฟ-ทาลิกในหน่วย ppm เสร็จแล้วจึงนำผลลัพธ์ที่ได้ไปกรอกในโปรแกรม MINITAB เพื่อวิเคราะห์ผล

4. ผลการศึกษาวิจัย

4.1 ผลการศึกษาการสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลในรูปน้ำพลาสมาเบื้องต้น

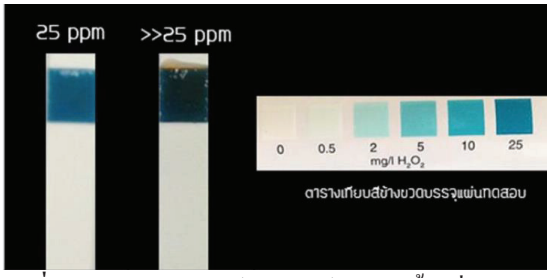
ผลการทดลองในส่วนแรกหลังจากได้วัดความเข้มแสงที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องออพติคัลอิมิสชันสเปกโทรมิเตอร์ สามารถแสดงผลการวัดได้ดังรูปที่ 6 พบว่าในการสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลโดยจ่ายก๊าซอาร์กอนที่อัตรา 10 L/min มีค่าความเข้มแสงที่ความยาวคลื่น 310 nm เกิดขึ้นสูง ซึ่งค่าพีคดังกล่าวแสดงถึงการเกิดอนุมูลไฮดรอก-ซิลในสภาวะพลาสมาปริมาณมาก [29]



รูปที่ 6 ผลการวัดแสงพลาสมาด้วยออพติคัลอิมชันสเปกโทรมิเตอร์

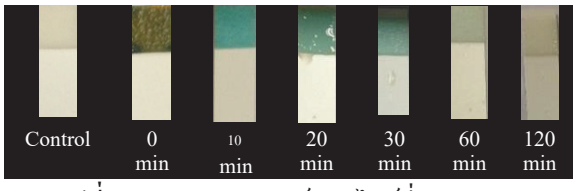
ดังนั้นจึงหมายความว่า ระบบพลาสมาไกลดิงอาร์กสามารถสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลได้จริง

ผลการทดลองในส่วนถัดมา พบว่าในกรณีที่ใช้น้ำกลั่นเป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลจะได้ค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ประมาณ 25 ppm แต่เมื่อนำไมโครบับเบิ้ลมาใช้พบว่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์มากกว่า 25 ppm โดยสังเกตจากสีของแผ่นทดสอบดังรูปที่ 7 ทั้งนี้ผลการทดลองได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ [25] ที่กล่าวว่าไมโครบับเบิ้ลจะช่วยเพิ่มพื้นผิวที่ผิวร่วมระหว่างสถานะของเหลวและก๊าซ ช่วยให้อนุมูลไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้นในพลาสมาก๊าซสามารถละลายลงน้ำพลาสมา ซึ่งเป็นของเหลวได้ดีขึ้น นอกจากนี้ตัวไมโครบับเบิ้ลเองสามารถสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลได้ด้วยกลไกการสลายตัวเอง ดังนั้นการใช้ไมโครบับเบิ้ลจึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลทั้งทางตรงและทางอ้อม



รูปที่ 7 การทดสอบเพอร์ออกไซด์กรณีใช้น้ำกลั่น (ซ้าย) และใช้ ไมโครบับเบิ้ล (ขวา) เป็นวัตถุดิบ

ผลการทดลองในส่วนสุดท้าย พบว่าเมื่อใช้แผ่นทดสอบเพอร์ออกไซด์วัดน้ำพลาสมาทันทีที่ผลิตได้ แผ่นทดสอบมีสีเข้มมากกว่าที่แผ่นทดสอบรองรับได้ โดยแผ่นทดสอบสามารถตรวจวัดความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ได้ตั้งแต่ 0-25 ppm ดังนั้น หมายความว่า ในน้ำพลาสมามีความเข้มข้นของไฮโดรเจน-เพอร์ออกไซด์มากกว่า 25 ppm มาก ซึ่งต่อมาเมื่อวัดซ้ำที่ช่วงเวลา 10 min พบว่ามีความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพอร์เหลือ 25 ppm และที่ 20 min เหลือเพียง 5 ppm และยังคงลดลงอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งเมื่อผ่านไป 120 min ความเข้มข้นเหลือน้อยกว่า 0.1 ppm ดังรูปที่ 8 โดยการทดลองทั้ง 3 ครั้งภายใต้เงื่อนไขเดิมให้ผลการทดลองที่ใกล้เคียงกัน จึงสรุปได้ว่าในการสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลภายใต้เงื่อนไขดังกล่าวอนุมูลไฮดรอกซิลที่อยู่ในรูปไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์จะมีแนวโน้มความเข้มข้นลดลงและจะคงอยู่ในน้ำพลาสมาได้ประมาณ 120 min



รูปที่ 8 แผ่นทดสอบเพอร์ออกไซด์ที่เวลาต่าง ๆ

4.2 ผลการทดลองการสร้างสมการทำนายความเข้มข้นของกรดไฮดรอกซิลเทเรฟทาลิก

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการวัดมาเข้าสมการในโปรแกรม MS Excel พบว่าความสัมพันธ์ที่ได้นั้นมีลักษณะเป็นแบบเชิงเส้นพบว่าสมการที่ได้ คือ

$$y = 0.0148x \qquad (12)$$

ซึ่ง X คือ ความเข้มข้นของกรดไฮดรอกซิลเทเรฟ-ทาลิก ในหน่วย ppm และ y คือ ค่าการดูดกลืนแสง ผลทดสอบค่าความเชื่อมั่นของโมเดลพบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R-Square เท่ากับ 99.62% ดังนั้น สมการนี้จึงสามารถนำไปใช้ทำนายได้

4.3 ผลการทดลองเพื่อคัดกรองปัจจัยที่มีนัยสำคัญ

หลังจากทำการทดลองและวัดผลเสร็จสิ้นครบทั้ง 32 ตัวอย่าง แล้วจึงข้อมูลไปแทนในสมการที่ 12 พบว่าค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของกรดไฮดรอกซิลเทเรฟทาลิกมีค่าเท่ากับ 6.190 ppm โดยที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์แต่ละการทดลองมีค่าประมาณ 10-25 ppm จากนั้นจึงนำผลลัพธ์ที่ได้ไปวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยโปรแกรม MINITAB โดยกำหนดผลตอบ คือ ค่าความเข้มข้นของกรดไฮดรอกซิลเทเรฟทาลิกได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน

ปัจจัยแฝง	F-Value	P-Value
L_A	0.23	0.637
L_B	28.55	0.000
L_C	36.70	0.000
L_D	91.79	0.000
L_E	5.40	0.034
L_F	4.24	0.056

ปัจจัยในตารางที่ 3 จะเป็นปัจจัยแฝงที่ประกอบด้วยปัจจัยชนิดอื่นปะปนกันอยู่ โดยสามารถระบุส่วนประกอบของปัจจัยแฝงได้จากโครงสร้างปัจจัยแฝง ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 โครงสร้างปัจจัยแฝง

ปัจจัยแฝง	โครงสร้างปัจจัยแฝง
L_A	A + BCE + DEF + ABCDF
L_B	B + ACE + CDF + ABDEF
L_C	C + ABE + BDF + ACDEF
L_D	D + AEF + BCF + ABCDE
L_E	E + ABC + ADF + BCDEF
L_F	F + ADE + BCD + ABCEF

จากตารางที่ 3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าปัจจัยแฝง L_B, L_C, L_D, L_E มีค่า P-Value < 0.05 ดังนั้นปัจจัยแฝงดังกล่าวจึงมีนัยสำคัญ ซึ่งเมื่อพิจารณาตารางที่ 4 พบว่าปัจจัยแฝงกลุ่มดังกล่าวประกอบด้วย การปนกันของผลกระทบระหว่างปัจจัยหลัก ปัจจัยร่วม 3 และ 5 ทาง ซึ่งปัจจัยที่มีนัยสำคัญนั้นจะมาจากปัจจัยอันดับต้น ซึ่งก็คือปัจจัยหลัก จึงสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อการสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลอย่างมีนัยสำคัญ คือ ปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนต (B) ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (C) อัตราการจ่ายก๊าซอาร์กอน (D) และอัตราส่วนการผสมก๊าซออกซิเจน (E)

5. สรุปงานวิจัย

งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการทดลองเพื่อศึกษาการสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลในน้ำพลาสมาด้วยวิธีพลาสมาไกลดิงอาร์ก และหาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพอนุมูลไฮดรอกซิลอย่างมีนัยสำคัญ โดยในการทดลองจะเริ่มจากการศึกษาการสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลที่เงื่อนไขต่างๆ และหาพฤติกรรมการคงอยู่ของอนุมูลไฮดรอกซิล หลังจากนั้นจึงทำการทดลองเพื่อคัดกรองปัจจัยที่มีนัยสำคัญ โดยพบว่ามี 4 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนต ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า อัตราการจ่ายก๊าซอาร์กอน และอัตราการผสมก๊าซออกซิเจน

6. ข้อเสนอแนะ

ระบบการวัดอนุมูลไฮดรอกซิลในงานวิจัยนี้เป็นการวัดทางอ้อม ซึ่งเป็นการประมาณอนุมูลไฮดรอกซิล โดยอ้างอิงจากความเข้มข้นของกรดไฮดรอกซิลเทเลฟทาลิกและไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ ซึ่งไม่ได้วัดอนุมูลไฮดรอกซิลโดยตรง จึงทำให้ทราบเพียงแนวโน้มและปัจจัยที่ส่งผลเท่านั้น หากต้องการทราบความเข้มข้นของอนุมูลไฮดรอกซิลในน้ำพลาสมาโดยละเอียด จำเป็นต้องใช้วิธีอื่นในการวัดเพิ่มเติม และในการทดลองเมื่อสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลเสร็จควรวัดค่าทันที เพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น

ในอนาคตสามารถนำงานวิจัยนี้ไปศึกษาต่อได้อีกหลายรูปแบบ เช่น การศึกษาหาเงื่อนไขการทดลองที่ดีที่สุดในการสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลในรูปน้ำพลาสมาด้วยวิธีพลาสมาไกลดิงอาร์กที่ใช้ไมโครบับเบิ้ลที่ผลิตด้วยวิธีการทำให้ตะกอนลอยด้วยไฟฟ้า หรือการศึกษาผลกระทบต่อประสิทธิภาพการสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลเมื่อใช้ไมโครบับเบิ้ลที่ผลิตด้วยวิธีอื่นเป็นวัตถุดิบ เมื่อใช้ก๊าซชนิดอื่นจ่ายเข้าระบบ หรือเมื่อใช้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าชนิดอื่น หรือการปรับปรุงระบบให้มีกำลังการผลิตสูงขึ้น โดยที่ยังคงไว้ซึ่งคุณภาพของน้ำพลาสมา ซึ่งจะเป็นการพัฒนาระบบพลาสมาให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นจนสามารถนำไปใช้จริงในอุตสาหกรรมได้

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร ที่สนับสนุนทุนอุดหนุนงานวิจัย และขอขอบคุณคณาจารย์ เจ้าหน้าที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ และคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้คำแนะนำและเอื้อเฟื้อเครื่องมืออุปกรณ์ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] Thai-Pan. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการเพื่อเตือนภัยสารเคมีกำจัดศัตรูพืชประจำปี 2558. การประชุมวิชาการเพื่อเตือนภัยสารเคมีกำจัดศัตรูพืช: เครือข่ายเตือนภัยสารเคมีกำจัดศัตรูพืช, 2558.

[2] สำนักงานสาธารณะสุขจังหวัดลำปาง. ล้างผัก ผลไม้ ลดสารพิษตกค้าง. 2558.

[3] Hu, Y., Bai, Y., Li, X. and Chen, J. Application of Dielectric Barrier Discharge Plasma for Degradation and Pathways of Dimethoate in Aqueous Solution. *Separation and Purification Technology*. 2013; 120: 191-7.

[4] Xu, Y., Tian, Y., Ma, R., Liu, Q. and Zhang, J. Effect of Plasma Activated Water on the Postharvest Quality of Button Mushrooms, Agaricus Bisporus. *Food Chemistry*. 2016; 197(4): 36-44.
[5] Cheng, M., Zeng, G., Huang, D., Lai, C., Xu, P., Zhang, C. and Liu, Y. Hydroxyl Radicals Based Advanced Oxidation Processes (Aops) for Remediation of Soils Contaminated with Organic Compounds: A Review. *Chemical Engineering Journal*. 2016; 284: 582-98.
[6] Moreau, M., Orange, N. and Feuilloley, M.G.J. Non-Thermal Plasma Technologies: New Tools for Bio-Decontamination. *Biotechnology Advances*. 2008; 26(6): 610-7.
[7] Li, X., Wang, T., Qu, G., Liang, D. and Hu, S. Enhanced Degradation of Azo Dye in Wastewater by Pulsed Discharge Plasma Coupled with Mwcnts-Tio_2/Γ-Al_2O_3 Composite Photocatalyst. *Journal of Environmental Management*. 2016; 172: 186-92.
[8] Kang, J., Li, O.L. and Saito, N. Synthesis of Structure-Controlled Carbon Nano Spheres by Solution Plasma Process. Carbon. 2013; 60: 292-8.
[9] Yamamoto, M., Nishioka, M. and Sadakata, M. Sterilization by H_2O_2 Droplets under Corona Discharge. *Journal of Electrostatics*. 2002; 55(2): 173-87.
[10] Attri, P., Kim, Y.H., Park, D.H., Park, J.H., Hong, Y.J., Uhm, H.S., Kim, K.N., Fridman, A. and Choi, E.H. Generation Mechanism of Hydroxyl Radical Species and Its Lifetime Prediction During the Plasma-Initiated Ultraviolet (UV) Photolysis. *Scientific Reports*. 2015; 5: 9332.
[11] Ma, R., Wang, G., Tian, Y., Wang, K., Zhang, J. and Fang, J. Non-Thermal Plasma-Activated Water Inactivation of Food-Borne Pathogen on Fresh Produce. *Journal of Hazardous Materials*. 2015; 300: 643-651.
[12] Sarangapani, C., Misra, N.N., Milosavljevic, V., Bourke, P., O'Regan, F. and Cullen, P.J. Pesticide Degradation in Water Using Atmospheric Air Cold Plasma. *Journal of Water Process Engineering*. 2016; 9: 225-32.
[13] El-Aragi, G.M. Gliding Arc Discharge (GAD) Experiment. 2009; [Online] Available: https://www.ispc-conference.org/ispcproc/papers/3.pdf
[14] Kim, H.S., Cho, Y.I., Hwang, I.H., Lee, D.H., Cho, D.J., Rabinovich, A. and Fridman, A. Use of Plasma Gliding Arc Discharges on the Inactivation of E. Coli in Water. *Separation and Purification Technology*. 2013; 120: 423-8.
[15] Scholtz, V., Pazlarova, J., Souskova, H., Khun, J. and Julak, J. Nonthermal Plasma - A Tool for Decontamination and Disinfection. *Biotechnology Advances*. 2015; 33(6, Part 2): 1108-1119.
[16] Sun, S.R., Wang, H.X., Mei, D.H., Tu, X. and Bogaerts, A. CO_2 Conversion In A Gliding Arc Plasma: Performance Improvement Based on Chemical Reaction Modeling. *Journal of CO_2 Utilization*. 2017; 17: 220-34.
[17] Fridman, A., Nester, S., Kennedy, L.A., Saveliev, A. and Mutaf-Yardimci, O. Gliding Arc Gas Discharge. *Progress in Energy and Combustion Science*. 1999; 25(2): 211-231.
[18] Jiang, B., Zheng, J., Qiu, S., Wu, M., Zhang, Q., Yan, Z. and Xue, Z. Review on Electrical Discharge Plasma Technology for Wastewater Remediation. *Chemical Engineering Journal*. 2014; 236: 348-368.
[19] El-Zein, E., Talaat, M., El-Aragi, G. and El-Amawy, A. Experimental Model to Study the Characteristics of Gliding Arc Plasma Reactor with Argon/Nitrogen. *Journal of Electrical Engineering*, 2015; 15: 64-67
[20] Kozáková, Z. Electric Discharges in Water Solutions. Brno: Brno University of Technology, 2011.
[21] Lin, Z-R., Zhao, L. and Dong, Y-H. Quantitative Characterization of Hydroxyl Radical Generation in a Goethite-Catalyzed Fenton-Like Reaction. *Chemosphere*. 2015; 141: 7-12.
[22] Keswani, M., Raghavan, S., Govindarajan, R. and Brown, I. Measurement of Hydroxyl Radicals in Wafer Cleaning Solutions Irradiated with Megasonic Waves. *Microelectronic Engineering*. 2014; 118: 61-5.
[23] Hirakawa, T., Yawata, K. and Nosaka, Y. Photocatalytic Reactivity for O_2^- and OH Radical Formation in Anatase and Rutile TiO_2 Suspension as the Effect of H_2O_2 Addition. *Applied Catalysis A: General*. 2007; 325(1): 105-11.

[24] Tesař, V. Microbubble Generation by Fluidics PART I: Development of the Oscillator. Colloquium FLUID DYNAMICS 2012, Institute of Thermomechanics AS CR, v.v.i., Prague, October 24 - 26, 2012.

[25] Parmar, R. and Majumder, S.K. Microbubble Generation and Microbubble-Aided Transport Process Intensification - A State-of-the-Art Report. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 2013; 64: 79-97.

[26] Marui, T. An Introduction to Micro/Nano-Bubbles and their Applications. *SYSTEMICS, CYBERNETICS AND INFORMATICS*, 2013; 11(4): 68-73.

[27] สุทัศน์ ณ อยุธยา, ป., เหลืองไพบูลย์ พ. การออกแบบและวิเคราะห์การทดลองลอง. กรุงเทพฯ: ท้อป, 2551.

[28] Kyzas, G.Z. and Matis, K.A. Electroflotation Process: A Review. *Journal of Molecular Liquids*. 2016; 220: 657-64.

[29] Kanazawa, S. and Furuki, T. Measurement of OH Radicals in Aqueous Solution Produced by Atmospheric-pressure LF Plasma Jet. *International Journal of Plasma Environmental Science and Technology*, 2012; 6(2):166-171.