

บทที่ 2

สาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

1. ปลานวลจันทร์เทศ

1.1 รูปร่างลักษณะของปลานวลจันทร์เทศ

ปลานวลจันทร์เทศ (รูป 2.1) มีชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Cirrhinus mrigala* เป็นปลามีเกล็ด อยู่วงศ์เดียวกับปลาตะเพียนขาว และปลาไน มีรูปร่างป้อม ด้านข้างค่อนข้างแบน ความยาวของส่วนหัวเป็น 1/5 ของความยาวของส่วนตัว ฐานของครีบหลังอยู่ใกล้มาทางจะงอยปากมากกว่าฐานของครีบหาง ขนาดของเกล็ดปานกลาง เกล็ดเส้นข้างตัวมี 40 - 45 เกล็ด ครีบหางเว้าลึก ลำตัวมีสีเงิน ด้านหลังมีสีเทาเข้ม บริเวณครีบออก ครีบท้อง และครีบกันมีสีชมพูอ่อน ตามีสีทอง เพศผู้มีลำตัวเรียวยาว ครีบหุบมีตุ่มเล็กๆ เมื่อใช้มือลูบครีบหูจะรู้สึกสากมือ เมื่อถึงฤดูผสมพันธุ์ช่องเพศมีลักษณะเป็นวงรีเล็ก ถ้าใช้มือบีบช่องท้องใกล้อวัยวะสืบพันธุ์จะมีน้ำสีขาวข้นไหลออกมา ส่วนเพศเมียมีลำตัวอ้วนป้อม ครีบหุบไม่มีสากมือเหมือนตัวผู้ เมื่อถึงฤดูผสมพันธุ์ส่วนท้องจะขยายใหญ่ขึ้นเห็นชัดเจน พื้นท้องนูน ช่องเพศเป็นวงกลมบวม มีสีชมพูอ่อนๆ (อำพล และอารีย์, 2532)



รูป 2.1 ปลานวลจันทร์เทศ

1.2 องค์ประกอบของปลานวลจันทร์เทศ

จากการวิเคราะห์ proximate analysis พบว่าปลานวลจันทร์เทศประกอบไปด้วยน้ำร้อยละ 75.0 - 79.8 โปรตีนร้อยละ 18.1 - 19.6 และไขมันร้อยละ 0.2 - 4.0 (Clucas, 1981)

1.3 แหล่งกำเนิดและการแพร่กระจายสู่ประเทศไทย

ถิ่นกำเนิดดั้งเดิมของปลานวลจันทร์เทศอยู่แถบแคว้นอัสสัมของประเทศอินเดีย ประเทศปากีสถาน บังกลาเทศ และพม่า เป็นปลาชนิดหนึ่งในจำนวน 3 ชนิดจากประเทศอินเดียที่ได้นำเข้ามาในประเทศไทย ได้แก่ ปลายี่สกเทศ ปลานวลจันทร์เทศ และปลากะโท้เทศ ได้มีการนำเข้ามาประเทศไทย 2 ครั้งด้วยกัน ครั้งแรกเมื่อ 28 พฤศจิกายน พ.ศ. 2523 โดย น.ท.สว่าง เจริญผล อธิบดีกรมประมง ได้นำพันธุ์ปลาที่มาจากบังกลาเทศประมาณ 100 ตัว ภายหลังได้นำไปเลี้ยงที่สถานีประมงน้ำจืดจังหวัดเชียงใหม่ เมื่อ 19 มกราคม พ.ศ. 2524 และได้ทำการเพาะขยายพันธุ์โดยผสมเทียมสำเร็จเป็นครั้งแรกเมื่อ 25 พฤษภาคม พ.ศ. 2525 ต่อจากนั้นทางสถานีฯ ได้ปรับปรุงวิธีการเพาะพันธุ์และขยายพันธุ์ไปยังที่อื่นๆ อีก จนเป็นที่รู้จักกันแพร่หลาย

ครั้งที่ 2 เป็นการนำพันธุ์ปลามาจากประเทศลาว โดย ดร. วีอาร์ พันทูลู (Dr. V.R. Pantulu) ผู้เชี่ยวชาญประมงด้านสิ่งแวดล้อมของโครงการพัฒนาแม่น้ำโขงเป็นผู้นำมาจากประเทศอินเดีย และมอบให้สถานีประมงท่าโงน ประเทศลาว ต่อมา มร. เอ็ม วี กุปตา (Mr.M.V. Gupta) ผู้เชี่ยวชาญประมงโครงการพัฒนาแม่น้ำโขงตอนล่างได้เป็นผู้นำเอาปลานวลจันทร์เทศมาจากสถานีประมงท่าโงน ซึ่งเป็นปลาน้ำจืดพ่อแม่พันธุ์แม่พันธุ์หนักประมาณ 700-800 กรัม จำนวน 8 คู่ และลูกปลาจำนวนประมาณ 500 ตัว ไปมอบให้สถานีประมงจังหวัดกาฬสินธุ์เมื่อประมาณเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2525 และได้ทำการเพาะพันธุ์สำเร็จในปีเดียวกัน จากนั้นมีการนำพันธุ์ปลาดังกล่าวไปเพาะเลี้ยงในสถานีประมงอื่นๆ และฟาร์มเอกชนต่างๆ ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และแพร่กระจายลงมายังภาคกลางในปีต่อมา (อำพล และอารีย์, 2532)

จากรายงานประจำปีของกรมประมงเกี่ยวกับผลการผลิตและผลการปล่อยปลานวลจันทร์เทศ ในช่วงปีพ.ศ. 2537 - 2541 ดังตาราง 1.1 และ 1.2 แสดงให้เห็นแนวโน้มว่าปลานวลจันทร์เทศได้รับความนิยมในการเลี้ยงมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องมาจากการขยายพันธุ์ที่ได้ผลดี เจริญเติบโตเร็ว มีอัตราการรอดสูงเมื่อเทียบกับปลานิล ปลาทะเพียนขาว และปลายี่สกเทศ สามารถอาศัยอยู่ได้ทั้งในแม่น้ำ หนอง บึง และอ่างเก็บน้ำ ตลอดจนมีความสามารถปรับตัวเข้ากับธรรมชาติในแหล่งน้ำดังกล่าว หรือในบ่อเลี้ยงและนาข้าวได้ดี (อำพล และอารีย์, 2532)

1.4 ผลิตภัณฑ์จากปลานวลจันทร์เทศ

ปลานวลจันทร์เทศเป็นปลาน้ำจืดที่มีรสชาติอร่อย นำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ปลาได้หลายชนิด เช่น ปลาต้ม ใส่อ้วปลา ปลายอ ลูกชิ้นปลา รวมทั้งปลาหมักแห้ง ปลาหมักแห้งเป็นผลิตภัณฑ์ปลาที่ผ่านการอบแห้งชนิดหนึ่ง วิธีการผลิตปลาหมักแห้งทำได้โดยการหั่นเนื้อปลาให้เป็นเส้นหมักเนื้อปลากับเครื่องปรุงซึ่งประกอบไปด้วย น้ำตาล เกลือ และผงชูรส แล้วนำไปอบให้แห้งเมื่อต้องการบริโภคปลาหมักแห้งอาจนำมาทอด อบ หรือย่าง แล้วรับประทานเป็นอาหารว่างหรือรับประทานเป็นกับข้าวก็ได้ นอกจากนี้ยังสามารถบดปลาหมักแห้งให้ละเอียดแล้วใช้เป็นส่วนผสมในการทำน้ำพริกต่างๆ ได้อีกด้วย เนื่องจากปลาหมักแห้งมีลักษณะเป็นเส้นๆ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกชื่อว่าปลาเส้น

2. การทำแห้ง

การทำแห้ง คือ การลดความชื้นของอาหารลงจนถึงระดับที่สามารถลดการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ได้ ซึ่งส่งผลให้เก็บอาหารไว้ได้นาน อาหารแห้งแต่ละชนิดจะมีความชื้นในระดับที่ปลอดภัยไม่เท่ากัน เช่น ผลไม้แช่แข็งเก็บได้ที่มีความชื้นร้อยละ 15-20 แต่ถ้าเป็นเมล็ดธัญพืชถ้าหากเก็บที่ความชื้นนี้จะเกิดเชื้อราได้ การทำแห้งเป็นวิธีการถนอมอาหารที่มนุษย์ค้นเคยมาแต่โบราณ เช่น การตากเมล็ดพืชพันธุ์สำหรับฤดูกาลหน้า ตากเนื้อสัตว์ ผัก ผลไม้และธัญพืชที่เหลือกินไว้เป็นอาหาร เช่น เนื้อเค็ม ปลาเค็ม กล้วยตาก ข้าวเปลือก เป็นต้น (สุคนธ์ชื่น, 2539)

ในการทำแห้งจะต้องมีการให้พลังงานแก่อาหาร เพื่อให้ให้น้ำในอาหารเปลี่ยนสถานะเป็นไอแล้วเคลื่อนย้ายออกจากอาหาร ถ้าใช้พลังงานจากแสงแดดจะเรียกว่า การตากแห้ง ถ้าใช้พลังงานความร้อนจากไฟฟ้า ก๊าซ หรือไอน้ำในเครื่องอบแห้งจะเรียกว่า การอบแห้ง รวมเรียกทั้งสองวิธีว่าการทำแห้ง (สุคนธ์ชื่น, 2539) การทำแห้งปลาด้วยการตากแห้งเป็นวิธีดั้งเดิมที่สุดและยังคงทำกันอยู่ในปัจจุบันเพราะมีค่าใช้จ่ายต่ำ แต่การตากแห้งมีข้อด้อยคือพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ให้อุณหภูมิไม่สูงนักและกระแสน้ำธรรมชาติไม่แรงพอทำให้การตากแห้งต้องใช้เวลาานาน ใช้พื้นที่มากและมักทำในที่เปิดโล่งเมื่อปลาจึงมีโอกาสนเปื้อนจากฝุ่นผง แมลง หนู และสิ่งปฏิกูลจากนก เป็นต้น (Potter and Hotchkiss, 1995) ดังนั้นจึงมีการพัฒนาเครื่องอบแห้งขึ้นมาใช้ ข้อดีของการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งคือทำให้สามารถควบคุมพลังงานความร้อนและอุณหภูมิของกระแสลมได้ พร้อมทั้งมีอุปกรณ์ เช่น พัดลม ช่วยในการเคลื่อนย้ายไอน้ำออกจากผิวอาหาร ทำให้การถ่ายเทความร้อนและมวลสารเกิดได้เร็ว อาหารจึงแห้งเร็วขึ้น การให้กระแสลมร้อนเคลื่อนที่ผ่านอาหาร กระแสลมร้อนจะทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่อาหารและเคลื่อนย้ายไอน้ำออกจากผิวอาหาร การถ่ายเทความร้อนแบบนี้เป็นแบบการพาความร้อน (สุคนธ์ชื่น, 2539)

2.1 การเคลื่อนที่ของน้ำภายในอาหารระหว่างการอบแห้ง

ในระหว่างการอบแห้งอาหารนั้นจะมีการเคลื่อนที่ของน้ำที่อยู่ภายในชั้นอาหารมาที่ผิวของอาหารแล้วจึงระเหยกลายเป็นไอ เคลื่อนย้ายออกไปกับกระแสลม การเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในชั้นอาหารออกมาที่ผิวอาหารเมื่อได้รับพลังงานความร้อน มี 2 วิธีคือ

1. การเคลื่อนที่ด้วยแรงผ่านช่องแคบ (capillary force)

เป็นการเคลื่อนที่ในอาหารที่มีเซลล์โปร่งมีช่องว่างระหว่างเซลล์ต่อเนื่องกันเป็นทางแคบๆ เกิดเป็นแรงดันของน้ำขึ้นมาตามท่อ การเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นได้สะดวกรวดเร็ว แต่จะหยุดเมื่อน้ำในทางแคบๆ นั้นขาดตอนลง

2. การเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ (diffusion) ผ่านเซลล์

เป็นการเคลื่อนที่ในอาหารที่มีเนื้อแน่น ไม่มีช่องว่างระหว่างเซลล์ที่ต่อเนื่องเป็นทางแคบๆ หรือเกิดในอาหารที่อบแห้งไประยะหนึ่งซึ่งแรงผ่านช่องแคบหมดไปแล้ว น้ำจะต้องแพร่ผ่านเซลล์จึงเคลื่อนที่ได้ช้า (สุคนธ์ชื่น, 2539)

2.2 อัตราการทำแห้ง

อัตราการทำแห้งคือ การสูญเสียน้ำต่อหนึ่งหน่วยเวลา ลักษณะการเคลื่อนที่ของน้ำในอาหารมีผลต่ออัตราการทำแห้ง กราฟการทำแห้งอาหารสามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วงตามอัตราการทำแห้งที่เกิดขึ้นดังนี้

1. ช่วงอัตราการทำแห้งคงที่ (constant rate period)

ในระหว่างการอบแห้งถ้าอาหารมีลักษณะเนื้อที่โปรงการเคลื่อนที่ของน้ำจะเป็นแบบการไหลผ่านช่องแคบ (capillary flow) ทำให้น้ำที่อยู่ภายในอาหารเคลื่อนที่มาที่ผิวอาหารได้เร็วกว่าการระเหยกลายเป็นไอทันที จึงทำให้ผิวอาหารเปียกชุ่มด้วยน้ำ การระเหยของน้ำจึงเกิดขึ้นอย่างอิสระด้วยอัตราเร็วคงที่จึงเรียกการทำแห้งช่วงนี้ว่า ช่วงอัตราการทำแห้งคงที่ ดังรูป 2.2

2. ช่วงอัตราการทำแห้งลดลง (falling rate period)

เมื่อการเคลื่อนที่ของน้ำแบบการไหลผ่านช่องแคบหมดไป น้ำต้องเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ซึ่งช้าลงมากจนน้ำเคลื่อนที่มาที่ผิวอาหารไม่เพียงพอผิวอาหารจึงแห้ง การระเหยเกิดขึ้นได้ช้าลงทำให้อัตราการทำแห้งลดลงจึงเรียกการทำแห้งช่วงนี้ว่า ช่วงอัตราการทำแห้งลดลง (สุคนธ์ชิน, 2539) ดังรูป 2.2

ในกรณีการทำแห้งในเนื้อปลาที่มีลักษณะเนื้อแน่นการเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในชั้นปลาที่ผิวชั้นปลาจะช้ามาก เพราะน้ำจะเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ผ่านเซลล์ ทำให้กราฟการทำแห้งมีเฉพาะช่วงอัตราการทำแห้งลดลงเท่านั้น ดังรูป 2.3 ซึ่งเป็นกราฟของการอบแห้งชั้นปลาค็อด (cod filets) ที่อุณหภูมิ 30 และ 60 องศาเซลเซียส (Horner, 1997)

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำแห้ง

การทำแห้ง คือการเคลื่อนย้ายน้ำออกจากอาหาร ดังนั้นปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเคลื่อนย้ายน้ำจึงมีผลต่ออัตราเร็วการทำแห้ง ดังนี้

1. ธรรมชาติของอาหาร

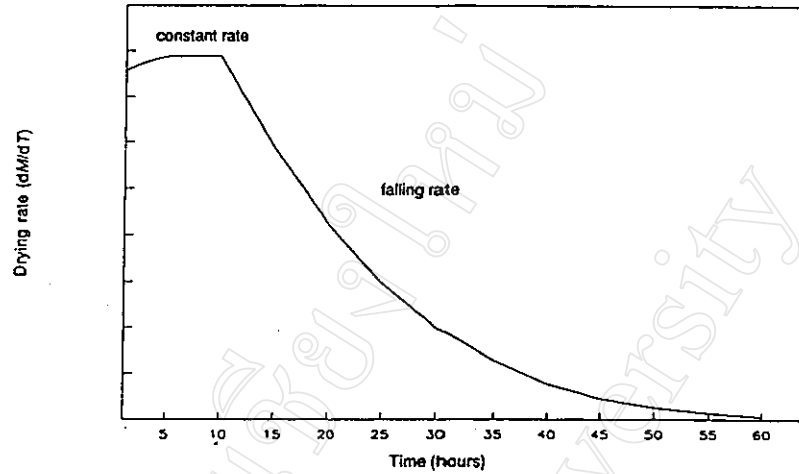
อาหารที่มีลักษณะเนื้อที่โปรงมีการเคลื่อนที่ของน้ำภายในอาหารแบบผ่านช่องแคบเร็วกว่าการแพร่ในอาหารที่มีลักษณะเนื้อแน่น ดังนั้นอาหารกลุ่มแรกจึงแห้งเร็วกว่ากลุ่มหลัง อาหารที่มีน้ำตาลสูงจะเหนียวเหนอะหนะซึ่งเป็นปัจจัยที่กีดขวางการเคลื่อนที่ของน้ำทำให้การทำแห้งช้า อาหารที่มีการลวก นวดคลึง ทำให้เซลล์แตกจะแห้งได้เร็วขึ้น

2. ขนาดและรูปร่าง

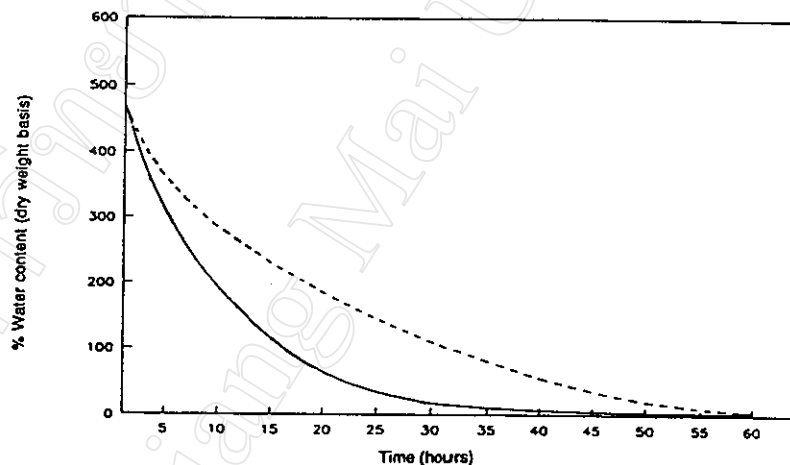
ขนาดและรูปร่างมีผลต่อพื้นที่ผิวต่อน้ำหนัก เช่น อาหารที่มีรูปร่างเหมือนกันถ้ามีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักมากกว่าขนาดใหญ่จึงแห้งได้เร็วกว่า ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับอากาศที่จะเกิดการเคลื่อนย้ายไอน้ำออกไปได้ด้วย ถ้าชิ้นเล็กมากทั้บถมกันการระเหยเกิดได้เฉพาะที่ผิวสัมผัสกับอากาศจึงเกิดได้ช้าทั้งๆ ที่พื้นที่ผิวต่อน้ำหนักมีมาก

3. ตำแหน่งของอาหารในเครื่องอบแห้ง

น้ำในอาหารที่สัมผัสกับลมร้อนได้ดีกว่า หรือสัมผัสกับลมร้อนที่มีความชื้นต่ำย่อมระเหยได้ดีกว่า



รูป 2.2 กราฟการอบแห้งแบบอุณหภูมิต่ำ
ที่มา : Horner (1997)



รูป 2.3 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อการสูญเสียความชื้นของชั้นปลาคอด (*Gadus morhua*)
ความเร็วของอากาศ 1 เมตรวินาที : เส้นทึบ คืออบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
เส้นประ คืออบแห้งที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส
ที่มา : Horner (1997)

4. ปริมาณอาหารต่อถาด

ถ้าปริมาณอาหารต่อถาดมากเกินไป อาหารส่วนล่างไม่ได้สัมผัสกับอากาศร้อน หรือได้รับความร้อนจากถาดแล้ว แต่ไอน้ำไม่สามารถแพร่กระจายผ่านชั้นอาหารตอนบนออกมาได้ จึงแห้งช้า

5. ความสามารถในการรับไอน้ำของอากาศร้อน

อากาศร้อนที่มีไอน้ำอยู่มากแล้วจะรับไอน้ำได้น้อยกว่าอากาศร้อนที่มีไอน้ำอยู่น้อย

6. อุณหภูมิของอากาศร้อน

ถ้าอากาศมีความชื้นคงที่ การเพิ่มอุณหภูมิของอากาศร้อนเป็นการเพิ่มความสามารถในการรับไอน้ำ และอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้การแพร่กระจายของน้ำในอาหารดีขึ้นด้วย

7. ความเร็วของอากาศร้อน

อากาศร้อนทำหน้าที่ในการเคลื่อนย้ายไอน้ำออกไปด้วย ดังนั้นเมื่อความเร็วอากาศร้อนเพิ่มขึ้นการเคลื่อนย้ายไอน้ำก็จะเกิดขึ้นได้ดี การเคลื่อนย้ายไอน้ำเกิดขึ้นเต็มที่ที่ความเร็วลม 244 เมตร/นาที นอกจากนั้นความเร็วของอากาศร้อนยังทำให้เกิดกระแสปั่นป่วนของอากาศในเครื่องอบแห้งอากาศจึงสัมผัสอาหารได้ดีขึ้น

2.4 การเปลี่ยนแปลงของอาหารเนื่องจากการอบแห้ง

การอบแห้งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอาหารมากหรือน้อยขึ้นกับธรรมชาติของอาหารและสภาวะที่ใช้ในการอบแห้ง ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงหลายประการคือ

1. การหดตัว

การเสียน้ำทำให้เซลล์อาหารหดตัวจากผิวนอก ส่วนที่แข็งจะคงสภาพได้ ส่วนที่อ่อนกว่าจะเว้าลงไป อาหารที่มีน้ำมากจะหดตัวบิดเบี้ยวมาก การทำแห้งอย่างรวดเร็วจะทำให้อาหารเกิดการหดตัวน้อยกว่าการทำแห้งอย่างช้าๆ

2. การเปลี่ยนสี

อาหารที่ผ่านการทำแห้งมักมีสีเข้มขึ้นเนื่องจากความร้อนหรือปฏิกิริยาเคมีที่เกิดสีน้ำตาล อุณหภูมิและเวลาที่อาหารมีความชื้นร้อยละ 10 - 20 มีผลต่อความเข้มของสี จึงควรหลีกเลี่ยงอุณหภูมิสูงในช่วงความชื้นดังกล่าวนี้

3. การเกิดเปลือกแข็ง

เป็นลักษณะที่ผิวอาหารแข็งเป็นเปลือกหุ้มส่วนในเอาไว้ซึ่งส่วนในนั้นยังไม่แห้ง การเกิดลักษณะเช่นนี้เนื่องจากในช่วงแรกมีการระเหยน้ำเร็วเกินไป น้ำจากด้านในเคลื่อนที่มาที่ผิวไม่ทันหรืออาจมีสารละลายของน้ำตาล โปรตีนเคลื่อนมาที่ผิวและเกิดการแข็งตัว เหตุการณ์เช่นนี้สามารถหลีกเลี่ยงได้โดยไม่ให้อุณหภูมิสูงและควรปรับอบอากาศให้มีความชื้นสูงเพื่อไม่ให้ผิวอาหารแห้งก่อนเวลาอันสมควร

4. การเสียความสามารถในการคืนสภาพ

อาหารแห้งบางชนิดต้องนำมาคืนสภาพ แต่การคืนสภาพโดยการเติมน้ำจะไม่ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเหมือนเดิมเพราะเซลล์อาหารเสียความยืดหยุ่นของผนังเซลล์ โปรตีนสูญเสียความสามารถในการดูดน้ำ

5. การสูญเสียคุณค่าทางอาหารและสารระเหย

เกิดการเสื่อมสลายของวิตามินซีและแคโรทีนจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไรโบฟลาวินจากแสง และไทอะมีนจากความร้อน ยิ่งถ้าใช้เวลาทำแห้งนานการสูญเสียก็ยิ่งมาก โปรตีนมีการสูญเสียบางส่วนเนื่องจากความร้อนเช่นเดียวกัน การสูญเสียสารระเหยเนื่องจากความร้อนส่งผลให้กลิ่นของอาหารแห้งลดลงหรือแตกต่างไปจากเดิม (สุคนธ์ชื่น, 2539)

3. ค่าน้ำที่เป็นประโยชน์และอาหารกึ่งแห้ง

ค่าน้ำที่เป็นประโยชน์ (a_w) คือ อัตราส่วนของความดันไอของสารละลาย (P) ต่อความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิเดียวกัน (P_0) เป็นการประมาณปริมาณน้ำอิสระที่อยู่ในอาหารนั้นโดยไม่รวมถึงปริมาณน้ำที่อาหารดูดยึดไว้ (ไพโรจน์, 2539; Troller and Christian, 1978)

$$a_w = \frac{P}{P_0}$$

โดยทั่วไปอาหารที่มีค่าน้ำที่เป็นประโยชน์ต่ำกว่า 0.70 จะปลอดภัยจากเชื้อจุลินทรีย์ มีอายุการเก็บที่ยาวนาน (สุคนธ์ชื่น, 2539) แต่อาหารที่มีปริมาณน้ำต่ำเกินไปจะกรอบ เปราะแตกหักง่าย ขนาดเปลี่ยนไป คุณค่าทางอาหารลดลงและเมื่อทำให้คืนรูปจะไม่คืนสู่สภาพเดิม ปัจจุบันแทนที่จะพยายามทำให้ผลิตภัณฑ์คงทนโดยการระเหยน้ำออกให้มากด้วยการทำแห้ง ก็ได้มีการปรับปรุงเทคโนโลยีให้ดีขึ้นโดยพยายามระเหยน้ำออกจำนวนหนึ่งในปริมาณที่ทำให้จุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเสื่อมเสียไม่สามารถเจริญเติบโตได้ และมีการนำสารที่เรียกว่า humectant มาใช้ในอาหารเพื่อเป็นการลดปริมาณน้ำในอาหาร วิธีการดังกล่าวทำให้ได้ประเภทของอาหารที่แตกต่างกัน อาหารจะมีคุณภาพดีและเก็บรักษาได้นานขึ้น อาหารประเภทนี้เรียกว่า อาหารกึ่งแห้ง (ไพโรจน์, 2539)

อาหารกึ่งแห้งคือ อาหารที่มีค่าน้ำที่เป็นประโยชน์อยู่ในช่วง 0.65 - 0.85 มีความชื้นประมาณร้อยละ 15 - 30 ตัวอย่างของอาหารกึ่งแห้งที่พบได้ทั่วไป ไปเช่น กุนเชียง เนยแข็งบ่ม แยมแห้ง แยม เค้กผลไม้ ผลไม้แห้ง และลูกกวาด ค่าน้ำที่เป็นประโยชน์ของอาหารเหล่านี้แสดงในตาราง 2.1 อาหารกึ่งแห้งจะมีอายุการเก็บรักษานานกว่าอาหารทั่วไป เพราะอาหารกึ่งแห้งมีค่าน้ำที่เป็นประโยชน์ลดลงจนถึงระดับที่จุลินทรีย์ส่วนใหญ่โดยเฉพาะจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค (pathogenic microorganism) ไม่สามารถเจริญได้ อาหารกึ่งแห้งยังคงมีปริมาณน้ำจำนวนหนึ่งจึงทำให้ลักษณะเนื้อสัมผัสอาหารยังคงเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค (ไพโรจน์, 2539; Robson, 1967)

ตาราง 2.1 ค่าน้ำที่เป็นประโยชน์ในอาหารกึ่งแห้งบางชนิด

ประเภทอาหารกึ่งแห้ง	ค่าน้ำที่เป็นประโยชน์
กุนเชียง	0.82-0.85
ไส้กรอกประเภท landjager	0.79
ผลไม้แห้ง	0.72 - 0.80
แยมและเยลลี่	0.82 - 0.94
น้ำผึ้ง	0.75
ไส้ที่ใช้กับ pastries	0.65 - 0.71

ที่มา: ไพโรจน์ (2539)

4. การเปลี่ยนแปลงของอาหารกึ่งแห้งในระหว่างการเก็บรักษา

ความทนทานของอาหารกึ่งแห้งในระหว่างการเก็บรักษาเป็นสิ่งสำคัญและเป็นปัจจัยหลักที่ต้องคำนึงถึงก่อนที่อาหารกึ่งแห้งจะถึงมือผู้บริโภค ผู้ผลิตอาหารกึ่งแห้งจึงควรเข้าใจการเปลี่ยนแปลงของอาหารกึ่งแห้งทั้งจากจุลินทรีย์และจากปฏิกิริยาเคมีต่างๆ

4.1 การเปลี่ยนแปลงของอาหารกึ่งแห้งเนื่องมาจากเชื้อจุลินทรีย์

ค่าน้ำที่เป็นประโยชน์ของอาหารเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ ความสามารถในการสร้างสารพิษและความคงทนของจุลินทรีย์ โดยทั่วไปจุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตได้ดีที่สุดในอาหารที่มีค่าน้ำที่เป็นประโยชน์ในระดับที่เหมาะสม การเจริญเติบโตจะลดลงเมื่อปริมาณน้ำที่เป็นประโยชน์ลดลง จนกระทั่งถึงช่วงหนึ่งที่จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ ช่วงที่มีปริมาณน้ำน้อยที่สุดที่จุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตได้เรียกว่า minimal water activity เชื้อจุลินทรีย์ส่วนใหญ่มักจะเจริญเติบโตในอาหารที่มีค่าน้ำที่เป็นประโยชน์สูง มีจุลินทรีย์เพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่สามารถเจริญเติบโตในอาหารที่มีค่าน้ำที่เป็นประโยชน์ต่ำ ดังนั้นหากค่าน้ำที่เป็นประโยชน์ลดลงจะมีจุลินทรีย์ทั่วไปจำนวนน้อยที่สามารถเจริญเติบโตได้

การยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ไม่ต้องการในอาหารกึ่งแห้งไม่เพียงแต่ใช้วิธีการลดค่าน้ำที่เป็นประโยชน์จนถึงระดับที่ไม่เหมาะสมแก่การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เท่านั้น แต่ยังขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ อีกด้วย เช่น อิทธิพลของอุณหภูมิ สารกันเสีย พวก competitive microflora redox potential และ pH ถ้าหากปรับค่าต่างๆ เพื่อให้มีสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตก็สามารถลดปริมาณจุลินทรีย์ลงได้เช่นกัน

4.1.1 การเปลี่ยนแปลงของอาหารกึ่งแห้งเนื่องมาจากแบคทีเรีย

จากตาราง 2.2 จะเห็นว่าถ้าหากลดค่าน้ำที่เป็นประโยชน์ให้น้อยกว่า 0.95 จะสามารถยับยั้งแบคทีเรียแกรมลบ (gram-negative bacteria) และแบคทีเรียที่สร้างสปอร์ (spore-forming bacteria) ได้ เช่น *Bacillus* และ *Clostridium* เป็นต้น และยังสามารถยับยั้งการงอกของสปอร์ของแบคทีเรียเหล่านี้ด้วย

แบคทีเรียแกรมบวก (gram-positive bacteria) บางชนิดเช่น *Lactobacillus*, *Pediococcus* หรือ *Micrococcus* มีความทนทานต่อค่าน้ำที่เป็นประโยชน์ที่น้อยกว่า 0.95 ได้ แต่ถูกยับยั้งที่ค่าน้ำที่เป็นประโยชน์น้อยกว่า 0.90

แบคทีเรียที่ทำให้อาหารเป็นพิษ (food poisoning bacteria) เช่น *Shigella* จะถูกยับยั้งการเจริญเติบโตที่ค่าน้ำที่เป็นประโยชน์ต่ำกว่า 0.96 ส่วนแบคทีเรียแกรมลบที่มีรูปร่างเป็นแท่งเช่น *Salmonella*, *Escherichia coli* และ *Vibrio parahaemolyticus* สามารถยับยั้งได้ที่ค่าน้ำที่เป็นประโยชน์น้อยกว่า 0.95 แต่ก็มีบางสายพันธุ์ของ *V. parahaemolyticus* จะถูกยับยั้งที่ค่าน้ำที่เป็นประโยชน์น้อยกว่า 0.94 เช่นกัน

การเจริญเติบโตและการสร้างสารพิษของ *Clostridium botulinum* type C จะถูกยับยั้งที่ค่าน้ำที่เป็นประโยชน์น้อยกว่า 0.98 และ type E ถูกยับยั้งที่ค่าน้ำที่เป็นประโยชน์

ตาราง 2.2 ค่าน้ำที่เป็นประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย เชื้อรา และเชื้อยีสต์

a_w	Bacteria	Yeasts	Molds
0.98	<i>Clostridium</i> (1), <i>Pseudomonas</i> ^a	—	—
0.97	<i>Clostridium</i> (2)	—	—
0.96	<i>Flavobacterium</i> , <i>Klebsiella</i> , <i>Lactobacillus</i> , ^a <i>Proteus</i> , ^a <i>Pseudomonas</i> , ^a <i>Shigella</i>	—	—
0.95	<i>Alcaligenes</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Citrobacter</i> , <i>Clostridium</i> (3), <i>Enterobacter</i> , <i>Escherichia</i> , <i>Proteus</i> , <i>Pseudomonas</i> , <i>Salmonella</i> , <i>Serratia</i> , <i>Vibrio</i>	—	—
0.94	<i>Lactobacillus</i> , <i>Microbacterium</i> , <i>Pediococcus</i> , <i>Streptococcus</i> , ^a <i>Vibrio</i> ^a	—	—
0.93	<i>Lactobacillus</i> , ^a <i>Streptococcus</i>	—	<i>Rhizopus</i> , <i>Mucor</i>
0.92	—	<i>Rhodotorula</i> , <i>Pichia</i>	—
0.91	<i>Corynebacterium</i> , <i>Staphylococcus</i> (4), <i>Streptococcus</i> ^a	—	—
0.90	<i>Lactobacillus</i> , ^a <i>Micrococcus</i> , <i>Pediococcus</i> , <i>Vibrio</i> ^a	<i>Hansenula</i> , <i>Saccharomyces</i>	—
0.88	—	<i>Candida</i> , <i>Debaryomyces</i> , <i>Hanseniaspora</i> , <i>Torulopsis</i>	<i>Cladosporium</i>
0.87	—	<i>Debaryomyces</i> ^a	—
0.86	<i>Staphylococcus</i> (5)	—	<i>Paecilomyces</i>
0.80	—	<i>Saccharomyces</i> ^a	<i>Aspergillus</i> , <i>Penicillium</i> , <i>Emericella</i> , <i>Eremascus</i>
0.75	Halophilic bacteria	—	<i>Aspergillus</i> ^a <i>Wallemia</i>
0.70	—	—	<i>Eurotium</i> , <i>Chrysosporium</i>
0.62	—	<i>Saccharomyces</i> ^a	<i>Eurotium</i> , ^a <i>Monascus</i>

^a Some strains; (1) = *Clostridium botulinum* type C; (2) = *Cl. botulinum* type B and some strains of *Cl. perfringens*; (3) = *Cl. botulinum* type A and B and *Cl. perfringens*; (4) = anaerobic; (5) = aerobic.

ที่มา: Leistner and Rodel (1976)

น้อยกว่า 0.97 ส่วน type A และ type B และ *Cl. perfringens* ถูกยับยั้งที่ค่าน้ำที่เป็นประโยชน์น้อยกว่า 0.95 อย่างไรก็ตามควรมีการคำนึงถึงการเสื่อมเสียของอาหารกึ่งแห้งเนื่องจาก *Clostridium* และการสร้างสารพิษของจุลินทรีย์ชนิดนี้ซึ่งถ้ามีการเก็บอาหารกึ่งแห้งในสภาพที่อากาศผ่านเข้าออกไม่ได้

แบคทีเรียที่ทำให้อาหารเป็นพิษที่สามารถทนทานต่อค่าน้ำที่เป็นประโยชน์ต่างๆ และมีความสำคัญมาก คือ *Staphylococcus aureus* บางสายพันธุ์สามารถผลิต enterotoxin ได้ ซึ่งแบ่งออกเป็น enterotoxin A, B, C₁, C₂, D, E และ F การแบ่งกระทำตามปฏิกิริยาระหว่าง

สารพิษกับ specific antibodies มีรายงานเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของการเจริญเติบโตของ *S. aureus* กับการผลิต enterotoxin ที่ค่าน้ำที่เป็นประโยชน์ต่างๆ ว่าการผลิต enterotoxin B และ C จะเกิดขึ้นที่ค่าน้ำที่เป็นประโยชน์ 0.94 ส่วน enterotoxin A สามารถถูกสร้างได้ที่ค่าน้ำที่เป็นประโยชน์น้อยกว่า 0.90 การเจริญเติบโตของ *S. aureus* มีสองสภาวะ คือ สภาวะที่ไม่ต้องการอากาศและต้องการอากาศ ถ้าหากไม่ต้องการอากาศจะถูกยับยั้งที่ค่าน้ำที่เป็นประโยชน์น้อยกว่า 0.91 และถ้าหากในสภาวะที่ต้องการอากาศจะถูกยับยั้งที่ค่าน้ำที่เป็นประโยชน์น้อยกว่า 0.86 ดังนั้นในอาหารกึ่งแห้งที่มีค่าน้ำที่เป็นประโยชน์น้อยกว่า 0.86 จึงไม่มีปัญหาในเรื่องนี้ เช่นเดียวกับรายงานของ Scott ซึ่งได้ศึกษาการเจริญเติบโตของเชื้อ *S. aureus* 14 สายพันธุ์ ทั้งในอาหารเลี้ยงเชื้อและอาหารบริโภคนของมนุษย์ พบว่าการเจริญเติบโตจะถูกยับยั้งที่ค่าน้ำที่เป็นประโยชน์น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.86 โดยไม่พบความแตกต่างระหว่างสายพันธุ์เลย ดังนั้นในอาหารกึ่งแห้งซึ่งมีค่าน้ำที่เป็นประโยชน์เท่ากับ 0.85 หรือต่ำกว่า จึงไม่น่าที่จะมีการเพิ่มของ *S. aureus*

อย่างไรก็ตามมีรายงานเกี่ยวกับการศึกษาเซลล์ของเชื้อ *S. aureus* ที่พิจารณาว่าเมื่อมีการเติมตัวถูกละลายประเภทเกลือแกลลงในอาหารจะส่งผลให้สามารถลดจำนวน *S. aureus* ได้ เพราะว่าเกลือจะไปดึงน้ำออกจากเซลล์ทำให้เซลล์เหี่ยว การทำงานของเซลล์จะหยุดชะงัก แต่หลังจากที่เซลล์เมมเบรนถูกฉีกขาดหรือเหี่ยวเนื่องจากเกลือดังกล่าว ถ้าหากสภาวะเหมาะสมจากการเก็บอาหารไว้นานๆ และมีอากาศกับความชื้นเกิดขึ้นในช่วงหลังของการเก็บรักษา จะทำให้จุลินทรีย์ที่พิการตอนแรกสามารถเจริญเติบโตได้ ดังนั้นจุลินทรีย์ที่ได้รับบาดเจ็บจึงมีความสำคัญในแง่การเกิดการเสื่อมเสียในช่วงหลังของการเก็บรักษา ซึ่งเป็นข้อควรคำนึงอย่างมากของผู้ผลิตอาหารกึ่งแห้ง

ส่วนเชื้อ *Salmonella* ก็มีความสำคัญต่ออาหารกึ่งแห้งในกรณีที่มักพบเชื้อนี้ในส่วนประกอบที่ใช้ในสูตรการผลิตอาหารกึ่งแห้ง เพราะเชื้อนี้ทนต่อความร้อนในระหว่างการผลิตอาหาร ทำให้อาจมีปัญหาของการเสื่อมเสียเนื่องจากเชื้อดังกล่าว (ไพโรจน์, 2539; Leistner and Rodel, 1976)

4.1.2 การเปลี่ยนแปลงของอาหารกึ่งแห้งเนื่องจากเชื้อรา

อาหารที่มีค่าน้ำที่เป็นประโยชน์มากกว่า 0.90 โดยทั่วไปมักจะเกิดการเสื่อมเสียเนื่องมาจากจุลินทรีย์ประเภทแบคทีเรียมากกว่าที่จะเสื่อมเสียเนื่องจากเชื้อยีสต์และเชื้อรา แต่ถ้าหากค่าน้ำที่เป็นประโยชน์ของอาหารลดลงต่ำกว่าระดับนี้ เชื้อรามีแนวโน้มต่อการเสื่อมเสียของอาหารกึ่งแห้งมากในระหว่างการเก็บรักษา เชื้อราที่สามารถเจริญได้ในอาหารกึ่งแห้งได้แก่ *Cladosporium*, *Paecilomyces*, *Penicillium*, *Aspergillus*, *Emericella*, *Eremascus*, *Wallemia*, *Eurotium*, *Chrysosporium* และ *Monascus* นอกจากนั้นเชื้อรายังสามารถสร้างสารพิษได้อีกด้วย (Leistner and Rodel, 1976)

• ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของเชื้อราในอาหารกึ่งแห้ง

1. ความชื้นสัมพัทธ์

ปัจจัยที่สำคัญที่สุดเกี่ยวกับการเจริญเติบโตของเชื้อราคือ ความชื้นสัมพัทธ์ในบรรยากาศสิ่งแวดล้อมรอบๆ อาหาร อาหารกึ่งแห้งที่ถูกเก็บรักษาในภาชนะบรรจุที่อากาศผ่านเข้าออกได้มักจะเกิดปัญหานี้ หรือถ้าเก็บอาหารกึ่งแห้งในที่ที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่าอาหาร อาหารก็

จะลดความชื้นจากอากาศได้ทำให้อาหารมีความชื้นเพิ่ม เชื้อราก็สามารถเจริญเติบโตได้ วิธีการที่ถูกต้องก็คือต้องใช้ภาชนะบรรจุที่มีให้อากาศผ่านเข้าออกได้เพื่อป้องกันการเจริญเติบโตของเชื้อรา ดังนั้นปริมาณความชื้นที่สูญเสียในระหว่างการเก็บรักษาจะมีผลต่อความชื้นสัมพัทธ์ของผลิตภัณฑ์ ซึ่งขึ้นกับปัจจัยต่างๆ คือ ภาชนะบรรจุอาหารหรือผลิตภัณฑ์นั้นๆ ความแตกต่างระหว่างบรรยากาศภายในและภายนอกภาชนะบรรจุ อุณหภูมิที่ทำการเก็บรักษา และวิธีบรรจุ

2. อุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บรักษา

ถ้าอุณหภูมิในการเก็บรักษาลดลงอาหารกึ่งแห้งจะมีอายุการเก็บเพิ่มขึ้น

3. จำนวนเชื้อราที่ปนมาในอาหาร

จำนวนเชื้อราในอาหารเริ่มต้นเป็นปัจจัยสำคัญต่ออายุการเก็บของอาหาร กล่าวคืออาหารที่มีเชื้อราปนเปื้อนมากย่อมมีอายุการเก็บน้อยกว่าอาหารที่มีเชื้อราปนเปื้อนน้อย

4. ปัจจัยอื่นๆ

ปัจจัยอื่นๆ ที่มีผล คือ pH คุณค่าทางอาหารของผลิตภัณฑ์ และ redox potential ของผลิตภัณฑ์ เป็นต้น และที่สำคัญคือในอาหารกึ่งแห้งที่มีน้ำตาลสูง จะมีสารชนิดหนึ่งที่ยับยั้งเชื้อราตามธรรมชาติได้คือ hydromethyl furfural จากปฏิกิริยา caramelization (ไพโรจน์, 2539; Seiler, 1976)

• แนวโน้มการเกิดสารพิษจากเชื้อราในอาหารกึ่งแห้ง

ปัจจุบันมีเชื้อราประมาณ 200 สายพันธุ์ที่สามารถสร้างสารพิษได้แม้ว่าบางสายพันธุ์จะไม่ก่อให้เกิดความเป็นพิษก็ตาม บางสายพันธุ์จะเป็น hydrophilic fungi แต่ส่วนใหญ่จะเป็น mesoxerophilic fungi หรือ xerophilic fungi ซึ่งสามารถจะเจริญในสภาพที่มีค่าน้ำที่เป็นประโยชน์ต่ำ การควบคุมการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เหล่านี้ขึ้นกับความสัมพัทธ์ระหว่างค่าน้ำที่เป็นประโยชน์กับคุณสมบัติทางเคมี กายภาพ และชีววิทยาของสภาพสิ่งแวดล้อมต่างๆ การสร้างสารพิษจะมีมากเมื่อสภาพสิ่งแวดล้อมมีความเหมาะสม

ในอาหารกึ่งแห้งส่วนใหญ่จะมีความคงทนต่อจุลินทรีย์มากกว่าอาหารสด เพราะอาหารกึ่งแห้งมีค่าน้ำที่เป็นประโยชน์น้อย แต่บางทีจุลินทรีย์ที่สามารถทนต่อสภาพที่มีค่าน้ำที่เป็นประโยชน์ต่ำก็สามารถเจริญและทำให้อาหารเสื่อมเสียได้ โดยเฉพาะพวก osmophilic yeast และพวก xerophilic microfungi นอกจากนั้นถ้าสภาพสิ่งแวดล้อมเหมาะสมต่อการสร้างสารพิษ เชื้อเหล่านี้ก็จะสร้างสารพิษขึ้นซึ่งมีโทษต่อชีวิตของมนุษย์ เช่น aflatoxin , ochratoxin , T-2 toxin , fusarium-X และ zearalenone (F-2 toxin) เป็นต้น สารพิษดังกล่าวแม้ว่าจะทดลองแล้วพบว่ามียับยั้งต่อสัตว์ทดลองแต่ก็ยังไม่แน่ใจว่าจะเกิดกับมนุษย์รุนแรงมากหรือน้อยเพียงไร ปัจจุบันนี้ก็มีการศึกษามากมายเพื่อให้เกิดความแน่ใจว่าโรคบางอย่างที่เกิดขึ้นกับมนุษย์มีสาเหตุจากสารพิษจากเชื้อรา

อาหารจำพวกกึ่งแห้งมีแนวโน้มของการเสื่อมเสียเนื่องมาจากเชื้อรามาก ดังนั้นจึงควรคำนึงอย่างมากเกี่ยวกับพิษที่เกิดจากการที่เชื้อราสร้างขึ้น เพราะสารพิษจากเชื้อรา ก่อให้เกิดปัญหาค่อนข้างมากต่อการพัฒนาอาหารกึ่งแห้ง ซึ่งสารพิษที่เกิดอาจปนมากับอาหารก็ได้ แต่บางครั้งอาจเกิดจากในอาหารมีเชื้อราและมีการสร้างพิษขึ้นมาภายหลังถ้ามีการเก็บรักษาในสภาพสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการสร้างสารพิษ (ไพโรจน์, 2539; Jarvis, 1976)

4.1.3 การเปลี่ยนแปลงของอาหารกึ่งแห้งเนื่องมาจากเชื้อยีสต์

อาหารกึ่งแห้งมีค่าน้ำที่เป็นประโยชน์ประมาณ 0.60 - 0.85 ที่ค่าน้ำที่เป็นประโยชน์นี้สามารถยับยั้งเชื้อยีสต์ส่วนใหญ่ได้ แต่เชื้อยีสต์บางสายพันธุ์มีความทนทานต่อค่าน้ำที่เป็นประโยชน์ต่ำได้ เรียกยีสต์พวกนี้ว่า osmophilic yeast เช่น *Saccharomyces rouxii*, *S. baillii* var. *osmophilus*, *S. bisporus* var. *mellis*, *Torulopsis candida*, *Schizosaccharomyces pombe*, *Debaryomyces hansenii*, *Pichia ohmeri* และ *Hansenula anomala* var. *anomala* แต่เชื้อยีสต์ประเภทที่ทำให้เกิดโทษ (pathogenic yeast) ไม่สามารถเจริญเติบโตที่ค่าน้ำที่เป็นประโยชน์ต่ำ ดังนั้นสิ่งที่จะเกิดขึ้นก็คือการเกิดการเน่าเสียในอาหารเท่านั้น

• วิธีการควบคุม osmophilic yeasts

1. การควบคุมให้มีปริมาณ osmophilic yeasts ต่ำที่สุดในวัตถุดิบเริ่มต้น

ในอาหารที่มีค่าน้ำที่เป็นประโยชน์น้อยกว่า 0.85 การเสื่อมเสียจะเกิดขึ้นถ้ามีปริมาณยีสต์ประมาณ 10^5 - 10^6 เซลล์/กรัมของอาหาร ดังนั้นวิธีการยืดอายุการเก็บอาหารกึ่งแห้งทำได้โดยลดปริมาณยีสต์เริ่มแรกในอาหาร เช่น ใช้วัตถุดิบที่มีคุณภาพดี ป้องกันการผลิตที่ล่าช้า ตลอดจนป้องกันแมลงในโรงงานด้วย

2. ส่วนประกอบของอาหาร

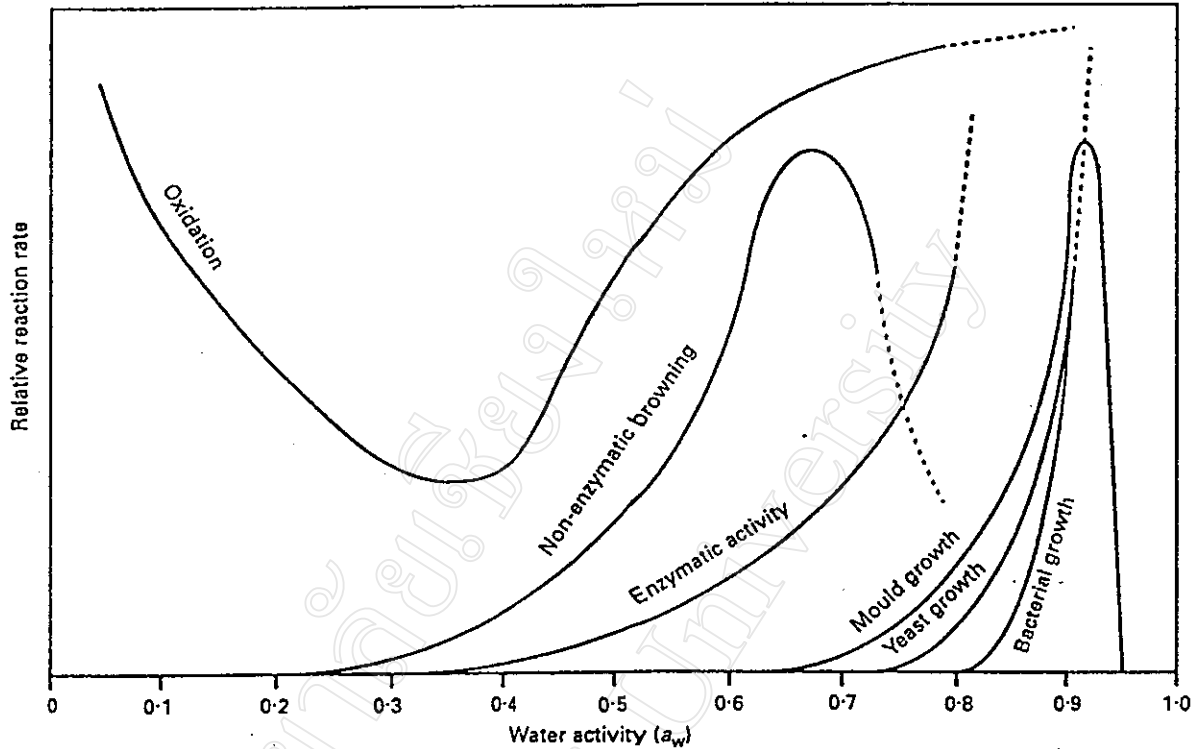
คุณสมบัติและความเข้มข้นของสารถูกละลายมีผลกระทบต่อ การเสื่อมเสียของอาหารกึ่งแห้งและมีผลต่อ osmophilic yeasts แตกต่างกัน จึงต้องเลือกใช้ให้เหมาะสม เช่น ที่ค่าน้ำที่เป็นประโยชน์เดียวกันเกลือสามารถยับยั้งจุลินทรีย์ได้ดีกว่าน้ำตาล แต่การใช้ในระดับความเข้มข้นสูงเกินไปผู้บริโภคจะไม่ยอมรับ จึงต้องมีการพัฒนาน้ำ humectant ชนิดใหม่มาใช้ ซึ่งในบางกรณีอาจจะต้องลด pH ของอาหาร แต่ถ้าหากลดต่ำเกินไปผู้บริโภคอาจไม่ยอมรับรสชาตินั้น

3. การควบคุมด้วยสารเคมี

การเติมสารกันเสียลงในอาหารเป็นวิธีหนึ่ง que ป้องกันการเสื่อมเสียของอาหารกึ่งแห้งในปัจจุบัน โดยต้องใช้ภายใต้กฎหมายกำหนดซึ่งเป็นไปตามกฎหมายของแต่ละประเทศ สารกันเสียที่ใช้ได้แก่ กรดซัลฟูริก กรดเบนโซอิก กรดซอร์บิก กรดพาราไฮดรอกซีเบนโซอิก และเกลือของกรดเหล่านี้ การจะใช้สารใดก็ขึ้นกับประเภทของอาหารกึ่งแห้ง และแนวโน้มของเชื้อที่จะเกิดในผลิตภัณฑ์นั้น (ไพโรจน์, 2539 ; Tilbury, 1976)

4.2 การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของอาหารกึ่งแห้ง

แม้ว่าอาหารกึ่งแห้งจะมีปริมาณน้ำต่ำจนสามารถลดการเสื่อมเสียอันเนื่องมาจากเชื้อจุลินทรีย์ได้ แต่มีการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่สำคัญ คือการเกิดออกซิเดชันของน้ำมันและไขมัน และการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่ใช่เอนไซม์ (non-enzymatic browning) อัตราการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวจะสูงที่สุดในช่วงของอาหารกึ่งแห้ง ดังรูป 2.4 ซึ่งผลของปฏิกิริยาจะทำให้คุณค่าทางอาหารลดลง กลิ่นรสและลักษณะปรากฏของอาหารเปลี่ยนแปลง



รูป 2.4 การเปลี่ยนแปลงทางเคมีและจุลินทรีย์ที่ค่าน้ำที่เป็นประโยชน์ต่างๆ
ที่มา : Macrae et al. (1993)

4.2.1 การเกิดออกซิเดชันของน้ำมันและไขมัน

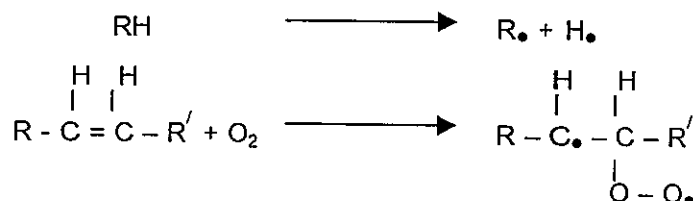
พันธะคู่ในโมเลกุลของน้ำมันและไขมันในอาหารสามารถส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนในอากาศ ดังนี้

- กลไกการเกิดออกซิเดชัน

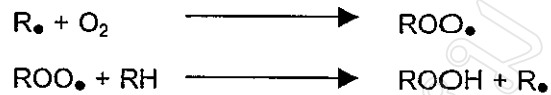
กลไกการเกิดออกซิเดชันดำเนินไป 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. initiation เป็นขั้นตอนการเกิดอนุมูลอิสระ (free radical)
2. propagation เป็นปฏิกิริยาของ free-radical chain reaction
3. termination เป็นปฏิกิริยาสุดท้ายที่ทำให้เกิด non-radical products

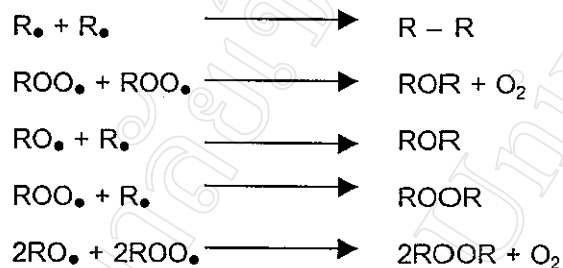
ปฏิกิริยาเริ่มต้นของออกซิเจนกับกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวจะทำให้เกิด hydroperoxide โดย unsaturated hydrocarbon จะสูญเสียไฮโดรเจนอะตอมทำให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระ และออกซิเจนจะเข้าไปทำปฏิกิริยาที่พันธะคู่เกิดเป็น diradical ดังนี้



หลังจากนั้นก็เกิดปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระกับออกซิเจนต่อเนื่องไปเรื่อยๆ



ได้เป็น peroxy radical ($ROO\cdot$) , hydroperoxide ($ROOH$) และ hydrocarbon radical ($R\cdot$) อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นใหม่นี้ก็จะเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องกับออกซิเจนต่อไป และเมื่อใดที่อนุมูลอิสระมาทำปฏิกิริยากันเองเกิดเป็นสารประกอบใหม่ที่ไม่ใช่อนุมูลอิสระ ปฏิกิริยาต่อเนื่องก็จะยุติลงตัวอย่างเช่น



เมื่อไม่มีอนุมูลอิสระเหลือสำหรับทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับออกซิเจนแล้ว ถ้าหากยังมีออกซิเจนเหลืออยู่มากก็จะเริ่มต้นเกิดปฏิกิริยาขั้นที่ 1 เพื่อเกิดเป็นอนุมูลอิสระใหม่ (นิธิยา, 2541)

- ผลของปฏิกิริยาออกซิเดชันในน้ำมันและไขมัน

ปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันและไขมันจะทำให้กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวซึ่งเป็นกรดไขมันจำเป็นต่อร่างกายถูกทำลาย และยังทำลายพวกวิตามินต่างๆ ที่ละลายในน้ำมันและไขมันอีกด้วย (นิธิยา, 2541) นอกจากนั้นยังทำให้อาหารเกิดการเหม็นหืนด้วยทั้งนี้เพราะเกิดจากไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (เป็นสารที่ไม่มีกลิ่นและรส) สลายตัวให้สารประกอบอัลดีไฮด์ คีโตน แอลกอฮอล์ และกรด เป็นต้น ซึ่งสารประกอบเหล่านี้ทำให้อาหารมีกลิ่นรสเหม็นหืน (Macrae et al., 1993)

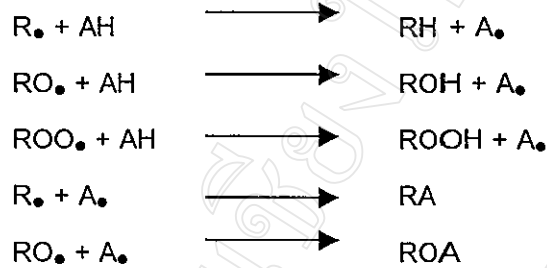
- ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดออกซิเดชันในน้ำมันและไขมัน

ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดออกซิเดชันของน้ำมันและไขมัน ได้แก่ ปริมาณออกซิเจน ระดับความไม่อิ่มตัวขององค์ประกอบของน้ำมันและไขมัน กรรมวิธีการแปรรูปการใช้สารกันหืน ตัวเร่งโลหะ ตัวเร่งชีวภาพ เช่น โลปอกซิเดส และสารฮีมาติน ภาชนะบรรจุแสงสว่างและอุณหภูมิ (ไพบูลย์, 2529) จากรูป 2.4 จะเห็นว่าอัตราการเกิดออกซิเดชันของน้ำมันและไขมันจะสูงในช่วงของอาหารกึ่งแห้งและอัตราจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของปริมาณความชื้น เพราะการเคลื่อนที่ของสารตั้งต้นมากขึ้น ตัวเร่งละลายได้ดีขึ้นและเซลล์อาหารพองตัว ทำให้พื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น (Macrae et al., 1993)

- วิธีการควบคุมการเกิดออกซิเดชันของน้ำมันและไขมัน

1. การใช้สารกันหืนหรือสารต้านออกซิเดชัน (antioxidant)

สารกันหืนจะยับยั้งไม่ให้เกิด free radical chain reaction ตัวอย่างการทำหน้าที่ยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารต้านออกซิเดชัน (กำหนดให้สารกันหืนมีสูตรเป็น AH)
เช่น



สารกันหืนที่ใช้ในอาหารได้แก่ tocopherol , butylated hydroxy toluene , butylated hydroxy anisole และ propyl gallate เป็นต้น

2. การทำ hydrogenation

เป็นการเติมไฮโดรเจนที่พันธะคู่ของกรดไขมันไม่อิ่มตัวของน้ำมันและไขมัน ทำให้กรดไขมันไม่อิ่มตัวเปลี่ยนเป็นกรดไขมันอิ่มตัว เช่น กรด linolenic จะเปลี่ยนไปเป็นกรด linoleic

3. การควบคุมอุณหภูมิ

ตามทฤษฎีของ Arrhenius อัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมีจะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 10 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงควรเก็บรักษาอาหารในที่มีอุณหภูมิต่ำสุดเท่าที่สามารถกระทำได้ แต่ควรคำนึงถึงประเภทและลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ

4. การใช้เอนไซม์

เอนไซม์บางชนิดเช่น cytochrome-C , catalase และ glucose oxidase จะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวของเปอร์ออกไซด์ไปเป็นสารที่ไม่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

5. การกำจัดอากาศ

เป็นการควบคุมออกซิเจนไม่ให้เข้าไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ (ไพโรจน์, 2539)

6. สภาพการบรรจุหีบห่อ

วัสดุหีบห่ออาหารต้องมีคุณสมบัติที่สามารถป้องกันการผ่านเข้าออกของออกซิเจนได้ และควรมีสีเข้มเพื่อป้องกันแสงสว่างและการแผ่รังสี ควรเก็บรักษาอาหารในสภาพสุญญากาศ การบรรจุหีบห่อแบบปรับสภาพบรรยากาศ หรือการบรรจุหีบห่อแบบควบคุมบรรยากาศ (Macrae et al., 1993)

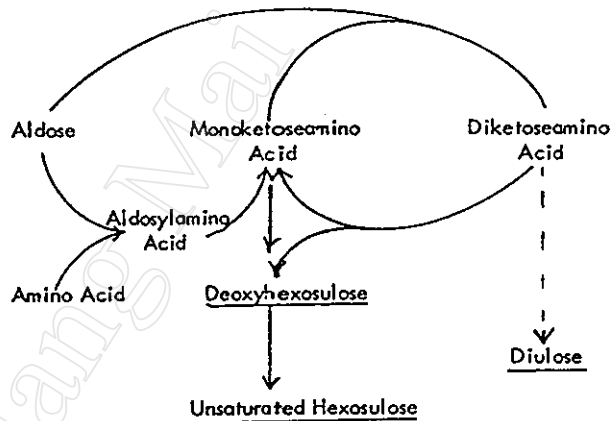
4.2.2 การเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล

การเกิดสีน้ำตาลในอาหารกึ่งแห้งนี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารประกอบอัลดีไฮด์หรือคีโตนกับสารประกอบกรดอะมิโน ซึ่งก่อให้เกิดสารประกอบที่มีโมเลกุลใหญ่ที่ให้สีได้ สารประกอบอัลดีไฮด์และคีโตนเป็นสารพวกคาร์บอนิล ได้แก่ คาร์โบไฮเดรตหรือสารที่เกิดจากการออกซิเดชันของน้ำมันและไขมันก็ได้ ส่วนสารประกอบกรดอะมิโน ได้แก่ กรดอะมิโน โปรตีน และเอมีน ปฏิกิริยานี้มีชื่อเรียกอีกชื่อว่า Maillard reaction

- กลไกการเกิดสีน้ำตาล

1. ปฏิกิริยาระหว่าง aldose กับ amino acid ก่อให้เกิด aldosylamino acid ด้วยการเกิด aldol condensation
2. เกิด Amadori re-arrangement จะให้ ketose amino acid
3. มีการรวม 2 โมเลกุลของ ketose amino acid เป็น diketose amino acid
4. ketose amino acid และ diketose amino acid สลายตัวให้ carbonyl intermediates เช่น deoxyhexosulose และ diulose unsaturated hexosulose

ขั้นตอนที่ 1-4 ของการเกิดปฏิกิริยา Maillard reaction แสดงในรูป 2.5



รูป 2.5 ขั้นตอนที่ 1 - 4 ของปฏิกิริยา Maillard reaction

ที่มา: Williams (1976)

5. ขั้นตอนการเกิดสารให้สีน้ำตาล ปฏิกิริยาขั้นตอนนี้มีความยุ่งยากสลับซับซ้อนมากและไม่เด่นชัด การเกิดสารให้สีนี้เชื่อว่าเกิดจากการ aldol condensation ของ carbonyl intermediates หรือ products ในปฏิกิริยาต่อมารดอะมิโนจะเข้ามาทำปฏิกิริยาอีกครั้งหนึ่งในขั้นตอนนี้ และให้ nitrogen containing pigments ที่เรียกว่า melanodins ซึ่งให้สีน้ำตาล (ไพโรจน์, 2539)

- ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล

1. ชนิดของสารประกอบคาร์บอนิล ในอาหาร

ถ้าคาร์บอนิลในอาหารมีโครงสร้างเป็นเพนโตส (เช่น ไซโลส หรือโรโบส) จะเกิดสีน้ำตาลเร็วกว่าเฮกโซส (เช่น ฟรุกโตส หรือกลูโคส) และในกลุ่มเฮกโซสเองถ้ามีโครงสร้างเป็นอัลโดสจะเกิดสีน้ำตาลเร็วกว่าคีโตส เพราะ aldose amino acids มีการรวมตัวดีกว่า ketose amino acids

2. ชนิดของสารประกอบอะมิโนในอาหาร

สารประกอบอะมิโนที่ละลายน้ำได้จะเกิดปฏิกิริยาได้ดีว่าสารประกอบอะมิโนที่ละลายน้ำไม่ได้

3. อุณหภูมิ

ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการเกิดสีน้ำตาลจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 10 องศาเซลเซียส อัตราการเปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้น 3 - 4 เท่าจากเดิม แต่การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวขึ้นกับค่าน้ำที่เป็นประโยชน์ด้วย

4. pH

ถ้าหากเพิ่ม pH จะทำให้อัตราการเกิดสีน้ำตาลเพิ่มขึ้นด้วย ปฏิกิริยาจะช้าหาก pH น้อยกว่า 5 - 6 และจะเพิ่มอัตราอย่างรวดเร็วหาก pH เพิ่มขึ้นมากกว่านี้ (ไพโรจน์, 2539)

5. ค่าน้ำที่เป็นประโยชน์

โดยภาพรวมแล้วอัตราการเกิดสีน้ำตาลจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มค่าน้ำที่เป็นประโยชน์และอัตราการเกิดสีน้ำตาลจะเกิดสูงสุดที่ช่วงค่าน้ำที่เป็นประโยชน์ 0.65 - 0.70 ซึ่งเป็นช่วงของอาหารกึ่งแห้งดั่งรูป 2.4 สำหรับอาหารกึ่งแห้งที่มีค่าน้ำที่เป็นประโยชน์ต่ำการเพิ่มปริมาณน้ำจะทำให้สารตั้งต้นเคลื่อนที่ได้ดีทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้รวดเร็ว ต่อจากนั้นเมื่อค่าน้ำที่เป็นประโยชน์สูงขึ้นปริมาณน้ำกลับทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้าลงเนื่องจากการเจือจางสารตั้งต้น (Macrae et al., 1993)

• การควบคุมการเกิดสีน้ำตาล

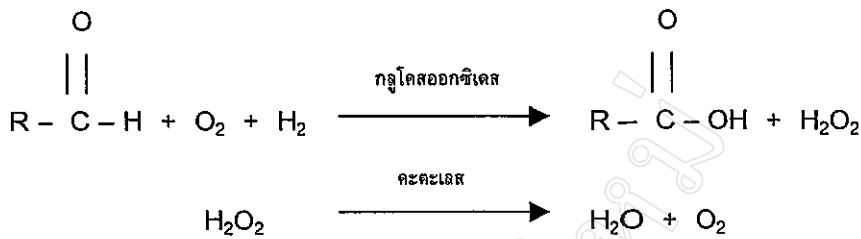
1. การใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์หรือซัลไฟต์ นอกจากจะลดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลแล้วยังช่วยชะงักการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์อีกด้วย

2. ใช้อุณหภูมิต่ำในการผลิตและการเก็บรักษา เพราะว่าอุณหภูมิต่ำจะทำให้การรวมตัวของน้ำตาลรีดิวซ์กับกรดอะมิโนเป็นไปได้ช้า

3. ลด pH ของอาหาร โดยให้มี pH 5 - 6 และเปลี่ยนประเภทของน้ำตาลที่ใช้ในการผลิตอาหาร เช่น ใช้น้ำตาลซูโครส ฟรุคโตส แทนน้ำตาลรีดิวซ์ต่างๆ

4. ลดการใช้ปริมาณน้ำตาลในผลิตภัณฑ์ เช่น การใช้เอนไซม์กลูโคสออกซิเดสเพื่อเปลี่ยนกลูโคสที่เหลือในอาหารไปเป็นกรดกลูโคนิกซึ่งไม่สามารถรวมตัวกับกรดอะมิโน แต่การใช้เอนไซม์กลูโคสออกซิเดสนั้นทำให้ได้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ออกมาด้วยซึ่งเป็นเรื่องที่ไม่ต้องการ ดังนั้นจึงต้องเติมเอนไซม์คะตะเลสลงไปด้วย เพื่อเปลี่ยนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นออกซิเจนกับน้ำดังปฏิกิริยาในรูป 2.6

5. พยายามทำให้โปรตีนที่มีในผลิตภัณฑ์อยู่ในรูปของโปรตีนที่ไม่สามารถละลายได้โดยการใช้สารที่มีปริมาณร้อยละการละลายของโปรตีนต่ำ เช่น ในการเตรียมกลูโคสไซรัปนิยมใช้แป้งข้าวฟ่างแทนแป้งข้าวโพด เพราะว่าแป้งข้าวฟ่างมีปริมาณการละลายของโปรตีนเท่ากับร้อยละ 0.01 ส่วนแป้งข้าวโพดมีค่าร้อยละ 0.07 (ไพโรจน์, 2539)



รูป 2.6 ปฏิกริยาการเปลี่ยนกลูโคสด้วยเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส และคะตะเลส
ที่มา : ไพโรจน์ (2539)

4.2.3 ผลการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของอาหารกึ่งแห้ง

การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของอาหารกึ่งแห้งก่อให้เกิดผลดังต่อไปนี้

1. สูญเสียการยอมรับจากผู้บริโภค

การเกิดกลิ่นที่ไม่ปกติโดยปฏิกิริยา Maillard และกลิ่นเหม็นหืนจากการออกซิเดชันของน้ำมันและไขมัน อีกทั้งยังทำให้เกิดสีที่ไม่ต้องการ โดยเฉพาะแตสีน้ำตาลที่เกิดจากปฏิกิริยา Maillard เท่านั้น การเกิดออกซิเดชันในรงควัตถุไมโอโกลบินก็สามารถทำให้เกิดสีน้ำตาลในเนื้อสัตว์และทำให้เนื้อเหนียวด้วย ประกอบกับโปรตีนมีการจับตัวกันแน่นโดยปฏิกิริยา Maillard ทำให้ผู้บริโภคไม่ยอมรับและเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ค่า protein digestibility ลดลง

2. สูญเสียคุณค่าทางโภชนาการอาหารและวิตามิน

ในช่วงค่าน้ำที่เป็นประโยชน์ของอาหารกึ่งแห้งส่งผลให้เกิดปฏิกิริยา Maillard ร่วมกับการเกิดออกซิเดชันในสารประกอบพวกกรดแอสคอบิกได้อย่างรวดเร็ว การเกิดสีน้ำตาลจะทำให้สูญเสียคุณค่าทางอาหาร มีการสูญเสียน้ำตาลโดยเฉพาะมีการสูญเสียกรดอะมิโนที่จำเป็น เช่น ไลซีน รวมทั้งมีการสูญเสียกรดอะมิโนที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบด้วย

3. อาจเกิดความเป็นพิษได้

ได้มีการศึกษาโดยนำเอาผลิตภัณฑ์ที่เกิดปฏิกิริยา Maillard ไปให้หนูทดลองกิน พบว่าหนูทดลองมีน้ำหนักลดลง เกิด organ enlargement รวมไปถึง pregnancy ไม่ทำงาน น้ำมันและไขมันที่ถูกออกซิไดซ์ด้วยความร้อนจะทำให้เนื้อเยื่อของสัตว์ทดลองถูกทำลาย และเกิด organ enlargement (ไพโรจน์, 2539)

5. กรดซอร์บิกและโปแตสเซียมซอร์เบท

5.1 คุณสมบัติทางเคมี

- กรดซอร์บิก

เป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัวสายตรง ชื่อทางเคมีคือ 2,4 - hexadienoic acid สูตรโมเลกุลคือ $\text{CH}_3\text{-CH=CH-CH=CH-COOH}$ และมีน้ำหนักโมเลกุล 112.13 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกรดซอร์บิกแสดงในตาราง 2.3 ผลึกของกรดซอร์บิกมีลักษณะเป็นเกล็ดหรือเข็ม ไม่มีสี และสามารถพบในลักษณะเป็นผงหรือเม็ดสีขาว อ่อนนุ่มแตกหักง่าย มีกลิ่นและรสชาติของกรดอย่างเด่นชัด กลุ่มคาร์บอกซิล (carboxyl group) ของกรดซอร์บิกสามารถทำปฏิกิริยากับโลหะได้ดีเกิดเป็นสารประกอบประเภทเกลือหรือเอสเทอร์ นอกจากนี้พันธะคู่ของกรดซอร์บิกก็สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีเช่นกัน และมีผลในการยับยั้งกิจกรรมของจุลินทรีย์ (antimicrobial activity) เป็นอย่างดี (Sofos and Busta, 1993)

โดยทั่วไปแล้วกรดซอร์บิกจะมีประสิทธิภาพที่ pH น้อยกว่า 6.5 ประสิทธิภาพในการยับยั้งจะสูงขึ้นหาก pH ต่ำลง เพราะกรดซอร์บิกในรูปไม่แตกตัว (undissociated form) มีประสิทธิภาพในการยับยั้งจุลินทรีย์ดีกว่ากรดซอร์บิกในรูปที่แตกตัว (dissociated form) การแตกตัวของกรดซอร์บิกจะขึ้นอยู่กั pH กล่าวคือยิ่ง pH ต่ำลง ยิ่งมีปริมาณกรดซอร์บิกในรูปไม่แตกตัวสูง (Lindsay, 1985) ดังตาราง 2.4 อย่างไรก็ตามมีรายงานว่ากรดซอร์บิกในรูปที่แตกตัวก็ให้ผลยับยั้งกิจกรรมของจุลินทรีย์ได้ด้วยเช่นกัน แต่มีประสิทธิภพน้อยกว่ากรดซอร์บิกในรูปที่แตกตัว 10 - 600 เท่าที่ pH สูงกว่า 6.0 การยับยั้งมีมากกว่าร้อยละ 50 ซึ่งเป็นผลมาจากกรดซอร์บิกในรูปที่แตกตัว (Sofos and Busta, 1993)

กรดซอร์บิกละลายในน้ำได้น้อย จากตาราง 2.5 จะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส กรดซอร์บิกละลายได้เพียง 0.15 กรัม ในน้ำ 100 มิลลิลิตร การละลายจะเพิ่มขึ้นหากอุณหภูมิและ/หรือ pH สูงขึ้น กรดซอร์บิกละลายได้มากขึ้นใน glacial acetic acid แอลกอฮอล์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเอทานอลและในไขมัน โดยกรดซอร์บิกละลายในไขมันได้มากกว่าในน้ำประมาณสามเท่า เกลือของกรดซอร์บิกละลายน้ำได้ดีกว่ากรดซอร์บิก อุตสาหกรรมอาหารจึงนิยมใช้เกลือซอร์เบทมากกว่ากรดซอร์บิก เกลือซอร์เบทที่มีจำหน่ายในทางการค้าได้แก่ แคลเซียมซอร์เบท โซเดียมซอร์เบท และโปแตสเซียมซอร์เบท ทั้งนี้จะนิยมใช้เกลือโปแตสเซียมซอร์เบทมากที่สุดเพราะละลายน้ำได้ดีที่สุด มีความคงตัวสูงและวิธีการผลิตไม่ยุ่งยาก (Sofos and Busta, 1993)

- โปแตสเซียมซอร์เบท

มีชื่อทางเคมีคือ 2,4 - Hexadienoic acid potassium salt สูตรโมเลกุลคือ $\text{CH}_3\text{-CH=CH-CH=CH-COOK}$ น้ำหนักโมเลกุล 150.22 มีลักษณะเป็นผงหรือเป็นเม็ดสีขาว สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของโปแตสเซียมซอร์เบทแสดงในตาราง 2.3 และจากตาราง 2.5 จะเห็นว่าโปแตสเซียมซอร์เบทละลายในน้ำได้ดีกว่ากรดซอร์บิก ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส โปแตสเซียมซอร์เบทละลายได้ถึง 58.20 กรัมในน้ำ 100 มิลลิลิตร การใช้โปแตสเซียมซอร์เบทในอาหารสามารถละลายได้มากกว่าร้อยละ 50 ประสิทธิภาพในการยับยั้งจุลินทรีย์คิดเป็นร้อยละ 74 ของกรดซอร์บิกที่มีน้ำหนักเท่ากัน

ตาราง 2.3 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกรดซอร์บิกและโปแตสเซียมซอร์เบท

สมบัติ	กรดซอร์บิก	โปแตสเซียมซอร์เบท
ชื่อทางเคมี	2,4-Hexadienoic acid	2,4-Hexadienoic acid potassium salt
สูตรโมเลกุล	$\text{CH}_3\text{-CH=CH-CH=CH-COOH}$	$\text{CH}_3\text{-CH=CH-CH=CH-COOK}$
น้ำหนักโมเลกุล	112.13	150.22
อุณหภูมิติดไฟ (องศาเซลเซียส)	126	-
ค่าคงที่ในการแตกตัวเป็นไอออน ที่ 25 องศาเซลเซียส	1.73×10^{-5}	-
ความหนาแน่น ที่ 20 องศาเซลเซียส (กรัม/มิลลิลิตร)	-	1.36
อุณหภูมิหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	132-137	สลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 270 องศาเซลเซียส
Heat of Combustion ที่ 25 องศาเซลเซียส (บีทียู/ปอนด์)	11,927	-
ความเป็นต่าง / ความเป็นกรด	-	1.1 มิลลิลิตร ของ NaOH 0.1 นอร์มัล ถึง 0.8 มิลลิลิตร ของ HCl 0.1 นอร์มัล/1.1 กรัม
ความดันไอ (มิลลิเมตรปรอท)		
ที่ 20 องศาเซลเซียส	< 0.001	-
ที่ 120 องศาเซลเซียส	10	-
ที่ 140 องศาเซลเซียส	43	-
จุดเดือด (องศาเซลเซียส) ที่ความดัน		
760 มิลลิเมตรปรอท	สลายตัว	-
50 มิลลิเมตรปรอท	143	-
10 มิลลิเมตรปรอท	119	-
ความบริสุทธิ์ (ร้อยละ)	> 98	> 98
ปริมาณความชื้นไม่เกิน (ร้อยละ)	0.5	1.0
ปริมาณโลหะหนักไม่เกิน (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)	10	10
ปริมาณ Arsenic ไม่เกิน (ร้อยละ)	3	3
ปริมาณตะกั่วไม่เกิน (ร้อยละ)	0.2	-

ที่มา : Sofos and Busta (1993)

ตาราง 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง pH กับปริมาณกรดซอร์บิกในรูปแบบไม่แตกตัว

pH	ปริมาณกรดซอร์บิกในรูปแบบไม่แตกตัว (ร้อยละ)
3	98
4	86
5	37
6	6
7	0.6

ที่มา : Giese (1994)

ตาราง 2.5 ค่าการละลาย (ร้อยละ) ของกรดซอร์บิกและโปแตสเซียมซอร์เบท

ตัวทำละลาย	กรดซอร์บิก	โปแตสเซียมซอร์เบท
น้ำ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (pH 3.1)	0.15	58.20
น้ำ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (pH 4.4)	0.22	-
น้ำ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (pH 5.9)	1.02	-
น้ำ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	0.55	61.00
น้ำ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส	4.00	64.00
น้ำมันข้าวโพด อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	0.80	0.01
น้ำมันข้าวโพด อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	2.00	0.03
น้ำมันถั่วเหลือง อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	0.52	-
น้ำมันเมล็ดฝ้าย อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	1.00	0.01
สารละลายซูโครส ร้อยละ 10	0.15	58.00
สารละลายซูโครส ร้อยละ 40	0.10	45.00
สารละลายซูโครส ร้อยละ 60	0.08	28.00
สารละลายโซเดียมกลูโคไรต์ ร้อยละ 5	0.11	47.00
สารละลายโซเดียมกลูโคไรต์ ร้อยละ 10	0.07	34.00
สารละลายโซเดียมกลูโคไรต์ ร้อยละ 15	0.04	12.00 - 15.00
กรดอะซิติก	11.50 - 12.30	-
กรดแลคติก ร้อยละ 85.5	2.25	-
กรดซิตริก ร้อยละ 50	0.26	-
กรดฟอสฟอริก ร้อยละ 85	0.12	-
เอทานอล ร้อยละ 5	0.16	57.40
เอทานอล ร้อยละ 20	0.29	54.60
เอทานอล ร้อยละ 50	-	45.30
เอทานอล ร้อยละ 95	12.60 - 14.50	6.50
เอทานอล ร้อยละ 100	12.90 - 14.80	2.00
โพรพิลีนไกลคอล อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	0.20	55.00
โพรพิลีนไกลคอล อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	0.50	48.00
โพรพิลีนไกลคอล อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส	5.50	20.00
เพนเทน อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	0.15	-
เพนเทน อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	0.60	-
เพนเทน อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส	1.80	-
เบนซีน อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	2.34	< 0.01
เบนซีน อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	8.14	-
เบนซีน อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส	24.00	-
เอทิลเอเทอร์ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	5.00 - 5.30	0.10
กลีเซอรอล อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	0.31	0.20
อะซิโตน อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	9.20	0.10
เมทานอล อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	12.90	16.00
ไซโคลเฮกเซน อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	0.28	-
คาร์บอนเตตระคลอไรด์ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	1.30	< 0.01

ที่มา : Sofos and Busta (1993)

ประสิทธิภาพในการยับยั้งจุลินทรีย์ของซอร์เบทจะเพิ่มขึ้นหาก pH ลดลง เช่นเดียวกับกรดซอร์บิก เพราะมีค่าคงที่ในการแตกตัว (dissociation constant, pK_a) เท่ากับ 4.76 แม้ว่าซอร์เบทจะยับยั้งจุลินทรีย์ได้ดีในสภาวะที่มี pH ต่างๆ แต่ก็มีรายงานว่าซอร์เบทยังคงมีประสิทธิภาพที่ pH เท่ากับ 6.5 หรือแม้กระทั่งที่ pH สูงเท่ากับ 7.0 ซึ่งนับว่าเป็นข้อดีอีกประการหนึ่งของซอร์เบท เมื่อเปรียบเทียบกับสารกันเสียชนิดอื่นๆ ตัวอย่างเช่น โพรพิโอนัทและเบนโซเอทจะมีประสิทธิภาพที่ pH ไม่เกิน 5.0 - 5.5 และ 4.0 - 4.5 ตามลำดับ

ผลึกซอร์เบทที่บริสุทธิ์และแห้งจะมีความคงตัวดีกว่าสารละลายซอร์เบท สารละลายซอร์เบทจะเสื่อมสลายได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดเป็นสารประกอบคาร์บอนิลต่างๆ เช่น โครโตนัลดีไฮด์ (crotonaldehyde) มาโลนัลดีไฮด์ (malonaldehyde) อะเซตัลดีไฮด์ (acetaldehyde) และเบต้าคาร์บอกซีแลคโตลีน (β - Carboxylactolein) อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารละลายซอร์เบทจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น pH ลดลง และสภาวะที่มีแสงและกรด วิธีการยับยั้งการเกิดออกซิเดชันและการสูญเสียกรดซอร์บิกคือการใช้สารต้านการออกซิเดชัน การใช้ภาชนะบรรจุที่เหมาะสมและการเก็บรักษาในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน

กรดซอร์บิกที่เติมลงในอาหารจะสูญเสียไปในระหว่างการเก็บอาหาร ปริมาณที่สูญเสียจะมากหรือน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับปริมาณซอร์เบทที่ใช้ในอาหาร pH องค์ประกอบ และปริมาณความชื้นของอาหาร กระบวนการผลิตอาหาร ภาชนะบรรจุที่ใช้ อุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บอาหาร และสารเจือปนอื่นๆ ที่มีอยู่ในอาหาร

การแพร่ของซอร์เบทเข้าสู่เนื้ออาหารจะเกิดมากหรือน้อยเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับสมบัติต่างๆ ของอาหารนั่นเอง ไม่ว่าจะเป็นส่วนประกอบ สมบัติทางกายภาพ โครงสร้าง ความชื้น หรือค่าน้ำที่เป็นประโยชน์ ดังนั้นเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ที่ต้องการใช้ซอร์เบทสำหรับถนอมอาหาร ผู้ผลิตอาหารควรจะต้องศึกษาถึงกลไกการแพร่ของกรดซอร์บิกเข้าสู่เนื้ออาหาร เพื่อที่จะสามารถควบคุมให้กรดซอร์บิกแพร่เข้าสู่เนื้ออาหารมากที่สุด ทั้งในระหว่างกระบวนการผลิตและการเก็บรักษาอาหาร

กรดซอร์บิกและโปแตสเซียมซอร์เบทเป็นสารประกอบที่ไวต่อความร้อน ความชื้น และแสงแดด ดังนั้นเพื่อป้องกันการถูกทำลายจากปัจจัยดังกล่าว จึงควรเก็บรักษาสารนี้ในภาชนะบรรจุที่ป้องกันการซึมผ่านของความชื้นได้ดี พร้อมทั้งเก็บภาชนะดังกล่าวในบริเวณที่มีอุณหภูมิและความชื้นต่ำ ไม่มีแสงแดด (Sofos and Busta, 1993) ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุขระบุว่าให้เก็บกรดซอร์บิกในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท กันแสงได้ และเก็บที่อุณหภูมิไม่เกิน 38 องศาเซลเซียส (กระทรวงสาธารณสุข, 2527)

5.2 ผลต่อจุลินทรีย์

5.2.1 การยับยั้งจุลินทรีย์

Sofos and Busta (1993) รายงานว่าโดยทั่วไปแล้วซอร์เบทมีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อยีสต์และเชื้อราได้ดีกว่าแบคทีเรีย ซอร์เบทความเข้มข้นร้อยละ 0.05 - 0.3 จะให้ผลในการยับยั้งจุลินทรีย์ในอาหารมากที่สุด ประสิทธิภาพการยับยั้งของเกลือซอร์เบทต่อจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ มีดังนี้คือ

- การยับยั้งเชื้อยีสต์

นักวิจัยหลายคนได้รายงานถึงประสิทธิภาพของซอร์เบทในการยับยั้งเชื้อยีสต์หลายชนิด ได้แก่ เชื้อยีสต์ในจีนัส *Brettanomyces* , *Candida* , *Cryptococcus* , *Debaryomyces* , *Endomycopsis* , *Hansenula* , *Kloeckera* , *Pichia* , *Rhodotorula* , *Saccharomyces* , *Sporobolomyces* , *Torulasporea* , *Torulopsis* และ *Zygosaccharomyces* เป็นต้น

มีการใช้ซอร์เบทเพื่อยับยั้งเชื้อยีสต์ในอาหารหลายชนิด เช่น ผักดอง น้ำผลไม้ ไวน์ เนยแข็ง ผลไม้แห้ง ผลิตภัณฑ์เนื้อ ผลิตภัณฑ์ปลา อาหารที่มี pH ต่ำ และอาหารกึ่งแห้ง เช่น น้ำสลัด น้ำเชื่อม แยม ลูกอม เยลลี่ และ chocolate syrup

- การยับยั้งเชื้อรา

มีรายงานมากมายถึงประสิทธิภาพของซอร์เบทในการยับยั้งเชื้อราหลายชนิด ได้แก่เชื้อราในจีนัส *Alternaria* , *Ascochyta* , *Aspergillus* , *Botrytis* , *Cephalosporium* , *Chaetomium* , *Cladosporium* , *Colletotrichum* , *Cunninghamella* , *Curvularia* , *Fusarium* , *Geotrichum* , *Gliocladium* , *Helminthosporium* , *Heterosporium* , *Humicola* , *Molinia* , *Mucor* , *Penicillium* , *Phoma* , *Peperularia* , *Pestalotiopsis* , *Pullularia* , *Rhizoctonia* , *Rhizopus* , *Rosellinia* , *Sporotrichum* , *Trichoderma* และ *Truncatella* เป็นต้น

การใช้ซอร์เบทเพื่อยับยั้งเชื้อราในอาหารจะนิยมใช้ในเนยแข็งมากที่สุด ส่วนการใช้ในอาหารอื่นๆ ได้แก่ เนย ไส้กรอก ผลไม้ น้ำผลไม้ แยม กล้วย หนมปัง และปลารมควัน

ซอร์เบทสามารถยับยั้งการสร้างสารพิษจากเชื้อราได้หลายชนิดทั้งในอาหารเลี้ยงเชื้อและอาหารต่างๆ ไป แต่ก็มียุทธศาสตร์บางอย่างการใช้ซอร์เบทที่ความเข้มข้นต่ำกว่าระดับที่ให้ผลยับยั้ง (subinhibitory levels) อาจกระตุ้นการสร้างสารพิษจากเชื้อรา ทั้งนี้การกระตุ้นการสร้างสารพิษจากเชื้อราโดยซอร์เบทที่มีความเข้มข้นต่ำนี้ขึ้นกับปัจจัยต่างๆ คือ ชนิดและสายพันธุ์ของเชื้อรา อุณหภูมิในการเก็บ และยังมีปัจจัยอื่นๆ เข้ามาเกี่ยวข้องอีกด้วย

- การยับยั้งแบคทีเรีย

แม้ว่าซอร์เบทจะมีประสิทธิภาพในการยับยั้งต่อเชื้อยีสต์และเชื้อรามากกว่าแบคทีเรีย แต่ก็มียุทธศาสตร์การยับยั้งของซอร์เบทต่อแบคทีเรียหลายชนิด ได้แก่ แบคทีเรียในจีนัส *Acetobacter* , *Achromobacter* , *Acinetobacter* , *Enterobacter* , *Aeromonas* , *Alcaligenes* , *Alteromonas* , *Arthrobacter* , *Micrococcus* , *Moraxella* , *Mycobacterium* , *Pediococcus* , *Proteus* , *Pseudomonas* , *Salmonella* , *Serratia* , *Staphylococcus* , *Vibrio* และ *Yersinia* เป็นต้น

ซอร์เบทสามารถชะลอการเจริญเติบโตของ *Listeria monocytogenes* ได้ทั้งในอาหารเลี้ยงเชื้อและใน cold-pack cheese แต่มีแบคทีเรียบางสายพันธุ์ไม่ถูกยับยั้งโดยซอร์เบท และบางสายพันธุ์สามารถเมตาบอไลซ์ซอร์เบทได้ อย่างไรก็ตามสามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่าซอร์เบทสามารถยับยั้งแบคทีเรียชนิดต่างๆ คือ แบคทีเรียแกรมบวกและแบคทีเรียแกรมลบ แบคทีเรีย

ที่สร้างเอนไซม์คะตะเลส (catalase-positive bacteria) แบคทีเรียที่สร้างเอนไซม์คะตะเลสไม่ได้ (catalase-negative bacteria) แบคทีเรียที่ต้องการอากาศ (aerobic bacteria) แบคทีเรียที่ไม่ต้องการอากาศ (anaerobic bacteria) แบคทีเรียที่เจริญที่อุณหภูมิปานกลาง (mesophilic bacteria) แบคทีเรียที่เจริญที่อุณหภูมิต่ำ (psychrotrophic bacteria) แบคทีเรียที่ทำให้อาหารเน่าเสีย (spoilage bacteria) และแบคทีเรียที่ทำให้เกิดโทษ (pathogenic bacteria)

ในผลิตภัณฑ์เนื้อชอร์เบทสามารถยับยั้งแบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรคและแบคทีเรียที่ทำให้อาหารเสื่อมเสียได้ ซึ่งได้แก่แบคทีเรียต่อไปนี้ *Clostridium botulinum* , *Cl. perfringens* , *Cl. sporogenes* , *Salmonella* , *Staphylococcus aureus* , *Escherichia coli* , *Yersinia enterocolitica* , *Brochothrix thermosphacta* , *Serratia liquefaciens* , *Lactobacillus* , *Bacillus cereus* , *B. licheniformis* และ *Pseudomonas* จากการศึกษาในผลิตภัณฑ์เนื้อชนิดต่างๆ คือ เบคอน เนื้อหมัก เนื้อหมู เนื้อวัว เนื้อไก่ พบว่าประสิทธิภาพการยับยั้งจะดีขึ้นหากใช้ชอร์เบทร่วมกับไนไตรท์ โซเดียมคลอไรด์ ฟอสเฟต สารต้านการออกซิเดชัน กรด pH ต่ำ อุณหภูมิการเก็บรักษาต่ำ สภาวะที่มีออกซิเจนน้อย และสภาวะที่มีคาร์บอนไดออกไซด์สูง

ชอร์เบทยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียได้โดยไม่มีผลทำให้ช่วง lag phase เพิ่มขึ้นและอัตราการเจริญเติบโตลดลง นอกจากนี้ชอร์เบทยังมีผลต่อการสร้างสปอร์ของแบคทีเรียได้อีกด้วยโดยอาจจะรบกวนการสร้างสปอร์ การงอกของสปอร์ (spore germination) การเจริญเติบโต และการแบ่งตัวของ vegetative cell

5.2.2 กลไกที่กระทำต่อจุลินทรีย์

Sofos and Busta (1993) ได้รายงานถึงกลไกที่ชอร์เบทไปกระทำต่อเซลล์จุลินทรีย์และสปอร์ ไว้ดังนี้

- กลไกการยับยั้งการสร้างสปอร์ของแบคทีเรีย

จากการศึกษาถึงผลของชอร์เบทในการยับยั้งการงอกของสปอร์ของแบคทีเรียหลายชนิดทั้งในอาหารเลี้ยงเชื้อและในอาหารที่มนุษย์บริโภค พบว่า

- ชอร์เบทเป็นตัวยับยั้งแบบแข่งขันต่อกรดอะมิโนที่เหนียวนำไปเกิดการงอกของสปอร์และสามารถย้อนกลับมาเป็นตัวยับยั้งได้อีก (reversible inhibitor)
- ชอร์เบทไม่ได้ยับยั้งการปล่อย (triggering) สปอร์ แต่ยับยั้งขั้นตอนในการงอกของสปอร์
- ชอร์เบทอาจจะยับยั้ง sporeolytic enzyme ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการงอกของสปอร์
- ชอร์เบทจะทำปฏิกิริยากับส่วนที่เป็นเมมเบรนของสปอร์

- กลไกการยับยั้งต่อ metabolic function ของจุลินทรีย์

ภายใต้สภาวะบางอย่างชอร์เบททำให้ลักษณะปรากฏและสัณฐานวิทยา (morphology) ของเซลล์จุลินทรีย์เปลี่ยนแปลงดังนี้

ในเซลล์ยีสต์ ฟอสโฟโปรตีนจะจับตัวกันแน่น (dense phosphoprotein) นิวเคลียสผิดแปลกไป (irregular nuclei) ไมโทคอนเดรียและแวคคิวโอลมีจำนวนเพิ่มขึ้นและมีขนาดหลายๆ ขนาด

มีรายงานในเซลล์แบคทีเรียบางชนิด เช่นเซลล์ของ *Clostridium botulinum* พบว่าเซลล์จะยาวขึ้นและมีส่วนพองนูนทำให้การแบ่งเซลล์บกพร่อง ส่วน *Cl. sporogenes* ซึ่งเซลล์ปกติมีลักษณะเป็นเส้นใยและไม่มีผนังกัน (filamentous and nonseptate) ก็จะมีการเปลี่ยนแปลงคือ รูปร่างจะผิดแปลกไป มีส่วนโค้งนูนหลายแห่ง หากมีผนังกันจะทำให้ผนังเซลล์ด้านใน (inner cell wall) หนาขึ้น ผนังเซลล์ด้านนอก (outer cell wall) บางส่วนหายไป ส่วนเซลล์ของ *Alteromonas putrefaciens* พบว่าการใช้ซอร์เบทที่ pH 7.0 จะเพิ่มค่าความไม่ชอบน้ำ (hydrophobicity) ของเซลล์ และผนังเซลล์จะถูกลดด้วยเอนไซม์ lysozyme นอกจากนี้ยังมีหลักฐานการเสียหายของเซลล์เมมเบรนของแบคทีเรียชนิดอื่นๆ อีกด้วยเช่นกัน

กลไกที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ อาจเนื่องมาจาก

- มีการรวมตัวของซอร์เบทกับโครงสร้างจำเพาะของเซลล์
- เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการสังเคราะห์ทางชีว (biosynthetic process) ภายในเซลล์

• กลไกการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

การยับยั้งของซอร์เบทต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์อาจจะแยกได้เป็นสองลักษณะ ลักษณะที่หนึ่งคือเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของเซลล์เมมเบรนด้วยกลไกต่างๆ ดังนี้

➤ ซอร์เบททำให้มีการเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยา ความสมบูรณ์ และหน้าที่ของเซลล์เมมเบรน เช่น รูปร่างของเซลล์เมมเบรนโตขึ้น

➤ ซอร์เบททำให้เซลล์ลดการดูดซึมคาร์บอนจากสารตั้งต้นพวก กลูโคส , acetate , succinate , pyruvate , lactate , oxalate , α -ketoglutarate , เอทานอล และ acetaldehyde

ลักษณะที่สองคือ มีการยับยั้งเมตาบอลิซึมของเซลล์ด้วยกลไกต่างๆ ดังนี้

➤ ซอร์เบทยังยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ของจุลินทรีย์ ซึ่งอาจนำไปสู่การทำลายกระบวนการที่สำคัญของเซลล์ เช่น กระบวนการถ่ายเทสารเข้าออกเซลล์ กระบวนการเมตาบอลิซึมของเซลล์ กระบวนการเจริญเติบโตและการแบ่งเซลล์ เอนไซม์ที่ถูกยับยั้งได้แก่ alcohol dehydrogenase , fumarase , enolase , aspartase , catalase , malate dehydrogenase , α -ketoglutarate dehydrogenase , succinic dehydrogenase และ ficin

➤ ซอร์เบทยับยั้งการถ่ายเทสารตั้งต้นเข้าสู่เซลล์ เพราะเมื่อซอร์เบทเปลี่ยนไปอยู่ในรูปกรดซอร์บิกจะละลายในไขมันได้ดี จึงอาจจะรบกวนกลไกการถ่ายเทสารตั้งต้น (เช่น กลูโคส หรือกรดอะมิโน) และการถ่ายเทอิเล็กตรอน

➤ ซอร์เบทยับยั้งการใช้สารอาหาร (nutrient uptake) ของเซลล์ โดยอาจจะเกิดจากการทำให้ proton motive force เป็นกลาง การยับยั้งระบบการถ่ายเทอิเล็กตรอน การยับยั้งการสังเคราะห์

ATP การยับยั้งเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทสาร (transport enzyme) หรือการทำให้ปริมาณ ATP ลดลง

5.2.3 ความทนทานของจุลินทรีย์ต่อกรดซอร์บิกและซอร์เบท

เนื่องจากอาหารแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันทางด้านองค์ประกอบหรือส่วนผสมของอาหาร pH ค่าน้ำที่เป็นประโยชน์ วัตถุประสงค์ที่ใช้ กระบวนการผลิตอาหาร ชนิดและสายพันธุ์ของจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อน อุณหภูมิและบรรยากาศในการเก็บรักษาอาหาร ชนิดของภาชนะบรรจุ และความเข้มข้นของซอร์เบทที่ใช้ ดังนั้นประสิทธิภาพของซอร์เบทจึงมีน้อยแตกต่างกันในอาหารแต่ละชนิด

มีรายงานว่าในบางสภาวะ เชื้อยีสต์บางสายพันธุ์สามารถต้านทานต่อการยับยั้งของจุลินทรีย์ได้ ซึ่งได้แก่เชื้อยีสต์ในจีนัส *Zygosaccharomyces*, *Saccharomyces*, *Torulopsis*, *Brettanomyces*, *Candida* และ *Triganopsis* กลไกที่อาจเป็นไปได้ในการต้านทานของ osmotolerant yeast ต่อการยับยั้งของซอร์เบท คือ ในสภาวะที่มีค่าน้ำที่เป็นประโยชน์ต่ำเซลล์ยีสต์จะหดตัวและลดขนาดรูที่เมมเบรน เป็นผลให้ซอร์เบทซึมผ่านเข้าสู่เซลล์ยีสต์ได้ช้า หรือเซลล์ยีสต์อาจจะผลิตสารบางอย่างเช่น polyols เพื่อป้องกันไม่ให้ซอร์เบทยับยั้งการทำงานของเอนไซม์

โดยทั่วไปแล้วซอร์เบทสามารถยับยั้งเชื้อราได้เป็นอย่างดี ซอร์เบทร้อยละ 0.1 ก็เพียงพอต่อการยับยั้งเชื้อรา แต่ในบางสภาวะเชื้อราบางสายพันธุ์กลับสามารถเจริญเติบโตและเมตาบอลิซึมซอร์เบทให้เป็นแหล่งคาร์บอนได้ ดังเช่นในเนยแข็งที่ใช้ซอร์เบทความเข้มข้นสูงถึงร้อยละ 0.18 - 1.20 พบว่าเชื้อราจีนัส *Penicillium* สามารถเจริญเติบโตและเมตาบอลิซึมซอร์เบทได้สารประกอบ 1,3-Pentadiene ซึ่งเป็นสารระเหยมีกลิ่นคล้ายน้ำมันก๊าด สีพลาสติก หรือไฮโดรคาร์บอน เชื้อราอื่นๆ ที่สามารถสลายซอร์เบทได้ ได้แก่เชื้อราในจีนัส *Aspergillus*, *Fusarium*, *Mucor* และ *Geotrichum* อย่างไรก็ตามไม่มีความสัมพันธ์ใดๆ ระหว่างการต้านทานของเชื้อราต่อซอร์เบทกับการสร้างสารพิษของเชื้อรา ปัจจัยที่มีผลต่อการสลายซอร์เบทด้วยเชื้อรา ได้แก่ ชนิดและสายพันธุ์ของเชื้อรา ปริมาณซอร์เบท ปริมาณเชื้อเริ่มต้น และชนิดของสารตั้งต้น

นอกจากเชื้อราแล้ว แบคทีเรียบางสายพันธุ์ก็มีความทนทานต่อซอร์เบทและย่อยสลายซอร์เบทได้เช่นเดียวกันหากอยู่ในสภาวะที่เหมาะสม โดยเฉพาะแบคทีเรียที่ผลิตกรดแลคติก ในกรณีที่มีจำนวนเชื้อนี้สูงมากและเป็นอาหารที่ใช้ซอร์เบทน้อยกว่าความเข้มข้นที่ทำให้ลายเชื้อรา (sublethal concentrations) แบคทีเรียที่ผลิตกรดแลคติกจะย่อยสลายซอร์เบทไปเป็นสารประกอบพวก ethyl sorbate, 4-hexenoic acid, 1-ethoxyhexa-2,4-diene และ 2-ethoxyhexa-3-5-diene ซึ่งทำให้เกิดกลิ่นผิดปกติ ดังเช่นที่ผู้ผลิตไวน์มักจะพบกลิ่นผิดปกติเสมอๆ ในไวน์ที่ใช้ซอร์เบทและมีการปนเปื้อนของจุลินทรีย์สูง (Sofos and Busta, 1993)

5.3 ความเป็นพิษ

ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมมนุษย์และสัตว์สามารถเมตาบอไลซ์ซอร์เบทได้เช่นเดียวกับกรดไขมันชนิดอื่น เช่น กรดคาโปรอิก (caproic acid) และกรดบิวทีริก (butyric acid) โดยจะเกิดจากปฏิกิริยาเบต้าออกซิเดชัน (β -oxidation) หรือหากมีปริมาณซอร์เบทสูงๆ ก็เกิดจากปฏิกิริยาโอเมก้าออกซิเดชัน (ω -oxidation) ผลจากการออกซิเดชันอย่างสมบูรณ์จะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ และให้พลังงาน 6.6 กิโลแคลอรี/กรัม

ในการพิจารณาให้ซอร์เบทเป็นสารกันเสียที่ใช้ในอาหารได้จะต้องมีการวิจัยอย่างละเอียดถึงความเป็นพิษของสารนี้ นักวิทยาศาสตร์ได้ศึกษาความเป็นพิษของซอร์เบทต่อสัตว์ทดลองหลายชนิด โดยตรวจหาความเป็นพิษเฉียบพลัน ผลต่อกระบวนการเมตาบอลิซึม การก่อมะเร็ง และการก่อให้เกิดความผิดปกติต่อทารก โดยติดตามผลการเปลี่ยนแปลงทั้งในระยะสั้นและระยะยาว การวิจัยทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าซอร์เบทไม่มีอันตรายต่อสัตว์ทดลอง และมีความปลอดภัยสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุเจือปนอาหารอื่น ๆ จากการศึกษาความเป็นพิษเฉียบพลันของซอร์เบทต่อหนูพบว่า มีค่า LD_{50} (mean lethal dose) อยู่ระหว่าง 4.2 - 10.5 กรัม/กิโลกรัมน้ำหนักตัว เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่า LD_{50} ของเกลือแกง (sodium chloride) ซึ่งมีค่าเป็น 5 กรัม/กิโลกรัมน้ำหนักตัว สามารถพิจารณาได้ว่าซอร์เบทเป็นสารกันเสียที่มีอันตรายน้อยที่สุดชนิดหนึ่ง จากการศึกษาความเป็นพิษเรื้อรังในหนูทดลอง โดยให้หนูกินอาหารที่มีกรดซอร์บิคผสมอยู่ร้อยละ 10 ผลปรากฏว่าไม่มี ความผิดปกติเกิดขึ้นกับหนู และหนูบางตัวมีอัตราการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากหนูได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นจากการเมตาบอไลซ์กรดซอร์บิคนั่นเอง และมีรายงานว่า การใช้ซอร์เบทในอาหารก็ไม่ก่อให้เกิดมะเร็งหรือการผิดปกติในสัตว์ทดลอง (Sofos and Busta, 1993)

5.4 กฎหมายเกี่ยวกับการใช้กรดซอร์บิคและโปแตสเซียมซอร์เบทในอาหาร

ปัจจุบันนี้ซอร์เบทได้รับอนุญาตให้ใช้เป็นสารกันเสียในผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิดทั่วโลก และกำลังจะได้รับอนุญาตเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เป็นเพราะว่าซอร์เบทมีความเป็นพิษต่ำและมีคุณสมบัติที่ดีกว่าสารกันเสียชนิดอื่นนั่นเอง ในประเทศไทยมีประกาศของกระทรวงสาธารณสุขฉบับที่ 84 ณ วันที่ 25 ธันวาคม พ.ศ. 2527 อนุญาตให้มีโปแตสเซียมซอร์เบทในอาหารได้ในปริมาณสูงสุดไม่เกิน 1,000 มิลลิกรัม/น้ำหนักอาหาร 1 กิโลกรัม (กระทรวงสาธารณสุข, 2527)

ในประเทศสหรัฐอเมริกา กรดซอร์บิคและโปแตสเซียมซอร์เบทได้รับการพิจารณาว่าเป็นสารประกอบที่มีความปลอดภัย (Generally Recognized As Safe, GRAS) ต่อมนุษย์ และได้รับคำรับรองจากคณะกรรมการอาหารและยาแห่งสหรัฐอเมริกา (U.S. Food and Drug Administration) เป็นที่เรียบร้อยแล้ว ปัจจุบันอนุญาตให้ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารมากกว่า 80 ชนิด และอาจจะมีการอนุญาตให้ใช้ได้กับผลิตภัณฑ์อาหารทุกชนิดในอนาคต ตามข้อบังคับของ code of federal regulation เรื่องการใช้สารกันเสีย มีข้อกำหนดว่าอาหารที่มีการใช้โปแตสเซียมซอร์เบทหรือกรดซอร์บิคจะต้องมีการระบุไว้บนฉลากอาหารว่า "ใช้โปแตสเซียมซอร์เบท" หรือ "ใช้กรดซอร์บิค" และระบุวัตถุประสงค์ที่ใช้ เช่น "เพื่อรักษาความสด" "เพื่อยืดอายุการเก็บ" หรือ "เพื่อถนอมอาหาร"

องค์การอนามัยโลก (World Health Organization) ได้กำหนดปริมาณซอร์เบทที่ร่างกายรับได้สูงสุดคือ 25 มิลลิกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักตัว/วัน (Sofos and Busta, 1993)

5.5 การใช้ในอาหาร

มีการใช้กรดซอร์บิกและโปแตสเซียมซอร์เบทเป็นสารกันเสียในอาหารอย่างแพร่หลาย นอกจากจะใช้เพื่อถนอมอาหารสำหรับมนุษย์บริโภคแล้วยังมีการใช้ในอาหารสัตว์ เครื่องสำอาง ด้านเภสัชกรรม วัสดุหีบห่อ และผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับอาหารหรือร่างกายมนุษย์ ปัจจุบันมีการอนุญาตให้ใช้ซอร์เบทในผลิตภัณฑ์อาหารจำนวนมากกว่า 80 ชนิดวัตถุประสงค์หลักของการใช้ซอร์เบทในอาหารก็คือเพื่อยับยั้งเชื้อยีสต์และเชื้อรา โดยเฉพาะการใช้ในผลิตภัณฑ์นม ขนมอบ ผลิตภัณฑ์ผักและผลไม้ ผลิตภัณฑ์อิมัลชัน ผลิตภัณฑ์เนื้อ ผลิตภัณฑ์ปลา และขนมหวาน ดังแสดงในตาราง 2.6 แม้ว่าซอร์เบทจะมีประสิทธิภาพสูงในการป้องกันการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในอาหาร แต่ก็ต้องใช้ซอร์เบทในอาหารที่ผ่านกระบวนการผลิตที่สะอาดถูกสุขลักษณะ วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการผลิตต้องมีการปนเปื้อนของจุลินทรีย์น้อยที่สุด หากอาหารนั้นเสื่อมเสียแล้วการใช้ซอร์เบทก็ไม่มีประโยชน์เพราะซอร์เบทไม่สามารถปรับปรุงคุณภาพของอาหารที่เสื่อมเสียแล้วให้ดีขึ้นได้

การใช้ซอร์เบทปริมาณร้อยละ 0.02 - 0.3 จะไม่มีผลกระทบต่อคุณภาพของอาหาร แต่หากใช้ปริมาณสูงเกินกว่านี้อาจจะทำให้เกิดรสชาติแปลกปลอมในอาหารได้ แต่ในอาหารบางชนิดแม้ว่าจะใช้ซอร์เบทไม่มากคือเพียงร้อยละ 0.1 ผู้บริโภคบางคนสามารถรับรสชาติที่แปลกปลอมได้

ตาราง 2.6 การใช้ซอร์เบทในการยับยั้งจุลินทรีย์ในอาหาร

Products	Levels (%)
Dairy products: aged cheeses , processed cheeses, cottage cheese, cheese spreads, cheese dips, sour cream ,yogurt	0.05 - 0.30
Bekery products: cakes , cake mixes , pies ,fillings , mixes , icings , fudges , toppings , doughnuts	0.03 - 0.30
Vegetable products: fermented, pickles , olives, relishes , fresh salads	0.02 - 0.20
Fruit products: dried fruit, jams , jellies , juices, fruits salads , syrups, purees , concentrates	0.02 - 0.25
Beverages: still wines , carbonated and noncarbonated beverages , fruit drinks , low-calorie drinks	0.02 - 0.10
Food emulsions: mayonnaise , margarine , salad dressings	0.05 - 0.10
Meat and fish products: smoked and salted fish , dry sausages	0.05 - 0.30
Miscellaneous: dry sausage casings, semimoist pet foods, confectionery	0.05 - 0.30

ที่มา : Sofos and Busta (1993)

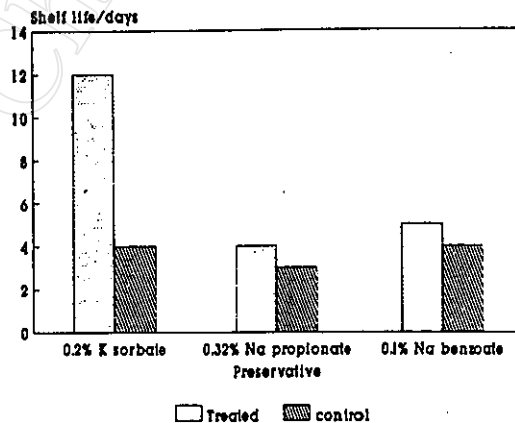
วิธีการใช้ซอร์เบทในอาหารมีอยู่หลายแบบทั้งการใส่โดยตรงในอาหาร การฉีดพ่น สารละลายซอร์เบท การจุ่มอาหารในสารละลายซอร์เบท การคลุกพร้อมกับผงแป้ง หรือการเติม

ลงในวัสดุหีบห่อหรือวัสดุที่ใช้เคลือบผิวอาหาร การเลือกวิธีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดอาจพิจารณาจากกระบวนการผลิตอาหาร ชนิดของอาหาร วัตถุประสงค์ที่ต้องการ เครื่องมือ และความสะอาด (Sofos and Busta, 1993)

งานวิจัยเกี่ยวกับการยืดอายุการเก็บผลิตภัณฑ์ปลาด้วยการใช้โปแตสเซียมซอร์เบท มีอยู่หลายเรื่องดังเช่น Geminder (1959) สามารถยืดอายุการเก็บปลารมควัน ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส โดยการฉีดพ่นหรือการจุ่มในสารละลายโปแตสเซียมซอร์เบทความเข้มข้นร้อยละ 5 หากทำการฉีดพ่นสารละลายลงบนปลาแล้วนำไปรมควันจะทำให้มีกรดซอร์บิกในผลิตภัณฑ์ปริมาณร้อยละ 0.04 และสามารถเก็บผลิตภัณฑ์ได้ 20 วัน ในขณะที่ตัวอย่างควบคุม (ไม่ใช้โปแตสเซียมซอร์เบท) เก็บรักษาได้ 11 วัน ส่วนการจุ่มปลาที่รมควันแล้วลงในสารละลายโปแตสเซียมซอร์เบทจะทำให้มีกรดซอร์บิกในผลิตภัณฑ์ปริมาณร้อยละ 0.03 และสามารถเก็บผลิตภัณฑ์ได้ 24 วัน ในขณะที่ตัวอย่างควบคุมเก็บรักษาได้ 10 วัน

จากผลการวิจัยของ Statham et al. (1985) พบว่าหากนำชิ้นปลาสดไปจุ่มในสารละลายโปแตสเซียมซอร์เบทความเข้มข้นร้อยละ 1.2 แล้วนำมาเก็บรักษาในสภาพสุญญากาศที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส พบว่าการใช้โปแตสเซียมซอร์เบทจะลดจำนวนแบคทีเรียลงอย่างชัดเจน ชิ้นปลาที่ไม่ได้จุ่มสารละลายโปแตสเซียมซอร์เบทมีอายุการเก็บ 6 วัน ส่วนชิ้นปลาที่จุ่มโปแตสเซียมซอร์เบทเก็บได้ 13 วัน และมีปริมาณโปแตสเซียมซอร์เบทโดยเฉลี่ยในชิ้นปลาสดเท่ากับร้อยละ 0.08

Amarasinghe and Jayaweera (1995) เปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารกันเสีย 3 ชนิดคือ โปแตสเซียมซอร์เบท โซเดียมโปรปิโอเนต และโซเดียมเบนโซเอท ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0.2 , 0.32 และ 0.1 ตามลำดับ ในการยืดอายุการเก็บผลิตภัณฑ์ tuna fish curry ของประเทศศรีลังกาซึ่งมีชื่อเรียกว่า Ambul Thiyal ที่อุณหภูมิห้อง (28 องศาเซลเซียส) ผลการทดลองแสดงในรูป 2.7 จะเห็นว่าตัวอย่างควบคุมมีอายุการเก็บ 3 - 4 วัน สารกันเสียทั้ง 3 ชนิดสามารถยืดอายุการเก็บผลิตภัณฑ์ได้ โดยโปแตสเซียมซอร์เบทมีประสิทธิภาพดีที่สุดคือทำให้อายุการเก็บของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นเป็น 12 วัน



รูป 2.7 ผลของสารกันเสียต่ออายุการเก็บของ Ambul Thiyal
ที่มา : Amarasinghe and Jayaweera (1995)

6. การบรรจุหีบห่อแบบปรับสภาพบรรยากาศ

แม้ว่าจะผลิตอาหารกึ่งแห้งอย่างเหมาะสมและมีคุณภาพดี อาหารกึ่งแห้งก็ยังสามารถเปลี่ยนแปลงได้ ทั้งทางด้านจุลินทรีย์และทางค่านเคมีดังได้อธิบายในส่วนแรกแล้ว เทคโนโลยีการบรรจุอาหารกึ่งแห้ง นับว่าเป็นปัจจัยสำคัญในการป้องกันการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของอาหารกึ่งแห้ง ผลิตภัณฑ์ควรบรรจุในภาชนะที่น้ำและออกซิเจนไม่สามารถผ่านเข้าออกได้เพื่อลดการเสื่อมเสียเนื่องจากจุลินทรีย์ เพราะว่าถ้าปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นจะทำให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตและแบ่งเซลล์ต่อไป ถ้าออกซิเจนผ่านเข้าไปในภาชนะบรรจุได้จะทำให้เกิดการออกซิเดชันของน้ำมันและไขมันส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เหม็นหืนได้ (ไพโรจน์, 2539) ปัญหาดังกล่าวสามารถควบคุมได้โดยการบรรจุอาหารกึ่งแห้งแบบปรับสภาพบรรยากาศและเก็บรักษาอาหารกึ่งแห้งที่อุณหภูมิต่ำ (Macrae et al., 1993) สำหรับปลาหมักกึ่งแห้ง หากนำมาบรรจุหีบห่อแบบปรับสภาพบรรยากาศย่อมจะคงคุณภาพที่ดีไว้ได้นาน มีอายุการเก็บเพิ่มขึ้น และสามารถส่งปลาหมักกึ่งแห้งไปจำหน่ายในท้องที่ที่ไกลออกไปได้

การบรรจุหีบห่อแบบปรับสภาพบรรยากาศ เป็นการบรรจุอาหารในภาชนะปิดสนิทโดยมีการปรับสภาพบรรยากาศภายในภาชนะนั้น เช่น ปรับปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซออกซิเจน ก๊าซไนโตรเจน และไอน้ำ วิธีปรับสภาพบรรยากาศภายในภาชนะสามารถทำได้ 2 แบบ คือ แบบสูญญากาศและแบบพ่นก๊าซ สำหรับแบบสูญญากาศจะใช้เครื่องสูบล้างอากาศกำจัดอากาศภายในภาชนะออกแล้วจึงปิดผนึกให้เรียบร้อย ส่วนแบบพ่นก๊าซจะใช้เครื่องสูบล้างอากาศกำจัดอากาศภายในภาชนะออก จากนั้นพ่นก๊าซที่ต้องการเข้าไป แล้วจึงปิดผนึกภาชนะ (Macrae et al., 1993) สภาพบรรยากาศภายในภาชนะจะเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา โดยการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับปัจจัยต่างๆ เช่น การหายใจของผลิตภัณฑ์ถ้าเป็นการบรรจุผักและผลไม้ การเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีและการซึมผ่านของก๊าซ (Parry, 1993) สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาถึงการบรรจุปลาหมักกึ่งแห้งแบบสูญญากาศและแบบพ่นก๊าซด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

6.1 วัตถุประสงค์ของการบรรจุหีบห่อแบบปรับสภาพบรรยากาศ

วัตถุประสงค์ของการบรรจุหีบห่อแบบปรับสภาพบรรยากาศผลิตภัณฑ์อาหารจะแตกต่างกันออกไปบ้างขึ้นกับชนิดของผลิตภัณฑ์ แต่ก็มีเป้าหมายหลักเหมือนกันคือเพื่อชะลอหรือป้องกันการเสื่อมเสียคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารนั้นก่อนเวลาอันควร สามารถจำแนกวัตถุประสงค์ออกได้เป็น 6 ประการที่สำคัญคือ

1. ชะลอหรือป้องกันการเกิดปฏิกิริยาเคมีในอาหาร

ปฏิกิริยาเคมีในอาหารที่สำคัญคือปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งเมื่อเกิดกับน้ำมันและไขมัน จะทำให้อาหารเหม็นหืน เมื่อเกิดกับวิตามินจะทำให้คุณค่าทางอาหารลดลง การชะลอหรือป้องกันการเกิดปฏิกิริยานี้จะต้องกำจัดก๊าซออกซิเจนภายในบรรยากาศล้อมรอบอาหารออกไป

2. ชะลอหรือป้องกันการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุให้อาหารเสื่อมเสียคุณภาพ

สภาพบรรยากาศที่ไร้ก๊าซออกซิเจนและมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากๆ จะช่วยชะลอหรือป้องกันการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้ โดยทั่วไปจะใช้ได้ผลดีกับแบคทีเรียที่ต้องการอากาศและเชื้อรา ส่วนเชื้อยีสต์นั้นผลไม่ค่อยเด่นชัด

3. ป้องกันการเสีयरูปร่างของผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์ที่ไวต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันต้องบรรจุให้อยู่ในสภาพไร้ออกซิเจน แต่ผลิตภัณฑ์บางประเภทไม่เหมาะที่จะใช้การบรรจุแบบสุญญากาศ เนื่องจากจะทำให้เกิดความเสียหายแก่ผลิตภัณฑ์ เช่น การแตกหักของชั้นมันฝรั่งทอด การยุบตัวของขนมปัง เป็นต้น จึงควรใช้การบรรจุแบบปรับสภาพบรรยากาศเพื่อป้องกันการเสีयरูปร่างของผลิตภัณฑ์

4. รักษาสีแดงของเนื้อ

การบรรจุเนื้อไว้ในบรรยากาศที่มีก๊าซออกซิเจนมาก ๆ จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxygenation) ของเม็ดสีในเนื้อที่เรียกว่าไมโอโกลบิน (myoglobin) ได้สารชื่อออกซิไมโอโกลบิน (oxymyoglobin) ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เนื้อมีสีแดงสดที่ผู้บริโภคต้องการ

5. ชะลออัตราการหายใจของพืช

เนื่องจากพืชจะหายใจช้าลงเมื่อความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนในบรรยากาศลดลง หรือความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น และเมื่อพืชหายใจช้าลงการเสื่อมเสียคุณภาพของพืชก็จะช้าลงด้วย

6. ชะลอหรือป้องกันการเจริญเติบโตและการฟักไข่ของหนอน แมลงต่าง ๆ

ในสภาพไร้ออกซิเจน หนอน ไข่หนอน และแมลงต่าง ๆ ที่อาจติดอยู่ในอาหารจะไม่สามารถเจริญเติบโตได้ (งามทิพย์, 2537)

สำหรับวัตถุประสงค์ของการบรรจุหีบห่อปลาเส้นกึ่งแห้งแบบปรับสภาพบรรยากาศในงานวิจัยนี้ได้แก่วัตถุประสงค์ในข้อ 1-3

6.2 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

6.2.1 คุณสมบัติของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

1.สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์บางชนิดได้จึงเรียกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ว่าเป็น bacteriostatic หรือ fungistatic agent คือจะยับยั้งการเจริญเติบโตเท่านั้นมิได้ทำลายหรือฆ่าจุลินทรีย์ โดยทั่วไปจะต้องใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นอย่างน้อยร้อยละ 20 ณ สมดุลบรรยากาศ พบว่าผลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์เป็นแบบเลือกเฉพาะ (selective effect) ดังนี้คือ

➢ แบคทีเรียที่ต้องอากาศและเชื้อราทั่วไปไม่สามารถเจริญเติบโตในบรรยากาศที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมาก

➢ แบคทีเรียที่ต้องการอากาศน้อย ๆ (slightly aerobic bacteria) เช่น *Lactobacillus* ยังคงเจริญเติบโตได้ดีในสภาวะที่มีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาก

➢ สำหรับแบคทีเรียที่เจริญได้ทั้งในสภาพมีหรือไม่มีอากาศ (facultative anaerobic bacteria) พบว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นสูง ๆ ได้ช่วยยับยั้งการเจริญเติบโต บางกรณียังช่วยเร่งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียเหล่านี้ด้วย

➢ แบนคที่เรียที่ไม่ต้องการอากาศเจริญเติบโตได้ดีในสภาพไร้ออกซิเจนแต่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 10-20 แต่ถ้าเพิ่มก๊าซออกซิเจนเล็กน้อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียเหล่านี้ได้บางชนิด

➢ สำหรับยีสต์ ก่อนข้างจะทนทานต่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี จึงยังคงพบการเจริญเติบโตของยีสต์ในสภาวะที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูง ๆ

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ได้ก็ต่อเมื่อจุลินทรีย์เหล่านั้นอยู่ในช่วงการเตรียมพร้อมเพื่อแบ่งตัว (lag phase) โดยจะทำให้ช่วงเวลานี้เพิ่มขึ้น เป็นผลให้การแบ่งตัวเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์เป็นไปได้ช้ายิ่งขึ้น ผลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มมากยิ่งขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง หรือเมื่อความดันของบรรยากาศเพิ่มขึ้น

2. สามารถละลายได้ดีในน้ำและไขมัน ซึ่งการละลายนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง โดยสามารถสังเกตได้จากการยุบตัวของภาชนะบรรจุ เนื่องจากความดันภายในภาชนะบรรจุต่ำกว่าความดันบรรยากาศภายนอกภาชนะบรรจุ นอกจากนี้หากการละลายสูงมากพอจะทำให้เกิดกลิ่นรสของกรดในผลิตภัณฑ์อาหารได้ จึงต้องจำกัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้เหมาะสมกับประเภทของผลิตภัณฑ์อาหารที่จะบรรจุ (งามทิพย์, 2537)

6.2.2 กลไกการยับยั้งจุลินทรีย์

Genigeorgis รายงานว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถยับยั้งกิจกรรมของจุลินทรีย์ได้เพราะว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถซึมเข้าสู่ผิวอาหารเกิดเป็นกรดคาร์บอนิก (carbonic acid) ตามด้วยการเกิดไอออน (ionisation) และทำให้ pH ของอาหารลดลง Farber ได้อธิบายกลไกที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีผลต่อเซลล์จุลินทรีย์ คือ

- เปลี่ยนแปลงการทำงานของเซลล์เมมเบรน การดูดซึมและการใช้สารอาหาร
- ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ของจุลินทรีย์ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง
- เปลี่ยนแปลงความเป็นกรดเป็นด่างภายในเซลล์จุลินทรีย์
- เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของโปรตีน (Phillips, 1996)

6.3 วัสดุหีบห่อ

การเลือกวัสดุหีบห่อเป็นปัจจัยสำคัญประการหนึ่งสำหรับการบรรจุหีบห่อแบบปรับสภาพบรรยากาศให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ ในงานวิจัยนี้ใช้ถุงบรรจุพลาสติกทั้งแก๊สเป็นฟิล์มพลาสติก 2 ชั้น ชั้นในเป็นโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นตรง (Linear Low Density Polyethylene, LLDPE) ความหนา 54 ไมครอน ชั้นนอกเป็นไนลอน (nylon) ความหนา 18 ไมครอน ฟิล์มทั้งสองชั้นนี้เชื่อมติดกันด้วยกาวที่มีความหนา 8 ไมครอน ดังนั้นถุงพลาสติกนี้มีความหนารวมเป็น 80 ไมครอน (บริษัท ที.อาร์.ซี. โพลีแพค จำกัด, 2538)

6.3.1 โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น

ในบรรดาพลาสติกที่ใช้สำหรับการบรรจุหีบห่อ โพลีเอทิลีน (polyethylene) เป็นพลาสติกที่มีการใช้กันมากที่สุดและในขอบเขตที่กว้างขวาง ไม่ว่าสินค้าจะเป็นอาหารสด ผลิตภัณฑ์อาหาร และผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมต่าง ๆ โพลีเอทิลีนมีหลายชนิดโดยแบ่งตามความหนาแน่นดังนี้

High Density Polyethylene (HDPE)	มีความหนาแน่น 0.941-0.959 กรัม/มิลลิเมตร
Medium Density Polyethylene (MDPE)	มีความหนาแน่น 0.926-0.940 กรัม/มิลลิเมตร
Low Density Polyethylene (LDPE)	มีความหนาแน่น 0.910-0.925 กรัม/มิลลิเมตร
Linear Low Density Polyethylene (LLDPE)	มีความหนาแน่น 0.910-0.925 กรัม/มิลลิเมตร

- คุณสมบัติของโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น

- โปร่งแสง
- นิ่มและยืดหยุ่น
- มีความเหนียวสูง
- มีความทนทานต่อสารเคมีจำพวกกรด ต่างได้ดี
- ดูดซึมน้ำได้ต่ำมาก
- ป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้ดี
- ป้องกันการซึมผ่านของก๊าซได้ดี
- ป้องกันการซึมผ่านของไขมันและน้ำมันได้ดี
- ปิดผนึกด้วยความร้อนได้ดี สามารถปิดผนึกผ่านสิ่งสกปรกหรือขณะฟิล์มเปียกน้ำได้
- ใช้ได้เหมาะสมกับอุณหภูมิตั้งแต่ - 40 ถึง 80 องศาเซลเซียส
- มีความคงรูปต่ำ
- มีความปลอดภัย สามารถใช้กับอาหารและยาได้

- การใช้งาน

- ถุงบรรจุอาหาร เช่น ผักและผลไม้สด เนื้อสด ขนมบั้ง ลูกกวาด อาหารแช่แข็ง และอาหารแห้ง
- ถุงหิ้วเพื่อการขายปลีก
- ถุงสำหรับบรรจุสินค้าหนัก เช่น ผลผลิตเกษตร ข้าวสาร ปุ๋ย และชิ้นส่วนเครื่องจักร
- ถุงชั้นในของถุงกระดาษหรือกระสอบพลาสติกซึ่งใช้บรรจุอาหารสัตว์และปุ๋ย
- ถุงบรรจุสินค้าอุตสาหกรรมทั่วไป เช่น เสื้อผ้าสำเร็จรูป สิ่งทอ และกระดาษชำระ
- ฟิล์มหด (shrink film) และฟิล์มยืด (stretch film) ที่ต้องการความเหนียวสูง เช่น ใช้รัดสินค้าที่วางเรียงบนแท่นรองรับสินค้าเพื่อการขนถ่ายเป็นหน่วยใหญ่

➢ ใช้ร่วมกับวัสดุอื่น เช่น พลาสติกต่างชนิดกัน กระดาษ อะลูมิเนียม ในลักษณะของการประกบหรือการรีดร่วมหรือการเคลือบ เพื่อเสริมคุณสมบัติในการใช้งานให้เหมาะสม เช่น Polyethylene Terephthalate/LLDPE (PET/LLDPE) โดย LLDPE จะทำหน้าที่เป็นวัสดุเชื่อมประสานช่วยในการปิดผนึก ป้องกันไอน้ำ และเพิ่มความเหนียว

6.3.2 ไนลอน

ไนลอนหรือโพลีแอมไนด์ (polyamide) มีอยู่หลายชนิดโดยเรียกตามจำนวนอะตอมของคาร์บอนในสารตั้งต้น เช่น ไนลอน 6 และไนลอน 11 เป็นต้น ในกระบวนการผลิตฟิล์มสามารถใช้วิธีรีด และวิธีเป่า ซึ่งมักทำให้โมเลกุลจัดเรียงตัวกัน เรียกว่า oriented polyamide

- คุณสมบัติของไนลอน

- โปร่งใส
- มีความเหนียวสูงโดยเฉพาะอย่างยิ่งสามารถต้านแรงที่มทะเลและแรงดันทะเลได้สูง
- มีความคงรูป
- มีความทนทานต่อการขีดสีสูง
- มีความทนทานต่อสารเคมีจำพวกกรดและตัวทำละลายในเกณฑ์ดี แต่ไม่ทนทานต่อด่าง
- ดูดซึมน้ำได้สูงจึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาด การขุ่นมัวและสีเปลี่ยนได้เมื่อเก็บไว้นาน
- ป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้ดี
- ป้องกันการซึมผ่านของก๊าซได้ดีมากไม่ว่าจะเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซออกซิเจน และก๊าซไนโตรเจน
- ป้องกันการซึมผ่านของไขมันและน้ำมันได้สูง
- ปิดผนึกด้วยความร้อนได้ โดยใช้อุณหภูมิ 130 ถึง 180 องศาเซลเซียส
- ทนทานต่ออุณหภูมิทั้งร้อนจัดและเย็นจัด สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 160 องศาเซลเซียส และต่ำถึง - 40 องศาเซลเซียส
- ต้านทานการพับได้สูง

- การใช้งาน

ไม่นิยมใช้ฟิล์มไนลอนเดี่ยวๆ เนื่องจากดูดซึมน้ำได้ง่ายและอุณหภูมิในการปิดผนึกค่อนข้างสูง แต่จะใช้ร่วมกับพลาสติกชนิดอื่นไม่ว่าจะอยู่ในลักษณะของการประกบ การเคลือบ หรือการรีดร่วมก็ตาม โดยทำถุงบรรจุผลิตภัณฑ์อาหารและอุปกรณ์ทางการแพทย์ ตัวอย่างเช่น LLDPE/nylon/LDPE ใช้บรรจุอาหารที่ต้องการเก็บรักษาสภาพ กลิ่น และมีอายุการเก็บรักษานาน เช่น กาแฟสำเร็จรูป ปลาเค็ม เนย และผลิตภัณฑ์เนื้อแปรรูป เป็นต้น โดยบรรจุแบบธรรมดาหรือบรรจุแบบสุญญากาศก็ได้ นอกจากนี้ nylon/ionomer ยังใช้กับอาหารแช่แข็งที่ต้องการความเหนียว และสามารถป้องกันก๊าซและกลิ่นได้อย่างดีเช่นกัน (ศูนย์การบรรจุหีบห่อไทย, 2533)

6.4 ความปลอดภัยทางด้านจุลินทรีย์ของผลิตภัณฑ์อาหารที่บรรจุภายใต้บรรยากาศของก๊าซ

เชื้อจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารจำแนกเป็น 2 ประเภท คือ จุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเน่าเสีย และจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเป็นพิษ อาหารที่เน่าเสียอาจจะเป็นพิษหรือไม่ก็ได้ สามารถสังเกตอาหารเน่าเสียได้จากกลิ่น สี ที่ผิดปกติ การมีฟองอากาศ หรือการมีเมือก เป็นต้น ส่วนอาหารที่เป็นพิษอาจจะไม่แสดงอาการเน่าเสียก็ได้ซึ่งเป็นอันตรายมาก เนื่องจากผู้บริโภคไม่สามารถสังเกตได้จากลักษณะภายนอก จนกระทั่งเกิดอาการเจ็บป่วยหลังจากบริโภคอาหารนั้นๆ

โดยทั่วไปการบรรจุหีบห่อแบบปรับสภาพบรรยากาศที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความเข้มข้นสูงจะสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเน่าเสียได้ดี เนื่องจาก

ส่วนใหญ่จะเป็นแบคทีเรียที่ชอบอากาศ เช่น *Pseudomonas* เชื้อราเกือบทุกสายพันธุ์ ยกเว้นเชื้อราบางชนิดที่ทำให้อาหารเป็นพิษ เช่น *Aspergillus flavus* ที่สามารถสร้างสารพิษ aflatoxin สาเหตุของโรค turkey X รวมทั้ง *Alternaria ochraceus* สร้างสารพิษ ochratoxin และ *Penicillium islandicum* สร้างสารพิษที่เรียกว่า yellow rice เป็นต้น บางครั้งพบว่าเมื่อจุลินทรีย์เหล่านี้ไม่สามารถเจริญเติบโตได้จะทำให้เชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเป็นพิษกลับเจริญเติบโตได้ดีขึ้น เนื่องจากไม่มีการแข่งขันเพื่อความอยู่รอดระหว่างจุลินทรีย์ต่างชนิดกัน หรือไม่มีสารยับยั้งการเจริญเติบโต เช่น กรดที่จุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเน่าเสียบางสายพันธุ์สามารถสร้างขึ้นได้ระหว่างการเจริญเติบโต นอกจากนี้จุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเป็นพิษมักเจริญเติบโตได้ดีในสภาพไร้ออกซิเจน หรือมีก๊าซออกซิเจนปริมาณไม่มากนัก การใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ความเข้มข้นสูงบางครั้งก็ไม่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตและการสร้างสารพิษของจุลินทรีย์ประเภทนี้ได้

ด้วยเหตุนี้จึงมีการศึกษาค้นคว้าหาข้อเท็จจริงเกี่ยวกับความปลอดภัยในการบริโภคอาหารที่เก็บรักษาภายใต้บรรยากาศที่มีความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงๆ และแม้ว่าในปัจจุบันจะยังไม่มียานวิจัยใดที่ให้ข้อสรุปที่กระจ่างชัดได้ แต่ก็น่าจะสามารถใช้ในการกำหนดแนวทางปฏิบัติที่สำคัญได้ คือ ต้องควบคุมคุณภาพด้านจุลินทรีย์ของผลิตภัณฑ์อาหารก่อนบรรจุให้ดีที่สุด โดยมีการปนเปื้อนของจุลินทรีย์น้อยที่สุด และหากเป็นไปได้ควรมีการฆ่าเชื้อด้วยกระบวนการที่เหมาะสมก่อนการบรรจุ นอกจากนี้สำหรับอาหารที่เน่าเสียง่ายควรใช้อุณหภูมิในระหว่างการขนส่ง และการเก็บรักษาไม่เกิน 1 องศาเซลเซียส เนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเป็นพิษสายพันธุ์ที่สำคัญ เช่น *Clostridium botulinum* type E, *Yersinia enterocolitica*, *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes* และ *Aeromonas hydrophila* ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ที่อุณหภูมินี้

6.5 การใช้กับอาหาร

6.5.1 การบรรจุแบบสุญญากาศ

Sophonphong (1991) ได้ทดลองเก็บรักษาปลาเค็มอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบว่าปลาเค็มที่บรรจุในถุงแบบบรรยากาศปกติมีอายุการเก็บเพียง 4 – 6 สัปดาห์ แต่ปลาเค็มที่บรรจุในถุงแบบสุญญากาศมีอายุการเก็บเพิ่มขึ้นเป็น 12 สัปดาห์ โดยผลิตภัณฑ์มีลักษณะปรากฏดีกว่า และยังพบว่าการบรรจุแบบสุญญากาศสามารถลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันลงได้

Reddy et al.(1996) ได้ศึกษาอายุการเก็บเนื้อปลาสดที่ใส่เชื้อ *Clostridium botulinum* ปริมาณ 100 สปอร์/กรัมของเนื้อปลา ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส จากผลการประเมินทางด้านประสาทสัมผัสพบว่าเนื้อปลาสดที่บรรจุในถุงแบบบรรยากาศปกติมีอายุการเก็บ 10 วัน ส่วนเนื้อปลาสดที่บรรจุในถุงแบบสุญญากาศมีอายุการเก็บเพิ่มขึ้นเป็น 47 วัน และตรวจไม่พบสารพิษ botulin ในเนื้อปลา

Gray et al. (1984) ได้เพิ่มเชื้อ *Staphylococcus aureus* ในเนื้อไก่แล้วนำมาศึกษาผลของการบรรจุแบบบรรยากาศปกติ แบบสุญญากาศ และการใช้โปแตสเซียมซอร์เบท ที่มีต่อจำนวน *S. aureus* ในเนื้อไก่ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส พบว่าสำหรับเนื้อไก่ที่

จุ่มในสารละลายโปแตสเซียมซอร์เบทความเข้มข้นร้อยละ 1.0 และ 2.5 และบรรจุแบบสุญญากาศ จำนวน *S. aureus* จะเพิ่มขึ้นน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อไก่ที่บรรจุแบบบรรยากาศปกติ ส่วนเนื้อไก่ที่จุ่มในสารละลายโปแตสเซียมซอร์เบทความเข้มข้นร้อยละ 5.0 และบรรจุแบบสุญญากาศ พบว่าจำนวน *S. aureus* จะลดลงไปในระหว่างการเก็บรักษา

6.5.2 การบรรจุแบบพ่นก๊าซ

Readdy et al. ศึกษาการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ความเข้มข้นสูงในการเก็บรักษาปลาสด และรายงานว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ละลายเข้าสู่เนื้อปลาจึงทำให้ภาชนะบรรจุแบบติด (collapse) กับเนื้อปลา ทำให้สีของเนื้อปลาเปลี่ยนไป pH ของเนื้อปลาลดลงซึ่งอาจจะเป็นผลให้ ความสามารถในการอุ้มน้ำของเนื้อปลาลดลงตามไปด้วย สังเกตได้ว่าน้ำในเนื้อปลาจะไหลออกมา Pastoriza et al. รายงานว่าปลา Hake สด ที่เก็บในสภาพที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 60 จะมีอายุการเก็บเป็น 2 เท่าของการเก็บในบรรยากาศปกติ และพบว่าการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ถูกยับยั้ง ปริมาณ total volatile base และ trimethylamine ลดลง และการเปลี่ยนแปลงของโปรตีนน้อยลง (Phillips, 1996)

Statham et al. (1985) ศึกษาวิธีเก็บรักษาชิ้นปลา Morwong สด ในถุง cryovac โดยเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส มีตัวชี้บ่งการเสื่อมเสียคือ pH จำนวนแบคทีเรีย กลิ่นปลา และการทดสอบชิม ได้ข้อสรุปจากการทดลองว่าการเก็บรักษาด้วยวิธีจุ่มชิ้นปลาในสารละลายโปแตสเซียมซอร์เบทความเข้มข้นร้อยละ 0.08 ร่วมกับการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 100 จะทำให้เก็บชิ้นปลาได้นานที่สุดคือสามารถเก็บได้ 20 วัน ส่วนการเก็บรักษาโดยการจุ่มชิ้นปลาในสารละลายโปแตสเซียมซอร์เบทเพียงอย่างเดียวทำให้เก็บชิ้นปลาได้เป็นเวลา 17 วัน และการเก็บรักษาโดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพียงอย่างเดียวจะทำให้เก็บชิ้นปลาได้ 13 วัน จะเห็นว่าการใช้โปแตสเซียมซอร์เบทร่วมกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะมีประสิทธิภาพในการยืดอายุการเก็บที่ดีที่สุด