

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับใบเตย

เตยหอมมีชื่อโดยทั่วไปว่า fragrant screw pine มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Pandanus odoratus* Ridl. หรือ *Pandanus amaryllifolius* Roxb. อยู่ในวงศ์(family) pandanaceae มีประมาณ 600 ชนิด กระจายอยู่ทั่วไปในภูมิภาคเขตร้อน และกึ่งเขตร้อน และมีการใช้เป็นยาพื้นบ้าน (Takayama *et al*, 2002) เตยเป็นต้นไม้ที่ขึ้นในเขตร้อน และเป็นต้นไม้ที่แยกเพศ คือ มีต้นตัวผู้และต้นตัวเมีย ต้นตัวผู้มีดอกซึ่งมีกลิ่นหอม ส่วนต้นตัวเมียมีแต่ลูก คนนิยมเรียกต้นตัวผู้ว่า ต้นลำเจียก ส่วนต้นตัวเมียเรียกว่า เตย ในประเทศไทยเรียกเตยที่ไม่มีหนามแต่มีดอกว่า ต้นลำจวน แลบลมลายูเรียกดอกหรือใบเตยที่มีกลิ่นหอมว่า แพนแดน (pandan) ดังนั้นชื่อวิทยาศาสตร์จึงได้รากศัพท์มาจากชื่อพื้นเมืองว่า แพนดานัส (Pandanus) ในภาคกลางของไทยเตยหอมมีชื่อเรียกอีกหลายชื่อ เช่น เตยหอมใหญ่ เตยหอมเล็ก เตยหอม และหวานข้าวใหม่ ทางภาคใต้ และแลบลมลายูเรียกว่า ปาเนะวอจิง (ปาเนะออริง ปาแปะออริง) ส่วนในภาษาจีนเรียกว่า ฟังลิ่ง มีถิ่นกำเนิดในแถบทวีปแอฟริกา ทวีปเอเชีย (ไทย และมาเลเซีย) บริเวณชายฝั่ง และหมู่เกาะแถบทวีปออสเตรเลีย

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ เตยหอมเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวลักษณะแตกออกเป็นพุ่มขนาดเล็ก ลำต้นเป็นข้อ ใบออกเป็นพุ่มบริเวณปลายยอด เมื่อเติบโตจะมีรากค้ำจุนช่วยพยุงลำต้นไว้ ใบเป็นใบเดี่ยวเรียงสลับเวียนเป็นเกลียวขึ้นไปจนถึงยอด ลักษณะใบยาวเรียวคล้ายใบหอก ปลายใบแหลม ขอบใบเรียบ ผิวใบเป็นมัน เส้นกลางใบเว้าลึกเป็นแฉ่ง ด้านท้องใบเป็นรูปคล้ายกระดุกงูเรือ ใบมีกลิ่นหอม (สุนทร, 2553)

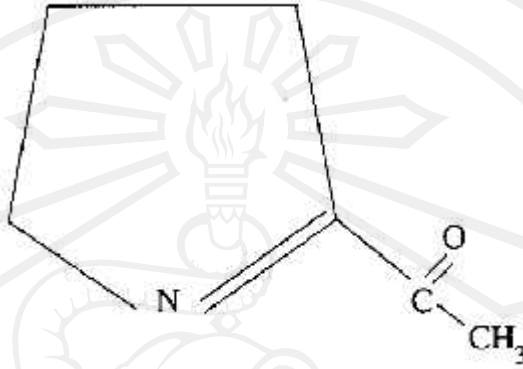
ประโยชน์ของเตยหอมตามสรรพคุณยาโบราณ รากใช้บำรุงหัวใจให้ชุ่มชื้นแก้กระษัย น้ำเบาพิการ ขับปัสสาวะ ละลายก้อนน้ำในไต รากอากาศ แก้หนองใน แก้พิษโลหิต ต้น ใช้ขับปัสสาวะ บำรุงหัวใจแก้อ่อนเพลีย แก้กระษัย น้ำเบาพิการ ส่วนใบ ใช้แก้ไข้ แก้อ่อนเพลีย แก้กระหายน้ำ แก้ร้อนใน แก้กระหายน้ำ แก้อ่อนเพลีย ขับปัสสาวะ บำรุงหัวใจ ชูกำลัง ดับพิษไข้ รักษาโรคหัด รักษาโรคสุกใส แก้โรคผิวหนัง ซึ่งในการสำรวจทางเภสัชวิทยาเมื่อปีพ.ศ. 2541 พบว่า สารสกัดจากรากของใบเตยมีผลช่วยลดระดับน้ำตาลในกระแสเลือดได้ (Peungvicha *et al*, 1998) ส่วนใบประกอบไปด้วยน้ำมันหอมระเหย

(essential oils) แคโรทีนอยด์ (carotenoids) โทโคฟีรอล (tocopherols) และโทโคไตรอินอล (tocotrienols) (Lee *et al*, 2004) เควอซีติน (quercetin) (Miean and Mohamed, 2001) แอลคาลอยด์ (alkaloids) (Busque *et al*, 2002) กรดไขมัน (fatty acids) และเอสเทอร์ (esters) (Zainuddin, 2004) และโปรตีนที่ทำหน้าที่ขนส่งไขมันแบบไม่เจาะจง (non-specific lipid transfer proteins) (Ooi *et al*, 2006) ในใบเตยมีน้ำมันหอมระเหย เรียกว่า Fragrant Screw Pine สารให้กลิ่นหลักที่สกัดได้จาก ส่วนใบของ *Pandanus amaryllifolius* Roxb. คือ 2-acetyl-1-pyrroline (2-AP) (Gangopadhyay *et al*, 2004) ใบเตยหอมมีการใช้ในทางยา ในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ใช้พื้นฟูร่างกาย ลดไข้ บรรเทาอาการอาหารไม่ย่อย และอาการท้องอืด (Cheeptham and Towers, 2002) อีกทั้งใบมีสีเขียวมักใช้สีมาผสมอาหาร หรือขนมให้น่ารับประทาน และในใบเตยมีน้ำมันหอมระเหยซึ่งมีกลิ่นหอมน่ารับประทานทำให้อาหารที่ใส่น้ำใบเตยมีรสหอมเย็นชื่นใจ

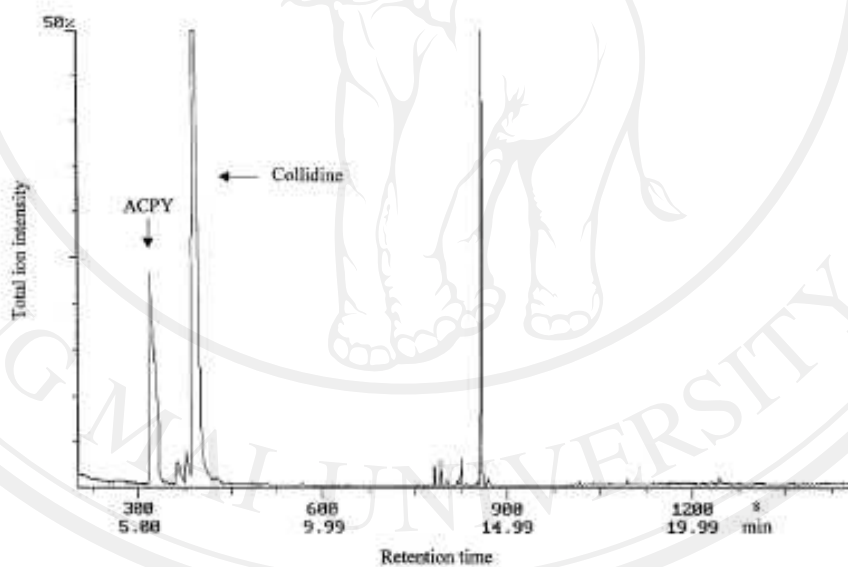
2.1.1 สารหอมหลักจากใบเตย

Buttery *et al.* (1983) ได้ค้นพบว่า สารที่ให้กลิ่นหอมหลักในใบเตยคือสารประกอบ 2-Acetyl-1-Pyrroline (ACPY) ซึ่งสกัดได้จากใบเตยที่ผ่านการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze drying) ด้วยชุดสกัดไอน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์แบบต่อเนื่อง (simultaneous steam distillation/solvent extraction apparatus) ซึ่งสารประกอบ ACPY ดังกล่าวเป็นสารประกอบประเภท heterocyclic มีโครงสร้างและลักษณะเป็นสารประกอบในกลุ่ม pyrrole ซึ่งเป็นวงขนาด 5 เหลี่ยมที่มีอะตอมไนโตรเจนอยู่ในวง มีพันธะคู่ระหว่างคาร์บอนกับไนโตรเจน (C=N) และมีหมู่ acetyl เกาะกับคาร์บอนที่เกิดพันธะดังรูปที่ 2.1 สารประกอบ ACPY จะมีลักษณะทางกายภาพเป็นของเหลวใสไม่มีสี มีสมบัติเป็นด่างเล็กน้อยสามารถระเหยได้ง่าย และไม่เสถียรเมื่ออยู่ในรูปสารบริสุทธิ์ (จริยาพร, 2544) สาร ACPY นอกจากจะเป็นสารประกอบหลักที่พบได้ในใบเตยแล้วยังสามารถพบได้ใน ข้าวโพดคั่ว ข้าวโพดหวานสด ข้าวโพดหวานแช่แข็ง ข้าวโพดหวานบรรจุกระป๋อง ข้าวหอมมะลิ ขนมันฝรั่งจากแป้งสาลี แป้งข้าวไรน์ที่ผ่านการอบใหม่ และในดอกชมนาด (Schieberle and Grosch, 1985; Buttery *et al.*, 1994; Buttery and Ling, 1995; สุกัญญา, 2540) นอกจากนี้ยังพบสาร ACPY ในกระบวนการผลิตต่างๆ โดยเฉพาะในกระบวนการทำอาหารให้สุกด้วยความร้อน เช่น ใน Baguette crusts (Zehentbauer and Grosch, 1998) กุ้งนางสายพันธุ์ *Procambarus clarkii* (Cadwallader and Baek, 1998) มันฝรั่งต้ม (Mutti and Grosch, 1999) เมล็ดมะม่วงหิมพานต์อบ สายพันธุ์ *Irvingia gabonensis* (Tairu *et al.*, 2000) ไม้กระถอกกระเทียมสไตส์อิตาลีและแฮมที่ผ่านความร้อน (Blank *et al.*, 2001) และกุ้งก้ามกราม (*Homarus americanus*) (Lee *et al.*, 2001) เป็นต้น

Apintanapong and Noomhorm (2003) ได้ตรวจสอบสารประกอบ ACPY ที่สกัดได้จากใบเตยด้วยวิธีการกลั่นด้วยไอน้ำ และใช้เทคนิค Gas chromatography-Mass spectrometry (GCMS) วิเคราะห์พบว่า มีเวลารีเทนชันเท่ากับ 5.33 นาทีดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของสารประกอบ 2-Acetyl-1-Pyrroline
ที่มา : Buttery *et al.* (1982)



รูปที่ 2.2 โครมาโตแกรมที่ได้จากสารสกัดจากใบเตยด้วยวิธีการกลั่นด้วยไอน้ำ
ที่มา : Apintanapong and Noomhorm (2003)

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Porrarud and Pranee (2010) ได้ศึกษาถึงการทำ Microencapsulation ของ Zn-chlorophyll จากใบเตย โดยใช้การทำแห้งแบบพ่นฝอย (spray drying) ซึ่งใช้ Zn-chlorophyll derivatives ที่สกัดจากใบเตย ทำการเปรียบเทียบตัวตว้ริง (wall material) 3 ชนิดคือ gum Arabic (GA), maltodextrin (MD) และ osa-modified starch (MS) โดยศึกษาลักษณะทางกายภาพทางเคมี สมบัติ และความคงตัว

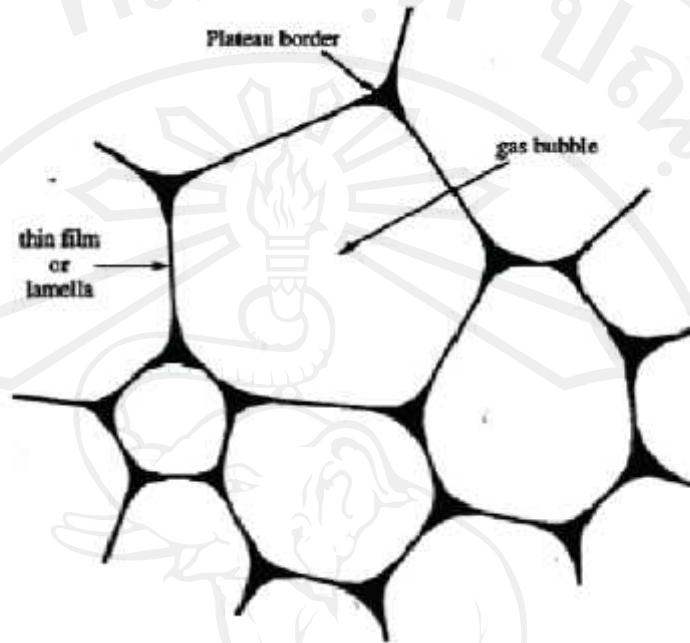
ของผง จากการทดลองพบว่า ผงที่ใช้ *osa-modified starch* มีลักษณะอนุภาคผงที่กลมผิวเรียบ ในขณะที่ผงที่ใช้ *gum Arabic (GA)*, *maltodextrin (MD)* มีการหดรัดตัวที่ผิวของอนุภาคผง การใช้ *modified starch 30%* จะทำให้ผง *Zn-chlorophyll* มีค่าสีเขียวสูงที่สุด คลอโรฟิลล์รวม และค่าการต้านอนุมูลอิสระคือ 14.64, 187.34 mg/100gfw และ 772.50 μ MTEAC/g fresh mass ตามลำดับ *modified starch* ยังสามารถรักษาอายุการเก็บได้นานที่สุด (462วัน) เมื่อเปรียบเทียบกับ *gum Arabic (GA)*, *maltodextrin (MD)* โดยที่ตัวอย่างผงมีค่าสีเขียว สารหอมระเหย 2-acetyl 1- pyrroline ที่เป็นลักษณะกลิ่นของใบเตย และสังกะสีมีปริมาณ 13.12 mg/kg ซึ่งปลอดภัยต่อการบริโภค

Loh *et al.* (2005) ได้ศึกษากระบวนการที่เหมาะสมในการผลิตใบเตยผง (*Pandanus amaryllifolius*) โดยใช้วิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอย โดยใช้วิธี *response surface methodology (RSM)* โดยตัวแปรคืออุณหภูมิขาเข้า (170-200 องศาเซลเซียส) อัตราการป้อน (6-12 รอบต่อนาที) และอุณหภูมิขาออก 90 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่า การประมาณค่าการตอบสนองของสัมประสิทธิ์ (R^2) สำหรับกายภาพทางเคมี ลักษณะของผง และทางด้านประสาทสัมผัส ค่าการตอบสนองของผงใบเตยมากกว่าและเท่ากับ 0.800 ยกเว้นการยอมรับโดยรวม กระบวนการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งโดยใช้วิธีการอบแห้งแบบพ่นฝอย เป็นเงื่อนไขที่จะทำให้ดัชนีการยอมรับด้านสีมีค่าสูง (เช่นค่า L, a และ b) ค่ากิจกรรมของน้ำต่ำ (a_w), การละลาย และค่าสีสูง, รส, กลิ่น และการยอมรับรวมสำหรับการตอบสนองทางประสาทสัมผัส โดยสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตใบเตยผงจะใช้อุณหภูมิขาเข้า 170 องศาเซลเซียส อัตราการป้อน 6 รอบต่อนาที และใช้อุณหภูมิขาออกคือ 90 องศาเซลเซียสจะผลิตใบเตยผงที่มีค่าสี กลิ่นรสได้ดีที่สุดที่ใช้วิธีการอบแห้งแบบพ่นฝอย

2.3 การเกิดโฟม (Foaming formation)

โฟมเป็นระบบคอลลอยด์ชนิดหนึ่งที่มีการผสมกัน และอยู่ร่วมกันของก๊าซกับของเหลว หรือก๊าซกับของแข็ง โดยที่ก๊าซเป็นอนุภาคที่กระจายตัว (disperse phase) อยู่ในของเหลวหรือของแข็งซึ่งเป็นส่วนที่ต่อเนื่อง (continuous phase) และมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศประมาณ 10^{-3} (Fennema, 1996) โดยแบ่งโฟมในเชิงคุณภาพออกเป็น 2 ประเภท (Dickinson, 1992) ได้แก่ Bubbly foams ในไอศกรีม และ Polyhedral foams ซึ่งโครงสร้างของฟองอากาศ มีการจัดเรียงตัวคล้ายรวงผึ้ง เช่น ฟองเบียร์อาหารที่มีสมบัติการเกิดโฟมต่ำจำเป็นต้องเติมสารก่อให้เกิดโฟม สารดังกล่าวนอกจากช่วยให้เกิดโฟมแล้ว ยังช่วยรักษาสภาพโฟมให้คงตัวอยู่ได้นานไม่เกิดการยุบตัว และการแตกของฟองอากาศ โดยเพิ่มความแข็งแรงให้กับ lamellae ซึ่งเป็นชั้นของเหลว ที่ชั้นกลางระหว่างฟองอากาศ ซึ่งกระจายตัวอยู่ในของเหลว และเมื่อจำนวนฟองอากาศเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจากการตี

บั้นจั่นของ lamellae ทั้ง 3 ด้านมาบรรจบกันเป็นรูปปริซึม ซึ่งจะเรียกปริซึมนี้ว่า Plateau border (Fennema, 1996) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 รูปแสดงโครงสร้างของโฟม
ที่มา โครงสร้างของโฟม(Wilde and Clark 1996)

ปกติโมเลกุลของสารที่ก่อให้เกิดโฟมนั้นประกอบไปด้วยส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophile) ซึ่งเป็นพวกอนุโมลอิสระที่มีประจุอยู่เช่น OH^- , COO^- , HN_2^+ และ N^+ เป็นต้น และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobe) ซึ่งเป็นส่วนของอนุพันธ์คาร์บอนอะตอมที่มีสายยาวๆ (aliphatic carbon chain) (สมบัติ, 2529) โดยสมบัติที่สำคัญของสารที่ก่อให้เกิดโฟม คือ สามารถลดแรงตึงผิว (interfacial tension) ของของเหลวได้อย่างรวดเร็วและสามารถสร้าง viscoelastic film ที่ต้านทานการยุบตัวหรือการแตกของฟองอากาศได้ดี (Dickinson, 1995) ของเหลวที่บริสุทธิ์จะให้โฟมที่ไม่คงตัว ฟองอากาศที่ใส่ลงไปได้ผิวจะแตกตัวเมื่อของเหลวที่กั้นระหว่างฟองได้ระบายออกไป การใส่สารที่ก่อให้เกิดโฟมจะช่วยให้ฟองอากาศอยู่ตัวดีขึ้น สารชนิดนี้จะเข้าไปอยู่ในผิวสัมผัสระหว่างฟองอากาศ และของเหลวในลักษณะของชั้นบางๆ โดยปกติสารที่ก่อให้เกิดโฟมจะมีสมบัติของสารช่วยกระจายไขมัน อย่างไรก็ตามโฟมจะแตกตัวได้ง่ายเมื่อมีการระเหยของของเหลวมีการสัมผัสกับฝุ่นละอองหรือมีการแพร่กระจายของแก๊ส โดยเฉพาะแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ความคงตัวของโฟมเหมือนกับความคงตัวของอิมัลชัน ฉะนั้นสารอิมัลซิไฟเออร์ต่างๆจึงช่วยให้เกิดโฟมได้ดี โดยสารเหล่านี้จะทำ

ให้เกิดชั้นของเหลวกั้นระหว่างฟองอากาศไว้ ความคงตัวของโฟม จะขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นของเหลวนี้ และอัตราความเร็วของการระบายของเหลวออกไปจากผิวของฟองอากาศ (ณรงค์, 2538)

2.3.1 กระบวนการทำให้เกิดโฟม

การทำให้เกิดโฟมเป็นขั้นตอนแรกของการทำแห้งแบบโฟมเมท เป็นระบบของสารแขวนลอยอย่างสมบูรณ์ของโฟมแก๊สในของเหลว ซึ่งแตกต่างจากโฟมของน้ำสบู่ซึ่งมีลักษณะเบา กว่ามาก โดยลักษณะโฟมที่พึงประสงค์ในการอบแห้งแบบโฟมเมทจะต้องมีความคงตัวดีในระหว่างการอบแห้งเพื่อให้โฟมยังคงมีลักษณะเป็นโฟมและแตกหักออกเป็นผงได้ง่าย อย่างไรก็ตาม โฟมที่คงตัวในบรรยากาศปกติบางครั้งก็ไม่เหมาะสมสำหรับการอบแห้ง (Hart *et al*, 1963) การก่อให้เกิดโฟมอย่างต่อเนื่องเกิดขึ้นได้โดยการเติมสารที่ทำให้คงตัว การเติมอากาศด้วยสัดส่วนที่ถูกต้อง การผสมของผสม 2 สถานะด้วยแรงเฉือนที่สูง และการทำให้โฟมเย็นลงเพื่อลดความร้อนที่เกิดจากการผสม ความหนาแน่นที่ดีของโฟม คือ ความหนาแน่นที่สูงที่สุดที่ทำให้เกิดโฟมที่คงตัว โดยทั่วไปอยู่ที่ประมาณ 0.4-0.6 กรัมต่อมิลลิลิตร ประกอบด้วยโฟมอากาศทรงกลม เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 0.1 มิลลิเมตรกระจายตัวอยู่ในของเหลว โฟมที่เบาประกอบด้วยช่องว่างของแก๊สที่ใหญ่กว่าโดยมีผนังของเหลวที่เกือบจะแบนราบกันอยู่นั้นไม่เหมาะกับการเติมอากาศเข้าไปในโฟม ทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพดีเท่ากับการใช้แก๊สเฉื่อย (Hart *et al*, 1963) Bates (1964) ศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการผลิตโฟมและความคงตัวของโฟมน้ำผลไม้เมื่อร้อนพบว่า ปัจจัยที่มีผลอย่างมากต่อการเกิดโฟมและความคงตัวของโฟม คือ ธรรมชาติทางเคมีของผลไม้ ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ อัตราส่วนของเนื้อผลไม้ ชนิดของสารที่ก่อให้เกิดโฟม ชนิดและความเข้มข้นของสารที่ทำให้โฟมคงตัว ส่วนปัจจัยที่มีความสำคัญน้อย คือ ความเข้มข้นของสารที่ก่อให้เกิดโฟม เวลาในการผสม และอุณหภูมิในการผสม ซึ่ง Pointing *et al*. (1973) รายงานว่า การเตรียมโฟมจะเตรียมในเครื่องผสมแบบต่อเนื่องและเติมสารที่ทำให้โฟมคงตัว ความเข้มข้นประมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนักแห้งลงไปที่การตีโฟมเป็นการเติมอากาศเข้าไปในอาหารเหลวซึ่งจะทำให้อาหารไม่เกาะตัวกันเป็นก้อน นำโฟมไปอบในเตาอบแห้งแบบสายพานต่อเนื่อง หรืออบแห้งในเตาอบแบบถาดต่อเนื่อง ในรูปแผ่นบางๆ โครงสร้างของโฟม และการจัดเรียงตัวของโฟมบนถาดที่เหมาะสมจะทำให้การอบแห้งเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว โฟมที่อบแห้งแล้วจะมีโครงสร้างเป็นรูพรุนอย่างมาก สามารถดูดซับน้ำให้เป็นผงซึ่งสามารถละลายน้ำได้ทันทีในน้ำเย็น ซึ่งจะรักษาคุณภาพของอาหารไว้ได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะอาหารที่ไวต่อการเสื่อมคุณภาพด้วยความร้อนนอกจากอาหารที่เป็นของเหลวแล้ว อาหารที่แห้งอยู่แล้วยังสามารถนำมาละลายหรือทำให้เป็นสารแขวนลอยแล้วนำไปอบแห้งแบบโฟม-เมท เพื่อให้ได้ของแข็งที่มีความหนาแน่นน้อยลง และมีการกระจายตัวได้ดีขึ้น

2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อความคงตัวของโฟม (นิธิยา, 2543)

ปัจจัยที่มีผลต่อความคงตัวของโฟมแบ่งออกได้เป็น 5 ปัจจัย ได้แก่

(1) การทำให้ของเหลวมีความหนืดสูงขึ้นจะทำให้โฟมมีความคงตัวมากขึ้น สารที่ช่วยเพิ่มความหนืดส่วนใหญ่เป็นพวกน้ำตาล และสารไฮโดรคอลลอยด์ สารพวกนี้นอกจากจะเพิ่มความหนืดแล้วยังลดแรงตึงผิวอีกด้วย

(2) ของเหลวที่มีแรงตึงผิวดำจะช่วยทำให้ของเหลวมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นรอบๆ ฟองอากาศโดยไม่บีบตัวให้ฟองอากาศแตกตัวเร็วเกินไป ดังนั้นการเปลี่ยนแรงตึงผิวของฟิล์มสามารถทำให้เกิดโฟมหรือเกิดการยุบตัวของโฟมได้

(3) ของเหลวต้องมีความดันไอต่ำ เพราะทำให้ของเหลวกลายเป็นไอได้ยาก หรือของเหลวจะระเหยได้ช้า ถ้าของเหลวมีความดันไอสูงจะกลายเป็นไออย่างรวดเร็ว ทำให้ฟิล์มที่ล้อมรอบฟองอากาศบางลง และโฟมจะยุบตัว (bubble collapse)

(4) การเกิดฟิล์มของอนุภาคฟองอากาศโฟมที่มีความคงตัว ฟิล์มที่เกิดขึ้นต้องมี degree of surface elasticity และ surface viscosity สูง

(5) สารที่จะช่วยให้โฟมมีความแข็งตัว (rigidity) ที่ระหว่างผิวของก๊าซ และของเหลว เช่น โปรตีนที่มีอยู่ในอาหาร เมื่อทำให้เกิดโฟมโดยการตีโปรตีนจะเสียสภาพขณะตีจะช่วยทำให้โฟมมีความแข็งตัว และคงตัวมากขึ้นด้วย

2.2.3 วิธีการตรวจสอบคุณภาพของโฟม

คุณภาพของโฟมที่เกิดจากการตีปั่นส่วนผสมมีผลต่อสภาวะการอบแห้งและคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง ดังนั้นจำเป็นต้องมีการตรวจสอบคุณภาพของโฟมที่ได้ ดังนี้

(1) การวัดความหนาแน่นของโฟม (ดัดแปลงจากวิธีของ Akintoye and Oguntunde, 1991) จากการนำโฟมที่ต้องการวัดความหนาแน่น บรรจุลงในถ้วยพลาสติก บรรจุให้เต็มไม่ให้มีโพรงอากาศภายในถ้วยเกลี่ยโฟมที่เส้นบริเวณปากถ้วยด้วยพายยาง เช็ดบริเวณรอบนอกถ้วยให้มีเศษโฟมเหลืออยู่ จากนั้นชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของถ้วยที่บรรจุโฟมนั้น นำมาคำนวณหาความหนาแน่นของโฟม ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ความหนาแน่นของโฟม (กรัมต่อมิลลิลิตร)} &= \frac{\text{น้ำหนักของโฟม}}{\text{ปริมาตรของถ้วย}} \\ &= \frac{\text{น้ำหนักของถ้วยเมื่อบรรจุโฟม} - \text{น้ำหนักถ้วย}}{\text{ปริมาตรของถ้วย}} \end{aligned}$$

(2) การวัดความคงตัวของโฟม (Sauter and Montoure, 1972) โดยบรรจุโฟมลงในกรวยกรองที่ทราบปริมาตร โดยรองรับของเหลวที่แยกตัวออกมาด้วยกระบอกตวงขนาด 100 มิลลิลิตร ในช่วงเวลา 60 นาที บันทึกปริมาตรของของเหลวที่แยกออกมาทุกๆ 15 นาที

(3) ค่า overrun (Kirk and Sawyer, 1991) โดยชั่งน้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรของส่วนผสมก่อนตีโฟม และน้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรของโฟม และคำนวณหา overrun ดังนี้

$$\text{overrun} = \frac{\text{น้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรของส่วนผสม} - \text{น้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรของโฟม} \times 100}{\text{น้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรของโฟม}}$$

2.4 เทคโนโลยีการทำแห้งแบบโฟมเมท (Foam-mat drying)

เป็นกระบวนการทำแห้งที่ต้องทำให้อาหารเหลวที่ต้องการทำให้แห้ง มีลักษณะเป็นโฟมที่คงตัวในระหว่างการทำแห้ง กระบวนการทำให้เกิดโฟมทำได้โดยการนำอาหารเหลวมาตีโดยใช้เครื่องตีความเร็วสูง เพื่อเป็นการเติมอากาศเข้าไปในอาหาร อาหารบางชนิด เช่น นํ้านม ไข่ขาว เมื่อนํ้ามาตีสามารถเกิดโฟมขึ้นได้ เนื่องจาก อาหารเหล่านี้มีองค์ประกอบของโปรตีนและสารโมโนกลีเซอไรด์ ซึ่งมีสมบัติทำให้เกิดโฟมและรักษาโฟมให้คงทนแข็งแรง แต่อาหารบางชนิด เช่น นํ้าส้มคั้น จำเป็นต้องมีการเติมสารก่อให้เกิดโฟมลงไปด้วย จึงจะได้โฟมที่คงทน จากนั้นโฟมที่ได้จะถูกนำไปเกลี่ยให้เป็นแผ่นบางบนถาด หรือสายพานแล้วจึงนำไปทำแห้ง ผลผลิตทันทีที่ได้หลังจากการอบจะถูกนำไปบดเป็นผง (รัตนา, 2547)

2.5 ข้อดีของการทำแห้งแบบโฟมเมท (รัตนา, 2527)

(1) ใช้ได้ดีกับอาหารเหลวหรืออาหารกึ่งเหลวที่มีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบสูง โดยยังสามารถรักษาสีและกลิ่นไว้ได้ ขณะที่กระบวนการทำแห้งอื่นๆ เช่น การทำแห้งแบบพ่นฝอย (spray drying) การทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (drum drying) ไม่สามารถทำได้

(2) เป็นการทำแห้งที่ใช้ระยะเวลาอบแห้งน้อยมาก น้อยกว่ากระบวนการทำแห้งอื่นๆ ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำกว่าวิธีอื่น

(3) คุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารที่ได้ สามารถรักษาสี กลิ่น และความสามารถในการคืนรูปไว้ได้ดีกว่า การทำแห้งโดยใช้ลมร้อนแบบอื่นๆ และมีคุณภาพใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ที่ทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze drying)

(4) ผลิตภัณฑ์อาหารที่ได้มีลักษณะเป็นผง มีน้ำหนักเบา และสามารถเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องได้ ทำให้ค่าใช้จ่ายในการขนส่งต่ำ

2.6 สมบัติของสารก่อโฟมที่เลือกใช้

2.6.1 สารก่อโฟม

สารที่ก่อให้เกิดโฟม หมายถึง สารที่มี surface active ต่ำใช้สำหรับเติมลงในอาหารเหลวเพื่อช่วยให้เกิดโฟมเมื่อนำไปตีในเครื่องตี สารที่ก่อให้เกิดโฟมที่เลือกใช้สำหรับอาหารควรมีคุณสมบัติ ดังนี้

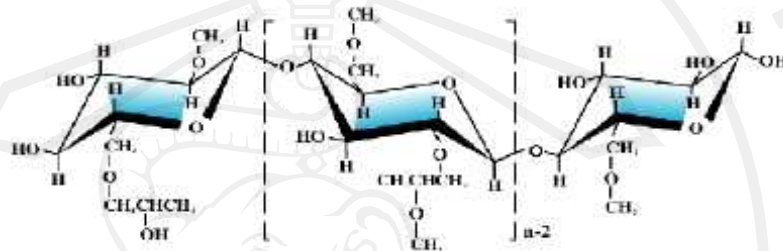
- (1) ต้องไม่มีรสชาติและไม่ทำปฏิกิริยากับอาหาร
- (2) สามารถทำให้เกิดโฟมได้ดีเมื่อใช้ในปริมาณต่ำและปลอดภัยสำหรับการบริโภค

สารที่ก่อให้เกิดโฟมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ได้แก่

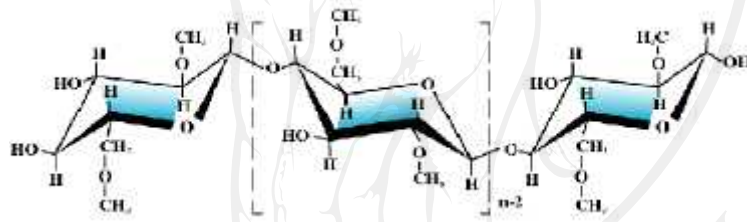
(1) เมทโทเซล[™] (Methocel[™])

เป็นสารช่วยให้โฟมคงตัวชนิดหนึ่ง โดยมีสายโพลิเมอร์ของเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบเคมีหลัก ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยา ลักษณะเป็นผงที่มีความบริสุทธิ์สูงและให้พลังงานต่ำ ไม่ให้กลิ่นรสกับอาหารที่ถูกเติมลงไปและใช้ในปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมทโทเซลสามารถละลายน้ำได้ มีสมบัติเป็นสารยึดเกาะ (binders) สารช่วยให้เกิดการแขวนลอย (suspension agents) สารช่วยให้มีลชั้นคงตัว (emulsifier) สเตบิลไลเซอร์ (stabilizer) และสารป้องกันไม่ให้สารแขวนลอยแยกตัว (protective colloid) นอกจากนั้นยังแสดงสมบัติเป็นสารหล่อลื่น รักษาความชื้นให้กับอาหาร และให้ความคงตัวกับอาหารระหว่างการแช่แข็ง และละลายน้ำแข็ง ที่สำคัญคือ เมทโทเซล[™] เป็นกัมที่มีสมบัติเป็นเจล สามารถเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ (thermally gel) สามารถทำหน้าที่เป็นตัวลดแรงตึงผิว (surfactant) ทำให้เกิดสภาพฟิล์มขึ้น (film forming) ในอาหารได้ทั้งที่อุณหภูมิสูงและต่ำ ซึ่งเป็นสมบัติที่ดีในการเป็นสารช่วยให้โฟมคงตัวในอาหารที่ต้องการทำแห้งแบบโฟม และสามารถแบ่งเมทโทเซล[™] ตามชนิดของ cellulose ethers ภายในองค์ประกอบทางเคมีได้เป็น 2 ชนิด คือ methyl cellulose และ hydroxypropyl methylcellulose โครงสร้างทางเคมีของเมทโทเซล[™] ทั้ง 2 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 2.4 และ 2.5 มีโครงสร้างเป็น polymeric backbone cellulose ซึ่งมีโครงสร้างพื้นฐาน คือ anhydroglucose unit โดยความแตกต่างของเมทโทเซล[™] ชนิดต่างๆ เกิดจากการผันแปรสัดส่วนของหมู่แทนที่ที่เป็น hydroxypropyl กับ methoxyl สัดส่วนดังกล่าวนี้จะทำให้ความสามารถ ในการละลาย ความหนืด และอุณหภูมิเริ่มเกิดเจล (thermal gel point) ของสารละลายเมทโทเซล[™] แตกต่างออกไป เมทโทเซล[™] ละลายน้ำที่อุณหภูมิห้องไม่ได้ แต่สามารถกระจายตัวได้ดีในน้ำร้อน ซึ่งต้องมีอุณหภูมิของน้ำสูงเกินค่าเฉพาะค่าหนึ่ง หลังจากเมทโทเซล[™] กระจายตัวในน้ำ และทุกอนุภาคเปียกแล้วการละลายของเมทโทเซล[™] จะเกิดขึ้นต่อเมื่อลดอุณหภูมิของน้ำให้ต่ำลง (รูปที่ 2.6) แสดงขั้นตอนการละลายของเมทโทเซล[™] เมื่อโมเลกุลน้ำจับกับสายโพลิเมอร์เมทโทเซล[™] อย่างสมบูรณ์ ทำให้เกิดการคลายตัวของสายโพลิเมอร์เมทโทเซล[™] จากที่จับซ้อนเมื่อเริ่มต้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นสายโพลิเมอร์จะปล่อยโมเลกุลของน้ำออกมา ทำให้ความหนืดลดลงไป จนกระทั่งอุณหภูมิสูงถึงจุดเริ่มเกิดเจล

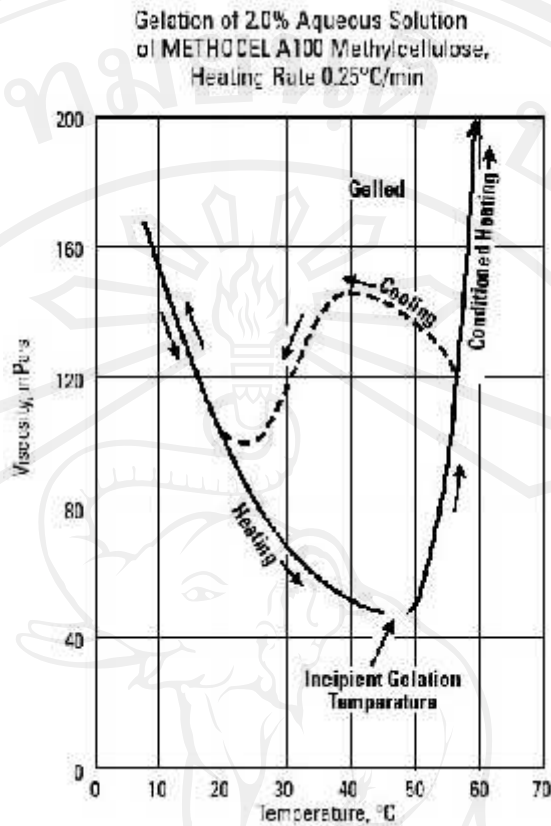
(incipient gelation temperature) สายโพลิเมอร์ที่ปราศจากน้ำนี้จะจับกัน และสารละลายเริ่มเกิดเจล ความแข็งแรงของเจลเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แต่มีค่าความแข็งแรงต่อไปได้อีกเพียงเล็กน้อย หลังจากนั้น ปฏิกิริยาจะเริ่มผันกลับ และความหนืดจะลดลงอย่างรวดเร็ว จนในที่สุดกราฟลดลงมาจนบรรจบ กราฟเดิมเมื่อเริ่มต้นให้ความร้อน โดยกลไกนี้สามารถทำซ้ำได้อีกหลายครั้งตามต้องการเพราะเจลของ เมทโรเซลTM มีคุณสมบัติผันกลับได้ (reversible) (กัลยาณี, 2540)



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างของไฮดรอกซีโพรพิล เมทิล เซลลูโลส
ที่มา Dow Chemical Company (2002)



รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของ เมทิล เซลลูโลส
ที่มา Dow Chemical Company (2002)



รูปที่ 2.6 ผลของการเพิ่มและลดอุณหภูมิต่อความข้นหนืดและการเกิดเจลของเมทโซเซลTM
ที่มา Dow Chemical Company (2002)

Karim and Wai (1999) ได้ศึกษาการทำมะเฟืองผงโดยการแบบแห้งแบบโพร-เมท โดยเตรียมโพรจากเนื้อมะเฟืองสดและใช้เมทโซเซล 65 เอชจี (methocel 65 HG) เป็นสารก่อโพรที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.1-0.4 โดยน้ำหนักพบว่าที่ความเข้มข้นของเมทโซเซล 65 เอชจี ร้อยละ 0.4 โดยน้ำหนัก ค่า overrun และความคงตัวของโพรมีค่าสูงสุด ซึ่งค่าของทั้งสองตัวนี้จะผันแปรตามความเข้มข้นของเมทโซเซล 65 เอชจี เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้งจาก 70 องศาเซลเซียส เป็น 90 องศาเซลเซียสจะลดเวลาในการทำแห้งลงถึง 30 นาที แต่อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นนี้ส่งผลให้เกิดสีน้ำตาลอ่อนและทำให้กลิ่นของมะเฟืองลดลง Raharitsifa and Ratti (2009) ได้ศึกษาถึงการใส่เมทโซเซลเพื่อเป็นสารก่อโพรให้กับน้ำแอปเปิล โดยใช้เมทโซเซลที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 ผันแปรความหนืดของตัวอย่างน้ำแอปเปิลที่ทำให้เกิดโพรกับน้ำแอปเปิลธรรมดาเป็น 4 ระดับ คือ 1, 4, 6 และ 8 เซนติเมตร แล้วแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นทำการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะสุญญากาศ สุ่มตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ปริมาณความชื้นที่เวลา 1, 3, 5, 7, 9, 12, 18, 24 และ 48 ชั่วโมง พบว่า การขึ้นโพรช่วยในการลดเวลาที่ใช้ในกระบวนการทำแห้งเมื่อ

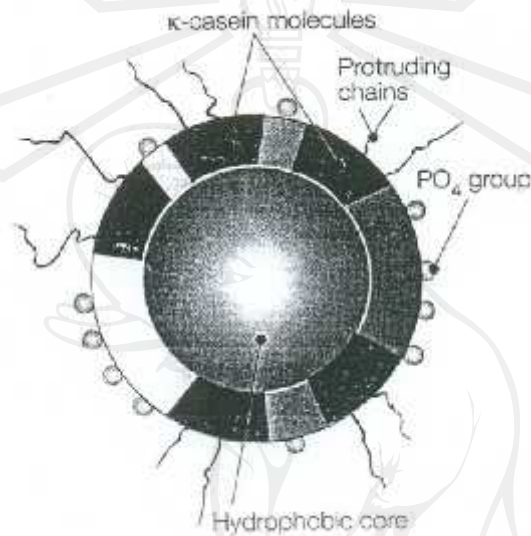
เปรียบเทียบกับตัวอย่างที่มีปริมาณความหนาเท่ากัน แต่ความหนาแน่นที่ต่ำกว่าของโฟมนั้นจะลดน้ำหนักที่ใช้ในการทำแห้งลงทำให้ปริมาณผงที่ได้น้อยลงเมื่อเทียบกับน้ำแอปเปิลที่ไม่ขึ้นโฟม

(2) อัลบูมินจากไข่ (Egg albumin)

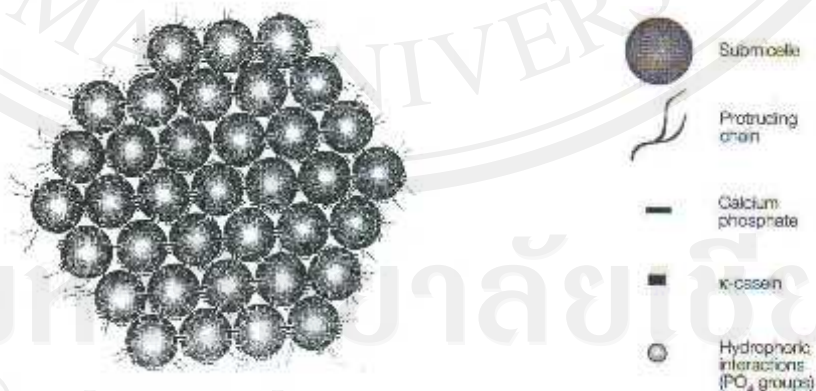
อัลบูมินจากไข่ เป็นโปรตีนในกลุ่มของ simple protein ซึ่งอัลบูมินเป็นกลุ่มของโปรตีนที่ละลายได้ดีในน้ำและมีน้ำหนักโมเลกุลค่อนข้างต่ำ เสถียรภาพธรรมชาติได้ง่ายด้วยความร้อน (นิธิยา, 2551) อัลบูมินจากไข่มีสมบัติในการทำให้เกิดความคงตัว ช่วยให้เกิดการขึ้นฟู การเกิดโฟม ทำให้เกิดลักษณะปรากฏและเนื้อสัมผัสที่ดี (ศิริลักษณ์ และกมลวรรณ, 2544) Falade *et al.* (2003) รายงานว่าการทำแห้งแบบโฟม-เมทของ cowpea ที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดร้อยละ 22, 25 และ 28 โดยใช้ Glycerol monostearate (GMS) และอัลบูมินจากไข่ เป็นสารก่อโฟมที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 2.5, 5.0, 7.5, 12.5 และ 15 โดยน้ำหนัก เวลาที่ใช้ในการตีโฟม 3, 6, 9, 12, 15, 18 และ 21 นาที อุณหภูมิในการเกิดโฟม 15, 25 และ 35 องศาเซลเซียสและทำแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 นาที พบว่าหลังจากนาที่ที่ 9 และ 21 ในการตีปั่นโฟมโดยใช้ GMS และอัลบูมินจากไข่ เป็นสารก่อโฟม พบว่าโฟมที่เกิดจากการเติมอัลบูมินจากไข่ไม่มีความคงตัวในระหว่างการทำแห้ง Garcia *et al.* (1988) ใช้ไข่ขาวผงปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เป็นสารก่อโฟม จากการทดลองพบว่าไข่ขาวผงเป็นสารก่อโฟมที่ดีสามารถลดความหนาแน่นของกล้วยได้และเมื่อพิจารณาอัตราการอบแห้งของแผ่นโฟมกล้วยหั่นขึ้นพบว่า การอบแห้งแผ่นโฟมกล้วยจะให้อัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งกล้วยหั่นขึ้นถึง 2 เท่า แต่ไม่มีการศึกษาถึงคุณภาพของแผ่นโฟมกล้วยเมื่อผ่านการอบแห้ง รติยาและคณะ (2550) ได้ศึกษาการอบแห้งแผ่นโฟมที่ทำจากกล้วยสุกโดยใช้ไข่ขาวเป็นสารก่อโฟม พบว่ากล้วยสุกสามารถทำให้เป็นโฟมได้โดยใช้ไข่ขาวสดปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักเป็นสารก่อโฟม Raharitsifa and Ratti (2009) ได้ศึกษาถึงการไข่ไข่ขาว เพื่อเป็นสารก่อโฟมให้กับน้ำแอปเปิล โดยใช้ไข่ขาวที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 ผันแปรความหนาของตัวอย่างน้ำแอปเปิลที่ทำให้เกิดโฟมกับน้ำแอปเปิลธรรมดาเป็น 4 ระดับ คือ 1, 4, 6 และ 8 เซนติเมตร แล้วแช่เยือกแข็ง ที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นทำการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะสูญญากาศ สุ่มตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ปริมาณความชื้นที่เวลา 1, 3, 5, 7, 9, 12, 18, 24 และ 48 ชั่วโมง พบว่าการขึ้นโฟมช่วยในการลดเวลาที่ใช้ในกระบวนการทำแห้งลง เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่มีปริมาณความหนาเท่ากัน แต่ความหนาแน่นที่ต่ำกว่าของโฟมนั้นจะลดน้ำหนักที่ใช้ในการทำแห้งลงทำให้ปริมาณผงที่ได้น้อยลงเมื่อเทียบกับน้ำแอปเปิลที่ไม่ขึ้นโฟม

(3) โซเดียมเคซีเนต (Sodium caseinate)

โซเดียมเคซีนเป็นโปรตีนที่ได้จากการตกตะกอนของเคซีนน้ำนม ซึ่งเคซีนจะอยู่ในสภาพไมเซลล์ แสดงดังรูปที่ 2.7 ประกอบด้วยไมเซลล์ย่อย (submicelle) ซึ่งมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.8 มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 – 15 นาโนเมตร (Bylund, 1995) เคซีนไมเซลล์จะประกอบด้วยเคซีนกลุ่มย่อย ๆ ได้แก่ แอลฟา – เอส – เคซีน แคลป์า – เคซีน บีตา - เคซีน และ แกมมา – เคซีน ในจำนวนที่แตกต่างกันทำให้ขนาดของเคซีนไมเซลล์แตกต่างกัน



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของเคซีนสับไมเซลล์ ที่มา (Bylund, 1995)



รูปที่ 2.8 โครงสร้างเสถียรของเคซีนไมเซลล์ ที่มา (Bylund, 1995, p.24)

2.1.1 แอลฟา – เคซีน (α - casein) เป็นสายเพปไทด์ (peptide chain) ที่มีกรดอะมิโนจำนวน 199 หน่วย (residue) มีน้ำหนักโมเลกุล 23 กิโลดอลตัน (Kdal) เมื่อมีแคลเซียมไอออน (Ca^{2+} ion) จะ

ทำให้แอลฟา – เอส 1 – เคซีน (α_1 -casein) ไม่ละลาย โดยจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของกรดอะมิโนบนสายเพปไทด์ และเกิดการตกตะกอน

(1) แอลฟา – เอส 1 – เคซีน ประกอบด้วย กรดอะมิโนจำนวน 100 ถึง 199 หน่วยเป็นพวกที่ไม่มีขั้ว (apolar)

(2) แอลฟา – เอส 2 – เคซีน (α_2 -casein) มีโครงสร้างแบบมีขั้วและไม่มีขั้ว (dipolar structure) เมื่อมีแคลเซียมไอออน แอลฟา-เอส 2-เคซีน จะตกตะกอนง่ายกว่าแอลฟา-เอส 1-เคซีน

2.1.2 บีตา – เคซีน (β - casein) เป็นสายเพปไทด์ที่มีกรดอะมิโนจำนวน 209 หน่วยมีน้ำหนักโมเลกุล 24.5 กิโลดอลตัน ปลายข้างหนึ่งของสายเพปไทด์เป็นพวกมีขั้ว (polar head) ส่วนปลายอีกข้างหนึ่งเป็นพวกไม่มีขั้ว (apolar tail) สามารถตกตะกอนได้เมื่อมีแคลเซียมไอออน

2.1.3 แคปป์ตา – เคซีน (K - casein) เป็นสายเพปไทด์ที่มีกรดอะมิโนจำนวน 169 หน่วยมีน้ำหนักโมเลกุล 18 กิโลดอลตัน มีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบ คือ น้ำตาลกาแล็กโทสร้อยละ 1 สารประกอบกาแล็กโทซามีนร้อยละ 1.2 และกรดเอ็น – แอซิติลนิวรามิก (N - acetylneuramic) ร้อยละ 2.4 แคปป์ตา – เคซีน เป็นโปรตีนที่สำคัญที่ช่วยให้แอลฟา – เคซีน และบีตา – เคซีน ไม่เกิดการตกตะกอนเมื่อมีแคลเซียมไอออน และช่วยให้เคซีนไมเซลล์เกิดความคงตัว (Belitz & Grosch, 1999)

2.1.4.แกมมา – เคซีน(γ -casein) มีประมาณร้อยละ 3 ของเคซีนทั้งหมดมีน้ำหนักโมเลกุล 20,500 เป็นเคซีนที่แยกได้จาก β -เคซีน ตรงตำแหน่งกรดอะมิโนลำดับที่ 29-209 (Walstra, 1999)

เคซีนไมเซลล์ในน้ำนมมีคุณสมบัติเป็นคอลลอยด์ ลักษณะเป็นอนุภาคทรงกลม (globular particle) และยังอยู่ในสภาพของเกลือแคลเซียม จึงเรียกว่า แคลเซียมเคซิเนต (calciumcaseinate) แต่ละไมเซลล์ประกอบด้วยองค์ประกอบทั้งหมดของเคซีน คือ แอลฟา – เอส บีตา แคปป์ตา และแกมมา โดยจะอยู่รวมกันกับแคลเซียมฟอสเฟต ดังนั้น เคซีนจึงไม่ได้อยู่ในสภาพของสารละลายในน้ำนม แต่เป็นคอลลอยด์ที่แขวนลอยอยู่ตลอดเวลา อัตราส่วนของเคซีนแต่ละชนิดที่ประกอบเป็นไมเซลล์จะแตกต่างกันออกไป พบว่า มากกว่าร้อยละ 50 ของไมเซลล์ประกอบด้วย เคซีนชนิดต่าง ๆ ในอัตราส่วน 3 แอลฟา – เอส 1 บีตา 1 แคปป์ตา 0 แกมมา (วรรณ และวิบูลย์ศักดิ์, 2531.)

ในทางอุตสาหกรรมจะเตรียมเคซีนได้จากหางนมหรือนมพร้อมมันเนย โดยใช้วิธีการตกตะกอนด้วยกรด หรือด้วยวิธีการทำให้น้ำนมตกตะกอนด้วยแบคทีเรีย หรืออาจใช้วิธีเติมเอนไซม์เรนเนต (rennet) เอนไซม์เรนเนตหรือเอนไซม์เรนนิน (rennin) เป็นเอนไซม์ที่ทำให้เคซีนเกิดการตกตะกอนโดยมีการตัด (cleave) เฉพาะระหว่างพันธะเพปไทด์ที่มีการเชื่อมต่อระหว่างฟีนิลอะลานีน (phenylalanine) และเมธิโอนีน (methionine) ในตำแหน่งที่ 106 ได้เป็น 2 ส่วน คือพารา – แคปป์ตา – เคซีน (para - K - casein) และไกลโคเพปไทด์ (glycopeptide) ไกลโคเพปไทด์มีคุณสมบัติละลายน้ำ

ได้ แต่พารา-แคปทา-เคซีน จะตกตะกอนเมื่อมีแคลเซียมไอออน ดังนั้นเมื่อเติมเอนไซม์ชนิดนี้ลงไป ในน้ำนม จึงทำให้เคซีนเกิดการตกตะกอน (Belitz and Grosch, 1999)

หากใช้กรดเป็นตัวตกตะกอน ประจุไฟฟ้าของเคซีนจะถูกทำให้เป็นกลาง โดยปกติแล้วความเป็นกรดของน้ำนมประมาณ พีเอช 6.6 ซึ่งมีฤทธิ์เป็นกรดเล็กน้อย หากลดพีเอชต่ำลงด้วยการเติมกรดซ้ำ ๆ เคซีนจะไม่คงตัว และตกตะกอนที่ พีเอช 4.7 เรียกสภาวะของความเป็นกรดขณะนี้ว่า ไอโซอิเล็กทริกพอยต์ (isoelectric point) ของเคซีน ซึ่งเป็นสภาวะที่เคซีนมีประจุไฟฟ้ารวมเท่ากับศูนย์ (สภาพเป็นกลาง) กรดที่สามารถใช้ตกตะกอนเคซีน ได้แก่ กรดแล็กติก กรดเกลือกรดอะซิติก และกรดซัลฟิวริกเคซีนเมื่อถูกทำให้ตกตะกอนแล้วจะถูกกรองแยกออกมาทำให้แห้ง หรืออาจทำให้เป็นเกลือเคซิเนต (caseinate salt) ด้วยการเติมสารละลายต่าง หากใช้เอนไซม์ตกตะกอน พบว่า เคซีนจะถูกเปลี่ยนไปเป็น พารา-เคซีน (para-casein) ซึ่งพบในเนยแข็งทั่วไปเมื่อนำเคซีนมาเติมน้ำและทำให้มีฤทธิ์เป็นกลางด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์จนได้พีเอชเท่ากับ 7.0 เคซีนซึ่งเดิมอยู่ในสภาพบริสุทธิ์จะถูกเปลี่ยนเป็นเกลือของโซเดียม หรือเรียกว่า โซเดียมเคซิเนต (sodium caseinate) ซึ่งสามารถละลายน้ำได้ดีกว่าในสภาพของเคซีน โดยปกติมักทำให้เป็นสารละลายโซเดียมเคซิเนตที่มีความเข้มข้นต่ำกว่าร้อยละ 15 เนื่องจากถ้ามีความเข้มข้นสูงกว่านี้สารละลายมีความหนืดสูง แต่เมื่อนำสารละลายไปทำให้ร้อนที่อุณหภูมิ 160 – 180 °F (70 – 80 °C) จะสามารถลดความหนืดลงได้ หรืออาจทำให้แห้งด้วยระบบสเปรย์หรือด้วยระบบลูกกลิ้ง (roller drying) แต่การทำแห้งด้วยระบบสเปรย์จะได้เกลือเคซิเนต ที่มีคุณภาพดี มีความเบา และความหนาแน่นรวม (bulk density) ต่ำ

เกลือโซเดียมเคซิเนตเป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลายในผลิตภัณฑ์ไอศกรีม เนยแข็งในปัจจุบันใช้เติมในกาแฟ เรียกว่าเป็น ครีมเทียม (non dairy coffee whitener) และด้วยเหตุที่โซเดียมเคซิเนตมีคุณสมบัติอุ้มน้ำได้ดี จึงนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมอบ และผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์สารดังกล่าวสามารถลดการหดตัว ตลอดจนลดการสูญเสียไขมันขณะนำเนื้อสัตว์มาปรุงอาหาร โดยทั่วไปโซเดียมเคซิเนตเป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลายในผลิตภัณฑ์อื่นมากกว่าในผลิตภัณฑ์นม (วรรณ และวิบูลย์ศักดิ์, 2531)

2.7 การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying or lyophilization)

การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง เป็นกระบวนการทำแห้งที่ใช้กระบวนการระเหิดของน้ำแข็งซึ่งเป็นกลไกหลักของการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็ง โดยน้ำที่สภาวะของเหลวจะถูกทำให้อยู่ในสถานะของแข็งระหว่างการแช่เยือกแข็งเบื้องต้น หลังจากนั้นจะถูกกำจัดออกโดยการระเหิด ในระหว่างสภาวะการทำแห้งขั้นต้นภายใต้สภาวะการทำแห้งต่ำกว่าจุด triple point ของน้ำ คือ 0 °C และความดัน 611 Pa การที่มีอุณหภูมิต่ำและความดันต่ำร่วมกับการไม่มีน้ำที่เป็นของเหลว และออกซิเจนช่วยให้เกิดโครงสร้างรูพรุนเริ่มต้นและรักษาความเป็นรูพรุนที่เพิ่มสูงขึ้นไว้ได้ในระหว่าง

การทำแห้ง ซึ่งปัจจัยดังกล่าวยังช่วยลดการเสียดสภาพเนื่องจากความร้อนและการใช้สารเคมีอีกด้วย ดังนั้นการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็งจึงเป็นกระบวนการทำให้แห้งที่นิยมสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีความไวต่อความร้อน อย่างไรก็ตามเนื่องจากราคาในการทำให้แห้งด้วยกระบวนการนี้มีราคาสูง การนำกระบวนการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็งนี้ไปประยุกต์ใช้จะถูกจำกัดในผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูง ได้แก่ ยา ผลิตภัณฑ์ทางชีวภาพ และอาหารที่มีคุณภาพ (Song *et al.*, 2005) แม้ว่าการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นกระบวนการทำให้แห้งที่มีค่าใช้จ่ายสูง แต่ค่าใช้จ่ายอาจจะลดลงได้ ถ้ากระบวนการทำให้แห้งใช้ระยะเวลาสั้น (Lin *et al.*, 2005) การทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นกระบวนการทำให้แห้งสำหรับวัสดุที่มีความไวต่อความร้อนเช่น อาหาร ยา วัตถุชีวภาพ (Wang and Chen, 2005) และผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูง เช่น เนื้อ กาแฟ ปลาอาหารทะเลบางชนิด และผลไม้ เป็นต้น (Onwulata, 2005) เนื่องจากเป็นเทคนิคการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี และการสูญเสียเนื่องจากความร้อน (Schoug *et al.*, 2006) โดยทั่วไปการทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการ มีความจำเป็นก่อนการผลิตในระดับอุตสาหกรรมเพื่อหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุดสำหรับผลิตภัณฑ์คุณภาพสูง แต่อย่างไรก็ตามการทดสอบการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งนั้นมีมูลค่าสูง กินระยะเวลา และยุ่งยาก โมเดลของกระบวนการผลิตสามารถช่วยไม่เพียงแต่เลือกสภาวะ และตารางการทำงานที่เหมาะสมเท่านั้นยังสามารถวิเคราะห์กลไกของการขนส่งได้อีกด้วย เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบเครื่องทำแห้ง (Wang and Chen, 2005)

กระบวนการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็งเกิดขึ้นใน 3 ขั้นตอน (วิล, 2546) คือ

ขั้นตอนการแช่เยือกแข็ง (Freezing stage) คือการทำให้ น้ำในผลิตภัณฑ์แข็งตัวโดยการนำอาหารมาแช่แข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของสารละลายในอาหารนั้น จนทำให้องค์ประกอบทุกอย่างที่สามารถแข็งตัวได้ ในอาหารเกิดการแข็งตัวอย่างสมบูรณ์

ขั้นตอนการระเหิด (Primary drying stage) การระเหิดเอาส่วนของสารละลายที่แข็งตัวออกจากผลิตภัณฑ์โดยการลดความดันรอบๆชิ้นอาหารให้ต่ำลง จนน้ำแข็งเกิดการระเหิดอย่างต่อเนื่อง

ขั้นตอนการระเหย (Secondary drying stage) คือการระเหยเอาสารละลายเข้มข้นที่ไม่แข็งตัวในผลิตภัณฑ์ออก ซึ่งต้องมีการให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย

จากหลักการดังกล่าวสามารถนำมาทำอาหารแห้งได้

กระบวนการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็งประกอบด้วยกระบวนการ 2 ขั้นตอน คือในขั้นตอนแรก ผลิตภัณฑ์ถูกแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการยุบตัวของโครงสร้างผลิตภัณฑ์ (collapse temperature, T_c) ซึ่งการทำให้แห้งระยะแรกเกิดขึ้นหลังจากผ่านกระบวนการแช่เยือกแข็งแล้ว ความดันของห้องอบ มีค่าต่ำลง ในขณะที่อุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น และน้ำอิสระถูกกำจัดโดยการระเหิด นอกจากนี้การทำให้แห้งในระยะเริ่มต้นอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์จะถูกรักษาไว้ให้ต่ำกว่า

critical thermal threshold ได้แก่ค่า T_c อีกด้วย ในที่สุด กระบวนการทำให้แห้งระยะที่สองจะกำจัดน้ำที่ก่อกวนขึ้น โดยการ desorption และอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์จะกลับมาที่อุณหภูมิห้องที่ละน้อย (Schoug *et al.*, 2006) ข้อดีของการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็ง คือ เป็นกระบวนการทำแห้งที่เหมาะสมกับวัตถุดิบส่วนใหญ่ อุณหภูมิในการอบแห้งต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง กระทำที่ความดันต่ำ (27-133 Pa) และอาศัยการระเหิดของน้ำแข็งจากผิวหน้าของการระเหิด การเคลื่อนตัวของสารถูกละลายเกิดขึ้นน้อยมาก เนื่องจากอยู่ในสถานะเยือกแข็ง นอกจากนี้ การทำแห้งเร็ว และสมบูรณ์ สี รส และกลิ่นของอาหารเหมือนเดิม สามารถคงคุณค่าทางโภชนาการไว้ได้ เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ไม่ใช้ความร้อน แต่มีข้อเสียคือ ค่าใช้จ่ายสูง (Fellows, 2000)

ปรากฏการณ์ทางกายภาพที่เกิดขึ้นระหว่างการอบแห้งของอาหาร

เป็นที่ทราบกันว่าถ้าการควบคุมกระบวนการอบไม่ถูกต้องแล้วนั้น จะมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อย่างรุนแรง โดยทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ไม่พึงต้องการกับรูปร่างหรือโครงสร้าง เช่น เกิดรอยแตก ผิวหน้าแข็ง การเสียโครงสร้างของโปรตีน เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล เกิดออกซิเดชันของส่วนประกอบที่ไม่คงตัว หรือการเน่าเสียจากจุลินทรีย์อันเนื่องมาจากกระบวนการทางกายภาพ เคมิหรือชีวภาพ เมื่อนำอาหารเข้าอบแห้งจะมีกระบวนการพื้นฐานเกิดขึ้นพร้อมกัน 2 กระบวนการ ได้แก่

(1) การถ่ายเทความร้อน การถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นที่จุดที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิ นั่นคือการอบแห้งกับตัวนำความร้อน การดำเนินการอบแห้งทางการค้าอาจใช้การถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีการนำความร้อน การพาความร้อน การแผ่รังสีความร้อน หรือใช้วิธีร่วมกันจากวิธีดังกล่าว

(1.1) การนำความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยการแลกเปลี่ยนความร้อนจากโมเลกุลหนึ่งกับโมเลกุลข้างเคียง สภาพนำความร้อน (thermal conductivity) เป็นคุณสมบัติของสารที่ประกอบกันขึ้นเป็นวัตถุ ซึ่งจะมีค่าแตกต่างกัน สภาพนำความร้อนขึ้นกับอุณหภูมิและความร้อน (Gorling, 1958) ค่าสภาพนำความร้อนของน้ำจะมีค่ามากกว่าค่าของวัตถุแห้งที่เป็นอาหาร เช่น ในผักและผลไม้สดซึ่งมีน้ำเป็นองค์ประกอบจำนวนมาก ค่าสภาพนำความร้อนของผักและผลไม้สดดังกล่าวจะไม่แตกต่างจากค่าของน้ำบริสุทธิ์มาก อย่างไรก็ตามขณะที่การอบแห้งเกิดขึ้นกับวัตถุค่าสภาพนำความร้อนจะลดลง (Van Arsdell, 1963) อุณหภูมิที่ผิวหน้าวัตถุที่ขึ้นจะแตกต่างเพียงเล็กน้อยจากอุณหภูมิกระเปาะเปียก (wet-bulb temperature) ลักษณะเช่นนี้จะเกิดขึ้นเมื่อการระเหยเกิดขึ้นที่ผิวหน้าของวัตถุที่ขึ้นจริง ๆ อย่างมีประสิทธิภาพ

(1.2) การพาความร้อน การถ่ายเทความร้อนภายในวัตถุที่ขึ้นจะเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อนทั้งสิ้น แต่สภาพของเหลวและก๊าซ การถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อน

เกิดขึ้นน้อยมาก ในทางปฏิบัติการถ่ายเทความร้อนทั้งสามวิธีจะเกิดขึ้นพร้อม ๆ กันได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่ามีลักษณะอย่างไร เช่น วัตถุที่ลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็ก ๆ ซึ่งภายในช่องว่างเต็มไปด้วยของเหลวหรือไอ การถ่ายเทความร้อนภายในที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบการนำความร้อน แต่ถ้าช่องว่างภายในมีขนาดใหญ่และมีของเหลวอยู่ด้วย การถ่ายเทความร้อนภายในของเหลวจะเป็นแบบการพาความร้อน ซึ่งจะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น แต่ถ้าความดันอากาศรอบ ๆ วัตถุนั้นลดลง ซึ่งเกิดขึ้นกับการอบแห้งแบบสุญญากาศ การถ่ายเทความร้อนจะพบว่าเป็นการแผ่รังสี (Van Arsdel, 1963)

(1.3) การแผ่รังสี การถ่ายเทพลังงานโดยการแผ่รังสีนั้นเกิดเพียงส่วนน้อยในกระบวนการอบแห้งอาหาร แต่ในกรณีของการอบแห้งสุญญากาศ และการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะมีการถ่ายเทความร้อนแบบแผ่รังสีเป็นหลัก นอกจากนี้การถ่ายเทความร้อนแบบแผ่รังสียังใช้ในกระบวนการอบแห้งอาหารอื่น ๆ เช่น การอบแห้ง แบบพ่นฝอย การอบแห้งแบบถาด การแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่รังสีจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Van Arsdel, 1963)

(2) การเคลื่อนย้ายของน้ำในอาหาร เมื่ออาหารได้รับความร้อนระหว่างการอบแห้ง ในขณะเดียวกันน้ำที่อยู่ในอาหารก็จะเคลื่อนตัวออกจากอาหาร ลักษณะการเคลื่อนที่ของน้ำในอาหารอาจเป็นลักษณะของการเคลื่อนที่ของเหลวหรือของไอ (Karel, 1975) กล่าวคือ น้ำหรือไอกภายในอาหารจะเคลื่อนที่มาที่ผิวหน้าของวัตถุ จากนั้นน้ำที่ผิวหน้าจะกลายเป็นไอระเหยออกไปสู่รอบบรรยากาศของตู้อบ กลไกภายในของการไหลของของเหลว และผลของสภาพภายนอก ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วของลม มีส่วนเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนตัวของน้ำในระหว่างการอบแห้ง กลไกภายในของการไหลของของเหลวนั้นได้พบว่ามีอยู่หลายแบบ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของอาหาร ชนิดการเคลื่อนที่ของน้ำอาจเกิดขึ้นจาก

(2.1) เกิดจากแรงคะปิลลารี (Capillary force) การเคลื่อนตัวแบบนี้มีลักษณะที่ซับซ้อนมาก ซึ่งยากต่อการคำนวณและยากต่อการแยกแยะว่าเป็นการเคลื่อนที่แบบที่เกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นหรือจากแรงคะปิลลารี ฉะนั้นเพื่อให้เกิดความสะดวกจึงใช้ค่าสภาพนำของเหลว (liquid conductivity) มาใช้อธิบาย ซึ่งค่านี้จะแตกต่างกันตามปริมาณน้ำ เมื่อปริมาณน้ำในอาหารลดลง การเคลื่อนที่ของน้ำผ่านคะปิลลารีและรูเปิดเล็ก ๆ เกิดขึ้นจากไอเป็นส่วนใหญ่อีกด้วย (Karel, 1975)

(2.2) การแพร่ของของเหลว (liquid diffusion) เนื่องจากการเคลื่อนที่ของน้ำในอาหารอาจเป็นลักษณะการเคลื่อนที่ของของเหลวหรือของไอ ถ้าเป็นสถานะของของเหลวการเคลื่อนที่ของน้ำจะเกิดขึ้นเนื่องจากความเข้มข้นที่ต่างกันที่เกิดขึ้นเมื่อน้ำได้ระเหยไปจากผิวหน้า นั่นคือความเข้มข้นของของแข็งเพิ่มขึ้นขณะที่น้ำลดลง

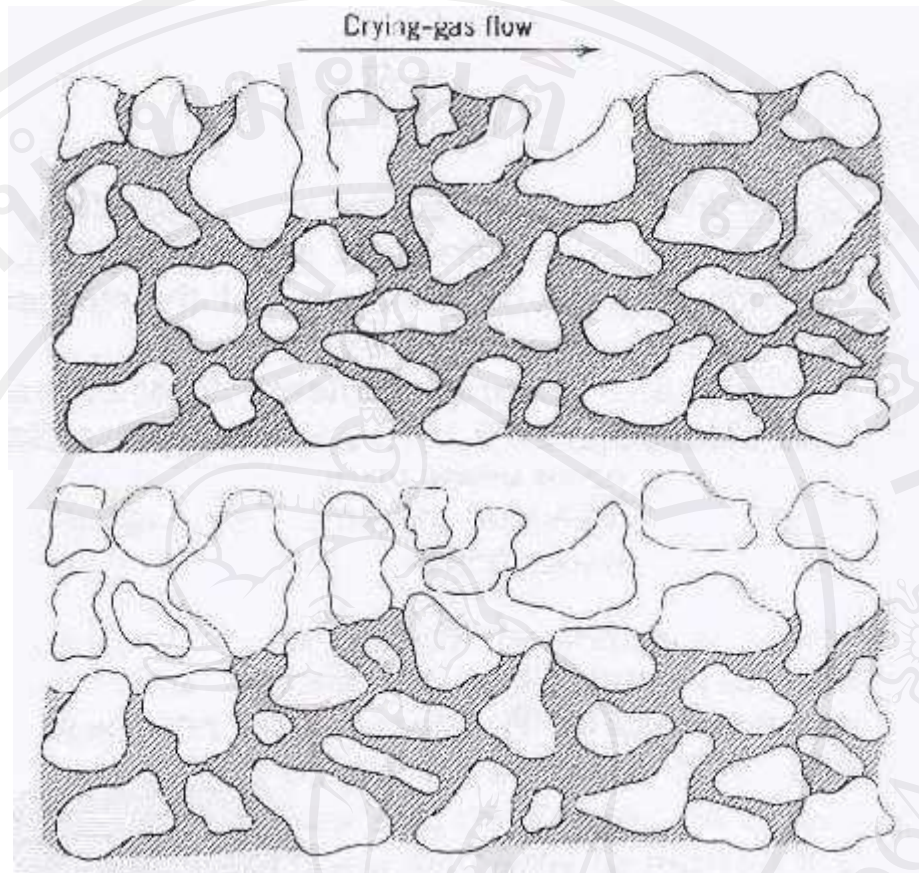
(2.3) การแพร่ของไอน้ำ (water vapour diffusion) เกิดจากความแตกต่างของความดันย่อยอากาศที่อยู่ในรูเปิดเล็ก ๆ มีลักษณะคงที่แต่เมื่อไอน้ำที่เกิดจากการระเหยของน้ำในระหว่างการอบแห้งแพร่ซึมผ่านเข้าไปยังรูเล็ก ๆ นี้ จะไปได้อากาศบริเวณที่มีความดันไอน้ำสูงไปสู่ที่ความดันไอน้ำต่ำอัตราการเคลื่อนที่นี้ขึ้นกับแฟกเตอร์การต้านทานต่อการแพร่ซึ่งมีลักษณะคล้ายค่าสภาพนำของวัตถุ

(2.4) การแพร่ของไอ เกิดจากความแตกต่างของความดันไอ ความชื้นอาจจะเคลื่อนที่โดยการแพร่ของไอผ่านอาหารที่เป็นของแข็งได้ทราบเท่าที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิ การระเหยและการแพร่ของไออาจเกิดขึ้นในอาหารที่เป็นของแข็งโดยอาหารนั้นได้รับความร้อนข้างหนึ่งและการระเหยเกิดขึ้นอีกซีกหนึ่ง หรือการอบแห้งแบบสูญญากาศ

(2.5) การแพร่ของของเหลวที่ดูดซับอยู่ที่ผิวของอาหาร การแพร่ของน้ำที่ดูดซับไว้ที่ผิวหน้าในอาหารที่มีความชื้นค่อนข้างต่ำ (10-15%) การแพร่แบบนี้ เรียกว่า การแพร่โดยการกระตุ้น

Constant Rate Drying (Rc) และ Falling Rate Drying (Rf)

อัตราการอบ (R) หมายถึง ค่าความชื้นที่ระเหยออกไปได้ต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลาหน่วยอาจเป็นปอนด์น้ำต่อตารางฟุตชั่วโมง หรือกิโลกรัมน้ำต่อตารางเมตรชั่วโมง Constant Rate Drying (Rc) คือการอบแห้งในช่วงการอบที่มีค่าอัตราการระเหยต่อพื้นที่และเวลาคงที่เป็นการอบที่มีความชื้นในวัสดุเหลือเฟือ จึงเดินทางมาสู่ผิวหน้าได้ทันเวลากับความร้อนที่ถ่ายจากลมร้อนมาที่ผิวเป็นปริมาณความชื้นที่อยู่ในประเภท unbound moisture ที่สำคัญคือ การอบในช่วงนี้เกิดโดยที่อุณหภูมิวัสดุคงที่ Twet bulb ของอากาศแห้งที่ใช้อบ



รูปที่ 2.9 Moisture receding in falling rate drying period

ที่มา : ไพบูลย์ (2535)

Falling Rate Drying คือ การอบในช่วงที่ปริมาณน้ำที่ผิววัสดุแห้งลง เมื่อน้ำระเหยมาที่ผิวไม่ทัน อัตราการระเหยต่อหน่วยพื้นที่และเวลาก็จะลด ในช่วงนี้อุณหภูมิที่ผิวอาจค่อย ๆ เพิ่มขึ้น และค่า RF อาจจะไม่แปรผันตรงกับค่าความชื้นที่เหลืออยู่ (กราฟ falling rate เป็นเส้นตรง) หรือไม่ขึ้นโดยตรงกับค่า X' (กราฟของ falling rate เป็นเส้นโค้ง) ก็ได้ วัสดุอบบางประเภทอาจมีแต่ falling rate ตลอดการอบเลยก็ได้

2.8 สมบัติของอาหารผง

2.8.1 Water activity (a_w)

คำจำกัดความของ water activity คือ อัตราส่วนของความดันไอของน้ำในระบบกับความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิเดียวกัน หรือความชื้นสัมพัทธ์สมดุลของอากาศแวดล้อมของระบบ ณ อุณหภูมิเดียวกัน (Rahman, 1995) ดังสมการ

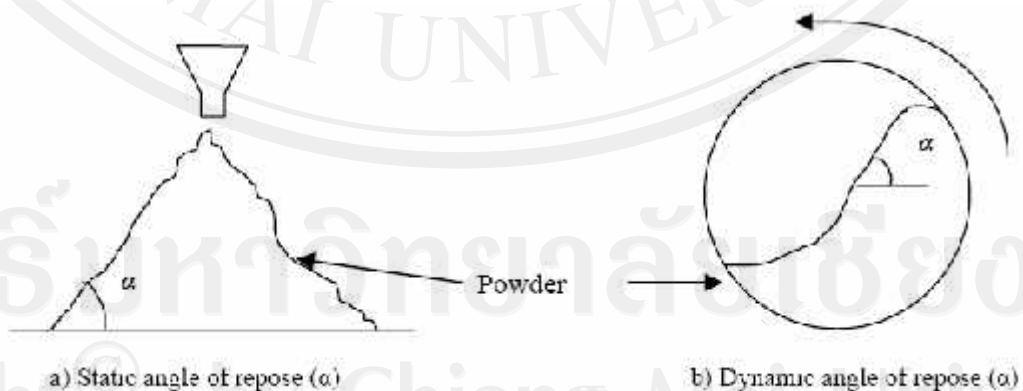
$$a_w = P/P_o = RH\% / 100$$

โดย P = ความดันไอของน้ำในตัวอย่างอาหาร, P_o = ความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ t_o ซึ่งเป็นอุณหภูมิสมดุลของระบบ, a_w = ค่า critical water activity, RH = ค่าความชื้นสัมพัทธ์ (%)

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-ประมาณ 1.00 (Fellows, 2000) ค่า a_w เป็นปัจจัยหลักในการป้องกันหรือจำกัดการเจริญของจุลินทรีย์ และในหลายๆ กรณีพบว่า ค่า a_w คือ ตัวแปรเริ่มต้นที่มีผลต่อความคงตัวของอาหาร เป็นเกณฑ์สำหรับวัดการตอบสนองของจุลินทรีย์ และวิเคราะห์ประเภทของจุลินทรีย์ที่พบในอาหาร นอกจากนี้ปัจจัยอื่นๆที่มีผลต่อการเจริญของจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์อาหาร ได้แก่ อุณหภูมิ pH ออกซิเจน สารอาหารเป็นต้น ในอุตสาหกรรมน้ำผึ้งปริมาณน้ำของน้ำผึ้งเป็นปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดการเน่าเสียโดยเกิดการหมัก แต่อย่างไรก็ตามไม่ใช่เฉพาะปริมาณน้ำเท่านั้นแต่เป็นค่า a_w ของอาหารด้วยที่เป็นตัวควบคุมการเจริญของจุลินทรีย์ (Chirife *et al.*, 2006) การลดค่า a_w เพื่อไม่ให้จุลินทรีย์สามารถนำน้ำไปใช้ในการเจริญ มีหลายวิธี เช่น การทำแห้ง การระเหย การอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง การทำให้น้ำในอาหารตกผลึกกลายเป็นน้ำแข็ง หรือการตรึงน้ำในอาหาร การใช้คอลลอยด์ที่ชอบรวมกับน้ำ เช่น วุ้น ทำให้จุลินทรีย์หรือปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ ไม่สามารถนำน้ำไปใช้ได้ (วิล, 2546) ค่า a_w ของผลิตภัณฑ์สามารถวัดได้จากค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุลของอากาศที่ปล่อยยให้สมดุลกับผลิตภัณฑ์ ดังนั้นผลิตภัณฑ์จะต้องถูกวางไว้ในระบบปิด เพื่อให้เกิดความสมดุลได้ จุดที่เกิดความสมดุลคือจุดที่ a_w ของตัวอย่างมีค่าเท่ากับค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศนั่นเอง นอกจากการ วัดค่า a_w โดยการวัดความชื้นสัมพัทธ์สมดุลแล้วยังมีเครื่องมือวัดค่า a_w โดยตรงเพื่อความสะดวกในการใช้งานด้วย การวัดค่า a_w โดยเครื่องมือที่ใช้วิธี Chilled-Mirror dew point ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับเป็นมาตรฐานระหว่างประเทศ Association of Official Agricultural Chemists (AOAC) จะสามารถวัดค่าได้โดยใช้เวลาประมาณ 5 นาทีในขณะที่เครื่องมือที่ใช้ Electronic Capacitive Sensors จะใช้เวลาประมาณ 30-90 นาที เพื่อเข้าสู่สถานะสมดุลของความชื้นสัมพัทธ์ สำหรับการใช้งานบางอย่างการอ่านผลได้รวดเร็วจะทำให้ผู้ผลิตอาหารสามารถกำกับและควบคุมค่า a_w ได้ ณ จุดที่ทำการผลิตทำให้สามารถปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตให้เหมาะสมได้ในระหว่างที่ทำการผลิต เครื่องมือในระบบ Chilled Mirror สามารถอ่านค่า a_w ได้กว้างกว่าระบบ Electronic Capacitive Sensors ก็จะวัดค่าได้ในช่วงตั้งแต่ 0.030 ถึง 1.000 (รัตนันท์, 2007)

2.8.2 ความสามารถในการไหล (flowability)

มุมกอง (Angle of repose) ตามนิยามของ Terzaghi and Peck (1948) หมายถึง มุมกองระหว่างพื้นราบ และพื้นเอียงของกองวัสดุที่ถูกทำให้ไหลลงมาจากอุปกรณ์ที่จัดให้อยู่สูงเหนือพื้นราบ โดยใช้อุปกรณ์อย่างง่ายในการทำให้เกิดการไหลของวัสดุจากจุดที่อยู่เหนือพื้นราบจนกระทั่งมุมที่เกิดขึ้นคงที่ แล้วจึงวัดมุมกองของวัสดุแห้ง ค่ามุมกองของวัสดุแห้งที่มีค่าต่ำกว่าจะมีความสามารถในการไหลได้มากกว่าวัสดุแห้งที่มีค่ามุมกองที่สูงกว่า (Bodhimage, 2006) มุมกองเป็นดัชนีชี้วัดความสามารถในการไหลของผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นผง Carr (1965,1970) and Raymus (1985) ได้กล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการไหลของผง และการวัดทางกายภาพอย่างง่ายว่า ค่ามุมกองที่ต่ำกว่า 30° แสดงว่ามีความสามารถในการไหลที่ดีมาก ค่ามุมกองอยู่ในช่วง $30^\circ-45^\circ$ แสดงว่าอนุภาคผงสามารถไหลได้ดี แต่มีความเกาะตัวกันระหว่างอนุภาคเล็กน้อย สำหรับค่ามุมกองที่อยู่ในช่วง $45^\circ-55^\circ$ แสดงว่ามีความเกาะตัวกันระหว่างอนุภาคมาก และค่ามุมกอง $>55^\circ$ แสดงว่า อนุภาคไหลได้ช้า หรือ มีความเกาะตัวกันระหว่างอนุภาคสูงมากและมีความสามารถในการไหลจำกัด (Geldart *et al.*, 2006) การวัดค่ามุมกองเป็นวิธีที่ง่าย เชื่อถือได้ รวดเร็ว และง่ายสำหรับการวัดความสามารถในการไหลของผงที่แตกต่างกัน โดยมุมกองที่มีขนาดเล็กกว่าจะมีความสามารถในการไหลของผงได้อิสระกว่า ขณะที่มุมกองที่มีขนาดใหญ่กว่าแสดงว่า วัสดุมีความสามารถในการไหลได้ไม่ดี หรือมีความเกาะตัวกันระหว่างอนุภาคได้ดีกว่า (cohesiveness) ซึ่ง ISO 3435 ได้ใช้วิธีวัดมุมกองสำหรับการวิเคราะห์ความเกาะตัวกันระหว่างอนุภาคของวัสดุที่มีขนาดใหญ่ (Bodhimage, 2006) มุมกองสามารถวัดได้ 2 แบบ คือ static angle of repose เป็นมุมที่เกิดขึ้นระหว่างระนาบพื้นราบ และเส้นความชันที่ยาวไปตามพื้นผิวของกองที่เกิดขึ้น โดยวัสดุที่เทลงบนพื้นผิวราบ การวัด static angle of repose แสดงดังรูป สำหรับ dynamic angle of repose จะถูกวัดในกระบอกตวงที่มีการหมุน (rotating cylinder) แสดงดังรูป 2.10 (Bodhimage, 2006)

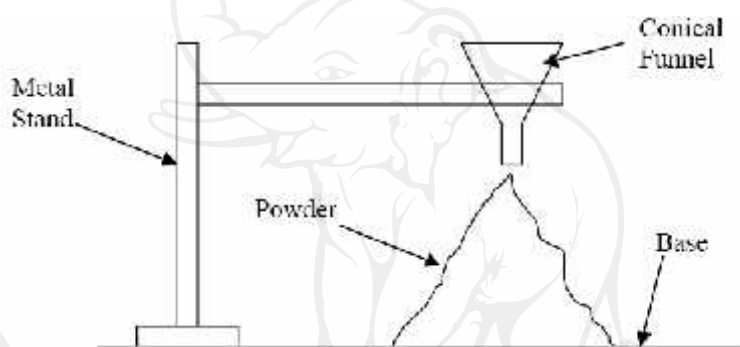


รูปที่ 2.10 Static และ dynamic of angle of repose

ที่มา : Bodhimage (2006)

การวัด static angle of repose

อุปกรณ์สำหรับการวัด static angle of repose ในการศึกษาในปัจจุบันประกอบด้วยกรวยแก้วกรวยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของทางออกด้านปลายกรวยแก้วกรวยขนาด 0.9 cm ซึ่งถูกตรึงไว้บนขาตั้งโลหะดังรูปที่ 2.11 โดยทางออกด้านปลายกรวยแก้วกรวยจะอยู่สูงจากฐาน 6 cm ตามมาตรฐาน ISO 3435/1 กล้องดิจิตอลจะถูกวางไว้ในตำแหน่งด้านหน้าของกรวยกรวยเพื่อถ่ายรูปร่างของผง หลังจากนั้นก็ถูกวิเคราะห์สำหรับ static angle of repose โดยใช้ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ชื่อว่า “Scion Image” (www.scioncorp.com) ปลายทางออกของกรวยกรวยจะถูกปิดไว้ และตัวอย่างผง 200 g จะถูกเทผ่านลงไป เมื่อปลายทางออกถูกเปิดออกวัสดุจะไหลออกไปสร้างเป็นรูปทรงกรวยบนฐาน โดยผู้ถ่ายภาพยังคงจับภาพโดยใช้กล้องถ่ายรูป และจากนั้นป้อนข้อมูลเข้าไปในโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อวัด static angle of repose (Bodhimage, 2006)



รูปที่ 2.11 การวัด Static angle of repose

ที่มา : Bodhimage (2006)

จากรูปที่ 2.11 Angle of repose เป็นมุมระหว่างพื้นผิวของกรวย และระนาบพื้นผิวซึ่งคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้เป็น $\tan \alpha = H/R$ เมื่อ H = ความสูงของรูปกรวย และ R = รัศมีของวงกลม (Leesawat *et al.*, 2004)

ปัจจัยที่มีผลต่อค่ามุมกรวยคือสภาวะในการเก็บรักษาของผงที่ต้องการทดสอบความสามารถในการไหลซึ่งถ้ามีการเปลี่ยนแปลงความชื้นของผงเพียงเล็กน้อยก็สามารถเพิ่มค่ามุมกรวยได้มากกว่า 100% (Zou and Bruswitz, 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 ประกอบด้วยไขมันอยู่สูงจะไปยับยั้งความสามารถ

ของการไหล (Kim *et al.*, 2005) และปริมาณไขมันยังมีผลอย่างมากต่อการเกาะตัวกันของนมผง โดยนมผงที่มีปริมาณไขมันที่พื้นผิวของอนุภาคมากกว่าก็จะส่งผลให้มีการเกาะตัวกันมากกว่าทำให้ความสามารถในการไหลของผลิตภัณฑ์นมผงมีค่าลดลง (Fitzpatrick *et al.*, 2007)

2.8.3 ความสามารถในการละลาย (Solubility)

สมบัติการละลายของผง (Barbosa-Cánovas and Vega-Mercado, 1996) ได้แก่

(1) Wettability คือ ความสามารถของอนุภาคของผงในการดูดซับน้ำบนพื้นผิวของอนุภาค และปัจจัยที่มีผลต่อ wettability ได้แก่ กระบวนการการเกาะกันเป็นก้อนของอนุภาคจำนวนของอนุภาคที่ดูดซับน้ำได้ พื้นผิวของอนุภาค หรือ การไม่มีอนุภาคที่ไม่เกาะกันเป็นก้อน

(2) Sinkability คือ ความสามารถของผงในการจมลงไปในน้ำ หลังจากผงเกิดการดูดซับน้ำบนพื้นผิวของอนุภาค และถูกกระทบโดยความหนาแน่นของอนุภาค

(3) Dispersibility หมายถึง ความสามารถของผง ในการกระจายตัวตลอดทั่วทั้งภายในน้ำ โดยไม่เกิดเป็นก้อน ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ dispersibility คือ การไม่มีของอนุภาคที่มีขนาดมากกว่า 250 μm หรือ อนุภาคที่เกาะตัวกันเป็นก้อน

(4) Solubility คือ อัตราการละลายหรือความสามารถในการละลายทั้งหมด โดยการไม่มีจุดและการบวมตัวอย่างรวดเร็วของอนุภาค เป็นปัจจัยที่กระทบต่อความสามารถในการละลาย

Solubility index (SI) คือ ร้อยละของมวลแห้งของสารที่ละลายได้ใน supernatant (Ws) กับมวลแห้งของตัวอย่างทั้งหมด (Wo) (Mandala and Bayas, 2004)

$$SI = Ws/Wo \times 100\% \text{ (ของแข็งที่ละลายได้ (g) / มวลแห้งของตัวอย่างทั้งหมด (g))}$$

ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการละลาย คือ ธรรมชาติของตัวถูกละลาย และตัวทำละลาย อุณหภูมิ ความดัน ขนาดของอนุภาค และการกวนผสม (Rahman, 1995) การวิเคราะห์ค่าความสามารถในการละลาย โดยใช้ตัวอย่างปริมาณ 5 g ใส่ใน centrifuge tube เติมน้ำ 50 mL ที่อุณหภูมิ 30°C ปั่นที่ความเร็ว 3000 rpm นาน 10 นาที เท supernatant ใส่ใน aluminium can อบที่อุณหภูมิ 105°C เวลานาน 24 ชั่วโมง คำนวณหาค่าความสามารถในการละลาย(%) ดังนี้ (Fernandez, 2003)

$$\text{ค่าความสามารถในการละลาย(\%)} = \frac{\text{น้ำหนัก supernatant ก่อนอบ} - \text{น้ำหนัก supernatant หลังอบ} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างที่ซึ่งเริ่มต้น}}$$