โอโซน : สมบัติทางเคมีกายภาพและการประยุกต์ใช้เพิ่มความขาวผลิตภัณฑ์เนื้อปลา

Ozone : Physico - Chemical Properties and Whiteness Increasing Application on Fish Products

ปิยะวิทย์ ทิพรส*
PIYAVIT THIPBHAROS

* อาจารย์ประจำภาควิชาวิทยาศาสตร์ (สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร) คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์

บทคัดย่อ

โอโซน คือ สารชนิดหนึ่งที่ถูกผลิตจากออกซิเจนซึ่งมีอยู่ทั่วไปในอากาศ โดยใช้พลังงานไฟฟ้าหรือรังสีอัลตราโอเลท เปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีของออกซิเจนจาก 2 อะตอม (O2) ให้เป็น 3 อะตอม (O3) ใน 1 โมเลกุล โอโซนถูกพบครั้งแรกในปี พ.ศ. 2383 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมัน ชื่อว่า C. F. Schonbein ต่อมา ปี พ.ศ. 2431 ได้จดลิขสิทธิ์ชื่อว่า "ก๊าซโอโซน" สามารถละลายน้ำได้ดีมากที่อุณหภูมิต่ำ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในรูปสารละลายโอโซนที่มีสมบัติเป็นสารฆ่าเชื้อโรคในน้ำ จากหลักการดังกล่าว จึงพัฒนาเครื่องผลิตโอโซนจำหน่ายในเชิงการค้า โดยให้ก๊าซออกซิเจนผ่านกระแสไฟฟ้าบริเวณดิสชาร์จแกป (Discharge gap) ซึ่งเกิดจากการผลิตกระแสไฟฟ้าตรงบริเวณไดอิเลกตริก เซอร์เฟส (Dielectric surface) ทำให้ได้ก๊าซโอโซนออกมา การสลายตัวของโอโซนขึ้นกับค่า pH อุณหภูมิสูง และแสงอัลตราไวโอเลท ปฏิกิริยาการสลายตัวของโอโซนในทางเคมีเกิดขึ้นได้ 2 แบบ คือ ปฏิกิริยาการสลายตัวทางอ้อม และปฏิกิริยาการสลายตัวทางตรง ปัจจุบันมีการนำโอโซนมาใช้ประโยชน์กันมากขึ้น ได้แก่ 1) ทำลายสารพิษ หรือสารชีวพิษ 2) ใช้เป็นสารออกซิไดซ์สารประกอบอินทรีย์ 3) ทำลายเซลล์จุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรค 4) ลดกลิ่นไม่พึงประสงค์ และ 5) กำจัดสีหรือฟอกสี ในปี พ.ศ. 2540 Dee Graham เป็นผู้รับรองให้ใช้โอโซนเป็นสารทำความสะอาดเครื่องมือ เครื่องจักร และบริเวณพื้นผิวในโรงงานแปรรูปอาหารและเป็นผู้ผลักดันให้โอโซนผ่านการรับรองจากกระทรวงเกษตรแห่งสหรัฐอเมริกา (USDA) ด้วยข้อกำหนดมาตรฐานที่เรียกว่า "โดยทั่วไปถือว่าปลอดภัย" (GRAS) จนกระทั่งเมื่อวันที่ 26 มิถุนายน 2544 สำนักงานคณะกรรมอาหารและยาแห่งสหรัฐอเมริกา (U.S. FDA) ได้ยอมรับโอโซนทั้งในสถานะก๊าซและของเหลวอย่างเป็นทางการ กลไกการทำงานของโอโซนในการเพิ่มความขาวของผลิตภัณฑ์อาหาร มีรายงานว่า การล้างเนื้อปลาด้วยน้ำที่ผสมโอโซน จะให้ค่าความสว่างและความขาวมากกว่าวิธีอื่น เนื่องจากการสูญเสียไมโอโกลบิน การฟอกสีโดยใช้โอโซนนั้น โอโซนจะเข้าทำลายโครงสร้างของพอร์ไฟริน (Porphylin) ในไมโอโกลบิน (Myoglobin) และฮีโมโกลบิน (Heamoglobin) แต่โอโซนจะไปมีผลต่อการเกิดเจล ซึ่งสอดคล้องกับทดลองใช้โอโซนในการผลิตซูริมิเนื้อปลาแมคเคอเรล โอโซนจะออกซิไดซ์หมู่ซัลฟไฮดริลอิสระ (Free sulfhydryl group) บนโมเลกุลของโปรตีนก่อให้เกิดพันธะไดซัลไฟด์(Disulphide bond) นอกจากนี้ โอโซนยังสามารถออกซิไดซ์พันธะไดซัลไฟด์และเกิดเป็นกรดซีสเตอิก (Cysteic acid) หรือสามารถทำลายพันธะไดซัลไฟด์และเกิดเป็นกรดซัลโฟนิก (Sulphonic acid) ส่งผลทำให้เกิดการเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีน นั่นคือ ทำให้ความสามารถในการเกิดเจลลดลง ส่วนการใช้โอโซนแก้ไขความขาวของเนื้อปลาฮอร์สแมคเคอเรล (Horse mackerel) โดยล้าง

เนื้อปลาด้วยโอโซนในน้ำกลั่น 1 ครั้ง ควบคุมอุณหภูมิน้ำล้าง ต่ำกว่า 5 ˚C ใช้เวลา 10 - 20 นาที สามารถแก้ไขความขาวได้ เนื่องจาก โอโซนเป็นสารออกซิไดซ์อย่างแรง ซึ่งสามารถทำลายโครงสร้างของพอร์ไฟริน นอกจากนี้ ยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการแยกองค์ประกอบต่างๆ โดยการลอยตัวกับฟองอากาศ ดังนั้น เม็ดสีที่ละลายได้อาจถูกขจัดโดยการลอยตัวดังกล่าว ส่วนการทดลองล้างด้วยน้ำเย็นและการล้างโดยใช้สารละลายด่างต้องใช้เวลานาน หรือล้างหลายครั้งถึงจะแก้ไขความขาวได้ นอกจากนี้มีรายงานว่า การใช้โอโซนในการผลิตซูริมิสามารถแก้ไขความขาวได้ โดยทดลองล้างเนื้อปลาแมคเคอเรล ใช้โอโซนปริมาณ 0.04 M ในซิเตรทบัฟเฟอร์ที่ค่า pH 3 เวลา 30 นาที ได้ค่าความขาวเพิ่มขึ้น รวมทั้งลดปริมาณไมโอโกลบินและปริมาณรงควัตถุทั้งหมด นอกจากนี้ การล้างเนื้อปลาโดยใช้โอโซน ต้องคำนึงถึงปริมาณโอโซนที่ตกค้างอยู่ในน้ำ เพราะถ้าไม่พบปริมาณโอโซนตกค้างในน้ำก็จะไม่มีผลในการใช้งาน

Abstract

Ozone is the substance which is produced from oxygen in the air and electric energy or ultraviolet ray by changing oxygen's chemical structure from O2 to O3 in 1 molecule. In 1840, ozone was first found by the German Scientist, C. F. Schonbein. Its qualification is water soluble at low temperature and can be applied as ozone solution which has the sanitizing property in water. According to this principle, there is a development of ozone generator for business which lets oxygen gas flows through electric stream in the discharge gap which is the result of produced electrical stream from the dielectric surface. The breakdown of ozone depends on pH value, temperature, and ultraviolet ray. There are 2 types of chemical breakdown reaction of ozone namely indirect and direct. Currently, there are many ways of using ozone namely 1) damaging toxin or biotoxic agents, 2) using as oxidized organic compounds, 3) damaging pathogenic microorganism, 4) eliminating unwanted odours, and 5) bleaching. In 1997, Dee Graham certified that ozone could be used for cleaning tools, machines, and grounds of the food processing factory. He also motivated the United States Department of Agriculture (USDA) to certify ozone by specifying the standard of "generally recognized as safe" (GRAS). Moreover, the United States for Food and Drug Administration (USFDA) officially accepted ozone in both gaseous and aqueous phases on June 26, 2001. In terms of ozone's mechanism of "revised whiteness", the previous research found that washing fish by ozone water could increase more lubricity value and whiteness than other ways. Because of the losing of myoglobin and bleaching, ozone would destroy the structure of porphylin in myoglobin and haemoglobin, but ozone would cause the gelation. In addition, the previous research related to the test of ozone for producing mackerel surimi found that ozone oxidized the free sulfhydryl group on protein molecule which caused the disulfide bond. Ozone could also oxidized the disulfide and led to the cysteic acid. In other words, ozone could destroy disulfide bond which led to sulfonic acid. This process caused the protein denaturation that caused the reduced capacity of gelation. As for the using of ozone for revised whiteness of horse mackerel fish, it was washed by using ozone in distilled water , and was controlled by washed water temperature lower than 5 °C. It was found that this process could revised whiteness for 10-20 minutes because ozone was the strong

oxidizing agent which could destroy the structure of porphylin. Besides, it could increase the proficiency of various composition separated by floating with bubble. Therefore, "soluble pigment" might be destroyed by this floating. As for the test of using the cooled water and washing with alkaline solution, it was found that it took long time or had to wash many times in order to revised. Moreover, it was found that ozone could revised whiteness and reduce the quantity of myoglobin and total pigment content for producing surimi by washing mackerel meat with 0.04 M ozone in citrate buffer at pH 3 for 30 minutes. In conclusion, washing fish by using of ozone must consider the residual ozone in water because if there is no residual ozone, it will be ineffective.

คำสำคัญ : โอโซน สมบัติทางเคมีกายภาพ ความขาว ผลิตภัณฑ์เนื้อปลา
Keywords : ozone, physico-chemical properties, whiteness, fish products

ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับโอโซน

ความหมาย

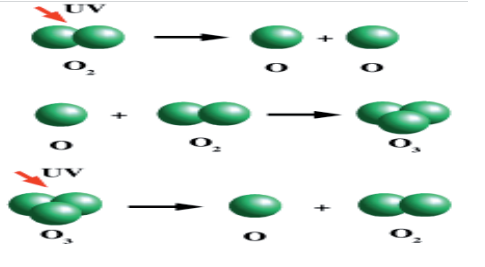
โอโซน คือ สารชนิดหนึ่งที่ถูกผลิตจากออกซิเจนซึ่งมีอยู่ทั่วไปในอากาศโดยใช้พลังงานไฟฟ้าหรือรังสีอัลตราไวโอเลทเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีของออกซิเจนจาก 2 อะตอม (O2) ให้เป็น 3 อะตอม (O3) ใน 1 โมเลกุล (Rip, 1984 อ้างถึงใน ยุวันดา นะหีม , 2545)

ประวัติการค้นพบโอโซน

โอโซนถูกพบครั้งแรกในปี พ.ศ. 2383 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมัน ชื่อว่า C. F. Schonbein ต่อมา ปี พ.ศ. 2431 ได้ทำการจดลิขสิทธิ์ให้ชื่อว่าก๊าซโอโซน (O3) ที่มีสมบัติที่เรียกว่า "Deodorize sewer gases" โอโซนสามารถละลายน้ำได้ดีมากที่อุณหภูมิต่ำ จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในรูปที่เป็นสารละลายโอโซน ที่มีสมบัติเป็นสารฆ่าเชื้อโรคในน้ำ ที่เรียกว่า Polluted water disinfectant ต่อมาในปี พ.ศ. 2434 ได้รับการยอมรับว่าเป็นสารฆ่าเชื้อแบคทีเรีย (Bactericidal agent) อีกประมาณ 2 ปี ต่อมา ชาวฮอลแลนด์ได้ผลิตโอโซนในเชิงการค้าจุดประสงค์เพื่อบำบัดน้ำเสียและน้ำดีใช้ในประเทศ และในปี พ.ศ. 2443 มีการใช้โอโซนกันอย่างกว้างขวางในทวีปยุโรป โดยเฉพาะในปี พ.ศ. 2545 ประเทศเยอรมนีได้ผลิตโอโซนเพื่อใช้บำบัดน้ำดื่มน้ำใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม (Graham และคณะ, 1997) จนกระทั่งปี พ.ศ. 2483 มีการใช้โอโซนอย่างกว้างขวางในประเทศสหรัฐอเมริกาอย่างต่อเนื่อง และต่อมา ในปี พ.ศ. 2523 มีรายงานว่ามีการใช้โอโซนในการบำบัดน้ำดื่มน้ำใช้ใน 5 โรงงานในประเทศสหรัฐอเมริกา และพบว่าในปี พ.ศ. 2530 มีการใช้โอโซนในการบำบัดน้ำดื่มน้ำใช้ในโรงงาน มากกว่า 200 โรงงานในประเทศสหรัฐอเมริกา (Kaminski และ Prendiville, 1996 ; Graham และคณะ, 1997)

ลักษณะเด่น การใช้ประโยชน์ และการสลายตัวของโอโซน

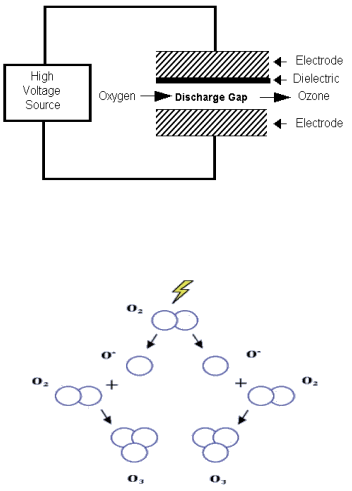
โอโซนเกิดขึ้นตามธรรมชาติในชั้นบรรยากาศสตราโทสเฟียร์ (Stratosphere) โดยรังสีอัลตราไวโอเลต (Ultraviolate ray) ทำให้ก๊าซออกซิเจนแตกตัวเป็น 2 อะตอม ก๊าซโอโซนเกิดขึ้นเมื่ออะตอมที่แตกตัวรวมกับออกซิเจนโมเลกุล (รูปที่ 1) ซึ่งต่อกันด้วยปฏิกิริยาโฟโตเคมิคอล (Photochemical reaction) ทำให้เกิดการสลายตัวอย่างรวดเร็ว (Graham และคณะ, 1997 อ้างถึงใน ณัฐพล ฟ้าภิญโญ, 2550) นอกจากนี้ โอโซนเกิดขึ้นในเวลาฟ้าแลบ ฟ้าร้อง ฟ้าผ่า ระหว่างฝนตก ซึ่งเกิดจากกระบวนการโคโรนาดิสชาร์จ (Corona discharge) โดยมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าในอากาศสูงมาก ทำให้ก๊าซออกซิเจนแตกตัวรวมกันเป็นก๊าซโอโซน



รูปที่ 1 ลักษณะการแตกตัวของออกซิเจนกลายเป็นก๊าซโอโซน

ที่มา : www.ozone.meteo.be/meteo/view/en/1547746-Formatio สืบค้นใน www.google.com

จากหลักการดังกล่าว จึงมีการพัฒนาเครื่องผลิตโอโซน (Ozone generator) จำหน่ายในเชิงการค้า โดยให้ก๊าซออกซิเจนผ่านกระแสไฟฟ้าบริเวณดิสชาร์จแกป (Discharge gap) ซึ่งเกิดจากการผลิตกระแสไฟฟ้าจากบริเวณไดอิเลกตริก เซอร์เฟส (Dielectric surface) ทำให้ได้ก๊าซโอโซนออกมา (Kim และคณะ, 1999 อ้างถึงใน ณัฐพล ฟ้าภิญโญ, 2550) ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ลักษณะการเกิดก๊าซโอโซนโดยปราการณ์โคโรนาดิสชาร์จ

ที่มา : www.ozonesolutions.comOzone_Formation. html สืบค้นใน www.google.com

1. ลักษณะเด่นของโอโซน

ปัจจุบันการศึกษาวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการใช้โอโซนมากขึ้นและใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยโอโซนมีลักษณะเด่น ดังนี้ (ดัดแปลงจาก ยุวันดา นะหีม , 2545)

(1) สลายตัวเร็ว เนื่องจาก ไม่คงตัว (Unstable) และไม่สามารถเก็บบรรจุใส่ภาชนะใดๆได้ (ยกเว้นการเก็บในสภาวะอุณหภูมิต่ำหรือน้ำแข็ง) การสลายตัวจะขึ้นกับอุณหภูมิและความชื้น

(2) มีกลิ่นคล้ายกลิ่นฝนตกใหม่ๆ และถ้ามีความเข้มข้นสูงจะมีกลิ่นฉุน

(3) สถานะทั่วไปเป็นก๊าซ

(4) มีฤทธิ์ในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียที่รุนแรงมาก(Potential bactericidal disinfection) ทั้งในน้ำและอากาศ

(5) เป็นสารออกซิไดซ์ที่มีความรุนแรงมาก (Potential oxidizing agent) จึงสามารถทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ได้

2. การใช้ประโยชน์โอโซนในอุตสาหกรรมอาหาร

ปัจจุบันมีการนำโอโซนมาใช้ประโยชน์กันมากขึ้น (ดัดแปลงจาก ยุวันดา นะหีม, 2545) ดังนี้

(1) ทำลายสารพิษ หรือสารชีวพิษ

(2) ใช้เป็นสารออกซิไดซ์สารประกอบอินทรีย์ (Oxidation of organic compounds)

(3) ทำลายเซลล์จุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรค

(4) ลดกลิ่นไม่พึงประสงค์

(5) กำจัดสีหรือฟอกสี

ในปี พ.ศ. 2540 ดร.ดี เกรแฮม (Dr. Dee Graham) เป็นผู้รับรองให้ใช้โอโซนเป็นสารทำความสะอาด (Disinfectant หรือ Sanitizer) เครื่องมือ เครื่องจักร และบริเวณพื้นผิวในโรงงานแปรรูปอาหารและเป็นผู้ผลักดันให้โอโซนผ่านการรับรองจากกระทรวงเกษตรแห่งสหรัฐอเมริกา (The united states department of agricultural ; USDA) ด้วยข้อกำหนดมาตรฐานที่ว่า

"โดยทั่วไปถือว่าปลอดภัย" (GRAS ; Generally recognized as safe) (Graham และคณะ, 1997) จนกระทั่งเมื่อวันที่ 26 มิถุนายน 2544 สำนักงานคณะกรรมอาหารและยาแห่งสหรัฐอเมริกา (The united states Food and drug administration ; U.S. FDA) ได้ยอมรับเป็นทางการว่าโอโซนทั้งในสถานะก๊าซและของเหลว สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ในอาหารระหว่างการแปรรูปและการเก็บรักษา ต่อมา วันที่ 21 ธันวาคม 2544 กระทรวงเกษตรแห่งสหรัฐอเมริกาว่าด้วยข้อกำหนดมาตรฐานด้านความปลอดภัยอาหารและการบริการตรวจสอบหรือเรียกหน่วยงานนี้ว่า USDA FSIS (The united states department of agricultural,s food safety and inspection service) ได้รับรองให้ใช้โอโซนผสมน้ำเย็น น้ำแข็ง สัมผัสโดยตรงกับซากเนื้อสัตว์ และซากสัตว์ปีกก่อนแช่เย็นและแช่แข็ง นอกจากนี้ ยังสามารถใช้ประโยชน์แพร่หลายกับผลิตภัณฑ์สัตว์น้ำ กระบวนการแปรรูปเนื้อสัตว์ สัตว์ปีก และระบบการบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรมอาหารในปัจจุบัน (Dew, T. L, 2005)

3. การสลายตัวของโอโซน

การสลายตัวของโอโซนขึ้นกับค่า pH อุณหภูมิสูง และรังสีอัลตร้าไวโอเลต Tomiyasu และคณะ (1985) รายงานว่า ปฏิกิริยาการสลายตัวของโอโซนในทางเคมีเกิดขึ้นได้ 2 แบบ คือ ปฏิกิริยาการสลายตัวทางอ้อม (Indirect reaction) และปฏิกิริยาการสลายตัวทางตรง (Direct reaction) (Tomiyasu และคณะ, 1985 อ้างถึงใน ยุวันดา นะหีม, 2545) โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) ปฏิกิริยาการสลายตัวทางอ้อม

ปฏิกิริยาการสลายตัวทางอ้อมจะมีการรวมตัวกับอนุมูลหรือเรดิคอล (Radicals) การสลายตัวของโอโซนจะเกิดขึ้น 2 ขั้น คือ ขั้นแรก เกิดจากตัวเร่งเริ่มต้น (Initiators) เช่น ไฮดรอกซิลไอออน (OH-) ขั้นที่สอง เป็นการออกซิเดชันไฮดรอกซิลเรดิคอล (Hydroxyl radicals ; OH) จะทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ไฮดรอกซิลเรดิคอลเป็นตัวที่มีบทบาทสำคัญในการกำจัดสารเหล่านี้

กลไกการสลายตัวของโอโซนสามารถแบ่งเป็น 3 ส่วน

(1) ขั้นเริ่มต้น (Initiation)

(2) ขั้นการเกิดสายโซ่ของเรดิคอล (Radical chain)

(3) ขั้นสุดท้าย (Termination step)

ขั้นเริ่มต้น เป็นปฏิกิริยาระหว่างไฮดรอกซิลไอออน และโอโซนทำให้เกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์ แอนไอออนเรดิคอล (Superoxide anion radical ; $O_2^{\bullet-}$) และไฮโดรเปอรอกซิลเรดิคอล ; $OH_2^{\bullet}$) ดังนี้

$$O_3 + OH \longrightarrow O_2^{\bullet-} + OH_2^{\bullet}$$

ไฮโดรเปอรอกซิลเรดิคอลอยู่ในสมดุลกรด-เบส (Acid - base equilibrium) สามารถเปลี่ยนเป็นซูเปอร์ออกไซด์ แอนไอออนเรดิคอล ดังนี้

$$OH_2^{\bullet} \longleftrightarrow O_2^{\bullet-} + H^+$$

ขั้นสายโซ่ของเรดิคอล โอโซนแอนไอออนเรดิคอล ($O_3^{\bullet-}$) เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างโอโซนและซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนเรดิคอล สามารถสลายตัวเกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคอล ดังนี้

$$O_3 + O_2^{\bullet-} \longrightarrow O_3^{\bullet-} + O_2 \quad (1)$$
$$HO_3^{\bullet} \longleftrightarrow O_3^{\bullet-} + H^+ \quad (2)$$
$$OH_3^{\bullet} \longrightarrow OH^{\bullet} + O_2 \quad (3)$$

Hoige (1982) รายงานว่า ไฮดรอกซิลเรดิคอลที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับโอโซนเกิดเป็น $OH_4^{\bullet}$ และสลายตัวได้ออกซิเจน และไฮโดรเปอร์ออกซิลเรดิคอล ซึ่งจะให้ไฮดรอกซิลเรดิคอลด้วยตามวิถีการเกิดของปฏิกิริยา (Pathway) (Hoige,1982 อ้างถึงใน ยุวันดา นะหีม, 2545) ดังนี้

$$HO^{\bullet} + O_3 \longrightarrow OH_4^{\bullet} \quad (4)$$
$$OH_4^{\bullet} \longrightarrow O_2^{\bullet-} + HO_2^{\bullet} \quad (5)$$

การสลายตัวของ $OH_4^{\bullet}$ ได้ออกซิเจนและไฮโดรเปอร์ออกซิลเรดิคอล จะเป็นปฏิกิริยาสายโซ่ ซึ่งจะเริ่มตั้งแต่ปฏิกิริยาที่ (1) จนถึงปฏิกิริยาที่ (4) จะเปลี่ยนไฮดรอกซิลเรดิคอลเป็นซูเปอร์ออกไซด์ แอนไอออนเรดิคอล และไฮโดรเปอร์ออกซิลเรดิคอลจะเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ เรียกว่า ตัวส่งเสริม (Promoter) ส่วนการสลายตัวของโอโซนที่เป็นแบบจำลองของ Tomiyasu และคณะ (1985) จะไม่พบปฏิกิริยาลูกโซ่ แต่จะให้ผลคล้ายกัน

ขั้นสุดท้าย เป็นขั้นตอนที่สารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลเรดิคอล ซึ่งไฮดรอกซิลเรดิคอลเกิดจากโอโซนจำนวน 3 โมเลกุลให้ไฮดรอกซิล เรดิคอล 2 โมเลกุล ดังนี้

$$3O_3 + OH^- + H^+ \longrightarrow 2OH^{\bullet} + 4O_2$$

สรุปแบบปฏิกิริยาของการสลายตัวของโอโซนตามรูปแบบของ Tomiyasu และคณะ (1985) ดังนี้ (อ้างถึงใน ยุวันดา นะหีม, 2545)

<u>ขั้นเริ่มต้น</u>

$$O_3 + OH^- \longrightarrow O_2^{\bullet-} + OH_2^{\bullet}$$
$$OH_2^{\bullet} \longleftrightarrow O_2^{\bullet-} + H^+$$

<u>ขั้นสายโซ่ของเรดิคอล</u>

$$O_3 + O_2^{\bullet-} \longrightarrow O_3^{\bullet-} + O_2$$
$$HO_3^{\bullet} \longleftrightarrow O_3^{\bullet-} + H^+$$
$$OH_3^{\bullet} \longrightarrow OH^{\bullet} + O_2$$

<u>ขั้นสุดท้าย</u>

$$3O_3 + OH^- + H^+ \longrightarrow 2OH^{\bullet} + 4O_2$$

2) ปฏิกิริยาการสลายตัวทางตรง

ปฏิกิริยาการสลายตัวทางตรงจะเกิดขึ้นถ้าในน้ำไม่มี Initiate chain reaction (Initiators) หรือ Termination chain reaction เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วหรือความเข้มข้นของสารตัวจับที่ช่วยให้เกิดกลไกปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Scavengers mechanism of oxidation) เพิ่มขึ้น ดังตารางที่ 1 ส่งผลให้ปฏิกิริยาการสลายตัวทางตรงมีความสำคัญหรือ

เกิดมากขึ้น (Gottschalk และคณะ, 2000 อ้างถึงในยุวันดา นะหีม, 2545)

ตารางที่ 1 ชนิดของ Initiators, Promotors และ Scavengers ที่สำคัญและมีผลต่อการสลายตัวของโอโซน

Initiators	Promotors	Scavengers
OH^-	Humic acid	HCO^{3-} / CO^{3-}
O_2H_2 / HO_2^-	ary - R	PO_3^{4-}
	Tert - butyl alcohols (TBA)	
Fe^{2+}	Primary and secondary alcohols	humic acid
		ary - R
		tert - butyl alcohols (TBA)

ที่มา : Gottschalk และคณะ (2000) อ้างถึงใน ยุวันดา นะหีม (2545)

ชนิดของเครื่องผลิตโอโซน

เครื่องผลิตโอโซนแบ่งตามหลักการเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีของออกซิเจน จาก 2 อะตอม ให้เป็น 3 อะตอม ใน 1 โมเลกุล ซึ่งจะทำให้ได้ก๊าซที่มีลักษณะแตกต่างกับก๊าซออกซิเจนโดยสิ้นเชิง ที่เรียกว่า ก๊าซโอโซน หรือกล่าวได้ว่า โอโซน คือ "ออกซิเจนที่มีพลัง (Active oxygen)"(หจก. อินโนเวชั่น ไอเดีย, 2550) และสามารถแบ่งได้เป็น 2 หลักการ ดังนี้ (ยุวันดา นะหีม, 2545)

1. เครื่องผลิตโอโซนโดยใช้รังสีอัลตราไวโอเลท (UV Ozone generator)

ใช้รังสีจากหลอดอัลตราไวโอเลทที่มีความยาวคลื่น 185 นาโนเมตร (ดังรูปที่ 3) จะผลิตก๊าซโอโซนความเข้มข้นต่ำ 0.01% - 0.1% โดยน้ำหนัก (หรือ 100 ppm - 1,000 ppm)นิยมใช้กับอากาศมากกว่าใช้กับน้ำ เพราะถ้าใช้กับน้ำการละลายจะต่ำมาก โดยเราจะให้อากาศปริมาณมากผ่านหลอดแสงอัลตราไวโอเลท ส่งผลให้ก๊าซออกซิเจนในอากาศแตกกระจายออกเป็นออกซิเจนอะตอม (O^-) ที่มีความคงตัว และรวมตัวกับก๊าซออกซิเจนโมเลกุลอื่น ได้เป็นก๊าซโอโซน จากนั้นก๊าซโอโซนจะถูกฉีดเข้าไปผสมกับน้ำหรือไอน้ำ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาเคมีกับสารแปลกปลอมต่างๆ เช่นสารประกอบอินทรีย์ อนินทรีย์ รวมทั้งจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคในน้ำ โดยโอโซนจะเข้าทำลายผนังเซลล์ของจุลินทรีย์ทันที เป็นผลทำให้กิจกรรมของเอนไซม์และเซลล์สูญเสียไป

(Ozone solutions, Inc. อ้างถึงใน http://www.ozoneapplications.com/info/cd_vs_uv.htm และ ยุวันดา นะหีม, 2545)

รูปที่ 3 เครื่องผลิตโอโซนโดยใช้รังสีอัลตราไวโอเลท (UV Ozone generator)
ที่มา : www.silvermedicine.org สืบค้นใน www.google.com

2. หลักการทางพลังงานไฟฟ้า ที่เรียกว่า ปรากฏการณ์ โคโรนา ดิสชาร์จ (Corona discharge phenomena ; CD ozone) ดังรูปที่ 2

เป็นการให้ก๊าซออกซิเจนแห้งและบริสุทธิ์ผ่านเข้าไปในสนามไฟฟ้า (Electrical field) หลายพันโวลท์ ทั้งชนิดความถี่ต่ำ (50 Hz - 100 Hz) ความถี่ปานกลาง (100 Hz - 1,000 Hz) และความถี่สูง (1,000 Hz ขึ้นไป) ที่บริเวณ Discharge gap ซึ่งเกิดจากการผลิตกระแสไฟฟ้าที่บริเวณ Dielectric surface ณ สนามไฟฟ้าแห่งนี้มีผลให้ก๊าซออกซิเจนในอากาศแตกกระจายออกเป็นออกซิเจนอะตอม ($O^{\cdot}$) ที่มีความคงตัว และรวมตัวกับก๊าซออกซิเจนโมเลกุลอื่น ได้เป็นก๊าซโอโซนออกมาด้วยความเข้มข้นสูง ตั้งแต่ 1%-10% โดยน้ำหนัก สามารถนำไปใช้บำบัดน้ำได้อย่างดี ขนาดเครื่องมีตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ (ระดับมิลลิกรัม ถึง ระดับกิโลกรัม ต่อ ชั่วโมง) (Kim และคณะ,1999, ยุวันดา นะหีม, 2545 และ http://www.ozoneapplications.com/info/cd_vs_uv.htm)

3. วิธีการผสมก๊าซโอโซนกับน้ำ

ระบบการผสมโอโซนกับน้ำ มีวิธีปฏิบัติที่นิยมทำกัน 2 วิธี คือ

3.1 ระบบกระจายฟองอากาศ (Aeration system)

หลักการ มีดังนี้

(1) ใช้ปั๊มลมดันก๊าซโอโซนลงสู่น้ำผ่านหัวทรายหรือหัวกระจายอากาศ

(2) ขนาดฟองโอโซนขึ้นกับชนิดและคุณภาพของหัวกระจายอากาศ

(3) เหมาะสำหรับระบบบำบัดน้ำที่น้ำมีเวลาพักอยู่ในถังเก็บเป็นเวลานาน

ข้อดี คือ ใช้งานง่าย ราคาไม่แพง

ข้อเสีย มีดังนี้

(1) ประสิทธิภาพการผสมโอโซนต่ำ

(2) การซ่อมบำรุงขึ้นกับคุณภาพน้ำ เพราะอาจเกิดการอุดตันที่หัวกระจายฟองอากาศ

(3) ไม่เหมาะกับระบบผลิตน้ำที่ต้องการความต่อเนื่องในการผลิต (เวลาที่น้ำพักในถังน้อย)

ข้อกำหนดในการติดตั้ง มีดังนี้

(1) ต้องวางหัวกระจายฟองก๊าซโอโซน ณ จุดกึ่งกลางด้านล่างของถัง

(2) ติดตั้งเครื่องผลิตโอโซนให้สูงกว่าระดับน้ำและระวังมิให้น้ำไหลกลับเข้าสู่เครื่องได้

3.2 ระบบการฉีดผ่านหัวเวนทูรี (Ventury injection system) หรือระบบดูดโอโซน

หลักการ มีดังนี้

(1) ใช้ระบบ Ventury injector เป็นตัวดูดให้โอโซนละลายในน้ำ โดยอาศัยหลักการของการสร้างความแตกต่างของแรงดันจะเกิดสุญญากาศ ทำให้สามารถดูดก๊าซโอโซนในปริมาณที่ต้องการได้ เมื่อใช้น้ำดันผ่าน Ventury injector

(2) ขนาดฟองโอโซนจะเล็กมากให้ประสิทธิภาพสูงกว่าระบบกระจายอากาศ

(3) เหมาะสำหรับระบบการผลิตน้ำดื่มที่ต้องการผลผลิตมากและมีความต่อเนื่อง

ข้อดี มีดังนี้

(1) ประสิทธิภาพสูง ให้ผลลัพธ์ที่แน่นอน

(2) ซ่อมบำรุงดูแลง่าย

ข้อเสีย คือ ราคาสูงกว่า ทั้งระบบที่ติดตั้งและค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ

ข้อกำหนดในการติดตั้ง มีดังนี้

(1) ต้องเลือกขนาดและแรงดันของเครื่องสูบน้ำให้เหมาะสมกับขนาดของ Ventury injector

(2) เลือกขนาดของถังผสมโอโซนในเวลาที่สัมผัสกับน้ำ (Contact time) ตามที่กำหนด

4. กลไกการทำงานของโอโซนในการเพิ่มความขาว (Whiteness)

ความขาวเป็นดัชนีเฉพาะของเนื้อปลาอย่างหนึ่ง สามารถคำนวณได้จากสูตรดังนี้

$$\text{Whiteness} = 100 - ((100 - L^*)^2 + (a^*)^2 + (b^*)^2)^{1/2}$$

ค่า L* คือ ค่าความสว่าง มีค่าระหว่าง 0 (สีดำ) - 100 (สีขาว)

ค่า a* คือ ค่าบวก (+) แสดงค่าสีแดง ค่า a* คือ ค่าลบ (-) แสดงค่าสีเขียว

ค่า b* คือ ค่าบวก (+) แสดงค่าสีเหลือง ค่า b* คือ ค่าลบ (-) แสดงค่าสีน้ำเงิน

Chen และคณะ (1997) อ้างถึงในยุวันดา นะหีม (2545) รายงานว่า การล้างเนื้อปลาด้วยน้ำที่ผสมโอโซน จะให้ค่าความสว่างและความขาวมากกว่าวิธีอื่น การเปลี่ยนแปลงสีสังเกตได้จากการเพิ่มขึ้นของความขาว การเพิ่มของค่า L* และการลดลงของค่า a* จะทำให้เกิดความโปร่งแสง เนื่องจากการสูญเสียไมโอโกลบิน (Myoglobin) การฟอกสีโดยใช้โอโซนนั้น โอโซนจะเข้าทำลายโครงสร้างของพอร์ไฟริน (Porphyrin) ในไมโอโกลบินและฮีโมโกลบิน แต่โอโซนจะมีผลต่อการเกิดเจล

Mudd และคณะ(1989) อ้างถึงในยุวันดา นะหีม (2545) และสุทธวัฒน์ เบญจกุล (2549) รายงานว่า จากการทดลองใช้โอโซนในการผลิตซูริมิ (Surimi) ปลาแมคเคอเรล โอโซนจะออกซิไดซ์หมู่ซัลฟไฮดริลอิสระ (Free active sulfhydryl groups) บนโมเลกุลของโปรตีน ก่อให้เกิดพันธะไดซัลไฟด์ (Disulfide bond) นอกจากนี้ โอโซนยังสามารถออกซิไดซ์ไดซัลไฟด์และเกิดเป็นกรดซีสเตอิก (Cysteic acid) หรือสามารถทำลายพันธะไดซัลไฟด์และเกิดเป็นกรดซัลโฟนิก (sulfonic acid) ส่งผลทำให้เกิดการเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีน นั่นคือ ทำให้ความสามารถในการเกิดเจลลดลง

Chen และคณะ (1997) อ้างถึงใน ยุวันดา นะหีม (2545) และสุทธวัฒน์ เบญจกุล (2549) รายงานว่า การใช้โอโซนเพิ่มความขาวของเนื้อปลาฮอร์สแมคเคอเรล (Horse mackerel) ล้างเนื้อปลาโดยใช้โอโซนในน้ำกลั่น 1 ครั้ง ควบคุมอุณหภูมิน้ำล้าง ต่ำกว่า 5 ˚C ใช้เวลา 10 - 20 นาที สามารถเพิ่มความขาวได้ ทั้งนี้ เนื่องจาก โอโซนเป็นสารออกซิไดส์ (Oxidizing agent) อย่างแรง ซึ่งสามารถทำลายโครงสร้างของพอร์ไฟริน (Porphyrin) นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการแยกองค์ประกอบต่างๆ โดยการลอยตัวกับฟองอากาศ(Bubble floatation) ดังนั้น เม็ดสีที่ละลายได้อาจถูกขจัดโดยการลอยตัวดังกล่าว ส่วนการทดลองล้างด้วยน้ำเย็นและการล้างโดยใช้สารละลายด่าง (Alkaline solution) ต้องใช้เวลานาน หรือล้างหลายครั้งถึงจะเพิ่มความขาวได้ Jiang (1998) อ้างถึงใน ยุวันดา นะหีม (2545) และ สุทธวัฒน์ เบญจกุล (2549) รายงานว่า การใช้โอโซนในการผลิตซูริมิสามารถเพิ่มความขาวได้ โดยทดลองล้างเนื้อปลาแมคเคอเรล โดยใช้โอโซนใน 0.04 M ซิเตรทบัฟเฟอร์ ที่ค่า pH 3.0 เป็นเวลา 30 นาที ได้ค่าความขาวเป็น 51.7 - 60.1 และค่า L* เป็น 53.9 - 62.6 รวมทั้งลดปริมาณไมโอโกลบินและปริมาณรงควัตถุทั้งหมด

การล้างโดยใช้โอโซน ต้องคำนึงถึงปริมาณโอโซนที่ตกค้าง (Residual ozone) อยู่ในน้ำ เพราะถ้าไม่พบปริมาณโอโซนตกค้างในน้ำก็จะไม่มีผลในการใช้งาน ดังนั้น การใช้ระบบโอโซนต้องคำนึงถึงสิ่งต่อไปนี้
(ยุวันดา นะหีม, 2545)

1. ปริมาณโอโซนที่เครื่องผลิตโอโซนผลิตได้ ต้องมีปริมาณเพียงพอในการใช้งาน

2. ความเข้มข้นที่เครื่องผลิตโอโซนผลิตได้ เมื่อเปรียบเทียบกับอากาศที่ใช้ในการผลิตความเข้มข้นต้องสูงเพียงพอ เนื่องจากความเข้มข้นของโอโซนที่เครื่องผลิตโอโซนที่ใช้ผลิตจะมีผลต่อปริมาณโอโซนที่ผลิตได้

3. ปริมาณโอโซนที่ตกค้างในน้ำ จะเป็นตัวทำปฏิกิริยาโดยตรงกับสิ่งปนเปื้อนในน้ำ ฉะนั้น โอโซนที่ละลายน้ำต้องมีความเข้มข้นเพียงพอ

4. ระบบผสมโอโซนกับน้ำ เนื่องจากโอโซนที่ผลิตได้จากเครื่องผลิตโอโซนจะอยู่ในสถานะก๊าซซึ่งต่างสถานะกับน้ำ จึงจำเป็นต้องมีระบบผสมเพียงพอที่จะทำให้โอโซนละลายน้ำได้ดี

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

ณัฐพล ฟ้าภิญโญ (2550). **คุณภาพและการยืดอายุการเก็บรักษาปูนิ่ม (Scylla serrata Forskal) โดยใช้โอโซน กรดแอซีติก กรดแล็กติก กรดแอสคอร์บิก และการเก็บรักษาภายใต้สภาะปรับบรรยากาศ.** บัณฑิตวิทยาลัย วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก สาขาวิชาผลิตภัณฑ์ประมง ภาควิชาผลิตภัณฑ์ คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ : กรุงเทพฯ, 137 หน้า.

ยุวันดา นะหีม (2545). **อิทธิพลของโอโซน ไข่ขาวผง และซีสเตอีนต่อคุณภาพเจลของซูริมิที่ทำจากปลาทูแขก (Decapterus maruadsi) แช่เยือกแข็ง.** บัณฑิตวิทยาลัยปริญญาโท สาขาวิชาผลิตภัณฑ์ประมง ภาควิชาผลิตภัณฑ์ประมง คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. : กรุงเทพฯ, 109 หน้า.

สุทธวัฒน์ เบญจกุล (2549). การปรับปรุงสีของซูริมิจากปลาที่มีไขมันสูง. **ซูริมิ : วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเนื้อปลาบด.** กรุงเทพฯ. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, หน้า 65.

ภาษาอังกฤษ

H. H. Chen, E. M. Chiu., and J. R. Huang (1997). Color and Gel Forming Properties of Horse Mackerel(Trachurus japonicus) as Related to Washing conditions. **J. Food Sci.** 62 : pp. 985 - 991.

T. L. Dew (2005). **Ozone Degradation of Off - Flavors in Catfish.** A Thesis Submitted to the Graduate Faculty of The Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College. In The Department of Food Science, 69 p.

J. A. Gottschalk, M. A. Libra, and K. M. Saupe (2000). **Ozonation of Water and Waste Water.** Weinheim. New York, 189 p.

D. M. Graham (1997). Use of Ozone for Food Processing. **Food Technology**, 51(6) ; pp. 72 - 75.

J. Hoigne.1982. **Mechanism, Rates and Selectivities of Oxidations of Organic Compounds Initiated by Ozonation of Water**, pp.341 - 379. In Rice, R. G., and Netzer, A. (eds). Handbook of Ozone Technology and Applications. Ann. Arbor. Sci. Publ, Ann Arbor MI.

Jiang, Shan - Tzang, H.O. Ming - Lang, Sheng - H. O. Jiang, and Hsing - Chen Chen (1998). Purified NADPH - Sulfite Reductase from *Saccharomyces cerevisiae* Effects on Quality of Ozoned Mackerel Surimi. **J. Food Sci.** 63 (5) : pp. 777 - 781.

J. C., Kaminski, and P. W. Prendiville. (1996). **Milwaukee,s Ozone Upgrade**, Civil Engineering, September : pp. 62 - 67.

J. G. Kim, S. Daves, and A. E. Yousef (1999). Application of Ozone for Enhancing the Microbiological Safety and Quality of Foods. **Journal Food Protection.** 62 : pp. 1071 - 1087.

J. F. Martin, L. W. Bennett, and W. H. Graham (1988). Off - Flavor in the Channel Catfish (Icatlurus punctatus) due to 2 - methylisoborneol and its Dehydration Products. **Water Sci. Technol.** 29 (8/9) : pp. 65 - 99.

J. B. Mudd, L. Leavith, A. Ongun, and T. T. McManas (1989). Reaction of Ozone with Amino Acid and Protein. **Atoms Environ**. 23 : pp. 669 - 674.

G. R. Rip (1984). **Soft Drinking Water.** Lewis Publishers, Inc., United States of America. 275 p.

H. H. Tomiyasu, S. A. Fukutomi, and G. Godon (1985). Kinetics and Mechanisms of Ozone Decomposition in Basic Aqueous Solutions. **Inorganic Chem.** 24 : pp. 2962 — 2985.

http://www.ozoneapplications.com/info/cd_vs_uv.htm) (2008) สืบค้นเมื่อวันที่ 20 ธันวาคม 2551 จาก www.google.com

http://www.ozonesolutions.com/Ozone_Formation.html (2008) สืบค้นเมื่อวันที่ 5 ธันวาคม 2551 จาก www.google.com

http://www.ozone.meteo.be/meteo/view/en/1547746-Formatio (2008) สืบค้นเมื่อวันที่ 18 ตุลาคม 2551 จาก www.google.com

www.silvermedicine.org (2008) สืบค้นเมื่อวันที่ 20 ธันวาคม 2551 จาก www.google.com