

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำนม

องค์ประกอบทางเคมีของน้ำนมค่อนข้างซับซ้อน องค์ประกอบทางเคมีหลักของน้ำนม ได้แก่ โปรตีน น้ำตาลแลคโตส วิตามิน แร่ธาตุ และน้ำ องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของน้ำนมมีค่าโดยประมาณ แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำนมโดยประมาณ

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละโดยปริมาตร)
โปรตีน	3.50
ไขมัน	3.70
น้ำตาลแลคโตส	4.90
เกลือ	0.70
น้ำ	87.20

ที่มา: (นรินทร์, 2531)

2.1.1 น้ำ

น้ำเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ของน้ำนม กล่าวคือ น้ำนม 1 ลิตร จะมีน้ำอยู่ระหว่าง 860-880 มิลลิลิตรหรือประมาณร้อยละ 86-88 โดยปริมาตร แม้ว่าจะมีน้ำในปริมาณที่สูงมาก แต่น้ำนมก็ยังคงเป็นอาหารเหลวที่มีสารอาหารเข้มข้นที่สุดในบรรดาอาหารเหลวทั้งหมดของทารก น้ำนมเป็นตัวนำสารอาหารที่สำคัญที่ทำให้สะดวกต่อการบริโภคสำหรับทารกหรือเด็กอ่อนที่ยังไม่มีฟันเคี้ยวอาหาร และเป็นสื่อกลางให้สารอาหารหลายชนิดละลายอยู่ และหลายชนิดอยู่ในสภาพแขวนลอย (นิธิยา, 2541)

2.1.2 โปรตีน

น้ำนมวัว (cow milk) ประกอบด้วยโปรตีนร้อยละ 3.25 โดยปริมาตร โปรตีนที่สำคัญที่พบในน้ำนม ได้แก่ เคซีน (casein) และ เวย์โปรตีน (whey protein) (ตารางที่ 2.2) ซึ่งประกอบด้วยโปรตีนหลัก 2 ชนิดคือ แอลฟา-แลคตัลบูมิน (α -lactalbumin) และบีต้า-แลคโตโกลบูลิน (β -lactoglobulin) (รัชณี, 2542)

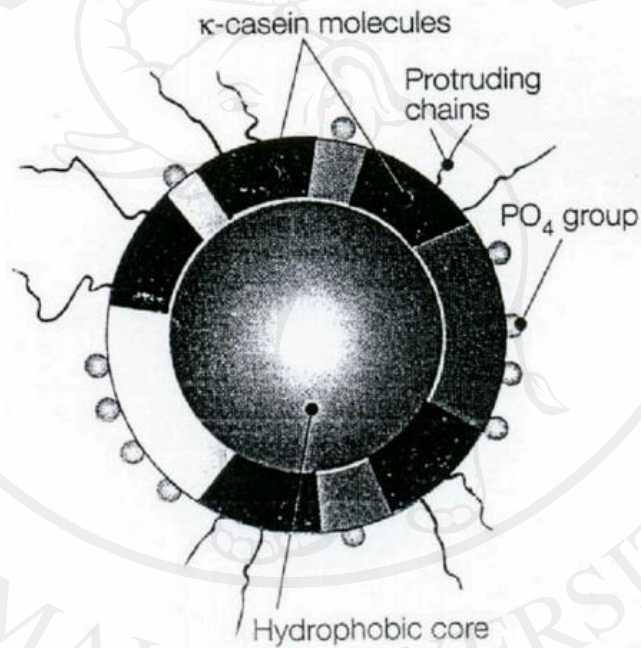
ตารางที่ 2.2 ชนิด และปริมาณ โปรตีนที่พบในน้ำนมวัว

ชนิดของโปรตีน	ความเข้มข้น (กรัมต่อลิตร)	ร้อยละโดยน้ำหนัก
เคซีน	24 – 28	80
แอลฟา – เคซีน	15 – 19	
α_{s1} – เคซีน	12 – 15	34
α_{s2} – เคซีน	3 – 4	8
บีต้า – เคซีน	9 – 11	25
แคปป์ตา – เคซีน	3 – 4	9
แกรมมา – เคซีน	1 – 2	4
เวย์โปรตีน	5 – 7	20
บีต้า – แลคโตโกลบูลิน	2 – 4	9
แอลฟา – แลคโตแอลบูมิน	1.0 – 1.5	4
โปรตีนเอส – เปปโตน	0.6 -1.8	4
โปรตีนจากเลือด (blood protein)		
ซีรัมแอลบูมิน	0.1 – 0.4	1
อิมมูโนโกลบูลิน	0.6 -1.0	2
โปรตีนทั้งหมด		100

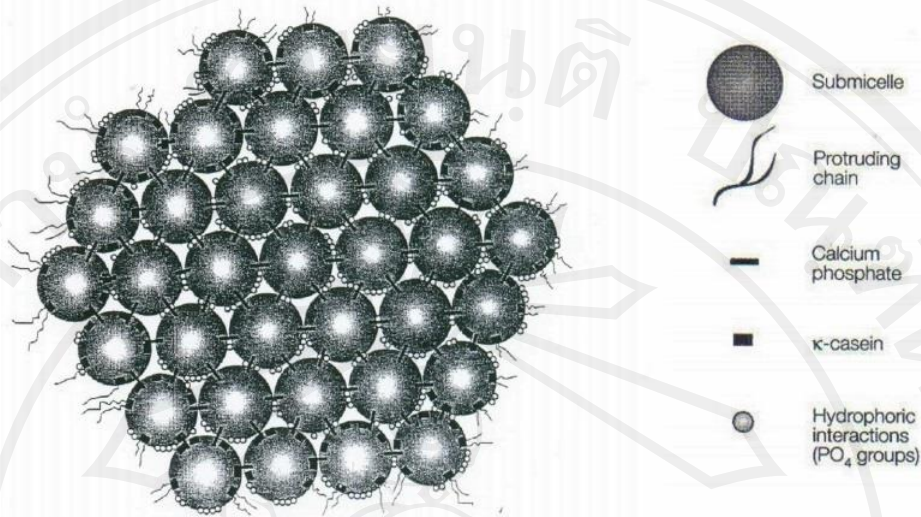
ที่มา: Swaisgood, 1996

2.1.2.1 เคซีน เคซีนมีปริมาณร้อยละ 80 ของโปรตีนในน้ำนม เป็นโปรตีนที่พบในน้ำนมเท่านั้น มีลักษณะเป็นสีขาว ไม่มีกลิ่นรส เป็นตัวที่ทำให้น้ำนมมีสีขาว เคซีนมีความสำคัญต่อความคงตัวของผลิตภัณฑ์นมระหว่างการให้ความร้อน การทำให้เข้มข้น และการเก็บรักษา นอกจากนี้ยังมีผลต่อคุณสมบัติการไหล (rheological properties) ของผลิตภัณฑ์นมเปรี้ยวและ

นมข้น ในน้ำนมโดยปกติเคซีนอยู่ในรูปของไมเซลล์ซึ่งกระจายเป็นแบบคอลลอยด์ในน้ำนม เคซีนจะมีลักษณะทรงกลมหยาบ เส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 40-300 nm โดยเฉลี่ยประกอบด้วยเคซีนประมาณ 104 โมเลกุล เคซีนไมเซลล์มีลักษณะเป็นประจุลบ ภายในไมเซลล์ประกอบด้วยสารอนินทรีย์สำคัญคือ แคลเซียมฟอสเฟต นอกจากนี้ยังประกอบด้วยโปรตีนอื่นๆ อีกเล็กน้อย เช่น โปรตีนเอส-เปปไทด์ (Walstra et al., 1999) เคซีนอยู่ในสภาพไมเซลล์ แสดงดังรูปที่ 2.2 ประกอบด้วยไมเซลล์ย่อย (submicelle) ซึ่งมีโครงสร้างดังรูป 2.1 เคซีนไมเซลล์จะประกอบด้วยเคซีนกลุ่มย่อยๆ ได้แก่ แอลฟา-เอส-เคซีน แคปปา-เคซีน บีตา-เคซีน และแกมมา-เคซีน ในจำนวนที่แตกต่างกันทำให้ขนาดเคซีนไมเซลล์แตกต่างกัน



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเคซีนสับไมเซลล์ (Bylund, 1995)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างเสถียรของเคซีนไมเซลล์ (Bylund, 1995)

2.1.2.1.1 แอลฟา-เคซีน (α -casein) เป็นสายเพปไทด์ (peptide chain) ที่มีกรดอะมิโนจำนวน 199 หน่วย (residue) มีน้ำหนักโมเลกุล 23 กิโลดอลตัน (Kdal) เมื่อมีแคลเซียมไอออน (Ca^{2+} ion) จะทำให้แอลฟา-เอส 1-เคซีน (α_{s1} -casein) ไม่ละลาย โดยจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของกรดอะมิโนบนสาย เพปไทด์ และเกิดการตกตะกอน

(1) แอลฟา-เอส 1-เคซีน ประกอบด้วยกรดอะมิโนจำนวน 100 ถึง 199 หน่วย เป็นพวกที่ไม่มีขั้ว (apolar)

(2) แอลฟา-เอส 2-เคซีน (α_{s2} -casein) มีโครงสร้างแบบมีขั้ว และไม่มีขั้ว (dipolar structure) เมื่อมีแคลเซียมไอออน แอลฟา-เอส 2-เคซีน จะตกตะกอนง่ายกว่าแอลฟา-เอส 1-เคซีน

2.1.2.1.2 บีตา-เคซีน (β -casein) เป็นสายเพปไทด์ที่มีกรดอะมิโนจำนวน 209 หน่วย มีน้ำหนักโมเลกุล 24.5 กิโลดอลตัน ปลายข้างหนึ่งของพวกเพปไทด์เป็นพวกมีขั้ว (polar head) ส่วนปลายอีกข้างหนึ่งเป็นพวกไม่มีขั้ว (apolar tail) สามารถตกตะกอนได้เมื่อมีแคลเซียมไอออน

2.1.2.1.3 แคลป์า-เคซีน (κ -casein) เป็นสายเพปไทด์ที่มีกรดอะมิโนจำนวน 169 หน่วย มีน้ำหนักโมเลกุล 18 กิโลดอลตัน มีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบคือ น้ำตาลกาแลคโตส (galactose) ร้อยละ 1 สารประกอบกาแลคโตซามีน (galactosamine) ร้อยละ 1.2 และกรดเอ็น-แอซิติลนิวรามิก (N-acetyl neuramic) ร้อยละ 2.4 แคลป์า-เคซีน เป็นโปรตีนที่สำคัญที่ช่วยให้แอลฟา-เคซีน และบีตา-เคซีน ไม่เกิดการตกตะกอนเมื่อมีแคลเซียมไอออน และช่วยให้เคซีนไมเซลล์เกิดความคงตัว (Belitz and Grosch, 1999)

เคซีนไมเซลล์ในน้ำนมมีคุณสมบัติเป็นคอลลอยด์ ลักษณะเป็นอนุภาคทรงกลม และยังคงอยู่ในสภาพของเกลือแคลเซียม จึงเรียกว่า แคลเซียมแคซิเนต (calcium caseinate) แต่ละไมเซลล์ประกอบด้วยองค์ประกอบทั้งหมดของเคซีน คือ แอลฟา-เคซีน และบีต้า แคปทา และแกมมา โดยจะอยู่รวมกันกับแคลเซียมฟอสเฟต ดังนั้น เคซีนจึงไม่ได้อยู่ในสภาพของสารละลายในนม แต่เป็นคอลลอยด์ที่แขวนลอยอยู่ตลอดเวลา อัตราส่วนของเคซีนแต่ละชนิดที่ประกอบเป็นไมเซลล์จะแตกต่างกันออกไป พบว่า มากกว่าร้อยละ 50 ของไมเซลล์ประกอบด้วยเคซีนชนิดต่างๆ ในอัตราส่วน 3 แอลฟา-เอส 1 บีตา 1 แคปทา (วรรณ และวิบูลย์ศักดิ์, 2531)

ในทางอุตสาหกรรมจะเตรียมเคซีนได้จากหางนมหรือนมพร่องมันเนย โดยใช้วิธีการตกตะกอนด้วยกรด หรือด้วยวิธีการทำให้น้ำนมตกตะกอนด้วยแบคทีเรีย หรืออาจใช้วิธีเติมเอนไซม์เรนเนต (rennet) เอนไซม์เรนเนตหรือเอนไซม์เรนนิ (rennin) เป็นเอนไซม์ที่ทำให้เคซีนเกิดการตกตะกอน โดยมีการตัด (cleave) เฉพาะระหว่างพันธะเพปไทด์ที่มีการเชื่อมต่อกันระหว่างฟินิลอะลานีน (phenylalanine) และเมธิโอนีน (methionine) ในตำแหน่งที่ 106 ได้เป็น 2 ส่วน คือ พารา-แคปทา-เคซีน (para-K-casein) และไกลโคเพปไทด์ที่มีคุณสมบัติละลายน้ำได้ แต่พารา-แคปทา-เคซีนจะตกตะกอนเมื่อมีแคลเซียมไอออน ดังนั้นเมื่อเติมเอนไซม์ชนิดนี้ลงไปให้น้ำนม จึงทำให้เคซีนเกิดการตกตะกอน (Belitz and Grosch, 1999)

กรณีใช้กรดเป็นตัวตกตะกอน ประจุไฟฟ้าของเคซีนจะถูกทำให้เป็นกลาง โดยปกติแล้วความเป็นกรดของน้ำนมประมาณพีเอช 6.6 ซึ่งมีฤทธิ์เป็นกรดเล็กน้อย หากลดพีเอชต่ำลงด้วยการเติมกรดต่างๆ เคซีนจะไม่คงตัว และตกตะกอนที่ พีเอช 4.7 เรียกสภาวะของความเป็นกรดขณะนี้ว่า ไอโซอิเล็กทริกพอยต์ (isoelectric point) ของเคซีน ซึ่งเป็นสภาวะที่เคซีนมีประจุไฟฟ้ารวมเท่ากับศูนย์ (สภาพเป็นกลาง) กรดที่สามารถใช้ตกตะกอนเคซีนได้แก่ กรดแล็กติก (lactic acid) กรดเกลือ (hydrochloric acid) กรดแอซติก (acetic acid) และกรดซัลฟิวริก (sulfuric acid)

เคซีนเมื่อถูกทำให้ตกตะกอนแล้วจะถูกกรองแยกออกมาทำแห้ง หรืออาจทำให้เป็นเกลือเคซิเนต (caseinate salt) ด้วยการเติมสารละลายต่าง หากใช้เอนไซม์ตกตะกอนพบว่า เคซีนจะถูกเปลี่ยนไปเป็น พารา-เคซีน (para-casein) ซึ่งพบในเนยแข็งทั่วไป

2.1.2.2 เวย์โปรตีน (whey protein) เวย์โปรตีนเป็นของเหลือจากกระบวนการผลิตชีส และ เคซีน แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ เวย์ที่ได้จากการตกตะกอนเคซีนด้วยเอนไซม์เรนนิที่พีเอช 5.6-6.3 เรียกเวย์ชนิดนี้ว่า สวีทเวย์ (sweet whey) และเวย์ที่ได้จากการตกตะกอนโปรตีนเคซีนด้วยกรดที่พีเอช 4.3-4.6 เรียกเวย์ชนิดนี้ว่า แอซิดเวย์ (acid whey) ซึ่งเวย์โปรตีนผลิตโดยการนำน้ำนมที่เหลือจากกระบวนการทำเนยแข็ง (skim milk) มาสกัดส่วนที่เป็น คาร์โบไฮเดรต ไขมัน เกลือแร่ออก เวย์โปรตีน คือ โปรตีนจากหางนมโดยนำน้ำนมที่เหลือจากกระบวนการทำเนยแข็ง

(skim milk) มาสกัดส่วนที่เป็น คาร์โบไฮเดรต ไขมัน เกลือแร่ออก ให้เหลือส่วนที่เป็น โปรตีนบริสุทธิ์แล้วทำให้เข้มข้น ในน้ำนมวัวมีปริมาณน้ำร้อยละ 87 ไขมันร้อยละ 3.9 โปรตีนร้อยละ 3.3 แลคโตสร้อยละ 5.0 แร่ธาตุ และวิตามินร้อยละ 0.8 (Wong et al., 1996) โดยมีองค์ประกอบของเวย์ในนมวัวเฉลี่ย ประมาณ 4-7 กรัมต่อลิตร อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของเวย์โปรตีนขึ้นอยู่กับชนิดของเวย์ สถานที่ตั้ง และสุขภาพของวัว รวมทั้งสภาวะที่ใช้ในกระบวนการผลิตเนยแข็ง และปริมาณของโปรตีนเคซีน (casein) (Korhonen et al., 1998) โปรตีนหลัก 2 ชนิดที่พบในเวย์โปรตีน คือ แอลฟาแลคตัลบูมิน (α -lactalbumin) และเบต้าแลคโตโกลบูลิน (β -lactoglobulin) (รัชนี, 2542) เคซีนจัดเป็นฟอสโฟโปรตีนมีประมาณ 80% ของโปรตีนทั้งหมดในนม สามารถตกตะกอนแยกออกจากนมได้ง่ายโดยการปรับค่าพีเอชของน้ำนมให้ต่ำลงเป็น 4.6 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เมื่อแยกเอาตะกอนเคซีนออกแล้ว ส่วนของน้ำนมที่เหลือเรียกว่า เวย์ และโปรตีนที่ยังเหลืออยู่คือ เวย์โปรตีน หรือซีรัมโปรตีน (milk serum proteins) ซึ่งมีโปรตีนประมาณร้อยละ 20 ของโปรตีนทั้งหมด (นิธิยา, 2545)

เวย์โปรตีนทั่วไปประกอบด้วยบีตา-แลคโตโกลบูลินร้อยละ 50 แอลฟา-แลคตัลบูมินร้อยละ 20 ซีรัมอัลบูมิน (serum albumin) ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักนอกจากนี้ยังประกอบด้วย อิมมูโนโกลบูลิน (Immunoglobulin) โปรตีนที่มีฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบ (phospholipid-protein complex) เอนไซม์ และเพปไทด์ของเคซีน (casein-derived peptide) (Fox and McSweeney, 1998)

2.1.2.2.1 บีตา-แลคโตโกลบูลิน เป็นโปรตีนที่มีปริมาณมากที่สุดในเวย์ มีมวลโมเลกุลในรูปโมเลกุลเดี่ยวเท่ากับ 18 กิโลดอลตัน โครงสร้างที่เสถียรอยู่ในรูปไดเมอร์ (dimer) มีไอโซอิเล็กทริกพอยต์ที่พีเอช 5.5-7.5 ค่าพีเอชต่ำกว่า 3.5 หรือสูงกว่า 7.5 โมเลกุลที่สร้างพันธะในรูปไดเมอร์จะแตกตัวเป็น โมเลกุลเดี่ยว (monomer) บีตา-แลคโตโกลบูลินเสื่อมสภาพ (denature) ที่อุณหภูมิสูงกว่า 65 องศาเซลเซียส (Fox and McSweeney, 1998)

2.1.2.2.2 แอลฟา-แลคตัลบูมิน เป็นโปรตีนในเวย์ที่มีปริมาณมากเป็นอันดับสอง รองจากบีตา-แลคโตโกลบูลิน มีมวลโมเลกุล 14 กิโลดอลตัน แอลฟา-แลคตัลบูมินเป็นโมดิไฟเออร์โปรตีน (modifier protein) ในเอนไซม์แลคโตซินเทตาส (lactose synthetase) เนื่องจากเอนไซม์กาแลคโตซิลทรานส์เฟอเรส (galactosyltransferase) เป็นตัวส่งถ่ายน้ำตาลกาแลคโตสจากยูพิดิ-กาแลคโตส (UPD-galactose) ไปยังเอ็น-แอสิติลกลูโคซาไมน-ไกลโคโปรตีน (N-acetylglucosaminyl-glycoprotein) ซึ่งมีน้ำตาลกลูโคสเป็นองค์ประกอบ โดยปกติอัตราการส่งถ่ายน้ำตาลกาแลคโตสไปยังน้ำตาลกลูโคสเกิดขึ้นได้ช้า แต่เมื่อมีแอลฟา-แลคตัลบูมินอัตราการส่งถ่ายน้ำตาลกาแลคโตสไปยังน้ำตาลกลูโคสจะเพิ่มสูงขึ้น (Belitz and Grosch, 1999)

คุณสมบัติโดยทั่วไปของโปรตีนเวย์ประกอบด้วย

(1) การละลาย (solubility) การละลายของโปรตีนเวย์ขึ้นกับอุณหภูมิ พีเอช สารละลายร่วม และเกลือ โปรตีนละลายได้น้อยในช่วงไอโซอิเล็กทริกพอยต์ แต่โปรตีนเวย์สามารถละลายได้ในช่วงดังกล่าวซึ่งเป็นคุณสมบัติที่น่าสนใจของโปรตีนเวย์เพื่อใช้ในผลิตภัณฑ์ต่างๆ การเพิ่มอุณหภูมิมีผลทำให้การละลายของโปรตีนลดลง เนื่องจากสูญเสียโครงสร้างทางธรรมชาติ (native conformation) นอกจากนี้กระบวนการผลิตเวย์โปรตีนเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการละลายจากการทดลอง Morr and Foegeding (1990) ได้ศึกษาการละลายของโปรตีนเวย์คอนเซนเทรต (whey protein concentrate, WPC) และโปรตีนเวย์ ไอโซเลตที่พีเอช (whey protein isolate, WPI) 3, 4, 5 และ 7 พบว่า WPI ละลายได้มากกว่า WPC ที่ค่าพีเอชดังกล่าว

(2) อันตรกิริยาระหว่างน้ำและโปรตีน (water-protein interaction) โปรตีนเวย์ละลายน้ำได้ แต่จะจับกับน้ำเมื่อโครงสร้างโปรตีนเวย์เสียสภาพ แลคตัลบูมินที่เสียสภาพด้วยความร้อน (heat-denatured whey protein) จับกับน้ำได้มากกว่าโครงสร้างที่ไม่เสียสภาพ โดยค่าความหนืด (viscosity) แสดงถึงคุณสมบัติการเกิดอันตรกิริยาระหว่างน้ำและโปรตีน จากการทดลองของ De wit (1989) พบว่าที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ค่าความหนืดของเวย์เพิ่มสูงขึ้น และเพิ่มสูงมากที่อุณหภูมิมากกว่า 85 องศาเซลเซียส ในช่วงระหว่างอุณหภูมิ 65 ถึง 85 องศาเซลเซียสพบ โครงสร้างโปรตีนเวย์ที่เสียสภาพ

(3) การเกิดโฟม (foaming) คุณสมบัติการเกิดโฟมเป็นอันตรกิริยาระหว่างอากาศและน้ำ การเพิ่มอุณหภูมิทำให้เวย์เกิดโฟมได้มากขึ้น เนื่องจากโครงสร้างเวย์โปรตีนที่เสียสภาพมีการจัดเรียงตัวเกิดเป็นฟิล์มบนผิว โปรตีนเวย์ชนิดบีตา-แล็กโทโกลบูลินมีโครงสร้างตามธรรมชาติที่เกี่ยวข้องกับการเกิดโฟมมากที่สุด

(4) การเกิดอิมัลชัน (emulsification) โปรตีนเวย์เป็นอิมัลซิไฟเออร์ (emulsifier) ที่ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารทั่วไป ทั้งในลักษณะน้ำในน้ำมัน (oil in water) และ น้ำในน้ำมัน (water in oil) เนื่องจากโครงสร้างของโปรตีนเวย์มีหมู่ฟังก์ชันน้ำที่ชอบน้ำ (hydrophilic) และไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ค่าพีเอชเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเกิดอิมัลชันของโปรตีนเวย์ ในช่วงพีเอชใกล้เคียงกับค่าไอโซอิเล็กทริกพอยต์จะเกิดลักษณะอิมัลชันที่ไม่คงตัว โปรตีนเวย์เสียสภาพเนื่องจากผลของความร้อนส่งผลให้คุณสมบัติการเกิดอิมัลชันลดลง

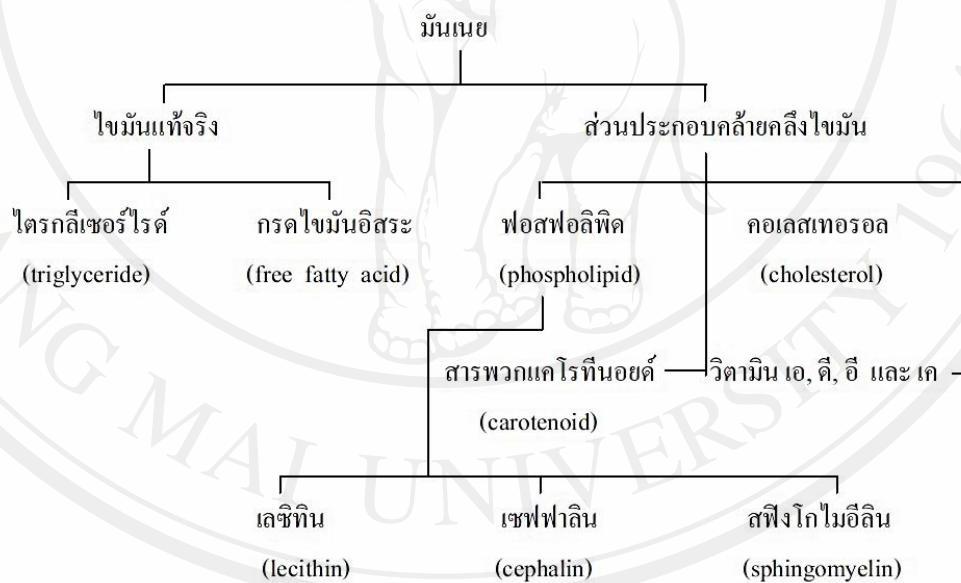
(5) การเกิดเจล (gelation) การเกิดเจลเป็นผลความสมดุลของอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุล พอลิเมอร์ (polymer molecule) เป็นผลให้เกิดโครงร่างตาข่าย (network) ซึ่งมีคุณสมบัติในการอุ้มน้ำและจับโมเลกุลอื่น การเกิดเจลของโปรตีนมี 2 ชั้น ในขั้นแรกโปรตีนเกิดการเสียสภาพ โครงสร้างไม่ม้วนงอ ชั้นต่อมาโปรตีนที่เสียสภาพจัดเรียงตัวและอยู่เป็นกลุ่ม (aggregation) ชั้นแรก

ควรเกิดได้รวดเร็วกว่าขั้นที่สองเพื่อให้ได้ลักษณะเจลที่ดี การเกิดเจลของโปรตีนเวย์ให้ลักษณะเจลที่ดี ถึงแม้ว่าการเกิดเจลนั้นมีปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อต่างๆ เช่น ปริมาณ โปรตีน อุณหภูมิ พีเอช ปริมาณเกลือแร่ เป็นต้น (Kilara, 1994)

2.1.3 ไขมัน

ไขมันจากน้ำนมมักเรียกว่า ไขมันเนย (milk fat; butter fat) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดของน้ำนมทั้งในด้านโภชนาการและในด้านเศรษฐกิจ ไขมันเนยเป็นแหล่งสำคัญของพลังงาน ไขมันเนย 1 กรัม ให้พลังงาน 9 แคลอรี นอกจากนี้ยังมีสารอาหารที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย สารที่ละลายในไขมันพวกแคโรทีน ซึ่งเป็นแหล่งของวิตามินเอ และวิตามินอื่นๆ เอ ดี อี และ เค ส่วนในแง่ความสำคัญทางเศรษฐกิจนั้น ได้แก่ การใช้ปริมาณไขมันเนยเป็นตัวกำหนดราคาซื้อขาย (นรินทร์, 2531)

ไขมันเนยประกอบด้วย ไขมันแท้จริง (true fat) และส่วนประกอบคล้ายคลึงไขมัน (associated substance) แสดงส่วนประกอบไขมันเนยดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของไขมันเนย (นรินทร์, 2531)

2.1.3.1 ไขมันแท้จริง หมายถึง กรดไขมัน (fatty acid) ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของไขมันเนย ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) ร้อยละ 98-99 ส่วนกรดไขมันอิสระมีอยู่บ้างแต่เป็นส่วนน้อย กรดไขมันที่จับอยู่กับกลีเซอรอลมีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่คาร์บอน 4 ตัวไปจนถึง 20 ตัว โดยมีกรดไขมันอิ่มตัว (saturated fatty acid) และกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัว (unsaturated fatty acid) แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ส่วนประกอบของไขมันในมันเนย

กรดไขมัน	ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
ก. ชนิดอิ่มตัว	
บิวทีริก (butyric)	3.0-4.5
คาโปรอิก (caproic)	1.3-2.2
คาพรีลิก (caprylic)	0.8-2.5
คาพริก (capric)	1.8-3.8
ลอริก (lauric)	2.0-5.0
ไมริสติก (myristic)	7.0-11.0
ปาล์มมิติก (ปาล์มมิติก)	25.0-29.0
สเตียริก (stearic)	7.0-3.0
ข. ชนิดไม่อิ่มตัว	
โอเลอิก (oleic)	30.0-40.0
ลิโนลีนิก (linoleic)	2.0-3.0
ลิโนลีนิก (linolenic)	สูงถึง 1.0
อะราชีดิก (arachidonic)	สูงถึง 1.0

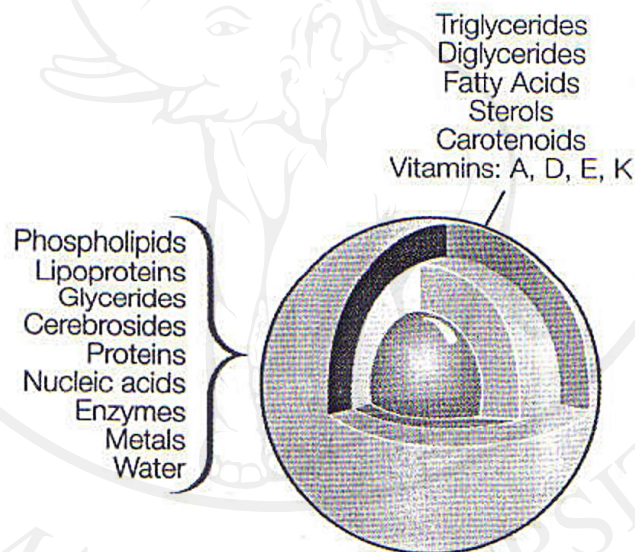
ที่มา: Bylund, 1995

2.1.3.2 ส่วนประกอบคล้ายคลึงไขมัน ในที่นี้รวมถึงสารประกอบที่ละลายได้ในไขมัน ได้แก่ ฟอสโฟลิพิด คอเลสเทอรอล สารพวกแคโรทีน และวิตามิน

นมและครีมเป็นตัวอย่างของระบบอิมัลชันน้ำมันในน้ำ (oil in water) ไขมันเนยจะกระจายอยู่เป็นเม็ดไขมันขนาดเล็ก หรือเป็นหยดไขมันในน้ำมัน โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.1 ถึง 20 ไมครอน มีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 3 ถึง 4 ไมครอน และมีจำนวนเม็ดไขมันประมาณ 15 พันล้านเม็ดต่อน้ำมัน 1 มิลลิลิตร (Bylund, 1995)

เม็ดไขมันนมจะแขวนลอยอยู่ในส่วนที่เป็นของเหลว (น้ำ) แขนงลอยอยู่แบบระบบอิมัลชันน้ำมันในน้ำ เม็ดไขมันจะทำหน้าที่เป็นเฟสกระจายตัว (dispersing phase) และของเหลวทำหน้าที่เป็นตัวกลาง (medium) หรือเฟสคงที่ (stationary phase) เม็ดไขมันแต่ละเม็ดจะมีสภาพเป็นประจุไฟฟ้าลบผลัดซึ่งกันและกัน ถ้าสามารถทำลายคอลลอยด์ที่ล้อมรอบไขมันให้หลุดออกไปได้ เม็ดไขมันขนาดเล็กๆ เหล่านี้จะสามารถรวมตัวเป็นเม็ดไขมันขนาดใหญ่

ความคงตัว (stability) ของระบบไขมันมีความสัมพันธ์กับพื้นผิว และสารประกอบที่ล้อมรอบเม็ดไขมัน คอลลอยด์ที่ล้อมรอบเม็ดไขมันนั้นเรียกว่า เยื่อหุ้มเม็ดไขมัน (fat globule membrane) (วรรณ า และ วิบูลย์ศักดิ์, 2531) ซึ่งประกอบด้วยฟอสโฟลิพิด (phospholipid) ลิโปโปรตีน (lipoprotein) ซีรีโบรไซด์ (cerebroside) โปรตีน กรดนิวคลีอิก แร่ธาตุต่างๆ รวมถึงน้ำที่ยึดเกาะกับเม็ดไขมัน (รูปที่ 2.4) สารประกอบที่ล้อมรอบเม็ดไขมัน และความหนาของเม็ดไขมันจะไม่คงที่ขึ้นกับการแลกเปลี่ยนสารต่างๆ ในซีรัม มีผู้ทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างของเยื่อหุ้มเม็ดไขมัน พบว่าประกอบด้วยไตรกลีเซอไรด์ที่มีจุดหลอมเหลวสูงจำนวนหลายชั้น ตามมาด้วยชั้นฟอสโฟลิพิดหนึ่งชั้น ต่อจากนั้นเป็นโปรตีนจำนวนหลายชั้นด้วยกัน ชั้นในสุดของเม็ดไขมันจะเป็นไขมันเหลว

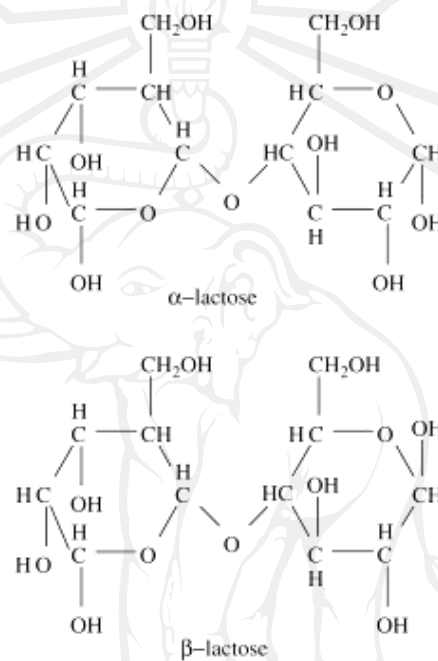


รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบต่างๆ ในเม็ดไขมัน (Bylund, 1995)

2.1.4 น้ำตาลแลคโตส

น้ำตาลแลคโตส (lactose) เป็นคาร์โบไฮเดรตหลักในน้ำนม และยังพบสารประกอบอื่นๆ เช่น ซีรีโบรไซด์ กลูโคส กาแลคโตส และซูโครส ในปริมาณเล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบน้ำตาลอะมิโน (amino sugar) เช่น เฮกโซซามีน (hexosamine) แอซิทิลแล็กโทซามีน (o-acetyl-lactosamine) และ โอลิโกแซ็กคาไรด์ (oligosaccharide) สารประกอบเหล่านี้แม้จะพบในปริมาณเล็กน้อยแต่มีบทบาทสำคัญต่อน้ำนม เช่น ในกระบวนการที่ใช้ความร้อนสารประกอบเหล่านี้มีผลต่อกลิ่นน้ำนม

น้ำตาลแลคโตสเป็นน้ำตาลสองชั้น หรือไดแซ็กคาไรด์ ประกอบด้วยน้ำตาลชั้นเดียวสองชนิด คือ กลูโคสและกาแลคโตส แลคโตสที่พบในน้ำนมเป็น โมเลกุลของสอง ไอโซเมอร์ คือ แอลฟา (α) และบีตา (β) ซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพแตกต่างกัน โครงสร้างของแอลฟา-แลคโตสและบีตา-แลคโตสแสดงในรูปที่ 2.5 ปกติแล้วจะพบไอโซเมอร์ทั้งสองชนิดในส่วนผสมที่สมดุล (equilibrium mixture) ในผลิตภัณฑ์นมชนิดของเหลว (fluid dairy product)



รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของแอลฟา-แลคโตสและบีตา-แลคโตส (Ganzle et al., 2008)

ปกติแอลฟา-แลคโตส (รูปที่ 2.5) มีค่าการละลายที่ 25 องศาเซลเซียสเท่ากับร้อยละ 17.8 และใน สารละลายอิ่มตัวจะตกผลึกอยู่ในรูป α -hydrate (มีน้ำ 1 โมเลกุล) เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 93 องศาเซลเซียสผลึกมีความแข็งแรงมาก และมีขนาดใหญ่ ซึ่งมักจะพบในผลิตภัณฑ์นมที่ผ่านกรรมวิธีระเหยน้ำหรือทำให้เข้มข้น เมื่อรับประทานอาจรู้สึกเหมือนเป็นทราย (sandiness) และบางครั้งอาจพบลักษณะเช่นนี้ในผลิตภัณฑ์ที่มีแลคโตสสูงและเก็บไว้ในที่อุณหภูมิต่ำ เช่น ไอศกรีม อีกรูปหนึ่งของน้ำตาลแลคโตส คือ บีตา-แลคโตสในรูปผลึกของ anhydrous β -lactose เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 93 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิห้องบีตา-แลคโตสจะละลายได้ดีกว่าแอลฟา-แลคโตสถึง 7 เท่า

น้ำตาลแลคโตสมีความหวานน้อยกว่าน้ำตาลชนิดอื่น และละลายน้ำได้น้อยด้วย ถ้าเปรียบเทียบความหวาน ระหว่างน้ำตาลชนิดต่างๆ น้ำตาลแลคโตสละลายได้น้อยลงในอุณหภูมิต่างๆ ทั้งนี้เนื่องจากน้ำตาลแลคโตสมีแนวโน้มที่จะตกผลึก ซึ่งมักจะพบในผลิตภัณฑ์นมที่ผ่านกรรมวิธีระเหยน้ำหรือทำให้เกิดความเข้มข้นอาจรู้สึกเหมือนเป็นทราย เมื่อรับประทานบางครั้งอาจพบ

ลักษณะเช่นนี้ในผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำตาลแลคโตสประกอบอยู่สูง และเก็บผลิตภัณฑ์ไว้ในที่มีอากาศเย็น นับว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อการละลายของน้ำตาลแลคโตส อัตราส่วนสัมพัทธ์ (relative ratio) ระหว่างแอลฟาและบีตาในสารละลายแลคโตส ตลอดจนผลของกรรมวิธีตกผลึก และกระบวนการทำแห้งต่อการเปลี่ยนรูปของน้ำตาลแลคโตส (วรรณมา และวิบูลย์ศักดิ์, 2531)

2.1.5 แร่ธาตุ

น้ำนมประกอบด้วยแร่ธาตุหลักอยู่ 7 ชนิด นอกนั้นเป็นธาตุที่พบในปริมาณเพียงเล็กน้อย แร่ธาตุสำคัญที่ตรวจพบ แสดงในตารางที่ 2.4 แร่ธาตุที่พบในปริมาณเล็กน้อย ได้แก่ สังกะสี ทองแดง เหล็ก และอื่น ๆ ส่วนเกลือแร่ หรือสารประกอบเกลือที่พบในน้ำนม ได้แก่ เกลือคลอไรด์ ฟอสเฟต และซีเตรตของธาตุแคลเซียม แมกนีเซียม โซเดียม และโพแทสเซียม

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบแร่ธาตุ (มิลลิกรัมหรือไมโครกรัมต่อน้ำนม 1 ลิตร) ของน้ำนมจากโคนม

แร่ธาตุ	น้ำนมโค	
	ค่าเฉลี่ย	ช่วง
โซเดียม (มิลลิกรัม)	500	350-900
โพแทสเซียม (มิลลิกรัม)	1500	1100-1700
คลอไรด์ (มิลลิกรัม)	950	900-1100
แคลเซียม (มิลลิกรัม)	1200	1100-1300
แมกนีเซียม (มิลลิกรัม)	120	90-140
ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม)	950	900-1000
เหล็ก (ไมโครกรัม)	500	300-600
สังกะสี (ไมโครกรัม)	3500	2000-6000
ทองแดง (ไมโครกรัม)	200	100-600
แมงกานีส (ไมโครกรัม)	30	20-50
ไอโอดีน	260	-
ฟลูออไรด์ (ไมโครกรัม)	-	30-220
ซีลีเนียม (ไมโครกรัม)	-	5-67
โคบอลต์ (ไมโครกรัม)	1	0.5-1.3
โครเมียม (ไมโครกรัม)	10	8-13
โมลิบดีนัม (ไมโครกรัม)	73	18-120

ตารางที่ 2.4 (ต่อ)

แร่ธาตุ	น้ำนมโค	
	ค่าเฉลี่ย	ช่วง
นิกเกิล (ไมโครกรัม)	25	0-50
ซิลิกอน (ไมโครกรัม)	2600	750-7000
วานาเดียม (ไมโครกรัม)	-	Tr-310
ดีบุก (ไมโครกรัม)	170	40-500
อาซีนิก (ไมโครกรัม)	45	20-60

ที่มา: Fox and McSweeney (1998)

หมายเหตุ Tr (trace) หมายถึง พบจำนวนเล็กน้อย

2.2 กระบวนการผลิตน้ำเวย์

กระบวนการผลิตเวย์หรือน้ำเวย์ที่ได้จากอุตสาหกรรมนม นั้น จะมีขั้นตอนของการผลิตดังนี้ (Zadow, 1992)

2.2.1 ต้นกำเนิดและลักษณะของเวย์

ดังกล่าวมาแล้วข้างต้น เวย์หรือน้ำเวย์โดยทั่วไป ได้จากการผลิตเนยแข็งในเชิงพาณิชย์ เวย์นั้นเป็นผลพลอยได้ซึ่งเป็นส่วนของของเสียในกระบวนการที่ต้องมีการกำจัดออกไป เป็นเวลากว่าหลายทศวรรษของการตระหนักถึงเรื่องสิ่งแวดล้อมและการแข่งขันทางการค้าของความเป็นไปได้ในการนำเวย์ที่ได้จากอุตสาหกรรมที่เป็นของเสียในกระบวนการผลิต นำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ และมีการใช้เทคโนโลยีมาพัฒนาให้มีความสะดวกขึ้นพร้อมทั้งยังตระหนักถึงความสำคัญในการเพิ่มมูลค่าของเวย์ โดยการนำไปใช้ผลิตร่วมกับผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นๆ อีกด้วย อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปมักนำเวย์มากรองผ่านการเมมเบรนให้เกิดการแยกของสารและเพิ่มความเข้มข้นของโปรตีนในกระบวนการปฏิบัติการภายใต้การใช้ความดัน ซึ่งตัวทำละลายและโมเลกุลตัวถูกละลายขนาดเล็ก ก็จะเคลื่อนผ่านเมมเบรนที่เรียกว่า เพอร์มีเอท (permeate) การแยกสารโดยการใช้เมมเบรนจะมีความสำคัญในทำให้น้ำเวย์ที่ได้มีความบริสุทธิ์จากกระบวนการผลิตเนยแข็ง แต่อาจจะยกเว้นสารบางอย่างหรืออนุภาคบางชนิด เช่น แบคทีเรีย อนุภาคไขมัน โมเลกุลโปรตีนที่มีขนาดใหญ่ ทั้งนี้ จะขึ้นอยู่กับขนาดของรูพรุนของเมมเบรนที่ใช้

เทคโนโลยีที่สามารถใช้ประโยชน์ได้สำหรับกระบวนการผลิตของเวย์ทั้งหมดหรือในการแยกโปรตีนออกจากเวย์ (โดยวิธีอัลตราฟิวเตรชัน หรือระบบปฏิบัติการอื่นๆ) ในการทำให้

เข้มข้น ขึ้นหรือเป็นการทำแห้งของผลิตภัณฑ์โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบเดิมที่มีอยู่ในเวย์ โดยส่วนประกอบและลักษณะของเวย์และเพอร์มิเอท ซึ่งแบ่งประเภทของเวย์ได้เป็นสวิตเวย์ และแอชีดเวย์

2.2.2 กระบวนการผลิตเวย์

เมื่อได้รับเวย์มาหลังจากการผลิตเนยแข็งแต่ละภาคการผลิตแล้ว จะต้องนำมารวมให้เป็นเนื้อเดียวกันทั้งหมดและเก็บไว้จนรวมตัวกันจนมีความเสถียร สำหรับใช้เป็นวัตถุดิบที่จำเป็นในขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.2.2.1 การขจัดสิ่งปนเปื้อน (Clarification)

เนื่องจากเวย์ที่ได้จากการผลิตเนยแข็งหรือการแยกโปรตีนเคซีนออกนั้น ยังคงมีอนุภาคของสารแขวนลอยอยู่ หรือเคิร์ดที่เกิดขึ้นก็อาจจะมีหลงเหลืออยู่บ้างในการทำให้โปรตีนตกตะกอน โดยสิ่งเหล่านี้จะเพิ่มความเสี่ยงต่อเครื่องจักรที่ใช้งาน ซึ่งอาจจะทำให้เกิดการอุดตันได้ในช่องของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchanger channels) หรือสารพวกพอลิเมอร์ที่เป็นอันตรายต่อกระบวนการหมักเบรณอย่าง อุลตราฟิวเตรชัน หรือรีเวอร์สออสโมซิส นอกจากนี้ยังมีผลกระทบต่อสมบัติการละลายและกลิ่นรสของผลิตภัณฑ์สุดท้ายด้วยการขจัดสิ่งสกปรกหรือสิ่งปนเปื้อนในเวย์ที่นำมาเป็นวัตถุดิบในกระบวนการจะสำเร็จได้จะต้องอาศัยวิธีการในการตกตะกอนร่วมกันหลายวิธี เช่น การผ่านแผ่นตะแกรงร้อน การปั่นเหวี่ยงหรือจะเป็นเพียงการปั่นเหวี่ยงโดยลำพัง ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดและระดับความละเอียดของอนุภาค

2.2.2.2 การแยก (Separation)

เมื่อได้เวย์จากกระบวนการผลิตเนยแข็ง ตามปกติจะมีปริมาณไขมันอยู่หนาแน่น ยกเว้นเฉพาะชนิดของเนยแข็งที่ทำมาจากน้ำนมปราศจากไขมัน (non-fat milk) เช่น skim Cottage หรือ skim Cheddar cheese เพราะเนยแข็งแต่ละชนิดก็จะมีเอกลักษณ์แตกต่างกันไปให้มีกลิ่นและรสชาติเฉพาะตัว และตามความต้องการของผู้บริโภค การแยกไขมันขึ้นอยู่กับระดับความละเอียดของอนุภาค โดยถ้ามีระดับต่ำจะผ่านเข้าเครื่องแยก (separator) เพื่อให้เวย์ใส แต่ถ้ามีระดับความละเอียดของอนุภาคสูงก็จะนำไปทำตามขั้นตอนแรกอีกครั้ง คือการทำให้ใสขึ้นแล้วจึงนำไปผ่านเข้าเครื่องแยก อย่างไรก็ตาม เป็นไปไม่ได้ที่จะแยกเอาไขมันออกไปได้ทั้งหมดจากเวย์โดยการปั่นเหวี่ยง ยังคงมีปริมาณของไขมันเหลืออยู่เล็กน้อย ประมาณ 0.06 %

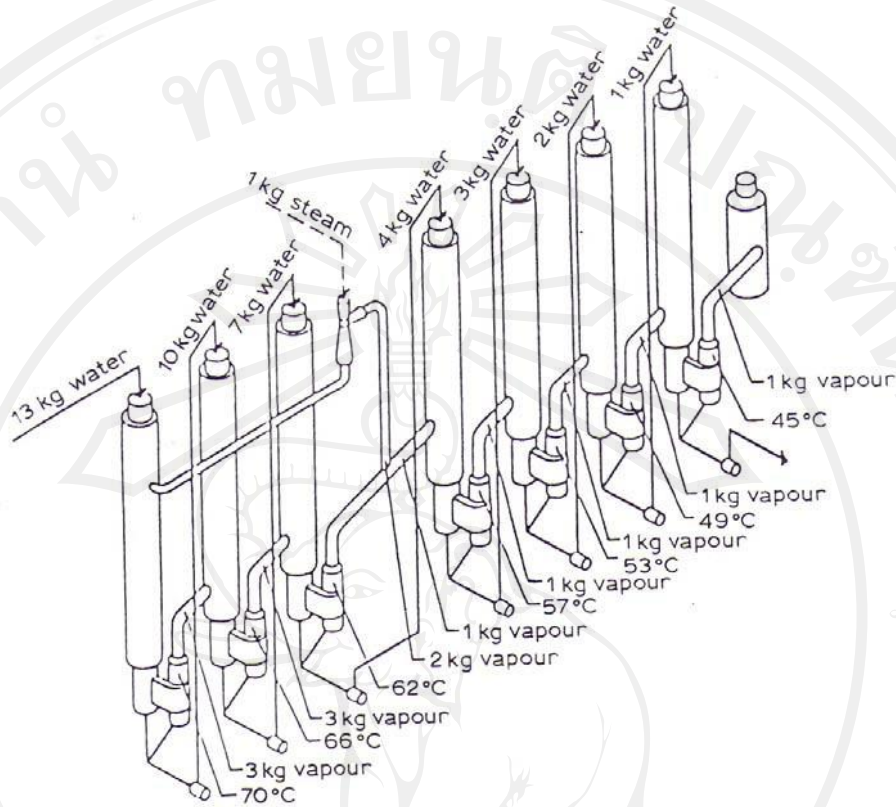
2.2.2.3 การพาสเจอร์ไรซ์ (Pasteurization)

การผลิตเวย์ในอุตสาหกรรม จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการพาสเจอร์ไรซ์เวย์เพื่อลดจำนวนจุลินทรีย์ลงจำนวนหนึ่ง เพื่อรักษาคุณภาพและสามารถเก็บไว้ได้อย่างเสถียรชั่วระยะเวลาหนึ่ง ควรเก็บรักษาเวย์ไว้ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ก่อนนำมาพาสเจอร์ไรซ์ เวลาและอุณหภูมิที่ใช้ร่วมกันจะอยู่ในช่วง 72-75 องศาเซลเซียส นาน 15-20 วินาที ซึ่งแน่นอนว่าสามารถลดจำนวนเชื้อจุลินทรีย์และยับยั้งเอนไซม์ฟอสฟาเทสและโครโมซินได้ แต่บางครั้งก็จะเพิ่มอุณหภูมิถึง 78 องศาเซลเซียส เพื่อลดความเสี่ยงที่เกิดขึ้นจาก แบคทีริโอเฟส (bacteriophage) ที่ปนเปื้อนมาจากโรงงานผลิตเนยแข็ง

2.2.3 การเพิ่มความเข้มข้นของเวย์

2.2.3.1 การทำระเหย (Evaporation)

กระบวนการทำระเหยในอุตสาหกรรมนมนี้มีความสำคัญมาเป็นระยะเวลานานแล้ว นอกจากนี้ยังสามารถนำเวย์มาใช้ประโยชน์ในการเป็นตัวทดสอบระบบของเครื่องระเหยโดยผ่านการดึงน้ำออก ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ใช้ในการออกแบบและปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องระเหยสารเพราะเวย์จะมีความเข้มข้นของของแข็งต่ำและเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีราคาถูก เหมาะแก่การนำมาใช้งาน การระเหยเป็นวิธีการแยกสารที่นิยมใช้ระเหยน้ำออกจากสารละลาย หากการระเหยเกิดขึ้นที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศการระเหยจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำลง จึงเหมาะสำหรับใช้ระเหยอาหารที่เสื่อมเสียง่ายหากได้รับความร้อนสูง เวย์จะมีความเข้มข้นของของแข็งในช่วง 40-60 % ซึ่งเหมาะสมต่อการนำไปทำแห้งในภายหลัง ในทางทฤษฎีเมื่อน้ำเวย์มีอุณหภูมิสูงขึ้นจะเกิดการกระจายตัวสูงโดยทั้งถึงภายในท่อแบบแนวตั้ง และมีการไหลของน้ำเวย์เกิดเป็นแผ่นฟิล์มบางภายใต้สูญญากาศ ระหว่างที่กระบวนการกำลังดำเนินอยู่ น้ำจะระเหยกลายเป็นไอออกจากชั้นของฟิล์มทำให้มีความเข้มข้นขึ้นอยู่ที่ด้านล่างของท่อ การออกแบบเครื่องระเหยมีทั้งแบบที่เป็นท่อเดี่ยว (single tube) ในขั้นตอนเดียว และหลายท่อ (multiple tube) ทำให้สามารถนำพลังงานไอน้ำมาหมุนเวียนใช้ได้อย่างสมบูรณ์ พลังงานไอน้ำจากในขั้นตอนก่อนหน้านั้นจะถูกนำมาเป็นแหล่งพลังงานให้กับขั้นต่อไป ดังตัวอย่างของเครื่องระเหยสารแบบหลายท่อ รูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 เครื่องระเหยสารแบบ 7 ท่อ (Zadow, 1992)

2.2.3.2 รีเวอร์สออสโมซิส (Reverse osmosis)

กระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse osmosis; RO) มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องในหลายปีที่ผ่านมาสำหรับการทำน้ำให้บริสุทธิ์ อีกทั้งยังได้มีการนำมาประยุกต์ใช้กับน้ำแฉะเพื่อทำให้มีความเข้มข้นเจือจางลง แต่อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของแฉะที่จะถูกนำมาใช้ในกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสยังมีข้อจำกัด โดยความหนืดของแฉะนั้นจะต้องมีปริมาณของแข็งอยู่ 20-22 % กระบวนการนี้ไม่สามารถใช้แทนกระบวนการทำระเหยได้ทั้งหมด แต่จะเป็นกระบวนการที่ใช้ร่วมกัน ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในกระบวนการทำระเหยในขั้นตอนต่อไป และยังเป็นการเพิ่มปริมาณมวลรวมของผลิตภัณฑ์นี้

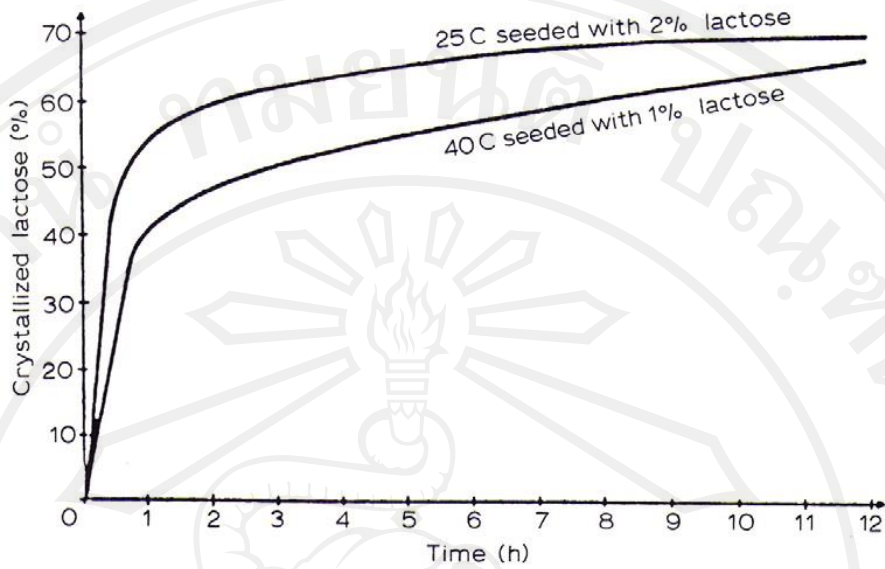
หลักการของกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) เป็นการบังคับให้เกิดการย้อนกลับของปรากฏการณ์ออสโมซิส โดยออสโมซิสนี้เป็นปรากฏการณ์ที่ของเหลวซึมผ่าน Semipermeable membrane ซึ่งมีลักษณะเป็นเยื่อบางๆ มีรูพรุน เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.0001 ถึง 0.1 ไมครอน โดยที่โมเลกุลของตัวทำละลาย (solvent) ของสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำซึมผ่านเมมเบรน ไปยังสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง จนกระทั่งเกิดสภาวะสมดุลระหว่างความเข้มข้นของ

สารละลายทั้งสอง ความสามารถในการออสโมซิสของสารละลายขึ้นอยู่กับสมบัติของสารละลาย ได้แก่ความดันออสโมติก (Osmotic pressure) ความดันออสโมติก ถือเป็นสมบัติเฉพาะของสารละลายมีหน่วยเป็นบรรยากาศ โดยความดันออสโมติกจะมีค่าสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลาย สารละลายที่มีความเข้มข้นสูงจะมีความดันออสโมติกสูงกว่า สารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำ จากนั้นจะมีการบังคับให้เกิดการย้อนกลับของปรากฏการณ์ออสโมซิส โดยการให้ความดันไฮดรอลิก (hydraulic pressure) แก่สารละลายที่มีความเข้มข้นสูง เพื่อให้เกิดการออสโมซิส จากสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงไปยังสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำ ซึ่งความดันไฮดรอลิกที่ใส่เข้าไป ต้องมีค่ามากกว่าความดันออสโมติกจึงจะเกิดการรีเวอร์สออสโมซิสได้

2.2.4 กระบวนการผลิตในขั้นตอนสุดท้าย

2.2.4.1 การตกผลึกของเวย์

ในขั้นตอนสุดท้ายของการผลิตเวย์ผงจากเวย์เข้มข้น ควรจะมีกระบวนการคั่งน้ำออกจากเวย์ร่วมด้วย เช่น การทำแห้งโดยการฉีดพ่นเป็นผง แต่ต้องมีความระมัดระวังเป็นพิเศษเพราะจะมีผลต่อการตกผลึกของน้ำตาลแลคโตสในเวย์เข้มข้นและเพอร์มีเอทได้ โดยปกติของแห้งสามารถที่จะรับหรือถ่ายความชื้นให้กับบรรยากาศรอบๆ ตัวจนถึงภาวะสมดุลได้มาก และทำให้มีความเสี่ยงในการเกาะเป็นก้อนในการเก็บรักษา นอกจากนี้ประสิทธิภาพของการทำแห้งจะลดลงไปเนื่องจากเป็นไปไม่ได้ที่จะทำให้เวย์เข้มข้นมีปริมาณของแข็งมากกว่า 42-45 % ของปริมาณของแข็งทั้งหมด ดังนั้นในการผลิตเวย์ผงมักจะผลิตในรูปแบบที่ไม่ดูดความชื้น (non-hygroscopic whey powder) ซึ่งจะต้องทำให้แลคโตสที่มีอยู่ในเวย์มากกว่า 70 % ตกผลึกก่อนที่จะนำไปทำแห้งความเข้มข้นของเวย์และเพอร์มีเอทที่มีปริมาณของแข็งมากกว่า 55 % ที่อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส อธิบายได้ว่าเป็นสารละลายอิ่มตัวของแลคโตสและจำเป็นที่ต้องหลีกเลี่ยงการเกิดผลึกขึ้นเองโดยธรรมชาติในเครื่องทำระเหยโดยที่ยังต้องคงอุณหภูมิสูงในขั้นตอนสุดท้ายของเครื่องทำระเหย การควบคุมการเกิดผลึกแลคโตสจะใช้การทำให้เย็นอย่างรวดเร็วถึงอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งจำเป็นที่จะต้องควบคุมขนาดและรูปร่างของผลึกด้วย และปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดผลึกของแลคโตสคือความหนืดของสารละลาย ดังนั้นการให้ความร้อนแก่เวย์จะมีส่วนสำคัญต่อการทำให้โปรตีนในเวย์เสียสภาพ และมีผลต่อความหนืดของสารละลาย แนวโน้มลักษณะการเกิดผลึกแลคโตส แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แนวโน้มการเกิดผลึกของแลคโตสเมื่อเทียบกับเวลา (Zadow, 1992)

2.2.4.2 การทำแห้งของเวย์และเพอร์มิเอท

เทคนิคและวิธีการที่ใช้ในการทำแห้งของทั้งเวย์และเพอร์มิเอทมีลักษณะคล้ายกัน

ก. เวย์ผงแบบดูดความชื้น (Hygroscopic whey powder)

แลคโตสที่มีรูปร่างแบบ แอลฟา-เอมอร์ฟัส (alpha-amorphous) จะมีความสามารถในการดูดความชื้นได้สูง ซึ่งในลักษณะของรูปแบบนี้จะไม่มีปัญหาในการทำแห้งเมื่อมีการป้อนเข้าเครื่อง โดยตัวแปรของระบบการปฏิบัติการและลักษณะทางกายภาพของตัวผงที่ได้จะแตกต่างจากผงของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเวย์ผงแบบไม่ดูดความชื้น เนื่องจากมีข้อจำกัดในการละลายของสารซึ่งเวย์หรือเพอร์มิเอทจะมีความเข้มข้นเพียง 42-45 % ของปริมาณของของแข็งทั้งหมด ก่อนที่จะถูกฉีดพ่นให้เป็นผงในการทำแห้งอย่างทันที การแพร่กระจายของตัวผลิตภัณฑ์ในเครื่องทำแห้งอาจจะต้องอาศัยทั้งหัวฉีดแรงดันสูง (high-pressure nozzle) และ จานหมุนแบบพ่นฝอย (rotating disc atomizer) ช่องทางขาเข้าของเครื่องทำแห้งใช้อุณหภูมิสูงถึง 180 องศาเซลเซียส เพื่อเป็นการป้องกันผงของผลิตภัณฑ์ที่สามารถดูดความชื้นได้มาก ส่วนบริเวณช่องทางขาออกอาจจะใช้อุณหภูมิสูงด้วยเช่นกัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีอนุภาคที่ละเอียด แต่ค่อนข้างสกปรก เหนียวและมีความชื้นสูง

ข. เวย์ผงแบบไม่ดูดความชื้น (Non-hygroscopic whey powder)

หลังจากเพิ่มความเข้มข้นและทำให้มีการตกผลึกแล้ว เวย์หรือเพอร์มิเอทจะมีปริมาณของแข็งเป็น 55-60 % ของปริมาณของของแข็งทั้งหมดและรูปร่างของแลคโตสจะเป็นแบบ แอลฟา-โมโนไฮเดรต (alpha-monohydrate) ดังนั้นเมื่อผ่านเข้าเครื่องทำแห้งจะมีผลต่อการปรับปรุงลักษณะของการทำแห้งเป็นผงมีคุณภาพดีขึ้น รวมไปถึงจะมีขนาดของอนุภาคใหญ่ขึ้นอีกทั้งมีความ

หนาแน่นสูง และยังมีแนวโน้มเกี่ยวกับเรื่องความชื้นที่จะรวมตัวเกาะเป็นก้อนลดลง ปัจจุบันมีอิทธิพลมากต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งแน่นอนว่าในการผลิตเพื่อให้มีคุณภาพสูง ผงที่ได้ไม่เกาะรวมเป็นก้อน ต้องมีการให้ความร้อนเป็นสภาวะเบื้องต้นก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการทำระเหยที่เป็นส่วนสำคัญต่อไป สำหรับอุณหภูมิที่ใช้ให้ความร้อนเบื้องต้นนั้นจะมีช่วงของอุณหภูมิแคบ เช่น ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ใช้เวลาประมาณ 20 วินาที จะมีการตกผลึกอย่างรวดเร็วและมากมาย ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จะมีคุณภาพดีและไม่มีความเหนียวมากเกินไป แต่ถ้าให้ความร้อนเบื้องต้นสูงมากก็ย่อมทำให้เกิดความเหนียวมากขึ้น สารละลายจะมีความเข้มข้นมากสามารถที่จะถูกฉีดพ่นให้เป็นผงได้อย่างเป็นที่น่าสนใจ ถ้าให้ความร้อนเบื้องต้นต่ำก็จะมีแนวโน้มที่ดีสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความเหนียวซึ่งจะไปเกาะอยู่ที่ผนังห้องเครื่องทำแห้ง และสมบัติในการเกาะรวมกันเป็นก้อนของผงผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้น ความเหนียวของสารละลายไม่ได้ขึ้นอยู่กับสภาวะการให้ความร้อนเบื้องต้นเท่านั้น แต่ยังขึ้นกับปริมาณของโปรตีนและตัวแปรตามฤดูกาลของวัตถุดิบที่ใช้ สำหรับเวย์ผงแบบไม่ดูดความชื้นใช้อุณหภูมิช่องทางขาเข้าประมาณ 185 องศาเซลเซียส และช่องทางขาออกประมาณ 85 องศาเซลเซียส

2.3 ปัญหาที่มีผลกระทบมาจากน้ำเวย์

น้ำเวย์ที่ได้จากกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์น้ำนม โดยเฉพาะการผลิตเนยแข็งนั้นมักเป็นปัญหาล้าสมัยกับสิ่งปฏิกูลจากเทศบาล แต่เป็นของเสียที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่สูง หากนำไปแปรรูปดำเนินการต่อ จะมีค่าใช้จ่ายอย่างมาก รวมไปถึงเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้เป็นของเฉพาะทางซึ่งมีราคาแพง ทำให้ไม่เหมาะสมต่อโรงงานอุตสาหกรรมขนาดเล็ก ซึ่งแนวทางในการบำบัดควรใช้วิธีมากกว่าหนึ่งอย่าง เพื่อประสิทธิภาพที่ดี และควรวางแผนการจัดการบำบัดอย่างเป็นระบบให้สอดคล้องกัน สำหรับวิธีการบำบัดน้ำเวย์นั้นจะมีค่าใช้จ่ายที่สูงกว่าการบำบัดน้ำเสียทั่วไป เช่น น้ำเสียจากอาคารบ้านเรือน ชุมชนในหมู่บ้านหรือในเขตเมืองโดยวิธีการที่ใช้ก็เหมือนกับวิธีการต่างๆที่มีอยู่ในปัจจุบัน ดังแสดงในตารางที่ 2.5 (เอกริกษ์ และคณะ, 2549 ; Zadow, 1992) นอกจากนี้น้ำเวย์ยังมีค่า biological oxygen demand (BOD) สูงประมาณ 30,000-40,000 ppm ส่วนค่า chemical oxygen demand (COD) เท่ากับ 60 kg/m³ ในแต่ละปีพบว่าน้ำเวย์ทั่วโลกมีประมาณ 85 ล้านตันและมีแนวโน้มว่าจะเพิ่มขึ้น 3 % ต่อปี ด้วยเหตุนี้ทำให้กระบวนการกำจัดน้ำเวย์เนยแข็งเป็นปัญหาทั่วโลกเพราะน้ำเวย์ที่เหลือทิ้งมีปริมาณมาก ประกอบกับน้ำเวย์มีมวลโมเลกุลน้อยและละลายน้ำได้ ถึงแม้ว่าน้ำเวย์จะมีปริมาณแลคโตส 4-5 % แต่เมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ น้ำเวย์นี้จะทำให้ระดับออกซิเจนในน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมา

สำหรับประเทศไทยนอกจากจะมีน้ำเว้าจากเนยแข็งแล้ว ยังมีน้ำเว้าที่น่าสนใจอีกอย่างหนึ่งคือ น้ำเว้าเต้าหู้ซึ่งได้จากกระบวนการทำเต้าหู้ โดยปกติโรงงานผลิตเต้าหู้จะทิ้งน้ำเว้าเต้าหู้ที่เหลือจากการตกตะกอนโปรตีนออกจากน้ำต้มถั่วเหลืองลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยไม่ผ่านกระบวนการบำบัดก่อน ซึ่งถั่วเหลือง 1 กิโลกรัม ใช้น้ำในการผลิต 10 ลิตร ในแต่ละโรงงานจะมีน้ำเว้าเต้าหู้ไม่ต่ำกว่า 500 ลิตรต่อวัน ส่งผลให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำเช่นเดียวกับน้ำเว้าจากเนยแข็ง เพราะน้ำเว้าเต้าหู้มีค่า BOD และมีสารอินทรีย์สูง (กุลวดี, 2552)

ตารางที่ 2.5 ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของวิธีการบำบัดน้ำเสียแบบต่างๆ ในอุตสาหกรรมนม

<i>Activated sludge (A.S)</i>	<i>Trickling filters (T.F.)</i>	<i>Aerated lagoon (A.L.)</i>
<p><i>Advantages</i> Good BOD reduction Good operating flexibility Good resistance to shock loads Minimum load requirements</p>	<p><i>Advantages</i> Good BOD reduction Good resistance to shock loads Lower operating cost than A.S.</p>	<p><i>Advantages</i> Good BOD reduction Good resistance to shock loads Low capital cost Less supervision than A.S. and T.F. Lower sludge problems than A.S. and T.F.</p>
<p><i>Disadvantages</i> Substantial capital investment High operating cost Continuous supervision Upset to shock loads</p> <p>Sludge disposal problems Very temperature sensitive</p>	<p><i>Disadvantages</i> Substantial capital investment High operating cost Continuous supervision Long acclimation period after shock loads Ponding of trickling filters Significant land requirements Sludge disposal problems Performance drop with temperature drop</p>	<p><i>Disadvantages</i> Large land requirements High power cost Performance drop with temperature drop</p>

ตารางที่ 2.5 (ต่อ)

<i>Stabilization ponds (S.P.)</i>	<i>Irrigation</i>	<i>Combine systems</i>
<p><i>Advantages</i> Suitable as a pretreatment system Prevents shock loads to preceding treatment systems Good resistance to shock loads Low capital cost Low operating cost Less sludge problems than A.S. and T.F.</p> <p><i>Disadvantages</i> BOD reduction below A.S., T.F. and A.L. Algae growth Large land requirements Insect problems Odours Ordinances restricting location</p>	<p><i>Advantages</i> 100% treatment efficiency Low capital cost</p> <p>No sludge problems (except for ridge and furrow) Suitable for disposal of whey</p> <p><i>Disadvantages</i> Amount of land required and in some cases, distance from the factory Surface runoff Ponding Seepage to ground water supplies Health hazards to animals Soil-clogging and compaction Vegetation damage Insect propagation Odours Spray carry-over Maintenance problems—clogging nozzles, freeze up, and the requirement that lines be relocated to allow 'rest periods' Cold water surface icing Sludge build up (ridge and furrow only) State ordinances limiting location</p>	<p><i>Advantages</i> Good BOD reduction Good resistance to shock</p> <p><i>Disadvantages</i> High capital costs High operating costs Significant land requirements Constant supervision Sludge disposal problems</p>

ที่มา: Zadow, 1992

2.4 การใช้ประโยชน์ของน้ำเวย์

เวย์โปรตีนเป็นที่รู้จักกันดีว่ามีคุณค่าทางโภชนาการที่สูงมีบทบาทและมีประโยชน์ทางด้านอาหาร มีการประเมินว่ามีการผลิตทั่วโลกเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง และได้นำมาใช้ในการเป็นส่วนผสมหรือส่วนประกอบต่างๆ ในอาหาร ลักษณะของคุณค่าทางโภชนาการและบทบาทหน้าที่ที่มีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับโครงสร้างและลักษณะทางชีวภาพของโปรตีน ในปัจจุบันยังเป็นที่สนใจในเรื่องของคุณค่าทางอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโต และยังมีประสิทธิภาพต่อสูตรอาหารสำหรับวัยทารกในการเจริญเติบโตด้วยเช่นกัน ซึ่งยังรวมไปถึงอาหารสำหรับลดน้ำหนักและอาหารเสริมสุขภาพ โดยใช้ในรูปแบบของโปรตีนธรรมชาติและโปรตีนที่ย่อยง่าย (Wit, 1998) มีการนำเวย์ในรูปแบบต่างๆ มาใช้ในการวิจัยเพื่อเป็นประโยชน์ในหลายๆ ด้านในทางอาหาร เช่น Kontogiorgos et al. (2009) มีการศึกษาพฤติกรรมและการเปลี่ยนแปลงของสารผสมระหว่าง oat β -glucan กับ whey protein isolate (WPI) สารผสมทั้งสองมีค่าพีเอชเป็น 3.0 และ 7.0 โดยมีการเติมซูโครสในปริมาณ 10 % w/v และแบบไม่เติมซูโครส วิเคราะห์ค่าต่างๆ ด้วยการวัดความหนืด การทำอิเล็กโตรโฟรีซิส และการส่องกล้องจุลทรรศน์แบบ fluorescent microscopy แสดงภาพของโครงสร้าง ซึ่ง

การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช จาก 7.0 ถึง 3.0 โดยมีการเติมซูโครสเพื่อช่วยให้มีการผสมให้เข้ากันได้ดี หลังจากนั้นค่าพีเอชลดลงมาอยู่ที่ 3.0 การวัดความหนืดของสารผสมในระบบจะได้ลักษณะการไหลเป็นแบบ pseudoplastic คือ เป็นของไหลที่มีค่าความหนืดลดลง เมื่อเพิ่มอัตราเฉือน หรือ ยิ่งกวนเร็ว ยิ่งเกิดการได้ไหลง่าย และพฤติกรรมที่เปลี่ยนไปนั้นจะเป็นไปตามปัจจัยความเข้มข้นของสารผสม Tedeschi et al. (2009) ได้นำเวย์โปรตีนมาเป็นส่วนผสมในการเคลือบผิวของสารตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบการสลายตัวของ bioaccessibility และ bioavailability (มีลักษณะคล้ายกับสารประเภทวิตามิน หรือสารต้านอนุมูลอิสระ) เพื่อใช้คาดคะเนกระบวนการย่อยที่เกิดขึ้นภายในร่างกาย โดยให้มีการแพร่กระจายอย่างช้าๆ และมีการละลายพร้อมทั้งถูกดูดซึมที่ลำไส้ ซึ่งต้องมีความคงตัวในระหว่างกระบวนการผลิตมาเป็นอาหาร และสามารถคาดการณ์การปลดปล่อยของสารออกจากวัสดุเคลือบผิว ภายใต้สภาวะที่เลียนแบบลำไส้เล็ก เพื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของวัสดุที่ใช้เคลือบผิวอาหารที่มีประสิทธิภาพต่อการปลดปล่อยสารที่ต้องการออกมา โดยจะทำการศึกษาในหลอดทดลองที่จำลองสภาวะการย่อยแบบในลำไส้เล็ก โดยมีการจะบรรจุสาร green tea extract (GTE) ใน whey protein hydrogels แล้ววิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-vis absorption spectroscopy ซึ่งสาร GTE มีสมบัติเป็นสารที่ต้านทานการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน อีกทั้งเป็นสารป้องกันการอักเสบและช่วยในการขยายตัวของหลอดเลือด สาร GTE นี้สามารถช่วยป้องกันโรคที่เกี่ยวข้องกับหัวใจได้ Yamul และ Lupano (2005) ศึกษาโครงสร้างและสมบัติการทำงานของเจลที่ทำจากเวย์เข้มข้นที่มีส่วนประกอบของน้ำผึ้งและแป้งสาลี โดยมีค่าพีเอชเป็น 3.75, 4.2 และ 7.0 แล้ววิเคราะห์ทางโครงสร้างสังเกตผ่านกล้องจุลทรรศน์แบบ scanning electron microscopy และมีการให้ความร้อนทำให้โปรตีนเกิดการเสียสภาพและเกิดเป็นเจลขึ้น จากนั้นจึงประเมินผลด้วยเครื่อง differential scanning calorimetry แล้วจึงนำเจลมาทดสอบ โดยการนำมาขึ้นรูปเป็นแผ่นเจล (polyacrylamide gel electrophoresis, PAGE) และศึกษาสมบัติต่างๆ เช่น ความแข็งแรง ความยืดหยุ่น แรงยึดเหนี่ยวภายใน ระยะเวลาการคืนรูป เป็นต้น ซึ่งคุณลักษณะที่ได้พบว่า ที่ค่าพีเอช 3.75 สมบัติของเจลที่มีการเสริมด้วยน้ำผึ้งและแป้งสาลีจะมีประสิทธิภาพดีที่สุด

นอกจากนี้มีการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตโยเกิร์ต คือ พีเอชและอุณหภูมิที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของโยเกิร์ตและการเพิ่มคุณค่าทางอาหารด้วยเวย์โปรตีนเข้มข้นสำหรับเวย์โปรตีนเข้มข้นนี้จะช่วยเสริมลักษณะของโยเกิร์ตให้มีสมบัติที่ดีขึ้น เช่น ความข้นหนืดและลักษณะการอุ้มน้ำของเนื้อสัมผัสให้สูงขึ้น (Sodini et al., 2006) และการปรับปรุงบทบาทหน้าที่ของเวย์โปรตีนเข้มข้นด้วยเพคติน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพต่างๆ ทั้งด้านกายภาพและเคมี เช่น สมบัติของการละลาย อิมัลชัน การเกิดเป็นเจล พฤติกรรมของการเกิดฟอง ให้ดีเพิ่มขึ้น และประยุกต์ใช้เวย์โปรตีนเข้มข้นในทางอุตสาหกรรมอาหารได้ต่อไป (Mishra et al., 2001) จะเห็นได้

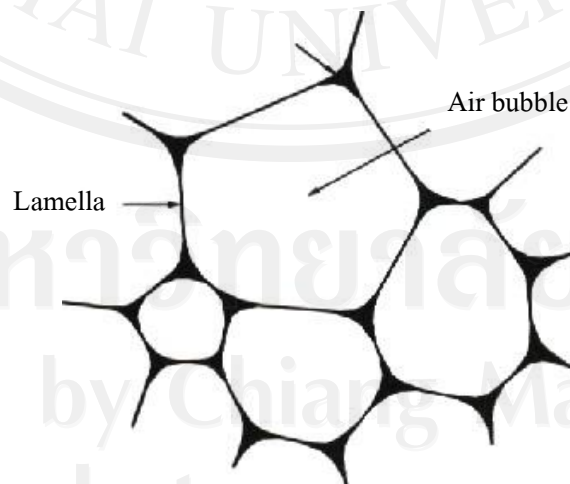
ว่ามีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำเวย์โปรตีนมาพัฒนาให้มีประสิทธิภาพเพื่อใช้ทางด้านอาหารอย่างมาก

2.5 โฟมอาหาร

2.5.1 การเกิดโฟม (Foaming formation)

โฟม (foams) เป็นระบบคอลลอยด์ชนิดหนึ่งที่เกิดจากการผสมกัน และอยู่ร่วมกันของก๊าซกับของเหลวหรือก๊าซกับของแข็ง โดยที่ก๊าซเป็นอนุภาคที่กระจายตัว (disperse phase) อยู่ในของเหลวหรือของแข็งซึ่งเป็นส่วนที่ต่อเนื่อง (continuous phase) และมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศประมาณ 10^{-3} (Fennema, 1996) โดยแบ่งโฟมในเชิงคุณภาพออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ Bubbly foams ในไอศกรีม และ Polyhedral foams ซึ่งโครงสร้างของฟองอากาศ มีการจัดเรียงตัวคล้ายรวงผึ้ง เช่น ฟองเบียร์ เป็นต้น (Dickinson, 1992)

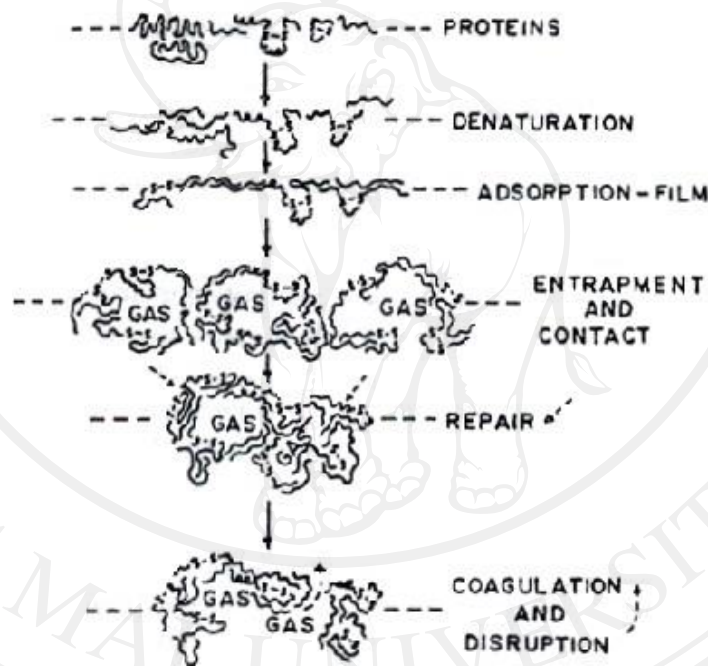
โครงสร้างของโฟมเป็นระบบคอลลอยด์ซึ่งประกอบด้วยเฟสของฟองอากาศขนาดเล็กซึ่งกระจายอยู่ในเฟสของของเหลว โดยโปรตีนที่มีอยู่ในอาหารจะทำหน้าที่เป็นสารลดแรงตึงผิวช่วยในการเกิดฟองและรักษาความคงตัวของอากาศที่กระจายอยู่ได้ ขนาดของฟองอากาศที่กระจายอยู่จะมีผลต่อลักษณะปรากฏและเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์อาหาร ถ้าหากฟองอากาศที่กระจายอยู่มีขนาดใหญ่จะทำให้อาหารมีเนื้อสัมผัสเบาและมีรูพรุน ในขณะที่ฟองอากาศมีขนาดเล็กจะทำให้เนื้อสัมผัสเนียนเรียบและแน่นกว่า การเกิดฟองเป็นอีกคุณสมบัติหนึ่งของโปรตีนที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์อาหารหลายๆ ประเภทที่มีลักษณะขึ้นฟูและเบา เช่น Whipped cream ไอศกรีม เค้ก เมอร์แรง Souffle Mousse และ Marshmallow โครงสร้างของโฟมดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของโฟม (Wilde and Clark, 1996)

กลไกในการเกิดฟองของโปรตีน ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนคือ

1. โปรตีนในสารละลายจะเกิดการเคลื่อนที่ไปยังผิวหน้าระหว่างน้ำและอากาศโดยอาศัยกระบวนการแพร่ และ/หรือการพา
2. โปรตีนที่เคลื่อนที่มาจะเกิดการแทรกตัวไปยังระหว่างชั้นของน้ำและอากาศซึ่งจะทำให้ความเข้มข้นที่ผิวหน้าเพิ่มขึ้น แรงดึงผิวลดลง
3. โปรตีนจะเกิดการคลายตัว และเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ ทำให้เกิดเป็นฟิล์มห่อหุ้มอากาศไว้โดยโปรตีนจะหันส่วนที่ชอบน้ำไปยังเฟสของน้ำ และหันส่วนที่ไม่ชอบน้ำไปยังเฟสของอากาศ การเกิดโฟมของโปรตีนมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การเกิดโฟมของโปรตีน (Wilde and Clark, 1996)

เนื่องจากโครงสร้างของฟองที่เกิดขึ้นนี้ยังคงไม่มีความคงตัวมากนัก ดังนั้นในระบบการผลิตอาหารจำเป็นต้องรักษาความคงตัวของฟองไว้โดยการทำให้โครงสร้างโปรตีนของโฟมเกิดการเสถียรภาพ ซึ่งอาจทำได้โดย การใช้ความร้อน การผสมกับส่วนประกอบอาหารอื่น การเติมสารเจือปน หรือการปรับค่าพีเอช

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดโฟม

- ขนาดของโมเลกุลโปรตีน
- การละลาย

- ความหนืด
- แรงตึงผิว
- ความเข้มข้น
- หมู่ไฮโดรโฟบิกที่ผิว
- พีเอช

การทำให้เกิดโฟมในอาหารเหลว ทำได้โดยการตีด้วยความเร็วสูงๆ เป็นการผสมของผสม 2 สถานะด้วยแรงเฉือนที่สูง อาหารเหลวมีการแตกตัวทำให้อากาศสามารถแทรกตัวเป็นฟองในของเหลวได้ ซึ่งกลไกของการเกิดโฟมในของเหลวนั้นจะเกี่ยวข้องกับแรงตึงผิว (surface tension) ทั้งนี้โดยปกติเมื่อฟองอากาศในของเหลวลอยขึ้นมาสู่ผิวหน้าจะมีการแตกของฟองอากาศ ดังนั้นถ้าต้องการรักษาสภาพของฟองอากาศให้คงอยู่ที่ผิวของเหลวได้ จะต้องทำการเปลี่ยนค่าแรงตึงผิวนั้น (Hart et al., 1963) การตีโฟมในอาหารเหลวจะทำให้อาหารไม่เกาะตัวกันเป็นก้อนเมื่อนำโฟมไปอบในเครื่องอบแห้งแบบสายพานต่อเนื่องหรืออบแห้งในเตาอบแบบถาดต่อเนื่องในรูปแบบต่างๆ โครงสร้างของโฟมและการจัดเรียงตัวของโฟมที่เหมาะสม จะทำให้การอบแห้งเป็นได้อย่างรวดเร็ว โดยลักษณะของโฟมที่พึงประสงค์ในการอบแห้ง คือ โฟมจะต้องมีความคงตัวสูง เพื่อให้โฟมสามารถพุงโครงสร้างของอาหารในระหว่างการอบแห้งได้ โฟมที่อบแห้งจะมีโครงสร้างที่เป็นรูพรุนสามารถดูดโฟมที่แห้งให้เป็นผง ซึ่งสามารถละลายได้ทันทีในน้ำเย็น ซึ่งจะรักษาคุณภาพของอาหารไว้ได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะอาหารที่ไวต่อการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน นอกจากอาหารที่เป็นของเหลวแล้ว อาหารที่แห้งอยู่แล้วสามารถนำมาละลายหรือทำให้เป็นสารแขวนลอยแล้วนำไปอบแห้งแบบโฟมเมท เพื่อให้ได้ของแข็งที่มีความหนาแน่นน้อยลง และมีการกระจายตัวได้ดีขึ้น

ความคงตัวของโฟมขึ้นกับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ (นิธิยา, 2545)

1. การทำให้ของเหลวมีความหนืดสูงขึ้นจะทำให้โฟมมีความคงตัวมากขึ้น สารที่ช่วยเพิ่มความหนืดส่วนใหญ่เป็นพวกน้ำตาล และสารไฮโดรคอลลอยด์ สารพวกนี้นอกจากจะเพิ่มความหนืดแล้วยังลดแรงตึงผิวอีกด้วย

2. ของเหลวที่มีแรงตึงผิวต่ำจะช่วยทำให้ของเหลวมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นรอบๆ ฟองอากาศโดยไม่บีบตัวให้ฟองอากาศแตกตัวเร็วเกินไป ดังนั้นการเปลี่ยนแรงตึงผิวของฟิล์มสามารถทำให้เกิดโฟม หรือเกิดการยุบตัวของโฟมได้

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

4. การเกิดฟิล์มของอนุภาคฟองอากาศโพลีเมอร์ที่มีความคงตัว ฟิล์มที่เกิดขึ้นต้องมี degree of surface elasticity และ surface viscosity สูง

5. สารที่จะช่วยให้โพลีเมอร์มีความแข็งตัว (rigidity) ที่ระหว่างผิวของก๊าซ และของเหลว เช่น โปรตีนที่มีอยู่ในอาหาร เมื่อทำให้เกิดโพลีเมอร์ โดยการตีโปรตีนจะเสียดสีสภาพขณะนี้จะช่วยให้โพลีเมอร์มีความแข็งตัว และคงตัวมากขึ้นด้วย

2.5.2 สารก่อโฟม (foaming agent)

สารก่อโฟมเป็นสารที่ใช้เติมลงไปในการอาหารเหลว เพื่อช่วยให้เกิดโฟมเมื่อนำไปตีในเครื่องตีปั่นเติมอากาศให้กับอาหารจนเกิดโฟม ซึ่งเป็นของผสมระหว่างของเหลวหรือกึ่งของแข็ง และอากาศมีของเหลวเป็นส่วนต่อเนื่อง (continuous phase) และอากาศเป็นส่วนกระจาย (disperse phase) โดยชั้นของเหลวบางๆ เรียกว่า ลามลล (lamellae) แยกฟองอากาศออกจากกัน สารก่อโฟมที่เติมลงในอาหารจะช่วยให้เกิดสภาพโฟม สารนี้ทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงบริเวณลามลล ทำให้อาหารอุ้มอากาศไว้ภายในได้มากขึ้น โดยฟองอากาศนั้นไม่แตกหรือแยกออก ขณะเดียวกันจะช่วยรักษาสภาพโฟมให้คงตัวอยู่ได้นาน ทำให้โพลีเมอร์มีความคงตัวยิ่งขึ้น ปกติโมเลกุลของสารที่ช่วยให้เกิดโฟมนั้นประกอบไปด้วยส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophile) ซึ่งเป็นพวกอนุภาคมูลอิสระที่มีประจุ ซึ่งอาจเป็นประจุบวกหรือลบก็ได้ เป็นส่วนที่ละลายอยู่ในเฟสของน้ำ และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobe) เป็นส่วนที่ไม่มีประจุ มักเป็นอนุพันธ์คาร์บอนอะตอมที่มีสายยาวๆ (aliphatic carbon chain) เป็นส่วนที่จะละลายอยู่ในเฟสของน้ำมัน

สารก่อโฟมที่เลือกใช้สำหรับอาหารต้องไม่มีรสชาติดูและไม่ทำปฏิกิริยากับอาหาร และสามารถทำให้เกิดโฟมได้ดี เมื่อใช้ในปริมาณต่ำและปลอดภัยสำหรับการบริโภค (Ponting et al., 1972) สารก่อโฟมที่ใช้ในอาหารที่สำคัญในกระบวนการอบแห้งแบบโพลีเมอร์ เช่น เมโทเซล (methocel) โปรตีน ถั่วเหลือง (solubilized soya protein) เมทิลเซลลูโลส (methyl cellulose) กลีเซอรอล โมโนสเตียเรต (glycerol monostearate) อัลบูมินจากถั่วเหลืองชนิดดัดแปร (modified soya albumin) และอัลบูมิน จากไข่ (egg albumin) แต่ที่นิยมใช้มากที่สุด คือ เมโทเซล คุณสมบัติของสารก่อโฟมมีดังนี้

2.5.2.1 เวย์โปรตีน (whey protein)

การเกิดโฟมของเวย์โปรตีนจะเกิดจากอันตรกิริยาระหว่างอากาศและน้ำ และการเพิ่มอุณหภูมิสามารถทำให้เวย์โปรตีนเกิดโฟมได้มากขึ้น เนื่องจากโครงสร้างเวย์โปรตีนที่เสียดสีจะมีการจัดเรียงตัวเกิดเป็นฟิล์มบนผิว โดยโปรตีนที่มีความเกี่ยวข้องกับการเกิดโฟมมากที่สุด คือ β -lactoglobulin (Davis et al., 2004) Pernell et al. (2002) ได้ศึกษาสมบัติของ โพลีเมอร์จากเวย์โปรตีนเปรียบเทียบกับ โพลีเมอร์จากโปรตีนไข่ขาว โดยผันแปรความเข้มข้นของโปรตีนไข่ขาว และเวย์โปรตีน

ไอโซเลต (whey protein isolate) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 2-20 โดยปริมาตรของโปรตีน ผลการทดลองพบว่าโฟมจากโปรตีนไข่ขาวมีค่าความเค้นคราก (yield stress) สูงสุดในตัวอย่างที่มีปริมาณโปรตีนต่ำ (ร้อยละ 2-10) แต่เมื่อปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้น ค่าความเค้นครากจะลดลง แปรผกผันกับปริมาณโปรตีน นอกจากนี้โปรตีนไข่ขาวยังเกิดโฟมได้เร็ว (ประมาณ 2 นาที) ในขณะที่โฟมจากเวย์โปรตีนไอโซเลตเกิดโฟมต่อเมื่อตัวอย่างมีปริมาณโปรตีนสูงตั้งแต่ร้อยละ 10-20 และเวลาที่ใช้ในการเกิดโฟมนานกว่าของไข่ขาว (ประมาณ 15 นาที) แต่การเพิ่มขึ้นของปริมาณโปรตีน มีผลต่อค่าความเค้นครากในโฟมจากเวย์โปรตีนไอโซเลตน้อยมาก ส่วนค่าโอเวอร์รันทั้งของโฟมจากเวย์โปรตีนไอโซเลต และโฟมจากโปรตีนไข่ขาวเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เวลาในการตีปั่นเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ Davis และ Foegedig (2007) ได้ศึกษาเปรียบเทียบสมบัติของโฟมจากเวย์โปรตีนไอโซเลตกับโฟมจากโปรตีนไข่ขาวเพิ่มเติม โดยการเติมน้ำตาลซูโครสร้อยละ 25 โดยน้ำหนักลงในตัวอย่างทั้งสองแบบ ผลการทดลองพบว่าการเติมน้ำตาลซูโครส ทำให้ค่าความเค้นครากของโฟมจากโปรตีนไข่ขาวเพิ่มขึ้น และยังทำให้โฟมมีความคงตัวมากขึ้นเช่นกัน ในขณะที่การเติมน้ำตาลซูโครสลงในสารละลาย whey protein isolate ทำให้ค่าความเค้นครากของโฟมลดลง และยังไม่มีส่วนต่อความคงตัวของโฟมหรือมีน้อยมาก

2.5.2.2 เมโธเซล (Methocel)

เมโธเซลเป็นสารช่วยให้โฟมมีความคงตัวชนิดหนึ่ง โดยมีสายพอลิเมอร์ของเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบเคมีหลัก ไม่ไวต่อปฏิกิริยา โดยเมโธเซลที่นำมาใช้ในอาหารนั้นจะมีลักษณะเป็นผงที่มีความบริสุทธิ์สูง และให้พลังงานต่ำ ไม่ให้กลิ่นรสกับอาหารเมื่อมีการเติมลงไป และใช้ในปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมโธเซลสามารถละลายน้ำได้ มีสมบัติเป็นสารยึดเกาะ (binders) สารช่วยให้เกิดการแขวนลอย (suspension agents) สารช่วยให้เกิดอิมัลชันที่คงตัว (emulsifier) สารเพิ่มความคงตัว (stabilizer) และสารป้องกันไม่ให้สารแขวนลอยแยกตัว (protective colloid) ที่สำคัญคือเมโธเซลเป็นกัม (gum) ที่มีสมบัติเป็นเจลสามารถเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ (thermally gel) สามารถทำหน้าที่เป็นสารลดแรงตึงผิว (surfactant) ทำให้เกิดสภาพฟิล์ม (film forming) ในอาหารได้ทั้งที่อุณหภูมิสูง และต่ำ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ดีในการเป็นสารช่วยให้โฟมคงตัวในอาหารที่ต้องการทำแห้งแบบโฟม และสามารถแบ่งเมโธเซลตามชนิดของ cellulose ethers ภายในองค์ประกอบทางเคมีได้เป็น 2 ชนิดคือ methyl cellulose และ hydroxypropyl methyl-cellulose โครงสร้างทางเคมีของเมโธเซลทั้ง 2 ชนิดมีโครงสร้างเป็น polymeric backbone cellulose ซึ่งมีโครงสร้างพื้นฐาน คือ anhydroglucose unit โดยความแตกต่างของเมโธเซลชนิดต่างๆเกิดจากการผันแปรสัดส่วนของหมู่แทนที่ที่เป็น hydroxypropyl กับ methoxyl สัดส่วนดังกล่าวนี้จะทำให้

ความสามารถในการละลายความหนืดและอุณหภูมิเริ่มเกิดเจล (thermal gel point) ของสารละลายเมโรเซลแตกต่างกันออกไป

เมโรเซลละลายน้ำที่อุณหภูมิห้องไม่ได้แต่สามารถกระจายตัวได้ดีในน้ำร้อน ซึ่งต้องมีอุณหภูมิของน้ำสูงเกินค่าเฉพาะค่าหนึ่ง หลังจากเมโรเซลกระจายตัวในน้ำและทุกอนุภาคเปียกแล้ว การละลายของเมโรเซลจะเกิดขึ้นต่อเมื่อลดอุณหภูมิของน้ำให้ต่ำลง ขั้นตอนการละลายของเมโรเซลเมื่อโมเลกุลน้ำจับกับสายพอลิเมอร์เมโรเซลอย่างสมบูรณ์ทำให้เกิดการคลายตัวของสายพอลิเมอร์เมโรเซลจากที่ซับซ้อนเมื่อเริ่มต้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นสายพอลิเมอร์จะปล่อยโมเลกุลของน้ำออกมา ทำให้ความหนืดลดลงไป จนกระทั่งอุณหภูมิสูงถึงจุดเริ่มเกิดเจล (incipient gelation temperature) สายพอลิเมอร์ที่ปราศจากน้ำนี้จะจับกัน และสารละลายเริ่มเกิดเจล ความแข็งแรงของเจลเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แต่มีค่าความแข็งแรงต่อไปได้อีกเพียงเล็กน้อย หลังจากนั้นปฏิกิริยาจะเริ่มผันกลับ และความหนืดจะลดลงอย่างรวดเร็วจนในที่สุดกราฟลดลงมาจนบรรจบกราฟเดิม เมื่อเริ่มต้นให้ความร้อน โดยกลไกนี้สามารถทำซ้ำได้อีกหลายครั้งตามต้องการเพราะเจลของเมโรเซล มีคุณสมบัติผันกลับได้ (reversible) (กัลยาณี, 2540)

Karim และ Wai (1999) ได้ศึกษาความคงตัว และลักษณะเฉพาะของการทำแห้งแบบโพรหมของน้ำมะเฟือง โดยในขั้นตอนการเตรียมโพรหมมีการเติมเมโรเซลที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 โดยน้ำหนักของสารละลายน้ำมะเฟือง จากนั้นเปรียบเทียบค่าโอเวอร์รัน ความหนาแน่น และเปรียบเทียบความคงตัวของโพรหมที่ได้จากการใช้เมโรเซลในระดับที่แตกต่างกัน ผลจากการทดลองพบว่าค่าโอเวอร์รัน และความคงตัวของโพรหมจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเมโรเซลเพิ่มขึ้น แต่จะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งความเข้มข้นของเมโรเซลมีค่าร้อยละ 0.4 โดยน้ำหนักเท่านั้น ผลการศึกษาเมื่อทำการอบแห้งโพรหมจากน้ำมะเฟืองโดยการใช้อุณหภูมิที่ต่างกันสองอุณหภูมิคือ 70 และ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 90 นาที แล้วทำการวัดความชื้นทุก 10 นาที จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปทดสอบสมบัติทางด้านประสาทสัมผัส และวัดค่าสีในระบบอัตโนมัติ พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เกิดการระเหยของน้ำมากกว่าที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแห้งมากกว่า แต่การอบแห้งที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสเกิดการสูญเสียกลิ่นรสของมะเฟือง และผลิตภัณฑ์เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล

2.5.2.3 กลีเซอรอลโมโนสเตียเรต (glycerol monostearate, GMS)

กลีเซอรอลโมโนสเตียเรตรู้จักกันในนามโมโนสเตียรีน (monostearin) ซึ่งเป็นสารผสมที่มีสัดส่วนที่ต่างกันของกลีเซอรอลโมโนสเตียเรต (glycerol monostearate) กลีเซอรอลโมโนปาล์มมิเตต (glycerol monopalmitate) และกลีเซอรอลเอสเตอร์ของกรดไขมัน (glycerol ester) ในทางการค้าสามารถเตรียม GMS ได้โดยการทำกลีเซโรไลซิส (glycerolysis) ของไขมันและน้ำมันที่

ได้มาจากแหล่งอาหารที่บริโภคได้ หรือโดยกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชัน (esterification) ของ กรดสเตียริกที่บริโภคได้ด้วยกลีเซอริน (glycerin) (Igoe and Hui, 1996) Hart et al. (1963) ได้ รายงานถึงชนิดของสารเพิ่มความคงตัวของโฟมและวิธีการเตรียมสารก่อนนำมาใช้ว่าในช่วงแรกที่มี การพัฒนากระบวนการอบแห้งแบบโฟมเมท โดยสารเพิ่มความคงตัวของโฟมที่นิยมใช้มากที่สุด คือ กลีเซอริน โมโนสเตียเรตซึ่งเป็นสารที่ไม่สามารถละลายในน้ำเย็นได้ ซึ่งมีวิธีการเตรียมสารโดย ละลาย GMS ลงในน้ำให้มีความเข้มข้นร้อยละ 5-10 โดยน้ำหนัก จากนั้นคนให้ละลายและเก็บไว้ที่ อุณหภูมิ 68-75 องศาเซลเซียส หรือใช้เครื่องผสมทำให้ GMS กระจายตัวในน้ำที่อุณหภูมิ 83 องศาเซลเซียส และเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 63 องศาเซลเซียส มีการใช้ GMS เป็นสารเพิ่มความคงตัวของ โฟมในอาหารเหลวหลายชนิดได้แก่ นมข้น นมข้น น้ำตาลชูโครสผสมเจลาตินและนมข้นเชือกเทศ เข้มข้น และยังพบว่ามีการใช้สารชูโครส โมโนปาลมิเตต (sucrose monopalmitate) ชูโครส โม โนลอเรต (sucrose monolaurate) อัลบูมินจากไข่ (egg albumin) ซอร์บิแทน โมโนสเตียเรต (sobitan monostearate) พอลิออกซีเอทิลีน ซอร์บิแทน โมโนสเตียเรต (polyoxyethylene sorbitan monostearate) เมทิล เซลลูโลส (methyl cellulose) กัวกัม (guar Gum) และแป้งมันสำปะหลังเป็น สารเพิ่มความคงตัวของโฟมในการผลิตอาหารผงหลายชนิด Berry et al. (1965) ได้รายงานถึง วิธีการเตรียมสารเพิ่มความคงตัวของโฟม 3 ชนิดคือ อัลบูมินจากถั่วเหลืองชนิดดัดแปร (modified soya albumin, D-100) เมทิล เซลลูโลสและ GMS การเตรียมอัลบูมิน จากถั่วเหลืองชนิดดัดแปรโดย การละลายในน้ำให้มีความเข้มข้นร้อยละ 16.7 โดยน้ำหนัก แล้วเก็บไว้ในตู้เย็นเมทิล เซลลูโลส เตรียมโดยการละลายในน้ำให้มีความเข้มข้น 10 เซนต์พอยส์ โดยการทำให้กระจายตัวในน้ำร้อน ในปริมาณน้อยๆ แล้วจึงเติมน้ำเย็นให้ได้ปริมาณที่ต้องการและปรับให้มีความเข้มข้นร้อยละ 4.8 โดยน้ำหนัก ส่วน GMS เตรียมโดยการต้มน้ำจนมีอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ค่อยๆ เติมน้ำลง ไปให้มีความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พร้อมกับคนให้กระจายตัว นำสารแขวนลอยที่ได้ไป ผสมในเครื่องผสมซึ่งอยู่ภายในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 77 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที จะได้สาร แขวนลอยคล้ายครีมสีขาว เก็บไว้ในภาชนะแล้วทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง โดยต้องมีการเตรียม สารใหม่เพื่อใช้งานทุกๆ 24 ชั่วโมง และเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง

การศึกษาของ Bates (1964) พบว่า GMS เป็นสารที่เหนียวน้ำให้เกิดโฟมน้ำผลไม้ในเขต ร้อนได้ดีกว่าสารก่อโฟมชนิดอื่นที่ศึกษา (carboxyl methyl cellulose, pectin และ modified soya protein) นอกจากนี้สารก่อโฟมที่เหมาะสมในการทำแห้งลำไยจะมีการผสมของเมทิลเซลลูโลสร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก และ GMS ร้อยละ 0.13 โดยน้ำหนักที่มีการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็น เวลา 5 นาที โดยมีความเร็วอากาศคงที่ที่ 1 เมตรต่อวินาที (Ratchaniyom, 2002 และ Sanket and Castaigne, 2004) ดุจหทัย (2005) ได้ศึกษาวิธีการผลิตนํ้านมข้าวโพดผง โดยวิธีการอบแห้งแบบโฟ

มเมท โดยคัดเลือกประเภท และชนิดของสารก่อโฟมที่เหมาะสมในการเกิดโฟมที่คงตัว พบว่า ความเข้มข้นร้อยละ 5 ของสารผสมระหว่าง GMS และเมโซเซลในอัตราส่วน 1:1 เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้เกิดโฟมที่คงตัว โดยโฟมที่ได้มีความหนาแน่นต่ำสุด มีอัตราการแยกตัวของเหลวต่ำสุดมีค่าโอเวอร์รันสูงสุด

2.5.3 สารเพิ่มความคงตัวของโฟม (foam stabilizers)

สารเพิ่มความคงตัวของโฟม เป็นสารที่ใช้สำหรับเติมลงในอาหารที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายอยู่ในปริมาณน้อยหรือมีความหนืดต่ำ เพื่อให้อาหารมีความหนืดเพิ่มขึ้น และสามารถตีให้เป็นโฟมที่ไม่ยุบตัวได้ง่ายใน สารเพิ่มความคงตัวที่นิยมใช้ในอาหาร ได้แก่ มอลโตเด็คซ์ตริน (maltodextrin) มอลโตเด็คซ์ตรินมีสูตร โครงสร้างทางเคมี คือ $(C_6H_{10}O_5)_nH_2O$ มีลักษณะเป็นสายพอลิเมอร์ของแซคคาไรด์ที่มีคุณค่าทางอาหาร ประกอบด้วย D-glucose ยูนิต หลายๆ ยูนิต ต่อกันด้วยพันธะ (bonds) ชนิด alpha 1-4 และมีค่าสมมูลเด็คซ์โทรส (dextrose equivalent หรือ DE) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงปริมาณ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก) ของน้ำตาลกลูโคสที่มีอยู่ในตัวอย่าง มอลโตเด็คซ์ตรินสามารถละลายได้ในน้ำที่อุณหภูมิห้อง สารละลายที่ได้จะอาจใสหรือขุ่นขึ้นกับชนิดของมอลโตเด็คซ์ตริน สารละลายที่ได้มีคุณสมบัติทางด้านความเป็นเนื้อ (body) และมีความหนืดที่สม่ำเสมอ เนื้อสัมผัสเรียบเนียนมีความสามารถในการดูดความชื้นต่ำ โดยเฉพาะพวกที่มีค่า DE ต่ำๆ มีจุดเยือกแข็งคงที่ และสามารถควบคุมการเกิดสีน้ำตาลได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังสามารถละลายได้ในอาหารที่เป็นของเหลวเช่น ซุป นม น้ำผลไม้ เป็นต้น โดยอาจเติมในลักษณะที่เป็นผงโดยตรง หรือนำมาละลายในน้ำก่อน (Furia, 1972) เมื่อเทฟงมอลโตเด็คซ์ตรินออกมาจะไหลลงอย่างอิสระไม่เกาะติดกัน มนุษย์สามารถรับประทานมอลโตเด็คซ์ตรินอย่างปลอดภัย เพราะเอนไซม์ในลำไส้เล็กของมนุษย์จะย่อยมอลโตเด็คซ์ตรินให้เป็น D-glucose เช่นเดียวกับคาร์โบไฮเดรตทั่วไปมอลโตเด็คซ์ตรินที่มี DE สูงจะมีความสามารถในการดูดความชื้น ความหนาแน่นปรากฏ ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล ค่าการละลาย ความใสของสารละลายและความหวานสูงกว่ามอลโตเด็คซ์ตรินที่มี DE ต่ำ แต่จะมีความหนืดต่ำกว่า (Macrae et al., 1993) ความสามารถในการละลายของมอลโตเด็คซ์ตรินขึ้นอยู่กับค่า DE โดยการละลายจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า DE เพิ่มขึ้นจาก DE 5 เป็น DE 18 จากนั้นจะค่อยๆ ลดลง ส่วนค่าความหนืดของสารละลายจะลดลงเมื่อค่า DE สูงขึ้น นอกจากนี้ความหนืดยังขึ้นอยู่กับปริมาณของมอลโตเด็คซ์ตรินที่เติมลงในสารละลายนั้นๆ ด้วย หากมีปริมาณสูง ความหนืดของสารละลายที่ได้ก็สูงตามไปด้วย มอลโตเด็คซ์ตรินเป็นโมเลกุลใหญ่ที่สามารถถูกเอนไซม์กลุ่มอะมิเลสย่อย แล้วให้น้ำตาลมอลโตสได้ เช่น มอลโตไตรโอส (maltotriose) มอลโตเตตราโอส (maltotetraose) และมอลโตเพนทาโอส (maltopentaose) เป็นต้น ค่า DE แปรผกผันกับขนาดโมเลกุล ค่า DE ของดี-กลูโคสที่ปราศจากน้ำ (anhydrous D-glucose) เท่ากับ 100

ในขณะที่ค่า DE ของสตาร์ชดั้งเดิม (native starch) เท่ากับ 0 (Macrae et al., 1993) มอลโตเด็คซ์ตริน มีลักษณะเป็นผงสีขาว มีความหวานเล็กน้อยหรือไม่หวานเลยขึ้นอยู่กับค่า DE มีความชื้นประมาณร้อยละ 3-5 มีความหนาแน่นปรากฏ (bulk density) อยู่ในช่วง 0.31-0.61 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สามารถใช้มอลโตเด็คซ์ตรินได้ในปริมาณที่เหมาะสมกับชนิดของอาหารและหน้าที่ของมอลโตเด็คซ์ตรินในอาหารนั้นๆ (generally recognized as safe) (Macrae et al., 1993) มอลโตเด็คซ์ตรินสามารถละลายได้ในน้ำที่อุณหภูมิห้องสารละลายที่ได้อาจใสหรือขุ่นขึ้นกับชนิดของมอลโตเด็คซ์ตรินที่นำมาใช้ สารละลายที่ได้มีคุณสมบัติทางด้านความเป็นเนื้อ (body) และมีความหนืดที่สม่ำเสมอ เนื้อสัมผัสเนียนเรียบ มีความสามารถในการดูดความชื้นต่ำ (low hygroscopicity) โดยเฉพาะพวกที่มีค่า DE ต่ำๆ เนื่องจากปริมาณ โมโนแซคคาไรด์น้อย มีจุดเยือกแข็งคงที่และสามารถควบคุมการเกิดสีน้ำตาลได้เป็นอย่างดี ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้เกิดสีน้ำตาลน้อยลง นอกจากนี้ยังสามารถละลายได้ในอาหารที่เป็นของเหลว เช่น ซุป นํ้านมและน้ำผลไม้ เป็นต้น โดยอาจเติมในลักษณะที่เป็นผงโดยตรงหรือนำมาละลายในน้ำก่อน (Furia, 1972) เมื่อเทพงมอลโตเด็คซ์ตรินออกมาจะไหลลงอย่างอิสระไม่เกาะติดกัน มนุษย์สามารถรับประทานมอลโตเด็คซ์ตรินได้อย่างปลอดภัย เพราะเอนไซม์ในลำไส้เล็กของมนุษย์จะย่อยมอลโตเด็คซ์ตรินให้เป็น D-glucose เช่นเดียวกับคาร์โบไฮเดรตทั่วไป มอลโตเด็คซ์ตรินที่มี DE สูงจะมีความสามารถในการดูดความชื้น ความหนาแน่นปรากฏ ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล ค่าการละลาย ความใสของการละลายและความหวานสูงกว่ามอลโตเด็คซ์ตรินที่มี DE ต่ำ แต่จะมีความหนืดต่ำกว่า (Macrae et al., 1993) การผลิตมอลโตเด็คซ์ตรินนั้นมีอยู่ 2 แบบ คือ แบบขั้นตอนเดียว และแบบสองขั้นตอน (กล้าณรงค์ และเกื้อกุล, 2543) ดังนี้

(1) การผลิตแบบขั้นตอนเดียว เป็นการย่อยแป้งด้วยกรดที่อุณหภูมิมากกว่า 105 องศาเซลเซียส หรือเอนไซม์อะมิเลสที่อุณหภูมิ 82-105 องศาเซลเซียส แล้วหยุดปฏิกิริยาโดยปรับความเป็นกรด-ด่างหลังให้ความร้อน ทำการกรองแบบสุญญากาศโดยใช้สารช่วยกรอง ปรับกลิ่นสีโดยคาร์บอนหรือผงถ่าน แล้วกรองอีกครั้ง จากนั้นต้มระเหยให้มีความเข้มข้นสูงขึ้น แล้วทำเป็นผงแห้งด้วยการทำแห้งแบบพ่นฝอย

(2) การผลิตแบบสองขั้นตอน เป็นการย่อยแป้งด้วยเอนไซม์อะมิเลสที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส และหยุดปฏิกิริยาโดยความร้อน 110-180 องศาเซลเซียส ขนาดของ DE จะได้ปริมาณ 2-5 จากนั้นก็ใช้เอนไซม์อะมิเลสอีกครั้งหนึ่งที่ 85 องศาเซลเซียส จนได้ DE 5-20 จึงหยุดปฏิกิริยาโดยการปรับความเป็นกรด-ด่างหรือความร้อน จากนั้นทำการกรองแบบสุญญากาศโดยใช้สารช่วยกรองปรับกลิ่นสีโดยคาร์บอน (ผงถ่าน) แล้วกรองอีกครั้ง จากนั้นต้มระเหยให้มีความเข้มข้นสูงขึ้น แล้วทำเป็นผงแห้งด้วยการทำแห้งแบบพ่นฝอย

ในอุตสาหกรรมอาหารมีการใช้มอลโตเด็คซ์ตรินในหลายหน้าที่ เช่น ใช้ใน salad dressing เพื่อแทนการใช้ไขมัน ใช้มอลโตเด็คซ์ตรินควบคู่กับ cellulose gum เพื่อป้องกันการเกิดผลึกขนาดใหญ่เมื่อทำการแช่เยือกแข็งผลิตภัณฑ์ ใช้เพิ่มปริมาณของแข็งให้กับวัตถุดิบก่อนที่จะนำเข้าเครื่องทำแห้ง และยังช่วยลดการดูดความชื้นกลับในผลิตภัณฑ์ผงซึ่งมีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบสูง เช่น น้ำผลไม้ผง เป็นต้น ทำให้ผลิตภัณฑ์ผงที่ได้สามารถไหลได้โดยสะดวก (Chronakis, 1988)

2.6 การทำแห้งแบบโฟมแมท (Foam-mat drying)

การทำแห้งแบบโฟมแมท เป็นวิธีการทำแห้งโดยใช้หลักการตีปั่นให้ผลิตภัณฑ์เกิดเป็นโฟม และใช้ความร้อนจากลมร้อนเป็นตัวระเหยความชื้นที่แทรกอยู่บนโฟมออกไป ทำให้ผลิตภัณฑ์แห้ง โดยการใช้เครื่องอบลมร้อนแบบธรรมชาติ แบบลาดหรือแบบสายพานก็ได้ กรรมวิธีการทำแห้งแบบโฟมแมท เริ่มจากการนำอาหารแบบเหลวที่ต้องการทำแห้งมาระเหยน้ำออกเพื่อเพิ่มความเข้มข้น ระดับการทำให้เข้มข้นขึ้นอยู่กับชนิดของอาหารเหลวว่ามีปริมาณสารที่จะละลายได้ทั้งหมดมากหรือน้อยเพียงใด จากนั้นจึงนำมาทำให้เกิดโฟมด้วยการตีในเครื่องตีความเร็วสูง อาจมีการเติมสารก่อโฟม และสารเพิ่มความคงตัว นำโฟมที่ได้ไปหยอดเป็นเส้น หรือชั้นบางๆ บนถาด หรือสายพาน นำไปทำแห้งในตู้อบลมร้อน เวลา และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้ง ขึ้นอยู่กับชนิดของตู้อบลมร้อน (รัตนานา, 2547)

คุ้มเกล้า (2552) ได้ศึกษาการผลิตน้ำกระเทียมดองผงโดยวิธีการอบแห้งแบบโฟมแมทเพื่อหาชนิด และปริมาณสารก่อโฟมและอุณหภูมิ และเวลาในการอบที่เหมาะสม โดยแปรอุณหภูมิ การอบแห้งที่ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส และแปรเวลาที่ 6, 2 และ 1.50 ชั่วโมง ตามลำดับ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เมื่อคั้นตัวแล้วมีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำกระเทียมดองสดมากที่สุด ผลการศึกษาชนิดของสารที่ก่อโฟม พบว่าใช้สารละลายเมโทเซลที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.9 โดยน้ำหนัก ร่วมกับมอลโตเด็คซ์ตริน 10 กรัม ในน้ำกระเทียมดองทั้งสูตรหวาน และสูตรเค็มให้ค่าความคงตัวที่เหมาะสมคือ 1.35 และ 0.16 มิลลิลิตรต่ออนาที ตามลำดับ ความหนาแน่น 0.128 และ 0.103 กรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ และค่าโอเวอร์รันเท่ากับร้อยละ 717.09 และ 915.93 ตามลำดับ ผลการศึกษาอุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสมในการผลิตพบว่าผลิตภัณฑ์ที่อบแห้ง ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง มีคะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านกลิ่น และความชอบโดยรวมใกล้เคียงกับน้ำกระเทียมดองสดมากที่สุด Rajkumar et al. (2007) ได้ศึกษาคุณลักษณะของมะม่วงอัลฟองโซผงโดยการทำแห้งแบบโฟมแมท ในการทดลองใช้ไข่ขาวร้อยละ 10 เป็นสารก่อโฟม ร่วมกับการใช้เมทิลเซลลูโลส (methyl cellulose) ร้อยละ 0.5 เป็นสารเพิ่มความคงตัว อบแห้งที่

อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่าเวลาที่ใช้ในการอบแห้งโพนมะม่วงอัลฟองโซ่ต้องใช้เวลาอย่างน้อย 35 นาที กำลังการผลิต 2.5 กิโลกรัมต่อวัน (8 ชั่วโมง) และมะม่วงอัลฟองโซ่ผงจากการทำแห้งแบบโพนเมท เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านคุณภาพน้อยกว่ามะม่วงที่ผ่านการอบแห้งแบบปกติทั่วไป

กระบวนการทำแห้งแบบโพนเมทมีข้อดีหลายประการ ได้แก่ (รัตน, 2547)

(1) สามารถใช้ได้ดีกับอาหารเหลวหรืออาหารกึ่งเหลวที่มีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบอยู่สูง โดยยังสามารถรักษากลิ่นและสีไว้ได้ ขณะที่กระบวนการทำแห้งแบบอื่นๆ เช่น การทำแห้งแบบพ่นฝอย (spray drying) การทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (drum drying) ไม่สามารถทำได้

(2) เป็นการทำแห้งที่ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยมาก น้อยกว่ากระบวนการทำแห้งอื่นๆ ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำกว่าวิธีการอื่น

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

(4) ผลิตภัณฑ์อาหารที่ได้มีลักษณะเป็นผง มีน้ำหนักเบาและสามารถเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องได้ ทำให้ค่าใช้จ่ายในการขนส่งต่ำ