

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำผึ้ง (Honey)

น้ำผึ้ง เป็นผลผลิตของน้ำหวานจากดอกไม้ และจากแหล่งน้ำหวานอื่นๆซึ่งผึ้งงานนำมาเก็บสะสมและผ่านขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และทางกายภาพบางประการแล้วเก็บสะสมไว้ในรังผึ้ง น้ำผึ้งมีลักษณะที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับน้ำหวานจากดอกไม้ที่ผึ้งเก็บมาทำเป็นน้ำผึ้ง น้ำผึ้งที่ได้จากธรรมชาติจะมีรสหวานจัด กลิ่นหอม มีสีเหลืองอ่อนๆจนถึงสีน้ำตาลเข้มแล้วแต่แหล่งที่ได้มา ลักษณะของน้ำผึ้งที่ดีควรมีลักษณะขุ่นหนืดซึ่งแสดงว่ามีน้ำน้อย มีกลิ่นหอมของน้ำผึ้งและดอกไม้ตามแหล่งที่ได้มา ไม่มีฟองอันเนื่องมาจากการบูด สะอาดไม่มีไขผึ้งหรือตัวผึ้งปนและใส น้ำผึ้งจากดอกไม้ที่ต่างชนิดกันยังมีองค์ประกอบของน้ำตาลแตกต่างกันไปด้วยเช่น สัดส่วนของน้ำตาลกลูโคสและน้ำตาลฟรุกโตสไม่เท่ากัน ดังนั้นน้ำผึ้งที่มาจากแหล่งต่างๆจะมีคุณสมบัติเฉพาะที่แตกต่างกันเช่น สี กลิ่น รส หรือคุณสมบัติในการตกผลึก (สิริวัฒน์ และคณะ, 2528)

2.1.1 องค์ประกอบของน้ำผึ้ง

องค์ประกอบทางเคมีของน้ำผึ้งประกอบด้วยน้ำตาลฟรุกโตสและน้ำตาลกลูโคสปริมาณ 70-80% น้ำ 10-20% และองค์ประกอบปริมาณเล็กน้อยอื่นๆ ได้แก่ กรดอินทรีย์ แร่ธาตุ วิตามิน โปรตีน สารประกอบฟีนอลิก และกรดอะมิโนอิสระ (Ouchemoukh *et al.*, 2007) น้ำผึ้งแต่ละชนิดจะมีองค์ประกอบทางเคมีต่างๆแตกต่างกันไปดังตารางที่ 2.1 ซึ่งแสดงองค์ประกอบทางเคมีของน้ำผึ้งไทยบางชนิด (ขนิษฐา, 2550) นอกจากนี้น้ำผึ้งยังอุดมไปด้วยสารต้านอนุมูลอิสระที่เป็นเอนไซม์ (enzymatic antioxidants) ได้แก่ กลูโคสออกซิเดสและคะตะเลส สารต้านอนุมูลอิสระที่ไม่ใช่เอนไซม์ (non-enzymatic antioxidants) ได้แก่ กรดแอสคอร์บิก ฟลาโวนอยด์ กรดฟีนอลิก อนุพันธ์ของแคโรทีนอยด์ กรดอินทรีย์ ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล กรดอะมิโน โปรตีน และแอลฟา-โทโคเฟอรอล ซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของวิตามินอีที่มีสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (Ahmed *et al.*, 2007) ทำให้น้ำผึ้งมีสมบัติในการเป็นสารยั่วยุการเก็บของอาหารได้ซึ่งจากประโยชน์ต่างๆที่มีในน้ำผึ้งดังกล่าวข้างต้น ทำให้มีความหลากหลายของผลิตภัณฑ์จากน้ำผึ้งทั้งในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง ยา และอาหาร

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำผึ้งดอกทานตะวัน น้ำผึ้งดอกกล้วย และน้ำผึ้งดอกสาบเสือ

องค์ประกอบทางเคมี	ชนิด		
	น้ำผึ้งดอกทานตะวัน	น้ำผึ้งดอกกล้วย	น้ำผึ้งดอกสาบเสือ
1. ของแข็ง (%)	80.5	79.0	80.0
2. เถ้า (%)	0.11	0.07	0.09
3. ค่าความเป็นกรดต่าง (pH)	3.53	4.49	3.84
4. ปริมาณความชื้น (%)	19.5	21.0	20.0
5. Water activity (a_w)	0.52	0.53	0.52
6. ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (%)	0.06	0.02	0.03
7. ฟรุคโตส (%)	40.66	43.89	48.54
8. กลูโคส (%)	32.1	33.85	31.13
9. มอลโทส (%)	7.67	1.26	0.33
10. ซูโครส (%)	<0.1	<0.1	<0.1
11. ไนโตรเจน (%)	0.06	0.05	0.06
12. สัดส่วนฟรุคโตสต่อกลูโคส	1.27	1.30	1.56

ที่มา : ดัดแปลงจากขนิษฐา (2550)

น้ำผึ้งประกอบด้วย

1. ความชื้นหรือน้ำ

ความชื้นที่เหมาะสมของน้ำผึ้งคือประมาณ 17-18% ซึ่งทำให้สามารถเก็บน้ำผึ้งไว้ได้นาน โดยเปลี่ยนแปลงสภาพเพียงเล็กน้อย เมื่อมีความชื้นที่เหมาะสม น้ำผึ้งก็จะมีแรงดูดซึมน้ำสูงจึงสามารถดูดซึมน้ำจากเซลล์จุลินทรีย์ต่างๆ ทำให้เชื้อโรคตายได้ (นาวิ, 2550) น้ำผึ้งที่มีความชื้นสูงอาจทำให้เกิดการหมักเนื่องมาจาก osmophilic yeasts ได้ (Belitz and Grosch, 1999)

2. น้ำตาล

น้ำตาลเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ของน้ำผึ้งมากกว่า 95% ของปริมาณของแข็งในน้ำผึ้ง องค์ประกอบของน้ำตาลขึ้นอยู่กับชนิดของดอกไม้ สภาพอากาศและพื้นที่ที่ผึ้งไปคูดน้ำหวานมา Zamora and Chirife (2006) ได้รายงานว่ น้ำตาลในน้ำผึ้งประกอบไปด้วย

2.1 น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (โมโนแซคคาไรด์) เช่น กลูโคสและฟรุกโตส ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของน้ำผึ้ง คิดเป็นประมาณ 80-85% ของของแข็งในน้ำผึ้ง และเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้น้ำผึ้งมีรสหวาน ซึ่งสิ่งมีชีวิตส่วนใหญ่จะใช้น้ำตาลกลุ่มนี้ในการสร้างพลังงาน

2.2 น้ำตาลโมเลกุลคู่ (ไดแซคคาไรด์) เช่น มอลโตสและซูโครส

2.3 น้ำตาลอื่นๆ เช่น ไตรแซคคาไรด์ และ โอลิโกแซคคาไรด์ แต่มีในปริมาณน้อย

น้ำตาลทั้งหมดนี้เป็นน้ำตาลที่เป็นส่วนผสมขององค์ประกอบโดยธรรมชาติจากต่อมน้ำหวานของพืชหรือเป็นส่วนผสมของน้ำหวานที่แมลงจำพวกเพี้ยปล่อยออกมาหลังจากที่คูดกินน้ำเลี้ยงจากพืช ส่วนน้ำหวานหรือน้ำเชื่อมที่ได้จากการเอาน้ำตาลทราย น้ำตาลปีบ น้ำตาลปึก หรือน้ำตาลสังเคราะห์อื่นๆ ไปละลายน้ำแล้วให้ผึ้งกินไม่เป็นที่ยอมรับว่าเป็นส่วนผสมของน้ำผึ้งโดยธรรมชาติ ดังนั้นในน้ำผึ้งแท้บริสุทธิ์จึงต้องมีข้อกำหนดว่าจะมีน้ำตาลซูโครสได้เพียงไม่เกิน 5% โดยน้ำหนัก (ตารางที่ 2.2) น้ำผึ้งที่มีปริมาณน้ำตาลซูโครสสูงกว่านี้ ถือว่าเป็นน้ำผึ้งผสมน้ำเชื่อมซึ่งไม่ใช่ น้ำผึ้งบริสุทธิ์ (นาวิ, 2550)

3. กรด

กรดในน้ำผึ้งมีหลายชนิด แต่ที่สำคัญคือ กรดกลูโคนิก ซึ่งเกิดจากกิจกรรมของเอนไซม์ กลูโคสออกซิเดส นอกจากนั้นยังพบกรดชนิดอื่นๆ ในน้ำผึ้งแต่มีอยู่ในปริมาณน้อยเช่น กรดอะซีติก บิวทีริก แลคติก ซิตริก ฟอร์มิก มาลิก และออกซาลิก เป็นต้น (Belitz and Grosch, 1999)

4. กรดอะมิโน

น้ำผึ้งประกอบด้วยกรดอะมิโนหลายชนิด ซึ่งกรดอะมิโนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของโปรตีน ซึ่งพบในเกสรดอกไม้ที่ผึ้งได้ไปคูดน้ำหวานมา ตัวอย่างกรดอะมิโนที่มีในน้ำผึ้งแสดงดังตารางที่ 2.3

5. แร่ธาตุ

แร่ธาตุในน้ำผึ้งมีอยู่หลายชนิด เช่น แคลเซียม โซเดียมและฟอสฟอรัส ปริมาณแร่ธาตุเหล่านี้แม้จะมีไม่มากนัก แต่ก็อยู่ในสัดส่วนที่เหมาะสม การเติมน้ำผึ้งลงไปแทนน้ำตาลในอาหารชนิดต่างๆ เป็นการเพิ่มปริมาณแร่ธาตุที่จำเป็นให้แก่ร่างกายด้วย

ตารางที่ 2.2 มาตรฐานทางเคมีของน้ำผึ้ง

คุณลักษณะทางเคมี	เกณฑ์ที่กำหนดตาม มาตรฐาน มอก.	เกณฑ์ที่กำหนดตาม มาตรฐาน CODEX
1. น้ำตาลรีดิวซ์ซึ่ง คิดเป็นน้ำตาลอินเวิร์ต (%) ไม่น้อยกว่า	65	65
2. ความชื้น (%) ไม่เกิน	21	21
3. ซูโครส (%) ไม่เกิน	5	5
4. สารที่ไม่ละลายน้ำ (%) ไม่เกิน	0.1	0.1
5. เถ้า (%) ไม่เกิน	0.6	0.6
6. ความเป็นกรด มิลลิวาเลนต์ของกรด ต่อ 1000 กรัม ไม่เกิน	40	40
7. ค่าไดเอสเตส แอกติวิตี (diastase activity) และปริมาณไฮดรอกซีเมทิล เฟอร์ฟิวรัล (hydroxyl methyl furfural)		
7.1 ค่าไดเอสเตส แอกติวิตีต้องไม่น้อยกว่า เมื่อปริมาณไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟิวรัล มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ไม่เกิน	8 40	3 80
7.2 ค่าไดเอสเตส แอกติวิตี ต้องไม่น้อยกว่า เมื่อปริมาณไฮดรอกซีเมทิล เฟอร์ฟิวรัล มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ไม่เกิน	3 15	- -

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

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	ออไนทีน (Orn)	0.26
ซิสเตอีน (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)

6. เอนไซม์

เอนไซม์คือสารอินทรีย์ประเภทโปรตีนที่มีอยู่ในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาต่างๆ ภายในเซลล์นั้นๆ เช่น การย่อยอาหาร เอนไซม์ที่สำคัญที่สุดที่พบในน้ำผึ้งคือ อินเวอร์เทส (invertase) ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนน้ำตาลซูโครสเป็นน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโตสและเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส (glucose oxidase) ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนน้ำตาลกลูโคสเป็นกรดกลูโคนิก อันเป็นส่วนประกอบของน้ำตาลกลูโคส (นาวิ, 2550) นอกจากนั้นยังพบเอนไซม์ไดเอสเตส (diastase) ในน้ำผึ้งอีกด้วย โดยแอกติวิตีของเอนไซม์อินเวอร์เทสและไดเอสเตสพร้อมกับปริมาณไฮดรอกซีเมทิลเฟอรัฟรัล (hydroxyl methyl furfural) สามารถใช้ในการประเมินได้ว่าน้ำผึ้งนั้นผ่านการให้ความร้อนหรือไม่ (Belitz and Grosch, 1999) ซึ่งอุณหภูมิในการให้ความร้อนมีผลต่อ

ปริมาณไฮดรอกซีเมทิลเฟอรัฟรัล โดยปริมาณไฮดรอกซีเมทิลเฟอรัฟรัลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Crane, 1984) ดังนั้นจึงมีการกำหนดค่ามาตรฐาน ไดเอสเตสแอกติวิตี (diastase activity) และปริมาณไฮดรอกซีเมทิลเฟอรัฟรัลไว้ในน้ำผึ้งดังตารางที่ 2.2

7. วิตามิน

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

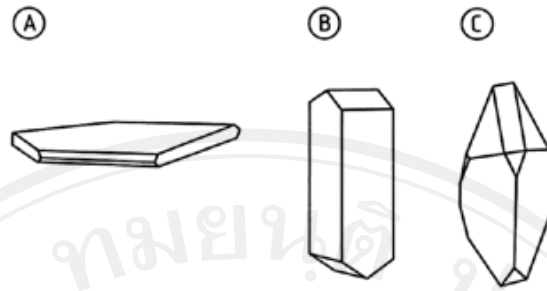
8. อินฮิบิน (inhibine)

คือสารที่มีคุณสมบัติในการต่อต้านเชื้อโรค คนในสมัยโบราณนิยมใช้น้ำผึ้งในการรักษาบาดแผลและแก้อาการอักเสบ ซึ่งได้ผลเพราะน้ำผึ้งมีสารอินฮิบินเป็นองค์ประกอบ

2.1.2 การตกผลึกของน้ำผึ้งในระหว่างการเก็บรักษา

ในบางครั้งน้ำผึ้งที่ได้จากน้ำหวานดอกไม้บางชนิดเช่น ดอกทานตะวัน และดอกยางพารา เมื่อเก็บไว้ในช่วงเวลาหนึ่งอาจมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเช่น น้ำผึ้งมีสีเข้มขึ้น สูญเสียรสชาติ และเกิดการตกผลึกได้ เนื่องจากเกิดการสูญเสียน้ำทำให้โมเลกุลของกลูโคสรวมตัวกันเกิดเป็นผลึกของแข็ง (ขนิษฐา, 2550)

น้ำผึ้งตกผลึก (crystallized honey) คือน้ำผึ้งที่เปลี่ยนสถานะจากของเหลวมาเป็นของแข็งหรือเป็นผลึก สาเหตุมาจากน้ำผึ้งชนิดนั้นมีความหวานมากหรือกลูโคสมีมากกว่าฟรุกโตสหมายความว่าปริมาณกลูโคสมีมากกว่าน้ำหรือความชื้นในน้ำผึ้งมีน้อยก็จะตกผลึกได้ง่าย และจะตกผลึกเร็วขึ้นเมื่อเก็บน้ำผึ้งในอุณหภูมิที่ต่ำ และการเก็บรักษาน้ำผึ้งที่อุณหภูมิต่ำกว่าจะมีผลทำให้ได้ผลึกขนาดเล็กซึ่งเกิดจากการจำกัดการเคลื่อนที่ของโมเลกุล (Hebbbar *et al.*, 2008) โดยปกติน้ำผึ้งทั่วไปไม่ค่อยตกผลึกเพราะมีฟรุกโตสมากกว่ากลูโคส ถ้ามีฟรุกโตสมากกว่ากลูโคสถึง 1.5 เท่า น้ำผึ้งจะไม่เกิดการตกผลึกรูปร่างของผลึกกลูโคสในธรรมชาติจะอยู่ในรูป D-enantiomer และเป็นรูปที่พบได้ทั่วไปในผลึกน้ำผึ้งซึ่งมีสามแบบ คือ α -monohydrate, α -anhydrous และ β -anhydrous (Yong, 2003) แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของผลึกน้ำตาลกลูโคส

A) α -Monohydrate; B) α -Anhydrous; C) β -Anhydrous

ที่มา : Ullmann (2003)

การตกผลึกของน้ำผึ้งอาจเกิดการตกผลึกเป็นบางส่วน ตกผลึกเพียงหนึ่งในสี่ สองในสาม หรือตกผลึกทั้งหมดขึ้นกับค่าของสัดส่วนระหว่างกลูโคสกับน้ำในน้ำผึ้ง น้ำผึ้งที่ตกผลึกไม่ได้เป็นน้ำผึ้งที่เสียเพียงแต่เปลี่ยนสถานะไป น้ำผึ้งไทยที่ตกผลึกง่ายคือ น้ำผึ้งดอกทานตะวัน น้ำผึ้งดอกลิ้นจี่ และน้ำผึ้งจากดอกยางพารา สำหรับวิธีแก้ น้ำผึ้งตกผลึกให้เป็นของเหลวนั้นทำได้โดยหนึ่งที่อุณหภูมิไม่เกิน 60°C จนละลายหมด การปฏิบัติด้วยวิธีนี้จะส่งผลน้อยต่อการสูญเสียคุณภาพของน้ำผึ้ง หากมีการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่านี้จะทำให้สารอินฮิบิน (inhibine) และอื่นๆที่มีในน้ำผึ้งสูญเสียไป และยังคงได้รับการยอมรับจากผู้บริโภค (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2550) และจากรายงานการวิจัยผลของการละลายผลึกน้ำผึ้งด้วยความร้อนที่มีต่อสมบัติทางเคมีและกายภาพ โดยละลายผลึกน้ำผึ้งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 55°C ในอ่างควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่าน้ำผึ้งที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนจะมีปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำอิสระลดลงในขณะที่มีปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้นและน้ำผึ้งมีสีที่เข้มขึ้นจากเดิม อย่างไรก็ตามน้ำผึ้งที่ละลายด้วยความร้อนที่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพเพียงเล็กน้อย ยังคงได้รับการยอมรับจากผู้บริโภค (ขนิษฐา, 2550) แต่ถ้าหากน้ำผึ้งได้รับความร้อนสูงหรือเป็นเวลานาน จะส่งผลให้น้ำผึ้งเสื่อมคุณภาพและไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคได้

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดผลึกของน้ำผึ้งได้แก่ ปริมาณกลูโคส ความชื้น องค์ประกอบอื่นในน้ำผึ้งและสภาวะการเก็บรักษา (สมพิศ, 2545) โดยผลึกที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลึกของกลูโคสซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยการนำตัวอย่างผลึกน้ำผึ้งที่แยกได้ล้างด้วยแอลกอฮอล์ 95% แล้วอบให้แห้งด้วยตู้อบแห้งแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาวิเคราะห์หาจุดหลอมเหลวด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) พบว่าผลึกน้ำผึ้งดอกทานตะวันมีการเปลี่ยนแปลง 2 จุด จุดแรกมีอุณหภูมิการหลอมเหลวที่ 82.95°C ซึ่งจุดหลอมเหลวที่ได้ใกล้เคียงกับจุดหลอมเหลวของน้ำตาลกลูโคส จุดที่ 2 แสดงให้เห็นถึงอุณหภูมิการหลอมเหลวของน้ำตาล

มอลโตสซึ่งมีค่าเท่ากับ 193.48°C (ขนิษฐา, 2550) จึงสามารถสรุปได้ว่าผลึกของน้ำตาลที่เกิดขึ้นในน้ำผึ้งดอกทานตะวันคือ ผลึกกลูโคสโมโนไฮเดรตและมอลโตส แต่จะมีผลึกกลูโคสมากกว่าซึ่งสอดคล้องกับการรายงานของ Comforti *et al.* (2006) การตกผลึกของน้ำผึ้งมีผลทำให้ในส่วนที่เป็นของเหลวมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น และยังมีผลให้ยีสต์สามารถเจริญได้ ซึ่งทำให้น้ำผึ้งเกิดกระบวนการหมัก (Lazaridou *et al.*, 2004) และส่งผลต่อการเกิดผลึก โดยลักษณะเนื้อสัมผัสและลักษณะการเกิดผลึกของน้ำผึ้งขึ้นอยู่กับสัดส่วนของน้ำตาล 2 ชนิดคือ น้ำตาลกลูโคสและฟรุคโตส โดยถ้าหากน้ำผึ้งมีสัดส่วนของน้ำตาลกลูโคสสูงก็จะเกิดการตกผลึกอย่างรวดเร็วและมีขนาดเล็ก แต่ถ้าหากมีสัดส่วนของน้ำตาลฟรุคโตสสูง การตกผลึกก็จะช้าและมีขนาดใหญ่ ที่สำคัญคือการใช้ผลึกล่อก็จะทำให้เกิดผลึกน้ำผึ้งเร็วและมีขนาดเล็กมากขึ้น โดย Dyce (1931) ได้รายงานไว้ว่า การเติมผลึกล่อและควบคุมสภาวะก่อนที่จะมีการเติมผลึกล่อลงไป ในน้ำผึ้ง สภาวะระหว่างเติมผลึก และสภาวะหลังจากการเติมผลึกล่อลงไป ในน้ำผึ้ง พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ใช้เก็บน้ำผึ้งหลังจากการเติมผลึกล่อเพื่อให้ได้ขนาดผลึกที่มีขนาดเล็กและสม่ำเสมอคือ 14°C และการพาสเจอร์ไร้น้ำผึ้งก่อนที่จะนำน้ำผึ้งมาทำการตกผลึกสามารถป้องกันการเจริญของยีสต์ได้ ซึ่งหากมีการสร้างสภาวะการตกผลึกภายใต้การควบคุมสามารถนำน้ำผึ้งที่ตกผลึกผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ได้เรียกว่า น้ำผึ้งครีม (creamed honey) การสร้างสภาวะที่เหมาะสมในการตกผลึกของน้ำผึ้งส่งผลให้เกิดผลึกขนาดเล็กเป็นจำนวนมากและไม่ส่งผลในเชิงลบต่อเนื้อสัมผัสของน้ำผึ้ง (Comforti *et al.*, 2006)

2.1.3 ปัจจัยการตกผลึกของน้ำผึ้ง

1. องค์ประกอบของน้ำผึ้ง

องค์ประกอบน้ำตาลหลักในน้ำผึ้งได้แก่ กลูโคสและฟรุคโตส น้ำผึ้งที่มีกลูโคสปริมาณมาก จะเกิดการตกผลึกได้เร็ว เนื่องจากมีความสามารถในการละลายต่ำกว่าฟรุคโตส (Zamora and Chirife, 2006) อัตราส่วนระหว่างฟรุคโตสต่อกลูโคส สัดส่วนกลูโคสต่อน้ำ ปริมาณเดกซ์ทริน ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) และผลึกของแข็งขนาดเล็กที่มีอยู่ในน้ำผึ้ง จากรายงานการวิจัยพบว่าน้ำผึ้ง จะเกิดการตกผลึกได้มากเมื่อมีปริมาณกลูโคสมากกว่า 280-300 กรัม/กิโลกรัม น้ำผึ้งมีอัตราส่วน ฟรุคโตสต่อกลูโคส น้อยกว่า 1.14 (Bogdanov, 1993) และมีอัตราส่วนกลูโคสต่อน้ำมากกว่าหรือเท่ากับ 2.1 (White, 1974) แต่ถ้าหากมีสิ่งปนเปื้อนที่ละลายน้ำได้เช่น สารคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อน หรือ โปรตีน ผสมอยู่ในน้ำผึ้งจะทำให้สามารถชะลอหรือยับยั้งการตกผลึกของกลูโคสในน้ำผึ้งได้ (Zamora and Chirife, 2006)

2. สภาพการเก็บ

การเก็บรักษาน้ำผึ้งที่อุณหภูมิต่ำจะเร่งให้เกิดการตกผลึกของกลูโคสและยังมีผลต่อความหนืด เนื่องจากความสามารถในการละลายของน้ำตาลจะลดลงตามอุณหภูมิ นอกจากนั้นการคนหรือเขย่าน้ำผึ้งจะช่วยให้เกิดการตกผลึกได้ดีขึ้น เนื่องจากการสัมผัสกันของโมเลกุลน้ำตาลในสารละลายที่หนืดจะมีมากขึ้น (Yong, 2003)

3. สารชักนำอื่นๆที่อยู่ในน้ำผึ้ง

ละอองเกสร ผุ่น ไช้ผึ้ง พรอพอลิส ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำผึ้ง การมีผลึก (nuclei) อนุภาคเล็กๆ หรือฟองอากาศที่มีอยู่ในน้ำผึ้งเป็นจุดเริ่มต้นที่ทำให้เกิดการตกผลึกโดย Escobedo *et al.* (2006) ได้รายงานว่าน้ำผึ้ง tajonal สามารถเกิดการตกผลึกได้ที่อุณหภูมิการเก็บรักษา 27.8°C โดยเริ่มตกผลึกในสัปดาห์ที่ 4 ซึ่งการตกผลึกเริ่มจากการเกิด nuclei และหลังจากนั้นการตกผลึกจะสามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว รูปร่างของผลึกที่พบในครั้งแรกมีลักษณะเป็นรูปวงรี หลังจากนั้นในสัปดาห์ที่ 8 ผลึกน้ำผึ้งมีลักษณะเป็นรูปหกเหลี่ยม โดยการตกผลึกที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับความอึดตัวของกลูโคส อุณหภูมิ และความเป็นกรดค้าง ซึ่งมีผลต่ออัตราการขยายขนาดและรูปร่างของผลึก

2.1.4 การเสื่อมคุณภาพของน้ำผึ้ง

การเก็บน้ำผึ้งในที่อุณหภูมิ 0-10°C เป็นเวลาหลายปี มักจะไม่ทำให้น้ำผึ้งเปลี่ยนแปลงในทางส่วนประกอบและกิจกรรมทางชีวเคมี (biochemical activity) รวมทั้งสีและกลิ่นรส น้ำผึ้งจะไม่เสื่อมเนื่องจากจุลินทรีย์ ยกเว้น osmophilic yeast จะเกิดในน้ำผึ้งที่มีปริมาณความชื้นสูง (Varju *et al.*, 1970) จากรายงานการวิจัยของ White *et al.* (1953) พบว่ามีเอนไซม์ทรานส์กลูโคไซเลส (transglucosylase) จะเปลี่ยนกลูโคสไปเป็นไดแซคคาไรด์หลายชนิดเมื่อเก็บน้ำผึ้งไว้ เช่น มอลโทส และไอโซมอลโทส White *et al.* (1962) พบว่าเมื่อเก็บน้ำผึ้งที่อุณหภูมิ $26 \pm 3^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 2 ปี สีจะคล้ำขึ้น และพบว่าโมโนแซคคาไรด์จะเปลี่ยนเป็นไดแซคคาไรด์ประมาณ 9% ต่อปี อัตราส่วนระหว่างกลูโคสกับฟรุกโตสจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากกลูโคสลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนฟรุกโตสจะเปลี่ยนเป็นกรดกลูโคนิก เอนไซม์จะลดลงโดยเฉพาะไดเอสเตสจะลดลงเร็วกว่าเอนไซม์อื่นๆ นอกจากนี้ Paine *et al.* (1934) ยังพบว่าน้ำผึ้งที่เก็บไว้เป็นเวลานานๆ ถึงแม้จะเก็บที่อุณหภูมิห้องจะไม่เสื่อมแต่จะทำให้กรดอะมิโนทำปฏิกิริยากับน้ำตาลรีดิวซ์ (reducing sugar) ได้สาร melanoidin ทำให้น้ำผึ้งมีสีเข้ม แสดงว่าน้ำผึ้งที่มีกรดอะมิโนสูงมีโอกาสจะเกิดสีคล้ำได้มากกว่าน้ำผึ้งที่มีกรดอะมิโนต่ำ น้ำผึ้งที่มีความชื้นต่ำทำให้ความเข้มข้นของน้ำตาลสูง จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญได้ จึงสามารถเก็บน้ำผึ้งไว้เป็นเวลานานโดยไม่มีการเน่าเสีย ส่วนน้ำผึ้งที่มีความชื้นสูงมักมีลักษณะเหลว

และมีฟองอากาศที่บริเวณผิวของน้ำผึ้งในภาชนะบรรจุเป็นจำนวนมาก เมื่อเกิดการหมัก กลิ่นของน้ำผึ้งจะบูดเปรี้ยว เนื่องจากน้ำตาลบางส่วนเปลี่ยนกรดเป็นอัลกอฮอล์ (Cathaway, 1932) เพราะฉะนั้นความชื้นในน้ำผึ้งจึงเป็นองค์ประกอบที่ต้องนำมาพิจารณาเมื่อต้องการเก็บรักษาน้ำผึ้งไว้เป็นระยะเวลานานๆ เนื่องจากเมื่อเกิดการหมักแล้วองค์ประกอบของน้ำผึ้งจะเปลี่ยนไป ซึ่งมีผลทำให้สมบัติทางกายภาพเกี่ยวกับสี กลิ่น และความเข้มข้นของน้ำผึ้งเปลี่ยนไปด้วย โดยทั่วไปกลิ่นและรสของน้ำผึ้งจะเป็นแรงจูงใจที่สำคัญสำหรับผู้บริโภค

ในน้ำผึ้งที่มีปริมาณของน้ำตาลสูง จุลินทรีย์ที่สามารถเจริญเติบโตได้เป็นพวกที่สามารถทนสภาพที่มีความเข้มข้นของน้ำตาลสูงได้แก่พวก osmophilic yeast และจะเกิดการหมัก เมื่อมีความชื้นและอุณหภูมิที่เหมาะสม มียีสต์หลายชนิดที่แยกได้จากน้ำผึ้งที่สามารถเกิดการหมักได้แก่ *Nematospora ashbya gossypii*, *Saccharomyces bisporus*, *S. torulosus*, *Schizosaccharomyces octosporus*, *Schwanniomyces occidentilis*, *Torula mellis*, *Zygosaccharomyces spp.*, *Z. barkeri*, *Z. japonicus*, *Z. mellis*, *Z. mellis acidi*, *Z. mussbaumeri*, *Z. priorianus* และ *Z. richteri* (Crane, 1984) สำหรับปริมาณของไฮดรอกซีเมทิลเพอร์ฟิวรัลในน้ำผึ้งใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงอายุและการเก็บรักษาน้ำผึ้งได้เป็นอย่างดีเช่นเดียวกับเอนไซม์อินเวอร์เทสและไดเอสเตส ระดับไฮดรอกซีเมทิลเพอร์ฟิวรัลในน้ำผึ้งใหม่ เท่ากับ 0.6-2.0 mg/kg เมื่อน้ำผึ้งได้รับความร้อนหรือเก็บไว้เป็นเวลานาน ปริมาณของไฮดรอกซีเมทิลเพอร์ฟิวรัลอาจสูงถึง 40 mg/kg (Crane, 1984)

2.2 การแปรรูปน้ำผึ้งผง

การผลิตน้ำผึ้งผงสามารถทำได้โดยกระบวนการทำแห้ง การกำจัดน้ำหรือการทำแห้ง (drying) หมายถึง การใช้ความร้อนภายใต้สภาวะควบคุมเพื่อกำจัดน้ำส่วนใหญ่ที่อยู่ในอาหารโดยการระเหยน้ำหรือการระเหิดของแข็งในการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze drying) วัตถุประสงค์ของการกำจัดน้ำคือ การยืดอายุการเก็บรักษาอาหารโดยการลดค่า a_w ซึ่งมีผลยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์และการทำงานของเอนไซม์ นอกจากนั้นการลดน้ำหนักและปริมาณของอาหารยังช่วยลดค่าใช้จ่ายของการเก็บรักษาและขนส่ง เพิ่มความหลากหลายและความสะดวกให้แก่ผู้บริโภค อย่างไรก็ตามการทำแห้งทำให้เกิดการสูญเสียทั้งคุณภาพการบริโภคและคุณค่าทางโภชนาการของอาหาร (วิไล, 2546)

การทำแห้งน้ำผึ้งผงทำได้หลายวิธีเช่น การใช้ตู้อบแห้งแบบใช้ลมร้อน (hot air drying) แบบพ่นฝอย (spray drying) อบแห้งแบบสุญญากาศ (vacuum shelf drying) การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze drying หรือ sublimation) เป็นต้น ซึ่งอาหารแห้งที่ได้จะมีปริมาณน้ำหรือความชื้นประมาณ 2-3% ทำให้ลดค่า a_w ในอาหารให้น้อยลงด้วย จึงทำให้ยืดอายุการเก็บรักษาได้นานขึ้น

เพราะเมื่อน้ำในอาหารลดลง จะสามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์และแอกทิวิตีของเอนไซม์ได้ (นิธิยา, 2549) ซึ่งงานวิจัยค้นคว้าแบบอิสระฉบับนี้ใช้การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งและการอบแห้งแบบสุญญากาศ

2.2.1 การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง เป็นกระบวนการทำแห้งที่ใช้กระบวนการระเหิดของน้ำแข็ง ซึ่งเป็นกลไกหลักของการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็ง โดยน้ำที่สถานะของเหลวจะถูกทำให้อยู่ในสถานะของแข็งระหว่างการทำเยือกแข็งเบื้องต้น หลังจากนั้นจะถูกกำจัดออกโดยการระเหิดในระหว่างสถานะการทำให้แห้งขั้นต้นภายใต้สถานะการทำให้แห้งต่ำกว่าจุด triple point ของน้ำคือ 0°C และภายใต้ความดัน 610.5 Pa (วิล, 2546)

กระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเกิดขึ้นใน 3 ขั้นตอน (วิล, 2546) คือ

ขั้นตอนการแช่เยือกแข็ง (Freezing stage) คือการทำให้ น้ำในผลิตภัณฑ์แข็งตัวโดยการนำอาหารมาแช่แข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของสารละลายในอาหารนั้น จนทำให้องค์ประกอบทุกอย่างที่สามารถแข็งตัวได้ ในอาหารเกิดการแข็งตัวอย่างสมบูรณ์

ขั้นตอนการระเหิด (Primary drying stage) การระเหิดเอาส่วนของสารละลายที่แข็งตัวออก จากผลิตภัณฑ์โดยการลดความดันรอบๆชิ้นอาหารให้ต่ำลง จนน้ำแข็งเกิดการระเหิดอย่างต่อเนื่อง

ขั้นตอนการระเหย (Secondary drying stage) คือการระเหยเอาสารละลายเข้มข้นที่ไม่แข็งตัวในผลิตภัณฑ์ออก ซึ่งต้องมีการให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย

จากหลักการดังกล่าวสามารถนำมาทำอาหารแห้งได้ โดยนำอาหารมาแช่แข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของสารละลายในอาหาร จากนั้นนำอาหารไปไว้ในสถานะที่มีความดันต่ำ น้ำแข็งในเนื้ออาหารจะเกิดการระเหิดอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งน้ำที่เป็นของแข็งในอาหารถูกถ่ายเทออกไป ทำให้อาหารแห้ง การระเหิดของน้ำแข็งจะต้องใช้ความร้อนจำนวนหนึ่งที่เรียกว่า ความร้อนในการระเหิด (Heat of sublimation) น้ำในผลิตภัณฑ์จะระเหิดออกไปโดยไม่กลายเป็นของเหลวทำให้การเคลื่อนที่ของสารละลายต่างๆในผลิตภัณฑ์เกิดน้อย โครงสร้างของผลิตภัณฑ์จะยังคงอยู่รูปเดิมโดยไม่มีทรุดตัว การที่มีอุณหภูมิต่ำและความดันต่ำร่วมกับการไม่มีน้ำที่เป็นของเหลวและออกซิเจน ช่วยให้เกิดโครงสร้างรูพรุนเริ่มต้นและรักษาความเป็นรูพรุนที่เพิ่มสูงขึ้นไว้ได้ในระหว่างการทำแห้ง (Fellow, 2000) ซึ่งปัจจัยดังกล่าวยังช่วยลดการเสียดสีสภาพเนื่องจากความร้อนและการใช้สารเคมีอีกด้วย ทำให้สามารถรักษาสี กลิ่น รสชาติและคุณค่าทางอาหารได้ดี

การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying) จึงเป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการกักเก็บสารประกอบที่สามารถละลายน้ำได้และสารจำพวกกลีโคไลนส์ที่ได้จากธรรมชาติ (Desai and Park,

2005) รวมถึงสารที่ไวต่อความร้อน (heat sensitive materials) อย่างไรก็ตามเนื่องจากราคาในการทำแห้งด้วยกระบวนการนี้มีราคาสูง การนำกระบวนการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็งนี้ไปประยุกต์ใช้จะถูกจำกัดในผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูงได้แก่ ยา ผลิตภัณฑ์ทางชีวภาพ และอาหารที่มีคุณภาพ (Song *et al.*, 2005) แม้ว่าการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นกระบวนการทำให้แห้งที่มีค่าใช้จ่ายสูง แต่ค่าใช้จ่ายอาจจะลดลงได้ถ้ากระบวนการทำให้แห้งใช้ระยะเวลาสั้น (Lin *et al.*, 2005) การทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นกระบวนการทำแห้งสำหรับวัสดุที่มีความไวต่อความร้อน เช่น อาหาร ยา วัสดุชีวภาพ และผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูง เช่น เนื้อ กาแฟ ปลา อาหารทะเลบางชนิด และผลไม้ เป็นต้น (Onwulata, 2005) เนื่องจากเป็นเทคนิคการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี และการสูญเสียเนื่องจากความร้อน (Schoug *et al.*, 2006)

กระบวนการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็งประกอบด้วยกระบวนการ 2 ขั้นตอนคือในขั้นตอนแรก ผลิตภัณฑ์ถูกแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการยุบตัวของโครงสร้างผลิตภัณฑ์ (collapse temperature, T_c) ซึ่งการทำให้แห้งระยะแรกเกิดขึ้นหลังจากผ่านกระบวนการแช่เยือกแข็งแล้วความดันของห้องอบมีค่าต่ำลง ในขณะที่อุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นและน้ำอิสระถูกกำจัดโดยการระเหิด นอกจากนี้การทำให้แห้งในระยะเริ่มต้นอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์จะถูกรักษาไว้ให้ต่ำกว่า critical thermal threshold ได้แก่ค่า T_c อีกด้วย ในที่สุดกระบวนการทำให้แห้งระยะที่สองจะกำจัดน้ำที่ก่อกวนระ โดยการ desorption และอุณหภูมิจึงจะกลับมาที่อุณหภูมิห้องที่ระเหิด (Schoug *et al.*, 2006) ข้อดีของการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็งคือ เป็นกระบวนการทำแห้งที่เหมาะสมกับวัตถุดิบส่วนใหญ่ อุณหภูมิในการอบแห้งต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง กระทำที่ความดันต่ำ (27-133 Pa) และอาศัยการระเหิดของน้ำแข็งจากผิวหน้าของการระเหิดการเคลื่อนตัวของสารถูกละลายเกิดขึ้นน้อยมากเนื่องจากอยู่ในสภาวะเยือกแข็ง นอกจากนี้การอบแห้งเร็วและสมบูรณ์ สี รส และกลิ่นของอาหารเหมือนเดิม สามารถคงคุณค่าทางโภชนาการไว้ได้ เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ไม่ใช้ความร้อน แต่มีข้อเสียคือ ค่าใช้จ่ายในการผลิตค่อนข้างสูง (Fellows, 2000)

นอกจากนั้นการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการกักเก็บสารประกอบที่สามารถละลายน้ำได้และสารจำพวกกลีโคไซด์ที่ได้จากธรรมชาติ (Desai and Park, 2005) เนื่องจากการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นการใช้ความดันสูงเพื่อกำจัดน้ำออกจากวัฏภาคของแข็ง (น้ำแข็ง) ให้กลายเป็นไอโดยไม่ผ่านวัฏภาคของเหลวจนกระทั่งวัตถุดิบแข็งตัวและแห้ง โดยกระบวนการทั้งหมดจะเกิดที่อุณหภูมิต่ำ โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็งถ้าอยู่ในบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมจะสามารถเก็บไว้ได้โดยไม่จำกัดระยะเวลา ซึ่งยังคงรักษาคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี ชีววิทยาและคุณภาพทางประสาทสัมผัสได้เหมือนกับผลิตภัณฑ์เริ่มต้น อีกทั้งการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งยังลดการสูญเสียคุณภาพเนื่องมาจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลทั้งที่เกิดจาก

เอนไซม์และไม่ใช้เอนไซม์ ช่วยรักษาสีและวิตามินของอาหาร (Ramaswamy and Marcotte, 2006) อีกทั้งองค์ประกอบต่างๆของอาหารที่ไวต่อความร้อน จึงไม่มีการสูญเสียคุณภาพของผลิตภัณฑ์ หรือสูญเสียไปน้อยมาก การเคลื่อนย้ายของผลิตภัณฑ์น้ำแข็งจะทำให้เกิดโครงสร้างที่เป็นรูพรุน ทำให้ผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มที่จะสามารถละลายน้ำได้เร็ว (Rahman and Perera, 1999)

จากตารางที่ 2.4 และ 2.5 แสดงให้เห็นถึงข้อดีและข้อเสียของการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง รวมถึงความแตกต่างระหว่างการอบแห้งแบบดั้งเดิมเช่น การอบแห้งแบบลมร้อน การอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ และการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง จะเห็นได้ว่าเทคนิคการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งอาจได้รับความนิยมน้อยกว่าเทคนิคอื่นเพราะราคาของการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีราคาสูงกว่าการอบแห้งแบบอื่น โดยมากกว่าเป็น 4 เท่าของการอบแห้งแบบดั้งเดิมและมากกว่าเป็น 50 เท่าของการอบแห้งแบบพ่นฝอย (spray dry) การเก็บรักษาและการขนส่งของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งค่อนข้างแพง อีกทั้งการนำไปประยุกต์ใช้เพื่อทางการค้าค่อนข้างถูกจำกัดเนื่องมาจากกระบวนการที่ใช้เวลานาน (Madene *et al.*, 2005)

ตารางที่ 2.4 ข้อดีและข้อเสียของการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

ข้อดี	ข้อเสีย
1. ไม่ถูกทำลายด้วยความร้อน	1. การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีราคาสูงกว่าการอบแห้งแบบอื่น
2. สามารถกักเก็บสารให้กลิ่นรสได้	2. ผลิตภัณฑ์จะถูกทำลายโดยการแช่แข็งก่อนที่จะทำให้แห้ง
3. กักเก็บวิตามินไว้ได้ดี	3. ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งค่อนข้างจะดูความชื้นเร็ว นอกจากจะเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ที่มีความชื้นต่ำ
4. ได้ผลิตภัณฑ์อบแห้งอย่างรวดเร็ว บางครั้งอาจต้องทำให้เยือกแข็งแบบช้าๆก่อนการทำแห้ง	4. ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะค่อนข้างเปราะ
5. ผลิตภัณฑ์หาคัดตัวน้อย	5. ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งมักจะมีสีซีดลงเมื่อเก็บรักษา
6. ผลิตภัณฑ์มีอายุการเก็บรักษาที่ยาวนาน (บรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสม)	

ที่มา: Schwartzberg (2009)

ตารางที่ 2.5 ความแตกต่างระหว่างการอบแห้งแบบดั้งเดิมกับการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

วิธีการอบแห้งแบบดั้งเดิม	วิธีอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง
1. ได้ผลดีกับอาหารที่แห้งง่าย เช่น ผัก เมล็ดธัญพืช	1. ได้ผลดีสำหรับอาหารส่วนใหญ่ แต่การใช้จำกัดอยู่กับอาหารที่อบแห้งยากด้วยวิธีอื่น
2. โดยทั่วไปไม่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์เนื้อ	2. ได้ผลดีกับเนื้อสุกหรือสด
3. ช่วงอุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง 37-93°C	3. ใช้อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง
4. ความดันบรรยากาศ	4. ความดันต่ำ (27-133 Pa)
5. อาศัยการระเหยน้ำจากผิวของอาหาร	5. อาศัยการระเหิดของน้ำแข็ง
6. เกิดการเคลื่อนที่ของตัวถูกละลายและอาจเกิดเปลือกแข็ง	6. มีการเคลื่อนที่ของตัวถูกละลายน้อยมาก
7. แรงเค้นในอาหารทำให้เกิดความเสียหายของโครงสร้างและเกิดการหดตัว	7. เกิดความเสียหายของโครงสร้างและเกิดการหดตัวน้อยที่สุด
8. เกิดการกำจัดน้ำอย่างช้าๆและไม่สมบูรณ์	8. เกิดการกำจัดน้ำอย่างสมบูรณ์
9. ได้ของแข็งหรืออาหารแห้งที่มีรูพรุนซึ่งมักจะมีความหนาแน่นสูงกว่าวัตถุดิบ	9. ได้อาหารแห้งที่มีความหนาแน่นต่ำกว่าวัตถุดิบเริ่มต้น
10. กลิ่นรสมักผิดปกติ	10. กลิ่นรสมักไม่เปลี่ยน
11. สีมักจะคล้ำลง	11. สีไม่ค่อยเปลี่ยน
12. คุณค่าทางโภชนาการลดลง	12. คุณค่าทางโภชนาการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก
13. ต้นทุนส่วนใหญ่ต่ำ	13. ต้นทุนมักสูง อาจสูงถึง 4 เท่าของวิธีการอบแห้งแบบดั้งเดิม

ที่มา: วิไล (2546)

2.2.2 การทำแห้งแบบสุญญากาศ

หลักการทั่วไป

เป็นการระเหยนํ้าออกจากอาหารภายใต้สุญญากาศและอุณหภูมิต่ำกว่าความดันบรรยากาศ เพื่อให้การระเหยได้เร็วขึ้นแม้จะใช้อุณหภูมิไม่สูงมากนัก โดยอุณหภูมิที่นิยมใช้ในการอบแห้งแบบสุญญากาศอยู่ในช่วง 65-75°C (Anon, 1952; Copley *et al.*, 1956) อาหารที่นิยมใช้กับวิธีการอบแห้งชนิดนี้มักเป็นอาหารที่มีการเปลี่ยนแปลงได้ง่ายเมื่อใช้อุณหภูมิสูงเช่น ผักหรือผลไม้ที่มีกลิ่นหอม ทั้งนี้เพื่อป้องกันการสลายตัวของวิตามินบางชนิดที่ไม่ทนต่อความร้อน การสูญเสียกลิ่นรสเนื่องจากการสูญเสียสารระเหยง่ายทั้งหลาย แต่อาจเกิดความเสียหายต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหารในบางครั้งเพราะในระหว่างการดึงนํ้าออกภายใต้ระบบสุญญากาศจะทำให้นํ้าระเหยเร็วมาก ทำให้ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์แห้งเกิดการแข็งและหดตัว ทำให้ผลิตภัณฑ์แห้งที่ผิวหน้าแต่ภายในยังชื้นอยู่ ซึ่งเป็นข้อเสียของการทำแห้งโดยวิธีนี้ (ฉัญญา, 2544)

ระบบการทำงาน

การอบแห้งในระบบความดันต่ำ จุดเดือดของนํ้าจะต่ำกว่า 100°C โดยการลดความดันบรรยากาศให้ต่ำลงเท่ากับ 0.6107 kPa จุดเดือดของนํ้าจะเป็น 0°C ระดับความดันและอุณหภูมิที่ใช้อบแห้งในระบบนี้ขึ้นอยู่กับความไวต่อความร้อนของวัตถุดิบ การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในระบบเป็นแบบการนำความร้อนและการแผ่รังสี อย่างไรก็ตามเมื่อนํ้าระเหยไปทำให้อาหารหดตัวซึ่งจะทำให้พื้นที่สำหรับการถ่ายเทความร้อนลดลง (รัตนา และคณะ, 2540) คุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้งมีคุณภาพดีเนื่องจากทำการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ สารระเหยต่างๆยังคงอยู่ในผลิตภัณฑ์ แต่จะมีความไวในการดูดความชื้น ดังนั้นจึงต้องมีการบรรจุที่เหมาะสมเพื่อป้องกันการดูดความชื้นเข้าสู่ผลิตภัณฑ์ในระหว่างการเก็บรักษา

ชนิดของเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศมี 4 ชนิด (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2552) ได้แก่

Vacuum shelf dryer เป็นระบบที่ง่ายที่สุดสำหรับเครื่องอบแห้งสุญญากาศ ตัวเครื่องประกอบด้วยตู้สุญญากาศ ซึ่งภายในมีชั้นรองรับถาดวางผลิตภัณฑ์ ชั้นวางอาหารอาจได้รับความร้อนจากไฟฟ้าซึ่งจะถ่ายเทความร้อนไปยังอาหาร โดยการนำความร้อนหรือใช้อากาศร้อนเป็นตัวพาความร้อนไปยังชั้นผลิตภัณฑ์ ตัวตู้สุญญากาศจะต่อกับอุปกรณ์สร้างระบบสุญญากาศที่อยู่ภายนอกตู้ ซึ่งอาจเป็นปั๊มสุญญากาศหรือ steam ejector อุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับระบบคือคอนเดนเซอร์ซึ่งเป็นตัวเก็บไอนํ้าอาจอยู่ในหรือนอกตู้ แต่ควรติดตั้งอยู่ก่อนหน้าปั๊มสุญญากาศเพื่อป้องกันไม่ให้ไอนํ้าเข้าไปในปั๊ม เครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบนี้เหมาะสำหรับการผลิตแบบกะสามารถ

บำรุงรักษาได้ง่ายเหมาะสำหรับการใช้ระดับสุญญากาศสูง สามารถใช้ได้กับผลิตภัณฑ์ในทุก รูปแบบตั้งแต่รูปของเหลว ของเหลวเข้มข้น และเป็นผง

Conical rotating vacuum dryer เป็นการผลิตแบบกะลักษณะเป็นถังสุญญากาศ ทรงกระบอกหมุน ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการลื่นไหลอย่างนุ่มนวลผ่านผนังของถังที่หุ้มด้วยชั้นของ น้ำร้อนรอบๆ ซึ่งเป็นการเพิ่มความร้อนให้กับผลิตภัณฑ์อย่างทั่วถึง เหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มี ลักษณะเป็นผงและชื้น และไม่มีการเกาะติดกันหรือติดผนังซึ่งจะทำให้ลดอัตราการถ่ายเทความร้อน และการอบแห้ง

Rotary vacuum dryer เป็นเครื่องที่มีประสิทธิภาพสูง มีลักษณะเป็นลูกกลิ้งแนวอนไม่ เคลื่อนที่ หุ้มด้วยชั้นของน้ำร้อน เป็นการทำงานแบบกะ ใช้ได้กับผลิตภัณฑ์หลายชนิดและต้องการ ระดับสุญญากาศสูงๆ

Continuous vacuum drying เป็นการผลิตแบบต่อเนื่องโดยการอบด้วยระบบสุญญากาศ ร่วมกับสายพานให้ความร้อน (belt dryer) ให้ความร้อนโดยเครื่องให้ความร้อนแบบอินฟราเรด (infrared heater) หรือให้ความร้อนจากแผ่นร้อนจากด้านบนหรือล่าง จะมีการกลับผลิตภัณฑ์ ระหว่างการลำเลียงจากสายพานหนึ่งไปสายพานอีกอันหนึ่ง เพื่อให้ผลิตภัณฑ์แห้งอย่างทั่วถึง เหมาะสำหรับผลไม้เป็นชิ้นๆ การอบแห้งแบบนี้ต้องใช้เงินลงทุนสูงกว่าแบบกะ เมื่อใช้กำลังการผลิตที่เท่ากัน

เทคนิคการอบแห้งแบบสุญญากาศ (Vacuum drying) คล้ายกับการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง แต่แตกต่างกันที่ผลิตภัณฑ์จะไม่ผ่านการแช่เยือกแข็ง ซึ่งสามารถทำให้อาหารแห้งได้โดยไม่ใช้อุณหภูมิสูงแต่จะทำให้ความดันภายในตู้อบสุญญากาศต่ำเพื่อทำให้น้ำระเหยที่อุณหภูมิต่ำกว่า สภาวะความดันบรรยากาศ การขาดอากาศระหว่างการอบแห้งจะทำให้ลดการเกิดปฏิกิริยา ออกซิเดชัน อีกทั้งช่วยปรับปรุงสี เนื้อสัมผัสและกลิ่นของผลิตภัณฑ์ของอาหารอบแห้ง (Rahman and Perera, 1999) การกำจัดน้ำที่มากขึ้นและการทำให้แห้งภายใต้อุณหภูมิต่ำจะป้องกัน องค์ประกอบต่างๆของอาหารที่ไวต่อความร้อน การระเหยของน้ำจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากสุญญากาศ การเคลื่อนที่ของน้ำที่รวดเร็วจะทำให้โครงสร้างภายในผลิตภัณฑ์เกิดการ พองตัวหรือมีลักษณะเป็นโฟม (Ramaswamy and Marcotte, 2006) จากรายงานการวิจัยของ Mowlah *et al.*, (1982) ได้ศึกษาถึงผลของกระบวนการผลิตกล้วยผงจากกล้วยวาเลอรี [*Musa (Sapientum L.) 'Valery'*] ต่อสมบัติของการดูดความชื้นกลับของกล้วยผงและสมบัติทางด้านสี พบว่าการทำแห้งโดยใช้อากาศร้อน การทำแห้งแบบสุญญากาศ การดึงน้ำออกก่อนทำแห้งแบบแช่ เยือกแข็ง (dehydro-freeze drying) และการทำแห้งแบบดึงน้ำออกก่อนทำแห้งแบบสุญญากาศ (dehydro-vacuum drying) ไม่มีผลต่อ absorption isotherm ของกล้วยผง ยกเว้นตัวอย่างที่ได้จากการทำแห้ง

แบบแช่แข็ง (freeze drying) ที่มีความชื้นต่ำ (0-10%) นอกจากนั้นพบว่าปริมาณน้ำชั้นเดี่ยว (monolayer moisture content) ของทุกตัวอย่างอยู่ในช่วง 5.2-5.4% ยกเว้นตัวอย่างจากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งสูงกว่าเล็กน้อย คืออยู่ในช่วง 6.2% คุณภาพของสีเรียงลำดับจากดีมากไปจนถึงดีน้อยสุดดังนี้คือ การทำแห้งแบบแช่แข็ง แบบคังน้ำออกก่อนทำแห้งแบบแช่แข็ง แบบสุญญากาศ แบบคังน้ำออกก่อนทำแห้งแบบสุญญากาศและแบบอากาศร้อน โดยที่แต่ละคุณภาพสีมีความแตกต่างกันน้อยมากในแต่ละวิธีการทำแห้ง ยกเว้นตัวอย่างจากการทำแห้งแบบอากาศร้อนที่มีสีคล้ำกว่าตัวอย่างอื่นๆ

2.2.3 การอบแห้งแบบพ่นฝอย

การอบแห้งแบบพ่นฝอย (spray drying) เป็นวิธีการที่นิยมใช้สำหรับการทำแห้งสารละลาย อินทรีย์ สารประเภทอิมัลชัน และของเหลวชนิดต่างๆ โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของผงแห้ง มักใช้วิธีนี้ในอุตสาหกรรมทางเคมีและอาหาร การทำแห้งด้วยวิธีนี้นอกจากจะใช้สำหรับการทำแห้งอย่างรวดเร็วแล้ว ยังเป็นวิธีการที่มีประโยชน์มากในการลดขนาดและปริมาตรของของเหลวอีกด้วย จากการวิจัยและการพัฒนาที่ต่อเนื่องกันมา ทำให้วิธีการอบแห้งแบบพ่นฝอยกลายเป็นวิธีการทำแห้งที่มีประสิทธิภาพและนิยมนำมาทำแห้งให้กับผลิตภัณฑ์หลายชนิดในปัจจุบัน การอบแห้งแบบพ่นฝอยเป็นกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องและสามารถทำการผลิตผลิตภัณฑ์ได้ในปริมาณมาก โดยอาศัยหลักการพาความร้อนของอากาศ ซึ่งเป็นวิธีการทำแห้งที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูง ทำให้น้ำระเหยออกจากอาหารได้อย่างรวดเร็ว เวลาที่ใช้ในการทำแห้งสั้น และได้ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในรูปของผงแห้ง ซึ่งจะเป็นการลดน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ลง ทำให้ง่ายต่อการขนส่ง และการเก็บรักษา (พรศักดิ์ และสมยศ, 2533)

ประโยชน์ของการทำแห้งแบบพ่นฝอย คือ ความจำเพาะของผงยังคงมีค่าคงที่ตลอดเครื่องอบแห้งเมื่อสภาวะการอบแห้งมีค่าคงที่ เป็นกระบวนการอบแห้งที่ควบคุมการทำงานได้ง่ายและต่อเนื่อง และสามารถปรับใช้เป็นระบบการควบคุมแบบอัตโนมัติได้ตลอดทั้งกระบวนการอบแห้ง นอกจากนี้เครื่องอบแห้งยังถูกออกแบบมาหลากหลาย เพื่อประยุกต์ใช้กับวัตถุดิบที่มีความไวต่อความร้อน วัตถุดิบความร้อน สารที่เป็นสนิมได้ง่าย และวัตถุดิบสำหรับจับ (Barbosa-Cánovas and Vega-Mercado, 1996) สำหรับข้อเสียของการทำแห้งแบบพ่นฝอยคือ ใช้เงินลงทุนสูง หน่วยการผลิตจะมีขนาดใหญ่กว่าเครื่องอบแห้งประเภทอื่นๆ ทำให้การสร้างเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยมีราคาแพง และอาหารที่ส่งเข้ามาต้องมีปริมาณความชื้นสูงเพื่อให้มั่นใจว่าสามารถที่จะป้อนเข้ามาในเครื่องผลิตละอองได้ ทำให้ต้องใช้พลังงานเพื่อกำจัดความชื้นและเกิดการระเหยสูง (วิไล, 2546) แม้ว่าจะเป็นเครื่องอบแห้งประเภทพาความร้อนแต่ประสิทธิภาพด้านความร้อนยังต่ำกว่าเครื่องอบแห้งแบบ

สัมผัสกับอาหาร โดยตรง (direct-contact dryer) นอกจากนี้ยังต้องใช้อุณหภูมิเข้าที่สูงมากหากเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีอุณหภูมิในการหลอมเหลวสูง อากาศเสียที่สูบออกจากเครื่องอบแห้งจะมีปริมาณมาก ซึ่งจะประกอบด้วยความร้อนซึ่งมีคุณภาพต่ำ มีผลในการจัดการความร้อนที่ออกจากอุปกรณ์และการแลกเปลี่ยนความร้อนจะมีราคาสูง ดังนั้นอุปกรณ์จะต้องมีการจัดการผงและอากาศที่อึดตัวหรืออยู่ในสถานะใกล้เคียงอึดตัว ซึ่งจะต้องมีการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีความซับซ้อนยิ่งขึ้น มีการนำเครื่องอบแห้งแบบสายพาน (conveyer-band dryer) และเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์มาใช้แทนเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย เนื่องจากมีความกะทัดรัดและประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูงกว่า (Masters, 1991)

ปัญหาหลักที่มักเกิดขึ้นในระหว่างการอบแห้งแบบพ่นฝอยของน้ำผึ้งหรืออาหารที่มีปริมาณน้ำตาลสูง คือปัญหาเรื่องความเหนียวเป็นผลมาจากน้ำผึ้งซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลในปริมาณมาก (70-80%) ระหว่างการทำแห้งผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำตาลสูง ผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจยังมีลักษณะเป็นไซรัปหรือเกิดการเหนียวที่ผนังของ chamber เป็นผลให้เกิดการจับตัวกันเป็นก้อนบริเวณผนังของ chamber หรือภายในระบบท่อลำเลียงของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย อาจเกิดปัญหาในการปฏิบัติงานได้ (Roos *et al.*, 1996) การอบแห้งแบบพ่นฝอยของน้ำผึ้งมักเกิดการเกาะติดของน้ำผึ้งที่ผนังของเครื่องอบแห้ง (Bhandari *et al.*, 1997) เนื่องจากน้ำผึ้งมีน้ำตาลและกรดอินทรีย์เป็นองค์ประกอบหลักส่งผลให้การอบแห้งทำได้ยากและปริมาณผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้ลดลง (Wang and Langrish, 2008) นอกจากนี้ความร้อนยังสามารถทำลายสารต้านอนุมูลอิสระ วิตามิน และกรดอะมิโนต่างๆ ได้มีผลให้คุณค่าทางอาหารของน้ำผึ้งลดลง ดังนั้นการแปรรูปน้ำผึ้งผงโดยใช้เทคนิคการอบแห้งแบบสุญญากาศและการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง เป็นกระบวนการแปรรูปอาหารที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งเป็นกระบวนการแปรรูปที่สามารถรักษาคุณภาพทางด้านสี กลิ่น รส และคุณค่าทางอาหารของน้ำผึ้งไว้ได้ดีกว่ากระบวนการทำแห้งโดยใช้ความร้อนสูง

2.3 Glass Transition และสมบัติการเกาะติดของอาหารแห้ง

Glass transition temperature (T_g) หมายถึง อุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของอาหารจากที่มีโครงสร้างอสัณฐาน (amorphous system) หรือมีสถานะคล้ายแก้ว (glassy state) ไปเป็นสถานะของเหลวหนืดคล้ายยาง (rubbery state) ความสามารถในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลในสถานะคล้ายแก้วมีค่าต่ำ เนื่องจากความหนืดของของผสมมีค่าสูง (ประมาณ 10^{12} Pa s) (Silva *et al.*, 2006) สามารถวิเคราะห์อุณหภูมิดังกล่าวได้ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimetry (DSC) ซึ่งการเปลี่ยนรูปแบบโครงสร้างที่สัมพันธ์กับความหนืดเช่น stickiness, elasticity, collapse, shrinkage และ crystallization จะขึ้นอยู่กับ glass transition (Sopade *et al.*, 2007)

T_g ขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุล โครงสร้างเฉพาะของตัวถูกละลาย ปริมาณของตัวทำละลายที่ปรากฏ (Rahman, 1995) และปริมาณน้ำในผลิตภัณฑ์ (Onwulata, 2005) ค่า T_g ถูกใช้เป็นปัจจัยทางเคมีกายภาพที่ใช้ในการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการผลิต สมบัติ คุณภาพ ความคงตัว และความปลอดภัยของอาหาร (Barbosa-Cánovas and Vega-Mercado, 1996) glass transition ของอาหารที่ผ่านการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็ง เป็นตัวแปรสำคัญในการอธิบายกลไกของกระบวนการเปลี่ยนรูปในอาหาร และการควบคุมอายุการเก็บของอาหารนั้น (Omar and Roos, 2007) น้ำผึ้งประกอบด้วยน้ำตาลฟรุกโตสและกลูโคสปริมาณ 70-80% (Ouchemoukh *et al.*, 2007) โดยน้ำตาลฟรุกโตสและกลูโคสมีค่า T_g เท่ากับ -42 และ -43°C ตามลำดับ (Rahman, 1995) ค่า T_g ของน้ำผึ้งอยู่ในช่วงระหว่าง -54.14 และ -33.64°C (Ahmed *et al.*, 2007) หรือ -47.2 และ -34.6°C (Lazaridou *et al.*, 2004) ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำผึ้ง เนื่องจาก T_g ของน้ำผึ้งมีค่าต่ำมากจึงเป็นปัญหาสำคัญในการอบแห้ง

ค่า 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) และการตกผลึก ระหว่างกระบวนการผลิตอาหารและการเก็บรักษา ปริมาณน้ำอิสระและ T_g มักจะใช้เพื่อพิจารณาถึงความเสถียรในระหว่างการเก็บรักษาอาหาร ผลิตภัณฑ์อาหารจะเสถียรมากที่สุดเมื่อปริมาณความชื้นเท่ากับความชื้นชั้นเดี่ยว (monolayer moisture) ซึ่งจะมี a_w ประมาณ 0.1-0.3 หรือต่ำกว่า T_g (Goula *et al.*, 2005) T_g ของคาร์โบไฮเดรตมักจะแปรผกผันกับน้ำหนักโมเลกุล

โดยทั่วไปถ้าต้องการผลิตผลิตภัณฑ์ที่เกาะติดง่ายให้แห้งจะต้องเติมสารที่มีมวลโมเลกุลสูง เช่น มอลโทเด็กซ์ทรินลงไปเพื่อเพิ่มค่า T_g (Silva *et al.*, 2006) จากรายงานการวิจัย Fitzpatrick *et al.* (2007) ได้ศึกษา glass transition และการเกาะตัวกันเป็นก้อนของนมผงที่มีองค์ประกอบของน้ำตาลแลคโตสแบบออสฐาน เมื่อให้อุณหภูมิและปริมาณน้ำในสถานะที่พอเหมาะ โมเลกุลจะเกิดการเคลื่อนที่ในลักษณะเหมือนการไหลของสารที่มีความหนืดสูง ทำให้อนุภาคมีความเหนียว ส่งผลให้เกิดการจับกันเองของอนุภาค (cohesiveness) ที่เพิ่มขึ้นและเพิ่มการเกาะติดกับพื้นผิวที่สัมผัสอีกด้วย ซึ่งการเปลี่ยนสถานะจากสถานะแห้ง (glassy state) ไปเป็นสถานะของเหลวหนืด (rubbery state)

สามารถเกิดขึ้นได้จากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของผงในกระบวนการผลิตที่เหนือกว่า T_g ของผลิตภัณฑ์ ความเหนียวที่อุณหภูมิกำหนดด้วย glass transition นี้จะขึ้นอยู่กับระยะเวลา เมื่อเวลาผ่านไป กระบวนการการเกิดผลึกสามารถเกิดขึ้นได้ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างแลคโตสจากออสถูแลนไปเป็นผลึก และยิ่งกว่านั้นลักษณะการเกาะกันเป็นก้อนของผงขึ้นอยู่กับจำนวนขององค์ประกอบอยู่ในรูปอสถูแลน การศึกษานี้ได้แสดงถึงการประยุกต์ความสัมพันธ์ระหว่าง glass transition และปริมาณน้ำสำหรับทำนายปัญหาการเกาะกันเป็นก้อนของผงที่มีโครงสร้างอสถูแลน

Roos and Karel (1991) พบว่าความเหนียวของอาหารผงจะถึงจุดวิกฤตเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิ glass transition ประมาณ $10-20^{\circ}\text{C}$ ลักษณะการเหนียวของวัตถุดิบเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิ glass transition โดยวัตถุดิบที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะมี T_g สูง แต่หากวัตถุดิบนั้นมี T_g ต่ำกว่าอุณหภูมิในการผลิตจะมีผลทำให้เกิดการเหนียวและเกาะติดของวัตถุดิบที่ผนังของเครื่องอบแห้งอาหารที่เหนียวง่าย อนุภาคมีการเกาะติดกันต้องอาศัยการควบคุม T_g หรือใช้อุณหภูมิในกระบวนการผลิตต่ำกว่า T_g ของผลิตภัณฑ์ หรือการเพิ่ม T_g ของผลิตภัณฑ์ด้วยการเติมสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (Boonyai *et al.*, 2006, Bhandari *et al.*, 1997)

สารที่ถูกนำมาใช้ทั่วไปในการเป็นสารลดการเกาะติดกัน ได้แก่ อนุพันธ์ของสตาร์ชที่ผ่านการไฮโดรลิซิส (Hydrolyzed starch derivatives) เช่นมอลโทเด็กซ์ทริน เป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่มี ความเหนียว โดยจะทำให้ T_g ของของผสมจะเปลี่ยนไป ค่า T_g ของสารประกอบอสถูแลนแต่ละชนิดจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อผสมมอลโทเด็กซ์ทรินซึ่งมี T_g สูง ทำให้สามารถผลิตและควบคุมคุณภาพของอาหารแห้งได้ดีขึ้น (Boonyai *et al.*, 2006) โดย T_g ต้องมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งเช่น สตาร์ช โปรตีน และกัม (วัตถุดิบที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง) จะมีค่า T_g สูงกว่าน้ำตาลกรดอินทรีย์และวัตถุ ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ขณะที่ค่า T_g ของน้ำจะมีค่าต่ำที่สุดอยู่ที่ประมาณ -135°C ดังนั้นน้ำจึงมีผลต่อการทำให้ค่า T_g ของของผสมลดลง ค่า T_g ของวัตถุจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อผ่านกระบวนการทำแห้ง เนื่องจากน้ำถูกกำจัดออกไป วัตถุที่มีค่า T_g สูง จะสามารถทำให้แห้งได้ง่าย ขณะที่วัตถุที่มีค่า T_g ต่ำ อาจจะทำให้แห้งได้ยาก เนื่องจากวัตถุยังคงอยู่ในสถานะของไหลภายใต้สภาวะทำแห้งปกติ (Onwulata, 2005) อาหารที่มีพอลิแซคคาไรด์และโปรตีนเป็นองค์ประกอบนั้นจะเป็นโครงสร้างแบบผสมเช่น สารละลายแซ่เยือกแข็งที่ประกอบด้วย ซูโครส แลคโตส แร่ธาตุในนม และโปรตีนจากนมพร้อมมันเนย และ guar หรือ locust bean gum มีผลต่อค่า T_g โดยพบว่าค่า T_g ของสารละลายที่มีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีพอลิเมอร์ (โปรตีนหรือพอลิแซคคาไรด์) ผสมอยู่ ดังนั้น Glass transition จึงเป็นเครื่องมือที่ใช้ทำความเข้าใจการเคลื่อนที่ของน้ำในอาหารและการควบคุมอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ เสถียรภาพ การเปลี่ยนแปลงด้านกายภาพและเคมีของอาหาร

2.4 การลดการเกาะติดของอาหารผงที่มีปริมาณน้ำตาลสูง

มอลโทเด็กซ์ทริน : สารช่วยลดการเกาะติดของอาหารแห้ง

การทำแห้งอาหารที่มีปริมาณน้ำตาลสูงเช่น น้ำผึ้งมักประสบปัญหาการเกาะติด ปัญหานี้จะเกิดขึ้นรุนแรงเมื่ออุณหภูมิในการผลิตสูง ดังนั้นการผลิตน้ำผึ้งจึงต้องมีการเติมสารบางชนิดเพื่อช่วยลดความเหนียวของน้ำผึ้งผง สารดังกล่าวเรียกว่าสารต้านความเหนียวเช่น มอลโทเด็กซ์ทริน โดยมอลโทเด็กซ์ทรินเกิดจากการไฮโดรไลซิสแป้งข้าวโพดบางส่วนด้วยกรดหรือเอนไซม์ โดยดูได้จากค่า dextrose equivalents (DEs) ค่า DE วัดได้จาก degree of starch polymer hydrolysis (Rahman, 1995) มอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE แตกต่างกันจะมีสมบัติทางเคมี ภายภาพแตกต่างกัน เช่น ความสามารถในการละลาย อุณหภูมิเยือกแข็งและความหนืด เป็นต้น (Klinkesorn *et al.*, 2004)

มอลโทเด็กซ์ทรินคือ สตาร์ชที่ผ่านการไฮโดรไลซิสบางส่วนด้วยกรดหรือเอนไซม์ มอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า dextrose equivalent (DE) น้อยกว่า 20 ประกอบด้วย 1,4 และ 1,6- α -D-glucopyranose-linked residues (Klinkesorn *et al.*, 2004) ค่า DE คือ ค่า reducing power ของพอลิแซคคาไรด์หรือ โอลิโกแซคคาไรด์ที่ได้จากสตาร์ชเปรียบเทียบกับ D-glucose โดยน้ำหนักฐานแห้ง โดยปกติมอลโทเด็กซ์ทรินมีค่า DE < 20 ขณะที่ corn syrup solids มีค่า DE > 20 สมบัติของมอลโทเด็กซ์ทรินคือ สามารถละลายน้ำได้ดีที่อุณหภูมิห้อง สารละลายที่ได้อาจใสหรือขุ่นขึ้นกับชนิดของมอลโทเด็กซ์ทรินที่นำมาใช้ สารละลายที่ได้มีสมบัติทางด้านความหนืดที่สม่ำเสมอและเนื้อสัมผัสเรียบเนียน ช่วยป้องกันการจับตัวกัน (anticaking) สามารถปลดปล่อยสารให้รสชาติได้เร็ว (Madene *et al.*, 2005) สามารถป้องกันการเกิดออกซิเดชัน (oxidation) ได้ดี เป็นสารหน่อหุ้มที่กักเก็บและป้องกันสารที่มีความไวต่อความร้อนได้ดี (Onwulata, 2005) ฟิล์มที่ได้ค่อนข้างมีความชื้นต่ำ มีสามารถในการกระจายตัวได้ดี (Adhikari *et al.*, 2003) ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า DE ของมอลโทเด็กซ์ทรินที่ใช้ อีกทั้งมีความสามารถในการดูดความชื้นต่ำ (low hygroscopicity) และสามารถควบคุมการเกิดปฏิกิริยาน้ำตาลได้เป็นอย่างดีทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้เกิดสีน้ำตาลน้อยลงมาก

อย่างไรก็ตามมอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE เหมือนกันอาจจะมีสมบัติต่างกันได้ขึ้นอยู่กับวิธีการไฮโดรไลซิสแหล่งของสตาร์ช เช่น ข้าวโพด มันฝรั่ง และ ข้าว) และอัตราส่วนของอะไมโลสต่ออะไมโลเพกทิน (Klinkesorn *et al.*, 2004) มอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE สูงกว่า จะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าและมีค่า T_g ต่ำกว่า เช่น มอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE 10 และ 20 มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 1800 และ 900 ตามลำดับ และมีค่า T_g เท่ากับ 160 และ 141°C ตามลำดับ ที่ a_w เท่ากับ 0.00 (Rahman, 1995) ซึ่งเมื่อผสมมอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE ต่ำกว่าลงไปในผลิตภัณฑ์ที่มีความเหนียวและนำไปทำให้แห้ง จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีความเกาะติดกันต่ำกว่าเนื่องจากมอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE ต่ำกว่า จะมีน้ำหนักโมเลกุลสูงและค่า T_g สูงกว่า มอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE สูง จึงสามารถทำ

ให้แห้งได้ง่ายทำให้โครงสร้างของผลิตภัณฑ์มีความเหนียวลดลง ตัวอย่างเช่นการเติม 30% มอลโทเด็กซ์ทริน DE 20 ลงไปในเนื้อ camu-camu (*Myrcaria dubia* (HBK) Mc Vaugh) ที่มี reducing sugar (กรัมของกลูโคส/100 กรัม) เท่ากับ 3.25 ± 0.03 แล้วนำไปทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็ง ทำให้ค่า T_g ของผลิตภัณฑ์สูงขึ้น (Silva *et al.*, 2006)

Jaya and Das (2004) ได้ศึกษาการทำให้แห้งภายใต้สุญญากาศ (vacuum drying) ของเนื้อมะม่วงที่มีระดับการเติมมอลโทเด็กซ์ทรินที่แตกต่างกันในช่วงระหว่าง 0.25 - 0.65 กิโลกรัมต่อกิโลกรัมของปริมาณของแข็งทั้งหมดในเนื้อมะม่วง นอกจากนี้ยังมีการเติมกลีเซอรอลโมโนสเตียเรต (glycerol monostearate : GMS) และไตรแคลเซียมฟอสเฟต (tricalcium phosphate : TCP) ในระดับที่แตกต่างกันอยู่ในช่วง 0.01-0.02 กิโลกรัมต่อกิโลกรัมของปริมาณของแข็งทั้งหมดในเนื้อมะม่วง โดยมีมอลโทเด็กซ์ทรินถูกใช้เพื่อกำจัดความเหนียวของผงมะม่วงและได้ผงที่มีค่าการดูดความชื้นต่ำ นอกจากนี้ GMS ถูกใช้เพื่อทำให้ฟองก๊าซหรืออากาศเสถียร และ TCP ที่เติมลงไปนั้นเป็นสารป้องกันการรวมตัวกันของอนุภาค ทำให้ผลิตภัณฑ์ยังคงแห้งและมีการไหลอย่างอิสระจากนั้นทำการวิเคราะห์ปริมาณการดูดซับความชื้นของสาร (hygroscopicity) ความสามารถในการไหล (flowability) อุณหภูมิการเกาะติด (sticky temperature) ของผงแห้งที่มีปริมาณความชื้น 5% พบว่าปริมาณที่เหมาะสมของมอลโทเด็กซ์ทรินที่เติมลงไปคือ 0.43-0.57 กิโลกรัมต่อของปริมาณของแข็งทั้งหมดในเนื้อมะม่วงและปริมาณของ TCP และ GMS ที่เหมาะสม คือ 0.015 กิโลกรัมต่อกิโลกรัมของปริมาณของแข็งทั้งหมดในเนื้อมะม่วง เช่นเดียวกับ Sahu (2008) ได้ศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติมที่มีผลต่อสมบัติของน้ำผึ้งผงจากการอบแห้งแบบสุญญากาศ สารตัวเติมที่ใช้มี 3 ชนิดคือ มอลโทเด็กซ์ทรินกลีเซอรอลโมโนสเตียเรต (glycerol monostearate : GMS) และไตรแคลเซียมฟอสเฟต (tricalcium phosphate : TCP) พบว่าปริมาณที่เหมาะสมของมอลโทเด็กซ์ทริน กลีเซอรอลโมโนสเตียเรต และไตรแคลเซียมฟอสเฟตที่เติมลงไปคือ 0.429-0.55, 0.0121-0.0157 และ 0.0147-0.0156 กิโลกรัมต่อกิโลกรัมของปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำผึ้ง ตามลำดับ

2.5 สมบัติสำคัญของอาหารผง

2.5.1 Water activity (a_w)

ค่า a_w เป็นปัจจัยที่สำคัญในการควบคุมและป้องกันการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์อาหาร จึงมีผลโดยตรงต่อการกำหนดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์อาหาร เนื่องจากค่า a_w เป็นปัจจัยที่ชี้ระดับปริมาณน้ำต่ำสุดในอาหารที่เชื้อจุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตและใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ ค่าจำกัดความของ a_w คือ อัตราส่วนของความดันไอของน้ำในระบบกับความ

ดันไอของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิเดียวกัน หรือความชื้นสัมพัทธ์สมดุลของอากาศแวดล้อมของระบบ ณ อุณหภูมิเดียวกัน (Rahman, 1995) ดังสมการที่ 2.1

$$a_w = P/P_0 = ERH (\%)/100 \quad (2.1)$$

เมื่อ P = ความดันไอของน้ำในตัวอย่างอาหาร
 P_0 = ความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิสมดุลของระบบ
 a_w = ค่า critical water activity
 ERH = ค่าความชื้นสัมพัทธ์ (%) ณ จุดสมดุล

ที่ระดับ a_w ต่ำ เชื้อจุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญได้ โดยอาหารส่วนมากมีค่า a_w ในช่วง 0.6-0.7 (Stencl, 2004) กิจกรรมของจุลินทรีย์ส่วนใหญ่จะถูกยับยั้งที่ a_w ต่ำกว่า 0.6 เชื้อราส่วนใหญ่ถูกยับยั้งการเจริญที่ a_w ต่ำกว่า 0.7 ส่วนยีสต์ และแบคทีเรียส่วนใหญ่ถูกยับยั้งการเจริญที่ a_w ต่ำกว่า 0.8 และ 0.9 ตามลำดับ ในขณะที่อาหารสด เช่น ผัก ผลไม้ เนื้อสัตว์ รวมทั้งสัตว์ปีกและปลา มีค่า a_w อยู่ระหว่าง 0.97-1.00 (Fellows, 2000) ค่า a_w เป็นปัจจัยหลักในการป้องกันหรือจำกัดการเจริญของจุลินทรีย์ และในหลายๆ กรณีพบว่า ค่า a_w คือตัวแปรเริ่มต้นที่มีผลต่อความคงตัวของอาหาร เป็นเกณฑ์สำหรับวัดการตอบสนองของจุลินทรีย์ และวิเคราะห์ประเภทของจุลินทรีย์ที่พบในอาหาร นอกจากนี้ปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อการเจริญของจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์อาหาร ได้แก่ อุณหภูมิ pH ออกซิเจน และสารอาหาร เป็นต้น ในอุตสาหกรรมน้ำผึ้งปริมาณน้ำของน้ำผึ้งเป็นปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดการเน่าเสียโดยเกิดการหมัก แต่อย่างไรก็ตามไม่ใช่เฉพาะปริมาณน้ำเท่านั้นแต่เป็นค่า a_w ของอาหารด้วยที่เป็นตัวควบคุมการเจริญของจุลินทรีย์ (Chirife *et al.*, 2006)

การลดค่า a_w เพื่อไม่ให้จุลินทรีย์สามารถนำน้ำไปใช้ในการเจริญ มีหลายวิธี เช่น การทำแห้ง การระเหย การอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง การทำให้น้ำในอาหารตกผลึกกลายเป็นน้ำแข็ง หรือการเติมน้ำในอาหาร การใช้คอลลอยด์ที่ชอบรวมกับน้ำ เช่น วุ้น ทำให้จุลินทรีย์หรือปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ ไม่สามารถนำน้ำไปใช้ได้ (วิล, 2546) ค่า a_w ของผลิตภัณฑ์สามารถวัดได้จากค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุลของอากาศที่ปล่อยให้สมดุลกับผลิตภัณฑ์ ดังนั้นผลิตภัณฑ์จะต้องถูกวางไว้ในระบบปิดเพื่อให้เกิดความสมดุลได้ จุดที่เกิดความสมดุลคือจุดที่ a_w ของตัวอย่างมีค่าเท่ากับความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศนั่นเอง

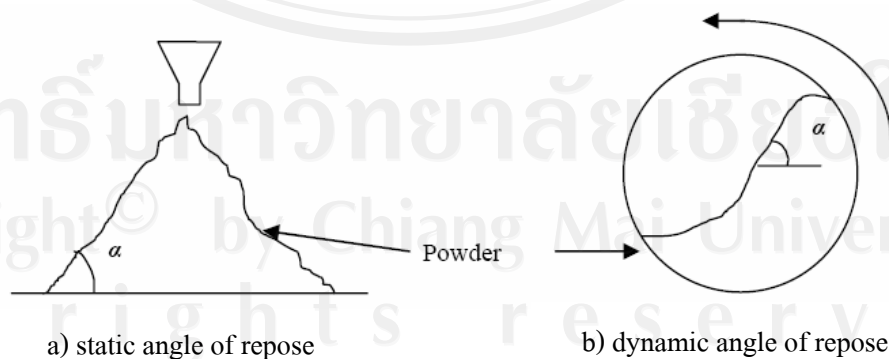
นอกจากการวัดค่า a_w โดยการวัดความชื้นสัมพัทธ์สมดุลแล้วยังมีเครื่องมือวัดค่า a_w โดยตรงเพื่อความสะดวกในการใช้งานด้วย การวัดค่า a_w โดยเครื่องมือที่ใช้วิธี Chilled-Mirror dew point ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับเป็นมาตรฐานระหว่างประเทศ สามารถวัดค่าได้โดยใช้เวลาประมาณ 5

นาที่ ในขณะที่เครื่องมือที่ใช้ Electronic Capacitive Sensors จะใช้เวลาประมาณ 30-90 นาที เพื่อเข้าสู่ภาวะสมดุลของความชื้นสัมพัทธ์ สำหรับการใช้งานบางอย่างการอ่านผลได้รวดเร็วจะทำให้ผู้ผลิตอาหารสามารถกำกับและควบคุมค่า a_w ได้ ณ จุดที่ทำการผลิตทำให้สามารถปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตให้เหมาะสมได้ในระหว่างที่ทำการผลิต เครื่องมือในระบบ Chilled Mirror สามารถอ่านค่า a_w ได้กว้างกว่าระบบ Electronic Capacitive Sensors ก็จะวัดค่าได้ในช่วงตั้งแต่ 0.030 ถึง 1.000 (รัตนันท์, 2007)

2.5.2 ความสามารถในการไหล (flowability)

ความสามารถในการไหลของอาหารผงทำได้โดยการวัดค่ามุมกอง โดยมุมกอง (Angle of repose) ตามนิยามของ Terzaghi and Peck (1948) หมายถึง มุมกองระหว่างพื้นราบ และพื้นเอียงของกองวัสดุที่ถูกทำให้ไหลลงมาจากอุปกรณ์ที่จัดให้อยู่สูงเหนือพื้นราบ โดยใช้อุปกรณ์อย่างง่ายในการทำให้เกิดการไหลของวัสดุจากจุดที่อยู่เหนือพื้นราบจนกระทั่งมุมที่เกิดขึ้นคงที่ แล้วจึงวัดมุมกองของวัสดุแห้ง ค่ามุมกองของวัสดุแห้งที่มีค่าต่ำกว่าจะมีความสามารถในการไหลได้มากกว่าวัสดุแห้งที่มีค่ามุมกองที่สูงกว่า (Bodhimage, 2006) มุมกองเป็นดัชนีชี้วัดความสามารถในการไหลของผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นผง

มุมกองสามารถวัดได้ 2 แบบ คือ static angle of repose เป็นมุมที่เกิดขึ้นระหว่างระนาบพื้นราบ และเส้นความชันที่ยาวไปตามพื้นผิวของกองที่เกิดขึ้น โดยวัสดุที่เทลงบนพื้นผิวราบ การวัด static angle of repose แสดงดังรูป 2.2a สำหรับ dynamic angle of repose จะถูกวัดในกระบอกตวงที่มีการหมุน (rotating cylinder) แสดงดังรูป 2.2b (Bodhimage, 2006)

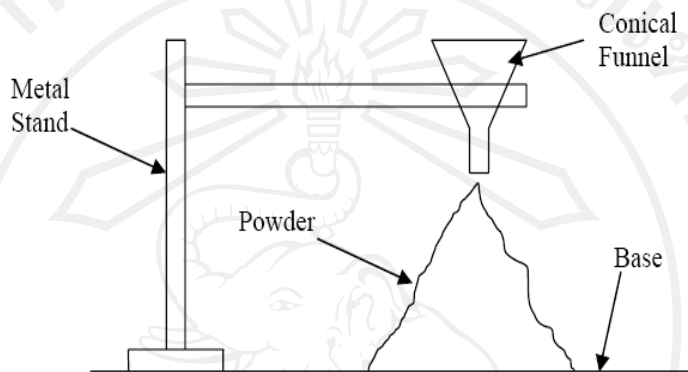


รูปที่ 2.2 Static และ dynamic of angle of repose

ที่มา : Bodhimage (2006)

1. การวัดค่ามุมกองแบบสถิตย์ (static angle of repose)

การวัดค่ามุมกองแบบสถิตย์ ทำโดยเทอาหารผงลงผ่านกรวยที่ทราบความสูงจากพื้นหรือบรรจุอาหารผงลงในกรวยจากนั้นค่อยๆยกกรวยขึ้นเพื่อให้อาหารผงไหลลงมา ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งอาหารผงที่ใช้วิธีการทั้งสองวิธีนี้ต้องสามารถไหลผ่านกรวยขนาดเล็กได้ และอาหารผงที่มีการเกาะตัวกันนั้นไม่ควรใช้วิธีการนี้ในการวัดค่ามุมกอง (Geldart, 2006)

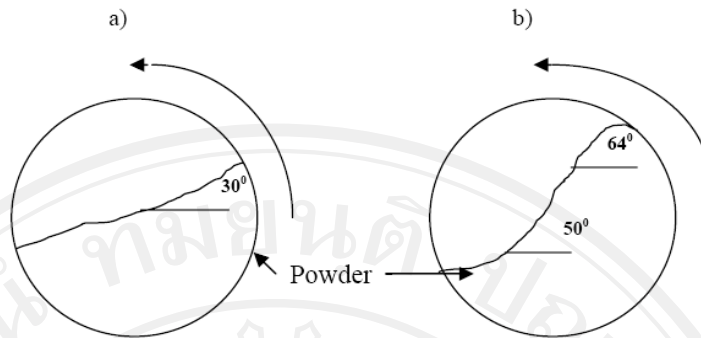


รูปที่ 2.3 การวัด Static angle of repose

ที่มา : Bodhimage (2006)

2. การวัดมุมกองแบบพลศาสตร์ (dynamic angle of repose)

การวัด dynamic angle of repose ด้วย Electrical Capacitance Tomography (ECT) โดย Dury และ Ristow ในปี 1998 นำผงตัวอย่างเข้าไปในกระบอกตวงที่มีการหมุน (rotating drum) แล้วสังเกตก้อนที่กลิ้งไปตามพื้นผิวของกองผง เมื่อเพิ่มอัตราการหมุนพบว่าก้อนที่กลิ้งจะหยุดเป็นพักๆ หรือน้อยลงและขาดออกจากพื้นผิวอย่างต่อเนื่อง โดย dynamic angle of repose คือ มุมที่เกิดขึ้นโดยพื้นผิวที่ลาดเอียงของกองผงกับแนวราบเมื่อทำการหมุนในกระบอกตวง และเมื่อเพิ่มอัตราเร็วการหมุนต่อไปมากขึ้น จะทำให้เกิดการเสีรูปร่างของพื้นผิวแบนราบไปเป็นรูปร่างตัว S (S shape profile) การเสีรูปร่างเริ่มต้นจากการลดเข้ามาข้างในของขอบเขตและสามารถถูกประมาณค่าโดยเส้นตรง 2 เส้นที่มีความชันแตกต่างกัน โดยเส้นตรงที่มีความชันมากกว่าจะเป็นค่ามุมกองแบบ dynamic angle of repose (Bodhimage, 2006) แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การวัด Dynamic angle of repose

ที่มา : Bodhimage (2006)

Carr (1965, 1970) and Raymus (1985) ได้กล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการไหลของผง และการวัดทางกายภาพอย่างง่ายว่า ค่ามุมกองที่ต่ำกว่า 30 องศาแสดงว่ามีความสามารถในการไหลที่ดีมาก ค่ามุมกองอยู่ในช่วง 30-45 องศา แสดงว่าอนุภาคผงสามารถไหลได้ดี แต่มีความเกาะตัวกันระหว่างอนุภาคเล็กน้อย สำหรับค่ามุมกองที่อยู่ในช่วง 45-55 องศา แสดงว่ามีความเกาะตัวกันระหว่างอนุภาคมาก และค่ามุมกอง >55 องศา แสดงว่า อนุภาคไหลได้ช้า หรือมีความเกาะตัวกันระหว่างอนุภาคสูงมากและมีความสามารถในการไหลจำกัด (Geldart *et al.*, 2006) การวัดค่ามุมกองเป็นวิธีที่น่าเชื่อถือ รวดเร็ว และง่ายสำหรับการวัดความสามารถในการไหลของผงที่แตกต่างกัน โดยมุมกองที่มีขนาดเล็กกว่าจะมีความสามารถในการไหลของผงได้อิสระกว่า ขณะที่มุมกองที่มีขนาดใหญ่กว่าแสดงว่า วัสดุมีความสามารถในการไหลได้ไม่ดี หรือมีความเกาะตัวกันระหว่างอนุภาคได้ดีกว่า (cohesiveness) ซึ่ง ISO 3435 ได้กำหนดวิธีวัดมุมกองสำหรับการวิเคราะห์ความเกาะตัวกันระหว่างอนุภาคของวัสดุที่มีขนาดใหญ่ (Bodhimage, 2006)

Shittu and Lawal (2007) ได้ศึกษาการวัดมุมกองของตัวอย่างเครื่องดืมโกโก้ผงที่ผลิตในประเทศไนจีเรีย ปริมาณ 200 ml ในกระบอกตวง โดยนำกระบอกตวงไปแขวนบนชุดขาตั้งให้ปากของกระบอกตวงสูงจากพื้นผิวราบประมาณ 20 cm จากนั้นปล่อยให้ผงไหลอย่างอิสระภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งได้กองโกโก้ผงบนพื้นผิวราบตามขวาง พบว่าค่ามุมกองอยู่ในช่วง 25.0 ถึง 37.7 องศา เมื่อความชื้นและปริมาณน้ำตาลในเครื่องดืมโกโก้ผง เท่ากับ 0.8-3.6% และ 52.4-90.5% ตามลำดับ แสดงว่าเครื่องดืมโกโก้ผงมีความสามารถในการไหลที่ดี นอกจากนี้ Antoine *et al.* (2003) พบว่า มุมกอง และ Carr index ของผงถั่วเหลือง มีค่าเท่ากับ 38.33 ± 1.106 องศาและ Carr index มีค่าเท่ากับ $26.72 \pm 1.06\%$

ปัจจัยที่มีผลต่อค่ามุมกองคือสถานะในการเก็บรักษาของผงที่ต้องการทดสอบความสามารถในการไหลซึ่งถ้ามีการเปลี่ยนแปลงความชื้นของผงเพียงเล็กน้อยก็สามารถเพิ่มค่ามุมกองได้มากกว่า

100% (Zou and Brusewitz, 2002) นอกจากนี้ ยังขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาค และองค์ประกอบของพื้นผิวของผง โดยเฉพาะอย่างยิ่งผงที่มีไขมันเป็นองค์ประกอบของพื้นผิวสูง จะไปยับยั้งสมบัติของการไหล โดยพบว่า skim milk powder มีการไหลได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับผงชนิดอื่นๆ คือ whole milk powder, cream powder และ whey protein concentrate เนื่องจากพื้นผิวของ skim milk powder ประกอบด้วยน้ำตาลแลคโทส และโปรตีน ซึ่งมีจำนวนของไขมันอยู่เล็กน้อย ขณะที่พื้นผิวของ whole milk, cream และ whey protein powder ประกอบด้วยไขมันอยู่สูงจะไปยับยั้งความสามารถของการไหล (Kim *et al.*, 2005) และปริมาณไขมันยังมีผลอย่างมากต่อการเกาะตัวกันของนมผง โดยนมผงที่มีปริมาณไขมันที่พื้นผิวของอนุภาคมากกว่าก็จะส่งผลให้มีการเกาะตัวกันมากกว่าทำให้ความสามารถในการไหลของผลิตภัณฑ์นมผงมีค่าลดลง (Fitzpatrick *et al.*, 2007)

2.5.3 ความสามารถในการละลาย (Solubility)

สำหรับผลิตภัณฑ์ผงที่ละลายน้ำได้ทันที (instant powder) ควรมีสมบัติดังต่อไปนี้ พื้นที่ในการดูดซับน้ำปริมาณมาก (wettability) ทำให้ความสามารถในการจมตัว (sinkability) และความสามารถในการกระจายตัว (dispersibility) ดีขึ้น ส่งผลให้เกิดการละลายน้ำ (solubility) ตามมา (Masters, 1991) นอกจากนี้ความสามารถในการคืนตัว (reconstitution) ยังขึ้นอยู่กับกรจับตัวกับน้ำ โดยปกติแล้วพบว่าในการทำแห้งซึ่งมีผลต่อลักษณะทางกายภาพและการคืนรูปของผลิตภัณฑ์อาหารผง ซึ่งการคืนรูปของอาหารแห้งหมายถึง การดูดน้ำกลับคืนของอาหารแห้งเพื่อเข้าสู่สภาพเดิมคล้ายก่อนการทำแห้งนั่นเอง ปัจจัยที่มีผลต่อการคืนรูปของอาหารผง (Barbosa-Cánovas and Vega-Mercado, 1996) ได้แก่

1. Wettability คือ ความสามารถของอนุภาคของผงในการดูดซับน้ำบนพื้นผิวของอนุภาค และปัจจัยที่มีผลต่อ wettability ได้แก่ขนาดและองค์ประกอบทางเคมีของผิวอาหาร อาหารที่มีอนุภาคเล็กจะมีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักสูง ซึ่งการเปียกนี้จะมีแนวโน้มจับตัวกันเป็นก้อนแน่น โดยภายในยังคงมีอาหารผงที่แห้งอยู่ทำให้น้ำซึมผ่านได้ลำบากและอัตราการดูดซับน้ำต่ำ ดังนั้นการเพิ่มอนุภาคโดยนำผงมารวมตัวกันอย่างหลวมๆ (agglomeration) จะช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับน้ำผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาคได้ดี ในขณะที่องค์ประกอบทางเคมีเช่น การมีไขมันที่ผิวของอนุภาคจะขัดขวางการดูดซับน้ำ ดังนั้นการเติมสารบางอย่างเพื่อเพิ่มความสามารถในการกระจายตัว (surface active agent) เช่น เลซิทินซึ่งเป็นอิมัลซิไฟเออร์ทำให้เกิดการกระจายตัวในน้ำได้ดีขึ้น

2. Sinkability คือ ความสามารถของผงในการจมลงไปใต้น้ำหลังจากผงเกิดการดูดซับน้ำบนพื้นผิวของอนุภาคและถูกกระทบโดยความหนาแน่นของอนุภาค พบว่าขนาดที่มีอนุภาคใหญ่กว่าและมีความหนาแน่นมากกว่าจะจมตัวได้เร็วกว่าอนุภาคเล็กและเบา สำหรับอนุภาคที่มีอากาศ

ภายในหรือมีโครงสร้างที่โปร่งจะมีความสามารถในการจมน้ำได้สูงเนื่องจากอนุภาคมีความหนาแน่นและน้ำหนักที่เบาจะลอยที่ผิวน้ำ

3. Dispersibility หมายถึง ความสามารถของผงในการกระจายตัวตลอดทั่วทั้งภายในน้ำโดยไม่เกิดเป็นก้อน ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ dispersibility คือ การไม่มีของอนุภาคที่มีขนาดมากกว่า 250 μm หรืออนุภาคที่เกาะตัวกันเป็นก้อน ซึ่งส่งผลให้การกระจายตัวเกิดขึ้นน้อยลง

4. Solubility คือ อัตราการละลายหรือความสามารถในการละลายทั้งหมด โดยการไม่มีจุดและการบวมตัวอย่างรวดเร็วของอนุภาค เป็นปัจจัยที่กระทบต่อความสามารถในการละลาย ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการละลาย คือ ธรรมชาติของตัวถูกละลาย และตัวทำละลาย อุณหภูมิ ความดัน ขนาดของอนุภาค และการกวนผสม (Rahman, 1995)

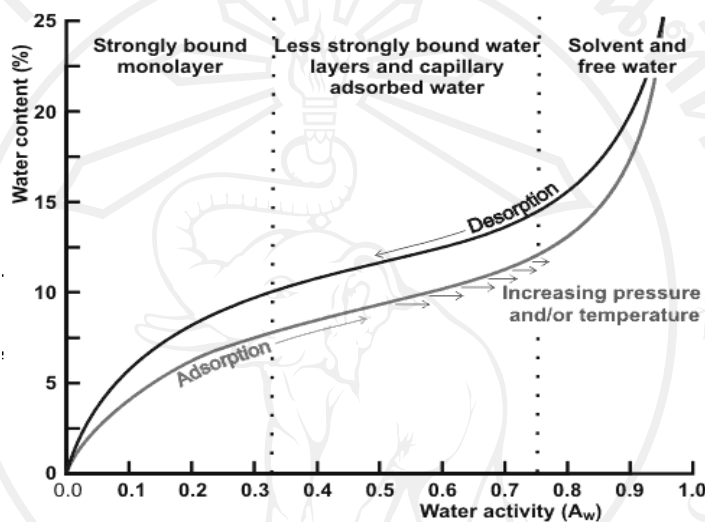
สมบัติทั้ง 4 ประการนี้จะมีผลต่อการคืนรูปของอาหารแห้งที่เป็นผง ซึ่งสมบัติเหล่านี้จะต้องสมดุลกัน ถ้าสมบัติประการใดเปลี่ยนแปลงไปพฤติกรรมการคืนรูปของอาหารนั้นจะเปลี่ยนไปด้วย ทั้งนี้สมบัติบางอย่างเช่น ขนาดของอนุภาคและความหนาแน่น นอกจากจะมีผลต่อการคืนรูปแล้วยังส่งผลต่อลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้อีกด้วย

2.5.4 Sorption isotherm

น้ำอิสระมีความสำคัญเกี่ยวกับคุณภาพและความคงตัวของอาหาร (Goula *et al*, 2008) เนื่องจากมีผลต่อ a_w ของอาหาร โดยการอบแห้งอาหารเป็นการลดปริมาณน้ำภายในอาหาร ทำให้เหลือปริมาณน้ำอิสระน้อยลงส่งผลให้ค่า a_w ของอาหารลดต่ำลงด้วยเช่นกันความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำในอาหารและค่า a_w จะเรียกว่า ซอร์ปชันไอโซเทอร์ม (sorption isotherm) (Barbosa-Cánovas and Vega-Mercado, 1996) ซึ่ง sorption isotherm เป็นเครื่องมือที่สำคัญสำหรับอาหารที่มีความชื้นต่ำ โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำแห้งหรือการคืนน้ำกลับ (rehydration) อีกทั้งยังใช้ในการพิจารณาเสถียรภาพของอาหารระหว่างการเก็บรักษา (Goula *et al.*, 2008)

sorption isotherm โดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นรูปตัว S (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 หลังจากนั้นนำไปปรับความชื้นในภาชนะปิดที่มีสารละลาย

เกลืออิมิตัวที่เหมาะสม (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 ฮิสเตอร์ริซิส (hysteresis) ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ตัวอย่าง sorption isotherm ของอาหาร

ที่มา: Chaplin (2008)

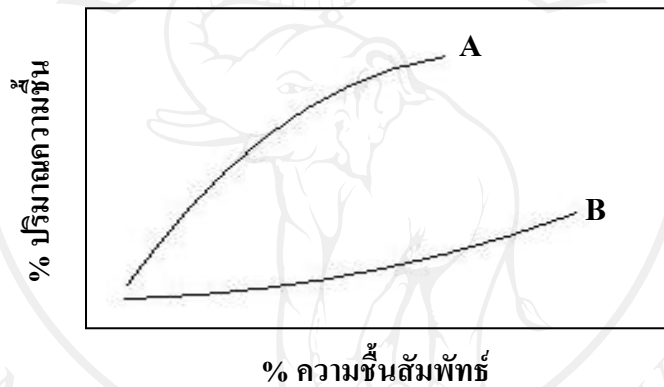
จากรูปที่ 2.5 สามารถแบ่ง sorption isotherm ออกได้เป็น 3 ช่วงซึ่งจะแตกต่างกันตามปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในอาหาร หรือค่า a_w (นิธิยา, 2549)

ช่วงที่ 1 เส้นกราฟจะค่อนข้างชัน สอดคล้องกับ monomolecular layer ของน้ำ ซึ่งเป็นน้ำที่เกาะอยู่กับสารประกอบในอาหารอย่างเหนียวแน่น และมีค่า a_w อยู่ในช่วง 0-0.25 หรือ 0.3

ช่วงที่ 2 เส้นกราฟค่อนข้างราบ สอดคล้องกับ capillary water ที่มีอยู่ในอาหารซึ่งเป็นน้ำที่กำจัดออกได้แต่ค่อนข้างยาก ถ้าปริมาณน้ำส่วนนี้ลดลงจะทำให้ค่า a_w ลดลงและยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์และปฏิกิริยาทางเคมีส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นในอาหารได้ด้วย ปริมาณความชื้นจะลดลงเหลือประมาณ 3-7% ขึ้นอยู่กับชนิดของอาหารและอุณหภูมิ โดยมีค่า a_w อยู่ในช่วง 0.3-0.8

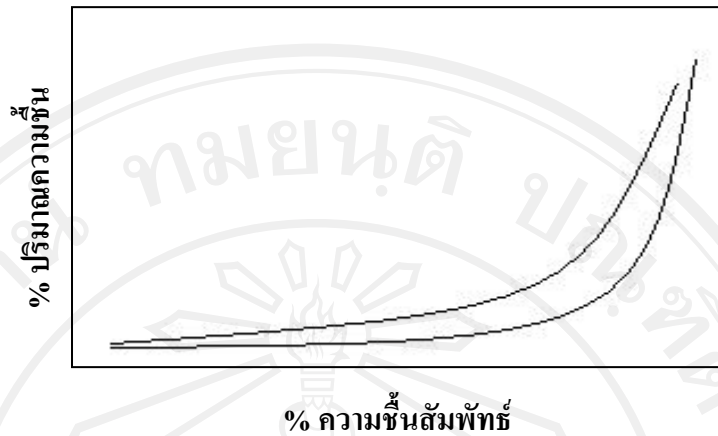
ช่วงที่ 3 เป็นน้ำอิสระที่มีอยู่ในเนื้อเยื่ออาหารทั้งจากพืชและสัตว์ สามารถกำจัดออกได้ง่าย น้ำเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นตัวทำละลาย ถูกใช้สำหรับการเจริญของจุลินทรีย์และการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี อาหารจะมีน้ำประมาณ 12-25% และมีค่า a_w มากกว่า 0.8-1.0

กราฟ desorption isotherm เป็นการวิเคราะห์ระดับความแห้งของอาหารที่ค่อยๆ เพิ่มขึ้น หรือ ความชื้นของอาหารที่ค่อยๆ ลดต่ำลง จนถึงจุดสมดุลกับสถานะแวดล้อม หรือความชื้นของอากาศขณะนั้น ดังนั้นจึงใช้ desorption isotherm สำหรับกระบวนการทำแห้ง กราฟ adsorption หรือ resorption isotherm เป็นการวิเคราะห์ความชื้นของอาหารที่ค่อยๆ เพิ่มขึ้น เนื่องจากอาหารนั้นมีความสามารถในการดูดความชื้นจากอากาศได้ หากความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย อาหารมีความสามารถในการดูดความชื้นได้มาก เส้นกราฟ adsorption isotherm จะมีความชันมาก อาหารประเภทนี้เรียกว่า hygroscopic product และถ้าอาหารไม่มีความไวต่อความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่เพิ่มขึ้น เส้นกราฟจะมีความชันน้อย อาหารประเภทนี้เรียกว่า nonhygroscopic product ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ลักษณะ adsorption isotherm ของสารประเภท hygroscopic product (A) และ nonhygroscopic product (B)
ที่มา: นิธิยา (2549)

อาหารหลายชนิดมีรูปกราฟของ adsorption ต่างจากรูปที่ 2.6 คือเส้นกราฟจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในช่วงแรก เมื่อค่า a_w เพิ่มขึ้นเป็นพวก low hygroscopicity และเส้นกราฟจะชันขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงปลายเป็นพวก high hygroscopicity ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งรูปกราฟของ adsorption isotherm เช่นนี้เป็นสมบัติของอาหารที่มีปริมาณน้ำตาลหรือเกลือสูงเนื่องจากมี capillary adsorption ต่ำ ดังนั้นอาหารใดที่มีสมบัติเป็น hygroscopicity เมื่อมีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย จะทำให้ปริมาณความชื้นในอาหารเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (นิธิยา, 2549)



รูปที่ 2.7 ตัวอย่าง sorption isotherm ของอาหารที่มีปริมาณน้ำตาลหรือเกลือสูงและมี capillary adsorption ต่ำ

ที่มา: นิธิยา (2549)

Isotherm แบ่งออกเป็น 5 ประเภทดังรูปที่ 2.8 ซึ่งถูกค้นพบโดย Brunauer, Deming and Teller ในปี 1938

ประเภทที่ 1 คือ Langmuir isotherm ซึ่งได้มาโดยการดูดซับโมเลกุลเดี่ยวของแก๊สโดยของแข็งที่มีรูพรุน (porous solid) ในปริมาตรของช่องว่างที่จำกัด

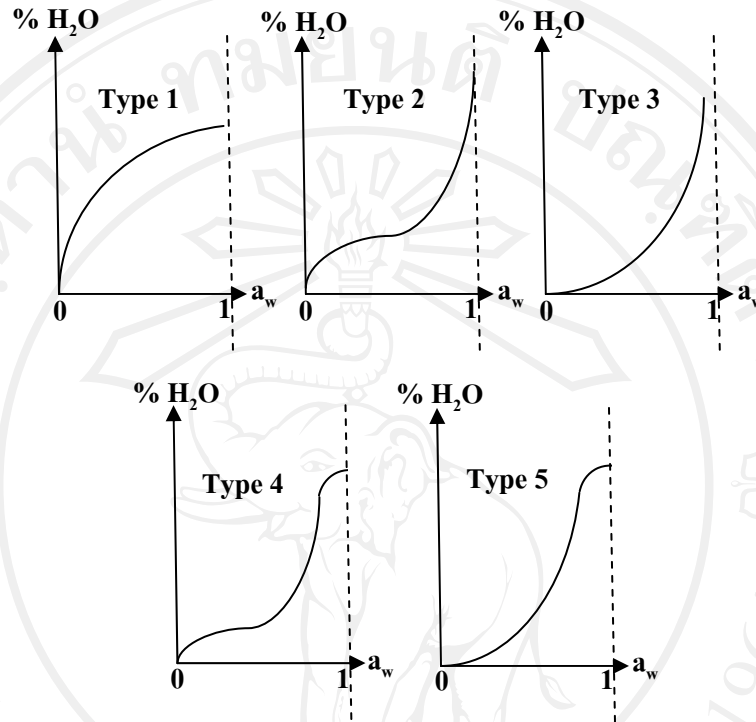
ประเภทที่ 2 คือ Sigmoid isotherm ใช้อธิบายสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ละลายได้ และมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงที่โค้งเข้าหาแนวเส้น a_w ที่มีค่าเท่ากับ 1

ประเภทที่ 3 คือ Flory-Huggins isotherm ใช้คำนวณสำหรับการดูดซับของตัวทำละลายหรือผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นพลาสติกคล้ายกอลลีเซอรอลที่อุณหภูมิเหนือค่า T_g หรือใช้อธิบายสำหรับผลิตภัณฑ์อาหารที่มีองค์ประกอบเป็นของแข็งที่ละลายน้ำได้ เช่น น้ำตาลหรือเกลือ (Rahman, 1995)

ประเภทที่ 4 อธิบายการดูดซับโดยของแข็งที่ชอบน้ำ และมีความสามารถอุ้มน้ำได้ (Swellable hydrophilic solid) จนกระทั่งถึงจุดสูงสุดของการ hydration

ประเภทที่ 5 คือ B.E.T (Brunauer, Emmett and Teller, 1938) multilayer adsorption isotherm ใช้สำหรับวิเคราะห์การดูดซับของไอน้ำบนถ่านหิน และสัมพันธ์กับ isotherm ประเภท 2 และ 3

นอกจากนี้ยังพบว่า isotherm 2 ประเภทที่พบบ่อยที่สุดในผลิตภัณฑ์อาหารคือ isotherm ประเภทที่ 2 และ 4 (Mathlouthi and Roge, 2003)



รูปที่ 2.8 ประเภทของ Sorption isotherms

ที่มา : Mathlouthi and Roge (2003)

รูปร่างของ isotherm ที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับธรรมชาติของผงอาหารว่าเป็นผลึกที่มีรูปแบบที่แน่นอน หรือมีรูปแบบไม่แน่นอน ซึ่งผงอาหารส่วนมากมีโครงสร้างที่ซับซ้อน ได้แก่ตัวถูกละลายที่มีผลึกรูปแบบที่แน่นอน เช่น น้ำตาล ซึ่งแสดงการเปลี่ยนเป็นผลึก ในระหว่างการดูดซับของน้ำ โดยน้ำตาลในรูปแบบที่แน่นอน มีหลายปัจจัยที่กระทบต่อการดูดซับของไอน้ำ และส่งผลต่อความคงตัวของ การเก็บรักษา การมีฟิล์มบางของสารละลายอิมตัวที่ผิวของผลึก การกระจายขนาดของอนุภาคเล็กๆ และน้ำในผลึก คือ ปัจจัยบางประการ ซึ่งทำให้ความชื้นสัมพัทธ์สมดุลของน้ำตาลไม่มีความเป็นระเบียบ และมีแนวโน้มเกิดการเกาะตัวกันของผง (Mathlouthi and Roge, 2003) อาหารแต่ละชนิดจะมี sorption isotherms แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางกายภาพองค์ประกอบทางเคมี และปริมาณของน้ำที่ยึดอยู่ในอาหาร (วิไล, 2546)

การศึกษา sorption isotherm ของอาหารมักกระทำที่อุณหภูมิต่างๆกัน ผลของอุณหภูมิต่อ sorption isotherm จะให้ได้ข้อมูลที่สำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำที่ระดับความชื้น

สัมพัทธ์ต่างๆ เมื่ออาหารมีความชื้นที่เท่ากันอุณหภูมิจะส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำในอาหารและสมดุลพลศาสตร์ระหว่างไอน้ำและวัฏภาคที่ดูดซึม (adsorbed phase) สมดุลของน้ำจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเมื่อ a_w คงที่ การเพิ่มอุณหภูมิเป็นผลให้โมเลกุลน้ำได้รับการกระตุ้นไปสู่ระดับพลังงานที่สูงกว่าและแตกพันธะออกจากส่วนที่น้ำเชื่อมโยงกับอาหาร เป็นผลทำให้สมดุลของปริมาณความชื้นลดลง อย่างไรก็ตามมีรายงานวิจัยพบว่าน้ำตาลที่ตกผลึกเช่นน้ำตาลกลูโคสในอาหารแห้งเป็นสาเหตุให้สมดุลของปริมาณความชื้น ณ อุณหภูมิต่างๆแตกต่างกันที่ระดับ a_w สูงๆ Myhara and Sablani (2001) ได้รายงานว่ปริมาณความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content) ของลูกเกดที่มีน้ำตาลกลูโคสสูงหรือผลอินชผลาล์ม ณ ระดับ a_w ต่ำๆจนถึง a_w 0.55 จะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและที่ระดับ a_w สูงๆปริมาณความชื้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Goula *et al*, 2008) จากรายงานการวิจัย Yan *et al.* (2007) ได้ศึกษา sorption isotherm ที่อุณหภูมิ 10 และ 40 องศาเซลเซียสของกล้วยที่ผ่านการอบแห้งโดยใช้ตู้อบสุญญากาศพบว่าปริมาณความชื้นสมดุลเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง ณ ระดับ a_w คงที่

Ahmed *et al.* (2005) ได้ศึกษา sorption isotherm ของผลอินชผลาล์มที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมพบว่าผลอินชผลาล์มที่ที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะดูดความชื้นอย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม เนื่องมาจากรูพรุนของผลอินชผลาล์มที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยอัตราการดูดซึมความชื้นของผลอินชผลาล์มที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะสูงกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ที่ระดับ a_w ตั้งแต่ 0.55 ขึ้นไป

Lee and Lee (2008) ได้ศึกษา sorption isotherm ของเห็ด โดยการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน และ อบแห้งโดยใช้ตู้อบสุญญากาศ พบว่าปริมาณความชื้นสมดุลของเห็ดที่ผ่านการอบแห้งโดยตู้อบลมร้อนต่ำที่สุด รองลงมาคืออบแห้งโดยตู้อบสุญญากาศ และทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งตามลำดับ เห็ดที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะดูดซึมไอน้ำมากกว่าเห็ดที่ผ่านการอบแห้งโดยตู้อบลมร้อนและตู้อบสุญญากาศ เนื่องจากรูพรุนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง อีกทั้งผลิตภัณฑ์แทบจะไม่มี การหดตัวและมีความสามารถในการดูดความชื้นได้มากกว่าวิธีการอบแห้งแบบอื่น

การศึกษา sorption isotherm นั้นกระทำในระบบปิดซึ่งมีการควบคุมสภาวะบรรยากาศให้ความชื้นสัมพัทธ์ในระบบคงที่ ซึ่งสภาวะความชื้นสัมพัทธ์จะถูกสร้างโดยการใช้สารละลายเกลืออิ่มตัวต่างๆ ดังตารางที่ 2.7 ตัวอย่างอาหารที่ทราบน้ำหนักเริ่มต้นจะถูกเก็บไว้ในระบบนี้ ความชื้นของอาหารปรับตัวจนกว่าจะสมดุลกับความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศที่เก็บรักษา โดยอาหารจะไม่

มีน้ำหนักเพิ่มขึ้นหรือลดลงภายใต้การเก็บรักษาในสภาวะดังกล่าว (Ramaswamy and Marcotte, 2006)

ตารางที่ 2.6 ค่า a_w ของสารละลายเกลือที่แตกต่างกันที่อุณหภูมิ 25°C

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)

โดย sorption isotherm จะใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นและการกำหนดสภาวะการอบแห้ง คัดเลือกบรรจุภัณฑ์ และทำนายอายุระหว่างการรักษาอาหารแห้งทำให้ผลิตภัณฑ์มีโครงสร้างเนื้อสัมผัสที่ดี เพื่อลดการเปลี่ยนแปลงจากปฏิกิริยาเคมีและให้ปลอดภัยจากการเจริญของจุลินทรีย์ (นักสิทธิ์, 2546) การเกาะตัวกันของอาหารเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพจากกลาส (amorphous glass) ไปเป็นของเหลวหนืด (amorphous rubber) ปริมาณความชื้นหรือ a_w มีผลต่อการเกาะติดกันของอนุภาค โดยทั่วไปอาหารที่มีน้ำตาลปริมาณสูง อัตราการเปลี่ยนแปลงเฟสระหว่างการเก็บรักษาจะเห็นได้ชัดเจนที่อุณหภูมิห้อง ถ้าผลิตภัณฑ์ได้รับความชื้นโดยมี a_w มากกว่า 0.4 การเชื่อมโยงระหว่างอนุภาคจะเกิดขึ้นเป็นผลทำให้เกิดการเกาะตัวกันของอนุภาค ดังนั้นเพื่อป้องกันปัญหาการเกาะตัวกันจึงต้องมีการศึกษา sorption isotherm ของส่วนผสมอาหาร (Bell and Labuza, 2000)

อาหารที่มีลักษณะเป็นผงมีแนวโน้มบ่อยครั้งที่จะมีลักษณะเหนียว และเกาะตัวกันของผง ซึ่งน้ำเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อปัญหาดังกล่าว ดังนั้น sorption isotherm เป็นเครื่องมือที่ใช้ประโยชน์สำหรับการทำความเข้าใจในเรื่องของความคงตัวของอาหารผง และสามารถใช้ในการทำนายความชื้นสูงสุดในอาหารที่ควรควบคุมในระหว่างกระบวนการทำแห้งและการเก็บรักษาของอาหารผง (Stencl, 2004) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษา sorption isotherm ของน้ำผึ้งผงเพื่อใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เก็บรักษาที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกศึกษา sorption isotherm น้ำผึ้งผงที่ระดับอุณหภูมิห้องเพื่อศึกษาถึงความคงตัวของน้ำผึ้งผง



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved