

ระบบพลาสมาไอโซไนเซชันและการประยุกต์ใช้สำหรับยืดอายุการเก็บรักษา

อาหารทะเลจากพื้นที่อ่าวปากนคร จ.นครศรีธรรมราช

พิชญ์ศักดิ์ จันทร์กุล¹, ชัยภรณ์ แก้วอ่อน¹, ลัญจกร จันทร์อุดม²

¹ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

² สาขาวิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างระบบพลาสมาไอโซไนเซชันและศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อผลผลิตไอโซน สำหรับประยุกต์ใช้ยืดอายุการเก็บรักษาอาหารทะเลจากพื้นที่อ่าวปากนคร จังหวัดนครศรีธรรมราช แหล่งจ่ายไฟฟ้าของระบบใช้คอลย์จตุระเปิดจะได้ความต่างศักย์ 6-16 กิโลโวลต์ ความถี่ 2 กิโลเฮิร์ต และหลอดไอโซไนเซชันของระบบประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าทรงกระบอกซ้อนกัน และใช้แก๊วไนโตรเจนเป็นสารไดอิเล็กตริก ที่ความต่างศักย์ 6-8 กิโลโวลต์ อัตราการไหลของก๊าซ 2 ลิตร/นาที ให้ความเข้มข้นของไอโซน 19-87 มิลลิกรัม/ลิตร นำมาประยุกต์ใช้กับ ปูทะเล หอยแมลงภู่ และ ปลาตุ๊กทะเล โดยแช่น้ำไอโซนสามารถลดปริมาณเชื้อ *E. coli* จากเริ่มต้น 6 log CFU/g ได้ 1-5 log CFU/g ที่ 6-8 กิโลโวลต์ ในเวลาสัมผัส 10-120 วินาที ($p \leq 0.05$) โดยความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการลดของเชื้อ *E. coli* (Y) กับความต่างศักย์ (X_1) และเวลาสัมผัส (X_2) ในรูปสมการถดถอยเชิงเส้นของแต่ละตัวอย่างเป็น $Y = 0.262X_1 + 0.959X_2$ ($R^2 = 0.988$), $Y = 0.273X_1 + 0.946X_2$ ($R^2 = 0.985$) และ $Y = 0.703X_1 + 0.679X_2$ ($R^2 = 0.977$) ตามลำดับ ผลจากการใช้ไอโซน ทั้ง 3 ชนิด มีอายุการเก็บรักษา 10 วัน ขณะที่ชุดควบคุม 4 วัน และผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้านสี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ในทุกตัวอย่างค่าเฉลี่ยคะแนนที่ได้ของชุดที่ใช้ไอโซนกับชุดควบคุมของแต่ละวันของการเก็บรักษา มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

คำสำคัญ : ระบบพลาสมาไอโซไนเซชัน, อาหารทะเล, การยืดอายุการเก็บรักษา

Plasma Ozonizer System and Its Application on Extending the Shelf Life of Seafood from Pak Nakhon Bay,

Nakhon Si Thammarat

Pitchasak Chankuson¹, Chaiyaporn Kaewon¹, Lanchakon Chanudom²

¹Department of Physics, Faculty of Science and Technology Nakhon Si Thammarat Rajabhat University

²Department of Microbiology, Faculty of Science and Technology

Nakhon Si Thammarat Rajabhat University

Abstract

This research aims to develop plasma ozonizer system and investigate factors which affected the ozone output for application on extending the shelf life of seafood obtained from Pak Nakhon area. The system was composed of high-frequency high-voltage power supply and ozonizer tubes. The power supply of system using ignition coil. The high voltage output was 6-16 kV and high frequency was 2 kHz. Plasma ozonizer was a cylinder-cylinder electrode consist of two electrodes. Outer and inner electrode was made of stainless steel, which inner electrode was covered with pyrex glass as dielectric. Discharge gap between electrode was fixed at 7.5 mm. Ozone concentration generated by this ozonizer in ranges of 19-87 mg/l at 6-8 kV and optimum purified oxygen feed rate of 2 l/min. In applying for *Scylla serrata*, *Perna viridis* and *Plotosus lineatus*. The efficiency of ozone water to reduce *E. coli* artificially contaminated on seafood was studied. The initial number of *E. coli* was 6 log CFU/g after treated with ozone water at 6-8 kV and discharge time 10-120 second the reduction of *E. coli* were reduced 1-5 log CFU/g ($p \leq 0.05$). The relationships between the reduction of *E. coli* (Y) with voltages (X_1) and discharged times (X_2) in each sample showed that $Y = 0.262X_1 + 0.959X_2$ ($R^2 = 0.988$), $Y = 0.273X_1 + 0.946X_2$ ($R^2 = 0.985$) and $Y = 0.703X_1 + 0.679X_2$ ($R^2 = 0.977$), respectively. The regression equations could be used to predict discharge time and the effectiveness of ozone water on the reduction of the target organisms. The samples were treated with ozone water the results showed shelf life of three types was extended to at least 10 days, while shelf life of control was 4 days. Sensory qualities of ozonated water samples was better than control sample ($p \leq 0.05$).

Keywords : plasma ozonizer system, seafood, shelf life

บทนำ

พื้นที่ส่วนใหญ่ของเทศบาล ต.ปากนคร เป็นพื้นที่ราบลุ่มและป่าชายเลนติดกับทะเลอ่าวไทย ประชาชนส่วนใหญ่มีอาชีพการทำประมงชายฝั่ง เทศบาล ต.ปากนคร จึงมีนโยบายการพัฒนาการประมง แบบยั่งยืนอย่างครบวงจร รวมทั้งการศึกษาวิจัย และเพิ่มความรู้ให้แก่เกษตรกร ส่งเสริมให้เป็นแหล่งขายทั้งอาหารทะเลสดและแปรรูป ตามแผนยุทธศาสตร์การพัฒนาเทศบาล ต.ปากนคร พ.ศ. 2554-2559 (Paknakhon Subdistrict Municipality, 2010) การแปรรูปโดยทั่วไปใช้การแช่แข็ง โดยเก็บและขนส่งที่อุณหภูมิต่ำกว่า - 18 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นระดับที่จุลินทรีย์ไม่สามารถดำเนินปฏิกิริยาทางชีวเคมีได้ ทำให้อาหารยังคงรักษาสภาพไว้ได้ รวมถึงในขั้นตอนการเตรียม ที่มีการล้างโดยน้ำที่เติมคลอรีนที่สามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรีย แต่การใช้คลอรีนซึ่งมีคุณสมบัติในการกัดกร่อน ระคายเคืองผิว และอาจเป็นสารก่อมะเร็ง โดยเมื่อนำผลิตภัณฑ์อาหารทะเลแช่แข็งมาเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส จะเก็บได้ 1-3 วัน งานวิจัยนี้ได้นำโอโซนซึ่งเป็นที่ยอมรับในการทำลายเชื้อจุลินทรีย์อย่างมีประสิทธิภาพทั้งกลุ่มแบคทีเรียแกรมบวก และแกรมลบ (Shreya et al., 2015) สปอร์ของแบคทีเรียเชื้อรา ไวรัส และโพรโตซัว (Goncalves, 2009) และไม่มีสารเคมีตกค้าง เนื่องจากโอโซนสามารถสลายตัวเป็นออกซิเจนได้ โดยสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยาของสหรัฐอเมริกา (US-FDA) ให้โอโซนเป็นสารที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารได้ (GRAS; Generally Recognized As Safe) (Tzortzakis et al., 2007) และได้รับการอนุญาตให้ใช้ฆ่าเชื้อในอาหาร (Karaca et al., 2014) โดยในการผลิตโอโซนใช้หลักการของไดอิเล็กทริกแบร์เรียร์ดิสชาร์จ (Dielectric barrier discharge, DBD) ซึ่งเป็นดิสชาร์จที่สามารถเกิดที่ระดับความดันบรรยากาศหรือสูงกว่า จึงเป็นที่นิยมใน

การประยุกต์ใช้และมีประสิทธิภาพมากที่สุดในการผลิตโอโซน (Pekarek, 2012) โดยจะประกอบด้วยหน่วยต่าง ๆ คือ แหล่งจ่ายพลังงาน หลอดผลิตโอโซน และส่วนการเตรียมอากาศ เรียกรวมกันว่าระบบพลาสมาโอโซนในเซอร์ ในส่วนของแหล่งจ่ายพลังงาน เพื่อให้ได้ความต่างศักย์ไฟฟ้าระดับกิโลโวลต์ จึงมีการนำหม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้า (Variac) (Hamid et al., 2014; Kamel et al., 2016) คอิลจุดระเบิด (Ignition Coil) (Manu et al., 2014) หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ให้ความถี่สูง เช่น IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) (Boonduang et al., 2012), MOSFET (Nacera et al., 2016) เป็นต้น มาใช้ร่วมกับหม้อแปลง ส่วนหลอดผลิตโอโซนจะมีทั้งแบบแผ่นคู่ขนาน (Dingkun et al., 2016) แบบทรงกระบอกซ้อนกัน (Boonduang et al., 2012; Manu et al., 2014; Kamel et al., 2016; Nacera et al., 2016) และส่วนสุดท้ายคือ ส่วนของการเตรียมอากาศโดยทั่วไปใช้ก๊าซออกซิเจนจากถังออกซิเจน

ในงานวิจัยนี้ แหล่งจ่ายพลังงานจะใช้คอิลจุดระเบิด ทำหน้าที่สร้างไฟฟ้าแรงสูง เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่สามารถซื้อหาได้ง่าย ส่วนหลอดผลิตโอโซนใช้แบบท่อทรงกระบอกซ้อนกัน เพราะให้ประสิทธิภาพในการผลิตโอโซนมากที่สุด (Nemmich et al., 2015) โดยระบบดังกล่าวนี้จะมีราคาไม่สูงเมื่อเทียบกับเครื่องผลิตโอโซนสำเร็จรูป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

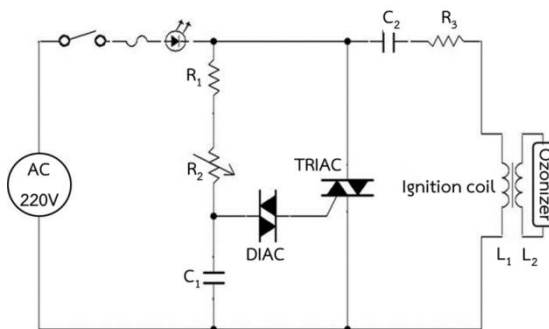
1. สร้างระบบพลาสมาโอโซนในเซอร์และศึกษาผลของโอโซนต่อการกำหนดค่า
2. นำระบบพลาสมาโอโซนในเซอร์เพื่อใช้ยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารทะเลที่ได้จากพื้นที่อ่าวปากนคร จังหวัดนครศรีธรรมราช

วิธีการวิจัย

1. การสร้างระบบพลาสมาไอโซไนเซออร์และศึกษาผลของไอโซนต่อการกำหนดค่า

1.1 สร้างแหล่งจ่ายพลังงานและขั้วอิเล็กโตรดสำหรับระบบพลาสมาไอโซไนเซออร์

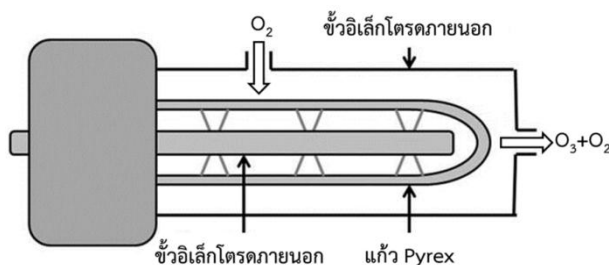
วงจรแหล่งจ่ายพลังงานของระบบแสดงดังภาพที่ 1 โดยใช้การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จากคอยล์จตุระเปิด



ภาพที่ 1 วงจรแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าของระบบ

ในส่วนเซลล์พลาสมาไอโซไนเซออร์หรือหลอดผลิตไอโซน แสดงดังภาพที่ 2 ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าชนิดทรงกระบอก 2 ขั้ว คือ ขั้วไฟฟ้าภายนอกและขั้วไฟฟ้าภายใน ขั้วทั้งสองทำจาก

เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) โดยที่ขั้วไฟฟ้าภายในมีแก้ว pyrex ทำหน้าที่เป็นสารไดอิเล็กตริก และมีขนาดช่องดิสชาร์จขนาด 7.5 มิลลิเมตร



ภาพที่ 2 หลอดผลิตไอโซนของระบบ

1.2 ศึกษาความเข้มข้นของน้ำไอโซนที่ได้จากการพ่นไอโซนลงไปใต้น้ำกลั่น โดยวิธีมาตรฐานโพแทสเซียมไอโอไดด์ (AOAC, 1995)

1.3 ศึกษาความเข้มข้นของน้ำไอโซนที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1, 2, 3 และ 4 ลิตรต่อนาที ที่ความต่างศักย์ 6, 7 และ 8 กิโลโวลต์

1.4 ศึกษาความเข้มข้นของน้ำไอโซนที่ความต่างศักย์ 6, 7 และ 8 กิโลโวลต์ โดยใช้อัตรา

การไหลของออกซิเจนที่ให้ความเข้มข้นของไอโซนมากที่สุดจากข้อ 1.3 ที่เวลา 1, 2, 3 และ 4 นาที

1.5 ศึกษาการใช้พลังงานของระบบเนื่องจากหลอดผลิตไอโซนเป็นแบบท่อทรงกระบอกซ้อนกัน ซึ่งมีองค์ประกอบที่สัมพันธ์กับลักษณะของตัวเก็บประจุ สามารถหาค่าความจุไฟฟ้าจากสมการ

$$C = \frac{2\pi L \epsilon_0}{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)} \quad (1)$$

และการใช้พลังงานทั้งหมดในการผลิตไอโซนที่ความต่างศักย์ต่าง ๆ ได้ จากสมการ

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (2)$$

2. การศึกษาประสิทธิภาพการลดเชื้อ *E. coli* ที่ปนเปื้อนบนอาหารทะเลด้วยน้ำไอโซน

2.1 การเตรียมตัวอย่าง

นำตัวอย่างอาหารทะเลทั้งตัวที่มีน้ำหนักเท่า ๆ กันของแต่ละตัวอย่างมาล้างด้วยน้ำกลั่น ตั้งไว้ให้สะเด็ดน้ำที่อุณหภูมิห้อง (30 ± 1 องศาเซลเซียส)

2.2 การสร้างการปนเปื้อน

สร้างการปนเปื้อนโดยนำกล้าเชื้อ *E. coli* หยดบนตัวอย่าง เกลี่ยให้ทั่วตัวอย่างวางในตู้ปลอดเชื้อนาน 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง (30 ± 1 องศาเซลเซียส) จากนั้นนำมาล้างเชื้อที่ไม่ยึดเกาะกับตัวอย่างด้วยน้ำปราศจากไอออน ตั้งไว้ 5 นาที จึงนำมาทดสอบจำนวนเชื้อเริ่มต้น

2.3 การทดสอบประสิทธิภาพของน้ำไอโซน

นำตัวอย่างอาหารทะเลที่มีปริมาณเชื้อเริ่มต้นประมาณ $6 \log \text{CFU/g}$ มาผ่านน้ำไอโซนที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 6, 7 และ 8 กิโลโวลต์ และเวลาที่สัมผัสนาน 10, 30, 60 และ 120 วินาที ที่อุณหภูมิห้อง (30 ± 1 องศาเซลเซียส) โดยให้ปริมาณตัวอย่างต่อสารละลาย 1:10 (g/ml) นำมาตรวจสอบจำนวนเชื้อที่เหลือรอดทันที วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการลดเชื้อ *E. coli* กับความต่างศักย์ไฟฟ้าและเวลาสัมผัสไอโซนโดยการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (multiple regression analysis)

3. ศึกษาอายุการเก็บรักษา

3.1 การเก็บตัวอย่าง

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกตัวอย่างอาหารทะเลของพื้นที่ ต.ปากนคร จ.นครศรีธรรมราช

โดยเลือกจากความโดดเด่นในด้านของปริมาณที่มีในพื้นที่และปริมาณที่มีการส่งออกจำหน่ายมาก จำนวน 3 ชนิด ได้แก่ ปูทะเล (*Scylla serrate*), หอยแมลงภู่ (*Perna viridis*) และปลาตุกทะเล (*Plotosus lineatus*) เก็บตัวอย่างจากชาวบ้านที่ออกเรือไปในแต่ละครั้ง ชนิดละ 3 ตัวอย่าง เก็บรักษาในน้ำแข็งควบคุมอุณหภูมิไม่ให้เกิน 4 ± 1 องศาเซลเซียส โดยระยะเวลาตั้งแต่เก็บตัวอย่างจนถึงการตรวจไม่เกิน 3 ชั่วโมง

3.2 แบ่งตัวอย่างอาหารทะเลมา 2 ชุด

โดยชุดแรกนำตัวอย่างไปแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 4 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นชุดควบคุม ชุดที่สองนำไปแช่ในน้ำไอโซนโดยใช้เงื่อนไขความต่างศักย์ 6 กิโลโวลต์ อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 2 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที

3.3 บรรจุอาหารทะเลในถุงพลาสติก

Polyethylene (PE) ปรับสภาวะบรรยากาศภายในถุง โดยใช้เครื่องบรรจุภัณฑ์แบบสุญญากาศ เก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 4 ± 1 องศาเซลเซียส

3.4 ประเมินลักษณะปรากฏที่เปลี่ยนแปลงตลอดอายุการเก็บรักษาทั้งทางเคมี ได้แก่ ค่าความเป็นกรดต่าง (AOAC, 2000) และทางจุลชีววิทยา ได้แก่ จำนวนแบคทีเรียทั้งหมดด้วยวิธี USFDA-BAM Online (2001, Chapter 3) โดยถ้าปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดเกินมาตรฐานและหรือลักษณะปรากฏไม่เป็นที่ยอมรับถือว่าสิ้นสุดอายุการเก็บรักษา นำข้อมูลมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์และเปรียบเทียบความแตกต่างโดยวิเคราะห์ทุก 2 วัน ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

3.5 ประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส ในการชิมใช้ผู้ทดสอบระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งได้รับการฝึกฝนจำนวน 10 คน โดยใช้ผู้ชิมชุดเดียวกันตลอดการทดลอง โดยนำตัวอย่างอาหารทะเลในสภาวะต่าง ๆ ประมาณ 200 กรัม นึ่งด้วยไอน้ำนาน 5 นาทีและนำไปให้ผู้ทดสอบ

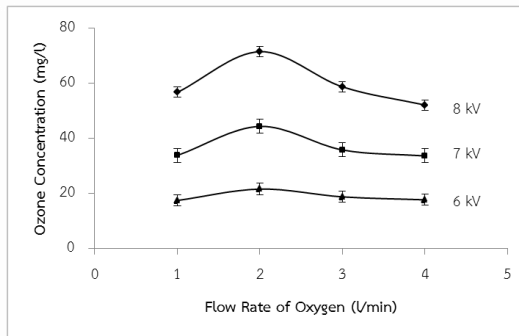
ชิมทันที (คนละประมาณ 20 กรัม) ผู้ทดสอบประเมินคุณภาพทางด้านกลิ่น สี เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ให้คะแนนแบบ 9-point hedonic scale กำหนดให้คะแนนต่ำกว่า 5 เป็นคะแนนที่ผู้บริโภคไม่ยอมรับ โดยใช้การทดลองแบบ RCBD (Randomized Complete Block Design) คะแนนที่ได้จากการประเมินนำไปหาค่าเฉลี่ย วิเคราะห์ความแปรปรวนและเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

โดยโปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลการวิจัย

1. การสร้างระบบพลาสมาโอโซนไฮเซอร์ และศึกษาผลของโอโซนต่อการกำหนดค่า

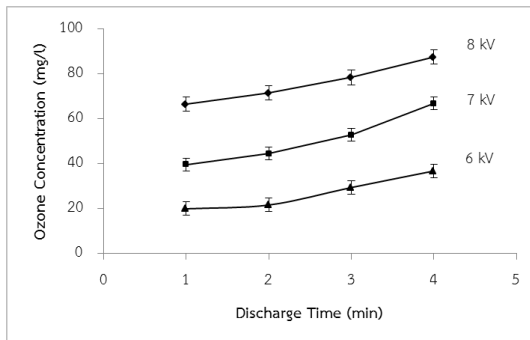
แหล่งจ่ายพลังงานจะให้ความต่างศักย์ 6-16 กิโลโวลต์ และความถี่ 2 กิโลเฮิร์ต โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ความต่างศักย์ 6, 7 และ 8 กิโลโวลต์ เริ่มจากที่ 6 กิโลโวลต์ ซึ่งเป็นระดับต่ำสุดที่แหล่งจ่ายให้ได้



ภาพที่ 3 ความเข้มข้นของโอโซนที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1, 2, 3 และ 4 ลิตรต่อนาที ที่ความต่างศักย์ 6, 7 และ 8 กิโลโวลต์

จากภาพที่ 3 เมื่ออัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเป็น 1, 2, 3 และ 4 ลิตรต่อนาที ที่ความต่างศักย์ 6 กิโลโวลต์ มีความเข้มข้นเป็น 17.44, 21.56, 18.75 และ 17.55 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่ความต่างศักย์ 7 กิโลโวลต์ มีความเข้มข้นเป็น 33.78, 44.34, 35.58 และ 33.47 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และที่ความต่างศักย์ 8 กิโลโวลต์ มีความเข้มข้นเป็น 56.67, 71.57, 58.51 และ

52.14 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ นั่นคือ ที่ความต่างศักย์เดียวกัน เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซถึงค่าหนึ่ง จะให้ค่าความเข้มข้นที่มากที่สุด จากนั้นความเข้มข้นจะลดลงตามอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับ Lakshminarayanan et al. (2012) และ Boonduang et al. (2012) ดังนั้น อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนที่เหมาะสม ที่นำมาใช้กำหนดในงานวิจัยนี้ คือ 2 ลิตรต่อนาที



ภาพที่ 4 ความเข้มข้นของโอโซนที่ความต่างศักย์ 6, 7 และ 8 กิโลโวลต์ อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 2 ลิตรต่อนาที ที่เวลาดีสชาร์จ 1, 2, 3 และ 4 นาที

จากภาพที่ 4 เมื่อเวลาดีสชาร์จ 1, 2, 3 และ 4 นาที ที่ความต่างศักย์ 6 กิโลโวลต์ มีความเข้มข้นเป็น 19.47, 21.64, 29.44 และ 36.82 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่ความต่างศักย์ 7 กิโลโวลต์ มีความเข้มข้นเป็น 39.52, 44.43, 52.84 และ 66.74 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และที่ความต่างศักย์ 8 กิโลโวลต์ มีความเข้มข้นเป็น 66.54, 71.48, 78.78 และ 87.43 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ นั่นคือ ที่เวลาหนึ่ง การเพิ่มความต่างศักย์ เป็นการเพิ่มความเข้มของสนามไฟฟ้า ซึ่งเป็นการเพิ่มพลังงานให้แก่อิเล็กตรอน โอกาสการชนกันของโมเลกุลออกซิเจนภายในช่องว่างระหว่างขั้วอิเล็กโตรดจะมีมากขึ้น และเป็น การเพิ่มขึ้นเวลาในการทำให้ก๊าซออกซิเจนแตกตัว แล้วรวมกันเป็นโอโซนมีมากขึ้น (Hamid et al., 2014)

หลอดผลิตโอโซนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ สามารถหาค่าความจุไฟฟ้าได้ตามสมการ (1) โดย มีค่าความยาวของขั้วอิเล็กโตรด (L) = 0.15 m,

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในสุญญากาศ (ϵ) = 8.854×10^{-12} F/m, ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์แก้ว pyrex (ϵ_0) = 5, รัศมีภายนอกของขั้วอิเล็กโตรด (r_e) = 16.5×10^{-3} m และรัศมีภายในของขั้วอิเล็กโตรด (r_i) = 4×10^{-3} m จะได้ค่าความจุไฟฟ้าของหลอดผลิตโอโซนเท่ากับ 29.43 พิโคฟารัด เมื่อนำมาหาพลังงานที่ใช้ตามสมการ (2) โดยที่ค่าความต่างศักย์ 6, 7 และ 8 กิโลโวลต์ จะใช้พลังงาน 529.74, 721.04 และ 941.76 ไมโครจูล ตามลำดับ โดยความต่างศักย์ที่สูงขึ้น จะมีการใช้พลังงานมากขึ้น ทำให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการผลิตโอโซน (Boonduang et al., 2012) และทำให้เกิดความเสียหายต่อขั้วอิเล็กโตรด อายุการใช้งานของหลอดผลิตโอโซนจะสั้นลง

2. การศึกษาประสิทธิภาพการลดเชื้อ *E. coli* ที่ปนเปื้อนบนอาหารทะเลด้วยน้ำโอโซน

ตารางที่ 1 การลดของปริมาณเชื้อ *E. coli* ในปุ๋ยมะเลที่ความต่างศักย์ 6, 7 และ 8 กิโลโวลต์ กับเวลาที่สัมผัส 10, 30, 60 และ 120 วินาที

ความต่างศักย์ (kV)	Log Reduction (log CFU/g)			
	10 s	30 s	60 s	120 s
6	1.36 ^a ±0.13	1.68 ^a ±0.11	2.35 ^a ±0.22	3.36 ^a ±0.12
7	1.74 ^b ±0.21	1.95 ^b ±0.15	2.62 ^b ±0.13	3.75 ^b ±0.24
8	1.97 ^c ±0.12	2.04 ^c ±0.14	2.88 ^c ±0.16	3.94 ^c ±0.27

^{a,b,c} หมายถึง ตัวเลขที่มีอักษรเหมือนกันในแนวนอนเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 2 การลดของปริมาณเชื้อ *E. coli* ในหอยแมลงภู่ที่ความต่างศักย์ 6, 7 และ 8 กิโลโวลต์ กับเวลาที่สัมผัส 10, 30, 60 และ 120 วินาที

ความต่างศักย์ (kV)	Log Reduction (log CFU/g)			
	10 s	30 s	60 s	120 s
6	1.77 ^a ±0.16	2.26 ^a ±0.21	2.95 ^a ±0.18	3.94 ^a ±0.15
7	2.06 ^b ±0.14	2.48 ^b ±0.17	3.22 ^b ±0.22	4.33 ^b ±0.18
8	2.40 ^c ±0.23	2.87 ^c ±0.15	3.68 ^c ±0.21	4.62 ^c ±0.25

^{a,b,c} หมายถึง ตัวเลขที่มีอักษรเหมือนกันในแนวนอนเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 3 การลดของปริมาณเชื้อ *E. coli* ในปลาดุกทะเลที่ความต่างศักย์ 6, 7 และ 8 กิโลโวลต์ กับเวลาที่สัมผัส 10, 30, 60 และ 120 วินาที

ความต่างศักย์ (kV)	Log Reduction (log CFU/g)			
	10 s	30 s	60 s	120 s
6	1.86 ^a ±0.14	2.27 ^a ±0.18	2.95 ^a ±0.26	3.87 ^a ±0.11
7	2.24 ^b ±0.23	2.77 ^b ±0.24	3.48 ^b ±0.21	4.52 ^b ±0.22
8	3.88 ^c ±0.26	4.26 ^c ±0.28	4.97 ^c ±0.13	5.03 ^c ±0.32

^{a,b,c} หมายถึง ตัวเลขที่มีอักษรเหมือนกันในแนวนอนเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

จากตารางที่ 1, 2 และ 3 การลดของปริมาณเชื้อ *E. coli* จะเพิ่มขึ้นเมื่อความต่างศักย์ และ เวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยความสัมพันธ์ระหว่างการลดของปริมาณเชื้อ *E. coli* (Y) กับความต่างศักย์ (X_1) และเวลาสัมผัส (X_2) ของปุ๋ยมะเล หอยแมลงภู่ และปลาดุกทะเล

แสดงความสัมพันธ์ในรูปสมการถดถอยเชิงเส้นได้ตามลำดับ ดังนี้

$$Y = 0.262X_1 + 0.959X_2 \quad ; R^2 = 0.988 \quad (3)$$

$$Y = 0.273X_1 + 0.946X_2 \quad ; R^2 = 0.985 \quad (4)$$

$$Y = 0.703X_1 + 0.679X_2 \quad ; R^2 = 0.977 \quad (5)$$

จากสมการ (3), (4) และ (5) นำมาหาเวลาในการสัมผัสไอโซนสำหรับงานวิจัยนี้ โดยเมื่อวัดปริมาณเชื้อ *E. coli* ของตัวอย่างอาหารทะเลเมื่อเริ่มต้นประมาณ 5-6 log CFU/g ดังนั้นหากจะให้ได้ค่าระดับของเชื้อไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานคือ มีปริมาณเชื้อ *E. coli* น้อยกว่า 2 log CFU/g (Department of Medical Sciences, 2007) นั่นคือ ค่าการลดของปริมาณเชื้อ *E. coli* (Y) เป็น 3-4 log CFU/g ความต่างศักย์ (X_1) เป็น 6 กิโลโวลต์ จะได้ค่าเวลาสัมผัส (X_2) เป็น 2 นาที ซึ่งจะนำมาใช้กำหนดในงานวิจัยนี้ ต่อไป

เวลาในการสัมผัสไอโซนที่เพิ่มขึ้น การทำลายเชื้อก็ทำได้มากขึ้น เนื่องจากเป็นให้ไอโซนสัมผัส

กับเชื้อนานขึ้น สอดคล้องกับ Singh et al. (2002) ที่ได้รายงานผลของไอโซนต่อการลด *E. coli* และ Seabneung et al. (2007) ที่พบการทำลายเชื้อแกรมลบ *Salmonella* spp. และแกรมบวก *Listeria* sp. จะเพิ่มขึ้นตามเวลาในการสัมผัสที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน

3. ศึกษาอายุการเก็บรักษา

จากตารางที่ 4 สำหรับชุดควบคุม ทั้ง 3 ชนิด สามารถเก็บรักษาได้ 4 วัน โดยไม่ผ่านเกณฑ์ เนื่องจากมีกลิ่นเน่าและค่าปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดเกินเกณฑ์มาตรฐาน

ตารางที่ 4 ลักษณะปรากฏด้านต่างๆ ของตัวอย่างอาหารทะเลชุดควบคุม

ชนิดตัวอย่าง	ระยะเวลาการเก็บ (วัน)	pH	Total bacteria (CFU/g)	กลิ่น	สี
ปูทะเล <i>Scylla serrata</i>	0	9.18	$6.67 \pm 0.45 \times 10^5$	ปกติ	ปกติ
	2	8.67	$7.27 \pm 0.74 \times 10^5$	ปกติ	ปกติ
	4	7.82	$9.51 \pm 0.52 \times 10^5$	ปกติ	ปกติ
	6	7.63	$9.35 \pm 0.86 \times 10^6$	มีกลิ่นเน่า	ปกติ
หอยแมลงภู่ <i>Perna viridis</i>	0	7.97	$5.87 \pm 0.21 \times 10^5$	ปกติ	ปกติ
	2	7.66	$7.83 \pm 0.82 \times 10^5$	ปกติ	ปกติ
	4	7.41	$8.74 \pm 0.56 \times 10^5$	ปกติ	ปกติ
	6	6.57	$2.64 \pm 0.74 \times 10^6$	มีกลิ่นเน่า	ปกติ
ปลาตุ๊กทะเล <i>Plotosus lineatus</i>	0	7.75	$8.85 \pm 0.57 \times 10^4$	ปกติ	ปกติ
	2	7.58	$4.96 \pm 0.32 \times 10^5$	ปกติ	ปกติ
	4	6.33	$7.63 \pm 0.35 \times 10^5$	ปกติ	ปกติ
	6	5.95	$1.17 \pm 0.48 \times 10^6$	มีกลิ่นเน่า	ปกติ

ตารางที่ 5 ลักษณะปรากฏด้านต่างๆ ของตัวอย่างอาหารทะเลชุดที่ผ่านน้ำไอโซน

ชนิดตัวอย่าง	ระยะเวลา การเก็บ (วัน)	pH	Total bacteria (CFU/g)	กลิ่น	สี
ปูทะเล <i>Scylla serrata</i>	0	9.38	$3.35 \pm 0.68 \times 10^4$	ปกติ	ปกติ
	2	8.95	$8.63 \pm 0.26 \times 10^4$	ปกติ	ปกติ
	4	8.65	$5.62 \pm 0.71 \times 10^5$	ปกติ	ปกติ
	6	8.57	$7.76 \pm 0.33 \times 10^5$	ปกติ	ปกติ
	8	8.36	$8.74 \pm 0.32 \times 10^5$	ปกติ	ปกติ
	10	7.64	$8.96 \pm 0.67 \times 10^5$	ปกติ	ปกติ
	12	7.38	$4.61 \pm 0.72 \times 10^6$	มีกลิ่นเน่า	ซีด
หอยแมลงภู่ <i>Perna viridis</i>	0	8.06	$6.75 \pm 0.22 \times 10^4$	ปกติ	ปกติ
	2	7.77	$6.86 \pm 0.55 \times 10^4$	ปกติ	ปกติ
	4	7.68	$8.84 \pm 0.34 \times 10^4$	ปกติ	ปกติ
	6	7.46	$4.06 \pm 0.43 \times 10^5$	ปกติ	ปกติ
	8	7.22	$5.43 \pm 0.62 \times 10^5$	ปกติ	ปกติ
	10	6.79	$8.55 \pm 0.46 \times 10^5$	ปกติ	ปกติ
	12	6.45	$6.22 \pm 0.28 \times 10^6$	ปกติ	ซีด
ปลาดุกทะเล <i>Plotosus lineatus</i>	0	7.87	$7.65 \pm 0.53 \times 10^4$	ปกติ	ปกติ
	2	7.48	$8.23 \pm 0.44 \times 10^4$	ปกติ	ปกติ
	4	7.27	$3.34 \pm 0.15 \times 10^5$	ปกติ	ปกติ
	6	7.02	$5.52 \pm 0.24 \times 10^5$	ปกติ	ปกติ
	8	6.94	$8.86 \pm 0.26 \times 10^5$	ปกติ	ปกติ
	10	6.18	$9.41 \pm 0.13 \times 10^5$	ปกติ	ปกติ
	12	5.88	$8.63 \pm 0.42 \times 10^6$	ปกติ	ซีด

จากตารางที่ 5 สำหรับชุดที่ผ่านน้ำไอโซน ทั้ง 3 ชนิด สามารถเก็บรักษาได้ 10 วัน โดยปูทะเล ไม่ผ่านเกณฑ์เนื่องจากมีกลิ่นเน่า สีซีด หอยแมลงภู่ มีกลิ่นปกติ แต่ไม่ผ่านเกณฑ์เนื่องจากมีสีซีด และ ปลาดุกทะเล มีกลิ่นปกติ แต่มีสีซีด และทั้ง 3 ชนิด มีค่าปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดเกินเกณฑ์มาตรฐานทั้ง 3 ชนิด

ในส่วนของค่า pH ของตัวอย่างอาหารทะเลทั้ง 3 ชนิด มีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาของเก็บ

รักษาเพิ่มขึ้น ($p \leq 0.05$) โดยการเปลี่ยนแปลงของค่า pH เกิดจากแบคทีเรียกลุ่ม aerobic และ facultative aerobic สร้างเอนไซม์มาย่อยโปรตีนในกล้ามเนื้อให้เป็นกรดอะมิโนออกมา สอดคล้องกับรายงานของ Nathapol et al (2007) ที่พบการลดลงของค่า pH ตามระยะเวลาของการเก็บรักษาในตัวอย่างของปูทะเลนี้

ตารางที่ 6 ค่าเฉลี่ยคะแนนทางประสาทสัมผัสของตัวอย่างอาหารทะเลชุดควบคุม

ชนิดตัวอย่าง	ระยะเวลาการเก็บ (วัน)	กลิ่น	สี	เนื้อสัมผัส	ความชอบโดยรวม
ปูทะเล <i>Scylla serrata</i>	0	9.86 ^a ±0.32	9.94 ^a ±0.55	9.83 ^a ±0.67	9.85 ^a ±0.37
	2	6.28 ^b ±0.57	6.85 ^b ±1.28	5.84 ^b ±0.64	6.33 ^b ±0.46
	4	5.75 ^c ±0.75	5.84 ^c ±0.33	5.86 ^c ±0.42	5.82 ^c ±0.51
หอยแมลงภู่ <i>Perna viridis</i>	0	9.55 ^a ±0.58	9.63 ^a ±0.42	9.46 ^a ±0.73	9.05 ^a ±0.56
	2	6.85 ^b ±0.33	6.52 ^b ±0.47	7.32 ^b ±0.64	7.46 ^b ±1.21
	4	5.83 ^c ±0.62	5.77 ^c ±1.32	5.69 ^c ±0.46	5.73 ^c ±0.48
ปลาดุกทะเล <i>Plotosus lineatus</i>	0	9.64 ^a ±0.67	9.56 ^a ±0.57	9.52 ^a ±0.42	9.65 ^a ±0.73
	2	6.34 ^b ±0.46	6.85 ^b ±1.33	6.78 ^b ±0.51	6.44 ^b ±0.37
	4	5.82 ^c ±0.77	5.78 ^c ±0.64	5.62 ^c ±0.41	5.86 ^c ±0.45

^{a-c} หมายถึง ตัวเลขที่มีอักษรเหมือนกันในแนวตั้งเดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

ตารางที่ 7 ค่าเฉลี่ยคะแนนทางประสาทสัมผัสของตัวอย่างอาหารทะเลชุดที่ผ่านน้ำไอโซน

ชนิดตัวอย่าง	ระยะเวลาการเก็บ (วัน)	กลิ่น	สี	เนื้อสัมผัส	ความชอบโดยรวม
ปูทะเล <i>Scylla serrata</i>	0	9.76 ^a ±0.81	9.85 ^a ±0.78	9.82 ^a ±0.57	9.87 ^a ±0.68
	2	9.52 ^b ±0.56	9.78 ^b ±0.63	9.77 ^b ±0.72	9.62 ^b ±0.55
	4	9.27 ^c ±0.75	8.85 ^c ±0.84	8.96 ^c ±0.75	8.73 ^c ±0.72
	6	8.66 ^d ±0.82	7.56 ^d ±0.57	8.23 ^d ±0.64	8.18 ^d ±0.67
	8	8.05 ^e ±0.76	7.14 ^e ±1.12	7.87 ^e ±0.96	7.93 ^e ±0.82
	10	7.63 ^f ±1.16	6.53 ^f ±1.24	7.27 ^f ±0.77	7.54 ^f ±0.93
หอยแมลงภู่ <i>Perna viridis</i>	0	9.35 ^a ±0.72	8.85 ^a ±0.43	9.22 ^a ±0.74	8.95 ^a ±0.89
	2	9.11 ^b ±0.68	8.77 ^b ±0.58	9.05 ^b ±0.53	8.84 ^b ±0.78
	4	8.57 ^c ±0.85	8.62 ^c ±0.66	8.78 ^c ±0.81	8.67 ^c ±1.02
	6	8.35 ^d ±1.25	8.43 ^d ±0.61	8.33 ^d ±1.18	8.36 ^d ±1.17
	8	7.67 ^e ±1.13	7.92 ^e ±1.27	8.16 ^e ±0.82	8.03 ^e ±1.28
	10	7.54 ^f ±0.82	7.86 ^f ±0.96	8.04 ^f ±1.06	7.85 ^f ±0.98
ปลาดุกทะเล <i>Plotosus lineatus</i>	0	9.53 ^a ±0.86	9.21 ^a ±0.68	9.00 ^a ±0.92	9.27 ^a ±0.66
	2	9.24 ^b ±0.57	8.98 ^b ±1.15	8.85 ^b ±0.47	9.07 ^b ±0.83
	4	8.84 ^c ±0.94	8.37 ^c ±0.71	8.67 ^c ±0.75	8.81 ^c ±0.85
	6	8.56 ^d ±0.88	8.06 ^d ±0.59	8.45 ^d ±1.26	8.32 ^d ±1.07
	8	8.11 ^e ±0.79	7.82 ^e ±0.82	8.22 ^e ±0.88	8.02 ^e ±0.76
	10	8.03 ^f ±1.01	7.67 ^f ±0.76	8.04 ^f ±0.86	7.86 ^f ±0.82

^{a-f} หมายถึง ตัวเลขที่มีอักษรเหมือนกันในแนวตั้งเดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

จากตารางที่ 6 และ 7 พบว่า ในแต่ละตัวอย่าง ค่าเฉลี่ยคะแนนที่ได้ของชุดควบคุมที่แช่น้ำกลั่นกับชุดที่สองที่แช่น้ำไอโซนในแต่ละวันของ

การเก็บรักษาหลังจากวันแรกมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) และในตัวอย่างเดียวกัน ค่าเฉลี่ยคะแนนมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมี

นัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) และคะแนนทุกด้าน มีแนวโน้มลดลงจากวันเริ่มต้นของการเก็บรักษา

สำหรับชุดที่สองที่ผ่านน้ำไอโซน เมื่อสิ้นสุดการเก็บรักษา 10 วัน ค่าเฉลี่ยคะแนนทางประสาทสัมผัสด้านต่าง ๆ เป็นดังนี้ ด้านกลิ่น ประมาณ 7-8 หมายถึง กลิ่นอาจจะมีความผิดปกติเล็กน้อย แต่ยังเป็นลักษณะที่ยอมรับได้ ด้านสี ประมาณ 6-7 หมายถึง สีที่มีความชัดในระดับที่ไม่มาก โดยในตัวอย่าง ปูทะเล มีค่าลดลงมากกว่าในตัวอย่าง หอยแมลงภู่ และปลาตุกทะเล ด้านเนื้อสัมผัส ประมาณ 7-8 หมายถึง เนื้อสัมผัสมีความแน่นน้อยกว่าเมื่อเริ่มต้น และด้านความชอบโดยรวม ประมาณ 7 หมายถึง ความชอบโดยรวมในระดับที่ลดลงแต่ยังเป็นลักษณะที่ยอมรับได้

สรุปและอภิปรายผล

1. ระบบพลาสมาไอโซไนเซชันที่ได้ให้ ความต่างศักย์ 6-16 กิโลโวลต์ ความถี่ 2 กิโลเฮิร์ต และอัตราการไหลของก๊าซ 2 ลิตรต่อนาที เป็น อัตราการไหลที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้ เนื่องจาก สำหรับโมเลกุลของออกซิเจนจำนวนหนึ่ง พลังงานที่ให้กับหลอดผลิตไอโซไนเซชันที่ระดับหนึ่ง เพียงพอกับโมเลกุลของออกซิเจนที่มี การเพิ่ม อัตราการไหล เป็นการเพิ่มโมเลกุลของออกซิเจน โมเลกุลบางส่วนจึงไม่เปลี่ยนไปเป็นไอโซน และที่อัตราการไหลสูงๆ โมเลกุลของออกซิเจนจะ ผ่านช่องระหว่างขั้วอิเล็กโตรดไปอย่างรวดเร็ว โมเลกุลของก๊าซบางส่วนจึงไม่เกิดการแตกตัว (Tirawanichakul et al., 2007) และที่อัตราการไหลของก๊าซต่ำ ๆ เวลาที่โมเลกุลของออกซิเจน อยู่ในบริเวณที่เกิดดิสชาร์จนานขึ้น ขณะที่ ปฏิกิริยาการเกิดไอโซไนเซชันยังเกิดอย่างต่อเนื่อง โอกาสการชนกันของโมเลกุลออกซิเจนและ อิเล็กตรอนจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดซ้ำของ พลาสมาที่เกิดระหว่างขั้วอิเล็กโตรด

2. เมื่อนำระบบพลาสมาไอโซไนเซชันมาใช้ ลดปริมาณเชื้อ *E. coli* ในปูทะเล หอยแมลงภู่ และปลาตุกทะเล สามารถลดได้ 1-5 log CFU/g ซึ่งอยู่ในระดับที่ไม่เกินเกณฑ์มาตรฐาน โดยแสดง ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการลดของเชื้อ *E. coli* กับความต่างศักย์และเวลาสัมผัสในรูปแบบ สมการถดถอยเชิงเส้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อ ความต่างศักย์และเวลาเพิ่มขึ้นจะเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของไอโซน ซึ่งเป็นการเพิ่มตัว oxidizing agents ที่เกิดจากการที่ไอโซน ซึ่งเป็น ก๊าซที่ไม่เสถียรจะแตกสลายให้ก๊าซออกซิเจน และออกซิเจนอะตอมเดี่ยว ๆ ซึ่งจะทำหน้าที่เป็น oxidizing agents ที่ทำลายจุลินทรีย์การทำลาย เชื้อจึงทำได้มาก

3. เมื่อนำมาใช้ในการยืดอายุการเก็บ รักษาปูทะเล หอยแมลงภู่ และปลาตุกทะเล จะ สามารถยืดอายุระยะเวลาการเก็บรักษาจาก 4 วัน ได้เป็น 10 วัน โดยยังมีคุณภาพทางประสาท สัมผัสที่ยอมรับได้

ข้อเสนอแนะ

ผลการวิจัยที่ได้เป็นความรู้และเทคโนโลยี ด้านการแปรรูปที่ใช้เป็นแนวทางเบื้องต้นในการศึกษา เพื่อนำไปพัฒนาในระดับของตัวอย่าง ที่มากขึ้น และนำไปสู่ผู้ประกอบการที่สามารถ นำไปใช้ ตามนโยบายหน่วยงานภาครัฐ

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย จากมหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา

References

- AOAC. (1995). **Official Method of Analysis.** (16th ed.). The Association of Official Analytical Chemists, Inc. Arlington, Virginia. USA.
- AOAC. (2000). **Official Method of Analysis AOAC International.** (16th ed.). The Association of Official Analytical Chemists, Inc. Maryland.
- Bacteriological Analytical Manual Online, (2002). **Chapter 4 Enumeration of *Escherichia coli* and the coliform bacteria.** USDA. 10 pp. (<http://www.cfsan.fda.gov>) 8 pp. (<http://www.cfsan.fda.gov>).
- Bacteriological analytical manual Online. (2001). **Chapter 3, Aerobic plate count.** USDA.
- Boonduang, S., Limsuwan, S., Kongsri, W. & Limsuwan, P. (2012). **Effect of oxygen pressure and flow rate on electrical characteristic and ozone concentration of cylinder-cylinder DBD ozone generator.** SciVerse ScienceDirect Procedia Engineering 32. 936-942.
- Department of Medical Sciences. (2007). **The criteria of microbiological quality of food and food containers.** Retrieved September 22, 2015 from <http://dmisc2.dmisc.moph.go.th>.
- Dingkun, Y., Zhihua, W., Can, D., Yong, H., Ronald, W. and Kefa, C. (2016). Ozone production in parallel multichannel dielectric barrier discharge from oxygen and air: the influence of gas pressure. **Journal of Physics D: Applied Physics,** 49(45).
- Goncalves, A.A. (2009). Ozone-An emerging technology foe the seafood industry. **Braz. Arch. Biol. Technol,** 52, 1527-1539.
- Hamid, H. A. and Hadeel, O. I. (2014). Design an ozone generator by using dielectric barrier discharge. **Journal of Al-Nahrain University,** 17(1), 89-94.
- Hamid, H. M. (2014). Effect of applied voltage and flow rates of ozone generator fed by dry air and O₂ on the coaxial wire-cylinder reactor by varying various electrodes parameter. **International Journal of Modern Engineering Research,** 4(9). 56-60.
- Kamel, N., Mostefa, B., Said, N., Nacera, H., Nouredine, Z. and Amar, T. (2016). Comparative experimental study between surface and volume DBD ozone generator. **Ozone: Science & Engineering,** 38(1). 70-76.

- Karaca, H. Velioglu, Y.S. (2014). Effect of ozone treatments on microbial quality and some chemical properties of lettuce, spinach, and parsley. **Postharvest Biol. Technol.**, 88, 46-53.
- Lakshminarayanan, V., Balakrishnan, A. P. & Mahendran, N. (2012). Effect of temperature and flow rates of ozone generator on the DBD by varying various electrical parameter. **American Journal of Applied Science**, 9 (9). 1496-1502.
- Manu, F., Tawee, C., Pollawat, F. and Wasana, F. (2014). **An experimental investigation of the concentration of KCl liquid electrode of atmospheric pressure DBD.** Progress in Electromagnetics Research Symposium Proceeding, Guangzhou, China, Aug. 25-28, 2014. 2727-2014.
- Nacera, H., Mansour, Z., Said, N., Zouaoui, D., Sidi-Mohamed, R., Bouregba, N. and Amar, T. (2016). Development of high-voltage high-frequency power supply for ozone generation. **Journal of Engineering Science and Technology**, 11(5), 755-767.
- Nathapol, P., Tawirat, C., Aiyakarn, T., Kijja, S., Aekarat, K., Wanchai, W. and Jim, P. S. (2007). Shelf-life extension of refrigerated soft shell mud crab (*Scylla serrate* Forskal) by ozone water and storage under air and modified atmosphere packaging. **Kasetsart J. (Nat. Sci.)**, 41, 539-547.
- Nemmich, S., Tilmatine, A., Dey, Z., Hammadi, N., Nassour, K. and Messal, S. (2015). Optimal sizing of a DBD ozone generator using response surface modeling. **Science & Engineering: The Journal of the International Ozone Association**, 37, 3-8.
- Paknakhon Subdistrict Mulnicpality. (2010). **Stratigic development plan 2011-2016.** Retrieved September 22, 2015, from <http://www.paknakhoncity.go.th>.
- Pekarek, S. (2012). Experimental study fo surface dielectric barrier discharge in air and Its ozone production. **Journal of Physics D: Applied Physics**, 45(7), 201-209.
- Seabneung, C., Pravate, T., Kooranee, T. & Aroon, B. (2007). Reduction of *Salmonella spp.* and *Lisreria sp.* on swine carcasses using ozone water jet spray. **Agricultural Sci. J.**, 38(5) (suppl.), 395-398.
- Shreya, W., Jagpreet, K.M., Joseph, R.T., Jeremy, B. & Ian S. (2015). Effect of ozone treatment on inactivation of *Escherichia coli* and *Listeria sp.* on Spinach. **Agriculture**, 5, 155-169.

- Singh, N., Singh, R.K., Bhunia, A. K. & Stroshine, R.L. (2002). Efficacy of chlorine dioxide, ozone, and thyme essential oil or a sequential washing in killing *Escherichia coli* O157:H7 on lettuce and baby carrots. **LWT Food Sci. Technol**, 35, 720-729.
- Tirawanichakul, Y., Chankuson, P., & Tirawanichakul, S. (2007). Electrical discharges of plasma ozonizer and its application. **Songklanakarin J. Sci. Technol.**, 2, 365-378.
- Tzortzakis, N., Borland, A., Singleton, I. & Barnes, J. (2007). Impact of atmospheric ozone-enrichment on quality-related attributes of tomato fruit. **Postharvest Biol. Technol**, 45, 317-325.