

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กะเพรา

กะเพรมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Ocimum sanctum* L. วงศ์ Lamiaceae เป็นพืชล้มลุกขนาดเล็กที่แตกกิ่งก้านสาขา ใบรูปรีปลายใบมนหรือแหลม โคนใบแหลม ขอบใบจักเป็นฟันเลื่อย ใบปกคลุมด้วยขนนูนทั้งสองด้าน ดอกเป็นช่อที่ปลายยอด สีขาวแกมม่วงแดง กะเพราเป็นพืชสวนครัว กะเพราเป็นที่ปลูกกันทั่วไปมีอยู่ 2 ชนิด คือ กะเพราขาวและกะเพราแดง ซึ่งเรียกชื่อตามสีของก้านใบและก้านดอก โดยกะเพราขาวนิยมนำมาปรุงอาหารคาว ส่วนกะเพราแดงจะมีความฉุนแรงกว่า มักนำไปทำยาและเข้าเครื่องยาต่างๆที่เป็นยาสมุนไพร ดังแสดงในภาพที่ 2.1 ในเรื่องพันธุ์นั้นยังไม่มีการศึกษาปรับปรุงพันธุ์หรือคัดเลือกพันธุ์อย่างจริงจังในทางวิชาการ (อรพรรณ, 2545; สุนทร, 2540)



ภาพที่ 2.1 กะเพราแดง

ที่มา : ปรีชา (2554)

กะเพรา จัดว่าเป็นพืชสารพัดประโยชน์สำหรับคนไทย (สถาบันวิจัยโภชนาการ มหาวิทยาลัยมหิดล และมูลนิธิโตโยต้าประเทศไทย, 2545) ซึ่งกะเพรามีคุณสมบัติหลายอย่าง เช่น สรรพคุณทางยา ที่ช่วยแก้อาการคลื่นไส้ อาเจียน ท้องอืด ท้องเฟ้อ จุกเสียด แก้อาเจียน ขับเหงื่อ ขับพยาธิ ขับน้ำมันในสตรีหลังคลอด ลดไข้ รักษา กลากเกลื้อน และต้านเชื้อรา เป็นต้น และใช้ในการปรุงอาหาร สารอาหารที่มีอยู่ในกะเพรา เช่น เบต้าแคโรทีน ซึ่งช่วยป้องกันโรคมะเร็งและโรคหัวใจขาดเลือด โดยในใบกะเพราแดงมีปริมาณเบต้าแคโรทีน 7,875 ไมโครกรัมต่อ 100 กรัม ซึ่งสูงกว่าแครอทและตำลึงที่มีเบต้าแคโรทีน 6,994 และ 5,190 ไมโครกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ (คณะกรรมการสวัสดิการกรมอนามัย, 2535) นอกจากนี้ใบกะเพรายังมีแคลเซียมและฟอสฟอรัสสูงมาก ซึ่งจะช่วยให้บำรุงกระดูกให้แข็งแรง ดังนั้นการปรุงอาหารที่มีส่วนประกอบของใบกะเพราอยู่ด้วยก็จะช่วยให้ได้สารอาหารค่อนข้างครบครัน (สุนิสา, 2545; สุนทรี, 2540)

ข้อมูลทางวิทยาศาสตร์

เมื่อนำใบกะเพรามากลั่นด้วยไอน้ำจะได้น้ำมันหอมระเหยสีเหลืองคล้ายน้ำมันกานพลู มีคุณสมบัติในการขับลมและมีฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ทั้งนี้ใบกะเพรามีน้ำมันหอมระเหยประมาณร้อยละ 0.36 ประกอบด้วยสารสำคัญ คือ Camphor Cined, Eshugenol, Limonene, Pinene, Terpieol, Ocimol, Linalool และกรดอินทรีย์หลายชนิด จากการทดลองพบว่าน้ำมันหอมระเหยมีฤทธิ์ขับลม ลดการบีบตัวของลำไส้ และสาร Eugenol มีฤทธิ์ขับน้ำดี ช่วยย่อยไขมันและลดอาการจุกเสียด ใบกะเพราเป็นพืชที่มีวิตามินเอและฟอสฟอรัสค่อนข้างสูง รวมทั้งวิตามินซี เกลิโอแรและวิตามินอื่นๆ จึงเหมาะที่จะนำมาประกอบอาหารได้หลายประเภท (ฉัฐฉา และอารยา, 2548)

รสและสรรพคุณทางยา

ความเผ็ดร้อนเป็นยาตั้งธาตุ แก้ปวดท้อง ท้องขึ้น จุกเสียด ใช้แต่งกลิ่นรสได้ โดยเฉพาะกะเพราแดงมีสรรพคุณทางยา คือ ใช้แก้ท้องขึ้น ท้องเฟ้อ ขับลม หากคั้นน้ำกะเพราแดงสม้าสมอระบบทางเดินอาหารจะปกติ นอกจากนี้ยังสามารถใส่ในแกงเลียงให้สตรีที่คลอดบุตรแล้วรับประทานเพื่อช่วยขับลม ทำให้เกิดความสบายท้อง และทำให้กระเพาะอาหาร ลำไส้ทำหน้าที่อย่างปกติ แก้ท้องเฟ้อได้ดีมาก

ส่วนที่เป็นยา ใบสดหรือแห้งช่วงเวลาในการเก็บเป็นยาต้องเป็นใบที่สมบูรณ์เต็มที่ซึ่งนิยมใช้กะเพราแดงมากกว่ากะเพราขาว หรือใช้ทั้งต้น เรียกว่า กะเพราทั้งห้า คุณค่าทางโภชนาการของกะเพราแดงในส่วนที่รับประทานได้ 100 กรัม แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณค่าทางโภชนาการของกะเพราแดงในส่วนที่รับประทานได้ 100 กรัม

คุณค่าทางโภชนาการ	ปริมาณ (ต่อ 100 กรัม ส่วนที่รับประทานได้)	
พลังงาน	4.1	กิโลแคลอรี
โปรตีน	4.2	กรัม
ไขมัน	0.5	กรัม
คาร์โบไฮเดรต	4.8	กรัม
กากหรือเส้นใยอาหาร	1.3	กรัม
แคลเซียม	25	กรัม
ฟอสฟอรัส	28.7	กรัม
เหล็ก	15.1	กรัม
วิตามินเอ	13,222	หน่วย
วิตามินบี 1	0.04	มิลลิกรัม
วิตามินบี 2	0.34	มิลลิกรัม
ไนอะซิน	1.8	มิลลิกรัม
วิตามินซี	25	มิลลิกรัม

ที่มา : คณะกรรมการสวัสดิการกรมอนามัย (2535)

องค์ประกอบของสารแอนติออกซิแดนทึนกะเพราแห้ง 100 กรัม

ประกอบด้วย เบต้าแคโรทีน 5.10 มิลลิกรัม แซนโทฟิลล์ 3.18 มิลลิกรัม วิตามินซี 9.25 มิลลิกรัม วิตามินอี 0.02 มิลลิกรัม แทนนิน 40.75 มิลลิกรัม สารประกอบฟีนอลิก 91.83 มิลลิกรัม (นวลศรี และ อัญชญา, 2545)

2.2 สารแคโรทีนอยด์

แคโรทีนอยด์เป็นสารที่อยู่ในคลอโรพลาสต์ (chloroplast) ถือเป็นรงควัตถุที่เกี่ยวข้องในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (photosynthesis) ของพืช ในธรรมชาติพบว่า แคโรทีนอยด์จะอยู่ร่วมกับคลอโรฟิลล์ เพื่อเพิ่มความเสถียร (Bauernfeind, 1981) ในรูป pigment-protein complex ภายในคลอโรพลาสต์ โดยเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนอยู่ 40 อะตอม สูตรโครงสร้างพื้นฐานของแคโรทีนอยด์ จัดเป็นสารประกอบในกลุ่มเทอร์พีน (terpene group) เกิดจากหมู่ไอโซพรีน 8 หน่วย ซึ่งเป็นสารประกอบแอลคีน (alkene) ที่มีพันธะคู่จำนวนมากใน

โมเลกุลมาต่อเรียงกันเป็นสายยาว มีลักษณะที่สำคัญคือ 2 พันธะคู่จะถูกแบ่งโดยพันธะเดี่ยว และมีการเชื่อมต่อกับหมู่เมทิล โดยการเชื่อมต่อระหว่างหมู่ไอโซพรีนในโครงสร้างมี 2 แบบ คือ แบบหัวโมเลกุลต่อท้ายโมเลกุล (head to tail) และท้ายโมเลกุลต่อท้ายโมเลกุล (tail to tail) ซึ่งการเชื่อมต่อระหว่างหมู่ไอโซพรีนของแบบที่ 2 จะพบที่บริเวณส่วนกลางของในโครงสร้างโมเลกุลของแคโรทีนอยด์ (Gross, 1987)

นอกจากนี้โครงสร้างโมเลกุลของสารในกลุ่มแคโรทีนอยด์ยังประกอบด้วย วงแหวนที่มีคาร์บอนอยู่ 5 อะตอม หรือ 6 อะตอม (ส่วนใหญ่พบ 6 อะตอม) เป็นแบบวงแหวน (cyclic) โดยต่ออยู่ที่ปลายของโครงสร้างด้านใดด้านหนึ่ง หรือทั้งสองด้านของโครงสร้าง ตัวอย่างเช่น เบต้าแคโรทีน แอลฟาแคโรทีน ไวโอเลทริน (violerythrin) และอาจมีอนุพันธ์อื่นๆที่มีออกซิเจนอะตอมมาเกาะอยู่ด้วย ได้แก่ หมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl) คีโต (keto) อีพอกซี (epoxy) เมทอกซี (methoxy) หรือหมู่กรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic group) เช่น ลูทีน (lutein) (Britton, 1995)

ลักษณะการเชื่อมต่อกันของหมู่ไอโซพรีน ทำให้เกิดความสมมาตรของโครงสร้างโมเลกุลของแคโรทีนอยด์ และพันธะคู่ในโครงสร้างโมเลกุลเกิดการหมุน หรือเปลี่ยนตำแหน่งของพันธะ (rotation) ในโครงสร้างได้ (Handelman *et al.*, 1996) ทำให้สารในกลุ่มแคโรทีนอยด์สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบ geometric ได้หลายไอโซเมอร์ คือ *cis-trans* isomer โดย *trans* isomer ทั้งในรูปแบบ *cis* form และ *trans* form จะมีความคงตัวสูง เช่น เบต้าแคโรทีน ในธรรมชาติจะพบรูป *trans* ประมาณร้อยละ 90

สมบัติทางเคมีและกายภาพของแคโรทีนอยด์

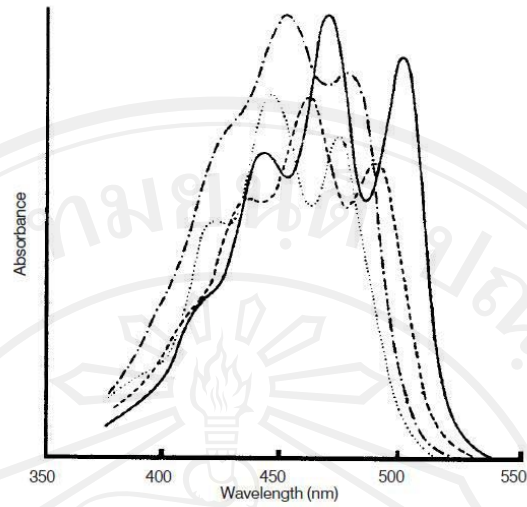
แคโรทีนอยด์มีสมบัติทางเคมีและกายภาพที่สำคัญ ดังนี้

1. ความสามารถในการละลาย

แคโรทีนอยด์เป็นไลโปฟิลิก (lipophilic) ซึ่งจะไม่สามารถละลายได้ในน้ำ แต่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น อะซิโตน (acetone) แอลกอฮอล์ (alcohol) เอทิลอีเทอร์ (ethyl ether) คลอโรฟอร์ม (chloroform) และเอทิลอะซิเตต (ethyl acetate) โดยแคโรทีนอยด์สามารถละลายได้อย่างรวดเร็วในปิโตรเลียมอีเทอร์ (petroleum ether) เฮกเซน (hexane) และทอลูอิน (toluene) ส่วนแซนโทฟิลสามารถละลายในเมทานอล (methanol) และเอทานอล (ethanol) ได้ดี (Rodriguez-Amaya, 2001)

2. การดูดกลืนแสง

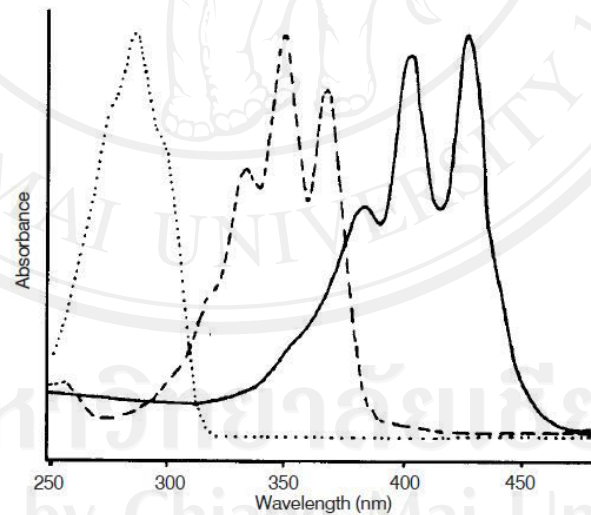
ระบบ conjugated double-bond ประกอบกันขึ้นเป็นโครโมฟอร์ (chromophore) ให้สเปกตรัมที่ดูดกลืนแสงในช่วงที่มองเห็นได้ ทำให้แคโรทีนอยด์มีสี ซึ่งใช้เป็นหลักพื้นฐานในการบ่งชี้ และหาปริมาณของแคโรทีนอยด์ ในการวิเคราะห์แคโรทีนอยด์ที่ระดับต่างๆ สามารถศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีหรือการสูญเสียแคโรทีนอยด์ที่เวลาต่างๆ ทำให้ทราบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างหรือการสลายตัวขึ้น ดังนั้นสเปกตรัมในช่วงที่มองเห็นได้และอัลตราไวโอเล็ตจึงใช้ในการบ่งชี้การสลายตัวของแคโรทีนอยด์ ช่วงความยาวคลื่นที่ดูดกลืนได้มากที่สุด (λ_{\max}) และรูปร่างของสเปกตรัมเป็นสิ่งที่แสดงลักษณะของโครโมฟอร์ ทั้งนี้แคโรทีนอยด์ส่วนใหญ่จะดูดกลืนแสงได้มากที่สุดที่ 3 ช่วงความยาวคลื่น ทำให้เกิดเส้นกราฟที่มี 3 ยอด ดังภาพที่ 2.2 โดยเมื่อจำนวน conjugated double-bond มีค่ามากขึ้น ค่า λ_{\max} ก็จะสูงขึ้นด้วย ดังนั้นไลโคพีนซึ่งเป็นแคโรทีนอยด์แบบอะไซคลิกที่ไม่อิมตัวสูงที่สุด โดยมี 11 conjugated double-bond และมีสีแดง จะดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 444 470 และ 502 นาโนเมตร ตามลำดับ แคโรทีนอยด์จะต้องมี conjugated double-bond อย่างน้อย 7 แห่ง จึงจะมีสีที่เห็นได้ชัดเจน เช่น ซิกมาแคโรทีน ซึ่งเป็นแคโรทีนอยด์แบบอะไซคลิกที่มี 7 conjugated double-bond มีสีเหลือง และดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 378 400 และ 425 นาโนเมตร (ภาพที่ 2.3) ซึ่งต่ำกว่าไลโคพีน ส่วนไฟโตอีน และไฟโตฟลูอิน ซึ่งมี 3 และ 5 conjugated double-bond ตามลำดับนั้นจะไม่มีสี (Rodriguez-Amaya, 2001)



— ไลโคพีน --- แกมมาแคโรทีน -.- เบต้าแคโรทีน แอลฟาแคโรทีน

ภาพที่ 2.2 เส้นกราฟการดูดกลืนแสงในช่วงที่มองเห็นได้ของไลโคพีน แกมมาแคโรทีน เบต้าแคโรทีน และแอลฟาแคโรทีนในอีเทอร์ไดเอทิล

ที่มา: Rodriguez-Amaya (2001)



— ซิกมาแคโรทีน --- ฟิโตฟลูอีน ฟิโตอีน

ภาพที่ 2.3 เส้นกราฟการดูดกลืนแสงของซิกมาแคโรทีน ฟิโตฟลูอีน และฟิโตอีน

ในอะซิโตน: เอทิลอะซิเตต: เมทานอล (85:10:5)

ที่มา: Rodriguez-Amaya (2001)

ประโยชน์ของแคโรทีนอยด์

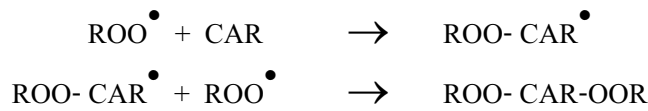
1. สีสผสมอาหาร

เนื่องจากโครงสร้างของแคโรทีนอยด์มี conjugated double-bond ที่ประกบกันขึ้นเป็นโครโมฟอร์ ทำให้แคโรทีนอยด์แต่ละชนิดดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกัน จึงมีผลต่อสีที่ปรากฏของผักผลไม้ที่มีสารแคโรทีนอยด์เป็นส่วนประกอบ โดยสารกลุ่มแคโรทีนอยด์จะถูกนำไปใช้เป็นสีผสมอาหาร เช่น เบต้าแคโรทีน (β -carotene) แซนโทฟิลล์ (xanthophyll) เบต้า-อะโป-8'-แคโรทีนอล (β -apo-8'-carotenal) และแคนทาแซนทิน (canthaxanthin) ในประเทศสหรัฐอเมริกาอนุญาตให้ใช้สารทั้ง 4 ชนิดผสมอาหารได้ (Gordon and Bauernfeind, 1982) ซึ่งสารในกลุ่มนี้จะให้สีเหลือง-ส้ม และส้ม-แดงแก่ผลิตภัณฑ์อาหาร

แคโรทีนอยด์สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น การใช้เป็นสีผสมในเนยเทียม เครื่องดื่มประเภทต่างๆ ผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ รวมทั้งลูกอมและไอศกรีม ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอางมีการใช้แคโรทีนอยด์เป็นสีผสมในลิปสติกแทนการใช้สีสังเคราะห์ นอกจากนี้ยังนำแคโรทีนอยด์ไปผสมกับอาหารสัตว์ เพื่อให้ผลิตภัณฑ์จากสัตว์นั้นมีสีที่ดูดีเป็นที่น่าสนใจต่อการบริโภค (นารินทร์, 2553)

2. สารต้านการออกซิเดชัน

สารต้านออกซิเดชัน (antioxidant) หมายถึง สารประกอบที่สามารถป้องกันหรือชะลอการเกิดกระบวนการออกซิเดชันได้ (ศรีวัฒนา, 2548) แคโรทีนอยด์เป็นสารต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เนื่องจากโครงสร้างของแคโรทีนอยด์มีพันธะคู่ที่สายของโมเลกุล ทำให้แคโรทีนอยด์มีความสามารถในการจับกับ singlet oxygen (1O_2) จึงป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจากออกซิเจนได้ โดยสารที่มีพันธะคู่มากยิ่งจับกับออกซิเจนได้ดี เช่น ไลโคพีน มีพันธะคู่ 11 คู่ จะจับ 1O_2 ได้ดีกว่าเบต้าแคโรทีน ที่มีพันธะคู่ 9 คู่ นอกจากนี้โครงสร้างของแคโรทีนอยด์ที่มีหมู่ฮอนพันธู์ของออกซิเจนมาเกาะ จะมีความสามารถในการจับ peroxy radical (ROO^\bullet) ตัวอย่างเช่น ไวโอลาแซนทินซึ่งมีหมู่ฮอนพันธู์กลุ่มคีโตและไฮดรอกซิลมาเกาะ จะจับกับ peroxy radical ได้ดีกว่าเบต้าแคโรทีนซึ่งไม่มีฮอนพันธู์ในโครงสร้างโมเลกุล (ภาพที่ 2.4) จากสมบัติดังกล่าว ทำให้มีการนำสารกลุ่มแคโรทีนอยด์มาใช้เป็นส่วนประกอบหรือเคลือบผิวอาหาร เพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชัน ทำให้อาหารมีอายุการเก็บรักษาที่นานขึ้น



ภาพที่ 2.4 ปฏิกิริยาระหว่างแคโรทีนอยด์กับ peroxy radical

ที่มา: Britton (1995)

3. สารโปรวิตามินเอ

ในปัจจุบันจากการศึกษาชนิดของแคโรทีนอยด์ พบว่ามีแคโรทีนอยด์มากกว่า 600 ชนิด แต่มีเพียง 50 ชนิดที่มีสมบัติเป็น โปรวิตามินเอ (Pro-vitamin A) โดยโดยเบต้าแคโรทีน 6 หน่วยจะเปลี่ยนเป็นวิตามินเอได้ 1 หน่วย (นิรยา, 2549) ซึ่งเบต้าแคโรทีนมีแอกติวิตีของวิตามินเอ สูงที่สุดเมื่อเทียบกับสารแคโรทีนอยด์ชนิดอื่น ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แอกติวิตีของวิตามินเอกลุ่มแคโรทีนอยด์

สารแคโรทีนอยด์	แอกติวิตี (%)
all-trans-β-carotene	100
9-cis-β-carotene	38
13-cis-β-carotene	53
all-trans-α-carotene	53
9-cis-α-carotene	13
13-cis-α-carotene	16
all-trans-cryptoxanthin	57
9-cis-cryptoxanthin	27
15-cis-cryptoxanthin	42
β-carotene 5,6-epoxide	21
β-carotene 5,8-epoxide	80
γ-carotene	42-50
β-zeacarotene	20-40

ที่มา : Crawley (1993)

ประโยชน์ของโปรวิตามินเอที่มีต่อร่างกายแบ่งออกเป็น 3 ด้านดังนี้

3.1 ด้านการมองเห็น

โปรวิตามินเอเข้าสู่ร่างกายจะเปลี่ยนแปลงไปเป็นสารสำคัญที่เรียกว่า เรตินอล (retinol) เรตินอลเป็นส่วนประกอบสำคัญของจอประสาทตา ซึ่งเป็นบริเวณที่มีเซลล์รับแสง 2 ชนิด คือ เซลล์รูปกรวย (cone cells) ที่แยกความแตกต่างของสี และเซลล์รูปแท่ง (rod cells) ที่เชื่อมเซลล์รูปแท่งจะมีสารสีม่วงแดงชื่อ โรดอปซิน (rhodopsin) ฝังตัวอยู่ สารชนิดนี้ประกอบด้วยโปรตีน ออปซิน (opsin) ร่วมกับสารเรตินอล (retinol) ซึ่งไวต่อแสง ทำให้สามารถปรับสายตาในที่ๆมีแสงสว่างไม่เพียงพอ หรือการเปลี่ยนจากที่สว่างไปสู่ที่มืด (อัญชลินทร์ และทศพร, 2553) จากความสามารถดังกล่าวทำให้เบต้าแคโรทีน ช่วยในการป้องกันความผิดปกติทางสายตา เช่น อาการตาบอดกลางคืน (night blindness) หรือที่ทางการแพทย์เรียกว่า Xerophthalmia ซึ่งเกิดจากการขาดวิตามินเอ โดยจะแสดงอาการ คือ กระจกตาเป็นแผล เยื่อตาขาวแห้งมีรอยย่นที่เรียกว่าเกร็ดกระดี่ เป็นต้น (ศิริวรรณ, 2545)

3.2 ด้านระบบสืบพันธุ์

ในเพศชายเมื่อโปรวิตามินเอถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของวิตามินเอ จะมีบทบาทในการเปลี่ยนสภาพของเซลล์เริ่มต้นเพื่อใช้สร้างอสุจิ โดยหากได้รับวิตามินเอน้อยจะส่งผลทำให้เยื่อหุ้มตัวต่อมลูกหมากและถุงเก็บน้ำอสุจิเกิดการเปลี่ยนแปลงผิดปกติ จนถึงการสร้างอสุจิจากเยื่อชั้นลิเทียม (germinal epithelium) ในเพศหญิงจะแสดงอาการบวมที่บริเวณชั้นใต้ผิวหนังภายในเซลล์ของท่อรังไข่ มดลูกรวมถึงช่องคลอด นอกจากนี้ยังเป็นสาเหตุทำให้เกิดการหลุดลอกของเยื่อหุ้มมดลูก ซึ่งกระทบต่อการเจริญของทารกและสายรกในระหว่างตั้งครรภ์ (อรชุน, 2539)

3.3 ด้านการเจริญเติบโตของกระดูกและเนื้อเยื่อผิว

สารโปรวิตามินเอในรูปของกรดเรติโนอิก (retinoic acid) ในร่างกายจะทำงานร่วมกับวิตามินดี ในการเสริมความแข็งแรงของกระดูก โดยกรดเรติโนอิกจะช่วยให้การควบคุมเซลล์ ออสทีโอคลาสต์ (osteoclast) ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงรูปร่างของกระดูกและฟันในร่างกายให้มีการเจริญเติบโตอย่างเป็นปกติ ส่วนสารโปรวิตามินเอในรูปของเรตินอล (retinol) จะทำหน้าที่ช่วยควบคุมรูปร่างและความแข็งแรงให้แก่เยื่อหุ้มผิวภายในเซลล์ นอกจากนี้การรับประทานอาหารที่มีสารโปรวิตามินเอเข้าไปยังสามารถป้องกันโรคทางผิวหนัง ในลักษณะความผิดปกติจากการเพิ่มจำนวนของเซลล์ชั้นผิว การเกิดผิวลักษณะแข็งหรือแห้ง จนถึงเกิดการหลุดลอก รวมถึงในส่วน

ของเนื้อเยื่อต่างๆที่เกิดจากภูมิคุ้มกันของร่างกายต่ำลง การอักเสบหรือติดเชื้อได้ง่าย ตลอดจนถึงความผิดปกติของเนื้อเยื่อในระบบทางเดินอาหารและระบบทางเดินหายใจ (อรชุน, 2539)

3.4 ลดอัตราการเกิดโรค

จากสมบัติต่างๆของสารกลุ่มแคโรทีนอยด์ จึงมีการวิจัยถึงชนิดของสารแคโรทีนอยด์เพื่อใช้ในการรักษาโรค ตัวอย่างเช่น เบต้าแคโรทีนช่วยในการลดอัตราการเป็นมะเร็งปอดของกลุ่มผู้ที่เสี่ยงต่อโรคนี (Wilhelm and Helmut, 1999) จากการศึกษาเกี่ยวกับโรคมะเร็งในผู้ที่รับประทานวิตามินเอสามารถลดความเสี่ยงในการเกิดโรคมะเร็งช่องปาก มะเร็งกระเพาะอาหาร รวมถึงมะเร็งปอด ซึ่งในการทดลองให้ปริมาณเบต้าแคโรทีนแก่กลุ่มคนที่เป็นโรคมะเร็งและคนที่สูบบุหรี่เป็นประจำ พบว่า ปริมาณเบต้าแคโรทีนในเลือดของคนที่เป็นโรคมะเร็งและคนที่สูบบุหรี่จัดจะต่ำกว่ากลุ่มคนที่ไม่เป็นโรคมะเร็ง(อรชุน, 2539) นอกจากนี้ยังพบว่าแคโรทีนอยด์มีอิทธิพลต่อระบบภูมิคุ้มกัน ควบคุมการเจริญและเปลี่ยนแปลงของเซลล์ และยังช่วยป้องกันการเจ็บป่วยจากโรคหัวใจอีกด้วย (Vince *et al.*, 1999)

การสลายตัวของแคโรทีนอยด์

แคโรทีนอยด์เป็นสารที่มีความไม่อิ่มตัวสูง จึงไวต่อการสลายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันและกระบวนการทางความร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเก็บรักษาภายใต้กระบวนการและสภาวะที่ไม่เหมาะสม (Bonnie and Choo, 1999)

1. ออกซิเจน

ออกซิเจนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบทางตรง (direct oxidation) เกิดขึ้นเมื่อแคโรทีนอยด์สัมผัสกับอาหาร ตำแหน่งของพันธะคู่ในโครงสร้างของโมเลกุลจะจับกับออกซิเจนเกิดเป็นสารสีน้ำตาลของไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxide) สารประกอบคาร์บอนิลและสารระเหยอื่นๆ อัตราการสูญเสียแคโรทีนอยด์จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน นอกจากจะขึ้นอยู่กับปริมาณของออกซิเจนแล้ว ความเข้มของแสง อุณหภูมิ และความร้อน ก็เป็นปัจจัยร่วมในการกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Crawley, 1993) การป้องกันการเกิดออกซิเดชันเนื่องจากอากาศสามารถป้องกันได้โดยการเติมสารต้านออกซิเดชัน เช่น BHA (butylated hydroxyanisole) BHT (butylated hydroxytoluene) TBHQ (tertiary butyl hydroquinone) และ PG (propyl gallate) เป็นต้น (นิธิยา, 2548) และการทำไฮโดรจิเนชัน คือ กระบวนการเติมไฮโดรเจนให้กับตำแหน่งพันธะคู่ภายในโมเลกุลของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว เพื่อเพิ่มความคงตัวและลดการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนลง อีกวิธีหนึ่งคือ การป้องกันการเข้าไปสัมผัสอากาศ เช่น การใช้บรรจุภัณฑ์ที่บรรจุ

แก๊สเฉื่อย การเก็บรักษาภายใต้สภาวะสุญญากาศ และการใช้น้ำมันเคลือบที่ผิวผลิตภัณฑ์ เป็นต้น (Bauernfeind, 1981)

2. กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว

กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเป็นตัวเร่งในปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบทางอ้อม (indirect oxidation) เนื่องจากกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวสามารถรวมตัวกับออกซิเจน และทำให้แคโรทีนอยด์ ถูกออกซิไดซ์ไปด้วย สามารถแก้ไขได้โดยใช้กรดไขมันชนิดอิ่มตัวในการผสมกับสารแคโรทีนอยด์ (นิธิยา, 2548)

3. ไอออนของโลหะ

หากในผลิตภัณฑ์แคโรทีนอยด์ประกอบด้วยไอออนของโลหะ ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน หรือมีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวรวมอยู่ด้วย พบว่า การเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ยิ่งรวดเร็วขึ้น เช่น ในมะเขือเทศ พบว่า หากมีโลหะทองแดงภายในส่วนประกอบ ผลิตภัณฑ์จะมีการเสื่อมสลายของไลโคพีนเพิ่มขึ้นจากเดิม 3.5 เท่า เนื่องจากโลหะทองแดงเป็นตัวเร่งการเกิดอนุมูลอิสระได้อย่างดี (นิธิยา, 2548)

4. แสงสว่าง

แสงสว่างเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และมีปริมาณออกซิเจนเป็นอีกปัจจัยหนึ่งซึ่งเกี่ยวข้อง โดยจะสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงของสี กลิ่น และรสชาติ แต่สามารถแก้ไขได้โดยการเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ทึบแสง (Morais *et al.*, 2001)

5. เอนไซม์

การเสื่อมสลายจากปฏิกิริยาออกซิเดชันเนื่องจากเอนไซม์ เป็นผลมาจากภายในเซลล์ แคโรทีนอยด์จะอยู่ในรูปซึ่งก่อพันธะเชิงซ้อนอยู่กับโมเลกุลของโปรตีน โดยเอนไซม์หลักที่มีผลต่อการเกิดออกซิเดชันมีอยู่ 3 ชนิด คือ เปอร็อกซิเดส (peroxidase) หรือ POD เป็นเอนไซม์ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงแคโรทีนอยด์ทั้งทางตรงและทางอ้อม ดังสมการ



เอนไซม์นี้จะไปเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยอากาศ ทำให้เกิดอนุมูลอิสระซึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยากับแคโรทีนอยด์ ทำให้แคโรทีนอยด์ลดลง และในเอนไซม์ไลโปเปอร็อกซิเดส (lipoperoxidase) เอนไซม์ตัวนี้จะทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาของการสลายสารแคโรทีนอยด์ ซึ่งเกิดต่อเนื่องมาจากสารเปอร็อกไซด์ที่ได้จากการออกซิเดชัน โดยอาศัยเอนไซม์ไลโปอกซิเดส (นิธิยา, 2548)

6. น้ำ

น้ำเป็นส่วนประกอบที่ช่วยในกิจกรรมของเอนไซม์ โดยพบว่า หากตัวอย่างถูกกำจัดน้ำออกไปบางส่วนจะทำให้เอนไซม์ทำงานได้ลดน้อยลง แต่การที่ไม่มีน้ำอยู่ในตัวอย่างเลยจะทำให้ผิวนอกของตัวอย่างมีโอกาสสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศได้มากขึ้น และหากน้ำในตัวอย่างเหลือน้อยเกินไป จะทำให้เอนไซม์มีประสิทธิภาพมากขึ้น ที่สภาวะนี้เซลล์จะเกิดความเสียหายและตายลง เอนไซม์สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับสารที่เกิดออกซิเดชันได้ง่าย ดังนั้นในตัวอย่างที่มีน้ำอยู่น้อย จะเกิดการสูญเสียแคโรทีนอยด์ได้ง่าย (รุจิภรณ์, 2546)

2.3 เทคโนโลยีการเก็บกัก

เทคโนโลยีการเก็บกัก (encapsulation technology) เป็นการควบคุมพื้นที่การปลดปล่อยเพื่อเป็นการควบคุมการปล่อย active biomolecules โดยอาศัยการประยุกต์ด้านเทคโนโลยีชีวภาพ ความไวของการปลดปล่อยสารขึ้นอยู่กับปัจจัยแวดล้อมที่จะเป็นตัวควบคุมการปลดปล่อยของยา, (pro)biotica และ bioactive materials (Laos *et al.*, 2007) เทคโนโลยีการเก็บกักเป็นหนึ่งในวิธีการประยุกต์ใช้สารเคลือบที่รับประทานได้ ทำให้สารสำคัญที่อยู่ในรูปของเหลวไม่ว่าจะเป็นไขมัน (fat) หรือน้ำมัน (oil) ให้กลายเป็นผงซึ่งสะดวกต่อการใช้งานมากขึ้น การเก็บกักสารสำคัญที่มีขนาดอนุภาคในระดับไมครอน เรียกว่า ไมโครเอนแคปซูลชัน (microencapsulation) ซึ่งหมายถึงกระบวนการที่ของเหลวหรืออนุภาคถูกห่อหุ้มให้อยู่ในรูปของแคปซูลด้วยพอลิเมอร์เป็นชั้นบาง ๆ เกิดเป็นแคปซูลขนาดเล็กซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 1 ไมครอน จนถึง 1,000 ไมครอน (เอกลักษณ์, 2552) โดยชั้นพอลิเมอร์บางๆจะเป็นตัวป้องกันหรือปลดปล่อยสารสำคัญภายในออกมาเมื่อเราต้องการสารสำคัญที่อยู่ภายในไมโครแคปซูลจะถูกเรียกว่า คอร์ (core) และผนังบางๆที่ห่อหุ้มสารสำคัญจะถูกเรียกว่า วอลล์ (wall) (Benita, 1996)

การเลือกใช้สารที่จะนำมาทำเป็นวอลล์ จึงจำเป็นต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมต่อสารสำคัญ และตามสภาวะที่ต้องการใช้ ในบางครั้งอาจจะต้องทำวอลล์ 2 ชั้น ชั้นในเพื่อปกป้องคอร์ ชั้นนอกเพื่อวัตถุประสงค์ของการนำมาใช้งาน โดยวัสดุที่จะนำมาใช้นั้นมักมีลักษณะที่เกิดเป็นฟิล์มได้ อาจเลือกจากพอลิเมอร์ที่มาจากธรรมชาติ หรือพอลิเมอร์สังเคราะห์ ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุสำหรับการเก็บกักและรูปร่างลักษณะของผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ต้องการ ซึ่งวัสดุที่ใช้ในการเก็บกักที่ดีควรมีความสามารถในการแผ่เป็นฟิล์มบางๆได้ มีความยืดหยุ่นและแข็งแรงเพียงพอ มีความสามารถทำให้เกิดอิมัลชัน มีความสามารถในการยึดติดกับคอร์ได้ดีโดยไม่ทำปฏิกิริยากัน มีความหนืดต่ำเมื่อ

อยู่ในสถานะของแข็งต้องไม่ขึ้นง่าย นอกจากนี้ยังต้องมีความคงตัวสูงเพื่อปกป้องคอร์จากสภาพแวดล้อมต่างๆ และปลดปล่อยคอร์ได้ตรงตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน

อย่างไรก็ตาม ไม่มีวัสดุที่ใช้ในการเก็บกักสารสำคัญที่มีคุณสมบัติดังกล่าวครบทุกประการ ดังนั้น เพื่อให้การเก็บกักสารสำคัญมีประสิทธิภาพจึงอาจมีการใช้วัสดุหลายชนิดผสมเข้าด้วยกัน สำหรับวัสดุที่นิยมใช้ในการเก็บกักสารสำคัญ ได้แก่

มอลโทเดกซ์ทริน

มอลโทเดกซ์ทรินเป็นสารประกอบพอลิเมอร์ของกลูโคสที่ต่อกันด้วยพันธะ $\alpha - (1, 4)$ ได้จากกระบวนการไฮโดรไลซิสสตาร์ชด้วยกรดหรือเอนไซม์ ไม่มีรสหวาน สามารถใช้เป็นวัสดุสำหรับป้องกันสารสำคัญจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ได้อย่างดี เนื่องจากมีความสามารถในการสร้างฟิล์มรอบๆ หยดสารสำคัญในระหว่างกระบวนการทำแห้งซึ่งเป็นเวลาเดียวกันกับน้ำที่ระเหยออกไป มอลโทเดกซ์ทรินจะมีค่า Dextrose Equivalent (DE) ซึ่ง DE เป็นการวัดระดับ (degree) ของการย่อยพอลิเมอร์ของสตาร์ชซึ่งเป็นดัชนีบ่งบอกความสามารถในการทำให้เกิดเมทริกซ์ซึ่งมีส่วนสำคัญในการทำให้เกิดการเคลือบผิว โดยค่า DE จะแปรผกผันกับน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย ชนิดที่มีค่า DE สูงที่สุด คือ มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่สุดและดูดความชื้นได้ดี การไฮโดรไลซิสสตาร์ชให้มีค่า DE 20-60 จะได้โมเลกุลของเดกซ์ทรินที่มีขนาดต่างๆ กัน เมื่อทำให้แห้งเรียกว่า corn syrup solid ซึ่งละลายน้ำได้รวดเร็วและมีรสหวานเล็กน้อย (นิธิยา, 2549)

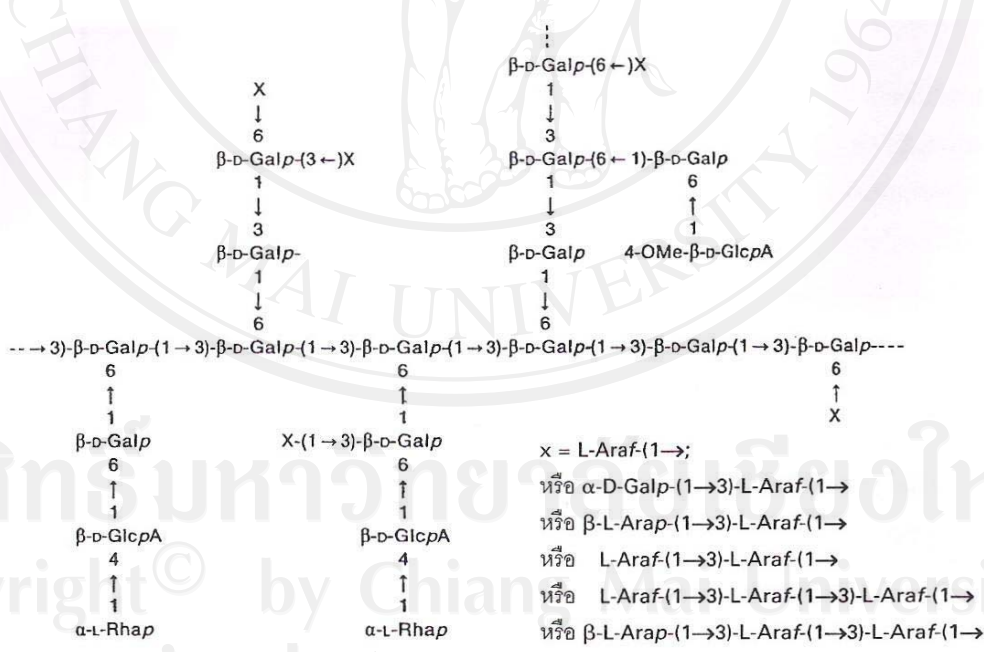
มอลโทเดกซ์ทรินที่มี DE สูง จะมีความสามารถในการดูดความชื้น ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล ค่าการละลาย ความใสของสารละลาย และความหวานสูงกว่ามอลโทเดกซ์ทรินที่มี DE ต่ำ แต่จะมีความหนืดต่ำกว่า มอลโทเดกซ์ทรินชนิดที่มีค่า DE ต่ำจะไม่ดูดความชื้น (nonhygroscopic) มอลโทเดกซ์ทรินไม่มีกลิ่นรส ละลายน้ำได้ดี มีความหนืดต่ำ แต่ไม่มีคุณสมบัติในการเป็นอิมัลซิไฟเออร์จึงมักใช้ร่วมกับกัมอะราบิก เพื่อลดต้นทุนการผลิต

กัมอะราบิก

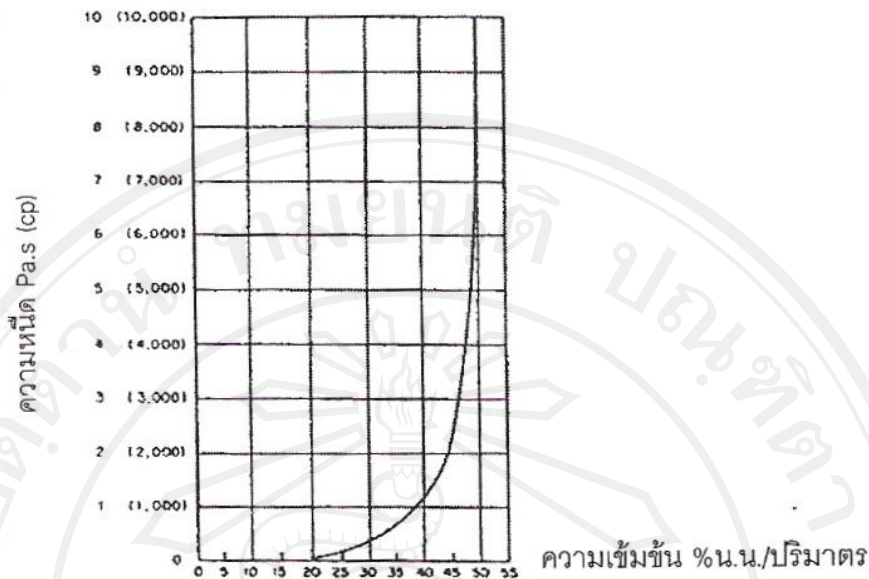
กัมอะราบิก (Arabic gum) หรือบางครั้งเรียกว่า กัมอะคาเซีย (Acacia gum) เป็นกัมจากต้นอะคาเซีย โดยเฉพาะจาก *Acacia Senegal* L. เมื่อบริเวณกิ่งและลำต้นเกิดบาดแผลจะมีกัมเหลวซึมออกมาในลักษณะเป็นก้อนรูปร่างคล้ายหยดน้ำตา เมื่อนำมาอบแห้งแล้วมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2-7 เซนติเมตร มีสีอำพันและเป็นของแข็งอสัณฐาน เรียกว่า กัมหยาบ ซึ่งจะต้องทำความสะอาดก่อนเพื่อแปรรูปเป็นกัมอะราบิกที่มีขนาดและเกรดต่างๆ ก่อนนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อาหารและยา กัมอะราบิกจะมีความชื้นร้อยละ 15-20 ชนิดผงมีความชื้น

ร้อยละ 12 และผงชนิดพ่นแห้ง จะมีความชื้นร้อยละ 8 กัมอะราบิกเกรดดี (บริสุทธิ์สูง) จะให้สารละลายที่ไม่มีสี และไม่รสนิดๆ (วรรณา, 2549)

กัมอะราบิกจัดเป็นพอลิแซ็กคาไรด์เชิงซ้อนชนิดหนึ่ง โครงสร้างประกอบด้วยน้ำตาล 4 ชนิด ได้แก่ แอล-เอราบินโนส (ร้อยละ 27) ดี-กาแลกโทส (ร้อยละ 44) แอล-เรมโนส (ร้อยละ 13) และกรดดี-กลูโครนิก (ร้อยละ 14.5) โดยสายโซ่หลักประกอบด้วย เบต้า-กาแลกโทไพแรนอส จับด้วยพันธะ β -1,3 และมีสายกิ่งต่อออกจากสายโซ่หลัก ดังภาพที่ 2.5 กัมอะราบิกอาจอยู่ในรูปของพอลิแซ็กคาไรด์ที่เป็นกลาง หรืออยู่ในรูปเกลือของกรดอ่อนที่มีแคลเซียม แมกนีเซียม และโพแทสเซียม กัมชนิดนี้มีน้ำหนักโมเลกุล 250,000 ถึง 270,000 คาลตัน ละลายน้ำได้ดี ให้สารละลายใส และมีความหนืดต่ำ ความหนืดจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้น แต่การเพิ่มจะช้า ที่ความเข้มข้นร้อยละ 25 น้ำหนักต่อปริมาตร จะมีความหนืดประมาณ 160 Pa.s ถ้าใช้ความเข้มข้นสูงกว่าร้อยละ 25 ขึ้นไป ความหนืดจะเพิ่มเร็วขึ้น ดังภาพที่ 2.6 ที่ความเข้มข้นประมาณร้อยละ 50 มีความหนืดสูงสุดที่ 10,000 Pa.s ความหนืดกัมอะราบิกจะขึ้นกับ pH ความหนืดสูงสุดที่ pH 5-6 และความหนืดอาจลดลงร้อยละ 20 ที่ pH ประมาณ 3 หรือประมาณ 11



ภาพที่ 2.5 โครงสร้างกัมอะราบิก
ที่มา : วรรณา (2549)



ภาพที่ 2.6 ผลของความเข้มข้นของสารละลายกัมอะราบิกต่อความหนืด
(วัดที่อุณหภูมิ 25.5 ± 0.5 °C โดยใช้ Brookfield Synchroelectric)
ที่มา : วรรณ (2549)

กัมอะราบิกจัดเป็นกัมที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารมาก เช่น การใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตสารที่ให้กลิ่น (นิธิยา, 2534) การใช้เป็นตัวกระทำอิมัลชันในพวกอิมัลชันแต่งรสชาติ (flavor emulsion) สำหรับพวกเครื่องดื่ม เช่น อิมัลชันน้ำมันผิวส้ม (citrus oil emulsion) ใช้เป็นสารช่วยความคงตัวในฟองเบียร์ ใช้เป็นตัวช่วยป้องกันการเกิดผลึกน้ำแข็งในผลิตภัณฑ์ไอศกรีมและเชอร์เบต ทำให้ผลิตภัณฑ์มีเนื้อสัมผัสละเอียด และใช้ในยาอมคล้ายเยลลี่รสหวานมีกลิ่นและรสสมุนไพร เรียกว่า พาสทิลล์ (pastills) ซึ่งมีน้ำตาลในสูตรมาก และมีความชื้นต่ำ จึงเหมาะในการผลิตแคปซูลเคลือบสารให้กลิ่น ช่วยลดการระเหยของสารให้กลิ่นรส ไม่มีผลกระทบต่อความหนืดและกลิ่นรสรวมทั้งสีกลิ่นของผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้เมื่ออยู่ในรูปผงแห้งจะมีการกระจายตัวได้ดี ไม่จับตัวกันได้ง่าย จึงเหมาะในการใช้ห่อหุ้มคอร์ที่ขึ้นง่ายอีกด้วย

เจลาติน

เจลาตินเป็นโปรตีนชนิดหนึ่ง ได้จากการไฮโดรไลซ์วัตถุดิบที่มีคอลลาเจน (fibrous protein collagen) ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญในเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน (connective tissue) กระดูก และเอ็นของสัตว์ทุกชนิด แต่วัตถุดิบที่นำมาไฮโดรไลซ์จะต้องมีคอลลาเจนมากๆ เช่น หนังวัว หนังหมู และกระดูก ผลที่ได้จะมีกรดอะมิโนเช่นเดียวกับการไฮโดรไลซ์โปรตีนทั่วไป ยกเว้นไม่มี ทริปโตเฟน

(tryptophane) และมีกรดอะมิโนบางตัวสูงเป็นพิเศษได้แก่ ไกลซีน (glycine) ร้อยละ 27 โพรลีน (proline) และกรดไฮดรอกซีโพรลีน รวมร้อยละ 25 ที่รองลงมา มีกรดกลูตามิก (glutamic acid) อะลานีน (alanin) ร้อยละ 9 อาร์จินีน (arginine) ร้อยละ 8 และกรดแอสปาร์ติก (aspartic acid) ร้อยละ 6 สามารถเซตตัวเป็นเจลได้เหมือนกับคอลลาเจน โดยเจลที่ได้จะมีลักษณะอ่อนนุ่ม มีจุดหลอมเหลวประมาณ 37 องศาเซลเซียส เท่ากับอุณหภูมิของร่างกาย ดังนั้นเมื่อกินเข้าไปจึงให้ความรู้สึกในการกินที่ดีมาก ส่วนในแง่ของการแจ้งข้อความบนฉลากนั้น เจลาตินถูกจัดว่าเป็นอาหารชนิดหนึ่งอยู่แล้ว ดังนั้นจึงไม่ต้องใช้รหัสกำกับในฉลาก (สุวรรณ, 2543)

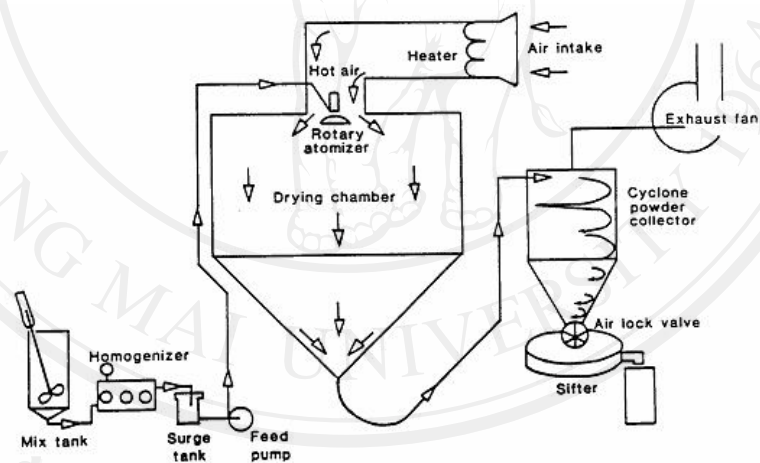
เจลาตินที่จำหน่ายในท้องตลาด มีอยู่ 2 ชนิด สามารถแบ่งออกได้ตามกรรมวิธีการผลิต คือ เจลาตินแบบ A จะใช้กรดอินทรีย์เจือจางในการไฮโดรไลซ์ (acid process) และใช้น้ำนมเป็นวัตถุดิบ มีค่า pI ระหว่าง 7.5-9.5 หรือใช้กระดูกเป็นวัตถุดิบ จะมีค่า pI ระหว่าง 6.5-8.5 กับเจลาตินแบบ B ใช้ด่างในการไฮโดรไลซ์ (alkaline process) จะใช้น้ำวัวเป็นวัตถุดิบซึ่งมีค่า pI ระหว่าง 4.8-5.2 รูปแบบที่มีจำหน่าย ได้แก่ ชนิดแผ่นบาง (leaf, sheet) ชนิดแกรนูล (granule) ชนิดผง (powder) และชนิดหนา (slab) ในกระบวนการไฮโดรไลซ์นั้น โมเลกุลของคอลลาเจนจะเกิดการแตกหักลงไปเรื่อยๆ ดังนั้นในแต่ละขั้นตอนของการย่อย เจลาตินจะมีน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกันไป ซึ่งส่งผลให้สมบัติทางกายภาพของเจลาตินที่ได้ เช่น ความแข็งแรงของเจล ความหนืดต่างกันไป หน่วยที่บอกความแข็งแรงของเจล เรียกว่า ค่าบลูม (bloom value) หมายถึง แรง (บันทึกน้ำหนักเป็นกรัม) ที่ต้องให้กับตัวกด (plunger) ที่มีขนาดและรูปร่างแน่นอนตามกำหนด กดเนื้อเจลซึ่งเตรียมจากเจลาตินความเข้มข้นร้อยละ 6.67 น้ำหนักโดยน้ำหนัก ทำให้เย็นจนถึง 10 องศาเซลเซียส ในถ้วย (bloom jar) เป็นเวลา 16-18 ชั่วโมง แล้วกดเป็นระยะทาง 4 มิลลิเมตร นอกจากนี้ค่าบลูมยังใช้เป็นตัวบอกราคาซื้อขาย กล่าวคือเจลาตินที่มีค่าบลูมสูงจะมีราคาแพงกว่าเจลาตินที่มีค่าบลูมต่ำ

2.3.1 วิธีการที่ใช้ในการเก็บกักสารสำคัญ

การเก็บกักสารสำคัญสามารถทำได้หลายวิธี วิธีการที่ใช้อย่างแพร่หลายในระดับอุตสาหกรรมได้แก่ การอบแห้งแบบพ่นฝอย (spray drying) และเอ็กซ์ทรูชัน (extrusion) นอกจากนี้ยังสามารถใช้เทคนิคอื่นๆ เช่น สเปรย์ชิลลิ่งและคูลลิ่ง (spray chilling and cooling), โคอะเซอร์เวชัน (coacervation), การเคลือบโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไดส์เบด (fluidized bed coating), การใช้ไลโปโซมในการหุ้ม (liposome entrapment), inclusion complexation และเทคนิคการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze drying)

2.3.1.1 การทำแห้งแบบพ่นฝอย (spray drying)

เป็นวิธีการเก็บกักสารสำคัญแบบเก่าแก่ที่สุด เริ่มใช้มาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1930 โดยนำกัมอะราบิกมาใช้เก็บกักกลีเซอรอล มักนิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยาก ขนาดของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความสม่ำเสมอ ต้นทุนการผลิตต่ำกว่าวิธีอื่น ขั้นตอนการเอนแคปซูลเลทโดยใช้เทคนิคการอบแห้งแบบพ่นฝอยนั้น ประกอบไปด้วย การนำตัวกลางที่ใช้เคลือบ (carrier หรือ wall material) เช่น มอลโทเดกซ์ทริน สตาร์ชคัดแปร์ กัม หรือ ส่วนผสมของสารเหล่านี้มาละลายน้ำ จากนั้นนำสารสำคัญที่ต้องการมาเอนแคปซูลเลทมาผสมกับสารละลายของตัวกลางที่ใช้ในการเคลือบ (carrier solution) นำส่วนผสมที่ได้ไปผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ (homogenize) เพื่อให้ได้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 1 ไมครอน จากนั้นจึงป้อนส่วนผสม (feed) ผ่านรูหัวฉีด (rotary atomizer) หรือจานจ่ายลงมาในส่วนของถัง (drying chamber) ที่มีลมร้อนเป่าที่อุณหภูมิประมาณ 180 องศาเซลเซียส จึงทำให้ได้อนุภาคของสารสำคัญที่มีขนาดเล็กและถูกเคลือบจนแห้งออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ (press powder) ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 การเอนแคปซูลเลทโดยใช้เทคนิคการอบแห้งแบบพ่นฝอย

ที่มา : Madene *et al.* (2006)

ข้อด้อยของวิธีการนี้คือ ไม่สามารถใช้กับสารสำคัญที่ไม่เสถียรต่อความร้อนและระเหยง่าย เช่น แอลกอฮอล์ อัลดีไฮด์ และคีโตน ที่มีจุดเดือดอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 38-180 องศาเซลเซียส เพราะสารสำคัญจะถูกทำลายไประหว่างการทำแห้งแบบพ่นฝอย

2.3.1.2 เอกซ์ทรูชัน (extrusion)

เทคนิคการเอนแคปซูลเลทโดยใช้กระบวนการเอกซ์ทรูชัน จะเกี่ยวข้องกับการกระจายตัวของสารให้กลิ่นรสในมวลของคาร์โบไฮเดรตที่หลอมเหลว โดยส่วนผสมจะถูกบังคับให้เคลื่อนผ่านหัวไดล์ (die) ไปยังของเหลวซึ่งใช้ในการดึงน้ำออก (dehydrating liquid) ซึ่งจะทำให้สารเคลือบเกิดการแข็งตัวและจับสารแกนกลางไว้ภายใน ของเหลวที่ใช้ในการดึงน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ ได้แก่ isopropyl alcohol ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นซึ่งมีความแข็ง (harden material) ซึ่งต้องนำไปผ่านขั้นตอนการทำให้แตกเป็นชิ้นเล็กๆ และทำให้แห้ง วิธีการนี้จะทำให้ได้ไมโครแคปซูลขนาดใหญ่ (500-1000 ไมครอน) ซึ่งทำให้มีข้อจำกัดในการใช้งานเนื่องจากมีผลต่อเนื้อสัมผัสของอาหาร และยังเป็นกระบวนการที่ใช้ความร้อนจึงอาจทำให้มีการสูญเสียสารที่ระเหยได้ง่ายไปในระหว่างการผลิต (กฤษฎี และคณะ, 2548)

2.3.1.3 สเปรย์ชิลลิ่งและคูลลิ่ง (spray chilling and cooling)

วิธีการเก็บกักกลิ่นรสทั้งสองนี้มีหลักการคล้ายกัน โดยสารแกนกลางจะกระจายตัวอยู่ในสารละลายที่ใช้ในการเคลือบ จากนั้นทำการ feed ของผสมที่ได้ผ่านหัวฉีด (atomizer) เพื่อพ่นให้เป็นละอองฝอย จากนั้นผสมกันผ่านอากาศเย็น วัสดุสำหรับเก็บกักสารสำคัญจะเก็บกักสารสำคัญไว้และแข็งตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งเทคนิคนี้แตกต่างจากการอบแห้งแบบพ่นฝอยตรงที่อุณหภูมิในถังของเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยร้อนมาก เพื่อระเหยตัวทำละลายออกไป แต่ในทางตรงกันข้าม spray chilling และ spray cooling จะถูกฉีดพ่นไปยังอากาศเย็น (cool or chill air) ซึ่งวิธีการนี้จะทำให้สารเคลือบเกิดการแข็งตัวรอบๆ ผิวของสารแกนกลาง

เทคนิคของสเปรย์ชิลลิ่ง และ สเปรย์คูลลิ่งจึงแตกต่างกันที่จุดหลอมเหลวของสารที่ใช้ในการเคลือบเท่านั้น โดยทั้งสองเทคนิคจะนิยมใช้ในการเอนแคปซูลเลทสารให้กลิ่นรส วิตามิน กลีโคไซด์ หรือ สารให้ความเป็นกรด เนื่องจากสามารถเลือกจุดหลอมเหลวของสารเคลือบทำให้สามารถควบคุมการปลดปล่อย (control release) สารแกนกลางได้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเอนแคปซูลเลทโดยวิธีนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์ขนมอบ ชูปัง และผลิตภัณฑ์อาหารที่มีไขมันเป็นองค์ประกอบ

วิธีการนี้ใช้ต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดในกระบวนการเก็บรักษากลิ่นรส (Gouin, 2004) นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์เกล็ดอินทรีรี่ เกล็ดอนินทรีรี่ เอนไซม์ กลิ่นรส รวมถึงส่วนผสมอื่นๆ เพื่อปรับปรุงด้านความคงตัวของความร้อน ช่วยชะลอการปลดปล่อยกลิ่นรสสู่สถานะแวดล้อมที่เปียกชื้น เป็นต้น

2.3.1.4 Coacervation หรือ phase separation

วิธีการนี้เป็นการเก็บรักษาสารสำคัญโดยใช้ปฏิกิริยาทางเคมี โดยจะใช้วัสดุสำหรับเก็บกักสารสำคัญที่มีประจุบวกและลบเพื่อให้มาเกาะตัวกันแล้วเก็บกักสารสำคัญไว้ข้างในการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ ค่าความเป็นกรดต่าง หรือองค์ประกอบอื่นๆจะทำให้วัสดุสำหรับเก็บกักสารต่างชนิดกันมาเกาะตัวกัน แล้วนำมากรองหรือหมุนเหวี่ยง ล้างด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสม จากนั้นนำไปทำแห้งจนกระทั่งมีลักษณะที่เบาลอยตัวได้ ข้อเสียของวิธีการนี้คือใช้ต้นทุนการผลิตสูง จึงไม่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร

2.3.1.5 การเคลือบโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไดส์เบด (fluidized bed coating)

เทคนิคนี้เป็นการเคลือบผิวอนุภาคของแข็งโดยอนุภาคที่ต้องการเคลือบผิวจะเคลื่อนที่ไปพร้อมกับกระแสอากาศที่เคลื่อนที่หมุนเวียนอยู่ในห้องอบแห้งด้วยความเร็วสูง ในขณะเดียวกันตัวกลางที่ใช้ในการเคลือบจะถูกพัดผ่านหัวฉีดและพ่นเป็นละอองฝอยไปยังกระแสของอนุภาค (particle stream) และเกาะอยู่ที่ผิวของอนุภาค ความหนาของสารเคลือบผิวสามารถควบคุมได้โดยควบคุมระยะเวลาที่อนุภาคเคลื่อนที่อยู่ที่อยู่ในห้องอบแห้ง วิธีนี้จะทำให้ไมโครแคปซูลที่ได้มีความหนาของเปลือกที่สม่ำเสมอมาก และยังสามารถเคลือบอนุภาคด้วยสารห่อหุ้มทุกชนิด (กฤษณี และคณะ, 2548)

2.3.1.6 การใช้ไลโปโซมในการหุ้ม (liposome entrapment)

วิธีนี้ใช้กันมากในอุตสาหกรรมการผลิตยา (pharmaceutical industry) ปัจจุบันได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ไลโปโซมประกอบด้วยเฟสที่เป็นน้ำ (aqueous phase) ล้อมรอบโดยเมมเบรนซึ่งประกอบด้วยฟอสโฟไลปิด (phospholipid – base membrane) เมื่อฟอสโฟไลปิดกระจายตัวอยู่ในเฟสที่เป็นน้ำจะเกิดการ form เป็นไลโปโซมโดยอัตโนมัติ ไลโปโซมสามารถใช้ในการหุ้มสารที่ละลายได้ในน้ำหรือในไขมันไว้ภายใน

2.3.1.7 เทคนิคการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze drying)

การเอนแคปซูลโดยใช้เทคนิคการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งสามารถประยุกต์ใช้ในการเอนแคปซูลสารสำคัญที่ไวต่อความร้อน การเอนแคปซูลจะเกิดระหว่างขั้นตอนการแช่เยือกแข็งโดยขณะที่น้ำในสารละลายเปลี่ยนสถานะเป็นผลึกน้ำแข็ง สารละลายในส่วนที่น้ำยังไม่แข็งตัว (non-frozen solution) จะมีความหนืดเพิ่มขึ้นซึ่งจะช่วยชะลอการแพร่ของสารให้กลั่นรส

เมื่อปริมาณผลึกน้ำแข็งเพิ่มมากขึ้นสารละลายที่มีสารให้กลิ่นรสละลายอยู่จะอยู่ในสถานะอิมมัตวที่ยังยวดยและเริ่มตกผลึกโดยจับสารให้กลิ่นรสไว้ในผลึกที่ได้อาจอยู่ในรูป amorphous solid การเอนแคปซูลโดยใช้เทคนิคการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีต้นทุนการผลิตค่อนข้างสูงโดยสูงกว่าเทคนิคการอบแห้งแบบพ่นฝอยประมาณ 50 เท่า (Desobry *et al.*, 1997) เนื่องจากค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตและการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่ได้ค่อนข้างสูง (Jacquot and Permetti, 2003) รวมถึงระยะเวลาการผลิตจะนานกว่าการเอนแคปซูลโดยใช้เทคนิคอื่น (Barbosa-Canovas and Vega-Mercado, 1996)

2.3.2 ประโยชน์ของเทคโนโลยีการเก็บกัก

1. ลดการระเหยของสาร ทำให้สามารถเก็บสารที่ระเหยได้ เช่น น้ำมันหอมระเหย ไว้ภายในไมโครแคปซูล ทำให้มีความคงตัวระหว่างการเก็บรักษามากขึ้น
2. เพิ่มความคงตัว โดยไมโครแคปซูลจะป้องกันสารภายในจากสภาพแวดล้อม เช่น ความชื้น ออกซิเจน และแสงได้ ทำให้มีความคงตัวที่ดีขึ้น
3. กลบกลิ่นรสที่ไม่พึงปรารถนา
4. ช่วยให้ง่ายต่อการนำไปใช้งาน เช่น การเปลี่ยนสารที่เป็นของเหลวให้อยู่ในรูปแคปซูลที่เป็นของแข็ง ง่ายต่อการนำไปผสมกับสารอื่น และไม่จับตัวกันเป็นก้อน
5. สามารถควบคุมการทำงานของสารให้มีการปลดปล่อยสารในบริเวณที่เหมาะสม และยังคงความสิ้นเปลืองในการใช้สาร

2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเก็บรักษาไมโครแคปซูล

1. อุณหภูมิ เป็นปัจจัยที่สำคัญประการหนึ่งในการเก็บรักษาสารสำคัญ กลิ่น รสชาติในอาหาร โดยการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่ำ จะทำให้อายุการเก็บรักษานานขึ้น
2. ความชื้นสัมพัทธ์ มีผลต่อการเก็บรักษาโดยสังเกตจากการปล่อยกลิ่น รส ระหว่างการเก็บรักษาจะเพิ่มขึ้นถ้ามีการเพิ่มขึ้นของความชื้นสัมพัทธ์ และยังมีคำแนะนำว่า ที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงนั้นจะทำลายโครงสร้างของแคปซูล (Rosenberg *et al.*, 1990)
3. การเลือกใช้สารห่อหุ้ม เป็นจุดสำคัญในการตัดสินใจอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์อย่างหนึ่ง Usha and Pothakamury (1995) ได้แนะนำว่า สารห่อหุ้มนั้นจะต้องมีคุณสมบัติอิมัลชันที่ดี และมีความสามารถในการสร้างฟิล์ม นอกจากนั้นจะต้องมีราคาสูงและสามารถหาได้ง่าย เช่น เดกซ์ทริน กัมอะราบิก และโปรตีน

4. ขนาดของอิมัลชัน มีผลต่อการเก็บรักษาสารสำคัญ โดยอิมัลชันขนาดใหญ่จะเก็บและรักษาสารสำคัญได้น้อยกว่าอิมัลชันที่มีขนาดเล็ก (Risch and Reineccius, 1995)

นอกจากปัจจัยดังกล่าว Desobry *et al.* (1997) ได้เปรียบเทียบผลของกระบวนการทำแห้ง 3 แบบ คือ การทำแห้งแบบพ่นฝอย การทำแห้งโดยลูกกลิ้งทรงกระบอก และ กระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ที่ใช้ในการเก็บกักเบต้าแคโรทีนด้วย มอลโตเดกซ์ตริน (DE 25) และศึกษาความคงตัวของเบต้าแคโรทีน โดยทำการผันแปรปริมาณความชื้น (ร้อยละ 11 และ 25) กับอุณหภูมิ (25, 35, 45 องศาเซลเซียส) พบว่า ปริมาณความชื้นไม่มีผลต่อความคงตัวของเบต้าแคโรทีน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเมื่อเปรียบเทียบความคงตัวของแคโรทีนระหว่างการเก็บของทั้ง 3 กระบวนการ พบว่า การทำแห้งโดยลูกกลิ้งทรงกระบอกสามารถคงปริมาณแคโรทีนไว้มากที่สุด (ร้อยละ 47) แต่จะสูญเสียปริมาณแคโรทีนเริ่มต้นมากที่สุด ส่วนกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งนั้น มีอัตราการคงตัวร้อยละ 38 แต่มีการสูญเสียปริมาณแคโรทีนเริ่มต้นน้อยที่สุด

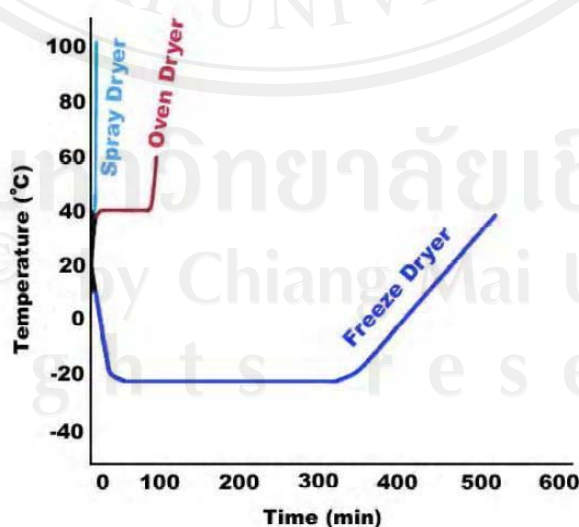
เทคนิคการเก็บกักสารได้มีการนำไปประยุกต์ใช้ในทางโภชนาการต่างๆ ดังนี้ Schrooyen *et al.* (2000) ได้ทำการศึกษาการเก็บกักน้ำมันผิวส้มที่มีลิโมนินเป็นองค์ประกอบหลัก โดยใช้วัสดุที่เก็บกัก 4 ชนิด ได้แก่ กัมอะราบิก, กัมอะราบิก-มอลโตเดกซ์ตริน, เคซีเนท-มอลโตเดกซ์ตริน และ โพลีแซคคาไรด์จากพืช ใช้การทำแห้งแบบพ่นฝอย เพื่อเก็บกักลิโมนิน (limonene) ซึ่งถูกทำลายได้ง่ายด้วยออกซิเจน ซึ่งเมื่อลิโมนินถูกออกซิไดซ์จะเปลี่ยนเป็น limonene-1,2-epoxide และ carvone ในการทดสอบอายุการเก็บในสภาวะเร่ง (อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส) พบว่า โพลีแซคคาไรด์จากพืชมีปริมาณ limonene-1,2-epoxide น้อยที่สุด เนื่องจากมีการซึมผ่านของออกซิเจนน้อยกว่าวัสดุตัวอื่น

Junyaprasert *et al.* (2001) ศึกษาผลของกระบวนการในการเก็บกักวิตามินเอปาล์มมิเตทโดยใช้เจลาตินและกัมอะกาเซีย ทำการผันแปรอัตราส่วนของเจลาตินและกัมอะกาเซีย สัดส่วนของวัสดุต่อสารละลายที่ต้องการเก็บกัก ความเข้มข้นของสารละลาย สารตั้งต้นในการขึ้นรูป และ กระบวนการทำแห้ง ผลการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่สุด คือ การใช้เจลาตินต่อกัมอะกาเซียในอัตราส่วน 1:1, อัตราส่วนของสารละลายต่อวัสดุเก็บกัก คือ 1:2, ใช้เวลาในการขึ้นรูป 60 นาที และการใช้น้ำมันข้าวโพดที่มีวิตามินเอ ปาล์มมิเตท เข้มข้นร้อยละ 40 ส่วนกระบวนการทำแห้งนั้นพบว่า การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง และการทำแห้งโดยใช้ลม ให้ผลผลิตที่มากกว่า การทำแห้งแบบลมร้อน อย่างไรก็ตามการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ทำให้ microcapsule มีลักษณะทางกายภาพที่ดีกว่า

2.4 การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

เทคนิคการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze drying หรือ lyophilization) เป็นเทคนิคการทำสารให้เข้มข้นและทำให้อยู่ในรูปผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้ายในลักษณะผงแห้ง โดยอาศัยหลักการแช่แข็ง (freezing) เพื่อเปลี่ยนสถานะของตัวอย่างจากสถานะของเหลวมาเป็นของแข็ง จากนั้นจึงกระตุ้นให้เกิดการระเหิดของน้ำกลายเป็นไอโดยตรง โดยอาศัยหลักการปรับความดันไอของน้ำให้มีค่าลดต่ำกว่าจุด triple point ของน้ำ จากหลักการดังกล่าวทำให้เราสามารถลดปริมาณน้ำในตัวอย่างลงได้จนกระทั่งอยู่ในระดับที่สามารถเก็บผลิตภัณฑ์ไว้ได้นาน โดยที่มีการเสื่อมคุณภาพน้อยที่สุด ดังนั้นอาหารที่ได้จึงมีคุณภาพทางประสาทสัมผัสและคุณค่าทางโภชนาการดีกว่าอาหารแห้งทั่วไป

กระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีคุณลักษณะที่แตกต่างจากกระบวนการทำแห้งโดยทั่วไป คือ เป็นการทำแห้งภายใต้อุณหภูมิต่ำและความดันต่ำ ใช้เวลาการทำแห้งนาน เนื่องจากต้องการรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้ใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์สดมากที่สุด จากกราฟเปรียบเทียบเวลาและอุณหภูมิในการทำแห้ง (ภาพที่ 2.8) การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งใช้อุณหภูมิต่ำเป็นเวลานาน ในขณะที่การทำแห้งแบบพ่นฝอย (spray drying) ใช้อุณหภูมิสูงในเวลาสั้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่นำมาแปรรูปว่ามีองค์ประกอบทางเคมี สารออกฤทธิ์และคุณค่าอื่นๆ ที่ได้รับความเสียหาย เนื่องจากความร้อนมากเพียงใด อย่างไรก็ตามกระบวนการดังกล่าวจะใช้เวลานานกว่าการกำจัดน้ำ ค่าใช้จ่ายสำหรับพลังงานในการทำใหเยือกแข็งและค่าใช้จ่ายในการทำสุญญากาศย่อมมีราคาสูงมากผนวกกับเงินลงทุนที่ค่อนข้างสูง ทำให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตอาหารแห้งหรืออาหารเข้มข้นโดยวิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีราคาแพง



ภาพที่ 2.8 กราฟเปรียบเทียบเวลาและอุณหภูมิในการทำแห้ง 3 วิธี

ที่มา: ปิณณธร (2547)

โดยทั่วไปสารที่นิยมใช้เทคนิคการทำแห้งแบบเยือกแข็ง นิยมใช้กับสารที่มีการสลายตัวด้วยความร้อนได้ง่าย ทำให้ไม่สามารถใช้การอบแห้ง หรือการทำแห้งโดยวิธีการนำ หรือพาความร้อนได้โดยตรง เช่น เอนไซม์ ยาปฏิชีวนะ ฮอว์โมนต่างๆ เป็นต้น ในอุตสาหกรรมอาหารนิยมใช้การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งกับที่มีราคาแพงซึ่งต้องการรักษากลิ่นหรือลักษณะเนื้อสัมผัสค่อนข้างเปราะบาง เช่น กาแฟ เห็ด เครื่องเทศและสมุนไพร น้ำผลไม้ เนื้อ อาหารทะเล ผัก และอาหารพร้อมรับประทานสำหรับกองทัพ รวมทั้งใช้ในการเก็บรักษาหัวเชื้อจุลินทรีย์เป็นระยะเวลานานๆ เพื่อใช้เป็นหัวเชื้อในการแปรรูปอาหาร

2.4.1 หลักการของการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

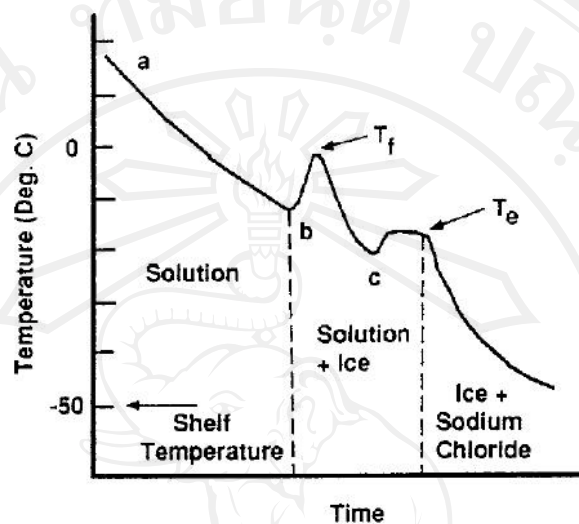
น้ำในตัวอย่างสามารถแบ่งออกเป็นสองรูปแบบด้วยกัน คือ น้ำอิสระ (free water) และน้ำที่ถูกยึดจับไว้ในโครงสร้างของสิ่งมีชีวิต (bounded water) โดยทั่วไปพบน้ำทั้งสองในอัตราส่วนร้อยละ 80 ต่อ 20 ดังนั้นหลักการการทำแห้งโดยวิธีนี้จึงแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน คือ การไล่น้ำอิสระเกิดขึ้นได้ง่ายเนื่องจากมีแรงยึดเหนี่ยวกับโมเลกุลของสารตัวอย่างไม่มากนัก ส่วนขั้นตอนที่สอง คือการไล่น้ำในส่วนที่ถูกจับยึดไว้ในส่วนโครงสร้างของสารจะถูกไล่ออกไปได้ยากต้องใช้พลังงานในการสลายพันธะหรือแรงยึดเหนี่ยวในปริมาณที่สูง ขั้นตอนในการทำแห้งแบบเยือกแข็งแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

2.4.1.1 การแช่เยือกแข็ง (Freezing)

กระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นก๊าซ วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งนั้นต้องทำการแช่แข็งก่อน โดยเริ่มจากการเปลี่ยนสถานะของน้ำจากสถานะของเหลวให้อยู่ในรูปของแข็ง โดยเริ่มจากการลดอุณหภูมิของน้ำจากอุณหภูมิห้องลงมาเป็น 0 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งบางส่วน เรียกว่าน้ำที่แข็งตัวนี้ว่า nucleation ice ส่วนของแข็งที่ละลายน้ำอยู่นั้นมีความเข้มข้นสูงขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนสถานะของน้ำนั้นเปรียบเสมือนตัวทำละลายมีปริมาณลดลง ทำให้สารตัวอย่างเข้มข้นมากขึ้นจนถึงขั้นของการตกผลึก เรียกจุดนี้ว่า eutectic ณ อุณหภูมิที่ทั้งน้ำและตัวถูกละลายเกิดการตกผลึกควบคู่กันเรียกว่า Eutectic temperature (T_E) แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของน้ำ และสารละลายตัวอย่างดังภาพที่ 2.9 และ 2.10

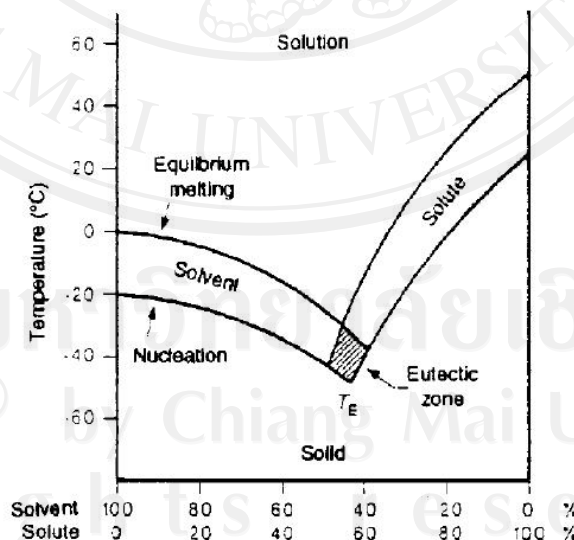
แต่ในทางปฏิบัติตัวถูกละลายไม่เกิดการตกผลึกอย่างสมบูรณ์ เนื่องจากเกิดการเพิ่มขึ้นของความหนืด โดยเริ่มจากสภาพคล้ายน้ำเชื่อม (syrupy) เข้มข้นขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเป็นลักษณะยางเหนียว (rubbery) ดังภาพที่ 2.11 พ่ายที่สุดเมื่อปริมาณน้ำอิสระลดลงจนต่ำที่สุด (เกิดการ

แข็งตัวหมด) จึงเกิดการตกผลึกลงมาเป็นผลึกที่มีขนาดและรูปร่างไม่แน่นอน (amorphous glass) ที่มีน้ำขังอยู่ในโครงสร้างของผลึกอยู่ (bounded water) เรียกอุณหภูมิ ณ จุดที่สารตัวอย่างเกิดการตกผลึกว่า glass transition temperature (T_g) และเรียกอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการไล่น้ำออกไปได้ในปริมาณสูงสุดว่า collapse temperature (T_c)



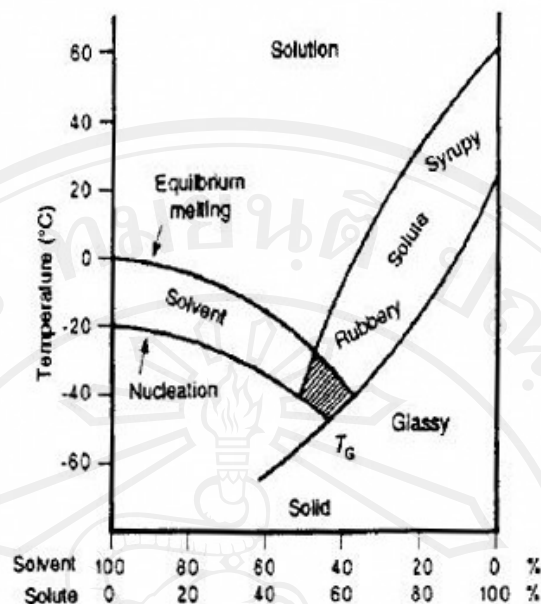
ภาพที่ 2.9 กราฟการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของน้ำในการแช่เยือกแข็ง (freezing curve)

ที่มา : ชรินทร์ (2542)



ภาพที่ 2.10 กราฟการเปลี่ยนสถานะ (State diagram) ในระหว่างการตกผลึกของสารผสมสองชนิด

ที่มา : ชรินทร์ (2542)

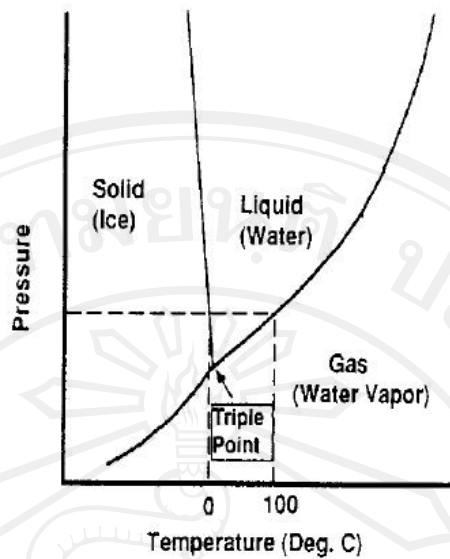


ภาพที่ 2.11 กราฟสถานะ (State diagram) ของการตกผลึก แสดงเฉพาะในส่วนของตัวถูกละลาย (สารตัวอย่าง) ในการเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็น โครงสร้างผลึกที่มีเฉพาะน้ำในส่วน bounded water อยู่

ที่มา : ชรินทร์ (2542)

2.4.1.2 การระเหิด (Sublimation หรือ primary drying)

หลังจากการแช่แข็งจนกระทั่งได้ลักษณะตัวอย่างเป็นผลึกน้ำแข็งแล้ว ในสถานะของแข็งนี้พบว่าค่าความดันไอของน้ำมีค่าลดลงจนกระทั่งต่ำกว่าจุดสมดุสสถานะ (triple point) ทำให้ลักษณะการเปลี่ยนแปลงบนเส้นสมดุสสถานะเกิดขึ้นได้เพียงสองสถานะ คือ จากสถานะของแข็งสามารถเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำได้โดยตรงโดยไม่ต้องเกิดการหลอมตัวเป็นของเหลวก่อน เรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า การระเหิด แสดงกราฟสมดุสสถานะของน้ำดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 กราฟสมดุลสถานะของน้ำ (Phase diagram) ที่ความดันบรรยากาศ น้ำอยู่ในสมดุลระหว่างของแข็งและของเหลวที่ 0°C และอยู่ในสมดุลระหว่างของเหลวและก๊าซที่ 100°C

ที่มา : ชรินทร์ (2542)

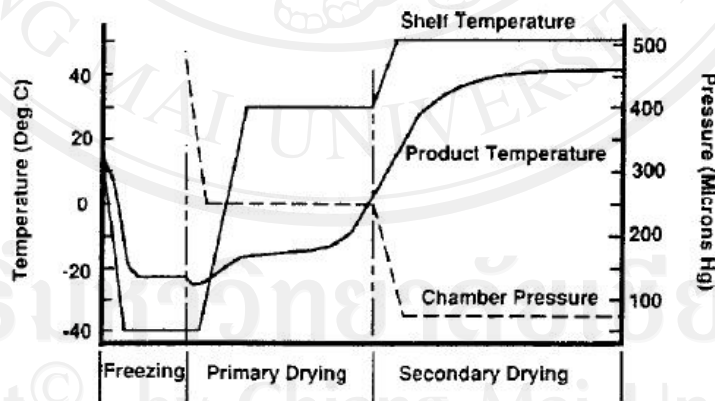
การระเหิดนี้ต้องอาศัยพลังงานจากภายนอกสูงถึง 2800 kJ/kg ของน้ำ โดยพลังงานดังกล่าวเป็นตัวพา (convection) ความร้อนเข้าสู่ชั้นของสารแช่แข็ง เพื่อระเหิดน้ำในรูปอิสระออกจากโครงผลึกสารตัวอย่าง แหล่งพลังงานข้างต้นสามารถกระทำได้โดยการใช้ปั๊มสุญญากาศเป็นตัวกำเนิดพลังงาน โดยอาศัยผลต่างของความดันในสารตัวอย่างกับภายในเครื่องมือ เป็นตัวพาไอน้ำออกมา ความแตกต่างของความดันดังกล่าวต้องสูงกว่า 10^{-2} mbar หรืออาจกล่าวได้ว่าเมื่อทำการปรับสภาพความดันไอของน้ำให้ต่ำกว่า 6 mbar (4.6 mm.Hg) ทำให้น้ำเข้าสู่จุด triple point จึงทำให้เกิดการพาความร้อนในลักษณะดังกล่าว อย่างไรก็ตามในสภาพสุญญากาศ การระเหิดสามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิต่ำ 20 ถึง 50 องศาเซลเซียส เนื่องจากค่าความดันไอน้ำลดต่ำลง จึงสามารถขจัดน้ำอิสระออกจากสารตัวอย่างได้ที่อุณหภูมิต่ำ ในขั้นตอนการระเหิดนี้สามารถลดปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์ให้เหลือต่ำกว่าร้อยละ 20 โดยน้ำหนักแห้งได้ ในขณะที่ยังคงปริมาณรวมของโครงสร้างสารเท่ากับขั้นตอนการแช่แข็ง (ชรินทร์, 2542)

2.4.1.3 การไล่น้ำในส่วน bounded form (Desorption)

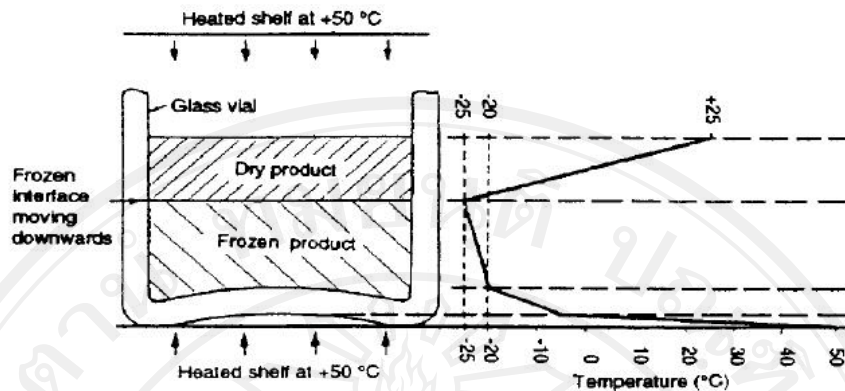
เกิดจากการให้ความร้อนภายใต้สภาพสุญญากาศ โดยพบว่าการให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 20 ถึง 40 องศาเซลเซียส สามารถระเหยน้ำที่เหลืออยู่ในโครงสร้างออกมาได้เป็นการระเหยของน้ำโดยอาศัยผลต่างของอุณหภูมิตั้งแต่ภายในตัวอย่างและพื้นผิวของตัวทำความร้อนที่ให้เข้าไป ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่ใช้เวลานานมากที่สุด ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะดังนี้

1. ทำให้สารเสียสภาพหรือสูญเสียค่ากิจกรรมการทำงานน้อยที่สุด
2. ความชื้นต่ำกว่า 1.5 % โดยน้ำหนักแห้ง
3. ลักษณะเป็นผงแห้งมีรูพรุนเนื่องจากส่วน bounded water ถูกดึงออกไป
4. เมื่อนำมาละลายน้ำใหม่ โมเลกุลของน้ำสามารถแทรกเข้าไปในโครงสร้างที่เป็นรูพรุนของสารที่เป็นส่วนของ bounded water เดิม ทำให้สารนั้นกลับมาอยู่ในสภาพปกติพร้อมที่ใช้งานได้ดั้งเดิม (rehydration)
5. ให้ความน่าเชื่อถือในด้านความสะอาด เนื่องจากสามารถทำในสภาพปลอดเชื้อได้

การเปลี่ยนแปลงทั้งหมดตั้งแต่ขั้นตอนการแช่แข็ง จนกระทั่งการไล่น้ำที่ยึดติดในโครงสร้างออกไป แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและทิศทางการถ่ายเทความร้อน ดังภาพที่ 2.13 และ 2.14



รูปที่ 2.13 กราฟการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระหว่างการทำแห้งแบบเยือกแข็ง
ที่มา : ชรินทร์ (2542)



ภาพที่ 2.14 การถ่ายเทมวลสารและพลังงานในระหว่างการทำแห้งแบบเยือกแข็ง
ที่มา : ชรินทร์ (2542)

อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติพบว่าลำดับขั้นของการทำแห้งแบบเยือกแข็งนี้ไม่ได้แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนอย่างชัดเจน มีการคาบเกี่ยวกันอยู่ตลอดเวลาในแต่ละรอบของการทำแห้ง ตัวอย่างเช่น ในกรณีที่มีสารที่มีจุดหลอมเหลวต่ำเช่น เอทานอลอยู่ พบว่าไม่เกิดการแข็งตัวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิที่ใช้ในการทำแช่แข็ง ดังนั้นในขณะที่ทำการระเหิดจะมีการระเหยของเอทานอลออกจากส่วนของชั้นของเหลวก่อนจะเกิดการทำให้แห้งในส่วนของสารที่ต้องการจริงๆ เสียอีก ทำให้ในรอบการทำงานของการไล่น้ำในส่วน bounded form (desorption) เกิดขึ้นเร็วกว่าปกติ เพราะผิวหน้าของผลิตภัณฑ์จะแห้งมากเนื่องจากการระเหยของเอทานอล ในขณะที่ส่วนเนื้อสารจริงๆ ยังเกิดการระเหิดไม่สมบูรณ์ ทำให้เกิดการคาบเกี่ยวกันระหว่างขั้นตอนการระเหิดของน้ำอิสระ และการทำให้แห้งของน้ำในส่วนโครงสร้าง นอกจากปัจจัยดังกล่าวแล้วขนาดของผลิตภัณฑ์น้ำแข็งที่เกิดขึ้นยังมีผลต่อการระเหิดของน้ำด้วย โดยผลิตภัณฑ์น้ำแข็งที่มีขนาดเล็กและโครงสร้างของผลิตภัณฑ์มีขนาดเล็ก สม่่าเสมอเกิดการระเหิดได้ช้ากว่าผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นการแช่แข็งสารให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว (quick freezing) จึงไม่เป็นผลดีเนื่องจากให้ผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็ก จึงควรทำให้เกิดการแข็งตัวของเนื้อสารอย่างค่อยเป็นค่อยไป ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่และมีโครงสร้างที่มีขนาดสม่่าเสมอ ช่วยลดเวลาในการระเหิดของสารลงได้

2.4.2 วิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

วิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งแบ่งออกเป็น 3 วิธีแต่ละวิธีมีวัตถุประสงค์ที่ต่างกันซึ่งขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์เริ่มต้นและผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ต้องการ

2.4.2.1 Manifold method

เป็นวิธีที่ใช้ flask หรือ vials ต่อเข้ากับ manifold หรือ chamber โดยตรง ผลิตภัณฑ์จะถูกแช่แข็งในช่องแช่แข็งจากการแช่ลงในอ่างอุณหภูมิต่ำโดยตรง หรือการแช่แข็งโดยใช้ shelf freezer ขึ้นอยู่กับลักษณะของผลิตภัณฑ์และปริมาณที่ต้องการหลังจากการทำแห้ง ผลิตภัณฑ์ที่แช่แข็งแล้วจะถูกต่อเข้ากับ manifold หรือ chamber อย่างรวดเร็วเพื่อป้องกันการละลายและทำให้เกิดสถานะสุญญากาศอย่างรวดเร็ว วิธีนี้จะใช้สำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณน้อยและผลิตภัณฑ์ที่มีอุณหภูมิ eutectic และ collapse สูง

วิธี manifold method ดีกว่าวิธีการทำแห้งแบบ batch method เนื่องจากสามารถต่อ flask เข้ากับตัว manifold ได้โดยตรง ทำให้สามารถระเหิดน้ำออกได้เร็วกว่าจึงใช้เวลาในการทำแห้งน้อยลง



ภาพที่ 2.15 เครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่ใช้หลักการ manifold method

ที่มา : Labconco (2006)

2.4.2.2 Batch method

ในการทำ batch drying เป็นการใส่ผลิตภัณฑ์ลงในขวดที่มีขนาดเท่ากันและวางลงไปบนถาดที่ใช้สำหรับทำแห้ง โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์ในขวดจะผ่านการแช่แข็งก่อนที่จะทำแห้ง การควบคุมความเที่ยงตรงของอุณหภูมิ และปริมาณความร้อนที่มีในผลิตภัณฑ์ระหว่างการทำแห้งสามารถทำได้ โดยทั่วไปทุก vials ในแต่ละ batch จะถูกทำในกระบวนการที่เหมือนกันในการทำแห้ง แม้ว่าจะมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยในการนำความร้อนเข้าไปใน shelf สำหรับความแตกต่างของแต่ละส่วนพื้นที่ โดยที่ vials ส่วนหน้าจะได้รับปริมาณความร้อนที่มีการแผ่มาจากประตู ความแตกต่างเล็กน้อยเหล่านี้จะส่งผลให้เกิดความแตกต่างในปริมาณความชื้นที่หลงเหลืออยู่

Batch drying ทำให้ ทุกๆ vials สิ้นสุดกระบวนการทำแห้งในเวลาเดียวกัน และ ทุกๆ vials จะถูกปิดฝาในสถานะสุญญากาศหรือมีการเติมก๊าซเฉื่อยลงไป การปิดฝา vials ทั้งหมดพร้อมกันจะทำให้ความคงตัวในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์เป็นไปในรูปแบบเดียวกัน ซึ่งกระบวนการ batch drying จะนิยมใช้ในอุตสาหกรรมทางเภสัชกรรม เครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่ใช้หลักการ batch method แสดงดังภาพที่ 2.16



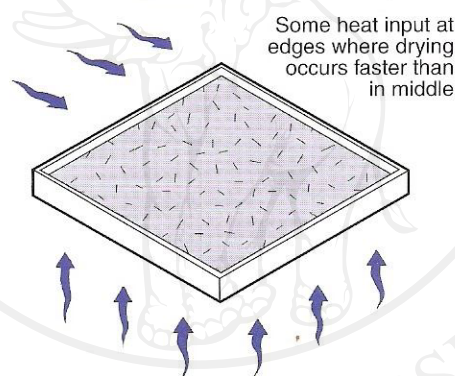
ภาพที่ 2.16 เครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่ใช้หลักการ batch method

ที่มา : Labconco (2006)

2.4.2.3 Bulk method

โดยทั่วไปจะทำในถาดที่ใช้สำหรับการทำแห้งคล้ายกับ batch drying แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นจะถูกเทลงไปในถาดและถูกทำให้แห้งเป็น single unit แม้ว่าจะมีการเคลื่อนผลิตภัณฑ์ทั่วทั้งผิวหน้าภาชนะและมีความหนาเท่ากัน และมีขนาดเหมือนกับการทำใน vials แต่การทำ bulk drying จะขาดพื้นที่ว่างภายในผลิตภัณฑ์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอัตราการรับความร้อน ซึ่งการได้รับความร้อน ถูกจำกัด โดยได้รับการสัมผัสกับ shelf ที่แสดงดังภาพที่ 2.17

Bulk drying ไม่ได้เพิ่มขึ้นเมื่อทำการ sealing ผลิตภัณฑ์ ภายใต้สภาวะที่ได้รับการควบคุมเหมือนกับ manifold และ batch drying และโดยทั่วไปจะเอาผลิตภัณฑ์ออกมา ก่อนปิดการและจากนั้นทำการบรรจุใน air tight container โดยทั่วไปจะทำ bulk drying กับผลิตภัณฑ์ที่มีความคงตัว ไม่ไวต่อออกซิเจน และความชื้น



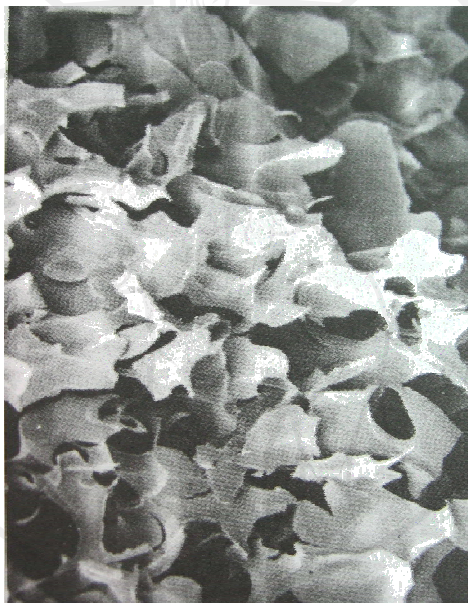
ภาพที่ 2.17 การทำแห้งแบบ bulk ความร้อนจะผ่านชั้นที่ว่างโดยตรง

ที่มา : Labconco (2006)

ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งแบบระเหิดจะมีอายุการเก็บรักษานานกว่า 12 เดือน ถ้ามีการบรรจุอย่างถูกต้องเหมาะสม โดยที่คงคุณภาพด้านประสาทสัมผัสและคุณค่าทางโภชนาการไว้ได้ เช่น สารหอมระเหยจะไม่อยู่ในน้ำบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์น้ำแข็ง ดังนั้นกลิ่นจึงไม่หลุดไปในไอน้ำที่ระเหิดออกไปจากน้ำแข็งแต่จะยังคงอยู่ในอาหาร เป็นผลทำให้ร้อยละ 50-100 ของกลิ่นยังคงอยู่

ส่วนลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหารอบแห้งแบบระเหิดจะยังคงใกล้เคียงวัตถุดิบมาก เนื่องจากเกิดการหดตัวหรือเกิดเปลือกแข็งน้อยมาก โครงสร้างที่เป็นรูพรุน (ภาพที่ 2.18) นี้จะทำให้เกิดการคืนตัวอย่างรวดเร็วเมื่อเติมน้ำ แต่โครงสร้างดังกล่าวจะเปราะบางและแตกหักได้ง่ายมาก

จึงจำเป็นต้องมีการป้องกันความเสียหายทางกายภาพขึ้น เกิดการเปลี่ยนแปลงของโปรตีน แป้ง หรือคาร์โบไฮเดรตอื่นๆ น้อยมาก อย่างไรก็ตามโครงสร้างที่เป็นรูพรุนอาจทำให้ออกซิเจนซึมผ่านเข้าไปได้ง่ายและทำให้ไขมันเกิดการเสื่อมเสียเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ จึงจำเป็นต้องบรรจุอาหารในภาชนะบรรจุก๊าซเฉื่อย มีการเปลี่ยนแปลงไขมันและกรดแอสคอร์บิกน้อยมากระหว่างการอบแห้งแบบระเหิดและเกิดการสูญเสียวิตามินในระดับต่ำมาก อย่างไรก็ตามการสูญเสียที่เกิดขึ้นในระหว่างการเตรียมผลิตภัณฑ์อาจจะส่งผลต่อคุณภาพด้านโภชนาการของอาหาร



ภาพที่ 2.18 ภาพขยายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของ 20% มอลโทเดกซ์ทริน

ที่ผ่านการทำแห้งแบบระเหิด (208x)

ที่มา : วิไล (2545)

เนื่องจากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสภาพใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ก่อนทำแห้งมาก คือ สามารถรักษากลิ่น สี และรูปร่างให้ใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ก่อนอบได้ดีกว่าการทำแห้งแบบใช้ลมร้อน ดังนั้นจึงมีการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการอบแห้งแบบใช้ลมร้อนและวิธีการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ความแตกต่างระหว่างการอบแห้งแบบดั้งเดิมกับการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

วิธีอบแห้งแบบใช้ลมร้อน

วิธีอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

- | | |
|--|--|
| 1. ได้ผลดีกับอาหารที่แห้งง่าย เช่น ผัก เมล็ด ธัญพืช | 1. ได้ผลดีสำหรับอาหารส่วนใหญ่ แต่การใช้จำกัดอยู่กับอาหารที่อบแห้งยากด้วยวิธีอื่น |
| 2. โดยทั่วไปไม่เหมาะกับผลิตภัณฑ์เนื้อ | 2. ได้ผลดีกับเนื้อสุกหรือสด |
| 3. ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ 37-93 องศาเซลเซียส | 3. ใช้อุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็ง |
| 4. ความดันบรรยากาศ | 4. ความดันต่ำ (27-133 ปาสคาล) |
| 5. อาศัยการระเหยน้ำจากผิวของอาหาร | 5. อาศัยการระเหิดของน้ำแข็ง |
| 6. เกิดการเคลื่อนที่ของตัวถูกละลายและอาจเกิดเปลือกแข็ง | 6. มีการเคลื่อนที่ของตัวถูกละลายน้อยมาก |
| 7. แรงเค้นในอาหารทำให้เกิดความเสียหายของโครงสร้างและเกิดการหดตัว | 7. เกิดความเสียหายของโครงสร้างและเกิดการหดตัวน้อยที่สุด |
| 8. เกิดการกำจัดน้ำอย่างช้าๆและไม่สมบูรณ์ | 8. เกิดการกำจัดน้ำอย่างรวดเร็วและสมบูรณ์ |
| 9. ได้ของแข็งหรืออาหารแห้งที่มีรูพรุนซึ่งมักมีความหนาแน่นสูงกว่าวัตถุดิบ | 9. ได้อาหารแห้งที่มีความหนาแน่นต่ำกว่าวัตถุดิบเริ่มต้น |
| 10. กลิ่นรสมักผิดปกติ | 10. กลิ่นรสมักไม่เปลี่ยน |
| 11. สีมักจะคล้ำลง | 11. สีไม่ค่อยเปลี่ยน |
| 12. คุณค่าทางโภชนาการลดลง | 12. คุณค่าทางโภชนาการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก |
| 13. ต้นทุนส่วนใหญ่ต่ำ | 13. ต้นทุนมักสูง อาจสูงถึง 4 เท่าของวิธีอบแห้งแบบดั้งเดิม |

ที่มา : วิไล (2545)