บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 นมผึ้ง หรือ รอยัลเยลลี่ (Royal Jelly)

นมผึ้ง หรือ รอยัลเยลลี่ (royal jelly) หมายถึง อาหารสำหรับเลี้ยงตัวอ่อนของผึ้งนางพญา มีลักษณะเหมือนครีมข้นสีขาว และรวมไปถึงรอยัลเยลลี่ที่นำไประเหยน้ำออกจนแห้งด้วยกรรมวิธีที่เหมาะสม มีลักษณะเป็นผง หรือเกล็ด หรือลักษณะอื่น (กระทรวงสาธารณสุข, 2548)

2.1.1 แหล่งที่มาของนมผึ้ง

นมผึ้งเป็นอาหารที่ผึ้งงานในช่วงที่เป็นผึ้งพี่เลี้ยงอายุ 6-12 วัน (young worker bees) สร้างขึ้นในระหว่างการย่อยเกสร และน้ำผึ้ง ที่ต่อมไฮโปฟารินเจียล (hypopharyngeal gland) และต่อมแมนดิบูลาร์ (mandibular gland) ที่อยู่บริเวณส่วนหัวของผึ้งงาน (พิชัย, 2545 ; FAO, 1996) โดยที่ต่อมไฮโปฟารินเจียลจะสร้างนมผึ้งในปริมาณที่มากกว่าต่อมแมนดิบูลาร์ ซึ่งผึ้งงานจะผลิตนมผึ้งสำหรับเลี้ยงตัวอ่อนของผึ้งทุกชนิดที่อายุไม่เกิน 3 วัน แต่จะมีเฉพาะตัวอ่อนที่เจริญเป็นผึ้งนางพญาเท่านั้นที่ได้รับนมผึ้งจำนวนมากตลอดชีวิต (พิชัยและสมนึก, 2537 ; Townsed and Lucuas, 1940; Lercker *et al*., 1981) นมผึ้งเป็นอาหารที่สำคัญต่อตัวอ่อนของผึ้งนางพญา ความแตกต่างของปริมาณนมผึ้งที่ตัวอ่อนของผึ้งงานและตัวอ่อนของผึ้งนางพญาได้รับ ส่งผลให้ผึ้งนางพญามีพัฒนาการทางด้านรูปร่าง และหน้าที่แตกต่างไปจากผึ้งงานทั่วไป (Karaali *et al*., 1988) โดยมีขนาดตัวใหญ่กว่า สามารถออกไข่เพื่อสืบพันธุ์ได้ และมีช่วงอายุยืนยาวกว่าผึ้งงานทั่วไป 10-20 เท่า (สุภาภรณ์, 2539) จากข้อสังเกตทางธรรมชาตินี้ทำให้นักวิทยาศาสตร์สนใจที่จะศึกษาถึงองค์ประกอบของนมผึ้ง โดยพบว่านมผึ้งประกอบไปด้วย โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน วิตามินและแร่ธาตุหลายชนิด รวมถึงสารชีวโมเลกุลต่างๆ (Miyata *et al*., 2004; Nagai and Inoue, 2004; Simuth *et al*., 2004; Stocker *et al*., 2005) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาถึงคุณประโยชน์มากมายของนมผึ้ง ทำให้ในปัจจุบันนมผึ้งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้รับความนิยมอย่างมาก ทั้งเพื่อเป็นอาหารเสริมบำรุงร่างกาย เพื่อการรักษาโรค รวมไปถึงเพื่อการเสริมความงาม ซึ่งปริมาณของส่วนประกอบในนมผึ้งจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับฤดูกาล แหล่งอาหารและสภาพแวดล้อมบริเวณที่ผึ้งอาศัยอยู่ (Stocker *et al*., 2005; Ratanavalachai, 2002; Takenaka, 1982) ปริมาณการผลิตนมผึ้งของผึ้งงานจะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

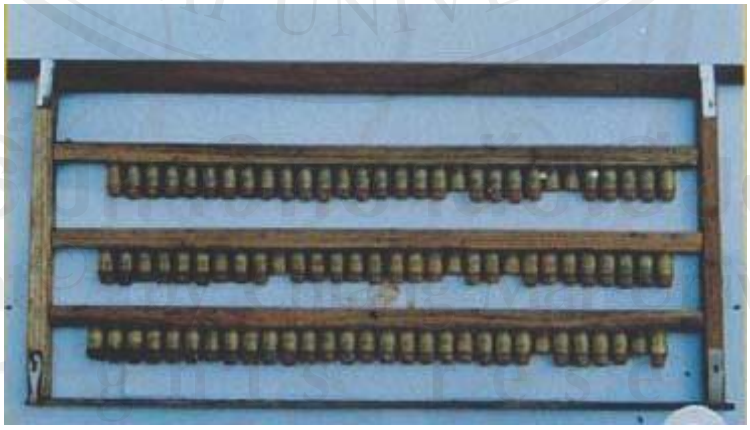
เกี่ยวข้องกับพืชอาหาร และสภาพแวดล้อมเช่นกัน (พิชัย, 2545 ; กรมส่งเสริมการเกษตร, 2528 และ Morse, 1975)

2.1.2 กรรมวิธีการผลิตนมผึ้ง

กระบวนการทางธรรมชาติที่ก่อให้เกิดการผลิตนมผึ้งนั้นคือ การสร้างผึ้งนางพญา ซึ่งจะเกิดจากสาเหตุ 3 ประการ คือ เพื่อเปลี่ยนผึ้งนางพญาตัวเดิมที่หมดสภาพ เพื่อขยายเผ่าพันธุ์ผึ้งออกไป และเพื่อทดแทนผึ้งนางพญาตัวเดิมที่สูญหายหรือตายโดยอุบัติเหตุ การผลิตที่เกิดจากทั้ง 3 ประการนี้จะได้ปริมาณนมผึ้งเพียงเล็กน้อย ไม่สม่ำเสมอ ขึ้นอยู่กับสภาพภายในรังผึ้งแต่ละรังว่าจะมีสภาพภายในเอื้ออำนวยมากน้อยแค่ไหน สำหรับการผลิตระดับอุตสาหกรรมจึงต้องจัดสภาพภายในรังผึ้งให้เหมาะสมต่อการผลิตอันประกอบด้วยการจัดผึ้งที่แข็งแรง มีผึ้งงานวัยอ่อนอย่างพอเพียง และเกิดการทดแทนอย่างสมดุล รวมทั้งมีปริมาณอาหารมากพอ และปราศจากศัตรูรบกวนโดยเฉพาะศัตรูภายในรังผึ้ง เช่น เชื้อจุลินทรีย์และไร

ขั้นตอนการผลิตนมผึ้ง

หลังจากจัดสภาพภายในรังผึ้งให้เหมาะสม พร้อมที่จะผลิตแล้ว ให้นำคอนผลิตนมผึ้งที่ติดถ้วยไว้ครบตามความต้องการใส่ลงไปในรังเลี้ยงตรงช่องที่กำหนด แล้วทิ้งไว้ 1 คืน เพื่อให้ผึ้งในรังคุ้นเคยกับสิ่งที่จะเกิดในรังต่อไป วันรุ่งขึ้นนำคอนผลิตที่ใส่ไว้ออกมา เพื่อย้ายหนอนผึ้งลงไปในคอนผลิต

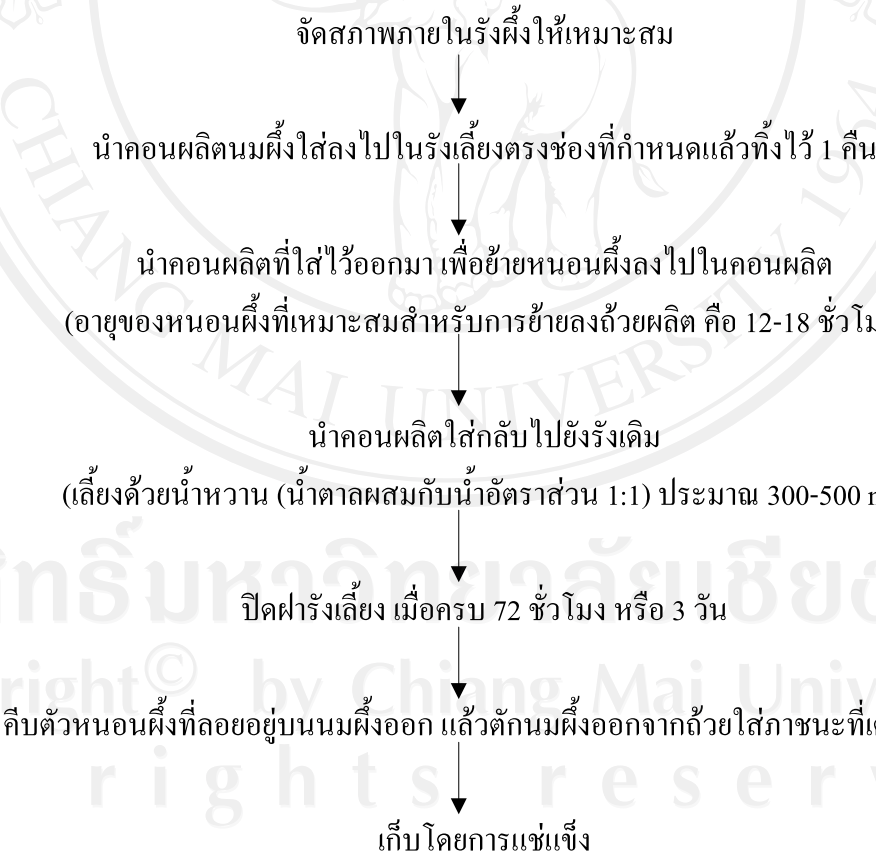


รูปที่ 2.1 : คอนสำหรับผลิตนมผึ้ง

ที่มา : พิชัย (2545)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ในการย้ายครั้งแรกควรรองก้นถ้วยที่ใช้ผลิตด้วยนมผึ้งเล็กน้อย อายุของหนอนผึ้งที่เหมาะสมสำหรับการย้ายลงถ้วยผลิต คือ 12-18 ชั่วโมง หรือเล็กที่สุดเท่าที่ตาเปล่ามองเห็น เมื่อย้ายหนอนผึ้งลงครบทุกถ้วยในคอนผลิตแล้ว นำคอนผลิตใส่กลับไปยังรังเดิม แล้วเลี้ยงด้วยน้ำหวาน (น้ำตาลผสมกับน้ำอัตราส่วน 1:1) ประมาณ 300-500 ml หลังจากนั้นปิดฝารังเลี้ยง เมื่อครบ 72 ชั่วโมง หรือ 3 วันหลังจากย้ายหนอนผึ้งก็ยกคอนผลิตออกจากรังเลี้ยง แล้วปัดผึ้งที่ติดคอนออกให้หมด ตัดไขผึ้งที่ผึ้งงานสร้างต่อจากถ้วยพลาสติกออก คีบตัวหนอนผึ้งที่ลอยอยู่บนนมผึ้งออก แล้วตักนมผึ้งออกจากถ้วยใส่ภาชนะที่เตรียมไว้ แล้วเก็บโดยการแช่แข็ง ส่วนคอนที่ตักนมผึ้งออกหมดแล้วก็สามารถที่จะนำมาใช้ผลิตได้อีก ซึ่งสามารถลดต้นทุนการผลิตลงได้ หลังจากย้ายหนอนผึ้งลงผลิตครบ 2 ครั้งแล้ว ควรเปลี่ยนเอาคอนที่ดักแด้แก่จัดที่เป็นตัวเต็มวัยหมดแล้ว กลับไปใส่ในช่องที่มีผึ้งนางพญาอยู่ เพื่อให้ผึ้งนางพญาได้ใช้ไข่ต่อไป พร้อมทั้งย้ายเอาคอนดักแด้ที่แก่จัดที่จะออกเป็นตัวมาไว้ยังช่องผลิตนมผึ้ง (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2528)



รูปที่ 2.2 : ขั้นตอนการผลิตนมผึ้ง

ที่มา : ดัดแปลงจาก กรมส่งเสริมการเกษตร (2528)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

การผลิตนมผึ้งจะประสบความสำเร็จหรือไม่ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ ความชำนาญในการย้ายหนอนผึ้งได้อย่างสม่ำเสมอ และรวดเร็ว โดยไม่ให้บอบช้ำ ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนในการผลิตลงได้ ขนาดของหนอนผึ้งควรมีขนาดเล็ก คือ อายุ 12-18 ชั่วโมง เพราะให้ปริมาณนมผึ้งมากกว่าหนอนผึ้งที่โต ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ (humidity) ในบรรยากาศ และอุณหภูมิในรังควรเหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของตัวหนอน แสงสว่างก็จะต้องเพียงพอต่อการองเห็นตัวหนอนผึ้งของผึ้งงานอย่างชัดเจน เพื่อจะนำนมผึ้งไปป้อนได้รวดเร็วขึ้น ระยะเวลาที่เหมาะสมในการเก็บนมผึ้งให้ได้ปริมาณมากที่สุดคือ 3 วัน และควรเก็บในตอนเช้าเพราะจะได้นมผึ้งที่ฉ่ำ สด ไม่กระด้าง น้ำตาลที่ใช้ควรเป็น น้ำตาลทรายขาว เพราะจะทำให้สีของนมผึ้งสวย และการเก็บนมผึ้งควรแช่เย็นอย่างรวดเร็วเท่าที่ทำได้

ปริมาณของนมผึ้งที่ผลิตได้ขึ้นอยู่กับ ความแข็งแรงของผึ้งในรัง (colony) และความหนาแน่นของประชาการผึ้งงาน ความอุดมสมบูรณ์ของแหล่งเกสร รวมถึงน้ำหวานที่ให้แก่ผึ้งในรัง และอายุของหนอนผึ้งในถ้วยผลิต (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2528)

2.1.3 องค์ประกอบของนมผึ้ง

นมผึ้งมีลักษณะเป็นของเหลวข้น มีสีครีม กลิ่นเฉพาะ มีรสเปรี้ยว ฝาดและขมเล็กน้อย มีค่า pH อยู่ระหว่าง 3.6-4.2 มีฤทธิ์เป็นกรด (Howe *et al*., 1985; FAO, 1996) มีความหนาแน่นประมาณ 1.1 g/cm^3 (FAO, 1996) มีงานวิจัยต่าง ๆ ที่ศึกษาองค์ประกอบของนมผึ้งพบว่าส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วย ความชื้น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน (ตารางที่ 2.1)

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของนมผึ้ง

องค์ประกอบ	เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักนมผึ้งสด (%w/w)			
	FAO[a]	**Brazil[b]**	**Thailand[c]**	**Australia[d]**
ความชื้น (น้ำ)	57 - 70	61.45 - 67.58	64.38 - 69.70	65 - 68
โปรตีน	17 - 45	11.99 - 14.01	12.05 - 13.76	11 – 15
คาร์โบไฮเดรต	18 - 52	18.95 - 21.20	8.15 - 15.94	16 – 20
ไขมัน	3.5 - 19	2.17 - 4.22	2.93 - 5.91	> 1.9
แร่ธาตุ	2-3			

ที่มา : (a) FAO, 1996; (b) Henrique *et al.,* 2007; (c) Ratanavalachai, 2002; (d) TGA, 2010

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ซึ่งปริมาณของส่วนประกอบในนมผึ้งจะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับฤดูกาล แหล่งอาหารและสภาพแวดล้อมบริเวณที่ผึ้งอาศัยอยู่ (Takenaka, 1982; Ratanavalachai, 2002; Stocker *et al*., 2005) โดยพบว่าในนมผึ้งสดมีปริมาณความชื้นสูง มีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่มากที่สุด คาร์โบไฮเดรตและโปรตีนมีปริมาณใกล้เคียงกัน สำหรับคาร์โบไฮเดรตส่วนใหญ่จะเป็นน้ำตาลฟรุกโตสและกลูโคสประมาณ 90% นอกนั้นจะเป็นน้ำตาลชนิดอื่น เช่น มอลโตส แซคคาโลส ตรีฮาโลส ไรโบส และมีลิบิโอส เป็นต้น สารปะกอบไนโตรเจนในนมผึ้งส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปโปรตีนและไกลโคโปรตีน มีกรดอะมิโนอิสระประมาณ 2.3% และมีเปปไทด์ 0.16% ของโปรตีนทั้งหมด นอกจากนี้ยังรวมไปถึงเอนไซม์ต่างๆ เช่น กลูโคสออกซิเดสฟอสฟาเทส และ โคลินเอสเธอเรส สำหรับองค์ประกอบที่เป็นไขมันในนมผึ้ง ส่วนใหญ่แล้วจะอยู่ในรูปกรดไขมันอิสระ ประมาณ 80-90% โดยมีโครงสร้างเป็นกรดไขมันสายสั้น (8-10 คาร์บอนอะตอม) ซึ่งแตกต่างจากกรดไขมันที่ได้จากพืชและสัตว์ชนิดอื่น (14-20 คาร์บอนอะตอม) (FAO, 1996) นอกจากนี้ในนมผึ้งยังพบวิตามินต่าง ๆ (ตารางที่ 2.2)

ตารางที่ 2.2 วิตามินที่พบในนมผึ้ง

วิตามิน	ความเข้มข้น (ไมโครกรัม/กรัม ของนมผึ้งสด)	
	A	**B**
Vitamin B		
Thiamine (B_1)	2	1.44 - 6.70
Riboflavin (B_2)	10	5 - 25
Pyridoxin (B_6)	2	1 - 48
Nicotinic acid	75	48 - 88
Biotin (B_8)	2	1.1 - 19.8
Folic acid (B_9)	0.3	0.13 - 0.53
Inositol (B_7)	100	80 - 350
Pantothenic acid (B_5)	250	159 - 265
Vitamin C (ascorbic acid)	3-5	-

ที่มา : (A) ตรีทิพย์, 2528 และ (B) FAO, 1996

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

วิตามินที่พบในนมผึ้งจะพบวิตามินบีเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งพบกรดแพนโตทีนิคมากเป็นพิเศษ มากถึง 17 เท่าของกรดแพนโตทีนิคที่ได้จากเกสรผึ้ง

Kanbur และคณะ (2009) ได้วิเคราะห์นมผึ้งที่นำมาใช้ในงานวิจัย พบว่ามีกรดอะมิโนอิสระหลายชนิดที่มีประโยชน์ต่อร่างกายที่เป็นองค์ประกอบสำคัญในนมผึ้ง (ตารางที่ 2.3) และนอกจากนี้ยังมีการศึกษาพบว่ามีฮอร์โมนบางชนิดอยู่ในนมผึ้งด้วย (ตารางที่ 2.4)

ตารางที่ 2.3 กรดอะมิโนอิสระที่พบในนมผึ้ง

Free amino acid	**mg/100 g**
Aspartic acid	17.33
Serine	1.39
Glycine	1.66
Lysine	62.43
Cysteine	1.29
Glutamic acid	2.99
Threonine	1.15
Alanine	1.14
Proline	58.76
Valine	3.29
Methionine	–
Tyrosine	1.29
Tryptophan	–
Histidine	–
Arginine	–
Cystine	21.76
Phenylalanine	1.49
Hydroxyproline	1.61
Leucine–isoleucine	1.51

ที่มา : Kanbur *et al*. (2009)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ 2.4 ฮอร์โมนที่พบในนมผึ้ง

ฮอร์โมน	พิโครกรัม/กรัม ของนมผึ้งสด
Pregnandlol-3 α-glucuronide	18,840.0
E_1-3-glucuronide	15,645.0
Testosterone	2,213.4
17β-Estradiol	381.6
Progesterone	310.7
Cortisol	181.2

ที่มา : Tangpraprutgul (1993)

ตารางที่ 2.5 แร่ธาตุที่พบในนมผึ้ง

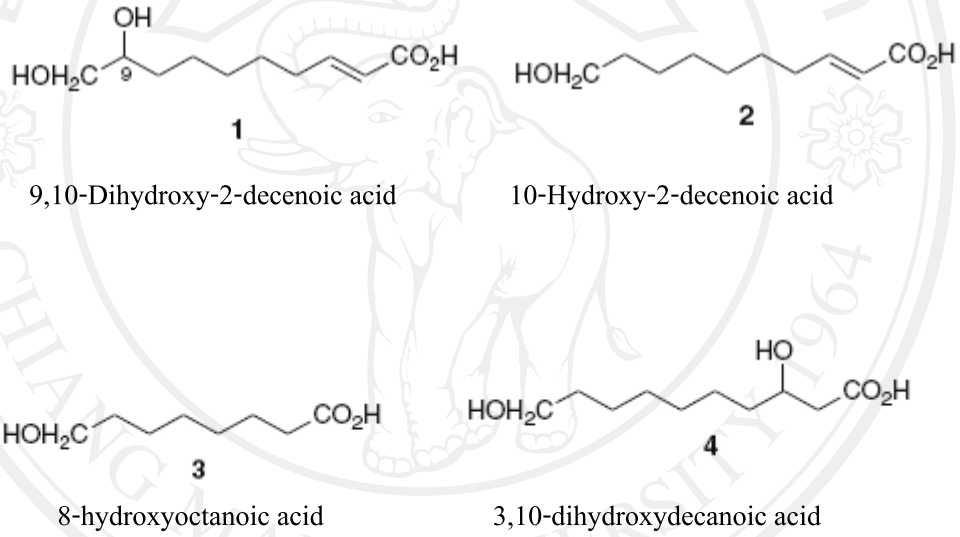
ชนิดของแร่ธาตุ	ปริมาณที่พบ (mg/kg)	ชนิดของแร่ธาตุ	ปริมาณที่พบ (µg/kg)
P	1940-2350	Sn	15-277
S	1154-1420	Hg	< 1-36
Ca	113-145	Pb	32-287
Mg	28-312	Cd	1.3-19
K	2462-3120	W	2.6-4820
Na	106-142	Te	0.3-9.1
Al	0.8-54.7	Sb	0.4-5.4
Zn	20.1-24.8	Tl	0-1.15
Fe	9.1-22.1	Bi	1.6-13.5
Cu	4.0-8.1	Ba	< 100
Cr	0.33-2.97	V	< 200
Mn	0.7-4.35	Co	< 200
Ni	0.14-1.70	Mo	< 400
Ti	< 0.14-1.55	Sr	< 100

ที่มา : ดัดแปลงมาจาก Stocker *et al.* (2005)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

จะเห็นได้ว่านมผึ้งมีสารประกอบที่มีประโยชน์ต่อร่างกายมากมาย นอกจากนี้ยังพบแร่ธาตุต่างๆ อีกหลายชนิดในนมผึ้ง ดังตารางที่ 2.5 ซึ่ง Stocker และคณะ (2005) ได้ศึกษาถึงแร่ธาตุที่มีอยู่ในนมผึ้งที่เก็บในฤดูกาลและสถานที่แตกต่างกัน โดยชนิดและปริมาณของแร่ธาตุที่มีอยู่ในนมผึ้งนั้นขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมที่ผึ้งอาศัยอยู่ รวมไปถึงความแตกต่างของพืชพรรณในแต่ละฤดูกาล

มีการศึกษาวิจัยหาสารสำคัญที่อยู่ในนมผึ้งที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย พบว่ามีสารชีวโมเลกุลหลายชนิด (ดังรูป 2.3) มีประโยชน์ทางด้านเภสัชวิทยา (pharmacological activities) และมีผลช่วยในการรักษาโรคต่างๆ เช่น 10-hydroxy-2-decenoic acid (10-HDA) ซึ่งเป็นกรดไขมันที่พบเฉพาะในนมผึ้งเท่านั้น (FAO, 1996)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของกรดไขมันที่มีอยู่ในนมผึ้ง
ที่มา : Tani *et al*. (2009)

นอกจากนี้ในนมผึ้งยังมีเปปไทด์ที่ประกอบด้วยกรดอะมิโนเชื่อมต่อกันที่มีชื่อเรียกว่า Royalisin (Fujiwara *et al.,* 1990), Royalactin (Kamakura *et al.,* 2001), Apisimin (Bilikova *et* al., 2002), Apisin (Watanabe *et al*., 1998) และ Jelleines (Fontana *et al.,* 2004) ซึ่งสารเหล่านี้จะประกอบด้วยชนิดของกรดอะมิโนในโครงสร้างที่แตกต่างกันและมีมวลโมเลกุลที่ต่างกัน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.1.4 ประโยชน์ของนมผึ้ง

ในธรรมชาตินมผึ้งเป็นอาหารที่สำคัญต่อตัวอ่อนของผึ้ง ความแตกต่างของปริมาณนมผึ้งที่ตัวอ่อนของผึ้งงานและตัวอ่อนของผึ้งนางพญาได้รับ ส่งผลให้ผึ้งนางพญามีลักษณะที่แตกต่างจากผึ้งงานทั่วไป โดยมีขนาดตัวใหญ่กว่า สามารถออกไข่เพื่อสืบพันธุ์ได้ และมีช่วงอายุยืนยาวกว่าผึ้งงานทั่วไป 10-20 เท่า (สุภาภรณ์, 2539) เนื่องด้วยนมผึ้งประกอบด้วยสารอาหารที่มีประโยชน์เป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงได้นิยมนำนมผึ้งมาใช้กันอย่างแพร่หลาย ทั้งเพื่อเป็นอาหารเสริมบำรุงร่างกาย เพื่อการรักษาโรค รวมไปถึงเพื่อการเสริมความงาม

มีงานวิจัยที่ศึกษาถึงคุณประโยชน์ของนมผึ้ง โดยพบว่านมผึ้งมีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุ-มูลอิสระ (Buratti *et al*., 2007; Jamnik *et al*., 2007; Nagai *et al*., 2006) และ สามารถยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียได้หลายชนิด (Fontana *et al.,* 2004; อิทธิพล, 2545; ตรีทิพย์, 2528)

จากการศึกษาทางด้านเภสัชวิทยาของนมผึ้ง พบว่านมผึ้งสามารถช่วยยับยั้งการลุกลามของเซลล์มะเร็ง (Bincoletto *et al*., 2005; Majtan *et al*., 2006) ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซึมแคลเซียมและป้องกันภาวะกระดูกพรุน (Hidaka *et al*., 2006) ช่วยขยายหลอดเลือดและช่วยลดความดันเลือด (Shimoda *et al*., 1978) ช่วยลดระดับคอเรสเตอรอลในเลือด (Nakajin *et al*., 1982) ช่วยเสริมการทำงานของฮอร์โมนเพศหญิง (Mishima *et al*., 2005; Husein and Haddad, 2006; Kridli and Al-Khetib, 2006) มีสารที่มีฤทธิ์คล้ายอินซูลิน (Salazar-Olivo and Paz-Gonzales, 2005) ช่วยลดระดับน้ำตาลในเส้นเลือด (Fujii *et al*., 1990) มีคุณสมบัติช่วยรักษาบาดแผลและป้องกันโรคเกี่ยวกับทางเดินอาหาร (Fujii *et al*., 1990) ช่วยลดความอ่อนเพลียจากการทำงานหนัก (Kamakura *et al*., 2001) ช่วยเพิ่มความเป็นไปได้ในการมีบุตรของผู้ชายที่อยู่ในภาวะบุตรยาก (Abdelhafiz and Muhamad, 2008) ช่วยเพิ่มการทำงานของระบบประสาท (Vucevic *et al*., 2007) ช่วยลดบาดแผลในตับที่เกิดจากการได้รับสารอันตราย (El-Nekeety *et al.,* 2007) เป็นต้น นอกจากนี้พบว่านมผึ้งสามารถช่วยเสริมการสร้างคอลลาเจนในร่างกายได้ (Miyata *et al*., 2004) ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอางได้อีกด้วย

2.1.5 ความเป็นพิษของนมผึ้ง

นมผึ้งไม่ได้เป็นสารที่มีความเป็นพิษต่อร่างกาย แต่อย่างไรก็ตามในผู้บริโภคบางรายอาจมีอาการแพ้ได้ ขึ้นอยู่กับสภาพร่างกายของแต่ละบุคคล ดังนั้นควรทดลองบริโภคในปริมาณเล็กน้อยในช่วง 2-3 วันแรกก่อน หากมีอาการแพ้หรือผิดปกติเกิดขึ้น ควรหยุดบริโภคทันที (FAO, 1996) ผู้บริโภคบางรายอาจมีอาการเพียงเล็กน้อย โดยมีรายงานพบว่ามีผู้บริโภคนมผึ้ง 5 กรัม เป็นเวลา 2-3 วัน หลังจากนั้นมีอาการนอนไม่หลับ กระสับกระส่าย อุณหภูมิในร่างกายสูงเล็กน้อย หรือบางราย

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

อาจมีอาการรุนแรง เช่น สตรีชาวญี่ปุ่นอายุประมาณ 53 ปี มีอาการปวดหลังและท้องร่วงอย่างรุนแรง หลังจากที่บริโภคนมผึ้ง 10 ml ต่อวัน เป็นเวลา 25 วัน (อิทธิพล , 2545) คุณภาพของนมผึ้งที่นำไปบริโภคขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการเก็บรักษา ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเก็บรักษานมผึ้งไว้ในอุณหภูมิที่เหมาะสมเพื่อคุณประโยชน์ที่จะได้รับของผู้บริโภค

2.1.6 การเก็บรักษานมผึ้ง

นมผึ้งสดควรมีการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิแช่เยือกแข็ง เพื่อคงคุณภาพของนมผึ้งให้สดใหม่ ในระหว่างการเก็บรักษา หากเก็บนมผึ้งสดไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิห้อง จะทำให้ความหนืดของนมผึ้งสดเพิ่มขึ้นและมีสีเข้มขึ้น แต่จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเมื่อเก็บไว้ที่ -20 องศาเซลเซียส (Chen and Chen, 1995) ซึ่งอายุการเก็บรักษานมผึ้งสดนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการเก็บรักษา หากเก็บนมผึ้งสดไว้ในอุณหภูมิตู้เย็น จะสามารถเก็บนมผึ้งไว้ได้ 18 เดือน ถ้าต้องการยืดอายุการเก็บรักษาควรเก็บนมผึ้งไว้ที่อุณหภูมิ –17 องศาเซลเซียส หรือต่ำกว่า ซึ่งจะสามารถเก็บนมผึ้งสดได้ประมาณ 24 เดือน และหลังจากที่นำนมผึ้งที่แช่แข็งมาละลายแล้วไม่ควรเก็บไว้เกิน 12 เดือน (FAO, 1996) สารสำคัญในนมผึ้งที่เป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณภาพ คือ 10-hydroxy-2-decenoic acid (10-HDA) ปริมาณ 10-HDA เป็นปัจจัยที่แสดงถึงสภาวะการเก็บรักษาหรือความสดใหม่ของนมผึ้ง จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 10-HDA ในระยะเวลาการเก็บรักษา 12 เดือน ของ Antinelli *et al*. (2003) พบว่าเมื่อเก็บนมผึ้งสดไว้ที่อุณหภูมิ –18 องศาเซลเซียส ปริมาณสาร 10-HDA ไม่มีการเปลี่ยนแปลง หากเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ปริมาณสาร 10-HDA ลดลง และจะมีปริมาณลดลงมากเมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส) ซึ่งการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสหรือสูงกว่า อาจทำให้นมผึ้งเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและเกิดปฏิกิริยาระหว่างโปรตีนและน้ำตาลได้ จึงทำให้คุณภาพของนมผึ้งลดลง ดังนั้นจึงนิยมนำมาแปรรูปเพื่อให้มีรูปแบบที่มีความเสถียรมากขึ้น ง่ายต่อการเก็บรักษาและการบริโภค

2.1.7 การแปรรูปนมผึ้ง

วิธีที่นิยมใช้ในการแปรรูปนมผึ้ง คือ การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ซึ่ง เป็นกระบวนการทำแห้งสำหรับวัตถุที่มีความไวต่อความร้อน เช่น อาหาร ยา วัตถุชีวภาพ (Wang and Chen, 2005) และผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูง เช่น เนื้อ กาแฟ ปลาอาหารทะเลบางชนิด และผลไม้ เป็นต้น (Onwulata, 2005) เนื่องจากเป็นเทคนิคการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำ จึงสามารถลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีและการสูญเสียเนื่องจากความร้อน (Schoug *et al*., 2006) จึงจะสามารถคงคุณค่าของนมผึ้งไว้ให้มากที่สุด

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze drying or lyophilization)

เป็นกระบวนการทำอาหารแห้งด้วยการทำให้น้ำหรือตัวทำละลายระเหิดออกจากผลิตภัณฑ์ที่แช่เยือกแข็ง การระเหิดของน้ำในอาหารจะเป็นการเปลี่ยนสถานะจากน้ำแข็งให้กลายเป็นไอ โดยไม่เปลี่ยนเป็นของเหลว (Velardi and Barresi, 2008) วิธีนี้จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมต่อการแปรรูปนมผึ้ง เนื่องจากจะทำให้สาร 10-hydroxy-2-decenoic acid ที่เป็นสารสำคัญในนมผึ้งเกิดการสูญเสียระหว่างกระบวนการแปรรูปน้อยกว่าการแปรรูปที่มีการใช้ความร้อนร่วมด้วย

กระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเกิดขึ้นใน 3 ขั้นตอน (วิไล, 2546) คือ

ขั้นตอนการแช่เยือกแข็ง (Freezing stage) คือการทำให้น้ำในผลิตภัณฑ์แข็งตัวโดยการนำอาหารมาแช่ เยือกแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของสารละลายในอาหารนั้น จนทำให้องค์ประกอบทุกอย่างที่สามารถเยือกแข็งได้ ในอาหารเกิดการเยือกแข็งอย่างสมบูรณ์

ขั้นตอนการระเหิด (Primary drying stage) การระเหิดน้ำแข็งออกจากผลิตภัณฑ์โดยการลดความดันรอบๆชิ้นอาหารให้ต่ำลง จนเกิดการระเหิดอย่างต่อเนื่อง

ขั้นตอนการระเหย (Secondary drying stage) คือการระเหยน้ำออกจากสารละลายเข้มข้นที่ไม่สามารถเยือกแข็งในผลิตภัณฑ์ออก ซึ่งต้องมีการให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย

การทำแห้งนมผึ้งสดด้วยวิธีนี้ จะต้องแช่เยือกแข็งนมผึ้งสดโดยให้มีความหนาไม่เกิน 1 เซนติเมตร เนื่องจากการระเหิดน้ำแข็งจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ (ระเหิดที่ความหนาของน้ำแข็งประมาณ 1 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง) หากมีความหนามากจะใช้เวลาในการอบแห้งนานขึ้น เนื่องจากไอน้ำเคลื่อนที่ผ่านของแข็งได้ช้า (Pikel, 2002) น้ำแข็งจะถูกกำจัดออกโดยการระเหิดไปเป็นไอน้ำทันทีโดยไม่ผ่านการละลายภายใต้สภาวะการทำให้แห้ง ที่ต่ำกว่าจุด triple point ของน้ำ คือ 0 องศาเซลเซียสและความดัน 611 ปาสคาล ไอน้ำจะถูกกำจัดออกอย่างต่อเนื่องด้วยการรักษาความดันในตู้อบให้ต่ำกว่าความดันไอน้ำที่ผิวของน้ำแข็ง ไอน้ำจะถูกกำจัดออกไปด้วยปั๊มสุญญากาศและกลั่นตัวบนขดลวดทำความเย็น การระเหิดของน้ำแข็งจะต้องใช้ความร้อน ปริมาณหนึ่ง (Heat of sublimation) น้ำในผลิตภัณฑ์จะระเหิดออกไปโดยไม่กลายเป็นของเหลวทำให้การเคลื่อนที่ของสารละลายต่างๆในผลิตภัณฑ์เกิดน้อย โครงสร้างของผลิตภัณฑ์จะยังคงอยู่รูปเดิมโดยไม่มีการหดตัว การที่มีอุณหภูมิต่ำและความดันต่ำร่วมกับการไม่มีน้ำที่เป็นของเหลว จะช่วยให้เกิดโครงสร้างรูพรุนในระหว่างการทำแห้ง (Fellow, 2000) ซึ่งปัจจัยดังกล่าวยังช่วยลดการเสียสภาพเนื่องจากความร้อน ทำให้สามารถรักษาสี กลิ่น รสชาติและคุณค่าทางอาหารได้ดี แต่การทำแห้งด้วยวิธีการนี้มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง จึงต้องคำนึงถึงข้อดีข้อเสียของกระบวนการดังแสดงในตารางที่ 2.6

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ 2.6 ข้อดีและข้อเสียของการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

ข้อดี	ข้อเสีย
1.ผลิตภัณฑ์ไม่ถูกทำลายด้วยความร้อน 2. สามารถคงรสชาติและกลิ่นรสของผลิตภัณฑ์ไว้ได้ 3. สามารถกักเก็บวิตามินไว้ได้ดี 4. ผลิตภัณฑ์มีการหดตัวน้อย 5. ผลิตภัณฑ์มีอายุการเก็บรักษาที่ยาวนานถ้าเก็บในบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสม 6. ยังคงเก็บรักษากิจกรรมของสารชีวโมเลกุลไว้ได้	1. มีค่าใช้จ่ายสูงกว่าการทำแห้งวิธีอื่น 2. ผลิตภัณฑ์จะถูกทำลายโดยการแช่เยือกแข็งก่อนที่จะทำให้แห้ง หากเป็นการแช่เยือกแข็งในอัตราที่ช้า 3. ผลิตภัณฑ์จะดูดความชื้นเร็ว(hygroscopic) เกิดการเกาะติดกัน (caking) ได้ง่าย นอกจากจะเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ 4. ผลิตภัณฑ์จะค่อนข้างเปราะและมีรูพรุน 5. ผลิตภัณฑ์มักจะมีสีซีดลงเมื่อเก็บรักษา

ที่มา: Schwartzberg (2010)

สำหรับการทำแห้งนมผึ้งนั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ผลิตเป็นอาหารเพื่อสุขภาพ โดย ต้องการให้คงคุณภาพและคุณค่าทางโภชนาการ รวมไปถึงสารชีวโมเลกุลที่สำคัญต่างๆ ที่มีในนมผึ้ง และยังต้องการรักษากลิ่น สีและรสชาติ ของนมผึ้งไว้ด้วย ดังนั้นวิธีนี้จึง น่าจะเป็นวิธีที่เหมาะสมในการทำแห้งนมผึ้งสด

2.1.8 ผลิตภัณฑ์นมผึ้ง

นมผึ้งที่ได้จากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมักจะอยู่ในรูปนมผึ้งผง สามารถนำไปทำให้อยู่ในรูปแบบอื่นได้อีก เช่น การทำนมผึ้งผงอัดเม็ด การนำไปบรรจุในแคปซูล เพื่อใช้เป็นผลิตภัณฑ์เสริมอาหาร นอกจากนี้แล้วยังมีผลิตภัณฑ์ที่มีนมผึ้งเป็นส่วนผสมในหลากหลายรูปแบบ เช่น การทำเครื่องดื่มนมผึ้งพร้อมดื่มที่มีการผสมสารที่ช่วยเพิ่มการกระจายตัว เพื่อให้ได้สารละลายที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Susumu *et al*., 2002) นำไปผสมในน้ำผลไม้ เช่น น้ำส้ม ในอัตราส่วนต่างๆ เพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ (Masahito *et al*., 2000) ผสมนมผึ้งลงในวัสดุที่ใช้ทำแคปซูล โดยนำนมผึ้งไปผสมกับไขผึ้ง ไขมัน น้ำมัน และ glycerin fatty acid ester (Nobuyuki and Koji, 2001) การทำนมผึ้งผงดัดแปร และนมผึ้งผงดัดแปรผสมอาหารผง โดยนำนมผึ้งผงละเอียดไปทำเป็นแกรนูลโดยใช้สารที่สามารถละลายน้ำได้ เช่น เดกซ์ตริน คาเซอีน กัมอะราบิค หรือโพลีไวนิล แอลกอฮอล์ แล้วเคลือบผิวด้วยไขมันหรือน้ำมัน ที่มีจุดหลอมเหลวมากกว่าหรือเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

(Yukiya *et al*., 1999) มีการนำนมผึ้งมาย่อยด้วยเอนไซม์ protease ให้มีโมเลกุลเล็กลง ได้สารที่ช่วยเร่งในการดูดซึมแคลเซียม แล้วเติมลงในนมพร้อมดื่มและนมเปรี้ยว ซึ่งมีสารที่ช่วยเร่งในการดูดซึมแคลเซียม เช่น คาเซอีน ฟอสเฟตเปปไทด์ ไอโซฟลาโวน วิตามินดี วิตามินเค และสารอื่นๆ (Shuichiro and Mitsuyoki, 2000) นอกจากนี้ยังนำนมผึ้งไปผสมในเครื่องดื่มชา เช่น ชาอู่หลง ชาเขียว หรือ ชาจัสมิน เพื่อเป็นเครื่องดื่มเพื่อสุขภาพ (Taizo and Sadahiro, 1999) และมีการใช้นมผึ้งเป็นส่วนผสมในโยเกิร์ตและนมข้นหวาน (Henrique *et al.,* 2007) เป็นต้น จะเห็นได้ว่ามีการใช้นมผึ้งอย่างแพร่หลาย ซึ่งไม่ได้จำกัดอยู่ในอุตสาหกรรมอาหารและยาเท่านั้น แต่ยังเป็นที่นิยมในอุตสาหกรรมเครื่องสำอางอีกด้วย ดังจะเห็นได้จากผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางในปัจจุบันจะมีการผสมนมผึ้งลงไป เช่น แชมพู ครีม โลชั่น และแป้ง อีกด้วย

2.2 สมบัติสำคัญของอาหารผง

2.2.1 ขนาดอนุภาคและการกระจายของขนาด (Particle size and size distribution)

ขนาดอนุภาคของผงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวของอนุภาคผง ยิ่งอนุภาคมีขนาดเล็กพื้นที่ผิวก็จะมีมาก ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติทางด้านกายภาพ เคมี ของอนุภาคผง หน่วยที่ใช้วัดขนาดของอนุภาคที่นิยมใช้กัน ได้แก่ ไมโครเมตร (10^{-6} เมตร) ในบางกรณีถ้าหากอนุภาคผงมีขนาดเล็กมากอาจใช้หน่วยเรียกเป็นนาโนเมตร (10^{-9} เมตร) โดยทั่วไปอนุภาคผงจะมีหลายๆ ขนาดปะปนกันอยู่ (polydisperse) จึงต้องมีการระบุขนาดของอนุภาคผงเป็นค่าเฉลี่ย (average size) หรือช่วงของขนาด (size range) และยังมีการกระจายขนาด (size distribution) ที่แตกต่างกันออกไปด้วย (จักรพันธ์, 2551)

ขนาดอนุภาค

ขนาดของอนุภาคที่มีรูปร่างทรงกลมสามารถจะระบุได้โดยตรงด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคนั้นๆ แต่ในความเป็นจริงอนุภาคของผงไม่มีรูปร่างทรงกลมจึงทำให้การกำหนดขนาดของอนุภาคผงโดยใช้เส้นผ่านศูนย์กลางมีความยุ่งยากมากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อมีความไม่สมมาตรของอนุภาคมากขึ้น ดังนั้นค่าที่ระบุถึงขนาดของอนุภาคผงโดยใช้เส้นผ่านศูนย์กลางซึ่งใช้กัน โดยทั่วไปจึงเป็นเพียงค่าเทียบเคียงกับเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่มีรูปร่างทรงกลม (Equivalent spherical diameter) (จักรพันธ์, 2551) ขนาดของอนุภาคมักใช้ในการจัดกลุ่มและจำแนกอาหารผง โดยค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคควรมีค่าน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร ค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคอาหารผงแต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 2.7 ได้มีการจัดมาตรฐานของอนุภาคอาหารผง ดังตารางที่ 2.8 เพื่อใช้ในการให้คำนิยามของอาหารผงแต่ละชนิด (Barbosa-Canovas *et al*., 2005)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ 2.7 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 2.8 คำนิยามลักษณะของอาหารผง

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

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

อนุภาคผงที่มีขนาด 200-300 ไมครอน จะมีแนวโน้มในการไหลได้ดีกว่าอนุภาคผงที่มีขนาดเล็ก เนื่องจากมีน้ำหนักมากกว่าและมีแรงยึดเกาะกันน้อย อนุภาคผงที่มีขนาดอยู่ในช่วง 75-200 ไมครอน มีน้ำหนักไม่มาก แต่มีพื้นที่ผิวมากกว่า ทำให้เกิดแรงยึดกัน และส่งผลต่อการไหลของผงได้ ส่วนอนุภาคผงที่มีขนาดเล็กกว่า 100-75 ไมครอน จะมีปัญหาในการไหลของผง เนื่องมาจากแรงยึดกันระหว่างอนุภาค ในกรณีที่มีผงละเอียดอยู่มากและมีแรงยึดกันหรือมี free surface energy ด้วย จะไปยับยั้งการไหลของผง โดยทั่วไปการที่ผงมีขนาด 10 ไมครอน หรือเล็กกว่า จะมีแรงยึดกันระหว่างอนุภาคอยู่สูง แต่อย่างไรก็ตามขนาดอนุภาคที่จะเกิดแรงยึดกันระหว่างอนุภาคจนส่งผลต่อการไหล (critical size) ขึ้นอยู่กับผงแต่ละชนิดซึ่งจะแตกต่างกัน เช่น แป้งข้าวสาลีที่ขนาด 20-25 ไมครอน และ boric acid ที่ขนาด 150-170 ไมครอน ในกระบวนการอัดเม็ดนั้นหากอนุภาคผงที่นำมาตอกอัดมีปริมาณผงละเอียดอยู่มากจะมีผลทำให้การไหลของผงลงสู่เบ้าตอกไม่สม่ำเสมอ ถ้ามี

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ผงละเอียดปริมาณมากจะทำให้ผลิตภัณฑ์อัดเม็ดมีค่าความแปรปรวนของน้ำหนักมาก แต่ในกรณีที่ขนาดของเม็ดเล็กลง (เบ้ามีขนาดเล็ก) แต่อนุภาคผงที่ใช้มีขนาดใหญ่เกินไป เมื่ออยู่ในเบ้าขนาดเล็กจะมีช่องว่างเกิดขึ้นมากกว่าอนุภาคที่มีขนาดละเอียด และเมื่ออนุภาคไหลลงเต็มเบ้า การเกลี่ยที่ผิวหน้าจะไม่เรียบเหมือนอนุภาคที่มีขนาดละเอียด ทำให้เกิดความสม่ำเสมอในการบรรจุลงเบ้า ซึ่งมีผลต่อความแปรปรวนของน้ำหนักเม็ดที่ได้เช่นกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของเม็ดด้วย (จักรพันธ์, 2551)

การกระจายของขนาดอนุภาค

โดยทั่วไปอนุภาคผงจะมีขนาดต่างๆ กันรวมกันอยู่ จึงมีความจำเป็นที่จะรู้ไม่เพียงแต่ขนาดเท่านั้น แต่จะต้องรู้ด้วยว่าอนุภาคขนาดนั้นๆ มีการกระจายอยู่ปริมาณเท่าใด การกระจายขนาดอนุภาคของผงอาจจะระบุเป็นน้ำหนัก (weight distribution) หรือจำนวนก็ได้ (number distribution) ข้อมูลทางด้านการกระจายของขนาดที่ได้จากการทดลองสามารถที่จะคำนวณหาขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงได้ การกระจายของขนาดอนุภาคผงจะมีผลต่อการไหลของผง (internal flow) และส่งผลต่อการแยกตัวของอนุภาคผงที่มีขนาดต่างกันในระหว่างที่ไหลผ่านที่บรรจุผง (hopper) ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้น้ำหนักของเม็ดที่ได้ลดลงในช่วงท้ายของการผลิต ในกระบวนการอัดเม็ดนั้นถ้ามีการกระจายของขนาดอนุภาคแคบเท่าไหร่ก็จะส่งผลดีต่อการผลิต ทำให้ได้รูปแบบเม็ดที่สม่ำเสมอและไม่ทำให้กระบวนการผลิตติดขัดได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องรู้ทั้งขนาดของอนุภาคและการกระจายของขนาดของผงด้วย (จักรพันธ์, 2551)

2.2.2 การวัดขนาดอนุภาค

เครื่องมือหรือวิธีการที่ใช้ในการหาขนาดของอนุภาคผงจะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคที่ต้องการจะหาขนาด ซึ่งจะเหมาะสมกับช่วงขนาดที่แตกต่างกัน (จักรพันธ์, 2551) มีหลายวิธีการที่ใช้วัดขนาดของอนุภาค การวัดขนาดของอนุภาคสามารถทำได้ดังนี้ การร่อนผ่านตะแกรง (sieving) การส่องกล้องจุลทรรศน์ (microscopy techniques) การตกตะกอน (sedimentation) เป็นต้น (Barbosa-Canovas *et al*., 2005)

Sieving

เป็นการหาขนาดโดยวิธีนี้จะใช้ตะแกรง (Sieve) ที่มีขนาดรูเปิดแตกต่างกันมาเรียงซ้อนกันเป็นชุด ตะแกรงที่นำมาใช้จะต้องมีการตรวจสอบ (Calibrate) ขนาดรูเปิดให้แน่นอน (จักรพันธ์, 2551) การวิเคราะห์ทำโดยการเรียงซ้อน ตะแกรงตามลำดับของขนาดรูเปิด จากนั้นใส่ผงที่ต้องการวิเคราะห์ลง ในตะแกรง เปิดเครื่องให้มีการเขย่าตะแกรงอยู่นานระยะหนึ่งโดยเป็นเวลาที่แน่นอน แล้วจึงชั่งหาน้ำหนักของผงที่ค้างบนตะแกรง (Barbosa-Canovas *et al*., 2005)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

การหาขนาดอนุภาคโดยการใช้ตะแกรงอาจมีความผิดพลาดเกิดขึ้นได้ โดยเป็นผลมาจากปัจจัย 3 อย่าง คือ ปริมาณของผงที่ใช้ในการทดสอบ (sieve loading) ระยะเวลาในการเขย่า (duration of agitation) และระดับความแรงที่ใช้ในการเขย่า (intensity of agitation) ซึ่งจะทำให้ได้ผลที่ไม่เหมือนกันถ้าไม่ควบคุมปัจจัยเหล่านี้ให้เหมือนกันทุกครั้ง (จักรพันธ์, 2551)

Optical Microscopy

กล้องจุลทรรศน์ธรรมดาทั่วไปมีความเป็นไปได้ที่จะใช้วัดขนาดของอนุภาคช่วง 0.2 – 100 ไมครอน ขนาดของอนุภาคประมาณได้โดยอาศัย micrometer ที่ติดอยู่ที่ microscope eyepiece แล้วทำการนับจำนวนอนุภาคที่มีขนาดต่างๆ ได้โดยตรงจากการส่องดู

ข้อเสียของการใช้กล้องจุลทรรศน์คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้นั้นดูจาก 2 มิติเท่านั้น คือด้านกว้างและด้านยาว ไม่ได้ประมาณค่าความหนาของอนุภาค นอกจากนั้นสำหรับการวัดด้วยวิธีนี้จะต้องนับจำนวนอนุภาคอย่างน้อย 300-500 อนุภาค เพื่อให้ได้การประมาณค่าที่ดีสำหรับการกระจายของอนุภาคผง จึงต้องใช้เวลานาน (จักรพันธ์, 2551)

Sedimentation

เป็นการหาขนาดอนุภาคด้วยวิธีการตกตะกอน ขนาดที่ได้จะสัมพันธ์กับอัตราที่อนุภาคตกตะกอนลงมาผ่านของเหลวตัวกลางที่ใช้แขวนตัวอนุภาค (suspending medium) โดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก (gravity sedimentation) ในการหาขนาดด้วยวิธีนี้ อนุภาคที่นำมาหาขนาดต้องไม่เกาะรวมตัวหรือจับตัวกัน (aggregate or clumped) ขณะที่แขวนตัวอยู่ตัวกลางในระหว่างการทดสอบ เพราะถ้าเป็นเช่นนั้นจะทำให้เกิดการตกลงมาได้เร็วกว่าอนุภาคเดี่ยวๆ และทำให้ผลที่ได้ผิดพลาดไป (จักรพันธ์, 2551)

Coulter Counter

เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดปริมาตรของอนุภาค และแปรผลที่สามารถวัดได้ให้ออกมาเป็นขนาดของอนุภาคโดยเทียบเท่าขนาดอนุภาคที่มีลักษณะเป็นทรงกลม และมีปริมาตรเท่ากันกับปริมาตรของอนุภาคที่ต้องการรู้ขนาด เครื่องมือนี้สามารถตรวจนับอนุภาคได้อย่างรวดเร็วในอัตราประมาณ 4000 อนุภาคต่อวินาที ทำให้วัดขนาดอนุภาคและหาการกระจายของขนาดเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว อีกทั้งยังสามารถเปลี่ยนจาก volume distribution ไปเป็น weight distribution ได้ด้วย (จักรพันธ์, 2551)

Light Scattering

เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่นำมาใช้ในการหาขนาดและการกระจายของขนาด คำว่า scattering ใช้ได้เช่นเดียวกันกับคำว่า diffraction เป็นเทคนิคที่ใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง เครื่องมือที่ใช้มีหลักการโดยปล่อยให้ลำแสงเลเซอร์ไปกระทบกับอนุภาคที่จะใช้วัดและทำให้มีการหักเหไปของ

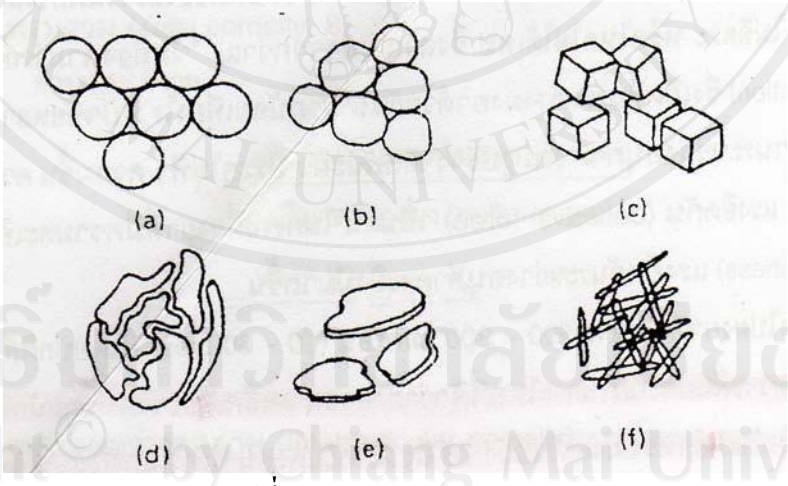
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

แสงเลเซอร์ โดยอาจจะเป็น static light scattering หรือ dynamic light scattering ทั้งนี้มุมการหักเหจะเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของอนุภาค ใช้วัดขนาดได้ในช่วงที่กว้าง (จักรพันธ์, 2551)

2.2.3 การจัดเรียงตัวของผง (Packing)

การจัดเรียงตัวของอนุภาคผงทำให้เกิดช่องว่างหรือความพรุนในกองผงที่ต่างกัน โดยปัจจัยที่มีผลต่อการจัดเรียงตัวของอนุภาคผงมีดังนี้

รูปร่างของอนุภาค - รูปร่างของอนุภาคผงที่มีลักษณะแตกต่างกัน จะส่งผลต่อสมบัติการไหลและการจัดเรียงตัวของอนุภาค โดยอนุภาคผงที่มีรูปร่างทรงกลมและมีผิวเรียบจะมีสมบัติการไหลที่ดี การจัดเรียงตัวของอนุภาคจะทำให้มีช่องว่างหรือความพรุนอยู่ระหว่าง 26-48% ส่วนอนุภาคที่มีรูปร่างไม่แน่นอนโดยเฉพาะมีส่วนที่ยื่นระเกะระกะ (dendritic) จะทำให้เกิดการยึดหรือเชื่อมต่อกัน (locking, bridging) สภาพผิวที่ขรุขระอาจเป็นประโยชน์ในการยึดเกาะกับอนุภาคขนาดเล็กได้หรือทำให้เม็ดที่ได้มีความแข็งมากขึ้นเนื่องจากมีบริเวณที่จะยึดเชื่อมกันได้มาก จากรูปที่ 2.4 a และ b รูปร่างผงมีลักษณะกลมจะไหลได้ดีกว่าผงที่มีลักษณะเหลี่ยมในรูป c และผงที่มีลักษณะเป็นแผ่นหรือเป็นเกล็ดในรูป d และ e การไหลที่ไม่ดีเกิดจากการเกาะกันของผงที่มีรูปร่างที่สามารถยึดเกาะกันได้ หรือมีลักษณะเป็นเส้นใยดังรูป f (จักรพันธ์, 2551)



รูปที่ 2.4 รูปร่างของอนุภาคผง
ที่มา : จักรพันธ์ (2551)

ขนาดและการกระจายขนาดอนุภาค – อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ใกล้เคียงกัน จะเกิดช่องว่างมากกว่าอนุภาคขนาดเล็กเมื่อมาเรียงตัวกัน ดังนั้นถ้ามีอนุภาคขนาดเล็กผสมอยู่และมีขนาดเล็กพอก็สามารถแทรกเข้าไปอยู่ในช่องว่างนั้นได้ การที่ผงละเอียดเข้าไปแทรกอยู่ในช่องว่างที่อยู่ระหว่างผง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ขนาดใหญ่จะทำให้เกิดการเรียงตัวกันแน่นขึ้นและยังส่งผลให้การไหลเป็นไปได้ยากขึ้น นอกจากนั้นการที่มีอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากอาจเกิดประจุไฟฟ้า (electrostatic forces) ทำให้เกิดการเกาะกันระหว่างอนุภาคหรือเกาะกับภาชนะ ทำให้น้ำหนักของเม็ดที่ได้มีความแปรปรวน(จักรพันธ์, 2538)

ความชื้น – การที่ผงมีปริมาณความชื้นมากเกินไปอาจก่อให้เกิดความแปรปรวนของขนาดเม็ดหรือน้ำหนักเม็ดที่ได้ และในบริเวณที่ตอกอัดเม็ดถ้ามีความชื้นสูงเกินไปอาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดการไหลของผงไม่สม่ำเสมอ อนุภาคของผงจะดูดความชื้นไว้ที่ผิว เมื่ออนุภาคเข้ามาใกล้กันจะเกิดการเชื่อมกันของชั้นของเหลวที่เรียกว่า liquid bridge ซึ่งจะดึงหรือยึดอนุภาคเข้าด้วยกัน จึงต้องแก้ไขโดยต้องปรับความชื้นภายในห้องตอกอัดเม็ดเพื่อให้มีความชื้นที่เหมาะสม

<u>การวิเคราะห์พารามิเตอร์การจัดเรียงอนุภาค (Packing Parameter)</u>

- *ปริมาตรกองผง (Bulk volume)*

เมื่อเทผงลงในกระบอกตวงโดยให้ผงตกลงไปอย่างอิสระ และอ่านปริมาตรของผงที่ได้จะเป็นปริมาตรกองผง แต่การที่อ่านโดยตรงจะยังไม่เป็นที่น่าเชื่อถือกันนักเพราะการเทของแต่ละคนอาจจะต่างกันออกไปได้ โดยทั่วไปจึงมีการเคาะก่อน 3 ครั้ง โดยในแต่ละครั้งให้ห่างกัน 2 วินาที และเคาะสูง 1 นิ้วจากพื้นโต๊ะที่แข็งแล้วจึงอ่านค่าปริมาตร ซึ่งจะทำให้ได้ค่าที่แม่นยำและคงที่มากขึ้น ปริมาตรที่ได้เป็นปริมาตรรวมของผงและช่องว่าง ถ้าเป็นอนุภาคที่ไม่มีรูพรุน ช่องว่างจะเป็นช่องว่างระหว่างอนุภาค แต่ถ้าเป็นอนุภาคที่มีรูพรุน ซึ่งมีรูเปิดภายในอนุภาคขนาดเล็ก ช่องว่างจะรวมถึงช่องว่างระหว่างอนุภาคและช่องว่างภายในอนุภาค (จักรพันธ์, 2551)

- *ความหนาแน่นของกองผง (Bulk density)* เป็นความหนาแน่นที่ได้จากมวลของผงหารด้วยปริมาตรกองผง และส่วนกลับของค่านี้ก็คือปริมาตรกองผงจำเพาะ (specific bulk volume) (จักรพันธ์, 2551) ผงที่มีค่า bulk density ต่ำ จะฟูมากกว่าผงที่มีค่า bulk density สูง อาจเป็นปัญหาเวลาปรับน้ำหนักขณะตอกเม็ด (ทัดทรง, 2534)

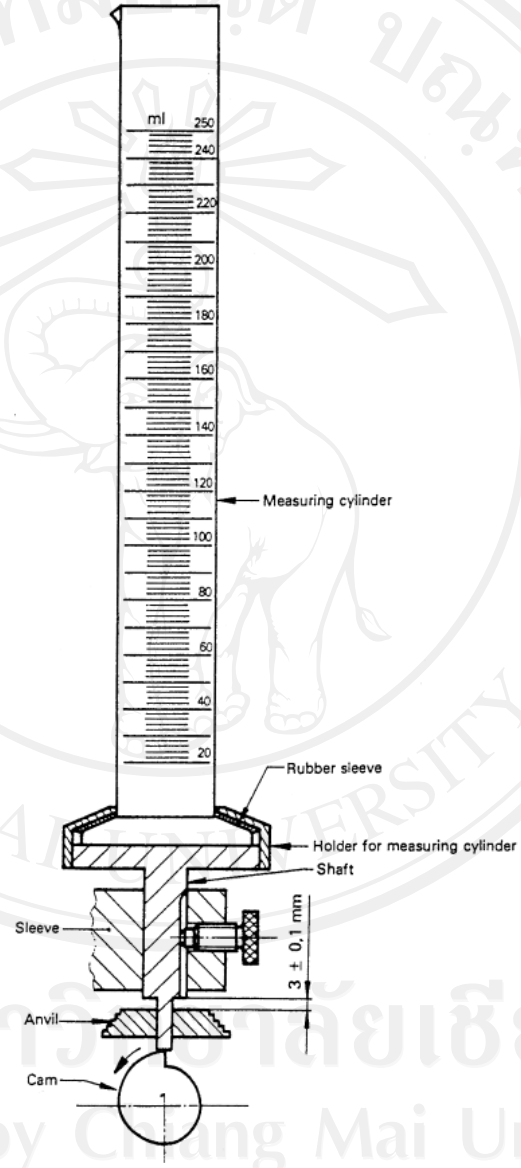
- *ปริมาตรจากการเคาะจนปริมาตรคงที่ (Tapped volume)*

หลังจากทำการหาปริมาตรกองผงและนำมาเคาะต่อจนทำให้ได้ปริมาตรคงที่ ปริมาตรที่ได้จะเป็น tapped volume โดยทั่วไปพบว่าจะต้องเคาะผงตัวอย่างตั้งแต่ 200 ครั้งขึ้นไปจึงจะได้ปริมาตรที่คงที่ แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสมบัติของผงแต่ละชนิด ในการเคาะสามารถใช้อุปกรณ์หรือเครื่องมือที่ช่วยในการเคาะได้ เรียกว่า Jolting volumeter (จักรพันธ์, 2551) หรือ Tapped density volumeter เครื่องเคาะผงประกอบด้วยกระบอกตวงและเครื่องเคาะ ดังรูปที่ 2.5 หลังจากที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอนของผงในกระบอกตวงแล้ว มอเตอร์ที่กำลัง 60 วัตต์จะทำงานโดยเขย่าเครื่องขึ้นลงด้วยอัตราเร็ว 250 รอบต่อนาที (Abdullah and Geldart, 1999)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

- ความหนาแน่นของผงที่เคาะจนปริมาตรคงที่ (Tapped density)

เป็นความหนาแน่นที่ได้จากมวลของผงหารด้วยปริมาตรกองผง ที่เคาะจนปริมาตรคงที่ (จักรพันธ์, 2551)



รูปที่ 2.5 เครื่องเขย่าเพื่อหาปริมาตรอัดแน่นของผง (Jolting volumeter / Tapped density volumeter)
ที่มา : Abdullah and Geldart (1999)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.2.4 สมบัติการไหลของผง

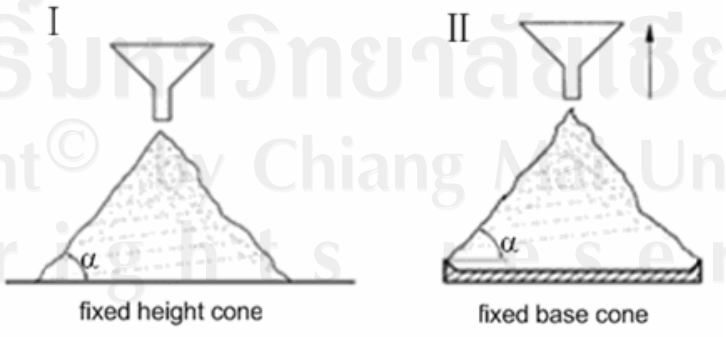
สมบัติการไหลเป็นสมบัติสำคัญในกระบวนการตอกอัดเม็ดของอาหารผง โดยผงจำต้องมีความสามารถในการไหลลงในเบ้าสำหรับตอกอัดได้ดี วิธีการหาสมบัติการไหลของผงนั้นมีวิธีการหลายวิธีที่จะใช้วัดถึงความสามารถในการไหลของอาหารผง เช่น

มุมของการไหล (Angle of repose)

ความสามารถในการไหลของอาหารผง วัดได้โดยการวัดค่ามุมกอง มุมกอง (Angle of repose) หมายถึง มุมกองระหว่างพื้นราบ และพื้นเอียงของกองวัสดุที่ถูกทำให้ไหลลงมาจากอุปกรณ์ที่จัดให้อยู่สูงเหนือพื้นราบ (Terzaghi and Peck, 1948) วัดโดยใช้อุปกรณ์อย่างง่ายในการทำให้เกิดการไหลของวัสดุจากจุดที่อยู่เหนือพื้นราบจนกระทั่งมุมที่เกิดขึ้นคงที่ แล้วจึงวัดมุมกองของวัสดุแห้ง ค่ามุมกองของวัสดุแห้งที่มีค่าต่ำจะมีความสามารถในการไหลได้มากกว่าวัสดุแห้งที่มีค่ามุมกองที่สูง (Bodhmage, 2006) มุมกองเป็นดัชนีชี้วัดความสามารถในการไหลของผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นผง การวัดค่ามุมกองของผงวัดได้ 2 แบบ คือ การวัดค่ามุมกองแบบสถิตย์ และการวัดค่ามุมกองแบบพลศาสตร์

การวัดค่ามุมกองแบบสถิตย์ (static angle of repose)

การวัดค่ามุมกองแบบสถิตย์ ทำโดยเทอาหารผงลงผ่านกรวยที่ทราบความสูงจากพื้น (ดังรูปที่ 2.6 I) หรือบรรจุอาหารผงลงในกรวยจากนั้นค่อยๆยกกรวยขึ้นเพื่อให้อาหารผงไหลลงมา แล้ววัดมุม α ซึ่งเป็นค่ามุมกองของผง (ดังรูปที่ 2.6 II) ซึ่งอาหารผงที่ใช้วิธีการทั้งสองวิ ธีนี้ต้องสามารถไหลผ่านกรวยขนาดเล็กได้ และ อาหารผงที่มีการเกาะตัวกันนั้นไม่ควรใช้วิธีการนี้ ในการวัดค่ามุมกอง (Geldart, 2006)



รูปที่ 2.6 การวัดค่ามุมกองของอาหารผงแบบสถิตย์

ที่มา: Geldart (2006)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ผงจะมีความสามารถในการไหลได้ดีมากหรือไหลได้อย่างอิสระ (free flowing) เมื่อค่ามุมกองแบบสถิตมีค่าต่ำกว่า 30 องศา ความสามารถในการไหลอยู่ในระดับดี แต่มีการเกาะตัวกันระหว่างอนุภาคเล็กน้อย เมื่อค่ามุมกองอยู่ในช่วง 30-45 องศา สำหรับค่ามุมกองที่อยู่ในช่วง 45-55 องศา แสดงว่ามีการเกาะตัวกันระหว่างอนุภาคมาก และค่ามุมกองมากกว่า 55 องศา แสดงว่ามีความเกาะตัวกันระหว่างอนุภาคสูงมากและมีความสามารถในการไหลจำกัด (Carr, 1965; Carr, 1970; Raymus, 1985) สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมกองและสมบัติการไหลของอาหารผงนั้น Xinde *et al*. (2007) ได้แสดงสมบัติการไหลของผงโดยการวัดค่ามุมกองแบบสถิตย์ดังตาราง 2.9

ตารางที่ 2.9 สมบัติการไหลของอาหารผงจากการวัดค่ามุมกองแบบสถิตย์

Flowability	**α ($^{\circ}$)**
non flowing	> 60
cohesive	> 60
fairly free-flowing	45-60
free-flowing	30-45
excellent flowing	10-30
aerated	< 10

ที่มา : Xinde *et al.* (2007)

แต่สำหรับการประเมินสมบัติการไหลของผงที่จะนำไปใช้ในกระบวนการอัดเม็ดนั้นแสดงดังตารางที่ 2.10 ซึ่งสมบัติการไหลของผงมีผลต่อความสามารถในการไหลของผงลงสู่เบ้าตอกอัด ผงที่มีค่ามุมกองมากกว่า 40 องศาจะมีความสามารถในการไหลลงสู่เบ้าตอกได้ต่ำซึ่งจะมีผลทำให้น้ำหนักของผลิตภัณฑ์อัดเม็ดที่ได้ไม่สม่ำเสมอ

ตารางที่ 2.10 การจัดประเภทความสามารถในการไหลของผงที่นำไปใช้ในกระบวนการอัดเม็ด

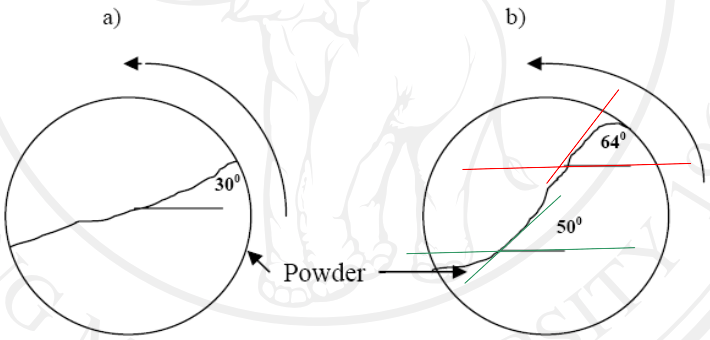
สมบัติการไหล	**มุมการไหล ($^{\circ}$)**
ไม่ดี (very poor)	> 40
พอใช้ได้ (passable)	30-40
ดี (good)	25-30
ดีมาก (excellent)	< 25

ที่มา : จักรพันธ์ (2551)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

การวัดมุมกองแบบพลศาสตร์ (dynamic angle of repose)

การวัดมุมกองแบบพลศาสตร์ ทำโดยบรรจุตัวอย่างอาหารผงเข้าไปในกระบอกตวงที่มีการหมุน (rotating drum) และสังเกตก้อนที่กลิ้งไปตามพื้นผิวของกองอาหารผง เมื่อเพิ่มอัตราการหมุน จะพบว่า ก้อนที่กลิ้งจะหยุดหรือน้อยลง และขาดออกจากพื้นผิวอย่างต่อเนื่อง โดยมุมกองพลศาสตร์ (dynamic angle of repose) คือมุมที่เกิดขึ้นโดยพื้นผิวที่ลาดเอียงของกองอาหารผงกับแนวราบเมื่อทำการหมุนในกระบอกตวง และเมื่อเพิ่มอัตราการหมุนให้เร็วมากขึ้น จะทำให้เกิดการเสียรูปของพื้นผิวแบนราบไปเป็นรูปร่างตัว S (S shape) การวิเคราะห์ค่ามุมกองทำโดยการ ประเมินค่าเส้นตรง 2 เส้นที่มีความชันแตกต่างกัน โดยเส้นตรงที่มีความชันมากกว่าจะเป็นค่ามุมกองแบบ พลศาสตร์ (Bodhmage, 2006) แสดงดังรูปที่ 2.7 จากรูปจะเห็นว่าเส้นขอบเขตล่างทำให้ได้มุม 50 องศา และเส้นขอบเขตบนซึ่งมีค่าความชันมากกว่า ทำให้ได้มุม 64 องศา ดังนั้นค่ามุมกองแบบพลศาสตร์ของผงจึงมีค่าเท่ากับ 64 องศา



รูปที่ 2.7 การวัด Dynamic angle of repose (a คือผิวลาดเอียงเริ่มต้น, b คือผิวลาดเอียงสูงสุด)
ที่มา : Bodhmage (2006)

ได้มีหลายงานวิจัยที่ศึกษาสมบัติการไหลของอาหารผง โดยการวัดมุมกอง เช่น Shittu and Lawal (2007) ได้ศึกษาการวัดมุมกองของตัวอย่างเครื่องดื่มโกโก้ผงที่ผลิตในประเทศไนจีเรีย ปริมาณ 200 ml ในกระบอกตวง โดยนำกระบอกตวงไปแขวนบนชุดขาตั้งให้ปาก ของกระบอกตวงสูงจากพื้นผิวราบประมาณ 20 cm จากนั้นปล่อยให้ผงไหลอย่างอิสระภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งได้กองโกโก้ผงบนพื้นผิวราบตามขวาง พบว่าค่ามุมกองแบบสถิตย์อยู่ในช่วง 25.0 ถึง 37.7 องศา เมื่อความชื้นและปริมาณน้ำตาลในเครื่องดื่มโกโก้ผง เท่ากับ 0.8-3.6% และ 52.4-90.5% ตามลำดับ แสดงว่าเครื่องดื่มโกโก้ผงมีความสามารถในการไหลที่ดี นอกจากนี้ Antoine *et al.* (2003) พบว่า ค่ามุมกองของผงถั่วเหลือง มีค่าเท่ากับ 38.33 ± 1.106 องศา

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการไหล ของผงได้แก่ ความชื้น หากความชื้น ของผงเกิดการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยก็สามารถเพิ่มค่ามุมกองได้มากกว่า 100% (Zou and Brusewitz, 2002) นอกจากนี้ ยังขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาค และองค์ประกอบของพื้นผิวของผง โดยเฉพาะอย่างยิ่งผงที่มีไขมันที่ผิวของอนุภาค สูง จะมีผลเชิงลบต่อความสามารถในการไหลของผง ตัวอย่างเช่น นมผงพร่องมันเนย (skim milk powder) มีการไหลได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับ นมผงธรรมดา (whole milk powder) ผงครีมนม (cream powder) และ ผงโปรตีนเวย์เข้มข้น (whey protein concentrate) เนื่องจากพื้นผิวของนมผงพร่องมันเนยประกอบด้วยน้ำตาลแลกโทส และโปรตีน ซึ่งมีจำนวนของไขมันอยู่เล็กน้อย ขณะที่พื้นผิวของอนุภาคของนมผงธรรมดา ผงครีมนม และ ผงโปรตีนเวย์เข้มข้น มีไขมันอยู่สูงกว่า จึงทำให้ความสามารถของการไหล (Kim *et al*., 2005) นอกจากนั้นปริมาณไขมันยังมีผลอย่างมากต่อการเกาะตัวกันของนมผง โดยนมผงที่มีปริมาณไขมันที่ผิวของอนุภาคมากกว่าก็จะส่งผลให้มีการเกาะตัวกันมากกว่าทำให้ความสามารถในการไหลของผลิตภัณฑ์นมผงมีค่าลดลง (Fitzpatrick *et al*., 2007)

Compressibility ratio

ค่า compressibility ratio หรือเรียกเป็น compressibility values เป็นดัชนีอีกอย่างหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในการประเมินถึงสมบัติในการไหลของผงได้ โดยสามารถคำนวณได้จากค่า tapped density และ bulk density ดังสมการ

$$\text{Compressibility ratio} = \frac{\text{Tapped density} - \text{Bulk density}}{\text{Tapped density}}$$

ค่า compressibility ratio จะสัมพันธ์โดยทางอ้อมกับอัตราการไหลสัมพัทธ์ การยึดเกาะติดกัน และขนาดอนุภาคของผง โดยทั่วไปผงที่มีการถูกตอกอัดได้ (compressible material) จะไหลได้น้อยกว่า (less flowable) และพบว่าผงที่มีค่า compressibility ratio มากกว่า 20-21% จะแสดงถึงสมบัติการไหลที่ไม่ดี อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปมักมีการประเมินสมบัติการไหลของผงจากค่าที่แสดงในดังตารางที่ 2.11

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ 2.11 สมบัติการไหลของผงจากค่า compressibility ratio

% Compressibility ratio	สมบัติการไหล
5 – 12	ดีมาก (excellent)
12 – 16	ดี (good)
16 – 21	ปานกลาง (fair)
21 – 35	ไม่ดี (poor)
มากกว่า 35	แย่มาก (very poor)

ที่มา : จักรพันธ์ (2551)

Hauser ratio

ค่า Hauser ratio (HR) หรือ Hausner-Factor (HF) คือผลของ tapped density / bulk density ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการประเมินสมบัติการไหลของผงได้เช่นกัน (จักรพันธ์, 2551) สำหรับการประเมินความสามารถในการไหลของอาหารผงจากค่า HR ของ Xinde *et al*. (2007) ได้แสดงดังตาราง 2.12

ตารางที่ 2.12 สมบัติการไหลของผงจากค่า Hauser ratio (HR)

Flowability	α
non flowing	> 1.4
cohesive	> 1.4
fairly free-flowing	1.25-1.4
free-flowing	1-1.25
excellent flowing	1-1.25
aerated	1-1.25

ที่มา : Xinde *et al.* (2007)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.2.5 Water activity (a_w)

ค่า a_w เป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมและป้องกันการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์อาหาร จึงมีผลโดยตรงต่ออายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์อาหาร ค่า a_w คือ อัตราส่วนของความดันไอของน้ำในระบบกับความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิเดียวกัน หรือความชื้นสัมพัทธ์สมดุลอากาศแวดล้อมของระบบ ณ อุณหภูมิเดียวกัน (Rahman, 1995) ดังสมการ

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

เมื่อ P = ความดันไอของน้ำในตัวอย่างอาหาร

P_o = ความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิสมดุลของระบบ

a_w = ค่า critical water activity

ERH = ค่าความชื้นสัมพัทธ์ (%) ณ จุดสมมูล

น้ำในอาหารทำให้เกิดความดันไอ ซึ่งความดันไอที่เกิดขึ้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ

1. ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในอาหาร
2. อุณหภูมิ
3. ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ละลายอยู่ในน้ำ เช่น เกลือและน้ำตาล

อาหารที่มีความชื้นสูงหรือมีปริมาณน้ำมากกว่าส่วนที่เป็นของแข็ง จะมีค่า a_w เท่ากับ 1.0 และเมื่ออาหารมีความชื้นต่ำลงหรือมีปริมาณน้ำน้อยกว่าส่วนที่เป็นของแข็ง a_w จะลดลงต่ำกว่า 1.0 (นิธิยา, 2549) อาหารส่วนมากมีค่า a_w ในช่วง 0.6-0.7 (Stencl, 2004) กิจกรรมของจุลินทรีย์ส่วนใหญ่จะถูกยับยั้งที่ a_w ต่ำกว่า 0.6 รา ส่วนใหญ่ถูกยับยั้งการเจริญที่ 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)

การลดค่า a_w ของอาหารมี 2 วิธี คือ การทำแห้งอาหาร และการเติมตัวถูกละลาย เช่น เกลือ น้ำตาล หรือสารที่มีสมบัติดูดความชื้นบางชนิด ซึ่งค่า a_w ของอาหาร เป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมการเจริญของจุลินทรีย์ในอาหาร ค่า a_w ต่ำสุดที่จุลินทรีย์แต่ละชนิดต้องการในการเจริญเติบโตมีค่าแตกต่างกัน โดยต้องปรับค่า a_w ของอาหารให้มีค่าต่ำกว่า a_w ต่ำสุดที่จุลินทรีย์สำคัญที่ทำให้อาหารเน่าเสียต้องการเพื่อการเจริญเติบโต จึงจะสามารถยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์อาหารออกไปได้ (สุมณฑา, 2549)

ผลิตภัณฑ์อาหารแห้งที่มีความชื้นปานกลาง จะมีค่า a_w ระหว่าง 0.85-0.6 ความชื้นประมาณร้อยละ 15-50 ส่วนมากสภาวะนี้สามารถยับยั้งแบคทีเรียแกรมลบและแกรมบวกหลายชนิด รวมทั้งยีสต์และรา สำหรับอาหารแห้งที่มีค่า a_w ต่ำกว่า 0.6 ไม่เหมาะสมต่อการเจริญของเชื้อแบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรคอาหารเป็นพิษ ยกเว้น *Staphylococcus aureus* แม้ว่าเชื้อนี้จะเจริญได้บ้าง แต่ไม่สามารถสร้างสารพิษที่เป็นตัวการทำให้เกิดโรคได้ ค่า a_w ของอาหารจะไม่คงที่ เนื่องจากในบรรยากาศมีการเปลี่ยนแปลงสมดุลของความชื้นอยู่ตลอดเวลา ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ในบรรยากาศ ดังนั้นการเก็บรักษาอาหารในบรรจุภัณฑ์ที่ช่วยป้องกันการถ่ายเทความชื้นได้ จะทำให้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สามารถเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารประเภทนี้ที่อุณหภูมิห้องได้นานพอควร การเสื่อมคุณภาพของอาหารแห้งมักสืบเนื่องมาจากการเก็บรักษาไม่ถูกต้อง เช่น เก็บรักษาในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง บรรจุภัณฑ์รั่วซึม ปิดผนึกไม่ดีพอ เป็นต้น (สุมณฑา, 2549)

2.2.6 ความชื้น (moisture)

ปริมาณความชื้นมีส่วนสำคัญกับอาหารผงซึ่งการเกาะติดของอนุภาคอาหารผงจะเพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาคอาหารผงมีความชื้นมากขึ้น อันเนื่องมาจากของเหลวระหว่างอนุภาคหรือฟิล์มที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคส่งผลให้เกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาค อย่างไรก็ตามของเหลวและฟิล์มที่ผิวของอาหารผงอาจเป็นสาเหตุให้อาหารผงมีความสามารถในการไหลที่จำกัดอีกด้วย โด ย ของเหลวระหว่างอนุภาคอาหารผงจะหมายถึงน้ำอิสระ (free moisture) (Barbosa-Canovas *et al*., 2005) ปริมาณความชื้นจะมีผลต่อค่า a_w ของผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างเช่น พาสตาที่มีปริมาณความชื้นประมาณร้อยละ 10-12 ค่า a_w จะอยู่ในช่วง 0.6-0.5 ไข่ผงซึ่งมีปริมาณความชื้นร้อยละ 5 จะมี a_w อยู่ในช่วง 0.5-0.4 คุกกี้ ขนมปัง และขนมปังกรอบมีปริมาณความชื้นร้อยละ 3-5 จะมี a_w อยู่ในช่วง 0.4-0.3 และ นมผงที่มีปริมาณความชื้นร้อยละ 2-3 จะมี a_w อยู่ในช่วง 0.3-0.2 เป็นต้น (Fennema, 2008) หากผลิตภัณฑ์มีความชื้นภายในอาหารผงต่ำก็จะส่งผลดีต่อคุณภาพของอาหารผงเนื่องจากปลอดภัยจาก การเจริญของ จุลินทรีย์ระหว่างการเก็บรักษา อีกทั้งยังช่วยให้อาหารผงไม่เกาะตัวรวมกัน (Barbosa-Canovas *et al*., 2005)

2.3 การตอกอัดเม็ด (Tablet compression)

การอัดผงเป็นกระบวนการหนึ่งที่อุตสาหกรรมในหลายสาขาได้ให้ความสนใจ จุดประสงค์ในการอัดผงนั้น คือการอัดสารที่อยู่ในรูปผงให้อยู่ในรูปแบบที่ต้องการ การตอกอัดให้เป็นรูปร่างที่ต้องการนั้นจะต้องอาศัยการยึดเกาะกันที่เพียงพอที่จะทำให้คงสภาพเช่นนั้นอยู่ได้ รูปแบบเม็ดที่ได้ต้องมีความแข็งที่พอเหมาะในการที่จะทนต่อแรงภายนอกในระหว่างการบรรจุหรือขนส่ง หรือให้มีความสึกกร่อนน้อย แต่ในขณะเดียวกันจะต้องมีสมบัติการแตกตัวกลับคืนไปสู่ในรูปผงขนาดเล็กได้ง่ายและรวดเร็ว การตอกอัดผงให้เป็นเม็ดนั้นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของผงที่จะนำมาตอก และการมีสารช่วยชนิดอื่นร่วมด้วย เช่น สารช่วยเพิ่มปริมาณ สารช่วยในการแตกตัว สารช่วยในการไหล สารหล่อลื่น สารยึดเกาะ (จักรพันธ์, 2538) การตอกอัดเกิดขึ้นภายในเครื่องตอกอัดเม็ด ที่ประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก ได้แก่ สากบน (Upper punch) สากล่าง (Lower punch) และเบ้า (Die) และส่วนที่ก่อให้เกิดแรงอัดส่งผ่านไปยังตัวสากและเกิดการอัด

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

กระบวนการตอกอัดเม็ด สามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

1. การบรรจุผงลงเบ้า (Die filling) เป็นการนำส่งผงจากถังเก็บ (Hopper) ลงสู่เบ้าโดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก ปริมาตรของผงที่บรรจุลงสู่เบ้าจะส่งผลต่อน้ำหนักเม็ดยา ซึ่งสามารถปรับได้จากระยะสากล่าง

2. การตอกอัดเม็ด (Tablet formation) สากบนจะเคลื่อนที่ลงผ่านรูของเบ้า และกดลงบนผง ระหว่างสากบนกดลงบนผง สากล่างอาจอยู่กับที่หรือดันขึ้นด้วยก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดเครื่องตอกอัด แรงอัดจะมีค่าสูงสุดเมื่อสากบนกดลงถึงตำแหน่งต่ำสุด จากนั้นสากบนจะเคลื่อนที่ขึ้นและถอยออกจากเบ้า การปรับความแข็งของเม็ดยาสามารถทำได้โดยการปรับระยะการเคลื่อนที่ของสากบนลงมาในเบ้า

3. การดันเม็ดยาออกจากเบ้า (Tablet ejection) สากล่างจะเคลื่อนที่ขึ้นจนขอบบนของสากล่างอยู่ในระดับเสมอกับผิวหน้าของเบ้า เม็ดยาจะถูกปัดออกจากเบ้าโดยอุปกรณ์ที่ดันเม็ดออกจากเบ้า (ทรงวุฒิ, 2551)

2.3.1 เครื่องตอกอัดเม็ด

เครื่องตอกอัดเม็ดโดยทั่วไป มี 3 รูปแบบ ได้แก่ เครื่องตอกอัดเม็ดชนิดสากเดี่ยว เครื่องตอกอัดเม็ดชนิดหมุนรอบ และเครื่องตอกแบบ Simulator (Compaction simulator)

เครื่องตอกอัดเม็ดชนิดสากเดี่ยว (Single punch press หรือ Eccentric press)

เครื่องตอกอัดเม็ดชนิดสากเดี่ยวประกอบด้วยสากและเบ้าเพียงหนึ่งชุด ผงจะถูกบรรจุไว้ในถังเก็บผงที่จะเชื่อมต่อกับ Feed shoe (Hopper shoe) ที่วางอยู่บนแท่นวางเบ้า (Die table) Feed shoe จะสามารถเคลื่อนที่เข้าออกจากเบ้าได้ เมื่อ Feed shoe เคลื่อนที่อยู่เหนือเบ้า ผงจะถูกป้อนเข้าไปในเบ้า และเมื่อ Feed shoe เคลื่อนที่ออกจากเบ้า สากบนจะกดลงบนผงและเกิดการตอกอัด เมื่อ Feed shoe เคลื่อนที่เข้าหาเบ้าอีกครั้ง เม็ดซึ่งถูกดันขึ้นจากสากล่างจะถูกผลักออกไป และเข้าสู่ขั้นตอนการบรรจุผงลงเบ้าอีกครั้ง องค์ประกอบของเครื่องตอกอัดเม็ดชนิดสากเดี่ยวมีกำลังการผลิตต่ำประมาณ 200 เม็ดต่อนาที เหมาะสำหรับงานวิจัยและพัฒนา และการผลิตในขนาดเล็ก (ทรงวุฒิ, 2551)

เครื่องตอกอัดเม็ดชนิดหมุนรอบ (Rotary press)

เครื่องตอกอัดเม็ดชนิดหมุนรอบเป็นเครื่องตอกอัดเม็ดที่ประกอบด้วยสากและเบ้าจำนวนหลายชุด ทำให้มีกำลังการผลิตสูง โดยสามารถผลิตได้ถึง 10,000 เม็ดต่อนาที เบ้าแต่ละชุดจะถูกยึดไว้บนแท่นวางเบ้าที่มีลักษณะเป็นวงกลม ระหว่างการผลิต สากและเบ้าแต่ละชุดจะหมุนไปพร้อม

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

กัน การเคลื่อนที่ขึ้นลงของสากบนและสากล่างจะถูกควบคุมโดยความสูงต่ำของทางที่สากเคลื่อนที่ผ่าน ซึ่งสามารถใช้ปรับน้ำหนักของเม็ดและแรงตอกอัดได้ (ทรงวุฒิ, 2551)

เครื่องตอกแบบ Simulator (Compaction simulator)

เครื่องตอกอัดเม็ดแบบนี้ได้มีการพัฒนาขึ้นมา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยในการตอกอัด ซึ่งมีข้อดีคือ ใช้ผงปริมาณน้อยในการศึกษา ไม่เหมือนกับการศึกษาวิจัยที่ใช้เครื่องตอกแบบ rotary ซึ่งต้องใช้ผงในปริมาณมาก เครื่อง compaction simulator นับว่ามีความเหมาะสมมากสำหรับขั้นตอนการพัฒนาผลิตภัณฑ์ ซึ่งผงที่นำมาศึกษาอาจมีปริมาณน้อยหรือหายาก ในการทดลองหรือศึกษาวิจัย จะได้ข้อมูลที่นำไปใช้ได้สำหรับเครื่องตอกอัดเม็ดเครื่องอื่นๆ ที่มีหลักการแบบเดียวกัน เพื่อความเหมาะสมกับการศึกษาวิจัยที่มีผลิตภัณฑ์ผงในปริมาณที่จำกัด จึงได้มีการพัฒนาเครื่องมือที่เลียนแบบเครื่องตอกอัดเม็ดที่มีโครงสร้างหลักเหมือนเครื่องตอกอัดแบบสากเดี่ยว แต่สากบนและสากล่างจะเคลื่อนตัวได้อย่างอิสระ ไม่ขึ้นต่อกัน โดยอาศัยระบบไฮโดรลิค (Hydraulic press) และมีการเคลื่อนตัวเลียนแบบการทำงานของเครื่องตอกอัดชนิดต่างๆ ได้ด้วย แต่สามารถตอกอัดได้ทีละเม็ด ซึ่งทำให้มีการใช้สารในปริมาณน้อย ข้อได้เปรียบอีกประการหนึ่งสำหรับเครื่องมือแบบนี้ คือ ส่วนประกอบไม่มีการหมุน จึงทำให้สะดวกต่อการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับวัดค่าต่างๆ ที่ใช้ในการตอกอัด (จักรพันธ์, 2538)

2.3.2 ส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์อัดเม็ด

ผลิตภัณฑ์อัดเม็ดโดยทั่วไปจะประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดจะทำหน้าที่ต่างกัน ส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์อาหารอัดเม็ดเกือบทุกชนิดอาจจะมีส่วนประกอบหนึ่งชนิดหรือมากกว่าหนึ่งขึ้นไปดังนี้ (นงสุดา, 2545)

1. สารเพิ่มปริมาณ/สารเจือจาง (Diluents)

มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มปริมาณส่วนผสมในผลิตภัณฑ์ให้มากพอที่จะตอกตัวอย่างได้ขนาดตามต้องการ สารเพิ่มปริมาณที่ดีต้องมีความคงตัวดี และเป็นสารเฉื่อย

2. สารยึดเกาะ (Binder/adhesives)

สารยึดเกาะ คือสารที่ใช้ในรูปแบบสารละลายเพื่อทำให้ผงเปียกเกาะกันเป็นแกรนูล สารที่ใช้ทำแกรนูลส่วนใหญ่มีคุณสมบัติทำให้ติดกัน ได้แก่ สารละลายเจลาติน อะเคเซีย กลูโคสเหลว

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ซูโครสไซรัป รวมทั้งสารละลายในน้ำของอนุพันธ์เซลลูโลสเช่น คาร์บอกซีเมธิลเซลลูโลส เมธิลเซลลูโลส

3. สารหล่อลื่น (Lubricants)

จุดประสงค์การใช้สารหล่อลื่นเพื่อลดการเกาะติดกันของผงแกรนูลกับสากและเบ้าตอก ซึ่งจะทำให้ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์อัดเม็ดหยาบหรือเป็นรู และลดแรงดันที่จะผลักผลิตภัณฑ์ที่ถูกอัดเม็ดแล้วออกจากเบ้าตอก การทำแกรนูลที่ไม่ได้ใส่สารหล่อลื่นจะเกิดแรงเสียดทานมากที่ผนังของเบ้าตอกขณะผลักเม็ดออกมา แรงเสียดทานนี้อาจทำให้ยาเม็ดแตกหักและแยกส่วน และอาจทำให้เกิดความเสียหายอื่นๆ แก่เครื่องมือ ประโยชน์ของสารหล่อลื่นยังช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคของแกรนูลทำให้การไหลดี ตัวอย่างสารหล่อลื่น ได้แก่ แมกนีเซียมสเตียเรท ทาร์ก (Talc) แป้งข้าวโพด เป็นต้น

4. สารทำให้แตกตัว (Disintegrants)

เป็นสารที่เติมลงไปเพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์แตกตัวเป็นชิ้นเล็กๆ ละลายตัวได้รวดเร็วหลังจากบริโภค ถ้าปราศจากสารนี้ต้องใช้เวลานานกว่าที่ตัวผลิตภัณฑ์จะละลายได้เอง ลักษณะเฉพาะของสารช่วยแตกตัวคือดูดซับน้ำและพองตัวเมื่อเปียกน้ำ สารที่ใช้เป็นสารช่วยทำให้แตกตัวส่วนใหญ่คือ แป้งข้าวโพด นอกจากนี้มี เบนโทไนท์ คาร์บอกซีเมธิลเซลลูโลส กรดอัลจีนิกและวีกัม

5. ส่วนประกอบอื่นๆ

ส่วนประกอบอื่นนอกเหนือจากที่กล่าวมาเป็นส่วนที่ไม่มีความสำคัญในการผลิต แต่ช่วยเสริมให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะดีขึ้น ได้แก่ สารปรุงแต่งกลิ่น สี กลิ่นรส และสารดูดซับ (adsorbents) สารดูดซับใช้สำหรับของเหลวปริมาณเล็กน้อย เช่น ส่วนประกอบที่เป็นน้ำมัน ของเหลวสกัด (fluid extract) หรือสารละลายให้เข้ากับส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างสารดูดซับได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ชนิดเบา คาโอลิน และเบนโทไนท์ เป็นต้น

2.3.3 วิธีการตอกอัดเม็ด แบ่งได้เป็น 2 วิธี (ดังรูปที่ 2.8) คือ

1. วิธีตอกโดยตรง (Direct compression)

2. วิธีเตรียมเป็นแกรนูล (Indirect compression) มี 2 วิธีคือ

2.1 การเตรียมเป็นแกรนูลเปียก (Wet granulation)

2.2 การเตรียมเป็นแกรนูลแห้ง (Dry granulation)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

วิธีการตอกอัดโดยตรง (Direct compression) (จักรพันธ์, 2551)

วิธีนี้ไม่มีขั้นตอนของการเตรียมเป็นแกรนูลก่อนนำไปตอกอัด เหมาะสำหรับสารบางชนิดเท่านั้นที่สามารถไหลและยึดเกาะกันเองได้ภายใต้แรงตอกอัด รวมทั้งมีสมบัติหล่อลื่นในตัวเอง เดิมการตอกโดยตรงเป็นการเอาสารเดี่ยวในรูปผงมาตอกอัด เม็ดที่ได้เมื่อใส่ในน้ำจะเป็นการละลายออกมามากกว่าจะแตกเป็นชิ้นเล็กๆ โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์อัดเม็ดที่มีความแข็งมาก ปัจจุบันมีการพัฒนาการผลิตด้วยวิธีการตอกโดยตรงด้วยการนำสารช่วยชนิดอื่นๆ มาผสม เช่น สารช่วยเพิ่มปริมาณ สารช่วยแตกตัว และสารหล่อลื่น เป็นต้น

ผงที่จะตอกอัดได้โดยตรงจะต้องมีสมบัติดังนี้

1. อนุภาคผงต้องมีสมบัติในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบพลาสติกที่พอเพียงภายใต้แรงตอกอัด (Plastic deformation) เพื่อให้อนุภาคผงเกาะติดกันเป็นเม็ดได้ ถ้าอนุภาคผงมีสมบัติเป็นอิลาสติก (elastic) มาก จะตอกเป็นเม็ดไม่ได้ เนื่องจากผงสามารถคืนรูปสภาพเดิมหลังจากถอนแรงตอกอัด
2. มีสมบัติในการไหลที่ดี
3. มีค่า Bulk density ที่สูง
4. ผงผสมไม่แยกออกจากกันระหว่างการตอกอัด

ข้อดีในการอัดเม็ดโดยวิธีตอกโดยตรง

1. ประหยัดเวลาและพื้นที่ในการผลิตน้อย ค่าแรงงานไม่สูงเนื่องจากใช้คนน้อย การใช้เครื่องมือน้อยชิ้น เช่น เครื่องผสมและเครื่องตอก และการใช้พลังงานที่ไม่มาก
2. ไม่มีการใช้ความร้อนและความชื้นในกระบวนการผลิตจึงเหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่มีปัญหาเกี่ยวกับความคงตัวเมื่อถูกความร้อนหรือความชื้น
3. การที่มีขั้นตอนในการผลิตไม่มาก ทำให้ลดโอกาสการเกิดความผิดพลาดหรือลดความแปรปรวนในแต่ละครั้งที่ผลิตได้ เพราะตัวแปรในการผลิตมีน้อย
4. เมื่อแตกตัวจะได้อนุภาคขนาดเล็กเหมือนผงก่อนตอก เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีที่ต้องเตรียมเป็นแกรนูลก่อน เม็ดจะแตกตัวให้แกรนูล แล้วแกรนูลจึงจะแตกตัวอีกครั้งหนึ่ง
5. เม็ดที่ได้มีความคงตัวดี

ข้อจำกัดในการอัดเม็ดโดยวิธีตอกโดยตรง

1. มีปัญหาด้านฝุ่นผง เนื่องจากสารที่ถูกตอกอัดโดยตรงเป็นผง ขนาดเล็กและเบา ทำให้เกิดฝุ่นกระจายในระหว่างการตอก และอาจนำไปสู่การปนเปื้อนกับสารอื่นได้
2. ผงที่มีขนาดเล็ก จะพบปัญหาในด้านการไหลและการตอก

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3. เกิดการแยกผสมได้ง่ายหลังจากการผสมหรือขณะตอก ซึ่งมีสาเหตุจากการไม่ยึดกันระหว่างอนุภาคผงหรือเกิดไฟฟ้าสถิต

4. ถ้าไม่ควบคุมมาตรฐานของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตให้ดีพอ อาจทำให้ได้ผลิตภัณฑ์อัดเม็ดไม่เหมือนกันในแต่ละครั้งที่ผลิตได้

วิธีทำให้อยู่ในรูปแกรนูลก่อน (Indirect compression)

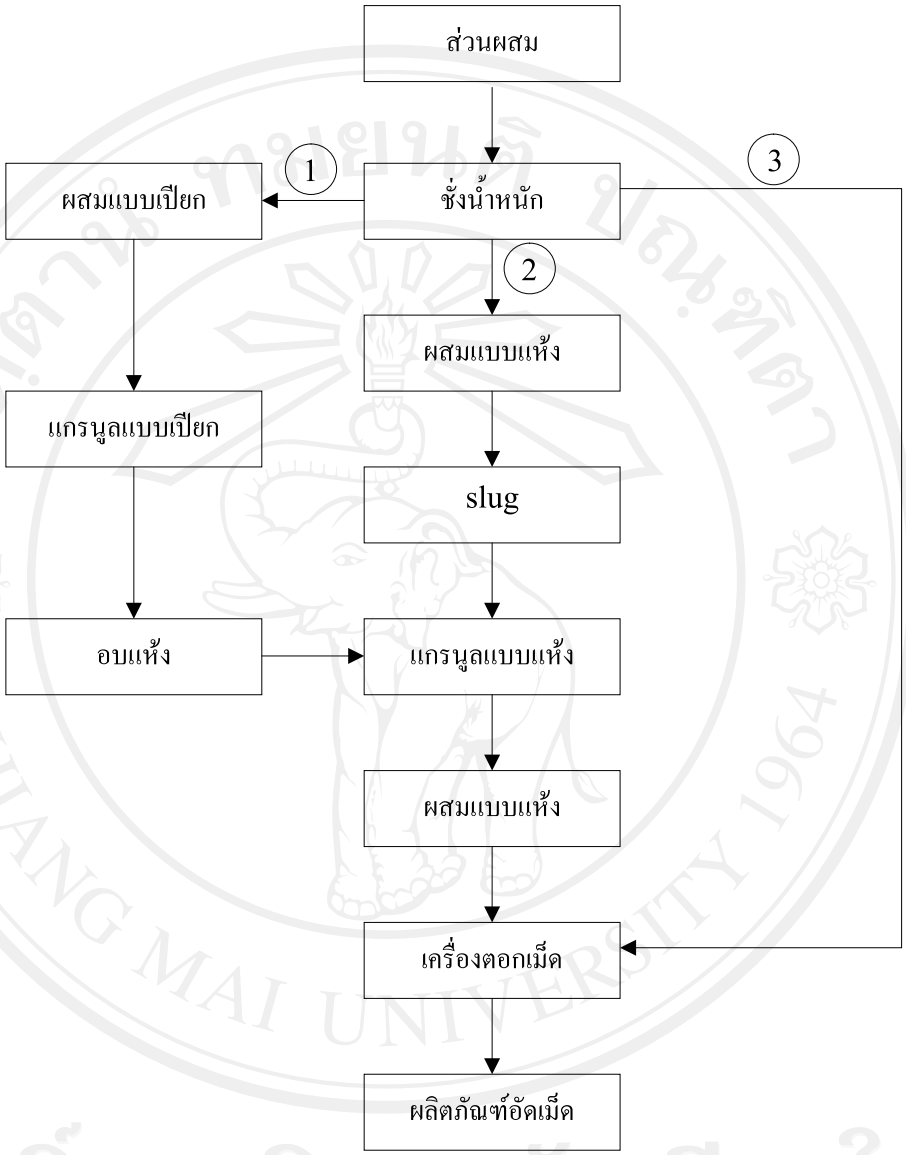
ผลิตภัณฑ์ผงบางชนิดมีสมบัติการไหลที่ไม่ดี และบางชนิดมีสมบัติยึดเกาะไม่ดีจึงจำเป็นต้องเตรียมให้อยู่ในรูปแกรนูลก่อนตอกอัด สามารถแบ่งการตอกอัด โดยการเตียมแกรนูลก่อนได้ 2 วิธี ได้แก่ วิธีแกรนูลแห้งและวิธีแกรนูลปียก

วิธีแกรนูลแห้ง เหมาะสำหรับผงที่อนุภาคยึดเกาะกันดี แต่ไหลไม่ดี ขั้นตอนการผลิต เริ่มจากการผสมองค์ประกอบที่เป็นผงแห้งเข้าด้วยกัน การตอกอัดให้เป็น slug การลดขนาด slug ให้เป็นแกรนูล การผสมองค์ประกอบที่เหลือ เช่น สารช่วยแตกตัว และสารช่วยลื่น และการตอกอัด

วิธีแกรนูลเปียก เหมาะสำหรับผงที่อนุภาคยึดเกาะกันได้ไม่ดี และมีการไหลที่ไม่ดีด้วย ขั้นตอนการผลิตประกอบด้วย การผสมองค์ประกอบที่เป็นของแข็งเข้าด้วยกัน การผสมเปียกโดยการเติมสารยึดกาะที่อยู่ในรูปสารละลาย การแร่งเปียก การทำให้แกรนูลแห้ง การลดขนาดแกรนูลแห้ง การผสมสารช่วยอื่นๆ และการตอก ในกระบวนการเตรียมแกรนูลนั้น ขนาดของแกรนูลที่เตรียมได้ก่อนตอก ส่งผลต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์อัดเม็ดอย่างมาก โดยหากแกรนูลมีขนาดเล็กและการกระจายตัวที่แคบ จะทำให้ได้เม็ดที่มีน้ำหนักสม่ำเสมอ มีความแข็งที่ดี มีความกร่อนน้อย แต่มักจะแตกตัวช้า ในขณะที่ความแข็งของแกรนูลจะส่งผลต่อความแข็งของเม็ดยาที่เตรียมได้ด้วย คือ หากแกรนูลมีความแข็งมาก จะทำให้เม็ดที่เตรียมได้มีความแข็งมาด้วย (ทรงวุฒิ, 2550)

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างวิธีการตอกอัดโดยตรงและวิธีแกรนูลเปียก (ตารางที่ 2.13) จะเห็นว่าวิธีการตอกอัดโดยตรงเป็นวิธีที่ง่าย มีกระบวนการไม่ซับซ้อน ไม่ต้องมีการเตรียมผงก่อน ดังนั้นวิธีการตอกอัดโดยตรงจึงมีความน่าสนใจสำหรับนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์นมผึ้งอัดเม็ด เพราะหากใช้วิธีที่มีการใช้ความร้อนร่วม จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบภายในนมผึ้งได้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 2.8 กระบวนการผลิตแบบต่างๆ

(1) วิธีทำแกรนูลแบบเปียก (2) วิธีทำแกรนูลแบบแห้ง (3) วิธีการตอกเม็ดโดยตรง

ที่มา : นงสุดา (2545)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ 2.13 การเปรียบเทียบกระบวนการผลิตโดยวิธีตอกเม็ดโดยตรงและวิธีแกรนูลแบบเปียก

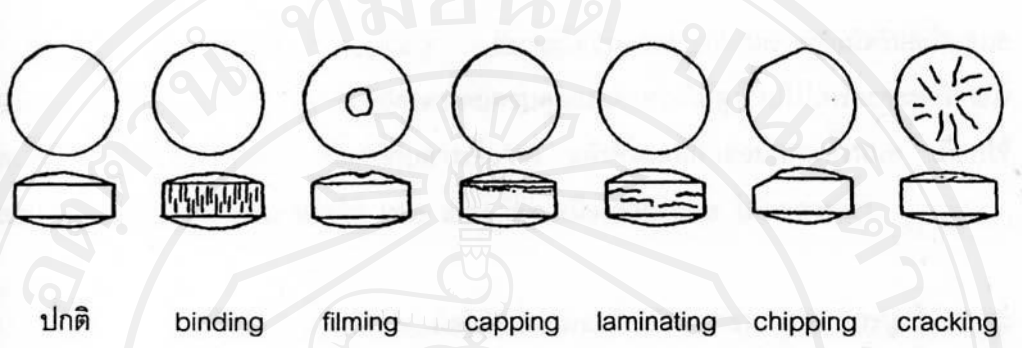
ตอกโดยตรง	แกรนูลแบบเปียก
ความสามารถในการยึดเกาะเป็นเม็ด	
เป็นปัญหาสำหรับส่วนผสมที่ไม่มีความสามารถในการยึดเกาะ	ทำให้สารที่มีความสามารถในการยึดเกาะที่ไม่ดีเป็นเม็ดที่แข็งแรงได้
การไหล	
อาจมีปัญหากับบางสูตรที่ไหลไม่ดี	ไหลได้มากเมื่อแกรนูลมีการกระจายของขนาดไม่กว้างเกินไป
ขนาดอนุภาค	
ขนาดเล็กกว่าและมีการกระจายขนาดแคบกว่า	มีขนาดใหญ่กว่าและการกระจายขนาดกว้างกว่า
ความสม่ำเสมอของส่วนผสม	
อาจมีการแยกของส่วนผสมระหว่างการตอกเม็ดหรือการขนส่ง	โดยทั่วไปจะมีความสม่ำเสมอ หากผสมได้สม่ำเสมอตั้งแต่ก่อนเตรียมแกรนูล
การผสม	
เป็นการให้แรงเฉือนในระดับต่ำ	เป็นการให้แรงเฉือนในระดับสูงหรือต่ำก็ได้
การแตกตัว	
โดยทั่วไปจะใช้ปริมาณค่อนข้างต่ำ	มักจะมีปัญหาในการทำให้แกรนูลแตกออกเป็นผงละเอียด
การละลาย	
เร็วกว่า	ช้ากว่า
ราคา	
ต้นทุนสูงด้านวัตถุดิบ และการควบคุมคุณภาพวัตถุดิบ	ต้นทุนสูงในด้านเครื่องมือ แรงงาน เวลากระบวนการผลิตและพลังงาน
ความง่ายในการพัฒนาสูตร	
สมบัติของวัตถุดิบมีผลต่อคุณภาพของเม็ด ดังนั้นต้องกำหนดชนิดและสมบัติของวัตถุดิบให้ชัดเจน	แกรนูลสามารถบดบังคุณสมบัติที่ไม่พึงปรารถนาของวัตถุดิบ เช่น ความแข็ง หรือความสามารถในการยึดเกาะ
ความเร็วในการตอก	
อาจต้องลดความเร็วลง	ใช้ความเร็วในการตอกเม็ดได้เร็วกว่า

ที่มา : นงสุดา (2545)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.3.4 ปัญหาในการผลิต

ปัญหาในขั้นตอนการตอกเม็ด ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีตำหนิ ไม่คงรูป มีลักษณะต่างๆ ดังรูปที่ 2.9 โดยมีสาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาต่างๆ ดังตารางที่ 2.14 (นงสุดา, 2545)



รูปที่ 2.9 ผลิตภัณฑ์อัดเม็ดที่มีตำหนิในลักษณะต่าง ๆ
ที่มา : นงสุดา (2545)

- *Binding* หมายถึง การที่เม็ดถูกส่งออกจากเบ้าลำบาก หรือการที่สากล่างไม่สามารถเคลื่อนที่ในเบ้าได้อย่างอิสระอาจเนื่องจากกรหล่อลื่นไม่เพียงพอ เครื่องตอกจะมีเสียงดังผิดปกติซึ่งเกิดจากการเสียดสี จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีขอบขรุขระ มีรอบขีดที่ข้างเม็ด และน้ำหนักเม็ดไม่สม่ำเสมอ
- *Sticking* หมายถึง การที่เนื้อผลิตภัณฑ์ที่ผิวหน้าของเม็ดติดอยู่ที่ผิวหน้าของหัวตอก หลังจากที่เม็ดถูกปัดออกจากเครื่องไปแล้ว ถ้าติดเป็นจุดเรียกว่า picking ถ้าติดป็นแผ่นบางๆ และจะค่อยๆหนาขึ้นเมื่อตอกเม็ดต่อเรียกว่า filming โดยเมื่อเกิด sticking จะต้องหยุดเครื่องตอกเม็ด ทำความสะอาดเช็ดหัวตอกด้วยผ้าที่นุ่มและชื้น แล้วเช็ดให้แห้ง
- *Capping* และ *laminating* หมายถึง การที่เม็ดผลิตภัณฑ์มีรอยแยก ถ้ารอยแยกเกิดที่ชั้นบนของเม็ดจนแยกเป็นฝาเรียกว่า capping หรือแยกหลายชั้นเรียกว่า laminating โดยปัญหาดังกล่าวอาจเกิดทันทีหลังตอกเม็ด หรือเกิดหลังจากตอกเม็ดไประยะหนึ่ง
- *Chipping* หมายถึง การที่ขอบของเม็ดบิ่น มักเกิดจากผิวหน้าสากที่ชำรุดเนื่องจากใช้งานเป็นระยะเวลานาน
- *Cracking* หมายถึง การที่เม็ดมีรอยแยกที่ส่วนบนของผิวหน้า โดยมากมักเกิดตรงกลางของส่วนบนของเม็ด
- *Motting* หมายถึง การกระจายสีบนผิวของเม็ดไม่สม่ำเสมอ อาจแก้ปัญหาโดยควบคุมแรงตอกไม่ให้สูงเกินไป เพราะจะทำให้แกรนูลแตกได้มากทำให้เห็นสีไม่สม่ำเสมอ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

- น้ำหนักของเม็ดไม่สม่ำเสมอ มักเกิดจากขนาดและแกรนูลไม่เหมาะสม แกรนูลมีการไหลไม่ดี หรือผสมไม่สม่ำเสมอ
- ความแข็งของเม็ดไม่สม่ำเสมอ ความแข็งจะขึ้นกับน้ำหนักแกรนูลและช่องว่างระหว่างสากบนและสากล่าง หากระยะห่างระหว่างสากเปลี่ยนแปลง ความแข็งจะไม่คงที่

ตารางที่ 2.14 สาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาในการตอกเม็ดและแนวทางการแก้ไข

สาเหตุ	ปัญหา	แนวทางการแก้ไข
1. สารหล่อลื่นน้อยเกินไป	binding	- เพิ่มปริมาณสารหล่อลื่น - เปลี่ยนสารหล่อลื่นให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น - ผสมสารหล่อลื่นใหม่ให้ทั่ว
2. สารหล่อลื่นมากเกินไป	capping, laminating	- ลดปริมาณสารหล่อลื่น
3. สารหล่อลื่นไม่มีสมบัติเป็นสารกันติด	sticking	- เปลี่ยนสารหล่อลื่นใหม่
4. สารหล่อลื่นไม่มีสมบัติเป็นสารช่วยในการไหล	น้ำหนักและความแข็งไม่สม่ำเสมอ	- เปลี่ยนสารหล่อลื่นใหม่
5. ความชื้นในแกรนูลน้อยเกินไป	binding, capping, laminating, เม็ดกร่อน	- หาความชื้นที่เหมาะสมก่อนตอก - เติมสารที่มีสมบัติดูดความชื้น เช่น ซอร์บิทอล
6. ความชื้นในแกรนูลมากเกินไป	binding, sticking, chipping	- หาความชื้นที่เหมาะสมก่อนตอก - อบแกรนูลให้มีความชื้นพอดี - ควบคุมความชื้นในสภาวะการตอก
7. สูตรชื้นหรือเหนียวง่าย	sticking, chipping	- เติมสารดูดซับ - ใช้สารปรุงแต่งที่มีจุดหลอมเหลวสูง - ควบคุมความชื้นในสภาวะการตอก
8. สารยึดเกาะน้อยเกินไป	sticking, capping, laminating, เม็ดกร่อน	- เพิ่มปริมาณสารยึดเกาะ - เปลี่ยนสารยึดเกาะที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น
9. สารยึดเกาะมากเกินไป	เม็ดแตกตัวช้า, ไม่ละลาย	- ลดปริมาณสารยึดเกาะ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ 2.14 สาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาในการตอกเม็ดและแนวทางการแก้ไข (ต่อ)

สาเหตุ	ปัญหา	แนวทางการแก้ไข
10. อนุภาคขยายตัวหลังการตอก	binding, capping, laminating, cracking	- ใช้เบ้าทรงสอบ - ใช้สารปรุงแต่งช่วย
11. ขนาดแกรนูลไม่เหมาะกับช่องเบ้า	น้ำหนักเม็ดและความแข็งไม่สม่ำเสมอ	- ปรับขนาดแกรนูลใหม่ -แร่งผงละเอียดออกบางส่วน
12. แกรนูลมีผงละเอียดเกินไป	capping, laminating, เม็ดกร่อน	-แร่งผงละเอียดออกบางส่วน
13. ความเร็วในการตอกมากเกินไป	capping, laminating	-ใช้เบ้าทรงสอบ
14. แรงตอกอัดเม็ดน้อย	เม็ดกร่อน	-ปรับแรงตอกใหม่
15. แรงตอกอัดเม็ดมาก	capping, laminating, เม็ดกร่อน	-ปรับแรงตอกใหม่
16. การตั้งหัวตอกและเบ้าไม่พอดี	binding, capping, laminating, chipping	- ตั้งหัวตอกและเบ้าใหม่
17. หัวตอกมีผิวหน้าเว้ามาก	capping, laminating	- เปลี่ยนหัวตอกเป็นผิวหน้าแบน
18. หัวตอกและเบ้าสกปรกหรือชำรุด	binding, capping, laminating, chipping, sticking	- ซ่อมแซมหรือเปลี่ยนใหม่ - ควรชุบผิวที่สัมผัสกับผลิตภัณฑ์ด้วยโครเมียม

ที่มา : นงสุดา (2545)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.3.5 การตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์อัดเม็ด

1. ขนาดและรูปร่างของเม็ด (Size and shape of tablet)

การควบคุมขนาดและรูปร่างของเม็ดเป็นสิ่งสำคัญที่มีผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค ความสม่ำเสมอของการผลิตแต่ละครั้ง ความสม่ำเสมอของเม็ดที่ผลิตออกมาแต่ละเม็ด นอกจากนี้ยังเป็นการบ่งบอกถึงปัญหาในการผลิตอีกด้วย การใช้เครื่องมือที่มีมาตรฐาน จะทำให้ได้เม็ดที่มีขนาดรูปร่างสม่ำเสมอ (ปราโมทย์, 2539)

2. ความแข็ง (Tablet hardness)

ความแข็ง หมายถึง ความสามารถในการต่อต้านของเม็ดต่ออุปกรณ์หรือเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบเมื่อแทงเข้าไปในเม็ด โดยดูจากค่าแรงดันหรือความดันที่ใช้ในการแทงหรือเจาะเข้าไปในเม็ดนั้น (จักรพันธ์, 2538) เม็ดจะต้องมีความแข็งที่พอเหมาะ เพื่อจะได้ทนต่อแรงที่กระทำต่อเม็ดทั้งขณะผลิต บรรจุ ขนส่ง และบริโภค การทนต่อการแตกร่วนหรือกร่อนของเม็ดจะทำให้เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค ความแข็งของเม็ดยังอาจมีผลต่อการแตกตัว และการละลายของเม็ดด้วย

ปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งของเม็ด ได้แก่

- สมบัติทางกายภาพของวัตถุดิบ
- การควบคุมความยาวของสากบนและล่างตามมาตรฐาน
- สมบัติของแกรนูล
- สารช่วยหล่อลื่น
- แรงอัดเม็ด ถ้าเพิ่มแรงอัดมากขึ้นความแข็งของเม็ดก็จะเพิ่มมากขึ้นจนถึงระดับหนึ่ง แต่ถ้าเพิ่มแรงมากกว่านี้จะทำให้เม็ดเกิดการแยกออกเป็นชั้นๆ ที่เรียกว่าเกิดการแยกฝาหรือการแยกชั้นของเม็ด (ปราโมทย์, 2539)

3. ความกร่อน (Friability of tablet)

การวัดความกร่อนเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้ประเมินความแข็งแรงของเม็ด ความกร่อนของเม็ดนี้จะสัมพันธ์กับความสามารถของเม็ดที่จะทนทานต่อทั้งแรงกระแทก และแรงขัดกร่อน ทั้งขณะทำการผลิต บรรจุ ขนส่ง และการใช้ สำหรับเม็ดที่มีแนวโน้มว่าจะร่วน บิ่น แตกง่าย จะขาดความสวยงาม ไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดความแปรปรวนของน้ำหนักเม็ดและความสม่ำเสมอของเม็ดอีกด้วย

วิธีวัดความกร่อน - เครื่องมือที่ใช้วัดความกร่อน จะใช้ทดสอบสอบเม็ดจำนวนหนึ่ง (10-20 เม็ด) โดยให้เม็ดเหล่านี้ได้รับผลของแรงกระแทกและแรงขัดกร่อน ภายในตัวเครื่องซึ่งหมุน 25 รอบต่อนาที มีระยะตกกระทบสูง 6 นิ้ว ในแต่ละรอบ

การทดสอบความกร่อนของเม็ดทำได้โดยการชั่งน้ำหนักของเม็ดจำนวนที่แน่นอน 10 หรือ 20 เม็ด แล้วจึงนำไปใส่ในเครื่องให้หมุนจำนวน 100 รอบ หรือหมุนนาน 4 นาที จากนั้นนำเม็ดทั้งหมดมาปัดฝุ่นออกแล้วชั่งอีกครั้งหนึ่ง คำนวณหาน้ำหนักที่หายไป ควรมีเปอร์เซ็นต์ความกร่อนไม่เกิน 0.5-1.0 แต่ถ้าเม็ดเกิดการแยกเป็นชั้นหรือแยกตรงฝาขณะทดสอบจะถือว่าเม็ดนั้นไม่ผ่านการทดสอบไม่ว่าเปอร์เซ็นต์ความกร่อนจะมีเท่าใดก็ตาม (ปราโมทย์, 2539)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4. ความหนาของเม็ด (Tablet thickness)

ความแปรปรวนของความหนาของเม็ดในแต่ละครั้งที่ผลิตหรือในการผลิตครั้งเดียวกันจะต้องไม่มีความแตกต่างกันจะมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าอย่างชัดเจน ทั้งนี้เพื่อให้ได้รับการยอมรับจากผู้บริโภค ช่วยให้การบรรจุเม็ดที่ใช้ปริมาตรเม็ดมาเกี่ยวข้องเป็นไปอย่างต่อเนื่องไม่ติดขัด และลดปัญหาของภาชนะบรรจุซึ่งมีปริมาตรคงที่

ในทางปฏิบัติถ้ามีการควบคุมคุณภาพของวัตถุดิบ การทำงานของเครื่องตอกและคุณสมบัติของแกรนูลให้ดีแล้ว ก็จะทำให้ความหนาของเม็ดมีค่าตามมาตรฐานที่กำหนดได้ (ปราโมทย์, 2539)

5. ปริมาณความชื้นในเม็ด (Moisture content of tablet)

การผลิตผลิตภัณฑ์อัดเม็ดนั้น แกรนูลหรืออนุภาคผงต้องการความชื้นปริมาณหนึ่งเพื่อช่วยในการจับตัวกัน (cohesion) เป็นผลิตภัณฑ์เม็ดที่แข็งแรง การทำให้แกรนูลแห้งเกินไปจะทำให้เกิด capping เนื่องจากขาดแรงที่ใช้ในการจับตัวกัน แต่ถ้าแกรนูลมีความชื้นมากเกินไปจะทำให้ผลิตภัณฑ์เม็ดมีความเหนียว ติดกับสากและเบ้า (ทัดทรง, 2534) ปริมาณความชื้นในเม็ดจะมีผลต่อความกร่อนของเม็ด ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในแกรนูลหรืออนุภาค ประมาณ 2-4% จะทำหน้าที่เป็นสารยึดเกาะทำให้เม็ดมีความกร่อนน้อยกว่าเม็ดที่แห้ง แต่ต้องระวังสำหรับสารที่ถูกแยกสลายด้วยน้ำได้ง่าย (ปราโมทย์, 2539) ปริมาณความชื้นของแกรนูลหรืออนุภาคที่นำตอกอัดเม็ด ยังมีผลทำให้เกิดความแปรปรวนของน้ำหนักเม็ด อันเนื่องมาจากความชื้นที่มากเกินไปจะมีผลต่อการไหลของผงลงสู่เบ้าตอก ถ้าแกรนูลมีความชื้นมากเกินไป เมื่อนำไปตอกอัดเป็นเม็ดอาจมีเศษผงติดอยู่ที่ผิวหน้าของสากที่ใช้ตอกอัด ทำให้เม็ดถูกดึงและหลุดจากกันได้ (จักรพันธ์, 2551) นอกจากนี้ปริมาณความชื้นของอนุภาคยังมีผลต่อความแข็งของผลิตภัณฑ์เม็ด หากความชื้นของผงเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความแข็งของเม็ดเพิ่มสูงขึ้นตาม (Sebhatu *et al*., 1997)

6. ความแปรปรวนหรือความแปรผันของน้ำหนักเม็ด (Wight Variation of Tablet)

สาเหตุที่ทำให้เกิดความแปรผันของน้ำหนักเม็ด แบ่งเป็น

6.1 สาเหตุที่เกิดจากแกรนูล

- แกรนูลมีสมบัติในการไหลที่ไม่ดี จะทำให้เกิดการไหลลงสู่เบ้าอย่างไม่สม่ำเสมอ
- การผสมแกรนูลกับสารช่วยไม่เหมาะสม
- ขนาดของอนุภาคของแกรนูลไม่เหมาะสมกับขนาดของเบ้าที่ใช้
- มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคกว้างทำให้แต่ละจุดมีความหนาแน่นไม่เท่ากัน
- รูปร่างของแกรนูลถ้ามีรูปร่างที่มีมุมมากขึ้นจะทำให้มีการแปรผันของน้ำหนักสูง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

6.2 สาเหตุที่เกิดจากเครื่องตอกเม็ด

- ความยาวของสากล่างในเครื่องตอกแบบหมุนรอบไม่เท่ากันในสากชุดเดียวกัน
- สากล่างสกปรกทำให้การเคลื่อนที่ขึ้นลงไม่อิสระ
- ถ้าขนาดของเม็ดใหญ่จะมีความแปรผันของน้ำหนักเพิ่มขึ้นด้วย
- ถ้าเครื่องตอกมีความเร็วเกินกว่าความสามารถในการไปของแกรนูลลงสู่เบ้าจะทำให้เกิดการแปรผันของน้ำหนักได้

วิธีการหาค่าแปรผันของน้ำหนักเม็ดยาตามกำหนดในเภสัชตำรับของประเทศสหรัฐอเมริกามีขั้นตอนดังนี้ (USP XX, 1980)

1. สุ่มตัวอย่างเม็ดมาทั้งหมด 20 เม็ด
2. ชั่งน้ำหนักแต่ละเม็ด
3. คำนวณหาค่าเฉลี่ยของน้ำหนักเม็ด
4. คำนวณหาค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของน้ำหนักเม็ด โดยคิดจากน้ำหนักเฉลี่ยของเม็ดที่หาได้กับค่าเปอร์เซ็นต์ การแปรผันของเม็ดที่กำหนดในตารางที่ 2.15
5. เปรียบเทียบน้ำหนักเม็ดแต่ละเม็ดกับช่วงน้ำหนักมาตรฐานที่คำนวณได้

การประเมินผลการแปรผันของน้ำหนักเม็ดจะเข้าตามมาตรฐานก็ต่อเมื่อ

- จะต้องมีเม็ดไม่เกิน 2 เม็ด ที่มีน้ำหนักเกินค่าเปอร์เซ็นต์ที่กำหนด ซึ่งคำนวณจากน้ำหนักเฉลี่ยของเม็ดที่นำมาทดสอบ
- จะต้องไม่มีเม็ดที่มีน้ำหนักเกินกว่าสองเท่าของค่าเปอร์เซ็นต์ที่กำหนดนั้น

ตารางที่ 2.15 ขอบเขตการเบี่ยงเบนของน้ำหนักเม็ดตัวอย่าง

น้ำหนักเม็ดโดยเฉลี่ย (mg)	ความแตกต่างของน้ำหนักเม็ดจากค่าเฉลี่ย (%)
130 หรือน้อยกว่า	10
130 – 324	7.5
มากกว่า 324	5

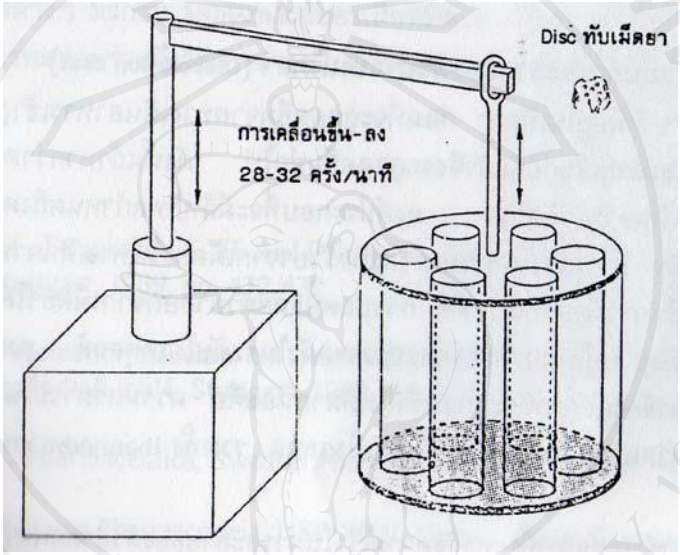
ที่มา : ปราโมทย์ (2539)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

7. การแตกตัว (Disintegration Test)

การแตกตัว หมายถึง การที่เม็ดแตกออกเป็นอนุภาคขนาดเล็กหรือแกรนูล เมื่อเม็ดสัมผัสกับของเหลวทางเดินอาหาร ก่อนที่จะละลายหรือถูกดูดซึมเข้ากระแสโลหิตต่อไป

เครื่องมือทดสอบหาการแตกตัว (รูปที่ 2. 10) ซึ่งประกอบด้วยหลอดแก้ว 6 หลอด สำหรับในเม็ดตัวอย่างแต่ละเม็ดที่ต้องการตรวจสอบ โดยที่ด้านล่างของหลอดแก้วจะมีตะแกรงติดไว้ ในระหว่างการทดสอบหลอดแก้วจะถูกยกขึ้นลงในสารละลายทดสอบ ซึ่งจะมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 36-38 องศาเซลเซียส สารละลายนี้มักบรรจุใน beaker ขนาด 1 ลิตร ในการทดสอบจะใช้จำนวน 6 เม็ด ซึ่งจะถือว่าแตกตัวอย่างสมบูรณ์ก็ต่อเมื่อส่วนที่แตกออกจากเม็ดนั้นได้หลุดผ่านตะแกรงลงไปหมด (จักรพันธ์, 2538)



รูปที่ 2.10 : เครื่องมือทดสอบการแตกตัวของเม็ด
ที่มา : จักรพันธ์ (2538)

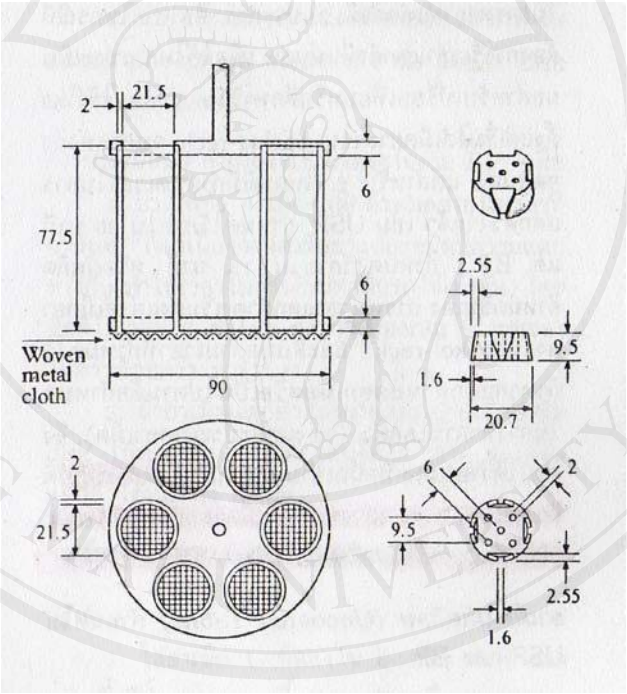
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ (จักรพันธ์, 2551)

1. Basket-rack assembly (ดูรูปที่ 2.11) : ประกอบด้วยหลอดแก้วปลายเปิดทั้งสองด้าน จำนวน 6 หลอด แต่ละหลอดยาว 7.75 ±0.25 เซนติเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในประมาณ 21.5 มิลลิเมตร และความหนาของหลอดประมาณ 2 มิลลิเมตร หลอดทั้ง 6 ถูกจับยึดให้อยู่ในแนวดิ่งด้วยแผ่นพลาสติกสองอันประกอบบนและล่าง แผ่นพลาสติกมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 9 เซนติเมตร และหนา 6.6 มิลลิเมตร มีช่อง 6 ช่อง แต่ละชองมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 24 มิลลิเมตร และห่างจากจุดศูนย์กลางเท่าๆ กัน และมีช่วงห่างเท่ากัน ด้านใต้แผ่นพลาสติกอันล่างมีตะแกรงทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาด 10 mesh เบอร์ 23 (0.025นิ้ว) ชุดทั้งหมดนี้ยึดติดกันด้วยน๊อตยาวสามตัว ตรงกลางของแผ่นพลาสติกอันบนมีก้านยื่นขึ้นไปเพื่อนำไปแขวนกับอุปกรณ์ที่ช่วยให้เกิดการยกขึ้นลงของ basket-rack assembly

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2. Disk/Disc : เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วางทับบนเม็ดแต่ละเม็ดในหลอดแก้ว รายละเอียดและขนาดดูจากรูปที่ 2.10 มีส่วนทำให้เกิดการเสียดสีของเม็ด disks/discs นี้อาจมีความสำคัญหรือไม่มีความสำคัญก็ได้ในการทดสอบ หรืออาจทำให้มีความไวอย่างมากต่อการทดสอบ มีประโยชน์สำหรับเม็ดที่ลอยตัวในสารละลาย

3. อุปกรณ์เครื่องกลสำหรับยก basket-rack assembly : ทำหน้าที่ยก basket-rack assembly ขึ้นและลงในสารละลายที่ใช้ทดสอบ มีอัตราการยกขึ้นลง 29-32 ครั้งต่อนาที ระยะทางเคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวดิ่งอยู่ในช่วง 5.3-5.7 เซนติเมตร ระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ขึ้นจะต้องเท่ากับระยะทางที่เคลื่อนที่ลง



รูปที่ 2.11 : ส่วนประกอบและขนาดของเครื่องทดสอบการแตกตัวของเม็ด
ที่มา : ทัดทรง (2534)

4. อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ : ทำหน้าที่ปรับอุณหภูมิของสารละลายให้อยู่ในช่วงอุณหภูมิที่กำหนด

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.3.6 ผลิตภัณฑ์นมผึ้งอัดเม็ด

จากการค้นคว้ารายงานการวิจัยเกี่ยวกับการผลิตนมผึ้งอัดเม็ด พบว่ามีการศึกษาเกี่ยว กับสารช่วยการเกาะตัวที่จะใช้ในกระบวนการอัดเม็ด ที่มักจะใช้เป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติในการเกาะตัวต่ำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความคงตัวป้องกันเม็ดที่อัดเกิดการอ่อนตัว สึกกร่อน แตกง่าย และเปื่อยยุ่ย สารช่วยการเกาะตัวที่ใช้คือ ผงแคลเซียมผสมกับนมผึ้งผงในการศึกษาการใช้นมผึ้งผงปริมาณสูงเป็นส่วนประกอบในการอัดเม็ดจะทำให้ลักษณะของเม็ดที่ได้มีความแข็งต่ำ แตกหักและยุ่ยง่าย การใช้สารช่วยยึดเกาะจะทำให้ลักษณะเม็ดมีความคงตัวดีขึ้น (Yoshimitsu and Takamitsu, 2003) นอกจากนี้ยังมีมีการศึกษาเกี่ยวกับลักษณะของเม็ดที่ผ่านการอัดเม็ดด้วยวิธีตอกอัดโดยตรง ซึ่งมีนมผึ้งผงเป็นส่วนประกอบในอัตราส่วน 30-70% ผสมกับผงแคลเซียม (food grade) ในอัตราส่วน 1-20% และผง collagen ในอัตราส่วน 10-69% แต่มีการใช้สาร lubricant ร่วมด้วย ใช้สภาวะในการศึกษาที่ความชื้น 45%อุณหภูมิ 25 °C น้ำหนักต่อเม็ดเฉลี่ย 250 มิลลิกรัมต่อเม็ด ผงผสมมีความสามารถในการไหลที่ดี สามารถไหลลงในเครื่องได้ง่าย และสามารถกดอัดได้ดีไม่เหนียวชื้นในระหว่างการผลิต ลักษณะโครงสร้างภายนอกที่เห็นจะมีผิวเงาเป็นมันและไม่มีความสม่ำเสมอ (Masaaki *et al*., 2002) นอกจากนี้ได้มีการพัฒนาการผลิตนมผึ้งผงอัดเม็ด โดยนำนมผึ้งผงซึ่งมีสารช่วยในการดูดซึมแคลเซียมไปอัดเม็ดจากนั้นจึงเคลือบด้วยน้ำตาล เพราะนมผึ้งสดมีปัญหาเรื่อง กลิ่นและรสชาติ ที่ยากต่อการบริโภค และสารช่วยการดูดซึมแคลเซียมที่มีในนมผึ้งสดจะทำงานได้น้อยกว่านมผึ้งที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ protease ซึ่งจะได้สารไอโซฟลาโวน ระดับน้ำตาลในนมผึ้งลดลงและลดการแยกตัวของผงแคลเซียมที่ผสมได้ อัตราส่วนที่ใช้คือ maltose starch syrup 30-50% นมผึ้งผง 10-30% แคลเซียม 10-30% และ ไอโซฟลาโวน 0.5-3.0% ซึ่งผลที่ได้จากทดลอง คือ ได้นมผึ้งอัดเม็ดรสชาติดีขึ้น ช่วยให้บริโภคได้ง่ายขึ้น (Hideo, 2005) และมีการผสมนมผึ้งผงจากการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งกับ starch powder ในอัตราส่วน 10-50% โดยน้ำหนัก และปริมาณนมผึ้ง 50-80% โดยน้ำหนัก อัดเม็ดด้วยวิธีการตอกอัดโดยตรง พบว่าสามารถทำการอัดเม็ดนมผึ้งให้มีความแข็งสูงสุดได้โดยใช้อัตราส่วนของนมผึ้ง 75-80% ซึ่งได้นมผึ้งอัดเม็ดที่ความเข้มข้นสูง (Kazuhisa and Kazunori, 2007)

2.3.7 ผลิตภัณฑ์อัดเม็ดอื่นๆ

กระบวนการอัดเม็ดเป็นกรรมวิธีที่นิยมนำมาใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารชนิดต่างๆ ผลิตภัณฑ์อัดเม็ดที่ผลิตขึ้นมีหลายรูปแบบ มักอยู่ในรูปของผลิตภัณฑ์เสริมอาหารและรูปแบบของลูกอมรสหวานหรือขนม ซึ่งมีทั้งชนิดอมละลายในปาก เคี้ยว หรือกลืน นอกจากนี้ยังมีผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มสำเร็จรูปอัดเม็ดที่เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในปัจจุบัน โดยผลิตภัณฑ์จะแตกตัวอย่างรวดเร็ว

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เมื่อละลายน้ำ ได้แก่ เครื่องดื่มผสมแอลกอฮอล์อัดเม็ด เมล็ดกาแฟอัดเม็ด ใบชาอัดเม็ด เบียร์อัดเม็ด เป็นต้น (Alberto-Culver Co., 1970; Barani and Avanvsions, 1997; Falkenstein, 1997; Kenke and Walkowiak, 2000; Belz, 2001) ส่วนผลิตภัณฑ์เสริมอาหารจะใช้รับประทานนอกเหนือจากการรับประทานอาหารหลักตามปกติ และมีจุดมุ่งหมายสำหรับบุคคลทั่วไป มิใช่สำหรับผู้ป่วย เช่น ผลิตภัณฑ์อาหารเสริมสุขภาพชนิดอัดเม็ดจากเห็ดหลินจือ (พัชรินทร์, 2544) ผลิตภัณฑ์เส้นใยอาหารอัดเม็ดจากสาหร่ายซึ่งเป็นแหล่งไอโอดีน (Briones *et al*., 1997) ผลิตภัณฑ์เส้นใยอาหารอัดเม็ดจากเปลือกส้ม เปลือกมะนาว และเปลือกสับปะรด (Larrauri *et al*., 1995) นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาอาหารเสริมสำหรับเด็ก ซึ่งมีเป้าหมายเพื่อให้เด็กหันมาบริโภคผลิตภัณฑ์อัดเม็ดที่มีประโยชน์แทนท๊อฟฟี่ เช่น การพัฒนาอาหารเสริมโปรตีนชนิดอัดเม็ดจากไข่แดงผงและนมผงเพื่อเป็นอาหารของเด็กวัยรุ่น (วุฒินันท์, 2541) การพัฒนาถั่วแดงหลวงอัดเม็ดสำหรับเด็กวัยเรียนและวัยรุ่น (นงสุดา, 2545) การพัฒนาผลิตภัณฑ์นมอัดเม็ดเสริมโปรตีนสำหรับนักเรียนในชนบท (มยุรฉัตร, 2550) และผลิตภัณฑ์อัดเม็ดที่มีส่วนผสมของลูกเดือยและถั่วลิสงบด (Jegede, 2000) และยังมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ต่างๆ ด้วยวิธีการอัดเม็ด เช่น ผลิตภัณฑ์น้ำผึ้งอัดเม็ด โดยมีส่วนผสมของน้ำผึ้งผง นมผงดัดแปร นมผงขาดมันเนย (Verner, 1975) ผลิตภัณฑ์อัดเม็ดจากเครื่องเทศ (spicy vegetable) โดยมีส่วนผสมของกระเทียมเป็นส่วนใหญ่ (Zurabishvill and Machikhin, 1980) เป็นต้น

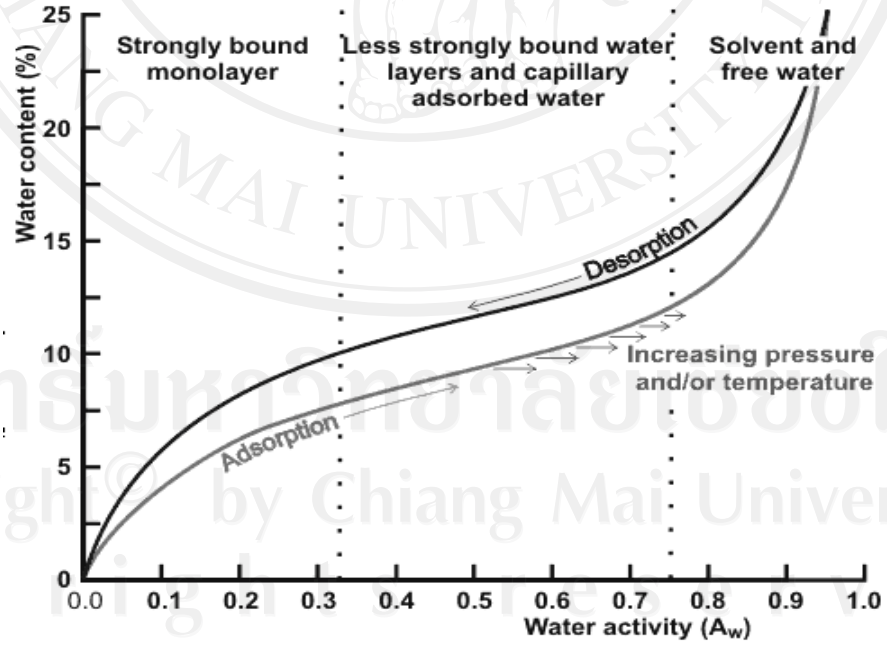
2.4 Sorption isotherm

Sorption isotherm เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำในอาหารกับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ หรือ a_w ซึ่งกระบวนการลดความชื้น (desorption) และการเพิ่มความชื้น (adsorption) เกิดขึ้นได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และจะมีผลต่อค่า a_w ด้วย (นิธิยา, 2549) ความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับ moisture sorption isotherm ของอาหารมีความสำคัญสำหรับการนำไปใช้เพื่อวัตถุประสงค์ที่หลากหลาย เช่น การออกแบบและหาจุดที่เหมาะสมในกระบวนการทำแห้ง ใช้สำหรับวิเคราะห์ปัญหาระหว่างการบรรจุเพื่อเลือกบรรจุภัณฑ์ให้เหมาะสม สำหรับสร้าง model ของการเปลี่ยนแปลงความชื้นเพื่อใช้ในกระบวนการอบแห้ง สำหรับคาดคะเนอายุการเก็บรักษา และ การศึกษาความคงตัวของอาหาร (Sinija and Mishra, 2008; Goula *et al*., 2008; Iguedjtal *et al*., 2008) เป็นต้น ในการถนอมอาหารและความคงตัวของลักษณะของอาหาร (รสชาติและความกรอบ ฯลฯ) ในระหว่างการเก็บรักษาจะขึ้นอยู่กับการควบคุมปริมาณความชื้นที่อยู่ในอาหาร กระบวนการถนอมอาหารถูกพัฒนาขึ้นเพื่อยืดอายุการเก็บรักษา โดยลดปริมาณน้ำเพื่อยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์และยับยั้งปฏิกิริยาทางเคมี โดยปริมาณความชื้นเป็นเกณฑ์ที่สำคัญใน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

การตัดสินคุณภาพของอาหาร ดังนั้นการศึกษาลักษณะ sorption isotherm ของนมผึ้งอัดเม็ดจึงมีความสำคัญและจะได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการเก็บรักษาและคุณภาพของผลิตภัณฑ์

Sorption isotherm ของอาหาร โดยทั่วๆไปจะมีลักษณะเป็นรูปตัว S (sigmoidal shape) สามารถแบ่งเป็น 2 แบบคือ desorption และ adsorption isotherm กระบวนการ desorption คือ กระบวนการลดความชื้น ในขณะที่กระบวนการ adsorption คือกระบวนการเพิ่มความชื้น ซึ่งกระบวนการทั้งสองจะเกิดขึ้นได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและจะมีผลต่อค่า a_w ด้วย การศึกษา desorption 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 เสมอ โดยปกติแล้วกระบวนการทั้งสองจะไม่สามารถย้อนกลับได้ (irreversible process) จึงทำให้เกิดปรากฏการณ์ ฮิสเตอร์ริซิส (hyteresis) ดังรูป 2.12



รูปที่ 2.12 ตัวอย่าง sorption isotherm ของอาหาร

ที่มา : Chaplin (2010)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

จากรูปที่ 2.12 สามารถแบ่ง sorption isotherm ออกได้เป็น 3 ช่วงซึ่งจะแตกต่างกันตามปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในอาหาร หรือค่า a_w

ช่วงที่ 1 เส้นกราฟจะค่อนข้างชัน จะสอดคล้องกับ 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 สามารถกำจัดออกได้โดยง่าย น้ำเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นตัวทำละลาย ถูกใช้สำหรับการเจริญของจุลินทรีย์และการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี อาหารจะมีน้ำประมาณ 12-25% และมีค่า a_w มากกว่า 0.8-1.0 (นิธิยา, 2549)

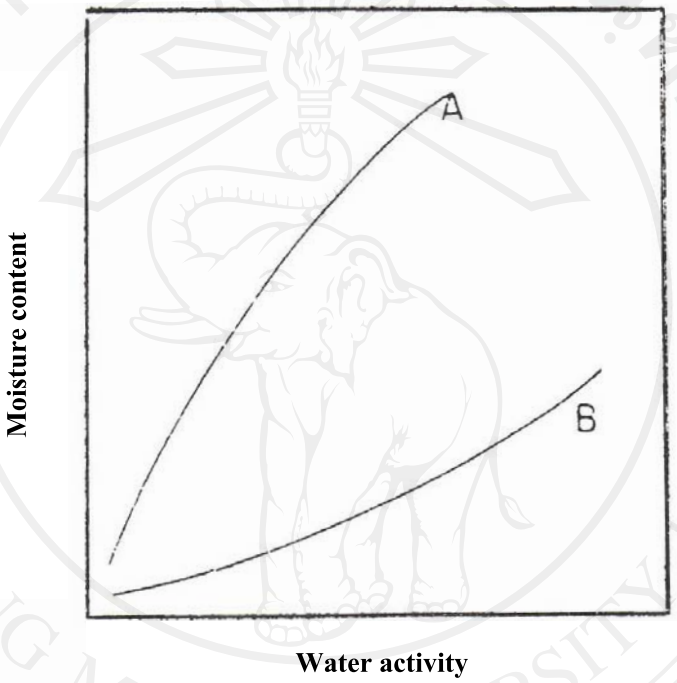
กราฟ desorption isotherm เป็นการวิเคราะห์ระดับความแห้งของอาหารที่ค่อยๆเพิ่มขึ้น หรือ ความชื้นของอาหารที่ค่อยๆ ลดต่ำลง จนถึงจุดสมดุลกับสภาวะแวดล้อม หรือความชื้นของอากาศขณะนั้น ดังนั้นจึงใช้ desorption isotherm สำหรับกระบวนการทำแห้ง กราฟ adsorption หรือ resorption isotherm เป็นการวิเคราะห์ความชื้นของอาหารที่ค่อยๆเพิ่มขึ้น เนื่องจากอาหารนั้นมีความสามารถในการดูดความชื้นจากอากาศได้ หากความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย อาหารมีความสามารถในการดูดความชื้นได้มาก เส้นกราฟ adsorption isotherm จะมีความชันมาก อาหารประเภทนี้เรียกว่า hygroscopic product และถ้าอาหารไม่มีความไวต่อความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่เพิ่มขึ้น เส้นกราฟจะมีความชันน้อย อาหารประเภทนี้เรียกว่า nonhygroscopic product ดังรูปที่ 2.13

อาหารหลายชนิดมีรูปกราฟของ adsorption ต่างจากรูปที่ 2.13 คือเส้นกราฟจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในช่วงแรก เมื่อค่า a_w เพิ่มขึ้นเป็นพวก low hygroscopicity และเส้นกราฟจะชันขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงปลายเป็นพวก high hygroscopicity ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ซึ่งรูปกราฟของ adsorption isotherm เช่นนี้เป็นสมบัติของอาหารที่มีปริมาณน้ำตาลหรือเกลือสูงเนื่องจากมี capillary adsorption ต่ำ ดังนั้นอาหารใดที่มีสมบัติเป็น hygroscopicity เมื่อมีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย จะทำให้ปริมาณความชื้นในอาหารเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (นิธิยา, 2549)

รูปร่างของ isotherm ที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับธรรมชาติของผงอาหารว่าเป็นผลึกที่มีรูปแบบที่แน่นอน หรือมีรูปแบบไม่แน่นอน ซึ่งผงอาหารส่วนมากมีโครงสร้างที่ซับซ้อน ได้แก่ตัวถูกละลายที่มีผลึกรูปแบบที่แน่นอน เช่น น้ำตาล ซึ่งแสดงการเปลี่ยนเป็นผลึก ในระหว่างการดูดซับของน้ำ โดยน้ำตาลในรูปแบบที่แน่นอน มีหลายปัจจัยที่กระทบต่อการดูดซับของไอน้ำ และส่งผล

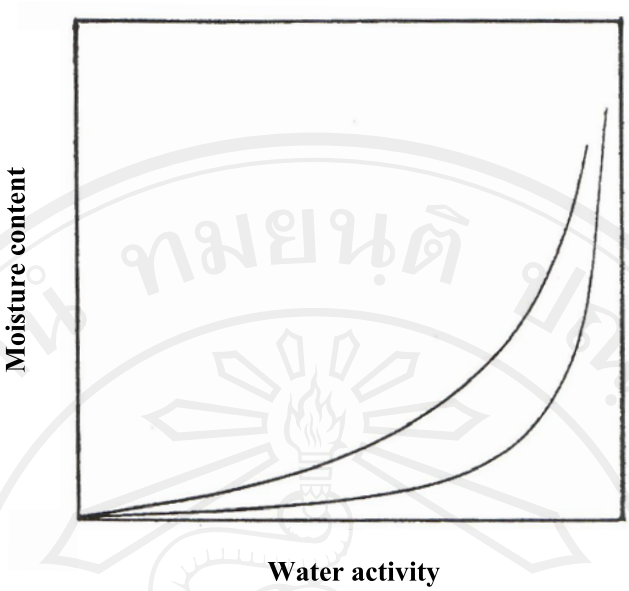
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ต่อความคงตัวของการเก็บรักษา การมีฟิล์มบางของสารละลายอิ่มตัวที่ผิวของผลึก การกระจายขนาดของอนุภาคเล็กๆ และน้ำในผลึก คือ ปัจจัยบางประการ ซึ่งทำให้ความชื้นสัมพัทธ์สมดุลของน้ำตาลไม่มีความเป็นระเบียบ และมีแนวโน้มเกิดการเกาะตัวกันของผง (Mathlouthi and Roge, 2003) อาหารแต่ละชนิดจะมี sorption isotherms แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี และปริมาณของน้ำที่ยึดอยู่ภายในอาหาร (วิไล, 2546)



รูปที่ 2.13 ลักษณะ adsorption isotherm
สารประเภท hygroscopic product (A) และ nonhygroscopic product (B)
ที่มา: นิธิยา (2549)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 2.14 ตัวอย่าง sorption isotherm ของอาหารที่มีปริมาณน้ำตาลหรือเกลือสูงและมี capillary adsorption ต่ำ
ที่มา: นิธิยา (2549)

ตารางที่ 2.16 ค่า a_w ของสารละลายเกลือที่แตกต่างกันที่อุณหภูมิ 25°C

สารละลายเกลืออิ่มตัว	a_w
LiCl	0.11-0.15
CH_3COOK	0.20-0.23
$MgCl_2 \cdot 6\ H_2O$	0.33
K_2CO_3	0.44
$Mg(NO_3)_2 \cdot 6\ H_2O$	0.52-0.55
NaCl	0.75
$CdCl_2$	0.82
K_2CrO_4	0.88
KNO_3	0.93-0.94
K_2SO_4	0.97

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

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

การศึกษา sorption isotherm นั้นกระทำในระบบปิดซึ่งมีการควบคุมสภาวะบรรยากาศให้มีความชื้นสัมพัทธ์ในระบบคงที่ ซึ่งสภาวะความชื้นสัมพัทธ์จะถูกสร้างโดยการใช้สารละลายเกลืออิ่มตัวต่างๆ ดังตารางที่ 2.16 ตัวอย่างอาหารที่ทราบน้ำหนักเริ่มต้นจะถูกเก็บไว้ในระบบนี้ ความชื้นของอาหารปรับตัวจนกว่าจะสมดุลกับความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศที่เก็บรักษา โดยอาหารจะไม่มีน้ำหนักเพิ่มขึ้นหรือลดลงภายใต้การเก็บรักษาในสภาวะดังกล่าว (Ramaswamy and Marcotte, 2006)

โดย sorption isotherm จะใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นและการกำหนดสภาวะการอบแห้ง คัดเลือกบรรจุภัณฑ์ ทำนายอายุระหว่างการเก็บรักษาอาหารแห้งทำให้ผลิตภัณฑ์มีโครงสร้างเนื้อสัมผัสที่ดี เพื่อลดการเปลี่ยนแปลงจากปฏิกิริยาเคมีและให้ปลอดภัยจากการเจริญของจุลินทรีย์ อาหารที่ถูกลดปริมาณความชื้นจะถูกทำให้กลายสภาพเป็นกลาส (glass) การเปลี่ยนสภาพจากกลาส (glassy state) เป็นของเหลวข้นหนืดจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g) ซึ่งค่า T_g นี้จะเป็นค่าเฉพาะตัวสำหรับอาหารแต่ละชนิด โดย T_g จะเป็นตัวบ่งชี้ที่ทำให้เข้าใจถึงการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพของอาหารระหว่างการแปรรูปและคุณภาพของอาหารที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างการเก็บรักษา เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเหนือ T_g จะมีการเปลี่ยนแปลง หลายอย่างเช่น ปริมาตร (free volume) เพิ่มขึ้น ความหนืดลดลง ความร้อนจำเพาะเพิ่มขึ้น การขยายตัวของความร้อนเพิ่มขึ้น (thermal expansion) การเปลี่ยนแปลงที่สำคัญเหล่านี้มีผลต่อพฤติกรรมของอาหารซึ่งเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของโมเลกุลอาหารที่เพิ่มขึ้นและการลดลงของความหนืด ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ขึ้นกับเวลา รวมถึงความหนืดซึ่งเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างเช่น เกิดความเหนียว การยุบตัว (collapse) และการตกผลึก ระหว่างกระบวนการผลิตอาหารและการเก็บรักษา ค่า a_w และอุณหภูมิกลาสทราน ซิชันมักจะใช้ เพื่อพิจารณาถึง ความเสถียรในระหว่างการเก็บรักษาอาหาร ผลิตภัณฑ์อาหารจะเสถียรมากที่สุดเมื่อปริมาณความชื้นอยู่ในระดับ ความชื้นโมโนเลเยอร์ (monolayer moisture) ซึ่งมีค่า a_w ประมาณ 0.1-0.3 หรือต่ำกว่าอุณหภูมิกลาสทราน ซิชัน (Goula *et al*., 2008)

กลาสทรานซิชันเป็นเครื่องมือที่ใช้ทำความเข้าใจการเคลื่อนที่ของน้ำในอาหารและการควบคุมอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ โดย T_g ให้ข้อมูลที่ดีกว่าค่า a_w โดยมีการพิสูจน์ว่าข้อมูลของค่า a_w ไม่เพียงพอสำหรับการประเมินอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ อาหาร ที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_g อาหารจะมีความเสถียร และไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางด้านกายภาพ เคมีและชีววิทยา อย่างไรก็ตาม T_g ไม่สามารถทำนายความเสถียรของจุลชีววิทยาของอาหารได้อย่างถูกต้องยังคงต้องการการค้นคว้าที่มากขึ้นในการทำความเข้าใจว่าน้ำและการเคลื่อนที่ของตัวถูกละลายมีอิทธิพลต่อการควบคุมการเจริญและกิจกรรมของจุลินทรีย์ในอาหาร อย่างไรก็ตามค่า a_w และอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ได้รับการยอมรับว่าเป็นข้อมูลที่แสดงปริมาณน้ำในอาหารที่ระเหยออกไปจากอาหารได้อย่าง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

แม่นยำ (Ahmed *et al*., 2005) นอกจากนี้ sorption isotherm ยังมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของอาหารเช่น การเกิดสีน้ำตาลเนื่องมาจากปฏิกิริยาที่ไม่ใช้เอมไซม์ การเกิดออกซิเดชันของไขมัน การเสื่อมสลายของวิตามิน กิจกรรมของเอมไซม์ การเสียสภาพของโปรตีน การเจลาติไนเซชัน (gelatinization) ของแป้ง และการเกิดรีโทรกราเดชัน (retrogradation) ของแป้ง ซึ่งมักนิยมใช้ในการพิจารณาความเสถียรของอาหารผง โดยพบว่าปฏิกิริยาทางเคมีส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นเมื่อ a_w มากกว่า 0.3 โดยน้ำจะมีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีดังต่อไปนี้

1. เป็นสารที่เข้าร่วมทำปฏิกิริยา (reactant) เช่น การไฮโดรไลซีส (hydrolysis) ของซูโครส
2. น้ำทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนไหวของสารที่เข้าร่วมทำปฏิกิริยา โดยส่งผลต่อความหนืดของอาหาร
3. น้ำทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนหรืออาจเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสารตัวอื่นๆ เช่น ส่งผลให้เกิดการออกซิเดชันของไขมันโดยการเข้าล้อมรอบโลหะที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หรือเกิดพันธะไฮโดรเจนของ ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxides) กับน้ำ
4. อาจก่อให้เกิดการรวมตัวของโปรตีน และการเปลี่ยนแปลงสภาพของน้ำตาลและแป้งจาก amorphous ไปเป็น crystalline (Rahman, 1995)

การเกาะตัวกันของอาหารเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพจากกลาส (amorphous glass) ไปเป็นของเหลวหนืด (amorphous rubber) ปริมาณความชื้นหรือ a_w มีผลต่อการเกาะติดกันของอนุภาค โดยทั่วไปอาหารที่มีน้ำตาลปริมาณสูง อัตราการเปลี่ยนแปลง วัฏภาคระหว่างการเก็บรักษาจะเห็นได้ชัดเจนที่อุณหภูมิห้อง ถ้าผลิตภัณฑ์ได้รับความชื้นโดยมี a_w มากกว่า 0.4 การเชื่อมโยงระหว่างอนุภาคจะเกิดขึ้นเป็นผลทำให้เกิดการเกาะตัวกันของอนุภาค ดังนั้นเพื่อป้องกันปัญหาการเกาะตัวกันจึงต้องมีการศึกษา sorption isotherm ของส่วนผสมอาหาร (Bell and Labuza, 2000)

อาหารบางชนิดมีแนวโน้มที่จะมีลักษณะเหนียวและเกาะตัวกัน ซึ่งน้ำเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อปัญหาดังกล่าว ดังนั้น sorption isotherm เป็นเครื่องมือที่ใช้ประโยชน์สำหรับการทำความเข้าใจในเรื่องของความคงตัวของอาหาร และสามารถใช้ในการทำนายความชื้นสูงสุดในอาหารที่ควรควบคุมในระหว่างกระบวนการทำแห้งและการเก็บรักษาของอาหาร (Stencl, 2004) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษา sorption isotherm ของผลิตภัณฑ์นมผึ้งอัดเม็ดเพื่อใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เก็บรักษาที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ ที่ระดับอุณหภูมิห้องเพื่อศึกษาถึงความคงตัวของผลิตภัณฑ์นมผึ้งอัดเม็ด

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved