

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 มะนาว

มะนาวจัดอยู่ในตระกูลส้ม (citrus fruits) อยู่ในวงศ์ Rutaceae เป็นพืชพื้นเมืองชนิดหนึ่งที่นิยมปลูกกันอย่างแพร่หลายมาช้านาน เชื่อว่าเป็นพืชพื้นเมืองของอินเดีย มีถิ่นกำเนิดในหมู่เกาะอินดีสตะวันออกหรือทางภาคเหนือของอินเดีย แล้วมีกระจายพันธุ์เข้ามาสู่แผ่นดินใหญ่ของทวีปเอเชีย (สมศักดิ์, 2535) มะนาวมีอยู่สองชนิด คือ ที่มีชื่อสามัญว่า lemon ชื่อวิทยาศาสตร์ คือ *Citrus limon* L. Burm. f. จะมีผลสีเหลืองอ่อนและมีกรดเป็นองค์ประกอบอยู่สูง ส่วนชนิดที่มีชื่อสามัญว่า lime ชื่อวิทยาศาสตร์ คือ *Citrus aurantifolia* (Christm.) Swing. มีผลขนาดเล็ก สีเขียว ให้กลิ่นและรสชาติที่มีลักษณะเฉพาะตัวมากกว่า lemon แต่ทั้งสองชนิดมีรูปร่างและองค์ประกอบทางเคมีคล้ายคลึงกัน (Kimball, 1991) มะนาวที่มีการบริโภคกันในประเทศไทยส่วนใหญ่คือ lime

2.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

มะนาวเป็นไม้พุ่มหรือไม้ยืนต้นขนาดเล็ก แผ่กิ่งก้านสาขากว้าง การแตกแยกของกิ่งค่อนข้างไม่เป็นระเบียบ ลักษณะทรงต้นสูงประมาณ 5 เมตร มีช่วงการแตกใบอ่อนหลายครั้งและเกือบทุกครั้งที่มีการแตกใบอ่อน มักจะมีดอกตามมาด้วยซึ่งขึ้นอยู่กับความสมบูรณ์ของต้นและปัจจัยอื่นๆ เช่นการใส่ปุ๋ยการตัดแต่งกิ่ง (สมศักดิ์, 2541)

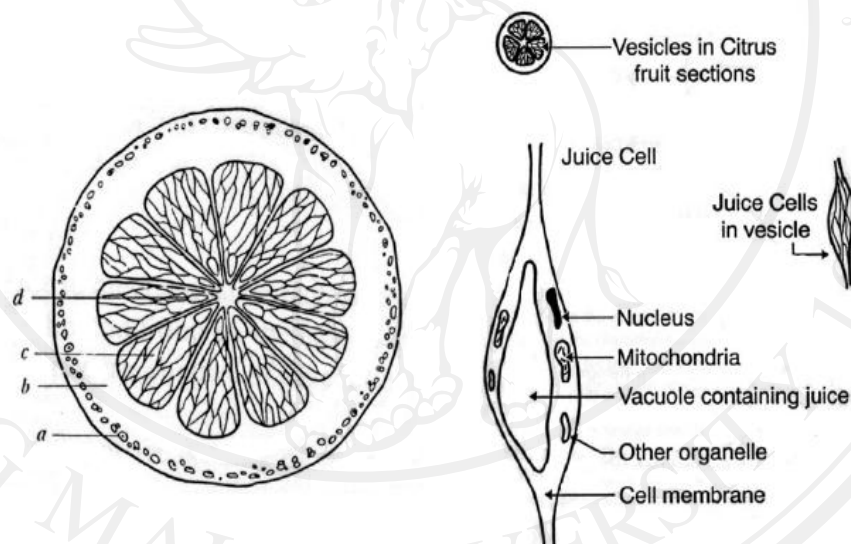
ลำต้น มีลักษณะงอ มีเปลือกสีเทาปนน้ำตาล กิ่งอ่อนมีสีเขียวอ่อน เมื่อแก่สีจะค่อยๆ เข้มขึ้น บนลำต้นจะมีหนาม ส่วนใหญ่จะเกิดที่บริเวณซอกใบเป็นสีเขียวเข้มจนถึงสีเขียวอมเหลือง หนามมีลักษณะแข็งอ้วนแหลมและสั้น

ใบ มีแผ่นใบอันเดียวสีเขียวอ่อน รูปร่างค่อนข้างยาวหรือรูปไข่ ปลายใบมีลักษณะแหลม ขอบใบหยัก แผ่นใบกว้างประมาณ 3-6 เซนติเมตร ยาว 6-12 เซนติเมตร ใบมีกลิ่นแรงเมื่อขยี้ ก้านใบมีขนาดสั้น มีปีกแคบหรืออาจไม่มีปีก ซึ่งขึ้นกับชนิดของพันธุ์ ใบอ่อนมีสีเขียวอมแดง

ดอก เกิดที่บริเวณซอกใบ อาจจะเป็นดอกเดี่ยวหรือดอกช่อ ดอกตูมจะมีขนาดความยาว 1-2 เซนติเมตร มีสีแดงเจืออยู่ด้วย กลีบเลี้ยงสีเขียวอ่อน กลีบดอกสีขาว และด้านท้องมีสีม่วงปนเกสร ตัวผู้มีจำนวนมากมาย 20-40 อัน เชื่อมติดกันเป็นกลุ่มๆ ละ 4-8 อัน เกสรตัวเมียมีรังไข่รูปร่างเกือบจะทรงกระบอก ก้านเกสรตัวเมียจะหลุดร่วงเอง

ผล รูปร่างยาวหรือรูปไข่ ที่ปลายมีลักษณะเป็นปุ่มเล็กๆ ผลมีขนาดความยาวประมาณ 7-12 เซนติเมตร ผิวเมื่อสุกจะออกสีเหลืองหรือสีทอง มีต่อมน้ำมันที่ผิวเปลือกเห็นได้ชัดเจน ผิวเปลือกมีลักษณะขรุขระ ใน 1 ผลจะมี 8-10 กลีบ เนื้อสีเหลืองอ่อน รสเปรี้ยวกลิ่นหอม

เมล็ด ขนาดเล็ก รูปร่างคล้ายไข่ ด้านปลายส่วนหัวและท้ายมีลักษณะแหลม มีเนื้อเยื่อสะสมอาหารภายในเป็นสีขาว (ภาพที่ 2.1 และ ภาพที่ 2.2)



- (a) ถูงน้ำมัน (oil sacs) (b) เปลือกชั้นกลาง (albedo)
 (c) ถูงบรรจุน้ำผลไม้ (juice cells) (d) เมล็ด (seeds)

ภาพที่ 2.1 ลักษณะภาพตัดขวางของผลไม้ตระกูลส้ม

ที่มา: Kimball (1991)



ภาพที่ 2.2 ลักษณะผลมะนาว

2.3 พันธุ์มะนาว

พันธุ์มะนาวที่พบเห็นในเมืองไทยมีหลายพันธุ์ด้วยกัน พันธุ์ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจและนิยมปลูกกันมากในปัจจุบันมี 3 พันธุ์ คือ มะนาวหนัง มะนาวไข่ และมะนาวแป้น (ศุภกิจ, 2540) ซึ่งมีลักษณะประจำพันธุ์ ดังนี้

มะนาวหนัง ผลอ่อนมีลักษณะกลมยาว หัวท้ายแหลม เมื่อโตขึ้นหัวท้ายจะมีลักษณะมนเข้าด้านหัวมีจุดเล็กๆ ผิวเรียบ เปลือกค่อนข้างหนา จึงทำให้สามารถเก็บรักษาผลไว้ได้ค่อนข้างนาน เป็นพันธุ์ที่มีรสเปรี้ยวจัดเพราะมีกรดค่อนข้างสูง น้ำมีกลิ่นหอม นำไปใช้ทำน้ำมะนาวเพื่อดื่มได้ดีมาก

มะนาวไข่ มีขนาดและลักษณะคล้ายมะนาวหนังเกือบทุกอย่าง ผลอ่อนมีลักษณะกลมยาว หัวท้ายแหลมและค่อยๆ มนเข้าเมื่อโตขึ้น ผลโตเต็มที่มีลักษณะกลมมน หัวและก้นมีจุดไม่แหลม ผิวเรียบ เปลือกบางใส มีผลโตกว่ามะนาวหนัง ออกลูกดกและผลมีน้ำมาก มีเมล็ดค่อนข้างน้อย ข้อดีของมะนาวไข่ คือ จะออกผลที่ปลายกิ่งสะดวกต่อการเก็บผล ปัจจุบันมีมะนาวไข่บางพันธุ์ที่สามารถออกผลทวายได้ เช่น พันธุ์แม่ไก่ไข่ดก

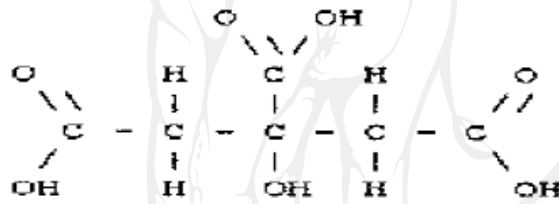
มะนาวแป้น ได้มาจากการเพาะเมล็ดมะนาวพื้นบ้านแล้วกลายพันธุ์ไปจนได้ลักษณะที่ดีเป็นมะนาวพันธุ์ที่นิยมปลูกมากที่สุดเพราะเป็นมะนาวที่ให้ผลดกและให้ผลได้ตลอดทั้งปี ผลมีขนาดปานกลาง ทรงผลแป้น เปลือกบางใสมีสีเขียวอมเหลือง มีน้ำมากไม่ค่อยมีเมล็ด มะนาวแป้นมีหลายพันธุ์ด้วยกัน เช่น มะนาวแป้นรำไพ มะนาวแป้นทวาย

2.4 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมะนาว

2.4.1 กรดในมะนาว

องค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ของน้ำมะนาว คือกรดซึ่งส่วนใหญ่เป็นกรดอินทรีย์ซึ่งประกอบด้วยกรดชนิดต่างๆ คือ กรดซิตริกร้อยละ 91.7 กรดมาลิกร้อยละ 4.9 กรดควินิก และกรดฟอสฟอริกร้อยละ 0.5 กรดที่ไม่ได้จำแนกชนิดร้อยละ 2.5 (Kefford, 1959) ส่วนประกอบของน้ำมะนาวจะเปลี่ยนแปลงไปตามพันธุ์และสถานที่ปลูก (สุนทรี, 2537) องค์ประกอบอื่นๆ แสดงในตารางที่ 2.1

กรดซิตริกเป็นกรดอินทรีย์ที่พบมากที่สุดในน้ำผลไม้ตระกูลส้ม จะมีการนำมาใช้เพื่อให้รสเปรี้ยวในอาหารและเครื่องดื่ม กรดซิตริกจะมีลักษณะเป็นผลึก สีขาว มีสูตรโมเลกุล คือ $C_6H_8O_7$ และมีสูตรโครงสร้าง ดังภาพที่ 2.3

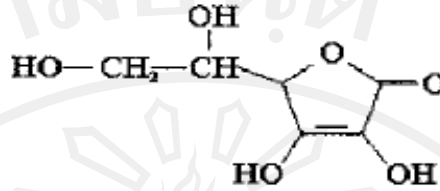


ภาพที่ 2.3 สูตรโครงสร้างของกรดซิตริก

ที่มา : Chemical formula (2010)

กรดซิตริกเป็นกรดอ่อนที่มีความคงตัว สภาพกรด (acidity) เกิดจากภายในโครงสร้างมีหมู่คาร์บอกซิล 3 หมู่ (carboxyl groups) ซึ่งสามารถให้โปรตอน (proton) แก่สารละลายได้ โดยอะตอมของออกซิเจนที่มีสภาพประจุลบ 2 อะตอม จะดึงอิเล็กตรอน (electron) ออกจากไฮโดรเจนของหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group)

กรดแอสคอร์บิกเป็นกรดอินทรีย์ที่มีสูตรโมเลกุล คือ $C_6H_8O_6$ และมีสูตรโครงสร้าง ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 สูตรโครงสร้างของกรดแอสคอร์บิก
ที่มา : นิธิยา (2553)

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของน้ำมะนาวสด

องค์ประกอบ	ค่าที่วัดได้
ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (°Brix)	8
ค่าความเป็นกรดต่าง (pH)	2.4
ปริมาณกรดในรูปกรดซิตริก (กรัม)	6.93
วิตามินซี (มิลลิกรัม/100 กรัม)	32.69
ค่าสี L	49.21
ค่าสี a	-5.33
ค่าสี b	8.83
ค่าการดูดแสง	0.542

ที่มา : วิลาวัลย์ (2547)

2.5 การใช้ประโยชน์จากมะนาว

มะนาวมีความสำคัญเกี่ยวข้องกับชีวิตคนไทย เนื่องจากแทบทุกครัวเรือนจะใช้น้ำมะนาวเป็นส่วนประกอบเพื่อเพิ่มรสชาติในการปรุงอาหารชนิดต่างๆ เช่น ต้มยำ แกง น้ำพริก นอกจากนี้ น้ำมะนาวจะมีคุณค่าทางอาหารแล้ว ส่วนอื่นๆของผลมะนาวสามารถนำมาใช้ประโยชน์ โดยแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆได้อีก ผลิตภัณฑ์แปรรูปจากมะนาวส่วนใหญ่ได้จากเนื้อเยื่อ (tissue) ของผลมากกว่ามาจากน้ำในผล (จารูวรรณ, 2543) ผลิตภัณฑ์ต่างๆ และการนำไปใช้ประโยชน์อาจจำแนกตามส่วนประกอบของผลได้ดังนี้

2.5.1 ผลมะนาว

เนื้อเยื่อของผลที่เป็นส่วนากที่เหลือหลังจากคั้นน้ำ หรือบีบเอาน้ำมันที่เปลือกออกไปแล้ว (เป็นเนื้อเยื่อสดหรือตากแห้ง) ใช้ผสมกับพืชตระกูลถั่วหรือผสมกับอาหารสัตว์ใช้เลี้ยงสัตว์ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้มะนาวทั้งผลหรือเนื้อเยื่อของผลสามารถนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆสำหรับบริโภค ได้แก่ มะนาวดอง มะนาวแช่อิ่ม เปลือกมะนาวแห้งสามรส (จารุวรรณ, 2543)

2.5.2 เปลือกมะนาว

น้ำมันหอมระเหยที่สกัดจากผิวเปลือก สามารถใช้ผลิตเครื่องสำอางได้และผสมยารักษาโรคบางชนิด (กาญจนา, 2530) และใช้ผสมในผลิตภัณฑ์เบเกอรี่และเครื่องดื่ม นอกจากนี้ยังมีการผลิตเพคตินผงจากเชื่อมะนาว แยมเปลือกมะนาวและลูกอมเปลือกมะนาว (นันทนา, 2531)

2.5.3 น้ำมะนาว

ในระดับครัวเรือนใช้น้ำมะนาวปรุงแต่งรสชาติอาหาร ในส่วนที่กินได้ของมะนาว 100 กรัม จะให้พลังงาน 36 แคลอรี ไขมัน 2.4 กรัม คาร์โบไฮเดรต 5.9 กรัม เยื่อใย 0.3 กรัม (กรมอนามัย, 2530) ยังมีวิตามินซีและกรดซิตริกสูงจึงใช้ผลิตเป็นเครื่องดื่มชนิดต่างๆ ในทางเภสัชกรรมมะนาวมีสารเฮสเพอริดิน (hesperidin) และนาริงจีน (naringin) ซึ่งสารทั้งสองนี้มีฤทธิ์แก้ไอเสบจึงใช้เป็นส่วนผสมของตัวยา การแพทย์แผนโบราณใช้น้ำในผลมะนาวกินแก้โรค ลักปิดลักเปิด ขับเสมหะแก้ไอ นอกจากนี้ยังใช้ในอุตสาหกรรมอีกหลายประเภท เช่น ผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางและผลิตภัณฑ์เสริมความงาม (พเยาว์, 2543)

2.5.4 เมล็ด

การแพทย์แผนโบราณใช้เมล็ดมะนาวคั่วเป็นส่วนผสมยาขับเสมหะ เมล็ดมะนาวตากจนแห้งแล้วบีบเอาน้ำมันในเมล็ดมาใช้เป็นส่วนผสมสำหรับผลิตสบู่ นอกจากนี้กากที่เหลือยังมีคุณค่าทางอาหารอันประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 43 โปรตีนร้อยละ 17 ไขมัน

ร้อยละ 9 และเกลือแร่ร้อยละ 4 จึงนำกากไปใช้เป็นส่วนผสมของอาหารสัตว์ ปัจจุบันนำมะนาวมาใช้ประโยชน์เป็นไม้ประดับที่สวยงามอีกด้วย โดยเฉพาะในช่วงที่มะนาวออกดอกจะมีกลิ่นหอม (สมศักดิ์, 2535) ด้านเศรษฐกิจมะนาวเป็นพืชที่มีบทบาททางการค้ามากขึ้น คือสามารถส่งเป็นสินค้าออกทำรายได้ให้ประเทศในรูปของมะนาวคอง ตากแห้ง อบแห้ง น้ำมะนาว และผลสด (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2540)

2.6 เครื่องดื่มจากธรรมชาติ

เครื่องดื่มจากธรรมชาติให้ประโยชน์ทั้งทางตรงและทางอ้อม ช่วยแก้กระหาย ทำให้ร่างกายสดชื่น กระปรี้กระเปร่า บำรุงร่างกาย เครื่องดื่มจากธรรมชาติที่นิยมดื่ม ได้แก่ น้ำอ้อย มะพร้าว น้ำมะนาว นมถั่วเหลือง น้ำบัวบก น้ำเก๊กฮวย และ น้ำมะตูม เป็นต้น เครื่องดื่มที่คนไทยนิยมดื่ม ได้แก่ น้ำชา กาแฟ น้ำอัดลม น้ำหวาน น้ำผลไม้ ตลอดจนเครื่องดื่มที่เตรียมจากส่วนต่างๆ ของพืช เครื่องดื่มจากธรรมชาติส่วนใหญ่ ได้แก่ น้ำผลไม้ซึ่งรวมทั้งน้ำคั้นจากผลไม้สด เช่น น้ำส้ม น้ำมะนาว น้ำมะพร้าว เป็นต้น และน้ำผลไม้ที่มีเนื้อผลไม้ปั่นมาด้วย น้ำผลไม้ชนิดหลังนี้ ทั้งน้ำและเนื้อผลไม้จะผ่านการบดหรือปั่นให้ละเอียดและแต่งเติมรสหวานด้วยน้ำตาล หรือน้ำเชื่อม และอาจเติมกรดผลไม้เพื่อแต่งรสเปรี้ยว ตัวอย่างของน้ำผลไม้ดังกล่าว ได้แก่ น้ำสับปะรด น้ำแตงโม น้ำมะเขือเทศ น้ำมะขาม เป็นต้น นอกจากน้ำผลไม้แล้ว เครื่องดื่มที่ได้จากธรรมชาติยังสามารถเตรียมจากส่วนอื่นๆ ของพืช เช่น ส่วนเหง้า ต้น ใบ ดอก เมล็ด เป็นต้น ตัวอย่างเครื่องดื่มประเภทนี้ ได้แก่ น้ำอ้อย น้ำขิง น้ำเก๊กฮวย น้ำบัวบก นมถั่วเหลือง เป็นต้น

นอกจากเครื่องดื่มชนิดต่างๆ ดังกล่าวแล้ว ยังมีน้ำผลไม้หลายชนิดที่นิยมดื่มกันแพร่หลาย เช่น น้ำฝรั่ง น้ำแตงโม น้ำมะขาม น้ำองุ่น น้ำลำไย น้ำทับทิม น้ำรากบัว น้ำบวญ ฯลฯ น้ำผลไม้ส่วนใหญ่มีวิธีการเตรียมเป็นเครื่องดื่มคล้ายคลึงกันกับที่กล่าวมาแล้วข้างต้น นอกจากน้ำผลไม้แล้วยังมีผู้นิยมดื่มน้ำผักอีกด้วย เนื่องจากน้ำผักจะให้วิตามินซี และแคลเซียมสูงกว่าน้ำผลไม้บางอย่าง และยังเป็นยาอายุวัฒนะอีกด้วย ผักที่นิยมนำมาบดเป็นน้ำผัก เช่น คื่นช่าย ผักกาดหอม แตงกวา เป็นต้น จะเห็นได้ว่า เครื่องดื่มจากธรรมชาติให้ประโยชน์ทั้งทางตรงและทางอ้อม ประโยชน์ทางตรงก็คือ ช่วยให้เครื่องดื่มที่อร่อย สะอาด ช่วยดับกระหาย คลายร้อน ทำให้ร่างกายสดชื่น กระปรี้กระเปร่า ส่วนประโยชน์ทางอ้อม คือ ใช้เป็นยาบำรุง และยารักษาโรค เช่น ช่วยขับปัสสาวะ ขับเหงื่อ บำรุงร่างกาย ช่วยระบาย หรือช่วยแก้ท้องเสีย เป็นต้น นอกจากนั้น เครื่องดื่มจากธรรมชาติสามารถเตรียมได้ง่ายๆ และ รวดเร็ว อีกทั้งช่วยประหยัดรายจ่ายของครอบครัวอีกด้วย

ประโยชน์ที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ เครื่องดื่มจากธรรมชาติ ไม่ต้องแต่งด้วยสีสังเคราะห์ สีของเครื่องดื่มเป็นสีจากพืชโดยตรง ดังนั้นจึงไม่มีพิษต่อร่างกายอย่างแน่นอน (ไพโรจน์, 2553)

2.7 การอบแห้ง

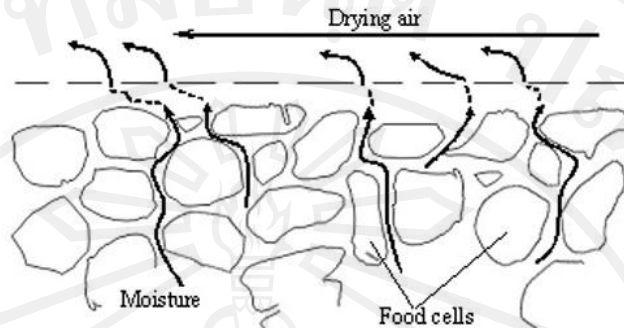
การอบแห้งอาหารเป็นการดึงน้ำออกจากอาหาร เป็นการถนอมอาหารแบบหนึ่งที่ทำได้ง่าย เป็นวิธีที่เก่าแก่ที่สุดวิธีหนึ่ง ผลึกภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งสามารถเก็บรักษาได้นานเป็นปี จากผลการศึกษาพบว่า ปริมาณความชื้นที่จะป้องกันการเสื่อมเสียของอาหารเนื่องจากจุลินทรีย์ โดยทั่วไปควรจะต้องดึงน้ำออกให้เหลือน้อยกว่าร้อยละ 10 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบเป็นสำคัญ ถ้าจะป้องกันการเสื่อมเสียเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ควรจะลดปริมาณความชื้นให้ต่ำลงถึงประมาณร้อยละ 5 (รุ่งนภา, 2535)

2.7.1 หลักการอบแห้ง

เมื่ออากาศหรือลมร้อนพัดผ่านผิวหนังของอาหารที่เปียก ความร้อนจะถ่ายเทไปยังผิวของอาหาร และน้ำในอาหารจะระเหยออกมาด้วยความร้อนแฝงของการเกิดไอ ไอนี้จะแพร่ผ่านฟิล์มอากาศและถูกพัดพาไปโดยลมร้อนที่เคลื่อนที่ สภาพดังกล่าวจะทำให้ความดันไอของน้ำที่ผิวหนังของอาหารต่ำกว่าความดันไอด้านในของอาหาร เป็นผลให้เกิดความแตกต่างของความดันไอน้ำขึ้น อาหารชั้นด้านในจะมีความดันไอสุงและค่อยๆลดต่ำลง เมื่อชั้นของอาหารเข้าไปใกล้อากาศแห้ง ความแตกต่างนี้ทำให้เกิดแรงดันเพื่อไล่น้ำออกจากอาหารน้ำจะเคลื่อนที่ไปยังผิวหนังดังภาพที่ 2.5 ด้วยกลไกต่อไปนี้

1. การเคลื่อนที่ของของเหลวด้วยแรงแคปิลารี
2. การการแพร่ของของเหลวซึ่งเกิดความแตกต่างของความเข้มข้นของตัวละลายของอาหารในส่วนต่างๆ
3. การแพร่ของของเหลวซึ่งดูดซับโดยผิวหนังของของแข็งในอาหาร
4. ความแตกต่างของความดันไอทำให้เกิดการแพร่ของไอในช่องอากาศของอาหาร

อาหาร



ภาพที่ 2.5 การเคลื่อนที่ของความชื้นระหว่างการทำแห้ง
ที่มา : วิไล (2546)

2.7.2 กระบวนการทำแห้งอาหาร

การทำแห้งคือ การลดความชื้นในอาหาร หรือ การลดค่า a_w ของอาหาร ค่า a_w มาจากคำว่า Available Water หรือ Water Activity น้ำที่มีอยู่ในอาหาร (water content of food) ซึ่งอาหารทุกชนิดจะมีน้ำเป็นส่วนประกอบในปริมาณมากน้อยแตกต่างกันตั้งแต่ร้อยละ 10-95 โดยน้ำหนัก อาหารที่มีน้ำมาก จะเกิดการเสื่อมเสียเร็ว แต่ปริมาณน้ำอย่างเดียวยังไม่สามารถที่จะบ่งชี้ว่าอาหารนั้นจะเสื่อมเสียได้เร็วหรือช้า เพราะองค์ประกอบของอาหารแตกต่างกัน น้ำที่มีอยู่ในอาหารแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. น้ำอิสระ (free water) น้ำส่วนใหญ่ที่มีอยู่ในเซลล์พืช เซลล์สัตว์ ไซโทพลาซึมช่องว่างระหว่างเซลล์ ท่อส่งน้ำ ท่ออาหาร น้ำอิสระสามารถดึงออกจากอาหารได้ง่ายๆ โดยใช้พลังงานความร้อนและแสงในช่วงการอบแห้งที่อัตราเร็วคงที่ น้ำอิสระเป็นน้ำที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยา เป็นน้ำที่จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้เพื่อการเจริญและการสืบพันธุ์ เรียกน้ำส่วนนี้ว่า Available Water หรือ Water Activity เป็นน้ำที่มีความสำคัญ มีบทบาทต่อการถนอมอาหารและคุณภาพของผลิตภัณฑ์

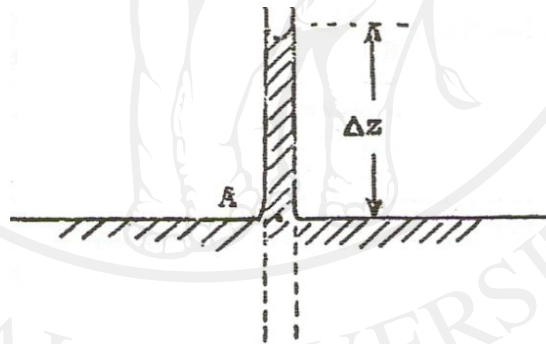
2. น้ำไม่อิสระ (bound water) น้ำไม่อิสระเพราะโมเลกุลไปเกาะเกี่ยวกับโมเลกุลของสารเคมี หรือสารประกอบอื่นๆ ในอาหารด้วยพันธะต่างๆ เช่น พันธะไฮโดรเจน พันธะ

แวนเดอร์วาลส์ การจับตัวด้วยพันธะต่างๆมีผลต่อความแข็งแรงความยากง่ายในการทำลายพันธะระหว่างโมเลกุลของน้ำกับโมเลกุลของสารอื่นๆ

2.7.3 การเคลื่อนที่ของน้ำภายในอาหารเนื่องจากการทำแห้ง

การทำแห้งเป็นการดึงน้ำออกจากอาหารโดยการระเหย การระเหยเกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของน้ำในอาหาร 2 ระดับ คือ การเคลื่อนที่จากภายในอาหารไปสู่ผิวหน้าของอาหาร และจากผิวหน้าของอาหารไปสู่อากาศ การเคลื่อนที่ของน้ำภายในอาหารเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะ คือ

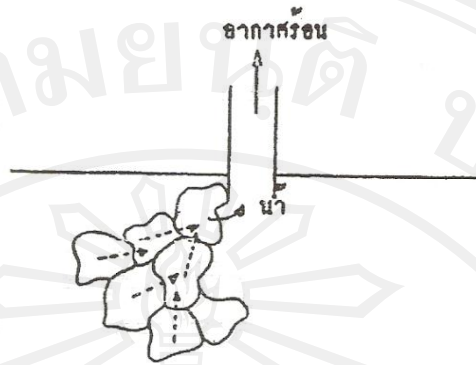
1. การเคลื่อนที่ด้วยแรงผ่านช่องแคบ (capillary force) เป็นการเคลื่อนที่ของไอน้ำในอาหารที่มีเซลล์โปร่ง มีรูพรุนขนาดใหญ่ มีช่องว่างระหว่างเซลล์ต่อเนื่องกันเป็นทางแคบๆ เกิดแรงดันของน้ำขึ้นมาตามท่อส่งน้ำ และท่อแคปิลลารี เกิดขึ้นได้สะดวกรวดเร็ว หยุดเมื่อน้ำในช่องแคบๆ ขาดตอนลง ดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 การเคลื่อนที่ของน้ำด้วยแรงผ่านช่องแคบ (capillary force)

ที่มา : สมบัติ (2529)

2. การเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ (diffusion) ผ่านเซลล์ เป็นการเคลื่อนที่ของน้ำในอาหารที่มีเนื้อแน่น ไม่มีช่องว่างระหว่างเซลล์ที่ต่อเนื่องเป็นทางแคบๆ หรือเกิดในอาหารที่อบแห้งไประยะหนึ่งแล้วที่แรงผ่านช่องแคบหมดไปแล้ว น้ำจะต้องแพร่ผ่านผนังเซลล์จึงเคลื่อนที่ได้ ซึ่ง มีลักษณะเป็น semipermeable membrane จากเซลล์หนึ่งไปยังอีกเซลล์หนึ่งน้ำเคลื่อนที่มาที่ผิวอาหารแล้วจะระเหยไปกับกระแสลมร้อน ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 การเคลื่อนที่ของน้ำด้วยการแพร่ (diffusion) ผ่านเซลล์
ที่มา : สมบัติ (2529)

2.7.4 อัตราการทำแห้งของอาหาร (Drying Rate)

ลักษณะการเคลื่อนย้ายของน้ำในอาหารมีผลต่ออัตราการทำแห้ง (การสูญเสียน้ำต่อหนึ่งหน่วยเวลา) อาหารที่มีเนื้อโปร่งการเคลื่อนที่ของน้ำจะเป็นแบบการไหลผ่านช่องแคบ น้ำที่เคลื่อนมาที่ผิวอาหารจะเร็วกว่าการระเหยกลายเป็นไอ ผิวอาหารจะเปียกชุ่มด้วยน้ำ การระเหยน้ำเกิดอย่างอิสระด้วยอัตราเร็วคงที่ เรียกการทำแห้งช่วงนี้ว่า อัตราการทำแห้งคงที่ เมื่อการไหลผ่านช่องแคบของน้ำหมดไป น้ำจะเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ที่ช้าลงมากจนผิวอาหารแห้ง การระเหยเกิดขึ้นช้าลง อัตราการทำแห้งจึงลดลง

อัตราการอบแห้ง เป็นการวัดความเร็วหรือความสามารถในการระเหยของน้ำต่อเวลาหรือพื้นที่โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

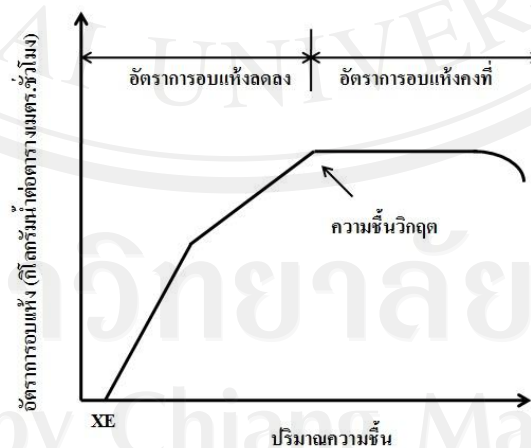
$$\text{อัตราการอบแห้ง} = \frac{\text{ปริมาณน้ำที่ระเหยไป}}{\text{ระยะเวลา หรือพื้นที่}}$$

การทำแห้งจะสิ้นสุดลง เมื่อความชื้นของอากาศในเครื่องทำแห้งสมดุลกับความชื้นของอาหารหรือค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ มีค่าเท่ากับ ค่า a_w ของอาหารคูณด้วย 100 เรียกว่าความชื้นสมดุล และการอบแห้งนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง คือ

- I : ช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัสดุ
 II : ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่
 III : ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง

เมื่อผิวของวัสดุเปียกชื้น ความชื้นที่ผิวจะอยู่ในรูปของน้ำ ถ้าเอาวัสดุนี้มาอบแห้งภายใต้เงื่อนไขที่คงที่ อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวก็จะคงที่ โดยอุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของลมร้อน ช่วงเวลาที่วัสดุใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิ จนถึงค่านี้ คือ ช่วง I ในช่วงเวลา II ที่ถัดไป อุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าคงที่ ทรายใดที่ยังมีความชื้นเหลืออยู่ในรูปของน้ำที่ผิววัสดุ ความร้อนทั้งหมดที่วัสดุได้รับในช่วงนี้จะถูกใช้ในการระเหยความชื้นเท่านั้น อัตราส่วนความชื้นของวัสดุจะลดลงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับเวลา ในช่วงนี้การอบแห้งจะเป็นแบบอัตราการอบแห้งคงที่ (constant drying rate) ในช่วง III ความชื้นในรูปของน้ำที่ผิวของวัสดุจะระเหยหมดไป การถ่ายเทความชื้นในรูปของน้ำจากส่วนในของวัสดุเกิดขึ้นไม่ทันกับการระเหยของน้ำจากผิวของวัสดุ

ดังนั้นผิวของวัสดุจะอยู่ในสภาพที่แห้งและอุณหภูมิของวัสดุจะเริ่มสูงขึ้น ปริมาณความร้อนที่วัสดุได้รับนอกจากจะลดลงแล้ว ความร้อนนี้ยังต้องใช้ในการระเหยความชื้นและเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุด้วย ในช่วงนี้การอบแห้งจะเป็นแบบอัตราการอบแห้งลดลง (falling drying rate) การอบแห้งจะสิ้นสุดลงเมื่อความชื้นลดลงถึงค่าความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content) ส่วนค่าของความชื้นที่จุดต่อระหว่างช่วง II และ III เรียกว่า ความชื้นวิกฤติ (critical moisture content) ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 การเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งกับความชื้น
 ที่มา : คัดแปลงจากนิธิยา (2555)

สำหรับการวัดความชื้นของผลผลิต โดยทั่วไปปริมาณน้ำที่อยู่ในวัสดุอบแห้ง คิดได้ 2 แบบ ดังนี้

- (1) ความชื้นมาตรฐานเปียก (wet basis); M_w จะใช้น้ำหนักของวัสดุที่ชื้น เป็นฐานในการคำนวณ ดังนี้

$$M_w = \left[\frac{(w-d)}{w} \right] \times 100 \quad (2.1)$$

- (2) ความชื้นมาตรฐานแห้ง (dry basis); M_d จะใช้น้ำหนักของวัสดุที่แห้ง เป็นฐานในการคำนวณ ดังนี้

$$M_d = \left[\frac{(w-d)}{d} \right] \times 100 \quad (2.2)$$

เมื่อ	M_w	=	ความชื้นมาตรฐานเปียก, %
	M_d	=	ความชื้นมาตรฐานแห้ง, %
	w	=	น้ำหนักรวมกับน้ำหนักแห้งของวัสดุ, kg
	d	=	น้ำหนักวัสดุแห้ง (น้ำหนักวัสดุหลังจากอบจนน้ำระเหยหมดแล้ว), kg

ความชื้นมาตรฐานเปียกจะนิยมใช้กันในวงการค้า ส่วนความชื้นมาตรฐานแห้งจะนิยมใช้กันในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งทางทฤษฎีเพื่อช่วยในการคำนวณสะดวกขึ้น ซึ่งเป็นเพราะมวลของวัสดุแห้งจะคงที่หรือเกือบคงที่ระหว่างการอบแห้ง

2.7.5 สมการจลนพลศาสตร์การอบแห้ง

1. ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่

การอบแห้งช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุอบแห้งมีความชื้นเริ่มต้นมากกว่าร้อยละ 230-300 (d.b.) ขึ้นไป (Brooker *et al.*, 1992) ที่ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ การถ่ายเทความร้อนและมวลระหว่างวัสดุ และอากาศจะเหมือนกับการถ่ายเทความร้อนและมวลที่เกิดขึ้นที่กระเปาะเปียกของเทอร์โมมิเตอร์ คือเกิดขึ้นเฉพาะที่รอบๆผิววัสดุเท่านั้น และน้ำจะ

เกาะอยู่ที่ผิวของวัสดุเป็นจำนวนมาก ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการอบแห้ง คือ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลม เมื่อเพิ่มความเร็วลมที่ไหลผ่านวัสดุ จะทำให้ฟิล์มอากาศนิ่งมีความหนาลดลง เป็นผลให้ความต้านทานต่อการไหลของความร้อนและมวลลดลงด้วย เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศอบแห้ง จะทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างที่ผิววัสดุและของกระแสอากาศที่ไหลอิสระมีมากขึ้น เป็นผลให้การถ่ายเทความร้อนและมวลดีขึ้น และเมื่อลดค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้ง จะเป็นผลให้ความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นอิมดตัวที่ผิววัสดุ และอัตราส่วนความชื้นของกระแสอากาศที่ไหลอิสระมีมากขึ้นทำให้เกิดการถ่ายเทมวลดีขึ้น การถ่ายเทมวลเกิดขึ้น เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของไอน้ำ ที่ผิวของกระเปาะเปียก และที่อากาศรอบนอก (สมชาติ, 2540) ดังสมการที่ (2.3)

$$m_w = h_D A (C_{wb} - C_\infty) \quad (2.3)$$

เมื่อ

m_w	=	อัตราการถ่ายเทมวล, kg/h
h_D	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล, m/h
A	=	พื้นที่ที่เกิดการระเหย, m^2
C_{wb}	=	ความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวของกระเปาะเปียก, kg/m^3
C_∞	=	ความเข้มข้นของไอน้ำที่กระแสการไหลอิสระของอากาศ, kg/m^3

2. ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง

สมการจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงสามารถแบ่งเป็น สมการการอบแห้งทางทฤษฎี สมการการอบแห้งกึ่งทฤษฎี และสมการการอบแห้งเอมไพริค-เคิล แต่ละรูปแบบสมการมีรายละเอียดดังนี้

ก. สมการการอบแห้งทางทฤษฎี

ทฤษฎีนี้มักตั้งสมมติฐานว่า การเคลื่อนที่ความชื้นภายในวัสดุเกิดขึ้นโดยการแพร่ (Diffusion) ตามกฎข้อที่สองของ Fick (Fick's Second Law) ซึ่งดำเนินไปแตกต่างกันตามรูปร่างของวัสดุที่กำลังอบแห้ง ทำให้สามารถคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (effective diffusion coefficient, D_{eff}) และพลังงานกระตุ้นสำหรับการแพร่ความชื้น (activation energy for diffusion) โดยการประยุกต์ใช้สมการอาร์เรเนียส (arrhenius equation) ซึ่งเป็นหลักการของ Newman (1931) สมมติฐานของสมการนี้ อาทิ ค่า D_{eff} นี้ขึ้นอยู่กับความชื้นของวัสดุในระหว่างการอบแห้ง และมีค่าคงที่ตลอดคาบเวลาการอบแห้ง อัตราการหดตัวของวัสดุในระหว่างการ

อบแห้งมีค่าคงที่ตลอดคาบเวลาการอบแห้ง การอบแห้งเป็นแบบมิติเดียว อุณหภูมิในการอบแห้งมีค่าคงที่ เป็นต้น (Adedeji *et al.*, 2008) กฎข้อที่สองของ Fick ในสภาวะการแพร่ความชื้นที่ไม่คงที่เมื่อไม่พิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิและความดันไอรวม สามารถอธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งวัสดุได้ดังนี้ (Kardum *et al.*, 2001; Janjai *et al.*, 2007)

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 X \quad (2.4)$$

เมื่อ ∇^2 คือ Laplace สำหรับเฟสของแข็งที่เคลื่อนที่ของความชื้นในทิศทางหนึ่งมิติตามทิศทาง x มีค่า ถ้าพิจารณาการถ่ายเทมวลในทิศทาง x , y และ z ซึ่งตั้งฉากกันและกัน จะได้ว่า

$$\nabla^2 = \frac{1}{x^s} + \frac{\partial}{\partial x} + \left(x^s \frac{\partial}{\partial x} \right) \quad (2.5)$$

สัมประสิทธิ์ s มีค่าเท่ากับ 0 สำหรับวัสดุที่มีรูปทรงเป็นแผ่นระนาบที่มีความยาวมาก ๆ (infinite slab) เท่ากับ 1 สำหรับวัสดุที่มีรูปทรงเป็นทรงกระบอก (cylinder) และเท่ากับ 2 สำหรับวัสดุที่มีรูปทรงเป็นทรงกลม (sphere) (Kardum *et al.*, 2001) ในสมการ (2.4) เมื่อกำหนดการะเริ่มต้นและภาวะขอบเขต (Crank, 1975) จะได้คำตอบของสมการ (2.4) ดังนี้ (Park, 1998; Kardum *et al.*, 2001; Moyano *et al.*, 2002; Janjai *et al.*, 2007; Adedeji *et al.*, 2008; Chin *et al.*, 2008; Janjai *et al.*, 2008; Gachovska *et al.*, 2008; Vega-Gálvez *et al.*, 2008)

- สำหรับวัสดุที่มีรูปทรงเป็นทรงกลม (sphere) ที่มีระยะรัศมีเท่ากับ r_0 ตัวอย่างวัสดุที่มีรูปร่างทรงกลม เช่น ลำไย ลิ้นจี่ องุ่น เมล็ดถั่วเหลือง เป็นต้น

$$\frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-n^2 \pi^2 \frac{D_{eff} t}{r_0^2}\right) \quad (2.6)$$

- สำหรับวัสดุที่มีรูปทรงเป็นทรงกระบอก (cylinder) ที่มีระยะรัศมีเท่ากับ r ตัวอย่างวัสดุที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก เช่น เมล็ดข้าวเปลือก ข้าวสาร พวักพืชเคี้ยวมัน (nuts) ดอกกะหล่ำหั่น เป็นต้น

$$\frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{r^2 (\alpha_n)^2} \exp\left(-(\alpha_n)^2 \pi^2 \frac{D_{eff} t}{r^2}\right) \quad (2.7)$$

- สำหรับวัสดุที่มีรูปทรงเป็นแผ่นระนาบที่มีความยาวมาก ๆ (infinite slab) และมีความหนาครึ่งหนึ่งเท่ากับ z ตัวอย่างวัสดุทางการเกษตรที่มีรูปร่างเป็นแผ่นระนาบ เช่น ผลไม้แผ่นกล้วยฉาบ เพื่อฉาบ สาหร่ายทะเลแผ่น เป็นต้น

$$\frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4 z^2}\right) \quad (2.8)$$

สมการ (2.6) ถึง (2.8) มีจำนวนเทอมที่ไม่มีที่สิ้นสุด และเทอมท้ายๆ จะมีค่าลดลงเรื่อยๆ ดังนั้นเราอาจตัดเทอมท้ายๆ ออกไปได้ โดยคงไว้เฉพาะเทอมแรก ($n = 1$) ซึ่งคำตอบที่ได้อาจจะไม่ผิดไปมากนัก โดยเฉพาะเมื่อเวลาการอบแห้งมีค่ามาก จึงสามารถเขียนสมการใหม่สำหรับวัสดุทรงกลม วัสดุทรงกระบอกและวัสดุแผ่นระนาบ ตามลำดับ ได้ดังนี้ (Reyes *et al.*, 2002; Lee *et al.*, 2004; Gachovska *et al.*, 2008; Khazaei *et al.* (2008); Vega-Galvez *et al.*, 2008)

$$\frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(-\pi^2 \frac{D_{eff} t}{r_0^2}\right) \quad (2.9)$$

$$\frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \frac{4}{r^2 (\alpha)^2} \exp\left(-(\alpha)^2 \frac{D_{eff} t}{r^2}\right) \quad (2.10)$$

$$\frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4 z^2}\right) \quad (2.11)$$

เมื่อ n = ลำดับที่ของฟังก์ชัน (1, 2, 3,...)

α_n = สังกาลค่าฟังก์ชันเบสเซลลอร์ดอร์ศูนย์ตามลำดับที่ n ของฟังก์ชัน

D_{eff} = สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (mm^2/min)

t = เวลาในการอบแห้ง (min)

z = ความหนาของวัสดุ (mm)

เมื่อทราบค่า D_{eff} และค่าอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง สามารถหาค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับการแพร่ (Activation energy for diffusion, E_a) โดยการประยุกต์ใช้สมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) แนวคิดนี้คิดค้นครั้งแรกโดย Newman (1931) ซึ่งมีรูปสมการคือ (Lee and Hsieh, 2008)

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (2.12)$$

เมื่อ D_0 = ค่าคงที่เทียบเท่ากับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่อุณหภูมิอากาศ

สูงไม่มีขอบเขต (mm^2/s)

E_a = พลังงานกระตุ้น (kJ/kg)

R = ค่าคงที่ของก๊าซ = 8.314 kJ/kmol.K

T = อุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง (K)

ข. สมการการอบแห้งกึ่งทฤษฎี

Lewis (1921) กล่าวว่า พฤติกรรมการอบแห้งของวัสดุนั้นจะคล้ายคลึงกับกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) จึงเรียกสมการนี้ว่าแบบจำลองของนิวตัน หรือ Exponential Model หรือ Logarithmic Model หรือ Lewis Model (Lee and Hsieh, 2008) ซึ่งเป็นรูปแบบผลเฉลยอย่างง่ายของสมการการแพร่ความชื้นของ Fick ปัจจัยที่ควบคุมการทำแห้งมาจากตัววัสดุ กฎการเย็นตัวของนิวตันมีรูปแบบสมการ ดังนี้

$$\frac{dT}{dt} = -k_r(T - T(eq)) \quad (2.13)$$

จากการเทียบเคียงจึงสามารถเขียนสมการซึ่งเกี่ยวกับอัตราการอบแห้งได้ว่า

$$\frac{d\bar{M}}{dt} = -k(\bar{M} - M(eq)) \quad (2.14)$$

แยกสมการและอินทิเกรตโดยใช้ภาวะเริ่มต้นและภาวะขอบเขต ดังนี้

$$M(r,0) = M_0 \quad \text{สำหรับ } r < R$$

$$M(r,t) = M_{eq} \quad \text{สำหรับ } t < 0$$

จะได้

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \exp(-kt) \quad (2.15)$$

ใส่ลึกรฐานธรรมชาติ (ln) ในสมการ (2.15) ทั้งสองข้างจะสามารถหาค่าคงที่การอบแห้ง (drying constant, k) ได้จากความลาดชันของเส้นกราฟที่พล็อตระหว่าง ln MR กับเวลาในการอบแห้ง (drying time, t) เส้นกราฟจะเป็นเส้นตรงที่มีความลาดชันเป็นลบ (ถ้าสมมุติฐานถูกต้อง) และค่าคงที่ k จะมีหน่วยเป็น เวลา⁻¹ ตามค่าหน่วยของ t ค่าคงที่การอบแห้งนี้จะบอกถึงระยะเวลาในการอบแห้ง หาก k มีค่ามากแสดงว่าการอบแห้งใช้เวลาสั้น Amellal and Benamara (2008) กล่าวว่าสมการนี้เหมาะกับวัสดุที่มีความพรุน (porous materials) เช่น อินทผลัมหั่นเต๋า แครรอตหั่น เป็นต้น

$$\ln MR = -kt \quad (2.16)$$

ค. สมการการอบแห้งเอมไพริคัล

สมการนี้เป็นสมการที่ได้จากการฟิตข้อมูลที่ได้จากการทดลอง เข้ากับสมการต้นแบบ ถือได้ว่าเป็นวิธีการที่ง่ายและนิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยสมการที่รู้จักกันดีในการอบแห้งวัสดุเกษตรและอาหารคือ สมการของ Page (Page's model) ซึ่งถูกพัฒนาในปี ค.ศ. 1949 เป็นสมการเริ่มแรกที่ใช้สำหรับเมล็ดข้าวโพด และพัฒนามาจาก Lewis Model (Lee and Hsieh, 2008) ดังนี้

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \exp(-kt^N) \quad (2.17)$$

ใส่ลึกรฐานธรรมชาติ (ln) ในสมการ (2.17) ทั้งสองข้าง 2 ครั้ง จะสามารถหาค่าคงที่การอบแห้ง (Drying constant, k) ได้จากเส้นกราฟที่พล็อตระหว่าง ln (-ln MR) กับ ln t เส้นกราฟจะเป็นเส้นตรงที่มีความลาดชันเป็นบวก (ถ้าสมมุติฐานถูกต้อง) ค่าคงที่ของแบบจำลองของเพจ (Page's model constant หรือค่า N) หาได้จากความลาดชันของเส้นตรง ค่า k คือ จุดที่

เส้นกราฟตัดแกนเมื่อ t มีค่าเท่ากับศูนย์นั่นก็คือ ที่ $\log 1$ นั่นเองในการพล็อต กราฟแบบ log-log และจะมีหน่วยเป็น เวลา⁻¹ ตามค่าหน่วยของค่า t ค่าคงที่การอบแห้งนี้จะบอกถึงระยะเวลาในการอบแห้งหากค่า k มีค่ามากแสดงว่าการอบแห้งใช้เวลาสั้น ส่วนค่าคงที่ N นั้นไม่มีหน่วย แบบจำลองเอมไพริคัลการอบแห้งที่นิยมใช้แสดงในสมการดังต่อไปนี้

สมการ Henderson and Pabis มีรูปแบบสมการ ดังนี้

$$MR = a \exp(-kt) \quad (2.18)$$

สมการ Two – term exponential มีรูปแบบสมการ ดังนี้

$$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat) \quad (2.19)$$

2.7.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำแห้ง

1. ธรรมชาติของอาหาร อาหารมีเนื้อโปร่ง น้ำจะเคลื่อนที่แบบผ่านช่องแคบซึ่งเร็วกว่าการแพร่ผ่านเซลล์ในอาหารเนื้อแน่น อาหารเนื้อโปร่งจะแห้งเร็วกว่าอาหารเนื้อแน่น อาหารมีน้ำตาลสูงจะเหนียว กีดขวางการเคลื่อนที่ของน้ำจะแห้งช้า อาหารที่ผ่านการลวก นวดคลึง จนเซลล์แตก จะแห้งได้เร็วขึ้น
2. ขนาดและรูปร่างมีผลต่อพื้นที่ผิว ต่อน้ำหนัก ขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักมากกว่าขนาดใหญ่ จึงแห้งได้เร็วกว่า ความหนาของอาหาร อาหารยิ่งหนามากเท่าไร การอบแห้งก็จะใช้เวลานาน นอกจากนั้นต้องคำนึงถึงพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับอากาศที่เคลื่อนย้ายไอน้ำออกไปด้วย
3. ตำแหน่งของอาหารในเตา อัตราการอบแห้งภายในตู้เกิดไม่สม่ำเสมอขึ้นอยู่กับชนิด ประสิทธิภาพ ทิศทางการเคลื่อนที่ของลมร้อน อาหารที่สัมผัสกับลมร้อนที่มีความชื้นต่ำ (ลมร้อนมีอุณหภูมิสูง) ระเหยได้ดี
4. ปริมาณอาหารต่อพื้นที่ในเตาที่มีความสัมพันธ์ กับพื้นที่ผิวที่จะสัมผัสกับลมร้อน การอบแห้งอาหารโดยใส่อาหารเข้าไปในตู้อบครั้งละมากๆ ทำให้การอบแห้งไม่ทั่วถึง โดยเฉพาะช่วงกลางๆ อาหารจะซ้อนทับกัน น้ำจะระเหยออกได้ไม่ดี อาหารจะสัมผัสกับอากาศร้อนไม่ทั่วถึง ไอน้ำไม่สามารถแพร่กระจายผ่านชั้นอาหารตอนบนได้จึงทำให้อาหารแห้งช้า การจัดเรียงอาหารเพื่อนำไปอบแห้งมีผลต่ออัตราการอบแห้ง การจัดเรียงอาหารให้แผ่กระจายอย่าง

สม่ำเสมอ ไม่ซ้อนทับกัน อาหารจะสัมผัสกับลมร้อนได้อย่างทั่วถึงสม่ำเสมอ อาหารจะแห้งได้อย่างทั่วถึง

5. ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ความแตกต่างระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของลมร้อนกับอาหารมีผลต่อแรงดันความชื้นออกจากอาหาร ในการอบแห้งลมร้อนยิ่งมีความชื้นต่ำ อัตราการอบแห้งยิ่งสูง แต่ถ้าลมร้อนมีความชื้นเข้าใกล้จุดอิ่มตัว (น้ำมาก) จะรับไอน้ำได้น้อย อัตราการอบแห้งจะต่ำ ความชื้นของอากาศจะเป็นตัวกำหนดว่าจะสามารถลดความชื้นของอาหารในกระบวนการอบแห้งให้ต่ำ อากาศร้อนที่มีไอน้ำอยู่มากจะรับไอน้ำเพิ่มได้น้อย ความชื้นสัมพัทธ์ของลมร้อนจะเป็นตัวกำหนดความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์เป็นจุดที่อาหาร และอากาศร้อนถึงจุดสมดุล การระเหยน้ำจะไม่เกิดขึ้นอีก

6. อุณหภูมิของอากาศ ถ้าเพิ่มอุณหภูมิของลมร้อนเท่ากับลดค่าความชื้นสัมพัทธ์ เป็นการเพิ่มความสามารถในการรับไอน้ำ เพิ่มแรงขับเคลื่อนน้ำหรือความชื้นออกจากผิวหนังอาหาร ถ้าใช้อุณหภูมิสูงในการอบแห้ง โมเลกุลของน้ำจะเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น อัตราการอบแห้งจะสูงขึ้น อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่ใช้ต้องไม่สูงจนทำให้อาหารไหม้ หรือเกิดความเสียหายจากปฏิกิริยาทางเคมี หรือกายภาพ การกำหนดอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ขึ้นกับลักษณะการเคลื่อนที่ของอากาศร้อน และระยะเวลาในการอบแห้ง การอบแห้งผักและผลไม้ อุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 45-70 องศาเซลเซียส ถ้าสูงกว่า 70 องศาเซลเซียส น้ำจะระเหยเร็วเกินไป อาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเชิงซ้อนทางเคมี กายภาพที่ผิวหนัง โดยผิวหนังเกิดเปลือกแห้งแข็งกระด้าง น้ำซึมผ่านไม่ได้ เรียกว่า case hardening อัตราการอบแห้งลดต่ำลง ผลิตภัณฑ์มีความชื้นอยู่ภายในสูง เมื่อเก็บผลิตภัณฑ์ไว้จะเกิดการเน่าเสีย และเกิดสีคล้ำ

7. ความเร็วของลมร้อน เป็นการพาความชื้นออกไป ถ้าใช้ความเร็วลมสูงก็จะพาไอน้ำจากผิวหนังของอาหารออกสู่ภายนอกได้เร็วขึ้น ทำให้อาหารแห้งเร็วและยังช่วยป้องกันการเกิดสภาวะอิมมัวในบรรยากาศเหนือผิวของอาหาร

2.8 การเปลี่ยนแปลงของอาหารเนื่องจากการอบแห้ง

การอบแห้งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอาหาร โดยขึ้นกับธรรมชาติของอาหาร และสภาวะที่ใช้ในการอบแห้ง กล่าวคือ

2.8.1 การหดตัว

เซลล์ของสิ่งมีชีวิตโดยธรรมชาติจะมีลักษณะเต่ง ผนังเซลล์มีความยืดหยุ่นสามารถต้านทานแรงได้ระดับหนึ่ง ถ้าแรงที่ได้รับมากเกินไปกว่าที่ผนังเซลล์จะรับได้ผนังเซลล์จะแตก เซลล์ฝิดรูปไปในการอบแห้งเมื่อน้ำระเหยไปจะเกิดช่องว่างขึ้น ทำให้เซลล์ของอาหารซึ่งเชื่อมโยงติดกันถูกดึงให้เข้าไปแทนที่ช่องว่างนั้นเซลล์หดตัวแต่ไม่สามารถหดตัวเข้าไปได้เท่าๆกันทุกส่วน ส่วนที่หดตัวไม่ได้ก็จะเกิดการยืดตัวออกทำให้เกิดแรงดึง ผนังเซลล์ทนต่อแรงดึงได้ระดับหนึ่ง ถ้าแรงที่ได้รับมากเกินไปกว่าที่ผนังเซลล์จะรับได้ทำให้เกิดการฉีกขาด ซึ่งมักเกิดกับอาหารที่มีโครงสร้างแข็งแรงหรือการอบแห้งที่เร็วเกินไป ถ้าทำการอบแห้งอย่างรวดเร็วโดยใช้อุณหภูมิสูง ผิวหน้าจะแห้งแข็งก่อนที่อาหารส่วนที่อยู่ใจกลางจะแห้ง ดังนั้นเมื่อบริเวณใจกลางแห้งและหดตัวจะดึงส่วนที่ผิวหน้าทำให้เกิดการปริแตกภายใน เกิดช่องว่าง ทำให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะคล้ายรังผึ้งได้ จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะแข็ง มีผิวหน้าที่โค้งเล็กน้อย มีลักษณะเหนียวมากกว่า มีช่องว่างมากกว่า ถ้าอบอย่างช้าๆ จะมีผิวหน้าที่โค้งมากกว่า มีเนื้อแน่น การเสียน้ำทำให้เซลล์ของอาหารเกิดการหดตัวจากผิวนอก ส่วนที่แข็งจะคงสภาพส่วนที่อ่อนจะเว้าลงไป อาหารที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบอยู่มากจะหดตัวบิดเบี้ยวมาก การทำแห้งอย่างรวดเร็วอาหารจะหดตัวน้อยกว่าการทำแห้งอย่างช้าๆ

2.8.2 การเปลี่ยนสี

สีของอาหารหลังการอบแห้งจะเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากการอบแห้งทำให้ลักษณะผิวหน้าของอาหารเปลี่ยนแปลง ทำให้เกิดการสะท้อนแสง สีเปลี่ยน และยังมีผลจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของรงควัตถุ คลอโรฟิลล์ แคโรทีนอยด์ ที่เกิดขึ้นระหว่างการอบแห้ง อาหารที่ผ่านการทำแห้งจะมีสีเข้มขึ้น เนื่องจากความร้อน ปฏิกิริยาทางเคมี เกิดสารสีน้ำตาล อุณหภูมิและความชื้นของอาหาร

2.8.3 การเกิดเปลือกแข็ง

อาหารจะมีเปลือกแข็งหุ้มส่วนในที่ยังไม่แห้งไว้ ซึ่งเกิดจากในช่วงแรกที่ทำให้น้ำระเหยเร็วเกินไป น้ำจากด้านในของอาหารเคลื่อนที่มาที่ผิวไม่ทัน หรือมีสารละลายน้ำตาล โปรตีนเคลื่อนที่มาแข็งตัวที่ผิว สามารถหลีกเลี่ยงได้โดยไม่ใช้อุณหภูมิสูงในการทำแห้ง

2.8.4 การสูญเสียความสามารถในการคืนรูป

อาหารแห้งบางชนิดต้องนำกลับมาคืนสภาพโดยการแช่น้ำ จะคืนน้ำกลับคืนได้ไม่ถึงร้อยละ 100 และใช้เวลานาน ผลิตภัณฑ์อาหารหลังคืนสภาพจะมีเนื้อเหนียว สูญเสียความนุ่ม ความฉ่ำน้ำ ความกรอบ อาจมีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การหดตัว การบิดเบี้ยว การฉีกขาดของเซลล์ เซลล์อาหารจะเสียความยืดหยุ่นของผนังเซลล์ โปรตีนเสียสภาพในการคืนน้ำ อัตราการคืนรูปอาจใช้เป็นดัชนีชี้คุณภาพของอาหาร อาหารที่ผ่านการทำแห้งภายใต้สภาวะที่เหมาะสมจะเสียหายน้อย คืนรูปได้เร็วและสมบูรณ์กว่าอาหารที่ทำแห้งไม่เหมาะสม อาหารทำแห้งด้วยการแช่เยือกแข็ง จะมีความสามารถในการคืนสภาพได้ดีที่สุด เพราะไม่ได้ใช้ความร้อนในการทำลายผนังเซลล์ หรือเปลี่ยนโครงสร้างของสตาร์ชโปรตีน

2.8.5 การเสียคุณค่าทางอาหารและสารระเหย

คุณค่าทางอาหารที่เหลืออยู่ในอาหารแห้งมีความแตกต่างกัน เป็นผลมาจากวิธีการเตรียม อุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำแห้ง สภาวะในการเก็บรักษา มีการเสื่อมสลายของวิตามินซี แคลโร-ทีน เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน การเสื่อมสลายไรโบฟลาวินจากแสง ส่วนไทอะมีน โปรตีน เกิดจากความร้อน เมื่อใช้เวลานานในการทำแห้งนานการสูญเสียก็จะยิ่งมาก การสูญเสียสารระเหยเนื่องจากความร้อนทำให้กลิ่นหอมกลิ่นรสของอาหารแห้งลดน้อยลงจากเดิม สารระเหยจะสูญเสียไปมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ปริมาณของแข็งที่มีอยู่ในอาหาร ความดันไอของสารละลาย

2.9 ประโยชน์ของการทำแห้ง

1. ป้องกันการเกิดปฏิกิริยาเคมี การผลิตเอนไซม์ การเน่าเสียที่เกิดจากเชื้อจุลินทรีย์
2. ทำให้มีผลิตภัณฑ์ไว้ใช้บริโภคในยามขาดแคลน นอกฤดูการผลิตหรือในแหล่งที่อยู่ห่างไกล
3. ทำให้สามารถเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ไว้ได้นาน โดยไม่ต้องใช้ตู้เย็นให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย
4. เป็นการลดน้ำหนักอาหาร ขนาดของอาหาร ทำให้สะดวกในการบรรจุ การเก็บรักษา การขนส่ง ลดพื้นที่ และค่าใช้จ่าย

5. เพื่อให้เกิดผลิตภัณฑ์อาหารชนิดใหม่ที่มีลักษณะ กลิ่นรสเฉพาะ เช่น ลูกเกด ซึ่งได้จากการทำแห้งองุ่น ลูกพรุน หมูแผ่น หมูหยอง กุนเชียง เป็นต้น

6. เพื่อให้เกิดความสะดวกในการใช้อุปโภคบริโภค เช่น ชา กาแฟสำเร็จรูป ผลิตภัณฑ์เหล่านี้ต้องผ่านกระบวนการหมัก ต้ม บด มาก่อนการอบแห้ง ผู้บริโภคเพียงนำมาเติมน้ำร้อน ก็สามารถบริโภคได้ทันที (รุ่งนภา, 2535)

2.10 ข้อดีและข้อเสียของการทำให้อาหารแห้ง

2.10.1 ข้อดีของการทำให้อาหารแห้ง

1. น้ำหนักเบา การทำแห้งสามารถลดน้ำหนักลงได้ประมาณร้อยละ 60-90 ของอาหารสด ยกเว้นธัญพืชประกอบด้วยน้ำ และน้ำส่วนนี้เองจะถูกกำจัดออกโดยกระบวนการอบแห้งหรือตากแห้ง
2. มีความกระชับ คือผลิตภัณฑ์อาหารอบแห้งต้องการเนื้อที่น้อยกว่าของอาหารสด อาหารแห้งเยือกแข็ง หรืออาหารกระป๋อง โดยเฉพาะถ้าสามารถจัดเก็บในภาชนะบรรจุได้
3. ความคงตัวที่สภาวะการเก็บ ผลิตภัณฑ์อาหารแห้งไม่จำเป็นต้องใช้ตู้เย็นในการเก็บรักษา แต่มีข้อจำกัดของอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในระหว่างการเก็บรักษา เพื่อให้ได้ระยะเวลาการเก็บรักษาที่นานขึ้น

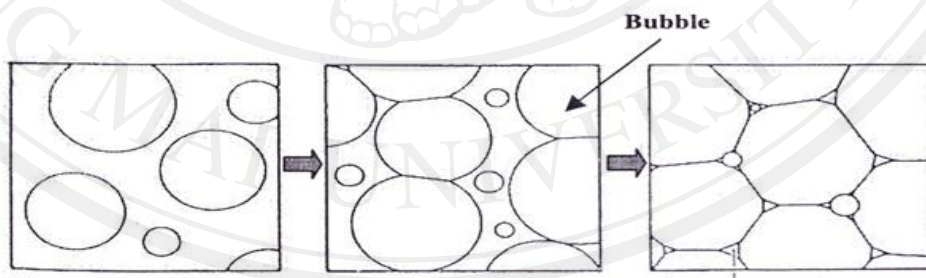
2.10.2 ข้อเสียของการทำให้อาหารแห้ง

1. ความไวต่อความร้อน เนื่องจากอาหารส่วนมากมีความไวต่อความร้อนในระดับหนึ่ง อาจทำให้เกิดกลิ่นรสใหม่ขึ้นได้ ถ้าควบคุมสภาวะไม่เหมาะสม
2. เกิดการสูญเสียกลิ่นรส สารระเหยที่ระเหยได้ และเกิดการเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์ได้
3. การเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ซึ่งรวมถึงการเกิดการแห้งกรอบ อันเนื่องมาจากการหดตัว
4. เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่ไม่ใช่เกิดจากเอนไซม์ ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มข้นของสารเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังเกิดการหืนของไขมัน

5. เกิดการเสื่อมเสียอันเนื่องมาจากจุลินทรีย์ได้ ถ้าหากว่าอัตราการอบแห้งเริ่มต้นช้า ปริมาณความชื้นสุดท้ายมีค่าสูง หรือเก็บผลิตภัณฑ์ไว้ในบรรยากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง

2.11 การทำแห้งแบบโฟม-แมท (Foam-mat Drying)

กระบวนการทำแห้งแบบโฟม-แมท เริ่มพัฒนาขึ้นที่ห้องปฏิบัติการวิจัย The Western Regional Research Laboratory โดยนายมอร์แกนและคณะ เพื่อผลิตน้ำผลไม้ผงที่มีสีและกลิ่นใกล้เคียงของสดโดยใช้ต้นทุนการผลิตต่ำกว่าการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งและแบบสุญญากาศ การทำแห้งแบบโฟม-แมทเป็น กระบวนการทำแห้งต่ออาหารเหลวให้มีลักษณะเป็นโฟมที่คงตัวในระหว่างกระบวนการ ซึ่งการทำให้เกิดโฟมทำได้โดยการนำอาหารเหลวมาตีโดยใช้เครื่องตีความเร็วสูง เพื่อเป็นการเติมอากาศเข้าไปในอาหาร (ภาพที่ 2.9) อาหารบางชนิด เช่น นํ้านม ไข่ขาว เมื่อนำมาผ่านกระบวนการดังกล่าวก็สามารถเกิดโฟมขึ้นได้ เนื่องจากอาหารเหล่านี้อาจประกอบด้วยโปรตีนและสารโมโนกลีเซอไรด์ ซึ่งมีสมบัติทำให้เกิดโฟมและรักษาโฟมให้คงทนแข็งแรง แต่อาหารบางชนิด เช่น นํ้าส้มคั้น จำเป็นต้องมีการเติมสารก่อให้เกิดโฟมลงไปด้วยจึงจะได้โฟมที่คงทน จากนั้นโฟมที่ได้จะนำไปเกลี่ยให้เป็นแผ่นบางบนถาดหรือสายพานแล้วจึงนำไปทำแห้งผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการอบจะนำไปบดเป็นผง (รัตนา, 2547)



ภาพที่ 2.9 ลักษณะของฟองอากาศที่แทรกตัวอยู่ในของเหลวตั้งแต่เริ่มตีปั่นจนเกิดโฟมที่สมบูรณ์
ที่มา : กฤต (2548)

2.11.1 ปัจจัยที่มีผลต่อความคงตัวของโฟม (นิธิยา, 2553)

ปัจจัยที่มีผลต่อความคงตัวของโฟมแบ่งออกได้เป็น 5 ปัจจัย ดังนี้

1. ความหนืด การทำให้ของเหลวมีความหนืดสูงขึ้น จะทำให้โฟมมีความคงตัวมากขึ้น สารที่ช่วยเพิ่มความหนืดส่วนใหญ่เป็นพวกน้ำตาลและสารไฮโดรคอลลอยด์ สารพวกนี้นอกจากจะเพิ่มความหนืดแล้วยังลดแรงตึงผิวอีกด้วย
2. ของเหลวที่มีแรงตึงผิวต่ำ จะช่วยให้ของเหลวมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นรอบฟองอากาศ โดยไม่บีบตัวให้ฟองอากาศแตกเร็วเกินไป ดังนั้นการเปลี่ยนแรงตึงผิวของฟิล์มสามารถทำให้เกิดโฟมหรือ การยุบตัวของโฟมได้
3. ความดันไอ ของเหลวต้องมีความดันไอต่ำ เพราะทำให้ของเหลวกลายเป็นไอดียากหรือของเหลวระเหยได้ช้า ถ้าของเหลวมีความดันไอสูงจะกลายเป็นไอย่างรวดเร็ว ทำให้ฟิล์มที่ล้อมรอบฟองอากาศบางลงและโฟมจะยุบตัว
4. การเกิดฟิล์มของอนุภาคฟองอากาศ โฟมที่มีความคงตัวฟิล์มที่เกิดขึ้นต้องมีค่าความยืดหยุ่นที่ผิวสัมผัสและความหนืดที่ผิวสัมผัสสูง
5. สารที่จะช่วยให้โฟมมีความแข็งตัว (rigidity) ที่ระหว่างผิวของก๊าซและของเหลว เช่น โปรตีนที่มีอยู่ในอาหาร เมื่อทำให้เกิดโฟมโดยการตี โปรตีนจะเสียสภาพขณะตี จะช่วยทำให้โฟมมีความแข็งตัวและคงตัวมากขึ้นด้วย

2.11.2 ข้อดีของกระบวนการทำแห้งแบบโฟม-แมท (รัตนา, 2547)

1. สามารถใช้ได้กับอาหารเหลว หรืออาหารกึ่งเหลวที่มีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบอยู่สูง โดยยังสามารถรักษากลิ่นและสีไว้ได้ ขณะที่กระบวนการทำแห้งแบบอื่นๆ เช่น การทำแห้งแบบพ่นฝอย (spray drying) การทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (drum drying) ไม่สามารถทำได้
2. เป็นการทำแห้งที่ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยมาก น้อยกว่ากระบวนการทำแห้งแบบอื่นๆ และส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำกว่าวิธีการอื่น
3. คุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารแห้งที่ได้ สามารถรักษาสี กลิ่น และความสามารถในการคืนรูปไว้ได้ดีกว่า การทำแห้งโดยใช้ลมร้อนแบบอื่นๆ และมีคุณภาพใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ที่ทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze drying)
4. ผลิตภัณฑ์อาหารที่ได้มีลักษณะเป็นผง มีน้ำหนักเบา และสามารถเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องได้ ทำให้ค่าใช้จ่ายในการขนส่งต่ำ

2.11.3 สารก่อให้เกิดโฟม (Foaming Agent)

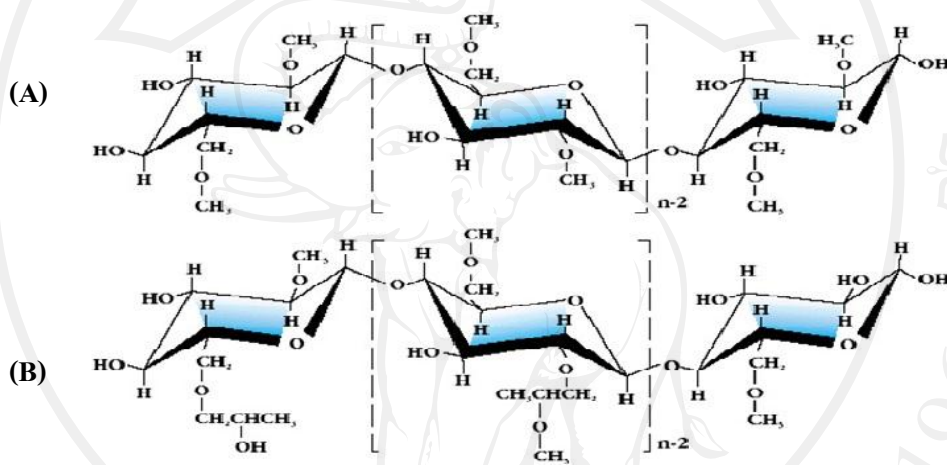
สารก่อให้เกิดโฟมเป็นสารที่ใช้เติมลงไปในการอาหารเหลว เพื่อช่วยให้เกิดโฟมเมื่อนำไปตีในเครื่องตีปั่นเติมอากาศให้กับอาหารจนเกิดโฟม ซึ่งเป็นของผสมระหว่างของเหลวหรือกึ่งของแข็งและอากาศมีของเหลวเป็นส่วนต่อเนื่อง (continuous phase) และอากาศเป็นส่วนกระจาย (disperse phase) โดยชั้นของเหลวบางๆ เรียกว่า ลามลเล (lamellae) แยกฟองอากาศออกจากกัน สารก่อให้เกิดโฟมที่เติมลงในอาหารจะช่วยทำให้เกิดสภาพโฟม สารนี้ทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงบริเวณลามลเล ทำให้อาหารอู้อากาศไว้ภายในได้มากขึ้น โดยฟองอากาศนั้นไม่แตกหรือแยกออก ขณะเดียวกันจะช่วยรักษาสภาพโฟมให้คงตัวอยู่ได้นาน ทำให้โฟมมีความคงตัวยิ่งขึ้น ปกติโมเลกุลของสารที่ช่วยให้เกิดโฟมนั้นประกอบไปด้วยส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophile) ซึ่งเป็นพวกอนุโมลติสรีที่มีประจุ อาจเป็นประจุบวกหรือลบก็ได้ เป็นส่วนที่ละลายอยู่ในเฟสของน้ำ และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobe) เป็นส่วนที่ไม่มีประจุ มักเป็นอนุพันธ์คาร์บอนอะตอมที่มีสายยาวๆ (aliphatic carbon chain) เป็นส่วนที่จะละลายอยู่ในเฟสของน้ำมัน (สมบัติ, 2529)

สารก่อให้เกิดโฟมที่เลือกใช้สำหรับอาหารต้องไม่มีรสชาติ ไม่ทำปฏิกิริยากับอาหาร สามารถทำให้เกิดโฟมได้ดีเมื่อใช้ในปริมาณต่ำ และปลอดภัยสำหรับการบริโภค (รัตนา, 2547) สารก่อให้เกิดโฟมที่ใช้ในอาหาร เช่น เมทโซเซล (methocel) โปรตีนถั่วเหลือง (solubilized soya protein) กลีเซอรอลโมโนสเตียเรต (glyceryl monostearate) และอัลบูมินจากไข่ (egg albumin) (ตารางที่ 2.2 แสดงสารเพิ่มความคงตัวของโฟมและวิธีการเตรียมสาร และตารางที่ 2.3 แสดงชนิดและความเข้มข้นของสารเพิ่มความคงตัวของโฟมในผลิตภัณฑ์ต่างๆ)

1. เมทโซเซล

เมทโซเซล เป็นชื่อทางการค้า ผลิตโดยบริษัท Dow Chemical ประเทศสหรัฐอเมริกา เมทโซเซลเป็นสารช่วยให้โฟมคงตัวชนิดหนึ่ง โดยมีสายโพลิเมอร์ของเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลัก ไม่มีรสชาติและไม่ทำปฏิกิริยากับอาหารที่เติมลงไป ลักษณะเป็นผง ความบริสุทธิ์สูงและให้พลังงานต่ำ และใช้ในปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมทโซเซลสามารถละลายน้ำได้ มีคุณสมบัติเป็นสารยึดเกาะ (binders) สารช่วยให้เกิดการแขวนลอย (suspension agent) สารช่วยให้มีอิมัลชันคงตัว (emulsifier colloid) ที่สำคัญคือ เมทโซเซลเป็นกัม (gum) ที่มีคุณสมบัติเป็นเจลสามารถเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ (thermally gel) สามารถทำหน้าที่เป็นตัวลดแรงตึงผิว (surfactant) ทำให้เกิดสภาพฟิล์มขึ้น (film forming) ในอาหารได้ ทั้งที่อุณหภูมิสูงและต่ำได้ ซึ่งเป็น

คุณสมบัติที่ดีในการเป็นสารช่วยให้โคมกตัวในอาหารที่ต้องการทำแห้งแบบโคม สามารถแบ่งเมทโรเซลตามชนิดของเซลลูโลส อีเทอร์ (cellulose ethers) ภายในองค์ประกอบทางเคมีได้ 2 ชนิด คือ เมทซิล เซลลูโลส (methylcellulose, MC) และไฮดรอกซีโพรพิล เมทซิล-เซลลูโลส (hydroxypropyl methylcellulose, HPMC) โครงสร้างทางเคมีของ เมทโรเซล ทั้ง 2 ชนิด (ภาพที่ 2.10) มีโครงสร้างเป็นสายโซ่ของเซลลูโลส (polymeric backbone cellulose) ซึ่งมีพื้นฐานคือ หน่วยย่อยของกลูโคส (anhydroglucose unit) (Dow Chemical Company, 2000)

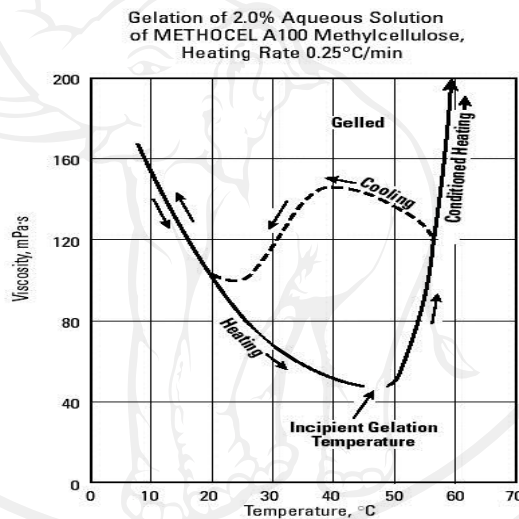


ภาพที่ 2.10 โครงสร้างทางเคมีของ Methocel ชนิด methylcellulose (A) และชนิด hydroxypropyl methylcellulose (B)

ที่มา : Dow Chemical Company (2000)

ความแตกต่างของเมทโรเซลชนิดต่างๆ เกิดจากการผันแปรสัดส่วนของหมู่แทนที่ที่เป็น hydroxypropyl กับ methoxyl สัดส่วนดังกล่าวนี้จะทำให้ความสามารถในการละลาย ความข้นหนืดและอุณหภูมิเริ่มเกิดเจล (thermal jel point) ของสารละลายเมทโรเซลแตกต่างกันไป สามารถแบ่งออกตามค่าระดับการแทนที่ (degree of substitution, D.S.) ซึ่งหมายถึงปริมาณโดยเฉลี่ยของหมู่แทนที่ที่ทำปฏิกิริยาที่วงแหวนตรงบริเวณหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl) ของ anhydroglucose unit หากมีการแทนที่ 2 แห่ง เรียก D.S. = 2 เป็นต้น ความหนืดของสารละลายเมทโรเซล เริ่มตั้งแต่ 3-100,000 เซนติพอยส์ เมทโรเซลละลายน้ำที่อุณหภูมิห้องไม่ได้ แต่สามารถกระจายตัวได้ดีในน้ำร้อน ซึ่งต้องมีอุณหภูมิสูงเกินค่าเฉพาะค่าหนึ่ง หลังจากเมทโรเซลกระจายตัวในน้ำและทุกอนุภาคเปียกแล้ว การละลายของเมทโรเซล จะเกิดขึ้นต่อเมื่อลดอุณหภูมิของน้ำให้

ต่ำลง เมื่อโมเลกุลน้ำจับกับสายโพลิเมอร์เมทโซเซลอย่างสมบูรณ์ ทำให้เกิดการคายตัวของสายโพลิเมอร์ เมทโซเซลจากที่จับซ้อนเมื่อเริ่มต้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นสายโพลิเมอร์จะปล่อยโมเลกุลของน้ำออกมา ทำให้ความหนืดลดลงไปจนกระทั่งอุณหภูมิสูงถึงจุดเริ่มเกิดเจล (incipient gelation temperature) สายโพลิเมอร์ที่ปราศจากน้ำนี้จะจับกันและสารละลายเริ่มเกิดเจล ความแข็งแรงของเจลเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แต่มีค่าความแข็งแรงต่อไปอีกเพียงเล็กน้อย หลังจากนั้นปฏิกิริยาจะเริ่มผันกลับและความหนืดจะลดลงอย่างรวดเร็ว จนในที่สุดกราฟลดลงมาจนบรรจบกราฟเดิมเมื่อเริ่มต้นให้ความร้อน โดยกลไกนี้สามารถทำซ้ำได้อีกหลายครั้งตามต้องการ เพราะเจลของเมทโซเซลมีคุณสมบัติผันกลับได้ (reversible) ดังภาพที่ 2.11 (Dow Chemical Company, 2000)



ภาพที่ 2.11 ผลของการเพิ่มและลดอุณหภูมิต่อความข้นหนืดและการเกิดเจลของสารละลายเมทโซเซล

ที่มา : Dow Chemical Company (2000)

ปรากฏการณ์เกิดเจลของเมทโซเซลที่บริเวณผิวรอยต่อของวัฏภาค (interfacial) ของอาหารที่มีสภาพอิมัลชันเกิดขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของเมทโซเซลมีลักษณะเป็นสายโพลิเมอร์เคลื่อนที่ไปยังบริเวณผิวสัมผัสระหว่างอากาศกับน้ำ ทำให้เกิดสภาพโฟมที่มีความคงตัวและไม่เกิดการยุบตัว ความหนืดของเมทโซเซลมีผลเล็กน้อยต่ออุณหภูมิเริ่มเกิดเจล ในขณะที่หากความเข้มข้นของเมทโซเซลเพิ่มขึ้นมีผลทำให้อุณหภูมิเริ่มเกิดเจลต่ำลง (Dow Chemical Company, 2000)

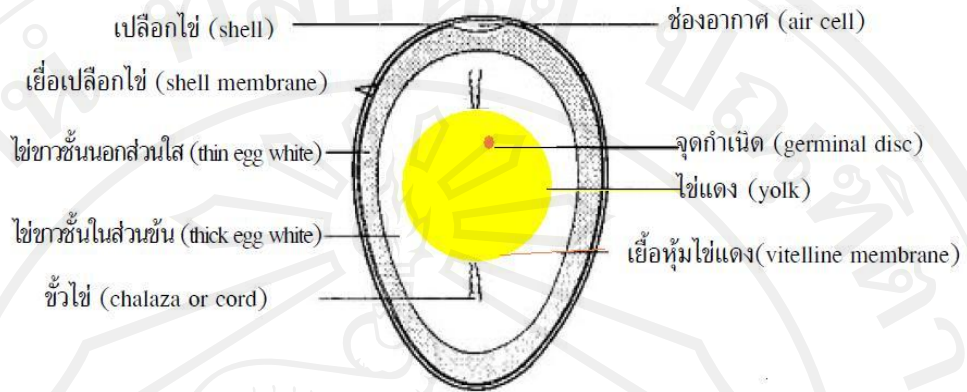
Karim and Wai (1999) ศึกษาการทำมะเฟืองผงโดยการอบแห้งแบบโฟม-เมท โดยเตรียมโฟมจากเนื้อมะเฟืองสดและใช้เมทโซเซล 65 เอชจี (methocel 65 HG) เป็นสารก่อโฟมที่

ความเข้มข้นร้อยละ 0.1-0.4 โดยน้ำหนัก พบว่าที่ความเข้มข้นของเมทโรเซล 65 เอชจี ร้อยละ 0.4 โดยน้ำหนัก ค่า overrun และความคงตัวของโฟมมีค่าสูงสุด ซึ่งค่าของทั้งสองตัวนี้จะผันแปรตามความเข้มข้นของเมทโรเซล 65 เอชจี เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้งโฟมของมะเฟืองจาก 70 องศาเซลเซียส เป็น 90 องศาเซลเซียส จะลดเวลาในการทำแห้งลงถึง 30 นาที แต่อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นนี้ส่งผลให้เกิดสีน้ำตาลอ่อนและทำให้กลิ่นของมะเฟืองลดลง

2. อัลบูมินจากไข่

อัลบูมินจากไข่ เป็นโปรตีนในกลุ่มของ simple protein ซึ่งอัลบูมินเป็นกลุ่มของโปรตีนที่ละลายได้ดีในน้ำและมีน้ำหนักโมเลกุลค่อนข้างต่ำ เสถียรภาพธรรมชาติได้ง่ายด้วยความร้อน (นิธิยา, 2553) อัลบูมินจากไข่มีสมบัติในการทำให้เกิดความคงตัว ช่วยให้เกิดการขึ้นฟู การเกิดโฟม ทำให้เกิดลักษณะปรากฏและเนื้อสัมผัสที่ดี (ศิริลักษณ์และกมลวรรณ, 2544) ภาพที่ 2.12 แสดงโครงสร้างของไข่ Garcia *et al.* (1988) ศึกษาการใช้อัลบูมินจากไข่ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เป็นสารก่อโฟม จากการทดลองพบว่าอัลบูมินจากไข่เป็นสารก่อให้เกิดโฟมที่ดี สามารถลดความหนาแน่นของก๊วยได้และเมื่อพิจารณาอัตราการอบแห้งของแผ่นโฟมก๊วยหั่นชิ้น พบว่าการอบแห้งแผ่นโฟมก๊วยจะให้อัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งก๊วยหั่นชิ้นถึง 2 เท่า แต่ไม่มีการศึกษาถึงคุณภาพของแผ่นโฟมก๊วยเมื่อผ่านการอบแห้ง

รติยาและคณะ (2550) ได้ศึกษาการอบแห้งแผ่นโฟมที่ทำจากก๊วยสุก โดยการใช้ไข่ขาว โปรตีนสกัดจากถั่วเหลือง (soy protein isolate) และโปรตีนจากหางนม (whey protein) เป็นสารก่อให้เกิดโฟม ความหนาแน่นของโฟมก๊วยที่ใช้ในการอบแห้งคือ 0.3, 0.5 และ 0.7 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร พบว่าโฟมก๊วยกรณีที่ใช้โปรตีนจากหางนมเป็นสารก่อให้เกิดโฟมมีเสถียรภาพมากกว่า และสามารถคงโครงสร้างความเป็นรูพรุนขณะอบแห้งได้ดีกว่า ส่งผลให้แผ่นโฟมก๊วยกรณีใช้โปรตีนจากหางนมหดตัวน้อยกว่าแผ่นโฟมก๊วยกรณีใช้ไข่ขาว และโปรตีนสกัดจากถั่วเหลือง และคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส พบว่าแผ่นโฟมก๊วยกรณีใช้ไข่ขาว และโปรตีนจากหางนมมีความกรอบน้อยกว่าแผ่น โฟมก๊วยกรณีใช้โปรตีนสกัดจากถั่วเหลือง โดยแผ่นโฟมก๊วยที่มีความหนาแน่นโฟมต่ำ จะมีความแข็งน้อยกว่าแผ่นโฟมก๊วยที่มีความหนาแน่นโฟมสูง แต่จะมีความกรอบน้อยกว่าด้วยและจากการทดสอบคุณภาพด้านประสาทสัมผัส พบว่าผู้ทดสอบพึงพอใจแผ่นโฟมก๊วยกรณีใช้โปรตีนจากหางนม มากกว่ากรณีใช้ไข่ขาวและโปรตีนสกัดจากถั่วเหลืองเป็นสารก่อให้เกิดโฟม



ภาพที่ 2.12 โครงสร้างของไข่
ที่มา : นิธิยา (2555)

3. กลีเซอรอล โมโนสเตียเรต (Glyceryl monostearate, GMS)

กลีเซอรอล โมโนสเตียเรต เป็นที่รู้จักในชื่อของโมโนสเตียรีน (monostearin) เป็นของผสมที่มีสัดส่วนที่แตกต่างของ กลีเซอรอล โมโนสเตียเรต (glyceryl monostearate) กลีเซอรอล โมโนปาล-มิเตด (glyceryl monopalmitate) และกลีเซอรอลเอสเทอร์ (glyceryl ester) ของกรดไขมันที่มีอยู่ในกรด สเตียริก GMS เตรียมได้จากการสลายกลีเซอรอล (glycerolysis) ของไขมันหรือน้ำมันที่ได้มาจากแหล่งที่สามารถรับประทานได้หรือผ่านกระบวนการเอสเทอริฟิเคชัน (esterification) ของกรดสเตียริกที่ได้มาจากแหล่งที่สามารถรับประทานได้ โดยใช้กลีเซอริน (Igoe and Hui, 1996) โดยสูตรโครงสร้างของ กลีเซอรอล โมโนสเตียเรต แสดงดังในภาพที่ 2.13

Falade *et al.* (2003) ศึกษาการทำแห้งแบบโฟม-เมทของถั่วฝักยาว (cowpea) โดยใช้สารก่อให้เกิดโฟม คือ อัลบูมินจากไข่และกลีเซอรอล โมโนสเตียเรต ผสมกับแป้งที่มีลักษณะเหนียวที่ทำจากถั่วฝักยาวที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดร้อยละ 22, 25 และ 28 ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 2.5, 5.0, 7.5, 12.5 และ 15 โดยน้ำหนัก เวลาที่ใช้ในการตีโฟม 3, 6, 9, 12, 15, 18 และ 21 นาที อุณหภูมิในการเกิดโฟม 15, 25 และ 35 องศาเซลเซียส และทำแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 นาที พบว่าความหนาแน่นของโฟมลดลง เมื่อความเข้มข้นของอัลบูมิน และกลีเซอรอล โมโนสเตียเรตเพิ่มขึ้น และความหนาแน่นต่ำสุดที่ได้มาใช้เวลาในการตีโฟม 21 และ 9 นาที ตามลำดับ

เมื่อนำไปอบแห้ง พบว่าโพลีที่ใช้อัลบูมินจากไข่เกิดการยุบตัวลง ขณะทำแห้งในด้านคุณภาพ ทางด้านประสาทสัมผัสไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $P > 0.05$



ภาพที่ 2.13 สูตรโครงสร้างของกลีเซอรอล โมโนสเตียเรต

ที่มา: ChemBlink (2011)

ตารางที่ 2.2 สารเพิ่มความคงตัวของโฟมและวิธีการเตรียมสาร

สารเพิ่มความคงตัว	ชื่อทางการค้า	บริษัทผู้ผลิต	การรับรอง ของ FDA	วิธีการใช้
กลีเซอรอล โมโนสเตียเรต (Glyceryl monostearate)	Myverol 1800	DPI	√	ใช้ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5-10ผสมและเก็บที่อุณหภูมิ 60-65 °C หรือทำให้เกิดการกระจายตัวที่อุณหภูมิ 77 °C และเก็บที่ 54°C
โปรตีนจากถั่วเหลือง (Solubilized soya protein)	D-100-WA	Gunther Product	√	ใช้ที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยเตรียมในรูปสารละลายที่อุณหภูมิ 21°C
ซูโครส โมโนปาลมิเตท (Sucrose monopalmitate)	-	Ledoga	X	ใช้ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1-5 โดยน้ำหนัก โดยละลายในน้ำที่อุณหภูมิ 71-82 °C ถ้าเตรียมที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 ควรใช้สารละลายที่ 21°C แต่ถ้าเตรียมที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 ควรใช้สารละลายที่ 54°C
ซูโครส โมโนลอเรต (Sucrose monolaurate)	-	Ledoga	X	ใช้ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1-5 โดยน้ำหนัก โดยละลายในน้ำที่อุณหภูมิ 71-82 °C ถ้าเตรียมที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 ควรใช้ที่ 21°C
อัลบูมินจากไข่ (Egg albumin)	Span 60	-	√	ใช้ในรูปสารละลายที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 ที่อุณหภูมิ 21°C
ซอร์บิแทน โมโนสเตียเรต (Sorbitan monostearate)	Tween 60	Atlas	บางส่วน	ใช้สารละลายผสมของ Span 60 เข้มข้นร้อยละ 9.2 ร่วมกับ Tween 60 ร้อยละ 0.8 ที่อุณหภูมิ 21-60 °C
โพลีออกซีเอทิลีน ซอร์บิแทน โมโนสเตียเรต (Polyoxyethylene Sorbitan onostearate)	Methocel110 CPS. MC	Atlas	บางส่วน	ใช้สารละลายผสมของ Span 60 เข้มข้นร้อยละ 9.2 ร่วมกับ Tween 60 ร้อยละ 0.8 ที่อุณหภูมิ 21-60 °C
เมทิลเซลลูโลส (Methylcellulose)	Jagure 307	Dow	√	เตรียมในรูปสารละลายที่อุณหภูมิต่ำ
กัวกัม (Guar gum)	Cell U	Stieb-Hall	√	เตรียมในรูปสารละลายที่อุณหภูมิต่ำ

ที่มา: รัตนา (2547)

ตารางที่ 2.3 ชนิดและความเข้มข้นของสารเพิ่มความคงตัวของโฟมในผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์	ปริมาณของแข็งที่ละลายได้	วัตถุเจือปนที่ใช้	ความเข้มข้น (ร้อยละ)	อุณหภูมิที่ใช้ (°C)	ความหนาแน่นของโฟม (กรัม/มิลลิลิตร)	เวลาที่ใช้ในการตีโฟม (นาที)
แอปริคอต	32	A	1.1	0	0.43	10
น้ำแอปเปิ้ล	47.2	C&D	0.10, 0.02	38	0.15	10
ซอสแอปเปิล	20	E	1.5	21	0.25	10
กล้วยแช่เยือกแข็ง	21	A	1.0	4	0.40	20
กาแฟสกัด	47	C	1.0	21	0.20	10
แป้งอเนกประสงค์	35	H	1.0	21	0.25	20
น้ำองุ่นเข้มข้น	46	B&I	1.0, 0.2	21	0.25	4
น้ำองุ่น	39	B&I	2.0, 0.45	21	0.17	11
น้ำมันาวเข้มข้น	60	A	1.0	21	0.25	5
นมเต็มมันเนย	42	J	-	21	0.35	10
กากน้ำตาล	85	A	0.3	21	0.50	3
น้ำส้ม	50	B&I	0.8, 0.2	4	0.30	20
ถั่วมีฝัก	18	A	5.5	21	0.40	15
ลูกแพร์	13	A	7.7	21	0.21	5
น้ำสับปะรด	46	B	1.0	21	0.28	2
มันฝรั่งชนิดขาว	19	A	1.6	21	0.52	3
น้ำผลไม้สกอช (Squash)	12	F&G	2.6, 0.2	21	0.55	35
พ룬 (Prune)	35	A	0.5	21	0.40	9
พ룬 (Prune)	24.4	B&H	4.0, 0.5	0	0.23	10
นมถั่วเหลือง	40	A	1.5	21	0.28	10
สตอเบอรี่ในน้ำเชื่อม	70	B	1.0	21	0.31	5
ซูโครส	53	B	1.0	21	0.29	5
ซูโครสผสมเจลาติน 6%	30	A	1.0	21	0.40	4

หมายเหตุ วัตถุเจือปนที่ใช้

A. Glyceryl monostearate

B. Solubilizes soya protein

C. Sucrose monopalmitate

D. Sucrose monolaurate

E. Egg albumin

F. Sorbitan monostearate

G. Polyoxyethylene sorbitan monostearate

H. Methylcellulose. 8000 cps.

I. Methylcellulose. 10 cps.

J. No additive

K. Guar gum

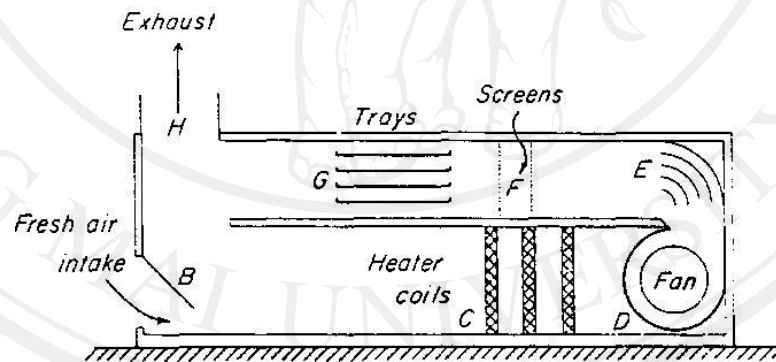
L. Tapioca starch

ที่มา: รัตนา (2547)

2.12 เครื่องอบแห้งสำหรับการทำแห้งแบบโฟม-แมท

1. เครื่องอบแห้งแบบถาดหรือห้องอบ (Tray or car dryer)

ระบบการอบแห้งชนิดนี้จะใช้ถาด หรือวัตถุอื่นที่ทำให้ผลิตภัณฑ์อาหารสัมผัสกับอากาศร้อนในห้องปิด (enclosed space) ถาดวางผลิตภัณฑ์ภายในตู้ (cabinet) หรือ ห้องปิด (ภาพที่ 2.14) จะสัมผัสกับอากาศร้อนเพื่อให้การทำแห้งดำเนินต่อไป การเคลื่อนที่ของอากาศเหนือผิวผลิตภัณฑ์ด้วยความเร็วค่อนข้างสูง เพื่อให้แน่ใจว่าการถ่ายเทมวล และความร้อนดำเนินไปด้วยประสิทธิภาพสูง การปรับปรุงเครื่องอบแห้งแบบคาบิเนทสามารถทำได้โดยการติดตั้งสูญญากาศภายในห้อง ระบบการทำแห้งชนิดนี้จะใช้สูญญากาศเพื่อรักษาความดันไอในที่ว่างรอบๆ ผลิตภัณฑ์ให้ต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้ การลดความดันเช่นนี้มีผลทำให้อุณหภูมิ และความชื้นของผลิตภัณฑ์ระเหยน้อยลง ซึ่งเป็นการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้ดีขึ้น โดยทั่วไปแล้วเครื่องอบแห้งแบบถาดจะทำงานลักษณะเป็นกะ (batch system) และมีข้อเสียในเรื่องการอบแห้งผลิตภัณฑ์ไม่สม่ำเสมอที่ตำแหน่งต่างๆกันภายในระบบ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการหมุนถาดของผลิตภัณฑ์เพื่อช่วยปรับปรุงการอบแห้งให้สม่ำเสมอ (รุ่งนภา, 2535)



ภาพที่ 2.14 เครื่องอบแห้งแบบถาดชนิดคาบิเนท

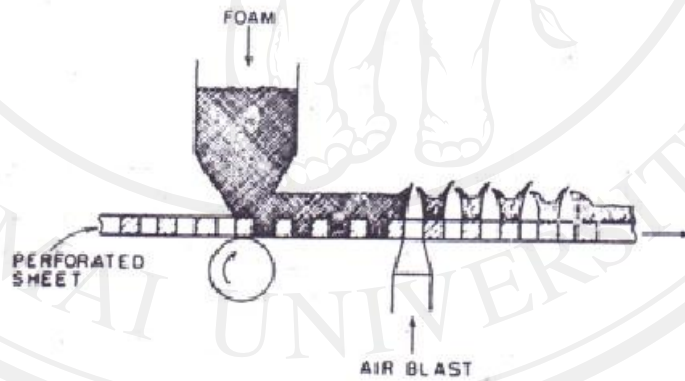
ที่มา : รุ่งนภา (2535)

2. เครื่องอบแห้งแบบสายพาน (Conveyor dryer)

เมื่อวางผลิตภัณฑ์ชั้นเดียวบนสายพานที่เป็นรู (perforated) ที่เคลื่อนที่ กระบวนการทำให้แห้งจะกระทำได้ในเครื่องอบแห้งแบบสายพาน อากาศที่ใช้ทำแห้งจะผ่านรูของ

สายพานในทิศทางที่ขึ้นหรือลง ซึ่งขึ้นกับลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์ ในบางกรณีการกลับทิศทางการไหลของลม ในเวลาต่างๆกันในระหว่างกระบวนการ ซึ่งเป็นข้อดีในแง่การทำงานโดยสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ขณะที่สายพานเคลื่อนผ่านบริเวณที่ปิดของเครื่องอบ ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์บนสายพานจะลดลง คุณสมบัติของอากาศที่ใช้ ณ ตำแหน่งต่างๆบนสายพานสามารถเปลี่ยนแปลงได้ เพื่อให้ได้คุณสมบัติและสภาวะที่สัมพันธ์กับผลิตภัณฑ์ตามต้องการ เครื่องอบแห้งแบบสายพานมีข้อจำกัด คือ การทำแห้งที่ให้ผลิตภัณฑ์นั้นมีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 10 ซึ่งต้องใช้เวลาที่ยาวนาน ด้วยเหตุนี้วิธีที่นิยมใช้กันคือการส่งผลิตภัณฑ์ไปยังเครื่องอบแห้งเครื่องที่สอง เมื่อปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์เป็นร้อยละ 27 หรือน้อยกว่า

ตัวอย่างของเครื่องอบแห้งแบบสายพาน ได้แก่ เครื่องอบแห้งโฟม-แมท เครื่องอบแห้งชนิดนี้จะใช้กับของเหลวที่มีความไวต่อความร้อนต่างๆกัน ซึ่งจะเปลี่ยนไปเป็นโฟมที่เสถียรแล้วจึงปล่อย โฟมบนสายพานดังภาพที่ 2.15 อากาศจะเป่าผ่านสายพานที่เป็นรู และผลิตภัณฑ์ในทิศทางขึ้นเพื่อให้เกิดการอบแห้ง ชั้นของโฟมนี้ปกติจะมีความหนา 3 มิลลิเมตร และจากการทดลองพบว่า ความเร็วและความชื้นของอากาศไม่ได้มีผลต่อระยะเวลาในการอบแห้งมากนัก (รุ่งนภา, 2535)



ภาพที่ 2.15 เครื่องอบแห้งแบบโฟม-แมท

ที่มา : รุ่งนภา (2535)

3. เครื่องอบแห้งแบบคราเตอริง (Cratering dryer)

เครื่องอบแห้งแบบนี้ได้รับการดัดแปลงจากตู้อบแห้งแบบถาด (tray dryer) วิธีนี้จะทำให้โฟมมีความหนาประมาณ $1/6 - 1/18$ นิ้ว บนถาดสแตนเลสที่มีรูพรุน ถาดสแตนเลสบรรจุโฟมเคลื่อนที่เข้าสู่ตู้อบลมร้อน อากาศร้อนจากด้านล่างของเตาเป่าผ่านรูพรุนของถาดขึ้นมาที่

ความเร็วลมประมาณ 350 – 400 ฟุตต่อนาที โดยมีทิศทางตามการเคลื่อนที่ของอากาศ เมื่ออากาศเคลื่อนที่ขึ้นสู่ชั้นบนของตู้อบ อากาศร้อนถูกป้อนเข้าสู่ระหว่างทางที่อากาศเคลื่อนที่ขึ้นสู่ชั้นบนด้วยความเร็ว 30 ฟุตต่อนาที และที่ชั้นบนด้วยความเร็ว 60 ฟุตต่อนาที ในลักษณะสวนทางกับการเคลื่อนที่ของอากาศ การจัดเรียงแบบนี้ทำให้น้ำระเหยออกไปอย่างรวดเร็ว โดยในช่วงแรกประมาณร้อยละ 80 และจะมีการสูญเสียความชื้นที่เหลือในช่วงที่กระแสลมเคลื่อนที่สวนทางกับการเคลื่อนที่ของอากาศ จากนั้นอากาศอาหารถูกส่งมาในส่วนของการทำงานให้เย็นโดยเป่าลมเย็นที่กำลังความชื้นในอากาศแล้ว เพื่อสะดวกต่อการเอาโฟมออกจากถาด (รัตนนา, 2547)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งโดยวิธีโฟม-แมท Beristain *et al.* (1993) ได้ศึกษาการผลิตน้ำดอกกระเจี๊ยบแดง โดยวิธีทำแห้งโฟม-แมทและมีการเติม emulsifiers (0.1-0.4% โดยน้ำหนัก) และมอลโทโรเดคซ์ตริน (5% โดยน้ำหนัก) ลงไปในน้ำดอกกระเจี๊ยบแดงเข้มข้น 15 °Brix เพื่อก่อให้เกิดโฟม และอบแห้งในเตาอบแห้งลมร้อน พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการอบคือ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 70 นาที และความหนาของโฟมเท่ากับ 4 มิลลิเมตร โดยมีความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์เป็นร้อยละ 3 (น้ำหนักเปียก) โดยผงที่ได้จากการอบแห้งโดยวิธีโฟม-แมทมีลักษณะปรากฏที่ดีกว่าผงที่ได้จากการทำแห้งแบบพ่นฝอย

Brown *et al.* (1973) ได้ศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการอบแห้งโดยวิธีโฟม-แมท เพื่อลดประสิทธิภาพการทำงานของเตาอบ โดยทำให้โฟมมีความเข้มข้นสูงขึ้นด้วยเครื่องระเหยน้ำ ซึ่งทำให้น้ำผลไม้มีความเข้มข้นมากขึ้น สามารถดีให้เป็นโฟมที่แข็งแรงและมีความคงตัวมากขึ้น แต่ถ้าทำให้เข้มข้นมากเกินไปจะทำให้โฟมมีความหนาแน่นมากเกินไป ทำให้ไม่สามารถดึงน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ได้หมดในระหว่างการอบแห้ง ความเข้มข้นของของแข็งที่ดีสำหรับมะเขือเทศคือ ร้อยละ 30 และสำหรับส้มคือร้อยละ 55

2.13 น้ำผลไม้ผง

2.13.1 คุณลักษณะของน้ำผลไม้ผง

น้ำผลไม้ผงเป็นผลิตภัณฑ์อาหารผงที่มีลักษณะเป็นอนุภาคขนาดเล็ก มีน้ำหนักน้อย และมีปริมาตรลดลงจากน้ำผลไม้ประมาณ 8 และ 4 เท่า ตามลำดับ น้ำผลไม้ผงที่ผ่านกรรมวิธีการทำแห้งจะมีความชื้นต่ำ คือ ประมาณร้อยละ 5 เมื่อเติมน้ำลงไปผลิตภัณฑ์น้ำผลไม้ผงจะได้น้ำผลไม้

ที่คล้ายน้ำผลไม้สดก่อนการทำแห้ง คุณลักษณะที่ดีของผลิตภัณฑ์ผง ได้แก่คุณลักษณะด้านการละลายที่สามารถละลายได้อย่างรวดเร็วแม้ในน้ำเย็น (1-2 นาที) มีสี และกลิ่นรสที่ใกล้เคียงกับน้ำผลไม้สดมากที่สุด เพื่อให้เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค และสามารถเก็บรักษาได้นานโดยไม่เสื่อมคุณภาพ นอกจากนี้คุณลักษณะทางกายภาพที่สำคัญของน้ำผลไม้ผง ยังประกอบด้วยคุณลักษณะที่สำคัญ (อรทัย, 2547) ได้แก่

1. ความสามารถในการดูดซึมของผิวอาหาร (wettability) เมื่อมีการเติมน้ำหากน้ำผลไม้ผงมีผิวสัมผัสมากจะดูดน้ำได้ดี ทำให้กระจายตัวในของเหลวได้ง่าย
2. การกระจายตัว (dispersibility) น้ำผลไม้ผงที่มีการกระจายตัวดี ทำให้จมน้ำได้เร็ว หากมีการรวมตัวกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ขึ้น อาจทำให้การกระจายตัวในของเหลวไม่ดี
3. การจมน้ำ (sinkability) น้ำผลไม้ผงที่จมน้ำได้เร็ว มักจะละลายได้ดี ทั้งนี้ขึ้นกับขนาดและความหนาแน่นของผง
4. ความสามารถละลายน้ำ (solubility) และอัตราเร็วของการละลาย ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและองค์ประกอบทางเคมีของน้ำผลไม้ผง

2.13.2 การทำแห้งน้ำผลไม้ผง

โดยทั่วไปกรรมวิธีการผลิตน้ำผลไม้ผงเริ่มจากการผลิตน้ำผลไม้เสียก่อน แล้วจึงนำไปทำแห้งซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายวิธีเช่น การทำแห้งแบบลูกกลิ้ง แบบโพน-เมท แบบพ่นฝอย แบบฟลูอิดไลซ์เบด หรือการทำแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศ เป็นต้น (คณาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร, 2549) การทำแห้งน้ำผลไม้ส่วนใหญ่จะเริ่มจากขั้นตอนการเตรียมน้ำผลไม้ให้มีคุณภาพที่ดีก่อน ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์น้ำผลไม้ผงที่มีสี และกลิ่นรสที่ดี กรรมวิธีการทำแห้งให้เป็นผงอาจทำได้หลายวิธี โดยส่วนใหญ่ต้องใช้ความร้อนสูงในการทำแห้ง หากหลีกเลี่ยงไม่ใช้ความร้อนสูงควรออกแบบกระบวนการทำแห้ง โดยแบ่งกระบวนการทำแห้งออกเป็นช่วง โดยช่วงแรกอาหารที่ยังมีความชื้นสูง อาจใช้อุณหภูมิสูงเพื่อลดความชื้นของอาหารอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นเมื่อความชื้นของอาหารลดลงบ้างแล้ว อาจลดอุณหภูมิในการทำแห้งให้ต่ำลงด้วย ซึ่งจะส่งผลให้คงคุณลักษณะภายนอกที่ดีของน้ำผลไม้ผง

ในบางกรณีการผลิตน้ำผลไม้ผง มีความจำเป็นต้องเติมวัตถุเจือปนอาหารประเภทที่ช่วยถนอมรักษาอาหาร (preservative) เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ หรือสารที่ช่วยในการสร้าง

โครงสร้างภายในของอาหารให้เหมาะสมต่อการทำแห้ง เช่น สารที่ก่อให้เกิดโฟม รวมทั้งสารที่ทำให้คงตัว (stabilizers) เช่น โปรตีนถั่วเหลือง (soya protein), glyceryl monostearate หรือ alginates เป็นต้น (สมชาติ, 2550)

2.13.3. ปัจจัยของการเสื่อมเสียของน้ำผลไม้ผง

1. การจับตัวกันเป็นก้อนของผลิตภัณฑ์ (Caking)

น้ำผลไม้ผงที่ผ่านการทำแห้งมีคุณสมบัติ hygroscopic มากจึงทำให้เกิดปัญหาการจับเป็นก้อน ซึ่งมีผลมาจาก Surface dissolution ของอนุภาคทำให้เกิดการเชื่อมโยงกันของสารละลายเข้มข้นที่จุดนั้น เมื่อส่วนที่เชื่อมโยงกันนี้กลายเป็นของแข็งก็จะทำให้อนุภาคติดกัน การใช้สารป้องกันการจับตัวเป็นก้อน (anti-caking agent) จะช่วยรักษาคุณสมบัติการไหลอย่างอิสระ (free flowing property) ของผลิตภัณฑ์และทำให้ผลิตภัณฑ์มีค่า ปริมาณความชื้นสมดุลต่ำลง (Hallenbach *et al.*, 1982; Cal-vidal and Falcone, 1985)

2. Glass Transition และ การเกิดผลึก (Crystallization)

ในสภาวะการเพิ่มขึ้นของความชื้นสัมพัทธ์ เช่น น้ำตาลไร้รูปร่าง (amorphous sugars) ได้รับความชื้นสัมพัทธ์สูง การดูดซับน้ำเป็นสาเหตุของการเกิดผลึก ในเวลาที่เกิดผลึก น้ำที่ถูกดูดซับอาจจะถูกปลดปล่อย ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนัก (Seleki-Gerhardt and Zograf, 1994; Buckton and Darcy, 1995; Roos *et al.*, 1996) การเกิดพลาสติกของน้ำ และการลดลงของ Tg (glasstransition) ตลอดจนอุณหภูมิที่ต่ำ ตอบสนองต่อการเกิดผลึกของ น้ำตาลไร้รูปร่างในอาหาร เป็นสาเหตุของการเพิ่มของปริมาตรอิสระและการเคลื่อนไหวยระดับโมเลกุล ความหนืดลดลง และส่งเสริมการแพร่ (Roos and Karel, 1990; Roos, 1995) การเกิดผลึกของน้ำตาลเป็นตัวอย่างที่สำคัญในผลิตภัณฑ์อาหาร และขอบเขตของการเกิดผลึก เป็นระดับวิกฤตต่อการยอมรับของผลิตภัณฑ์สุดท้าย (Kedward *et al.*, 1998) บทบาทของการเกิดผลึกมีผลต่อการผลิตลูกกวาด ซึ่งจำเป็นต้องมีการควบคุมการเจริญของผลึกน้ำตาล และขนาดของผลึก และผลิตผลิตภัณฑ์ให้มีคุณภาพ

3. การสลายตัวของวิตามินซี (Ascorbic acid)

ปริมาณความชื้นและวอเตอร์แอคทิวิตี มีผลอย่างมากต่อการสลายตัวของวิตามินซีของผลิตภัณฑ์น้ำผลไม้ เนื่องจากเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นจะมีผลให้อัตราการสลายตัวของวิตามินซีเพิ่มขึ้น ส่วนออกซิเจนมีผลเล็กน้อยต่อการสลายตัวของวิตามินซี กรดแอสคอร์บิกมีความสัมพันธ์

กับปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลแบบที่ไม่ใช่เอนไซม์ (nonenzymatic browning) โดยเมื่อปริมาณกรดแอสคอร์บิกลดลงจะเป็นช่วงที่ผลิตภัณฑ์เกิดสีน้ำตาลมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการสลายตัวของกรดแอสคอร์บิกทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นสาเหตุ สำคัญในการเกิดสีน้ำตาล (วิลาวัดย์, 2547)

4. การเกิดกลิ่นรสที่ผิดปกติ (Off-flavor)

off-flavor เป็นคำที่ใช้เมื่ออาหารมีกลิ่น และรสชาติเปลี่ยนไปจากธรรมชาติ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเกิดขึ้นในอาหารนั้นๆ คำที่ใช้บ่งลักษณะเฉพาะของกลิ่นและรสชาติที่เปลี่ยนแปลงไปจากธรรมชาติของอาหารชนิดต่างๆ เช่น sunlight flavor, musty, wet dog, putrid และ goaty เป็นต้น การเกิดกลิ่นและรสชาติเหล่านี้ เป็นการบ่งชี้ให้ทราบว่าอาหารมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและมีสารชนิดใหม่เกิดขึ้น ทำให้อาหารมีกลิ่นและรสชาติเปลี่ยนไป ปฏิกิริยาทางเคมีที่มักเกิดขึ้นเสมอในอาหาร ซึ่งมีผลกระทบต่อกลิ่นและรสชาติของอาหาร เช่น ปฏิกิริยาออกซิเดชัน ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (นิธิยา, 2553)

2.13.4 การเก็บรักษาผลิตภัณฑ์น้ำผลไม้ผง

การเก็บรักษาผลิตภัณฑ์น้ำผลไม้ผงที่ผ่านกรรมวิธีการทำแห้งนั้น มีข้อควรพิจารณาเกี่ยวกับสถานะในการเก็บรักษาดังนี้

1. เก็บในที่อุณหภูมิต่ำ
2. เก็บในบรรยากาศที่เป็นแก๊สเฉื่อย เพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชัน ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการเปลี่ยนแปลงสี และสูญเสียกลิ่นรสที่ดี
3. เก็บในที่ที่มีความชื้นต่ำ หรือเก็บในบรรจุภัณฑ์ที่มีสารดูดความชื้น หรือในสถานะสุญญากาศ
4. การใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในการผลิต เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์