บทที่ 5

วิจารณ์ผลการทดลอง

การรมก๊าซโอโซนอัตราการผลิต 250 มก./ชม. นานขึ้นจน 34-36 นาทีในน้ำอุณหภูมิปกติมีความสามารถในลดเปอร์เซ็นต์การเกิดโรคบนผลลำไยได้ดีมากยิ่งขึ้นสอดคล้องกับระดับความเข้มข้นของก๊าซโอโซนในน้ำที่มีสูงจะคงที่และลดลงอย่างช้าภายหลังปล่อยในน้ำนาน 24 นาที ซึ่งอาจเกิดคุณสมบัติ oxidizing agent ของโอโซนในน้ำสามารถทำปฏิกิริยาออกซิเดชั่นกับสารต่างๆ ในน้ำได้ 2 ทาง คือ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นกับสารในน้ำด้วยก๊าซโอโซนโดยตรงซึ่งจะเกิดได้มากกว่าการเกิดการเปลี่ยนรูปเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชั่นกับสารต่างๆ ในน้ำในรูปของไฮดรอกซิลฟรีแรดิเคิล (˙OH) ในน้ำ (Hoigné and Bader, 1977) และยังสามารถสลายตัวเป็นก๊าซออกซิเจนได้เนื่องจากมีครึ่งชีวิตในน้ำเพียง 30 นาที การสลายตัวของปริมาณก๊าซโอโซนในน้ำขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ค่าพีเอชและอุณหภูมิของน้ำ การปนเปื้อนของน้ำเนื่องจากอินทรีย์และอนินทรีย์วัตถุ ตลอดจนความชื้น (Hoigne and Bader, 1975, 1976) ก๊าซโอโซนมีความคงตัวและมีความสามารถในการละลายในน้ำต่ำ (unstable) มีค่าเท่ากับ 10 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 20ºC ปริมาณโอโซนในน้ำสำหรับใช้เป็นสารล้าง (sanitizer) ต้องมีความเข้มข้น 0.5-2 ppm อภินันท์ (2551) ตรวจพบปริมาณโอโซนน้ำด้วยวิธี Indigo method โดยปล่อยโอโซนที่มีกำลังผลิต 1,800 mg/h ในน้ำ พบว่ามีโอโซนในน้ำ 0.08 ppm ในน้ำสำหรับล้างสัมสามารถลดปริมาณเชื้อซึ่งมีค่าคล้ายคลึงกับการทดลองนี้ที่มีค่า 0.011 ppm ซึ่งค่าโอโซนในน้ำที่ต่ำกว่าอาจเกิดจากเครื่องโอโซนที่ใช้มีกำลังการผลิตต่ำกว่า Zhang *et al.* (2005) พบว่าการใช้ ozonated water ที่ความเข้มข้นต่ำเพียง 0.08 ppm สามารถช่วยลดปริมาณแบคทีเรียใน fresh cut celery และเพิ่มการยอมรับด้านประสาทสัมผัส Kim *et al.* (2003) รายงานว่าประสิทธิภาพของโอโซนในการฆ่าเชื้อสูงกว่าคลอรีน 1000 เท่า กลไกในการฆ่าเชื้อของโอโซนเกิดจากคุณสมบัติที่เป็นออกซิไดส์ซิ่งเอเจนส์ที่แรงที่สุดของโอโซน Whangchai *et al.* (2005) ศึกษาโอโซนที่มีกำลังผลิต 1,800 mg/h ในรูปของก๊าซรมผลลำไยนาน 60 นาทีจึงสามารถลดปริมาณเชื้อได้ ก๊าซโอโซนสามารถลดการเจริญของเส้นใยเชื้อราที่เป็นสาเหตุโรคบนผลลำไยได้หลายชนิด เช่น *Lasiodiplodia theobromae* และสปอร์ของ *Cladosporium* sp. และก๊าซโอโซนยังมีผลทำให้โครงสร้างของเส้นใยและสปอร์ของเชื้อราทั้งสองชนิดมีอาการผิดปกติ แต่อย่างไรก็ตามยังพบว่ายังมีเชื้อราสามารถเจริญบนผลภายหลังเก็บรักษานานๆ ซึ่งแสดงว่าโอโซนยังแทรกซึมเข้าไปไม่ทั่วถึงบนผิวเปลือกและยังสลายตัวง่าย การรมโอโซนในน้ำโดยทั่วไปในปัจจุบันมีการศึกษาสำหรับใช้ล้างผักและผลไม้ในขบวนการแปรรูปทดแทนสาร

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

คลอรีนซึ่งเป็นสาเหตุสารไตรคลอโรมีเทนที่เป็นสาเหตุของการเกิดมะเร็ง จมูกของคนจะเริ่มได้กลิ่นโอโซนเมื่อมีปริมาณโอโซนในน้ำในช่วง 0.01-0.04 ppm ประสิทธิภาพสูงสุดของโอโซนในการฆ่าเชื้อในน้ำช่วง 0.5-2 ppm

ส่วนการประเมินการยอมรับด้านสีผิวพบว่ามีค่าสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของค่าความสว่าง (L*) ค่า Chroma และ hue angle ของเปลือกซึ่งมีค่าลดลงตามระยะเวลาการเก็บรักษาซึ่งแสดงให้เห็นว่าสีผิวเริ่มเปลี่ยนแปลงเป็นสีน้ำตาลมากขึ้น เกิดจากการที่เปลือกผลลำไยเกิดการสูญเสียน้ำเนื่องจากทำให้เกิด cell plasmolysis กับเซลล์ในชั้น mesocarp เป็นผลให้เซลล์เมมเบรนเสียคุณสมบัติและเกิดการรั่วไหลของเอนไซม์ PPO (สัณห์, 2538) การรมด้วยก๊าซโอโซนในน้ำทุกระยะเวลานานถึง 36 นาที ไม่มีผลต่อค่าการยอมรับด้านสีผิวจากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบการกับการไม่รม (ชุดควบคุม) แต่อย่างไรก็ตามการรมก๊าซโอโซนในน้ำที่แช่ผลลำไยในเวลานานมากขึ้นมีผลโดยตรงต่อการลดการเปลี่ยนแปลงของค่าความสว่าง (L*), ความเข้มของสีผิว (C*) และค่า hue ของเปลือกด้านนอกและด้านใน เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมแสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติที่เป็นออกซิไดส์ซิ่งเอเจ้นท์ที่แรงมากของก๊าซโอโซนสามารถที่จะช่วยฟอกสีผิวให้เหลืองสอดคล้องงานวิจัยของสิคิริยา (2546) ที่ทดลองรมโอโซนที่มีกำลังผลิต 200 mg/h ในน้ำกับผลลำไยสดแต่การรมในน้ำนานเกินไป 90 นาที มีผลต่อการเปื่อยยุ่ยของเซลล์เปลือก ส่วนในรูปของก๊าซ Whangchai *et al*. (2005) รมเกิน 60 นาทีจนถึง 120 นาที

การรมโอโซนในน้ำที่อุณหภูมิปกติไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพของเนื้อได้แก่ ค่าความหวาน (% Brix) และค่าความแน่นเนื้อ (firmness)

ความเป็นกรดของน้ำ (ตัวกลาง) มีอิทธิพลต่อความคงตัวของปริมาณโอโซนในน้ำภายหลังการปล่อยนาน 36 นาที ปริมาณโอโซนในน้ำสลายตัวเร็วขึ้นเมื่อพีเอชตัวกลางสูงขึ้น

อิทธิพลของอุณหภูมิของน้ำ (ตัวกลาง) มีอิทธิพลอย่างมากต่อความคงตัวของปริมาณโอโซนในน้ำภายหลังการปล่อยนาน 36 นาที เนื่องจากโอโซนมีความคงตัวมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิตัวกลางต่ำลง

จากผลการทดลองเมื่อนำกรรมวิธีการปล่อยโอโซนในน้ำทั้งสามกรรมวิธีจาก 3 การทดลองได้แก่ การปล่อยก๊าซโอโซนนาน 36 นาทีในน้ำอุณหภูมิปกติ (27ºC), การปล่อยก๊าซโอโซนนาน 36 นาทีในน้ำอุณหภูมิปกติ (27ºC) ที่ปรับพีเอชน้ำเท่ากับ 3 และการปล่อยก๊าซโอโซนนาน 36 นาทีในน้ำอุณหภูมิต่ำเท่ากับ 5ºC ที่ปรับ pH น้ำเท่ากับ 3 มาศึกษาเปรียบเทียบกันอีกครั้งโดยเปรียบเทียบกับการรมในรูปของก๊าซโอโซนนาน 36 นาทีเท่ากัน พบว่าการปล่อยก๊าซโอโซนนาน 36 นาทีในน้ำอุณหภูมิต่ำเท่ากับ 5ºC ที่ปรับ pH น้ำเท่ากับ 3 ช่วยเพิ่มความคงตัวของปริมาณโอโซนในน้ำได้อย่างมีนัยสำคัญสูงกว่าการปล่อยก๊าซโอโซนนาน 36 นาทีในน้ำอุณหภูมิปกติ (27ºC), การปล่อยก๊าซ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

โอโซนนาน 36 นาทีในน้ำอุณหภูมิปกติ (27ºC) ที่ปรับ pH น้ำเท่ากับ 3 แสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของอุณหภูมิน้ำร่วมกับระดับความเป็นกรดของน้ำมีผลอย่างยิ่งต่อความคงตัวของปริมาณโอโซนในน้ำ สอดคล้องกับงานวิจัยของอภินันท์ (2548) ที่พบว่าการปรับ pH ของน้ำกรองร่วมกับการปรับพีเอชน้ำให้เป็นกรดช่วยลดการสลายตัวของโอโซนภายหลังตั้งทิ้งไว้นาน 2 ชั่วโมง ความคงตัวของโอโซนในน้ำที่สูงขึ้นกว่าทุกกรรมวิธีมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อของโอโซนเมื่อปล่อยในน้ำซึ่งมีเปอร์เซ็นต์การเน่าเสียต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับการไม่ปรับ pH และอุณหภูมิน้ำ แต่อย่างไรก็ตามเปอร์เซ็นต์การเกิดโรคยังสูงกว่าในรูปของการปล่อยด้วยก๊าซโอโซนฆ่าเชื้อบนผลลำไยโดยตรง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการฆ่าเชื้อด้วยโอโซนในรูปของก๊าซโอโซนมีประสิทธิภาพสูงกว่าในรูปของสารละลายเนื่องจากในรูปของก๊าซโอโซนมีโอกาสเข้าสัมผัสกับเชื้อโรคที่ผิวเปลือกได้มากกว่าในรูปสารละลายที่โอโซนมีคงตัวต่ำกว่า กานดา (2550) การใช้ในรูปของก๊าซโอโซนในน้ำพบว่ามีประสิทธิภาพต่ำกว่าในรูปของก๊าซ แต่อย่างไรก็ตามยังพบว่ายังมีเชื้อราสามารถเจริญบนผลภายหลังเก็บรักษานานๆ ซึ่งแสดงว่าโอโซนยังแทรกซึมเข้าไปไม่ทั่วถึงบนผิวเปลือกและยังสลายตัวง่าย

แต่การใช้ในรูปของก๊าซหรือในรูปของสารละลายมีรายงานกับลำไยว่ามีโอกาสทำให้ผิวเกิดขบวนการเสื่อมเนื่องจากเปลือกเป็นแผลได้ง่ายเมื่อรมนานเกินไป Whangchai *et al.* (2005) พบว่าไม่ควรรมก๊าซโอโซนนานเกิน 60 นาทีกับผลลำไยสดเพราะมีผลทำให้เปลือกเกิดแผลและทำให้ไปกระตุ้นทำให้เกิดการเปลี่ยนสีน้ำตาลได้เร็วขึ้นและเชื้อราสามารถเข้าทำลายซ้ำได้ง่าย ศรัณยา และคณะ (2546) ยังพบว่าการรมโอโซนในรูปของก๊าซยังมีผลไปกระตุ้นให้เกิดอนุมูลอิสระเปอร์ร๊อกไซด์มากขึ้นซึ่งมีผลโดยตรงต่อการเสื่อมของเซลล์เปลือกให้เร็วขึ้น ส่วนในรูปของสารละลาย สิคิริยา (2546) ที่ทดลองรมโอโซนที่มีกำลังผลิต 200 mg/h ในน้ำกับผลลำไยสดแต่การรมในน้ำเกินไป มีผลต่อการเปื่อยยุ่ยของเซลล์เปลือก การรมด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) มีประสิทธิภาพสูงสุดไม่มีการเกิดโรคเกิดขึ้นระหว่างการเก็บรักษาเนื่องจากก๊าซ SO_2 สามารถแทรกซึมได้อย่างทั่วถึงเนื้อระหว่างการรมในห้องรม SO_2 ทำปฏิกิริยากับน้ำกลายเป็นซัลไฟต์อิสระเช่นในกรณี pH ต่ำกว่า 3 จะอยู่ในรูปกรดซัลฟูรัส (H_2SO_3) หรือ pH ระหว่าง 3-5 จะอยู่ในรูปไบซัลไฟต์ไอออน (HSO_3^{2-}) ซึ่งขึ้นอยู่กับระดับ pH ของเปลือกและเนื้อในขณะรม และภายหลังการรมในเปลือกยังคงปริมาณสาร SO_2 ที่สูง แต่อย่างไรก็ตามการพบการตกค้างของ SO_2 ในเนื้อซึ่งเป็นส่วนที่ใช้รับประทานทำให้อาจจะกลายเป็นปัญหาสำคัญในอนาคตที่ประเทศนำเข้าอาจจะนำมาตั้งเป็นมาตรการกีดกันทางการค้า (Tongdee, 1994)

การใช้โอโซนทุกกรรมวิธีไม่มีผลต่อการสูญเสียน้ำหนักเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม เนื่องจากคุณสมบัติของโอโซนไม่มีผลไปช่วยลดการสูญเสียน้ำหนักนั่นเอง การสูญเสียน้ำหนักทุก

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

กรรมวิธีมีการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษา ทั้งนี้เนื่องจากเนื้อเยื่อของผักและผลไม้มีน้ำเป็นองค์ประกอบประมาณ 80-90% จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้มีการสูญเสียน้ำหนักได้มาก (ดนัย, 2540) นอกจากนี้ลำไยที่นำมาเก็บรักษายังคงมีการหายใจและคายความร้อนออกมาสู่บรรยากาศรอบๆ ตลอดเวลา ทำให้อุณหภูมิของอากาศรวมทั้งมีการเคลื่อนไหวของโมเลกุลน้ำมากขึ้น โมเลกุลน้ำจึงหลุดออกจากกัน แล้วเกิดการสูญเสียในรูปของไอน้ำมากขึ้นตามไปด้วย (จริงแท้, 2538) การหุ้มด้วยฟิล์มพลาสติกสุญญากาศเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยลดการเปลี่ยนสีน้ำตาลของผลลำไยเนื่องจากไปเพิ่มปริมาณความชื้นในภาชนะบรรจุและอาจจะช่วยดัดแปลงบรรยากาศในภาชนะทำให้ไปลดปริมาณออกซิเจนและเพิ่มปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้เข้าสู่จุดสมดุลเร็วขึ้น มานพ และคณะ (2549) รายงานว่าการบรรจุผลลำไยสดที่ผ่านการรมโอโซนในน้ำนาน 36 นาที และเก็บในถุงสุญญากาศ สามารถเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5ºC ได้นานถึง 40 วัน แต่ผลเสียที่พบตามมาการเก็บในถุงดังกล่าวอาจจะไปเพิ่มปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้นจึงมีผลต่อทำให้เกิด off-flavor ขึ้นเมื่อเก็บรักษานาน 10 วันขึ้นไป และเมื่อนำผลลำไยสดออกจากถุงสุญญากาศสีผิวเปลือกจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอย่างรวดเร็วเนื่องจากการสัมผัสกับก๊าซออกซิเจนทำให้ไปเร่งกระบวนการเปลี่ยนสีได้เร็วขึ้น (Thompson, 1997) การเก็บผลลำไยในฟิล์มพีวีซีซึ่งมีการถ่ายเทอากาศที่ดีจึงมีความเหมาะสมที่สุดเมื่อพิจารณาผลต่อคุณภาพด้านอื่นๆ ประกอบกัน (Seubrach *et al*., 2006)

การปล่อยก๊าซโอโซนในน้ำและในรูปก๊าซไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความสว่าง (L*), ค่า Chroma และ hue angle ซึ่งมีค่าลดลงอย่างช้าๆ เช่นเดียวกับชุดควบคุมสอดคล้องกับคะแนนการยอมรับด้านสีผิวเปลือกนอกซึ่งเกิดจากการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำที่ 5ºC ซึ่งผลลำไยมีโอกาสที่สามารถเกิดอันตรายจากความเย็นที่เรียกว่าอาการสะท้านหนาว (chilling injury) ได้ซึ่งสังเกตได้จากการยอมรับด้านสีผิวที่มีค่าลดลง ซึ่งการหุ้มด้วยฟิล์มอาจจะทำให้อาการสะท้านหนาวมีการพัฒนาของอาการให้เห็นช้าลงเนื่องจากฟิล์มพลาสติกสามารถลดการปะทะของลมเย็นไม่ให้เข้าไปปะทะกับผิวเปลือกได้โดยตรง ซึ่งสังเกตเห็นว่าการไม่หุ้มฟิล์มพลาสติกเลยมีผลทำให้สีผิวผลลำไยสดเปลี่ยนสีผิวเป็นน้ำตาลอย่างรวดเร็วภายใน 7 วันสอดคล้องกับงานวิจัยของดนัยและคณะ (2545); Jaitrong *et al.* (2006) รวมทั้งการใช้โอโซนไม่มีผลต่อกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส (PPO) และยังไม่สามารถชะลอการสูญเสียปริมาณฟีนอลในเปลือก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าก๊าซโอโซนไม่มีผลต่อการชะลอการเปลี่ยนสีผิวเป็นสีน้ำตาลเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการที่ใช้ในเชิงการค้าในปัจจุบัน คือ การรมด้วยก๊าซ SO_2ซึ่งมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเปลี่ยนสีน้ำตาลของเปลือกได้อย่างสมบูรณ์ซึ่งสอดคล้องกับมีกิจกรรมเอนไซม์ PPO ต่ำที่สุด และมีค่า L*, C* และ ºh ที่สูงที่สุดตลอดอายุการเก็บรักษา โดยสรุปแล้ว SO_2 มีกลไกที่ยับยั้งการเปลี่ยนสีน้ำตาลได้แก่ 1) คุณสมบัติที่

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เป็น reducing agent ในการดึงควิโนนที่กำลังจะรวมตัวกับสารต่างๆ กลายเป็นสารสีน้ำตาล ให้กลับมาอยู่ในรูปของไดฟีนอลธรรมดาซึ่งจะพบว่าการใช้ SO_2 มีปริมาณฟีนอล (total phenol) ที่วัดในรูปกรดแกลลิกสูงกว่าทุกกรรมวิธี (Wu *et al*., 2001; กานดา (2550)) 2) การเข้าไปรวมกับเอนไซม์ PPO โดยตรง 3) คุณสมบัติที่เป็นสาร antioxidant การพัฒนาก๊าซโอโซนให้สามารถยับยั้งการเปลี่ยนสีน้ำตาลได้อาจจำเป็นต้องใช้ควบคู่กับสารที่มีคุณสมบัติยับยั้งการเปลี่ยนสีน้ำตาลโดยตรง Whangchai *et al*. (2005) พบว่าการรมด้วยก๊าซโอโซนนาน 60 นาที และตามด้วยการจุ่มในกรดซิตริกและออกซาลิกสามารถช่วยชะลอการเปลี่ยนสีน้ำตาลได้นาน 3 สัปดาห์ และมีผลชะลอกิจกรรมของ PPO ระหว่างการเก็บ

การใช้โอโซนไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของเนื้อลำไยเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม เช่น ความหวาน และความแน่นเนื้อ ตลอดจนการยอมรับด้านประสาทสัมผัส เช่น การยอมรับด้านลักษณะเนื้อระหว่างการเก็บรักษาสอดคล้องกับสิริยา (2546); กานดา (2550) แต่มีผลต่อการยอมรับด้านกลิ่นเนื่องจากการหมักเนื่องจากอาจมีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในถุงสุญญากาศสูงเกินไป (Thompson *et al*., 1997)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved