

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลิ้นจี่

2.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของลิ้นจี่

ลิ้นจี่เป็นไม้ผลกึ่งเมืองร้อน (subtropical fruit) มีชื่อสามัญหลายชื่อ เช่น Litchi, Lychee, Litchee, Lici, Laichi และ Leechee เป็นต้น จัดอยู่ในตระกูล Sapinadales วงศ์ Sapindaceae มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Lichi Chinensis* Sonn. ลิ้นจี่จัดเป็นผลไม้กลุ่ม non climacteric fruit คือ กลุ่มของผลไม้ที่มีอัตราการหายใจค่อนข้างคงที่ขณะที่ผลสุก ซึ่งเป็นผลไม้ที่ไม่สามารถบ่มให้สุกได้ (สุนทรี, 2550) เนื่องจากหลังการเก็บเกี่ยวไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีมาก และเอทิลีนไม่มีผลต่อการสุก ดังนั้นการเก็บเกี่ยวลิ้นจี่จึงควรเก็บในระยะที่ผลแก่เต็มที่เพื่อให้ผลผลิตมีคุณภาพดี โดยทั่วไปการเก็บเกี่ยวลิ้นจี่จะดูการเปลี่ยนของสีเปลือกลิ้นจี่เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจ สังเกตได้จากสีเปลือกลิ้นจี่เปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีเขียวอมชมพู สีชมพู หรือสีแดง ซึ่งเกณฑ์การเปลี่ยนสีจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ สภาพแวดล้อม และการดูแลรักษา เกณฑ์อีกลักษณะหนึ่งที่ใช้ในการประกอบตัดสินใจคือการดูหนามของผลลิ้นจี่ ซึ่งลิ้นจี่ที่มีผลแก่หนามบนเปลือกผิวจะห่างกัน (นิธิยา และนิธิยา, 2533) ลิ้นจี่ยังเป็นผลไม้ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจชนิดหนึ่งของประเทศไทย และเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของภาคเหนือโดยเฉพาะภาคเหนือตอนบน ซึ่งแหล่งที่ปลูกลิ้นจี่มากที่สุด คือ อำเภอฝาง จังหวัดเชียงใหม่ เนื่องจากสภาพภูมิอากาศเหมาะสม ในปัจจุบันมีการปลูกลิ้นจี่มากขึ้นเกือบทุกภาคของประเทศไทย แหล่งเพาะปลูกที่สำคัญ ได้แก่ จังหวัดเชียงราย เชียงใหม่ พะเยา ลำพูน และสมุทรสงคราม (สุนทรี, 2550)

ผลผลิตลิ้นจี่สามารถส่งออกไปจำหน่ายยังตลาดต่างประเทศทั้งในรูปของผลสด และแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ นำรายได้เข้าประเทศปีละหลายล้านบาท โดยตลาดต่างประเทศที่สำคัญ ได้แก่ มาเลเซีย สิงคโปร์ ฮองกง ญี่ปุ่น ญวต แคนาดา ออสเตรเลีย สหรัฐอเมริกา ซาอุดีอาระเบีย อังกฤษ เยอรมัน เดนมาร์ก ฝรั่งเศส ใต้หวัน เนเธอร์แลนด์ เบลเยียม และสวีเดน เป็นต้น ผลผลิตของลิ้นจี่จะออกสู่ตลาดในช่วงกลางเดือนมิถุนายนจนถึงเดือนกรกฎาคม (สุนทรี, 2550)

2.1.2 สายพันธุ์ของลิ้นจี่

พันธุ์ลิ้นจี่ที่ปลูกในประเทศไทยแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม (สุนทรี, 2550) ตามแหล่งปลูกดังนี้

1) กลุ่มพันธุ์ลิ้นจี่ที่ปลูกในภาคกลางหรือที่ลุ่ม เป็นพันธุ์ลิ้นจี่ที่สามารถออกดอกได้โดยไม่ต้องอาศัยการกระตุ้นจากอากาศเย็น สามารถปลูกในที่ราบต่ำ เช่น อำเภออัมพวา และอำเภอบางคนที จังหวัดสมุทรสงคราม ได้แก่ พันธุ์ค่อม (ค่อมลำเจียก) กะโหลกใบยาว ลำเภาแก้ว กระโดนทอง-พระโรง เขียวหวาน สาแหรกทอง จีน ไทยธรรมดา ไทยใหญ่ กะโหลกใบใหม่ กะโหลกใบเตา ช่อระกำ และพันธุ์ทิพย์ เป็นต้น

2) กลุ่มพันธุ์ลิ้นจี่ที่ปลูกทางภาคเหนือหรือที่ดอน เป็นกลุ่มพันธุ์ลิ้นจี่ที่คาดว่ามีการนำเข้ามาปลูกในประเทศไทยหลังกลุ่มพันธุ์ที่ลุ่ม โดยลิ้นจี่พันธุ์นี้ต้องการความหนาวเย็นต่ำและยาวนานมากระตุ้นก่อนการออกดอกมากกว่าพันธุ์ที่ปลูกทางภาคกลาง นิยมปลูกเป็นการค้ากันแพร่หลายในภาคเหนือบริเวณจังหวัดเชียงใหม่ เชียงราย และจังหวัดใกล้เคียง พันธุ์ลิ้นจี่ที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ ได้แก่ พันธุ์กิมจี กิมเจ็ง กวางเจา ไกวแม่ จักรพรรดิ จีน เกรียงศักดิ์ จีนเล็ก จีนใหญ่ จีนหอม นครพนม1 นายสะอาด บรวิสเตอร์ ฝาง46 ฝาง80 พันธุ์ทิพย์ ลูกกลาย โอวเฮียะ ฮงฮวย ชมพู ฝาง1 ฝาง13 ฝาง48 แม่จัน โอวเฮียะ โอวเฮียะใบดำ ฮาวาย ฮ่องกง ไทโซ และไกวแม่พิงค์ เป็นต้น

2.1.3 องค์ประกอบทางเคมี และลักษณะทางสรีระวิทยาของผลลิ้นจี่สุก

ผลลิ้นจี่เมื่อถึงระยะการเก็บเกี่ยวผลจะเปลี่ยนเป็นสีแดงเข้มหรือแดงอมชมพู ที่ผิวเปลือกด้านในมีสีชมพูหรือแดงเรื่อๆ ร่องระหว่างหนามจะแยก ความแหลมของหนามจะลดลงใช้มือลูบผิวของผลจะทราบถึงความแตกต่างระหว่างผลอ่อน และผลแก่ (นภค และคณะ, 2543) รูป 2.1 แสดงลักษณะทางสรีระวิทยาของผลลิ้นจี่ โดยส่วนประกอบทางเคมี และลักษณะทางสรีระวิทยาที่สำคัญของผลลิ้นจี่สุกแสดงในตาราง 2.1



รูป 2.1 ลักษณะทางสรีระวิทยาของผลลิ้นจี่

ตาราง 2.1 องค์ประกอบทางเคมี และลักษณะทางสรีระวิทยาของผลลิ้นจี่สุก (นภคค และคณะ, 2543)

องค์ประกอบ/ลักษณะทางสรีระวิทยา	ปริมาณ
คลอโรฟิลล์ที่ผิวเปลือก	
คลอโรฟิลล์เอ	25 $\mu\text{g}/100 \text{ mg}$
คลอโรฟิลล์บี	14 $\mu\text{g}/100 \text{ mg}$
น้ำตาลในเนื้อ	
ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด	13-20 เปอร์เซ็นต์
ฟรุกโตส	1.6-3.1 g/100 g น้ำหนักสด
กลูโคส	5.0 g/100 g น้ำหนักสด
ซูโครส	8.5 g/100 g น้ำหนักสด
กรดแอสคอร์บิก	40-50 mg/100 g น้ำหนักสด
การสร้างเอทิลีน (C_2H_4)	1-5 $\mu\text{l}/\text{kg}$ ที่ 25 องศาเซลเซียส
อัตราการหายใจ (CO_2)	25 $\mu\text{l}/\text{kg}$ ที่ 25 องศาเซลเซียส

ปัญหาที่พบภายหลังการเก็บเกี่ยว คือ เปลือกผลลิ้นจี่จะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลภายใน 1-2 วัน หลังการเก็บเกี่ยวและระหว่างการเก็บรักษาไว้ในตู้ควบคุมห้อง ถึงแม้การเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลของ

เปลือกผลลึนจีไม่มีผลต่อรสชาติ แต่ลดมูลค่าทางการค้าของผลลึนจี การเก็บรักษาผลลึนจีที่อุณหภูมิ ต่ำที่สุดไม่เกิดอันตราย หรือก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอื่นๆ คือ ที่อุณหภูมิ 1.5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 90-95 เปอร์เซ็นต์ ผลลึนจีจะมีอายุการเก็บรักษา 3-5 สัปดาห์ การเปลี่ยนเป็นสี น้ำตาลมักมีสาเหตุมาจากการแห้งของเปลือก โดยการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียส และ ควบคุมบรรยากาศที่มีออกซิเจน 3-5 เปอร์เซ็นต์ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 3-5 เปอร์เซ็นต์ ความชื้นสัมพัทธ์ 90 เปอร์เซ็นต์ สามารถควบคุมการเกิดสีน้ำตาล และคุณภาพของผลลึนจีไว้ได้ดี (นิธิยา และคณัย, 2533)

2.1.4 คุณค่าทางโภชนาการของเนื้อลึนจีสด

ลึนจีแต่ละพันธุ์มีส่วนประกอบทางเคมี ปริมาณสารสำคัญและคุณค่าทางโภชนาการ (ตาราง 2.2) ในเนื้อแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับภูมิประเทศฤดูกาล การจัดการระหว่างการปลูก และระยะความแก่ อ่อนหลังการเก็บเกี่ยว ซึ่งส่วนประกอบทางเคมี และปริมาณสารสำคัญในเนื้อลึนจีมีดังนี้ (นิธิยา และคณัย, 2533)

- 1) ความชื้นหรือปริมาณน้ำ เนื้อลึนจีมีปริมาณน้ำเท่ากับ 77-87 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพันธุ์
- 2) โปรตีน เนื้อลึนจีมีโปรตีนเล็กน้อย คือ 0.8-0.9 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณสูงสุดอาจมีได้ถึง 1.5 เปอร์เซ็นต์ โปรตีนที่พบมักอยู่ในรูปเอนไซม์มากกว่ารูปอื่นๆ
- 3) ไขมัน ลึนจีมีไขมันน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ ไขมันส่วนใหญ่เป็นส่วนประกอบในเยื่อหุ้มเซลล์ และไขเคลือบผิว
- 4) น้ำตาล เนื้อลึนจีมีปริมาณน้ำตาล 20-60 เปอร์เซ็นต์ โดยอยู่ในรูปของน้ำตาลซูโครส และ น้ำตาลรีดิคซ์ คาร์โบไฮเดรตในเนื้อลึนจีประกอบไปด้วยน้ำตาลทั้งหมด 15.3 เปอร์เซ็นต์ เป็นน้ำตาลรีดิคซ์ 81.7 เปอร์เซ็นต์ และน้ำตาลซูโครส 18.3 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณน้ำตาลทั้งหมด Somogyi *et al.* (1996) พบว่า ลึนจีที่ปลูกในได้หวันจำนวน 23 สายพันธุ์มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด เท่ากับ 14.0-20.3 เปอร์เซ็นต์ และลึนจีสายพันธุ์ *Brewster* มีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดเท่ากับ 16.8 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งประกอบด้วยซูโครส 51.1 เปอร์เซ็นต์ กลูโคส 30.1 เปอร์เซ็นต์ และ ฟรุคโตส 18.8 เปอร์เซ็นต์
- 5) กรด ชนิดของกรดที่พบมากในลึนจี คือ กรดมาลิก รองลงมา คือ กรดซิตริก กรดซัคซินิก กรดฟอสฟอริก กรดกลูตามิก กรดมาโลนิก และกรดแลคติก ปริมาณกรดในเนื้อลึนจีจะแปรผัน ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ภูมิประเทศ และอุณหภูมิ ปริมาณกรดในเนื้อลึนจีจะลดลง เมื่อเนื้อลึนจีสุก และเก็บรักษาเป็นระยะเวลายาวนานขึ้น Somogyi *et al.* (1996) พบว่า ลึนจีสายพันธุ์ *Brewster* มี

ปริมาณกรดทั้งหมด 0.52 เปอร์เซ็นต์ โดยมีกรดมาลิกมากถึง 80 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณกรดอินทรีย์ที่ระเหยไม่ได้ ซึ่งประกอบด้วยกรดซิตริก 10.0 เปอร์เซ็นต์ และกรดแอสคอร์บิก 5.0 เปอร์เซ็นต์

6) วิตามินและเกลือแร่ วิตามินที่พบมากในเนื้อลิ้นจี่ คือ กรดแอสคอร์บิก มีปริมาณ 40–90 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ปริมาณกรดแอสคอร์บิกจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้น (Kadam and Deshpand, 1995) ปริมาณแร่ธาตุในเนื้อลิ้นจี่ พบว่ามีโพแทสเซียมมากที่สุด ส่วนแคลเซียม แมกนีเซียม และฟอสฟอรัสมีปริมาณไม่แตกต่างกัน

ตาราง 2.2 คุณค่าทางโภชนาการของเนื้อลิ้นจี่สดในส่วนที่บริโภคได้ 100 กรัม (นภคล และคณะ, 2543)

ส่วนประกอบทางเคมี	ปริมาณ
พลังงาน (แคลอรี)	63.00 – 64.00
ความชื้น (เปอร์เซ็นต์)	81.90-84.83
โปรตีน (g)	0.68-1.00
ไขมัน (g)	0.30-0.58
คาร์โบไฮเดรต (g)	13.31-16.40
เส้นใยอาหาร (g)	0.23-0.40
เถ้า (g)	0.37-0.50
แคลเซียม (mg)	8.00-10.00
เหล็ก (mg)	0.40
โซเดียม (mg)	3.00
โพแทสเซียม (mg)	170.00
วิตามินบี 1 (μg)	28.00
วิตามินบี 2 (μg)	0.40
ไนอะซิน (mg)	0.05
วิตามินซี (mg)	24.00-60.00

2.2 การแปรรูปน้ำผลไม้ผง

2.2.1 เครื่องดื่มนมผง

การผลิตเครื่องดื่มนมผงในประเทศไทยได้รับความสนใจมาก ทั้งนี้เพราะการผลิตเครื่องดื่มนมที่มีปริมาณความชื้นสูงย่อมจะเสื่อมคุณภาพได้ง่ายกว่าอาหารที่มีปริมาณความชื้นต่ำ เช่น พวกเครื่องดื่มน้ำผลไม้ เป็นต้น ดังนั้น การแปรรูปอาหารผง หรือเครื่องดื่มนมผงจึงเป็นการลดปริมาณความชื้นในอาหารลง ทำให้การเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์เกิดขึ้นได้ช้าลง อีกทั้งผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มนมผงยังมีน้ำหนักเบา ขนส่งได้สะดวก และง่ายต่อการบริโภค ซึ่งสามารถชงด้วยน้ำเย็น หรือน้ำร้อน และบริโภคได้ทันที การผลิตเครื่องดื่มนมผงมีความสำคัญมากในปัจจุบัน การผลิตจำเป็นต้องใช้ความรู้ทางวิชาการ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ดี และมีคุณภาพดี เครื่องดื่มนมผงที่พบมากในปัจจุบัน ส่วนมากจะเป็นผลิตภัณฑ์นมผง และกาแฟผง ในความเป็นจริงแล้วการผลิตเครื่องดื่มนมผงยังสามารถใช้กับผลิตภัณฑ์อื่นๆ ได้อีก เช่น เครื่องดื่มนมกระเจียบผง เครื่องดื่มนมขิงผง เครื่องดื่มนมมะนาวผง และเครื่องดื่มนมอัดก๊าซต่างๆ เนื่องจากวิธีการผลิตเครื่องดื่มนมผงมีต้นทุนการผลิตสูงมาก เมื่อเทียบกับการทำแห้งทั่วไป ดังนั้น เครื่องดื่มนมที่จะนำมาทำเป็นผงปกติ จึงเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีราคาแพง เพื่อให้คุ้มค่ากับต้นทุนที่สูงสูญเสียไปกับกระบวนการผลิต (ไพโรจน์, 2535)

การทำเครื่องดื่มนมผงเป็นการทำแห้งอาหารชนิดหนึ่งซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นผงมีการละลายน้ำได้ดี มีความชื้นต่ำกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ สามารถเก็บไว้ได้นานที่อุณหภูมิห้องสะดวกต่อการขนส่ง แต่เดิมการผลิตเครื่องดื่มนมผงมีปัญหาในแง่ของกลิ่นรสซึ่งเหลือน้อยมาก ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อคงไว้ซึ่งกลิ่นรสของเครื่องดื่มนม เช่น การพัฒนาทางด้านเครื่องมือการผลิตเครื่องดื่มนมผงจึงมีการนำเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (spray dryer) และเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freezing dryer) มาใช้ในการผลิตเครื่องดื่มนมผง นอกจากนี้ยังมีกรรมวิธีอื่นๆ อีก เช่น การตากแห้ง และการบดละเอียด หรือการใช้ส่วนประกอบเป็นผงมาผสมกัน เพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มนมผง (ไพโรจน์, 2535)

ชนิดของเครื่องดื่มนมผงแบ่งออกเป็น 3 ประเภท (ไพโรจน์, 2535) ได้แก่

- 1) เครื่องดื่มน้ำผลไม้แท้ ได้จากการสกัดน้ำผลไม้แท้และนำเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยเพื่อฉีดอาหารให้เป็นฝอยและกระทบกับความร้อนทำให้แห้งเป็นผง ต่อมาวิธีการนี้สามารถนำไปใช้กับเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งเพื่อเพิ่มการละลายให้มากขึ้น เช่น การผลิตกาแฟผง การผลิตนมผง และการผลิตน้ำผลไม้ผงต่างๆ วิธีนี้มีการลงทุนค่อนข้างสูง
- 2) เครื่องดื่มนมคัดแปลงผงหรือเครื่องดื่มนมกึ่งแท้ผง เป็นเครื่องดื่มนมที่ผลิตได้จากการสกัดน้ำผลไม้แล้วนำมาถดลงบนตัวนำหรือสารประกอบหลักเพื่อดูดซึมกลิ่นรสของผลไม้ไว้ แล้วจึงนำไปอบแห้ง

จากนั้นจึงบดละเอียดผสมกับองค์ประกอบอื่นๆ เพื่อผลิตเป็นเครื่องคัมผง ตามความต้องการ เช่น การผลิตเค้กขวยผง การผลิตขิงผง เป็นต้น

3) เครื่องคัมผงอัดก๊าซ เป็นเครื่องคัมที่ผลิตเลียนแบบเครื่องคัมอัดลม แต่ทำให้มีลักษณะเป็นผง และนำผงที่ได้ไปผสมกับโซเดียมไบคาร์บอเนต เมื่อนำไปละลายน้ำจะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างโซเดียมไบคาร์บอเนตกับกรดอินทรีย์ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และมีรสซ่าเกิดขึ้น

2.2.2 วิธีการแปรรูปน้ำผลไม้ผง

วิธีการแปรรูปน้ำผลไม้ผงแบ่งออกเป็น 4 แบบหลักๆ ดังต่อไปนี้

1) การแปรรูปน้ำผลไม้ผงแบบดั้งเดิม

เมื่อพิจารณาถึงวิธีการบริโภคผลไม้ ผู้บริโภคส่วนใหญ่บริโภคในรูปแบบของเครื่องคัมการทำน้ำผลไม้ผงนิยมทำโดยการ ใช้ผลไม้แห้งมาคัมกับน้ำและเติมน้ำตาลลงไปจนได้รสหวานตามต้องการ และคัมต่อจนเนื้อผลไม้คั้นตัวซึ่งต้องใช้เวลาประมาณ 30-40 นาที การคัมน้ำผลไม้ดังกล่าวถึงแม้วิธีการจะกระทำได้ง่าย แต่ก็ไม่สะดวกและใช้เวลานาน (ชนันท์, 2545) ปัจจุบันมีผลิตภัณฑ์ผลไม้ผงจำหน่ายในตลาดในปริมาณที่จำกัด การผลิตน้ำผลไม้ผงใช้วิธีแบบดั้งเดิมด้วยการนำเนื้อผลไม้มาเคี้ยวกับน้ำตาลทรายจนขึ้น นำไปทำให้แห้ง แล้วบดเป็นผง ซึ่งการผลิตโดยวิธีนี้ใช้ต้นทุนต่ำและใช้น้ำตาลทรายในปริมาณมาก ทำให้มีข้อจำกัดด้านการตลาดต่อกลุ่มผู้บริโภคที่เป็นโรคเบาหวาน (ไพโรจน์, 2535)

2) การแปรรูปน้ำผลไม้ผงแบบโฟมเมท

กระบวนการทำแห้งแบบโฟมเมท เป็นวิธีการทำแห้งโดยใช้หลักการดีให้ผลิตภัณฑ์เกิดเป็นโฟมและใช้ความร้อนจากลมร้อนเป็นตัวระเหยความชื้นที่แทรกอยู่ในโฟมออกไป การทำให้เกิดโฟมเป็นขั้นตอนแรกของการทำแห้งแบบโฟมเมท เป็นระบบสารแขวนลอยอย่างสมบูรณ์ในโฟมก๊าซของของเหลว ซึ่งลักษณะโฟมที่ดีในการอบแห้งแบบโฟมเมทนี้ จะต้องมีความคงตัวดีในระหว่างการอบแห้งเพื่อให้โฟมยังคงมีลักษณะเป็นโฟมและแตกหักออกเป็นผงได้ง่าย (ไพโรจน์, 2535)

3) การแปรรูปน้ำผลไม้ผงแบบอบแห้งฟ้นฝอย

เทคนิคการอบแห้งแบบฟ้นฝอย เป็นวิธีการที่นิยมใช้สำหรับการทำแห้งสารละลายอินทรีย์ สารประเภทอิมัลชันและของเหลวชนิดต่างๆ โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของผงแห้งมักใช้การอบแห้งแบบฟ้นฝอยในอุตสาหกรรมทางเคมีและอาหาร การอบแห้งด้วยวิธีนี้นอกจากจะใช้สำหรับการทำแห้งอย่างรวดเร็วแล้ว ยังเป็นวิธีการที่มีประโยชน์มากในการลดขนาดและปริมาตรของของเหลวอีกด้วย จากการวิจัยและพัฒนาที่ต่อเนื่องกันมา ทำให้วิธีการอบแห้งแบบฟ้นฝอยกลายเป็น

วิธีการทำแห้งที่มีประสิทธิภาพและนิยมนำมาทำแห้งให้กับผลิตภัณฑ์หลายชนิดในปัจจุบัน แต่เนื่องจากเครื่องมือในการผลิตมีต้นทุนที่สูง จึงเหมาะกับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่เท่านั้น (ไพโรจน์, 2535) ณัฐริพร (2549) ได้ทำการศึกษาการผลิตน้ำบ๊วยผงโดยวิธีอบแห้งแบบพ่นฝอย พบว่าสภาวะที่เหมาะสมให้การผลิตเครื่องดื่มน้ำบ๊วยผงโดยวิธีการอบแห้งแบบพ่นฝอย คือการใช้มอเตอร์โตะเดกตริน ร้อยละ 10 (น้ำหนักต่อน้ำหนัก) และอุณหภูมิลมขาเข้าที่ 180 องศาเซลเซียสจะได้ผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มน้ำบ๊วยผงที่มีคุณภาพทางเคมี กายภาพและทางประสาทสัมผัสที่ดีที่สุด

4) การทำน้ำผลไม้ผงโดยวิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

การทำน้ำผลไม้ผงโดยวิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง คือ การเอาน้ำผลไม้เข้มข้นมาทำให้แข็งตัวอย่างรวดเร็วเพื่อให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดเล็ก เพราะจะไม่ทำลายโครงสร้างเซลล์ของอาหาร หากเป็นน้ำผลไม้ที่ไม่มีกากอาจแช่แข็งโดยวิธีนี้ได้ หลังจากนั้นทำแห้งภายในตู้อบสูญญากาศที่ลดความดันต่ำลงประมาณ 4.58 ทอร์รี่ (610.5 พาสคาล) น้ำที่อยู่ในสภาพน้ำแข็งจะเกิดการระเหิดกลายเป็นไอโดยไม่หลอมเหลวเป็นของเหลว ไอน้ำที่เกิดขึ้นจะถูกดูดออกไปด้วยปั๊มสูญญากาศ และกลั่นตัว ส่วนผลิตภัณฑ์ที่ได้จะนำมาบดเป็นผงเพื่อทำเป็นเครื่องดื่มน้ำต่อไปเท่านั้น (ไพโรจน์, 2535) ในปัจจุบันนี้ได้มีการนำเอาวิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมาใช้ในการผลิตเครื่องดื่มน้ำบ๊วยผงซึ่งได้คุณภาพตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (ชัญญรัตน์, 2550)

2.2.3 คุณสมบัติที่ดีของผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มน้ำผลไม้ผง

คุณสมบัติที่ดีของผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มน้ำผลไม้ผง (อรุณี, 2530) มีดังต่อไปนี้

1) ความสามารถในการดูดซึมของผิวอาหาร (wetability) ถ้ามีผิวสัมผัสมากจะดูดน้ำได้ดี เมื่อมีการเติมน้ำลงไป ทำให้เกิดการกระจายตัวของเหลวได้ง่ายการจมน้ำ (sinkability) เครื่องดื่มน้ำที่ละลายได้ดี จะมีการจมน้ำได้เร็ว ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดและความหนาแน่นของผง

2) การกระจายตัว (dispensability) เครื่องดื่มน้ำที่มีการกระจายตัวดี จะมีการจมน้ำได้ดีแต่หากเครื่องดื่มน้ำมีการรวมกันเป็นก้อนใหญ่ขึ้น ความสามารถในการกระจายตัวอาจลดลงได้

3) ความสามารถในการละลายน้ำ (solubility) และอัตราเร็วของการละลายจะขึ้นอยู่กับลักษณะหรือส่วนประกอบทางเคมีของอาหาร

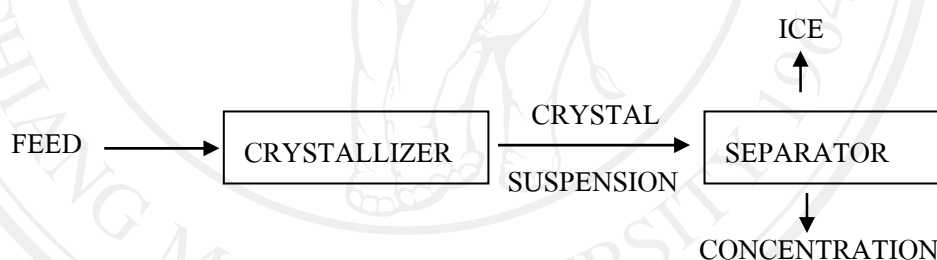
กระบวนการผลิตเครื่องดื่มน้ำบ๊วยนี้ต้องใช้อาหารเหลวที่มีความเข้มข้นสูงมาเป็นวัตถุดิบในการผลิต โดยการทำให้อาหารเหลวมีความเข้มข้นได้มีหลายวิธี ได้แก่ การทำให้เข้มข้นโดยใช้ความร้อน และการทำให้เข้มข้นโดยวิธีแช่เยือกแข็ง เป็นต้น การทำให้เข้มข้นโดยวิธีแช่เยือกแข็งเป็นวิธีที่ได้รับ

ความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดี นอกจากนั้น การนำเอาการทำให้เข้มข้นโดยวิธีแช่เยือกแข็งมาใช้ร่วมกับการอบแห้งแบบวิธีอื่นๆ จะทำให้ได้อาหารผงที่มีคุณภาพดีขึ้นจากเดิมเมื่อเทียบกับวิธีการอบแห้งวิธีอื่นๆ อีกด้วย (ศรีมา, 2546)

2.3 การผลิตน้ำผลไม้เข้มข้นด้วยวิธีการแช่เยือกแข็ง

2.3.1 กระบวนการเพิ่มความเข้มข้นด้วยวิธีการแช่เยือกแข็ง

กระบวนการเพิ่มความเข้มข้นด้วยวิธีการแช่เยือกแข็งสามารถแยกได้เป็น 2 ขั้นตอนใหญ่ๆ ได้แก่ ส่วนของการผลิตน้ำแข็ง (crystallization) และส่วนของการแยกผลึกออกจากของเหลวเข้มข้น (separation) (รูป 2.2) โดยส่วนของการผลิตน้ำแข็ง จะทำหน้าที่ลดอุณหภูมิของของเหลวจนกระทั่งน้ำในของเหลวเกิดเป็นผลึกน้ำแข็ง ในส่วนนี้ของเหลวจะเป็นของผสมระหว่างผลึกน้ำแข็งกับของเหลวที่เข้มข้นขึ้นซึ่งจะมีสภาพคล้ายโคลน (slurry) จากนั้นจะทำการแยกผลึกน้ำแข็งออกจากของเหลวเข้มข้นโดยการแยกผลึกน้ำแข็งออกจากของเหลวเข้มข้นนี้ มีด้วยกัน 3 วิธี คือ วิธีการบีบ (press) วิธีการใช้แรงเหวี่ยง (centrifuge) และวิธีใช้กระบอกล้าง (wash column) (Thijssen, 1975)

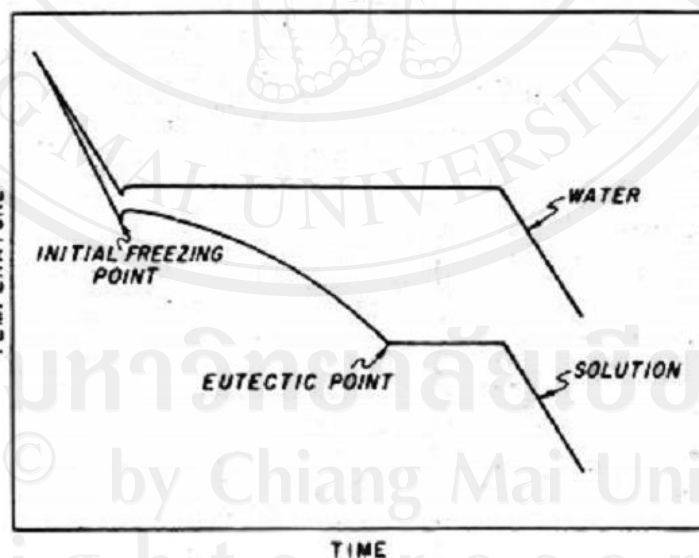


รูป 2.2 กระบวนการเพิ่มความเข้มข้นด้วยวิธีแช่เยือกแข็งผลิตเครื่องดื่มเข้มข้น (Thijssen, 1975)

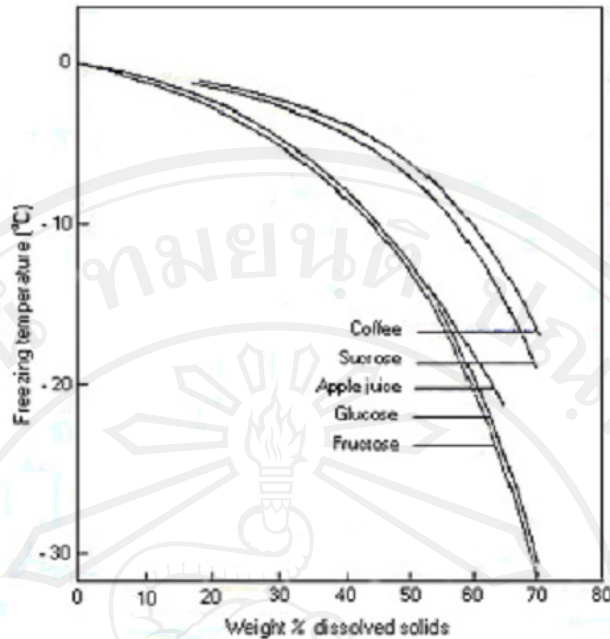
ในขั้นตอนของการลดอุณหภูมิของของเหลวเพื่อให้ของเหลวเกิดผลึกน้ำแข็งนั้น เมื่อความร้อนถูกกำจัดออกจากระบบจนกระทั่งถึงจุดเยือกแข็งของของเหลว ซึ่งจะเกิดขึ้นหลังจากเกิด supercooling (ความเย็นยิ่งยวด คือ อุณหภูมิของน้ำลดลงต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของผลิตภัณฑ์แต่ยังไม่เกิดผลึก) ในช่วงนี้ความร้อนจะถูกกำจัดออกไปในรูปของความร้อนแฝงของน้ำ ทำให้น้ำเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง หลังจากนั้นน้ำเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งจนหมดแล้ว ถ้าความร้อนถูกกำจัดออกจากระบบต่อไป อุณหภูมิก็จะลดลงอีก (รูป 2.3) ซึ่งการแช่แข็งช่วงเริ่มต้นจะก่อให้เกิดผลึกน้ำแข็งของน้ำ เป็นผลให้สารละลายที่เหลืออยู่มีความเข้มข้นขึ้น จุดเยือกแข็งของส่วนที่ยังไม่แข็งตัว (unfrozen) จะลดต่ำลงไปอีก ซึ่งกระบวนการแช่แข็งที่ดำเนินต่อไป จะทำให้จุดเยือกแข็งของสารละลายเข้มข้นลดลงจนถึงจุดที่เรียกว่า จุดยูเทคติก (eutectic point) หลังจากนั้นเมื่อ

กำจัดความร้อนออกไปอีกจะเกิดผลึกของตัวถูกละลายขึ้นมา (รุ่งนภา, 2535) กระบวนการการเพิ่มความเข้มข้นด้วยวิธีแช่เยือกแข็งควรยุติก่อนถึงอุณหภูมิ ณ จุดยูเทคติก ซึ่งโดยปกติกระบวนการจะหยุดก่อนถึงจุดยูเทคติกเสมอ เนื่องจากกระบวนการจะมีปัญหาที่เกิดจากความหนืดที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากความเข้มข้นที่สูงขึ้นนั่นเอง ซึ่งหากของเหลวมีความหนืดมากเกินไปจะเป็นผลให้ไม่สามารถแยกน้ำแข็งออกจากสารละลายเข้มข้นได้ (Deshpande *et al.*, 1982) โดยทั่วไปเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น อุณหภูมิ ณ จุดเยือกแข็งจะมีค่าลดลง (freezing point depression) ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากตัวถูกละลายโมเลกุลต่ำ เช่น น้ำตาลที่มีอยู่จะเป็นสาเหตุที่ทำให้จุดเยือกแข็งของสารละลายเปลี่ยนแปลง ทำให้สารละลายนั้นมีจุดเยือกแข็งต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส ซึ่งจุดเยือกแข็งจะมีอุณหภูมิเท่าใดนั้น ขึ้นอยู่กับปริมาณ และชนิดของตัวถูกละลายในสารละลายนั้น (Thijssen, 1975)

เมื่อพิจารณากราฟการแช่แข็ง ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิจุดเยือกแข็งกับความเข้มข้นของน้ำผลไม้ (รูป 2.4) พบว่า เมื่อทำการแช่แข็งน้ำแอปเปิลที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดอยู่ประมาณ 11 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่เป็นน้ำจะเริ่มเกิดเป็นผลึกน้ำแข็งที่อุณหภูมิประมาณ -1 องศาเซลเซียส ในขณะที่ต้องใช้อุณหภูมิในการแช่แข็งประมาณ -14 องศาเซลเซียส เพื่อให้แอปเปิลที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดอยู่ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ เกิดเป็นผลึกน้ำแข็ง (Van Pelt, 1975)



รูป 2.3 กราฟการลดลงของอุณหภูมิในการแช่เยือกแข็งน้ำบริสุทธิ์และสารละลาย (Heldman *et al.*, 1981)



รูป 2.4 กราฟการแช่แข็งของน้ำกาแฟสกัด น้ำแอปเปิล และสารละลายน้ำตาลบางชนิด (Thijssen, 1975)

2.3.2 กระบวนการเกิดผลึก (Crystallization process)

กระบวนการเกิดผลึกจะมี 2 ขั้นตอน คือ การเกิดผลึก หรือที่เรียกว่า นิวคลีเอชัน (nucleation) และการเติบโตของผลึก (crystal growth)

2.3.2.1 นิวคลีเอชัน (nucleation)

เมื่อสารละลายถูกลดอุณหภูมิจนถึงจุดเยือกแข็ง น้ำจะเริ่มกลายเป็นของแข็ง โดยธรรมชาติของการลดอุณหภูมิ การถ่ายเทความร้อน ไม่สามารถที่จะทำให้ทุกจุดในสารละลายมีอุณหภูมิเท่ากันได้ ผลึกน้ำแข็งจะเริ่มจากจุดเล็กๆ ที่มีอุณหภูมิเย็นยิ่งยวด (supercooling) ซึ่งจะต่ำกว่าอุณหภูมิโดยเฉลี่ยของสารละลาย อัตราการเกิดจุดผลึกเล็กๆ เหล่านี้จะมีผลต่อการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย คือ ถ้ามีอัตราการเกิดผลึกเล็กๆ มาก จะเป็นผลให้ความเข้มข้นของสารละลายสูง เนื่องจากน้ำบริสุทธิ์ในสารละลายได้เปลี่ยนรูปไปเป็นของแข็งมาก โดยทั่วไปแล้วนิวคลีเอชันสามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ (Thijssen, 1975) คือ

1) ไพรมารีนิวคลีเอชัน (primary nucleation)

1.1) โฮโมจีเนียสนิวคลีเอชัน (homogeneous nucleation)

โฮโมจีเนียสนิวคลีเอชัน จะเกิดขึ้นเฉพาะกับสารละลายที่มีความบริสุทธิ์อย่างมาก

เช่น สารละลายที่ประกอบจากน้ำแข็งบริสุทธิ์ หรือตัวถูกละลายบริสุทธิ์ และน้ำบริสุทธิ์ โดยนิวคลีโอจะเป็นกลุ่มของโมเลกุลของน้ำที่รวมตัวกันอย่างสมส่วน ซึ่งจะเกิดขึ้นได้ต้องใช้อุณหภูมิที่ต่ำมากๆ ซึ่งในความเป็นจริงแล้วโฮโมจีเนียสนิวคลีโอชัน มักไม่ค่อยเกิด และไม่เป็นที่ต้องการเนื่องจากควบคุมได้ยาก

1.2) เฮเทอโรจีเนียสนิวคลีโอชัน (heterogeneous nucleation)

เฮเทอโรจีเนียสนิวคลีโอชัน จะเกิดขึ้นได้เมื่อโมเลกุลของน้ำหรืออาจจะเป็นโมเลกุลของตัวถูกละลายไปจับตัวกับสิ่งแปลกปลอม เช่น อนุภาคเล็กๆ ที่มีอยู่ในสารละลาย ซึ่งอนุภาคเหล่านี้จะกระทำตัวเป็นนิวคลีโอไอโดยอนุภาคเหล่านี้ต้องมีโครงสร้างคล้ายกับผลึกน้ำแข็ง

2) เซคอนดารีนิวคลีโอชัน (secondary nucleation)

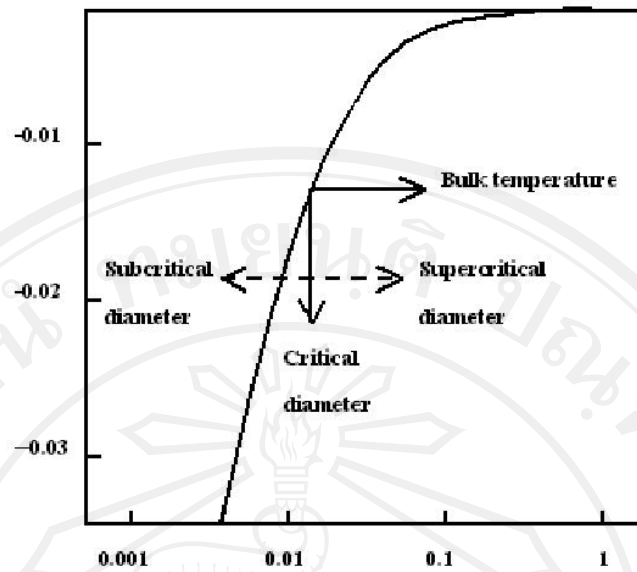
2.1) นิวคลีโอชันแบบเฉือนของของไหล (fluid shear nucleation) เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลหรือหน่วยต่างๆ ที่รวมกันอยู่อย่างหลวมๆ ถูกแยกออกมาจากผิวของผลึก หรือถูกฉีกขาดโดยแรงลากของของเหลวหนืดที่เคลื่อนที่ผ่านผิวของผลึกที่กำลังโตด้วยความเร็วสูง

2.2) นิวคลีโอชันแบบสัมผัส (contact nucleation) เกิดจากการที่ผลึกที่มีอยู่เกิดการชนกันเอง หรือชนกับผนังใบกวนแล้วชิ้นส่วนเล็กๆ แยกออกจากผลึก

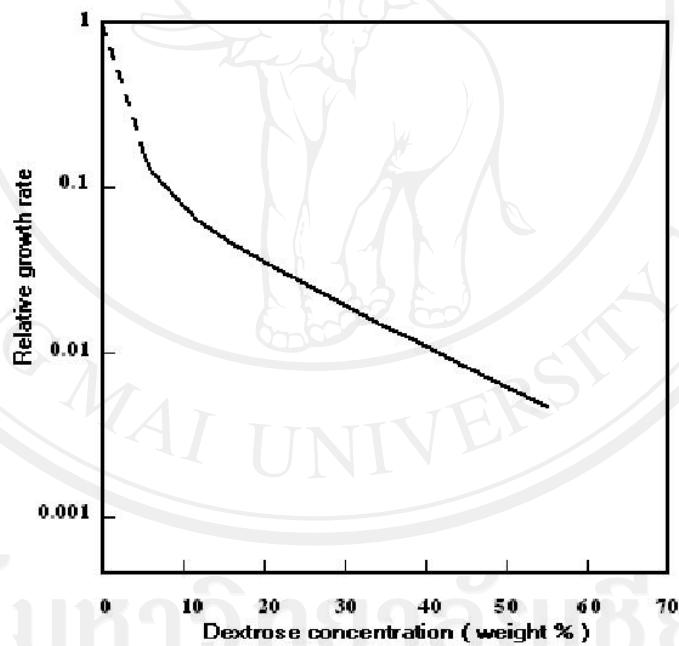
โดยทั่วไปอัตราการเกิดผลึกหรือนิวคลีโอชันของอาหารจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอัตราการเกิดผลึกจะแปรผันโดยตรงกับกำลังสองของอุณหภูมิเย็นยิ่งยวดรวม (bulk supercooling) ของสารละลาย และขึ้นอยู่กับกระบวนการกวนของสารละลาย การกวนจะมีผลทำให้อุณหภูมิเย็นยิ่งยวดของจุดผลึกเล็กๆ ลดลง

2.3.2.2 การเติบโตของผลึก (crystal growth)

การเติบโตของผลึกจะเกิดขึ้นหลังจากมีการเกิดจุดผลึกเล็กๆ จำนวนหนึ่งขึ้นมาพอ โดยผลึกจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเกิดการรวมตัวของผลึกน้ำแข็งเล็กๆ เหล่านั้น การรวมตัวกันที่เกิดขึ้น เกิดจากความสามารถในการละลายที่ไม่เท่ากันของผลึกก้อนเล็ก และผลึกก้อนใหญ่ที่มีในระบบ ผลึกก้อนเล็กสามารถละลายได้ง่ายกว่าผลึกก้อนใหญ่ เนื่องจากมีจุดหลอมเหลว และพลังงานอิสระที่ผิวต่ำกว่าผลึกก้อนใหญ่ ทำให้ผลึกก้อนเล็กเกิดการละลายมารวมกับผลึกก้อนใหญ่ เป็นผลให้ได้ผลึกที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งผลึกที่สามารถเติบโตต่อไปได้นั้นจะต้องมีขนาดไม่น้อยกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤต (critical diameter) ของผลึกในระบบ (รูป 2.5) โดยปรากฏการณ์ที่ผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้นจากการรวมตัวของผลึกเล็กๆ นี้จะเรียกว่า การบ่ม (ripening) ซึ่งขนาดของผลึกที่ได้จะขึ้นอยู่กับปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดของสารละลาย (รูป 2.6) อุณหภูมิเย็นยิ่งยวดรวม (bulk supercooling) ระยะเวลาในการเลี้ยงผลึก (resident time) และความเป็นเทอร์บูแลนต์ (turbulence) ของสารละลาย



รูป 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเย็นยิ่งยวดรวมกับขนาดวิกฤตของผลึก (Thijssen, 1975)



รูป 2.6 ผลของปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดที่มีต่อการเติบโตของผลึกของสารละลายเดกโตรส (Thijssen, 1975)

2.3.2.3 ลักษณะผลึกน้ำแข็ง

ลักษณะของผลึกน้ำแข็งที่ต้องการในกระบวนการเพิ่มความเข้มข้นด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง (Scnwartzberg and Roa, 1990) มีดังนี้

1) ผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับอัตราเร็วในการแช่แข็งและความเข้มข้น พบว่า หากอัตราเร็วในการแช่แข็งช้าจะได้ผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดใหญ่กว่า การใช้อัตราการแช่แข็งที่เร็ว สารละลายที่มีความเข้มข้นน้อยกว่าจะได้ผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดใหญ่กว่าสารละลายที่มีความเข้มข้นมากกว่า ผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดใหญ่จะทำให้สามารถแยกออกสารละลายเข้มข้นได้ง่ายขึ้น และจะมีการสูญเสียของสารละลายที่ติดไปกับผลึกลดลง

2) ความสมมาตรของผลึกน้ำแข็งจะขึ้นอยู่กับอัตราการกระจายตัวของตัวถูกละลาย พื้นที่ในการแช่แข็งกับอุณหภูมิในการแช่แข็ง โดยการที่จะได้ผลึกน้ำแข็งที่มีความสมมาตรกันนั้นต้องมีการกระจายตัวของตัวถูกละลายที่ดี และมีพื้นที่ในการแช่แข็งที่เพียงพอ ผลึกน้ำแข็งที่มีความสมมาตรจะช่วยลดการสูญเสียของตัวถูกละลายและของแข็งที่ติดไปกับผลึกโดยการกวน (agitation) จะช่วยให้สารละลายเกิดการผสมกันอย่างทั่วถึง เป็นผลให้ได้ผลึกที่มีลักษณะคล้ายกันและมีความกลมซึ่งจะทำให้ลดการสูญเสียของตัวถูกละลายจากกระบวนการแยก

2.3.3 การแยกผลึกน้ำแข็ง (Ice crystal separation)

น้ำผลไม้ที่ผ่านกระบวนการเพิ่มความเข้มข้นด้วยวิธีแช่เยือกแข็งแล้ว จะได้สารละลายที่อยู่ในรูปของสารละลายเข้มข้นผสมกับผลึกน้ำแข็ง แต่เนื่องจากต้องการสารละลายเข้มข้นเพียงอย่างเดียวจึงจำเป็นต้องมีการแยกผลึกน้ำแข็งออกจากสารละลาย ซึ่งกระบวนการแยกผลึกน้ำแข็งมีหลายวิธี เช่น วิธีกดบีบ (pressing) วิธีใช้แรงเหวี่ยง (centrifuge) และวิธีใช้กระบอบอกล้าง (wash column) โดยมีหลักการดังต่อไปนี้ (Thijssen, 1975)

1) วิธีกดบีบ (pressing)

เป็นวิธีที่นำความดันเข้ามาช่วยในการแยกผลึกน้ำแข็ง โดยที่จะใช้ความดันอัดผ่านชั้นกรองหรือ filter press ทำให้สามารถแยกผลึกน้ำแข็งออกจากสารละลายได้ แต่ในอุตสาหกรรมไม่นิยมใช้ เนื่องจากจะมีสารละลายเข้มข้นปนอยู่ในน้ำแข็งมาก ข้อดีของวิธีนี้คือ จะมีการสูญเสียกลั่นน้อยมาก เนื่องจากเป็นระบบปิด กลั่นไม่สามารถกระจายออกไปได้

2) วิธีใช้แรงเหวี่ยง (centrifuge)

เป็นวิธีที่แยกผลึกโดยอาศัยแรงเนื่องจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง และมีแผ่นกรองเป็นตัวกั้นไม่ให้ น้ำแข็งกลับไปผสมกับสารละลายเข้มข้นอีก ปัจจัยที่มีผลต่อการแยกได้แก่ ความเร็วการหมุนของตะแกรงแยก ขนาดของผลึกและความหนืดของสารละลายที่จะนำมาแยก หากเปรียบเทียบกับวิธีแรกแล้วจะพบว่า การแยกผลึกน้ำแข็งโดยวิธีใช้แรงเหวี่ยงนี้มีประสิทธิภาพในการแยกผลึกสูงกว่า ในอุตสาหกรรมมีการใช้วิธีนี้อยู่บ้างแต่ไม่กว้างขวาง เนื่องจากวิธีนี้จะทำให้เกิดการสูญเสียรสชาติและกลั่นได้ง่าย เพราะมีการสัมผัสกับอากาศโดยตรงขณะทำการแยกผลึกน้ำแข็ง

3) วิธีกระบอกล้าง (wash column)

เป็นวิธีการแยกผลึกน้ำแข็งที่มีมาตรฐานและประสิทธิภาพสูง นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการเพิ่มความเข้มข้นด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง ทั้งนี้เนื่องจากเป็นระบบปิดและไม่มีช่องว่างของอากาศอยู่เลย จึงสามารถรักษากลิ่นรสของสารละลายเข้มข้นได้เป็นอย่างดี วิธีการแยกผลึกน้ำแข็งทำได้โดยการส่งสารละลายเข้มข้น (crystal slurry) เข้ามาทางด้านล่างของคอลัมน์ จากนั้นจะบังคับให้ผลึกน้ำแข็งเคลื่อนที่ไปยังส่วนบนซึ่งอาจจะใช้สกรู หรือลูกสูบที่มีรูพรุน ซึ่งจะมีน้ำล้างที่ได้มาจากการละลายของผลึกน้ำแข็งบางส่วนไหลสวนทางมากับผลึกน้ำแข็ง โดยส่วนของผลึกน้ำแข็งจะถูกแยกออกทางส่วนบนของคอลัมน์ ส่วนสารละลายเข้มข้นนั้นจะถูกแยกออกทางส่วนล่างของคอลัมน์

2.3.4 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการเพิ่มความเข้มข้นด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง

ข้อดีของกระบวนการเพิ่มความเข้มข้นด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง (Thijssen, 1975) มีดังต่อไปนี้

- 1) ลดการเสื่อมเสียที่เกิดจากความร้อน ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพสูง
- 2) สามารถเก็บรักษากลิ่นหอมระเหยได้มากกว่าวิธีอื่นๆ ดังนั้นเมื่อเจือจางแล้วจะได้ น้ำผลไม้ที่มีรสชาติใกล้เคียงกับน้ำผลไม้สดมากที่สุด
- 3) การใช้อุณหภูมิต่ำทำให้การเปลี่ยนแปลงทางเคมี และปฏิกิริยาเอนไซม์ช้าลง
- 4) สามารถนำน้ำแข็งกลับมาใช้ในกระบวนการได้ เช่น นำกลับมาควบแน่นสารทำความเย็น

ข้อเสียของกระบวนการเพิ่มความเข้มข้นด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง (Thijssen, 1975) มีดังต่อไปนี้

- 1) ระดับความเข้มข้นที่ต้องการมักทำได้อย่างจำกัด ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของของเหลว โดยเฉพาะความหนืด โดยปกติปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solid content) ของน้ำผลไม้ต่างๆ จะมีค่าต่ำ และที่อุณหภูมิห้อง ของเหลวจะมีค่าความหนืดที่ต่ำ เมื่อทำให้ของเหลวเข้มข้นขึ้นในขณะอุณหภูมิต่ำๆ นั้น จะมีผลึกปนอยู่ด้วยจำนวนมาก ส่งผลให้ของเหลวมีความหนืดสูงมาก ทำให้การทำงานของระบบต่างๆ ถ้ามากขึ้น เครื่องตกลูกน้ำแข็งโดยทั่วๆ ไป จะออกให้สามารถทำให้เข้มข้นได้ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักทั้งหมดแต่ในการทำงานจริงไม่สามารถทำได้
- 2) ต้นทุนการผลิตสูง กระบวนการนี้จะมีต้นทุนสูงกว่าระบบอื่นๆ มาก แม้ว่าระบบนี้จะใช้พลังงานน้อยกว่าโดยต้องการพลังงานเพียง 144 บีทียูต่อปอนด์ เพื่อให้ น้ำกลายเป็นน้ำแข็ง ในขณะที่ระเหยน้ำปกตินั้นต้องการพลังงานสูงถึง 1,000 บีทียูต่อปอนด์

3) ถ้าทำให้ผลิตภัณฑ์แข็งตัวอย่างรวดเร็ว จะทำให้ส่วนของของแข็งที่ละลายน้ำได้ และเป็นที่ต้องการบางส่วนติดและหลุดออกไปพร้อมผลึกน้ำแข็งแทนที่จะอยู่ในส่วนที่เข้มข้นโดยสารแขวนลอยที่นำเข้าสู่ระบบจะทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสไอแทน ทำให้สารละลายที่เข้มข้นมีลึซึด และขาดกลิ่นรส เนื่องจากอนุภาคสารที่ให้สี และอนุภาคน้ำมันหอมระเหยซึ่งอยู่ศูนย์กลางผลึกน้ำแข็งถูกกำจัดออกจากระบบด้วย

4) ไม่สามารถทำลายจุลินทรีย์ได้ เพียงแต่ยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์เท่านั้น

2.3.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

รจนา และคณะ (2550) ได้ทำการศึกษาการผลิตน้ำส้มเข้มข้นพร้อมดื่มด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง โดยเปรียบเทียบกับการทำให้เข้มข้นโดยวิธีการระเหยน้ำโดยใช้ความร้อน พบว่า การผลิตน้ำส้มเข้มข้นพร้อมดื่มด้วยวิธีแช่เยือกแข็งสามารถได้น้ำส้มที่มีความเข้มข้นสูงเป็น 2 เท่าของน้ำส้มสด โดยมีความเข้มข้น 34.86 เปอร์เซ็นต์ของน้ำส้มสดเริ่มต้น ปริมาณการสูญเสียของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดที่ติดไปกับผลึกน้ำแข็งเท่ากับ 28.43 เปอร์เซ็นต์ ใช้พลังงานไฟฟ้าในการผลิต 1.31 หน่วย วิธีการเพิ่มความเข้มข้นด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง ได้ผลิตภัณฑ์ที่คุณภาพดีกว่า และประหยัดต้นทุนมากกว่า วิธีการเพิ่มความเข้มข้นด้วยวิธีการระเหยน้ำ เมื่อนำน้ำส้มเข้มข้นที่ได้จากการแช่แข็งมาเปรียบเทียบกับคุณภาพกับน้ำส้มสดและน้ำส้มที่จำหน่ายตามท้องตลาด พบว่าผลิตภัณฑ์น้ำส้มเข้มข้นโดยวิธีแช่เยือกแข็งได้รับการยอมรับด้านสีมากที่สุด สำหรับอายุการเก็บรักษาของน้ำส้มเข้มข้นพบว่าสามารถเก็บรักษาได้นาน 60 วัน ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นอกจากนั้นสมิต (2549) ได้มีการศึกษาเทคนิคและวิธีการทำให้น้ำตาลสดเข้มข้นเทียบเคียงน้ำผึ้ง ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเทคนิควิธีทำให้เข้มข้นเยือกแข็ง (freeze concentration) ร่วมกับการเหวี่ยงแยกของผสม และวิธีเครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze dryer) พบว่า น้ำตาลสดที่ได้มีค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด 17.8 เปอร์เซ็นต์ ความหนืด 20.3 เซนติพอยส์ และปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดเท่ากับ 4.2×10^5 โคโลนีต่อมิลลิลิตร มาทำให้เข้มข้นโดยการแช่เยือกแข็ง และเหวี่ยงแยกจะมีค่าของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด 38 เปอร์เซ็นต์ ความหนืด 43.7 เซนติพอยส์ และปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดเท่ากับ 3.7×10^5 โคโลนีต่อมิลลิลิตร ส่วนวิธีระเหิดน้ำแข็งจะมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดเท่ากับ 57 เปอร์เซ็นต์ ความหนืด 116.4 เซนติพอยส์ และปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดเท่ากับ 2×10^5 โคโลนีต่อมิลลิลิตร และไม่พบจุลินทรีย์ ซึ่งน้ำตาลสดเข้มข้นที่ได้ยังคงมีกลิ่น และรสชาติของน้ำตาลสด อีกทั้งยังมีความหวานเพิ่มขึ้น แต่ในขณะที่น้ำผึ้งแท้เจือจาง 50 เปอร์เซ็นต์มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดเท่ากับ 50.5 เปอร์เซ็นต์ และค่าความหนืดเท่ากับ 39.8 เซนติพอยส์ และ Clary *et al.* (2006) ได้ทำการศึกษาการเปรียบเทียบการทำให้เข้มข้นไวน์โดยวิธีแช่เยือกแข็งและวิธีการทำให้เข้มข้นโดยวิธีการระเหยด้วยรังสีไมโครเวฟภายใต้

สภาวะสุญญากาศ โดยทำการสกัดกลิ่นหลังจากกระบวนการทั้งสองโดยใช้เทคนิค solid-phase micro-extraction ซึ่งตรวจพบกลิ่นถึง 28 ชนิดในไวน์เข้มข้นแบบแช่เยือกแข็ง ซึ่งมีมากกว่าไวน์ที่เข้มข้นที่ผ่านกระบวนการระเหยน้ำโดยใช้รังสีไมโครเวฟภายใต้สภาวะสุญญากาศ อีกทั้งไวน์ที่ได้จากกระบวนการทำให้เข้มข้นโดยใช้รังสีไมโครเวฟภายใต้สภาวะสุญญากาศ ทำให้ปริมาณฟูเซลออยล์ (fusel oil) เพิ่มขึ้น และค่าความเป็นกรด-ด่างในไวน์ที่ได้ลดลงอีกด้วย อีกทั้ง Gary and Justin (1996) ได้ทำการศึกษการเปรียบเทียบการยอมรับทางประสาทสัมผัสของไวน์ขาวที่ทำให้เข้มข้นโดยวิธีระเหยน้ำโดยใช้ความร้อนและการทำให้เข้มข้นโดยวิธีการทำให้เข้มข้นแบบแช่เยือกแข็ง โดยทำการศึกษาที่ความเข้มข้นสองระดับ คือ 20.5 และ 30.5 เปอร์เซ็นต์ซึ่งพบว่าผลการทำให้ไวน์เข้มข้นโดยใช้วิธีการระเหยน้ำโดยใช้ความร้อนทำให้ลักษณะปรากฏด้านสีเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยเปลี่ยนจากสีขาวเป็นสีน้ำตาล และเมื่อนำไวน์ที่ได้มาทดสอบการยอมรับของผู้บริโภค พบว่าผู้บริโภคให้การยอมรับทางประสาทสัมผัสของไวน์ที่ผ่านการทำให้เข้มข้นโดยวิธีแช่เยือกแข็งทั้งสองความเข้มข้นมากกว่าไวน์ที่ทำให้เข้มข้นโดยการระเหยน้ำ

ดังนั้นจะเห็นได้ว่ากระบวนการทำให้เข้มข้นโดยวิธีแช่เยือกแข็งเป็นกระบวนการที่สามารถรักษาเอกลักษณ์ของผลิตภัณฑ์ได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะเอกลักษณ์เรื่องกลิ่น สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อทำให้อาหารมีความเข้มข้นสูงขึ้นได้เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ

2.4 กระบวนการแปรรูปน้ำผลไม้ผงด้วยการทำแห้งแบบโฟมเมท

2.4.1 การทำแห้งแบบโฟมเมท

การทำแห้งแบบโฟมเมท คือ การทำแห้งโดยการทำให้อาหารมีลักษณะเป็นโฟมเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยวิธีการดีให้เกิดโฟม กระบวนการการทำแห้งแบบโฟมเมทเริ่มจากการนำอาหารเหลวมาทำให้เข้มข้น เพื่อลดปริมาณน้ำส่วนหนึ่ง และช่วยทำให้โฟมที่เกิดขึ้นมีความคงตัวมากขึ้น ชนิดของอาหารจะเป็นตัวบ่งชี้ความสามารถในการเกิดโฟม เช่น นํ้านม และไข่สามารถนำมาทำให้เกิดโฟมได้ทันที เนื่องจากมีโปรตีนเป็นองค์ประกอบที่ทำให้เกิดโฟมได้ สำหรับอาหารบางชนิดที่ไม่สามารถดีให้เกิดโฟมได้หรือว่าสามารถทำให้เกิดโฟมได้ หรือโฟมที่เกิดขึ้นไม่คงตัว และยุบตัวขณะอบแห้ง ควรเติมสารเพิ่มความคงตัว (stabilizers) และสารปรับปรุงเนื้อสัมผัส (binders) เช่น คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส กลีเซอรอล โมโนสเตียเรท มอลโตเดคทรีน ซอร์บิทอล และเดกโตรส เป็นต้น เพื่อวัตถุประสงค์ 2 ประการ คือ ทำให้เกิดโฟม และทำให้โฟมมีความแข็งแรงหรือคงตัว อาหารที่ผ่านการทำโฟมแล้วจะถูกนำมาแผ่กระจายลงบนถาด และอบแห้งโดยใช้วิธีการอบแห้งต่างๆ การเติมสารเพิ่มความคงตัวของโฟม (foam stabilizers) จะใช้เมื่ออาหารเหลวที่จะทำให้อาหาร

เกิดโพนั่น มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดอยู่น้อยหรือมีความหนืดต่ำ เพื่อให้อาหารมีความหนืดเพิ่มขึ้น และตีให้เป็น โพนที่ไม่ยุบตัวได้ง่าย (Hart *et al.*, 1963)

2.4.2 กระบวนการทำให้เกิดโพน

การทำให้เกิดโพนในอาหารเหลว ทำได้โดยการตีด้วยความเร็วสูงๆ เป็นการผสมของผสม 2 สถานะ คือของเหลวและอากาศด้วยแรงเฉือนที่สูง อาหารเหลวมีการแตกตัวทำให้อากาศสามารถแทรกตัวเป็นฟองในของเหลวได้ ซึ่งกลไกของการเกิดโพนในของเหลวนั้นจะเกี่ยวข้องกับแรงตึงผิว (surface tension) ทั้งนี้โดยปกติเมื่อฟองอากาศในของเหลวลอยขึ้นมาอยู่ในผิวหน้า จะมีการแตกของฟองอากาศ ดังนั้นถ้าต้องการรักษาสภาพของฟองอากาศให้คงอยู่ที่ผิวของของเหลวได้ จะต้องทำการเปลี่ยนแปลงค่าแรงตึงผิวให้ต่ำลง (Hart *et al.*, 1963) การตีโพนในอาหารเหลวจะทำให้อาหารไม่เกาะตัวกันเป็นก้อน เมื่อนำโพนไปอบในเครื่องอบแห้ง โครงสร้างของโพน และการจัดเรียงตัวของโพนที่เหมาะสมจะทำให้การอบแห้งเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว โดยลักษณะของโพนที่ต้องการในการอบแห้งคือ โพนจะต้องมีความคงตัวสูง เพื่อให้โพนสามารถพุงโครงสร้างของอาหารในระหว่างการอบแห้งได้ โพนที่อบแห้งแล้วจะมีโครงสร้างเป็นรูพรุน และสามารถดูดซับน้ำได้เป็นผง ซึ่งสามารถละลายได้ทันทีในน้ำเย็น วิธีนี้สามารถช่วยรักษาคุณภาพของอาหารไว้ได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะอาหารที่ไวต่อการเสื่อมเสียคุณภาพด้วยความร้อน (Ponting *et al.*, 1973)

ปัจจัยที่มีผลต่อความคงตัวของโพน (นิธิยา, 2549) มีดังต่อไปนี้

1) ความหนืด การทำให้ของเหลวมีความหนืดสูงขึ้นจะทำให้โพนมีความคงตัวมากขึ้นสารที่ช่วยเพิ่มความหนืดส่วนใหญ่เป็นพวกน้ำตาล และสารไฮโดรคอลลอยด์ สารพวกนี้นอกจากจะเพิ่มความหนืดแล้วยังลดแรงตึงผิวอีกด้วย

2) แรงตึงผิว ของเหลวที่มีแรงตึงผิวต่ำ จะช่วยทำให้ของเหลวมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นรอบๆ ฟองอากาศโดยไม่บีบตัวให้ฟองอากาศแตกเร็วเกินไป ดังนั้นการเปลี่ยนแรงตึงผิวของฟิล์มสามารถทำให้เกิดโพน หรือเกิดการยุบตัวของโพนได้

3) ความดันไอ ของเหลวต้องมีความดันไอลำ เพราะทำให้ของเหลวกลายเป็นไอได้ยาก หรือของเหลวระเหยได้ช้า ถ้าของเหลวมีความดันไอสูงจะกลายเป็นไออย่างรวดเร็วทำให้ฟิล์มที่ล้อมรอบฟองอากาศบางลง และโพนอาจจะยุบตัว

4) การเกิดฟิล์มของอนุภาคฟองอากาศ โพนที่มีความคงตัวฟิล์มที่เกิดขึ้นต้องมี ค่าความยืดหยุ่นที่ผิวสัมผัส และความหนืดที่ผิวสัมผัสสูง

5) สารที่จะช่วยให้โฟมมีความแข็งตัว (rigidity) ที่ระหว่างผิวของก๊าซ และของเหลว เช่น โปรตีนที่มีอยู่ในอาหาร เมื่อทำให้เกิดโฟมโดยการตีโปรตีนจะเสียสภาพขณะตีจะช่วยทำให้โฟมมีความแข็งตัวและคงตัวมากขึ้นด้วย

2.4.3 สารที่ก่อให้เกิดโฟม

สารที่ก่อให้เกิดโฟม เป็นสารที่ใช้สำหรับเติมลงในอาหารเหลว เพื่อช่วยให้เกิดโฟมเมื่อนำไปตีในเครื่องปั่นเติมอากาศให้กับอาหารจนเกิดโฟม ซึ่งเป็นของผสมระหว่างของเหลว หรือกึ่งของแข็ง ในอากาศ มีของเหลวเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (continuous phase) และอากาศเป็นส่วนกระจาย (disperse phase) โดยชั้นระหว่างของเหลวบางๆ เรียกว่า lamellae แยกฟองอากาศออกจากกัน สารที่ก่อให้เกิดโฟมที่เติมลงไปในการจะช่วยให้เกิดสภาพโฟม ทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงบริเวณ lamellae ทำให้อาหารอู่อากาศไว้ภายในได้มากขึ้น โดยฟองอากาศนั้นไม่แตกหรือแยกออก ขณะเดียวกันจะช่วยรักษาสภาพโฟมให้มีความคงตัวยิ่งขึ้น ปกติโมเลกุลของสารที่ช่วยให้เกิด โฟมนั้นประกอบด้วย ส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic) ซึ่งเป็นอนุโมลติสระที่มีประจุบวกหรือลบ เป็นส่วนที่จะละลายอยู่ในวัฏภาคของน้ำ และส่วนที่เป็นประจุลบมักเป็นอนุพันธ์คาร์บอนอะตอมที่มีสายยาว (aliphatic carbon chain) เป็นส่วนที่จะละลายอยู่ในวัฏภาคของน้ำมัน สารที่ก่อให้เกิดโฟมที่เลือกใช้สำหรับอาหารต้องไม่มีรสชาติและไม่ทำปฏิกิริยากับอาหารสามารถทำให้เกิดโฟมได้ดีเมื่อใช้ในปริมาณต่ำ และปลอดภัย สำหรับการบริโภค (Ponting *et al.*, 1973)

สารที่ก่อให้เกิดโฟมที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีดังต่อไปนี้

1) มอลโตเดคตริน (Maltodextrin)

มอลโตเดคตริน เป็นสารที่ไม่มีความหวาน ประกอบด้วยหน่วยของ D-glucose เชื่อมต่อกันด้วยพันธะอัลฟา 1, 4 มอลโตเดคตริน มีทั้งที่เป็นผงสีขาวหรือสารละลายเข้มข้นที่เตรียมได้จากสตาร์ชข้าวโพด (corn starch) มาผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิส (hydrolysis) บางส่วนด้วยกรดและหรือเอนไซม์ที่เหมาะสม และปลอดภัย มอลโตเดคตรินจะมีขนาดโมเลกุลที่แตกต่างกันโดยสามารถแบ่งได้จากค่า dextrose equivalent (DE) ค่า DE คือ ค่า reducing power ของพอลิแซคคาไรด์ หรือ โอลิโกแซคคาไรด์ที่ได้จากสตาร์ชเปรียบเทียบกับ D-glucose โดยน้ำหนักฐานแห้ง โดยทั่วไป มอลโตเดคตรินจะมีค่า DE น้อยกว่า 20 หาก DE มากกว่า 20 เป็นกลูโคสไซรัป มอลโตเดคตรินที่มีค่า DE แตกต่างกันจะมีสมบัติทางเคมี ภายภาพต่างกัน เช่น ความสามารถในการละลาย อุณหภูมิเยือกแข็ง และความหนืด เป็นต้น คุณสมบัติของมอลโตเดคตริน คือ สามารถละลายน้ำได้ และป้องกันการเกิดออกซิเดชัน (oxidation) ได้ดี (นิธิยา, 2549)

2) ซอร์บิทอล (Sorbitol)

ซอร์บิทอล เป็นน้ำตาลแอลกอฮอล์ที่ให้ความหวานแทนน้ำตาล มีคุณสมบัติในการเป็นสารดูดความชื้น และสารปรับปรุงเนื้อสัมผัสได้ดีเยี่ยม ซอร์บิทอลนิยมใช้กับอาหารที่ต้องการพลังงานต่ำ เหมาะสำหรับผู้บริโภคที่ต้องการลดน้ำหนัก อีกทั้งยังใช้ในผลิตภัณฑ์ยา และเครื่องสำอางอีกด้วย ซอร์บิทอลมีความคงตัวมาก และไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีที่อุณหภูมิสูง ซึ่งช่วยป้องกันการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลโดยไม่ใช้เอนไซม์ (Maillard reaction) ได้ ในผลิตภัณฑ์อาหารซอร์บิทอลนิยมใช้ในขนมหวานจำพวกลูกอม ผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ ช็อคโกแลต หมากฝรั่ง ของหวานแช่แข็ง คุกกี้ เค้ก และน้ำตาลไอซิ่ง รวมทั้งยังใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพปาก และฟัน เช่น ยาสีฟัน และน้ำยาบ้วนปาก เป็นต้น (Dwivedi, 1991)

3) เดกโตรส (Dextrose)

เดกโตรส เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ได้จากการไฮโดรไลซ์แป้ง มีการประยุกต์ใช้เดกโตรสกับผลิตภัณฑ์อาหารหลากหลายชนิด เช่น ผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ เครื่องดื่มแอลกอฮอล์ แยม เจลลี่ น้ำผลไม้กระป๋อง และผลิตภัณฑ์ขนมหวานจำพวกลูกอม รวมทั้งยังใช้ในผลิตภัณฑ์ทางด้านเภสัช และยังใช้อย่างกว้างขวางอุตสาหกรรมหมักคอง ประโยชน์ของเดกโตรสคือ ทำให้ขนมปังมีความยืดหยุ่น และนุ่ม ใช้แทนน้ำตาลเนื่องจากให้พลังงานที่น้อยกว่า และป้องกันการตกผลึกของน้ำตาลในผลิตภัณฑ์ขนมหวานชนิดต่างๆ เป็นต้น (Universal Starch Chem Allied, 2005)

4) คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxy methyl cellulose)

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นอนุพันธ์เซลลูโลสอีเทอร์ที่อยู่ในรูปเกลือโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส อาจเรียกว่า เซลลูโลสกัม (cellulose gum) หรือใช้ชื่อย่อว่า CMC เป็นพอลิเมอร์ชนิดประจุลบที่ละลายได้ในน้ำ เนื่องจากการเตรียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสทำได้โดยใช้เซลลูโลสบริสุทธิ์มาทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อให้เส้นใยเซลลูโลสพองตัวออกได้เป็นสารละลายเซลลูโลสในด่าง แล้วทำปฏิกิริยาต่อกับโซเดียมโมโนคลอโรแอซีเตต ได้เป็นโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส สารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาการแทนที่ดังกล่าวจะทำให้ได้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสหลายชนิด ซึ่งสมบัติของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแต่ละชนิดจะผันแปรไปตามปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ความสม่ำเสมอของการแทนที่ (uniformity of substitution) degree of substitution (DS) และ degree of polymerization (DP) นอกจากนี้สมบัติของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแต่ละชนิดยังขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค ความสามารถในการดูดน้ำและความหนืดของสารละลายอีกด้วย (นิธิยา, 2549)

Degree of substitution เป็นจำนวนหมู่ไฮดรอกซิลบนโมเลกุลของแอนไฮโดรกลูโคส (anhydroglucose) ซึ่งจะถูกแทนที่ด้วยหมู่คาร์บอกซีเมทิล โดยทางทฤษฎีโมเลกุลของแอนไฮโดรกลูโคสมีหมู่ไฮดรอกซิล 3 หมู่ ดังนั้นควรจะมี DS เป็น 3 แต่ในทางปฏิบัติปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจริง ๆ จะ

ได้ DS น้อยกว่า 3 คือ มี DS อยู่ในช่วง 0.4–1.2 เท่านั้น คาร์บอกซีเมธิลเซลลูโลสที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร จะมี DS ประมาณ 0.9 ทำให้คาร์บอกซีเมธิลเซลลูโลสละลายได้ทั้งในน้ำร้อนและน้ำเย็น คาร์บอกซีเมธิลเซลลูโลสที่มี DS 0.3 หรือต่ำกว่าจะละลายได้ในน้ำแต่ไม่ละลายน้ำ และจะเริ่มละลายในน้ำเมื่อมี DS ตั้งแต่ 0.45 ขึ้นไป สำหรับความหนืดของสารละลายจะขึ้นอยู่กับ DP ถ้ามี DP สูง จะทำให้ได้สารละลายที่มีความหนืดเพิ่มขึ้น ความหนืดของสารละลายคาร์บอกซีเมธิลเซลลูโลสยังผันแปรขึ้นอยู่กับชนิดของคาร์บอกซีเมธิลเซลลูโลส เช่น สารละลายคาร์บอกซีเมธิลเซลลูโลสความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์ อาจให้ความหนืดได้ตั้งแต่ 10–50,000 เซนติพอยส์ก็ได้ และสารละลายคาร์บอกซีเมธิลเซลลูโลสมีลักษณะคล้ายซูโดพลาสติก คาร์บอกซีเมธิลเซลลูโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะได้สารละลายที่มีความหนืดต่ำ และมีความเป็นซูโดพลาสติกน้อยกว่าสารละลายคาร์บอกซีเมธิลเซลลูโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง โดยทั่วไปสารละลายคาร์บอกซีเมธิลเซลลูโลสจะมีความคงตัวที่ค่าความเป็นกรด-ด่างช่วง 4–10 แต่จะให้ค่าความหนืดสูงสุด และอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ถ้าค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่า 3 อาจทำให้คาร์บอกซีเมธิลเซลลูโลสที่อยู่ในรูปกรดอิสระตกตะกอน และถ้าค่าความเป็นกรด-ด่างสูงกว่า 10 จะทำให้สารละลายมีความหนืดลดลงเล็กน้อย (นิธิยา, 2549)

ความคงตัวของคาร์บอกซีเมธิลเซลลูโลสยังขึ้นอยู่กับชนิดของไอออนอีกด้วย ดังนั้น จึงมีกฎทั่วไปว่า ถ้าเป็นเกลือของคาร์บอกซีเมธิลเซลลูโลสที่เกิดจากไอออนประจุบวกที่มีเวเลนซ์ 1 (monovalent cation) จะละลายได้ดีในน้ำ แต่ถ้าเป็นไอออนประจุบวกที่มีเวเลนซ์ 2 (divalent cation) จะได้สารละลายที่มีลักษณะขุ่น และมีความหนืดลดลง ถ้าเป็นไอออนประจุบวกที่มีเวเลนซ์ 3 (trivalent cation) จะได้สารละลายเกลือที่ไม่ละลายน้ำ คาร์บอกซีเมธิลเซลลูโลสใช้เติมลงในไอศกรีมจะช่วยอุ้มน้ำ ลดการเคลื่อนตัวของน้ำ ทำให้ไอศกรีมมีลักษณะเนียนนุ่ม และเมื่อไอศกรีมแข็งตัวจะไม่เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ และยังใช้เติมลงในอาหารเพื่อให้อาหารมีพลังงานต่ำ (low calorie food) โดยทำหน้าที่เป็น bulking agent โซเดียมคาร์บอกซีเมธิลเซลลูโลสยังสามารถนำมาทำเป็นฟิล์มใส และมีความแข็งแรงโดยไม่มีผลกระทบจากน้ำมัน และตัวทำละลายอินทรีย์ (นิธิยา, 2549)

5) กลีเซอรอลโมโนสเตียเรท (Glycerol monostearate)

กลีเซอรอลโมโนสเตียเรท หรือ GMS เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ใช้เป็นอิมัลซิไฟเออร์ ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และมีรสหวาน GMS เป็นสารประกอบเอสเทอร์ของกรดสเตียริก ในด้านอาหาร GMS ถูกใช้เป็นสารเพิ่มความหนืด เพิ่มความคงตัว ป้องกันการเกาะกันของแข็ง และใช้เป็นสารกันบูด GMS ยังถูกใช้ในเส้นทางเภสัชวิทยา ผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง และผลิตภัณฑ์บำรุงเส้น อีกทั้งยังทำให้ไอศกรีม และวิปครีมมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่เรียบเนียนสม่ำเสมอ (Michael and Irene, 2004)

2.4.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กัลยาณี (2540) ได้รายงานถึงชนิดของสารเพิ่มความคงตัวของโฟม และวิธีการเตรียมสารก่อนนำมาใช้ว่า ในช่วงแรกที่มีการพัฒนากระบวนการอบแห้งแบบโฟมเมทสารเพิ่มความคงตัวของโฟมที่นิยมใช้มากที่สุด คือ กลีเซอรอลโมโนสเตียเรท (glycerol monostearated, GMS) ซึ่งเป็นสารที่ไม่ละลายในน้ำ มีวิธีการเตรียมสารก่อนนำไปใช้โดยการเติมกลีเซอรอลโมโนสเตียเรทลงในน้ำ ให้มีความเข้มข้น 5-10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก คนและเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 140-155 องศาฟาเรนไฮต์ หรือใช้เครื่องผสมทำให้กลีเซอรอลโมโนสเตียเรทกระจายตัวในน้ำที่อุณหภูมิ 170 องศาฟาเรนไฮต์ แล้วเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 130 องศาฟาเรนไฮต์ ในการใช้งานมีการใช้กลีเซอรอลโมโนสเตียเรท เป็นสารเพิ่มความคงตัวของโฟมในอาหารเหลวหลายชนิด ได้แก่ แอปเปิ้ลคอก กล้วยแช่แข็ง กล้วยกระป๋อง น้ำเลมอนเข้มข้น กากน้ำตาล ถั่ว ลูกสาเก ฝักรั้ว ลูกพรุน สเตอริไลซ์ผสมน้ำตาล น้ำตาลซูโครสผสมเจลาติน และน้ำมะเขือเทศเข้มข้น และศุภกิจ (2547) ได้ทำการศึกษากรรมวิธีการผลิตแคโรตทิงด้วยวิธีทำให้เกิดโฟม โดยการศึกษาระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมในการทำให้เกิดโฟมที่คงตัว และอุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบแห้งน้ำแคโรตทิงด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อน พบว่าการเพิ่มปริมาณของไข่ขาวผงช่วยทำให้ค่าความคงตัวของฟองเพิ่มขึ้น หลังจากการอบแห้งพบว่าปริมาณไข่ขาวผงและอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งช่วยลดระยะเวลาในการทำแห้งและปริมาณความชื้นในแคโรตทิง ในส่วนของปริมาณสารเบต้าแคโรทีนในแคโรตทิงมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งเพิ่มขึ้น สภาวะที่เหมาะสมในการทำแคโรตทิงโดยวิธีทำให้เกิดโฟม คือการใช้ไข่ขาวผง 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร อบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 90 นาที และแคโรตทิงที่ได้มีปริมาณความชื้นน้อยที่สุด คือ 12.6 เปอร์เซ็นต์ และมีปริมาณเบต้าแคโรทีนเท่ากับ 4,960 ไมโครกรัมต่อกรัม รวมทั้งครุณี (2550) ได้ศึกษาการพัฒนากระบวนการผลิตกล้วยน้ำว้าผงโดยวิธีทำแห้งแบบโฟมเมท พบว่าการเติม methocel 1.2 กรัมต่อกิโลกรัม และ myverol 15 กรัมต่อกิโลกรัม ในเนื้อกล้วยและตีปั่นด้วยความเร็วสูงนาน 5 นาที ทำให้ได้โฟมที่มีความเข้มข้นต่ำที่สุด อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการทำแห้ง 75 องศาเซลเซียส นาน 9 ชั่วโมง ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่มีค่ากิจกรรมของน้ำเท่ากับ 0.27 ปริมาณความชื้นเท่ากับ 4.79 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณเถ้า 2.16 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณโปรตีน 4.05 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณไขมัน 5.02 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณเส้นใย 3.88 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณเบต้าแคโรทีน 1,457.42 ไมโครกรัมต่อตัวอย่าง 100 กรัม จำนวนเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดเท่ากับ 8×10^6 โคโลนีต่อกรัม ปริมาณยีสต์และรานน้อยกว่า 10 โคโลนีต่อกรัม อีกทั้งจากรายงานการวิจัยของ Drazenka *et al.* (2003) ซึ่งได้ศึกษาคุณสมบัติของการเติมน้ำตาล trehalose และน้ำตาลซูโครสเพื่อรักษากลิ่นของสตอเบอร์รี่อบแห้งโดยใช้วิธีการทำแห้งแบบโฟมเมท ซึ่งได้ทำการเติมน้ำตาลทั้งสองชนิดลงในสตอเบอร์รี่ก่อนทำการอบแห้ง หลังจากการอบแห้งเสร็จสิ้นจึงทำการสกัดกลิ่นโดยใช้เทคนิค solid-phase micro-extraction (SPME) ร่วมกับการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี

โดยทำการวิเคราะห์เอสเทอร์ (ester) สารประกอบคาร์บอนิล (carbonyl compound) เทอเพนอยด์ (terpenoid) แอลกอฮอล์ที่สำคัญ (several alcohol) และกรด พบว่าน้ำตาลทั้งสองชนิดสามารถรักษากลิ่นของสโตเบอร์รี่ได้โดยการใช้น้ำตาล trehalose สามารถรักษากลิ่นได้ดีกว่าน้ำตาลซูโครส และจากการศึกษาของ Rajkumar *et al.* (2007) โดยศึกษาลักษณะของการอบแห้งแบบโฟมเมทเนื้อมะม่วงพันธุ์ Alphonso โดยใช้ egg albumen เป็นสารก่อโฟม และเมธิลเซลลูโลสเป็นสารเพิ่มความคงตัว โดยเปรียบเทียบการอบแห้งเนื้อมะม่วงสด และมะม่วงโฟมเมท พบว่า การอบแห้งแบบโฟมเมทที่ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นกว่าการอบแห้งแบบปกติ 50 เปอร์เซ็นต์ของระยะเวลาในการอบ และลดการแตกหักของผลิตภัณฑ์ที่ได้อีกด้วย รวมทั้งการศึกษาของ Thuwapanichayanan (2008) ซึ่งได้ศึกษาคูณลักษณะ และคุณภาพของกล้วยอบแห้งด้วยวิธีโฟมเมท พบว่า ความหนาแน่นของโฟมที่ใช้ egg albumen มีผลต่อลักษณะของกล้วยอบแห้งในด้านของการหดตัว เนื้อสัมผัสและโครงสร้างในระดับโมเลกุล ความหนาแน่นของโฟมที่ใช้มี 3 ระดับได้แก่ 0.3, 0.5 และ 0.7 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อบแห้งกล้วยที่ความหนา 5 มิลลิเมตร โดยใช้อุณหภูมิ 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส โดยใช้อุณหภูมิทั้ง 3 ระดับตามลำดับ ทำให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีความชื้น 0.03 กิโลกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง สภาวะที่ทำให้ได้ลักษณะของกล้วยอบแห้งที่ดีที่สุด คือการใช้โฟมที่ความหนาแน่น 0.5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 80 องศาเซลเซียส

จะเห็นได้ว่าการทำแห้งแบบ โฟมเมทเป็นการทำแห้งที่อุณหภูมิไม่สูง เพื่อรักษาสาระสำคัญที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ เช่น เบต้าแคโรทีนได้เป็นอย่างดี

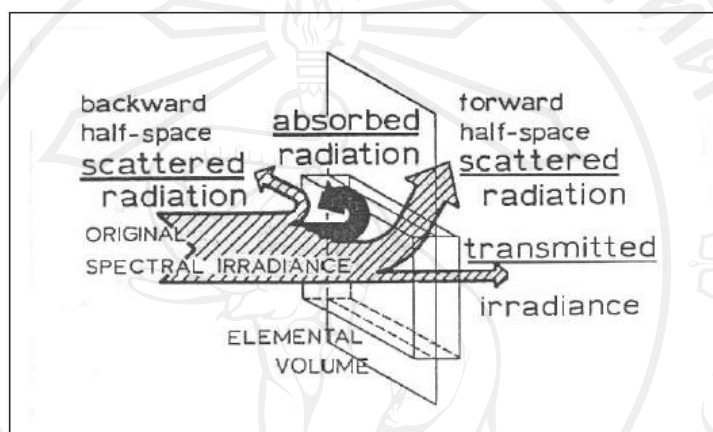
2.5 วิธีอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรด

รังสีอินฟราเรด (infrared) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 0.75–1000 ไมโครเมตร (Sandhu, 1989) ความยาวคลื่นในช่วงนี้สามารถแบ่งย่อยได้เป็น 3 ระดับ ตามความยาวคลื่น คือ

- 1) รังสีอินฟราเรดใกล้ (near infrared, NIR) ความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 0.75–3 ไมโครเมตร
- 2) รังสีอินฟราเรดกลาง (middle infrared, mid-IR) ความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 3–25 ไมโครเมตร
- 3) รังสีอินฟราเรดไกล (far infrared, FIR) ความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 25–100 ไมโครเมตร

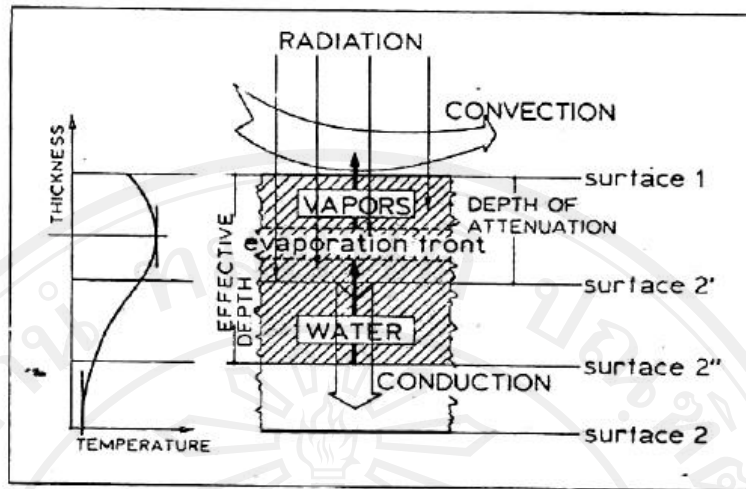
2.5.1 กลไกการแผ่รังสีอินฟราเรด

เมื่อรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบ และแพร่กระจาย (propagation) ผ่านวัสดุ ทำให้เกิดการสูญหายของรังสี (extinction of radiation) เนื่องจากรังสีบางส่วนจะถูกวัสดุดูดกลืน (absorption) และเปลี่ยนแปลงไปเป็นพลังงานความร้อนภายในตัววัสดุ บางส่วนเกิดการกระเจิง (scattering) ทำให้รังสีมีทิศทางแตกต่างจากทิศทางของรังสีจากแหล่งกำเนิด และส่วนที่เหลือจะเกิดการส่งผ่านวัสดุ (transmission) ดังแสดงในรูป 2.7



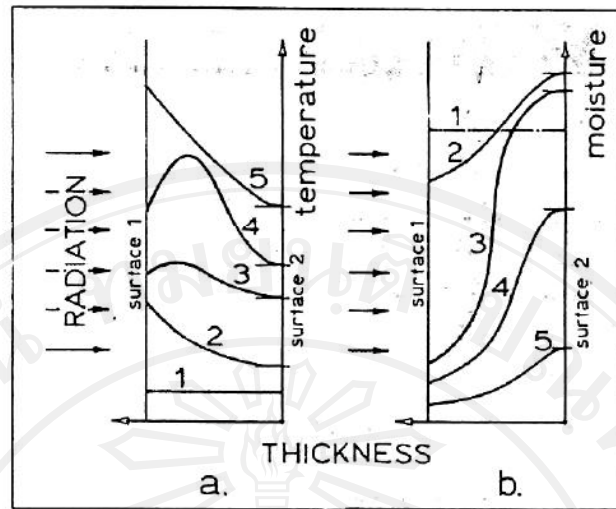
รูป 2.7 การสูญหายของรังสี (Sandhu, 1989)

Sandhu (1989) ได้กล่าวถึงกลไกการเปลี่ยนแปลงรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อนภายในตัววัสดุ โดยจำลองการแผ่รังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิห้องเพื่ออบแห้งแผ่นของแข็งชื้น (moist solid plate) ดังแสดงในรูป 2.8 รังสีอินฟราเรดแบบโพลีโครเมติกจะแผ่ออกมาตกกระทบบนพื้นผิวของแผ่นของแข็งด้านหนึ่ง ขณะที่พื้นผิวด้านตรงข้ามจะสมมติว่าเป็นฉนวนแบบแอดิยาเบติก (adiabatic) มีกระบวนการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบ 1 มิติ และเป็นกระบวนการแบบไม่คงตัว (transient process) รังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกมาจะถูกแผ่นของแข็งชื้นดูดกลืน ทำให้อ่อนกำลังลงตามความลึกซึ่งความลึกดังกล่าวนี้เรียกว่า ความลึกของการอ่อนกำลังลง (depth of attenuation) มีลักษณะเป็นชั้นตื้นๆ (superficial layer) และเป็นบริเวณที่เกิดความร้อนเกือบจะคงที่ (an almost uniform heat-generation) ซึ่งรูปแบบของอุณหภูมิ (temperature profile) จะมีค่าสูงที่สุดในช่วงความลึกของการอ่อนกำลังลงนี้ ขณะเดียวกันจะเกิดการถ่ายเทความร้อนภายในแผ่นของแข็งชื้น โดยพื้นผิวที่ 1 จะสูญเสียพลังงานความร้อนให้กับอากาศโดยการพาความร้อนซึ่งมีค่าน้อยมาก ส่วนพื้นผิวที่ 2 จะเกิดการถ่ายเทพลังงานความร้อนเข้าสู่ภายในแผ่นของแข็งชื้น โดยการนำความร้อน



รูป 2.8 การอบแห้งด้วยการแผ่รังสีของแผ่นของแข็งชื้น (Sandhu, 1989)

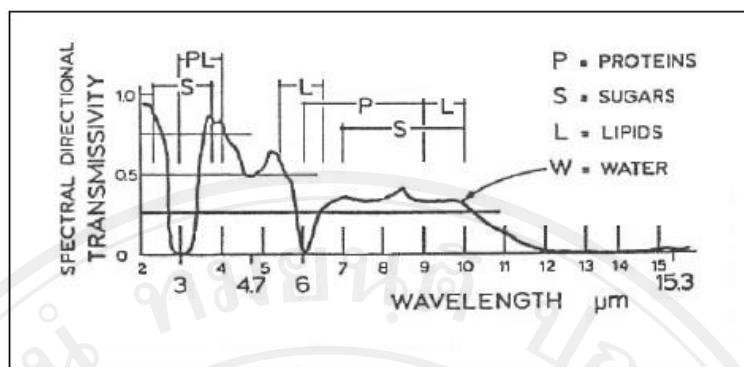
พิจารณารูป 2.9 ในสภาวะเริ่มต้น (หมายเลข 1) จะพิจารณาว่าแผ่นของแข็งมีปริมาณความชื้นสม่ำเสมอ น้ำจะเกิดการระเหยในช่วงความลึกของการอ่อนกำลังลง (หมายเลข 2 และ 3) การถ่ายเทความชื้นเกิดขึ้นภายในแผ่นของแข็ง และด้านหน้าของบริเวณการระเหย น้ำในสถานะของเหลว และไอน้ำ เคลื่อนที่สู่ด้านหน้าของการระเหยเนื่องจากแรงผลักดัน (driving force) ต่างๆ เช่น การแพร่ของโมเลกุล (molecular diffusion) การแพร่ของความร้อน (thermal diffusion) การแพร่แบบแคปิลลารี (capillary diffusion) ที่กระทำพร้อมกัน ส่วนการเพิ่มของความชื้นที่พื้นผิวที่ 2 (หมายเลข 2 และ 3) ซึ่งจะสูงกว่าความชื้นเริ่มต้นของแผ่นของแข็ง (หมายเลข 1) จะเกิดขึ้นระหว่างช่วงเริ่มต้นของการอบแห้ง เนื่องจากการแพร่ของน้ำในสถานะของเหลวเข้าสู่ภายในแผ่นของแข็ง ทำให้ความชื้นที่พื้นผิวที่ 2 เพิ่มขึ้นมากกว่าความชื้นเริ่มต้น จึงส่งผลให้ความชื้นที่อยู่ลึกกว่าความลึกประสิทธิผล (effective depth) แพร่ออกมายังพื้นผิวที่ 1 ได้ช้า ซึ่งลักษณะดังกล่าวนี้จะเรียกว่า ข้อจำกัดของการถ่ายเทมวล เนื่องจากกระบวนการแผ่รังสีอินฟราเรด (Sandhu, 1989) ดังนั้นวัสดุที่อยู่ในทิศทางของการแผ่รังสีตกกระทบนั้น จะต้องไม่มีความหนามากกว่าความลึกประสิทธิผล ซึ่งเป็นชั้นที่ลึกที่สุดภายในวัสดุที่มีการเคลื่อนที่ของน้ำออกไปได้ดีที่สุด ส่วนน้ำที่อยู่ลึกกว่าความลึกประสิทธิผลจะเคลื่อนที่ออกมาเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน ถ้าวัสดุมีความหนามากกว่าความลึกประสิทธิผล จะต้องใช้เทคนิคอย่างอื่นเข้ามาช่วย เช่น วิธีการแผ่รังสีเป็นช่วงๆ (intermittent irradiation method) ซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้จะช่วยทำให้ความชื้นที่อยู่ในชั้นความหนาที่ลึกกว่าความลึกประสิทธิผลแพร่ออกมายังความลึกประสิทธิผลและส่งผลให้สามารถอบแห้งได้เร็วขึ้น (Lykow, 1955) หรืออาจจะใช้วิธีการแผ่รังสีอินฟราเรดมากกว่า 1 ทิศทาง เป็นต้น



รูป 2.9 รูปแบบของอุณหภูมิ (a) และความชื้น (b) ระหว่างการอบแห้งด้วยการแผ่รังสีของแผ่นของแข็งชั้น เมื่อ 1 คือ เงื่อนไขเริ่มต้น และ 2-5 คือ สภาวะไม่สม่ำเสมอ (Sandhu, 1989)

2.5.2 การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของน้ำ (Infrared absorption by water)

รังสีอินฟราเรดที่แผ่ไปยังวัสดุส่วนมากจะถูกดูดกลืนโดยชั้นฟิล์มบางๆ ของน้ำ น้ำแข็ง ไขมัน หรือสารละลายน้ำ (water solution) ที่มีอยู่ในแคปิลลารี (capillary) ภายในวัสดุ หรือโดยไอน้ำที่เกิดขึ้นรอบๆ วัสดุ ซึ่งการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของน้ำที่สถานะแตกต่างกันจะดูดกลืนรังสีที่มีความเข้มแตกต่างกัน (Jamieson *et al.*, 1963) Saproow (1970) พบว่า ไอน้ำที่ 0 องศาเซลเซียส สามารถดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่น 1.14, 1.38 และ 1.87 ไมโครเมตร ได้น้อย แต่จะดูดกลืนรังสีที่มีความยาวคลื่น 2.7 และ 6.3 ไมโครเมตร ได้ดี ส่วนน้ำในสถานะของเหลว (liquid water) ที่ 25 องศาเซลเซียส จะดูดกลืนรังสีที่มีความยาวคลื่น 1.19, 1.43, 1.94, 2.93, 4.72 และ 6.10 ไมโครเมตร ได้น้อย แต่จะดูดกลืนรังสีที่มีความยาวคลื่น 3, 4.7, 6 และ 15.3 ไมโครเมตร ได้ดี ดังแสดงในรูป 2.10 สำหรับการดูดกลืนรังสีของไอน้ำที่อุณหภูมิ 27 ถึง 827 องศาเซลเซียส จะขึ้นอยู่กับมวลไอน้ำต่อพื้นที่ ความดัน และอุณหภูมิ ส่วนอากาศมีผลกระทบน้อยมากต่อการดูดกลืนรังสีของไอน้ำ นอกจากนี้ยังพบว่า ความหนาของฟิล์มน้ำมีผลต่อค่าการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด ดังตาราง 2.3 โดยน้ำในสถานะของเหลว จะเริ่มดูดกลืนรังสีอินฟราเรดตั้งแต่ฟิล์มที่มีความหนาบางๆ และที่ความหนา 10 ไมโครเมตร จะสามารถดูดกลืนรังสีได้ดีที่สุด



รูป 2.10 ย่านการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่สำคัญขององค์ประกอบหลักของอาหารเปรียบเทียบกับสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของน้ำในสถานะของเหลว (Sandhu, 1989)

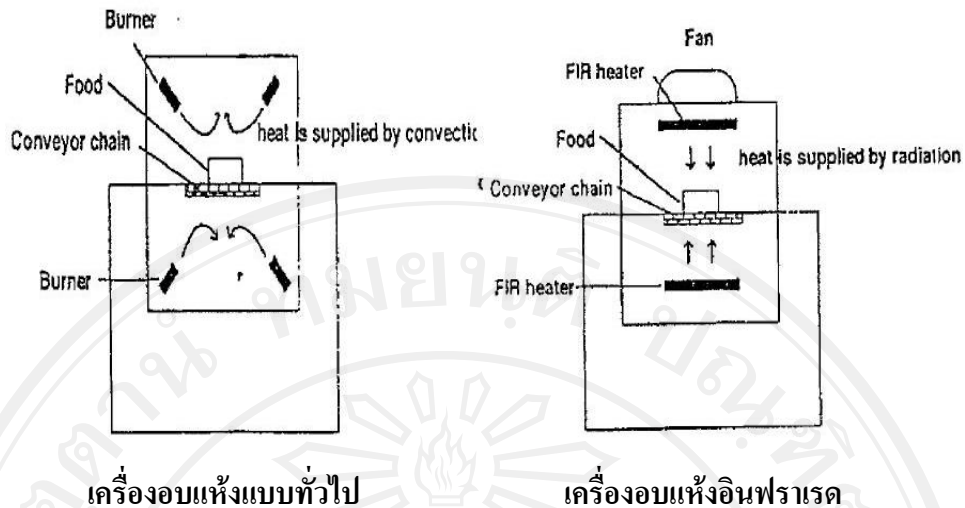
ตาราง 2.3 การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดโดยฟิล์มน้ำ (Sandhu, 1989)

ความหนาของฟิล์ม (ไมโครเมตร)	ความยาวคลื่น (ไมโครเมตร)			
	3.00	4.70	6.00	15.30
1.20	0.80	0.04	0.30	-
3.00	0.97	0.10	0.55	-
10.0	1.00	0.35	1.00	1.00

2.5.3 การเปรียบเทียบหลักการทำงานเบื้องต้นของเครื่องอบแห้งทั่วไป และเครื่องอบแห้งด้วยการ

แผ่รังสีอินฟราเรด

สำหรับหลักการทำงานเบื้องต้นของเครื่องอบแห้งแบบทั่วไป (convection dryer) หรือแบบลมร้อนและเครื่องอบแห้งด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรดแบบคลื่นยาว (far-infrared irradiative dryer) แสดงในรูป 2.11



รูป 2.11 การเปรียบเทียบหลักการทำงานเบื้องต้น (Sakai and Hanzawa, 1994)

เครื่องอบแห้งแบบทั่วไป ความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งส่วนใหญ่จะถูกป้อนไปยังพื้นผิวของวัสดุ โดยการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (natural convection) หรือการพาความร้อนแบบบังคับ (forced convection) จากอากาศที่หมุนวน (circulating hot air) แล้วความร้อนจะถ่ายเทโดยการนำความร้อนเข้าไปภายในวัสดุ ส่วนเครื่องอบแห้งด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรดนั้น ความร้อนจะถูกส่งไปยังอาหารโดยการแผ่รังสีอินฟราเรด ในลักษณะคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากหลอดรังสีอินฟราเรด โดยอัตราการถ่ายเทพลังงานระหว่างหลอดรังสีอินฟราเรดและวัสดุจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของวัสดุ และหลอดรังสีอินฟราเรด และเมื่อรังสีตกกระทบบนวัสดุจะทำให้พลังงานส่วนหนึ่งของรังสีถูกวัสดุดูดกลืนเอาไว้แล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงในสถานะการสั่นสะเทือนของโมเลกุลภายในวัสดุ ส่วนความร้อนที่ถ่ายเทจากภายในของอาหารไปยังผิวของอาหารจะเกิดจากการนำความร้อน (Sakai and Hanzawa, 1994)

2.5.4 ข้อดีและข้อเสียของการอบแห้งด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรด

ข้อดีของการอบแห้งด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรด (Jamieson, 1963) มีดังต่อไปนี้

- 1) มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นความร้อนสูง
- 2) ลดระยะเวลาของกระบวนการ (processing time) และพลังงาน
- 3) รังสีสามารถทะลุทะลวงเข้าไปในผลิตภัณฑ์ได้โดยตรง
- 4) ง่ายต่อการกำหนดวัฏจักรความร้อน (heating cycle) สำหรับผลิตภัณฑ์ต่างๆ
- 5) รูปแบบของการกำจัดความชื้นในผลิตภัณฑ์ทั้งหมดมีค่าระดับเดียวกัน

6) อากาศภายในอุปกรณ์จะมีความร้อนต่ำ ดังนั้นจึงทำให้อุณหภูมิแวดล้อมถูกรักษาอยู่ในระดับปกติ

7) ควบคุมง่าย

8) แหล่งพลังงานรังสีอินฟราเรดมีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งพลังงาน dielectric และไมโครเวฟ เนื่องจากแหล่งพลังงานรังสีอินฟราเรดมีอายุการใช้งานยาวนาน และค่าบำรุงรักษาต่ำ

9) การติดตั้งอุปกรณ์รังสีอินฟราเรดใช้พื้นที่น้อย และสามารถติดตั้งร่วมกับเครื่องอบแห้งแบบทั่วไปได้ง่าย

10) สภาพแวดล้อมการทำงานภายนอกของเครื่องอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดจะสะอาดมากกว่าเครื่องอบแห้งแบบทั่วไป

11) เทคโนโลยีราคาต่ำ

ข้อเสียของการอบแห้งด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรด (Jamieson, 1963) มีดังต่อไปนี้

1) การขยายขนาดของหลอดรังสีอินฟราเรดเป็นไปได้ยาก

2) จำเป็นต้องมีความพยายามอย่างมากในการปรับปรุงเทคโนโลยีรังสีอินฟราเรดเพื่อให้ความสามารถในการอบวัสดุที่มีความหนาได้

2.5.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Lin *et al.* (2004) ศึกษาการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งร่วมกับการทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดในมันฝรั่งหวาน โดยเปรียบเทียบกับวิธีการทำแห้งแบบใช้ลมร้อน และการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง พบว่า การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งร่วมกับการทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด สามารถลดเวลาในการทำแห้งลงได้มากกว่าวิธีอื่นๆ ที่กล่าวมา และจากการศึกษาของ Nowak *et al.* (2004) โดยศึกษาการใช้รังสีอินฟราเรดในการอบแห้งแอปเปิ้ลหั่นแบบบางเปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบธรรมดา พบว่า การใช้รังสีอินฟราเรดมีประสิทธิภาพในการขจัดน้ำออกจากชิ้นแอปเปิ้ลได้ดีกว่าการอบแห้งแบบธรรมดา และใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าในสถานะเดียวกัน และยังสามารถควบคุมอุณหภูมิในการอบแห้งได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดีของการอบแห้งแบบอินฟราเรด รวมทั้ง Umesh *et al.* (2004) ได้ทำการศึกษาวิธีการรวมเทคโนโลยีการใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับการอบแห้งแบบลมร้อนในการอบแห้งแครอท และมันฝรั่ง พบว่า สามารถลดเวลาในการอบแห้งลง 48 เปอร์เซ็นต์ และลดการใช้พลังงานลง 63 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนหรือรังสีอินฟราเรดเพียงอย่างเดียว ดังนั้นวิธีอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดจึงเป็นการรักษาคุณภาพของอาหารให้คงอยู่มากขึ้น

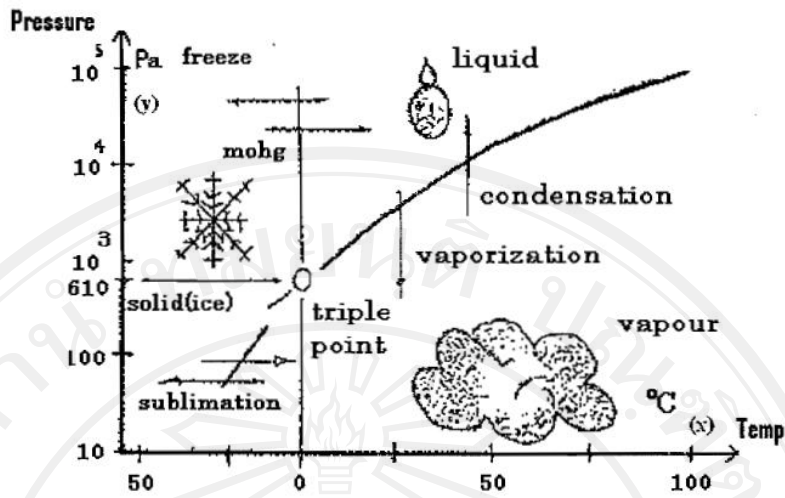
และช่วยลดระยะเวลาการอบแห้งอีกด้วย และ Sharma *et al.* (2005) ได้ศึกษาการอบแห้งหอมหัวใหญ่ สไลซ์โดยใช้รังสีอินฟราเรด โดยทำการผันแปรกำลังรังสีอินฟราเรด 3 ระดับ คือ 300, 400 และ 500 วัตต์ อุณหภูมิของลมที่ใช้ในการอบแห้ง คือ 35, 40 และ 45 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.0, 1.25 และ 1.5 เมตรต่อวินาที อัตราการอบแห้งจะเพิ่มขึ้นเป็น 2.25 เท่า เมื่อเปรียบกำลังของรังสีอินฟราเรดจาก 300 เป็น 500 วัตต์ ที่อุณหภูมิของอากาศ 35-45 องศาเซลเซียส และความเร็วลม 1.0-1.5 เมตรต่อวินาที การกระจายของความชื้นเพิ่มขึ้นจาก 0.21×10^{-10} เป็น 1.57×10^{-10} ตารางเมตรต่อวินาที ผลึกภัณฑ์ที่ได้มีอัตราส่วนการคืนรูปต่อผลึกภัณฑ์ที่อบแห้งอยู่ในช่วง 4.5–5.3 จะเห็นได้ว่าปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้ง คือ กำลังของรังสีอินฟราเรด และอุณหภูมิของอากาศที่ทำการอบแห้ง

2.6 การอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับสุญญากาศ

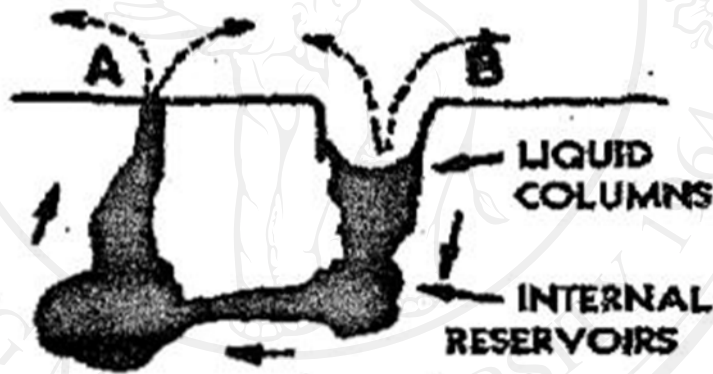
2.6.1 เครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ

เครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศนั้นมีความคล้ายคลึงกับเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนทั่วไปแต่มีหลักการที่แตกต่าง คือ ความดันในห้องอบแห้งอยู่ในสภาวะสุญญากาศ จากรูป 2.12 เมื่อแกน X คือ อุณหภูมิ แกน Y คือ ความดัน เมื่อลากเส้นจากจุดที่ความดันบรรยากาศขนานไปในแนวแกน X ไปตัดกราฟเส้นการเปลี่ยนสถานะของน้ำจะพบว่า คุณสมบัติของน้ำที่ความดันบรรยากาศจะมีจุดเดือด 100 องศาเซลเซียส และเมื่อความดันมีค่าลดลงแล้วลากเส้นไปตัดกราฟการเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำจะพบว่า จุดเดือดของน้ำมีค่าลดลง ดังนั้นแล้วความดันในห้องอบแห้งยังมีความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศมากเท่าไร จุดเดือดของน้ำก็ยิ่งจะมีค่าต่ำลง (Ernst *et al.*, 1938)

หลักการของการอบแห้งภายใต้ความดันสุญญากาศคือ อากาศมีความดันของไอน้ำต่ำ และความเข้มข้นของความชื้นในอากาศมีปริมาณต่ำ เมื่อมีวัสดุอยู่ในห้องอบแห้งสุญญากาศ จะทำให้เกิดการถ่ายเทมวลเกิดขึ้น โดยไอน้ำที่ผิววัสดุจะแพร่สู่อากาศเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น (vapor diffusion) ความดันไอ (partial vapor pressure) และของเหลวที่อยู่ในวัสดุจะเคลื่อนที่ออกมายังผิวด้วยแรง capillary flow ซึ่งเป็นผลมาจากแรงตึงผิว (surface force) แสดงตามรูป 2.13 โดยอากาศที่อยู่ในห้องอบแห้งอาจจะไม่จำเป็นต้องให้ความร้อนมากเท่ากับการอบแห้งด้วยลมร้อน เนื่องจากของเหลวที่อยู่ในวัสดุเมื่ออยู่ในสภาวะความดันสุญญากาศแล้วนั้น อาจจะมีการเดือดเกิดขึ้นในเนื้อวัสดุทำให้เหมือนเป็นการเร่งอัตราการถ่ายเทมวล โดยน้ำภายในวัสดุจะเคลื่อนที่มายังผิววัสดุในรูปของของเหลวหรือไอน้ำ แล้วระเหยอย่างรวดเร็วซึ่งถ้าของเหลวที่อยู่ใต้สภาวะความดันสุญญากาศต่ำมากๆ แล้วนั้นอาจจะทำให้ผิววัสดุที่อบแห้งมีความพรุนสูง เนื่องจากมีการเดือดอย่างรุนแรงในเนื้อวัสดุ (Ernst *et al.*, 1938)



รูป 2.12 Phase diagram ของน้ำ (Ernst et al., 1938)



รูป 2.13 ลักษณะกายภาพที่ผิวของวัสดุในอุณหภูมิต่ำ (Ernst et al., 1938)

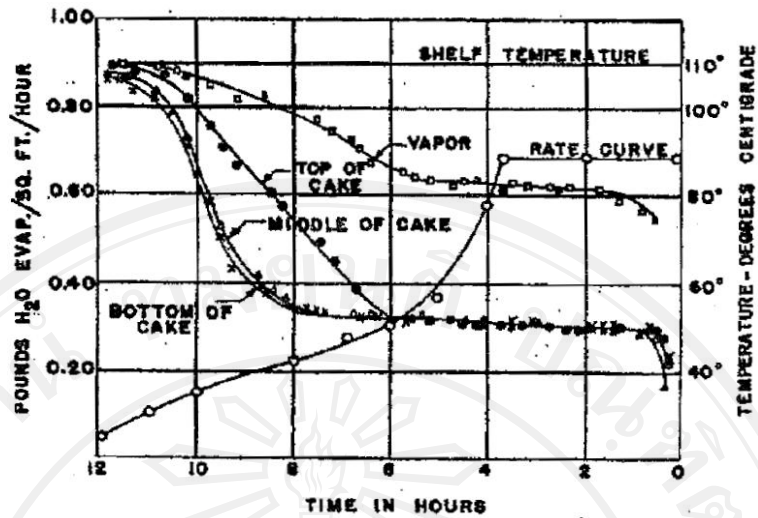
2.6.2 การให้ความร้อนแก่วัสดุในเครื่องอบแห้งสุญญากาศ

ทฤษฎีการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งสุญญากาศนั้น ไม่จำเป็นต้องให้ความร้อนแก่วัสดุที่ทำการอบแห้ง เนื่องจากเมื่อในห้องอบแห้งมีสภาวะความดันสุญญากาศ น้ำที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ก็จะมีจุดเดือดต่ำลง สมมุติให้อากาศที่อยู่ในห้องอบแห้งอยู่ในสภาวะความดันสุญญากาศที่ 2.33 กิโลปาสคาล (จากตารางคุณสมบัติของน้ำทางเทอร์โมไดนามิคอากาศที่ความดัน 2.33 กิโลปาสคาล จะมีจุดเดือดที่ 20 องศาเซลเซียส) ดังนั้นเมื่ออากาศแวดล้อมที่อยู่ภายนอกมีอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จะเกิดการถ่ายเทความร้อนจากอากาศแวดล้อมเข้าสู่ผนังห้องอบแห้ง และผนังห้องอบแห้งก็จะถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่ทำการอบแห้งอยู่ด้วยการแผ่รังสีความร้อนหรือจะเกิดการนำความร้อนจากผนังห้องอบแห้งไปยังชั้นวางของวัสดุอบแห้ง โดยความร้อนจะถูกถ่ายเทโดยการนำความร้อน ที่ผิวด้านล่าง

ของวัสดุที่สัมผัสกับชั้นวาง ความร้อนที่วัสดุได้รับ ไปนั้นก็จะถูกนำไปใช้ในการระเหยของน้ำ และไอน้ำภายในวัสดุ ยิ่งในห้องอบแห้งมีความดันต่ำลงมากเท่าใดก็จะเกิดเกรเดียนท์ของอุณหภูมิระหว่างวัสดุที่อบแห้งกับอากาศแวดล้อมที่อยู่ภายนอกห้องอบแห้งมากขึ้นตามกัน แต่ในความเป็นจริงแล้วนั้นการทำความดันต่ำมากๆ เป็นการสิ้นเปลืองพลังงานเป็นจำนวนมากให้กับปั๊มสุญญากาศดังนั้นจึงได้มีความคิดที่จะให้ความร้อนแก่วัสดุในเครื่องอบแห้งสุญญากาศขึ้น เพื่อช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้งและลดเวลาในการอบแห้งลง (Ernst *et al.*, 1938)

ดังนั้นแล้วจากงานวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมาจะให้ความร้อนแก่ผนังของห้องอบแห้งโดยการใช้อิอน้ำยวดยิ่งหรือน้ำร้อนและน้ำมันร้อน เมื่อวิเคราะห์ถึงอัตราการอบแห้งของวัสดุที่ทำการอบแห้งในเครื่องอบแห้งสุญญากาศ พบว่าเกี่ยวข้องกับอัตราการให้ความร้อนแก่วัสดุ จากรูป 2.13 การอบแห้ง silica gel ด้วยเครื่องอบแห้งความดันสุญญากาศแบบเป็นชั้นๆ (shelf vacuum dryer) พบว่าอัตราการอบแห้งคงที่อยู่ในช่วงขณะหนึ่งซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ช่วงอัตราการอบแห้งที่คงที่ที่เกิดขึ้นได้ต่อไปเรื่อยๆ ถ้าปริมาณความร้อนที่ต้องการใช้ในการระเหยน้ำภายในวัสดุยิ่งมากกว่าปริมาณความร้อนที่ให้แก่วัสดุ และเมื่อน้ำในวัสดุมีการระเหยไปส่วนหนึ่งแล้วนั้นจะทำให้ปริมาณความร้อนที่ให้กับวัสดุและน้ำภายในวัสดุเท่ากับปริมาณความร้อนที่ให้กับวัสดุ ก็จะเกิดจุดวิกฤตเกิดขึ้นในกราฟอัตราการอบแห้ง และอัตราการอบแห้งหลังจากจุดวิกฤตก็จะเป็นอัตราการอบแห้งที่สภาวะลดลง (Ernst *et al.*, 1938)

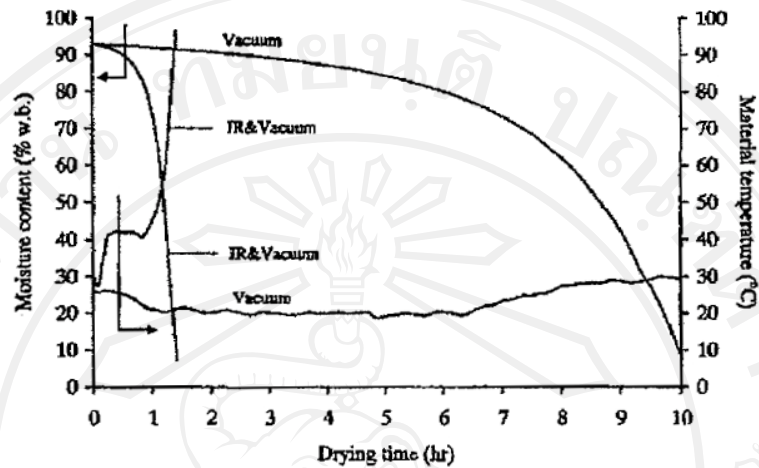
เมื่อวิเคราะห์ถึงอุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ในการอบแห้ง โดยเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศแล้วนั้นจะพบว่าจากรูป 2.14 อุณหภูมิของวัสดุจะเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอในช่วงครึ่งชั่วโมงแรก และถ้าหากพิจารณาความชันของกราฟทั้ง 3 เส้นของวัสดุในช่วงครึ่งชั่วโมงแรกทั้ง 1) ผิวด้านบนของวัสดุ 2) ผิวตรงกลางวัสดุ 3) ผิวด้านล่างของวัสดุ จะพบว่าที่ผิวด้านบนและล่างของวัสดุนั้นจะมีปริมาณความร้อนถ่ายเทมากกว่า อันเนื่องมาจากความร้อนที่ถ่ายเทนั้นเกิดขึ้นทั้งด้านบนและด้านล่างเป็นลำดับแรก เมื่อผ่านครึ่งชั่วโมงแรกไปแล้วนั้นจะพบว่า อุณหภูมิของวัสดุทั้ง 3 ตำแหน่ง จะมีค่าคงที่ประมาณ 50 องศาเซลเซียส ที่เวลา 4 ชั่วโมง สามารถอธิบายได้ว่าความร้อนที่วัสดุได้รับนั้นนำไปใช้ในการระเหยของน้ำที่อยู่ในเนื้อวัสดุ เมื่อจุดเดือดของน้ำในสภาวะสุญญากาศมีค่าต่ำลง และเมื่อปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุได้ถูกระเหยออกไปได้ส่วนหนึ่งแล้วนั้นจะพบว่า ที่อุณหภูมิผิวด้านบนของวัสดุมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งเกิดจากการที่ผิวด้านบนของวัสดุนั้นมีความชันลดลงมาก บริเวณการระเหยน้ำจะเคลื่อนที่ไปยังด้านในของวัสดุ และเมื่อเวลาผ่านไปเรื่อยๆ อุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ ก็จะเพิ่มขึ้นตามกันไปด้วยจนมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิของไอน้ำในห้องอบแห้งที่ระเหยออกไปจากวัสดุ ซึ่งอุณหภูมิของไอน้ำที่อยู่ในห้องอบแห้งนั้นจะมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อน (Ernst *et al.*, 1938)



รูป 2.14 กราฟอัตราการอบแห้งของ Silica gel อุณหภูมิของไอน้ำที่ความดันสูญญากาศ 26 นิ้วปรอท และอุณหภูมิของชั้นวางที่ 110 องศาเซลเซียส (Ernst et al., 1938)

การอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับสูญญากาศเป็นการให้ความร้อนแก่วัตถุโดยใช้แหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรดเพื่อเป็นการกำเนิดความร้อนจากวัตถุเองและเป็นการลดอุณหภูมิของน้ำโดยใช้สูญญากาศ เพื่อให้เป็นการอบแห้งที่ใช้ความร้อนต่ำ จุดประสงค์คือ ให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีกว่าการอบแห้งแบบใช้ลมร้อนต่างๆ ไป ซึ่งโดยปกติการอบแห้งแบบใช้ลมร้อนจะเป็นการให้ความร้อนแก่วัสดุโดยผ่านตัวกลางในการให้ความร้อนแก่วัสดุ ทำให้มีการสูญเสียความร้อนอันเนื่องมาจากสัมประสิทธิ์แลกเปลี่ยนความร้อนและจะมีความร้อนที่สูญเสียออกไปให้กับสิ่งแวดล้อม เพราะไม่สามารถให้ความร้อนโดยตรงกับวัสดุได้ และถ้าหากเปรียบเทียบถึงคุณลักษณะการให้ความร้อนของการแผ่รังสีอินฟราเรดแล้วนั้น จะเห็นว่าวัสดุที่ทำการอบแห้งนั้นจะดูดซับพลังงานจากหลอดรังสีอินฟราเรดได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพราะจะมีการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการดูดซับของตัวกลางน้อย ในขณะที่รังสีสามารถทะลุทะลวงเข้าไปในเนื้อวัสดุเพื่อให้ความร้อนแก่วัสดุ ทำให้โซนการอบแห้งไม่จำกัดอยู่ที่ผิวแล้วค่อยเคลื่อนที่เข้าไปข้างใน แต่จะเป็นโซนการอบแห้งที่ความลึกมีประสิทธิภาพในวัสดุแล้วเกิดการนำความร้อนเข้าไปในเนื้อวัสดุที่ลึกมากกว่า จึงก่อให้เกิดประสิทธิภาพของการอบแห้งมากขึ้น ดังนั้นการนำรังสีอินฟราเรดมาเป็นแหล่งให้พลังงานความร้อนแก่วัสดุในเครื่องอบแห้งสูญญากาศ จะให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ดี เพราะว่าเป็นการอบแห้งที่ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยลง อันเนื่องมาจากคุณสมบัติที่โดดเด่นในตัวเครื่องอบแห้งสูญญากาศและการให้ความร้อนโดยการแผ่รังสีอินฟราเรด จากรูป 2.15 ได้ทำการเปรียบเทียบให้เห็นถึงการนำหลอดรังสีอินฟราเรดเข้ามาใช้ร่วมกับเครื่องอบแห้งสูญญากาศจะเห็นได้ว่าสามารถช่วยลดเวลาในการอบแห้งได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งข้อดีของการอบแห้งวิธีนี้คือ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพใกล้เคียง

กับของสด และใช้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง ข้อเสียคือ เป็นการอบแห้งที่ใช้ต้นทุนในการผลิตสูง (Monrgpraneet *et al.*, 2002)



รูป 2.15 ผลของความชื้น และอุณหภูมิของวัสดุต่อการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดภายใต้สุญญากาศ กับเครื่องอบแห้งสุญญากาศ (Monrgpraneet *et al.*, 2002)

2.6.3 ข้อดีและข้อเสียของการอบแห้งภายใต้ความดันสุญญากาศ

ข้อดีของการอบแห้งภายใต้ความดันสุญญากาศ (Charles and Van marie, 1947) มีดังต่อไปนี้

- 1) มีการใช้พลังงานในการดำเนินงานที่น้อยกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน
- 2) มีอัตราการอบแห้งสูงที่อุณหภูมิต่ำ เหมาะกับวัสดุที่เสื่อมคุณภาพง่ายเมื่อถูกความร้อน และได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดี

3) ห้องอบแห้งมีความสะอาด ง่ายต่อการล้างทำความสะอาดทำให้ไม่มีกลิ่นเหม็นตกค้าง

4) วัสดุที่อบแห้งเสร็จแล้วนั้นจะมีความชื้นที่สม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้น

ข้อเสียของการอบแห้งภายใต้ความดันสุญญากาศ (Charles and Van marie, 1947) มีดังต่อไปนี้

- 1) ราคาต้นทุนของเครื่องอบแห้งมีราคาสูง
- 2) การควบคุมระบบให้ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพต้องอาศัยความชำนาญการเป็นอย่างมาก ในการควบคุมความดันในห้องอบแห้งให้คงที่ที่เหมาะสมกับการให้ความร้อนในการอบแห้งในห้องอบแห้ง

2.6.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ฤทธิไกร (2547) ได้ทำการศึกษาศึกษาการใช้รังสีอินฟราเรดไกลควบคุมคู่กับการอบแห้งภายใต้ความดันสุญญากาศเพื่ออบแห้งกล้วยหอมสุกหั่นบางที่ความดัน 5, 10 และ 15 กิโลปาสกาล อุณหภูมิที่ผิวของผลิตภัณฑ์ 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส ความหนาของกล้วยหอมหั่นบางเท่ากับ 2, 3 และ 4 มิลลิเมตร เมื่อทำการอบแห้งมีความชื้นเริ่มต้น 300 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง จนได้ความชื้นสุดท้าย 7 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง จากการทดลองพบว่า การอบแห้งกล้วยหอมหั่นบางที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร ความดันสุญญากาศ 5 กิโลปาสกาล และอุณหภูมิในการอบแห้งเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด ผลของความดันต่อการอบแห้งพบว่าเวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะลดลงตามความดันที่ลดลง กล้วยหอมที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร มีการโป่งพอง และความแข็งน้อยที่สุด สีของกล้วยหอมหั่นบางหลังการอบแห้งพบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงสีไปจากเดิมน้อยที่สุด โดยจะมีสีเหลืองนวลไม่คล้ำ และจากการศึกษาของศรีมา (2550) โดยได้ทำการศึกษาศึกษาการอบแห้งสมุนไพรด้วยเครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล โดยสมุนไพรที่นำมาใช้ในการอบแห้ง คือ ข่าหั่นบางประมาณ 2-3 มิลลิเมตร และใบมะกรูด โดยควบคุมความดันสุญญากาศที่ 5 และ 15 กิโลปาสกาล ควบคุมอุณหภูมิในห้องอบ 45 และ 55 องศาเซลเซียส โดยทำการอบแห้งข่าที่มีความชื้นเริ่มต้น 820 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง จนได้ความชื้นสุดท้าย 5 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง และอบแห้งใบมะกรูดที่มีความชื้นเริ่มต้น 170 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง จนได้ความชื้นสุดท้าย 5 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง พบว่า การอบแห้งสมุนไพรที่ความดัน 5 กิโลปาสกาล ควบคุมอุณหภูมิที่ 55 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด ผลต่อความดันที่มีต่อการอบแห้งพบว่า หากใช้ความดันต่ำจะทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยลง ในด้านของสี พบว่า ข่าที่อบแห้งที่ความดัน 15 กิโลปาสกาล ควบคุมอุณหภูมิที่ 55 องศาเซลเซียส และใบมะกรูดที่ความดัน 15 กิโลปาสกาล ควบคุมอุณหภูมิที่ 45 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงสีน้อยที่สุด เมื่อนำข่าและใบมะกรูดมาสกัดหาปริมาณน้ำมันหอมระเหย ได้น้ำมันหอมระเหยประมาณ 0.0928 และ 0.7849 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ตามลำดับ พบว่ายิ่งใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนานขึ้นจะทำให้ปริมาณน้ำมันหอมระเหยลดลง นอกจากนี้ Mongpraneet *et al.* (2002) ได้การศึกษาศึกษาการเพิ่มความเร็วในการอบแห้งหอมหัวใหญ่โดยการใช้รังสีอินฟราเรดภายใต้สภาวะสุญญากาศ การใช้รังสีอินฟราเรดความยาวคลื่นยาวเป็นช่วงที่รังสีอินฟราเรดมีพลังงานสูงสามารถนำไปใช้ในกระบวนการอบแห้งได้ โดยได้ทำการอบแห้งหอมหัวใหญ่ภายใต้สภาวะสุญญากาศ พบว่าความเข้มของรังสีมีอิทธิพลโดยตรงต่ออัตราเร็วในการอบแห้งและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และมีผลโดยตรงต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ (chlorophyll content) ในผลิตภัณฑ์ และยังพบว่าการใช้รังสีอินฟราเรดนั้นสามารถทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการคืนรูป (rehydration) มีคุณภาพดีขึ้น จากการศึกษาศึกษาของ Chatchai *et al.* (2007) โดยทำการเปรียบเทียบการใช้รังสีอินฟราเรดภายใต้สภาวะสุญญากาศกับการใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับไอน้ำ

อิมตัวยิ่งยวดความดันต่ำในการอบแห้งกล้วยแผ่นบาง พบว่าในช่วงแรกของการอบแห้งมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการอบแห้งไม่แตกต่างกัน เมื่อถึงระยะของการระเหยน้ำพบว่าการใช้รังสีอินฟราเรดภายใต้สภาวะสุญญากาศส่งผลให้อุณหภูมิที่ทำการอบแห้งต่ำมากกว่าการใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับไอน้ำอิมตัวยิ่งยวดความดันต่ำ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อสีของกล้วยแผ่นอบแห้ง โดยกล้วยที่อบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับไอน้ำอิมตัวยิ่งยวดความดันต่ำ จะใช้เวลานานและทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสีน้ำตาลและความสว่างของผลิตภัณฑ์ลดลง เห็นได้ชัดว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำสามารถรักษาคูณลักษณะของสีของผลิตภัณฑ์ได้ดีกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง

ดังนั้นการใช้วิธีการอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดภายใต้สภาวะสุญญากาศนั้น เป็นการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำทำให้สีของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงน้อย (ฤทธิไกร, 2547) สามารถทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการคืนรูป (rehydration) มีคุณภาพดีขึ้น (Mongpraneet *et al.*, 2002) และยังช่วยรักษาปริมาณน้ำมันหอมระเหยซึ่งเป็นเอกลักษณ์ที่สำคัญของอาหารแต่ละชนิด เนื่องจากใช้เวลาในการอบแห้งสั้นและอุณหภูมิต่ำ (ศรีมา, 2550)

2.7 ผลของการอบแห้งต่อคุณภาพของอาหาร

การอบแห้งมีผลต่ออาหารอบแห้งในด้านต่างๆ ดังต่อไปนี้

1) คุณค่าทางโภชนาการ การอบแห้งจะระเหยความชื้นหรือน้ำออกจากอาหาร และเพิ่มความเข้มข้นขององค์ประกอบของอาหาร เช่น แป้ง ไขมัน โปรตีน การถนอมอาหารโดยวิธีอบแห้งจะทำให้คุณภาพลดลงโดยเฉพาะวิตามินที่ละลายน้ำจะสูญเสียจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) (กุลยา, 2540)

2) โปรตีน จะเสียคุณค่าทางโภชนาการไปมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับวิธีการอบแห้งอาหาร และความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง โปรตีนหลายชนิดเมื่อได้รับความร้อนจะเสียสภาพและแข็งตัวกลายเป็นเจล หรือเกิด coagulation เช่น โปรตีนในไข่ขาวจะเสียสภาพธรรมชาติ และแข็งตัวที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส ส่วนไข่แดงจะเสียสภาพธรรมชาติที่อุณหภูมิประมาณ 66 องศาเซลเซียส ดังนั้นในกระบวนการอบแห้งต้องคำนึงถึงการสูญเสียสภาพของโปรตีนเนื่องจากอุณหภูมิที่ทำการอบแห้งซึ่งโปรตีนแต่ละชนิดเสียสภาพที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน (นิธิยา, 2549)

3) คาร์โบไฮเดรต การเปลี่ยนสีของผลไม้ตากแห้งเกิดจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์ (non-enzymatic browning reaction) โดยน้ำตาลรีดิวซ์จะทำปฏิกิริยากับหมู่อะมิโนในโมเลกุลของแอมโมเนีย กรดอะมิโน และโปรตีน ได้เป็นไกลโคซิลเอมีน (N-substituted glycosylamine) จะเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องจนได้สารสีน้ำตาล (นิธิยา, 2549)

4) ไขมัน การใช้ไขมันสูงจะทำให้อัตราการขึ้นปฏิกิริยาออกซิเดชันเพิ่มขึ้น ทำให้ไขมันมีกลิ่นหืนได้ง่าย ดังนั้นจึงควรใช้ไขมันต่ำหรือใช้สารกันหืน (antioxidant) ป้องกันปฏิกิริยาออกซิเดชันดังกล่าว สารกันหืนมีหลายชนิด เช่น butylated hydroxyl toluene (BHT) (กุลยา, 2540)

5) เอนไซม์ การยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ เป็นการป้องกันการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาการเปลี่ยนสีน้ำตาล สามารถทำได้โดยการใช้ความร้อนหรือการใช้สารเคมี (กุลยา, 2540)

6) จุลินทรีย์ เป็นสาเหตุของการทำให้อาหารเสื่อมเสีย ค่ากิจกรรมของน้ำเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อคุณภาพ และการเน่าเสียของอาหาร ดังนั้นการลดปริมาณน้ำในอาหารให้น้อยลงเพื่อทำให้ค่ากิจกรรมของน้ำลดต่ำลงจึงเป็นการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ และการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี การเติมตัวถูกละลายลงไปในอาหารสามารถช่วยลดปริมาณน้ำอิสระในอาหารได้ และช่วยลดปริมาณน้ำอิสระในการอบแห้งได้อีกด้วย (กุลยา, 2540)

7) เม็ดสีในอาหาร อาหารอบแห้งจะมีสมบัติทั้งทางกายภาพและทางเคมีเปลี่ยนไป สีของอาหารจะเปลี่ยนไป เม็ดสีพวกแคโรทีนอยด์ (carotenoids) และแอนโทไซยานิน (anthocyanins) จะซีดจางลงถ้าใช้ไขมันสูงและระยะเวลาอบแห้ง หรือใช้สารเคมีบางชนิดในการอบแห้งเพื่อยับยั้งปฏิกิริยาของเอนไซม์เช่น รมควันด้วยกำมะถันจะฟอกสีอาหารให้จางลง ดังนั้น พวกผักและผลไม้ จึงมีการตรึง (fixed) สีก่อนอบแห้งโดยการลวกน้ำร้อน หรือแช่สารเคมี เช่น สารละลายด่างอ่อนจะทำให้สีผักผลไม้ไม่ซีดจางลงหรือเป็นสีน้ำตาล แต่อาจจะทำให้อาหารแข็งกระด้างขึ้น (กุลยา, 2540)