

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

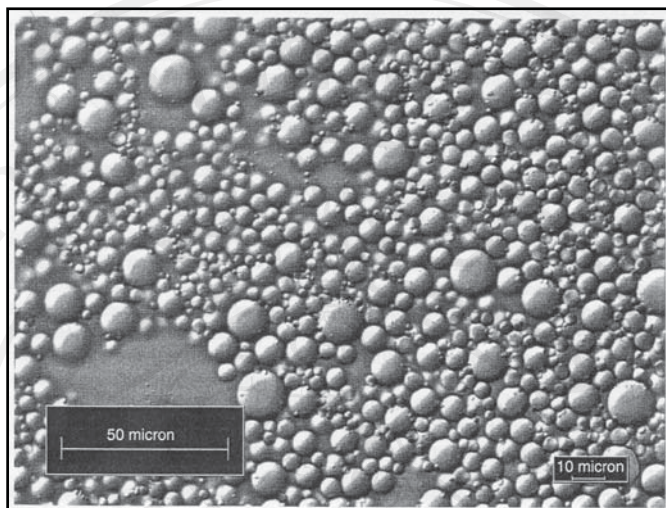
#### 2.1 ระบบอิมัลชัน

ผลิตภัณฑ์อาหารทั้งจากธรรมชาติและผลิตภัณฑ์อาหารที่ผ่านกระบวนการแปรรูปหลายชนิด มักอยู่ในรูปของอิมัลชัน (emulsion) บางส่วนหรือทั้งหมด หรือมีการเปลี่ยนสภาพเป็นอิมัลชัน ในระหว่างกระบวนการผลิต เช่น นำนม ครีม เนย มาคาริน น้ำผลไม้ อาหารสำหรับเด็กอ่อน ซุป เค้กเนย มายองเนส ซอส น้ำสลัด และไอศกรีม เป็นต้น (McClements, 2005) ผลิตภัณฑ์อาหารที่ประกอบด้วย ระบบอิมัลชันอาจมีลักษณะทางกายภาพเคมีและคุณภาพทางประสาทสัมผัสที่มีความหลากหลายได้แก่ คุณภาพด้านลักษณะปรากฏ กลิ่น เนื้อสัมผัส รสชาติ และอายุการเก็บรักษา เป็นต้น เช่น นำนม เป็นของเหลวสีขาวที่มีความหนืดต่ำ ส่วนมาคารินเป็นของกึ่งแข็งสีเหลือง ซึ่งความแตกต่างดังกล่าว เป็นผลมาจากส่วนผสมที่มีอยู่ในอาหารและสภาวะแวดล้อมในการแปรรูปของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด ดังนั้นในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อาหารที่เป็นอิมัลชันซึ่งมีคุณลักษณะคุณภาพเฉพาะตัวจึงขึ้นอยู่กับ การเลือกวัตถุดิบ เช่น น้ำ น้ำมัน อิมัลซิไฟเออร์ สารทำให้ข้นหนืด (thickening) สารให้กลิ่นรส และ สารให้สี รวมทั้งกระบวนการผลิตที่เลือกใช้ว่ามีความเหมาะสมหรือไม่ (McClements, 2005; เทพกาญญา, 2545)

#### 2.2 ลักษณะโดยทั่วไปของอิมัลชันในอาหาร

อิมัลชันเป็นระบบการกระจายของอาหารซึ่งมีของเหลวต่างๆ ผสมในลักษณะที่ไม่รวมตัวกัน (immiscible) โดยมีของเหลวที่กระจายอยู่แบบ droplet แสดงดังภาพที่ 2.1 ในกรณีที่วัฏภาคต่อเนื่อง (continuous phase) คือ น้ำ และของเหลวที่กระจายตัวอยู่ภายในอิมัลชัน (dispersed phase) คือ น้ำมัน จะเรียกระบบอิมัลชันนี้ว่าเป็นอิมัลชันชนิด “น้ำมันในน้ำ” (oil-in-water, O/W) เช่น นำนม ครีม มายองเนส น้ำสลัด เครื่องดื่ม ซุป และซอส เป็นต้น ในทางกลับกันหากของเหลวที่กระจายตัว ในอิมัลชัน คือ น้ำ และวัฏภาคต่อเนื่อง คือ น้ำมัน จะเรียกระบบอิมัลชันนี้ว่าเป็นอิมัลชันชนิด “น้ำใน น้ำมัน” (water-in-oil, W/O) เช่น มาคาริน และเนย นอกจากนี้ลักษณะของอิมัลชันอาจเป็นแบบ multiple ซึ่งแบ่งเป็นระบบอิมัลชันชนิด “น้ำมันในน้ำในน้ำมัน” (oil-in-water-in-oil, O/W/O) หรือ

“น้ำในน้ำมันในน้ำ” (water-in-oil-in-water, W/O/W) โดยระบบอิมัลชันแบบ multiple นี้มักพบในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง ยา และสารเคมีในอุตสาหกรรมต่างๆ (McClements, 2005)



ภาพที่ 2.1 อิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำซึ่งประกอบด้วย droplet ของน้ำมันกระจายตัวในน้ำ  
ที่มา : McClements, 2005

การโฮโมจิไนซ์ (homogenization) เป็นกระบวนการเปลี่ยนของเหลวสองชนิดซึ่งไม่รวมกัน เช่น น้ำและน้ำมันที่มีความบริสุทธิ์ ให้เป็นอิมัลชัน รวมทั้งการลดขนาดของ droplet ในอิมัลชันให้มีขนาดเล็กลง ในอุตสาหกรรมอาหารมักใช้เครื่องโฮโมจิไนซ์ (homogenizer) ได้หลายชนิดซึ่งอาศัยกลไกการทำงานที่แตกต่างกัน เช่น simple mixers, high speed blenders, turbo-mixers, colloid mills, high-pressure valve homogenizers และ ultrasonic เป็นต้น (McClements, 2005; Lizarraga *et al.*, 2008) โดยทั่วไปอิมัลชันที่ได้ภายหลังขั้นตอนการโฮโมจิไนซ์จะเกิดการแยกชั้นอย่างรวดเร็วเกิดเป็นชั้นของน้ำมันซึ่งมีความหนาแน่นต่ำกว่าลอยอยู่ด้านบนของชั้นน้ำซึ่งมีความหนาแน่นสูงกว่า การแยกชั้นของอิมัลชันอาจเกิดจากการชนกันระหว่าง droplet กับ droplet อื่นๆ ที่อยู่บริเวณใกล้เคียงและมีแนวโน้มที่จะรวมตัวกันซึ่งท้ายที่สุดจะนำไปสู่การแยกชั้นของวัฏภาคทั้งสองอย่างสมบูรณ์ แรงขับเคลื่อนที่ทำให้เกิดการชนกันระหว่างโมเลกุลของน้ำมันหรือน้ำ เกิดจากแรงขับเคลื่อนทางเทอร์โมไดนามิก ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการในระบบอิมัลชัน ดังนั้นอิมัลชันที่ได้จึงเป็นระบบอิมัลชันที่ไม่คงตัวทางเทอร์โมไดนามิก (thermodynamically unstable) วิธีการที่จะทำให้ระบบอิมัลชันเกิดความคงตัวเชิงจลน์ (kinetically stable) ในช่วงระยะเวลาหนึ่งอาจต้องเติมสารประกอบที่เรียกว่าสารให้ความคงตัว ซึ่งเป็นสารประกอบใดๆ ที่ช่วยเพิ่มความคงตัวให้กับระบบอิมัลชัน

สารให้ความคงตัวอาจจำแนกได้เป็นสองกลุ่ม คือ อิมัลซิไฟเออร์และสารช่วยปรับปรุงเนื้อสัมผัส (texture modifier) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับหน้าที่การทำงานของสารประกอบดังกล่าวภายในระบบอิมัลชัน อิมัลซิไฟเออร์ทำหน้าที่เป็นสารลดแรงตึงผิวโดยจะดูดซับอยู่ที่บริเวณพื้นผิวของ droplet ที่เกิดขึ้นใหม่ ในระหว่างการโฮโมจิไนซ์ เกิดเป็นโครงสร้างของเยื่อหุ้มบางๆ ทำหน้าที่ป้องกันและขัดขวางการชนกันของ droplet ซึ่งจะนำไปสู่การรวมตัวกัน (aggregate) ของ droplet ในภายหลัง อิมัลซิไฟเออร์ส่วนมากประกอบด้วยส่วนที่มีขั้ว (polar) และไม่มีขั้ว (nonpolar) อยู่ในโมเลกุลเดียวกันเรียกสมบัติของโมเลกุลชนิดนี้ว่า amphiphilic ตัวอย่างอิมัลซิไฟเออร์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหารได้แก่ สารลดแรงตึงผิวที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก ฟอสโฟลิพิด โปรตีน และพอลิแซคคาไรด์ เป็นต้น ขณะที่สารช่วยปรับปรุงเนื้อสัมผัสสามารถแบ่งย่อยได้เป็นสองกลุ่มตามหน้าที่การทำงานและสมบัติเฉพาะทางด้านรีโอโลยี (rheological characteristic) คือ สารช่วยเพิ่มความหนืด (thickening agent) และสารช่วยในการก่อเจล (gelling agent) ในอุตสาหกรรมอาหารสารช่วยเพิ่มความหนืดและสารที่ช่วยในการก่อเจลที่นิยมใช้ได้แก่ พอลิแซคคาไรด์ และ โปรตีนซึ่งนิยมใช้ในระบบอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ ส่วนผลึกไขมัน (fat crystals) นิยมใช้ในระบบอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมัน เป็นต้น (McClements, 2005)

### 2.3 ความคงตัวของอิมัลชัน

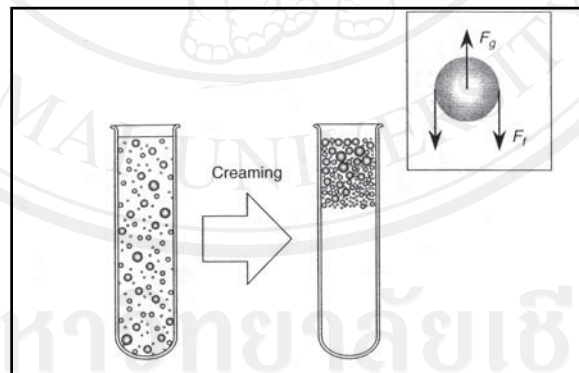
ความคงตัวของอิมัลชัน (emulsion stability) หมายถึง ความสามารถของอิมัลชันในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงของสมบัติต่างๆ เมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป นั่นคือ ถ้าอิมัลชันมีความคงตัวสูง จะทำให้การเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆ ทั้งสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของอิมัลชันเกิดขึ้นได้ช้าลง ความไม่คงตัวทางกายภาพของอิมัลชันเกิดจากการเปลี่ยนแปลงในระยะห่างการกระจายตัวหรือการจัดเรียงโครงสร้างของโมเลกุล เช่น การเกิดครีม (creaming), flocculation, coalescence, partial coalescence, phase inversion และ Ostwald ripening ขณะที่ความไม่คงตัวทางเคมีของอิมัลชันเกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของโมเลกุล เช่น การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส เป็นต้น (McClements, 2005) ช่วงระยะเวลาที่อิมัลชันมีความคงตัวนั้นขึ้นอยู่กับธรรมชาติของผลิตภัณฑ์อาหาร ในระบบอิมัลชันของอาหารบางชนิดอาจมีความคงตัวในระหว่างกระบวนการผลิตและสามารถคงตัวอยู่ได้ภายในระยะเวลาไม่กี่วินาที นาที หรือชั่วโมง เช่น เล็กเนย ไอศกรีมเหลว และส่วนผสมเริ่มต้นในการผลิตมาการีน ขณะที่ผลิตภัณฑ์อาหารอีกหลายชนิดอาจมีช่วงความคงตัวของอิมัลชันเป็นวัน เดือน หรือปี เช่น มายองเนส น้ำสลัด และครีมเหลว นอกจากนี้แล้วในผลิตภัณฑ์บางชนิดอาจเกี่ยวข้องกับการควบคุมความไม่คงตัวของอิมัลชันในระหว่างกระบวนการผลิต เช่น การผลิตมาการีน เนย วิปครีม และไอศกรีม เป็นต้น (McClements, 2005)

อิมัลชันเป็นระบบที่ไม่คงตัวทางเทอร์โมไดนามิกส์เนื่องจากระบบต้องการพลังงานอิสระในการเพิ่มพื้นที่ผิวระหว่างวัฏภาคของน้ำและน้ำมัน ดังนั้นเมื่อเวลาผ่านไประบบอิมัลชันจะเกิดการแยกชั้นซึ่งประกอบด้วยชั้นของน้ำมันที่ด้านบนซึ่งเป็นชั้นที่มีความหนาแน่นต่ำ และชั้นของน้ำที่มีความหนาแน่นสูงที่ด้านล่าง ตัวอย่างเช่น การผสมน้ำมันและน้ำเข้าด้วยกันเริ่มแรกจะเกิดอิมัลชันที่ดี มีความคงตัว แต่เมื่อตั้งทิ้งไว้ไม่นานก็จะเกิดการแยกชั้นขึ้น ในทางทฤษฎีความคงตัวของอิมัลชันเกี่ยวข้องกับสมดุลระหว่างแรงดึงดูดและแรงผลักระหว่าง droplet แรงดึงดูดซึ่งเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals) หรือแรงลอนดอน (London dispersion) เป็นแรงที่ทำให้เกิดความไม่คงตัวของอิมัลชัน ในขณะที่แรงผลักจะช่วยให้เกิดความคงตัวโดยทำให้ droplet แยกออกจากกัน (เทพกัญญา, 2545)

## 2.4 ประเภทของความไม่คงตัวของอิมัลชัน

### 2.4.1 การแยกชั้นจากแรงโน้มถ่วง (gravitational separation)

โดยทั่วไปแล้ว droplet ในอิมัลชันจะมีความหนาแน่นแตกต่างจากของเหลวโดยรอบ ถ้า droplet มีความหนาแน่นต่ำกว่าของเหลวที่อยู่รอบๆ droplet จะมีแนวโน้มที่จะเคลื่อนที่ขึ้นสู่ด้านบนซึ่งเรียกลักษณะของอิมัลชันนี้ว่าการเกิดครีม ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 การเกิดครีมของอิมัลชัน

ที่มา : McClements, 2005

ในทางตรงกันข้ามถ้า droplet มีความหนาแน่นสูงกว่าของเหลวที่อยู่รอบๆ droplet จะมีแนวโน้มที่จะเคลื่อนที่ลงด้านล่างซึ่งเรียกลักษณะของอิมัลชันนี้ว่าการตกตะกอน (sedimentation) โดยทั่วไปน้ำมันที่ใช้ในการบริโภคมักจะมีค่าความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำ จึงทำให้ droplet เกิดแรงต้านแรงโน้มถ่วงจึง

เคลื่อนที่ขึ้นสู่ด้านบน (upward gravitational force,  $F_g$ ) ซึ่งแรงต้านแรงโน้มถ่วงนี้มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.1

$$F_g = \frac{-4}{3} \pi r^3 (\rho_2 - \rho_1) g \quad \text{สมการที่ 2.1}$$

เมื่อ  $r$  คือ รัศมีของ droplet,  $g$  คือ ความเร่งอันเนื่องมาจากแรงโน้มถ่วงของโลก,  $\rho_1$  คือ ความหนาแน่นของวัฏภาคต่อเนื่อง และ  $\rho_2$  คือ ความหนาแน่นของวัฏภาคกระจายตัว แต่อย่างไรก็ตาม การเคลื่อนที่ของ droplet ขึ้นสู่ด้านบนมักเกิดแรงต้านในทิศทางตรงกันข้าม (friction force,  $F_f$ ) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.2

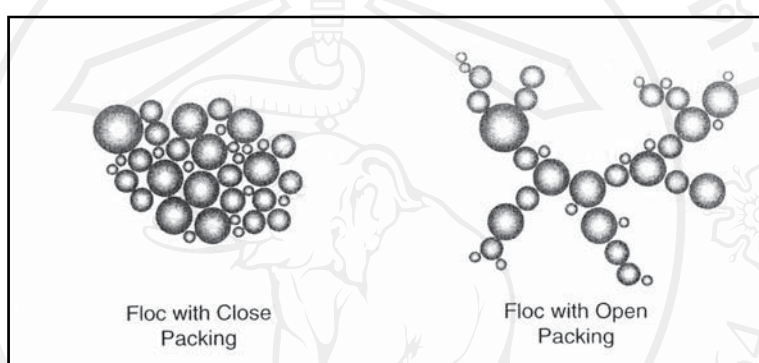
$$F_f = 6\pi\eta r v \quad \text{สมการที่ 2.2}$$

เมื่อ  $\eta$  คือ ความหนืดของวัฏภาคต่อเนื่องและ  $v$  คือ ความเร็วในการเกิดคริม หาก droplet มีค่า  $F_g$  สูงกว่า  $F_f$  อิมัลชันดังกล่าวจะเคลื่อนที่ขึ้นสู่ด้านบนเกิดเป็นชั้นคริมขึ้น ดังนั้นระบบอิมัลชันโดยทั่วไปจึงมีแนวโน้มที่น้ำมันจะเกิดการรวมตัวกันอยู่ด้านบนและเกิดชั้นน้ำที่บริเวณด้านล่าง หรืออาจกล่าวได้ว่า droplet ในระบบอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำมีแนวโน้มในการเกิดคริม ส่วน droplet ที่อยู่ในระบบอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันจะมีแนวโน้มในการเกิดการตกตะกอน ซึ่งการเกิดคริมของอิมัลชันเป็นความไม่คงตัวเริ่มต้นที่สามารถนำไปสู่ความไม่คงตัวประเภทอื่นของอิมัลชัน ได้แก่ flocculation และ coalescence แต่อย่างไรก็ตามการเกิดคริมจัดเป็นลักษณะความไม่คงตัวของอิมัลชันที่สามารถผันกลับได้โดยการกวนผสมใหม่อีกครั้ง เนื่องจากผู้บริโภคร้องการผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะปรากฏเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) การแยกชั้นของอิมัลชันซึ่งผู้บริโภครสามารถสังเกตเห็นได้จึงถือเป็นคุณลักษณะที่ผู้บริโภครไม่ต้องการ นอกจากนี้การแยกชั้นของอิมัลชันยังส่งผลต่อคุณภาพเนื้อสัมผัสและรสชาติของอาหาร โดยในส่วนของคริมซึ่งมีปริมาณไขมันสูงจะมีความหนืดและความมันมากกว่าในชั้นของอาหารเหลว (McClements, 2005)

#### 2.4.2 Flocculation

Flocculation เกิดจาก droplet ตั้งแต่ 2 droplet ขึ้นไปเคลื่อนที่มาเชื่อมต่อกัน แต่ยังคงรักษาสภาพของแต่ละ droplet (individual integrity) ไว้ได้ (ภาพที่ 2.3) การเคลื่อนที่ของ droplet เป็นผลจากการได้รับพลังงานความร้อน แรงโน้มถ่วง หรือแรงเชิงกล และเมื่อ droplet เคลื่อนที่มาปะทะกัน droplet อาจแยกออกจากกันหรือเกิดการรวมตัวกันได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแรงดึงดูดหรือแรงผลักที่เกิดขึ้น การเกิด flocculation อาจให้ทั้งผลดีหรือผลเสียต่อคุณภาพของอิมัลชันซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะธรรมชาติ

ของผลิตภัณฑ์อาหาร ในระบบอิมัลชันเจือจาง (dilute emulsions) ซึ่งเป็นระบบอิมัลชันที่ประกอบด้วย droplet ในอัตราส่วนความเข้มข้นไม่เกินร้อยละ 0.05 การเกิด flocculation จะช่วยเร่งให้เกิดการแยกชั้นอันเป็นผลมาจากแรงโน้มถ่วง ซึ่งเป็นลักษณะที่ไม่ต้องการ เพราะจะทำให้ผลิตภัณฑ์อายุการเก็บรักษาลดลง (McClements, 2005) นอกจากนี้การเกิด flocculation ยังเป็นสาเหตุให้อิมัลชันมีความหนืดเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นลักษณะที่ไม่ต้องการในผลิตภัณฑ์ที่ผู้ผลิตคาดหวังให้ผลิตภัณฑ์ดังกล่าวมีความหนืดต่ำ และการเกิด flocculation อาจทำให้เกิดโครงสร้างของเจลได้ ซึ่งอาจช่วยให้เกิดโครงสร้างของเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ที่ดีได้ เป็นต้น (Demetriades *et al.*, 1997)



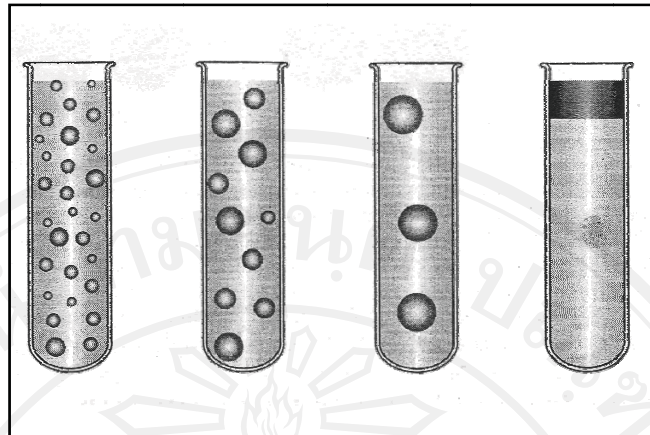
ภาพที่ 2.3 โครงสร้างการเกิด flocculation ของอิมัลชัน

ที่มา : McClements, 2005

การควบคุมการเกิด flocculation อาจใช้กระบวนการผลิตที่แตกต่างกันได้แก่ การเพิ่มแรงดึงดูด (attractive force) หรือการลดแรงผลัก (repulsive force) ที่เกิดขึ้นระหว่าง droplet เช่น การลดแรงผลักระหว่างไฟฟ้า (electrostatic repulsion) โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง หรือการเปลี่ยนแปลงค่า ionic strength การเพิ่มแรงดึงดูดอาจทำได้โดยการเติมสารประกอบพอลิเมอร์ที่ไม่ถูกดูดซับ (nonadsorbed polymer) การเพิ่มความสามารถในการดึงดูดของหมู่ hydrophobic ที่บริเวณผิวของ droplet เช่น การทำให้โปรตีนที่ดูดซับบริเวณผิวของ droplet เสียสภาพโดยการให้ความร้อน (thermal denaturation) และการเติมสารประกอบพอลิเมอร์มากกว่าสองชนิดบนผิวของ droplet เพื่อช่วยให้เกิดโครงสร้างที่เชื่อมต่อกัน เป็นต้น (Dickinson and McClements, 1995; Dalgleish, 1997; McClements, 2005)

#### 2.4.3 Coalescence

Coalescence เกิดจาก droplet ของของเหลวมากกว่า 2 droplet ขึ้นไปมารวมตัวกันกลายเป็น 1 droplet ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น แสดงดังภาพที่ 2.4



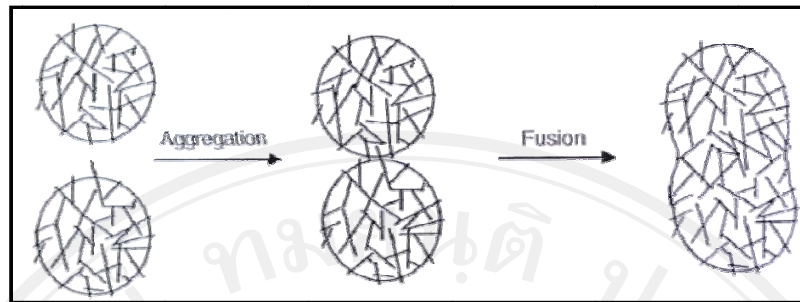
ภาพที่ 2.4 การเกิด coalescence ของอิมัลชัน

ที่มา : McClements, 2005

การเกิด coalescence เป็นกลไกของระบบอิมัลชันที่จะรักษาสถานะความคงตัวทางเทอร์โมไดนามิกให้มากที่สุดโดยการลดพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคของน้ำมันและน้ำ การเกิด coalescence เป็นสาเหตุให้ droplet ของอิมัลชันเกิดครีมหรือตกตะกอนอย่างรวดเร็ว เนื่องจากอนุภาคของ droplet มีขนาดใหญ่ขึ้น ในอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ การเกิด coalescence จะนำไปสู่การแยกชั้นน้ำมันที่บริเวณผิวหน้าของอาหารเรียกว่า oiling off ซึ่งเป็นกระบวนการที่ไม่สามารถผันกลับได้ ส่วนอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันจะทำให้เกิดการสะสมของชั้นน้ำที่บริเวณด้านล่างของอาหาร การเกิด coalescence จะเกิดขึ้นเมื่อ droplet ในอิมัลชันมีการสัมผัสกันโดยตรง ซึ่งอาจเกิดการรวมตัวกันอย่างรวดเร็วหรือเกิดขึ้นหลังจากปล่อยให้ droplet ในอิมัลชันสัมผัสกันเป็นช่วงระยะเวลาหนึ่ง อัตราเร็วในการเกิด coalescence ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตและกลไกการทำงานของอิมัลซิไฟเออร์ที่ใช้ วิธีการที่ช่วยให้อิมัลชันมีความคงตัวต่อการเกิด coalescence อาจทำได้โดยการป้องกันการเกิด flocculation ของ droplet การป้องกันการก่อโครงสร้างของชั้นครีม การลดความเข้มข้นของ droplet และการปรับเปลี่ยนสมบัติทางรีโอโลยีของผิวร่วมให้มีความคงตัวมากขึ้น (Aken, 2004)

#### 2.4.4 Partial coalescence

Partial coalescence เกิดขึ้นเมื่อ droplet ของน้ำมันที่เกิดผลึกไขมันบางส่วนอย่างน้อย 2 droplet เคลื่อนที่มาสัมผัสกันและเกิดการจัดเรียงตัวเป็นรูปร่างที่ผิดปกติดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 การเกิด partial coalescence ของอิมัลชัน  
ที่มา : McClements, 2005

การเกิด partial coalescence จะเริ่มขึ้นเมื่อผลึกไขมันบางส่วนภายใน droplet ทะลุออกไปยัง ส่วนของของเหลวใน droplet อื่นๆ และเกิดการรวมตัวกันของ droplet เพียงบางส่วน โดย droplet จะยังคงรักษารูปร่างเดิมไว้ทั้งนี้เพื่อลดพื้นที่ผิวของ droplet ที่จะสัมผัสกับโมเลกุลของน้ำและ ในบางครั้ง droplet อาจเกิดการเชื่อมต่อกันเป็น โครงสร้างร่างแหซึ่งจะช่วยลดการเคลื่อนที่ของ droplet ภายในอิมัลชันได้ดียิ่งขึ้น (McClements, 2005)

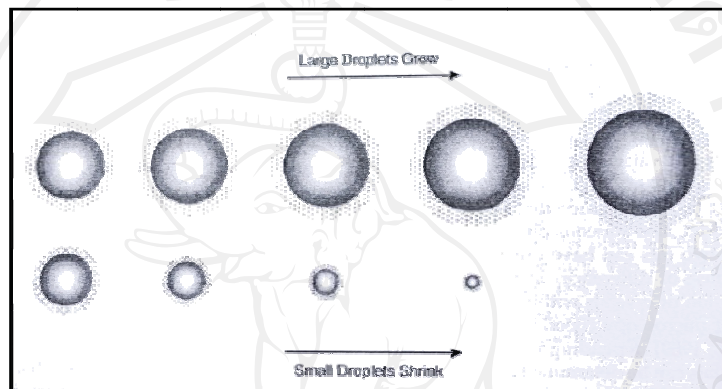
การเกิด partial coalescence มีความสำคัญในผลิตภัณฑ์นม (dairy product) เช่น การผลิต ไอศกรีม วิปครีม ไข่ เนย และมาการีน เนื่องจากการเกิดผลึกไขมันบางส่วนภายใน droplet จะ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการผลิต ในระบบอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ การลดอุณหภูมิ จะทำให้เกิดผลึกไขมันบางส่วนขึ้นภายใน droplet และเมื่ออิมัลชันนั้น ได้รับแรงเฉือนจะทำให้เกิด partial coalescence เกิดเป็น โครงสร้างร่างแหล้อมรอบเซลล์อากาศกระจายอยู่ในวัฏภาคของเหลว (aqueous phase) ดังนั้นการเกิด partial coalescence จึงเป็นกลไกที่มีความสำคัญต่อความคงตัวและ เนื้อสัมผัสที่ดีของผลิตภัณฑ์ไอศกรีมและวิปครีม แต่สำหรับกระบวนการผลิตเนยและมาการีนซึ่ง แต่เดิมเป็นระบบอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ การเกิด partial coalescence จะทำให้เกิดการเปลี่ยนวัฏภาค ของอิมัลชัน (phase inversion) ให้กลายเป็นระบบอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมัน (McClements, 2005)

#### 2.4.5 Ostwald ripening

Ostwald ripening เป็นกระบวนการที่ droplet ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจาก droplet ที่มีขนาดเล็กกว่า มารวมกันเนื่องจากการส่งถ่ายมวลของวัฏภาคกระจายตัวจากอนุภาคหนึ่งไปสู่อีกอนุภาคหนึ่งโดยแทรก ผ่านทางวัฏภาคต่อเนื่องดังภาพที่ 2.6 ซึ่งต่างจาก coalescence คือการเกิด coalescence จะเกิดเมื่อ droplet ตั้งแต่ 2 droplet ขึ้นไปเกิดการชนกันและเกิดการแตกออกของเยื่อฟิล์มบางๆ ทำให้องค์ของเหลว ภายในเกิดการรวมกัน ขณะที่ Ostwald ripening droplet จะมีขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องจาก droplet ที่มี



ขนาดเล็กและมีความสามารถในการละลายในวัฏภาคต่อเนื่องจะถูกดูดกลืนโดย droplet ที่มีขนาดใหญ่กว่า ซึ่งการเกิด Ostwald ripening นี้อาจไม่ต้องนำมาพิจารณาในผลิตภัณฑ์อาหารส่วนใหญ่ที่เป็นอิมัลชัน เนื่องจากความสามารถของการละลายทั้งของ triacylglycerols และน้ำมีค่าต่ำมาก ดังนั้นอัตราการส่งถ่ายมวลจึงเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อย่างไรก็ตาม Ostwald ripening มีความสำคัญต่ออิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำที่ประกอบด้วยไขมันที่ละลายน้ำได้มากกว่าหนึ่งชนิดขึ้นไป เช่น น้ำมันหอมระเหย หรืออาจเกิดเมื่อมีแอลกอฮอล์ละลายอยู่ในวัฏภาคของน้ำ เช่น cream liqueurs เป็นต้น (McClements, 2005)

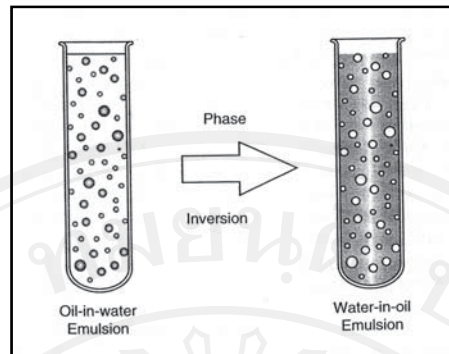


ภาพที่ 2.6 การเกิด Ostwald ripening ของอิมัลชัน

ที่มา : McClements, 2005

#### 2.4.6 การเปลี่ยนวัฏภาคของอิมัลชัน (phase inversion)

Phase inversion เป็นกระบวนการที่ระบบมีการเปลี่ยนแปลงจากอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำเป็นอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมัน หรือในทางกลับกันระบบอาจมีการเปลี่ยนแปลงจากอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันเป็นอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำได้ (ภาพที่ 2.7) การเปลี่ยนวัฏภาคนี้เป็นขั้นตอนที่จำเป็นในการผลิตผลิตภัณฑ์เนยและมาการีน แต่ในผลิตภัณฑ์อาหารอื่นๆ การเปลี่ยนวัฏภาคเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการเนื่องจากการเปลี่ยนวัฏภาคมีผลต่อลักษณะปรากฏ ลักษณะเนื้อสัมผัส ความคงตัว และรสชาติของผลิตภัณฑ์ (McClements, 2005)



ภาพที่ 2.7 การเปลี่ยนวิถุภาพของอิมัลชัน  
ที่มา : McClements, 2005

## 2.5 อิมัลซิไฟเออร์

อิมัลซิไฟเออร์หรือสารลดแรงตึงผิว (surface-active agent) เป็นสารประกอบใดๆ ที่ทำหน้าที่ลดแรงตึงผิวเมื่อถูกดูดซับบนผิวสัมผัสร่วม (interface) ระหว่างน้ำมันและน้ำ อีกทั้งยังช่วยป้องกันการรวมกัน (flocculation และ/หรือ coalescence) ของ droplet ในระบบอิมัลชัน อิมัลซิไฟเออร์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหารได้แก่อิมัลซิไฟเออร์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก พอลิเมอร์ของสารประกอบชีวภาพ และอิมัลซิไฟเออร์ที่มีสมบัติเฉพาะ โดยอิมัลซิไฟเออร์เหล่านี้จะช่วยให้ระบบอิมัลชันมีความคงตัวแตกต่างกันซึ่งขึ้นอยู่กับ โครงสร้าง โมเลกุลและลักษณะเฉพาะทางกายภาพเคมี อิมัลซิไฟเออร์ที่ดีควรจะดูดซับบนผิวสัมผัสร่วมระหว่างน้ำมันและน้ำได้อย่างรวดเร็วในระหว่างขั้นตอนการโฮโมจิไนซ์ สามารถลดแรงตึงผิวของ droplet ได้มาก และช่วยป้องกันการรวมกันของ droplet ในระหว่างขั้นตอนการโฮโมจิไนซ์ นอกจากนี้อิมัลซิไฟเออร์ต้องช่วยป้องกันการรวมตัวของ droplet ทั้ง flocculation และ/หรือ coalescence ของอิมัลชันภายใต้สภาวะแวดล้อมในการผลิต การขนส่ง การเก็บรักษา และเมื่อนำผลิตภัณฑ์อิมัลชันนั้นไปใช้ในการบริโภค (McClements, 2005)

อิมัลซิไฟเออร์หรือสารลดแรงตึงผิวที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหารแต่ละชนิดจะมีสมบัติที่แตกต่างกันตามค่าความสามารถในการละลายน้ำและน้ำมัน โดยอิมัลซิไฟเออร์ที่สามารถละลายได้ดีในน้ำ (water-soluble surfactants) นิยมนำไปใช้ในระบบอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ เช่น ในผลิตภัณฑ์เครื่องดื่ม, dressings, deserts และ coffee whiteners แต่อย่างไรก็ตามอิมัลซิไฟเออร์ในกลุ่มนี้บางครั้งอาจใช้เพื่อเข้าไปแทนที่โปรตีนที่ดูดซับบนผิว droplet ของน้ำมันในระหว่างกระบวนการผลิตไอศกรีม วิปครีม และทอปปิ้ง เป็นต้น ส่วนสารอิมัลซิไฟเออร์ที่สามารถละลายได้ดีในน้ำมัน

(oil-soluble surfactants) มักใช้ในระบบอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันเพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความคงตัว เช่น ผลิตภัณฑ์เนยและมาการีน รวมทั้งอาจใช้อิมัลซิไฟเออร์ที่สามารถละลายได้ดีในน้ำมันในการยับยั้งการตกผลึกของไขมันในอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำเมื่อต้องการเพิ่มความคงตัวต่อสถานะแช่เย็นให้กับผลิตภัณฑ์ เช่น ผลิตภัณฑ์ dressings เป็นต้น นอกจากนี้อิมัลซิไฟเออร์ที่สามารถละลายได้ดีในน้ำมันอาจใช้ร่วมกับอิมัลซิไฟเออร์ที่สามารถละลายได้ดีในน้ำเพื่อเข้าไปแทนที่โปรตีนออกจาก droplet ของน้ำมันในระหว่างกระบวนการผลิตไอศกรีม วิปครีม และทอปปิง ได้เช่นเดียวกัน (McClements, 2005) โดยอิมัลซิไฟเออร์ที่นิยมใช้ในอิมัลชันของอาหารสามารถแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ๆ 5 กลุ่มดังนี้ (เทพกัญญา, 2545; McClements, 2005)

### 2.5.1 mono/diglycerides

โมโน/ไดกลีเซอไรด์เป็นสารลดแรงตึงผิวที่นิยมใช้มากที่สุด โครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วยส่วนที่ชอบน้ำและส่วนที่ชอบน้ำมัน ทำให้ละลายได้บางส่วนทั้งในน้ำและน้ำมัน โดยจะถูกดูดซับที่บริเวณผิวร่วมระหว่างน้ำมันและน้ำ และเกิดเป็นผลึกของเหลว (liquid crystal phase) ในน้ำ โมโน/ไดกลีเซอไรด์ช่วยลดแรงตึงผิวที่บริเวณผิวร่วมจึงช่วยรักษาความคงตัวให้กับอิมัลชันได้ โดยทั่วไปนั้น โมโน/ไดกลีเซอไรด์มักใช้เป็นสารลดแรงตึงผิวในระบบอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมัน โดยนิยมใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมอบ แป้งเค้กผสม มาการีน อาหารสะดวกซื้อ สารให้ความขาวในกาแฟ (coffee whitener) และขนมหวานแช่แข็ง เป็นต้น

### 2.5.2 organic acid esters of monoglycerides

monoglyceride สามารถเกิดเอสเทอร์กับกรดอินทรีย์ได้หลายชนิด ได้แก่ อะซิติก ไดอะซิติก ทาร์ทาริก ซิตริก และกรดแลคติก ซึ่งมีผลทำให้สารลดแรงตึงผิวที่ได้มีสมบัติหน้าที่และการนำไปใช้แตกต่างกัน เช่น monoglyceride acetate ใช้เป็นสารเคลือบในผลิตภัณฑ์ต่างๆ และใช้เป็นสารให้ความลื่น (lubricant) diacetyl tartaric acid monoglycerides ใช้เป็นสารช่วยทำให้เกิดโคในผลิตภัณฑ์ขนมปัง monoglyceride citrates ใช้เป็นสารลดแรงตึงผิวในผลิตภัณฑ์ไส้กรอกและมาการีน เป็นต้น

### 2.5.3 polyol esters of fatty acids

พอลิออลเอสเทอร์ส่วนใหญ่ได้จากการเอสเทอร์ (esterification) กรดไขมันด้วย polyglycerol, propylene glycol, sorbitan, polyoxyethylene sorbitan และ sucrose

- พอลิกลีเซอรอลเอสเทอร์เป็นสารลดแรงตึงผิวที่สามารถกระจายตัวในน้ำได้เพียงเล็กน้อย แต่สามารถละลายได้ดีในน้ำมันและไขมัน มักใช้ในผลิตภัณฑ์เค้ก เนยขาว เครื่องดื่ม น้ำตาลไอซิ่ง (icing) และมาการีน

- โพรพิลีนไกลคอลเอสเทอร์เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ละลายได้ดีในน้ำมันนิยมใช้ในผลิตภัณฑ์เค้ก แป้งเค้กผสม วิปป์ทอปปี้ง และขนมปัง เช่น propylene glycol monostearate และ propylene glycol monopalmitate
- ซอร์บิแทนเอสเทอร์ มีหลายชนิด แต่มีเพียงชนิดเดียวที่ Food and Drug Administration (FDA) อนุญาตให้ใช้เป็นวัตถุเจือปนในอาหารคือ sorbitan monostearate สารในกลุ่มนี้มีชื่อทางการค้าว่า “Span™”
- พอลิออกซิเอทิลีน ซอร์บิแทนเอสเทอร์ สารในกลุ่มนี้มีชื่อทางการค้าว่า “Polysorbate™” หรือ “Tween™” และมักใช้ร่วมกับสารลดแรงตึงผิวในกลุ่ม Span™ เพื่อรักษาความคงตัวของอิมัลชันในผลิตภัณฑ์เค้ก วิปป์ทอปปี้ง ผลิตภัณฑ์โกโก้ เนยขาว น้ำมันที่ใช้สำหรับอบและทอด คัสตาร์ด แฉ่แข็ง เซอร์เบทผลไม้ ขนมหวานแฉ่แข็ง และไอศกรีม เป็นต้น
- ซูโครสเอสเทอร์ เป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดใหม่ที่ FDA อนุญาตให้ใช้เป็นวัตถุเจือปนอาหารได้ สารในกลุ่มนี้เป็นสารที่ไม่มีพิษ ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่ทำให้ผิวหนังระคายเคือง และร่างกายสามารถย่อยได้ง่าย ซูโครสเอสเทอร์มักพบในรูปของแข็ง มีลักษณะเป็นผง สามารถละลายน้ำได้ดี จึงถูกใช้เป็นสารลดแรงตึงผิวสำหรับอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ

#### 2.5.4 stearyl lactylate salts

สารลดแรงตึงผิวในกลุ่มนี้ได้จาก esterification เกิดของกรดแลคติกด้วยกรดไขมัน ทั้งเกลือโซเดียมหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เช่น sodium stearyl lactate เป็นสารลดแรงตึงผิวที่นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมอบ และ calcium stearyl lactylate นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมอบที่ทำให้ขึ้นฟูด้วยยีสต์

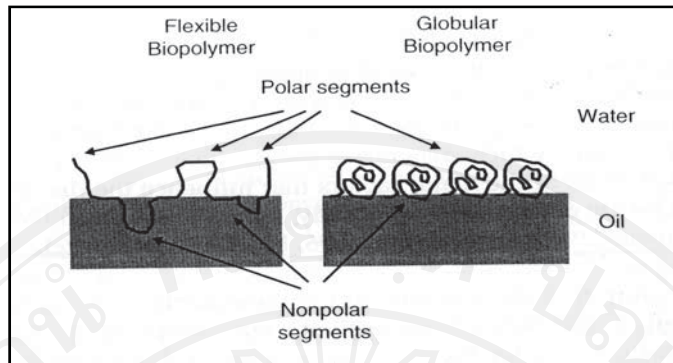
#### 2.5.5 lecithin

เลซิทินเป็นสารลดแรงตึงผิวที่สกัดจากถั่วเหลือง rapeseed และไข่ เลซิทินจากถั่วเหลืองนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารมากที่สุด เลซิทินจากไข่ซึ่งพบในไข่แดงเชื่อว่ามิมีบทบาทสำคัญต่อความคงตัวของมอยองเนสและน้ำสลัด แต่เลซิทินที่สกัดเพื่อนำมาใช้เป็นส่วนผสมในอาหารนั้นมีราคาแพงเกินไป

## 2.6 Amphiphilic biopolymers

Amphiphilic biopolymers คือพอลิเมอร์ของสารประกอบชีวภาพที่มีสมบัติเป็นโมเลกุลสองขั้ว เช่น โปรตีนและพอลิแซคคาไรด์ซึ่งเป็น amphiphilic biopolymer ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ โดยโปรตีนเป็นพอลิเมอร์ของกรดอะมิโน (amino acids) ขณะที่พอลิแซคคาไรด์เป็นพอลิเมอร์ของโมโนแซคคาไรด์ (monosaccharides) ผลิตภัณฑ์อิมัลชันของอาหารหลายชนิดมักใช้อิมัลซิไฟเออร์ในกลุ่มของ amphiphilic biopolymer เพื่อให้ดูจับที่ผิวของ droplet และเกิดโครงสร้างของเยื่อหุ้มบางๆ ทำหน้าที่ป้องกันการรวมตัวกันของ droplet ในระบบอิมัลชัน amphiphilic biopolymer บางชนิดอาจนำไปใช้เป็นส่วนผสมของอาหารในรูปขององค์ประกอบที่มีความหลากหลาย เช่น โปรตีนจากน้ำนม ไข่ เนื้อ ปลา และแป้ง เป็นต้น หรือการใช้ amphiphilic biopolymer ที่ผ่านกระบวนการสกัดจากรูปเดิมตามธรรมชาติและผ่านขั้นตอนการปรับปรุงเพื่อให้มีลักษณะเฉพาะที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้เป็นส่วนผสมของอาหาร เช่น โปรตีนเข้มข้น โปรตีนไอโซเลต และไฮโดรคอลลอยด์อิมัลซิไฟเออร์ เป็นต้น (McClements, 2005)

amphiphilic biopolymer เมื่อดูจับบนผิวร่วมของ droplet จะทำให้เกิดการรวมตัวกัน โดยโครงสร้างด้านที่ไม่มีขั้วของ amphiphilic biopolymer จะหันเข้าสู่ผิวของน้ำมันและด้านที่มีขั้วจะหันออกไปยังส่วนของผิวของน้ำ ซึ่งการดูจับของ amphiphilic biopolymer จะช่วยลดพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างโมเลกุลของน้ำมันและน้ำส่งผลให้แรงดึงผิวของผิวร่วมมีค่าลดลง อย่างไรก็ตาม ลักษณะการดูจับที่ผิวร่วมของ droplet ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของ amphiphilic biopolymer โดยพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบ flexible random-coil ส่วนที่ไม่มีขั้วจะยื่นเข้าไปยังผิวของน้ำมัน ส่วนที่มีขั้วจะยื่นออกไปยังผิวของน้ำ และในส่วนที่เป็นกลางจะแบนเรียบอยู่บริเวณผิวร่วม สำหรับลักษณะการดูจับของ globular biopolymers บนผิวร่วมพบว่าส่วนที่ไม่มีขั้วจะอยู่บนผิวหน้าของโมเลกุลของผิวของน้ำมันขณะที่ส่วนที่มีขั้วจะอยู่บนผิวหน้าของผิวของน้ำ ดังภาพที่ 2.8

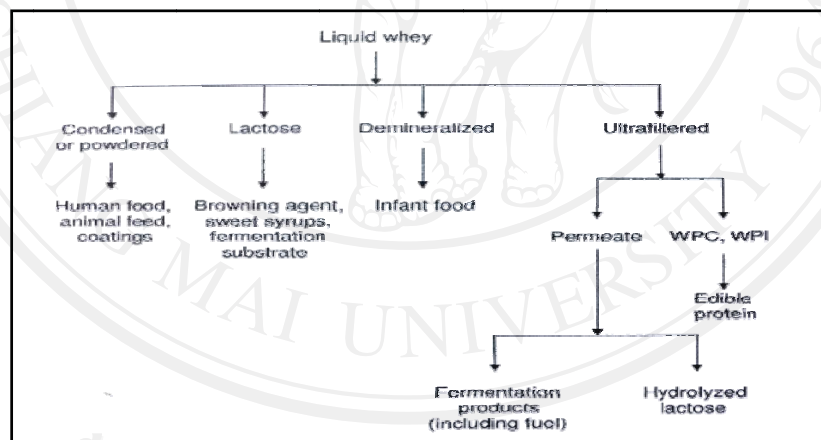


ภาพที่ 2.8 ลักษณะ โครงสร้างโมเลกุลของ biopolymer บนผิวร่วมระหว่างน้ำและน้ำมัน  
ที่มา : McClements, 2005

amphiphilic biopolymers ที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้เป็นอิมัลซิไฟเออร์นั้นจะต้องสามารถดูดซับบนผิวของ droplet ในระบบอิมัลชันได้อย่างรวดเร็วและเกิดเป็น โครงสร้างของเยื่อหุ้มบางๆ ที่ช่วยป้องกันการรวมตัวของ droplet ทำให้ระบบอิมัลชันที่ได้เกิดความคงตัว โดยความคงตัวของระบบอิมัลชันอาจเกิดจากกลไกที่แตกต่างกันของเยื่อหุ้มบาง ๆ ของ amphiphilic biopolymer ที่สร้างขึ้น เช่น แรงผลักกันทาง steric, electrostatic และ hydration ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของเยื่อหุ้มบางๆ เช่น ความหนา ประจุไฟฟ้า การจัดเรียงตัวภายใน และหมู่ฟังก์ชันที่ทำปฏิกิริยาภายใต้สภาวะแวดล้อมของสารละลายที่แตกต่างกันได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง, ionic strength, อุณหภูมิ และประสิทธิภาพการละลาย ยกตัวอย่างเช่น โปรตีนเมื่อดูดซับบนผิวของ droplet ในอิมัลชันจะเกิดเยื่อหุ้มบางๆ และประจุไฟฟ้าขึ้น ดังนั้นแรงผลักกันทางไฟฟ้าจึงเป็นกลไกหลักในการป้องกันการเกิด flocculation ในอิมัลชัน การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง และ ionic strength จึงมีผลต่อความคงตัวของอิมัลชัน โดยอิมัลชันจะมีแนวโน้มในการเกิด flocculation เมื่ออิมัลชันมีค่าความเป็นกรด-ด่าง เข้าใกล้ isoelectric point ของโปรตีนที่ดูดซับ และ/หรือเมื่อระดับ ionic strength มีความเข้มข้นสูงเกินไป นอกจากนี้หากใช้ globular protein ในอิมัลชันจะต้องระวังการใช้ความร้อนเนื่องจากโปรตีนเหล่านี้มีความไวต่อความร้อนที่ได้รับและอาจเกิดการคลายตัวหากได้รับปริมาณความร้อนมากเกินไปเกินกว่าอุณหภูมิวิกฤตซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยากันของส่วนไม่มีขั้วและหมู่ซัลไฟด์ไรล (sulfhydryl groups) ระหว่าง droplet แรงดึงดูดระหว่าง droplet เพิ่มขึ้นและอาจนำไปสู่การเกิด flocculation ของอิมัลชัน (McClements, 2005)

## 2.7 เวย์โปรตีน

เวย์เป็นของเหลวที่ได้ภายหลังจากการตกตะกอนเอาโปรตีนเคซีนในน้ำนมออก ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมการผลิตเนยแข็ง เวย์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ สวีทเวย์ (sweet whey) เป็นเวย์ที่ได้หลังจากตกตะกอนเคซีนในน้ำนมสดโดยใช้เอนไซม์เรนเนทในการผลิตเนยแข็งเชดดาร์ (cheddar cheese) ซึ่งน้ำเวย์ที่ได้มีค่าความเป็นกรด-ด่างไม่ต่ำกว่า 5.6 และแอซิดเวย์ (acid whey) เป็นเวย์ที่ได้จากอุตสาหกรรมการผลิตเนยแข็งโดยใช้กรดในการตกตะกอนเคซีน เช่น เนยแข็งคottage (cottage cheese) น้ำเวย์ที่ได้มีค่าความเป็นกรด-ด่างไม่เกิน 5.1 โดยปกติแล้วเวย์ไม่ได้ใช้เป็นอาหารสำหรับมนุษย์แต่ใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตอาหารสัตว์ หรือใช้เป็นปุ๋ยให้กับพืช อย่างไรก็ตามน้ำเวย์ประกอบด้วยองค์ประกอบที่มีความสำคัญหลายชนิด เช่น น้ำตาลแลคโตส เกลือแร่ และโปรตีนที่มีบทบาทหน้าที่สำคัญในด้านต่างๆ ต่อผลิตภัณฑ์อาหาร ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการวิจัยและพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์จากน้ำเวย์ในรูปแบบต่างๆ มากขึ้นดังแสดงในภาพที่ 2.9 (Onwulata and Huth, 2008)



ภาพที่ 2.9 แผนผังผลิตภัณฑ์จากน้ำเวย์

ที่มา : Onwulata and Huth, 2008

ผลิตภัณฑ์น้ำเวย์เข้มข้นและเวย์ผงในอดีตจะใช้ความร้อนเพื่อช่วยทำให้เข้มข้นและใช้ในกระบวนการอบแห้ง แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีข้อจำกัดคือ เวย์โปรตีนจะอยู่ในรูปที่เสถียรจากความร้อน มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ เกาะรวมกันเป็นก้อน และมีสีเหลือง-น้ำตาล ในปัจจุบันการผลิตเวย์โปรตีนเข้มข้นจะให้การกรองด้วยเมมเบรน (membrane filtration) ซึ่งสามารถแยกเวย์โปรตีนโดยยังคงรักษาความสามารถในการละลายน้ำได้ดี การกรองโดยใช้เมมเบรนเป็นเทคนิคในการแยกโมเลกุล

ของสารโดยใช้วัสดุที่มีรูพรุนที่มีความหนา 150 ไมโครเมตร หลายๆ ชั้นทำหน้าที่เป็นเชื้อเลือกผ่านของสาร วัสดุที่ใช้ทำเยื่อกรองที่ใช้โดยทั่วไปได้แก่ เซลลูโลสอะซิเตต (cellulose acetate) เซรามิก (ceramic) พอลิซัลโฟน (polysulfone) หรือเซอร์โคเนียมออกไซด์ (zirconium oxide) โดยเยื่อกรองจะประกอบเข้ากับวัสดุชั้นนอกที่เป็นสแตนเลสสตีล (Henning *et al*, 2006; Onwulata and Huth, 2008) การผลิตเวย์โปรตีนเข้มข้นสามารถทำได้โดยการกรองด้วยเมมเบรนใน 5 รูปแบบและบางครั้งอาจใช้วิธีการกรองหลายๆ รูปแบบร่วมกันซึ่งได้แก่ อัลตราฟิวเตรชัน (ultrafiltration, UF), ไมโครฟิวเตรชัน (microfiltration, MF), อิเล็กโทรไดอะไลซิส (electrodialysis, ED), นาโนฟิวเตรชัน (nanofiltration, NF) และรีเวอร์สออสโมซิส (reverse osmosis, RO) จากนั้นจึงนำเวย์โปรตีนเข้มข้นที่ได้ไประเหยแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (spray dryer) ให้เหลือความชื้นของผลิตภัณฑ์ต่ำกว่าร้อยละ 5 ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์เวย์โปรตีนเข้มข้นที่ได้จะมีปริมาณ โปรตีนแตกต่างกันขึ้นอยู่กับรูปแบบการกรองชนิดต่างๆ ร่วมกัน ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบเทคนิคการกรองน้ำเวย์ในรูปแบบต่างๆ (Onwulata and Huth, 2008)

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบการแยกองค์ประกอบต่างๆ ภายในน้ำนมด้วยการกรองโดยใช้เมมเบรน

Type	Pore size (nm)	Components retained	Molecular weight of component (kDa)
MF	20-4,000	Bacteria, casein micelles, fat globules	100-500
UF	20-200	Whey proteins	1-100
NF	<2	Lactose	0.1-1
RO	<2	Ions	<0.1

ที่มา : Onwulata and Huth, 2008

## 2.8 ชนิดของเวย์โปรตีน

การกรองน้ำเวย์ในระดับอัลตราฟิวเตรชันสามารถควบคุมและกำหนดปริมาณของโปรตีนในน้ำเวย์ได้ ซึ่งเมื่อนำน้ำเวย์ดังกล่าวไประเหยแห้งจะได้ผลิตภัณฑ์เวย์โปรตีนเข้มข้น (whey protein concentrate, WPC) เวย์โปรตีนเข้มข้นอาจมีความเข้มข้นของโปรตีนอยู่ในช่วงร้อยละ 20-89 โดยเวย์โปรตีนที่มีความเข้มข้นของโปรตีนร้อยละ 35 เป็นผลิตภัณฑ์ที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป การกรองน้ำเวย์ในระดับอัลตราฟิวเตรชันร่วมกับ ไดอะฟิวเตรชันจะช่วยแยกเกลือแร่และน้ำตาลแลคโตสออกจากน้ำเวย์



ได้มากขึ้นทำให้ผลิตภัณฑ์เวย์โปรตีนเข้มข้นที่ได้มีปริมาณโปรตีนมากกว่าร้อยละ 50 (Onwulata and Huth, 2008)

เวย์โปรตีนไอโซเลต (whey protein isolate, WPI) ประกอบด้วยโปรตีนที่ความเข้มข้นร้อยละ 90 ขึ้นไป ได้จากการกำจัดน้ำตาลแลคโตสออกจากน้ำเวย์อย่างสมบูรณ์โดยใช้เครื่องแลกเปลี่ยนประจุ (ion-exchange) ซึ่งจะแยกเฉพาะองค์ประกอบที่มีประจุแทนการแยกองค์ประกอบตามขนาดโมเลกุล และโดยทั่วไปมักใช้ร่วมกันกับการกรองโดยใช้เมมเบรน เวย์โปรตีนไอโซเลตจึงมีปริมาณโปรตีนและมีความบริสุทธิ์สูงกว่าเวย์โปรตีนเข้มข้น ดังนั้นแนวโน้มการนำเวย์โปรตีนไอโซเลตไปประยุกต์ใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์อาหารที่มีลักษณะเฉพาะจึงได้รับความนิยมมากกว่าการใช้เวย์โปรตีนเข้มข้น แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากเวย์โปรตีนไอโซเลตมีปริมาณโปรตีนสูง มีความบริสุทธิ์สูง และมีกระบวนการผลิตที่ซับซ้อนจึงทำให้เวย์โปรตีนไอโซเลตมีราคาสูงตามไปด้วย (Lizarraga *et al.*, 2008; Onwulata and Huth, 2008)

## 2.9 บทบาทของเวย์โปรตีนในระบบอิมัลชัน

เวย์โปรตีนประกอบด้วย globular proteins หลายชนิดแตกต่างกัน โดยทั่วไปประกอบด้วย  $\beta$ -lactoglobulin (ประมาณร้อยละ 55)  $\alpha$ -lactalbumin (ประมาณร้อยละ 24) serum albumin (ประมาณร้อยละ 5) และ immunoglobulin (ประมาณร้อยละ 15) เวย์โปรตีนสามารถทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ในระบบอิมัลชันของอาหารได้ เนื่องจากประกอบด้วยโปรตีนที่มีสมบัติเป็นโมเลกุลสองขั้วจึงช่วยให้อิมัลชันเกิดโครงสร้างได้ง่ายขึ้น ช่วยเพิ่มความคงตัวให้กับอิมัลชัน และให้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติทางกายภาพเคมีเป็นที่น่าพอใจ (McClements, 2005)

การนำเวย์โปรตีนมาประยุกต์ใช้เป็นตัวอิมัลซิไฟเออร์ในระบบอิมัลชัน เพื่อให้อิมัลชันมีความคงตัวและมีสมบัติทางกายภาพเคมีที่ดีนั้นจำเป็นต้องมีความเข้าใจในพฤติกรรมการดูดซับของเวย์โปรตีนที่บริเวณผิวร่วมและความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเฉพาะของผิวร่วมกับสมบัติทางกายภาพเคมีของอิมัลชัน เช่น ความคงตัวของอิมัลชัน สมบัติทางรีโอโลยี และลักษณะปรากฏ เป็นต้น งานวิจัยส่วนมากสนใจศึกษาความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับบทบาทหน้าที่ของเวย์โปรตีนในระบบอิมัลชันโดยใช้แบบจำลองระบบอิมัลชันอย่างง่ายเป็นตัวแทนในการศึกษา การใช้โปรตีนที่มีความบริสุทธิ์ การใช้ไขมันต้นแบบหรือไขมันที่มีความบริสุทธิ์สูง รวมทั้งการกำหนดค่าความเป็นกรด-ด่าง ionic strength และอุณหภูมิในการทดลองให้คงที่ เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการทดลองใช้เวย์โปรตีนในระดับอุตสาหกรรมในผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่มีพื้นฐานอยู่บนระบบอิมัลชันซึ่งมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องแตกต่างกัน เช่น สภาวะของสารละลาย (ค่าความเป็นกรด-ด่าง, ionic strength, surfactants และ biopolymers

ในสารละลาย) สภาพแวดล้อมในระหว่างการผลิต (การใช้ความร้อน, การแช่เย็น, การแช่เยือกแข็ง, การอบแห้ง, การโสมจิไนซ์ และการกวนโดยใช้แรงเชิงกล) การเก็บรักษา และการจัดจำหน่าย เป็นต้น (Onwulata and Huth, 2008)

### 2.9.1 บทบาทของเวย์โปรตีนต่อการแยกชั้นจากแรงโน้มถ่วงของอิมัลชัน

เวย์โปรตีนที่ใช้เป็นอิมัลซิไฟเออร์ในระบบอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำจะส่งผลต่อความคงตัวต่อการเกิดครีมของอิมัลชันได้หลายทางได้แก่ (i) เวย์โปรตีนช่วยให้เกิดโครงสร้างขนาดเล็กของ droplet ในระหว่างการโสมจิไนซ์และ (ii) เวย์โปรตีนช่วยเพิ่มแนวโน้มการเกิด flocculation ซึ่งเป็นผลดีต่อระบบอิมัลชัน อย่างไรก็ตามในระบบอิมัลชันชนิดเจือจางการเกิด flocculation อาจทำให้ความคงตัวของอิมัลชันลดลง โดยมีความเร็วในการเกิดครีมเพิ่มสูงขึ้น แต่ในระบบอิมัลชันชนิดเข้มข้นการเกิด flocculation จะช่วยเพิ่มความคงตัวต่อการเกิดครีมของอิมัลชัน ซึ่งเกิดจากการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคเกิดเป็นโครงสร้างร่างแหที่ช่วยป้องกันการเคลื่อนที่ของ droplet ในอิมัลชัน (Onwulata and Huth, 2008)

### 2.9.2 บทบาทของเวย์โปรตีนต่อการรวมตัวกันของ droplet

เวย์โปรตีนมีผลต่อความคงตัวของอิมัลชันในด้านการรวมกันระหว่าง droplet ในอิมัลชัน (flocculation, coalescence และ partial coalescence) ได้หลายทางดังนี้ (i) เวย์โปรตีนที่ดูดซับบริเวณผิวของ droplet ช่วยเพิ่มปริมาณประจุไฟฟ้าและชั้นความหนาของผิวสัมผัสร่วมทำให้เกิดแรงผลักกันระหว่าง droplet ในอิมัลชันเพิ่มสูงขึ้น จึงช่วยป้องกันการเกิด flocculation ของอิมัลชัน (ii) เวย์โปรตีนที่ดูดซับบนผิวของ droplet ช่วยเพิ่มความยืดหยุ่น (visco-elastic) ให้กับผิวร่วมทำให้ความสามารถในการต้านการผิดรูปของ droplet เพิ่มขึ้น ดังนั้นเวย์โปรตีนจึงช่วยป้องกันการเกิด coalescence และ partial coalescence ของอิมัลชันได้ (iii) เวย์โปรตีนที่ไม่ถูกดูดซับบนผิวของ droplet มีความสามารถเพิ่มความหนืดหรือช่วยในการเกิดเจลให้กับวัสดุต่อเนื่อง ทำให้ droplet เคลื่อนที่ได้ช้าลง จึงช่วยป้องกันการสัมผัสกันระหว่าง droplet ในระบบอิมัลชัน ดังนั้นเวย์โปรตีนจึงอาจช่วยลดโอกาสการเกิด flocculation และ coalescence ของอิมัลชันและ (iv) เวย์โปรตีนที่ไม่ถูกดูดซับที่ผิวของ droplet อาจช่วยเพิ่มแรงดึงดูดออสโมซิส (osmotic attraction) ระหว่าง droplet จึงช่วยลดการเกิด flocculation ของอิมัลชันได้ (Onwulata and Huth, 2008)

### 2.9.3 บทบาทของเวย์โปรตีนต่อสมบัติทางรีโอโลยีของอิมัลชัน

รีโอโลยี (rheology) เป็นวิทยาศาสตร์ที่ศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (stress) กับการผิดรูป (deformation) และ/หรือการไหลของวัสดุ (Rao, 1999) ซึ่งมีความสำคัญในอุตสาหกรรมอาหารเนื่องจากสมบัติทางรีโอโลยีส่งผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัส ความรู้สึกในปาก อายุการเก็บรักษา และกระบวนการผลิต เป็นต้น โดยทั่วไปในการทดสอบสมบัติทางรีโอโลยีนิยมวัดค่าการผิดรูป และ/หรือการไหลของวัสดุเมื่อได้รับแรงเค้นที่กำหนด การเลือกที่จะวัดค่าการผิดรูป และ/หรือการไหลของวัสดุนั้นขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพเคมีของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งข้อมูลที่ได้รับจากการทดสอบทางรีโอโลยีนั้นสามารถอธิบายเกี่ยวกับลักษณะและบทบาทหน้าที่ต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ได้ (Rao, 1999)

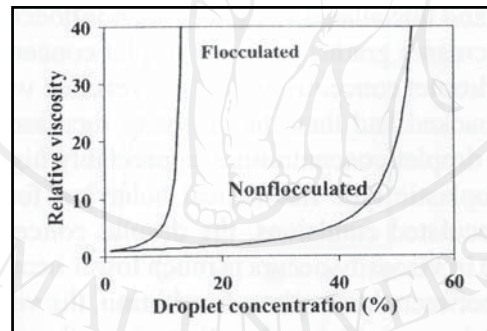
ระบบอิมัลชันของผลิตภัณฑ์อาหารในระดับอุตสาหกรรมประกอบด้วยองค์ประกอบที่มีความอ่อนแอแตกต่างกันทั้งของไหลที่มีความหนืดต่ำ เช่น นํ้านม และเครื่องดื่มต่างๆ ไปจนกระทั่งวัสดุแข็งที่มีความยืดหยุ่นสูง เช่น เนย หรือมาการีนที่ผ่านการแช่เย็น เป็นต้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบหรือโครงสร้างระดับจุลภาคของผลิตภัณฑ์ต่อสมบัติทางรีโอโลยีของอิมัลชัน เช่น ความหนืดปรากฏ (apparent viscosity,  $\eta$ ) ของอิมัลชัน ซึ่งโดยทั่วไปสามารถแสดงเป็นฟังก์ชันของปัจจัยต่างๆ ได้ดังสมการที่ 2.3 (Aoki *et al.*, 2005; Dickinson and McClements, 1995)

$$\eta = f(\eta_1, \eta_2, \phi, r, w(h), \tau) \quad \text{สมการที่ 2.3}$$

เมื่อ  $\eta_1$  คือ ความหนืดของวัฏภาคต่อเนื่อง,  $\eta_2$  คือ ความหนืดของวัฏภาคกระจายตัว,  $\phi$  คือ อัตราส่วนของวัฏภาคกระจายตัว,  $r$  คือ รัศมีของ droplet,  $w(h)$  คือ ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่าง droplet และ  $\tau$  คือ ความเค้นเฉือนที่ใช้ทดสอบ อย่างไรก็ตามในกรณีของระบบอิมัลชันชนิดเจือจางอาจใช้ Einstein's equation ในการอธิบายฟังก์ชันของความหนืดปรากฏของอิมัลชันดังสมการที่ 2.4 ซึ่ง Einstein's equation เป็นสมการที่ลดผลกระทบจากการผิดรูปของ droplet (droplet fluidity), ปฏิกริยาระหว่างอนุภาคของ droplet, การเกิด flocculation ของ droplet และวัฏภาคต่อเนื่องที่มีสมบัติเป็นของไหลนอนนิวตันเนียน (non-Newtonian fluid) (Aoki *et al.*, 2005; Dickinson and McClements, 1995)

$$\eta = \eta_1(1+2.5\phi) \quad \text{สมการที่ 2.4}$$

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับปริมาณของ droplet ของอิมัลชันทั้งในระบบอิมัลชันที่เกิด flocculation และไม่เกิด flocculation แสดงดังภาพที่ 2.10 พบว่าในระบบอิมัลชันที่ไม่เกิด flocculation เมื่อความเข้มข้นของ droplet เพิ่มขึ้นความหนืดของอิมัลชันจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนกระทั่งถึงความเข้มข้นวิกฤต ซึ่ง droplet จะอยู่ใกล้ชิดกันมาก ส่งผลให้ความหนืดของอิมัลชันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและในระบบอิมัลชันที่ความเข้มข้นของ droplet มีค่าสูงกว่าความเข้มข้นวิกฤต อิมัลชันดังกล่าวมีแนวโน้มที่จะแสดงสมบัติทางรีโอโลยีในรูปของ viscoplastic เช่น มายองเนส เป็นต้น ขณะที่ระบบอิมัลชันที่เกิด flocculation การเพิ่มความเข้มข้นของ droplet จะทำให้ความหนืดของอิมัลชันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งอาจเกิดจากโครงสร้างตาข่ายที่เกิดขึ้นระหว่าง droplet และนอกจากนี้ความหนืดของอิมัลชันที่เกิด flocculation จะมีค่าสูงกว่าอิมัลชันที่ไม่เกิด flocculation เพราะผลรวมของอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น ในหลายๆ อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับระบบอิมัลชันพบว่า อิมัลชันมีพฤติกรรมเป็นของไหลแบบ highly shear-thinning โดยเฉพาะในอิมัลชันที่เติมสารเพิ่มความหนืดในวัฏภาคต่อเนื่อง และ/หรือ ถ้า droplet ในอิมัลชันเกิด flocculation (Aoki *et al.*, 2005; Dickinson and McClements, 1995)



ภาพที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดสัมพันธ์กับความเข้มข้นของอิมัลชันชนิดน้ำมันน้ำที่เกิด flocculation และไม่เกิด flocculation  
ที่มา : Onwulata and Huth, 2008

เวย์โปรตีนมีผลต่อสมบัติทางรีโอโลยีของอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำได้หลายทางคือ (i) เวย์โปรตีนอาจส่งผลต่อรูปแบบ ระดับ และความถี่ที่แตกต่างกันของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่าง droplet ซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงผลรวมของ droplet ที่เกิด flocculation ในระบบอิมัลชัน ดังที่ได้กล่าวก่อนหน้านี้ ที่ความเข้มข้นของ droplet เท่ากัน การเกิด flocculation ของอิมัลชันจะมีแนวโน้มทำให้ความหนืดของอิมัลชันเพิ่มสูงขึ้นและมีแนวโน้มจะแสดงพฤติกรรมเป็นของไหล shear-thinning มากกว่าอิมัลชันที่ไม่เกิด flocculation และ (ii) เวย์โปรตีนอาจเพิ่มความหนืดให้กับวัฏภาคต่อเนื่องในระบบ

อิมัลชัน โดยเฉพาะถ้าเกิดการรวมตัวของเวย์โปรตีนเมื่อได้รับความร้อน โดยความร้อนที่ได้รับจะทำให้เวย์โปรตีนเกิดการเสียสภาพทำให้วัฏภาคต่อเนื้อมีความหนืดเพิ่มขึ้นหรืออาจเกิดเจลขึ้นได้ ซึ่งส่งผลอย่างมากต่อสมบัติทางรีโอโลยีโดยรวมของอิมัลชัน ดังนั้นปัจจัยอื่นๆ ที่อาจส่งผลต่อการรวมกันของเวย์โปรตีนทั้งเวย์โปรตีนที่ถูกคูดจับบริเวณผิวของ droplet และเวย์โปรตีนที่ไม่ถูกคูดจับ เช่น ค่าความเป็นกรด-ด่าง ionic strength และอุณหภูมิ จึงอาจมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางรีโอโลยีโดยรวมของอิมัลชันได้เช่นกัน (Onwulata and Huth, 2008)

Sun and Gunasekaran (2009) ศึกษาระดับความเข้มข้นของเวย์โปรตีนไอโซเลตที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.2, 1, 2 (w/w) และอัตราส่วนของน้ำมันปลา menhaden ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5, 20, 40 (v/v) ร่วมกับการเติมแซนแทนกัมความเข้มข้นร้อยละ 0.2 (w/w) ต่อความคงตัวและสมบัติทางรีโอโลยีของอิมัลชัน พบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของเวย์โปรตีนมีผลต่อขนาดของ droplet, surface charge และ oxidative stability ของอิมัลชันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) แต่มีผลเพียงเล็กน้อยต่อการเกิดครีมและสมบัติทางรีโอโลยี เมื่อความเข้มข้นของเวย์โปรตีนเพิ่มขึ้นจะทำให้ขนาดของ droplet เล็กลง และเกิดประจุลบบนผิวของ droplet เพิ่มขึ้น ซึ่งการเติมเวย์โปรตีนจะช่วยเพิ่มความคงตัวทาง steric และเพิ่มแรงผลักทางไฟฟ้า ทำให้อิมัลชันมีความคงตัวต่อการเกิด flocculation และความเข้มข้นของเวย์โปรตีนที่เพิ่มขึ้นยังช่วยลดการเกิดครีมของอิมัลชัน ซึ่งอาจเป็นผลจากเวย์โปรตีนในส่วนที่ไม่ถูกคูดจับในวัฏภาคของเหลว นอกจากนี้เวย์โปรตีนยังช่วยเพิ่มความคงตัวต่อการเกิดออกซิเดชันซึ่งอาจเกิดจากโครงสร้างของเวย์โปรตีนที่เคลือบเป็นชั้นบริเวณผิวของ droplet และความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระของเวย์โปรตีนที่อยู่ในวัฏภาคของของเหลว

Lizarraga *et al.* (2008) เปรียบเทียบความคงตัวของอิมัลชันน้ำมันข้าวโพด (ร้อยละ 50 v/v) โดยใช้เวย์โปรตีนเข้มข้นทางการค้าที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.37-2.93 w/w ทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ และเปรียบเทียบวิธีการโฮโมจิไนซ์ 2 รูปแบบ คือ การโฮโมจิไนซ์ด้วยเครื่อง Ultra Turrax (UT) และการโฮโมจิไนซ์ด้วยเครื่อง Valve Homogenizer (VH) พบว่า อิมัลชันที่โฮโมจิไนซ์ด้วยเครื่อง UT ไม่เกิด flocculation หรือเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย มีพฤติกรรมเป็นของไหลนิวโตเนียน ขนาดของ droplet จะลดลงอย่างคงที่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเวย์โปรตีน จาก 26  $\mu\text{m}$  ที่ความเข้มข้นของเวย์โปรตีนร้อยละ 0.37 w/w เป็น 11  $\mu\text{m}$  ที่ความเข้มข้นของเวย์โปรตีนร้อยละ 2.93 w/w สำหรับการโฮโมจิไนซ์ด้วยเครื่อง VH อิมัลชันที่ได้สามารถเกิด flocculation และมีแนวโน้มที่ droplet จะมีขนาดเล็กกว่าอิมัลชันที่โฮโมจิไนซ์ด้วยเครื่อง UT แม้ว่าจะใช้เวย์โปรตีนที่ระดับความเข้มข้นต่ำกว่า และพบว่าที่ความเข้มข้นของเวย์โปรตีนร้อยละ 0.37 w/w อิมัลชันที่ได้แสดงพฤติกรรมเป็นของไหลนิวโตเนียน แต่ที่ระดับ

ความเข้มข้นอื่นๆ อิมัลชันแสดงพฤติกรรมเป็นของไหล shear-thinning และเกิด hysteresis อิมัลชันที่ผ่านการโฮโมจิไนซ์ด้วยเครื่อง VH มีความคงตัวมากกว่าอิมัลชันที่ผ่านการโฮโมจิไนซ์ด้วยเครื่อง UT โดยเฉพาะเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเวย์โปรตีน ซึ่งเป็นผลจากการเกิด flocculation ของอิมัลชัน

Surh *et al.* (2006) ศึกษาความสามารถของเวย์โปรตีนเข้มข้นที่ปรับแต่งคุณค่าทางโภชนาการ (modified whey protein concentrate, MWPC) ซึ่งมีอัตราส่วนของฟอสโฟลิพิดและโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงในปริมาณสูงกว่าเวย์โปรตีนเข้มข้นทั่วไป (conventional whey protein concentrate, CWPC) ในการทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ในระบบอิมัลชันของน้ำมันข้าวโพด (ร้อยละ 10 w/w ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 7 ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.5 mM) โดยเปรียบเทียบกับอิมัลชันที่เติมเวย์โปรตีนเข้มข้นทั่วไป พบว่า อิมัลชันที่เติม MWPC สามารถใช้เวย์โปรตีนในปริมาณความเข้มข้นที่ต่ำกว่าอิมัลชันที่เติม CWPC เพื่อให้ได้อิมัลชันที่ได้มีความคงตัวภายใต้การโฮโมจิไนซ์ในสถานะเดียวกัน โดยอิมัลชันที่เติม MWPC ความเข้มข้นมากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 0.5 w/w จะให้อิมัลชันที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของ droplet ประมาณ 0.3  $\mu\text{m}$  แต่อิมัลชันที่เติม CWPC ต้องเติมเวย์โปรตีนที่ระดับความเข้มข้นมากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 0.9 w/w จึงจะได้ droplet ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.4  $\mu\text{m}$  นอกจากนี้แล้วอิมัลชันที่เติม MWPC ความเข้มข้นร้อยละ 0.9 w/w มีความคงตัวต่อสารละลายเกลือ ความร้อน และผลจากค่าความเป็นกรด-ด่าง มากกว่าอิมัลชันที่เติม CWPC ที่ความเข้มข้นเดียวกัน ทั้งนี้เป็นผลจากการเกิดแรงผลักกันทาง steric ของสายพอลิเมอร์มากกว่าแรงผลักทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่าง droplet ภายในอิมัลชัน

## 2.10 ไอศกรีม

ไอศกรีม คือ ผลิตภัณฑ์นมแช่เยือกแข็งซึ่งได้จากการนำส่วนผสมของไอศกรีมที่ผ่านการพาสเจอร์ไรซ์มาปั่นแข็งเพื่อเติมอากาศและทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความเป็นเนื้อเดียวกัน โดยทั่วไปส่วนผสมในการผลิตไอศกรีมประกอบไปด้วยผลิตภัณฑ์นม (ไขมันนม และน้ำนม) น้ำตาลทราย เกลือโครม คอรั่นไซรัป น้ำ และอาจมีส่วนผสมของไข่หรือผลิตภัณฑ์จากไข่ กลิ่นรสที่ไม่เป็นอันตรายให้ ความคงตัว อิมัลซิไฟเออร์ รวมทั้งส่วนผสมอื่นๆ ที่สามารถบริโภคได้และมีความปลอดภัย (Arbuckle, 1986) โดยปกติไอศกรีมสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ ไอศกรีมพรีเมียมและไอศกรีมมาตรฐาน ซึ่ง ไอศกรีมพรีเมียมจะผลิตจากวัตถุดิบที่มีคุณภาพสูงและมีปริมาณของไขมันนมในส่วนผสมอยู่สูงคือประมาณร้อยละ 15-20 มีปริมาณอากาศน้อย ในขณะที่ไอศกรีมมาตรฐานจะผลิตจากวัตถุดิบที่มีคุณภาพรองลงมาหรือวัตถุดิบอื่นที่มีราคาถูกทดแทน เช่น การใช้ไขมันนมหรือไขมันจากพืชในส่วนผสมประมาณร้อยละ 8-10 และมีการเติมอากาศในปริมาณที่มากกว่า

(Clarke, 2004) ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 222) พ.ศ. 2544 เรื่องไอศกรีม ไอศกรีมตามประกาศกระทรวงสาธารณสุขสามารถแบ่งออกเป็น 5 ชนิด คือ (1) ไอศกรีมนม ได้แก่ ไอศกรีมที่ทำขึ้นโดยใช้นมหรือผลิตภัณฑ์ที่ได้จากนม (2) ไอศกรีมดัดแปลง ได้แก่ ไอศกรีมนมที่ทำขึ้นโดยใช้ไขมันชนิดอื่นแทนมันเนยทั้งหมดหรือแต่บางส่วน หรือไอศกรีมที่ทำขึ้นโดยใช้ผลิตภัณฑ์ที่มีไขมันแต่ผลิตภัณฑ์นั้นมิใช่ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากนม เช่น ไอศกรีมที่ผสมน้ำมันปาล์มหรือน้ำมันมะพร้าว ไอศกรีมกะทิ เป็นต้น (3) ไอศกรีมผสม ได้แก่ ไอศกรีมนมหรือไอศกรีมดัดแปลงแล้วแต่กรณี ซึ่งมีผลไม้หรือวัตถุดิบที่เป็นอาหารเป็นส่วนผสมอยู่ด้วย เช่น เนื้อผลไม้ ถั่ว ช็อกโกแลต และส่วนผสมอื่นๆ (4) ไอศกรีมนม ไอศกรีมดัดแปลงหรือไอศกรีมผสม ชนิดแข็ง หรือผง ซึ่งต้องนำไปเติมน้ำตามสัดส่วนที่กำหนด แล้วนำไปปั่นให้แข็งหรือแช่เย็นให้แข็งก่อนนำไปบริโภค หรืออาจจำหน่ายในรูปของเหลว ซึ่งนำไปปั่นหรือแช่แข็งได้เลย ไอศกรีมชนิดนี้อาจเรียกว่าไอศกรีมกึ่งสำเร็จรูป (5) ไอศกรีมหวานเย็น ได้แก่ ไอศกรีมที่ทำขึ้นโดยใช้น้ำและน้ำตาล หรืออาจมีวัตถุดิบที่เป็นอาหารเป็นส่วนผสมอยู่ด้วย เช่น สีส้ม กลิ่น รส และน้ำผลไม้ (สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา, 2553)

## 2.11 ส่วนผสมในการผลิตไอศกรีม

ในการผลิต ไอศกรีมเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงจำเป็นต้องใช้ส่วนผสมที่ดีและมีความสมดุลกัน รวมทั้งต้องมีระบบจัดการกระบวนการผลิตอย่างชาญฉลาด (Arbuckle, 1986) ส่วนผสมที่ใช้ในการผลิต ไอศกรีมโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ คือ (1) วัตถุดิบหลัก ได้แก่ โปรตีนนม ไขมัน สารให้ความหวาน และน้ำ (2) วัตถุดิบรอง ได้แก่ สารให้ความคงตัว อิมัลซิไฟเออร์ สี (colors) และสารให้กลิ่นรส (flavors) และ (3) องค์ประกอบอื่นๆ ได้แก่ ช็อกโกแลต บิสกิต เวเฟอร์ ชิ้นผลไม้ และถั่วต่างๆ

การผลิต ไอศกรีมสามารถเลือกใช้วัตถุดิบได้หลากหลายชนิดเป็นส่วนผสม เช่น โปรตีนนม และไขมัน รวมทั้งน้ำบางส่วนได้จากนม หรือจากครีม นอกจากนี้อาจใช้องค์ประกอบต่างๆ ที่แยกได้จากนมนมดิบมาเป็นส่วนผสมในการผลิต ไอศกรีมได้ เช่น นมผงขาดมันเนย (skimmed milk powder) และไขมันนม (butterfat) ซึ่งการเลือกใช้ส่วนผสมชนิดใดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ต้นทุนและคุณค่าที่ได้รับจากวัตถุดิบ รวมทั้งขนาดของกำลังการผลิต (Clarke, 2004)

### 2.11.1 โปรตีนนม

โปรตีนในนมนมแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ เคซีน (casein) และเวย์โปรตีน เคซีนเป็นโปรตีนที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก ทำหน้าที่เป็นสารลดแรงตึงผิว ได้ดี เนื่องจากโมเลกุลด้านหนึ่งประกอบด้วย

กรดอะมิโนที่มีสมบัติละลายในน้ำ (hydrophilic) เช่น เซอรีนและกรดกลูตามิก ส่วนโมเลกุลของโปรตีนอีกด้านหนึ่งประกอบด้วยกรดอะมิโนที่มีสมบัติละลายในไขมัน (hydrophobic) เช่น ลิวซีน วาลีน และฟีนิลอะลานีน เคซีนเป็นโปรตีนที่ค่อนข้างทนต่อความร้อนได้ดีแต่อาจเกิดการเสียสภาพหากได้รับความร้อนมากเกินไป ส่งผลให้โปรตีนเกิดการรวมตัวและตกตะกอน เวย์โปรตีนเป็นโปรตีนนมอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตเนยแข็ง ประกอบด้วยโปรตีนหลัก 4 ชนิด คือ แลคโตโกลบูลิน (lactoglobulin) แลคตาอัลบูมิน (lactalbumin) แอลบูมิน (albumin) และอิมมูโนโกลบูลิน (immunoglobulin) ซึ่งโปรตีนเหล่านี้มีโครงสร้างกลม ทำหน้าที่ช่วยลดแรงตึงผิวได้ เช่นเดียวกับเคซีน เวย์โปรตีนมีความไวต่อความร้อนมากกว่าเคซีน ในผลิตภัณฑ์ไอศกรีมการเติมโปรตีนนมจะช่วยให้อิมัลชันของไอศกรีมมีความคงตัวและช่วยให้ผลิตภัณฑ์เกิดกลิ่นนมที่มีลักษณะเฉพาะ ซึ่งการผลิตไอศกรีมอาจเติมโปรตีนนมในรูปของน้ำนม หรือน้ำนมเข้มข้น น้ำนมไขมันต่ำ และน้ำนมสด หรืออาจเติมโปรตีนนมในรูปของนมผงขาดมันเนย หรือเวย์โปรตีนผง เป็นต้น เวย์โปรตีนเป็นแหล่งของโปรตีนนมที่มีราคาถูก โดยทั่วไปนิยมใช้ในรูปของเวย์โปรตีนผง แต่อย่างไรก็ตามการใช้เวย์โปรตีนมีข้อจำกัด คือ ทำให้ส่วนผสมของไอศกรีมมีปริมาณน้ำตาลแลคโตสจำนวนมาก เมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลแลคโตสอยู่ในระดับสูง น้ำตาลแลคโตสบางส่วนจะเกิดการตกผลึกในระหว่างการเก็บรักษาทำให้ผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่ได้มีเนื้อสัมผัสหยาบคล้ายทรายมีลักษณะเนื้อสัมผัสไม่เรียบเนียน และการที่เวย์โปรตีนมีความคงตัวต่อความร้อนต่ำกว่าเคซีน จึงอาจเกิดการเสียสภาพได้ในระหว่างขั้นตอนการผลิตไอศกรีม (Clarke, 2004)

### 2.11.2 ไขมัน

ไขมันเป็นดัชนีสำคัญซึ่งบ่งบอกถึงคุณภาพของไอศกรีม โดยช่วยให้ฟองอากาศมีความคงตัวให้ความรู้สึกเป็นครีม ทำให้เนื้อสัมผัสเรียบเนียน ทำให้อัตราการละลายลดลง และไขมันยังทำหน้าที่เป็นตัวช่วยพากลิ่นรส ทำให้เกิดการรับรู้กลิ่นรสที่ดี นอกจากนี้แล้วไขมันยังทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นภายใน freezer barrel ในระหว่างการปั่นไอศกรีม แหล่งของไขมันหลักที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตไอศกรีม คือ ไขมันเนย (butterfat) ครีม (cream) และไขมันจากพืช (vegetable fat) ข้อจำกัดของการใช้ไขมันในไอศกรีม คือ ทำให้ต้นทุนในการผลิตไอศกรีมสูง โดยเฉพาะการใช้ไขมันนมในปริมาณมาก นอกจากนี้ยังลดความสามารถในการขึ้นฟูของไอศกรีม และให้พลังงานมากอีกด้วย (Arbuckle, 1986; Clarke, 2004) ทั้งนี้แหล่งไขมันนมที่นิยมใช้ในการผลิตไอศกรีมได้แก่ ครีมสด ครีมแช่แข็ง เนย และน้ำมันเนย เป็นต้น ซึ่งไอศกรีมที่มีคุณภาพสูงจะใช้ครีมสดเป็นแหล่งไขมัน (Marshall and Arbuckle, 1996) อนุภาคน้ำมันในระบบอิมัลชันโดยทั่วไปจะอยู่ใน 3 รูปแบบด้วยกันคือ (i) floccules อนุภาคน้ำมันจะเกิดแรงดึงดูดอย่างอ่อนระหว่างกัน ซึ่งการกวนจะทำให้อนุภาคน้ำมันที่เกิด flocculation



แตกออก ซึ่งในน้ำนมจะไม่พบการเกิด flocculation เนื่องจากมีแรงผลักรันทางไฟฟ้าและแรงผลักรันเชิงมวลทำหน้าที่ป้องกันการเกิด flocculation (ii) clusters เกิดจากอนุภาคน้ำมันใช้วัสดุร่วมกันบางส่วนที่บริเวณผิวร่วมเช่น เคซีนไมเซลล์ (micellar casein) ได้แก่ homogenization clusters และ heat-coagulated fat globules โดยทั่วไปอนุภาคน้ำมันในรูป clusters จะไม่แยกจากกันเมื่อได้รับแรงกวน และ (iii) granules เกิดจากอนุภาคน้ำมันสัมผัสกันและเกิดการรวมตัวกันแบบ granules ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคน้ำมันเกิดการเชื่อมต่อกันของผลึกไขมันที่เกิดขึ้นภายในอนุภาคน้ำมันส่งผลให้อนุภาคน้ำมันมีลักษณะเป็นของแข็งเพิ่มขึ้น โดยทั่วไป granules จะไม่สามารถแยกจากกันจากการกวน (Walstra *et al.*, 1999)

### 2.11.3 สารให้ความหวาน

สารให้ความหวานที่นำมาใช้เป็นส่วนผสมของไอศกรีมมีหลายชนิด ได้แก่ กลูโคส ฟรุคโตส ซูโครส แลคโตส น้ำผึ้ง และคอร์นไซรัป ในผลิตภัณฑ์ไอศกรีมสารให้ความหวานหน้าที่ให้รสหวานช่วยเพิ่มรสชาติของไอศกรีม เพิ่มความหนืดให้กับส่วนผสม เพิ่มปริมาณของแข็งทั้งหมดทำให้จุดเยือกแข็งลดลง ปริมาณน้ำที่เป็นน้ำแข็งมีน้อย ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีเนื้อสัมผัสนุ่มง่ายต่อการรับประทาน และยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ไอศกรีม ปริมาณสารให้ความหวานที่ใช้ในไอศกรีมขึ้นอยู่กับระดับความหวานที่ต้องการ แต่อย่างไรก็ตามการใช้สารให้ความหวานในปริมาณมากเกินไปจะทำให้ผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่ได้มีรสหวานจัด อัตราการตีให้ขึ้นฟูลดลง ใช้ระยะเวลาในการปั่นไอศกรีมนาน ไอศกรีมมีเนื้อสัมผัสแฉะ ไอศกรีมละลายเร็ว และต้องใช้อุณหภูมิต่ำๆ ในขั้นตอนการ hardening ซึ่งเป็นผลมาจากสารให้ความหวานทำให้จุดเยือกแข็งไอศกรีมต่ำลง (จุฑารัตน์, 2549; หทัยทิพย์, 2552) การใช้สารให้ความหวานต้องคำนึงถึงความเหมาะสมทั้งชนิดและปริมาณ เพื่อให้มีความหวาน และจุดเยือกแข็งของไอศกรีมเหลวสูงพอที่จะทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งในปริมาณที่เหมาะสม (Marshall and Arbuckle, 1996) ซึ่งอาจใช้กลูโคสไซรัปแทนการใช้ซูโครสในการผลิตไอศกรีมได้ เนื่องจากการใช้กลูโคสไซรัปจะเพิ่มปริมาณของแข็งในไอศกรีมเหลวโดยไม่ทำให้มีรสหวานเกินไป แต่ถ้าใช้ในปริมาณมากเกินไปอาจทำให้ผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่ได้มีเนื้อสัมผัสเหนียว (gummy texture) หรือให้กลิ่นรสผิดปกติ (off-flavor) และให้พลังงานสูง (Arbuckle, 1986)

### 2.11.4 น้ำ

น้ำเป็นส่วนผสมที่มีอัตราส่วนมากที่สุดในผลิตภัณฑ์ไอศกรีมซึ่งโดยทั่วไปไอศกรีมประกอบด้วยน้ำร้อยละ 60-72 โดยน้ำหนัก แหล่งของน้ำอาจได้จากน้ำนมหรือได้จากน้ำที่เติมลงไปในส่วนผสม น้ำทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการละลายหรือกระจายตัวให้กับส่วนผสมอื่นๆ ทั้งหมด

ทั้งส่วนผสมที่สามารถละลายได้และส่วนผสมที่กระจายตัว โดยทั่วไปน้ำในส่วนผสมจะถูกเปลี่ยนเป็นน้ำแข็งในระหว่างขั้นตอนการปั่นไอศกรีมและการแช่เยือกแข็งไอศกรีม (Clarke, 2004)

### 2.11.5 สารให้ความคงตัว

สารให้ความคงตัวเป็นสารประเภทไฮโดรคอลลอยด์ที่มีความสามารถในการละลายน้ำหรือกระจายตัวได้ในน้ำ ใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์ไอศกรีม ซอร์เบต และอาหารชนิดอื่นๆ ที่ต้องการให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความคงตัว โดยทั่วไปสารให้ความคงตัวจะใช้เป็นส่วนผสมในปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น คือ ประมาณร้อยละ 0.2 (w/w) ของส่วนผสมทั้งหมด สารให้ความคงตัวส่วนมากเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาล ซึ่งได้จากแหล่งของพืช จากการสังเคราะห์ของแบคทีเรีย หรือได้จากสัตว์ เช่น แอลจิเนต คาราจีแนน โลคัสปีนกัน กัวกัม เพคติน โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส แซนแทนกัม และเจลาติน เป็นต้น สารให้ความคงตัวเป็นพอลิเมอร์ที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นเส้นตรงหรือแตกแขนงเป็นสาย ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลที่สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำได้ โดยทั่วไปสารให้ความคงตัวจะประกอบด้วยโมโนเมอร์ประมาณ  $10^3$  หน่วย และสารให้ความคงตัวอาจมีโมเลกุลขนาดใหญ่ซึ่งประกอบด้วยโมโนเมอร์ประมาณ  $10^5$ - $10^6$  หน่วย ซึ่งมีความสามารถในการละลายต่ำกว่าสารให้ความคงตัวที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก และบางครั้งอาจต้องเพิ่มอุณหภูมิและแรงกวนเพื่อให้เกิดการละลายอย่างสมบูรณ์ เมื่อสารให้ความคงตัวละลายจะทำให้ความหนืดของสารละลายเพิ่มขึ้นแม้ว่าจะใช้สารให้ความคงตัวในปริมาณน้อยก็ตาม บางครั้งสารให้ความคงตัวช่วยให้สารละลายเกิดเจลเมื่อได้รับความร้อน และ/หรือ ลดอุณหภูมิ หรือการเติมไอออนที่มีประจุบวก (Clarke, 2004) สารให้ความคงตัวมีผลต่อคุณภาพของไอศกรีม คือ ให้เนื้อสัมผัสที่เรียบเนียน อัตราการละลายต่ำลง ป้องกันการยุบตัวของโครงสร้างไอศกรีม ชะลอการสูญเสียความชื้นของไอศกรีมในระหว่างการเก็บรักษา ชะลอการเกิดผลึกและการเติบโตของผลึกน้ำแข็ง สารให้ความคงตัวจะช่วยเพิ่มความหนืดแต่ไม่มีผลต่อจุดเยือกแข็งของไอศกรีม โดยทั่วไปจะใช้ในปริมาณร้อยละ 0.2-0.3 (w/w) ของส่วนผสม ซึ่งอาจใช้เพียงชนิดเดียวหรือการใช้สารให้ความคงตัวหลายๆ ชนิดผสมกันเพื่อปรับปรุงคุณภาพของไอศกรีมให้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากการใช้สารให้ความคงตัวเหล่านี้ในปริมาณน้อย จึงไม่มีผลต่อคุณค่าทางอาหารและกลิ่นรสของไอศกรีม แต่การใช้สารให้ความคงตัวในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้ไอศกรีมละลายช้า ให้เนื้อสัมผัสที่แข็ง ไอศกรีมแฉะ และมีความเหนียวมาก (Clarke, 2004; Marshall and Arbuckle, 1996)

### 2.11.6 อิมัลซิไฟเออร์

อิมัลซิไฟเออร์เป็นสารที่ช่วยให้ไอศกรีมมีเนื้อสัมผัสเรียบเนียน ทำให้ได้ไอศกรีมที่มีลักษณะแห้ง (dryness) ลดระยะเวลาในการตีให้ขึ้นฟูของไอศกรีม ทำให้ฟองอากาศมีขนาดเล็กกระจายตัวอยู่

ทั่วไปในโครงสร้างของไอศกรีม ควบคุมความไม่คงตัวของไขมัน (fat destabilization) ป้องกันการหดตัว (shrinkage) และช่วยลดอัตราการละลายของไอศกรีม อิมัลซิไฟเออร์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ อิมัลซิไฟเออร์ที่มีอยู่ตามธรรมชาติ เช่น โพรตีนในน้ำนม ไข่แดง และเลซิติน และอิมัลซิไฟเออร์ที่ได้จากการสังเคราะห์ เช่น โมโน/ได กลีเซอไรด์ ซึ่งเป็นอนุพันธ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีของไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) ซึ่งเป็นรูปทั่วไปตามธรรมชาติ หรือการใช้อิมัลซิไฟเออร์ในกลุ่มของพอลิออกซีเอทิลีน (polyoxyethylene) ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของ hexahydric alcohols, glycol และ glycol esters โมเลกุลของอิมัลซิไฟเออร์ประกอบด้วยส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic) และส่วนที่ชอบไขมัน (hydrophobic) โดยจะแทรกตัวอยู่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างน้ำและน้ำมัน ช่วยลดแรงตึงผิวระหว่างวัฏภาคทั้งสองทำให้อิมัลชันมีความคงตัวมากต่อการเปลี่ยนแปลงต่างๆ เพิ่มขึ้น ในขั้นตอนการปั่นไอศกรีมเมื่อส่วนผสมของไอศกรีมได้รับแรงเฉือนเม็ดไขมันบางส่วนถูกทำลายและเริ่มไม่คงตัวเกิดการเกาะกลุ่มกัน (flocculate) เชื่อมต่อกันเป็นสายเคลือบที่ผิวของเซลล์อากาศทำให้เซลล์อากาศมีความคงตัว หากไม่มีอิมัลซิไฟเออร์เม็ดไขมันจะเชื่อมต่อกันได้ยาก เนื่องจากโปรตีนเคซีนซึ่งเป็นโปรตีนหลักในส่วนผสมของไอศกรีมจะถูกดูดซับที่บริเวณพื้นผิวเม็ดไขมันซึ่งจะขัดขวางการเชื่อมต่อกันของเม็ดไขมัน การใช้อิมัลซิไฟเออร์อย่างเหมาะสมจะช่วยให้ไอศกรีมมีคุณภาพดี แต่การใช้อิมัลซิไฟเออร์ในปริมาณมากเกินไปอาจทำให้ไอศกรีมที่ได้มีการละลายที่ช้าลง มีรูปร่างและเนื้อสัมผัสไม่ดี หรืออาจมีกลิ่นรสที่ผิดปกติ (Arbuckle, 1986; Clarke, 2004; Marshall and Arbuckle, 1996)

#### 2.11.7 สารปรุงแต่งกลิ่นรส

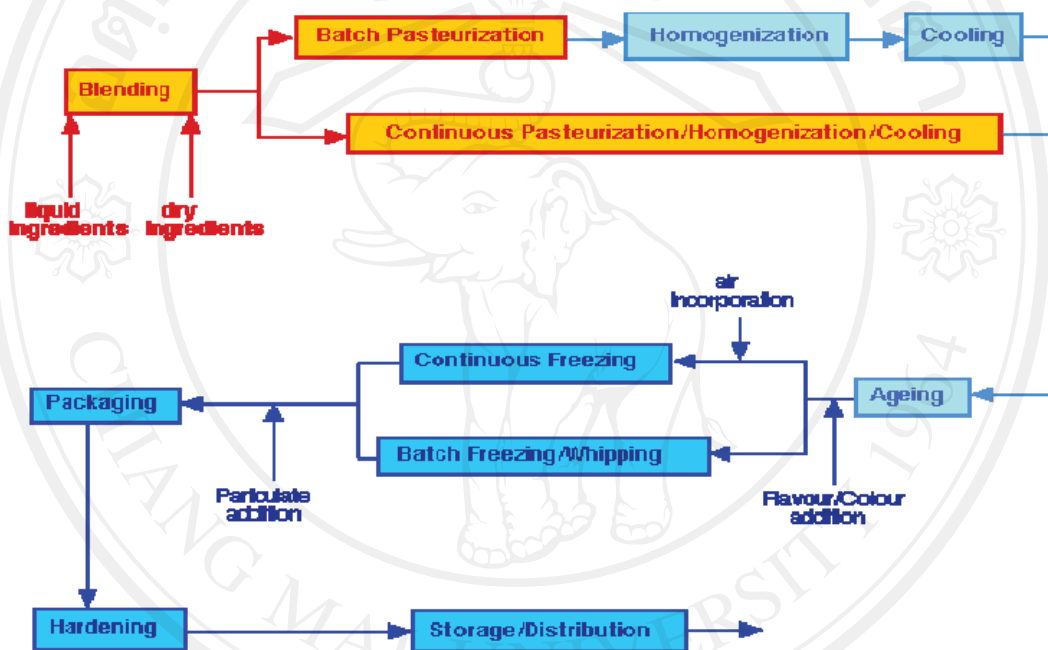
สารปรุงแต่งกลิ่นรสแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลิ่นรสที่ได้จากธรรมชาติ และกลิ่นรสที่ได้จากการสังเคราะห์ โดยกลิ่นรสที่นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์ไอศกรีม คือ กลิ่นวานิลลา ช็อคโกแลต และสตอเบอรี่ ซึ่งกลิ่นวานิลลาเป็นกลิ่นที่ได้รับความนิยมมากที่สุดได้จากการสกัดจากฝักวานิลลา หรืออาจสังเคราะห์ได้จากกลินินโดยกระบวนการทางชีวสังเคราะห์ (biosynthesis) (Clarke, 2004)

#### 2.11.8 สี

สีมีผลต่อการยอมรับของผู้บริโภคในคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การเติมสีนอกจากจะเป็นการเพิ่มสีสันให้กับผลิตภัณฑ์แล้วยังช่วยให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความน่าสนใจ และสามารถบ่งบอกถึงกลิ่นรสของผลิตภัณฑ์ได้ (Clarke, 2004)

## 2.12 ขั้นตอนการผลิตไอศกรีม

การผลิตไอศกรีมสามารถทำได้ทั้งแบบต่อเนื่องและแบบไม่ต่อเนื่องแสดงดังภาพที่ 2.11 โดยมีขั้นตอนหลักในการผลิตดังต่อไปนี้คือ การคำนวณส่วนผสม (mix calculations) การผสมส่วนผสมของไอศกรีม (blending) การพาสเจอร์ไรซ์ (pasteurization) การโฮโมจิไนซ์ (homogenization) การทำให้ส่วนผสมไอศกรีมเย็นลง (cooling) การบ่มส่วนผสม (ageing) การปั่นไอศกรีม (aeration and freezing) การบรรจุ (packaging) การแช่แข็ง (hardening) และการเก็บรักษาไอศกรีม (storage)



ภาพที่ 2.11 กระบวนการผลิตไอศกรีม

ที่มา : Goff, 2010a

### 2.12.1 การคำนวณส่วนผสม

การคำนวณส่วนผสมเป็นขั้นตอนแรกในการผลิตไอศกรีมซึ่งนับว่ามีความสำคัญ เนื่องจากได้สูตรไอศกรีมที่มีความสมดุลและสามารถควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้มีความสม่ำเสมอ กำหนดราคาของไอศกรีมไม่ให้สูงเกินไป และได้ไอศกรีมที่เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด (หทัยทิพย์, 2552; Arbuckle, 1986)

### 2.12.2 การผสมส่วนผสมของไอศกรีม

ส่วนผสมของไอศกรีมจะถูกผสมในภาชนะผสมร่วมกับการให้ความร้อนและการกวนเพื่อให้เกิดการผสมเป็นเนื้อเดียวกัน การใช้ความร้อนและการกวนจะต้องทำอย่างระมัดระวังเพื่อให้เกิดการละลายหรือกระจายตัวของส่วนผสมอย่างมีประสิทธิภาพ และป้องกันส่วนผสมที่ไวต่อความร้อนเกิดการเสียดสภาพ ขั้นตอนการผสมเริ่มจากนำส่วนผสมที่เป็นของเหลว (น้ำ นำนม กลูโคสไซรัป และครีม) เทลงไปในภาชนะผสม จากนั้นให้ความร้อนและเริ่มกวนส่วนผสมให้เข้ากัน จนกระทั่งอุณหภูมิของส่วนผสมประมาณ 50 องศาเซลเซียส จึงเติมส่วนผสมที่เป็นของแข็ง (นมผง น้ำตาลทราย สารให้ความคงตัว และอิมัลซิไฟเออร์) เป็นลำดับต่อไป สารให้ความคงตัวเป็นส่วนผสมของไอศกรีมที่ละลายได้ยากที่สุดและเพื่อป้องกันไม่ให้อิมัลชันจับตัวกันเป็นก้อน ดังนั้นจึงควรผสมสารให้ความคงตัวกับส่วนผสมอื่นที่เป็นของแข็งให้เข้ากัน ก่อนที่จะนำไปผสมรวมกับส่วนผสมที่เป็นของเหลว กวนส่วนผสมทั้งหมดให้เข้ากัน ของผสมทั้งหมดที่ได้เรียกว่าไอศกรีมเหลวหรือไอศกรีมมิกซ์ (ice cream mix) หลังจากผสมส่วนผสมให้เข้ากันแล้วโดยทั่วไปมักจะเพิ่มอุณหภูมิของไอศกรีมเหลวให้เท่ากับหรือสูงกว่า 65 องศาเซลเซียส เพื่อนำไปโฮโมจิไนซ์ในลำดับต่อไป (Arbuckle, 1986; Clarke, 2004; Goff, 2010a)

### 2.12.3 การโฮโมจิไนซ์

การโฮโมจิไนซ์เป็นขั้นตอนในการลดขนาดของเม็ดไขมัน โดยการใช้แรงดันสูง (โดยทั่วไปจะใช้ความดันมากกว่า 150 atm) ทำให้เม็ดไขมันที่มีขนาดใหญ่เกิดการผิครูปและแตกออกเป็นเม็ดไขมันขนาดเล็กซึ่งถือเป็นขั้นแรกของการโฮโมจิไนซ์ บางครั้งการโฮโมจิไนซ์อาจมีขั้นตอนที่สองโดยใช้ความดันในระดับต่ำ (ประมาณ 35 atm) เพื่อลดการเกาะกลุ่มกันของเม็ดไขมันขนาดเล็กที่ได้จากการโฮโมจิไนซ์ในขั้นแรก ภายหลังจากขั้นตอนการโฮโมจิไนซ์โปรตีนในนํานม เช่น เคซีน เคซีนไมเซลล์ และเวย์โปรตีน จะถูกดูดซับที่บริเวณพื้นผิวของเม็ดไขมันได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งความสามารถในการดูดซับของโปรตีนแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน เช่น เคซีนสามารถถูกดูดซับได้เร็วกว่าเวย์โปรตีน เป็นต้น โปรตีนในนํานมสามารถช่วยให้อิมัลชันชนิดนํานมในน้ำมีความคงตัว และต้านการเกิด coalescence เนื่องจากโปรตีนเหล่านี้จะสร้างเยื่อหุ้มบางๆ ที่มีความแข็งแรงและยึดหยุ่นล้อมรอบเม็ดไขมัน โดยปฏิกิริยาระหว่างโปรตีนที่ถูกดูดซับบนเม็ดไขมันจะช่วยให้การชนกันของเม็ดไขมันเกิดได้ยากขึ้น ส่งผลให้ระบบอิมัลชันที่ได้มีความคงตัวซึ่งเรียกความคงตัวประเภทนี้ว่า steric stabilization (Clarke, 2004) การโฮโมจิไนซ์นอกจากจะทำให้เม็ดไขมันมีขนาดเล็กลงซึ่งช่วยให้อิมัลชันมีความคงตัวแล้ว ยังการโฮโมจิไนซ์ยังช่วยให้ไอศกรีมที่ได้มีคุณภาพสม่ำเสมอ ลดระยะเวลาในการบ่มไอศกรีมเหลว เมื่อบ่ม ไอศกรีมสามารถขึ้นฟูได้ได้ง่ายและรวดเร็ว ผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่ได้มีเนื้อสัมผัสนุ่มและเรียบเนียน (Marshall and Arbuckle, 1996)

#### 2.12.4 การพาสเจอร์ไรซ์

ไอศกรีมเหลวที่ได้ต้องผ่านการฆ่าเชื้อในระดับพาสเจอร์ไรซ์เพื่อทำลายเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคที่อุณหภูมิ 69 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที (Low- Temperature Long-Time, LTLT) หรือที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 วินาที (High-Temperature Short-Time, HTST) การพาสเจอร์ไรซ์ที่ควรให้ความร้อนแก่ไอศกรีมเหลวอย่างรวดเร็วเพื่อให้ถึงอุณหภูมิในการฆ่าเชื้อที่กำหนดและคงอุณหภูมินั้นตามระยะเวลาที่เหมาะสม จากนั้นจึงลดอุณหภูมิตั้งแต่อย่างรวดเร็ว การผลิตไอศกรีมในระดับอุตสาหกรรมมักจะใช้การพาสเจอร์ไรซ์แบบ HTST เนื่องจากเป็นวิธีที่ประหยัดเวลา แรงงาน และสถานที่ทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ โดยจะขนส่งไอศกรีมเหลวภายในระบบท่อไปยังเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น (plate heat exchanger) เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนอย่างรวดเร็ว แต่อย่างไรก็ตามควรควบคุมและตรวจสอบอุณหภูมิในการพาสเจอร์ไรซ์ไว้ไม่เกิน 85 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันการเสียดสภาพของโปรตีนในน้ำนมและป้องกันการเกิดกลิ่นรสที่ผิดปกติเช่น การเกิดกลิ่นน้ำนมต้ม (Clarke, 2004; Goff, 2010a)

#### 2.12.5 การทำให้ส่วนผสมเย็นลง

เป็นขั้นตอนต่อเนื่องจากการพาสเจอร์ไรซ์โดยส่วนผสมของไอศกรีมเหลวจะถูกทำให้เย็นลงทันทีที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์และเตรียมส่วนผสมของไอศกรีมเหลวให้พร้อมสำหรับการบ่มในลำดับต่อไป (Arbuckle, 1986)

#### 2.12.6 การบ่มส่วนผสมของไอศกรีม

ในขณะที่บ่มส่วนผสมของไอศกรีมที่อุณหภูมิ 0-4 องศาเซลเซียส จะเกิดกระบวนการที่สำคัญ ดังนี้ คือ (i) โปรตีนที่ถูกดูดซับบนบริเวณพื้นผิวของเม็ดไขมันจะถูกแทนที่ด้วยอิมัลซิไฟเออร์เกิดเป็นเยื่อหุ้มบางๆ ซึ่งมีความแข็งแรงเพียงพอในการทำให้อิมัลชันเกิดความคงตัวในสภาวะหยุดนิ่งภายในภาชนะบรรจุ แต่อิมัลชันที่ได้นี้จะไม่คงตัวเมื่อได้รับแรงเฉือนในขั้นตอนการปั่นไอศกรีม (ii) เม็ดไขมันบางส่วนจะเกิดผลึกไขมันแข็งขึ้นภายในอย่างช้าๆ ซึ่งบางครั้งผลึกของไขมันอาจทะลุผ่านพื้นผิวของเม็ดไขมันได้ ซึ่งการเกิดผลึกของไขมันนี้จะช่วยให้ไอศกรีมที่ได้เกิดโครงสร้างของผลึกไขมันที่ดีและ (iii) โปรตีนและสารให้ความคงตัวเกิดการพองตัว หรือเกิดการละลายอย่างสมบูรณ์ ทำให้ส่วนผสมของไอศกรีมที่ได้มีความหนืดเพิ่มขึ้น ดังนั้นการบ่มส่วนผสมของไอศกรีมจึงต้องใช้ระยะเวลาที่เหมาะสมเพื่อให้เม็ดไขมันสามารถเกิดผลึกของไขมันบางส่วนและเกิดการดูดซับของอิมัลซิไฟเออร์แทนที่โปรตีน ซึ่งโดยทั่วไปในการผลิตไอศกรีมมักบ่มเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 6 ชั่วโมง แต่ระยะเวลาในการบ่ม

ไม่ควรเกิน 3 วัน หากระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มไม่เหมาะสมจะทำให้การเติมอากาศทำได้ยากและฟองอากาศที่เกิดขึ้นในระหว่างการปั่นไอศกรีมจะไม่คงตัว (Arbuckle, 1986; Clarke, 2004)

### 2.12.7 การปั่นไอศกรีม

การปั่นไอศกรีมเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในกระบวนการผลิตไอศกรีมเพราะมีผลต่อคุณภาพและปริมาณผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่ได้ ขั้นตอนการปั่นไอศกรีมทำได้โดยนำส่วนผสมของไอศกรีมที่ผ่านการบ่ม การเติมสีและกลิ่นรสตามต้องการจากนั้นทำให้แข็งตัวอย่างรวดเร็ว พร้อมกับการเติมอากาศตลอดเวลาภายในเครื่องปั่นไอศกรีมที่อุณหภูมิ -5 องศาเซลเซียส เพื่อทำให้น้ำในส่วนผสมกลายเป็นผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดเล็ก ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่มีเนื้อสัมผัสเรียบเนียน และสามารถอุ้มอากาศได้ดี เมื่อสิ้นสุดการปั่นผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่ได้เรียกว่า soft ice cream เนื่องจากไอศกรีมที่ปั่นออกจากเครื่องปั่นไอศกรีมมีอุณหภูมิประมาณ -4 ถึง -5 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิละดับนี้มีปริมาณน้ำที่กลายเป็นผลึกน้ำแข็งคิดเป็นร้อยละ 47 ของปริมาณน้ำทั้งหมดในส่วนผสมเท่านั้น ดังนั้นจึงต้องนำผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่ได้ไปบรรจุในภาชนะบรรจุในรูปแบบต่างๆ และนำไปแช่แข็งในลำดับต่อไป (Arbuckle, 1986; Marshall and Arbuckle, 1996; หทัยทิพย์, 2552)

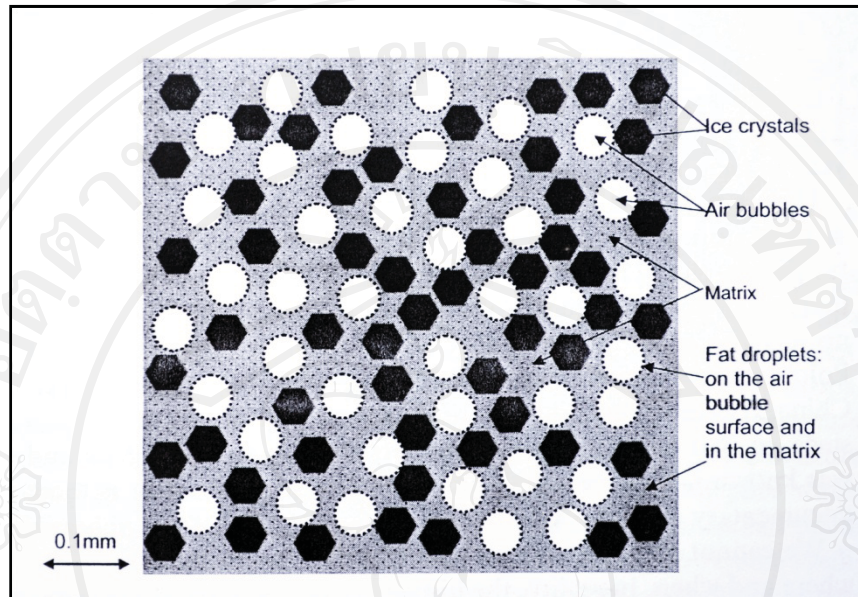
### 2.12.8 การแช่แข็ง

ผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่ได้จะถูกเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ -25 ถึง -18 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำแข็งในไอศกรีมละลาย หากในขั้นตอนการเก็บรักษาหรือการขนส่งอุณหภูมิในการเก็บรักษาไม่คงที่อาจทำให้น้ำแข็งละลายเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและแข็งตัวใหม่อีกครั้งเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง ทำให้ผลึกน้ำแข็งมีขนาดใหญ่ขึ้น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า heat shock (Arbuckle, 1986; Marshall and Arbuckle, 1996)

## 2.13 โครงสร้างของไอศกรีม

ไอศกรีมเป็นระบบอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ (oil in water emulsion) ที่ประกอบด้วยโครงสร้างทางกายภาพเคมี (physicochemical system) ที่มีความซับซ้อน โดยส่วนผสมทั้งหมดในการผลิตไอศกรีมจะช่วยให้เกิดโครงสร้างของไอศกรีมขึ้น โครงสร้างภายในของไอศกรีมประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ ของแข็ง ของเหลว และฟองอากาศ อยู่รวมกัน 3 วัฏภาค เรียกว่า Three-Phase System โดยฟองอากาศที่เกิดขึ้นในระหว่างขั้นตอนการปั่นไอศกรีมจะกระจายตัวอยู่ในวัฏภาคของของเหลว ล้อมรอบด้วยผลึกน้ำแข็ง สารละลายที่มีความหนืดสูงของสารให้ความหวาน พอลิแซ็กคาไรด์ และ

โปรตีนนม ซึ่งเรียกรวมกันว่า matrix (Clarke, 2004; หทัยทิพย์, 2552) โครงสร้างของไอศกรีมที่มีองค์ประกอบข้างต้นแสดงดังภาพที่ 2.12

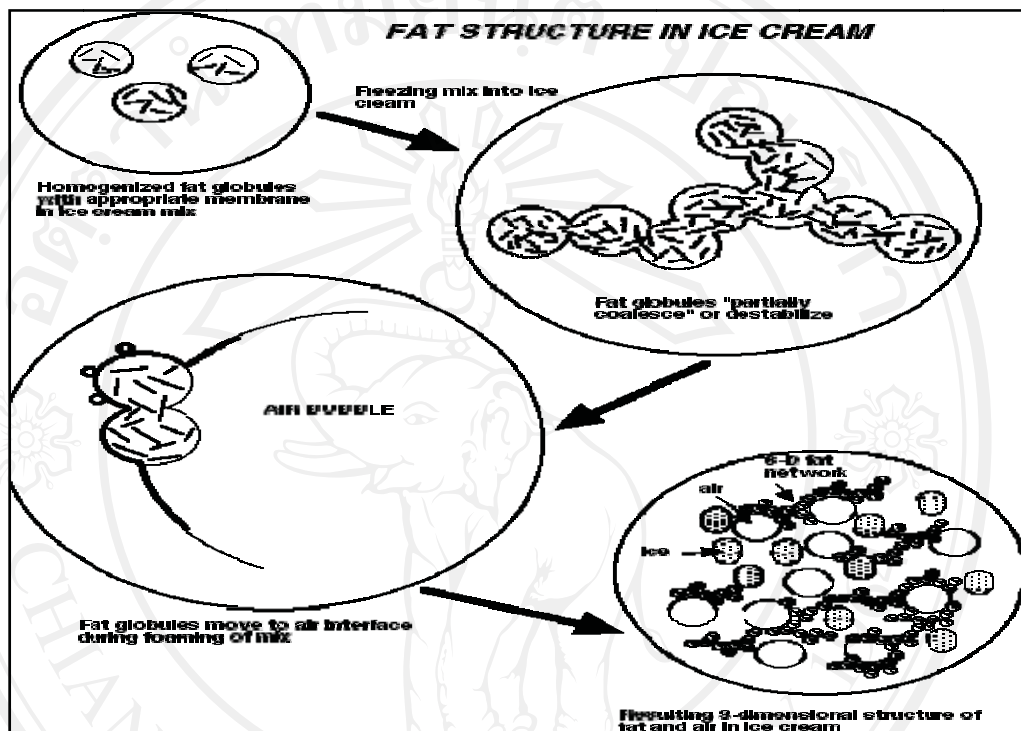


ภาพที่ 2.12 โครงสร้างภายในของไอศกรีม  
ที่มา : Clarke, 2004

การโฮโมจิไนซ์เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิด droplet ของไขมันขนาดเล็กจำนวนมากกระจายตัวอยู่ในวัฏภาคของน้ำ การที่ droplet ของไขมันมีขนาดเล็กส่งผลให้มีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้นและพื้นผิวใหม่ที่เกิดขึ้นนี้พร้อมจะยึดเกาะกับโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวต่างๆ จากส่วนผสมของไอศกรีมเหลว ได้แก่ เคซีน เวย์โปรตีน ฟอสโฟไลปิด ไลโปโปรตีน และอิมัลซิไฟเออร์อื่นๆ เกิดเป็นเยื่อหุ้มบางๆ ที่มีความยืดหยุ่นและช่วยลดแรงตึงผิวให้กับผิวร่วม ทำให้ระบบอิมัลชันที่ได้มีความคงตัวในสภาวะหยุดนิ่ง (static condition) และไม่คงตัวเมื่อได้รับแรงเฉือนในระหว่างการปั่นไอศกรีม ในขั้นตอนการบ่มส่วนผสมของไอศกรีมเหลว บางส่วนภายในเม็ดไขมันจะเกิดผลึกโครงสร้างที่ซับซ้อนของผลึกรูปเข็ม (needle-like crystals) ผลึกไขมันที่เกิดขึ้นนี้จะแทงผนังของเม็ดไขมันทำให้ไขมันเหลวภายในไหลออกมาเชื่อมกับเม็ดไขมันที่อยู่บริเวณใกล้เคียง ทำให้เม็ดไขมันเกาะกันเป็นกลุ่ม (clump) หรืออาจเชื่อมโยงกันเป็นสาย กระบวนการนี้เรียกว่า partial coalescence หรือ de-emulsified หรือ destabilized fat (ภาพที่ 2.13) และในระหว่างการปั่นไอศกรีมเม็ดไขมันที่เชื่อมต่อกันนี้จะเคลื่อนอยู่ที่ผิวของฟองอากาศทำให้ฟองอากาศที่เกิดขึ้นมีความคงตัว ดังนั้น โครงสร้างของไอศกรีมจึงประกอบด้วยฟองอากาศซึ่งมีเม็ดไขมันล้อมรอบและมีผลึกน้ำแข็งกระจายตัวอยู่ในส่วนของเหลวที่



ไม่แข็งตัว โครงสร้างดังกล่าวจะส่งผลต่อคุณภาพที่ดีของผลิตภัณฑ์ไอศกรีมคือ มีความแห้ง ให้ความรู้สึกในปาก (mouth feel) ที่ดี และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในระหว่างการเก็บรักษา (จุฑารัตน์, 2549)



ภาพที่ 2.13 การเกิดโครงสร้างร่างแหของเม็ดไขมัน (Fat globules network) ในไอศกรีม  
ที่มา : Goff, 2010b

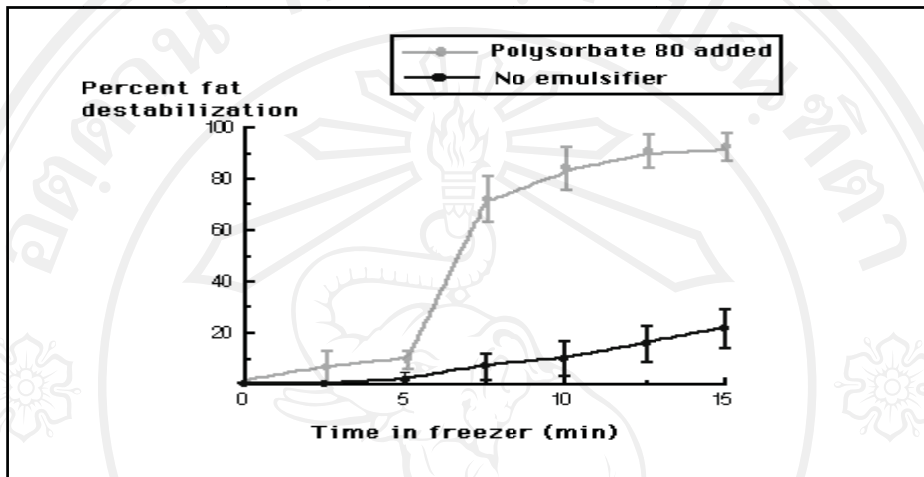
ในระหว่างการปั่นไอศกรีมจะเกิดผลึกน้ำแข็งและฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมากกระจายตัวอยู่ในส่วนผสมที่ไม่แข็งตัว น้ำซึ่งได้จากน้ำนมหรือจากส่วนผสมของไอศกรีมจะถูกแช่แข็งกลายเป็นน้ำแข็งทำให้น้ำตาลที่ละลายอยู่ในวัตถุดิบที่ไม่แข็งตัวมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นในระหว่างขั้นตอนการปั่นไอศกรีมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 30-50 ไมโครเมตร ซึ่งอาจเพิ่มขนาดขึ้นได้ทั้งจากกระบวนการผลิตหรือเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในระหว่างการเก็บรักษา ผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่ประกอบด้วยผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่จะมีเนื้อสัมผัสหยาบซึ่งให้ผลในเชิงลบต่อการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภค การปั่นไอศกรีมจะช่วยให้ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กและแยกออกจากกัน และการปั่นไอศกรีมยังช่วยเติมอากาศให้กับส่วนผสมของไอศกรีม โดยอากาศที่เติมลงไปจะอยู่ในรูปของฟองอากาศขนาดเล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 50-80 ไมโครเมตร ซึ่งโดยทั่วไป

ในผลิตภัณฑ์ไอศกรีมจะประกอบด้วยอากาศร้อยละ 50 ของปริมาตรไอศกรีมทั้งหมด และนอกจากนี้ การเติมอากาศในขั้นตอนการปั่น ไอศกรีมยังช่วยให้ผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่ได้มีคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้านความเรียบเนียนที่ดีและเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค (Goff, 2010c)

การเกิด partial coalescence ของอิมัลชันมีความสำคัญต่อการเกิดโครงสร้างของไอศกรีม โดย droplet ของไขมันทั้งที่เกิด partial coalescence และ droplet ที่แยกจากกัน รวมทั้งโปรตีนที่มีสมบัติเป็นสารลดแรงตึงผิวจะดูดซับบนผิวร่วมระหว่างฟองอากาศกับ matrix ในระหว่างการปั่น ไอศกรีม ทำให้ฟองอากาศที่เกิดขึ้นมีความคงตัวต่อการรวมตัวกัน ดังนั้นในการผลิตไอศกรีมจึงต้องควบคุมปริมาณไขมัน โปรตีน และสารลดแรงตึงผิวให้มีความสมดุล เพราะจะช่วยควบคุมความคงตัวของอิมัลชัน ช่วยให้การเติมอากาศทำได้ง่ายขึ้น และช่วยให้ฟองอากาศที่เกิดขึ้นมีความคงตัว หากอิมัลชันมีปริมาณโปรตีนมากเกินไปจนอาจทำให้อิมัลชันที่ได้มีความคงตัวมากเกินไป ทำให้การเกิด partial coalescence ของไขมันมีไม่เพียงพอ ส่งผลให้ฟองอากาศที่เกิดขึ้นไม่คงตัวและผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่ได้มีเนื้อสัมผัสหยาบและเปื่อย ในทางตรงกันข้ามหากอิมัลชันมีความคงตัวต่ำซึ่งอาจเกิดจากการมีปริมาณสารลดแรงตึงผิวหรือโปรตีนน้อยเกินไป ซึ่งอาจเป็นสาเหตุทำให้ droplet ของไขมันเกิดการรวมตัวกันและมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยผู้บริโภคสามารถตรวจพบได้เมื่อรับประทานไอศกรีมและเรียกคุณภาพทางประสาทสัมผัสลักษณะนี้ว่า buttering ดังนั้น ปริมาณการเกิด partial coalescence ในกระบวนการผลิตไอศกรีมจึงเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อการควบคุมคุณภาพและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตไอศกรีม (Clarke, 2004)

ส่วนผสมในการผลิตไอศกรีมโดยทั่วไปประกอบด้วยโปรตีน (เช่น โปรตีนเคซีน) ในปริมาณที่มากเกินไปต้องการเพื่อให้ระบบอิมัลชันเกิดความคงตัว ทำให้ droplet ของไขมันที่เกิดขึ้นภายหลังขั้นตอนการโฮโมจิไนซ์ถูกล้อมรอบด้วยชั้นโปรตีนที่มีความหนาและอึดตัว ชั้นของโปรตีนดังกล่าวนี้จะขัดขวางการเชื่อมต่อกันของ droplet ซึ่งเป็นขั้นตอนที่สำคัญต่อกระบวนการเกิด partial coalescence ทำให้การผลิตไอศกรีมที่ปราศจากการเติมอิมัลซิไฟเออร์ในส่วนผสมเกิด partial coalescence ในระดับต่ำ (ภาพที่ 2.14) ทั้งนี้เนื่องจากอิมัลซิไฟเออร์เป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกสูงกว่าโปรตีน ซึ่งในระหว่างการปั่นไอศกรีมเหลวอิมัลซิไฟเออร์จะเคลื่อนย้ายจากวัฏภาคซีรัมไปยังบริเวณผิวร่วมของ droplet และเข้าแทนที่โปรตีนที่ดูดซับอยู่ก่อน เกิดเป็นเชือกหุ้มบางๆ ที่ช่วยให้ droplet มีความคงตัวและสามารถเกิด partial coalescence ได้ดีตลอดจนเกิดการพัฒนาโครงสร้างของไอศกรีมในลำดับต่อไป ดังนั้นในการผลิตไอศกรีมจึงจำเป็นต้องเติมอิมัลซิไฟเออร์ในส่วนผสมเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่มีลักษณะเนื้อสัมผัสเป็นที่น่าพึงพอใจ (Goff and Jordan, 1989; Barford *et*

*al.*, 1991; Pelan *et al.*, 1997; Segall and Goff, 2002 ) อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีความเป็นไปได้ในการผลิตไอศกรีมโดยไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ในส่วนผสม ด้วยการใช้โปรตีนบางชนิดที่ทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ลงไปในส่วนผสม เช่น เวย์โปรตีน หรือการปรับปรุงกระบวนการผลิตไอศกรีม เป็นต้น



ภาพที่ 2.14 ผลของอิมัลซิไฟเออร์ต่อการเกิด partial coalescence ในระหว่างการปั่นไอศกรีม ที่มา : Goff and Jordan, 1989

Innocente *et al.* (2002) ศึกษาความสามารถของ protease-peptone ซึ่งเป็น โปรตีนที่แยกได้จากน้ำนมในการทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ในผลิตภัณฑ์ไอศกรีม โดยเปรียบเทียบกับไอศกรีมที่เติมและไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ทางการค้าทั่วไป พบว่าไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ protease-peptone มีค่าร้อยละการขึ้นฟูเท่ากับร้อยละ 44.1 ค่าร้อยละ fat destabilization เท่ากับร้อยละ 61 ค่าความหนืดปรากฏมีค่ามากกว่าไอศกรีมที่เติมอิมัลซิไฟเออร์ทางการค้าทั่วไป นอกจากนี้ยังพบว่าไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ protease-peptone มีความสามารถในการต้านการละลายของไอศกรีมและคุณภาพทางประสาทสัมผัสใกล้เคียงกับ ไอศกรีมที่เติมอิมัลซิไฟเออร์ทางการค้าทั่วไป โดยผลิตภัณฑ์ไอศกรีมไม่ได้รับผลกระทบด้านกลิ่นรสจาก protease-peptone

Ruger *et al.* (2002) ศึกษาผลของการไฮโดรจิไนซ์สองรอบร่วมกับการเติมเวย์โปรตีนเข้มข้นต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของไอศกรีม พบว่าผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่ผ่านการไฮโดรจิไนซ์สองรอบร่วมกับการเติมสารให้ความคงตัวทางการค้าและเวย์โปรตีนเข้มข้นมีค่าร้อยละการขึ้นฟูไม่ต่าง ( $p > 0.05$ ) กับไอศกรีมที่ผ่านการไฮโดรจิไนซ์หนึ่งรอบร่วมกับการเติมอิมัลซิไฟเออร์หรือ ไอศกรีมที่ผ่านการ

ไฮโมจิโนซ์หนึ่งรอบร่วมกับการเติมสารให้ความคงตัวทางการค้า (ชุดควบคุม) โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ ร้อยละ 96.6, 90.6 และ 90.6 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่ผ่านการไฮโมจิโนซ์ สองรอบร่วมกับการเติมสารให้ความคงตัวทางการค้าและเวย์โปรตีนเข้มข้นมีขนาดของผลึกน้ำแข็งเล็ก ที่สุดเมื่อเทียบกับสิ่งทดลอง (treatment) อื่นที่ระยะเวลาหลังจากกระบวนการผลิต 10 วัน และ 18 สัปดาห์ โดยมีคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้านความเข้มข้นรสวานิลลา การยอมรับรวมด้านกลิ่นรส ความเป็นผลึกน้ำแข็ง ความเย็น ความเป็นครีม และการยอมรับลักษณะเนื้อสัมผัสโดยรวม ไม่แตกต่าง ( $p>0.05$ ) กับ ไอศกรีมชุดควบคุม (control)

## 2.14 การผลิตไอศกรีมโดยกระบวนการสองวัฏภาค

การผลิตไอศกรีมโดยวิธีทั่วไปนั้นส่วนผสมของไอศกรีมทั้งหมด ได้แก่ แหล่งของโปรตีน แหล่งของไขมัน สารให้ความหวาน สารให้ความคงตัว อิมัลซิไฟเออร์ และน้ำ จะผ่านขั้นตอนการผสม การไฮโมจิโนซ์ การพาสเจอร์ไรซ์ การบ่ม และการปั่นไอศกรีมไปพร้อมๆ กัน แต่สำหรับการผลิต ไอศกรีมโดยกระบวนการสองวัฏภาคซึ่งเป็นแนวคิดหนึ่งในการผลิตไอศกรีมโดยไม่ใช้อิมัลซิไฟเออร์ สังเคราะห์ร่วมในส่วนผสม จำเป็นต้องปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตที่แตกต่างจากการผลิตไอศกรีมโดย วิธีทั่วไป โดยการเตรียมส่วนผสมของไอศกรีมแยกออกเป็น 2 ส่วน คือ วัฏภาคของอิมัลชัน (ประกอบด้วยไขมัน น้ำ และโปรตีนที่ทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์) และวัฏภาคของสารละลาย (ประกอบด้วยแหล่งโปรตีนจากนม สารให้ความหวาน สารให้ความคงตัว และน้ำ) โดยวัฏภาคของ อิมัลชันจะผ่านขั้นตอนการไฮโมจิโนซ์ การพาสเจอร์ไรซ์ และการบ่ม จากนั้นจึงนำมารวมกับวัฏภาคของ สารละลายที่ผ่านขั้นตอนการพาสเจอร์ไรซ์ และการบ่ม ในขั้นตอนก่อนการปั่นไอศกรีมเพื่อป้องกันการ ดูดซับของโปรตีนเคซีนซึ่งเป็นโปรตีนหลักในส่วนผสมของไอศกรีมบนผิว droplet ของไขมันภายหลัง ขั้นตอนการไฮโมจิโนซ์ ซึ่งโปรตีนเคซีนนี้จะขัดขวางการเกิด partial coalescence ของไขมันใน ระหว่างการปั่นไอศกรีมทำให้ผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่ได้มีคุณภาพลดลง (Segall and Goff, 2002)

Segall and Goff (1999) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของโปรตีนนมได้แก่ skim milk powder (SMP) (ร้อยละ 0.2-0.7 w/w) whey protein hydrolysate (WPH) (ร้อยละ 1.6-2.1 w/w) whey protein isolate (WPI) (ร้อยละ 0.2-0.7 w/w) และ sodium caseinate (ร้อยละ 0.2-0.7 w/w) ต่อความคงตัวของอิมัลชันทั้งในสถานะหยุดนิ่งและภายใต้แรงเฉือนโดยใช้อิมัลชันของน้ำมัน เนยร้อยละ 25 (w/w) เป็นตัวแทนในการศึกษา พบว่า อิมัลชันที่เติม SMP และ WPH ต้องใช้ใน ปริมาณความเข้มข้นของโปรตีนค่อนข้างสูงเพื่อให้อิมัลชันเกิดความคงตัวในสถานะหยุดนิ่งและใน

ขณะเดียวกันก็ทำให้อิมัลชันที่ได้มีความคงตัวมากเกินไปที่จะเกิด partial coalescence เมื่อได้รับแรงเหวี่ยง สำหรับอิมัลชันที่เติม WPI และ sodium caseinate สามารถคงตัวได้ในสภาวะหยุดนิ่งเมื่อใช้ความเข้มข้นของโปรตีนตั้งแต่ร้อยละ 0.3 ขึ้นไปและอิมัลชันสามารถเกิด partial coalescence ได้ดี แต่เมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของโปรตีนการเกิด partial coalescence ของอิมัลชันจะมีปริมาณลดลง โดยอิมัลชันที่เติม WPI จะมีปริมาณการเกิด partial coalescence สูงกว่าอิมัลชันที่เติม sodium caseinate ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน ดังนั้นการเติม WPI ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.3 จึงเหมาะสมที่สุดเพื่อนำไปใช้ในการผลิตไอศกรีมโดยไม่ใช้อิมัลซิไฟเออร์สังเคราะห์ในลำดับต่อไป

Segall and Goff (2002) เปรียบเทียบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาคซึ่งเติมเวย์โปรตีนไอโซเลตความเข้มข้นร้อยละ 0.3 ในวัฏภาคของอิมัลชันกับ ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมและไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์สังเคราะห์ พบว่า ผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาคสามารถเกิด partial coalescence ได้ดี มีอัตราการละลายไม่แตกต่าง ( $p > 0.05$ ) กับ ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปและเติมอิมัลซิไฟเออร์สังเคราะห์ มีค่าร้อยละการขึ้นฟูต่ำกว่า ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปและเติมอิมัลซิไฟเออร์สังเคราะห์เล็กน้อย โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 72 และ 90 ตามลำดับ ส่วนผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปและไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์สังเคราะห์มีอัตราการละลายสูงสุดและมีค่าร้อยละการขึ้นฟูต่ำที่สุดซึ่งเป็นผลมาจากผลิตภัณฑ์ไอศกรีมดังกล่าวเกิด partial coalescence ในระดับต่ำกว่าไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาค และไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปและเติมอิมัลซิไฟเออร์ ตามลำดับ