

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สารสีจากธรรมชาติ

ในปัจจุบันทั้งภาคอุตสาหกรรมอาหารและผู้บริโภคมักให้ความสำคัญในการใช้สารสีจากธรรมชาติแทนการใช้สารสีที่ได้จากการสังเคราะห์เนื่องมาจากความกังวลในเรื่องของสุขภาพ (Mobhammer *et al.*, 2005) ส่วนใหญ่สารสีประเภทนี้มักได้จากพืชและผลไม้ต่างๆ เช่น สีเขียวของผักเนื่องจากมีคลอโรฟิลล์ สีเหลือง สีส้มและสีแดงเนื่องจากสีของแคโรทีนอยด์รวมถึงบีตาเลน (betalain) ซึ่งเป็นกลุ่มของรงควัตถุที่ให้สีแดงและสีเหลืองคล้ายแอนโทไซยานินและฟลาโวนอยด์ ซึ่งพบได้ในพืชจำพวกหัวบีทรูท ผลแก้วมังกร ผลพืชกลุ่มกระบองเพชรทั้งหมดและดอกเฟื่องฟ้า

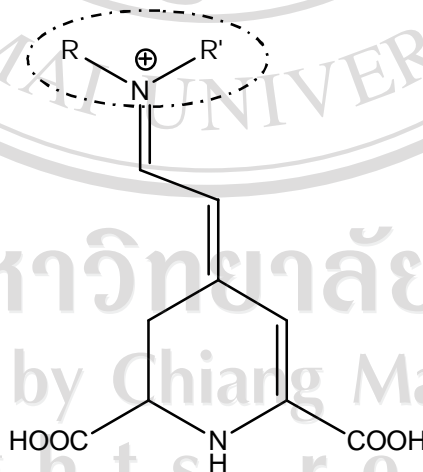
2.1.1 บีทรูท

บีทรูทหรืออาจเรียกว่า ผักกาดฝรั่ง ผักกาดแดง เป็นพืชที่อยู่ในวงศ์ Chenopodiaceae ชื่อสามัญคือ Chard, Beetroot, Sugar beet, Mangel-wurzel และมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Beta vulgaris* (Hanelt and Büttner, 2001) ลำต้นอยู่ใต้ดิน รากอวบหนา มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 4-5 เซนติเมตร ลักษณะของใบ เป็นใบเดี่ยวเรียงตัวสลับ ก้านยาว คล้ายรูปหัวใจ ดอก เป็นดอกเดี่ยวออกเป็นช่อมีสีเขียวอ่อน ผล มีขนาดเล็ก เป็นพืชใช้กินหัว มีรูปทรงกลมป้อม เปลือกสีดำ เนื้อสีแดงเลือดหมูหรือม่วงแดง เป็นผักเมืองหนาว ต้นกำเนิดอยู่ในแถบเมดิเตอร์เรเนียน ปัจจุบันนี้บีทรูทสามารถปลูกได้ในแถบภาคเหนือของไทย (ศูนย์ธรรมชาติบำบัดบับลวี, 2552) โดยปลูกได้ตลอดปีในระดับความสูงกว่า 1,000 เมตร เป็นพืชที่มีคุณค่าทางอาหารสูง รongมาจากมันฝรั่ง (มูลนิธิโครงการหลวง, 2552 ข.) ให้วิตามินซีสูง วิตามินเอ บี1 บี2 แคลเซียม ฟอสฟอรัส และเหล็ก (ศูนย์ธรรมชาติบำบัดบับลวี, 2552) นอกจากนี้บีทรูทยังมีสรรพคุณทางยาด้วย เพราะน้ำบีทรูทช่วยลดความดันเลือด โดยมีรายงานในวารสารโรคหัวใจของอเมริกา (American heart association journal hypertension) แสดงให้เห็นว่าการดื่มน้ำบีทรูท 500 มิลลิลิตรจะช่วยลดความดันเลือดได้ภายใน 1 ชั่วโมง (Webb *et al.*, 2008) บีทรูทยังมีคุณสมบัติในการช่วยรักษาโรคมะเร็ง ยังยั้งการเกิดเนื้องอกและมีคุณสมบัติในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ อีกทั้งบีทรูทยังใช้เป็นสีผสมอาหารจากธรรมชาติได้อย่างปลอดภัยโดยเติมลงในผลิตภัณฑ์ขนมหวาน แยม เยลลี่ ซีเรียล (cereals) และซอสมะเขือเทศเพื่อให้สีเข้มขึ้น เป็นต้น (Grubben and Denton, 2004)

สีม่วงแดงของบีทรูทเนื่องมาจากรงควัตถุบีตาเลน บีตาเลนเป็นกลุ่มของรงควัตถุที่ให้สีแดง และสีเหลืองคล้ายแอนโทไซยานินและฟลาโวนอยด์ สมัยก่อนเรียกว่า nitrogenous anthocyanins แอนโทไซยานินและบีตาเลน มีโครงสร้างทางเคมีไม่เหมือนกัน จึงบอกถึงความแตกต่างกันได้ง่าย เพราะมีช่วงดูดกลืนแสงแตกต่างกันด้วย แอนโทไซยานินสกัดออกจากพืชได้ง่ายด้วยเมทานอล แต่สกัดออกได้เพียงเล็กน้อยด้วยน้ำ และดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 270 นาโนเมตร ซึ่งต่างจาก บีตาเลนที่ละลายได้ดีในน้ำ บีตาไซยานินดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 540 นาโนเมตรและ บีตาแซนทินดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 480 นาโนเมตร (นิธิยา, 2549)

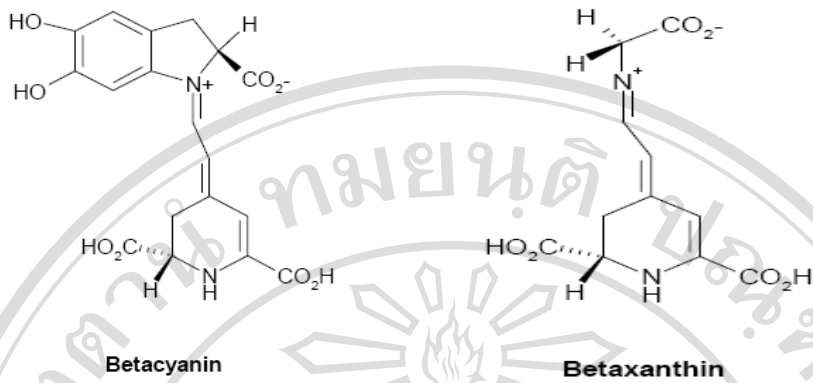
การสกัดสารให้สีบีตาเลนทำได้โดยการคั้นเอาน้ำจากหัวบีทมาทำให้เข้มข้นภายใต้สภาวะ สูญญากาศให้มีปริมาณของแข็งร้อยละ 40-60 ก่อนนำไปทำเป็นผงละเอียดโดยการทำแห้งแบบ ฟันฝอย บีตาเลนละลายน้ำได้ดีในน้ำและผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ บีตาเลน สลายตัวได้ง่ายเมื่อได้รับแสง ความร้อน และพีเอชสูง (สุทัศน์, 2547) สามารถเก็บรักษาบีตาเลนใน บีทผงได้ดีที่สุดคือ ภาวะที่มี a_w 0.12 หรือมีความชื้น 2 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง (นิธิยา, 2549)

บีตาเลนประกอบไปด้วยส่วนของบีตาไซยานิน (betacyanins) (รูปที่ 2.1) ซึ่งให้สีแดงและ บีตาแซนทิน (betaxanthins) ที่ให้สีเหลือง นั่นคือ ถ้าหมู่ R' และ R ถูกแทนที่ด้วยแอลคิล (alkyl) หรือเบนซิล (benzyl) โดยพันธะคู่มี resonance ดังแสดงในวงกลม สารประกอบที่ได้จะมีสีแดง เรียกว่า บีตาไซยานิน แต่ถ้าพันธะคู่ไม่มี resonance สารประกอบที่ได้จะมีสีเหลือง เรียกว่า บีตาแซนทิน ดังรูปที่ 2.2 (นิธิยา, 2549)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของบีตาเลน

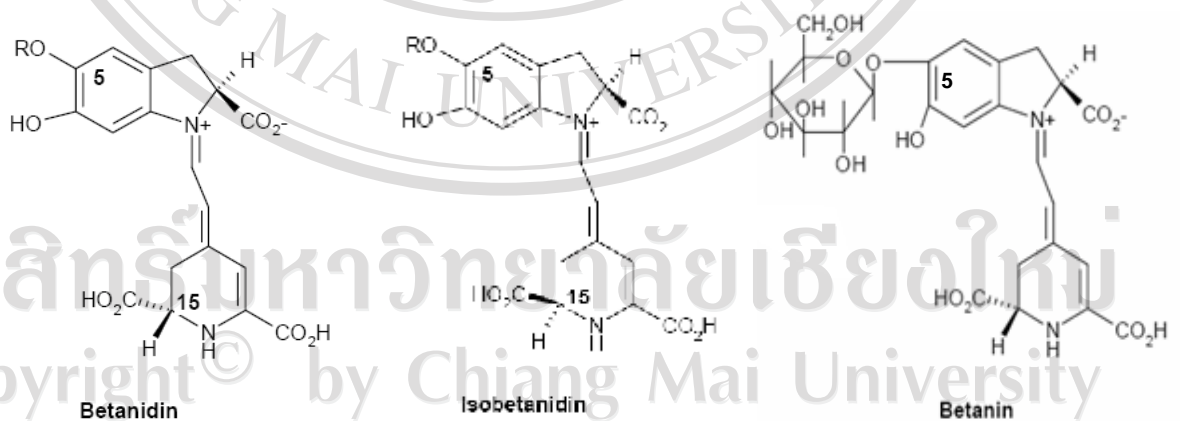
ที่มา: นธิยา (2549)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของบีตาไซยานินและบีตาแซนทิน

ที่มา: Zryd and Christinet (2003)

บีตาไซยานินทุกชนิดจะเป็นอนุพันธ์ของอะไกลโคโคนเพียง 2 ชนิดเท่านั้น คือ บีตานิดิน และ ไอโซบีตานิดิน ซึ่งเป็นอีพิเมอร์ของบีตานิดินที่คาร์บอนตำแหน่ง 15 สำหรับอะไกลโคโคนของ บีตาไซยานินที่พบในบีทรูทคือ บีตานิดิน และเมื่อรวมกับน้ำตาลกลูโคสโดยหมู่ไฮดรอกซิลที่ คาร์บอนตำแหน่ง 5 จะได้เป็นบีตานิน ดังรูปที่ 2.3 (นริยา, 2549)



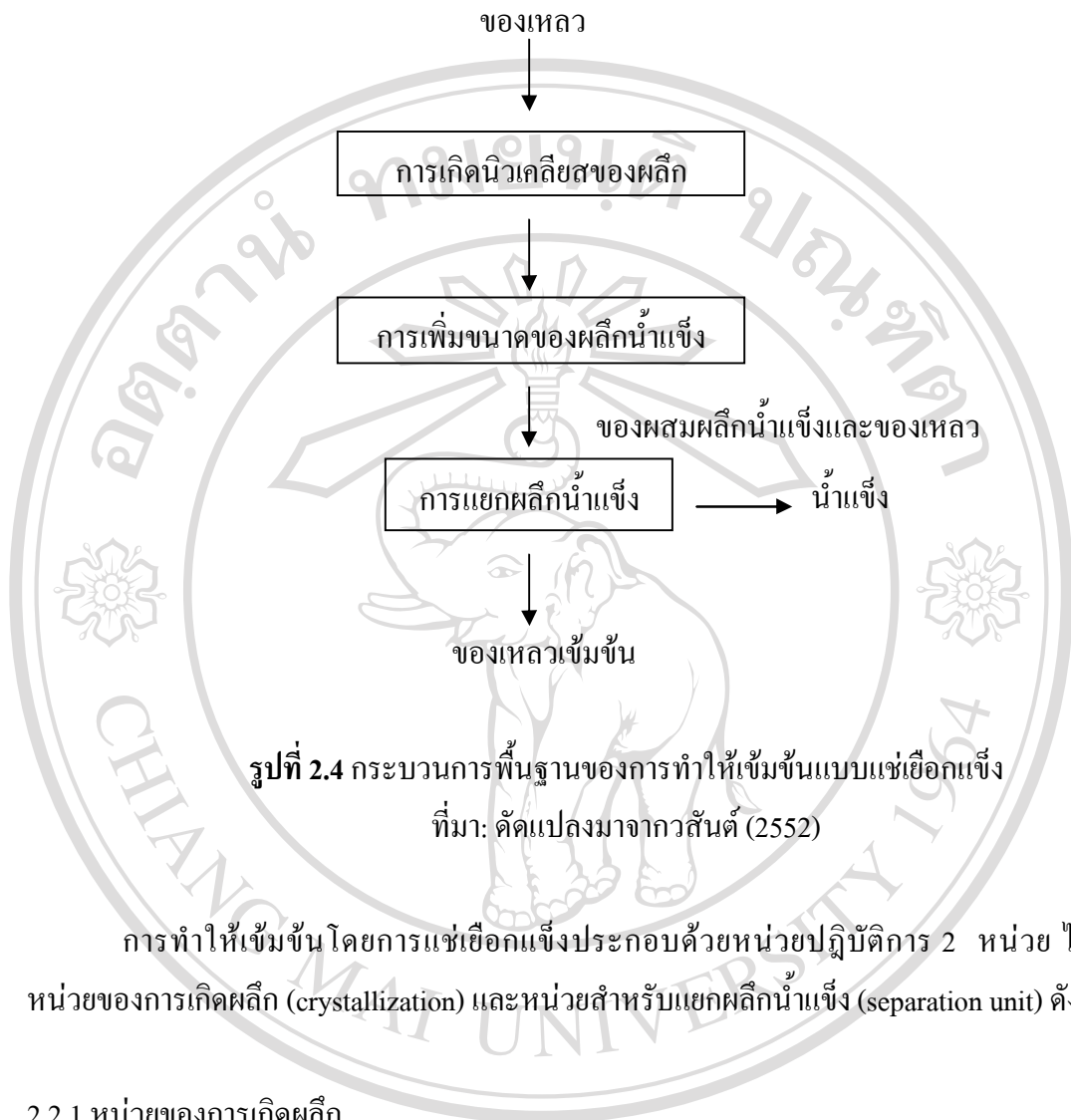
รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของบีตานิดิน ไอโซบีตานิดิน และบีตานิน

ที่มา: Zryd and Christinet (2003)

ความเข้มข้นของบีตานิโนในบีทรูทแดงมีปริมาณถึง 300-600 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เนื่องจากบีตานิโนสามารถสลายตัวได้เมื่อได้รับแสง ความร้อนและออกซิเจน ดังนั้นบีตานิโนจึงมักถูกใช้ในอาหารแช่แข็ง อาหารที่มีอายุการเก็บรักษาสั้น อาหารอบแห้งต่างๆ อีกทั้งในไอศกรีม เครื่องดื่มผง และอุตสาหกรรมลูกกวาดก็มักใช้บีตานิโนเป็นสารให้สีอีกด้วย (Starovicová, 2009) สารสีบีตานิโนสามารถคงตัวอยู่ได้ในผลิตภัณฑ์อาหารที่มีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบสูงและสภาวะที่อาหารมีปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ต่ำ (Herbach *et al.*, 2006) และจะมีความคงตัวที่พีเอช 4-6 จึงสามารถที่จะนำสีที่สกัดได้จากบีทรูทมาใช้เป็นสีผสมอาหารจากธรรมชาติได้ (นิธิยา, 2459) จากคุณประโยชน์ของสารสีในบีทรูทที่มีสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ อีกทั้งยังไม่มีรายงานการวิจัยแสดงถึงความเป็นพิษของบีทรูท จึงเกิดแนวคิดที่จะนำบีทรูทมาเป็นแหล่งของสารสีธรรมชาติเพื่อนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ โดยเลือกใช้เทคนิคการทำให้เข้มข้นแบบแช่เยือกแข็งเพื่อเก็บรักษาสารสีและคุณประโยชน์จากสารสีนี้ไว้

2.2 การทำให้เข้มข้นแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze concentration)

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เทคนิคการทำให้เข้มข้นแบบแช่เยือกแข็งในการทำให้สารสกัดสีจากบีทรูทเข้มข้นขึ้น โดยการทำให้เข้มข้นแบบแช่เยือกแข็งเป็นการทำให้อาหารที่เป็นของเหลวมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ซึ่งมีหลักการคือการลดอุณหภูมิของอาหารเหลวให้ต่ำลงจนกระทั่งอาหารบางส่วนแข็งตัว อาหารในช่วงนี้มีลักษณะเป็นกึ่งของเหลวกึ่งของแข็ง (slurry) เพราะในอาหารเหลวประกอบด้วยผลึกน้ำแข็ง (ice crystal) อยู่ร่วมกับส่วนที่เป็นของเหลว ทำให้อาหารมีความเข้มข้นมากขึ้นเนื่องจากน้ำในอาหารเหลวบางส่วนเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็ง ถ้าผลึกน้ำแข็งเกิดขึ้นในสภาวะที่เหมาะสม ผลึกน้ำแข็งที่ได้จะมีความบริสุทธิ์มาก แทบจะไม่มีองค์ประกอบอื่นๆ ของอาหารเข้าไปอยู่ในผลึกน้ำแข็ง เมื่ออาหารเหลวมีลักษณะเป็น slurry แล้วผลึกน้ำแข็งจะถูกแยกออกจากของเหลว โดยมีของเหลวติดไปกับผลึกน้ำแข็งน้อยที่สุด ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้คืออาหารเหลวที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น (วสันต์, 2552) รูปที่ 2.4 แสดงกระบวนการทำให้เข้มข้นแบบแช่เยือกแข็ง



การทำให้เข้มข้น โดยการแช่เยือกแข็งประกอบด้วยหน่วยปฏิบัติการ 2 หน่วย ได้แก่ หน่วยของการเกิดผลึก (crystallization) และหน่วยสำหรับแยกผลึกน้ำแข็ง (separation unit) ดังนี้

2.2.1 หน่วยของการเกิดผลึก

การเกิดผลึกน้ำแข็งในอาหารเหลวมี 2 ขั้นตอน คือ การเกิดนิวเคลียสของผลึกน้ำแข็ง และการเพิ่มขนาดของผลึกน้ำแข็ง ในหน่วยนี้ต้องมีการควบคุมให้เกิดผลึกน้ำแข็งอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งอาหารเหลว และเป็นผลึกน้ำแข็งที่เหมาะสมแก่ขั้นตอนการแยก นั่นคือ ผลึกน้ำแข็งควรมีรูปร่างกลม มีขนาดใหญ่และมีขนาดใกล้เคียงกันมากที่สุด ซึ่งจะทำให้สามารถแยกผลึกน้ำแข็งออกจากอาหารเหลวเข้มข้นได้ง่าย และลดปริมาณอาหารเหลวเข้มข้นที่ติดไปกับผลึกน้ำแข็ง (วสันต์, 2552)

โดยกระบวนการเกิดผลึกจะเกิดขึ้นได้ 2 ขั้นตอนคือ

1. การเกิดผลึก (crystal formation) หรือที่เรียกว่า นิวคลีเอชัน (Nucleation)

นิวคลีเอชันเป็นจุดเริ่มต้นของการแช่แข็ง ที่ก่อให้เกิดนิวคลีโอ (Nuclei) ขนาดเล็กๆ ซึ่งจะเป็นจุดศูนย์กลางของผลึกต่อไป โดยทั่วไปแล้วนิวคลีโอจะเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะคือ โฮโมจีเนียส (homogeneous) และเฮเทอโรจีเนียส (heterogeneous) ซึ่งแบบแรกนั้นจะเกิดขึ้นค่อนข้างน้อยเฉพาะในระบบที่น้ำถูกทำให้บริสุทธิ์อย่างมาก โดยนิวคลีโอจะเป็นกลุ่มของโมเลกุลน้ำที่รวมตัวกันอย่างสุ่ม ส่วนการเกิดแบบเฮเทอโรจีเนียสนั้นอนุภาคเล็กๆ ที่มีอยู่ในสารละลายจะกระทำตัวเป็นนิวคลีโอแล้วเกิดเป็นผลึกขึ้น อนุภาคเหล่านี้ต้องมีโครงสร้างผลึกคล้ายกับที่เกิดจากน้ำแข็ง นอกจากนี้ได้มีผู้ศึกษาผลของอุณหภูมิต่ออัตราการเกิดนิวคลีโอ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหลังจากการทำให้เย็นยิ่งยวด (supercooling) จะเกิดนิวคลีโอและอัตราการเกิดจะเร็วมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง

2. การเพิ่มขนาดของผลึกน้ำแข็ง (crystal growth)

การเพิ่มขนาดของผลึก เป็นขั้นตอนที่สองของการเกิดผลึกน้ำแข็ง เกิดขึ้นหลังจากเกิดนิวคลีโอขึ้นในจำนวนที่มากพอค่าหนึ่ง อัตราการเพิ่มขนาดของผลึกจะขึ้นกับปัจจัยดังนี้

- อัตราที่โมเลกุลน้ำทำปฏิกิริยาที่ผิวของผลึก
- อัตราการแพร่ของโมเลกุลน้ำจากสารละลายที่ยังไม่แข็งตัวไปยังผิวผลึก
- อัตราความร้อนที่ถูกกำจัดออกไป (ความร้อนของการเกิดผลึก)

อย่างไรก็ตาม ปัจจัยที่กล่าวมาแล้วล้วนขึ้นกับอุณหภูมิ อัตราการเพิ่มขนาดของผลึกจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง ขนาดของผลึกเมื่อสิ้นสุดกระบวนการแช่แข็งจะมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยในกระบวนการทำให้เข้มข้นแบบแช่เยือกแข็งนั้นหากผลึกน้ำแข็งมีขนาดใหญ่ก็จะช่วยลดปริมาณของเหลวเข้มข้นที่ติดไปกับผลึกน้ำแข็งในกระบวนการแยกผลึกน้ำแข็งออกจากของเหลวเข้มข้น (Fellows, 2000) ส่งผลให้ได้ของเหลวเข้มข้นที่มีคุณภาพดี โดยขนาดของผลึกน้ำแข็งนี้จะขึ้นกับจำนวนของนิวคลีโอที่เกิดขึ้นระหว่างการแช่แข็ง ถ้าเกิดนิวคลีโอจำนวนเล็กน้อยจะได้ผลึกขนาดใหญ่จำนวนน้อย แต่ถ้าเกิดนิวคลีโอจำนวนมากก็จะได้ผลึกขนาดเล็กจำนวนมากด้วย (รุ่งนภา, 2535)

2.2.2 หน่วยสำหรับแยกผลึกน้ำแข็ง

การแยกผลึกน้ำแข็งออกจากส่วนที่เป็นของเหลวนั้นอาจใช้เทคนิคการแยกทางกลเช่น การหมุนเหวี่ยง โดยเครื่องแยกผลึกน้ำแข็งแบบหมุนเหวี่ยง (Filtering centrifuges) จะสามารถกรองผลึกน้ำแข็งได้ในตัว โดยอาศัยหลักการที่ว่า ความหนาแน่นของผลึกน้ำแข็งกับส่วนของเหลวเข้มข้นมีค่าไม่เท่ากัน ส่วนของเหลวเข้มข้นมีความหนาแน่นมากกว่าผลึกน้ำแข็ง ดังนั้นจะถูกหมุนเหวี่ยงไปได้ไกลกว่า ส่วนของเหลวเข้มข้นจึงเป็นส่วนที่อยู่ติดผนังของเครื่องหมุนเหวี่ยง ซึ่งที่ผนังของเครื่องหมุนเหวี่ยงจะเป็นตัวกรองโดยรอบ ของเหลวเข้มข้นสามารถไหลผ่านตัวกรองออกไปได้ แต่ผลึกน้ำแข็งจะติดอยู่ภายในเครื่องหมุนเหวี่ยง ในช่วงที่ต่างๆของการหมุนเหวี่ยงอาจมีการเติมน้ำลงในเครื่องหมุนเหวี่ยงเพื่อให้แน่ใจว่าของเหลวเข้มข้นถูกแยกออกไปได้หมด ไม่มีหลงเหลืออยู่กับผลึกน้ำแข็ง ดังนั้นจึงมีน้ำส่วนหนึ่งถูกเหวี่ยงออกไปกับของเหลวเข้มข้นด้วย จึงทำให้ความเข้มข้นของเหลวเข้มข้นลดลงเล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่าการสูญเสียกลิ่นรสของอาหารไปบางส่วน ทั้งนี้เพราะว่าในระหว่างการหมุนเหวี่ยงจะเกิดช่องว่างอากาศบริเวณตรงกลางของเครื่องเหวี่ยง ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการแยกของเครื่องหมุนเหวี่ยง ได้แก่ ความเร็วรอบในการหมุน ขนาดของผลึก การกระจายขนาดของผลึก รูปร่างของผลึก และความชื้นหนืดของของเหลวเข้มข้น (วสันต์, 2552)

การทำให้เข้มข้นแบบแช่เยือกแข็งเป็นการกำจัดน้ำออกจากอาหารโดยไม่กำจัดองค์ประกอบอื่นๆ ของอาหารออกไป เช่น สารให้กลิ่นรสในอาหาร การทำให้เข้มข้นแบบแช่เยือกแข็งเป็นทางเลือกในการกำจัดน้ำที่ดีกว่าการต้มระเหยเพราะว่าไม่มีความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้อง เนื่องจากเป็นกระบวนการผลิตที่ใช้อุณหภูมิต่ำ ทำให้ยังคงเก็บรักษาสารกลิ่นรสในอาหารไว้ได้ นอกจากนี้อาหารที่ผ่านการทำให้เข้มข้นแบบแช่เยือกแข็งจะมีรสชาติที่ดีกว่าอาหารที่ผ่านการทำให้เข้มข้นโดยการต้มระเหย อย่างไรก็ตามการทำให้เข้มข้นแบบแช่เยือกแข็งยังเป็นกระบวนการที่มีค่าใช้จ่ายสูงสำหรับระบบทำความเย็น อุปกรณ์มีราคาแพง ค่าใช้จ่ายสำหรับกระบวนการผลิตค่อนข้างสูงแต่ผลผลิตที่ได้ค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการต้มระเหย โดยการทำให้เข้มข้นแบบแช่เยือกแข็งมีคุณภาพดีกว่าการใช้เมมเบรนแต่ยังมีคุณภาพต่ำกว่าการต้มระเหย จากเหตุผลนี้จึงเป็นข้อจำกัดสำหรับการทำให้เข้มข้นแบบแช่เยือกแข็งซึ่งจะเหมาะสำหรับอาหารที่มีราคาแพงและสารสกัดเท่านั้น (Fellows, 2000) อีกทั้งถ้าอาหารเหลวเริ่มต้นมีคุณภาพต่ำจะมีกลิ่นรสที่ไม่ดี หากนำมาทำให้เข้มข้นโดยการแช่เยือกแข็ง กลิ่นรสที่ไม่พึงประสงค์จะยังคงมีในอาหารเหลวเข้มข้นที่ได้ เช่น ถ้านำน้ำผลไม้จากผลไม้ที่สุกเกินไปมาทำให้เข้มข้นโดยการแช่เยือกแข็งจะมีกลิ่นผลไม้ที่สุกเกินไปหลงเหลืออยู่ในอาหารเหลวเข้มข้นที่ได้ซึ่งถ้าหากนำน้ำ

ผลไม้จากผลไม้ที่สุกเกินไปไปทำให้เข้มข้น โดยการต้มระเหยกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์นี้จะหายไป (วสันต์, 2552)

การทำให้เข้มข้นแบบแช่เยือกแข็งเหมาะสำหรับของเหลวใส โดยของแข็งที่ไม่ละลายในน้ำ จะลดความใสของของเหลวเข้มข้นที่ถูกแยกออกมา อย่างไรก็ตาม ควรแยกและกำจัดของแข็งที่ไม่ละลายน้ำออกมาก่อนกระบวนการทำให้เข้มข้น เพื่อให้ประสิทธิภาพของการทำให้เข้มข้นแบบแช่เยือกแข็งสูงขึ้น อาจทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของอาหารเหลว เช่น การยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ หรือใช้วิธีการแยกทางกายภาพ (การหมุนเหวี่ยงและการกรอง) เพื่อแยกของแข็งที่ไม่ละลายในน้ำออกไป เช่น การแยกองค์ประกอบพวกกาก (pulp) และเพคตินออกไป (วสันต์, 2552) ถ้ายังต้องการของแข็งในส่วนนี้อาจเติมลงไปภายหลังกระบวนการทำให้เข้มข้น (Schwartzberg, 2009)

2.3 น้ำผึ้ง

น้ำผึ้ง หมายถึง ของเหลวรสหวานซึ่งผึ้งผลิตขึ้นจากน้ำหวานของดอกไม้หรือจากส่วนใดส่วนหนึ่งของต้นไม้อันแล้วสะสมไว้ในรังผึ้ง (มอก., 2526) น้ำผึ้งต้องมีลักษณะเป็นของเหลวข้น เป็นเนื้อเดียวกัน ปราศจากสิ่งแปลกปลอม มีสีตามธรรมชาติตั้งแต่สีเหลืองอ่อนจนถึงสีน้ำตาล มีกลิ่นรสตามธรรมชาติ กลิ่นต้องไม่บูดเปรี้ยวหรือมีฟอง (มอก., 2526) น้ำผึ้งคุณภาพดีควรมีลักษณะตามมาตรฐานในตารางที่ 2.1 อีกทั้งน้ำผึ้งได้รับการยอมรับว่าเป็นอาหารเพื่อสุขภาพเนื่องจากมีคุณค่าทางโภชนาการหลายอย่างดังตารางที่ 2.2

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานทางเคมีของน้ำผึ้ง

คุณลักษณะทางเคมี	เกณฑ์ที่กำหนดตาม มาตรฐาน มอก.	เกณฑ์ที่กำหนดตาม มาตรฐาน CODEX
1. น้ำตาลรีดิวิวส์ซึ่ง คิดเป็นน้ำตาลอินเวิร์ต ร้อยละ ไม่น้อยกว่า	65	65
2. ความชื้น ร้อยละ ไม่เกิน	21	21
3. ซูโครส ร้อยละ ไม่เกิน	5	5
4. สารที่ไม่ละลายน้ำ ร้อยละ ไม่เกิน	0.1	0.1
5. เถ้า ร้อยละ ไม่เกิน	0.6	0.6
6. ความเป็นกรด มิลลิอีควิวาเลนต์ของกรด ต่อ 1000 กรัม ไม่เกิน	40	40
7. ค่าไดเอสเตส แอกติวิตี (diastase activity) และปริมาณไฮดรอกซี เมทิล เฟอร์ฟิวรัล (hydroxy methyl furfural)		
7.1 ค่าไดเอสเตส แอกติวิตี ต้องไม่น้อยกว่า เมื่อปริมาณไฮดรอกซี เมทิล เฟอร์ฟิวรัล มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ไม่เกิน	8 40	3 80
7.2 ค่าไดเอสเตส แอกติวิตี ต้องไม่น้อยกว่า เมื่อปริมาณไฮดรอกซี เมทิล เฟอร์ฟิวรัล มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ไม่เกิน	3 15	--- ---

ที่มา: มอก. (2526) และ Codex Alimentarius (2009)

ตารางที่ 2.2 คุณค่าทางโภชนาการของน้ำผึ้ง

น้ำผึ้ง	
คุณค่าทางอาหารต่อ 100 กรัม (3.5 ออนซ์) พลังงาน 1270 กิโลจูล 300 กิโลแคลอรี	
คาร์โบไฮเดรต	82.4 กรัม
น้ำตาล	82.12 กรัม
ใยอาหาร	0.2 กรัม
ไขมัน	0 กรัม
โปรตีน	0.3 กรัม
น้ำ	17.10 กรัม
ไรโบฟลาวิน (วิตามินบี 2)	0.038 มิลลิกรัม
ไนอะซิน (วิตามินบี 3)	0.121 มิลลิกรัม
กรดเพนโททานิก (วิตามินบี 5)	0.068 มิลลิกรัม
วิตามินบี 6	0.024 มิลลิกรัม
โฟเลต (วิตามินบี 9)	2 ไมโครกรัม
วิตามินซี	0.5 มิลลิกรัม
แคลเซียม	6 มิลลิกรัม
เหล็ก	0.42 มิลลิกรัม
แมกนีเซียม	2 มิลลิกรัม
ฟอสฟอรัส	4 มิลลิกรัม
โพแทสเซียม	52 มิลลิกรัม
โซเดียม	4 มิลลิกรัม
สังกะสี	0.22 มิลลิกรัม

ที่มา: USDA (2008)

2.3.1 องค์ประกอบของน้ำผึ้ง

1. ความชื้น

ความชื้นที่เหมาะสมของน้ำผึ้งคือประมาณร้อยละ 17-18 ซึ่งทำให้สามารถเก็บน้ำผึ้งไว้ได้นานโดยเปลี่ยนแปลงสภาพเพียงเล็กน้อย เมื่อมีความชื้นที่เหมาะสม น้ำผึ้งก็จะมีแรงดูดซึมสูงจึงสามารถดูดซึมน้ำจากเซลล์จุลินทรีย์ต่างๆ ทำให้เชื้อโรคตายได้ (นาวิ, 2550) น้ำผึ้งที่มีความชื้นสูงอาจทำให้เกิดการหมักเนื่องมาจาก osmophilic yeasts ได้ (Belitz and Grosch, 1999)

2. น้ำตาล

น้ำตาลเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ของน้ำผึ้งมากกว่าร้อยละ 95 ของของแข็งในน้ำผึ้ง องค์ประกอบของน้ำตาลขึ้นอยู่กับชนิดของดอกไม้ สภาพอากาศและพื้นที่ที่ผึ้งไปดูดน้ำหวานมา น้ำตาลในน้ำผึ้งประกอบไปด้วย (Zamora and Chirife, 2006)

- 2.1 น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (โมโนแซ็กคาไรด์) เช่น กลูโคส ฟรักโทส ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของน้ำผึ้ง คิดเป็นประมาณร้อยละ 80-85 ของของแข็งในน้ำผึ้ง และเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้น้ำผึ้งมีรสหวานซึ่งสิ่งมีชีวิตส่วนใหญ่จะใช้น้ำตาลกลุ่มนี้ในการสร้างพลังงาน
- 2.2 น้ำตาลโมเลกุลคู่ (ไดแซ็กคาไรด์) เช่น มอลโตส และซูโครส
- 2.3 น้ำตาลอื่นๆ เช่น ไตรแซ็กคาไรด์ และ โอลิโกแซ็กคาไรด์แต่มีในปริมาณน้อย

น้ำตาลทั้งหมดนี้เป็นน้ำตาลที่เป็นส่วนผสมขององค์ประกอบโดยธรรมชาติจากต่อมน้ำหวานของพืชหรือเป็นส่วนผสมของน้ำหวานที่แมลงจำพวกเพลี้ยปล่อยออกมาหลังจากที่ดูดกินน้ำเลี้ยงจากพืช ส่วนน้ำหวานหรือน้ำเชื่อมที่ได้จากการเอาน้ำตาลทราย น้ำตาลปีบ น้ำตาลปึก หรือน้ำตาลสังเคราะห์อื่นๆ ไปละลายน้ำแล้วให้ผึ้งกินไม่เป็นที่ยอมรับว่าเป็นส่วนผสมของน้ำผึ้งโดยธรรมชาติ ดังนั้นในน้ำผึ้งแท้บริสุทธิ์จึงต้องมีข้อกำหนดว่าจะมีน้ำตาลซูโครสได้เพียงไม่เกินร้อยละ 5-8 โดยน้ำหนัก (จากตารางที่ 2.1) น้ำผึ้งที่มีปริมาณน้ำตาลซูโครสสูงกว่านี้ ถือว่าเป็นน้ำผึ้งผสมน้ำเชื่อมซึ่งไม่ใช่ น้ำผึ้งบริสุทธิ์ (นาวิ, 2550)

3. กรด

กรดในน้ำผึ้งมีหลายชนิด แต่ที่สำคัญคือ กรดกลูโคสิก ซึ่งเกิดจากกิจกรรมของเอนไซม์ กลูโคสออกซิเดส นอกจากนั้นยังพบกรดชนิดอื่นๆ ในน้ำผึ้งแต่มีอยู่ในปริมาณน้อยเช่น กรดอะซีติก บิวทีริก เลคติก ซิตรีก ฟอรั่มิก มาลิก และ ออกซาลิก เป็นต้น (Belitz and Grosch, 1999)

4. กรดอะมิโน

น้ำผึ้งประกอบด้วยกรดอะมิโนหลายชนิด ซึ่งกรดอะมิโนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของ โปรตีน ซึ่งพบในเกสรดอกไม้ที่ผึ้งไปดูดน้ำหวานมา ตัวอย่างกรดอะมิโนที่มีในน้ำผึ้งแสดงดัง ตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 กรดอะมิโนที่พบในน้ำผึ้ง

กรดอะมิโน	มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม น้ำผึ้ง (น้ำหนักฐานแห้ง)	กรดอะมิโน	มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม น้ำผึ้ง (น้ำหนักฐานแห้ง)
กรดแอสพาร์ติก (Asp)	3.44	ไทโรซีน (Tyr)	2.58
แอสพาราจีน (Asn) + กลูตามีน (Gln)	11.64	ฟีนิลอะลานีน (Phe)	14.75
กรดกลูตามิก (Glu)	2.94	เบต้า-อะลานีน (β -Ala)	1.06
โพรลีน (Pro)	59.65	แกมมา-อะมิโนบิวทีริก (γ -Abu)	2.15
ไกลซีน (Gly)	0.68	ไลซีน (Lys)	0.99
อะลานีน (Ala)	2.07	ออโรไทซีน (Orn)	0.26
ซิสเทอีน (Cys)	0.47	ฮิสติดีน (His)	3.84
วาลีน (Val)	2.00	ทริพโตเฟน (Trp)	3.84
เมไทโอนีน (Met)	0.33	อาร์จินีน (Arg)	1.72
ไอโซลูซีน (Ile)	1.12	กรดอะมิโนที่ไม่สามารถ ระบุชนิดได้	24.53
ลูซีน (Leu)	1.03	รวมทั้งหมด	118.77

ที่มา: Belitz and Grosch (1999)

5. แร่ธาตุ

แร่ธาตุในน้ำผึ้งมีอยู่หลายชนิด เช่น แคลเซียม โซเดียม ฟอสฟอรัส ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ปริมาณแร่ธาตุเหล่านี้แม้จะมีไม่มากนัก แต่ก็อยู่ในสัดส่วนที่เหมาะสม การเติมน้ำผึ้งลงไปแทนน้ำตาลในอาหารชนิดต่างๆ เป็นการเพิ่มปริมาณแร่ธาตุที่จำเป็นให้แก่ร่างกายด้วย

6. เอนไซม์

เอนไซม์คือสารอินทรีย์ประเภทโปรตีนที่มีอยู่ในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาต่างๆ ภายในเซลล์นั้นๆ เช่น การย่อยอาหาร เอนไซม์ที่สำคัญที่สุดที่พบในน้ำผึ้งคือ อินเวอร์เทส (invertase) ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนน้ำตาลซูโครสเป็นน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโทส อีกทั้งเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส (glucose oxidase) ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนน้ำตาลกลูโคสเป็นกรดกลูโคนิก อันเป็นส่วนประกอบของน้ำตาลกลูโคส (นาวิ, 2550) นอกจากนี้ยังพบเอนไซม์ไดแอสเตส (diastase) ในน้ำผึ้งอีกด้วย โดยแอกติวิตีของเอนไซม์อินเวอร์เทสและไดแอสเตสร่วมกับปริมาณไฮดรอกซี เมทิล เฟอ์ฟิวรัล (hydroxy methyl furfural) สามารถใช้ในการประเมินได้ว่าน้ำผึ้งนั้นผ่านการให้ความร้อนหรือไม่ (Belitz and Grosch, 1999) ดังนั้นจึงมีการกำหนดค่ามาตรฐานไดแอสเตส แอกติวิตี (diastase activity) และปริมาณไฮดรอกซี เมทิล เฟอ์ฟิวรัลไว้ในมาตรฐานน้ำผึ้งดังตารางที่ 2.1

7. วิตามิน

ในน้ำผึ้งมีวิตามินอยู่หลายชนิด เช่น วิตามินซี บี2 (riboflavin) บี3 (niacin) บี6 เป็นต้น แม้ว่าวิตามินแต่ละชนิดจะมีอยู่ในปริมาณไม่มากนักแต่ก็อยู่ในสัดส่วนที่เหมาะสม ปริมาณวิตามินในน้ำผึ้งแต่ละชนิดจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับที่มาของน้ำผึ้ง

8. อินฮิบิน (inhibine)

คือสารที่มีคุณสมบัติในการต่อต้านเชื้อโรค คนในสมัยโบราณนิยมใช้น้ำผึ้งในการรักษาบาดแผลและแก้อาการอักเสบ ซึ่งได้ผลเพราะน้ำผึ้งมีสารอินฮิบินเป็นองค์ประกอบ

2.3.2 คุณค่าที่ได้รับจากน้ำผึ้ง

คุณค่าที่ผู้บริโภคได้รับจากน้ำผึ้งนั้นมีอยู่มากมายทั้งนี้ก็เพราะน้ำผึ้งอุดมไปด้วยสารอาหารที่มีประโยชน์ คุณค่าที่ได้รับจากน้ำผึ้งสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 หัวข้อใหญ่คือ คุณค่าทางโภชนาการ และคุณค่าทางยารักษาโรค (นาวิ, 2550) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.3.2.1 คุณค่าทางโภชนาการ

น้ำผึ้งมีคุณค่าทางโภชนาการสูงมากเพราะมีสารอาหารครบ คุณค่าทางโภชนาการที่สำคัญต่างๆ มีดังนี้

1. คาร์โบไฮเดรต

น้ำผึ้งจัดเป็นอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรตที่ดีที่สุด เพราะถ้าระเหยน้ำออกจากน้ำผึ้งจนหมด สิ่งที่เหลือก็คือน้ำตาลซึ่งเมื่อถูกเผาผลาญก็จะให้พลังงานแก่ร่างกาย ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับอาหารคาร์โบไฮเดรตชนิดอื่นๆ ในปริมาณน้ำหนักแห่งเท่ากัน น้ำผึ้งจะให้พลังงานและความอบอุ่นมากกว่า

2. โปรตีนและไขมัน

ถึงแม้ว่าในน้ำผึ้งจะมีโปรตีนและไขมันจำนวนน้อยแต่ก็มีคุณค่าทางโภชนาการสูงสุด เพราะอยู่ในรูปโมเลกุลที่เล็กที่สุดคือกรดอะมิโนและกรดไขมัน ซึ่งร่างกายสามารถนำไปใช้ได้ทันที

นอกจากนั้นน้ำผึ้งยังให้พลังงานที่เหมาะสมกับผู้ที่มีปัญหาในระบบย่อยอาหาร โดยน้ำตาลที่ได้จากแป้งและอาหารต่างๆ ไป ถ้าเป็นน้ำตาลซูโครสเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะต้องผ่านกระบวนการย่อยก่อนร่างกายจึงจะนำไปใช้ประโยชน์ได้ แต่สำหรับน้ำผึ้งนั้นร่างกายสามารถดูดซึมได้โดยตรงโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการย่อยอีก ร่างกายจึงนำสารอาหารไปเสริมสร้างพลังงานได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นผู้ที่มีปัญหาเกี่ยวกับการย่อยอาหารหรือเด็กที่กำลังเติบโต โดยต้องใช้พลังงานอยู่เสมอจึงควรรับประทานน้ำผึ้งเป็นประจำ (นาวิ, 2550)

อีกทั้งน้ำผึ้งช่วยควบคุมการทำงานของระบบประสาทในร่างกายเนื่องจากในน้ำผึ้งมีสารกระตุ้นปฏิกิริยาทางชีวภาพหลายชนิด ไม่ว่าจะเป็นเอนไซม์ วิตามิน แร่ธาตุ ฯลฯ ซึ่งต่างมีหน้าที่สำคัญในการควบคุมการทำงานของระบบประสาทในร่างกายให้เป็นอย่างมีประสิทธิภาพ (นาวิ, 2550)

2.3.2.2 คุณค่าทางยารักษาโรค

เนื่องจากน้ำผึ้งมีความเข้มข้นจึงมีแรงดูดซึม (osmotic pressure) สูง สามารถดูดซึมน้ำจากเซลล์จุลินทรีย์ทำให้ยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อโรคและทำให้เชื้อโรคตายได้อีกทั้งน้ำผึ้งยังมีสารอินฮิบินหรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จึงสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตและทำลายเชื้อโรคได้

จากคุณประโยชน์ของน้ำผึ้งที่ได้กล่าวมาจึงพบว่ามีคนนำน้ำผึ้งไปใช้ในอุตสาหกรรมมากมาย เพื่อผลิตเป็นสินค้าออกมารับความต้องการของผู้บริโภคไม่ว่าจะใช้ในการผสมอาหาร เช่น นมผสมน้ำผึ้ง ลูกอม ไอศกรีม ใช้ในการเก็บรักษาผักผลไม้ให้อยู่ได้นาน เช่น ลูกพรุน ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารกระป๋อง เช่น ช่วยลดการเหี่ยวของเนื้อสัตว์ ช่วยทำให้อาหารกระป๋องนำรับประทานยิ่งขึ้น (นาวิ, 2550)

เมื่อเก็บรักษาน้ำผึ้งไว้ระยะหนึ่งน้ำผึ้งจะมีสีเข้มขึ้น กลิ่นหอมลดลง และมีปริมาณไฮดรอกซี เมทิล เฟอร์ฟิวรัลเพิ่มขึ้นซึ่งขึ้นอยู่กับความเป็นกรด ต่าง ระยะเวลาการเก็บรักษา และอุณหภูมิ ดังนั้นควรเก็บรักษาน้ำผึ้งที่อุณหภูมิต่ำกว่า 10 องศาเซลเซียสและไม่ควรให้น้ำผึ้งสัมผัสความชื้นจากอากาศ (Belitz and Grosch, 1999) ในบางครั้งน้ำผึ้งที่มาจากน้ำหวานและเกสรดอกไม้บางชนิด เช่น ทานตะวัน ขางพารา ซึ่งเป็นน้ำผึ้งที่ดีเมื่อเก็บทิ้งไว้ในช่วงเวลาหนึ่ง หรือถูกเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิต่ำนานๆ อาจมีการตกผลึกเป็นตะกอนได้ ซึ่งทำให้ผู้บริโภคเข้าใจว่าเป็นน้ำผึ้งปลอม หากเปรียบเทียบการตกผลึกระหว่างเกล็ดน้ำตาลกับน้ำผึ้งจะพบว่ามีลักษณะที่แตกต่างกัน น้ำผึ้งแท้ที่ตกผลึกจะมีผลึกเป็นแท่งเหลี่ยมแหลมคมและถ้าตกผลึกทั้งขวดจะมองเห็นผลึกเป็นสีเดียวกันทั้งขวดไม่เป็นสีเข้มปนสีอ่อน ส่วนน้ำผึ้งที่ตกผลึกอยู่ที่ก้นขวด เนื้อผลึกขึ้นมาเป็นของเหลวและสีของเหลวนั้นมีสีเข้มกว่าผลึกอย่างเห็นได้ชัด (หทัยพร, 2552) น้ำตาลที่ตกผลึกนี้คือกลูโคสที่มีประโยชน์เพราะเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2550) ผลึกของน้ำผึ้งปลอมที่มีส่วนผสมของน้ำตาลทรายหรือคาราเมล (น้ำตาลเดี่ยว) จะเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู แต่ต้องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์จึงจะมองเห็น (ขนิษฐาพร, 2552) ผู้บริโภคที่เป็นนักบริโภคน้ำผึ้งบางรายนิยมรับประทานน้ำผึ้งตกผลึก เพราะมีรสชาติอีกแบบหนึ่ง ง่ายต่อการดื่มน้ำผึ้งรับประทาน ด้านการตลาดบางบริษัทผลิตน้ำผึ้งในรูปครีมน้ำผึ้งหรือน้ำผึ้งตกผลึกจำหน่าย แต่สามารถแก้ไขให้น้ำผึ้งตกผลึกกลับคืนสภาพเดิมได้ โดยการนำภาชนะที่บรรจุน้ำผึ้งตกผลึกไปแช่ในน้ำอุ่นไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้จะทำให้สารอินฮิบิน (inhibine) และสารอื่นๆที่มีอยู่ในน้ำผึ้งสูญเสียไป

2.4 การตกผลึกในน้ำผึ้ง

น้ำผึ้งตกผลึก (crystallized honey) คือ น้ำผึ้งที่เปลี่ยนสถานะจากของเหลวมาเป็นของแข็งหรือเป็นผลึก (Yong, 2003) น้ำผึ้งที่ตกผลึกไม่ใช่ น้ำผึ้งที่เสื่อมสภาพหรือเน่าเสีย แต่เป็นการเปลี่ยนสถานะทางกายภาพของน้ำตาลที่มีอยู่ในน้ำผึ้ง น้ำผึ้งที่ตกผลึกได้ง่าย เช่น น้ำผึ้งดอกลินจี่ น้ำผึ้งดอกทานตะวัน และน้ำผึ้งจากยางพารา (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2550) การตกผลึกในน้ำผึ้งทำให้เกิดความขุ่น ซึ่งส่งผลให้การยอมรับของผู้บริโภคลดลง (ขนิษฐา, 2550) ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดผลึกของน้ำผึ้ง ได้แก่ ปริมาณกลูโคส ความชื้น องค์ประกอบอื่นในน้ำผึ้ง และสภาวะการเก็บรักษา (สมพิศ, 2545) น้ำผึ้งที่มีกลูโคสปริมาณมากจะเกิดการตกผลึกได้เร็ว เนื่องจากมีความสามารถในการละลายต่ำกว่าฟรักโทส (Zamora and Chirife, 2006) จึงมีแนวโน้มที่จะตกผลึกในรูปของกลูโคสโมโนไฮเดรต (glucose monohydrate) ที่อุณหภูมิห้อง (Conforti *et al.*, 2006) น้ำผึ้งที่ตกผลึกมักไม่ได้รับการยอมรับจากผู้บริโภคและการตกผลึกของน้ำผึ้งมีผลทำให้ในวิภาคของเหลวมีความชื้นเพิ่มขึ้น มีผลให้ยีสต์สามารถเจริญได้ ซึ่งทำให้น้ำผึ้งเกิดกระบวนการหมัก (Lazaridou *et al.*, 2004) การหมักของน้ำผึ้งเกิดจากปฏิกิริยาของยีสต์ เป็นผลให้เกิดเอทิลแอลกอฮอล์และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเมื่อแอลกอฮอล์ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดอะซิติกและน้ำ ซึ่งเป็นผลทำให้น้ำผึ้งเกิดรสเปรี้ยวและมีกลิ่นผิดปกติได้ ยีสต์ที่ทำให้เกิดการหมักในน้ำผึ้งตามธรรมชาติคือ *Saccharomyces spp.* ในอุตสาหกรรมน้ำผึ้งปริมาณความชื้นในน้ำผึ้งจัดเป็นตัวบ่งบอกการเสื่อมเสียของน้ำผึ้งเนื่องมาจากการหมัก อย่างไรก็ตามได้มีรายงานว่าไม่เพียงเฉพาะปริมาณความชื้นเท่านั้นยังรวมถึงปริมาณน้ำอิสระของอาหารอีกด้วยที่ควบคุมการเจริญของจุลินทรีย์ ปริมาณน้ำอิสระของน้ำผึ้งมักจะต่ำกว่า 0.6 ซึ่งสามารถยับยั้งการเจริญของ osmophilic yeast (Zamora and Chirife, 2006)

จากรายงานการวิจัยพบว่าน้ำผึ้งจะเกิดการตกผลึกได้ดีเมื่อมีปริมาณกลูโคสมากกว่า 280-300 กรัมต่อ กิโลกรัม น้ำผึ้ง มีอัตราส่วนฟรักโทสต่อกลูโคสน้อยกว่า 1.14 และมีอัตราส่วนกลูโคสต่อน้ำมากกว่าหรือเท่ากับ 2.1 (Tosi *et al.*, 2004) แต่ถ้าหากมีสิ่งปนเปื้อนที่ละลายน้ำได้ เช่น สารคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อน หรือ โปรตีนผสมอยู่ในน้ำผึ้งจะทำให้สามารถชะลอหรือยับยั้งการตกผลึกของกลูโคสในน้ำผึ้งได้ (Zamora and Chirife, 2006) นอกจากนั้นการเก็บรักษาน้ำผึ้งที่อุณหภูมิต่ำ จะเร่งให้เกิดการตกผลึกของกลูโคส (ขนิษฐา, 2550) และยังมีผลต่อความหนืด เนื่องจากความสามารถในการละลายของน้ำตาลจะลดลงตามอุณหภูมิ นอกจากนั้นการคนหรือเขย่าน้ำผึ้งจะช่วยให้เกิดการตกผลึกได้ดีขึ้น เนื่องจากการสัมผัสกันของโมเลกุลน้ำตาลในสารละลายที่หนืดจะมีมากขึ้น (Yong, 2003)

ขนิษฐา (2550) ได้ศึกษาการตกผลึกของน้ำผึ้งไทยจำนวน 3 ชนิดคือน้ำผึ้งลำไย น้ำผึ้งสาบเสือ และน้ำผึ้งทานตะวัน พบว่าน้ำผึ้งทานตะวันตกผลึกได้ง่ายกว่าน้ำผึ้งลำไยและน้ำผึ้งสาบเสือ โดยน้ำผึ้งทานตะวันสามารถตกผลึกได้ที่มีการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ในขณะที่น้ำผึ้งลำไยและน้ำผึ้งสาบเสือไม่เกิดการตกผลึกทั้งนี้เนื่องมาจากน้ำผึ้งทานตะวันมีอัตราส่วนของฟรักโทสต่ำจึงเกิดการตกผลึกได้เร็ว

ธนากรและจิตติธัน (2551) ได้ศึกษาพฤติกรรมการตกผลึกของน้ำผึ้งไทยจำนวน 5 ชนิดคือน้ำผึ้งดอกทานตะวัน ดอกลิ้นจี่ ดอกลำไย ดอกสาบเสือ และดอกเงาะที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ซึ่งจากรายงานการวิจัยพบว่า ที่อุณหภูมิห้องมีเพียงน้ำผึ้งดอกทานตะวันเท่านั้นที่ตกผลึก ส่วนที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสนั้นน้ำผึ้งทุกชนิดจะเกิดการตกผลึก โดยน้ำผึ้งดอกทานตะวันเกิดการตกผลึกเร็วที่สุด

Gleiter (2006) ได้ศึกษาถึงความแตกต่างของค่า a_w ของน้ำผึ้งต่างชนิดกันที่ตกผลึกและยังไม่ตกผลึกพบว่าน้ำผึ้งที่ตกผลึกจะมีค่า a_w สูงกว่าน้ำผึ้งที่ยังไม่ตกผลึก ส่วนน้ำผึ้งต่างชนิดกันที่ไม่ตกผลึกจะมีค่า a_w ไม่แตกต่างกันดังนั้นการตกผลึกจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่า a_w

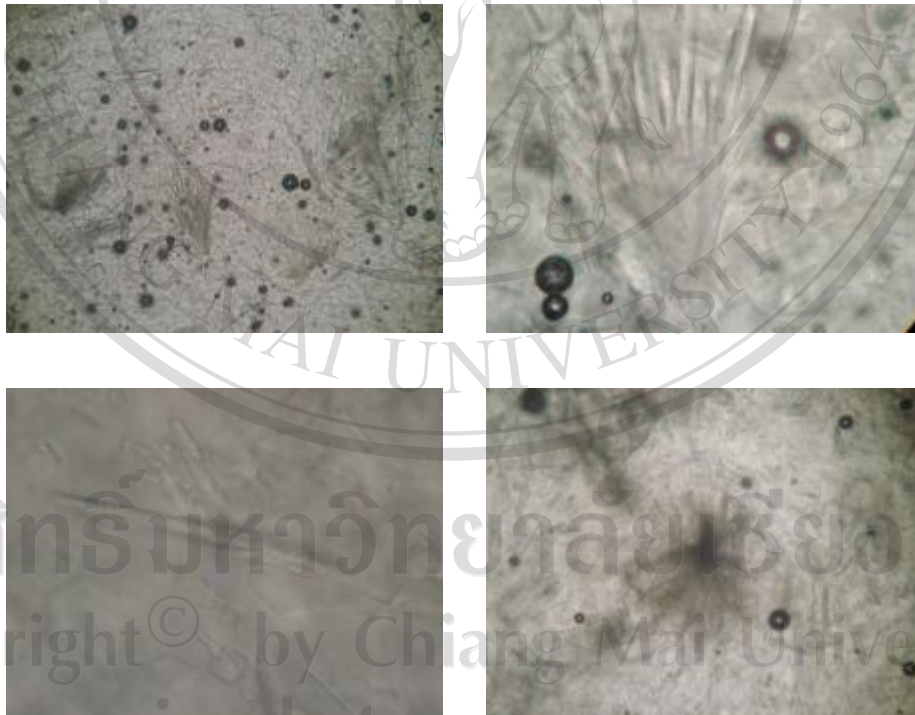
Lazaridou *et al.* (2004) ได้ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำผึ้งจากประเทศกรีซจำนวน 33 ตัวอย่าง พบว่าปริมาณความชื้นและค่า a_w ของน้ำผึ้งอยู่ในช่วง 13.0-18.9 กรัม ต่อ 100 กรัม และ 0.528-0.663 ตามลำดับ อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g) ของน้ำผึ้งวิเคราะห์โดยเครื่อง DSC โดยอยู่ระหว่าง -34 ถึง -47 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของน้ำผึ้ง โดยค่า T_g จะลดลงเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น

Lupano (1997) ได้ศึกษาคุณสมบัติของผลึกน้ำผึ้ง โดยเครื่อง DSC พบว่าอุณหภูมิการหลอมละลายของน้ำผึ้งสัมพันธ์กับขนาดของผลึก โดยน้ำผึ้งที่มีลักษณะผลึกละเอียดจะมีอุณหภูมิหลอมละลายของผลึกอยู่ระหว่าง 25 ถึง 45 องศาเซลเซียส ส่วนผลึกน้ำผึ้งที่มีขนาดใหญ่จะมีอุณหภูมิหลอมละลายจะอยู่ในช่วง 45 ถึง 65 องศาเซลเซียส

การตกผลึกของน้ำผึ้งเกิดขึ้นเนื่องจากปัจจัยหลายอย่าง เช่นองค์ประกอบของน้ำผึ้งซึ่งเกี่ยวข้องกับปริมาณน้ำตาลกลูโคส นอกจากนั้นแร่ธาตุและโปรตีนยังมีอิทธิพลต่อการตกผลึกของน้ำผึ้ง อีกทั้งอุณหภูมิการเก็บรักษา (Conforti, 2006) ชนิดของน้ำผึ้งและปริมาณความชื้นของน้ำผึ้ง รวมถึงละอองเกสร ผุน ไขผึ้ง โปรโปลิส ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำผึ้ง การมีผลึก (nuclei) อนุภาคเล็กๆ หรือฟองอากาศที่มีอยู่ในน้ำผึ้งล้วนเป็นจุดเริ่มต้นที่ทำให้ น้ำผึ้งเกิดการตกผลึกได้เช่นเดียวกัน (The Nation Honey Board, 2009)

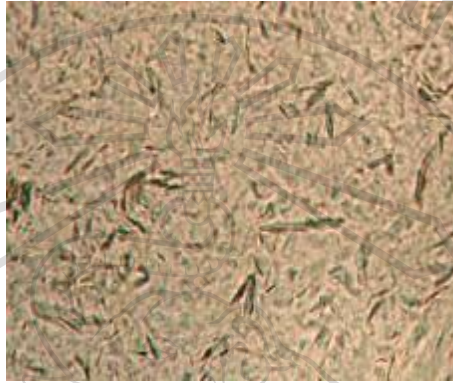
ขนิษฐา (2550) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของน้ำผึ้งดอกทานตะวันขณะเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 10 และ 25 องศาเซลเซียส โดยพบว่าที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส น้ำผึ้งดอกทานตะวันจะเริ่มเกิดการตกผลึกในวันที่ 15 แล้วตกผลึกหมดทั้งขวดในวันที่ 35 ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส จะเริ่มเกิดการตกผลึกและเห็นผลึกในวันที่ 21 แล้วตกผลึกทั้งหมดในวันที่ 42 และที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จะเริ่มเห็นผลึกในวันที่ 80 โดยลักษณะผลึกที่เกิดขึ้นในน้ำผึ้งดอกทานตะวันจะมีลักษณะเป็นรูปทรงเรขาคณิต

ธนากรและจิตติธัน (2551) ได้ศึกษาพฤติกรรมของการตกผลึกของน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส พบว่า ลักษณะการก่อตัวเป็นผลึกที่อุณหภูมิห้องของน้ำผึ้งดอกทานตะวันนั้น ผลึกเริ่มต้นเป็นผลึกรูปทรงเรขาคณิต เป็นผลึก 5 เหลี่ยม มีรูปร่างเป็นแท่งยาว เมื่อเวลาผ่านไปจะขยายขนาดทั้งแนวกว้างและแนวยาว หลังจากนั้นผลึกเดี่ยวที่มีขนาดเล็กกว่าจะแทรกเข้าข้างในผลึกใหญ่โดยโดยหันส่วนปลายแหลมไปทิศทางเดียวกันและกลุ่มผลึกขนาดใหญ่ก็จะเคลื่อนมารวมกันอย่างไม่เป็นระเบียบ ผลึกมีขนาดค่อนข้างใหญ่เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า



รูปที่ 2.5 ลักษณะผลึกน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ส่วนที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสนั้นลักษณะการก่อตัวเป็นผลึกจะมีลักษณะเป็นผลึกเรียวยาว หัวท้ายแหลม เมื่อเวลาผ่านไปจะขยายตัวตามแนวยาว หลังจากนั้นผลึกเดี่ยวจะเคลื่อนตัวมาซ้อนทับกัน หัวท้ายท้ายไปในแนวเดียวกันอย่างมีระเบียบ ลักษณะคล้ายต้นหญ้า ผลึกค่อนข้างมีขนาดใหญ่ เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า (ธนากรและจิตติธัน, 2551)



รูปที่ 2.6 ลักษณะผลึกน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส
ที่มา: ขนิษฐา (2550)

2.5 เทคนิคเอนแคปซูลชัน (Encapsulation Techniques)

เทคนิคเอนแคปซูลชันเป็นกระบวนการในการกักเก็บสารประกอบต่างๆ ที่สลายตัวได้ง่ายไว้ภายในระบบ โดยสารประกอบที่ถูกกักเก็บจะเรียกว่า active หรือ core material เช่น สารให้ความหวานในรูปผง วิตามิน แร่ธาตุ สารแอนติออกซิแดนท์ สี สารอาหารต่างๆ เป็นต้น ส่วนสารที่นำมาห่อหุ้มจะเรียกว่า wall materials ซึ่งสารห่อหุ้มที่ดีควรห่อหุ้มสารถูกกักเก็บได้ง่าย ทำให้สารถูกกักเก็บกระจายตัวได้ดีและได้อิมัลชันที่มีความคงตัว ไม่ทำปฏิกิริยากับสารถูกกักเก็บ สามารถห่อหุ้มและกักเก็บสารสำคัญไว้ได้ในระหว่างกระบวนการผลิตและการเก็บรักษา สามารถละลายได้ในตัวทำละลายที่เป็นที่ยอมรับในอุตสาหกรรมอาหาร มีราคาไม่แพง และสามารถปลดปล่อยสารถูกกักเก็บได้อย่างสมบูรณ์ (Madene *et al.*, 2005)

ในอุตสาหกรรมอาหารมักใช้เทคนิคเอนแคปซูลชันเพื่อ

1. ป้องกันการสลายตัวของสารถูกกักเก็บโดยลดการทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อมภายนอก เช่น ความร้อน แสง ความชื้นและอากาศ
2. ช่วยรักษากลิ่น
3. ป้องกันการเกิดออกซิเดชัน

4. ลดการระเหยหรืออัตราการถ่ายเทมวลของสารที่ถูกเก็บไปสู่สิ่งแวดล้อมภายนอก
5. ช่วยเพิ่มอายุการเก็บรักษา
6. ควบคุมการปลดปล่อยของสารที่ถูกเก็บ (Madene *et al.*, 2005)

2.5.1 ชนิดของสารห่อหุ้มที่นิยมใช้ในการเอนแคปซูเลชัน

สารห่อหุ้มที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหารมีหลายชนิดแต่ละชนิดจะเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในวิธีการเอนแคปซูเลชันที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สารห่อหุ้มและวิธีการที่นิยมใช้ในเทคนิคเอนแคปซูเลชัน

ประเภท	สารห่อหุ้มสำหรับเทคนิคเอนแคปซูเลชัน	วิธีการที่นิยมใช้ในเทคนิคเอนแคปซูเลชัน
คาร์โบไฮเดรต	สตาร์ช, มอลโตเดกซ์ตริน, ไคโตซาน, คอนไซรี่ป, เดกซ์แทรน (dextran), แป้งคัดแปร, ไซโคลเดกซ์ตริน	การอบแห้งแบบพ่นฝอย, การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง, การอัดขึ้นรูป (extrusion), โคอะเซอร์เวชัน (coacervation), อินคลูชัน คอมเพล็กซ์ชัน (Inclusion complexation)
เซลลูโลส	คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส, เมทิลเซลลูโลส, เอทิลเซลลูโลส, เซลลูโลสอะซีเตต-พาทาเลต, เซลลูโลสอะซีเตต-บิวทีเรต-พาทาเลต	โคอะเซอร์เวชัน (coacervation), การอบแห้งแบบพ่นฝอย, เอดิเบิล ฟิล์ม (edible films)
กัม	กัมอคาเซีย (gum acacia) เอการ์ (agar) โซเดียมแอลจิเนต, คาราจีแนน	การอบแห้งแบบพ่นฝอย, การสร้างเม็ดเจล (gel beads)
ลิปิด	เวกซ์, พาราฟิน, บีแวกซ์ (beeswax), ไดเอซิลกลีเซอรอล (diacylglycerols) น้ำมัน, ไขมัน	อิมัลชัน, ลิโปโซม, การก่อฟิล์ม (film formation)
โปรตีน	กลูเตน, เคซีน, เจลลาติน, อัลบูมิน, เปปไทด์	อิมัลชัน, การอบแห้งแบบพ่นฝอย

ที่มา: Desai and Park (2005)

คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate)

คาร์โบไฮเดรต เป็นสารที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในเทคนิคการเอนแคปซูลชันแบบพ่นฝอยเพื่อใช้เป็นสารห่อหุ้ม คาร์โบไฮเดรต เช่นสตาร์ช (starch), มอลโตเดกซ์ตริน (maltodextrin), คอนไซรี่ป (corn syrup solids) และกัมอคาเซีย (acacia gum) สามารถจับกับสารให้กลิ่นรสได้อย่างสมบูรณ์ อีกทั้งยังมีความหลากหลาย ราคาต่ำ มีการกระจายตัวที่ดี สามารถใช้กับอาหารได้และเป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับการเอนแคปซูลชัน นอกจากนี้คาร์โบไฮเดรตมีสมบัติเป็นสารที่มีความหนืดต่ำที่มีปริมาณของแข็งสูงและสามารถละลายได้ดี ซึ่งเป็นสมบัติที่ต้องมีในสารเอนแคปซูลติงเอเจนต์ (encapsulating agent) สตาร์ช และผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากสตาร์ช เช่น มอลโตเดกซ์ตริน และเบต้า-ไซโคลเดกซ์ตริน มักใช้ในการเอนแคปซูลชันสารประกอบที่ให้กลิ่นหอม (Madene *et al.*, 2005)

ตัวอย่างของสารคาร์โบไฮเดรตที่ใช้ในเทคนิคเอนแคปซูลชันมีดังต่อไปนี้

สตาร์ช (starch)

สามารถนำสตาร์ชมาใช้ในการกักเก็บสารให้กลิ่นรส โดยโครงสร้างที่มีลักษณะเหมือนขดลวดของอะไมโลสสามารถใช้กักเก็บสารให้กลิ่นรสได้ การทำให้อนุภาคของสตาร์ชเกิดเป็นโครงสร้างที่มีรูพรุนมากขึ้นอาจทำได้โดยใช้เอมไซม์อะไมเลส การทำแห้งแบบพ่นฝอยของสตาร์ชด้วยโปรตีนหรือสารจำพวกพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีความสามารถในการเป็นสารเชื่อมโยง (bonding agent) อาจทำให้สตาร์ชเกาะตัวรวมกันและทำให้เกิดโครงสร้างที่เป็นรูพรุน ซึ่งรูพรุนที่เกิดขึ้นสามารถใช้ในการกักเก็บสารให้กลิ่นรสได้ (Zeller *et al.*, 1999)

ซูโครส (sucrose)

สามารถนำน้ำตาลซูโครสมาใช้ในเทคนิคเอนแคปซูลชันเพื่อกักเก็บสารให้กลิ่นรสและน้ำมันได้ โดยมีรายงานการวิจัยในการใช้ ระบบอิมัลชันของกัมอราบิก ซูโครส และ เจลาตินในการกักเก็บลิโมนิน โดยใช้เทคนิคการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งพบว่า เมื่อใช้กัมอราบิก ซูโครส และ เจลาตินในอัตราส่วน 1:1:1 โดยน้ำหนัก สามารถกักเก็บลิโมนินได้ถึงร้อยละ 84 เมื่อเทียบกับปริมาณเริ่มต้นที่เติมลงไป (Kaushik and Roos, 2007) อีกทั้งยังมีรายงานการวิจัยในการนำน้ำตาลซูโครสเป็นตัวดูดซับ (adsorbent) สารให้กลิ่นรสเอาไว้ และนำน้ำตาลซูโครสที่ได้ไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางเพื่อใช้เป็นสารที่ให้ทั้งกลิ่นและความหวาน โดยนำผลึกน้ำตาลผ่านตะแกรงร่อน ทำให้แห้งและบดเพื่อทำให้ผลึกน้ำตาลมีพื้นที่ผิวที่มากขึ้น จากนั้นทำการพ่นน้ำตาลซูโครสลงไปใน

ในโตรเจนเหลว และนำไปผ่านกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง เพื่อผลิตเป็นน้ำตาลซูโครส ในรูป amorphous ที่มีพื้นที่ผิวมากเพื่อที่จะสามารถดูดซับสารให้กลิ่นไว้ได้ (Zeller *et al.*, 1999) มีรายงานการวิจัยโดย Beristain *et al.* (1996) ซึ่งใช้เทคนิคเอนแคปซูลชันแบบตกผลึกร่วม (co-crystallization) ในการกักเก็บน้ำมันจากผิวเปลือกส้มโดยใช้สารละลายน้ำตาลซูโครส จากการศึกษาพบว่า สารละลายน้ำตาลซูโครสมีความสามารถกักเก็บน้ำมันผิวเปลือกส้มได้มากกว่าร้อยละ 90

น้ำตาลซูโครสยังมีคุณสมบัติอีกหลายอย่างเช่น สามารถละลายในน้ำได้ดี ราคาไม่แพง มีอายุการเก็บรักษานานเมื่อเก็บไว้ในที่อุณหภูมิห้อง (Kaushik and Roos, 2007) แต่ผลึกน้ำตาลอาจเกิดการเกาะตัวกันเมื่ออยู่ในสภาวะที่มีอุณหภูมิและความชื้นที่ไม่แน่นอนเป็นผลทำให้เกิดการดูดซับความชื้น และเกิดการละลายของผิวหน้าผลึกกลายเป็นชั้น amorphous ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิเหนียว (Barbosa-Canovas and Juliano, 2005) ดังนั้นเพื่อป้องกันปัญหาการเกาะตัวกันของผลึกจึงควรเติมสารป้องกันการจับตัวเป็นก้อน (anticaking) ลงไป อีกทั้งยังช่วยปรับปรุงคุณสมบัติในการไหลอีกด้วย

นอกจากนั้นการใช้น้ำตาลซูโครสยังมีข้อจำกัดเรื่องการประยุกต์ใช้ เนื่องจากน้ำตาลซูโครสให้ความหวานค่อนข้างมาก ดังนั้นจึงไม่เหมาะกับการนำไปเป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์สำหรับผู้ป่วยโรคเบาหวาน โรคหัวใจและหลอดเลือด โรคความดันโลหิตสูง เป็นต้น โดยผู้ป่วยโรคเบาหวานซึ่งไม่สามารถผลิตอินซูลินหรือผลิตอินซูลินได้ปริมาณน้อยเมื่อรับประทานน้ำตาลซูโครสเข้าไปอาจทำให้เกิดภาวะน้ำตาลในเลือดสูง อีกทั้งการรับประทานอาหารหวานจัดเป็นประจำจะทำให้ระดับอินซูลินในร่างกายเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และถ้าระดับอินซูลินเพิ่มขึ้นสูงมากเป็นประจำจะส่งผลต่อผนังเส้นเลือดทำให้เส้นเลือดเสื่อมได้ง่าย (สรจักร, 2544) ดังนั้นการใช้ผลึกน้ำผึ้งซึ่งเป็นน้ำตาลกลูโคสที่ได้จากธรรมชาติจึงเป็นทางเลือกแทนการใช้น้ำตาลซูโครสเนื่องจากให้ความหวานที่ต่ำกว่าน้ำตาลซูโครสประมาณร้อยละ 40 และน้ำตาลกลูโคสยังเป็นน้ำตาลชนิดที่ร่างกายสามารถดูดซึมไปใช้ประโยชน์ได้เร็วที่สุด จึงเหมาะสำหรับผู้ที่มีอาการอ่อนเพลียซึ่งต้องการพลังงานอย่างรวดเร็ว แต่สำหรับในผู้ป่วยเบาหวานควรระมัดระวังในการบริโภคน้ำตาลกลูโคสเนื่องจากมีผลในการเพิ่มระดับน้ำตาลในเลือดอย่างรวดเร็ว (วิไลฐ, 2551)

มอลโตเดกซ์ตริน (maltodextrin)

มอลโตเดกซ์ตรินจัดเป็นสารห่อหุ้มชนิดหนึ่งที่ยอมรับใช้ในเทคนิคเอนแคปซูลชัน โดยมอลโตเดกซ์ตรินเกิดจากการไฮโดรไลซิสแป้งข้าวโพดบางส่วนด้วยกรดหรือเอนไซม์ โดยคู่ได้จากค่า dextrose equivalents (DEs) ค่า DE วัดได้จากระดับการไฮโดรไลซิสพอลิเมอร์ของแป้ง (degree

of starch polymer hydrolysis) (Rahman, 1995) มอลโตเดกซ์ตรินที่มีค่า DE ต่างกันจะมีสมบัติทางเคมี ภายภาพแตกต่างกัน เช่นความสามารถในการละลาย อุณหภูมิเยือกแข็ง ความหนืด เป็นต้น อย่างไรก็ตามมอลโตเดกซ์ตรินที่มีค่า DE เหมือนกัน อาจจะมีสมบัติต่างกันได้ขึ้นอยู่กับวิธีการไฮโดรไลซิสแหล่งของสตาร์ช (แป้งข้าวโพด มันฝรั่ง ข้าว) และอัตราส่วนของอะไมโลสต่ออะไมโลเพกติน (Klinkesorn *et al.*, 2004) มอลโตเดกซ์ตรินที่มีค่า DE สูงจะมีค่า T_g ต่ำกว่าและมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า เช่น มอลโตเดกซ์ตรินที่มีค่า DE 10 และ 20 มี T_g เท่ากับ 160 และ 141 องศาเซลเซียส เมื่อค่า a_w เท่ากับ 0.00 และมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 1800 และ 900 ตามลำดับ (Rahman, 1995) ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของมอลโตเดกซ์ตรินที่มี DE ต่างกัน

a_w	DE5 ^a			DE10 ^b			DE15 ^c			DE20 ^d			DE25 ^e			DE36 ^f		
	X_{wo}	T_{go} (°C)	X_{wo}	T_{go} (°C)	X_{wo}	T_{go} (°C)	X_{wo}	T_{go} (°C)	X_{wo}	T_{go} (°C)	X_{wo}	T_{go} (°C)	X_{wo}	T_{go} (°C)	X_{wo}	T_{go} (°C)		
0.00	0.000	188	0.000	160	0.000	-	0.000	141	0.000	121	0.000	100						
0.11	0.019	135	0.020	103	0.022	99	0.024	86	0.021	83	0.017	67						
0.23	0.038	102	0.047	84	0.046	83	0.052	73	0.044	60	0.038	45						
0.33	0.043	90	0.051	66	0.057	65	0.054	42	0.049	36	0.049	31						
0.43	0.059	87	0.065	60	0.066	57	0.058	40	0.059	34	0.054	27						
0.52	0.082	58	0.076	38	0.074	40	0.084	37	0.081	29	0.098	6						
0.75	0.096	44	0.095	30	0.102	8	0.139	-9	0.148	-18	0.170	-35						
0.85	0.150	23	0.158	-6	0.166	-15	0.208	-32	0.215	-39	0.238	-52						

^a Maltrin M040; Molecular weight: 3600 ^d Maltrin M200; Molecular weight: 900

^b Maltrin M100; Molecular weight: 1800 ^e Maltrin M250; Molecular weight: 720

^c Maltrin M150; Molecular weight: 1200 ^f Maltrin M365; Molecular weight: 500

Note: Heating rate: 5°C/min

ที่มา: Rahman (1995)

มอลโตเดกซ์ตรินเป็นสารที่ได้รับการยอมรับที่ดีทั้งทางด้านราคา และประสิทธิภาพ เนื่องจากไม่มีรสชาติ มีความหนืดต่ำ มักใช้เป็นสารเพิ่มความคงตัวและเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ สามารถละลายในน้ำเย็นได้ดี อีกทั้งยังทำหน้าที่เป็นสารป้องกันการเกาะติดและสามารถปลดปล่อยสารให้รสชาติได้เร็ว (Madene *et al.*, 2005) เมื่อผสมมอลโตเดกซ์ตรินที่มีค่า DE ต่ำกว่า ลงไปใน

ผลิตภัณฑ์ที่มีความเหนียว และนำไปทำให้แห้งจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีการเกาะติดต่ำ เนื่องจากมอลโตเดกซ์ตรินที่มีค่า DE ต่ำ จะมีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า และมีค่า T_g สูงกว่า ซึ่งสามารถทำให้แห้งได้ง่าย ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความเหนียวลดลง ในขณะที่มอลโตเดกซ์ตรินที่มีค่า DE สูงจะมีค่า T_g ต่ำ อาจทำให้แห้งได้ยากกว่า เนื่องจากวัตถุดิบยังคงอยู่ในสถานะของไหลภายใต้สภาวะการทำแห้งปกติ (Onwulata, 2005)

อย่างไรก็ตาม มีรายงานการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการเก็บรักษาสารให้รสชาติ 12 ชนิดขึ้นอยู่กับ DE ของมอลโตเดกซ์ตริน โดยมอลโตเดกซ์ตรินที่มีค่า DE 10 จะมีความสามารถในการเก็บรักษาที่ดีที่สุด ถ้า DE มากขึ้น (DE 15, 20, 25, 36.5) การกักเก็บสารให้รสชาติจะลดลง อีกทั้งการกักเก็บสารให้รสชาติระหว่างการเก็บรักษาจะเพิ่มขึ้นตามค่า DE ของมอลโตเดกซ์ตริน อีกทั้งมอลโตเดกซ์ตรินที่มี DE สูง จะป้องกันน้ำมันเปลือกส้มที่ถูกกักเก็บโดยจะต่อต้านการเกิดออกซิเดชัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของ DE ต่อระบบของสารหอม (Madene, *et al.*, 2005)

Duangmal *et al.* (2008) ได้ศึกษาความคงตัวของสีและสารแอนโทไซยานิน (anthocyanin) ในกระเจี๊ยบที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยเติมมอลโตเดกซ์ตริน (maltodextrin) และทรีฮาโลส (trehalose) เป็นสารเพิ่มความคงตัวพบว่า การเติมมอลโตเดกซ์ตรินและทรีฮาโลสจะช่วยให้สารแอนโทไซยานินสลายตัวช้าลงซึ่งเป็นผลมาจากการที่มีปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ต่ำในผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งและจากการถูกห่อหุ้มด้วยสารเพิ่มความคงตัว

โปรตีน (Protein)

สารจำพวกไฮโดรคอลลอยด์มักจะถูกใช้เป็นส่วนประกอบสำหรับกักเก็บสารให้กลิ่นรส ส่วนอาหารจำพวกโปรตีน เช่น โซเดียมเคซีเนต (sodium caseinate) เวย์โปรตีน (whey protein) โปรตีนถั่วเหลือง (soy protein isolate) และ เจลาติน (gelatin) เป็นต้น โปรตีนที่มีคุณสมบัติที่ดีเช่น การละลาย, ความหนืด, ความเป็นอิมัลชัน (emulsion) และคุณสมบัติในการก่อฟิล์ม สามารถนำมาใช้ในเทคนิคแอนแคปซูลชันได้ แต่โดยส่วนใหญ่แล้วยังไม่นิยมใช้โปรตีนในเทคนิคแอนแคปซูลชันมากนักเพราะความแตกต่างของกลุ่มเคมี (chemical group) และความมีขั้วของ โมเลกุล (amphiphilic properties) ความสามารถในการเชื่อมโยงและการเกิดปฏิกิริยากับสารอื่นๆ

เวย์โปรตีนสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นส่วนประกอบได้โดยเวย์โปรตีนเป็นตัวช่วยในการเกิดออกซิเดชันของไมโครแคปซูลน้ำมันจากส้ม (Madene, *et al.*, 2005) ส่วน Fäldt and Bergenstahl (1996) พบว่าเวย์โปรตีนเข้มข้น (whey protein concentrate) มีความสามารถในการกักเก็บน้ำมันถั่วเหลืองค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับ โซเดียมเคซีเนต (sodium caseinate)

โปรตีนอื่นๆ เช่น เจลาตินซึ่งได้จากการไฮโดรไลซิสคอลลาเจน โดยเจลาตินเป็นวัสดุที่สามารถละลายน้ำได้ ไม่เป็นพิษ ราคาไม่แพงและสามารถหาได้ง่าย สามารถก่อฟิล์มได้ดี เจลาตินมีคุณลักษณะทางเคมีและเคมีกายภาพที่เหมาะสมในการเอนแคปซูเลชัน เช่นเจลาตินสามารถเปลี่ยนรูปจากเจลไปเป็นของเหลวได้เมื่อทำให้เย็นลง (Rahman, 2007) และมีความสามารถในการก่อฟิล์ม มักนิยมใช้เจลาตินในการเอนแคปซูเลชันแบบ coacervation นอกจากนี้ในการทำแห้งแบบพ่นฝอย การเติมเจลาตินร้อยละ 1 ลงไปในส่วนผสมของมอลโตเดกซ์ตรินและกัมอราบิกจะเพิ่มการกักเก็บเอทิลบิวทีเรต (ethyl butyrate) และสามารถควบคุมการปลดปล่อยได้ดี (Madene *et al.*, 2005)

Jones *et al.* (2009) ได้ศึกษาการทำไบโอโพลิเมอร์จากสารประกอบเชิงซ้อนของโปรตีนและพอลิแซ็กการไรด์จากเบต้า-แลคโตโกลบูลิน (β -lactoglobulin) และเพกตินจากหัวบีท ซึ่งพบว่าไบโอโพลิเมอร์ชนิดนี้มีความเสถียรในช่วงพีเอชที่กว้าง จึงสามารถนำไบโอโพลิเมอร์ชนิดนี้มาใช้ในเทคนิคเอนแคปซูเลชันเพื่อใช้เป็นสารห่อหุ้มในการเอนแคปซูเลชันไขมัน

Ortiz *et al.* (2009) ได้ศึกษาการเอนแคปซูเลชัน casein hydrolysate โดยการอบแห้งแบบพ่นฝอยโดยใช้โปรตีนถั่วเหลืองเป็นสารห่อหุ้มเพื่อลดความขมของผลิตภัณฑ์ พบว่าโปรตีนถั่วเหลืองช่วยลดความขมของผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อีกทั้งยังช่วยลดการดูดซับความชื้นอีกด้วย

2.5.2 วิธีการผลิตแคปซูล

เทคนิคเอนแคปซูเลชันสามารถทำได้หลายวิธี ตัวอย่างเช่น Coacervation, Molecular inclusion, Spray-drying, Extrusion, Absorption, Adsorption และ Freeze drying (Madene *et al.*, 2005) เทคนิคเอนแคปซูเลชันเหล่านี้ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเป็นการผสมให้เกิดอิมัลชันของสารถูกกักเก็บ เช่นการกักเก็บน้ำมันหอมระเหยด้วยสารละลายของสารห่อหุ้มจำพวกคาร์โบไฮเดรตหรือโปรตีนในการเอนแคปซูเลชัน ขั้นตอนที่ 2 เป็นการทำให้อิมัลชันแห้งหรือเย็น

Coacervation

Coacervation คือการแยกวัฏภาคจากพอลิเมอร์ที่เป็นเนื้อเดียวกันออกเป็น 2 วัฏภาค วัฏภาคแรกจะเป็นวัฏภาคที่ประกอบไปด้วยพอลิเมอร์เป็นส่วนประกอบหลัก วัฏภาคที่ 2 จะเป็นวัฏภาคของตัวทำละลาย ตัวอย่างการเอนแคปซูเลชันโดยกระบวนการ coacervation สามารถทำได้โดยละลายโปรตีนที่สามารถก่อเจลได้ในน้ำ จากนั้นทำให้สารถูกกักเก็บอยู่ในรูปอิมัลชันในสารละลายโปรตีน จากนั้นทำให้เกิดการแยกวัฏภาคโดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ พีเอช หรือการเติมสารละลายเกลือเข้มข้น ท้ายสุดเป็นการแยกไมโครแคปซูลที่ได้โดยการกรองหรือการปั่นเหวี่ยง

(Rahman, 2007) เทคนิคการเอนแคปซูลเลชันแบบ coacervation ไม่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ยุ่งยากและมีราคาแพง อีกทั้งการหาความเข้มข้นของสารห่อหุ้มที่เหมาะสมในการทำให้เป็นอิมัลชันและเกิดการแยกตัวถูกทำให้ได้ยาก (Madene *et al.*, 2005)

Molecular inclusion หรือ Inclusion complexation

Molecular inclusion เป็นเทคนิคเอนแคปซูลเลชันที่ไม่เหมือนกับวิธีการอื่น เนื่องจากเกิดขึ้นในระดับโมเลกุล โดยเป็นการรวมโมเลกุลเข้ามาไว้ด้วยกัน (molecular inclusion) โดยใช้เบต้า-ไซโคลเดกซ์ทริน (β -cyclodextrin) เป็นสารห่อหุ้ม

ไซโคลเดกซ์ทรินเป็นแป้งตัดแปรเกิดจากไฮโดรไลซิสแป้งโดยการใช้เอนไซม์ หลังจากการไฮโดรไลซิสโดยการใช้เอนไซม์ ปลายทั้งสองด้านของโครงสร้างจะต่อเข้าด้วยกันจนโมเลกุลกลายเป็นวง ทำให้โครงสร้างภายนอกของโมเลกุลเป็นส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic) ในขณะที่ภายในเป็นส่วนที่กลัวน้ำ (hydrophobic) ทำให้สารที่ไม่มีขั้วถูกกักเก็บไว้ภายในโครงสร้างของไซโคลเดกซ์ทรินได้ การใช้เบต้า-ไซโคลเดกซ์ทรินเป็นสารห่อหุ้มในเทคนิคเอนแคปซูลเลชันกับอาหารนั้นค่อนข้างจำกัด อีกทั้งไซโคลเดกซ์ทรินยังมีราคาแพงอีกด้วย (Madene *et al.*, 2005)

Spray-drying

เทคนิคการทำแห้งแบบพ่นฝอยเป็นวิธีการที่ใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมอาหาร ในการกักเก็บสารให้กลิ่นรสและสารที่ระเหยได้ ข้อดีของกระบวนการคือสามารถติดตามและควบคุมกระบวนการผลิตได้ อีกทั้งยังเป็นกระบวนการการผลิตที่มีราคาถูก สามารถเลือกใช้สารห่อหุ้มได้หลายชนิด สามารถกักเก็บสารให้กลิ่นรสได้ดี ผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีความคงตัวที่ดีและสามารถผลิตได้อย่างต่อเนื่องในระดับการผลิตขนาดใหญ่ แต่เป็นกระบวนการที่ใช้ความร้อนดังนั้นจึงทำให้สารให้กลิ่นที่ต้องการกักเก็บเกิดการสูญเสียในระหว่างการทำแห้งและบางครั้งสารให้กลิ่นรสที่ต้องการกักเก็บอาจจะไปอยู่บนพื้นผิวของแคปซูล ซึ่งอาจทำให้เกิดการออกซิเดชันส่งผลทำให้สารให้กลิ่นรสเกิดการเปลี่ยนแปลง (Madene *et al.*, 2005)

Extrusion

Extrusion สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในเทคนิคเอนแคปซูลเลชันได้ โดยทำให้สารถูกกักเก็บกระจายตัวในสารประกอบคาร์โบไฮเดรตที่หลอมละลาย จากนั้นจะถูกดันผ่านหัวตัด ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะลงไปสู่ของเหลวที่ไม่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ (dehydrating liquid) (Rahman, 2007) ซึ่งมักนิยมใช้ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (isopropyl alcohol) เพื่อทำให้แคปซูลที่ได้แข็งตัวและกักเก็บสารไว้ได้

โดยความดันและอุณหภูมิที่ใช้ในการเอนแคปซูเลชันจะมีค่าน้อยกว่า 100 psi และ 115 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ข้อดีของวิธีการนี้คือสารถูกกักเก็บจะถูกห่อหุ้มโดยสารห่อหุ้มอย่างสมบูรณ์ อีกทั้งมีความคงตัวที่ดี ยับยั้งการเกิดออกซิเดชันและมีอายุการเก็บรักษาที่ยาวนาน แต่เมื่อเทียบกับวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอยพบว่ามีราคาแพงกว่าถึงเกือบ 2 เท่า (Madene *et al.*, 2005)

Absorption และ Adsorption

การใช้เทคนิคเอนแคปซูเลชันโดยอาศัยการดูดซึม (absorption) และการดูดซับ (adsorption) เทคนิคเอนแคปซูเลชัน โดยอาศัยการดูดซึมนั้น สารประกอบที่ต้องการจะกักเก็บ เช่น สารให้กลิ่นรส สารสีจะถูกดูดซึมเข้าสู่สารห่อหุ้ม ส่วนเทคนิคเอนแคปซูเลชันโดยอาศัยการดูดซับนั้น สารประกอบที่ต้องการกักเก็บจะอยู่ที่ผิวของสารห่อหุ้มเท่านั้น (Madene *et al.*, 2005) ซึ่งการดูดซับของสารให้กลิ่นรสบนสารห่อหุ้มนั้น สารห่อหุ้มควรมีพื้นที่ผิวมากเพื่อจะใช้ในการกักเก็บ โดยสารห่อหุ้มจะเกิดการรวมตัวกันทำให้เกิดโครงสร้างที่มีรูพรุน ซึ่งรูพรุนที่อยู่ระหว่างการเกาะตัวของสารห่อหุ้มจะสามารถกักเก็บสารให้กลิ่นและใช้ประโยชน์จากโครงสร้างที่เป็นรูพรุนนี้ในการควบคุมการปลดปล่อยสารให้กลิ่นด้วย การสร้างส่วนประกอบของอาหารให้มีรูพรุนเพื่อให้มีพื้นที่ผิวที่สามารถดูดซับสารให้กลิ่นรสได้นั้น น้ำตาลที่อยู่ในรูป amorphous จะเป็นผลิตภัณฑ์ลำดับแรกๆที่เลือกใช้ในการดูดซับสารให้กลิ่นรส (Zeller *et al.*, 1999)

เทคนิคการเอนแคปซูเลชันแบบการตกผลึกร่วม (co-crystallization) ของสารให้กลิ่นรสกับน้ำตาลและเทคนิคการดูดซึมของสารให้กลิ่นรสในรูพรุนของสารจำพวกคาร์โบไฮเดรตยังเป็นเทคนิคเอนแคปซูเลชันที่ใช้กันน้อยในทางการค้า ถึงแม้ว่าเทคนิคเอนแคปซูเลชันแบบนี้จะเปลี่ยนสารให้กลิ่นรสที่อยู่ในรูปของเหลวให้กลายเป็นอนุภาคขนาดเล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่การป้องกันการสูญเสียองค์ประกอบของสารให้กลิ่นรสที่ระเหยได้ยังมีค่อนข้างน้อย ผลึกน้ำตาลซูโครสจึงยังเป็นสารห่อหุ้มที่ไม่ดีสำหรับสารให้กลิ่นรส (Zeller *et al.*, 1999) จึงมีรายงานวิจัยในการทำให้ผลึกของแลคโตสและกลูโคสเกิดเป็นโครงสร้างที่มีรูพรุนเพื่อที่จะสามารถใช้ในการดูดซับสารให้กลิ่นรสในรูปของเหลวเข้าไป (Koshida *et al.*, 1983)

นอกจากนั้นยังมีการใช้เทคนิคการอบแห้งแบบพ่นฝอยเพื่อทำให้อนุภาคทรงกลมที่มีความหนาแน่นต่ำเช่น ซูโครส น้ำตาลข้าวโพด (corn sugars) และมอลติตอล (maltitol) ในการทำให้มีรูพรุนสูงในโครงสร้างและมีพื้นที่ผิวมากเพื่อให้เหมาะสำหรับการดูดซับสารให้กลิ่นรสในรูปของเหลว (Zeller *et al.*, 1999) นอกจากนั้นมอลโตเดกซ์ทรินที่อยู่ในรูป amorphous อาจเกิดการเกาะตัวกันจนเป็นอนุภาคที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนทำให้สามารถดูดซับสารให้กลิ่นรสได้

วิธีการที่ใช้ในการทำให้ผลิตภัณฑ์อาหารที่สามารถละลายได้ในน้ำและเป็นตัวกลางสำหรับกักเก็บสารสำคัญ เช่น สารจำพวกคาร์โบไฮเดรตที่มีพื้นที่ผิวมากๆ อาจทำได้โดยการพ่นฝอยสารละลายลงบนของเหลวเย็นจัด (cryogenic liquids) จากนั้นทำให้แห้งที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการยุบตัว (collapse temperature) หรือทำให้แห้งโดยการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็ง อีกทั้งการพ่นสารละลายลงในเอทานอลเย็นตามด้วยการอบแห้งในตู้อบสูญญากาศก็สามารถทำให้เกิดโครงสร้างที่มีพื้นที่ผิวสูงเพื่อประสิทธิภาพในการดูดซับสารให้กลิ่นรสได้เช่นกัน

น้ำตาลและเกลือที่มีพื้นที่ผิวมากได้นำมาใช้ในเทคนิคการดูดซับ โดยสารคาร์โบไฮเดรตที่ใช้จะเตรียมจากน้ำตาลซูโครส กลูโคส และฟรักโทส โดยน้ำตาลเหล่านี้จะเกิดการเสียสภาพได้ง่ายเนื่องจากความดันไอของน้ำ ซึ่งสารประกอบระหว่างน้ำตาลและเกลือจะมีความคงตัวมากกว่าการใช้น้ำตาลเพียงอย่างเดียว สารเหล่านี้จะมีลักษณะเฉพาะเนื่องจากสามารถใช้เป็นส่วนประกอบในอาหารเพื่อช่วยเพิ่มกลิ่นและรสชาติของอาหารแห้ง แม้แต่ในเครื่องดื่มผสมก็ยังคงต้องการสารที่สามารถละลายในน้ำได้ดีอีกด้วย (Zeller *et al.*, 1999)

จากลักษณะ โครงสร้างของผลึกน้ำผึ้งดอกทานตะวัน ซึ่งเป็นผลึกขนาดเล็ก มีรูปร่างเรขาคณิต โดยผลึกจะมีการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (crystal matrix) (รูปที่ 2.5) ทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้น การรวมกันเป็นกลุ่มของผลึกน้ำผึ้งทำให้เกิดช่องว่างภายใน ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นสารห่อหุ้มจากธรรมชาติที่ใช้ในการกักเก็บสารต่างๆ เอาไว้โดยอาศัยเทคนิคเอนแคปซูลชันแบบ physical adsorption

การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze Drying)

การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying) ซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการเอนแคปซูลชันสารประกอบที่สามารถละลายน้ำได้และสารจำพวกกลิ่นรสที่ได้จากธรรมชาติ (Desai and Park, 2005) รวมถึงสารที่ไวต่อความร้อน (heat sensitive materials) การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง เป็นกระบวนการระเหิดของน้ำแข็งซึ่งเป็นกลไกหลักของการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็ง โดยขั้นตอนแรกของการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งคือการแช่เยือกแข็งอาหาร อาหารชิ้นเล็กๆจะถูกแช่เยือกแข็งอย่างรวดเร็วเพื่อให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กและเพื่อลดความเสียหายที่จะเกิดกับเซลล์ของอาหาร หลังจากนั้นน้ำแข็งจะถูกกำจัดออกโดยการระเหิดไปเป็นไอน้ำทันทีโดยไม่ผ่านการละลาย ภายใต้สภาวะการทำแห้งต่ำกว่าจุด triple point ของน้ำ คือ 0 องศาเซลเซียสและความดัน 611 ปาสคาล ไอน้ำจะถูกกำจัดออกจากอาหารอย่างต่อเนื่องด้วยการรักษาความดันในตู้ให้ต่ำกว่าความดันไอน้ำที่ผิวของน้ำแข็ง ไอน้ำจะถูกกำจัดออกไปด้วยปั๊มสุญญากาศและกลั่นตัวบนขดลวดทำความเย็น (Fellows, 2000)

เนื่องจากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นการใช้ความดันต่ำเพื่อกำจัดน้ำออกจาก วัตถุประสงค์ของแข็ง (น้ำแข็ง) ให้กลายเป็นไอโดยไม่ผ่านวัฏภาคของเหลวจนกระทั่งวัฏดุติบแข็งตัวและ แห้ง โดยกระบวนการทั้งหมดจะเกิดที่อุณหภูมิต่ำ โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำแห้งแบบ แช่เยือกแข็งถ้าอยู่ในบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมจะสามารถเก็บไว้ได้เป็นระยะเวลานาน (Ramaswamy and Marcotte, 2006) มีรสชาติและคุณค่าทางอาหารที่ดี โดยสารประกอบจำพวกกลีโคไซด์จะไม่ระเหิด ไปด้วยน้ำแต่จะถูกเก็บอยู่ในโครงสร้างของอาหาร เป็นผลให้สามารถกักเก็บกลีโคไซด์ได้ถึงร้อยละ 80-100 (Fellows, 2000) อีกทั้งยังคงรักษาคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี ชีววิทยาและคุณภาพทาง ประสาทสัมผัสได้เหมือนกับผลิตภัณฑ์เริ่มต้น อีกทั้งการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งยังลดการสูญเสีย คุณภาพเนื่องมาจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลทั้งที่เกิดจากเอนไซม์และไม่ใช้เอนไซม์ ช่วยรักษาสี และวิตามินของอาหาร (Ramaswamy and Marcotte, 2006) อีกทั้งองค์ประกอบต่างๆของอาหารที่ไว ต่อความร้อน จึงไม่มีการสูญเสียคุณภาพของผลิตภัณฑ์หรือสูญเสียไปน้อยมาก การเคลื่อนย้ายของ ผลึกน้ำแข็งจะทำให้เกิดโครงสร้างที่เป็นรูพรุน ทำให้ผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มที่จะละลายน้ำได้เร็ว (Rahman and Perera, 1999) และค่อนข้างเปราะ อย่างไรก็ตามรูพรุนของโครงสร้างทำให้ออกซิเจน สามารถเข้าไปในโครงสร้างอาหารและก่อให้เกิดการออกซิเดชันของไขมันได้ ดังนั้นจึงควรเก็บ รักษาผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งในบรรจุภัณฑ์ที่บรรจุก๊าซเฉื่อย (Fellows, 2000)

จากการศึกษาเปรียบเทียบการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze drying), การทำแห้งแบบ พ่นฝอย (spray drying), การอบแห้งแบบถาด (tray drying) และการอบแห้งแบบลูกกลิ้ง ทรงกระบอก (drum drying) ในการผลิตแคปซูลของน้ำมันสั้มาเลนเซียด้วยกัมมอราบิกและ แป้งดัดแปร (modified starch) พบว่าการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นกระบวนการที่ทำให้ได้น้ำมัน สั้มาเลนเซียผงตามคุณสมบัติที่ต้องการมากที่สุด (Buffo and Reineccius, 2001) และจากการศึกษา เปรียบเทียบการเกิดออกซิเดชันของเมทิลลิโนเลอเต (methyl linoleate) เมื่อถูกห่อหุ้มด้วยกัมมอราบิก โดยการทำให้แห้งด้วยตู้อบลมร้อนกับการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง พบว่าเมทิลลิโนเลอเตที่ถูก เอนแคปซูลเลชันโดยการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็งจะเกิดการออกซิไดซ์อย่างช้าๆ ที่ทุกระดับ ความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity) และไม่มีการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการเก็บรักษา (Minemoto *et al.*, 1997) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการผลิตไมโครแคปซูลผงของน้ำมันปลาโดย การแช่เยือกแข็ง (freezing) และการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง พบว่าการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะ ช่วยเหลือผลิตภัณฑ์มีการต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่ดี และสามารถรักษารูปทรงของไมโคร แคปซูลไว้ได้ (Madene *et al.*, 2005)

จากตารางที่ 2.6 และ 2.7 แสดงให้เห็นถึงข้อดีและข้อเสียของการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง รวมถึงความแตกต่างระหว่างการอบแห้งแบบดั้งเดิมและการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง จะเห็นได้ว่า

เทคนิคการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งอาจได้รับความนิยมน้อยกว่าเทคนิคอื่นเพราะราคาของการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีราคาสูงกว่าการทำแห้งแบบอื่น โดยมากกว่าเป็น 4 เท่าของการอบแห้งแบบดั้งเดิมและมากกว่าเป็น 50 เท่าของการทำแห้งแบบพ่นฝอย (spray dry) การเก็บรักษาและการขนส่งของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งค่อนข้างแพง อีกทั้งการนำไปประยุกต์ใช้เพื่อทางการค้าค่อนข้างจำกัดเนื่องมาจากกระบวนการที่ใช้เวลานาน (Madene *et al.*, 2005)

อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่ากระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นกระบวนการที่มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงแต่หากวัตถุประสงค์ของการผลิตนั้น เพื่อใช้ผลิตเป็นอาหารเพื่อสุขภาพ โดยยังคงคุณภาพและการรักษาคุณค่าทางโภชนาการ รวมถึงกลิ่น สีและรสชาติของอาหารไว้ได้ อาจทำให้เป็นการเพิ่มมูลค่าแก่ผลิตภัณฑ์อาหาร และคุ้มค่ากับการใช้กระบวนการผลิตที่มีราคาสูงอย่างการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

ตารางที่ 2.6 ข้อดีและข้อเสียของการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

ข้อดี	ข้อเสีย
1. ไม่ถูกทำลายด้วยความร้อน	1. มีราคาสูงกว่าการทำแห้งแบบอื่น
2. สามารถกักเก็บสารให้กลิ่นรสได้	2. ผลิตภัณฑ์จะถูกทำลายโดยการแช่แข็งก่อนที่จะทำให้แห้ง
3. กักเก็บวิตามินไว้ได้ดี	3. ผลิตภัณฑ์จะดูความชื้นเร็ว นอกจากจะเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ที่มีความชื้นต่ำ
4. ได้ผลิตภัณฑ์อบแห้งอย่างรวดเร็ว	4. ผลิตภัณฑ์จะค่อนข้างเปราะ
5. ผลิตภัณฑ์หัดตัวน้อย	5. ผลิตภัณฑ์มักจะมียีสติดลงเมื่อเก็บรักษา
6. ผลิตภัณฑ์มีอายุการเก็บรักษาที่ยาวนานถ้าเก็บในบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสม	
7. ยังคงเก็บรักษากิจกรรมของสารชีวโมเลกุลไว้ได้	

ที่มา: Schwartzberg (2009)

ตารางที่ 2.7 การเปรียบเทียบการอบแห้งแบบดั้งเดิมกับการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

วิธีการอบแห้งแบบดั้งเดิม	วิธีอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง
1. ได้ผลดีกับอาหารที่แห้งง่าย เช่น ผัก เมล็ดธัญพืช	1. ได้ผลดีสำหรับอาหารส่วนใหญ่ แต่การใช้จำกัดขึ้นอยู่กับอาหารที่อบแห้งยากด้วยวิธีอื่น
2. ไม่เหมาะกับผลิตภัณฑ์เนื้อ	2. ได้ผลดีกับเนื้อสุกหรือสด
3. ช่วงอุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง 37-93 องศาเซลเซียส	3. ใช้อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง
4. ความดันบรรยากาศ	4. ความดันต่ำ (27-133 ปาสคาล)
5. อาศัยการระเหยน้ำจากผิวของอาหาร	5. อาศัยการระเหิดของน้ำแข็ง
6. เกิดการเคลื่อนที่ของตัวถูกละลายและอาจเกิดเปลือกแข็ง	6. มีการเคลื่อนที่ของตัวถูกละลายน้อยมาก
7. แรงเค้นในอาหารทำให้เกิดความเสียหายของโครงสร้างและเกิดการหดตัว	7. เกิดความเสียหายของโครงสร้างและเกิดการหดตัวน้อยที่สุด
8. เกิดการกำจัดน้ำอย่างช้าๆและไม่สมบูรณ์	8. เกิดการกำจัดน้ำอย่างสมบูรณ์
9. ได้ของแข็งหรืออาหารแห้งที่มีรูพรุนซึ่งมักจะมี ความหนาแน่นสูงกว่าวัตถุดิบ	9. ได้อาหารแห้งที่มีความหนาแน่นต่ำกว่า วัตถุดิบเริ่มต้น
10. กลิ่นรสผิดปกติ	10. กลิ่นรสไม่เปลี่ยนแปลง
11. สีคล้ำลง	11. สีไม่เปลี่ยนแปลง
12. คุณค่าทางโภชนาการลดลง	12. คุณค่าทางโภชนาการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก
13. ต้นทุนส่วนใหญ่ต่ำ	13. ต้นทุนสูง อาจสูงถึง 4 เท่าของวิธีการอบแห้งแบบดั้งเดิม

การอบแห้งแบบสุญญากาศ (Vacuum drying)

นอกจากนั้นยังมีเทคนิคการอบแห้งแบบสุญญากาศ (vacuum drying) ซึ่งต่างจากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง โดยที่ผลิตภัณฑ์จะไม่ผ่านการแช่เยือกแข็ง แต่สามารถทำให้อาหารแห้งได้โดยไม่ใช้อุณหภูมิสูงที่สภาวะความดันต่ำเพื่อทำให้น้ำระเหยที่อุณหภูมิต่ำกว่าที่สภาวะความดันบรรยากาศ การขาดอากาศระหว่างการอบแห้งซึ่งจะทำให้ลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และช่วยปรับปรุงสี เนื้อสัมผัสและกลิ่นของผลิตภัณฑ์ของอาหารอบแห้ง (Rahman and Perera, 1999) การกำจัดน้ำที่มากขึ้นและการทำให้แห้งภายใต้อุณหภูมิต่ำจะป้องกันองค์ประกอบต่างๆของอาหารที่ไวต่อความร้อน การระเหยของน้ำจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากสุญญากาศ การเคลื่อนที่ของน้ำที่รวดเร็วจะทำให้โครงสร้างภายในผลิตภัณฑ์เกิดการพองตัวหรือมีลักษณะเป็นโฟม (Ramaswamy and Marcotte, 2006) แต่กระบวนการนี้จำเป็นต้องมีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสูง จึงเหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูงหรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการให้มีความชื้นต่ำโดยไม่เกิดการทำลายผลิตภัณฑ์ ชนิดของเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศมี 4 ชนิด (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2552) ได้แก่

Vacuum shelf dryer เป็นระบบที่ง่ายที่สุดสำหรับเครื่องอบแห้งสุญญากาศ เครื่องประกอบด้วยตู้สุญญากาศ ซึ่งภายในมีชั้นรองรับถาดวางผลิตภัณฑ์ ตัวชั้นอาจได้รับความร้อนจากไฟฟ้าซึ่งจะถ่ายเทความร้อนไปยังอาหาร โดยการนำความร้อนหรือใช้อากาศร้อนเป็นตัวพาความร้อนไปยังชั้นผลิตภัณฑ์ ตัวตู้สุญญากาศจะต่อกับอุปกรณ์สร้างระบบสุญญากาศที่อยู่ภายนอกตู้ ซึ่งอาจเป็นปั๊มสุญญากาศหรืออุปกรณ์กำจัดไอน้ำ (steam ejector) อุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับระบบคือคอนเดนเซอร์ซึ่งเป็นตัวเก็บไอน้ำอาจอยู่ภายในหรือนอกตู้ แต่ควรติดตั้งอยู่ก่อนหน้าปั๊มสุญญากาศเพื่อป้องกันไม่ให้ไอน้ำเข้าไปในปั๊ม เครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบนี้เหมาะสำหรับการผลิตแบบกะ (batch) สามารถบำรุงรักษาได้ง่าย เหมาะสำหรับการใช้ระดับสุญญากาศสูงๆ สามารถใช้ได้กับผลิตภัณฑ์ในทุกรูปแบบตั้งแต่รูปของเหลว ของเหลวเข้มข้น และเป็นผง (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2552)

Conical rotating vacuum dryer เป็นการผลิตแบบกะ เป็นถังสุญญากาศทรงกระบอกหมุน ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการเคลื่อนไหลผ่านผนังของถังที่หุ้มด้วยชั้นของน้ำร้อนรอบๆ ซึ่งเป็นการเพิ่มความร้อนให้กับผลิตภัณฑ์อย่างทั่วถึง เหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นผง และเป็นชิ้น โดยผลิตภัณฑ์นั้นไม่ควรเกาะตัวกันหรือติดผนังซึ่งจะทำให้ลดอัตราการถ่ายเทความร้อนและการอบแห้ง

Rotary vacuum dryer เป็นเครื่องที่มีประสิทธิภาพสูง มีลักษณะเป็นลูกกลิ้งแนวนอนไม่เคลื่อนที่ หุ้มด้วยชั้นของน้ำร้อน เป็นการทำงานแบบกะใช้ได้กับผลิตภัณฑ์หลายชนิดและต้องการระดับสุญญากาศสูงๆ

Continuous vacuum drying เป็นการผลิตแบบต่อเนื่อง โดยการอบด้วยระบบสุญญากาศ ร่วมกับสายพานให้ความร้อน (belt dryer) ให้ความร้อนโดยเครื่องให้ความร้อนแบบอินฟราเรด (infrared heater) หรือให้ความร้อนจากแผ่นร้อนจากด้านบนหรือล่าง จะมีการกลับผลิตภัณฑ์ระหว่างการลำเลียงจากสายพานหนึ่งไปสายพานอีกอันหนึ่ง เพื่อให้ผลิตภัณฑ์แห้งอย่างทั่วถึง เหมาะสำหรับผลไม้เป็นชิ้นๆ การอบแห้งแบบนี้ต้องใช้เงินลงทุนสูงกว่าแบบกะเมื่อใช้กำลังการผลิตที่เท่ากัน

2.5.3 การควบคุมการปลดปล่อยของสารสำคัญในแคปซูล

การควบคุมการปลดปล่อยอาจนิยามได้ว่า เป็นวิธีการที่จะควบคุมสารที่ถูกกักเก็บให้เกิดการปลดปล่อยในสถานที่และเวลาที่ต้องการในอัตราที่เฉพาะเจาะจง มีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมการปลดปล่อยเพื่อความเข้าใจที่มากขึ้นและการนำไปประยุกต์ใช้ที่เหมาะสม การปลดปล่อยสารให้กลั่นรมีหลายกลไก เช่น การแพร่ การสลายตัว การหลอมเหลว และการปลดปล่อยโดยตัวทำละลาย เป็นต้น

การควบคุมการปลดปล่อยโดยการแพร่ (control release by diffusion)

กลไกการปลดปล่อยชนิดนี้เป็นการจำกัดการปลดปล่อยของสารที่ถูกกักเก็บภายในแคปซูลไปสู่พื้นผิวของอนุภาคโดยการควบคุมอัตราการแพร่ของสารที่ถูกกักเก็บ โดยการควบคุมการปลดปล่อยอาจเกิดจากแคปซูลเอง เช่น การควบคุมการปลดปล่อยโดยเมทริกซ์ (matrix-control release) หรือการใช้เมมเบรนที่เติมลงไปในแคปซูลเพื่อใช้ในการควบคุมการปลดปล่อย (membrane-control release) การปลดปล่อยโดยการแพร่ขึ้นกับจลนศาสตร์ระหว่างสารที่ถูกกักเก็บ สารห่อหุ้ม และอัตราของสารที่ถูกกักเก็บที่จะสามารถผ่านสารห่อหุ้มได้ ซึ่งจะถูกรักษาควบคุมโดยคุณสมบัติทางเคมีของไมโครแคปซูลและคุณสมบัติทางกายภาพของสารห่อหุ้ม เช่น โครงสร้างของเมทริกซ์และขนาดของรูพรุน โดยการแพร่จะเกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นในเมทริกซ์ (Rahman, 2007) ขั้นตอนที่สำคัญในการปลดปล่อยสารที่ถูกกักเก็บออกจากระบบ คือการแพร่ของสารที่ถูกกักเก็บไปที่พื้นผิวของเมทริกซ์ โดยสารที่ถูกกักเก็บจะอยู่ระหว่างเมทริกซ์และบริเวณโดยรอบของอาหารและเกิดการส่งผ่านสารที่ถูกกักเก็บจากพื้นผิวของเมทริกซ์ทั้งหมดไป (Madene *et al.*, 2005)

การควบคุมการปลดปล่อยโดยการสลายตัว (control release by degradation)

การปลดปล่อยจากแคปซูลอาจเกิดขึ้นได้จากการสลายตัวโดยการทำให้สารห่อหุ้มเกิดการสลายตัว ตัวอย่างเช่น การใช้เอมไซม์ไลเปสในการทำให้สารห่อหุ้มที่เป็นไขมันเกิดการเสื่อมสลาย อีกทั้งการใช้ค่าพีเอชในการควบคุมการปลดปล่อยเอมไซม์จากไลโปโซม โดยการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชเป็นการทำให้โครงสร้างของฟอสโฟลิปิด ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานของไลโปโซมเปลี่ยนแปลง (Rahman, 2007)

การควบคุมการปลดปล่อยโดยการหลอมเหลว (control release by melting)

กลไกการปลดปล่อยจะเกี่ยวข้องกับการหลอมเหลวของสารห่อหุ้ม โดยความร้อนเพื่อปลดปล่อยสารถูกกักเก็บ มีวัสดุหลายชนิดที่สามารถเกิดการหลอมเหลวและสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารได้ เช่น ไขมัน ไขมันคัดแปรและแว็กซ์ โดยไมโครแคปซูลจะถูกเก็บไว้ที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของสารห่อหุ้ม เมื่อต้องการให้เกิดการปลดปล่อยของสารถูกกักเก็บจะต้องมีการให้ความร้อนในระหว่างการทำอาหารเหนือจุดหลอมเหลวของสารห่อหุ้ม (Rahman, 2007)

การควบคุมการปลดปล่อยโดยตัวทำละลาย (solvent-activated release)

การปลดปล่อยโดยตัวทำละลายเป็นวิธีการควบคุมการปลดปล่อยที่ใช่มากในอุตสาหกรรมอาหาร โดยสารถูกกักเก็บจะต้องเป็นสารที่สามารถละลายได้ในน้ำ น้ำในอาหารจะละลายไมโครแคปซูลและปลดปล่อยสารที่กักเก็บไว้สู่อาหาร หรือน้ำจะทำให้แคปซูลเกิดการพองตัวและเริ่มปลดปล่อยสารที่กักเก็บไว้ภายใน อย่างไรก็ตามสารห่อหุ้มที่ไม่สามารถละลายน้ำได้สามารถทำให้เกิดการละลายได้โดยการเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสม (Madene *et al.*, 2005)

2.6 สมบัติของอาหารผง

คุณภาพของอาหารผงขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพ เคมี และจุลชีววิทยา ซึ่งสมบัติทางกายภาพเป็นสมบัติที่ผู้บริโภคสามารถสัมผัสได้เป็นลำดับแรก สมบัติทางกายภาพที่สำคัญของอาหารผงได้แก่ ความสามารถในการละลาย ความสามารถในการไหล ขนาดและรูปร่างของอนุภาค ส่วนสมบัติทางเคมีที่มีความสำคัญเป็นลำดับแรกคือ ความชื้น

2.6.1 ความสามารถในการละลาย (Solubility)

สมบัติการละลายของอาหารผงมีดังต่อไปนี้ (Barbosa-Cánovas and Vega-Mercado, 1996)

Wettability คือ ความสามารถของอนุภาคผงในการดูดซับน้ำบนพื้นผิวของอนุภาคโดยปัจจัยที่มีผลต่อ Wettability ได้แก่ การเกาะตัวกันเป็นก้อนของอนุภาค จำนวนของอนุภาคที่ดูดซับน้ำได้ พื้นผิวของอนุภาค หรือ การไม่มีอนุภาคที่ไม่เกาะกันเป็นก้อน

Sinkability คือ ความสามารถของอนุภาคผงในการจมลงไปใต้น้ำ หลังจากอนุภาคผงเกิดการดูดซับน้ำบนพื้นผิวของอนุภาค และถูกระบายด้วยความหนาแน่นของอนุภาค

Dispersibility หมายถึง ความสามารถของอนุภาคผงในการกระจายตัวตลอดทั่วทั้งภายในน้ำโดยไม่เกิดเป็นก้อน ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ Dispersibility คือ การไม่มีอนุภาคที่มีขนาดมากกว่า 250 ไมโครเมตร หรืออนุภาคที่เกาะกันเป็นก้อน

Solubility คือ อัตราการละลายหรือความสามารถในการละลายทั้งหมด และการบวมขึ้นอย่างรวดเร็วของอนุภาค ซึ่งเป็นปัจจัยที่กระทบต่อความสามารถในการละลาย

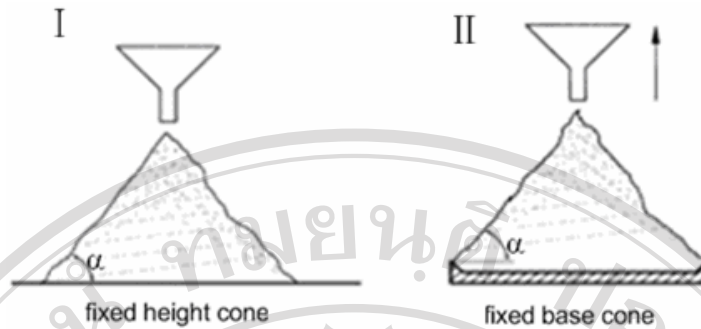
2.6.2 ความสามารถในการไหล (Flowability)

ความสามารถในการไหลของอาหารผงสามารถวิเคราะห์ได้โดยการวัดค่ามุมกอง ซึ่งทำได้ 2 วิธีคือการวัดค่ามุมกองแบบสถิตย์ของวัตถุ (Static angle of repose) และมุมกองพลศาสตร์ของวัตถุ (Dynamic angle of repose)

การวัดค่ามุมกองแบบสถิตย์ ทำโดยการวัดค่ามุมกองที่เกิดขึ้นระหว่างระนาบพื้นราบและเส้นความชันที่ยาวไปตามพื้นผิวของกองอาหารผงที่เกิดขึ้น โดยวัสดุที่เทลงบนพื้นผิวราบ ส่วนการวัดค่ามุมกองแบบพลศาสตร์ เป็นการวัดมุมที่เกิดขึ้นจากแนวโน้มของพื้นผิวของอาหารผงในแนวนอนเมื่อเกิดจากหมุนภายในลูกกอล์ฟ (drum) (Bodhmag, 2006)

การวัดค่ามุมกองแบบสถิตย์ (Static angle of repose)

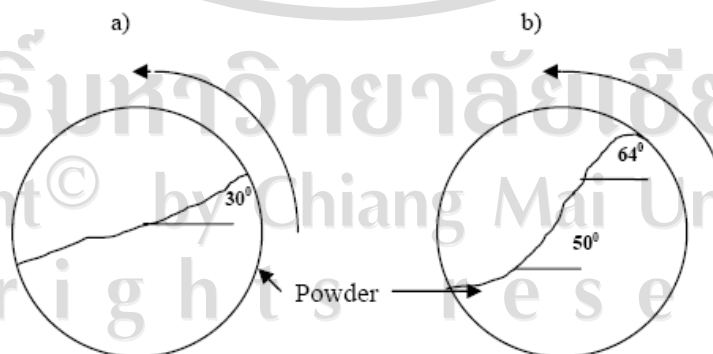
การวัดค่ามุมกองแบบสถิตย์ ทำโดยเทอาหารผงลงผ่านกรวยที่ทราบความสูงจากพื้น (ดังรูปที่ 2.7 I) หรือบรรจุอาหารผงลงในกรวยจากนั้นค่อยๆยกกรวยขึ้นเพื่อให้อาหารผงไหลลงมา (ดังรูปที่ 2.7 II) ซึ่งอาหารผงที่ใช้วิธีการทั้งสองวิธีนี้ต้องสามารถไหลผ่านกรวยขนาดเล็กได้ และ อาหารผงที่มีการเกาะตัวกันนั้น ไม่ควรใช้วิธีการนี้ในการวัดค่ามุมกอง (Geldart, 2006)



รูปที่ 2.7 การวัดค่ามุมกองของอาหารผงแบบสถิตย์
ที่มา: Geldart (2006)

การวัดมุมกองแบบพลศาสตร์ (Dynamic angle of repose)

การวัดมุมกองแบบพลศาสตร์ทำโดยบรรจุตัวอย่างอาหารผงเข้าไปในกระบอกตวงที่มีการหมุน (rotating drum) และสังเกตก้อนที่กลิ้งไปตามพื้นผิวของกองอาหารผง เมื่อเพิ่มอัตราการหมุนจะพบว่า ก้อนที่กลิ้งจะหยุดหรือน้อยลง และขาดออกจากพื้นผิวอย่างต่อเนื่อง โดยมุมกองพลศาสตร์ (dynamic angle of repose) คือมุมที่เกิดขึ้นโดยพื้นผิวที่ลาดเอียงของกองอาหารผงกับแนวราบเมื่อทำการหมุนในกระบอกตวง และเมื่อเพิ่มอัตราการหมุนให้เร็วมากขึ้น จะทำให้เกิดการเสียรูปของพื้นผิวแบนราบไปเป็นรูปร่างตัว S (S shape) การวิเคราะห์ค่ามุมกองทำได้โดยการประเมินค่าเส้นตรง 2 เส้นที่มีความชันแตกต่างกัน โดยเส้นตรงที่มีความชันมากกว่าจะเป็นค่ามุมกองแบบพลศาสตร์ (Bodhimage, 2006) ดังรูป 2.8



รูปที่ 2.8 การวัดค่ามุมกองของอาหารผงแบบพลศาสตร์
ที่มา: Bodhimage (2006)

ค่ามุมกองสามารถบ่งบอกความสามารถในการไหลของอาหารผงได้โดยค่ามุมกองที่ต่ำกว่า 30 องศา แสดงให้เห็นว่าอาหารผงมีความสามารถในการไหลที่ดี 30-45 องศา อาหารผงมีการเกาะตัวกันบ้างเล็กน้อย 45-55 องศา อาหารผงมีการเกาะตัวกัน มากกว่า 55 องศา อาหารผงมีการเกาะตัวกันสูงมาก และมีความสามารถในการไหลค่อนข้างจำกัด (Geldart, 2006) หรืออาจใช้ค่ามุมกอง 40 องศา เป็นตัวกำหนดและจัดกลุ่มความสามารถในการไหลและการเกาะตัวกันของอาหารผง (Geldart, 2006)

Prescott and Barnum (2000) ได้รายงานว่า ความสามารถในการไหลของอาหารผงเป็นผลมาจากอิทธิพลของ คุณสมบัติทางกายภาพของวัตถุดิบ และ อุปกรณ์ที่ใช้ในการจัดการ การเก็บรักษา และการผลิต

2.6.3 ขนาดและรูปร่างของอนุภาค (Particle size and shape)

ลักษณะของอนุภาคมีความสำคัญต่อคุณสมบัติของอาหารผง ซึ่งหมายถึงถึง ขนาดของอนุภาค รูปร่าง พื้นผิวของอนุภาค ความหนาแน่น ความแข็งและคุณสมบัติการดูดซับ เป็นต้น ขนาดของอนุภาคมักใช้ในการจัดกลุ่มและจำแนกอาหารผง โดยค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคควรมีค่าน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร (Barbosa-Canovas *et al.*, 2005) ค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคอาหารผงแต่ละชนิด แสดงดังตารางที่ 2.8

โดยขนาดของอนุภาคมักแสดงในหลายหน่วยขึ้นกับช่วงขนาดของอนุภาค โดยอนุภาคที่มีเนื้อสัมผัสหยาบจะวัดในหน่วยเซนติเมตรหรือหน่วยมิลลิเมตร แต่อนุภาคของอาหารผงที่ละเอียดจะแสดงในหน่วยไมโครเมตรและนาโนเมตร ได้มีการจัดมาตรฐานของอนุภาคอาหารผง ดังตารางที่ 2.9 เพื่อใช้ในการให้คำนิยามของอาหารผงแต่ละชนิด (Barbosa-Canovas *et al.*, 2005)

ตารางที่ 2.8 ค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคในอาหารชนิดต่างๆ

ชนิดของอาหารผง	B.S. meshes	ไมครอน(Microns)
เมล็ดข้าวและข้าวบาร์เลย์ (Rice and barley grains)	6-8	2,800-2,000
น้ำตาล (Granulated sugar)	30-34	500-355
เกลือ (Table salt)	52-72	300-210
โกโก้ (Cocoa)	200-300	75-53
น้ำตาลไอซิ่ง(Icing sugar)	350	45

ที่มา: Barbosa-Canovas *et al.* (2005)

ตารางที่ 2.9 คำนียามลักษณะของอาหารผง

ลักษณะของอาหารผง	B.S. meshes	
	อนุภาคผงผ่านได้ทั้งหมด	อนุภาคผงผ่านได้ไม่เกินร้อยละ 40
หยาบ	10	44
ค่อนข้างหยาบ	22	60
ค่อนข้างละเอียด	44	85
ละเอียด	85	
ละเอียดมาก	120	

ที่มา: Barbosa-Canovas *et al.* (2005)

เทคนิคในการวัดขนาดของอนุภาค

มีวิธีการมากมายที่ใช้วัดขนาดของอนุภาค การวัดขนาดของอนุภาคสามารถทำได้ดังนี้ การร่อนผ่านตะแกรง (sieving) การส่องกล้องจุลทรรศน์ (microscopy techniques) การตกตะกอน (sedimentation) การตรวจสอบโดยอาศัยกระแสน้ำหรือ ใอน้ำ (stream scanning) เป็นต้น ในที่นี้จะยกตัวอย่างเฉพาะการวัดขนาดอนุภาคโดยวิธีการร่อนผ่านตะแกรง (sieving) และการส่องกล้องจุลทรรศน์ (microscopy techniques) (Barbosa-Canovas *et al.*, 2005)

การร่อนผ่านตะแกรง

การร่อนผ่านตะแกรงเป็นวิธีการหนึ่งที่เป็นที่นิยม ทำได้ง่าย ผลิตภัณฑ์อาหารผงสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และเป็นวิธีการที่ไม่แพง ซึ่งเป็นวิธีการกระจายของขนาดอนุภาคตามมวลของอนุภาคในแต่ละช่วง โดยขนาดของอนุภาคจะถูกกำหนดโดยตะแกรงร่อนที่เป็นช่องสี่เหลี่ยมขนาดเล็ก ซึ่งอนุภาคจะสามารถผ่านและไม่ผ่านตะแกรงร่อน

การวิเคราะห์ทำได้โดยการเรียงซ้อนตะแกรงร่อนตามลำดับของขนาดตะแกรงร่อน จากนั้นวางอนุภาคที่ต้องการวิเคราะห์ลงบนตะแกรงร่อน ร่อนตะแกรงร่อนด้วยเครื่องมือหรือมือเปล่าในเวลาที่กำหนดไว้และพิจารณาถึงสัดส่วนของน้ำหนักอนุภาคที่ยังคงอยู่บนตะแกรงร่อน (Barbosa-Canovas *et al.*, 2005)

การวิเคราะห์โดยการส่องกล้องจุลทรรศน์

การส่องกล้องจุลทรรศน์เป็นวิธีการโดยตรงที่ใช้ประเมินขนาดของอนุภาค การวัดขนาดอนุภาคจะใช้ optical microscope โดยการวัดขนาดของอนุภาคโดยการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์จะจำกัดอยู่ในช่วง 50-150 ไมโครเมตร ส่วนกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนเช่น Transmission electron microscopy (TEM) และ Scanning electron microscopy (SEM) จะใช้ในการศึกษารูปร่างของอนุภาคอาหารผง ได้มีการให้คำนิยามของรูปร่างอาหารผงแสดงดังตารางที่ 2.10 โดยรูปร่างของอนุภาคจะมีส่วนสำคัญต่อสมบัติของอนุภาค นอกจากนั้นรูปร่างยังสามารถใช้ในการจำแนกอนุภาคอาหารผงก่อนที่จะมีการจัดกลุ่มตามขนาดของอนุภาค (Barbosa-Canovas *et al.*, 2005)

ตารางที่ 2.10 คำนิยามของรูปร่างอาหารผง

รูปร่าง	คำอธิบาย
Acicular	อนุภาคมีรูปร่างตรงเป็นเข็ม (Needle shape)
Angular	อนุภาครูปทรงหลายเหลี่ยม (Roughly polyhedral shape)
Crystalline	อนุภาครูปทรงเรขาคณิตในของเหลว (Freely developed geometric shape in a fluid medium)
Dendritic	ผลึกที่มีแขนง (Branched crystalline shape)
Fibrous	อนุภาคที่มีรูปร่างคล้ายเส้นไหมโดยมีรูปร่างแน่นอนและไม่แน่นอน (Regularly or irregular thread-like)
Flaky	อนุภาคมีรูปร่างเป็นแผ่น (Plate-like)
Granular	อนุภาคโดยประมาณที่มีรูปร่างไม่แน่นอน (Approximately equidimensional irregular shape)
Irregular	อนุภาคที่ขาดสมมาตร (Lacking any symmetry)
Modular	อนุภาคที่มีรูปร่างกลมแน่นอน (Rounded irregular shape)
Spherical	รูปทรงกลม (Global shape)

ที่มา: Barbosa-Canovas *et al.* (2005)

2.6.4 ความชื้น (Moisture)

ปริมาณความชื้นมีส่วนสำคัญกับอาหารผงซึ่งการเกาะติดของอนุภาคอาหารผงจะเพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาคอาหารผงมีความชื้นมากขึ้น อันเนื่องมาจากของเหลวระหว่างอนุภาคหรือฟิล์มที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคส่งผลให้เกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาค อย่างไรก็ตามของเหลวและฟิล์มที่ผิวของอาหารผงอาจเป็นสาเหตุให้อาหารผงมีความสามารถในการไหลที่จำกัดอีกด้วย โดยของเหลวระหว่างอนุภาคอาหารผงจะหมายถึงน้ำอิสระ (free moisture) โดยน้ำอิสระสามารถทำให้แห้งภายใต้สภาวะอากาศโดยรอบ ซึ่งใช้ในการหาปริมาณความชื้นของอนุภาคอาหารผง (Barbosa-Canovas *et al.*, 2005) อาหารผงที่ปลอดภัยควรมีปริมาณน้ำอิสระต่ำกว่า 0.5 เนื่องจากจุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญได้ ตัวอย่างเช่น พาสต้าที่มี a_w อยู่ในช่วง 0.6-0.5 จะมีปริมาณความชื้นประมาณร้อยละ 10-12 ไข่ผงซึ่งมี a_w อยู่ในช่วง 0.5-0.4 จะมีปริมาณความชื้นร้อยละ 5 ลูกกึ่ง ขนมปัง และขนมปังกรอบจะมี a_w อยู่ในช่วง 0.4-0.3 จะมีปริมาณความชื้นร้อยละ 3-5 และ นมผงที่มี a_w อยู่ในช่วง 0.3-0.2 จะมีปริมาณความชื้นร้อยละ 2-3 เป็นต้น (Fennema, 2008) แสดงให้เห็นว่าหากมีความชื้นภายในอาหารผงต่ำก็จะส่งผลดีต่อคุณภาพของอาหารผงเนื่องจากปลอดภัยจากเชื้อจุลินทรีย์ระหว่างการเก็บรักษา อีกทั้งยังช่วยให้อาหารผงไม่เกาะตัวรวมกัน (Barbosa-Canovas *et al.*, 2005)

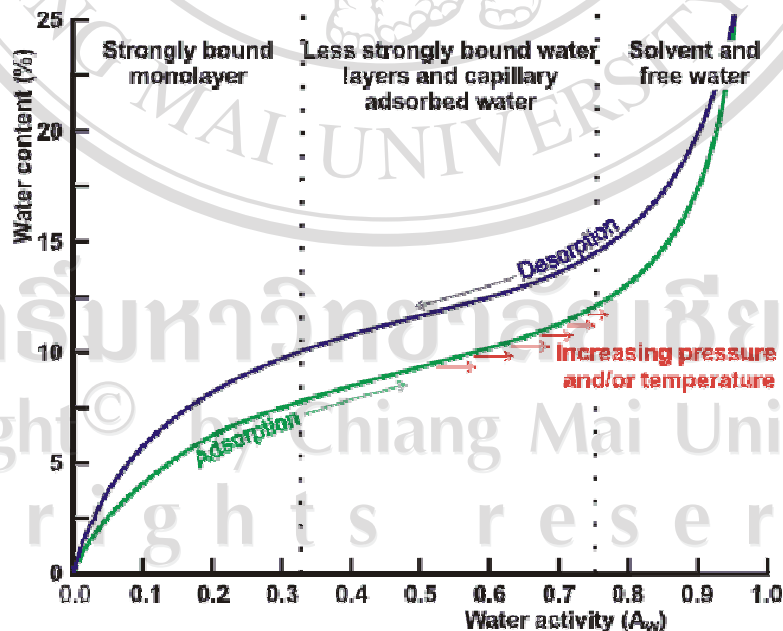
สมบัติของอาหารผง เช่น ขนาด รูปร่างและความชื้นจะมีความสัมพันธ์ต่อคุณสมบัติในการไหลของอาหารผง ตัวอย่างเช่น คำนวมกของของน้ำตาลที่มีขนาดแตกต่างกัน นมผงที่มีการเกาะตัวกัน (agglomerated) และ ไม่เกาะตัวกัน (fine) จะลดลงเมื่อขนาดของอนุภาคเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กจะเกิดการเกาะติดกันมากกว่า ส่วนรูปร่างของอนุภาคพบว่าอิทธิพลต่อพลังงานภายในของอนุภาค และมีผลต่อค่านวมกของอนุภาค ตัวอย่างเช่น อนุภาคอาหารผงที่มีรูปทรงกลม (spherical) และรูปทรงหลายเหลี่ยม (angular) พบว่าอาหารผงรูปทรงกลมจะมีสัมประสิทธิ์ค่าการเสียดสีต่ำ กอของอาหารผงค่อนข้างแบนราบ ในขณะที่อนุภาครูปทรงหลายเหลี่ยม กอของอาหารผงสูงขึ้นส่งผลต่อการเพิ่มค่านวมก ความชื้นจะเพิ่มการเกาะติดกันของอาหารผงโดยการเพิ่มความเปราะพลาสติก (plasticity) และของเหลวที่เชื่อมโยงระหว่างอนุภาค (liquid bridge) หลังการทำแห้ง ซึ่งจากเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้ค่านวมกเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณความชื้นของอาหารผงเพิ่มขึ้น (Barbosa-Canovas *et al.*, 2005)

2.7 ขอร้ปชั้นไอโซเทอร์ม (Sorption isotherm)

กว่าครึ่งศตวรรษที่นักวิทยาศาสตร์ได้ตระหนักว่าปริมาณน้ำอิสระมีความสำคัญเกี่ยวกับคุณภาพและความคงตัวของอาหาร (Goula *et al.*, 2008) โดยการอบแห้งอาหารเป็นการลดปริมาณน้ำอิสระ (water activity; a_w) ภายในอาหาร ปริมาณน้ำอิสระคืออัตราส่วนความดันไอของน้ำในอาหารต่อความดันไอบริสุทธิ์ที่จุดอิ่มตัวที่อุณหภูมิเดียวกัน โดยกราฟที่แสดงความสัมพันธ์

ระหว่างปริมาณน้ำในอาหารและค่า a_w จะเรียกว่าซอร์ปชันไอโซเทอร์ม (sorption isotherm) (นิธิยา, 2549) ซึ่งซอร์ปชันไอโซเทอร์มเป็นเครื่องมือที่สำคัญสำหรับอาหารที่มีความชื้นต่ำ โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมในการทำแห้งหรือการคืนน้ำกลับ (rehydration) อีกทั้งยังใช้ในการพิจารณาความเสถียรของอาหารระหว่างการเก็บรักษา (Goula *et al.*, 2008)

ซอร์ปชันไอโซเทอร์มโดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นรูปซิกมอยด์ (sigmoidal shape) สามารถแบ่งเป็น 2 แบบคือ desorption และ adsorption isotherm กระบวนการ desorption คือกระบวนการลดความชื้น ในขณะที่กระบวนการ adsorption คือกระบวนการเพิ่มความชื้น ซึ่งกระบวนการทั้งสองจะเกิดขึ้นได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและจะมีผลต่อค่า a_w ด้วยการศึกษาดesorption isotherm ทำโดยให้ความชื้นแก่ตัวอย่างอาหารที่ระดับปริมาณน้ำอิสระสูงๆ และหลังจากนั้นกำจัดความชื้นในภาชนะปิดที่มีสารละลายเกลืออิ่มตัวอยู่ ส่วน adsorption isotherm จะต้องทำให้ตัวอย่างอาหารแห้งก่อน หลังจากนั้นนำไปปรับความชื้นในภาชนะปิดที่มีสารละลายเกลืออิ่มตัวที่เหมาะสม (Bell and Labuza, 2000) สามารถสังเกตได้ว่ามีความแตกต่างระหว่าง adsorption และ desorption isotherms นั่นคือ ณ ที่ความชื้นหนึ่งๆ ของอาหาร ค่า a_w ของ desorption จะต่ำกว่า adsorption หรือ ณ ที่ค่า a_w หนึ่งๆ ปริมาณความชื้นของ desorption จะมากกว่า adsorption เสมอโดยปกติแล้วกระบวนการทั้งสองจะไม่สามารถย้อนกลับได้ (irreversible process) จึงทำให้เกิดปรากฏการณ์ ฮิสเทอรีซิส (hysteresis) ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ซอร์ปชันไอโซเทอร์ม

ที่มา: Chaplin (2009)

จากรูปที่ 2.9 สามารถแบ่งซอร์ปชันไอโซเทอร์มออกได้เป็น 3 ส่วนซึ่งจะแตกต่างกันตามปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในอาหาร หรือค่า a_w (นิธิยา, 2549)

ส่วนที่ 1 เส้นกราฟจะค่อนข้างชัน โดยสอดคล้องกับ monomolecular layer ของน้ำ ซึ่งเป็นน้ำที่เกาะอยู่กับสารประกอบในอาหารอย่างเหนียวแน่น และมีค่า a_w อยู่ในช่วง 0-0.25 หรือ 0.3

ส่วนที่ 2 เส้นกราฟค่อนข้างราบ สอดคล้องกับ capillary water ที่มีอยู่ในอาหารซึ่งเป็นน้ำที่กำจัดออกได้แต่ค่อนข้างยาก ถ้าปริมาณน้ำส่วนนี้ลดลงจะทำให้ค่า a_w ลดลงและยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์และปฏิกิริยาทางเคมีส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นในอาหารได้ด้วย ปริมาณความชื้นจะลดลงเหลือประมาณร้อยละ 3-7 ขึ้นอยู่กับชนิดของอาหารและอุณหภูมิ โดยมีค่า a_w อยู่ในช่วง 0.3-0.8

ส่วนที่ 3 เป็นน้ำอิสระที่มีอยู่ในเนื้อเยื่ออาหารทั้งจากพืชและสัตว์ สามารถกำจัดออกได้โดยง่าย น้ำเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นตัวทำละลาย ถูกใช้สำหรับการเจริญของจุลินทรีย์และการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี อาหารจะมีความชื้นประมาณร้อยละ 12-25 และมีค่า a_w มากกว่า 0.8-1.0

กราฟ desorption isotherm เป็นการวิเคราะห์ระดับความแห้งของอาหารที่ค่อยๆ เพิ่มขึ้น หรือ ความชื้นของอาหารที่ค่อยๆ ลดต่ำลง จนถึงจุดสมดุลกับสถานะแวดล้อม หรือความชื้นของอากาศขณะนั้น ดังนั้นจึงใช้ desorption isotherm สำหรับกระบวนการทำแห้ง สำหรับกราฟ adsorption หรือ resorption isotherm เป็นการวิเคราะห์ความชื้นของอาหารที่ค่อยๆ เพิ่มขึ้น เนื่องจากอาหารนั้นมีความสามารถในการดูดความชื้นจากอากาศได้ หากความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย อาหารมีความสามารถในการดูดความชื้นได้มาก เส้นกราฟ adsorption isotherm จะมีความชันมาก อาหารประเภทนี้เรียกว่า hygroscopic product และถ้าอาหารไม่มีความไวต่อความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่เพิ่มขึ้น เส้นกราฟจะมีความชันน้อย อาหารประเภทนี้เรียกว่า nonhygroscopic product



รูปที่ 2.10 adsorption isotherm ของสารประเภท hygroscopic product (A) และ nonhygroscopic product (B)
ที่มา: นิธิยา (2549)

อาหารหลายชนิดมีรูปกราฟของ adsorption ต่างจากรูปที่ 2.10 คือเส้นกราฟจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในช่วงแรก เมื่อค่า a_w เพิ่มขึ้นเป็นพวก low hygroscopicity และเส้นกราฟจะชันขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงปลายเป็นพวก high hygroscopicity ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งรูปกราฟของ adsorption isotherm เช่นนี้เป็นสมบัติของอาหารที่มีปริมาณน้ำตาลหรือเกลือสูงเนื่องจากมี capillary adsorption ต่ำ ดังนั้นอาหารใดที่มีสมบัติเป็น hygroscopicity เมื่อมีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย จะทำให้ปริมาณความชื้นในอาหารเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (นิธิยา, 2549)



รูปที่ 2.11 ซอร์ปชันไอโซเทอร์มของอาหารที่มีปริมาณน้ำตาลหรือเกลือสูง และมี capillary adsorption ต่ำ
ที่มา: นิธิยา (2549)

การศึกษาซอร์ปชันไอโซเทอร์มของอาหารมักกระทำที่อุณหภูมิห้อง ผลของอุณหภูมิต่อซอร์ปชันไอโซเทอร์มจะให้ข้อมูลที่สำคัญต่ออาหาร โดยแสดงให้เห็นช่วงอุณหภูมิระหว่างการเก็บรักษารวมถึงในช่วงกระบวนการผลิต อีกทั้งยังทราบการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำอิสระกับอุณหภูมิ ณ ปริมาณความชื้นที่เท่ากัน อุณหภูมิส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำในอาหารและสมดุลไดนามิกระหว่างไอน้ำและวัฏภาคที่ดูดซับ (adsorbed phase) สมดุลของน้ำจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณน้ำอิสระคงที่ จากรายงานการวิจัยพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิเป็นผลให้โมเลกุลน้ำได้รับการกระตุ้นไปสู่ระดับพลังงานที่สูงกว่าและแตกพันธะออกจากส่วนที่น้ำเชื่อมโยงกับอาหาร เป็นผลทำให้สมดุลของปริมาณความชื้นลดลง อย่างไรก็ตามมีรายงานวิจัยพบว่าน้ำตาลที่ตกผลึกเช่นน้ำตาลกลูโคสในอาหารแห้งเป็นสาเหตุให้สมดุลของปริมาณความชื้น ณ อุณหภูมิต่างๆ แตกต่างกันที่ระดับ a_w สูงๆ Myhara และ Sablani (2001) ได้รายงานว่ปริมาณความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content) ของลูกเกดที่มีน้ำตาลกลูโคสสูงหรือผลอินทผาลัม ณ ระดับ a_w ต่ำๆ

จนถึง a_w 0.55 จะลดลงเมื่ออุณหภูมิการเกิดซอร์ปชันเพิ่มขึ้นและที่ระดับ a_w สูงๆ ปริมาณความชื้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

Yan *et al.* (2008) ได้ศึกษาซอร์ปชันไอโซเทอร์มที่อุณหภูมิ 10 และ 40 องศาเซลเซียสของกล้วยที่ผ่านการอบแห้งโดยใช้ตู้อบสุญญากาศพบว่าปริมาณความชื้นสมดุลเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง ณ ระดับ a_w คงที่

Ahmed *et al.* (2005) ได้ศึกษาซอร์ปชันไอโซเทอร์มของผลอินทผลัมที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมพบว่าผลอินทผลัมที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะดูดความชื้นอย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม เนื่องจากกรูพุนของผลอินทผลัมที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยอัตราการดูดซึมความชื้นของผลอินทผลัมที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะสูงกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ที่ระดับ a_w ตั้งแต่ 0.55 ขึ้นไป

Goula *et al.* (2008) ได้ศึกษาซอร์ปชันไอโซเทอร์มที่ระดับอุณหภูมิ 20-70 องศาเซลเซียสของมะเขือเทศที่ผ่านการทำแห้งแบบฟ้นฝอยพบว่าอุณหภูมิส่งผลกระทบต่อซอร์ปชันไอโซเทอร์มของมะเขือเทศ โดยปริมาณความชื้นสมดุลจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ณ ระดับ a_w คงที่

Lee and Lee (2008) ได้ศึกษาซอร์ปชันไอโซเทอร์มของเห็ด โดยการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง อบแห้งแบบตู้อบลมร้อน และ อบแห้งโดยใช้ตู้อบสุญญากาศ พบว่าปริมาณความชื้นสมดุลของเห็ดที่ผ่านการอบแห้งโดยตู้อบลมร้อนต่ำที่สุด รองลงมาคืออบแห้งโดยตู้อบสุญญากาศ และทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ตามลำดับ เห็ดที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะดูดซึมน้ำมากกว่าเห็ดที่ผ่านการอบแห้งโดยตู้อบลมร้อนและตู้อบสุญญากาศ เนื่องจากกรูพุนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง อีกทั้งผลิตภัณฑ์แทบจะไม่มีกรดตัวและมีความสามารถในการดูดความชื้นได้มากกว่าวิธีการอบแห้งแบบอื่น

การศึกษาซอร์ปชันไอโซเทอร์มนั้นกระทำในระบบปิดซึ่งมีการควบคุมสภาวะบรรยากาศให้มีความชื้นสัมพัทธ์ในระบบคงที่ ซึ่งสภาวะความชื้นสัมพัทธ์จะถูกสร้างโดยการใช้สารละลายเกลืออิมิตัวต่างๆ ดังตารางที่ 2.11 ตัวอย่างอาหารที่ทราบน้ำหนักเริ่มต้นจะถูกเก็บไว้ในระบบนี้ ความชื้นของอาหารปรับตัวจนกว่าจะสมดุลกับความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศที่เก็บรักษา โดยอาหารจะไม่มีน้ำหนักเพิ่มขึ้นหรือลดลงภายใต้การเก็บรักษาในสภาวะดังกล่าว (Ramaswamy and Marcotte, 2006)

ตารางที่ 2.11 ค่า a_w ของสารละลายเกลือที่แตกต่างกันที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

สารละลายเกลืออิ่มตัว	a_w
LiCl	0.11-0.15
CH ₃ COOK	0.20-0.23
MgCl ₂ • 6 H ₂ O	0.33
K ₂ CO ₃	0.44
Mg(NO ₃) ₂ • 6 H ₂ O	0.52-0.55
NaCl	0.75
CdCl ₂	0.82
K ₂ CrO ₄	0.88
KNO ₃	0.93-0.94
K ₂ SO ₄	0.97

ที่มา: Barbosa-Cánovas and Vega-Mercado (1996)

โดยซอร์ปชันไอโซเทอร์มจะใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นและการกำหนดสภาวะการอบแห้ง คัดเลือกบรรจุภัณฑ์ ทำนายอายุระหว่างการเก็บรักษาอาหารแห้งทำให้ผลิตภัณฑ์มีโครงสร้างเนื้อสัมผัสที่ดี เพื่อลดการเปลี่ยนแปลงจากปฏิกิริยาเคมีและให้ปลอดภัยจากการเจริญของจุลินทรีย์ (นักสัตว, 2546) อาหารที่ถูกลดปริมาณความชื้นจะถูกทำให้กลายเป็นสถานะเป็นแก้ว (glass) การเปลี่ยนสภาพจากแก้ว (glassy state) เป็นของเหลวขึ้นเหนียวจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g) ซึ่งค่า T_g นี้จะเป็นค่าเฉพาะตัวสำหรับอาหารแต่ละชนิด โดย T_g จะเป็นตัวบ่งชี้ที่ทำให้เข้าใจถึงการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพของอาหารระหว่างการแปรรูปและคุณภาพของอาหารที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างการเก็บรักษา เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเหนือ T_g จะมีการเปลี่ยนแปลงหลายอย่างเช่น ปริมาตร (free volume) เพิ่มขึ้น ความหนืดลดลง ความร้อนจำเพาะเพิ่มขึ้น การขยายตัวของความร้อนเพิ่มขึ้น (thermal expansion) การเปลี่ยนแปลงที่สำคัญเหล่านี้มีผลต่อพฤติกรรมของอาหารซึ่งเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของโมเลกุลอาหารที่เพิ่มขึ้นและการลดลงของความหนืด ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ขึ้นกับเวลารวมถึงความหนืดซึ่งเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างเช่น เกิดความเหนียว การยุบตัว (collapse) และการแตกสีก ระหว่างกระบวนการผลิตอาหารและการเก็บรักษา ปริมาณน้ำอิสระและอุณหภูมิกลาสทรานซิชันมักจะใช้เพื่อพิจารณาถึง

ความเสถียรในระหว่างการเก็บรักษาอาหาร ผลิตภัณฑ์อาหารจะเสถียรมากที่สุดเมื่อปริมาณความชื้นอยู่ในระดับความชื้น โมโนเลเยอร์ (monolayer moisture) ซึ่งมีค่าปริมาณน้ำอิสระประมาณ 0.1-0.3 หรือต่ำกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (Goula *et al.*, 2008) อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของคาร์โบไฮเดรตมักจะมีสัดส่วนผกผันกับน้ำหนักโมเลกุล โดย T_g ของกลูโคสและกาแลคโตสจะมีค่าเท่ากับ 31 และ 32 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (Shrestha *et al.*, 2007)

กลาสทรานซิชันเป็นเครื่องมือที่ใช้ทำความเข้าใจการเคลื่อนที่ของน้ำในอาหารและการควบคุมอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ โดย T_g ให้ข้อมูลที่ดีกว่าปริมาณน้ำอิสระโดยมีการพิสูจน์ว่าข้อมูลของปริมาณน้ำอิสระไม่เพียงพอสำหรับการประเมินอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์อาหาร ที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_g อาหารจะมีความเสถียร และไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางด้านกายภาพ เคมีและชีววิทยา อย่างไรก็ตาม T_g ไม่สามารถทำนายความเสถียรของจุลชีววิทยาของอาหารได้อย่างถูกต้อง ยังคงต้องการการค้นคว้าที่มากขึ้นในการทำความเข้าใจว่าน้ำและการเคลื่อนที่ของตัวถูกละลายมีอิทธิพลต่อการควบคุมการเจริญและกิจกรรมของจุลินทรีย์ในอาหาร อย่างไรก็ตามปริมาณน้ำอิสระและอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ได้รับการยอมรับว่าเป็นข้อมูลที่แสดงปริมาณน้ำในอาหารที่ระเหยออกไปจากอาหารได้อย่างแม่นยำ (Ahmed *et al.*, 2005)

2.7.1 ความสำคัญของซอร์ปชันไอโซเทอร์มต่อเสถียรภาพของอาหาร

จากที่กล่าวมาแล้วว่าซอร์ปชันไอโซเทอร์มเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการทำนายความคงตัวของอาหาร โดยซอร์ปชันไอโซเทอร์มจะเกี่ยวข้องกับความคงตัวของอาหารดังนี้

ปฏิกิริยาทางเคมีและเอนไซม์ในอาหาร

ปฏิกิริยาทางเคมีของอาหารเช่น การเกิดสีน้ำตาลเนื่องมาจากปฏิกิริยาที่ไม่ใช้เอนไซม์ การเกิดออกซิเดชันของไขมัน การเสื่อมสลายของวิตามิน กิจกรรมของเอนไซม์ การเสียสภาพของโปรตีน การเจลาติไนเซชัน (gelatinization) ของแป้ง และการเกิดรีโทรกราเดชัน (retrogradation) ของแป้ง สามารถทำนายความชื้นระดับ โมโนเลเยอร์โดยการใช้อย่างน้อย Brunauer Emmett Teller isotherm (BET isotherm) ซึ่งมักนิยมใช้ในการพิจารณาความเสถียรของอาหารผง ซึ่งความชื้นระดับ โมโนเลเยอร์ที่ต่ำกว่า BET โมโนเลเยอร์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี เช่น การเกิดออกซิเดชันของไขมัน การเกิดสีน้ำตาลเนื่องมาจากปฏิกิริยาที่ไม่ใช้เอนไซม์จะเกิดขึ้นน้อยมาก ตัวอย่าง BET โมโนเลเยอร์ของอาหารแต่ละชนิดเช่น adsorption isotherm ขององุ่นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีค่า BET โมโนเลเยอร์เท่ากับ 0.019 ซูโครสที่อุณหภูมิ 47 องศาเซลเซียส มีค่า BET โมโนเลเยอร์

เท่ากับ 0.057 ส่วน desorption isotherm ของบีทรูทที่อุณหภูมิ 20 และ 35 องศาเซลเซียส มีค่า BET โมโนเลเยอร์เท่ากับ 0.055 และ 0.049 ตามลำดับโดยความชื้นโมโนเลเยอร์ในอาหารจะอยู่ในช่วง a_w 0.2-0.4 ถ้าความชื้นโมโนเลเยอร์สูงกว่านี้ ผลิตภัณฑ์อาหารจะสูญเสียคุณภาพไปโดยพบว่าปฏิกิริยาทางเคมีส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นเมื่อ a_w มากกว่า 0.3 โดยน้ำจะมีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีดังต่อไปนี้

1. เป็นสารที่เข้าร่วมทำปฏิกิริยา (reactant) เช่น การไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ของซูโครส
2. น้ำทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนไหวของสารที่เข้าร่วมทำปฏิกิริยา โดยส่งผลต่อความหนืดของอาหาร
3. น้ำทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนหรืออาจเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสารตัวอื่นๆ เช่น ส่งผลให้เกิดการออกซิเดชันของไขมัน โดยการเข้าล้อมรอบโลหะที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหรือเกิดพันธะไฮโดรเจนของไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxides) กับน้ำ
4. อาจก่อให้เกิดการรวมตัวของโปรตีน และการเปลี่ยนแปลงสภาพของน้ำตาลและแป้งจาก amorphous ไปเป็น crystalline

ปฏิกิริยาทางเคมีเกี่ยวข้องกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำอิสระ เนื่องมาจากการเพิ่มการเคลื่อนไหวของสารตั้งต้นที่เข้าทำปฏิกิริยา ยกเว้นในปฏิกิริยาการออกซิเดชันของไขมัน อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ต่ำที่สุดในอาหารจะมีค่า a_w ในช่วง 0.2-0.4 (Rahman, 1995)

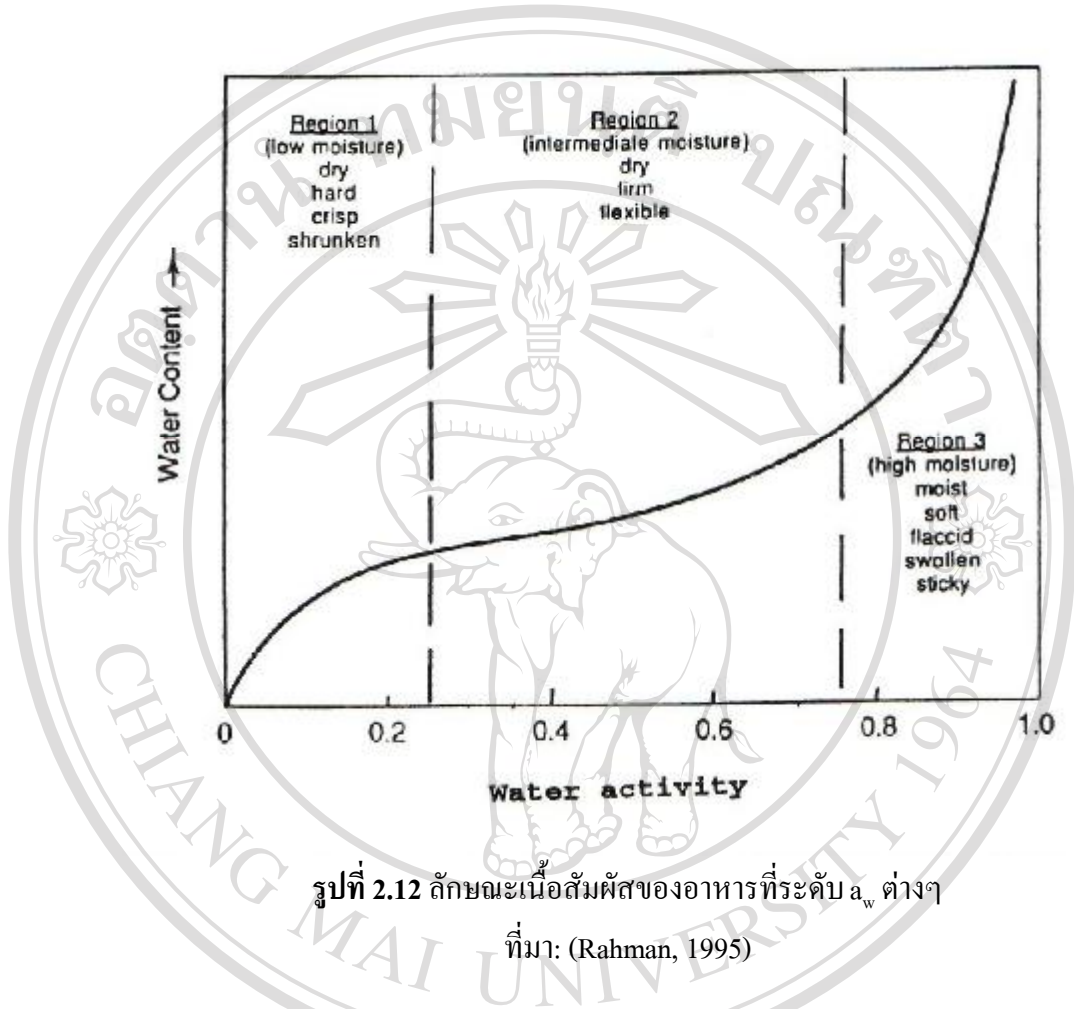
ความเสถียรของรงควัตถุในอาหาร

ความเสถียรของรงควัตถุในอาหารเกี่ยวข้องกับ ปริมาณออกซิเจน แสง ปฏิกิริยาออกซิเดชัน ปริมาณโลหะหนัก ปริมาณน้ำอิสระ ความเป็นกรด ต่าง และ อุณหภูมิ เป็นต้น โดยปริมาณน้ำอิสระจะเป็นปัจจัยลำดับต้นๆ ที่ส่งผลต่อความเสถียรของรงควัตถุในอาหารและสีของอาหาร โดยรงควัตถุที่มีผลต่อสีของอาหารเช่น คลอโรฟิลล์ แคโรทีนอยด์ แอนโทไซยานิน และบีตาเลน (Rahman, 1995)

คุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของอาหาร

เนื้อสัมผัสของอาหารสัมพันธ์กับซอร์ปชันไอโซเทอร์ม ดังรูป 2.12 โดยส่วนที่ 1 ปริมาณน้ำอิสระต่ำ (low water activity) อาหารจะแห้ง แข็ง กรอบและหดรตัว ส่วนที่ 2 ปริมาณน้ำอิสระปานกลาง (intermediate water activity) อาหารจะแห้ง แน่นเนื้อ และยืดหยุ่น ส่วนที่ 3 ปริมาณ

น้ำอิสระสูง (high water activity) อาหารจะค่อนข้างชื้น อ่อนตัว หนึ่่น้ำ (juicy) บวมน้ำ (swollen) และค่อนข้างเกาะตัวกัน (Rahman, 1995)



การเกาะตัวกันของอาหารเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพจากกลาส (amorphous glass) ไปเป็นของเหลวหนืด (amorphous rubber) ปริมาณความชื้นหรือ a_w มีผลต่อการเกาะติดกันของอนุภาค โดยทั่วไปอาหารที่มีน้ำตาลปริมาณสูง อัตราการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคระหว่างการเก็บรักษาจะเห็นได้ชัดเจนที่อุณหภูมิห้อง ถ้าผลิตภัณฑ์ได้รับความชื้น โดยมี a_w มากกว่า 0.4 การเชื่อมโยงระหว่างอนุภาคจะเกิดขึ้นเป็นผลทำให้เกิดการเกาะตัวกันของอนุภาค ดังนั้นเพื่อป้องกันปัญหาการเกาะตัวกันจึงต้องมีการศึกษาซอร์ปชัน ไอโซเทอร์มของส่วนผสมอาหาร (Bell and Labuza, 2000)

การเจริญของเชื้อจุลินทรีย์และการผลิตสารพิษในอาหาร

อาหารโดยส่วนใหญ่จะมีปริมาณน้ำอิสระอยู่ในช่วง 0.6-0.7 โดยแบคทีเรียส่วนใหญ่ ยีสต์ และราจะเจริญเมื่อปริมาณน้ำอิสระอยู่ในช่วง 0.9 ซึ่งความรู้จากซอร์ปชัน ไอโซเทอร์มจะสามารถใช้

ทำนายปริมาณความชื้นที่มากที่สุดของอาหารที่สามารถรับได้ในระหว่างการเก็บรักษา โดยการเจริญและการผลิตสารพิษของจุลินทรีย์จะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำอิสระของอาหาร ซึ่งปริมาณน้ำอิสระของอาหาร ควรจะต่ำพอที่จะยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ (Rahman, 1995) ดังแสดงในตารางที่ 2.12

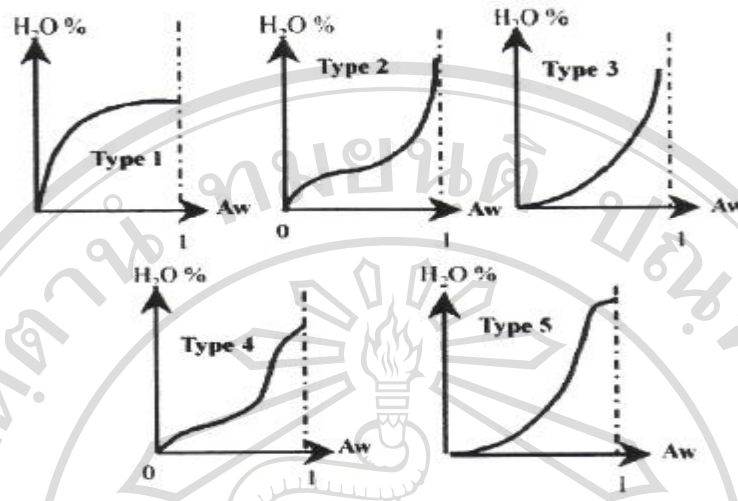
ตารางที่ 2.12 ระดับของ a_w ที่สามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์

a_w	a_w ที่สามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ในอาหาร
0.95	<i>Bacillus</i> , <i>Clostridium perfringens</i> , <i>Escherichia</i> , <i>Klebsiella</i> , <i>Proteus</i> , <i>Pseudomonas</i> , <i>Shigella</i> , ยีสต์บางชนิด
0.91	<i>Clostridium botulinum</i> , <i>Lactobacillus</i> , <i>Pediococcus</i> , <i>Salmonella</i> , <i>Serratia</i> , <i>Vibrio parahaemolyticus</i> ราและยีสต์บางชนิด
0.87	<i>Micrococcus</i> , ยีสต์ทุกชนิด
0.80	<i>Debaryomyces</i> , <i>Saccharomyces</i> , <i>Staphylococcus aureus</i>
0.75	แบคทีเรีย halophilic ส่วนใหญ่
0.65	ราจำพวก Xerophilic
0.60	ยีสต์จำพวก osmophilic ราบางชนิด
น้อยกว่า 0.5	ไม่มีจุลินทรีย์ชนิดใดเจริญได้

ที่มา: Bell and Labuza (2000)

2.7.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของซอร์ปชันไอโซเทอร์ม

อาหารแต่ละชนิดจะมีซอร์ปชันไอโซเทอร์มแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี และปริมาณน้ำที่ยึดอยู่ในอาหาร (วิไล, 2543) ซอร์ปชันไอโซเทอร์มแสดงความสัมพันธ์ในรูปเส้นโค้งดูดซับความชื้น โดยจะแสดงความแตกต่างของค่า a_w และการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของตัวอย่าง ณ อุณหภูมิที่กำหนด ซึ่งสามารถจัดประเภท adsorption isotherms ออกเป็น 5 ประเภท (Rahman, 1995) ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ประเภทของซอร์ปชันไอโซเทอร์ม

ที่มา: Mathlouthi and Roge (2003)

ซอร์ปชันไอโซเทอร์มของอาหารส่วนใหญ่จะไม่เป็นเส้นตรง โดยทั่วไปจะเป็นรูปซิกมอยด์ (sigmoid) ซึ่งจัดเป็นซอร์ปชันไอโซเทอร์มประเภทที่ 2 แต่ถ้าในอาหารมีองค์ประกอบเป็นของแข็งที่ละลายน้ำได้โดยมีลักษณะเป็นผลึกที่มีรูปร่างแน่นอนเป็นองค์ประกอบในอาหาร เช่น น้ำตาล กลีเซอรอล ซอร์ปชันไอโซเทอร์มจะเป็นประเภทที่ 3

นอกจากนี้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายซอร์ปชันไอโซเทอร์มยังสามารถแบ่งตามจำนวนของตัวแปร ได้ดังนี้คือ

1. Isotherms ประเภท 2 ตัวแปร คือ

แบบจำลองของ Smith (1947)

Smith (1947) ได้พัฒนาแบบจำลองเพื่อที่จะใช้อธิบายซอร์ปชันไอโซเทอร์มของไบโอพอลิเมอร์ (bio-polymer) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งสมการของ Smith (1947) แสดงได้ดังนี้

$$M_w = A + B \ln(1 - a_w) \quad (2.1)$$

แบบจำลองของ *Oswin (1946)*

Oswin (1946) ได้พัฒนาแบบจำลองสำหรับกราฟรูปร่างมอยด์ ซึ่งสมการของ *Oswin* แสดงได้ดังนี้

$$M_w = A \left[\frac{a_w}{1-a_w} \right]^B \quad (2.2)$$

แบบจำลองของ *Henderson (1952)*

$$M_w = \left[\frac{\ln(1-a_w)}{-A} \right]^{1/B} \quad (2.3)$$

แบบจำลองของ *Brunauer-Emmett-Teller (BET)*

ซึ่งค้นพบโดย *Brunauer et al. (1938)* ส่วนใหญ่จะใช้ที่ค่า a_w ในช่วง 0.05-0.45 สมการของ *BET* แสดงได้ดังนี้

$$M_w = \frac{M_0 C a_w}{(1-a_w)[1+(C-1)a_w]} \quad (2.4)$$

กำหนดให้

M_0 = ปริมาณความชื้นที่เนื้อเยื่อชั้นเดียว

C = ค่าคงที่ที่สัมพันธ์กับความร้อนสุทธิตั้งหมของซอร์ปชันไอโซเทอร์ม

แบบจำลองของ Halsey (1948)

Halsey (1948) ได้พัฒนาสมการนี้เพื่อใช้ทำนายในช่วงที่ BET ทำนายไม่ได้ โดยสามารถใช้ได้กับอาหารหลายชนิด ซึ่งองค์ประกอบของอาหารมีค่า a_w อยู่ในช่วง 0.1-0.8 ซึ่งสมการของ Halsey (1948) แสดงได้ดังนี้

$$M_w = \left[\frac{-A}{\ln a_w} \right]^{1/B} \quad (2.5)$$

แบบจำลองของ Chung และ Pfof (1967)

เป็นสมการที่แสดงการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระสำหรับซอร์ปชัน ไอโซเทอร์ม ที่สัมพันธ์กับปริมาณความชื้น แสดงได้ดังนี้

$$M_w = -\frac{1}{B} \ln \left[\frac{-\ln a_w}{A} \right] \quad (2.6)$$

แบบจำลองของ Iglorias และ Chirfe (1978)

สมการนี้ถูกออกแบบมาเพื่อใช้อธิบายลักษณะของอาหารที่มีน้ำตาลสูง

$$\ln [M_w + (M_w^2 + M_{0.5w})^{1/2}] = Aa_w + B \quad (2.7)$$

กำหนดให้

$M_{0.5w}$ = ปริมาณความชื้นที่ a_w เท่ากับ 0.5

2. Isotherms ประเภท 3 ตัวแปร คือ

แบบจำลองของ Cubic

คือ สมการกำลังสาม ใช้สำหรับอธิบายซอร์ปชัน ไอโซเทอร์มที่มีลักษณะเป็นรูปซิกมอยด์

$$M_w = p_1 + p_2 a_w + p_3 a_w^2 + p_4 a_w^3 \quad (2.8)$$

กำหนดให้

p_i = ค่าคงที่ของซอร์ปชัน ไอโซเทอร์ม

แบบจำลองของ Schuchmann-Ray-Peleg (1990)

ใช้ทำนายค่า a_w ที่มีปริมาณความชื้นสูง

$$X_w = \frac{Aa_m}{(1+Ba_m)(C-a_m)} \quad (2.9)$$

กำหนดให้

$$a_m = a_w / (1 - a_w)$$

แบบจำลองของ Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB)

เป็นแบบจำลองที่ใช้เหมาะสมสำหรับอาหารหลากหลายชนิดที่มีค่า a_w อยู่ในช่วงกว้าง แสดงสมการดังนี้

$$M_w = \frac{M_0 C k a_w}{(1 - k a_w)(1 - k a_w + C k a_w)} \quad (2.10)$$

กำหนดให้

M_0 = ปริมาณความชื้นที่เนื้อเยื่อชั้นเดียว

C และ k = ความสัมพันธ์ของผลเนื่องจากอุณหภูมิ

ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาชอร์ปชันไอโซเทอร์มของแคปซูลสารสกัดสีในผลึกน้ำผึ้งเพื่อใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของแคปซูลเมื่ออยู่ในระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกศึกษาชอร์ปชันไอโซเทอร์มของแคปซูลสารสกัดสีในผลึกน้ำผึ้งที่ระดับอุณหภูมิแตกต่างกัน เพื่อศึกษาถึงความคงตัวและหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการทำนายอายุการเก็บรักษาของแคปซูลสารสกัดสีในผลึกน้ำผึ้งเมื่ออยู่ในระดับความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิที่แตกต่างกัน