



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การปรับปรุงคุณภาพทางกายภาพ เนื้อสัมผัสและยืด
อายุการเก็บรักษาของปลานิลแดดเดียวโดยใช้การอบแห้งที่
อุณหภูมิต่ำร่วมกับไอโซน

โดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมุข ภาระกุลสุขสถิตย์

ธันวาคม 2551

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การปรับปรุงคุณภาพทางกายภาพ เนื้อสัมผัสและยี่ห้อ
อายุการเก็บรักษาของปลานิลแดดเดียวโดยใช้การอบแห้งที่
อุณหภูมิต่ำร่วมกับไอโซน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมุข ภาระกุลสุขสถิตย์
ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

Abstract

Project Code: MRG5080036

Project Title: Application of ozone in low temperature drying process for physical and textural improvement and shelf life extension in sun dried Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*)

Investigator: Asst.Prof.Dr. Pramuk Parakulsuksatid
Department of Biotechnology, Faculty of Agro-Industry,
Kasetsart University

E-mail Address: fagipmp@ku.ac.th

Project Period: 2 years

Ozone is an effective sanitizing agent against a broad spectrum of pathogenic and spoilage organisms. Thus, it would be a great benefit to ensure the effects of aqueous and gaseous ozone forms on the physico-chemical and microbiological properties of dried Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*). This study was conducted to explore the impacts of brine soaking (5 and 10% w/v) for two periods (15 and 30 min) and the rewashing process with the ozonated water (1, 2, and 3 ppm) for different periods (30, 60, and 90 s). Subsequently, the washed fish meats were dried at two temperatures (40 and 50°C) for 1 hr, then fumigated with ozone (1, 3, and 5 ppm) for 30 min. The process was repeated until 0.85 of A_w . As expected, the increment of lightness (L^*), hue, color difference (ΔE), whiteness index (WI) and all textural parameters was obtained as higher ozone concentration and soaking time applied. In contrast, microbial populations, fat content (%) and TVB-N value decreased. Fish meats with brine soaked (10% for 15 min), rewashed with the ozonated water (3 ppm for 90 s), and then alternately dried fresh fish at 50°C before fumigated with 5 ppm gaseous ozone showed the best quality attributes.

Finally, the results exhibited the application of ozone processes corporate with vacuum storage at 0°C had a potential to prolong the shelf life of dried Nile Tilapia up to 15 days, while the control sample from the traditional process had only 3 day storage. Thus, the combination process was recommended to improve the quality and extend the shelf life of dried fish meats.

Keywords: Ozone application, Nile Tilapia, Microbial quality, Color, Texture, Shelf life

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ: MRG5080036

ชื่อโครงการ: การปรับปรุงคุณภาพทางกายภาพ เนื้อสัมผัสและยืดอายุการเก็บรักษาของปลานิลแดดเดียวโดยใช้การอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำร่วมกับโอโซน

ผู้วิจัย: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมุข ภาระกุลสุขสถิตย์
ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อีเมลล์: fagipmp@ku.ac.th

ระยะเวลาโครงการ: 2 ปี

โอโซนมีประสิทธิภาพในการต้านเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคและเกิดการเน่าเสียได้ในช่วงกว้าง ดังนั้นจึงเป็นประโยชน์อย่างยิ่งที่ควรศึกษาผลของโอโซนในรูปของของเหลวและก๊าซ ต่อคุณสมบัติทางเคมี กายภาพ และเชื้อจุลินทรีย์ของปลานิลแดดเดียว (*Oreochromis niloticus*) การศึกษานี้เป็นการติดตามผลของการแช่น้ำเกลือ (ร้อยละ 5 และ 10 น้ำหนัก/ปริมาตร) ที่ระยะเวลา 2 ระดับ (15 และ 30 นาที) และนำมาล้างด้วยน้ำโอโซน (1, 2, และ 3 ส่วนต่อล้านส่วน) ที่ระยะเวลาต่างๆ (30, 60, และ 90 วินาที) ต่อมานำเนื้อปลาที่ล้างด้วยน้ำโอโซนแล้วมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 2 ระดับ (40 และ 50 องศาเซลเซียส) นาน 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมารวมก๊าซโอโซน (1, 3, และ 5 ppm) นาน 30 นาที กระบวนการดังกล่าวทำซ้ำจนกระทั่งได้ค่าวอเตอร์แอคทีวิตี้ 0.85 จากผลการทดลองพบว่าค่าความสว่าง (L^*), ค่า hue, ค่าความแตกต่างของสี (ΔE) ค่าดัชนีความขาวและค่าเนื้อสัมผัสเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของโอโซนและระยะเวลาในการแช่น้ำโอโซนมากขึ้น ในทางตรงกันข้าม ปริมาณของเชื้อจุลินทรีย์ ร้อยละของไขมัน และค่า TVB-N ลดลง เนื้อปลาที่แช่น้ำเกลือ (ร้อยละ 10 นาน 15 นาที) นำมาล้างด้วยน้ำโอโซน (3 ppm นาน 90 วินาที) และนำไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ก่อนนำไปรมก๊าซโอโซนที่ความเข้มข้น 5 ส่วนต่อล้านส่วน ให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ดีที่สุด

คำสำคัญ:

การประยุกต์ใช้ไอโซน, ปลานิล, คุณภาพทางจุลินทรีย์, สี, เนื้อสัมผัส, อายุ
การเก็บรักษา

หน้าสรุปโครงการ (Executive Summary)

1. ชื่อโครงการ

การปรับปรุงคุณภาพทางกายภาพ เนื้อสัมผัสและยืดอายุการเก็บรักษาของปลานิลแดดเดียวโดยใช้การอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำร่วมกับโอโซน

Application of ozone in low temperature drying process for physical and textural improvement and shelf life extension in sun dried Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*)

2. ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานที่สังกัด

หัวหน้าโครงการ

2.1 นาย ประมุข ภาระกุลสุขสถิตย์

Mr. Pramuk Parakulsuksatid

2.2 คุณวุฒิ Ph. D. (Food Science and Technology)

ตำแหน่ง อาจารย์

2.3 สถานที่ทำงาน ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 50 ถ. พหลโยธิน จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

2.4 โทรศัพท์: 02-562-5074 ต่อ 5079 โทรสาร: 02-579-4096

3. สาขาวิชาที่ทำการวิจัย กระบวนการอบแห้งและเทคโนโลยีโอโซน

5. ระยะเวลาดำเนินงาน 2 ปี

6. ปัญหาที่ทำการวิจัย และความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมีหลายหน่วยงานจากภาครัฐได้ออกมาเตือนผู้นิยมบริโภค “ปลาแดดเดียว-ปลากรอบ” จากท้องตลาดถึงความระมัดระวังในการซื้อผลิตภัณฑ์ปลาแปรรูปเหล่านี้ โดยควรตรวจสอบและตัดสินใจก่อนเลือกซื้อให้ดี เพราะปลาเหล่านี้บางครั้งมาจากแหล่งน้ำที่สกปรกทำให้ต้องผ่านการแช่เย็นมาอย่างน้อยไม่ต่ำกว่า 3 วัน ของยกตัวอย่างเช่น ปลาน้ำจืดที่มาจากเขมรที่กว่าจะมาถึงไทยนั้น มีพ่อค้าชาวเขมรที่ขาดความรับผิดชอบ (รวมถึงพ่อค้าคนไทยบางกลุ่มคน) ที่มักจะแช่ปลาแช่ใส่ภาชนะที่มีส่วนผสมยากันบูด-กัมมะถัน-ดินปะสิว บางรายเทน้ำยาฉีดศพลงไปด้วย และแช่ด้วยน้ำแข็งทิ้งไว้ 40 นาที ก่อนนำขึ้นผึ่งแดดพองพองแล้วเดินเร่ขายราคาถูก ๆ สิ่งเหล่านี้ย่อมก่อให้เกิด

ผลโดยตรงกับคนกินซึ่งเมื่อกินเข้าไปแล้วจะเกิดอาการเวียนหัว อาเจียน ท้องเสีย จนถึงบางคนอาจต้องหามส่งโรงพยาบาล

ชีวิตและความเป็นอยู่ประจำวันของคนไทยที่รัฐบาลพยายามผลักดันให้ประเทศผืนแผ่นดินนี้ กลายสภาพเป็น **ครัวของโลก** ซึ่งนักวิชาการไทยคงจะต้องขานตอบสนองนโยบายดังกล่าว แต่อาจจะผิดพลาดเป้าหมายไปเล็กน้อยเพราะเราได้เพียงแต่เป็น ประเทศที่นำ **“กล้วยของโรค”** อย่าง หลีกเลียงไม่ได้ จากการรายงานข่าวที่มาจากตลาดโรงเกลือถึงพิษภัยของ “ปลาแดดเดียว” ที่วางขายกันให้เกลื่อนกลาดในตลาดโรง เกลือ ต.ป่าไร่ อ.อรัญประเทศ แหล่งข่าวได้ระบุว่าปลาแดดเดียวที่เดินเร่ขายตามชายแดนด้านอรัญประเทศ นั้นมีที่มาจากปลาน้ำจืดในทะเลสาบเขมร ที่ทะเลาะลักเข้าประเทศไทยวันละ 300-500 ตัน มีทั้งปลาช่อน ปลาดุก ปลาคัง และปลาเนื้ออ่อน ฯลฯ โดยปลาเหล่านี้เมื่อนำขึ้นมาจากทะเลสาบเขมร ต้องใช้เวลาเดินทางกว่าจะมาถึงอรัญประเทศไม่ต่ำกว่า 3 วัน ด้วยการแช่เย็นเข้ามา เมื่อมาถึงตลาดโรงเกลือพ่อค้าชาวเขมรจะนิยมแปรรูปเป็นปลาแดดเดียว โดยให้คนงานแลปลาแช่ในอ่างพลาสติก-โอ่งมังกร และใช้น้ำมันขนาด 200 ลิตร ซึ่งมีส่วนผสมของยากันบูด-กำมะถัน-ดินประสิว พ่อค้าบางรายที่ซุกก็ใส่น้ำยาฉีดศพลงไปด้วย จากนั้นก็แช่ด้วยน้ำแข็งไว้ในภาชนะดังกล่าว ทิ้งไว้ประมาณ 40 นาที ก่อนจะนำขึ้นมาผึ่งแดดพอรอบมาด ๆ แล้วนำออกเดินเร่ขายทั่วตลาดโรงเกลือในราคาถูก ๆ

สำหรับสภาพของปลาแดดเดียวที่มีส่วนผสมของสารเคมีต่าง ๆ นั้น จะทำให้เนื้อปลาดูสวยงาม มีสีสด คล้ายปลาที่ตายใหม่ ๆ ไม่มีกลิ่นคาวเน่าเหม็นของปลา และไม่มีแมลงวัน-แมลงหวี่รุมตอม เมื่อนำไปทอดหรือย่างเพื่อบริโภคจะมีความรู้สึกฝาดลิ้น มีอาการชาริมฝีปาก หายใจออกมา มีกลิ่นสารเคมี บางรายถึงกับเวียนหัว อาเจียน ท้องเสีย ถึงขนาดต้องเข้าโรงพยาบาลก็มีมาแล้ว และไม่เฉพาะปลาแดดเดียวเท่านั้น ที่มีกรรมวิธีการผลิตไม่ถูกต้องเหมาะสม แต่ยังรวมถึงสินค้าประเภทปลาอย่าง และปลากรอบ ก็มีการใช้สารเคมีบางชนิดเป็นส่วนประกอบที่ไม่ถูกต้องด้วยเช่นกัน แต่ที่ผ่านมายังไม่มีหน่วยงานของรัฐเข้าไปดูแลเรื่องเหล่านี้ ไม่ว่าจะเป็นสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา (อย.) หรือสำนักงานสาธารณสุขจังหวัดสระแก้ว จึงอยากฝากเตือนให้นักท่องเที่ยวที่เดินทางไปจับจ่ายซื้อสินค้าในตลาดโรงเกลือ อ.อรัญประเทศ ควรระมัดระวังและตรวจสอบคุณภาพให้ดีด้วย

การแปรรูปผลิตภัณฑ์ปลาน้ำจืดแดดเดียวส่วนใหญ่นิยมตากให้แห้งโดยใช้แสงแดดจากธรรมชาติเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีผิวนอกแห้งแต่ทว่าเนื้อส่วนด้านในยังคงมีความนุ่มชื้น ทำให้เมื่อนำไปทอดจะได้ปลาแดดเดียวที่มีความกรอบนอกแต่นุ่มใน ตามปกติแล้วการทำแห้งโดยใช้แสงแดดนั้นจะมีข้อดีกว่าการใช้เตาอบความร้อนเพราะปลาแดดเดียวที่ได้จากเตาอบนั้นเมื่อนำไปทอดเนื้อสัมผัสด้านในจะไม่นุ่ม กลับแห้งเหนียวทำให้ไม่ได้รับความนิยม ถึงแม้ว่าการตากแดดจะเป็นกระบวนการที่แทบจะไม่เสียค่าใช้จ่ายในเรื่องของพลังงาน หากแต่การตากแห้งโดยใช้แสงแดดนั้นก็มีข้อด้อยหลายประการ ทั้งในเรื่องของความเข้มของแสงที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาและฤดูกาล อีกทั้ง

ยังมีปัญหาเกี่ยวกับสุขอนามัยของการบริโภคผลิตภัณฑ์ปลาน้ำจืดแค่นั้นเนื่องจากการปนเปื้อนของสารเคมี ไซ้แมลงวัน เชื้อจุลินทรีย์ และสิ่งแปลกปลอมต่างๆ จากสาเหตุเหล่านี้ทำให้ผลิตภัณฑ์ปลาน้ำจืดแค่นั้นส่วนใหญ่มีอันตราย หรือไม่ก็อายุการเก็บสั้น ดังนั้นการประยุกต์ใช้ไอโซนในกระบวนการผลิตอาจเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ส่งผลต่อการปรับปรุงคุณภาพทางกายภาพ เนื้อสัมผัสและยืดอายุการเก็บรักษาของปลานิลแค่นั้น และทำให้มีอายุการเก็บนานขึ้นสำหรับการส่งออก

7. วัตถุประสงค์

- 7.1 เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้ไอโซนและติดตามการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพ เนื้อสัมผัส กลิ่นคาวปลา และการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ในขั้นตอนการถอดเกล็ด ควักไส้และล้าง รวมถึงขณะที่ดองในน้ำเกลือเพื่อรอตากแดด
- 7.2 เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้ไอโซนร่วมในการอบแห้งและติดตามการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพ เนื้อสัมผัส และการลดลงของกลิ่นคาวปลาและเชื้อจุลินทรีย์ในช่วงระยะเวลาต่างๆ โดยเปรียบเทียบกับ การทดลองควบคุม
- 7.3 เพื่อประเมินหาอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ปลานิลแค่นั้นที่ได้จากการประยุกต์ใช้ไอโซนร่วมกระบวนการผลิต

8. ระเบียบวิธีวิจัย

- 8.1 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพ เคมี และจุลินทรีย์ในขั้นตอนก่อนการอบแห้ง การประยุกต์ใช้น้ำไอโซน
 - 8.1.1 เพื่อการศึกษาลักษณะพื้นฐานทางกายภาพเคมี และจุลินทรีย์ของปลานิลสด
 - 8.1.2 ศึกษาปริมาณความเข้มข้นของไอโซน ปริมาณเกลือ และระยะเวลาในการแช่ปลาที่มีผลต่อคุณภาพของปลานิลในขั้นตอนการถอดเกล็ด ควักไส้และล้าง(ยังไม่แล้) และขึ้นเนื้อที่ (แล้แล้ว) ดองน้ำเกลือ
 - 8.1.3 วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพ เคมี และจุลินทรีย์ในขั้นตอนก่อนการอบแห้ง

8.2 เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการอบแห้งที่มีโอโซนร่วมในการอบแห้งพลาสติก

- 8.2.1 ศึกษาการประยุกต์ใช้ก๊าซโอโซนที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ร่วมในการอบแห้งพลาสติกแล้ววัดที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ และรวมด้วยก๊าซโอโซนที่ระดับความเข้มข้น 4 ระดับ วางแผนการทดลองแบบ Factorial 3×4 วิเคราะห์ความแปรปรวนและเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยตามวิธี Duncan's New Multiple Range
- 8.2.2 วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพ เคมี และจุลินทรีย์ในขั้นตอนการประยุกต์ใช้ก๊าซโอโซนที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ร่วมในการอบแห้งพลาสติกแล้ววัดที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ

8.3 เพื่อประเมินหาอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์พลาสติกแตกเดียวที่ได้จากประยุกต์ใช้โอโซนร่วมกระบวนการผลิต

ประเมินหาอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์พลาสติกแตกเดียวที่ได้จากการรมโอโซนร่วมในการอบโดยนำพลาสติกที่ได้รับการคัดเลือกแล้วจากข้อที่ 9.1 มาศึกษาอายุการเก็บภายใต้สภาวะสุญญากาศและบรรยากาศปกติ โดยบรรจุในในถุงพลาสติก (PE) บรรจุถุงละ 3 ชิ้น ให้น้ำหนัก 300 กรัม เก็บรักษาสภาพผลิตภัณฑ์ได้ใน 3 อุณหภูมิ คือ อุณหภูมิห้อง (35 องศาเซลเซียส) อุณหภูมิ 15 และ 7 องศาเซลเซียส สุ่มตัวอย่างมาวิเคราะห์ทุกวัน 2 วัน เป็นระยะเวลา 30 วัน ศึกษาคุณภาพวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพ เคมี และจุลินทรีย์ของปลาแตกเดียว

8.4 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ข้อมูลที่ได้จากผลการทดลองจะถูกนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยแบบจำลองเชิงเส้นตรง (General linear model หรือ GLM) และการทดสอบความแตกต่างแบบ least significant difference หรือ LSD ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรม SAS รุ่น 8.01 (SAS, 2000)

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัย เรื่อง “การปรับปรุงคุณภาพทางกายภาพ เนื้อสัมผัสและยืดอายุการเก็บรักษาของปลานิลแดดเดียวโดยใช้การอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำร่วมกับโอโซน” ได้รับทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่ ตามโครงการความร่วมมือระหว่างสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษากับสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ประจำปีงบประมาณ 2550 จึงทำให้งานวิจัยนี้ประสบผลสำเร็จตามวัตถุประสงค์ได้ด้วยดี ทางคณะผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณผู้ช่วยวิจัย นิสิตผู้ช่วยงานวิจัย รวมถึงเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการทดลองตลอดระยะเวลาที่ดำเนินการวิจัย

ผู้วิจัย

2 ธันวาคม 2551

สารบัญ

	หน้า
Abstract	i
บทคัดย่อ.....	iii
หน้าสรุปโครงการ (Executive Summary).....	v
กิตติกรรมประกาศ.....	ix
สารบัญ.....	x
สารบัญตาราง.....	xii
สารบัญภาพ.....	xiii
บทที่ 1	
เอกสารที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....	1
ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับปลานิล.....	1
คุณค่าทางอาหารของปลานิล.....	1
กลิ่นโคลน (Musty/earthy off-flavor).....	2
ปลาเค็ม.....	3
การทำเค็ม อบแห้งและรมควัน.....	4
การเสื่อมเสียของปลาเค็ม.....	5
ไอโซนคืออะไร.....	6
คุณสมบัติของไอโซน.....	7
บทที่ 2	
ผลของความเข้มข้นและระยะเวลาในการแช่ไอโซนต่อคุณลักษณะทางเคมี	
กายภาพ และจุลินทรีย์ของเนื้อปลานิลชำแหละสด.....	42
บทนำ.....	12
วัตถุประสงค์และวิธีการทดลอง.....	14
ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	19
สรุปผลการทดลอง.....	30
บทที่ 3	
ผลของการใช้สารละลายเกลือและน้ำไอโซนต่อคุณลักษณะทางเคมี กายภาพ และ	
จุลินทรีย์ของเนื้อปลานิลชำแหละสด.....	31
บทนำ.....	31
วัตถุประสงค์และวิธีการทดลอง.....	33
	x

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	39
สรุปผลการทดลอง.....	49
 บทที่ 4	
ผลของก๊าซโอโซนต่อคุณลักษณะทางเคมี กายภาพ และจุลินทรีย์ของปลานิลอบแห้ง...	50
บทนำ.....	50
วัตถุประสงค์และวิธีการทดลอง.....	51
ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	54
สรุปผลการทดลอง.....	60
 บทที่ 5	
ผลของการประยุกต์ใช้โอโซนในการล้างและการอบแห้งต่ออายุการเก็บรักษาของเนื้อ ปลานิล.....	62
บทนำ.....	62
วัตถุประสงค์และวิธีการทดลอง.....	64
ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	69
สรุปผลการทดลอง.....	79
 บทที่ 6	
เอกสารอ้างอิง.....	80
Output ที่ได้จากโครงการ.....	86

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของปลานิลในส่วนที่กินได้ 100 กรัม.....	1
ตารางที่ 2 ค่าวอเตอร์แอคติวิตี (Aw) ต่ำสุดที่จุลินทรีย์ต่างๆ สามารถเจริญได้.....	6
ตารางที่ 3 เปรียบเทียบการใช้ Ozone กับการใช้สาร interox (H_2O_2)	9
ตารางที่ 4 เปรียบเทียบลักษณะต่างๆของการใช้ hypochlorite และ ozone ในน้ำ.....	10
ตารางที่ 5 ผลของความเข้มข้น และระยะเวลาในการแช่น้ำไอโซนต่อปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ของหนังและเนื้อปลานิล.....	22
ตารางที่ 6 ผลของความเข้มข้น และระยะเวลาในการแช่น้ำไอโซนต่อลักษณะสีของเนื้อปลานิล.....	27
ตารางที่ 7 ผลของความเข้มข้น และระยะเวลาในการแช่น้ำไอโซนต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของเนื้อปลานิล.....	28
ตารางที่ 8 ผลของความเข้มข้น และระยะเวลาในการแช่น้ำไอโซนต่อองค์ประกอบทางเคมีของเนื้อปลานิล.....	29
ตารางที่ 9 ผลของน้ำเกลือและไอโซนต่อปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ของหนังและเนื้อปลานิล.....	41
ตารางที่ 10 ผลของน้ำเกลือและไอโซนต่อลักษณะสีของเนื้อปลานิล.....	43
ตารางที่ 11 ผลของน้ำเกลือและไอโซนต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของเนื้อปลานิล.....	46
ตารางที่ 12 ผลของน้ำเกลือและไอโซนต่อองค์ประกอบทางเคมีของเนื้อปลานิล.....	48
ตารางที่ 13 ลักษณะของเชื้อจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ ที่พบบ่อในปลานิลแคตเตียว.....	55
ตารางที่ 14 ผลของความเข้มข้นไอโซนต่อการลดลงของปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อปลานิลอบแห้ง.....	56
ตารางที่ 15 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในปลานิล.....	57
ตารางที่ 16 ผลของความเข้มข้นไอโซนต่อเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะด้านสีในเนื้อปลานิลอบแห้ง.....	58
ตารางที่ 17 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะด้านสีในเนื้อปลานิล	58
ตารางที่ 18 ผลของความเข้มข้นไอโซนต่อคุณลักษณะทางเคมีของเนื้อปลานิลอบแห้ง.....	59
ตารางที่ 19 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อคุณลักษณะทางเคมีของเนื้อปลานิล.....	60

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 โครงสร้างของสารประกอบ 2- methylisoborneol (MIB) (a) และ Geosmin (GMS) (b).....	3
ภาพที่ 2 การถูกทำลายของเซลล์จุลินทรีย์โดยโอโซน.....	7
ภาพที่ 3 กระบวนการสร้างโอโซนในระบบปิด.....	15
ภาพที่ 4 ตำแหน่งของเนื้อปลาที่ตัดเพื่อวัดเนื้อสัมผัส.....	17
ภาพที่ 5 กราฟเนื้อสัมผัสและการคำนวณค่าเนื้อสัมผัสต่างๆโดย hardness = F1, springiness = L2/L1, cohesiveness = A2/A1, gumminess = F1*(A2/A1), chewiness = F1*(A2/A1)*(L2/L1), และ resilience = A6/A4.....	17
ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ของค่า normal stress และ normal strain ต่อคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของเนื้อปลานิล.....	25
ภาพที่ 7 กระบวนการสร้างโอโซนในระบบปิด.....	34
ภาพที่ 8 ตำแหน่งของเนื้อปลาที่ตัดเพื่อวัดเนื้อสัมผัส.....	36
ภาพที่ 9 กราฟเนื้อสัมผัสและการคำนวณค่าเนื้อสัมผัสต่างๆโดย hardness = F1, springiness = L2/L1, cohesiveness = A2/A1, gumminess = F1*(A2/A1), chewiness = F1*(A2/A1)*(L2/L1), และ resilience = A6/A4.....	37
ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ของค่า normal stress และ normal strain ต่อคุณลักษณะด้าน \ เนื้อสัมผัสของเนื้อปลานิล.....	45
ภาพที่ 11 กระบวนการสร้างโอโซนในระบบปิด.....	52
ภาพที่ 12 กระบวนการสร้างโอโซนในระบบปิด.....	52
ภาพที่ 13 กระบวนการสร้างโอโซนในระบบปิด.....	65
ภาพที่ 14 กระบวนการสร้างน้ำโอโซนในระบบปิด.....	66
ภาพที่ 15 กระบวนการสร้างก๊าซโอโซนในระบบปิด.....	67
ภาพที่ 16 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดบริเวณหนังของเนื้อปลานิลระหว่างการเก็บรักษา.....	70
ภาพที่ 17 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณยีสต์และราบริเวณหนังของเนื้อปลานิลระหว่างการเก็บรักษา.....	70
ภาพที่ 18 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในเนื้อปลานิลระหว่างการเก็บรักษา.....	71
ภาพที่ 19 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณยีสต์และราในเนื้อปลานิลระหว่างการเก็บรักษา.....	71

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 20 การเปลี่ยนแปลงค่าความสว่างของปลานิลระหว่างการเก็บรักษา.....	73
ภาพที่ 21 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นสีแดงของปลานิลระหว่างการเก็บรักษา.....	74
ภาพที่ 22 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นสีเหลืองของปลานิลระหว่างการเก็บรักษา.....	74
ภาพที่ 23 การเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสีของปลานิลระหว่างการเก็บรักษา.....	75
ภาพที่ 24 การเปลี่ยนแปลงค่ามุมของสีในปลานิลระหว่างการเก็บรักษา.....	76
ภาพที่ 25 การเปลี่ยนแปลงค่า TBA ของปลานิลระหว่างการเก็บรักษา.....	77
ภาพที่ 26 การเปลี่ยนแปลงค่า TVB-N ของปลานิลระหว่างการเก็บรักษา.....	79

บทที่ 1

เอกสารที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับปลานิล

ปลานิล มีชื่อเรียกทั่วไปว่า Nile tilapia อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำจืด น้ำกร่อย เลี้ยงง่าย กินอาหารได้ทั้งพืชและสัตว์ สามารถทนทานต่อสภาวะแวดล้อมได้ดี เนื้อมีรสชาติอร่อยจึงเป็นที่นิยมของคนทั่วไป (ศิริ, 2543) จากสถิติการประมง ปี 2545 รายงานว่า มีปลานิลที่ได้จากการเพาะเลี้ยง 28.5 % (จากปริมาณสัตว์น้ำจืดทั้งหมดที่ได้จากการเพาะเลี้ยง) ส่วนผลผลิตปลานิลที่จับได้ทั้งหมด (รวมการเพาะเลี้ยง) ในประเทศไทย เท่ากับ 120,900 ตัน ใช้ในการบริโภคสด 78.43 % ทำเค็ม ตากแห้ง 10.74 % นึ่ง ย่าง 5.00 % น้ำปลาจากปลานิล 0.01% ปลาร้าและปลาเจ๋านิล 5.81% และอื่นๆ 0.01 % (กลุ่มวิจัยและวิเคราะห์สถิติการประมง ,2545)

คุณค่าทางอาหารของปลานิล

ปลานิลจัดว่าเป็นแหล่งของโปรตีนจากปลาน้ำจืดและไขมันต่ำ มีกรดไขมันไม่อิ่มตัว (n3 PUFA) น้อยกว่าในปลาทะเล คุณค่าทางอาหารของปลาจะขึ้นอยู่กับ อาหาร แหล่งที่อยู่อาศัยและฤดูกาล โดยในช่วงฤดูหนาวปลานิล (*Oreochromis niloticus*) มีไขมัน 0.83 ± 0.17 ฤดูร้อน 0.99 ± 0.29 และฤดูใบไม้ร่วง 1.08 ± 0.13 % น้ำหนักแห้ง (% wet weight basis) (Rasoarahona, 2005) การศึกษาวิเคราะห์คุณค่าทางอาหารของปลานิลในส่วนที่รับประทานได้ 100 กรัม พบว่ามีองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของปลานิลในส่วนที่กินได้ 100 กรัม

องค์ประกอบทางเคมี	ปลานิลสด (raw)	ปลานิลนึ่ง (boiled)	ปลานิลทอด (fried)
ความชื้น (กรัม)	78.1	73.4	44.7
โปรตีน (กรัม)	19.8	21.4	30.9
ไขมัน (กรัม)	1.8	4.2	21.8
เถ้า (กรัม)	1.0	1.1	2.3
Total N (กรัม)	3.2	3.4	4.9
Prot. N (กรัม)	2.8	3.2	4.4
NPN (%)	12	7	10
% Edible portion	50	66	72

ที่มา: Puwastien และคณะ, 1999

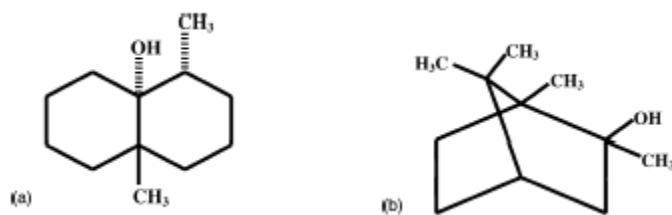
กลิ่นโคลน (Musty/earthy off-flavor)

กลิ่นโคลนเป็นกลิ่นรสที่ไม่พึงประสงค์ (off-flavor) ที่มักพบในปลาน้ำจืดทั่วไปและปลาน้ำจืดที่ได้จากการเพาะเลี้ยง การที่ปลามีกลิ่นโคลนทำให้เกิดผลิตภัณฑ์จากปลาด้วยคุณภาพ (Tucker, 2000) กลิ่นโคลนมิได้พบในปลาเท่านั้นแต่ยังพบในกุ้ง (Shrimp) (Lovell และ Broce, 1985) และ หอยกาบ (Clams) (Hsieh และคณะ) สารตัวสำคัญที่ทำให้เกิดกลิ่นโคลน คือ Geosmin ($1\alpha, 10\beta$ -dimethyl-9 α -decalol) ($C_{12}H_{20}O$) และ 2- methylisoborneol (1- *R*-exo-1,2,7,7-tetramethylbicyclo-[2,2,1]-heptan-2-ol) ($C_{11}H_{20}O$) (ภาพที่ 1) เป็นสารประกอบพวกแอลกอฮอล์ อิมิตที่ระเหยได้ โครงสร้างประกอบด้วยหมู่เมทิลและหมู่ไฮดรอกซิล มีคุณสมบัติทั่วไปคือ ละลายในไขมันได้ดี ไม่ชอบน้ำสูง กระจายตัวและสะสมในเนื้อเยื่อที่มีส่วนประกอบของไขมันสูง (Johnsen และคณะ, 1996)

สารประกอบ Geosmin และ 2- methylisoborneol เกิดจากการสร้างของ Actinomycetes และ Cyanobacteria (สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน: Blue-green algae) ทั้ง Geosmin และ 2- methylisoborneol เป็นสารประกอบที่เป็นสาเหตุของการเกิดกลิ่นรสที่ไม่พึงประสงค์ (Young และคณะ, 1996) ชนิด Cyanobacteria ที่ผลิตสารประกอบที่ทำให้เกิดกลิ่นรสที่ไม่พึงประสงค์ในน้ำและปลา มาจากสกุล *Anabena*, *Aphanizomenon*, *Lyngbya*, *Oscillatoria*, *Planktothrix*, *Phormidium* (Paerl และ Millie, 1996; Zimba และคณะ, 1999, 2001) *Oscillatoria perornata* ในบ่อเลี้ยงปลา Catfish เขต Mississippi-Alabama Black และ Prairie ประเทศสหรัฐอเมริกาเป็นสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินที่สำคัญที่ผลิตสาร 2- methylisoborneol ที่ทำให้เกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์ในปลา Catfish (Schrader และ Dennis, 2005) *Ananaena circinalis* (Rosen และคณะ, 1992), *Ananaen spirides* var. *crassus* (Baker และคณะ, 1994) และ *Aphanizomenon flosaquae* (Matsumoto และ Tsuchiya, 1988) เป็นชนิดของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินที่สามารถผลิตสาร Geosmin ได้

ปลาสามารถดูดซึมสาร Geosmin และ 2- methylisoborneol ซึ่งเป็นสารที่ Actinomycetes และ Cyanobacteria สร้างขึ้นโดยรวดเร็วผ่านทางเหงือก (Gills) รองลงมาได้แก่ ผิวหนัง ลำไส้เล็ก และกระเพาะอาหาร ตามลำดับ สารประกอบทั้ง 2 ไปสะสมอยู่ในตัวปลาในเนื้อเยื่อที่มีไขมัน (Martin และคณะ, 1990; Johnsen และ Lloyd, 1992) ทำให้ปลาเกิดกลิ่นรสที่ไม่พึงประสงค์

สารประกอบ 2- methylisoborneol จะให้กลิ่นโคลน (Muddy odor) และ สารประกอบ Geosmin จะให้กลิ่นเหม็นอับ กลิ่นสาบและกลิ่นหืน (Muddy odor) หรืออาจจะให้กลิ่นคล้ายหนังสือเก่า (old-book like odor) การรับรู้กลิ่น (Odor Threshold) ของสารประกอบ Geosmin ในปลา Channel catfish อยู่ระหว่าง 0.1 และ 0.2 $\mu\text{g/kg}$ และสารประกอบ 2- methylisoborneol อยู่ระหว่าง 0.25 และ 0.5 $\mu\text{g/kg}$ (Grimm และคณะ, 2004)



ภาพที่ 1 โครงสร้างของสารประกอบ 2-methylisoborneol (MIB) (a) และ Geosmin (GMS) (b)

ที่มา: Lawton และ และคณะ (2003)

การกำจัดกลิ่นโคลนในปลา

กำจัดกลิ่นโคลนที่ยังมีชีวิต ทำโดยกักปลาไว้ในบ่อจนกว่าปลาจะมีกลิ่นที่ดีขึ้นหรืออาจย้ายปลามาไว้ในบ่อที่มีน้ำสะอาดหลังจากจับปลามาจากบ่อซึ่งปลานั้นยังคงมีชีวิตอยู่กักปลาจนกว่าปลานั้นจะมีกลิ่นที่ดีขึ้น ปลา Rainbow trout ที่จับแบบมีชีวิตจากทะเลสาบในประเทศแคนาดา แล้วนำมาพักเลี้ยงในถังทดลองที่ระบบน้ำหมุนเวียนเป็นระยะเวลา 14 วัน ทำให้สาร Geosmin ลดลงจาก 1.1 เป็น 0.3 μg ในเนื้อปลา 100 g (Yurkowski และ Tabachek, 1974) การพักปลานิล (Nile tilapia) ที่มีกลิ่นโคลนไว้ 16 วัน สามารถลดสาร Geosmin ลงจาก 31.76 เหลือ 1.0 $\mu\text{g}/\text{kg}$ (Yamproyoon และ Noomhorm, 2000)

กำจัดกลิ่นโคลนในเนื้อปลาโดยกระบวนการแปรรูปเป็นวิธีการกำจัดกลิ่นโคลนที่ใช้ระยะเวลาน้อยกว่าการกำจัดกลิ่นโคลนในปลาที่ยังมีชีวิตอยู่ การกำจัดกลิ่นโคลนในเนื้อปลาหมอคเทศแล้ (Black Tilapia) ที่ล้างด้วยสารละลายไฮดรอกไซด์ของโซเดียม 5 % นาน 5 นาที สามารถลดกลิ่นโคลนลงได้และทำให้สีและเนื้อสัมผัสของเนื้อปลาหมอคเทศแล้ดีขึ้น (Mohsin และ และคณะ, 1999) และการแช่ล้างเนื้อปลาในสารละลายน้ำมะนาว น้ำมะขาม น้ำตะไคร้ น้ำเกลือ หรือผสมรวมกัน สามารถลดสาร Geosmin และสาร 2-methylisoborneol ที่เป็นสาเหตุของการเกิดกลิ่นโคลนในเนื้อปลาได้ (Anon, 1991; Jamilah และ Siti, 1997) ปลานิล (Nile tilapia) ทั้งตัวที่ผ่านการควักไส้และล้างด้วยน้ำสะอาดแล้วแช่ในสารละลายเกลือ 5 % นาน 30 นาที ก่อนแล่หนังและเลาะกระดูกออก เพื่อเตรียมเนื้อปลาในการทำ Surimi เป็นการกำจัดกลิ่นโคลนในเนื้อปลานิลได้ (Rohani และ Yunus, 1994)

ปลาเค็ม

ปลาเค็ม หมายถึง ปลาสดที่ผ่านการตัดแต่ง ขอดเกล็ด ตัดหัว ชักไส้ ล้างให้สะอาดและผ่านกรรมวิธีการทำเค็ม (ใช้เกลือเม็ด ใช้น้ำเกลือ และใช้เกลือเม็ดกับน้ำเกลือ) อาจอยู่ในสภาพแห้ง แช่

น้ำเกลือ แขน้ำมัน หรืออื่น ๆ ปลาเค็มอาจจะทำเค็มทั้งตัวหรือเป็นชิ้น สามารถแบ่งชนิดของปลาเค็มตามปริมาณเกลือได้ 3 ชนิด คือ ชนิดเค็มน้อย เค็มปานกลาง เค็มมาก โดยมีปริมาณเกลือน้อยกว่า 5.0, 5.0-10.0 และมากกว่า 10.0 % ตามลำดับ โดยคุณลักษณะที่ต้องการของปลาเค็มทั่วไปคือมีขนาดสม่ำเสมอในภาชนะบรรจุเดียวกัน ไม่มีเกล็ดติดอยู่ ยกเว้นบริเวณโคนครีบก้น และภายในช่องท้องต้องไม่มีเศษของลำไส้ติดอยู่ มีผิวหนังที่สมบูรณ์ ไม่ฉีกขาดหรือแตก มีกลิ่นตามธรรมชาติของปลาเค็ม ปราศจากสิ่งแปลกปลอม เช่น ชิ้นส่วนหรือสิ่งปฏิกูลของแมลง หนอน หนู และนก ดิน ทราายและกรวด มีค่าวอเตอร์แอกติวิตี (Aw) ไม่เกิน 0.85 ปริมาณเถ้าที่ไม่ละลายในกรดต้องไม่เกิน 0.3 % สารปนเปื้อน เช่น ปะปน ต้องไม่เกิน 0.5 mg/kg ตะกั่วไม่เกิน 1 mg/kg ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดต้องไม่เกิน 1×10^5 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม *Staphylococcus aureus* ต้องไม่เกิน 100 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม และราต้องไม่เกิน 2×10^2 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม (มอก. 1199-2536; มอก. 1204-2536)

การทำเค็ม อบแห้งและรมควัน

การทำเค็มเป็นการถนอมอาหารที่สำคัญในการลดค่าวอเตอร์แอกติวิตี (Aw) และยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ (Doe, 1998; Horner, 1997; Leroi และ Joffraud, 2000 a ; Rorvik, 2000) เนื่องจากคลอไรด์ไอออนในเกลือจะทำลายเชื้อจุลินทรีย์ (Leroi และ Joffraud, 2000b) การซึมของเกลือในชิ้นปลาขึ้นอยู่กับวิธีการใส่เกลือ ชนิดของเกลือ ความหนาของชิ้นเนื้อ ความเข้มข้นของน้ำเกลือ เวลาที่ใช้ในการแช่เกลือ และอัตราส่วนของเกลือและปลา (Jittinandana และคณะ, 2002) การทำเค็มปลาสด (*Trichogaster pectoralis*) โดยแช่น้ำเกลืออิ่มตัว นาน 2 ชั่วโมง ทำให้การซึมของเกลือเข้าสู่เนื้อปลาอย่างทั่วถึงสม่ำเสมอมากกว่าวิธีการดองด้วยเกลือ (พรรณทิพย์, 2543) ปลานิลแช่ในน้ำเกลือที่มีความเข้มข้นที่ 5 % NaCl ที่ 5 °C นาน 1 ชั่วโมง เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมกว่าที่ 10 และ 15% (Yanar และคณะ, 2005)

การอบแห้งเป็นการให้ความร้อนแก่อาหารเพื่อไล่น้ำออกจากอาหารให้เหลืออยู่ในปริมาณน้อยที่สุด การอบแห้งมีหลายวิธี เช่น การตากแห้ง (sun drying) การทำแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ (solar drying) ตู้อบแห้งแบบใช้ลมร้อน (hot air drier) ตู้อบแห้งแบบสุญญากาศ (Vacuum shelf drier) การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze drying หรือ sublimation) และการอบ (baking) เป็นต้น การอบแห้งเป็นการลดค่าวอเตอร์แอกติวิตี (Aw) ทำให้สามารถยืดอายุการเก็บอาหารได้ยาวนานขึ้น (นิธิยา, 2543) ปลาสดเค็ม อบแห้งด้วยลมร้อนที่ 50 °C ความเร็วลม 80-85 เมตร/นาทีก ความชื้นสัมพัทธ์ภายในตู้ 45% นาน 12 ชั่วโมง (ความชื้น 40 ± 2 %) ผลผลิตแห้งที่ได้ในแต่ละครั้งมีความสม่ำเสมอและสามารถป้องกันการปนเปื้อนจากสิ่งสกปรกและแมลงวันได้ดีกว่าที่ตากแห้งโดยแสงแดด (พรรณทิพย์, 2543)

การรมควันปลาเป็นวิธีการถนอมอาหารที่รู้จักกันทั่วโลก การรมควันจะมีผลต่อกลิ่นและรสชาติของปลาและนอกจากนี้ยังสามารถยืดอายุการเก็บรักษาปลาให้ยาวนานขึ้นเนื่องจากการรมควันเป็นการระเหยน้ำออกจากตัวปลา ควันมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเกิดการหืน (antioxidant) ยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ (antimicrobial) เนื่องจากควันมีองค์ประกอบของ formaldehyde carboxylic acid และ phenols (Doe, 1998; Horner, 1997; Leroi และ Joffraud, 2000; Rorvik, 2000) การรมควันปลามี 3 วิธี การรมควันที่อุณหภูมิต่ำ (cold smoking $\leq 30^{\circ}\text{C}$) การรมควันที่อุณหภูมิสูง (high smoking $\geq 60^{\circ}\text{C}$) อาจปล่อยกระแสไฟฟ้าร่วม (high voltage electrostatic) และการรมควันเหลว (liquid smoking) จะเป็นวิธีการรมควันปลาที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ปลามี polynuclear aromatic hydrocarbons ซึ่งมีแนวโน้มในการเกิดโรคมะเร็ง (Doe, 1998; Duffes, 1999; Espe และคณะ, 2002; Hattula และคณะ, 2001; Sigurgisladdottir และคณะ, 2000) ปลานิลเค็ม (*Oreochromis niloticus*) รมควันด้วยขี้เลื่อยไม้ โอ๊ก (oak) ที่ 80°C นาน 45 นาที ใน kiln dryer เก็บที่อุณหภูมิ 4°C สามารถเก็บรักษาปลานิลเค็มได้นานกว่า 35 วัน (Yanar และคณะ, 2005)

การเสื่อมเสียของปลาเค็ม

การเสื่อมเสียทางกายภาพที่พบทั่วไปจะมาจากหนอนของแมลงที่มาไข่ในระหว่างการตากแดดและฝักตัวเป็นตัวหนอนในผลิตภัณฑ์หรือเสียหายจากนกหรือหนูมากัดแทะในระหว่างตากแดดหรือการเก็บ

การเสื่อมเสียทางเคมี การหืนจะทำให้เกิดกลิ่นและกลิ่นรสที่ไม่พึงประสงค์ในผลิตภัณฑ์ปลา การหืนของผลิตภัณฑ์ปลาเค็มตากแห้งและปลาเค็มรมควันเกิดขึ้นได้จะขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นในตัวปลา (Akande และคณะ, 1991) เกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เป็นตัวเร่งการหืนในผลิตภัณฑ์ปลา (Castel และคณะ, 1965) ชนิดของภาชนะบรรจุที่ใช้เก็บรักษา (การซึมผ่านของออกซิเจนและไอน้ำ) (Akande และคณะ, 1991) แม้ว่าการใช้เกลือในปลาเป็นการยืดอายุการเก็บรักษาอาหารแต่จะไปเพิ่มการเกิดการหืนได้ในผลิตภัณฑ์ปลาที่มีไขมันไม่อิ่มตัวสูง (highly unsaturated lipid) ซึ่งมีผลโดยตรงทำให้ปลามีกลิ่นและกลิ่นรสไม่พึงประสงค์ (off-flavours, odours) โปรตีนเสียสภาพและเนื้อสัมผัสเปลี่ยน (Harris และ Tall, 1994) ปริมาณเกลือที่เพิ่มมากขึ้นในเนื้อปลาฮอสแมคเคอเรล (horse mackerel) ทำให้อัตราการหืนในเนื้อปลาสูงขึ้นในระหว่างการเก็บในสภาวะแช่เยือกแข็ง (Augbourg และ Ugliano, 2002)

การเสื่อมเสียทางจุลินทรีย์ ในอาหารที่มีค่าวอเตอร์แอคทิวิตี (Aw) แตกต่างกันการเจริญของจุลินทรีย์จะเจริญได้แตกต่างกัน (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 ค่าวอเตอร์แอคติวิตี (Aw) ต่ำสุดที่จุลินทรีย์ต่างๆ สามารถเจริญได้

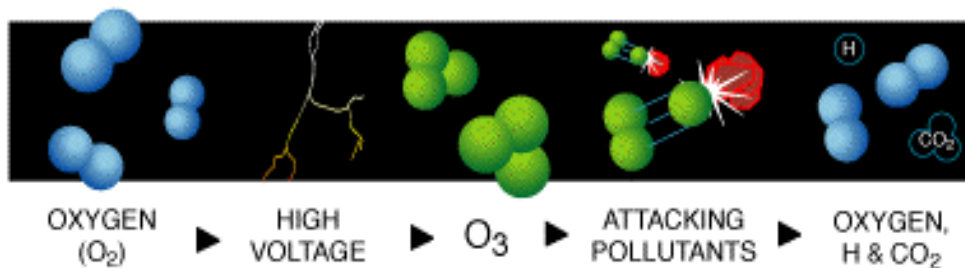
ชนิดของจุลินทรีย์	ค่า Aw ต่ำสุดที่จุลินทรีย์สามารถเจริญได้
แบคทีเรีย	0.91
ยีสต์	0.88
รา	0.80
Halophilic bacteria	0.75
Xerophilic fungi	0.65
Osmophilic yeasts	0.60

ที่มา : Frazier และ Westhoff, 1988

ผลิตภัณฑ์ปลาเค็มที่มีปริมาณเกลือที่สูงจะมีการเจริญของแบคทีเรียที่ชอบเกลือ (Halophilic bacteria) (Gran และ Huss, 1996) โดยค่าวอเตอร์แอคติวิตี (Aw) 0.75 เป็นค่าต่ำสุดที่ Halophilic bacteria สามารถเจริญได้ (Frazier และ Westhoff, 1988) การเจริญของเชื้อ *Staphylococcus arlettae* และ *S. xylosus* (Halophilic bacteria) พบจำนวนมากในปลาคอดเค็มแห้งและรมควัน ซึ่งเชื้อ *S. arlettae* และ *S. xylosus* สามารถเจริญได้ในน้ำเกลือที่มีความเข้มข้น 0.06-4.5 M NaCl และสามารถเจริญได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง 8-45 °C (Vilhelmsson และคณะ, 1997) แบคทีเรียพวก Halophilic bacteria จะมีเอนไซม์ย่อยโปรตีนที่ทำให้เกิดกลิ่นเหม็น การเน่าเสียแบบนี้เรียกว่า reddening ยีสต์ที่เป็นสาเหตุของการเสียในปลาคอด คือ *Sporendium epizoum* (*Hemispora stellata*) ปลาเค็มจะเป็นจุดๆ สีเทาเข้มหรือดำตามลำตัว ส่วนราที่เป็นสาเหตุของการเน่าเสียในปลาเค็ม คือ *Wallemia sebi* (*Sporodonema*) แต่จะไม่พบในเขตร้อน การเน่าเสียที่มีสาเหตุมาจากยีสต์และราจะเรียกรวมการเน่าเสียดังกล่าวว่า dun spoilage (นงนุช, 2538)

โอโซนคืออะไร

โมเลกุลโอโซน (O₃) ประกอบด้วยอะตอมออกซิเจน 3 อะตอม แทนที่จะเป็นโมเลกุลออกซิเจน (O₂) ตามปกติ รวมตัวกันในบรรยากาศ เมื่อโมเลกุลออกซิเจนได้รับรังสีดวงอาทิตย์ ในกระบวนการโฟโตไลซิส (Photolysis) โมเลกุลออกซิเจนจะแตกตัวเป็นอะตอมออกซิเจน 2 อะตอม ซึ่งจะกลับไปรวมตัวกัน 3 อะตอม เกิดเป็นโอโซนอีกครั้งหนึ่ง



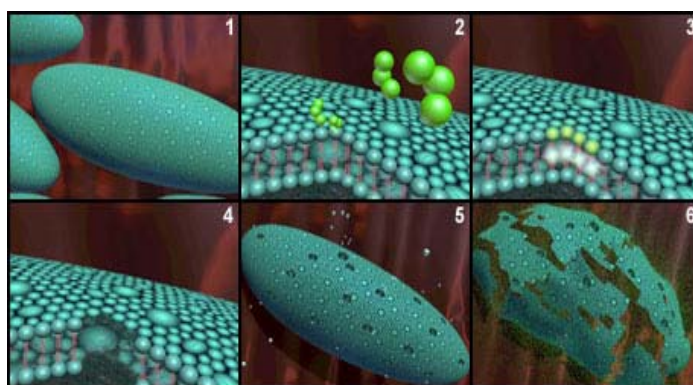
โอโซนเป็นก๊าซธรรมชาติรูปแบบหนึ่งของออกซิเจนที่ไม่เสถียร แต่มีพลังงานในการทำปฏิกิริยา ออกซิเดชันสูง โดยเมื่อทำปฏิกิริยาแล้ว จะไม่เหลือสารพิษตกค้างใดๆ นอกจากออกซิเจน จึงมีการนำโอโซนไปใช้งานอย่างแพร่หลาย ทั้งในครัวเรือน สำนักงาน จนถึงโรงงานอุตสาหกรรม

คุณสมบัติของโอโซน

กลไกการฆ่าเชื้อโรค

เรารู้จักโอโซนในแง่ของสิ่งที่ใช้ฆ่าเชื้อโรคได้อย่างรุนแรงและกว้างขวางที่สุดในโลก เพราะเป็นตัวออกซิไดเซอร์อย่างรุนแรง และกำจัดกลิ่นไม่พึงประสงค์ได้อย่างรวดเร็ว จากการทดลองทั่วโลกพบว่าโอโซน มีพลังในการฆ่าเชื้อโรคมากกว่า คลอรีน 3-5 เท่า และความเร็วในการฆ่าเชื้อโรค 600-3000 เท่า สามารถทำลายเซลล์ไวรัส แบคทีเรีย ในชั่วพริบตา และใช้อย่างกว้างขวางในการทำให้อากาศสดชื่น ถนอมอาหารให้สดนานขึ้น ทำให้น้ำสะอาดขึ้น โดยไม่ทิ้งสิ่งตกค้างไว้ให้เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เป็นตัวกำจัดสารพิษ กำจัดกลิ่นและ เป็นสารฟอกขาว (Kim และคณะ, 1996)

นอกจากนี้กลีนาที่มี การ encapsulate ไว้ก็จะถูกปลดปล่อยออกมาไปจับตัวกับผลิตภัณฑ์ ทำให้มีกลิ่นรสที่ดีขึ้น และโอโซนยังสามารถฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ได้



ภาพที่ 2 การถูกทำลายของเซลล์จุลินทรีย์โดยโอโซน

เครื่องผลิตโอโซนสามารถผลิตโอโซนได้ถึง 500มก./ชั่วโมง สามารถฆ่าเชื้อโรคได้หมดและกำจัดกลิ่นไม่พึงประสงค์ในอากาศ ผิววัตถุและในน้ำได้โดยไม่ต้องเพิ่มสารอย่างอื่นช่วย

คุณสมบัติของเด่นของก๊าซโอโซน

1. ฆ่าเชื้อโรคได้รวดเร็ว โดยเฉพาะ แบคทีเรีย (ทำให้เกิดโรคและกลิ่นเหม็น) ที่ความเข้มข้นเพียง 0.01-0.04 PPM
2. ทำลาย กลิ่น สารเคมี และก๊าซพิษได้ดีเยี่ยม
3. ไม่ทิ้งพิษตกค้าง เพราะเมื่อทำปฏิกิริยากับมลพิษเสร็จทุกครั้ง จะได้ ออกซิเจน (O₂) จึงเป็นการรักษาสิ่งแวดล้อมที่ดี
4. สามารถผลิตขึ้นได้จากอากาศทั่วไป และบริเวณที่มีไฟฟ้าใช้
5. สามารถควบคุมได้ง่ายอย่างอัตโนมัติ
6. ค่าใช้จ่ายในการใช้งานและบำรุงรักษาต่ำมากและใช้ได้ตลอดไป ไม่ต้องคอยเปลี่ยนอันใหม่ เหมือนสารเคมีดับกลิ่นอื่นๆ

การประยุกต์ใช้โอโซนในน้ำ

1. ใช้ล้าง พืช ผัก ผลไม้ เพื่อฆ่าเชื้อโรค สลายสารพิษ ขจัดสารเคมีและยาฆ่าแมลงที่ปนเปื้อน
2. กำจัดกลิ่นคาวในเนื้อสัตว์ อาหารทะเล หรือผักผลไม้
3. ใช้น้ำโอโซนล้างและฆ่าเชื้อโรคในภาชนะต่างๆ
4. ทำให้น้ำดื่มสะอาดและบริสุทธิ์ยิ่งขึ้น
5. ใช้น้ำโอโซนอาบ น้ำ ล้างหน้า สระผม จะทำให้ผิพรรณเปล่งปลั่งยิ่งขึ้น ลดการเป็นสิว
6. ทางกายภาพสามารถใช้ทำความสะอาดอุปกรณ์ต่างๆ ล้างแผลสด แผลอักเสบ เพื่อฆ่าเชื้อโรคและลดการอักเสบของแผล

การประยุกต์ใช้โอโซนในอากาศ

1. กำจัดกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ เช่น กลิ่นอับ กลิ่นอาหาร กลิ่นสี ในห้องน้ำ ห้องครัว ห้องรับแขกหรือห้องที่มีมลพิษ
2. ขจัดก๊าซพิษในอากาศ กำจัดควันต่างๆเช่น ควันบุหรี่ ก๊าซพิษจากท่อไอเสียรถยนต์ และฆ่าเชื้อโรคในอากาศ
3. ใช้อบห้องฆ่าเชื้อโรค ทำให้อากาศบริสุทธิ์

เกณฑ์มาตรฐานของ EPA

ล้างผัก	7	ppm
ล้างภาชนะ	5	ppm
ล้างเท้า	5	ppm
บ้วนปาก	2	ppm
ซักผ้าอ้อม	2	ppm
อาบน้ำ	1	ppm
ตุ้ปปลา	1	ppm
อบห้อง	1	ppm
น้ำดื่ม	0.1	ppm

ในโรงงานอุตสาหกรรมปลาหมึกแช่เยือกแข็งนั้น ปัญหาส่วนใหญ่ที่พบคือปลาหมึกกลิ่นเหม็นคาวซึ่งกลิ่นที่เกิดขึ้นนี้สาเหตุหลักเกิดมาจากเชื้อจุลินทรีย์ ๆ ที่มักพบอยู่ในอาหารทะเลรวมถึงปลาหมึกด้วย เช่นแบคทีเรียในตระกูล *Enterovibrionaceae*, *Photobacteriaceae*, *Salinivibrionaceae*, และ *Vibrionaceae*. เช่น *Enterovibrio norvegicus* และ *Grimontia hollisae*, *Enterovibrio corali*, *Photobacterium eurossenbergii*, *V. brasiliensis*, *V. chagasii*, *V. coralliilyticus*, *V. crassostreae*, *V. fortis*, *V. gallicus*, *V. hepatarius*, *V. hispanicus*, *V. kanaloae*, *V. neonatus*, *V. neptunius*, *V. pomeroyi*, *V. pacinii*, *V. rotiferianus*, *V. superstes*, *V. tasmaniensis*, *V. ezurae*, และ *V. xuii* แบคทีเรียเหล่านี้จะก่อให้เกิดกลิ่นที่ไม่ดีในปลาและทำให้ปลาเน่าเสียได้ (Kim และคณะ, 1996) ซึ่งในปัจจุบันในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์และการทำความสะอาดปลาหมึกนั้นใช้ H_2O_2 ข้อเปรียบเทียบระหว่างการใช้ H_2O_2 และ ozone แสดงดังตาราง

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบการใช้ Ozone กับการใช้สาร interox (H_2O_2)

ไอโซน	คุณสมบัติ	Interox (H_2O_2)
เวลาในการใช้	< 1 ชม.(ขึ้นอยู่กับปริมาณ)	2-3 ชม.
ราคา	ถูก	ปานกลาง
การกำจัดกลิ่นคาว	ดีมาก	ดี
ความสามารถในการออกซิเดชั่น	ดีมาก	ดี
การฟอกสี	ดีมาก	ดี

จากงานวิจัยของหลาย ๆ ท่านเป็นเครื่องยืนยันได้ว่า ozone สามารถฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ได้โดย ozone ทั้งนี้เนื่องจากว่า ozone เป็นสารที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์สูงมาก ozone จะเข้าทำลายผนังเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์ทำให้ผนังเซลล์ถูกทำลายเป็นรูพรุน เป็นสาเหตุให้เซลล์ของ จุลินทรีย์ถูกทำลายและตายไปในที่สุด ดังนั้นจึงสามารถช่วยลดกลิ่นคาวในปลาหมึกและยืดอายุการเก็บรักษาได้

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบลักษณะต่างๆของการใช้ hypochlorite และ ozone ในน้ำ

คุณลักษณะ	Hypochlorite	Ozone
ผลต่อจุลินทรีย์	- ฆ่าจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคพืชและจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายอย่างได้ผล - ฆ่าบางชนิดของจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคในคน - โปรโตซัวสร้างสปอร์มาต่อต้านได้ - การใช้ต้องอยู่ภายใต้การควบคุมอย่างจำกัด	- ฆ่าจุลินทรีย์ก่อโรคพืชและจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายอย่างได้ผลรวมทั้งการสร้างสปอร์ของโปรโตซัว - อัตราการใช้สูงสุดที่จำกัดด้วยค่าการละลายของโอโซน ไม่เกิน 10 µg/ml
ราคา	- สารเคมีราคาถูก - จำเป็นต้องควบคุมบาง pH และความเข้มข้น - การเก็บรักษาคลอรีนต้องการบำรุงรักษาเล็กน้อยและมีราคาถูก	- ไม่มีสารตกค้าง - ราคาต่ำ - ราคาทุนเริ่มต้นสูง - จำเป็นต้องกรองถ่านน้ำกลับมาใช้ใหม่ได้
อิทธิพลต่อ pH	- ประสิทธิภาพลดลงที่ pH มากขึ้นเหนือ 8 - มีการปลดปล่อยก๊าซคลอรีนที่ pH ต่ำ (4 หรือต่ำกว่า)	- ความรุนแรงไม่มีผลมากโดย pH - Ozone สลายตัวที่ pH สูงขึ้น
ผลิตภัณฑ์ฆ่าเชื้อโรค	- มีการควบคุมบ้าง เช่น tri – halo compound โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คลอโรฟอร์ม และต้องมีความใส่ใจในคุณภาพ	- มีการควบคุมน้อย มีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยใน aldehydes, ketone, alcohols และ carboxylic acids ซึ่งถูกสร้างจากสารอินทรีย์, BrO_3^- จาก OBr^-
ความปลอดภัยของ คนงาน	- Chloroamine สามารถทำให้ระคายเคือง - ระบบ chlorine gas ต้องการการวัดที่เหมาะสม - OSHA (TWA) จำกัดสำหรับก๊าซคลอรีนที่ 1 µg/ml	- ก๊าซ ozone จากสารละลายระคายเคืองและต้องจัดการ - MnO_2 ozone มีประสิทธิภาพในการทำละลายและอยู่ได้นาน - OSHA (TWA) จำกัดสำหรับก๊าซคลอรีนที่ 0.1 µg/ml

คุณลักษณะ	Hypochlorite	Ozone
ความคงตัวในน้ำ	- สามารถคงตัวอยู่ได้ในน้ำสะอาดได้นานเป็นชั่วโมง แต่เมื่ออยู่ในน้ำที่สกปรกจะอยู่ได้ไม่นานเพียงไม่กี่นาที	- สามารถคงตัวอยู่ได้ในน้ำสะอาดได้หลายนาทีก และยิ่งถ้าน้ำมีความสกปรกก็สามารถคงตัวอยู่ได้เพียงไม่กี่วินาที
อัตราที่ใช้	- จะจำกัดอยู่ที่ประมาณ 25 – 600 µg/ml. ขึ้นอยู่กับการนำมาประยุกต์ใช้	- ไม่มีการจำกัดปริมาณที่นำมาใช้ โดยจากทฤษฎีของ Henry's Law กล่าวว่าประสิทธิภาพของโอโซนจะมีค่าสูงสุดที่ใช้ในปริมาณ 30 µg/ml. 20 °C และจะเกิดการสูญเสียไปเพียง 5 µg/ml. เท่านั้น
การใช้ในน้ำอุ่น	- มีประสิทธิภาพของการใช้งานได้ดีในน้ำอุ่นหรือน้ำร้อน	- มีประสิทธิภาพของการใช้งานต่ำในน้ำอุ่นหรือน้ำร้อน
อิทธิพลที่มีต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์	- จะทำให้เกิดกลิ่นรสที่ไม่ดีและไม่เป็นที่ต้องการของผู้บริโภค - จะทำให้เกิดบาดแผลแก่ผลิตภัณฑ์ที่เป็นผลไม้ได้ถ้าใช้ในปริมาณที่มากเกินไป 50 µg/ml.	- เกิดการบาดเจ็บของผลิตภัณฑ์ต่ำ โดยเฉพาะพวกผักและผลไม้ที่มีความเปรี้ยวบางและเกิดการบาดเจ็บหรือบาดแผลได้ง่าย
อิทธิพลที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของน้ำ	- ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของน้ำในด้านลบเล็กน้อย เพราะจะทำให้ความเข้มข้นของเกลือในน้ำสูง - ลดค่า BOD ของน้ำลง - ยับยั้งการทำงานของยาฆ่าแมลง	- ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของน้ำในด้านบวกและให้ผลที่ดี - ไม่ทำให้ความเข้มข้นของเกลือในน้ำสูง - ยับยั้งการทำงานของยาฆ่าแมลง - ลดค่า BOD และ COD ของน้ำ - ช่วยย่อยและทำให้เกิดการตกตะกอนของสารชีวะโมเลกุลและสารอินทรีย์ได้ดี - ตกตะกอนเหล็กที่ละลายอยู่ในน้ำได้ดี - กำจัดสีได้
การกัดกร่อน	- จะกัดกร่อนสูงโดยเฉพาะเหล็กและโลหะบางชนิด	- เกิดการกัดกร่อนมากกว่า โดยเฉพาะยางพลาสติกบางชนิดอะลูมิเนียม และเหล็ก

ที่มา: Smilanick และคณะ (1999)

บทที่ 2

ผลของความเข้มข้นและระยะเวลาในการแช่น้ำไอโซนต่อคุณลักษณะทางเคมี กายภาพ และจุลินทรีย์ของเนื้อปลานิลชำแหละสด

บทนำ

ปลาและผลิตภัณฑ์จากสัตว์น้ำ สามารถเสื่อมเสียได้ง่ายเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ชนิดอื่น ซึ่งคุณภาพของผลิตภัณฑ์จะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ (Gram และ Huss, 1996; Manousaridis และคณะ, 2005) โดยเชื้อจุลินทรีย์จะไปย่อยสลายประกอบของเนื้อปลา โดยเฉพาะสารประกอบไนโตรเจนที่ไม่ใช่โปรตีน (non protein nitrogen) จึงเหนี่ยวนำให้เกิดกลิ่นที่ผิดปกติ (off-odor) และทำให้เกิดการเน่าเสียขึ้น (Ababouch และคณะ, 1991; Campos และคณะ, 2005)

ถึงแม้ว่าโรงงานอุตสาหกรรมอาหารจะมีการลดจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนมากับวัตถุดิบด้วยการสเปรย์หรือจุ่มในสารละลายคลอรีนอย่าง โซเดียมไฮโปคลอไรท์ (sodium hypochlorite) โดย Brooks และ Pierce (2007) ได้ทดลองยืดอายุเนื้อสดโดยการล้างด้วยสารประเภทคลอรีน แต่กลับพบว่าคลอรีนไม่สามารถยืดอายุการเก็บได้เนื่องจาก คลอรีนไม่สามารถยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ที่อาจหลงเหลืออยู่หลังการล้างได้ รวมถึงคลอรีนต้องใช้ระยะเวลาค่อนข้างนานในการแทรกซึมผ่านผนังเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์เพื่อไปยับยั้งกิจกรรมทางชีวเคมีของเชื้อจุลินทรีย์ ก่อนทำให้เชื้อจุลินทรีย์ตาย (Nabel, 1988; Cataldo, 2003) นอกจากนี้การใช้สารประเภทคลอรีนยังอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้บริโภค (Brooks และ Pierce, 2007) เนื่องด้วยการล้างผลิตภัณฑ์ด้วยสารประกอบคลอรีน จะทำให้เกิดการรวมตัวของสารประกอบคลอรีนกับสารอินทรีย์ ได้เป็นสารไตรฮาโลมีเทน (trihalomethanes, THMs) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งและยากต่อการทำลาย

การประยุกต์ใช้ไอโซนจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ สหรัฐอเมริกาประกาศให้ไอโซนเป็นสารที่ปลอดภัยต่อสุขภาพ (generally recognized as safe, GRAS) ตั้งแต่ปี 1997 และในปี 2001 ทางสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยาแห่งสหรัฐอเมริกา (USFDA) และกระทรวงเกษตรสหรัฐอเมริกา (USDA) ได้แก้ไขกฎหมายวัตถุเจือปนอาหารให้สามารถใช้ไอโซนทั้งในรูปของก๊าซและของเหลว ในการปรับปรุง เก็บรักษา และแปรรูปอาหารได้อย่างปลอดภัย และสามารถใช้อย่างปลอดภัยโดยตรงกับอาหารประเภท ปลา เนื้อ และสัตว์ปีกได้ (Mielcke และ Ried, 2004) โดย Korich และคณะ (1990) และ Restaino และคณะ (1995) รายงานว่าไอโซนสามารถยับยั้งการเจริญของแบคทีเรีย รา ไวรัสและโพรโตซัวได้ โดยการเข้าไปทำให้ผนังเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์แตก หรือเกิดการแยกเป็นส่วนใหญ่ เพื่อให้เกิดการรั่วของสารประกอบภายใน

เซลล์ ก่อนจะเข้าไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตรงกับสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบในเซลล์ของจุลินทรีย์ (Bringman, 1954; Chang, 1971; Chawla, 2006) ซึ่งไอโซนถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางเพื่อ (1) ลดการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ในปลา (Haraguchi และคณะ, 1969; Goche และ Cox, 1999) ผลิตภัณฑ์สัตว์ปีก (Sheldon และ Brown, 1986; Dave, 1999) ผลิตภัณฑ์เนื้อและนม (Dondo และคณะ, 1992; Gorman และคณะ, 1997) (2) ลดสารอะฟลาทอกซินในถั่วและเมล็ดฝ้าย (Dwankanath และคณะ, 1968) (3) ฆ่าเชื้อในเบคอน เนื้อวัว กลัวย ไข่ เห็ด ซีส และผลไม้ (Kaess และ Weidemann, 1968; Gammon และ Karelak, 1973) (4) ยืดอายุการเก็บรักษา ผักกาดหอม (Kim และคณะ, 1999) สตรอเบอรี่ (Lyons-Magnus, 1999) พริกไทย (Han และคณะ, 2002) รวมถึง (5) ปรับปรุงคุณภาพน้ำดื่ม (Bryant และคณะ, 1992) และบำบัดน้ำเสีย (Stover และ Jarnis, 1981; Rice และคณะ, 2000) เป็นต้น นอกจากนี้ไอโซนยังมีผลต่อการลดแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรคทางเดินอาหาร เช่น *Salmonella Typhimurium*, *Staphylococcus aureus*, *Listeria monocytogenes* และ *E.coli* 0147: H7 (Restaino และคณะ, 1995; Singh และคณะ, 2002) เป็นต้น

ปัจจุบันหลายประเทศมีแนวโน้มขยายการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเพื่อสร้างผลกำไรเข้าประเทศ ซึ่งปลานิลนับว่าเป็นสินค้าทำกำไรตัวหนึ่งเช่นเดียวกับกุ้ง เนื่องจากตลาดทั่วโลกมีความต้องการสูงอย่างต่อเนื่อง โดยประเทศไทยมีการส่งออกปลานิลไปยังสหภาพยุโรปเป็นมูลค่าหลายร้อยล้านบาทต่อปี และมีแนวโน้มของการส่งออกเพิ่มขึ้นทุกปี แม้ว่าปริมาณการส่งออกจะน้อยกว่าการส่งออกไปยังตลาดสหรัฐอเมริกา หากแต่มูลค่าการส่งออกดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า ตลาดสหภาพยุโรปยังคงเป็นตลาดที่รับซื้อปลานิลที่สำคัญตลาดหนึ่งของไทย ซึ่งมีช่องทางที่จะขยายตลาดได้มากขึ้นต่อไปในอนาคต อย่างไรก็ตามขณะนี้กลุ่มประเทศอเมริกาได้ได้ขยายการส่งออกเนื้อปลานิลแช่แข็ง (fresh tilapia fillets) ซึ่งมีราคาสูงกว่าเนื้อปลานิลแช่แข็ง (frozen tilapia fillets) ถึงสองเท่า เข้าไปยังสหรัฐอเมริกาเป็นจำนวนมาก (<http://news.thaieurope.net/content/view/2308/63/>)

ความเคลื่อนไหวของกลุ่มประเทศอเมริกาได้ในการให้ความสนใจขยายตลาดการส่งออกปลานิลไปยังสหรัฐอเมริกาครั้งนี้ เป็นการส่งสัญญาณว่ากลุ่มประเทศเหล่านั้น กำลังก้าวขึ้นมาเป็นคู่แข่งสำคัญต่อการส่งออกสินค้าปลานิลในตลาดโลกที่ไทยควรจับตามองอย่างใกล้ชิด ถึงแม้ว่าประเทศไทยจะมีตลาดรับซื้อปลานิลขนาดใหญ่ทั้งในสหรัฐอเมริกา และสหภาพยุโรปอยู่แล้ว แต่ควรมีการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ๆ และกระบวนการแปรรูปที่มีประสิทธิภาพในการผลิตปลานิลให้ได้คุณภาพที่ดีขึ้น เพื่อเป็นการยกระดับการแข่งขันกับประเทศอื่นๆ ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการศึกษานี้จึงเป็นการศึกษาผลของการประยุกต์ใช้ไอโซน โดยศึกษาถึงผลของความเข้มข้น และระยะเวลาในการแช่ไอโซนต่อการลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อปลานิลแช่แข็ง รวมถึงติดตามผลของ

โอโซนต่อการเปลี่ยนแปลงสี เนื้อสัมผัส และองค์ประกอบทางเคมีของเนื้อปลานิล เปรียบเทียบคุณลักษณะต่างๆ กับสภาวะควบคุมที่ไม่ผ่านการแช่น้ำโอโซน

วัตถุประสงค์และวิธีการทดลอง

การเตรียมปลานิล

ปลานิล (Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*) ที่มีชีวิตถูกจับจากบ่อในจังหวัดนครปฐม และปลาจะได้รับออกซิเจนตลอดระยะทางที่ขนส่งมายังภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ปลานิลที่เลือกมาใช้ในการทดลองมีอายุประมาณ 6 เดือน และมีน้ำหนักประมาณ 500 ± 50 กรัม ทำการชั่งปลาไว้ในสภาวะที่ไม่มีความเครียดก่อนทำให้ตาย ทำการชอดเกล็ด ควักไส้ และแล่แบบไม่ติดก้าง นำเนื้อปลาที่ได้มาแช่ในน้ำเย็นที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส นาน 2 นาที ก่อนทำการทดลองต่อไป โดยชิ้นปลาที่แล่แล้วจะมีความยาวและน้ำหนักเฉลี่ย $20.0-22.0$ เซนติเมตร และ 100 ± 20 กรัมต่อชิ้น ตามลำดับ

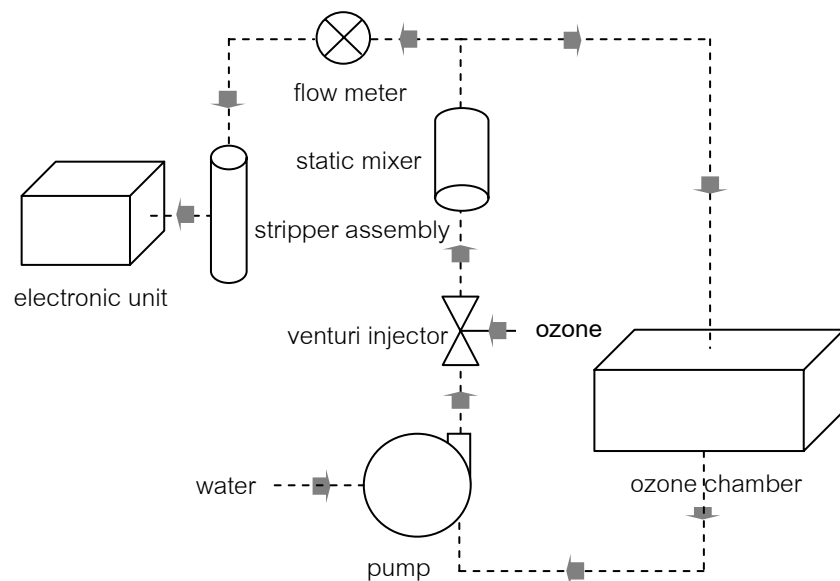
สภาวะในการทดลอง

ปริมาณความเข้มข้นของโอโซนที่ละลายได้ (dissolved ozone, dO_3) ที่ใช้ในการทดลองมี 3 ระดับ คือ 1 2 และ 3 ppm โดยโอโซนจะถูกละลายที่สภาวะปิดในน้ำเย็นที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ในถังโพลีเอทิลีน (polyethylene) ชนิด HDPE เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำจะช่วยเพิ่มปริมาณและควบคุมการละลายของโอโซนในน้ำ หลังจากนั้นนำเนื้อปลาที่แล่แล้ว 6 ชิ้น มาแช่ในน้ำโอโซนปริมาณ 25 ลิตร ที่ความเข้มข้นต่างๆ กันที่เป็นระยะเวลา 30 60 และ 90 วินาที หลังจากนั้นนำปลาที่ได้มาวางบนตะแกรงสเตนเลสที่ฆ่าเชื้อแล้ว 1 นาที ที่อุณหภูมิห้อง เก็บชิ้นปลาในถุงโพลีเอทิลีนที่ปิดสนิท และเก็บรักษาในน้ำแข็งก่อนนำไปวิเคราะห์คุณลักษณะทางเคมี กายภาพ และจุลินทรีย์ต่อไป ทำการทดลองแต่ละสภาวะ 3 ซ้ำ ทั้งนี้สภาวะควบคุมคือเนื้อปลาที่ไม่ผ่านการแช่น้ำโอโซน

การสร้างโอโซน

โอโซนจะถูกสร้างในสภาวะปิดที่มีระบบการหมุนเวียนดังภาพที่ 3 ซึ่งโอโซนจะผลิตจาก corona discharge (บริษัท Active Science จำกัด, ประเทศไทย) โดยการส่งออกซิเจนเข้มข้นที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 90-95 เข้าสู่ระบบ แล้วใช้กระแสไฟฟ้าสลับที่มีแรงเคลื่อนที่สูงผ่านเข้าไปในช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด เพื่อกระตุ้นให้อิเล็กตรอนของก๊าซออกซิเจนแตกตัว ก่อนจะไปรวมตัวกับก๊าซออกซิเจนโมเลกุลอื่นเป็นก๊าซโอโซน ในการทดลองจะควบคุมอัตราการไหลของออกซิเจนที่ปริมาณ 4.0 ลิตรต่อนาทีเพื่อสร้างโอโซนความเข้มข้นสูง โอโซนที่สร้างได้จะถูกส่งไป

ละลายในน้ำเย็นที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ผ่าน venturi injector ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร และเพิ่มปริมาณการละลายของโอโซนในน้ำด้วย static mixer



ภาพที่ 3 กระบวนการสร้างโอโซนในระบบปิด

การวัดปริมาณโอโซน

ปริมาณความเข้มข้นของโอโซนที่ละลายได้จะถูกวัดด้วยเครื่องวัดค่าการละลายของโอโซน (รุ่น DOM-1, บริษัท Ecosensor, ประเทศสหรัฐอเมริกา) โดยเครื่องจะสามารถวัดค่าการละลายของโอโซนได้ในช่วง 0-5 ppm ทั้งนี้การทำงานของเครื่องจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ stripper assembly และ electronic unit ซึ่ง stripper assembly จะนำก๊าซโอโซนปริมาณน้อยๆ ที่ถูกแยกออกจากน้ำ (เพื่อลดการรบกวนของสารเคมีอื่นๆ เช่นคลอรีน หรือเกลือที่มีในน้ำ) แล้ว ปริมาณน้อยกว่า 0.2 ลิตร ต่อนาที ส่งไปยังเซนเซอร์ในส่วน electronic unit อย่างต่อเนื่อง ส่วนของ electronic unit ประกอบด้วย เซนเซอร์ชนิด heated metal oxide semiconductor (HMOS) วงจรไฟฟ้า และ relay set point

ความดันของน้ำที่ส่งเข้าไปยังเครื่องวัดจะถูกควบคุมให้ไม่ต่ำกว่า 15 psi ในขณะเดียวกัน เซนเซอร์จะถูกสอบวัดทุกครั้งที่มีการใช้งานด้วยการวัดปริมาณโอโซนจากวิธีวัดสี (บริษัท Ebase จำกัด, ประเทศไทย) ซึ่งสามารถวัดค่าการละลายของโอโซนได้ในช่วง 0-3 ppm

การวิเคราะห์ทางจุลินทรีย์

ทำการวิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์ในตัวอย่างปลา 2 บริเวณ คือ (1) บริเวณหนัง โดยทำการ swab หนังปลาที่ขนาดพื้นที่ 5×5 เซนติเมตร ด้วย peptone water (บริษัท Sigma-Aldrich Chemica, GmbH, ประเทศเยอรมัน) ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 ที่ผ่านการสเตอไรล์แล้ว และ (2) ในเนื้อปลา โดยการนำตัวอย่างปลาน้ำหนัก 25 กรัม มาผสมกับ peptone water ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 ปริมาตร 225 มิลลิลิตร ตีให้เข้ากันด้วย stomacher (Seward Medical, ประเทศอังกฤษ) ทั้งนี้ ตัวอย่างทั้ง 2 บริเวณจะถูกนำมาเจือจางให้มีความเข้มข้นที่ระดับต่างๆ ด้วย peptone water วิเคราะห์ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด (total plate count) และยีสต์รา ในตัวอย่าง โดยการบ่มที่ อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 48 ชั่วโมง ตามลำดับ

การวิเคราะห์ทางกายภาพ

สี (color)

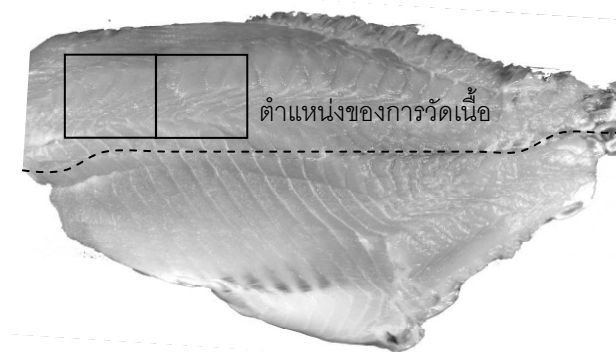
วัดค่า L^* a^* และ b^* ของตัวอย่างตามวิธีของ CIE (1997) ด้วย color-view™ spectrophotometer (รุ่น 9000, Gardner, ประเทศสหรัฐอเมริกา) โดยใช้แสงชนิด D65 และมีการหมุนของแสง 10° ทั้งนี้ค่า L^* จะบ่งบอกถึงค่าความสว่าง ($L^*=0$ แสดงความเป็นสีดำ และ $L^*=100$ แสดงความเป็นสีขาว) ค่า a^* แสดงค่าความเป็นสีแดง เมื่อ $a^*>0$ และ ค่า b^* แสดงค่าความเป็นสีเหลือง เมื่อ $b^*>0$

วัดค่าความแตกต่างของสีระหว่างตัวอย่างควบคุมและตัวอย่างที่แช่น้ำไอโซนโดยการคำนวณจาก $\Delta E = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$ รวมถึงวิเคราะห์ค่าความเข้มสี (chroma) จาก $C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$ ค่า มุมของสี (hue angle) จาก $h_{ab} = \tan^{-1}(b^*/a^*)$ เมื่อ $h_{ab}=0^\circ$ สำหรับ red hue และ $h_{ab}=90^\circ$ สำหรับ yellow hue และค่าดัชนีความขาว (whiteness index, WI) จาก $WI = 100 - [(100-L)^2 + a^2 + b^2]^{1/2}$ (Bricknell และ Hartel, 1998) โดยสีของเนื้อปลาจะถูกวัด 3 ตำแหน่งคือ ส่วนบนใกล้หัว ส่วนกลาง และส่วนล่างใกล้หาง ตามลำดับ ทำการวัดค่า 3 ซ้ำ

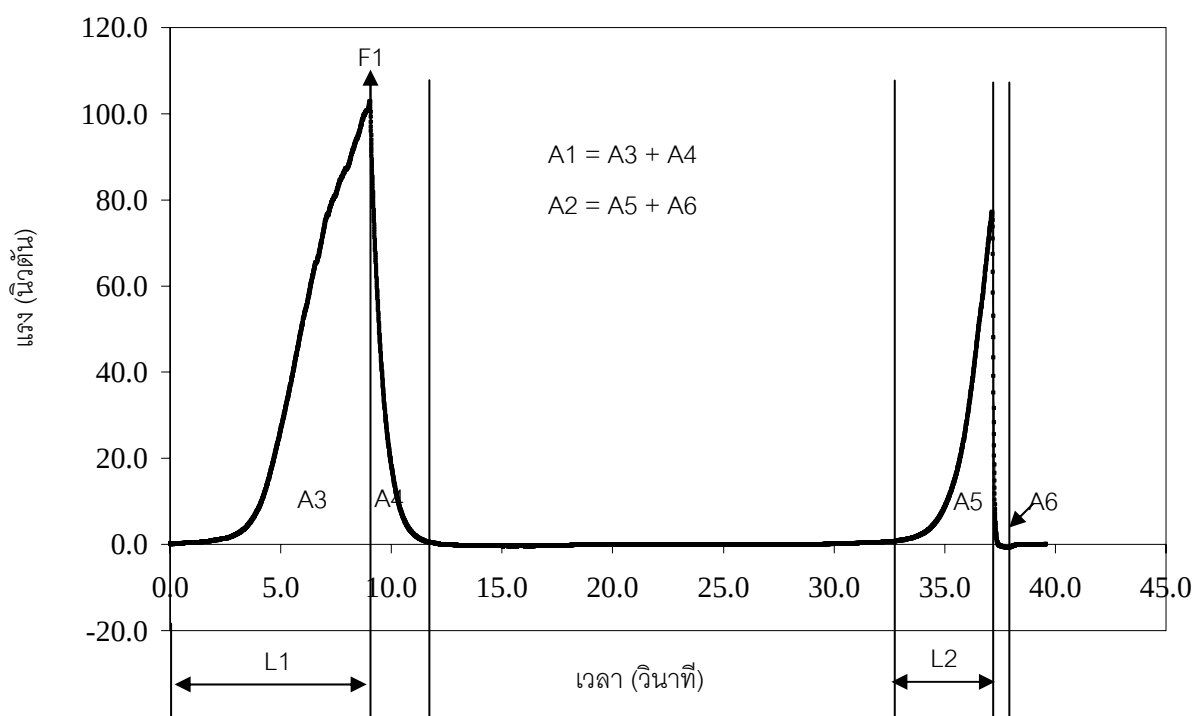
เนื้อสัมผัส (texture)

วัดเนื้อสัมผัสของเนื้อปลาด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (รุ่น TA-XT2i, บริษัท Stable Micro System จำกัด, ประเทศอังกฤษ) ทำการวัดแบบ texture profile analysis (TPA) ด้วยหัววัดอลูมิเนียมทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ความเร็วของหัววัดก่อนวัดเป็น 5 มิลลิเมตรต่อวินาที ขณะวัดเป็น 1 มิลลิเมตรต่อวินาที และความเร็วหลังวัดเป็น 10 มิลลิเมตรต่อ

วินาที ควบคุมค่าความเค้นของการกดตัวอย่างที่ร้อยละ 70 ทั้งนี้ตัวอย่างเนื้อปลาที่ผ่านการแช่ไอโซนจะถูกตัดเป็นชิ้นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 3×3 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 4 และทำการวัดเนื้อสัมผัสทันที ตัวอย่างจะถูกกด 2 ครั้งห่างกันครั้งละ 25 วินาที



ภาพที่ 4 ตำแหน่งของเนื้อปลาที่ตัดเพื่อวัดเนื้อสัมผัส



ภาพที่ 5 กราฟเนื้อสัมผัสและการคำนวณค่าเนื้อสัมผัสต่างๆโดย hardness = F1, springiness = $L2/L1$, cohesiveness = $A2/A1$, gumminess = $F1*(A2/A1)$, chewiness = $F1*(A2/A1)*(L2/L1)$, และ resilience = $A6/A4$

วิเคราะห์ค่าเนื้อสัมผัส 6 ค่า ดังแสดงในภาพที่ 5 ดังนี้ (1) hardness คือแรงสูงสุดที่เกิดจากการกดครั้งที่หนึ่ง (2) cohesiveness วัดจากพื้นที่ของงานระหว่างการกดครั้งที่สองต่อการกดครั้งที่หนึ่ง (3) springiness วัดจากระยะทางที่ทำให้เกิดแรงกดสูงสุดครั้งที่สองต่อการกดครั้งที่หนึ่ง (4) gumminess คำนวณจากผลคูณของค่า hardness กับค่า cohesiveness (5) chewiness คำนวณจากผลคูณของค่า gumminess กับค่า springiness และ (6) resilience คำนวณจากพื้นที่ที่เกิดจากการถอนหัววัดครั้งที่หนึ่งต่อครั้งที่สอง

ส่วนค่าความเครียดปกติ (normal stress) หาจากแรงสูงสุดต่อพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง ค่าความเค้นปกติ (normal strain) หาจากระยะทางสูงสุดที่เกิดจากการกดครั้งที่หนึ่งต่อความหนาของตัวอย่าง และค่าดัชนีวัดความแน่นเนื้อ (index of firmness) หาจากค่าความชันจากจุดเริ่มต้นของการวัดจนถึงจุดที่เกิดแรงสูงสุดจากการกดครั้งที่หนึ่ง ทำการวัดตัวอย่างจำนวน 3 ซ้ำ

ความชุ่มน้ำ (juiciness)

ตัดเนื้อปลาน้ำหนัก 1 กรัม ให้มีพื้นที่หน้าตัด 5 ตารางมิลลิเมตร วางบนกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 หลังจากนั้นนำตุ้มน้ำหนักขนาด 5 กิโลกรัมมาวางทับ นาน 1 นาที ค่าความชุ่มน้ำ คำนวณจากน้ำหนักของน้ำที่สูญเสียไประหว่างการกดต่อน้ำหนักของตัวอย่าง 100 กรัม

การวิเคราะห์ทางเคมี

วิเคราะห์องค์ประกอบของเนื้อปลาดังนี้ ความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้าใยอาหาร และ คำนวณหาปริมาณคาร์โบไฮเดรตโดยประมาณ

ปริมาณความชื้น (moisture content)

หาความชื้นของตัวอย่างโดยการนำตัวอย่างน้ำหนักประมาณ 3 กรัม ใส่ในตู้อบลมร้อน (รุ่น ED53, WTB binder, ประเทศเยอรมัน) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ตาม AOAC (2000) วิธีที่ 950.46 อบตัวอย่างจนกระทั่งน้ำหนักคงที่ คำนวณค่าความชื้นฐานเปียกจากร้อยละของผลต่างระหว่างน้ำหนักสดกับน้ำหนักแห้งต่อน้ำหนักสด ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

ปริมาณโปรตีน (protein content)

ปริมาณโปรตีนในตัวอย่างหาจากปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน ตาม AOAC (1995) วิธีที่ 955.04 ปริมาณโปรตีนในตัวอย่างคำนวณได้จากผลคูณของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดกับ 6.25 ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

ปริมาณไขมัน (fat content)

ปริมาณไขมันทั้งหมดในตัวอย่งหาจากการสกัดด้วย soxhlet ตาม AOAC (1995) โดยใช้สารละลายผสมของปิโตรเลียมอีเทอร์ และเฮกเซนในการสกัด ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

ปริมาณเถ้า (ash content)

ตัวอย่างเนื้อปลาจะถูกบดและนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ใน muffle furnace (รุ่น BFW 11/13, Carbolite, ประเทศอังกฤษ) ตาม AOAC (2000) วิธีที่ 923.03 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณกรัมเถ้าต่อตัวอย่างปลา 100 กรัม ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

ปริมาณใยอาหาร (fiber content)

วิเคราะห์ปริมาณใยอาหารตาม AOAC (1995) วิธีที่ 991.43 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณกรัมใยอาหารต่อตัวอย่างปลา 100 กรัม ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

ค่าความเป็นกรดต่าง (pH)

นำตัวอย่างเนื้อปลาน้ำหนัก 5 กรัม มาปั่นกับน้ำกลั่น 45 มิลลิลิตร ด้วยเครื่องปั่น นาน 30 วินาที วัดค่าความเป็นกรดต่างด้วยเครื่องวัดค่าความเป็นกรดต่าง (รุ่น 510 pH meter, Eutech, บริษัท Cyberscan จำกัด, ประเทศสิงคโปร์)

การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์ผลการทดลองด้วยโปรแกรม General Linear Model (GLM) หาค่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Least Significant Difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SAS (เวอร์ชัน 8.1, SAS Inst., Cary, NC, ประเทศสหรัฐอเมริกา)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของไอโซนต่อการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์

ไอโซนมีประสิทธิภาพในการเป็นสารต้านเชื้อจุลินทรีย์ได้ในช่วงกว้าง สามารถต้านเชื้อได้ทั้งแบคทีเรีย รา ไวรัส โปรโตซัว และสปอร์ของแบคทีเรียและรา (Khadre, Yousef, และ Kim, 2001; Pascual, Llorca, และ Canut, 2007) จากการทดลองพบว่า ความเข้มข้นและระยะเวลาในการแช่น้ำไอโซนที่มากขึ้นส่งผลให้ปริมาณยีสต์/รา บริเวณหนังปลานิล ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด และปริมาณยีสต์/รา ที่เนื้อปลานิลลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ส่วนปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดบริเวณหนังปลา มีแนวโน้มที่จะลดลงตามความเข้มข้น และระยะเวลาในการแช่น้ำไอโซนที่

มากขึ้นแต่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อปลาในสภาวะควบคุมที่ไม่ผ่านการแช่โอโซน พบว่าการใช้โอโซนส่งผลให้ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดและปริมาณยีสต์/รา ทั้งที่บริเวณหนังและเนื้อปลาลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 3.1) เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิไดเซอร์ที่รุนแรงจึงสามารถฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ได้

การฆ่าเชื้อของโอโซนจะมีกระบวนการที่ซับซ้อนในการจับกับเซลล์เมมเบรน ส่วนประกอบของผนังเซลล์ เช่น ไขมันไม่อิ่มตัว และสารประกอบที่อยู่ภายในเซลล์ เช่น เอนไซม์ และกรดนิวคลีอิก โดยปกติเชื้อจุลินทรีย์จะถูกทำลายจากการทำให้ผนังเซลล์แตก หรือเกิดการแยกเป็นส่วนๆ เพื่อให้เกิดการรั่วของสารประกอบภายในเซลล์ กลไกการทำงานของโอโซนในการยับยั้งจุลินทรีย์เกิดขึ้นได้โดยโมเลกุลของโอโซนจะเข้าไปทำปฏิกิริยาโดยตรงกับสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบในเซลล์ของจุลินทรีย์ ซึ่งปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นสาเหตุสำคัญในการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการใช้โอโซน (Bringman, 1954; Chang, 1971; Chawla, 2006) โดยจุดแรกที่เกิดการสัมผัสระหว่างโอโซนและเชื้อแบคทีเรียจะเกิดบริเวณเซลล์เมมเบรน ทำให้เกิดการออกซิเดชันของกรดอะมิโน เช่น ทริปโตเฟน (tryptophan) หรือการออกซิเดชันของไกลโคโปรตีน (glycoprotein) และไกลโคลิพิด (glycolipid) ที่ผนังเซลล์ (Scott และ Leshner, 1963; Goldstein และ McDonagh, 1975; Chawla, 2006) นอกจากนี้อนุมูลตัวกลางอิสระที่เกิดจากกระบวนการออกซิเดชันจะเป็นตัวเข้าทำลายเซลล์เมมเบรน ไฮโดรพลาสซึมโปรตีนและชั้นของไขมันในเซลล์จุลินทรีย์ ทำให้เกิดการจับตัวเป็นก้อนโปรตีนแล้วทำให้เซลล์แตก หรือการเข้าทำลายระบบหายใจของเซลล์จุลินทรีย์ได้ Dave (1999) พบว่าโอโซนสามารถทำลายผนังเซลล์ของ *Salmonella enteritidis* ได้ ซึ่งโอโซนอาจเข้าไปทำลายหน้าที่ของเซลล์ โดยการทำปฏิกิริยากับหมู่ซัลไฮดริล (sulfhydryl) ของเอนไซม์ที่มีส่วนในการเกิดเมแทบอลิซึม (metabolism) ของเซลล์ โดยเฉพาะซิสเตอีน (cysteine) (Ingram และ Haines, 1949; Chang, 1971; Chawla, 2006) ประสิทธิภาพของโอโซนในการทำลายเชื้อจุลินทรีย์จะเร็วกว่าคลอรีน เนื่องจากคลอรีนต้องแพร่กระจายเข้าสู่เซลล์ผ่านผนังเซลล์ แล้วจึงไปยับยั้งกิจกรรมทางชีวเคมีของเชื้อจุลินทรีย์ ก่อนทำให้เชื้อจุลินทรีย์ตาย (Nabel, 1988; Cataldo, 2003)

นอกจากนี้โอโซนยังมีประสิทธิภาพในการลดการเกิดกิจกรรมของพลาสมิดดีเอ็นเอ (plasmid DNA) (Mura และ Chung, 1990) ของเชื้อจุลินทรีย์ โมเลกุลของโอโซนสามารถเข้าทำลายเอนไซม์ DNA หรือ RNA ของเซลล์จุลินทรีย์ได้ (ศิริ, 2004) จากการศึกษาของ Kim และคณะ (1980) พบว่าโอโซนเข้าไปทำให้เชื้อจุลินทรีย์ปล่อยกรดไรโบนิวคลีอิก (ribonucleic acid; RNA) และกรดไรโบนิวคลีอิกที่ถูกปล่อยออกมาจะถูกออกซิเดชันโดยโอโซน ทั้งนี้จากการทดลองผลของ Sproul และ Kim (1982) พบว่ากลไกนี้จะเกิดเช่นเดียวกันเมื่อมีการปลดปล่อยของกรดดีออกซีไรโบนิวคลีอิก (deoxyribo-nucleic acid; DNA) (Sproul และ Kim, 1982) ทั้งนี้เชื้อจุลินทรีย์แต่ละชนิดจะมีความไวต่อการถูกทำลายโดยโอโซนแตกต่างกัน เชื้อแบคทีเรียจะสามารถถูกทำลายได้ง่ายกว่ายีสต์/

รา เชื้อแบคทีเรียแกรมบวกสามารถทำลายได้ง่ายกว่าแกรมลบ ในขณะที่สปอร์สามารถทนต่อไอโซนได้มากกว่าเซลล์ที่มีชีวิต (Pascual, Llorca, และ Canut, 2007)

จากการทดลองพบว่าการแช่น้ำไอโซนที่ความเข้มข้น 3 ppm นาน 90 วินาที สามารถลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาจากการทดลองพบว่าการใช้ไอโซนที่ความเข้มข้น 3 ppm นาน 90 วินาที สามารถลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด และปริมาณยีสต์/รา ที่บริเวณหนังและเนื้อปลาสดได้ร้อยละ 52.20 43.82 41.52 และ 39.60 ตามลำดับ (ตารางที่ 5) จะสังเกตได้ว่า ไอโซนสามารถลดเชื้อจุลินทรีย์ที่บริเวณหนังได้มากกว่าภายในเนื้อ เนื่องจากบริเวณหนังเป็นบริเวณที่สัมผัสกับไอโซนโดยตรง

จากการทดลองจะเห็นว่าความเข้มข้นของไอโซนที่ 3 ppm ส่งผลต่อการลดลงของปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตามการเพิ่มความเข้มข้นของไอโซนให้สูงกว่า 3 ppm อาจจะช่วยให้สามารถช่วยลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในปลานิลลงได้อีก แต่จากการทดลองเบื้องต้นพบว่า ความเข้มข้นที่ผลิตได้ 3 ppm เป็นค่าจำกัดสูงสุด เนื่องจากปริมาณไอโซนที่เพิ่มมากกว่านี้จะทำให้เกิด off-gassing ที่ส่งผลกระทบต่อผู้ใช้งานได้ เช่นเดียวกับระยะเวลาในการแช่น้ำไอโซน จากการทดลองนี้พบว่าเวลา 90 วินาทีเป็นเวลาสูงสุดที่สามารถรักษาความเข้มข้นของไอโซนให้คงที่ตลอดการแช่เนื้อปลาได้

ตารางที่ 5 ผลของความเข้มข้น และระยะเวลาในการแช่น้ำไอโซนต่อปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ของหนังและเนื้อปลานิล

ความเข้มข้น (ppm)	ระยะเวลา (วินาที)	ผิวหนัง (บริเวณหนัง)		เนื้อ	
		ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด	ยีสต์และรา	ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด	ยีสต์และรา
		(log cfu/cm ²)	(log cfu/ cm ²)	(log cfu/g)	(log cfu/g)
1	30	2.97 ^b (0.50)	2.31 ^b (0.09)	4.65 ^b (0.56)	4.05 ^b (0.12)
	60	2.85 ^{bc} (0.24)	1.99 ^c (0.04)	4.22 ^c (0.74)	3.71 ^c (0.07)
	90	2.80 ^{bc} (0.16)	1.94 ^c (0.04)	3.78 ^d (0.81)	3.58 ^d (0.08)
2	30	2.82 ^{bc} (0.29)	1.99 ^c (0.06)	3.65 ^e (0.12)	3.48 ^e (0.11)
	60	2.78 ^{bc} (0.95)	1.89 ^c (0.03)	3.40 ^g (0.09)	3.15 ^g (0.05)
	90	2.69 ^c (0.09)	1.76 ^d (0.05)	3.12 ⁱ (0.15)	3.02 ^h (0.07)
3	30	1.91 ^d (0.76)	1.73 ^d (0.05)	3.51 ^f (0.28)	3.25 ^f (0.01)
	60	1.88 ^d (0.32)	1.66 ^{de} (0.10)	3.33 ^h (0.17)	3.01 ^h (0.13)
	90	1.74 ^d (0.76)	1.59 ^e (0.03)	3.07 ⁱ (0.23)	2.70 ⁱ (0.07)
Control		3.64 ^a (0.39)	2.83 ^a (0.08)	5.25 ^a (0.38)	4.47 ^a (0.03)

แสดงผลในรูปของ ค่าเฉลี่ย (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

n = 18

^{a-j}, ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อในร้อยละ 95

ผลของโอโซนต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทางกายภาพ

สี

จากการศึกษาผลของความเข้มข้น และระยะเวลาในการแช่น้ำโอโซนต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะด้านสีของเนื้อปลานิลพบว่า ความเข้มข้นของโอโซนที่มากขึ้นส่งผลให้เนื้อปลานิลมีค่าความสว่าง ค่ามุมของสี (สีเหลือง) ค่าความแตกต่างของสีระหว่างตัวอย่างควบคุมและตัวอย่างที่แช่น้ำโอโซน และค่าดัชนีความขาวเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ส่วนค่าความเป็นสีแดง ค่าความเป็นสีเหลือง และค่าความเข้มของสีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) (ตารางที่ 6)

ในขณะเดียวกันระยะเวลาในการแช่น้ำโอโซนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่ามุมของสี ค่าความแตกต่างของสี และค่าดัชนีความขาวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ส่วนค่าความสว่าง ค่าความเป็นสีแดง ค่าความเป็นสีเหลือง และค่าความเข้มของสีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) (ตารางที่ 6)

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบผลของตัวอย่างที่แช่น้ำโอโซนกับตัวอย่างควบคุมที่ไม่ผ่านการแช่น้ำโอโซนพบว่า เนื้อปลานิลที่แช่น้ำโอโซนจะมีค่าความสว่าง ค่ามุมของสี (สีเหลือง) และค่าดัชนีความขาวมากกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยตัวอย่างควบคุมจะมีค่ามุมของสีใกล้เคียงสีแดง ส่วนค่าความเป็นสีแดง ค่าความเป็นสีเหลือง และค่าความเข้มสี น้อยกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) จากการเปรียบเทียบผลของการใช้โอโซนสภาวะที่ดีที่สุดที่ความเข้มข้น 3 ppm เป็นระยะเวลา 90 วินาที ต่อคุณลักษณะด้านสีของเนื้อปลานิลพบว่า โอโซนส่งผลให้ค่าความสว่าง ค่า hue angle และค่าดัชนีความขาวสูงกว่าตัวอย่างควบคุมร้อยละ 25.92 48.94 และ 26.60 ตามลำดับ ส่วนค่าความเป็นสีแดง ค่าความเป็นสีเหลือง และค่าความเข้มสี ต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมร้อยละ 66.59 16.93 และ 13.19 ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าการใช้โอโซนในการล้างช่วยให้เนื้อปลานิลมีสีขาวขึ้นกว่าเนื้อปลานิลที่ไม่ผ่านการล้างโอโซน โดย Chen และคณะ (1997) และ Kim และคณะ (1999) มีแนวคิดที่โอโซนน่าจะเข้าไปทำลายโครงสร้างของฮีม (heme) ในไมโอโกลบิน (myoglobin) หรือฮีโมโกลบิน (hemoglobin) ทำให้สีของเนื้อปลาจางลง ผลที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาของ Stivarius และคณะ (2002) ที่พบว่าการใช้น้ำโอโซนที่อุณหภูมิ 7.2 องศาเซลเซียสในระหว่างการตัดแต่งเนื้อวัวนาน 7 นาที ส่งผลให้ค่าความสว่าง และค่ามุมของสีสูงขึ้น ในขณะที่ค่าความเป็นสีแดงลดลง เนื่องจากโอโซนส่งผลต่อการลดลงของปริมาณออกซิไมโอโกลบิน (oxymyoglobin) ในเนื้อ จากการที่โอโซนมีคุณสมบัติเป็นสารออกซิไดซ์ (oxidize) ที่รุนแรง จึงส่งผลต่อสารประกอบอินทรีย์หลายชนิด (Michelsen, 1992; Tiwari และคณะ, 2008) จากรายงานการวิจัยพบว่าการใช้โอโซนในสีอินทรีย์ส่งผลให้เกิดการจางของสีเนื่องจากผล

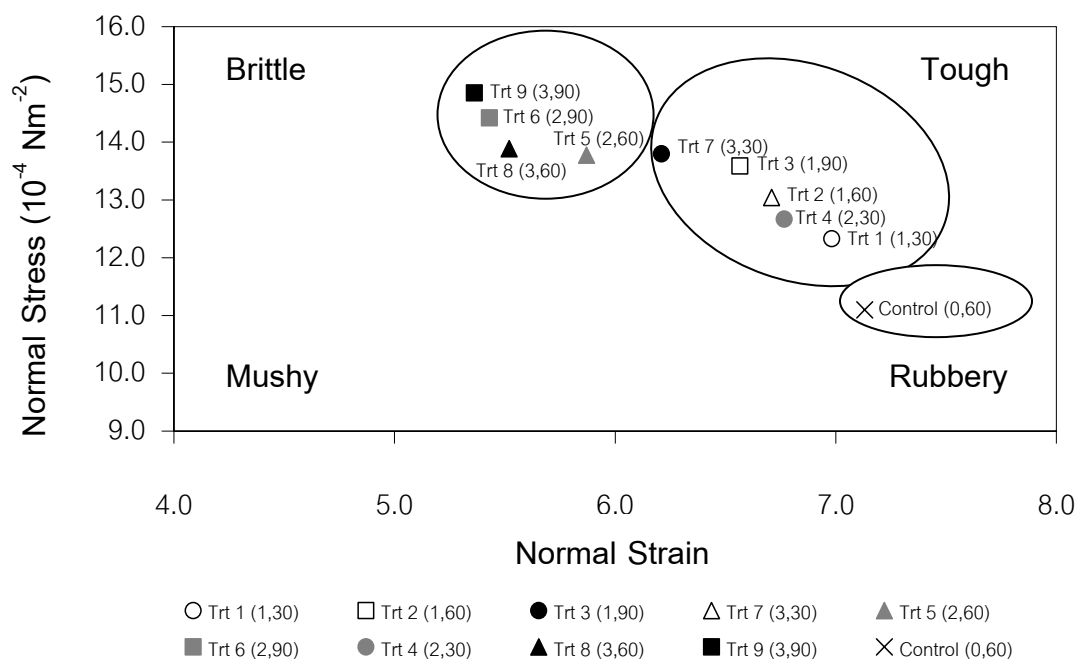
ของการออกซิเดชัน (Nebel, 1975) ซึ่ง Tiwari และคณะ (2008) รายงานว่าไฮดรอกซิลและอนุมูลไฮดรอกซี (hydroxyl radical, OH-) อาจไปทำให้วงแหวนอะโรมาติก (aromatic ring) ที่เป็นองค์ประกอบของสารสีแตกออก หลังจากนั้นจึงเกิดการออกซิเดชันของกรดอินทรีย์ (organic acid) แอลดีไฮด์ (aldehyde) และคีโตน (ketone) ทำให้สีของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงไป

เนื้อสัมผัส

ผลของความเข้มข้นและระยะเวลาในการแช่น้ำไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของเนื้อปลานิลแสดงดังตารางที่ 7 จากผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นและระยะเวลาในการแช่น้ำไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ส่งผลให้ค่าคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสทุกค่า ได้แก่ ค่า hardness ค่า springiness ค่า cohesiveness ค่า gumminess ค่า chewiness ค่า resilience ค่า juiciness และค่า firmness มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบผลของตัวอย่างที่แช่น้ำไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับตัวอย่างควบคุมที่ไม่ผ่านการแช่น้ำไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์พบว่า เนื้อปลานิลที่แช่น้ำไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะมีค่า hardness ค่า gumminess ค่า chewiness ค่า juiciness และค่า firmness สูงกว่าเนื้อปลาที่ไม่แช่น้ำไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยเมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างควบคุมกับตัวอย่างที่แช่น้ำไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 3 ppm นาน 90 วินาทีพบว่า ค่า hardness ค่า springiness ค่า cohesiveness ค่า gumminess ค่า chewiness ค่า resilience ค่า juiciness และค่า firmness ของเนื้อปลาที่แช่น้ำไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 33.73 26.88 7.14 33.64 54.34 29.41 63.11 และ 56.23 ตามลำดับ

ในขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของเนื้อปลานิลจากความสัมพันธ์ของค่า normal stress และค่า normal strain ดังแสดงในภาพที่ 6 พบว่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และระยะเวลาในการแช่น้ำไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มากขึ้น ส่งผลให้ค่าแรงในการกดให้ตัวอย่างเสียรูป (normal stress) เพิ่มขึ้น และส่งผลให้ระยะทางในการกดทำให้ตัวอย่างเสียรูป (normal strain) ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของค่าเนื้อสัมผัสต่างๆ ที่แสดงในตารางที่ 3 อย่างไรก็ตามคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของเนื้อปลานิลที่ได้จากความสัมพันธ์ของค่า normal stress และค่า normal strain อาจแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม คือ (1) สภาวะในการแช่น้ำไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 2 และ 3 ppm นาน 60 และ 90 วินาที ซึ่งตัวอย่างที่ได้มีแนวโน้มจะให้ลักษณะเนื้อสัมผัสแบบ brittle คือใช้แรงในการกดทำให้เสียรูปมาก และระยะทางในการกดให้ตัวอย่างเสียรูปน้อย (2) การแช่น้ำไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่สภาวะอื่นๆ จะให้ลักษณะเนื้อสัมผัสค่อนข้างไปทาง tough คือใช้แรงในการกดทำให้เสียรูปมาก และระยะทางในการกดให้ตัวอย่างเสียรูปมากเช่นกัน และ (3) ตัวอย่างควบคุมที่ไม่ผ่านการแช่น้ำไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะให้ลักษณะเนื้อสัมผัสแบบ rubbery คือใช้แรงในการกดให้ตัวอย่างเสียรูปน้อย และมีระยะทางในการกดทำให้เสียรูปมาก อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่เกี่ยวกับการศึกษาผลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเนื้อสัมผัส

ของผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ ยังไม่มีการศึกษาอย่างแพร่หลาย ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นดังกล่าวจึงเป็นจุดที่ต้องทำการศึกษาในเบื้องต้นต่อไป



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ของค่า normal stress และ normal strain ต่อคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของเนื้อปลานิล

ผลของโอโซนต่อคุณลักษณะทางเคมี

ผลของความเข้มข้น และระยะเวลาในการแช่น้ำโอโซนต่อองค์ประกอบทางเคมีของเนื้อปลานิล แสดงดังตารางที่ 4 จากผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นและระยะเวลาในการแช่น้ำโอโซนไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าร้อยละความชื้น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน ไอโอดีน และค่าความเป็นกรดต่าง ของเนื้อปลานิลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะควบคุมที่ไม่แช่น้ำโอโซน อย่างไรก็ตามค่าร้อยละความชื้นของเนื้อปลาที่มีแนวโน้มที่สูงกว่าตัวอย่างควบคุม

นอกจากนี้ความเข้มข้น และระยะเวลาในการแช่น้ำโอโซนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าร้อยละไขมันมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมพบว่าตัวอย่างเนื้อปลาที่แช่น้ำโอโซนจะมีค่าร้อยละไขมันลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยเมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นโอโซน 3 ppm พบว่า ระยะเวลาในการแช่ที่ 30 60 และ 90 วินาที สามารถช่วยลดค่าร้อยละไขมันลงได้ร้อยละ 37.28 45.09 และ 52.68 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม ในขณะที่เมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาในการแช่ 90 วินาที ที่ความเข้มข้น 1 2 และ 3 ppm พบว่าค่าร้อยละไขมันลดลงร้อยละ 40.63 51.34 และ 52.68 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามกลไกของโอโซนต่อการลดลงของไขมันในผลิตภัณฑ์ยังไม่ได้มีการอธิบายอย่างชัดเจน ในการ

ทดลองนี้คาดว่าน่าจะเกิดจากการใช้ระบบของการหมุนเวียนน้ำไอโซนผ่านตัวอย่างตลอดเวลา อย่างไรก็ตามจากการศึกษาของ Manousaridis และคณะ (2005) ที่ศึกษาผลของไอโซนต่อการเกิดออกซิเดชันในหอยแมลงภู่มากเปลือก โดยการวัดค่ากรดไธโอบาร์บิทูริก (thiobarbituric acid, TBA) ซึ่งเป็นค่าที่นิยมใช้เป็นตัวประเมินระดับการเกิดออกซิเดชันของไขมัน พบว่าผลิตภัณฑ์ความคมมีค่ากรดไธโอบาร์บิทูริกสูงกว่าผลิตภัณฑ์หอยแมลงภู่น้ำไอโซน ทั้งที่คาดว่า การใช้ไอโซนน่าจะส่งผลให้สารตั้งต้นที่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ถูกออกซิไดส์ เป็นอนุมูลอิสระที่ทำให้การเกิดออกซิเดชันของไขมันสูงขึ้น ผลดังกล่าวสอดคล้องกับการทดลองของ Sheldon และ Brown (1986) ซึ่งพบว่าค่ากรดไธโอบาร์บิทูริกของซากไก่แช่แข็งที่ล้างไอโซนต่ำกว่าซากไก่แช่แข็งล้างน้ำระบบสวนทาง เหตุผลที่เป็นไปได้นี้คาดว่าน่าจะเกิดจากไอโซนส่งผลให้สารตั้งต้นในการเกิดออกซิเดชันลดลง

ตารางที่ 6 ผลของความเข้มข้น และระยะเวลาในการแช่น้ำไอเซนต่อลักษณะสีของเนื้อปลานิล

ความเข้มข้น (ppm)	ระยะเวลา (วินาที)	L*	a*	b*	ΔE	chroma	hue (°)	WI
1	30	47.31 ^d (1.12)	2.20 ^b (0.50)	4.42 ^b (0.23)	5.42 ^f (0.17)	5.27 ^b (0.32)	63.44 ^g (1.05)	47.08 ^e (0.82)
	60	48.64 ^{cd} (0.71)	1.78 ^b (0.24)	4.22 ^b (0.73)	6.89 ^e (0.92)	5.19 ^b (0.34)	67.77 ^e (0.56)	48.43 ^{de} (0.54)
	90	48.88 ^{cd} (0.65)	2.02 ^b (0.16)	4.30 ^b (0.25)	7.11 ^{de} (0.71)	5.09 ^b (0.48)	69.17 ^d (0.52)	48.66 ^{de} (0.30)
2	30	49.78 ^{bcd} (1.10)	1.92 ^b (0.29)	4.81 ^b (0.36)	7.73 ^{cde} (0.39)	5.01 ^b (0.33)	65.43 ^f (0.49)	49.51 ^d (2.05)
	60	50.61 ^{bc} (1.04)	2.07 ^b (0.95)	4.86 ^b (0.75)	8.47 ^c (0.69)	4.95 ^b (0.33)	67.81 ^e (0.14)	50.33 ^c (0.65)
	90	51.59 ^{ab} (0.27)	1.80 ^b (0.09)	4.59 ^b (0.38)	9.53 ^b (0.69)	5.02 ^b (0.09)	73.83 ^b (0.10)	51.34 ^b (1.07)
3	30	50.04 ^{bc} (0.67)	2.12 ^b (0.76)	4.63 ^b (0.34)	7.97 ^{cd} (0.51)	4.78 ^b (0.34)	66.77 ^{ef} (0.49)	49.78 ^d (0.65)
	60	51.60 ^{ab} (0.52)	1.51 ^b (0.32)	4.82 ^b (0.43)	9.62 ^b (0.42)	4.85 ^b (0.33)	71.06 ^c (0.17)	51.34 ^b (0.73)
	90	53.48 ^a (0.81)	1.40 ^b (0.76)	4.66 ^b (0.01)	11.43 ^a (0.72)	4.87 ^b (0.20)	76.60 ^a (0.43)	53.23 ^a (1.13)
สภาวะควบคุม		42.47 ^e (0.33)	4.19 ^a (0.39)	5.61 ^a (1.11)		5.61 ^a (0.35)	51.43 ^h (0.89)	42.04 ^f (0.65)

แสดงผลในรูปของ ค่าเฉลี่ย (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

n = 18

^{a-h}, ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อในร้อยละ 95

ตารางที่ 7 ผลของความเข้มข้น และระยะเวลาในการแช่น้ำไอเซนต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของเนื้อปลานิล

ความเข้มข้น (ppm)	ระยะเวลา (วินาที)	hardness (10^{-6} Nm^{-3})	springiness	cohesiveness	gumminess (10^{-6} Nm^{-3})	chewiness (10^{-6} Nm^{-3})	resilience	juiciness (%)	firmness
1	30	8.61 ^{ab} (0.87)	1.01 ^{bc} (0.06)	0.29 (0.04)	2.60 ^{ab} (0.35)	2.69 ^{bc} (0.37)	0.19 ^{ab} (0.02)	13.69 ^a (0.33)	9.41 ^{cd} (0.29)
	60	9.21 ^a (0.32)	1.02 ^{bc} (0.04)	0.30 (0.02)	2.78 ^a (0.15)	2.83 ^{ab} (0.28)	0.20 ^{ab} (0.01)	13.75 ^a (0.22)	9.62 ^{cd} (0.68)
	90	9.36 ^a (1.70)	1.04 ^{bc} (0.04)	0.30 (0.02)	2.86 ^a (0.62)	2.92 ^{ab} (0.72)	0.19 ^{ab} (0.01)	14.70 ^a (1.32)	10.85 ^{bc} (0.26)
2	30	8.84 ^{ab} (0.80)	1.02 ^{bc} (0.04)	0.29 (0.03)	2.68 ^{ab} (0.28)	2.63 ^{bc} (0.32)	0.18 ^b (0.02)	13.79 ^a (1.65)	9.73 ^c (0.22)
	60	9.34 ^a (1.45)	1.09 ^{ab} (0.15)	0.29 (0.03)	2.81 ^a (0.43)	3.03 ^{ab} (0.46)	0.19 ^{ab} (0.03)	14.36 ^a (1.63)	9.99 ^c (0.71)
	90	9.78 ^a (0.58)	1.14 ^{ab} (0.10)	0.32 (0.04)	2.93 ^a (0.46)	3.30 ^a (0.32)	0.21 ^a (0.04)	14.85 ^a (0.78)	11.11 ^b (0.61)
3	30	8.73 ^{ab} (0.87)	1.01 ^{bc} (0.08)	0.29 (0.02)	2.74 ^a (0.17)	2.71 ^{bc} (0.27)	0.19 ^{ab} (0.01)	14.28 ^a (1.90)	10.01 ^{bc} (0.70)
	60	9.42 ^a (0.79)	1.12 ^{ab} (0.08)	0.29 (0.01)	2.88 ^a (0.20)	3.07 ^{ab} (0.36)	0.19 ^{ab} (0.01)	14.52 ^a (0.43)	12.71 ^{ab} (0.13)
	90	10.07 ^a (1.36)	1.18 ^a (0.13)	0.30 (0.01)	2.94 ^a (0.06)	3.38 ^a (0.36)	0.22 ^a (0.02)	15.47 ^a (0.60)	13.67 ^a (0.13)
สภาวะควบคุม		7.53 ^b (0.24)	0.93 ^c (0.10)	0.28 (0.03)	2.20 ^b (0.26)	2.19 ^c (0.50)	0.17 ^b (0.01)	9.65 ^b (0.05)	8.75 ^d (0.14)

แสดงผลในรูปของ ค่าเฉลี่ย (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

n = 24

^{a-c}, ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อในร้อยละ 95

ตารางที่ 8 ผลของความเข้มข้น และระยะเวลาในการแช่น้ำไอโซนต่อองค์ประกอบทางเคมีของเนื้อปลานิล

ความเข้มข้น (ppm)	ระยะเวลา (วินาที)	ความชื้น (%)	ไขมัน (%)	คาร์โบไฮเดรต (%)	โปรตีน (%)	เถ้า (%)	ใยอาหาร (%)	pH
1	30	76.15 (2.08)	3.17 ^b (0.15)	1.02 (0.26)	18.40 (0.55)	0.86 (0.03)	0.10 (0.02)	6.44 (0.05)
	60	74.13 (0.58)	2.83 ^{bcd} (0.31)	0.90 (0.17)	17.65 (0.60)	0.85 (0.05)	0.12 (0.04)	6.45 (0.02)
	90	74.30 (3.12)	2.66 ^{cd} (0.34)	1.11 (0.11)	17.55 (0.50)	0.85 (0.05)	0.10 (0.04)	6.47 (0.06)
2	30	77.99 (1.19)	3.07 ^{bc} (0.16)	0.95 (0.12)	17.44 (1.22)	0.84 (0.06)	0.09 (0.04)	6.43 (0.05)
	60	76.36 (2.00)	2.57 ^e (0.42)	1.13 (0.13)	17.41 (0.28)	0.83 (0.04)	0.11 (0.01)	6.43 (0.01)
	90	77.95 (2.50)	2.18 ^{ef} (0.10)	1.18 (0.27)	17.37 (0.87)	0.83 (0.02)	0.10 (0.03)	6.49 (0.03)
3	30	77.09 (3.30)	2.81 ^{bcd} (0.26)	1.13 (0.09)	17.45 (0.53)	0.86 (0.06)	0.11 (0.01)	6.43 (0.03)
	60	76.52 (0.32)	2.46 ^{def} (0.28)	0.97 (0.08)	17.81 (1.71)	0.82 (0.04)	0.09 (0.01)	6.43 (0.07)
	90	75.29 (2.54)	2.12 ^f (0.07)	1.17 (0.17)	17.64 (0.19)	0.85 (0.08)	0.11 (0.02)	6.48 (0.05)
สภาวะควบคุม		74.90 (2.90)	4.48 ^a (0.12)	1.10 (0.13)	17.36 (1.40)	0.83 (0.03)	0.10 (0.04)	6.49 (0.01)

แสดงผลในรูปของ ค่าเฉลี่ย (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

n = 18

^{a-f}, ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อในร้อยละ 95

สรุปผลการทดลอง

การศึกษาผลของปริมาณโอโซนที่ละลายได้ที่ความเข้มข้น 1, 2 และ 3 ppm ในการล้างเนื้อปลานิลฆ่าเหาะ ที่ระยะเวลาในการล้าง 3 ระดับ คือ 30, 60 และ 90 วินาที ต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมี กายภาพ และการลดลงของปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อปลานิล ผลการทดลองพบว่าโอโซนสามารถช่วยลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อปลานิลได้ การประยุกต์ใช้โอโซนที่ความเข้มข้นสูง และระยะเวลาในการแช่ให้นานขึ้นทำให้ค่าความสว่าง ค่า hue ค่าความแตกต่างของสี ค่าดัชนีความขาว และค่าเนื้อสัมผัสทั้งหมดเพิ่มขึ้น

บทที่ 3

ผลของการใช้สารละลายเกลือและน้ำไอโซนต่อคุณลักษณะทางเคมี กายภาพ และจุลินทรีย์ของเนื้อปลานิลชำแหละสด

บทนำ

ปลานิล (*Oreochromis niloticus*) เป็นปลาน้ำจืดที่สามารถเพาะเลี้ยงได้ในเกือบทุกภูมิภาคของโลก โดยความต้องการบริโภคปลานิลในตลาดโลก โดยเฉพาะในประเทศพัฒนาแล้วมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ส่วนหนึ่งเนื่องจากปลานิลเป็นปลาเนื้อขาวจึงเป็นที่ต้องการของกลุ่มผู้บริโภคที่ใส่ใจในสุขภาพ รวมถึงผู้สูงอายุซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมาก ประกอบกับเนื้อปลานิลมีรสชาติดี สามารถดัดแปลงไปเป็นวัตถุดิบประกอบอาหารของหลาย ๆ ชาติ และมีราคาถูกเมื่อเทียบกับปลาเนื้อขาวชนิดอื่น ๆ จึงเหมาะกับการนำมาเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่ม

ปัจจุบันสหรัฐอเมริกาเป็นผู้นำเข้าปลานิลรายใหญ่ที่สุดของโลก ด้วยปริมาณการนำเข้าที่มากกว่าร้อยละ 90 ของปริมาณนำเข้าปลานิลทั้งหมดของโลก โดยในช่วงปี 2542-2549 สหรัฐฯ นำเข้าปลานิลเพิ่มขึ้นกว่า 3 เท่าตัว จาก 37,600 ตัน ในปี 2542 เป็น 158,300 ตัน ในปี 2549 มีแหล่งนำเข้าสำคัญ คือ จีน (ครองส่วนแบ่งตลาดราวร้อยละ 80-90 ของปริมาณปลานิลทั้งหมดที่สหรัฐฯ นำเข้า) (ธนาคารเพื่อการส่งออกและนำเข้าแห่งประเทศไทย, 2550) สำหรับตลาดปลานิลในสหภาพยุโรป เป็นตลาดที่ทั้งผู้ส่งออกไทยและหลายประเทศต่างจับตามองเป็นพิเศษ แม้ปัจจุบันยังมีปริมาณบริโภคและนำเข้าไม่มากนัก แต่เริ่มมีแนวโน้มว่าชาวยุโรปบางส่วนจะหันมาบริโภคปลานิลและปลาเนื้อขาวชนิดอื่นเพิ่มขึ้นทดแทนปลากระพงและปลาค็อดซึ่งมีราคาแพงกว่า ทั้งนี้พบว่าชาวยุโรปนิยมบริโภคปลานิลตัวใหญ่ โดยผู้ที่อาศัยอยู่ทางตอนเหนือนิยมเลือกซื้อปลานิลแบบแล่เนื้อ ขณะที่ผู้ที่อาศัยอยู่ทางใต้นิยมซื้อปลานิลทั้งตัว (ธนาคารเพื่อการส่งออกและนำเข้าแห่งประเทศไทย, 2550)

เนื่องด้วยปลาและผลิตภัณฑ์จากสัตว์น้ำ สามารถเสื่อมเสียได้ง่ายเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ชนิดอื่นโดยคุณภาพของผลิตภัณฑ์จะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ (Gram และ Huss, 1996; Manousaridis และคณะ, 2005) ซึ่งเชื้อจุลินทรีย์จะไปย่อยสลายส่วนประกอบของเนื้อปลา จึงเหนี่ยวนำให้เกิดกลิ่นที่ผิดปกติ (off-odor) และเกิดการเน่าเสียของผลิตภัณฑ์ (Ababouch และคณะ, 1991; Campos และคณะ, 2005) โรงงานอุตสาหกรรมอาหารทะเลโดยทั่วไปจึงนิยมล้างวัตถุดิบก่อนแปรรูปด้วยสารละลายเกลือ โดยจากการศึกษาของ Mendes และ Nunes (1992) พบว่าการล้างเนื้อปลาสำหรับทำซูริมีด้วยน้ำเกลือจะช่วยกำจัดไขมัน ไขมัน โคพลาส- มิคโปรตีน (sarcoplasmic protein) สารอื่นๆ ที่ไม่ต้องการอย่าง เลือด สารสี (pigment)

และสารประกอบให้กลิ่นออกจากเนื้อปลา นอกจากนี้การแช่เนื้อปลาในสารละลายน้ำเกลือสามารถช่วยปรับปรุงรสชาติ และความสามารถในการอุ้มน้ำ (water holding capacity) ของเนื้อปลา (Esaiassen และคณะ, 2004; Esaiassen และคณะ, 2005) รวมถึงช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ได้ (Yanar และคณะ, 2006)

ในขณะเดียวกันการสเปรย์หรือจุ่มในสารละลายคลอรีนอย่าง โซเดียมไฮโปคลอไรท์ (sodium hypochlorite) สามารถช่วยลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนมากับวัตถุดิบด้วย อย่างไรก็ตาม Brooks และ Pierce (2007) พบว่าคลอรีนไม่สามารถยืดอายุการเก็บได้เนื่องจาก คลอรีนไม่สามารถยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ที่อาจหลงเหลือภายหลังการล้างได้ รวมถึงคลอรีนต้องใช้ระยะเวลาค่อนข้างนานในการแทรกซึมผ่านผนังเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์เพื่อไปยับยั้งกิจกรรมทางชีวเคมีของเชื้อจุลินทรีย์ ก่อนทำให้เชื้อจุลินทรีย์ตาย (Nabel, 1988; Cataldo, 2003) นอกจากนี้การใช้สารประเภทคลอรีนยังอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้บริโภค (Brooks และ Pierce, 2007) เนื่องด้วยการล้างผลิตภัณฑ์ด้วยสารประกอบคลอรีน จะทำให้เกิดการรวมตัวของสารประกอบคลอรีนกับสารอินทรีย์ได้เป็นสารไตรฮาโลมีเทน (trihalomethanes, THMs) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งและยากต่อการทำลาย

การประยุกต์ใช้โอโซนจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่ช่วยปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ สหรัฐอเมริกาประกาศให้โอโซนเป็นสารที่ปลอดภัยต่อสุขภาพ (generally recognized as safe, GRAS) ตั้งแต่ปี 1997 โดยโอโซนสามารถใช้ได้ทั้งในรูปของก๊าซและของเหลว ในการช่วยปรับปรุงเก็บรักษา และแปรรูปอาหารได้อย่างปลอดภัย สามารถใช้สัมผัสกับอาหารประเภท ปลา เนื้อ และสัตว์ปีกได้โดยตรง (Mielcke และ Ried, 2004) โดย Korich และคณะ (1990) Restaino และคณะ (1995) รายงานว่าโอโซนสามารถยับยั้งการเจริญของแบคทีเรีย รา ไวรัสและโพรโตซัวได้ โดยการเข้าไปทำให้ผนังเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์แตก หรือเกิดการแยกเป็นส่วนๆ เพื่อให้เกิดการรั่วของสารประกอบภายในเซลล์ ก่อนจะเข้าไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตรงกับสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบในเซลล์ของจุลินทรีย์ (Bringman, 1954; Chang, 1971; Chawla, 2006) ซึ่งโอโซนถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางเพื่อ (1) ลดการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ในปลา (Haraguchi และคณะ, 1969; Goche และ Cox, 1999) ผลิตภัณฑ์สัตว์ปีก (Sheldon และ Brown, 1986; Dave, 1999) ผลิตภัณฑ์เนื้อและนม (Dondo และคณะ, 1992; Gorman และคณะ, 1997) (2) ลดสารอะฟลาทอกซินในถั่วและเมล็ดฝ้าย (Dwankanath และคณะ, 1968) (3) ซ้ำเชื้อในเบคอน เนื้อวัว กลัวย ไข่ เห็ด ชีส และผลไม้ (Kaess และ Weidemann, 1968; Gammon และ Karelak, 1973) (4) ยืดอายุการเก็บรักษาผักกาดหอม (Kim และคณะ, 1999) สตอเบอรี่ (Lyons-Magnus, 1999) พริกไทย (Han และคณะ, 2002) รวมถึง (5) ปรับปรุงคุณภาพน้ำดื่ม (Bryant และคณะ, 1992) และบำบัดน้ำเสีย (Stover และ Jamis, 1981; Rice และคณะ, 2000) เป็นต้น

อย่างไรก็ตามงานวิจัยส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาถึงผลของโอโซนต่อคุณลักษณะต่างๆ ของผลิตภัณฑ์อาหาร หรืออาจมีการเติมสารประกอบเคมีอื่นๆ เช่น กรดอะซิติก (acetic acid) คลอรีนไดออกไซด์ (chlorine dioxide) เซทิลไพริดิเนียมคลอไรด์ (cetylpyridinium chloride) และไตรโซเดียมฟอสเฟต (trisodium phosphate) ร่วมกับการใช้น้ำโอโซน (Pohlman และคณะ, 2002) เพื่อลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ มีงานวิจัยน้อยมากที่ศึกษาถึงผลของการใช้สารประกอบเคมีอื่นๆ ในการปรับปรุงคุณลักษณะของเนื้อปลาก่อนนำไปล้างด้วยโอโซน ประกอบกับการที่ประเทศไทยเป็นประเทศหนึ่งที่มีศักยภาพในการเพาะเลี้ยงและแปรรูปสัตว์น้ำได้มาตรฐานเป็นที่ยอมรับในตลาดโลก จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ผู้ประกอบการไทยต้องศึกษาหาแนวทางลดต้นทุนการผลิต เพื่อเพิ่มโอกาสในการแข่งขันในตลาดส่งออก ในการผลิตเนื้อปลาแช่แข็งให้มีขนาดและคุณภาพเดียวกันได้ทั้งหมด ตรงตามความต้องการของธุรกิจร้านอาหารและอุตสาหกรรมอาหารแปรรูป ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการศึกษานี้จึงเป็นการศึกษาผลของการประยุกต์ใช้น้ำเกลือในการล้างเนื้อปลา ก่อนนำไปล้างด้วยโอโซน ต่อการลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อปลานิลชำแหละสด รวมถึงติดตามผลของโอโซนต่อการเปลี่ยนแปลงสี เนื้อสัมผัส และองค์ประกอบทางเคมีของเนื้อปลานิล เปรียบเทียบคุณลักษณะต่างๆ กับสภาวะควบคุมที่ไม่ผ่านการแช่น้ำโอโซน

วัตถุประสงค์และวิธีการทดลอง

การเตรียมปลานิล

ปลานิล (Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*) ที่มีชีวิตถูกจับจากบ่อในจังหวัดนครปฐม และปลาจะได้รับออกซิเจนตลอดระยะทางที่ขนส่งมายังภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ปลานิลที่เลือกมาใช้ในการทดลองมีอายุประมาณ 6 เดือน และมีน้ำหนักประมาณ 500 ± 50 กรัม ทำการชั่งปลาไว้ในสภาวะที่ไม่มีความเครียดก่อนทำให้ตาย ทำการขอดเกล็ด ควักไส้ และแล่แบบไม่ติดก้าง นำเนื้อปลาที่ได้มาแช่ในน้ำเย็นที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส นาน 2 นาที ก่อนทำการทดลองต่อไป โดยขึ้นปลาที่แล่แล้วจะมีความยาวและน้ำหนักเฉลี่ย $22.0-25.0$ เซนติเมตร และ 120 ± 20 กรัมต่อชิ้น ตามลำดับ

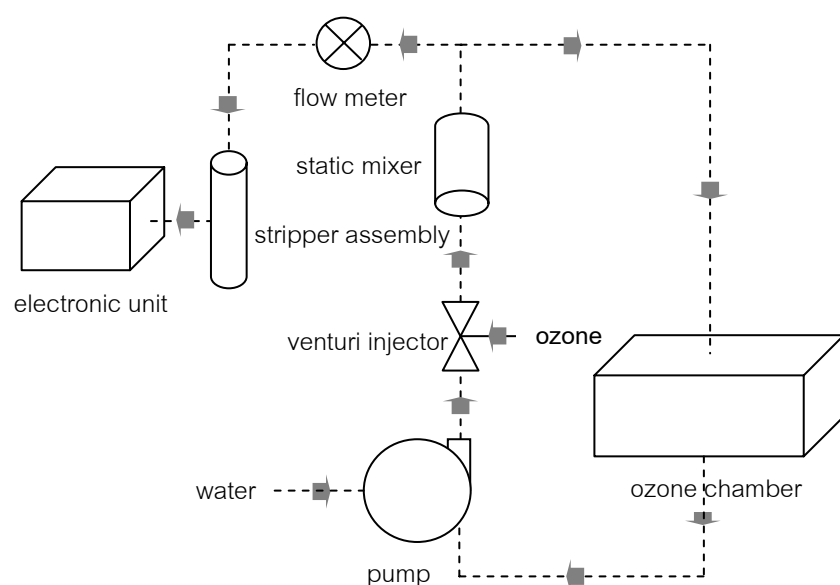
สภาวะในการทดลอง

นำเนื้อปลานิลที่แล่แล้ว 6 ชิ้น มาแช่ในสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 2 ระดับคือร้อยละ 5 และ 10 และระยะเวลาแช่ 2 ระดับคือ 15 และ 30 นาที ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ในอัตราส่วนของเนื้อปลาต่อสารละลายเกลือเป็น 1: 6 หลังจากนั้นนำเนื้อปลาที่ได้มาแช่ในน้ำโอโซนปริมาณ 25 ลิตร ที่มีปริมาณความเข้มข้นของโอโซนที่ละลายได้ (dissolved ozone,

dO₃) 3 ppm นาน 90 วินาที โดยโอโซนจะถูกละลายที่สภาวะปิดในน้ำเย็นที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ในถังโพลีเอทิลีน (polyethylene) ชนิด HDPE เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำจะช่วยเพิ่มปริมาณและควบคุมการละลายของโอโซนในน้ำ ปลาที่ได้หลังการแช่น้ำโอโซนถูกนำมาวางบนตะแกรงสแตนเลสที่ฆ่าเชื้อแล้ว 1 นาที ที่อุณหภูมิห้อง เก็บขึ้นปลาในถุงโพลีเอทิลีนที่ปิดสนิท และเก็บรักษาในน้ำแข็งก่อนนำไปวิเคราะห์คุณลักษณะทางเคมี กายภาพ และจุลินทรีย์ต่อไป ทำการทดลองแต่ละสภาวะ 3 ซ้ำ ทั้งนี้สภาวะควบคุมคือเนื้อปลาที่ไม่ผ่านการแช่สารละลายน้ำเกลือและน้ำโอโซน

การสร้างโอโซน

โอโซนจะถูกสร้างในสภาวะปิดที่มีระบบการหมุนเวียนดังภาพที่ 7 ซึ่งโอโซนจะผลิตจาก corona discharge (บริษัท Active Science จำกัด, ประเทศไทย) โดยการส่งออกซิเจนเข้มข้นที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 90-95 เข้าสู่ระบบ แล้วใช้กระแสไฟฟ้าสลับที่มีแรงเคลื่อนที่สูงผ่านเข้าไปในช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด เพื่อกระตุ้นให้อิเล็กตรอนของก๊าซออกซิเจนแตกตัว ก่อนจะไปรวมตัวกับก๊าซออกซิเจนโมเลกุลอื่นเป็นก๊าซโอโซน ในการทดลองจะควบคุมอัตราการไหลของออกซิเจนที่ปริมาณ 4.0 ลิตรต่อนาทีเพื่อสร้างโอโซนความเข้มข้นสูง โอโซนที่สร้างได้จะถูกส่งไปละลายในน้ำเย็นที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ผ่าน venturi injector ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร และเพิ่มปริมาณการละลายของโอโซนในน้ำด้วย static mixer



ภาพที่ 7 กระบวนการสร้างโอโซนในระบบปิด

การวัดปริมาณโอโซน

ปริมาณความเข้มข้นของโอโซนที่ละลายได้จะถูกวัดด้วยเครื่องวัดค่าการละลายของโอโซน (รุ่น DOM-1, บริษัท Ecosensor, ประเทศสหรัฐอเมริกา) โดยเครื่องจะสามารถวัดค่าการละลายของโอโซนได้ในช่วง 0-5 ppm ทั้งนี้การทำงานของเครื่องจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ stripper assembly และ electronic unit ซึ่ง stripper assembly จะนำก๊าซโอโซนปริมาณน้อยๆ ที่ถูกแยกออกจากน้ำ (เพื่อลดการรบกวนของสารเคมีอื่นๆ เช่นคลอรีน หรือเกลือที่มีในน้ำ) แล้ว ปริมาณน้อยกว่า 0.2 ลิตร ต่อนาที ส่งไปยังเซนเซอร์ในส่วน electronic unit อย่างต่อเนื่อง ส่วนของ electronic unit ประกอบด้วย เซนเซอร์ชนิด heated metal oxide semiconductor (HMOS) วงจรไฟฟ้า และ relay set point

ความดันของน้ำที่ส่งเข้าไปยังเครื่องวัดจะถูกควบคุมให้ไม่ต่ำกว่า 15 psi ในขณะเดียวกัน เซนเซอร์จะถูกสอบวัดทุกครั้งที่มีการใช้งานด้วยการวัดปริมาณโอโซนจากวิธีวัดสี (บริษัท Ebase จำกัด, ประเทศไทย) ซึ่งสามารถวัดค่าการละลายของโอโซนได้ในช่วง 0-3 ppm

การวิเคราะห์ทางจุลินทรีย์

ทำการวิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์ในตัวอย่างปลา 2 บริเวณ คือ (1) บริเวณหนัง โดยทำการ swab หนังปลาที่ขนาดพื้นที่ 5×5 เซนติเมตร ด้วย peptone water (บริษัท Sigma-Aldrich Chemica, GmbH, ประเทศเยอรมัน) ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 ที่ผ่านการสเตอไรล์แล้ว และ (2) ในเนื้อปลา โดยการนำตัวอย่างปลาน้ำหนัก 25 กรัม มาผสมกับ peptone water ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 ปริมาตร 225 มิลลิลิตร ตีให้เข้ากันด้วย stomacher (Seward Medical, ประเทศอังกฤษ) ทั้งนี้ ตัวอย่างทั้ง 2 บริเวณจะถูกนำมาเจือจางให้มีความเข้มข้นที่ระดับต่างๆ ด้วย peptone water วิเคราะห์ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด (total plate count) และยีสต์รา ในตัวอย่าง โดยการบ่มที่ อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 48 ชั่วโมง ตามลำดับ

การวิเคราะห์ทางกายภาพ

สี (color)

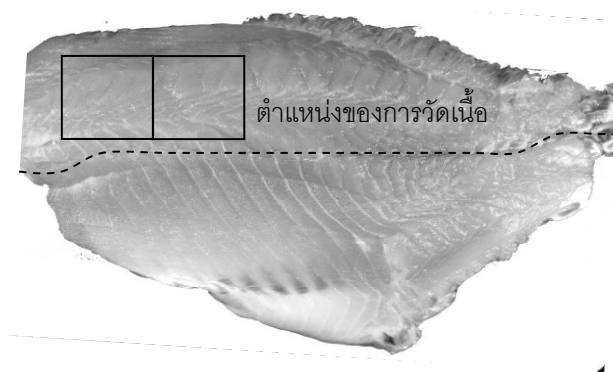
วัดค่า L^* a^* และ b^* ของตัวอย่างตามวิธีของ CIE (1997) ด้วย color-view™ spectrophotometer (รุ่น 9000, Gardner, ประเทศสหรัฐอเมริกา) โดยใช้แสงชนิด D65 และมีการ หมุนของแสง 10° ทั้งนี้ค่า L^* จะบ่งบอกถึงค่าความสว่าง ($L^*=0$ แสดงความเป็นสีดำ และ $L^*=100$

แสดงความเป็นสีขาว) ค่า a^* แสดงค่าความเป็นสีแดง เมื่อ $a^*>0$ และ ค่า b^* แสดงค่าความเป็นสีเหลือง เมื่อ $b^*>0$

วัดค่าความแตกต่างของสีระหว่างตัวอย่างควบคุมและตัวอย่างที่แช่น้ำไอโซนโดยการคำนวณจาก $\Delta E = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$ รวมถึงวิเคราะห์ค่าความเข้มสี (chroma) จาก $C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$ ค่า มุมของสี (hue angle) จาก $h_{ab} = \tan^{-1}(b^*/a^*)$ เมื่อ $h_{ab}=0^\circ$ สำหรับ red hue และ $h_{ab}=90^\circ$ สำหรับ yellow hue และค่าดัชนีความขาว (whiteness index, WI) จาก $WI = 100 - [(100-L)^2 + a^2 + b^2]^{1/2}$ (Bricknell และ Hartel, 1998) โดยสีของเนื้อปลาจะถูกวัด 3 ตำแหน่งคือ ส่วนบนใกล้หัว ส่วนกลาง และส่วนล่างใกล้หาง ตามลำดับ ทำการวัดค่า 3 ซ้ำ

เนื้อสัมผัส (texture)

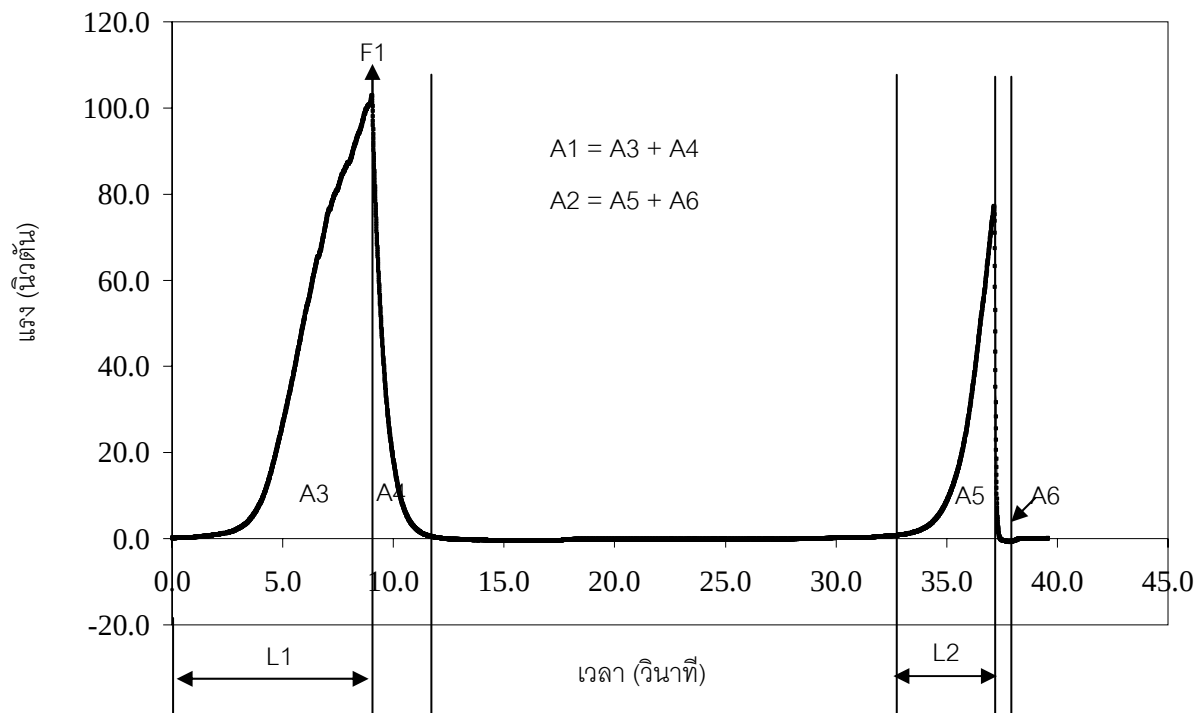
วัดเนื้อสัมผัสของเนื้อปลาด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (รุ่น TA-XT2i, บริษัท Stable Micro System จำกัด, ประเทศอังกฤษ) ทำการวัดแบบ texture profile analysis (TPA) ด้วยหัววัดอลูมิเนียมทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ความเร็วของหัววัดก่อนวัดเป็น 5 มิลลิเมตรต่อวินาที ขณะวัดเป็น 1 มิลลิเมตรต่อวินาที และความเร็วหลังวัดเป็น 10 มิลลิเมตรต่อวินาที ควบคุมค่าความเค้นของการกดตัวอย่างที่ร้อยละ 70 ทั้งนี้ตัวอย่างเนื้อปลาที่ผ่านการแช่ไอโซนจะถูกตัดเป็นชิ้นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 3×3 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 8 และทำการวัดเนื้อสัมผัสทันที ตัวอย่างจะถูกกด 2 ครั้งห่างกันครั้งละ 25 วินาที



ภาพที่ 8 ตำแหน่งของเนื้อปลาที่ตัดเพื่อวัดเนื้อสัมผัส

วิเคราะห์ค่าเนื้อสัมผัส 6 ค่า ดังแสดงในภาพที่ 9 ดังนี้ (1) hardness คือแรงสูงสุดที่เกิดจากการกดครั้งที่หนึ่ง (2) cohesiveness วัดจากพื้นที่ของงานระหว่างการกดครั้งที่สองต่อการกดครั้งที่หนึ่ง (3) springiness วัดจากระยะทางที่ทำให้เกิดแรงกดสูงสุดครั้งที่สองต่อการกดครั้งที่หนึ่ง (4) gumminess คำนวณจากผลคูณของค่า hardness กับค่า cohesiveness (5) chewiness คำนวณ

จากผลคูณของค่า gumminess กับค่า springiness และ (6) resilience คำนวณจากพื้นที่ที่เกิดจากการกดจนหวั้ดครั้งที่หนึ่งต่อครั้งที่สอง



ภาพที่ 9 กราฟเนื้อสัมผัสและการคำนวณค่าเนื้อสัมผัสต่างๆโดย hardness = F1, springiness = $L2/L1$, cohesiveness = $A2/A1$, gumminess = $F1 \cdot (A2/A1)$, chewiness = $F1 \cdot (A2/A1) \cdot (L2/L1)$, และ resilience = $A6/A4$.

ส่วนค่าความเครียดปกติ (normal stress) หาจากแรงสูงสุดต่อพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง ค่าความเค้นปกติ (normal strain) หาจากระยะทางสูงสุดที่เกิดจากการกดครั้งที่หนึ่งต่อความหนาของตัวอย่าง และค่าดัชนีวัดความแน่นเนื้อ (index of firmness) หาจากค่าความชันจากจุดเริ่มต้นของการวัดจนถึงจุดที่เกิดแรงสูงสุดจากการกดครั้งที่หนึ่ง ทำการวัดตัวอย่างจำนวน 3 ซ้ำ

ความชุ่มน้ำ (juiciness)

ตัดเนื้อปลาน้ำหนัก 1 กรัม ให้มีพื้นที่หน้าตัด 5 ตารางมิลลิเมตร วางบนกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 หลังจากนั้นนำตุ้มน้ำหนักขนาด 5 กิโลกรัมมาวางทับ นาน 1 นาที ค่าความชุ่มน้ำ คำนวณจากน้ำหนักของน้ำที่สูญเสียไประหว่างการกดต่อน้ำหนักของตัวอย่าง 100 กรัม

การวิเคราะห์ทางเคมี

วิเคราะห์องค์ประกอบของเนื้อปลาดังนี้ ความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า ใยอาหาร และ คำนวณหาปริมาณคาร์โบไฮเดรตโดยประมาณ รวมถึงวิเคราะห์ค่าเป็นกรดต่าง และปริมาณโซเดียมคลอไรด์

ปริมาณความชื้น (moisture content)

หาความชื้นของตัวอย่างโดยการนำตัวอย่างน้ำหนักประมาณ 3 กรัม ใส่ในตู้อบลมร้อน (รุ่น ED53, WTB binder, ประเทศเยอรมัน) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ตาม AOAC (2000) วิธีที่ 950.46 อบตัวอย่างจนกระทั่งน้ำหนักคงที่ คำนวณค่าความชื้นฐานเปียกจากร้อยละของผลต่างระหว่างน้ำหนักสดกับน้ำหนักแห้งต่อน้ำหนักสด ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

ปริมาณโปรตีน (protein content)

ปริมาณโปรตีนในตัวอย่างหาจากปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน ตาม AOAC (1995) วิธีที่ 955.04 ปริมาณโปรตีนในตัวอย่างคำนวณได้จากผลคูณของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดกับ 6.25 ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

ปริมาณไขมัน (fat content)

ปริมาณไขมันทั้งหมดในตัวอย่างหาจากการสกัดด้วย soxhlet ตาม AOAC (1995) โดยใช้สารละลายผสมของปิโตรเลียมอีเทอร์ และเฮกเซนในการสกัด ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

ปริมาณเถ้า (ash content)

ตัวอย่างเนื้อปลาจะถูกบดและนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ใน muffle furnace (รุ่น BFW 11/13, Carbolite, ประเทศอังกฤษ) ตาม AOAC (2000) วิธีที่ 923.03 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณกรัมเถ้าต่อตัวอย่างปลา 100 กรัม ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

ปริมาณใยอาหาร (fiber content)

วิเคราะห์ปริมาณใยอาหารตาม AOAC (1995) วิธีที่ 991.43 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณกรัมใยอาหารต่อตัวอย่างปลา 100 กรัม ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

ค่าความเป็นกรดต่าง (pH)

นำตัวอย่างเนื้อปลาน้ำหนัก 5 กรัม มาบดกับน้ำกลั่น 45 มิลลิลิตร ด้วยเครื่องปั่น นาน 30 วินาที วัดค่าความเป็นกรดต่างด้วยเครื่องวัดค่าความเป็นกรดต่าง (รุ่น 510 pH meter, Eutech, บริษัท Cyberscan จำกัด, ประเทศสิงคโปร์)

ปริมาณโซเดียมคลอไรด์ (sodium chloride content)

ตัวอย่างเนื้อปลาจะถูกบดและนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ใน muffle furnace (รุ่น BFW 11/13, Carbolite, ประเทศอังกฤษ) ล้างแก้วที่ได้ด้วยน้ำกลั่นปริมาณเล็กน้อย เติมสารละลายโพแทสเซียมโครเมต (potassium chromate) ความเข้มข้นร้อยละ 5 ปริมาตร 1 มิลลิลิตร และไตเตรทด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท (silver nitrate) ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ จนกระทั่งเป็นสีส้ม แสดงผลการวิเคราะห์ในรูปแบบของปริมาณโซเดียมคลอไรด์ ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์ผลการทดลองด้วยโปรแกรม General Linear Model (GLM) หาค่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Least Significant Difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SAS (เวอร์ชัน 8.1, SAS Inst., Cary, NC, ประเทศสหรัฐอเมริกา)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของน้ำเกลือและไอโซนต่อการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์

จากการศึกษาพบว่า ความเข้มข้นของน้ำเกลือและระยะเวลาในการแช่น้ำเกลือที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด และยีสต์/รา ที่บริเวณหนังและเนื้อของปลานิลหลังการแช่/ไม่แช่น้ำไอโซนลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) (ตารางที่ 9) ในขณะเดียวกันการใช้ไอโซนในการแช่เนื้อปลาส่งผลให้ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดบริเวณหนังปลานิล ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด และปริมาณยีสต์/รา ที่เนื้อปลานิลลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ส่วนปริมาณยีสต์/รา บริเวณหนังปลา มีแนวโน้มที่จะลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) (ตารางที่ 9) ทั้งนี้การแช่เนื้อปลานิลในน้ำเกลือที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 นาน 30 นาที ก่อนนำไปล้างด้วยน้ำไอโซนส่งผลให้ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ลดลงมากที่สุด โดยปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด และยีสต์/รา ที่บริเวณหนังและเนื้อของปลานิลหลังการแช่/ไม่แช่น้ำไอโซนลดลงร้อยละ 34.11 62.55 41.56 และ 30.92 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามจากผลการศึกษาจะเห็นว่าการแช่เนื้อปลาในสารละลายน้ำเกลือจะช่วยลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ลงได้แม้จะยังไม่มี การล้างด้วยไอโซน เนื่องจากเกลือมีคุณสมบัติในการ

ช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ โดยการเข้าไปเปลี่ยนแปลงความดันออสโมติก และลดกิจกรรมของเอนไซม์ภายในเซลล์เชื้อจุลินทรีย์

อย่างไรก็ตามเมื่อมีการใช้โอโซนร่วมด้วย ประสิทธิภาพในการลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำปลาจะยิ่งเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากโอโซนเกิดจากการรวมตัวกันของอะตอมออกซิเจน 3 อะตอมโดยการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้า จึงมีคุณสมบัติเป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรง (Dew, 2000) สามารถทำลายเชื้อจุลินทรีย์ได้โดยการฆ่าจากการสัมผัสโดยตรงที่ผนังเซลล์ และทำให้เกิดการออกซิเดชันของสารที่เป็นองค์ประกอบภายในเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์ (Bringman, 1954; Chang, 1971; Kim และคณะ, 1999; Chawla, 2006) ในขณะเดียวกันอนุมูลอิสระที่เกิดจากการแตกตัวของโอโซนจะไปทำลายพันธะคู่ในผนังเซลล์ และทำลายความเป็นเยื่อเลือกผ่านของโครงสร้างเซลล์ ทำให้เซลล์เกิดการแตกตัวของเซลล์ในที่สุด (Kim และคณะ, 1999) ซึ่งโอโซนจะออกซิไดซ์แบคทีเรียและสารอินทรีย์ที่รั่วออกมาจากเซลล์อย่างต่อเนื่อง จากการศึกษาของ Chen และคณะ (1987) พบว่าโอโซนที่ละลายในน้ำหรือในสารละลายโซเดียมคลอไรด์มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ เช่น *Vibrio cholerae*, *Escherichia coli*, *Salmonella typhimurium*, *Vibrio parahaemolyticus*, และ *Staphylococcus aureus* ได้ดี นักวิจัยหลายท่านรายงานว่า โอโซนสามารถลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ที่ผิวหน้าของปลาระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำได้ (Dondo และคณะ, 1992; da Silva และคณะ, 1998) นอกจากนี้ Naito และ Takahara (2006) ใช้โอโซนในการล้างอาหารทะเลก่อนแช่เยือกแข็ง เช่น กุ้งสด ปลาหมึก ปลาหมึกยักษ์ ปลาแมคเคอเรล ปลาทูน่า ปลาหางเหลือง และแซลมอน โดยการล้างด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 1.5 ที่มีโอโซน 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 5-10 นาที พบว่าปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ลดลง 2-3 logs และอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์เหล่านี้เพิ่มขึ้น รวมถึงช่วยปรับปรุงคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของปลาโดยช่วยลดกลิ่นคาว (trimethylamine) และช่วยลดการเกิดเมือก (surface slime) ในภาชนะใส่ปลา (Naito และ Takahara, 2006) ด้วย

ตารางที่ 9 ผลของน้ำเกลือและไอโซนต่อปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ของหนังและเนื้อปลานิล

สภาวะ	ความเข้มข้น ของน้ำเกลือ (%)	ระยะเวลา (วินาที)	ผิวหนัง (บริเวณหนัง)		เนื้อ	
			ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด (log cfu/cm ²)	ยีสต์และรา (log cfu/ cm ²)	ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด (log cfu/g)	ยีสต์และรา (log cfu/g)
ไม่มีไอโซน	0	0	2.58 ^a (0.03)	2.35 ^a (0.21)	3.85 ^a (0.21)	3.04 ^a (0.17)
	5	15	2.18 ^b (0.04)	1.47 ^b (0.13)	3.35 ^b (0.07)	2.54 ^b (0.09)
	5	30	2.10 ^{bc} (0.08)	1.09 ^c (0.02)	2.92 ^c (0.11)	2.40 ^{bc} (0.07)
	10	15	2.01 ^{cd} (0.01)	0.98 ^c (0.03)	2.81 ^{cd} (0.05)	2.36 ^c (0.02)
	10	30	1.95 ^{cd} (0.07)	0.92 ^c (0.03)	2.67 ^{de} (0.10)	2.32 ^c (0.03)
ไอโซน	0	0	1.95 ^{cd} (0.08)	1.55 ^b (0.07)	2.65 ^{de} (0.07)	2.38 ^c (0.09)
	5	15	1.93 ^d (0.04)	1.03 ^c (0.25)	2.63 ^{de} (0.04)	2.33 ^c (0.04)
	5	30	1.91 ^d (0.08)	0.90 ^c (0.06)	2.59 ^{ef} (0.02)	2.31 ^c (0.07)
	10	15	1.88 ^d (0.03)	0.89 ^c (0.13)	2.42 ^{fg} (0.03)	2.25 ^{cd} (0.15)
	10	30	1.70 ^e (0.14)	0.88 ^c (0.03)	2.25 ^g (0.07)	2.10 ^d (0.13)

แสดงผลในรูปของ ค่าเฉลี่ย (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

n = 20

^{a-e}, ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อในร้อยละ 95

ผลของน้ำเกลือและไอโซนต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทางกายภาพ

สี

จากการศึกษาผลของความเข้มข้น และระยะเวลาแช่น้ำเกลือในการล้างเนื้อปลานิล โดยยังไม่มี การล้างน้ำไอโซนต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะด้านสีพบว่า ความเข้มข้นของสารละลายเกลือ และระยะเวลาในการแช่ส่งผลให้ค่าความสว่าง ค่าความเป็นสีเหลือง ค่าความแตกต่างของสีระหว่าง ตัวอย่างควบคุมที่ไม่แช่น้ำเกลือกับตัวอย่างที่แช่น้ำเกลือ ค่าความเข้มของสี ค่ามุมของสี (สีเหลือง) c และค่าดัชนีความขาวมากขึ้นกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในขณะที่ค่า ความเป็นสีแดงต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตามค่า คุณลักษณะสีด้านต่างๆ มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น ($p \geq 0.05$) ตามความเข้มข้นของน้ำเกลือ และ ระยะเวลาในการแช่เนื้อปลาที่เพิ่มขึ้น (ตารางที่ 10) โดยจากการเปรียบเทียบผลของการแช่เนื้อปลา ในน้ำเกลือที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 นาน 30 นาที กับตัวอย่างควบคุม พบว่า ค่าความสว่าง ค่า ความเป็นสีเหลือง ค่าความเข้มของสี ค่ามุมของสี และค่าดัชนีความขาว เพิ่มขึ้นร้อยละ 16.61 45.90 20.42 49.03 และ 23.32 ตามลำดับ และค่าความเป็นสีแดงลดลงร้อยละ 68.48

นอกจากนี้เมื่อใช้น้ำไอโซนในการล้างเนื้อปลานิลที่ผ่านการแช่น้ำเกลือพบว่า ค่าความ สว่าง ค่าความเป็นสีเหลือง ค่าความแตกต่างของสี ค่าความเข้มของสี ค่ามุมของสี (สีเหลือง) และค่า ดัชนีความขาวมากขึ้นกว่าตัวอย่างที่ล้างน้ำไอโซนเพียงอย่างเดียวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในขณะที่ค่าความเป็นสีแดงลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 10) ซึ่งผล ที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองข้างต้น และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลของไอโซนต่อคุณลักษณะ ด้านสีของเนื้อปลานิลที่ผ่านการแช่น้ำเกลือที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 นาน 30 นาที พบว่าไอโซน ส่งผลให้ ค่าความสว่าง ค่าความแตกต่างของสี และค่ามุมของสีเพิ่มขึ้นร้อยละ 5.49 26.77 8.88 และ 5.30 ตามลำดับ ส่วนค่าความเป็นสีแดง ค่าความเป็นสีเหลือง และค่าความเข้มสีลดลงร้อยละ 87.05 24.20 และ 25.10 ตามลำดับ

ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า การใช้ไอโซนในการล้างเนื้อปลานิลหลังการแช่น้ำเกลือช่วยเสริมให้ เนื้อปลามีสีขาวยิ่งขึ้นกว่าเนื้อปลานิลที่ไม่ผ่านการล้างไอโซน จากการศึกษานี้ของ Chen และคณะ (1997) และ Kim และคณะ (1999) รายงานว่าไอโซนน่าจะเข้าไปทำลายโครงสร้างของฮีม (heme) ในไมโอโกลบิน (myoglobin) หรือฮีโมโกลบิน (hemoglobin) ทำให้สีของเนื้อปลาจางลง ผลที่ได้ สอดคล้องกับการศึกษาของ Stivarius และคณะ (2002) ซึ่งพบว่าไอโซนส่งผลต่อการลดลงของ ปริมาณออกซีไมโอโกลบิน (oxymyoglobin) ในเนื้อ จากการที่ไอโซนมีคุณสมบัติเป็นสารออกซิไดซ์ (oxidize) ที่รุนแรง จึงส่งผลต่อให้สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารประกอบอินทรีย์ได้หลาย ชนิด (Michelsen, 1992; Tiwari และคณะ, 2008) จึงอาจส่งผลให้สีของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงไป

ตารางที่ 10 ผลของน้ำเกลือและโอโซนต่อลักษณะสีของเนื้อปลานิล

สภาวะ	ความเข้มข้น ของน้ำเกลือ (%)	ระยะเวลา (วินาที)	L*	a*	b*	ΔE	chroma	hue (°)	WI
ไม่มีโอโซน	0	0	42.80 ^d (0.10)	4.41 ^a (0.02)	6.23 ^c (0.16)	-	7.64 ^b (0.16)	54.56 ^f (2.79)	42.29 ^f (2.14)
	5	15	47.29 ^c (2.21)	1.75 ^b (0.13)	7.15 ^b (0.68)	5.76 ^c (1.41)	7.36 ^{bc} (0.59)	76.27 ^e (0.83)	46.78 ^e (0.36)
	5	30	49.14 ^{bc} (0.36)	1.34 ^c (0.09)	8.85 ^a (0.08)	7.97 ^{bc} (0.95)	8.96 ^a (0.05)	81.41 ^{cd} (0.28)	48.36 ^d (0.57)
	10	15	49.17 ^{bc} (0.57)	1.40 ^c (0.04)	9.01 ^a (0.07)	8.04 ^{bc} (0.84)	9.12 ^a (0.06)	81.15 ^{cd} (0.17)	48.36 ^d (1.27)
	10	30	49.91 ^b (1.33)	1.39 ^c (0.04)	9.09 ^a (0.18)	8.78 ^{ab} (2.91)	9.20 ^a (0.18)	81.31 ^{cd} (0.41)	49.07 ^{cd} (1.68)
โอโซน	0	0	49.75 ^b (2.66)	1.03 ^d (0.01)	4.66 ^d (0.25)	8.21 ^{bc} (1.71)	4.77 ^d (0.25)	77.54 ^e (0.18)	49.53 ^c (1.13)
	5	15	50.48 ^{ab} (1.77)	1.95 ^d (0.10)	7.22 ^b (0.26)	8.84 ^{ab} (2.15)	7.16 ^{bc} (0.55)	82.40 ^c (0.02)	49.97 ^c (0.42)
	5	30	51.38 ^{ab} (1.14)	0.61 ^e (0.01)	7.11 ^b (0.05)	9.79 ^{ab} (1.46)	7.14 ^{bc} (0.07)	85.10 ^b (0.57)	50.86 ^b (1.22)
	10	15	50.66 ^{ab} (0.39)	0.27 ^f (0.04)	7.09 ^b (0.54)	9.31 ^{ab} (0.25)	7.12 ^{bc} (0.27)	87.83 ^{ab} (0.13)	50.13 ^b (0.12)
	10	30	52.65 ^a (1.30)	0.18 ^f (0.05)	6.89 ^b (0.52)	11.13 ^a (1.38)	6.89 ^c (0.23)	88.53 ^a (0.15)	52.15 ^a (2.66)

แสดงผลในรูปของ ค่าเฉลี่ย (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

n = 20

^{a-g}, ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อในร้อยละ 95

เนื้อสัมผัส

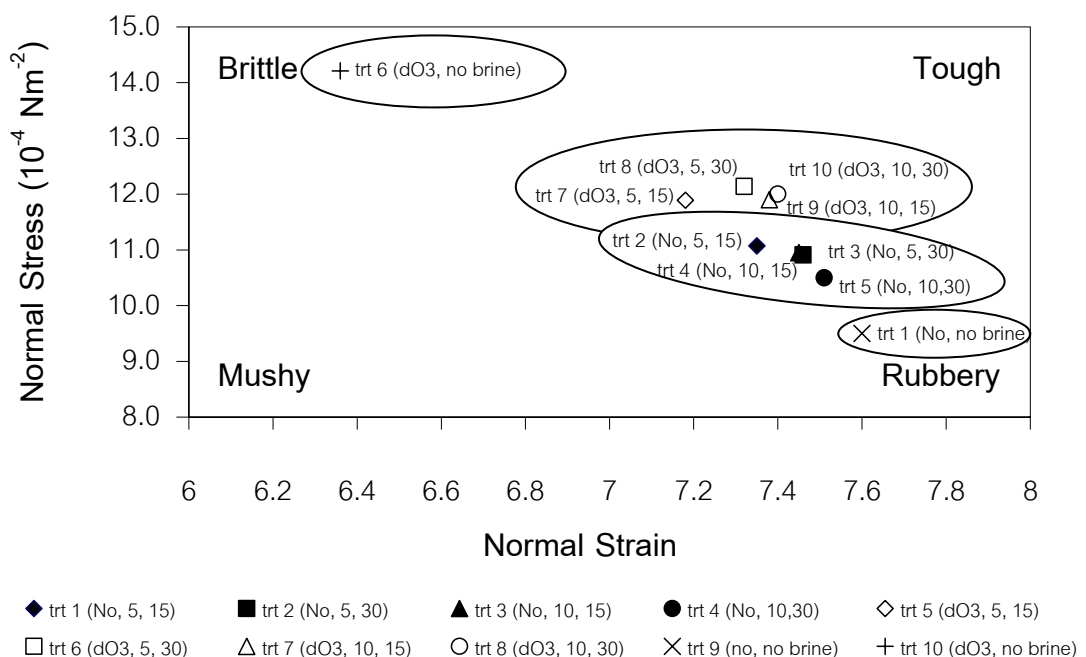
ผลของความเข้มข้น และระยะเวลาในการแช่น้ำเกลือต่อคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของเนื้อปลาชนิดที่ไม่ผ่านและผ่านการล้างด้วยน้ำไอโซนพบว่า ความเข้มข้นและระยะเวลาในการแช่น้ำเกลือที่มากขึ้นส่งผลให้ค่า hardness ค่า gumminess ค่า chewiness และค่า firmness มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ส่วนค่า juiciness เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในขณะที่ค่า springiness ค่า cohesiveness และค่า resilience ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) (ตารางที่ 11) โดยเมื่อเปรียบเทียบผลของการแช่เนื้อปลาในสารละลายน้ำเกลือที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 และร้อยละ 10 ที่เวลานาน 30 นาที กับตัวอย่างควบคุมในสภาวะที่ไม่ล้างน้ำไอโซน พบว่า ค่า juiciness เพิ่มขึ้นร้อยละ 37.07 และ 52.46 ตามลำดับ เช่นเดียวกับการแช่ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 นาน 15 และ 30 นาที พบว่าค่า juiciness เพิ่มขึ้นร้อยละ 50.33 และ 52.46 ตามลำดับ

ทั้งนี้จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มปริมาณเกลือต่อการเพิ่มขึ้นของความสามารถในการอุ้มน้ำของเนื้อ (water holding capacity) (Hamm, 1975; Aberle และคณะ, 1980; Puolanne และ Terrell, 1983; H และคณะ, 1987; Trout และ Schmidt, 1986; Barbut, 1988; Girard และคณะ, 1990) ซึ่งความเข้มข้นและระยะเวลาในการแช่น้ำเกลือส่งผลต่อ ionic strength ของโปรตีนแอคโตไมโอซิน (actomyosin) ในเนื้อ ทำให้เกิดการดูดซับทั้งประจุบวกและลบจากสารละลายเกลือ (Siegel และ Schmidt, 1979) โดยไอออนของคลอไรด์มีผลต่อโปรตีนในการช่วยเพิ่มความเป็นประจุลบให้แก่โมเลกุลของโปรตีนมากกว่าไอออนของโซเดียม แรงภายในในการดึงดูดประจุตรงข้ามของโมเลกุลโปรตีนด้วยกันเองจึงลดลง (Alex และ Johnson, 1950) ทำให้ค่าความเป็นกรดต่างของเนื้อสูงกว่าค่า isoelectric point (IP) ดังนั้นความสามารถในการอุ้มน้ำของเนื้อจึงเพิ่มสูงขึ้น การเพิ่มขึ้นของค่าความสามารถในการอุ้มน้ำสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของค่า juiciness รวมถึงการลดลงของค่า hardness ค่า chewiness และค่า firmness ที่ได้จากการทดลอง

นอกจากนี้จากการศึกษาพบว่า เนื้อปลานิลที่แช่น้ำไอโซนจะมีค่า hardness ค่า gumminess ค่า chewiness ค่า juiciness และค่า firmness สูงกว่าเนื้อปลาที่ไม่แช่น้ำไอโซนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ส่วนค่า springiness ค่า cohesiveness และค่า resilience ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) (ตารางที่ 11) เมื่อเปรียบเทียบเนื้อสัมผัสของเนื้อปลาที่แช่น้ำเกลือที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 นาน 30 นาที หลังจากผ่านและไม่ผ่านไอโซนพบว่า ค่า hardness ค่า gumminess ค่า chewiness ค่า juiciness และค่า firmness ของเนื้อปลาที่แช่น้ำไอโซนมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 25.43 34.57 45.06 2.86 และ 17.52 ตามลำดับ

ในขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของเนื้อปลานิลจาก ความสัมพันธ์ของค่า normal stress และค่า normal strain ดังแสดงในภาพที่ 10 พบว่าความเข้มข้น ระยะเวลา

ในการแช่น้ำเกลือ และไอโซน ส่งผลต่อความเค้นปกติ (normal stress) และค่าความเครียดปกติ (normal strain) ของตัวอย่าง โดยคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของเนื้อปลานิลที่ได้จากความสัมพันธ์ของค่า normal stress และค่า normal strain อาจแบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่ม คือ (1) ตัวอย่างที่ไม่แช่น้ำเกลือ และล้างด้วยไอโซนเพียงอย่างเดียวจะให้ลักษณะเนื้อสัมผัสแบบ brittle คือใช้แรงในการกดทำให้เสียรูปมาก และระยะทางในการกดให้ตัวอย่างเสียรูปน้อย ซึ่งตัวอย่างนี้จะให้ลักษณะเนื้อสัมผัสที่แตกต่างจากตัวอย่างกลุ่มอื่นๆ อย่างชัดเจน (2) ตัวอย่างแช่น้ำเกลือที่ความเข้มข้น และระยะเวลาต่างๆ และล้างด้วยไอโซน จะให้ลักษณะเนื้อสัมผัสค่อนข้างไปทาง tough คือใช้แรงในการกดทำให้เสียรูปมาก และระยะทางในการกดให้ตัวอย่างเสียรูปมากเช่นกัน (3) ตัวอย่างแช่น้ำเกลือที่ความเข้มข้น และระยะเวลาต่างๆ และไม่ล้างด้วยไอโซน จะให้ลักษณะเนื้อสัมผัสที่ระหว่าง tough และ rubbery คือใช้แรงในการกดให้ตัวอย่างเสียรูปน้อยกว่าตัวอย่างที่ล้างด้วยน้ำไอโซน แต่มากกว่าตัวอย่างควบคุม ในขณะที่ระยะทางในการกดให้ตัวอย่างเสียรูปมากกว่าตัวอย่างที่ล้างด้วยน้ำไอโซน แต่น้อยกว่าตัวอย่างควบคุม และ (4) ตัวอย่างควบคุมที่ไม่ผ่านการแช่น้ำเกลือและน้ำไอโซนจะให้ลักษณะเนื้อสัมผัสแบบ rubbery คือใช้แรงในการกดให้ตัวอย่างเสียรูปน้อย และมีระยะทางในการกดทำให้เสียรูปมาก



ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ของค่า normal stress และ normal strain ต่อคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของเนื้อปลานิล

ตารางที่ 11 ผลของน้ำเกลือและโอโซนต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของเนื้อปลานิล

สภาวะ	ความเข้มข้น ของน้ำเกลือ (%)	ระยะเวลา (วินาที)	hardness (10^{-6} Nm^{-3})	springiness	cohesiveness	gumminess (10^{-6} Nm^{-3})	chewiness (10^{-6} Nm^{-3})	resilience	juiciness (%)	firmness
ไม่มีโอโซน	0	0	7.73 ^{bc} (0.36)	0.96 ^{bc} (0.05)	0.28 ^{ab} (0.02)	2.20 ^{ab} (0.08)	2.11 ^{cd} (0.10)	0.19 (0.01)	10.33 ^e (0.96)	12.98 ^b (0.91)
	5	15	7.38 ^{bc} (0.20)	1.05 ^{ab} (0.04)	0.30 ^a (0.04)	2.17 ^{ab} (0.34)	2.28 ^{bc} (0.36)	0.19 (0.01)	13.54 ^d (0.68)	12.34 ^{bcd} (0.72)
	5	30	7.28 ^c (0.47)	0.92 ^c (0.11)	0.30 ^a (0.01)	2.14 ^{ab} (0.22)	1.96 ^d (0.09)	0.20 (0.01)	14.16 ^{cd} (0.78)	10.74 ^{de} (1.93)
	10	15	7.29 ^c (0.35)	1.02 ^{abc} (0.03)	0.26 ^b (0.02)	1.91 ^{bc} (0.11)	1.94 ^{de} (0.16)	0.18 (0.01)	15.53 ^{abc} (0.65)	11.17 ^{cde} (1.08)
	10	30	6.37 ^d (0.42)	1.01 ^{abc} (0.09)	0.25 ^b (0.03)	1.62 ^c (0.27)	1.62 ^e (0.14)	0.21 (0.05)	15.75 ^{ab} (0.89)	9.13 ^g (1.08)
โอโซน	0	0	9.14 ^a (0.46)	1.09 ^a (0.09)	0.30 ^a (0.01)	2.40 ^a (0.13)	2.62 ^a (0.27)	0.22 (0.02)	13.22 ^d (0.36)	14.76 ^a (0.91)
	5	15	7.93 ^{bc} (0.94)	1.00 ^{abc} (0.03)	0.27 ^{ab} (0.03)	2.16 ^{ab} (0.37)	2.14 ^{cd} (0.30)	0.23 (0.11)	13.84 ^d (0.84)	13.64 ^{ab} (1.47)
	5	30	8.09 ^b (0.38)	1.02 ^{ab} (0.03)	0.30 ^a (0.01)	2.42 ^a (0.11)	2.48 ^{ab} (0.15)	0.23 (0.06)	14.50 ^{bcd} (1.20)	11.03 ^{de} (0.53)
	10	15	7.93 ^{bc} (0.58)	1.03 ^{ab} (0.09)	0.27 ^{ab} (0.02)	2.12 ^{ab} (0.22)	2.17 ^{bcd} (0.27)	0.20 (0.02)	15.65 ^{ab} (1.16)	12.64 ^{bc} (0.56)
	10	30	7.99 ^{bc} (0.63)	1.08 ^a (0.07)	0.28 ^{ab} (0.01)	2.18 ^{ab} (0.13)	2.35 ^{abc} (0.18)	0.20 (0.01)	16.20 ^a (0.18)	10.73 ^{ef} (1.13)

แสดงผลในรูปของ ค่าเฉลี่ย (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

n = 30

^{a-g}, ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อในร้อยละ 95

ผลของน้ำเกลือและไอโซนต่อคุณลักษณะทางเคมี

จากการศึกษาผลของความเข้มข้น และระยะเวลาในการแช่น้ำเกลือต่อองค์ประกอบทางเคมีของเนื้อปลานิลที่ไม่ผ่านและผ่านการล้างน้ำไอโซนพบว่า ความเข้มข้นและระยะเวลาในการแช่น้ำเกลือส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าร้อยละความชื้น โซเดียมคลอไรด์ และค่าความเป็นกรดต่าง รวมถึงการลดลงของค่าร้อยละไขมัน และโปรตีนของเนื้อปลานิลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะควบคุมที่ไม่แช่น้ำเกลือ ในขณะที่ค่าร้อยละคาร์โบไฮเดรต เถ้า และใยอาหาร ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ความเข้มข้นของเกลือที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ความชื้น ค่าความเป็นกรดต่าง และปริมาณโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากเกลือส่งผลต่อโครงสร้างของโปรตีน (Offer และ Knight, 1988) โดยไอออนของสารละลายเกลือที่แตกตัวมีผลต่อโปรตีนในการช่วยเพิ่มความเป็นประจุลบให้แก่โมเลกุลของโปรตีน ทำให้ค่าความเป็นกรดต่างของเนื้อสูงขึ้นกว่าค่า isoelectric point (Alexและer และ Johnson, 1950) ความสามารถในการอุ้มน้ำของเนื้อจึงเพิ่มสูงขึ้น (Hamm, 1975; Aberle และคณะ, 1980; Puolanne และ Terrell, 1983; H และ คณะ, 1987; Trout และ Schmidt, 1986; Barbut, 1988; Girard และคณะ, 1990) นอกจากนี้จากการศึกษาของ Choi และคณะ (2007) พบว่าค่าความเป็นกรดต่าง และความชื้นของเนื้อปลาเพิ่มขึ้นเมื่อแช่เนื้อปลาในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นสูง ผลการศึกษาดังกล่าวสอดคล้องกับการศึกษาของ Larsen และคณะ (2008)

ความเข้มข้นของเกลือที่เพิ่มสูงขึ้นกลับส่งผลให้ปริมาณโปรตีน และไขมันลดลง โดยเกลือทำให้เกิดการละลายของไมโอไฟบริลโปรตีน (myofibrilla protein) (Choi และคณะ, 2007) จากการศึกษาของ Mendes และ Nunes (1992) พบว่าการล้างเนื้อปลาสำหรับทำซูริมีด้วยน้ำเกลือจะช่วยกำจัดไขมัน ซาร์โคพลาสมิคโปรตีน (sarcoplasmic protein) รวมถึงสารอื่นๆ ที่ไม่ต้องการอย่าง เลือด สารสี (pigment) และสารประกอบให้กลิ่นออกจากเนื้อปลา นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลของการใช้ไอโซนพบว่า เนื้อปลาที่แช่น้ำไอโซนจะมีค่าร้อยละไขมันลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ทั้งนี้กลไกของไอโซนต่อการลดลงของไขมันในผลิตภัณฑ์ยังไม่ได้มีการอธิบายอย่างชัดเจนในการทดลองนี้คาดว่าน่าจะเกิดจากการใช้ระบบของการหมุนเวียนน้ำไอโซนผ่านตัวอย่าง

ตารางที่ 12 ผลของน้ำเกลือและไอโซนต่อองค์ประกอบทางเคมีของเนื้อปลานิล

สภาวะ	ความเข้มข้น ของน้ำเกลือ (%)	ระยะเวลา (วินาที)	ความชื้น (%)	ไขมัน (%)	คาร์โบไฮเดรต (%)	โปรตีน (%)	เถ้า (%)	ใยอาหาร (%)	pH	โซเดียมคลอไรด์ (%)
ไม่มีไอโซน	0	0	76.48 ^d (0.53)	4.22 ^a (0.17)	1.01 (0.03)	17.42 ^a (0.31)	0.84 (0.09)	0.12 (0.03)	6.47 ^c (0.00)	0.08 ^h (0.01)
	5	15	77.88 ^{abc} (0.61)	3.90 ^{ab} (0.22)	0.90 (0.15)	16.78 ^{abc} (0.31)	0.85 (0.02)	0.10 (0.03)	6.48 ^c (0.03)	0.46 ^f (0.01)
	5	30	77.23 ^{bcd} (0.70)	3.40 ^c (0.42)	0.92 (0.13)	15.65 ^{ef} (0.07)	0.84 (0.07)	0.11 (0.02)	6.49 ^c (0.01)	0.67 ^d (0.01)
	10	15	78.52 ^a (0.59)	3.68 ^{bc} (0.15)	1.00 (0.10)	16.33 ^{cd} (0.18)	0.85 (0.06)	0.12 (0.02)	6.48 ^c (0.06)	0.90 ^b (0.04)
	10	30	78.04 ^{abc} (0.63)	3.38 ^c (0.31)	0.89 (0.03)	14.80 ^{gh} (0.28)	0.86 (0.02)	0.13 (0.05)	6.53 ^{bc} (0.00)	1.20 ^a (0.02)
ไอโซน	0	0	77.12 ^{cd} (1.13)	2.48 ^d (0.05)	0.92 (0.10)	17.11 ^{ab} (0.36)	0.84 (0.05)	0.11 (0.02)	6.49 ^c (0.03)	0.04 ^h (0.01)
	5	15	78.21 ^{ab} (0.33)	2.48 ^d (0.01)	0.90 (0.06)	16.58 ^{bcd} (0.33)	0.84 (0.01)	0.11 (0.01)	6.50 ^c (0.04)	0.32 ^g (0.01)
	5	30	78.01 ^{abc} (1.07)	2.13 ^{de} (0.06)	0.91 (0.07)	15.40 ^{fg} (0.57)	0.83 (0.03)	0.12 (0.04)	6.56 ^b (0.01)	0.57 ^e (0.01)
	10	15	78.42 ^a (0.27)	2.09 ^{de} (0.15)	1.02 (0.08)	16.10 ^{de} (0.14)	0.85 (0.05)	0.09 (0.02)	6.60 ^{ab} (0.01)	0.65 ^d (0.01)
	10	30	78.61 ^a (0.44)	1.98 ^e (0.07)	0.97 (0.05)	14.57 ^h (0.09)	0.82 (0.02)	0.10 (0.03)	6.63 ^a (0.02)	0.75 ^c (0.04)

แสดงผลในรูปของ ค่าเฉลี่ย (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

n = 20

^{a-h}, ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อในร้อยละ 95

สรุปผลการทดลอง

การศึกษาเพื่อติดตามผลของการแช่น้ำเกลือปลานิลที่ความเข้มข้น 2 ระดับ (5 และ 10 น้ำหนักต่อปริมาตร) และระยะเวลาในการแช่ 2 ระดับ (15 และ 30 นาที) ก่อนนำเนื้อปลานิลไปล้างด้วยน้ำไอโซนที่ความเข้มข้น 3 ppm นาน 90 วินาที ศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงทางเคมี กายภาพ และจุลินทรีย์ ผลการทดลองพบว่าการใช้น้ำเกลือร่วมกับไอโซนจะให้ลักษณะของเนื้อปลานิลที่ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อปลาในสภาวะควบคุม (ไม่แช่น้ำเกลือและไม่ล้างไอโซน) โดยเฉพาะในด้านการลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ การเพิ่มขึ้นของค่าความสว่าง และดัชนีความขาว

บทที่ 4

ผลของก๊าซโอโซนต่อคุณลักษณะทางเคมี กายภาพ และจุลินทรีย์ ของปลานิลอบแห้ง

บทนำ

โอโซน (O_3) เป็นก๊าซธรรมชาติรูปแบบหนึ่งของออกซิเจนที่ไม่เสถียร สามารถแตกตัวเป็นก๊าซออกซิเจน (O_2) และอะตอมของออกซิเจน (O) ได้ โดยอะตอมของออกซิเจนจะเกิดการรวมตัวกันเป็นก๊าซออกซิเจน หรือสามารถรวมตัวกับสารเคมีอื่นๆ จึงเป็นสาเหตุให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ จากการรวมตัวของออกซิเจนสามอะตอมจึงทำให้โอโซนจะมีพลังงานในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันสูง ส่งผลต่อการทำลายเชื้อแบคทีเรีย ยีสต์/รา และไวรัส (Akey และ Walton, 1985; Bolton และคณะ, 1982; Botzenhart และคณะ, 1993; Foegeding, 1985; Hall และ Sobsey, 1993; Kim และคณะ, 1980; Restaino และคณะ, 1995) จากการศึกษากลไกการทำงานของโอโซนในการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์และทำลายเซลล์แบคทีเรีย พบว่าโอโซนจะไปออกซิไดซ์หมู่ซัลไฟไฮดริล (sulfhydryl) และกรดอะมิโนในสายโซ่เปปไทด์ (peptide) ของเอนไซม์ และโปรตีน เมื่อโอโซนทำปฏิกิริยากับเอนไซม์และโปรตีนของเซลล์แบคทีเรียจะทำให้ถูกตัดเป็นเปปไทด์สายสั้นๆ ซึ่งก่อให้เกิดการสูญเสียสภาพในที่สุด หรือในบางกรณีโอโซนจะไปออกซิไดซ์กลุ่มกรดไขมันไม่อิ่มตัว (polyunsaturated fatty acid) ให้เป็นกรดเพอร์ออกไซด์ (acid peroxides) ซึ่งเป็นพิษต่อเซลล์ จึงทำให้เซลล์ตาย (Guzel-Seydim และคณะ, 2004; Zeynep และคณะ, 2004)

ดังนั้นจึงมีการประยุกต์ใช้โอโซนในอุตสาหกรรมอาหารหลายประเภท เพื่อลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในอาหาร และผิวหน้าของวัสดุที่ใช้ในการประกอบอาหาร (Chang, 1989; Greene และคณะ, 1993; Schneider และคณะ, 1991; Sheldon และ Brown, 1986) สำหรับโรคในระบบน้ำ และช่วยปรับปรุงคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสและอายุการเก็บรักษาของปลา (Kötters และคณะ, 1997; Kim และคณะ, 1999, 2000) เนื้อ (Greer และ Jones, 1989; Sheldon และ Brown, 1986) และกุ้ง (Chen และคณะ, 1992) รวมถึงช่วยทำลายยาฆ่าแมลงและสารพิษตกค้างในวัตถุดิบ (Hwang และคณะ, 2001; Ong และคณะ, 1996) เป็นต้น

ปลานิล (*Oreochromis niloticus*) เป็นหนึ่งในปลาน้ำจืดของไทยที่มีการผลิตเพิ่มขึ้นในปริมาณมาก ส่วนใหญ่นิยมส่งออกไปยังสหรัฐอเมริกา และสหภาพยุโรปในรูปของปลาชำแหละสด (ธนาคารเพื่อการส่งออกและนำเข้าแห่งประเทศไทย, 2550) อย่างไรก็ตามเนื่องด้วยปลาและผลิตภัณฑ์จากสัตว์น้ำ สามารถเสื่อมเสียได้ง่ายเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ชนิดอื่นโดยคุณภาพของผลิตภัณฑ์จะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ (Gram และ Huss, 1996; Manousaridis และ

คณะ, 2005) Gram และคณะ (1996) รายงานว่าปลาน้ำจืดจะพบแบคทีเรียชนิดแกรมลบ รูปร่างแท่ง ได้แก่ *Pseudomonas*, *Moraxella*, *Acinetobacter*, *Shewanella*, *Flavobacterium*, *Vibrionaceae* และ *Aeroomonadaceae* และแกรมบวก เช่น *Bacillus*, *Micrococcus*, *Clostridium*, *Lactobacillus* และ *Corynebacterium* ผู้ประกอบการหลายท่านจึงต้องแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ปลานิลแดดเดียว ทั้งนี้จากการเก็บตัวอย่างปลานิลแดดเดียวที่มีขายในท้องตลาดพบว่าผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดอยู่ในช่วง 6-8 log cfu/g ขึ้นกับแหล่งที่มาและกรรมวิธีในการผลิต ผลิตภัณฑ์โดยส่วนใหญ่ที่ไม่มีการเติมวัตถุกันเสียจึงมีอายุการเก็บรักษาสั้นประมาณ 4-5 วัน ดังนั้นวัตถุประสงค์ในการศึกษานี้จึงเป็นการศึกษาผลของการใช้ก๊าซโอโซนในการหมักเนื้อปลานิลระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิต่างๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงทางจุลินทรีย์ สี และคุณลักษณะทางเคมี เปรียบเทียบผลที่ได้กับสภาวะควบคุมที่ไม่ผ่านการรมก๊าซโอโซน

วัตถุดิบและวิธีการทดลอง

การเตรียมปลานิล

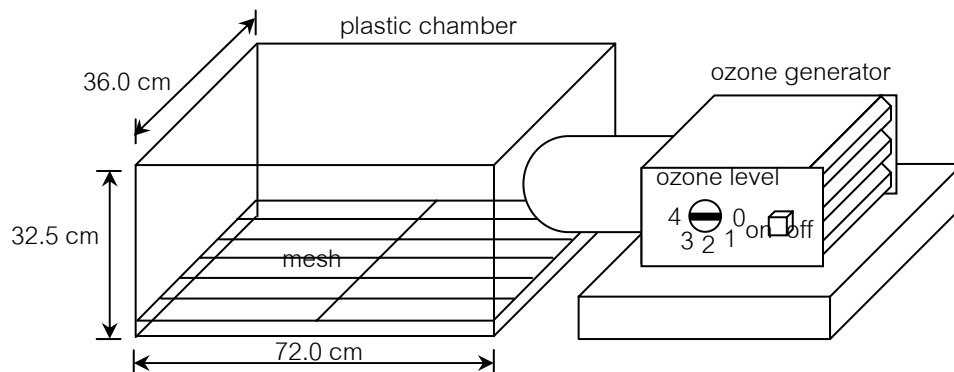
ปลานิล (Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*) ที่มีชีวิตถูกจับจากบ่อในจังหวัดนครปฐม และปลาจะได้รับออกซิเจนตลอดระยะทางที่ขนส่งมายังภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ปลานิลที่เลือกมาใช้ในการทดลองมีอายุประมาณ 6 เดือน และมีน้ำหนักประมาณ 500 ± 50 กรัม ทำการชั่งปลาไว้ในสภาวะที่ไม่มีความเครียดก่อนทำให้ตาย ทำการขอดเกล็ด ครวักไส้ และแล่แบบไม่ติดก้าง นำเนื้อปลาที่ได้มาแช่ในน้ำเย็นที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส นาน 2 นาที ก่อนทำการทดลองต่อไป โดยขึ้นปลาที่แล่แล้วจะมีความยาวและน้ำหนักเฉลี่ย $22.0-25.0$ เซนติเมตร และ 120 ± 20 กรัมต่อชิ้น ตามลำดับ

สภาวะในการทดลอง

นำเนื้อปลานิลที่แล่แล้ว 6 ชิ้น มาวางเรียงบนถาดในตู้อบแบบลมร้อน (รุ่น ED53, บริษัทกล้วยน้ำไธ, ประเทศไทย) โดยอบที่อุณหภูมิ 2 ระดับ คือ 40 และ 50 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปใส่ในตูรมโอโซน (ภาพที่ 11) เป็นเวลานาน 30 นาที และนำไปอบต่อ ทำซ้ำอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเวลาอบครบ 6 ชั่วโมง สำหรับอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และ 5 ชั่วโมง สำหรับอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เพื่อให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีค่า water activity (A_w) เป็น 0.85

ทั้งนี้ความเข้มข้นของโอโซนที่ใช้รมเนื้อปลานิลระหว่างการอบแห้งมี 3 ระดับคือ 1 3 และ 5 ppm เนื้อปลาที่ได้หลังเสร็จสิ้นกระบวนการถูกนำมาวางบนตะแกรงสเตนเลสที่ฆ่าเชื้อแล้วนาน 5 นาที ที่อุณหภูมิห้อง เก็บชิ้นปลาในถุงโพลีเอทิลีนที่ปิดสนิท ก่อนนำไปวิเคราะห์คุณลักษณะทางเคมี ภายภาพ

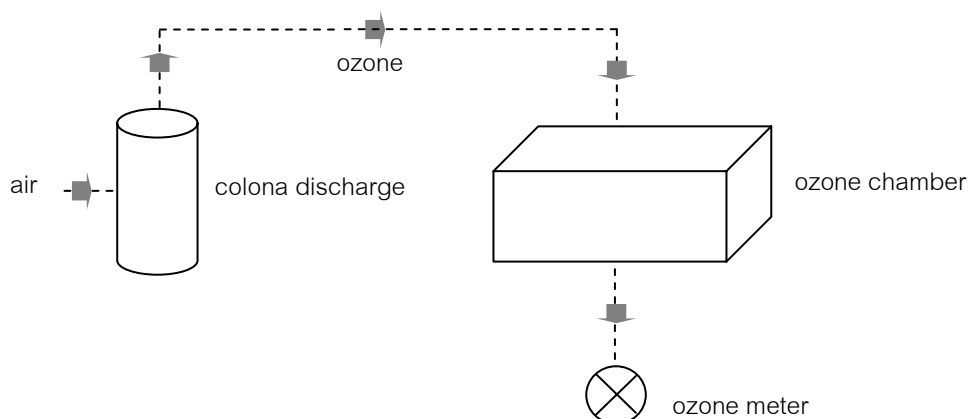
และจุลินทรีย์ต่อไป ทำการทดลองแต่ละสภาวะ 3 ซ้ำ ทั้งนี้สภาวะควบคุมคือเนื้ปลาที่ไม่ผ่านการรมโอโซน



ภาพที่ 11 กระบวนการสร้างโอโซนในระบบปิด

การสร้างโอโซน

โอโซนก๊าซจะถูกสร้างในสภาวะปิดที่มีระบบการหมุนเวียนดังภาพที่ 12 ภายในกล่องพลาสติกโพลีเอทิลีนขนาดความจุ 0.08 ลูกบาศก์เมตร ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งโอโซนจะผลิตจาก corona discharge (บริษัท Active Science จำกัด, ประเทศไทย) โดยการส่งออกซิเจนจากสภาวะบรรยากาศที่มีความเข้มข้นร้อยละ 21 เข้าสู่ระบบ แล้วใช้กระแสฟ้าสถิตย์ที่มีแรงเคลื่อนที่สูงผ่านเข้าไปในช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด เพื่อกระตุ้นให้อิเล็กตรอนของก๊าซออกซิเจนแตกตัว ก่อนจะไปรวมตัวกับก๊าซออกซิเจนโมเลกุลอื่นเป็นก๊าซโอโซน



ภาพที่ 12 กระบวนการสร้างโอโซนในระบบปิด

การวัดปริมาณโอโซน

ปริมาณความเข้มข้นของโอโซนจะถูกวัดด้วยเครื่องวัดโอโซนแบบเคลื่อนที่ (รุ่น A-21ZX, บริษัท Ecosensor, ประเทศสหรัฐอเมริกา) โดยเครื่องจะสามารถวัดค่าการละลายของโอโซนได้ในช่วง 0-10

ppm ที่ระดับความถูกต้อง 0.01 ซึ่งก๊าซไอโซนจะถูกส่งอย่างต่อเนื่องไปยังเซนเซอร์ชนิด heated metal oxide semiconductor (HMOS) ในส่วนของ electric unit

การวิเคราะห์ทางจุลินทรีย์

ทำการวิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์ในตัวอย่างปลา 2 บริเวณ คือ (1) บริเวณหนัง โดยทำการ swab หนังปลาที่ขนาดพื้นที่ 5×5 เซนติเมตร ด้วย peptone water (บริษัท Sigma-Aldrich Chemical, GmbH, ประเทศเยอรมัน) ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 ที่ผ่านการสเตอไรล์แล้ว และ (2) ในเนื้อปลา โดยการนำตัวอย่างปลาน้ำหนัก 25 กรัม มาผสมกับ peptone water ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 ปริมาตร 225 มิลลิลิตร ตีให้เข้ากันด้วย stomacher (Seward Medical, ประเทศอังกฤษ) ทั้งนี้ตัวอย่างทั้ง 2 บริเวณ จะถูกนำมาเจือจางให้มีความเข้มข้นที่ระดับต่างๆ ด้วย peptone water วิเคราะห์ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด (total plate count) และยีสต์รา ในตัวอย่าง โดยการบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 48 ชั่วโมง ตามลำดับ

การวิเคราะห์คุณลักษณะด้านสี

วัดค่า L^* a^* และ b^* ของตัวอย่างตามวิธีของ CIE (1997) ด้วย color-view™ spectrophotometer (รุ่น 9000, Gardner, ประเทศสหรัฐอเมริกา) โดยใช้แสงชนิด D65 และมีการหมุนของแสง 10° ทั้งนี้ค่า L^* จะบ่งบอกถึงค่าความสว่าง ($L^*=0$ แสดงความเป็นสีดำ และ $L^*=100$ แสดงความเป็นสีขาว) ค่า a^* แสดงค่าความเป็นสีแดง เมื่อ $a^*>0$ และ ค่า b^* แสดงค่าความเป็นสีเหลือง เมื่อ $b^*>0$ วิเคราะห์ค่าความเข้มสี (chroma) จาก $C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$ และค่ามุมของสี (hue angle) จาก $h_{ab} = \tan^{-1}(b^*/a^*)$ เมื่อ $h_{ab}=0^\circ$ สำหรับ red hue และ $h_{ab}=90^\circ$ สำหรับ yellow hue และค่าดัชนีความขาว (whiteness index, WI) จาก $WI = 100 - [(100-L)^2 + a^2 + b^2]^{1/2}$ (Bricknell และ Hartel, 1998) โดยสีของเนื้อปลาจะถูกวัด 3 ตำแหน่งคือ ส่วนบนใกล้หัว ส่วนกลาง และส่วนล่างใกล้หาง ตามลำดับ ทำการวัดค่า 3 ซ้ำ

การวิเคราะห์ทางเคมี

ปริมาณ Total volatile base nitrogen (TVB-N) (ดัดแปลงจาก Sallam, 2007)

การสกัดเนื้อปลาเพื่อหาปริมาณ TVB-N เตรียมได้โดยการนำเนื้อปลาน้ำหนัก 100 กรัม มาปั่นกับสารละลายกรดไตรคลอโรอะซิติก (trichloroacetic acid) ความเข้มข้นร้อยละ 7.5 ให้ละเอียดนาน 1 นาที ที่ความเร็วสูง นำสารผสมที่ปั่นได้ไปเหวี่ยงที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที นาน 5 นาที หลังจากนั้นกรองสารละลายส่วนใสที่ได้ผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1

หาปริมาณ TVB-N โดยการนำสารละลายที่กรองได้ปริมาณ 25 มิลลิลิตร มาเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 10 ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ทำการกลั่นด้วยไอน้ำ และรองรับสารที่ได้จากการกลั่นด้วยสารละลายกรดบอริกความเข้มข้นร้อยละ 4 ปริมาตร 15 มิลลิลิตร กลั่นจนกระทั่งได้ปริมาตรหลังการกลั่นรวม 50 มิลลิลิตร หลังจากนั้นนำไปไตเตรทกับกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ โดยใช้เมทิลเรด (methyl red) เป็นอินดิเคเตอร์ จำนวน 2 ซ้ำ

ค่ากรดไธโอบาร์บิทริก (Thiobarbituric acid; TBA) (ดัดแปลงจาก Jayasingh และคณะ, 2003)

นำเนื้อปลามาทำปฏิกิริยากับสารละลายผสมของกรดไตรคลอโรอะเซติกความเข้มข้นร้อยละ 15 และกรดไธโอบาร์บิทริก (thiobarbituric acid; TBA) ความเข้มข้นร้อยละ 0.375 ในกรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric) เข้มข้น 0.2 นอร์มัล ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส แล้วทำให้เย็นทันที จากนั้นนำไปเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 8,000 รอบต่อนาที นาน 20 นาที นำสารละลายส่วนใสที่ได้มาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร จำนวน 2 ซ้ำ

การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์ผลการทดลองด้วยโปรแกรม General Linear Model (GLM) หาค่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Least Significant Difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SAS (เวอร์ชัน 8.1, SAS Inst., Cary, NC, ประเทศสหรัฐอเมริกา)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

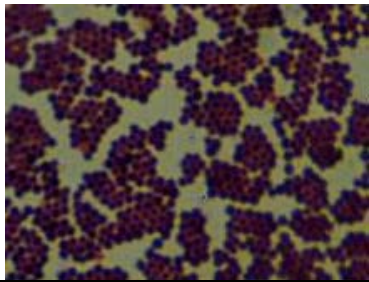
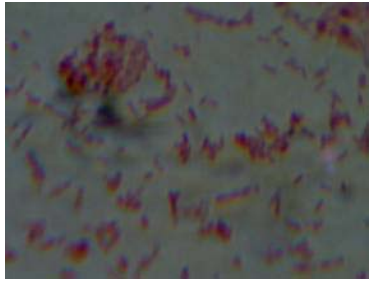
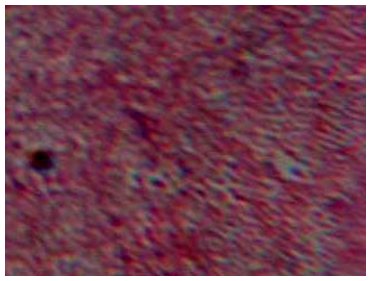
การลดลงของเชื้อจุลินทรีย์

จากการทดลองแยกโคโลนีเดี่ยวในผลิตภัณฑ์ปลานิลแดดเดียวที่มีขายทั่วไปในท้องตลาด พบว่าเชื้อจุลินทรีย์ส่วนใหญ่คือ *Staphylococcus* sp., *Bacillus* sp. และ Lactic acid bacteria ดังแสดงในตารางที่ 13 โดยเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิดดังกล่าว ล้วนเป็นเชื้อแบคทีเรียทั้งสิ้น ทั้งนี้อาจพบยีสต์บ้างในปริมาณน้อย เนื่องจากปลานิลแดดเดียวที่ได้จากการเก็บตัวอย่างมีค่า water activity (a_w) 0.85-0.96 จึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ โดยเฉพาะแบคทีเรีย (Stahl, 1978)

ดังนั้นจากการศึกษาผลของความเข้มข้นไอโซนในการรมเนื้อปลานิลเป็นช่วงๆ ของการอบแห้ง พบว่า ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด และยีสต์/รา ในปลานิลทั้งที่บริเวณหนังและเนื้อปลาลดลง ($p < 0.05$) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ตามระดับความเข้มข้นของไอโซนที่เพิ่มขึ้น (ตารางที่ 14) โดยการให้ไอโซนที่ความเข้มข้น 5 ppm สามารถลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ และยีสต์/รา ลงได้มากที่สุด ซึ่งปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดลดลง $1.08 \log \text{ cfu/cm}^2$ และ $1.02 \log \text{ cfu/g}$ ที่บริเวณหนังและเนื้อปลานิล

ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะควบคุมที่ไม่มีการใช้โอโซน ในขณะที่ปริมาณยีสต์/รา ลดลง 0.60 log cfu/cm² และ 0.95 log cfu/g ที่บริเวณหนังและเนื้อปลานิล ตามลำดับ เนื่องจากโอโซนมีคุณสมบัติเป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรง (Dew, 2000) สามารถทำลายเชื้อจุลินทรีย์ได้โดยการฆ่าจากการสัมผัสโดยตรงที่ผนังเซลล์ และยังส่งผลให้เกิดการออกซิเดชันของสารที่เป็นองค์ประกอบภายในเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์ (Bringman, 1954; Chang, 1971; Kim และคณะ, 1999; Chawla, 2006) เช่น ทริปโตเฟน (tryptophan) ไกลโคโปรตีน (glycoprotein) และไกลโคลิปิด (glycolipid) ที่ผนังเซลล์ (Scott และ Lesher, 1963; Goldstein และ Mcdonagh, 1975; Chawla, 2006)

ตารางที่ 13 ลักษณะของเชื้อจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ ที่พบบ่อยในปลานิลแดดเดียว

เชื้อที่พบ	ลักษณะ	ภาพ
<i>Staphylococcus sp.</i>	-รูปร่างกลม อยู่ติดกันเป็นรูปพวงของคู่ ติดสี่แกรมบวก -ขณะอยู่บนพื้นจะมีลักษณะกลม ขอบเรียบ สีเหลือง	
<i>Bacillus sp.</i>	-รูปร่างท่อน ติดสี่แกรมบวก -ขณะอยู่บนพื้นจะมีลักษณะกลม ขอบหยัก สีขาว	
Lactic acid bacteria	-รูปร่างท่อน ขนาดเล็ก ติดสี่แกรมลบ -ขณะฝังตัวในพื้นจะมีลักษณะคล้าย กระสวยสีขาว	

นอกจากนี้อนุมูลตัวกลางอิสระที่เกิดจากกระบวนการออกซิเดชันจะเป็นตัวเข้าทำลายเซลล์เมมเบรน ไซโตพลาสซึมโปรตีนและชั้นของไขมันในเซลล์จุลินทรีย์ ทำให้เกิดการจับตัวเป็นก้อนโปรตีนแล้วทำให้เซลล์แตก หรือการเข้าทำลายระบบหายใจของเซลล์จุลินทรีย์ได้ จากการศึกษาของ Öztekin และ

คณะ (2006) ในการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 5 ppm เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง กับผลมะเดื่ออบแห้ง พบว่า ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีประสิทธิภาพในการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดที่ใช้ออกซิเจนในการหายใจที่อุณหภูมิปานกลาง (total aerobic mesophyllic) และยีสต์/ราลงได้ร้อยละ 38 และ 72 ตามลำดับ ในขณะเดียวกันยังไม่พบการเจริญของ *Escherichia coli*

ตารางที่ 14 ผลของความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการลดลงของปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อปลานิลอบแห้ง

ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (ppm)	ผิวหน้า (บริเวณหนัง)		เนื้อ	
	ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด (log cfu/cm ²)	ยีสต์และรา (log cfu/cm ²)	ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด (log cfu/g)	ยีสต์และรา (log cfu/g)
0	3.62 ^a (0.05)	1.14 ^a (0.06)	5.55 ^a (0.05)	2.97 ^a (0.02)
1	3.40 ^b (0.04)	1.03 ^b (0.02)	5.48 ^a (0.05)	2.87 ^b (0.03)
3	3.11 ^c (0.06)	0.80 ^c (0.05)	5.23 ^b (0.10)	2.68 ^c (0.02)
5	2.54 ^d (0.11)	0.54 ^d (0.06)	4.53 ^c (0.06)	2.02 ^d (0.05)

แสดงผลในรูปของ ค่าเฉลี่ย (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

n = 16

^{a-d}, ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อในร้อยละ

95

จากการศึกษาพบว่าก๊าซไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถยับยั้งเชื้อ lactic acid bacteria ได้มากที่สุด รองลงมาคือเชื้อ *Bacillus* sp. และเชื้อ *Staphylococcus* sp. ตามลำดับ โดยเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก Lactic acid bacteria เป็นแบคทีเรียรูปร่างท่อน ไม่สร้างสปอร์ จึงทนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้น้อยที่สุด ทำให้ปริมาณการลดลงของเชื้อดังกล่าวมากที่สุด ส่วน *Bacillus* sp. เป็นแบคทีเรียรูปร่างท่อน สามารถสร้างสปอร์ได้ ทำให้มีผนังหนา ดังนั้นจึงทนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้มากกว่า Lactic acid bacteria ในขณะที่ *Staphylococcus* sp. เป็นแบคทีเรียรูปร่างกลม ซึ่งแบคทีเรียแบบนี้จะทนต่อสภาวะต่างๆ ได้มากกว่าแบบท่อน นอกจากนี้ยังมีผนังเป็นเปปติโดไกลแคน (peptidoglycan) ที่สามารถทนต่อสภาวะแห้งแล้งและอุณหภูมิสูงได้ รวมถึงยังสามารถทนต่อสภาวะความเข้มข้นของเกลือสูงอีกด้วย จึงทำให้แบคทีเรียชนิดนี้ลดลงได้น้อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Mielcke และ Ried (2004) ที่รายงานว่า การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นต่ำเพียง 0.01 ppm สามารถทำลายแบคทีเรียลงได้ ทั้งนี้เชื้อจุลินทรีย์แต่ละชนิดจะมีความไวต่อการถูกทำลายโดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แตกต่างกัน เชื้อแบคทีเรียจะสามารถถูกทำลายได้ง่ายกว่ายีสต์/รา เชื้อแบคทีเรียแกรมบวกสามารถทำลายได้ง่ายกว่าแกรมลบ ในขณะที่สปอร์สามารถทนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้มากกว่าเซลล์ที่มีชีวิต (Pascual, Llorca, และ Canut, 2007) ในขณะเดียวกัน Compos และคณะ

(2005) รายงานว่าการใช้โอโซนจะสามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียในปลาได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเชื้อจุลินทรีย์ที่โอโซนสามารถยับยั้งได้ เช่น *Vibrio cholerae*, *Vibrio parahaemolyticus*, *Escherichia coli*, *Salmonella typhimurium* และ *Staphylococcus aureus* เป็นต้น

นอกจากนี้จากการศึกษาผลของอุณหภูมิในการอบแห้งที่ 40 และ 50 องศาเซลเซียสร่วมกับการใช้โอโซนพบว่าอุณหภูมิในการอบแห้งเนื้อปลานิลไม่ส่งผลให้ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด และยีสต์/รา ที่บริเวณหนังและเนื้อของปลาแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 15

ตารางที่ 15 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในปลานิล

อุณหภูมิอบ (องศาเซลเซียส)	ผิวหนัง (บริเวณหนัง)		เนื้อ	
	ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด (log cfu/cm ²)	ยีสต์และรา (log cfu/cm ²)	ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด (log cfu/g)	ยีสต์และรา (log cfu/g)
40	3.28 (0.30)	0.90 (0.25)	5.31 (0.24)	2.73 (0.26)
50	3.20 (0.34)	0.85 (0.28)	5.28 (0.27)	2.69 (0.28)

แสดงผลในรูปของ ค่าเฉลี่ย (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

n = 16

การเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะด้านสี

จากการศึกษาผลของการรมโอโซนที่ความเข้มข้นต่างๆ ในระหว่างการอบแห้งเนื้อปลานิลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะด้านสีพบว่า ความเข้มข้นโอโซนที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าความสว่าง ค่าความเป็นสีเหลือง ค่าความเข้มสี ค่ามุมของสี และค่าดัชนีความขาวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในขณะที่ค่าความเป็นสีแดงลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งผลดังกล่าวจะเห็นได้ชัดที่ระดับความเข้มข้น 3 และ 5 ppm ตามลำดับ (ตารางที่ 16) โดยที่ความเข้มข้น 5 ppm ทำให้ค่าความสว่าง ค่าความเป็นสีเหลือง ค่าความเข้มสี ค่ามุมของสี และค่าดัชนีความขาวเพิ่มขึ้นร้อยละ 10.48 16.25 12.45 9.53 และ 9.06 ตามลำดับ ส่วนค่าความเป็นสีแดงลดลงร้อยละ 26.36 เมื่อเปรียบเทียบกับสถานะควบคุมที่ไม่ผ่านการรมโอโซน

การใช้โอโซนในการรมเนื้อปลานิลระหว่างการอบแห้งช่วยให้เนื้อปลามีสีขาวขึ้นกว่าเนื้อปลานิลที่ไม่ผ่านการรมโอโซน โดยก๊าซโอโซนมีคุณสมบัติในการฟอกสีผลิตภัณฑ์ได้ (Jiang และคณะ, 1998; Dew, 2005) จากการศึกษาของ Chen และคณะ (1997) และ Kim และคณะ (1999) รายงานว่าโอโซนน่าจะเข้าไปทำลายโครงสร้างของฮีม (heme) ในไมโอโกลบิน (myoglobin) หรือฮีโมโกลบิน (hemoglobin) ทำให้สีของเนื้อปลาจางลง ซึ่ง Jiang และคณะ (2007) ระบุว่า การเพิ่มขึ้นของค่าความสว่างเป็นผลมาจากการทำลายพันธะไดซัลไฟด์ (disulfide) ของโปรตีน หรือเปปไทด์ และรงควัตถุฮีมใน

เนื้อปลา ประกอบกับการที่โอโซนมีคุณสมบัติเป็นสารออกซิไดซ์ (oxidize) ที่รุนแรง จึงส่งผลต่อให้สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารประกอบอินทรีย์ได้หลายชนิด (Michelsen, 1992; Tiwari และคณะ, 2008) จึงอาจส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์ ผลดังกล่าวสอดคล้องกับการศึกษาของ Jiang และคณะ (1997) ที่แสดงให้เห็นว่าการใช้โอโซนช่วยปรับปรุงสีของซูริมิจากปลาแมคเคอเรล และ Hocke และคณะ (2000) รายงานว่าการใช้โอโซนส่งผลให้เนื้อปลาดูมีค่าความสว่างและค่าความเป็นสีเขียว (b*) เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 16 ผลของความเข้มข้นโอโซนต่อเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะด้านสีในเนื้อปลานิลอบแห้ง

ความเข้มข้นโอโซน (ppm)	L*	a*	b*	chroma	hue (°)	WI
0	52.75 ^c (1.39)	4.97 ^a (0.17)	14.34 ^b (0.89)	15.18 ^b (0.87)	70.85 ^d (0.95)	50.36 ^c (1.21)
1	53.43 ^{bc} (0.78)	4.63 ^b (0.14)	14.92 ^b (0.24)	15.63 ^b (0.24)	72.65 ^c (0.46)	50.85 ^c (2.23)
3	55.03 ^b (1.40)	4.35 ^c (0.19)	16.01 ^a (0.44)	16.59 ^a (0.41)	74.82 ^b (0.86)	52.07 ^b (0.40)
5	58.28 ^a (0.95)	3.66 ^d (0.22)	16.67 ^a (0.35)	17.07 ^a (0.36)	77.60 ^a (0.63)	54.92 ^a (0.89)

แสดงผลในรูปของ ค่าเฉลี่ย (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

n = 24

^{a-d}, ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อในร้อยละ 95

ตารางที่ 17 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะด้านสีในเนื้อปลานิล

อุณหภูมิอบ (องศาเซลเซียส)	L*	a*	b*	chroma	hue (°)	WI
40	54.04 ^b (3.30)	4.52 ^a (0.73)	15.02 ^b (1.57)	15.70 ^b (1.34)	73.06 ^b (3.82)	51.39 ^b (2.83)
50	55.70 ^a (3.13)	4.28 ^b (0.70)	15.95 ^a (1.43)	16.53 ^a (1.25)	74.89 ^a (3.40)	52.71 ^a (1.50)

แสดงผลในรูปของ ค่าเฉลี่ย (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

n = 24

^{a-b}, ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อในร้อยละ 95

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิในการอบปลานิลร่วมกับการใช้โอโซนพบว่า อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ค่าความสว่าง ค่าความเป็นสีเหลือง ค่าความเข้มสี ค่ามุมของสี และค่าดัชนีความขาว สูงกว่า ในขณะที่ค่าความเป็นสีแดงต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

($p < 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 17 เนื่องจากการอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งเนื้อปลานิล 5 ชั่วโมง ซึ่งน้อยกว่าอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ที่ใช้เวลา 6 ชั่วโมง

การเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทางเคมี

การวัดค่า TBA เป็นการวัดปริมาณผลิตภัณฑ์อันดับสองคือมาโลนาลดีไฮด์ ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันในผลิตภัณฑ์ จากการศึกษาผลของการรมโอโซนที่ความเข้มข้น 3 ระดับคือ 1 3 และ 5 ppm ในระหว่างการอบแห้งปลานิลพบว่า ค่า TBA ของเนื้อปลานิลเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ตามระดับความเข้มข้นของโอโซนที่เพิ่มขึ้น (ตารางที่ 18) เนื่องจากโอโซนมีคุณสมบัติเป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรง (Michelsen, 1992; Tiwari และคณะ, 2008) จึงสามารถเพิ่มอัตราการเกิดออกซิเดชันในผลิตภัณฑ์ให้สูงขึ้นได้ (Chawla, 2002) โดยโอโซนสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับผลิตภัณฑ์ได้ 2 ทาง คือ (1) ทำปฏิกิริยาได้โดยตรงกับโมเลกุลของโอโซน และ (2) ทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระ เช่น หมู่ -OH ที่เกิดจากการแตกตัวของโอโซน (Hoigné และ Bader, 1977) จากผลการทดลองพบว่าเนื้อปลานิลอบแห้งที่ผ่านการรมโอโซนที่ความเข้มข้น 5 ppm ส่งผลให้ค่า TBA เพิ่มขึ้นร้อยละ 91.58 เมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อปลานิลที่ไม่ผ่านการรมโอโซน

ตารางที่ 18 ผลของความเข้มข้นโอโซนต่อคุณลักษณะทางเคมีของเนื้อปลานิลอบแห้ง

ความเข้มข้นโอโซน (ppm)	TBA (Abs)	TVB-N (mg N/100 g sample)
0	0.190 ^d (0.010)	2.32 ^a (0.15)
1	0.215 ^c (0.010)	1.97 ^b (0.13)
3	0.264 ^b (0.006)	1.39 ^c (0.08)
5	0.364 ^a (0.022)	1.11 ^d (0.09)

แสดงผลในรูปของ ค่าเฉลี่ย (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

n = 16

^{a-d}, ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อในร้อยละ

95

จากการศึกษาผลของความเข้มข้นโอโซนต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า TVB-N ในเนื้อปลานิลอบแห้งพบว่า ค่า TVB-N ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อความเข้มข้นของโอโซนเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 18) โดยการใช้โอโซนความเข้มข้น 5 ppm สามารถช่วยชะลอการเพิ่มขึ้นของค่า TVB-N ในเนื้อปลาได้มากที่สุด ซึ่งค่า TVB-N ลดลงร้อยละ 52.16 40.09 และ 15.09 สำหรับความเข้มข้น 5 3 และ 1 ppm ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะควบคุมที่ไม่มีการใช้โอโซน เนื่องด้วยการวัดค่า TVB-N

เป็นการวัดระดับความสดของเนื้อปลา (Sallam, 2007) ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเน่าเสีย (Dalgaard, 2000) รวมถึงกลิ่นที่เกิดขึ้นจากเชื้อจุลินทรีย์ จากผลการทดลองข้างต้นพบว่า การลดลงของปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อปลาเมื่อความเข้มข้นของไอโซนเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับการลดลงของค่า TVB-N เช่นกัน ในขณะเดียวกันจากรายงานของ Kim และคณะ (1997) และ Park และคณะ (1999) พบว่าไอโซนมีประสิทธิภาพในการกำจัดกลิ่น และรสชาติที่ไม่พึงประสงค์ในเนื้อปลา และอาหารทะเลได้

นอกจากนี้จากการศึกษาผลของอุณหภูมิในการอบที่ 40 และ 50 องศาเซลเซียส ร่วมกับการรมไอโซนต่อคุณลักษณะทางเคมีของเนื้อปลานิลพบว่า การอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ค่า TBA ของเนื้อปลาสูงกว่าการอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เนื่องจากการอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาในการอบนานกว่า จึงมีจำนวนครั้งในการสัมผัสกับก๊าซไอโซนมากกว่าการอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามจากการผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิในการอบไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า TVB-N ในเนื้อปลานิล ($p \geq 0.05$) เท่ากับผลของระดับความเข้มข้นของไอโซน

ตารางที่ 19 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อคุณลักษณะทางเคมีของเนื้อปลานิล

อุณหภูมิอบ (องศาเซลเซียส)	TBA (Abs)	TVB-N (mg N/100 g sample)
40	0.164 ^a (0.079)	1.71 (0.50)
50	0.152 ^b (0.065)	1.69 (0.53)

แสดงผลในรูปของ ค่าเฉลี่ย (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

n = 16

^{a-b}, ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อในร้อยละ 95

สรุปผลการทดลอง

ปลานิลแดดเดียวที่ขายทั่วไปในท้องตลาดมักจะพบเชื้อ *Staphylococcus* sp., *Bacillus* sp., และ Lactic acid bacteria ดังนั้นการศึกษานี้จึงเป็นการศึกษาผลของการรมก๊าซไอโซนต่อคุณสมบัติทางเคมี กายภาพ และชีววิทยาของเนื้อปลานิลแดดเดียว โดยเนื้อปลานิลจะถูกนำมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 40 และ 50 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมารวมด้วยก๊าซไอโซนที่ความเข้มข้น 3 ระดับคือ 1, 3, และ 5 ppm นาน 30 นาที หมุนเวียนกระบวนการข้างต้นจนกระทั่งค่าวอเตอร์แอคทิวิตีได้ 0.85 ผลการทดลองพบว่าการใช้ก๊าซไอโซนที่ความเข้มข้น 5 ppm สามารถช่วยลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดและยีสต์/รา และค่า TVB-N ในเนื้อปลาได้ดีที่สุด ในขณะเดียวกันการอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

จะส่งผลให้ค่าความสว่าง ค่าความเป็นสีเหลือง ค่า hue ค่า chroma ค่าดัชนีความขาว และค่า TBA ของเนือปลาเพิ่มขึ้น

บทที่ 5

ผลของการประยุกต์ใช้ไอโซนในการล้างและการอบแห้งต่ออายุการเก็บรักษาของเนื้อปลานิล

บทนำ

ปลานิลเป็นผลิตภัณฑ์อาหารชนิดหนึ่งที่เสื่อมเสียได้ง่าย กระบวนการจับ การแปรรูป จนถึง การเก็บรักษา ล้วนเป็นขั้นตอนที่ส่งผลต่อการเสื่อมเสียของปลาทั้งสิ้น การเสื่อมเสียของปลาเกิดได้จากสาเหตุหลายประการ ทั้งทางกายภาพ เคมี และจุลินทรีย์ ปฏิกริยาทางเคมีและเอนไซม์ที่เกิดขึ้นล้วนทำให้ผลิตภัณฑ์สูญเสียความสด ในขณะที่กิจกรรมของจุลินทรีย์ส่งผลต่อการเสื่อมเสียและอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ปลา (Gram และ Huss, 1996) มีดัชนีหลายประการที่ใช้ในการประเมินคุณภาพของปลา ระหว่างการเก็บรักษา ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงของปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ (Gram และ Huss, 1996; Hozbor และคณะ, 2006; Sallam, 2007) การเปลี่ยนแปลงทางเคมี เช่น การวัดผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการแตกตัวของอะดีโนซีนไตรฟอสเฟต (adenosine triphosphate, ATP) (Dalgaard, 2000; Ethira และ Uchiyama, 1987; Ryder, 1985; Saito และคณะ, 1959; Sallam, 2007) การวัดปริมาณสารประกอบไนโตรเจนที่ระเหยได้ทั้งหมด (total volatile base nitrogen, TVB-N) และไตรเมทิลเอมีน (trimethylamine) (Malle และ Poumeyrol, 1989; Özogul และคณะ, 2004) รวมถึงการวัดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางประสาทสัมผัส (Dalgaard, 2000)

ปลานิล (*Oreochromis niloticus*) เป็นปลาน้ำจืดชนิดหนึ่งของไทยที่มีการผลิตเพิ่มขึ้นในปริมาณมาก ปัจจุบันปลานิลกำลังได้รับการส่งเสริมให้เป็นเมนูหลักของอาหารแทนปลาทะเลราคาแพงที่ต้องพึ่งพาการนำเข้าจากต่างประเทศ เนื่องจากไทยมีศักยภาพสูงด้านการผลิตปลานิล ประกอบกับทิศทางการบริโภคปลานิลที่ขยายตัวของตลาดโลก โดยเฉพาะตลาดในสหรัฐอเมริกา และยุโรปก็นิยมมารับประทานเมนูปลามากขึ้น เนื่องจากปริมาณปลาแซลมอนซึ่งเป็นปลาเนื้อแดงมีน้อยลง และคนอเมริกันหันมานิยมปลานิลซึ่งเป็นปลาเนื้อขาวมากกว่า ส่วนในสหภาพยุโรปปลานิลมีลักษณะคล้ายคลึงกับปลาซีบาส (Seabas) และปลาค็อด (Cod) หากราคาเยอะเยิ่นกว่ามาก รัสเซียก็เป็นอีกหนึ่งประเทศที่สนใจรับซื้อปลานิลไทยเช่นกัน (<http://www.positioningmag.com>)

ปัจจุบันปริมาณการเลี้ยงปลานิลประมาณ 200,000 ตัน มูลค่าประมาณ 7,900 ล้านบาท (คิดที่ราคาเฉลี่ยกิโลกรัมละ 39.32 บาท) ซึ่งปัจจุบันปริมาณการเลี้ยงปลานิลคิดเป็นร้อยละ 30.0 ของปริมาณการเพาะเลี้ยงปลาน้ำจืดทั้งหมดของไทย ผลผลิตปลานิลร้อยละ 70.0 ของปริมาณการผลิตปลานิลทั้งหมดบริโภคภายในประเทศโดยแยกเป็นการบริโภคสดร้อยละ 81.0 ในการแปรรูปทำเค็ม และตากแห้งร้อยละ 8.0 นึ่งหรือย่างร้อยละ 7.0 และที่เหลือร้อยละ 4.0 เป็นการบริโภคในรูปแบบอื่นๆ โดยเฉพาะการ

ทำปลาร้า ปลาเจ่า โดยปลานิลที่บริโภคในประเทศนั้นมีวิถีตลาดโดยเกษตรกรขายให้กับผู้บริโภคโดยตรง หรือขายผ่านผู้รวบรวม ซึ่งจะส่งต่อไปบรรดาผู้ค้าปลาในตลาดสดหรือผู้ที่แปรรูปปลา แล้วจึงจำหน่ายต่อไปให้กับผู้บริโภค

จากการทดลองเก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์ปลานิลแปรรูปแบบทำเค็ม และตากแห้งที่มีขายทั่วไปในท้องตลาด โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีค่าปริมาณน้ำอิสระอยู่ในช่วง 0.85-0.96 จึงทำให้สามารถเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ได้นานเพียง 4-5 วันเท่านั้น ผู้ผลิตหลายรายจึงนิยมใช้ผสมสารเคมีต่างๆ เพื่อช่วยยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ให้นานขึ้น ในขณะเดียวกันยังทำให้เนื้อปลาดูสวยงาม มีสีสดคล้ายปลาที่ตายใหม่ๆ ไม่มีกลิ่นคาวเน่าเหม็นของปลา และไม่มีแมลงวัน – แมลงหี่รุมตอม

การประยุกต์ใช้ไอโซนจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ สหรัฐอเมริกาประกาศให้ไอโซนเป็นสารที่ปลอดภัยต่อสุขภาพ (generally recognized as safe, GRAS) ตั้งแต่ปี 1997 และในปี 2001 ทางสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยาแห่งสหรัฐอเมริกา (USFDA) และกระทรวงเกษตรสหรัฐอเมริกา (USDA) ได้แก้ไขกฎหมายวัตถุเจือปนอาหารให้สามารถใช้ไอโซนทั้งในรูปของก๊าซและของเหลว ในการปรับปรุง เก็บรักษา และแปรรูปอาหารได้อย่างปลอดภัย และสามารถใช้อย่างปลอดภัยโดยตรงกับอาหารประเภท ปลา เนื้อ และสัตว์ปีกได้ (Mielcke และ Ried, 2004) โดย Korich และคณะ (1990) Restaino และคณะ (1995) รายงานว่าไอโซนสามารถยับยั้งการเจริญของแบคทีเรีย รา ไวรัสและโปรโตซัวได้ โดยการเข้าไปทำให้ผนังเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์แตก หรือเกิดการแยกเป็นบางส่วนๆ เพื่อให้เกิดการรั่วของสารประกอบภายในเซลล์ ก่อนจะเข้าไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตรงกับสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบในเซลล์ของจุลินทรีย์ (Bringman, 1954; Chang, 1971; Chawla, 2006) ซึ่งไอโซนถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางเพื่อ (1) ลดการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ในปลา (Haraguchi และคณะ, 1969; Goche และ Cox, 1999) ผลิตภัณฑ์สัตว์ปีก (Sheldon และ Brown, 1986; Dave, 1999) ผลิตภัณฑ์เนื้อและนม (Dondo และคณะ, 1992; Gorman และคณะ, 1997) (2) ฆ่าเชื้อในเบคอน เนื้อวัว กุ้ง ไข่ เห็ด ชีส และผลไม้ (Kaess และ Weidemann, 1968; Gammon และ Karelak, 1973) (3) ยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ผักผลไม้หลังการเก็บเกี่ยว (Kim และคณะ, 1999; Lyons-Magnus, 1999; Han และคณะ, 2002) และ (4) ปรับปรุงคุณภาพน้ำดื่ม (Bryant และคณะ, 1992) และบำบัดน้ำเสีย (Stover และ Jarnis, 1981; Rice และคณะ, 2000) เป็นต้น Khadra และ Yousef (2001) ได้ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของไอโซนกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่า ไอโซนมีผลในการยับยั้ง *Bacillus* spp. และสปอร์ได้มากกว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งศึกษาถึงผลของการใช้น้ำไอโซนในการล้างวัตถุดิบทางการเกษตร หรือการใช้ก๊าซไอโซนในการรมวัตถุดิบระหว่างการเก็บรักษาและหลังการแปรรูป (Haraguchi และคณะ, 1969; Goche และ Cox, 1999; Kaess และ Weidemann, 1968; Gammon และ Karelak, 1973) มีงานวิจัยเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่ศึกษาถึงผลของการใช้ไอโซนร่วมกันตั้งแต่กระบวนการทำความสะอาด

สะอาด ตลอดจนถึงกระบวนการแปรรูป ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการใช้น้ำโอโซนในการล้างเนื้อปลานิลฆ่าเห็ดสด และใช้ก๊าซโอโซนในการรมเนื้อปลานิลในขั้นตอนการอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ กายภาพ และเคมีของเนื้อปลานิล รวมถึงติดตามผลของโอโซนต่ออายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์เนื้อปลานิลอบแห้ง เปรียบเทียบกับเนื้อปลานิลในสภาวะควบคุมที่ไม่ผ่านการใช้อโอโซน

วัตถุดิบและวิธีการทดลอง

การเตรียมปลานิล

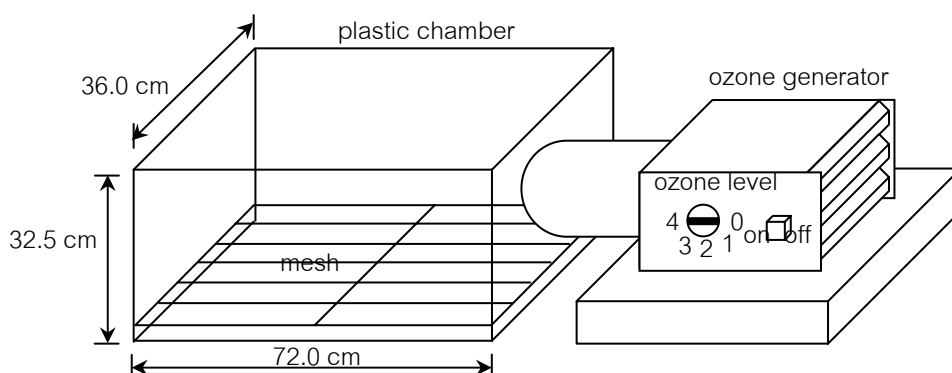
ปลานิล (Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*) ที่มีชีวิตถูกจับจากบ่อในจังหวัดนครปฐม และปลาจะได้รับออกซิเจนตลอดระยะทางที่ขนส่งมายังภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ปลานิลที่เลือกมาใช้ในการทดลองมีอายุประมาณ 6 เดือน และมีน้ำหนักประมาณ 500 ± 50 กรัม ทำการชั่งปลาไว้ในสภาวะที่ไม่มีมีความเครียดก่อนทำให้ตาย ทำการขอดเกล็ด ครวักไส้ และแล่แบบไม่ติดก้าง นำเนื้อปลาที่ได้มาแช่ในน้ำเย็นที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส นาน 2 นาที ก่อนทำการทดลองต่อไป โดยขึ้นปลาที่แล่แล้วจะมีความยาวและน้ำหนักเฉลี่ย $22.0\text{--}25.0$ เซนติเมตร และ 120 ± 20 กรัมต่อชิ้น ตามลำดับ

สภาวะในการทดลอง

เนื้อปลานิลที่แล่แล้ว 6 ชิ้น ถูกนำมาแช่ในสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 นาน 15 นาที ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ในอัตราส่วนของเนื้อปลาต่อสารละลายเกลือเป็น 1:6 หลังจากนั้นนำเนื้อปลาที่ได้มาแช่ในน้ำโอโซนปริมาณ 25 ลิตร ที่มีปริมาณความเข้มข้นของโอโซนที่ละลายได้ (dissolved ozone, dO_3) 3 ppm นาน 90 วินาที โดยโอโซนจะถูกละลายที่สภาวะปิดในน้ำเย็นที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ในถังโพลีเอทิลีน (polyethylene) ชนิด HDPE เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำจะช่วยเพิ่มปริมาณและความคุมการละลายของโอโซนในน้ำ หลังจากนั้นนำขึ้นมาทิ้งให้สะเด็ดน้ำนาน 1 นาที

นำเนื้อปลานิลที่ผ่านการล้างน้ำโอโซนแล้วมาวางเรียงบนถาดในตู้อบแบบลมร้อน (รุ่น ED53, บริษัทกล้วยน้ำไท, ประเทศไทย) โดยอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปใส่ในกล่องรมโอโซน (ภาพที่ 13) ที่ความเข้มข้น 5 ppm เป็นเวลานาน 30 นาที และนำไปอบต่อ ทำซ้ำอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเวลาอบครบ 5 ชั่วโมง เพื่อให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีค่า water activity (a_w) เป็น 0.85 เนื้อปลาที่ได้หลังเสร็จสิ้นกระบวนการถูกนำมาวางบนตะแกรงสแตนเลสที่ฆ่าเชื้อแล้วนาน 5 นาที ที่อุณหภูมิห้อง เก็บขึ้นปลาในถุงโพลีเอทิลีน โดยมีสภาวะในการบรรจุ 2 แบบ คือ การเก็บในสภาวะปกติ

และการเก็บในสภาวะสุญญากาศ ที่อุณหภูมิ 2 ระดับ คือ 7 และ 0 องศาเซลเซียส เก็บตัวอย่างทุกๆ 3 วัน เพื่อนำไปวิเคราะห์คุณลักษณะทางเคมี กายภาพ และจุลินทรีย์ต่อไป ทำการทดลองแต่ละสภาวะ 3 ซ้ำ ทั้งนี้สภาวะควบคุมคือเนื่อปลาที่ไม่ผ่านกระบวนการล้างและรมโอโซน

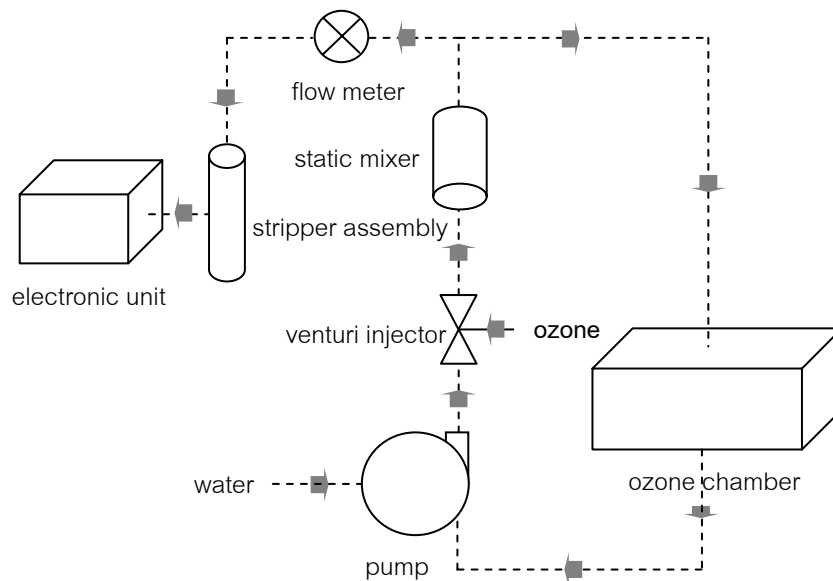


ภาพที่ 13 กระบวนการสร้างโอโซนในระบบปิด

กระบวนการสร้างน้ำโอโซน

การผลิตน้ำโอโซน

โอโซนจะถูกสร้างในสภาวะปิดที่มีระบบการหมุนเวียนดังภาพที่ 14 ซึ่งโอโซนจะผลิตจาก corona discharge (บริษัท Active Science จำกัด, ประเทศไทย) โดยการส่งออกซิเจนเข้มข้นที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 90-95 เข้าสู่ระบบ แล้วใช้กระแสไฟฟ้าสลับที่มีแรงเคลื่อนที่สูงผ่านเข้าไปในช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด เพื่อกระตุ้นให้อิเล็กตรอนของก๊าซออกซิเจนแตกตัว ก่อนจะไปรวมตัวกับก๊าซออกซิเจนโมเลกุลอื่นเป็นก๊าซโอโซน ในการทดลองจะควบคุมอัตราการไหลของออกซิเจนที่ปริมาณ 4.0 ลิตรต่อนาที่เพื่อสร้างโอโซนความเข้มข้นสูง โอโซนที่สร้างได้จะถูกส่งไปละลายในน้ำเย็นที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ผ่าน venturi injector ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร และเพิ่มปริมาณการละลายของโอโซนในน้ำด้วย static mixer



ภาพที่ 14 กระบวนการสร้างน้ำไอโซนในระบบปิด

การวัดปริมาณไอโซน

ปริมาณความเข้มข้นของไอโซนที่ละลายได้จะถูกวัดด้วยเครื่องวัดค่าการละลายของไอโซน (รุ่น DOM-1, บริษัท Ecosensor, ประเทศสหรัฐอเมริกา) โดยเครื่องจะสามารถวัดค่าการละลายของไอโซนได้ในช่วง 0-5 ppm ทั้งนี้การทำงานของเครื่องจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ stripper assembly และ electronic unit ซึ่ง stripper assembly จะนำก๊าซไอโซนปริมาณน้อยๆ ที่ถูกแยกออกจากน้ำ (เพื่อลดการรบกวนของสารเคมีอื่นๆ เช่นคลอรีน หรือเกลือที่มีในน้ำ) แล้ว ปริมาณน้อยกว่า 0.2 ลิตรต่อหน้าที่ส่งไปยังเซนเซอร์ในส่วน electronic unit อย่างต่อเนื่อง ส่วนของ electronic unit ประกอบด้วยเซนเซอร์ชนิด heated metal oxide semiconductor (HMOS) วงจรไฟฟ้า และ relay set point

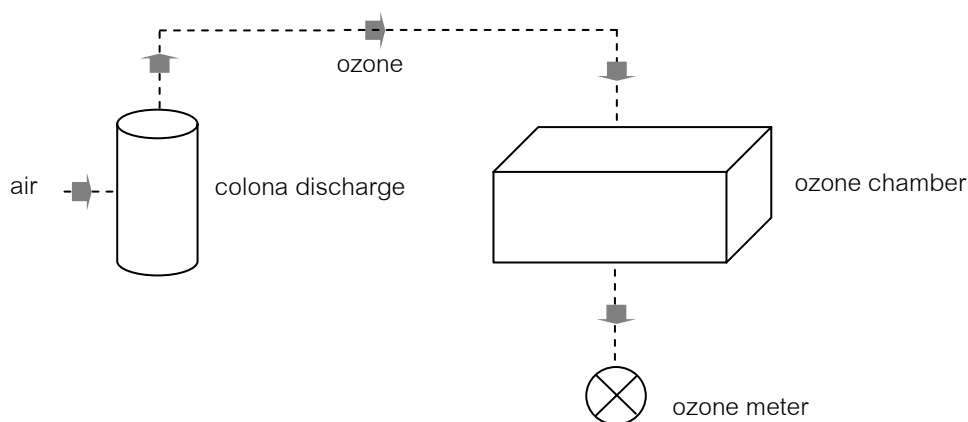
ความดันของน้ำที่ส่งเข้าไปยังเครื่องวัดจะถูกควบคุมให้ไม่ต่ำกว่า 15 psi ในขณะเดียวกันเซนเซอร์จะถูกสอบวัดทุกครั้งที่มีการใช้งานด้วยการวัดปริมาณไอโซนจากวิธีวัดสี (บริษัท Ebase จำกัด, ประเทศไทย) ซึ่งสามารถวัดค่าการละลายของไอโซนได้ในช่วง 0-3 ppm

กระบวนการสร้างก๊าซไอโซน

การผลิตก๊าซไอโซน

ไอโซนก๊าซจะถูกสร้างในสภาวะปิดที่มีระบบการหมุนเวียนดังภาพที่ 15 ภายในกล่องพลาสติกโพลีเอทิลีนขนาดความจุ 0.08 ลูกบาศก์เมตร ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งไอโซนจะผลิตจาก corona discharge

(บริษัท Active Science จำกัด, ประเทศไทย) โดยการส่งออกซิเจนจากสภาวะบรรยากาศที่มีความเข้มข้นร้อยละ 21 เข้าสู่ระบบ



ภาพที่ 15 กระบวนการสร้างก๊าซโอโซนในระบบปิด

การวัดปริมาณก๊าซโอโซน

ปริมาณความเข้มข้นของโอโซนจะถูกวัดด้วยเครื่องวัดโอโซนแบบเคลื่อนที่ (รุ่น A-21ZX, บริษัท Ecosensor, ประเทศสหรัฐอเมริกา) โดยเครื่องจะสามารถวัดค่าการละลายของโอโซนได้ในช่วง 0-10 ppm ที่ระดับความถูกต้อง 0.01 ซึ่งก๊าซโอโซนจะถูกส่งอย่างต่อเนื่องไปยังเซนเซอร์ชนิด heated metal oxide semiconductor (HMOS) ในส่วนของ electric unit

การวิเคราะห์ทางจุลินทรีย์

ทำการวิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์ในตัวอย่างปลา 2 บริเวณ คือ (1) บริเวณหนัง โดยทำการ swab หนังปลาที่ขนาดพื้นที่ 5×5 เซนติเมตร ด้วย peptone water (บริษัท Sigma-Aldrich Chemica, GmbH, ประเทศเยอรมัน) ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 ที่ผ่านการสเตอไรล์แล้ว และ (2) ในเนื้อปลา โดยการนำตัวอย่างปลาน้ำหนัก 25 กรัม มาผสมกับ peptone water ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 ปริมาตร 225 มิลลิลิตร ตีให้เข้ากันด้วย stomacher (Seward Medical, ประเทศอังกฤษ) ทั้งนี้ตัวอย่างทั้ง 2 บริเวณ จะถูกนำมาเจือจางให้มีความเข้มข้นที่ระดับต่างๆ ด้วย peptone water วิเคราะห์ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด (total plate count) และยีสต์รา ในตัวอย่าง โดยการบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 48 ชั่วโมง ตามลำดับ

การวิเคราะห์คุณลักษณะด้านสี

วัดค่า L^* a^* และ b^* ของตัวอย่างตามวิธีของ CIE (1997) ด้วย color-view™ spectrophotometer (รุ่น 9000, Gardner, ประเทศสหรัฐอเมริกา) โดยใช้แสงชนิด D65 และมีการหมุนของแสง 10° ทั้งนี้ค่า L^* จะบ่งบอกถึงค่าความสว่าง ($L^*=0$ แสดงความเป็นสีดำ และ $L^*=100$ แสดงความเป็นสีขาว) ค่า a^* แสดงค่าความเป็นสีแดง เมื่อ $a^*>0$ และ ค่า b^* แสดงค่าความเป็นสีเหลือง เมื่อ $b^*>0$ วิเคราะห์ค่าความเข้มสี (chroma) จาก $C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$ และค่ามุมของสี (hue angle) จาก $h_{ab} = \tan^{-1}(b^*/a^*)$ เมื่อ $h_{ab}=0^\circ$ สำหรับ red hue และ $h_{ab}=90^\circ$ สำหรับ yellow hue โดยสีของเนื้อปลาจะถูกวัด 3 ตำแหน่งคือ ส่วนบนใกล้หัว ส่วนกลาง และส่วนล่างใกล้หาง ตามลำดับ ทำการวัดค่า 3 ซ้ำ

การวิเคราะห์ทางเคมี

ปริมาณ Total volatile base nitrogen (TVB-N) (ดัดแปลงจาก Sallam, 2007)

การสกัดเนื้อปลาเพื่อหาปริมาณ TVB-N เตรียมได้โดยการนำเนื้อปลาน้ำหนัก 100 กรัม มาปั่นกับสารละลายกรดไตรคลอโรอะซิติก (trichloroacetic acid) ความเข้มข้นร้อยละ 7.5 ให้ละเอียดนาน 1 นาที ที่ความเร็วสูง นำสารผสมที่ปั่นได้ไปเหวี่ยงที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที นาน 5 นาที หลังจากนั้นกรองสารละลายส่วนใสที่ได้ผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1

หาปริมาณ TVB-N โดยการนำสารละลายที่กรองได้ปริมาณ 25 มิลลิลิตร มาเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 10 ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ทำการกลั่นด้วยไอน้ำ และรองรับสารที่ได้จากการกลั่นด้วยสารละลายกรดบอริกความเข้มข้นร้อยละ 4 ปริมาตร 15 มิลลิลิตร กลั่นจนกระทั่งได้ปริมาตรหลังการกลั่นรวม 50 มิลลิลิตร หลังจากนั้นนำไปไทเทรตกับกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ โดยใช้เมทิลเรด (methyl red) เป็นอินดิเคเตอร์ จำนวน 2 ซ้ำ

ค่ากรดไฮโอบาร์บิทริก (Thiobarbituric acid; TBA) (ดัดแปลงจาก Jayasingh และคณะ, 2003)

การวัดค่ากรดไฮโอบาร์บิทริก เป็นการบ่งชี้ถึงปริมาณผลิตภัณฑ์อันดับสองคือมาโลนาลดีไฮด์ (malonaldehyde) ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันในผลิตภัณฑ์ ซึ่งจากการศึกษาพบว่ากรดไฮโอบาร์บิทริก มีความสัมพันธ์โดยตรงกับการหืนที่ประเมินทางประสาทสัมผัส

นำเนื้อปลามาทำปฏิกิริยากับสารละลายผสมของกรดไตรคลอโรอะซิติกความเข้มข้นร้อยละ 15 และกรดไฮโอบาร์บิทริก (thiobarbituric acid; TBA) ความเข้มข้นร้อยละ 0.375 ในกรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric) เข้มข้น 0.2 นอร์มัล ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส แล้วทำให้เย็นทันที จากนั้นนำไปเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 8,000 รอบต่อนาที นาน 20 นาที นำสารละลายส่วนใสที่ได้มาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร จำนวน 2 ซ้ำ

การวิเคราะห์ทางสถิติ

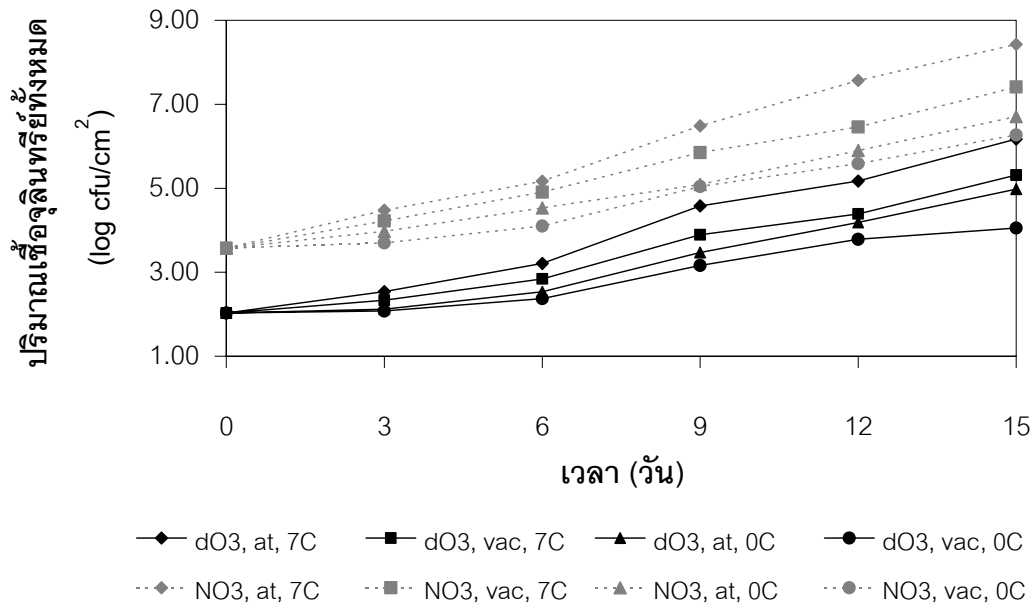
วิเคราะห์ผลการทดลองด้วยโปรแกรม General Linear Model (GLM) หาค่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Least Significant Difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SAS (เวอร์ชัน 8.1, SAS Inst., Cary, NC, ประเทศสหรัฐอเมริกา)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

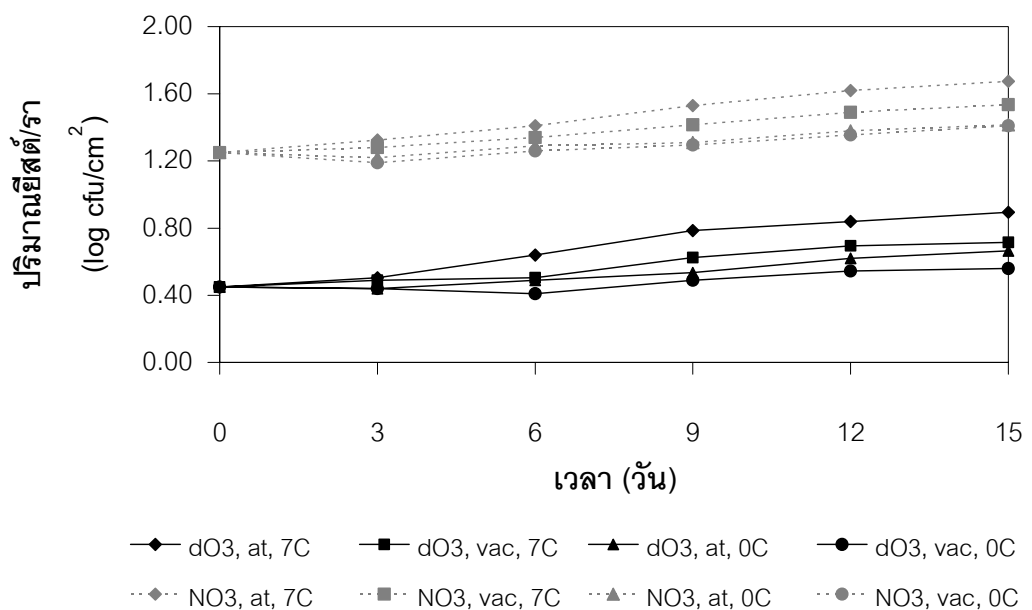
ไอโซนต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเชื้อจุลินทรีย์

จากการศึกษาผลของการใช้น้ำไอโซนในการล้างเนื้อปลา ร่วมกับการใช้ก๊าซไอโซนรมในระหว่างการอบแห้งพบว่า เนื้อปลานิลที่ผ่านไอโซนจะมีค่าปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด และยีสต์/ราเริ่มต้น ต่ำกว่าเนื้อปลาที่ไม่ผ่านไอโซน โดยเนื้อปลาที่ผ่านไอโซนจะมีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดและยีสต์/ราต่ำกว่าเนื้อปลาที่ไม่ผ่านไอโซน 1.54 และ 0.88 log cfu/cm² ที่บริเวณหนัง และ 1.55 และ 1.12 log cfu/g ในเนื้อ ดังแสดงในภาพที่ 16-19 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากไอโซนเกิดจากรวมตัวของออกซิเจนสามอะตอม จึงทำให้ไอโซนจะมีพลังงานในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation potential) สูงถึง 2.07 โวลต์ ส่งผลต่อการทำลายเชื้อแบคทีเรีย ยีสต์/รา และไวรัส (Akey และ Walton, 1985; Bolton และคณะ, 1982; Botzenhart และคณะ, 1993; Foegeding, 1985; Hall และ Sobsey, 1993; Kim และคณะ, 1980; Restaino และคณะ, 1995) โดยการทำลายจากการสัมผัสโดยตรงที่ผนังเซลล์ และอาจส่งผลให้เกิดการออกซิเดชันของสารที่เป็นองค์ประกอบภายในเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์ (Bringman, 1954; Chang, 1971; Kim และคณะ, 1999; Chawla, 2006) เช่น ทริปโตเฟน (tryptophan) ไกลโคโปรตีน (glycoprotein) และไกลโคลิปิด (glycolipid) ที่ผนังเซลล์ (Scott และ Lesher, 1963; Goldstein และ McDonagh, 1975; Chawla, 2006) ซึ่ง Guzel-Seydim และคณะ (2004) และ Zeynep และคณะ (2004) รายงานว่าไอโซนจะไปออกซิไดซ์หมู่ซัลไฟไฮดริล (sulfhydryl) และกรดอะมิโนในสายโซ่เปปไทด์ (peptide) ของเอนไซม์ และโปรตีน เมื่อไอโซนทำปฏิกิริยากับเอนไซม์และโปรตีนของเซลล์แบคทีเรียจะทำให้ถูกตัดเป็นเปปไทด์สายสั้นๆ ซึ่งก่อให้เกิดการสูญเสียสภาพในที่สุด หรือในบางกรณีไอโซนจะไปออกซิไดซ์กลุ่มกรดไขมันไม่อิ่มตัว (polyunsaturated fatty acid) ให้เป็นกรดเพอร์ออกไซด์ (acid peroxides) ซึ่งเป็นพิษต่อเซลล์ ทำให้เซลล์ตายในที่สุด ในขณะเดียวกันไอโซนยังมีประสิทธิภาพในการลดการเกิดกิจกรรมของพลาสมิดดีเอ็นเอ (plasmid DNA) (Mura และ Chung, 1990) ของเชื้อจุลินทรีย์ จากการศึกษาของ Kim และคณะ (1980) พบว่าไอโซนเข้าไปทำให้เชื้อจุลินทรีย์ปล่อยกรดไรโบนิวคลีอิก (ribonucleic acid; RNA) และกรดไรโบนิวคลีอิกที่ถูกปล่อยออกมาจะถูกออกซิเดชันโดยไอโซน

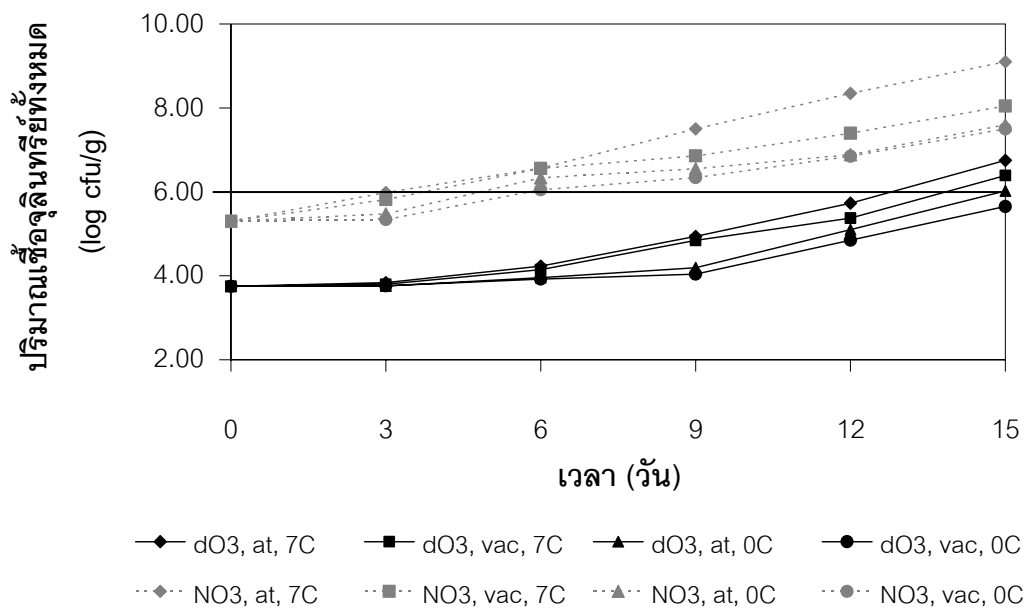
การแช่เนื้อปลาในสารละลายเกลือก่อนล้างน้ำไอโซน เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการช่วยยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ให้นานขึ้น โดย Chen และคณะ (1987) รายงานว่าไอโซนที่ละลายในน้ำหรือละลายในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ จะมีผลยับยั้งเชื้อ *Vibrio cholerae*, *Escherichia coli*, *Salmonella typhimurium*, *Vibrio parahaemolyticus* และ *Staphylococcus aureus* ได้



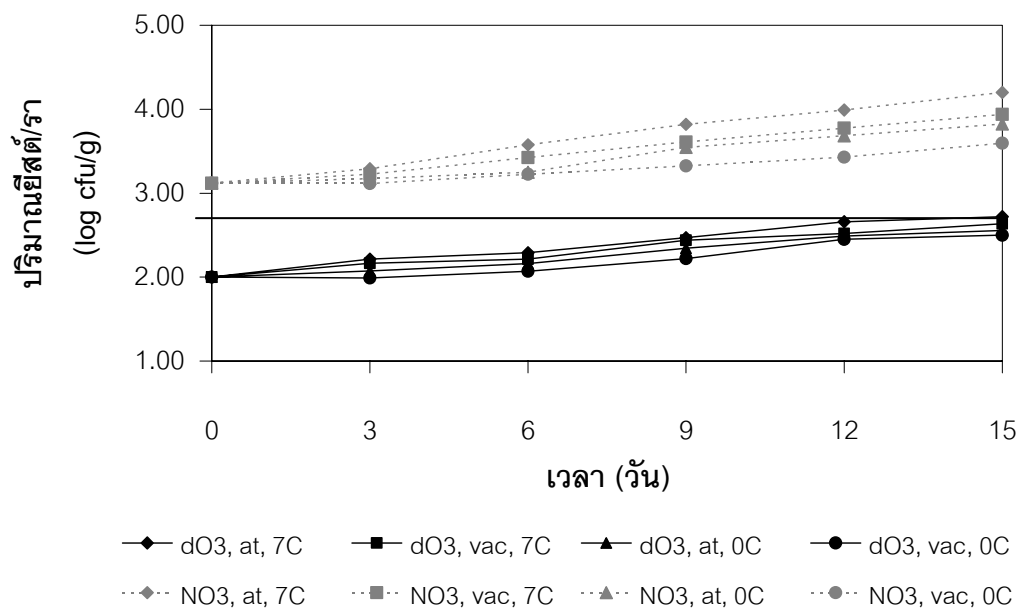
ภาพที่ 16 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดบริเวณหนังของเนื้อปลานิลระหว่างการเก็บรักษา



ภาพที่ 17 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณยีสต์และราบริเวณหนังของเนื้อปลานิลระหว่างการเก็บรักษา



ภาพที่ 18 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในเนื้อปลานิลระหว่างการเก็บรักษา



ภาพที่ 19 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณยีสต์และราในเนื้อปลานิลระหว่างการเก็บรักษา

ในขณะเดียวกันจากการศึกษาผลของโอโซน ต่อการเปลี่ยนแปลงในเนื้อปลาระหว่างการเก็บรักษาที่สภาวะการบรรจุแบบสุญญากาศและบรรยากาศพบว่า การเก็บรักษาเนื้อปลาที่ผ่านและไม่ผ่าน

โอโซนในสภาวะสุญญากาศ มีแนวโน้มที่จะช่วยชะลอการเพิ่มขึ้นของปริมาณเชื้อจุลินทรีย์เพียงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับผลของอุณหภูมิพบว่า อุณหภูมิส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณเชื้อจุลินทรีย์มากกว่าสภาวะในการบรรจุ ทั้งนี้การเก็บรักษาเนื้อมีโอโซนที่ผ่านและไม่ผ่านโอโซนที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส สามารถช่วยยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ได้ดีกว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 7 องศาเซลเซียส โดยเนื้อมีโอโซนที่ผ่านโอโซน บรรจุแบบสุญญากาศ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส จะช่วยชะลอการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด และยีสต์/รา ได้ดีที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 16-19 ตามลำดับ

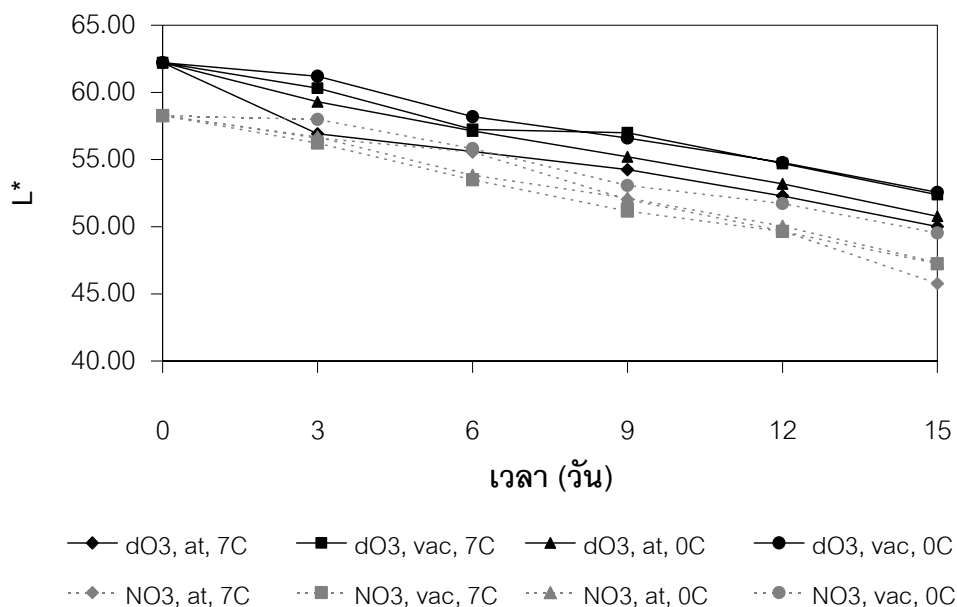
นอกจากนี้จากการทดลองพบว่าปริมาณของเชื้อจุลินทรีย์จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะเวลาในการเก็บรักษาที่นานขึ้น ซึ่งทางสำนักงานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ได้กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนของปลาแห้ง (มพข.6/2549) ไว้ว่าปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดต้องพบไม่เกิน 10^6 cfu/g หรือ 6 log cfu/g และปริมาณยีสต์/รา ต้องไม่เกิน 500 cfu/g หรือ 2.7 log cfu/g ดังนั้นจากผลการทดลองจะเห็นว่าเนื้อมีโอโซนที่ผ่านโอโซนทุกสภาวะการเก็บรักษาจะสามารถเก็บรักษาได้ประมาณ 12 วัน โดยที่ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด และยีสต์/รา ไม่เกินข้อกำหนดของสำนักงานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ซึ่งอายุการเก็บรักษาดังกล่าวมากกว่าเนื้อมีโอโซนที่ไม่ผ่านโอโซนประมาณ 4 เท่า เนื่องจากเนื้อมีโอโซนที่ผ่านโอโซนจะมีอายุการเก็บรักษาเพียง 3 วัน ยกเว้นการเก็บรักษาในสภาวะสุญญากาศ ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส อาจเก็บได้นานประมาณ 6 วัน อย่างไรก็ตามปริมาณยีสต์/รา เริ่มต้นของเนื้อมีโอโซนที่ไม่ผ่านโอโซนทุกสภาวะกลับมีค่าเกินข้อกำหนดของสำนักงานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ซึ่งจากการเก็บตัวอย่างเนื้อมีโอโซนจากผู้ผลิตที่ไม่มีการใช้วัตถุดิบเสียในจังหวัดนครปฐมพบว่า ส่วนใหญ่จะมีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นเกินข้อกำหนดทั้งสิ้น ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับการศึกษาของ Campos และคณะ (2005) ที่ทำการทดลองในปลาซาตินพบว่า การใช้โอโซนจะช่วยลดจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ ออกซิเจนในการหายใจที่อุณหภูมิปานกลาง จุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ก๊าซออกซิเจนในการหายใจ coliforms และแบคทีเรียที่เจริญในอุณหภูมิต่ำได้ และยังพบอีกว่าการใช้โอโซนจะช่วยยืดระยะเวลาการเก็บรักษาปลาซาตินได้ถึง 19 วัน ซึ่งจากเดิมที่ใช้น้ำแข็งปนสามารถเก็บรักษาได้เพียง 8 วัน เท่านั้น

การเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะด้านสี

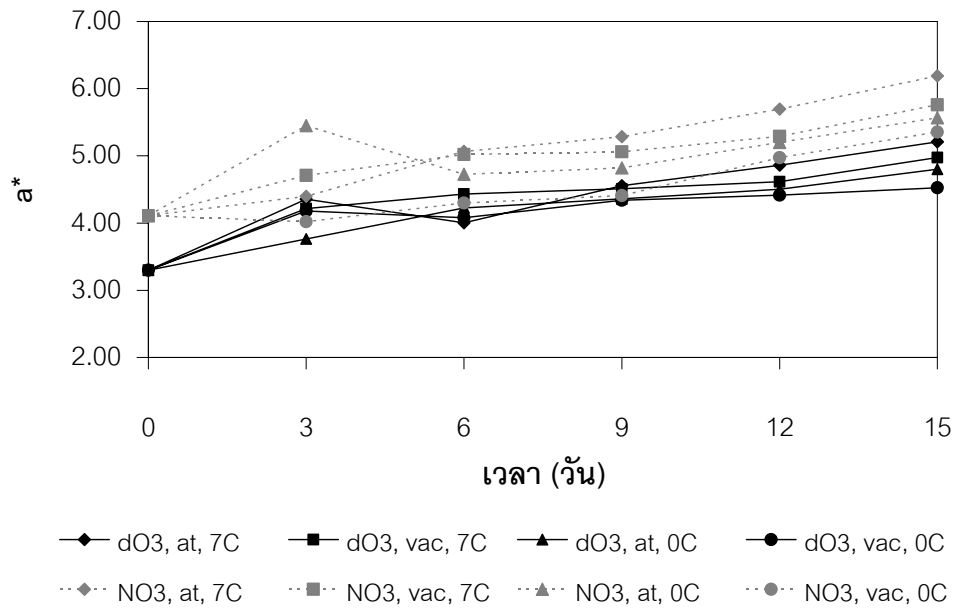
จากการศึกษาผลของการประยุกต์ใช้น้ำและก๊าซโอโซนต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสีของเนื้อมีโอโซนระหว่างการเก็บรักษา พบว่าเนื้อมีโอโซนที่ผ่านโอโซนจะมีค่าความสว่าง ค่าความเป็นสีเหลือง ค่าความเข้มสี และค่ามุมของสีเริ่มต้นสูงกว่าเนื้อมีโอโซนที่ไม่ผ่านโอโซน ในขณะที่ส่งผลให้ค่าความเป็นสีแดงเริ่มต้นต่ำกว่าเนื้อมีโอโซนที่ไม่ผ่านโอโซน ดังแสดงในภาพที่ 20-24 ตามลำดับ เนื่องจากก๊าซโอโซนมีคุณสมบัติในการฟอกสีผลิตภัณฑ์ได้ (Jiang และคณะ, 1998; Dew, 2005) จากการศึกษาของ Chen และคณะ (1997) และ Kim และคณะ (1999) รายงานว่าโอโซนน่าจะเข้าไปทำลายโครงสร้างของฮีโม

(heme) ในไมโอโกลบิน (myoglobin) หรือฮีโมโกลบิน (hemoglobin) ทำให้สีของเนื้อปลาจางลง ซึ่ง Jiang และคณะ (2007) ระบุว่า การเพิ่มขึ้นของค่าความสว่างเป็นผลมาจากการทำลายพันธะไดซัลไฟด์ (disulfide) ของโปรตีน หรือเปปไทด์ และแรงควัตถุสีในเนื้อปลา ประกอบกับการที่โอโซนมีคุณสมบัติเป็นสารออกซิไดซ์ (oxidize) ที่รุนแรง จึงส่งผลต่อให้สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารประกอบอินทรีย์ได้หลายชนิด (Michelsen, 1992; Tiwari และคณะ, 2008) จึงอาจส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์ ผลดังกล่าวสอดคล้องกับการศึกษาของ Jiang และคณะ (1997) ที่แสดงให้เห็นว่าการใช้โอโซนช่วยปรับปรุงสีของซูริมิจากปลาแมคเคอเรล

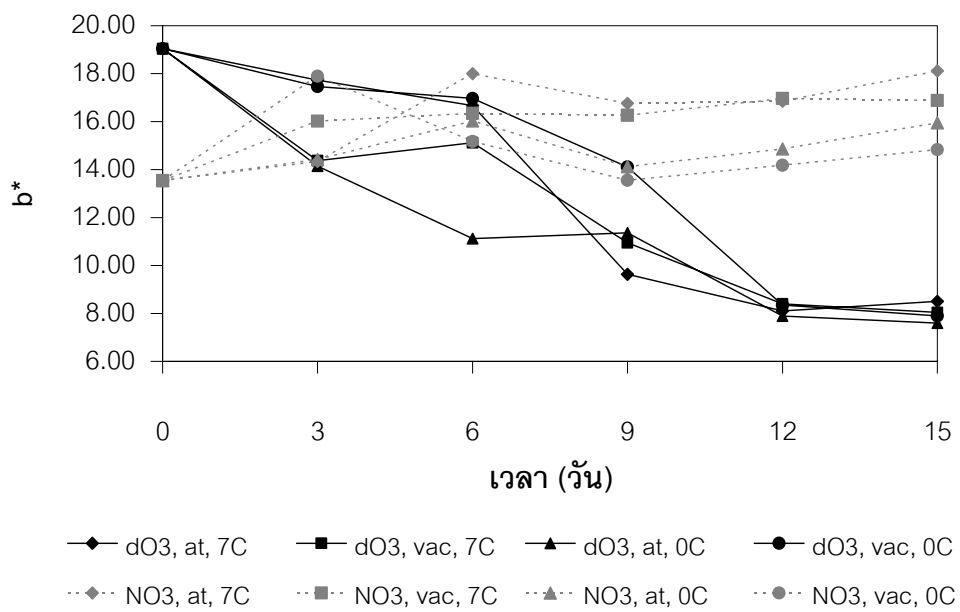
ทั้งนี้ค่าคุณลักษณะสีด้านต่างๆ ของเนื้อปลาทั้งสองสภาวะจะมีการเปลี่ยนแปลงตามอายุการเก็บรักษา โดยค่าความสว่างของเนื้อปลาที่ผ่านโอโซนจะลดลงจาก 62.22 เหลือในช่วง 50.01-52.57 เมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำนาน 15 วัน ส่วนเนื้อปลาที่ผ่านโอโซนค่าความสว่างจะลดลงจาก 58.28 เหลือในช่วง 45.77-49.54 ดังแสดงในภาพที่ 20 สำหรับการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นสีแดงพบว่าเมื่อเก็บรักษาผลิตภัณฑ์นานขึ้น ค่าความเป็นสีแดงของเนื้อปลาทั้งสองสภาวะจะเพิ่มขึ้นประมาณเฉลี่ยร้อยละ 38.38 และ 39.11 สำหรับเนื้อปลานิลที่ผ่านโอโซนและไม่ผ่านโอโซน ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 21



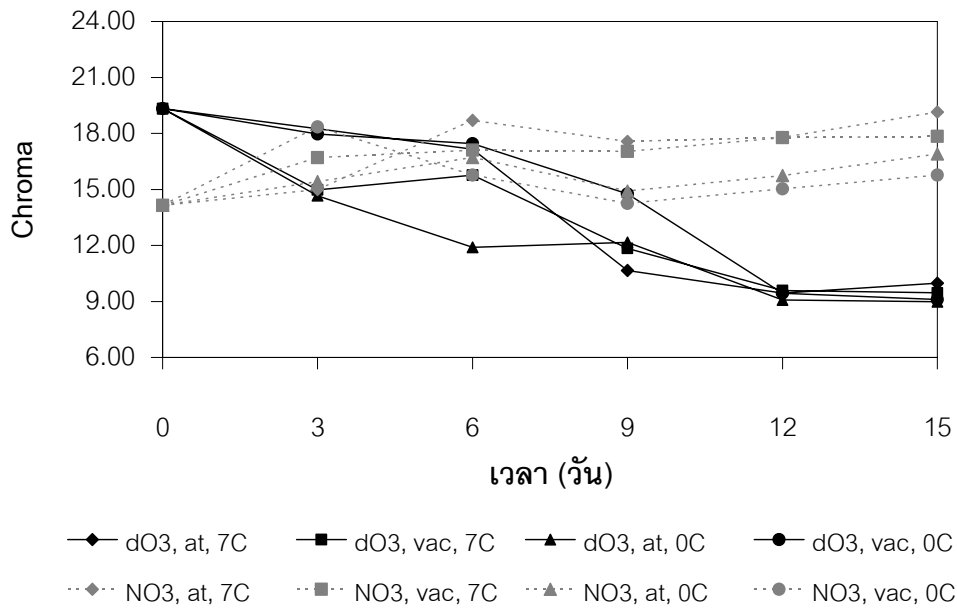
ภาพที่ 20 การเปลี่ยนแปลงค่าความสว่างของปลานิลระหว่างการเก็บรักษา



ภาพที่ 21 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นสีแดงของปลานิลระหว่างการเก็บรักษา

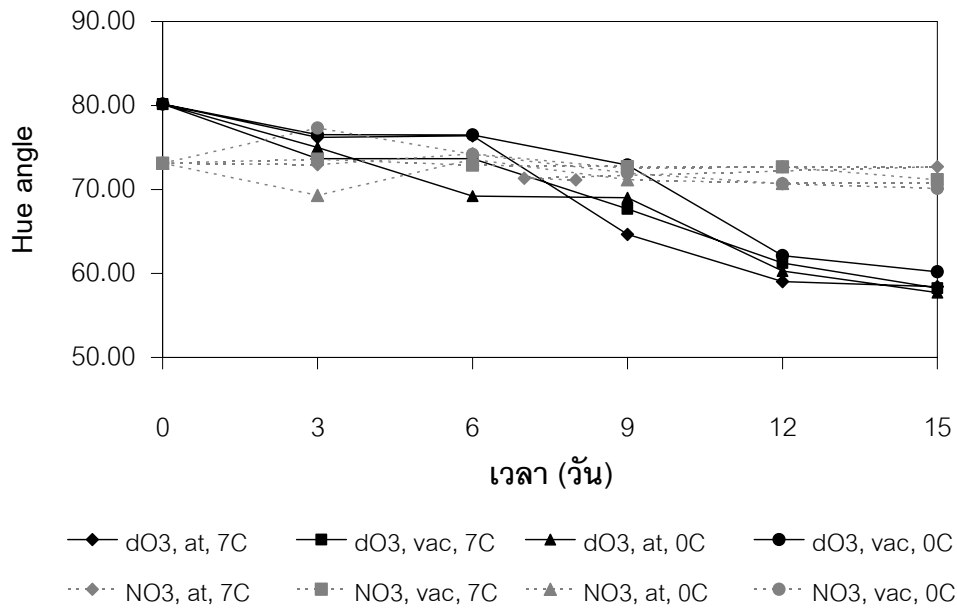


ภาพที่ 22 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นสีเหลืองของปลานิลระหว่างการเก็บรักษา



ภาพที่ 23 การเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสีของปลานิลระหว่างการเก็บรักษา

การเปลี่ยนแปลงของค่าค่าความเป็นสีเหลืองระหว่างการเก็บรักษาพบว่า เนื้อปลานิลที่ผ่านและไม่ผ่านโอโซนมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยเนื้อปลาที่ผ่านโอโซนค่าความเป็นสีเหลืองจะลดต่ำลงตามระยะเวลาในการเก็บรักษา ซึ่งค่าความเป็นสีเหลืองของเนื้อปลานิลที่ผ่านโอโซนทุกสภาวะการเก็บรักษาจะมีค่าลดลงใกล้เคียงกันตั้งแต่วันที่ 12 เป็นต้นไป ในทางตรงกันข้ามพบว่าเนื้อปลานิลที่ไม่ผ่านโอโซนจะมีค่าความเป็นสีเหลืองเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการเก็บรักษา โดยค่าความเป็นสีเหลืองของเนื้อปลานิลที่ไม่ผ่านโอโซน บรรจุในสภาวะสุญญากาศ และเก็บที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส จะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นสีเหลืองน้อยที่สุดตลอดอายุการเก็บรักษา ดังแสดงในภาพที่ 22 ซึ่งจากผลที่แตกต่างกันค่อนข้างชัดเจนของค่าความเป็นสีเหลืองส่งผลให้ค่าความเข้มของสีและความมูมของสี มีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกันกับค่าความเป็นสีเหลือง ดังแสดงในภาพที่ 23 และ 24 ตามลำดับ

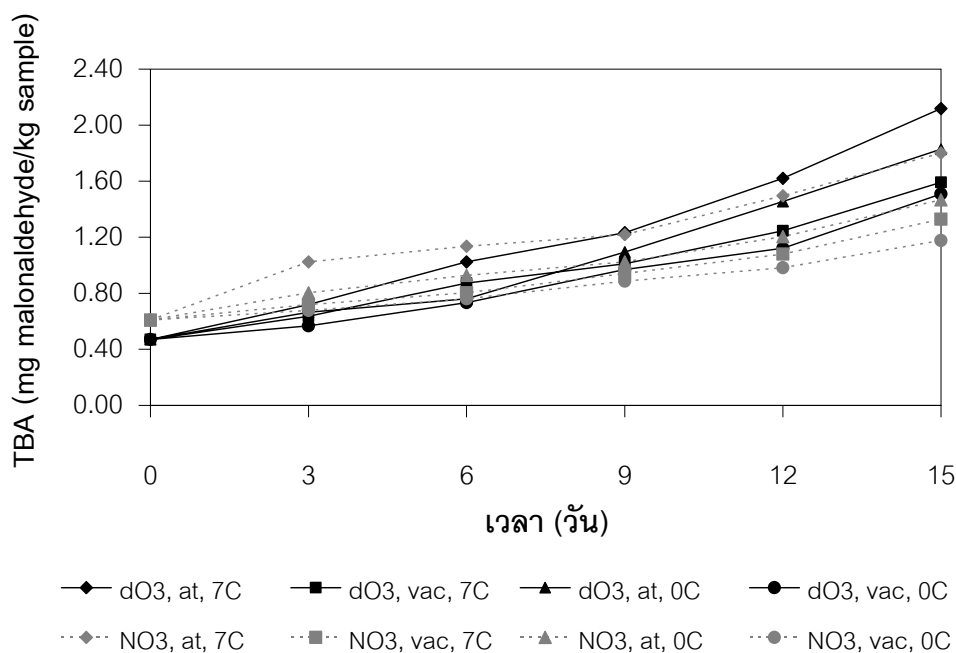


ภาพที่ 24 การเปลี่ยนแปลงค่ามุมของสีในปลานิลระหว่างการเก็บรักษา

อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองที่ได้จะเห็นว่าสภาวะในการบรรจุและอุณหภูมิในการเก็บรักษาไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะด้านสีของเนื้อปลานิลมากเท่ากับผลของการใช้ไอโซนในกระบวนการผลิต

การเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทางเคมี

จากการทดลองผลของไอโซนต่ออายุการเก็บรักษาเนื้อปลานิลที่ผ่านการอบแห้ง โดยการใช้ไอโซนในการล้างเนื้อปลาแช่แหวะ และใช้ก๊าซไอโซนในการรมเนื้อปลานิลเป็นช่วงๆ ระหว่างการอบแห้ง ผลการทดลองพบว่าค่า TBA เริ่มต้นของเนื้อปลานิลที่ผ่านไอโซนต่ำกว่าเนื้อปลาที่ไม่ผ่านไอโซน ซึ่งมีค่าเป็น 0.47 และ 0.61 มิลลิกรัมมาโลนาลดีไฮด์ต่อกิโลกรัมตัวอย่าง ตามลำดับ ทั้งนี้การเก็บรักษาที่นานขึ้นส่งผลให้ค่า TBA ของผลิตภัณฑ์ทั้งหมดเพิ่มสูงขึ้น โดยเนื้อปลานิลที่ผ่านไอโซนจะมีค่า TBA สูงขึ้นกว่าเนื้อปลาที่ไม่ผ่านไอโซนในช่วงวันที่ 6 และจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งถึงวันที่ 15 เมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อปลานิลที่ไม่ผ่านไอโซน ดังแสดงในภาพที่ 25



ภาพที่ 25 การเปลี่ยนแปลงค่า TBA ของปลานิลระหว่างการเก็บรักษา

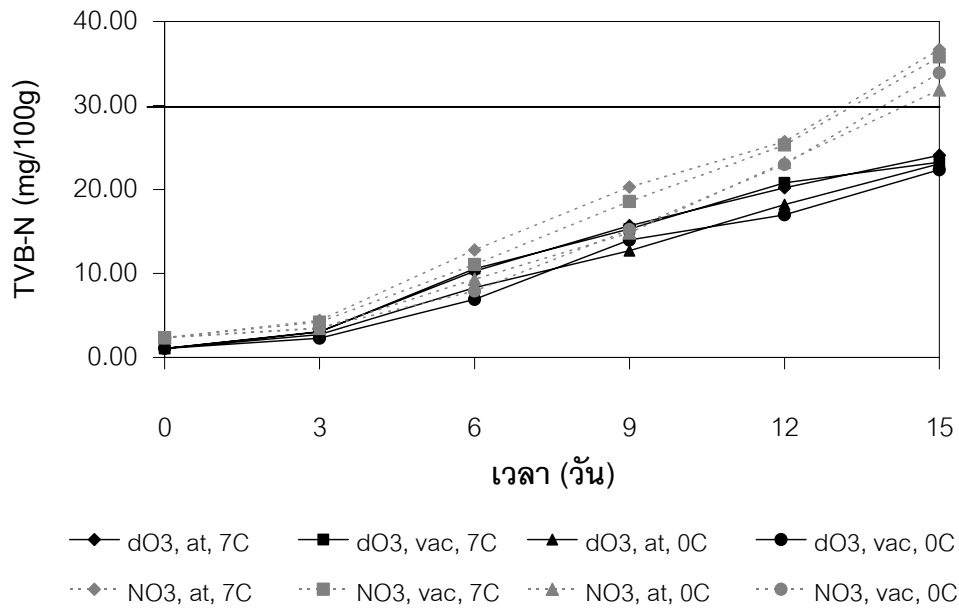
เนื่องจากการวัดค่า TBA เป็นการวัดปริมาณผลิตภัณฑ์อันดับสองคือมาโลนาลดีไฮด์ ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันในผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการใช้โอโซนที่มีคุณสมบัติเป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรง (Michelsen, 1992; Tiwari และคณะ, 2008) จึงสามารถเพิ่มอัตราการเกิดออกซิเดชันในผลิตภัณฑ์ให้สูงขึ้นได้ (Chawla, 2002) โดยโอโซนสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับผลิตภัณฑ์ได้ 2 ทาง คือ (1) ทำปฏิกิริยาได้โดยตรงกับโมเลกุลของโอโซน และ (2) ทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระ เช่น หมู่ -OH ที่เกิดจากการแตกตัวของโอโซน (Hoigné และ Bader, 1977) ในขณะเดียวกันเนื้อปลาก่อนแช่โอโซนได้ผ่านการแช่ในสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ ซึ่งจากการศึกษาของ Augbourg และ Ugliano (2002) พบว่า ความเข้มข้นของน้ำเกลือที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเร่งอัตราการเกิดเพอร์ออกไซด์ในปลาแมคเคอเรลระหว่างการเก็บรักษาในสภาวะแช่แข็ง Yanar และคณะ (2006) ได้ทดลองผลของความเข้มข้นน้ำเกลือต่ออายุการเก็บรักษาของปลานิลรวมคว้นเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส พบว่าความเข้มข้นของน้ำเกลือที่สูงร้อยละ 15 จะทำให้เนื้อปลามีค่า TBA สูงที่สุด เนื่องจากเกลือมีส่วนในการเร่งการเกิดปฏิกิริยาการเกิดออกซิเดชันโดยการกระตุ้นเหล็กที่เป็นองค์ประกอบในฮีม (heme) โดยประจุของไฮเดียมอาจจะไปแทนที่โมเลกุลขนาดใหญ่อย่างไมโอโกลบิน (myoglobin) ทำให้เกิดประจุอิสระของเหล็กที่ไปช่วยเร่งการเกิดออกซิเดชันของไขมัน (Kanner และคณะ, 1991; Liu และคณะ, 1997; Yanar และคณะ, 2006)

ในขณะเดียวกันจากผลการทดลองพบว่าเนื้อปลานิลที่ผ่านโอโซน บรรจุในสภาวะบรรยากาศและเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 7 องศาเซลเซียส มีอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า TBA สูงที่สุด ในขณะที่เนื้อปลานิล

ที่ไม่ผ่านไอโซน บรรจุแบบสุญญากาศ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส จะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า TBA ต่ำที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 25 ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าสภาวะในการบรรจุแบบสุญญากาศ และการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส สามารถช่วยชะลอการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของค่า TBA ได้ เนื่องจากช่วยลดปริมาณออกซิเจนตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันลง

นอกจากนี้จากการศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงของค่า TVB-N ของเนื้อปลานิลอบแห้งระหว่างการเก็บรักษาพบว่า เนื้อปลาที่ผ่านและไม่ผ่านไอโซนมีค่า TVB-N เริ่มต้น เป็น 1.08 และ 2.35 มิลลิกรัมต่อตัวอย่าง 100 กรัม ตามลำดับ โดยเนื้อปลาที่ผ่านไอโซนจะมีค่า TVB-N เริ่มต้นต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านไอโซนร้อยละ 54.04 อย่างไรก็ตามค่า TVB-N ของเนื้อปลาทั้งสองชุดจะมีค่าใกล้เคียงกันถึงวันที่ 6 หลังจากนั้นเนื้อปลาที่ไม่ผ่านไอโซนจะมีค่า TVB-N สูงขึ้นอย่างรวดเร็วในวันที่ 9 ของการเก็บรักษา และเพิ่มสูงเกิน 30 มิลลิกรัมต่อตัวอย่าง 100 กรัม หลังวันที่ 12 ดังแสดงในภาพที่ 26 ซึ่ง Sikorski และคณะ (1990) รายงานว่าผลิตภัณฑ์ปลาที่มีค่า TVB-N สูงกว่า 30 มิลลิกรัมต่อตัวอย่าง 100 กรัม จะมีคุณลักษณะไม่เหมาะต่อการบริโภค ดังนั้นเมื่อใช้ค่า TVB-N เป็นดัชนีในการชี้วัดคุณภาพเนื้อปลาแล้วพบว่าเนื้อปลาที่ผ่านไอโซนมีคุณภาพที่เหมาะสมตลอดอายุการเก็บรักษานาน 15 วัน

อย่างไรก็ตามน้ำเกลือที่ใช้แช่เนื้อปลาก่อนล้างด้วยน้ำไอโซน เป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการช่วยชะลอการเปลี่ยนแปลงของค่า TVB-N จากรายงานของ Yanar และคณะ (2006) พบว่าการใช้เกลือสามารถช่วยยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ปลาที่ใช้การวัดค่า TVB-N เป็นเกณฑ์ได้ ซึ่งเกลือจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเกิดกลิ่นรสที่ผิดปกติ (off-flavor) การเสื่อมสภาพของโปรตีน และการเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัสระหว่างการเก็บรักษา (Harris และ Tall, 1994) นอกจากนี้จากการศึกษาผลของสภาวะในการบรรจุและอุณหภูมิในการเก็บรักษา พบว่าการเก็บรักษาในสภาวะสุญญากาศ ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส จะช่วยลดการเพิ่มขึ้นของค่า TVB-N ระหว่างการเก็บรักษาได้ ทั้งนี้จากผลทดลองจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของค่า TVB-N ที่เพิ่มขึ้นสอดคล้องกับเปลี่ยนแปลงของปริมาณจุลินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นระหว่างการเก็บรักษา



ภาพที่ 26 การเปลี่ยนแปลงค่า TVB-N ของปลานิลระหว่างการเก็บรักษา

สรุปผลการทดลอง

การศึกษาเพื่อประเมินอายุการเก็บรักษาของเนื้อปลานิลแดงเดียวที่ผ่านการแช่น้ำเกลือความเข้มข้นร้อยละ 10 (น้ำหนักต่อปริมาตร) นาน 15 นาที ต่อมานำไปล้างด้วยน้ำไอโซนที่ความเข้มข้น 3 ppm นาน 90 วินาที หลังจากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส สลับกับการรมด้วยก๊าซไอโซนที่ความเข้มข้น 5 ppm นาน 30 นาที เนื้อปลานิลที่ได้จะถูกนำมาเก็บรักษาที่ 2 สภาวะคือ การเก็บรักษาที่สภาวะบรรยากาศ และสภาวะสุญญากาศ ที่อุณหภูมิ 2 ระดับ คือ 7 และ 0 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่ากระบวนการใช้ไอโซน การเก็บในสภาวะสุญญากาศ ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส เป็นสภาวะที่ดีที่สุดที่สามารถช่วยยืดอายุการเก็บรักษาเนื้อปลานิลได้นาน 15 วัน ในขณะที่สภาวะควบคุม (ไม่ใช้ไอโซน เก็บในสภาวะบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 7 องศาเซลเซียส สามารถเก็บรักษาได้นานเพียง 3 วัน

บทที่ 6

เอกสารอ้างอิง

- กลุ่มวิจัยและวิเคราะห์สถิติการประมง. 2545.
นนุช รักสกุลไทย. 2538. กรรมวิธีการแปรรูปสัตว์น้ำ. คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,
กรุงเทพฯ. 135 หน้า.
- พรณทิพย์ สุวรรณสาคร. 2543. ปลาสดเค็มแห้ง สถาบันวิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมสัตว์น้ำ กรม
ประมง, กรุงเทพฯ. 24 หน้า.
- ศิริ เกณฑ์ขุนทด. 2004. โอโซนกับความปลอดภัยของอาหาร. RSU JET vol.8 NO.1: 23-26 น.
- Akande, G.R., Knowles, M.J. Taylor, K.D.A. 1991. Rancidity and changes in fatty acid
composition of salted smoked mackerel cakes. Tropical Science. 31: 55-63.
- Akey, D.H., Walton, T.E., 1985. Liquid-phase study of ozone inactivation of Venezuelan equine
encephalomyelitis virus. Appl. Environ. Microbiol. 50 (4): 882-886.
- Anon. 1991. Malaysian fisheries statistics (Vol. 1). Malaysia Department of Fisheries. Ministry
of Aquaculture., John Wiley and Sons, Perek. 612 p.
- Auugbourg, S., Ugliano, M. 2002. Effect of brine pre-treatment on lipid stability of frozen horse
mackerel (*Trachurus trachurus*). European Food Research and Technology. 215: 91-
95.
- Bolton, D.C., Zee, Y.C., Osebold, J.W., 1982. The biological effects of ozone on representative
members of five groups of animal viruses. Environ. Res. 27: 476-484.
- Botzenhart, K., Tarcson, G.M., Ostruschka, M., 1993. Inactivation of bacteria and coliphages by
ozone and chlorine dioxide in a continuous flow reactor. Water Sci. Technol. 27 (3-4):
363-370.
- Castell, C.H., Maclean, J. Moor, B. 1965. Rancidity in lean fish muscle, IV. Effects of sodium
chloride and other salts. Journal of Fisheries Research Board of Canadian. 32: 929-
944.
- Chang, Y.H., 1989. Application of ozone with physical wastewater treatments to recondition
poultry process water. Poultry Sci. 68: 1078-1087.
- Chen, H.C., Huang, S.H., Moody, M.W., and Jiang, S.T. 1992. Bactericidal and mutagenic
effects of ozone on shrimp (*Penaeus monodon*) meat. J. Food Sci. 57: 923-927.

- Chen, H.H., Chiu, E.M., Huang, J.R., 1997. Color and gel forming properties of horse mackerel (*Trachurus japonicus*) as related to washing conditions. *J. Food Sci.* 62: 985–991.
- Doe, P.E., (Ed.). 1998. Fish drying and smoking, production and quality (pp. 13-115). Lancaster, PA: Technomic Publishing Co, Inc., pp. 89-115.
- Duffes, F. 1999. Improving the control of *Listeria monocytogenes* in cold smoked salmon. *Trends in Food Science and Technology.* 10: 211-216.
- Espe, M., Nortvedt, R., Lie, O., Hafsteinsson, H. 2002. Atlantic salmon (*Salmo salar*, L.) as raw material for the smoking industry. II: effect of different smoking methods on losses of nutrients and on the oxidation of lipids. *Food Chemistry.* 77: 41-46.
- Foegeding, P.M., 1985. Ozone inactivation of *Bacillus* and *Clostridium* spore populations and the importance of the spore coat to resistance. *Food Microbiol.* 2: 123-134.
- Frazier, W.C., Westhoff, D.C. 1988. Food as a substrate for microorganisms. In Elizabeth Dollinger (Ed.), *Food microbiology.* (4th ed., pp. 3-16). New York: McGraw-Hill.
- Gram, L. and Huss, H.H., 1996. Microbiological spoilage of fish and fish products. *Int J Food Micro* 33: 121-137.
- Greene, A.K., Few, B.K., Serafini, J.C., 1993. Ozonated vs. chlorinated sanitization of stainless steel surfaces soiled with milk spoilage organisms. *J. Dairy Sci.* 76: 3617-3620.
- Greer, G.G., and Jones, S.D.M. 1989. Effects of ozone on beef carcasses shrinkage, muscle quality and bacterial spoilage. *Can Inst Food Sci Tech J.* 2: 156-160.
- Grimm, C.C., Lloyd, S.W., Zimba, P.V., 2004. Instrumental versus sensory detection of off-flavors in farm-raised channel catfish. *Aquaculture.* 236 : 309-319.
- Güzel-Seydim, Z., Bever Jr., P.I., Greene, A.K. 2004. Efficacy of ozone to reduce bacterial populations in the presence of food components. *Food Micro (short communication).* 21: 475-479.
- Hall, R.M., Sobsey, M.D., 1993. Inactivation of Hepatitis A virus and MS2 by ozone and ozone-hydrogen peroxide in buffered water. *Water Sci. Technol.* 27 (3-4): 371-378.
- Harris, P., Tall, J. 1994. Rancidity in fish. In Allen J. Hamilton (Ed.), *Rancidity in foods* (pp. 256-272). London, UK: Chapman and Hall.

- Hattula, T., Elfving, K., Mroueh, U.M., Luoma, T. 2001. Use of liquid smoke flavouring as an alternative to traditional flue gas smoking of Rainbow Trout fillage (*Oncorhynchus mykiss*). *Leben-smittel-Wissenschaft und-Technologie*. 34: 512-525.
- Horner, W.F.A. 1997. Preservation of fish by curing, drying, salting and smoking. In G. M. Hall (Ed.), *Fish processing technology* (2nd ed., pp. 32-73). London: Blackie Academic and Professional.
- Hwang,E., Cash,J.N.,and Zabik,M.J. 2001. Postharvest treatments for the reduction of Mancozeb in fresh apples. *J. Agri Food Chem*. 49: 3127-3132.
- Jamilah,B. Siti Aini, H. 1997. The effect of Tamarind (*Tamarindus indicus*) and Lime(*Citrus medica*) juice washing on the sensory attributes and the rancidity development in breaded tilapia. A preliminary study. *Pertanika Journal of Tropical Agricultural Science*. 20 : 107-111.
- Jiang,Y.M., Fu,J., 1998. Inhibition of polyphenol oxidase and the browning control of litchi fruit by glutathione and citric acid. *Food Chem*. 62: 49 –52.
- Jittinandana, S.,Kenny, PB., Slider, S.D.,Kiser, R.A. 2002. Effect of brine concentration and brining time on Quality of smoked rainbow trot fillets. *Journal of Food Science*. 67: 2095-2099.
- Johnsen, P.B., Lloyd, S.W., 1992. Influence of fat content on uptake and depuration of the off-flavor 2-methylisoborneol by channel catfish (*Ictalurus punctatus*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*. 49: 2406-2411.
- Johnsen, P.B., Lloyd, S.W.,Vingard, B.T., Dionigi,P.C.. 1996. Effect of temperature on uptake and depuration of 2-methylisoborneol in channel catfish (*Ictalurus punctatus*). *Journal of the World Aquaculture Society*. 27(1): 15-20.
- Kim,C.K., Gentile,D.M., Sproul,O.J., 1980. Mechanism of ozone inactivation of bacteriophage f2. *Appl.Environ.Microbiol*. 39 (1): 210-218.
- Kim, J., Yousef, A., Dave, S., 1999. Application of ozone for enhancing the microbiological safety and quality of foods: a review. *J. Food Prot*. 62: 1071– 1087.
- Kim, T.J., Silva, J.L., Chamul, R.S., Chen, T.C., 2000. Influence of ozone, hydrogen peroxide or salt on microbial profile, TBARS and color of channel catfish fillets. *J. Food Sci*. 65: 1210– 1213.

- Kötters, J., Pradur, A., Skura, B., Rosenthal, H., Black, E.A., Rodrigues-Lopez, J., 1997. Observations and experiments on extending shelf life of rockfish (*Sebastes* spp.) products with ozone. *J. Appl. Ichthyol.* 13: 1– 8.
- Lawton, L.A., Robertson P.K.J., Robertson, R.F., Bruce, F.C., 2003. The destruction of 2-methylisoborneol and geosmin using titanium dioxide photocatalysis. *Applied Catalysis B: Environmental.* 44: 9-13.
- Leroi, F., Joffraud, J.J. 2000 (a). Salt and smoke simultaneously affect chemical and sensory quality of cold-smoked salmon during storage 5 °C storage predicted using factorial design. *Journal of Food Protection.* 63(9): 1222-1227.
- Leroi, F., Joffraud, J.J., Chevalier, F. 2000(b). Effect of Salt and smoke on the microbiological quality of cold-smoked salmon during storage at 5 °C as estimated by the factorial design method. *Journal of Food Protection.* 63(4) : 502-508.
- Lovell, R.T., Broce, D., 1985. Cause of musty flavor in pound-cultured penaeid shrimp. *Aquaculture.* 50: 169 -174.
- Martin, J.F., Plakas, M.S., Holley, H.J., Kitzman, A.M., 1990. Pharmacokinetics and tissue disposition of the off-flavor compound 2- methylisoborneol in the channel catfish (*Ictalurus punctatus*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science.* 47: 544-547.
- Moshin, M., Bakar, J., Selamat, J. 1999. The effect on colour, texture and sensory attributes achieved by washing black tilapia fresh with banana leaf ash solution. *International Journal Food Science and Technology.* 34:359-363.
- Ong, K.C., Cash, J.N., Zabik, M.J., Siddiq, M., and Jones, A.L. 1996. Chlorine and ozone washes for pesticide removal from apples and processed apple sauce. *Food Chemistry.* 55 (2): 153 –160.
- Pascual, A., Llorca, I., and Canut, A. 2007. Use of ozone in food industries for reducing the environmental impact of cleaning and disinfection activities. *Trend Food Sci Tech* 18: S29-S35.
- Paerl, H.W., Millie, D.F., 1996. Physiological ecology of toxic aquatic cyanobacteria. *Phycologia.* 35: 160-167(Suppl.).

- Pasoarahona J.R.E., Barnathan G., Bianchini J.P., Gaydou E., 2005. Influence of season on the lipid content and fatty acid profiles of three tilapia species (*Oreochromis niloticus*, *O. macrochir* and *Tilapia rendalli*) from Madagascar. Food Chemistry. 91. 683-695.
- Puwastien, P., Judprasong, K., Kettwan, E., Vasanachitt, K., Nakngamanong, Y., Bhattacharjee, L. 1999. Proximate composition of raw and cooked Thai freshwater and Marine fish. Journal of Food Composition and Analysis. 12: 9-16.
- Restaino, L., Frampton, E.W., Hemphill, J.B., Palnikar, P., 1995. Efficacy of ozonated water against various food-related micro-organisms. Appl. Environ. Microbiol. 61 (9): 3471-3475.
- Rohnani, A.C., Yunus, J.M. 1994. Processing of surimi from freshwater fish tilapia. In: Processing of the fifth asian food conference-food agenda 21st century, Kuala Lumpur, Malaysia. ASCAN Food Handling Bureau. Kuala Lumpur. Malaysia. 286-288 p.
- Rorvik, L.M. 2000. *Listeria monocytogenes* in the smoked salmon industry. International Journal of Food Microbiology. 62: 183-190.
- Sallam, K.I., 2007. Chemical, sensory and shelf life evaluation of sliced salmon treated with salts of organic acids. Food Chem 101: 592-600.
- Schrader, K.K., Dennis, M.E. 2005. Cyanobacteria and earth/musty compounds found in commercial catfish (*Ictalurus punctatus*) ponds in the Mississippi Delta and Mississippi-Alabama Blackland Prairie. Water Research. 39: 2807-2814.
- Schneider, K.R., Steslow, F.S., Sierra, F.S., Rodrick, G.E., Noss, C.I., 1991. Ozone depuration of *Vibrio vulnificus* from the southern quahog clam, *Mercenaria campechiensis*. J. Invertebr. Pathol. 57: 184-190.
- Sheldon, B.W., Brown, A.L., 1986. Efficacy of ozone as a disinfectant for poultry carcasses and chill water. J. Food Sci. 51 (2): 305-309.
- Sigurgisladottir, S., Sigurdardottir, M.S., Torrissen, O., Vallet, J.L., Hafsteinsson, H. 2000. Effect of different salting and smoking processes on the microstructure, the texture and yield of Atlantic salmon (*Salmo salar*) fillets. Food Research International. 33: 847-855.
- Tucker, C.S., 2000. Off-flavour problems in aquaculture. Reviews in Fisheries Science. 8: 45-88.

- Vilhelmsson, O., Hafsteinsson, H., Kristjansson J.K. 1997. Extremely halotolerant characteristic of fully cured and dried cod. *International Journal of Food Microbiology*. 36: 163-170.
- Yamprayoon, J., Noomhorm, A. 2000. Geosmin and off-flavor in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Journal of Aquatic product technology*. 9(2) : 29-41.
- Yanar, Y., Celik, M., Akamca, E. 2005. Effect of brine concentration on shelf-life of hot-smoke tilapia (*Oreochromis niloticus*) Storage at 4 °C. *Food Chemistry*. (Article in Press).
- Young, W.F. Horth, H., Crane, R., Ogden, T., Arnott, M. 1996. *Water Research*. 30: 331-340.
- Yurkowski, M., Tabachek, J.L. 1974. Identification analysis and removal of geosmin from muddy flavoured trout. *Journal of Fisheries Research Board of Canada*. 31: 1851-1859 p.
- Zimba, P.V., Dionigi, C.P., Millie, D.E., 1999. Evaluating the relationship between photopigments and secondary metabolite accumulation in cyanobacteria. *Journal of Phycology*. 35: 1422-1429.
- Zimba, P.V., Grimm, C.C., Dionigi, C.P., 2000. Phytoplankton community structure, biomass, and off-flavor: pond-size relationships in Louisiana catfish ponds. *Journal of the World Aquaculture Society*. 32: 96-104.

Output ที่ได้จากโครงการ

1. การถ่ายทอดเทคโนโลยีการใช้ไอโซนในการล้างเนื้อปลาให้กับกลุ่มแม่บ้าน และกลุ่มเกษตรกรผู้เลี้ยงและแปรรูปผลิตภัณฑ์จากปลานิล ในอำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม ซึ่งเป็นการช่วยปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เสริมรายได้ และช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับเศรษฐกิจในระดับรากหญ้า
2. กำลังอยู่ในระหว่างดำเนินการตีพิมพ์ผลงานในวารสารวิชาการในระดับประเทศและนานาชาติ ประมาณ 2 เรื่อง