

ผลของชนิดของโปรตีนนมและอีมีลซีฟไอเออร์ต่อความคงตัวและคุณภาพของ
ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมและไอศกรีม

นางสาวธิดาวัลย์ โพธิ์จิตร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2551

**THE EFFECTS OF MILK PROTEINS AND
EMULSIFIERS ON STABILITY AND
QUALITY OF ICE CREAM MIX
AND ICE CREAM**

Tidawan Pojit

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Science in Food Technology
Suranaree University of Technology
Academic Year 2008**

ผลของชนิดของโปรตีนนมและอีมีลชีฟเฟอร์ต่อความคงตัวและคุณภาพของ
ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมและไอศกรีม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยะวรรณ กาสลัก)
ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิวัฒน์ ไทยอุดม)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกพันธ์ แก้วมณีชัย)
กรรมการ

(อาจารย์ ดร.รัชฎาพร อุ่นศิริไธย)
กรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ สัตยธรรม)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุเวทย์ นิงสานนท์)
คณบดีสำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร

ธิดาวลัย โพธิ์จิตร : ผลของชนิดของโปรตีนนมและอิมัลซิไฟเออร์ต่อความคงตัวและคุณภาพของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมและไอศกรีม (THE EFFECTS OF MILK PROTEINS AND EMULSIFIERS ON STABILITY AND QUALITY OF ICE CREAM MIX AND ICE CREAM) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริวัฒน์ ไทยอุดม, 117 หน้า.

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ 1) ศึกษาผลของชนิดและปริมาณอิมัลซิไฟเออร์ที่มีต่อความคงตัวของระบบอิมัลชันต้นแบบโดยแปรชนิดอิมัลซิไฟเออร์ (Tween 60, Tween 80, glycerol monostearate (GMS) และ glycerol monooleate (GMO)) และปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์ (ร้อยละ 0, 0.04, 0.08 และ 1 โดยน้ำหนัก) 2) ศึกษาผลของชนิดอิมัลซิไฟเออร์ (ชนิดเดียวกับที่ศึกษาในระบบอิมัลชันที่ความเข้มข้นร้อยละ 0 และ 0.04 โดยน้ำหนัก) และโปรตีนนม (skim milk powder (SMP), sodium caseinate (SC) และ whey protein concentrate (WPC) ที่ความเข้มข้น 2.9 กรัมโปรตีนต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ที่มีต่อความคงตัวและคุณภาพของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมและไอศกรีม และ 3) ศึกษาผลของสภาวะการมาเชื้อด้วยการพาสเจอร์ไรส์ (69 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที และ 75 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที) และระยะเวลาการบ่มส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ 4 องศาเซลเซียส (0, 2, 4 และ 24 ชั่วโมง) ต่อความคงตัวและคุณภาพของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมและไอศกรีม ทั้งนี้ใช้ค่าขนาดอนุภาคเม็ดไขมัน ความหนืดของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม ค่าการสูญเสียความคงตัวของอนุภาคเม็ดไขมัน ปริมาณการขึ้นโฟมของไอศกรีม อัตราการละลายของไอศกรีมและเนื้อสัมผัสของไอศกรีมเป็นดัชนีชี้วัดความคงตัวและคุณภาพของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมและไอศกรีม ส่วนการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชัน, ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมและไอศกรีมใช้เทคนิค optical microscopy และ transmission electron microscopy (TEM) และการศึกษานิตและปริมาณโปรตีนที่ดูดซับที่พื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันใช้เทคนิค Lowry method และ sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel (SDS-PAGE)

อิมัลชันที่เติมอิมัลซิไฟเออร์เข้มข้นร้อยละ 0 หรือ 1 โดยน้ำหนักของอิมัลซิไฟเออร์ทุกชนิดพบว่ามีความคงตัวสูงกว่าอิมัลชันที่เติมอิมัลซิไฟเออร์เข้มข้นร้อยละ 0.04 หรือ 0.08 โดยน้ำหนักที่สภาวะ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง อย่างไรก็ตามขนาดอนุภาคเม็ดไขมันของอิมัลชันที่เติมอิมัลซิไฟเออร์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักมีขนาดเล็กกว่าอิมัลชันที่ไม่มีการเติมอิมัลซิไฟเออร์ ($p \leq 0.05$) ขนาดอนุภาคเม็ดไขมันของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SMP หรือ SC และอิมัลซิไฟเออร์มีขนาดเล็กกว่าตัวอย่างที่ไม่มีการเติมอิมัลซิไฟเออร์ (ตัวอย่างควบคุม) ($p \leq 0.05$) อย่างไรก็ตามขนาดอนุภาคเม็ดไขมันของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ WPC และอิมัลซิไฟเออร์มีขนาดไม่แตกต่างจากตัวอย่างควบคุม ($p > 0.05$) อิมัลซิไฟเออร์ทุกชนิดไม่มีผลต่อความหนืด

ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม ค่าการสูญเสียความคงตัวของอนุภาคเม็ดไขมันของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SMP+Tween 60, SC+Tween 80 หรือ WPC+Tween 60 มีค่าสูงที่สุด ($p \leq 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับผลของโครงสร้างระดับจุลภาคด้วย TEM อิมัลซิไฟเออร์ไม่มีผลต่อปริมาณโปรตีนที่ดูดซับอยู่บริเวณผิวของอนุภาคเม็ดไขมัน อย่างไรก็ตามโปรตีนจาก SMP สามารถดูดซับอยู่ที่พื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันได้มากกว่าโปรตีนจาก SC และ WPC ตามลำดับ

ไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SC ให้ค่าการขึ้นโฟมมากที่สุด แต่ให้ค่าการสูญเสียความคงตัวของอนุภาคเม็ดไขมันต่ำสุดส่งผลให้มีความต้านทานการละลายต่ำ ส่วนค่าการขึ้นโฟม ค่าการสูญเสียความคงตัวของอนุภาคเม็ดไขมันและความต้านทานต่อการละลายของไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SMP หรือ WPC ไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) อิมัลซิไฟเออร์ที่ใช้ในการผลิตไอศกรีมส่วนใหญ่ไม่มีผลต่อค่าการขึ้นโฟมในตัวอย่างที่ใช้โปรตีนชนิดเดียวกัน อย่างไรก็ตามไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SMP+Tween 60 หรือ WPC+GMO ช่วยเพิ่มค่าการสูญเสียความคงตัวของอนุภาคเม็ดไขมันและความต้านทานต่อการละลาย

ไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SMP+Tween 60 หรือ SC+Tween 80 ที่ผ่านการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 69 องศาเซลเซียส นาน 30 นาทีและบ่มที่ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ให้ค่าการสูญเสียความคงตัวของอนุภาคเม็ดไขมันและความต้านทานต่อการละลายที่สูงซึ่งบ่งบอกถึงคุณภาพที่ดีของไอศกรีมเช่นเดียวกับไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ WPC+GMO ที่ผ่านทำการฆ่าเชื้อที่ 75 องศาเซลเซียส นาน 15 นาทีและบ่มที่ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ดังนั้นคุณภาพของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมและไอศกรีมขึ้นอยู่กับชนิดของโปรตีนนมและอิมัลซิไฟเออร์ ตลอดจนสภาวะในการฆ่าเชื้อด้วยการพาสเจอร์ไรซ์ในกระบวนการผลิตและระยะเวลาในการบ่มส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม

TIDAWAN POJIT : THE EFFECTS OF MILK PROTEINS AND
EMULSIFIERS ON STABILITY AND QUALITY OF ICE CREAM MIX
AND ICE CREAM. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. SIWATT
THAIUDOM, Ph.D., 117 PP.

EMULSIFIERS/MILK PROTEINS/OVERRUN/FAT DESTABILIZATION/
MELTDOWN RESISTANCE

Objectives of this study were 1) to investigate the effects of types (Tween 60, Tween 80, glycerol monostearate (GMS) and glycerol monooleate (GMO)) and concentrations (0, 0.04, 0.08 and 1% w/w) of emulsifiers on stability of O/W emulsion, 2) to demonstrate the effects of those emulsifiers (0 and 0.04% w/w) and milk proteins including skim milk powder (SMP), sodium caseinate (SC) and whey protein concentrate (WPC) at a constant concentration of 2.9 g protein/ 100 g sample on stability and quality of both ice cream mix and ice cream, and 3) to determine the effects of pasteurization conditions (69°C/30 min and 75°C/15 min) and aging times (0, 2, 4 and 24 h) at 4°C on stability and quality of ice cream mix and ice cream. Fat particle size, viscosity, fat destabilization, overrun, meltdown resistance and textural properties were used as parameters indicating the stability and quality of emulsion, ice cream mix and ice cream. Microstructures of emulsion, ice cream mix and ice cream were also investigated using optical microscopy and transmission electron microscopy (TEM). Surface-covering proteins on the fat droplet were measured using Lowry method and their patterns were analyzed by sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE).

Emulsions containing 0 or 1% (w/w), compared with 0.04 or 0.08% (w/w), of all emulsifiers showed a better emulsion stability at 4°C for 24 h. However, fat droplet size of emulsions containing 1% (w/w) emulsifier was smaller than that of emulsion without emulsifier ($p \leq 0.05$). Fat particle size of ice cream mix containing SMP or SC with emulsifier was smaller than that of ice cream mix without emulsifier (control) ($p \leq 0.05$). However, fat particle size of ice cream mix containing WPC with emulsifier was not significantly different from that of control ($p > 0.05$). All emulsifiers did not affect viscosity of ice cream mix. Ice cream mixes prepared by adding SMP+Tween 60, SC+Tween 80, or WPC+Tween 60 showed the highest fat destabilization ($p \leq 0.05$). The results corresponded well with the results from TEM analysis. Emulsifiers did not affect protein surface coverage, however, SMP could be found on the surface of fat globules more than SC and WPC, respectively.

Ice cream containing SC exhibited the highest overrun with the lowest fat destabilization, resulting in less meltdown resistance. Overrun, fat destabilization and meltdown resistance of ice creams containing SMP and containing WPC were not significantly different ($p > 0.05$). Emulsifiers used in this research mostly did not affect the overrun of the samples containing the same type of milk protein. However, ice cream containing SMP+Tween 60 or WPC+GMO highly increased the fat destabilization and meltdown resistance.

High fat destabilization and meltdown resistance that indicated the quality of ice cream were found in SMP+Tween 60 and SC+Tween 80 ice cream, pasteurized at 69°C/30 min and aged at 4°C/24 h. Also, these were found in WPC+GMO ice cream which was pasteurized at 75°C/15 min and aged at 4°C for 24 h.

Therefore, the quality of both ice cream mix and ice cream depends on type and concentration of milk proteins and emulsifiers, pasteurization condition, and aging time.

School of Food Technology

Academic Year 2008

Student's Signature_____

Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้เงินสนับสนุน และอุปกรณ์เครื่องมือในการวิจัย ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริวัฒน์ ไทยอุดม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนะ ช่วยเหลือในการศึกษา งานวิจัยด้วยดีตลอดมา รวมถึงให้คำแนะนำในการเขียนและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จ สมบูรณ์ กราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิยะวรรณ กาสลัก ประธานกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกพันธ์ แก้วมณีชัย และอาจารย์ ดร.รัชฎาพร อุ่นศิริไธย์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น กราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้ด้านวิชาการตลอดระยะเวลาที่ศึกษาอยู่ที่ มทส.

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือ 3 และศูนย์เครื่องมือ 1 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่ตลอดเวลาให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกแก่ผู้วิจัยด้วยดีตลอดมา ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ที่ร่วมเรียนระดับบัณฑิตศึกษา และผู้ช่วยวิจัย สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหารที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษาและคำแนะนำตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและทุกคนในครอบครัวที่ให้การเลี้ยงดู อบรม ให้กำลังใจและส่งเสริมการศึกษาอย่างดีตลอดมาในอดีต จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

ธิดาวลัย โพธิ์จิตร

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฒ
บทที่	

1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	4
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	5
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	5
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
2. ปรัชสน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 ไอศกรีม.....	7
2.1.1 กระบวนการผลิตไอศกรีม.....	10
2.1.2 โครงสร้างทางกายภาพของไอศกรีม.....	16
2.2 ปัจจัยทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีที่มีผลต่อลักษณะที่ดีของไอศกรีม.....	17
2.2.1 ปัจจัยทางด้านการผลิต.....	17
2.2.2 ปัจจัยทางด้านองค์ประกอบทางเคมี.....	21
2.3 ระบบอิมัลชัน.....	23
2.4 สารอิมัลซิไฟเออร์.....	25
2.5 ระบบอิมัลชันของไอศกรีม.....	29

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3. วัสดุและวิธีการ.....	33
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	33
3.2 วัสดุคืบ.....	34
3.3 สูตรส่วนผสมและการเตรียมตัวอย่าง.....	34
3.4 การศึกษาและการทดสอบคุณลักษณะต่าง ๆ.....	36
3.5 การวิเคราะห์ทางสถิติ.....	42
3.6 สถานที่ทำการทดลองและเก็บข้อมูล.....	42
4. ผลการทดลองและการวิจารณ์.....	43
4.1 ผลของชนิดและปริมาณของอีพอกซีไฟเออร์ต่อความคงตัวของระบบอีพอกซี ต้นแบบที่มีไขมันเนยเป็นส่วนประกอบ.....	43
4.2 ผลของชนิดและปริมาณของอีพอกซีไฟเออร์และชนิดของโปรตีนนมต่อ ความคงตัวของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม.....	50
4.3 ผลของชนิดและปริมาณของอีพอกซีไฟเออร์และชนิดของโปรตีนนมต่อ ความคงตัวและคุณภาพของไอศกรีม.....	64
4.4 ผลของสภาวะในการฆ่าเชื้อและระยะเวลาการบ่มต่อความคงตัว และคุณภาพของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมและไอศกรีม.....	71
4.4.1 ผลของสภาวะในการฆ่าเชื้อและระยะเวลาการบ่มต่อความคงตัว ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม.....	71
4.4.2 ผลของสภาวะในการฆ่าเชื้อและระยะเวลาการบ่มต่อความคงตัว และคุณภาพของไอศกรีม.....	79
5. สรุปและข้อเสนอแนะ.....	85
5.1 บทสรุป.....	85
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	85
รายการอ้างอิง.....	87
ภาคผนวก.....	96
ภาคผนวก ก.....	97
ภาคผนวก ข.....	100

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ก.....	104
ประวัติผู้เขียน.....	117

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 เวลาและอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่ใช้ในกระบวนการพาสเจอร์ไรเซชัน ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม.....	11
2.2 ความดันโดยประมาณที่ใช้ในกระบวนการโฮโมจีไนเซชันของ ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีปริมาณไขมันที่แตกต่างกัน.....	13
2.3 ความสามารถในการเกิดอิมัลชัน (Emulsifiability) เปรียบเทียบกับ ความสามารถในการละลายตามกฎของ Bancroft.....	26
2.4 ค่า Hydrophilic-lipophilic balance (HLB) ของอิมัลซิไฟเออร์ ที่นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์ไอศกรีม.....	27
4.1 คุณลักษณะทางกายภาพของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ทำจาก โปรตีนและอิมัลซิไฟเออร์ชนิดต่างๆ.....	52
4.2 ปริมาณโปรตีนของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ทำจากโปรตีนนมและ อิมัลซิไฟเออร์ชนิดต่าง ๆ ในส่วนที่เป็นส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม ส่วนของชีร์และชั้นครีม.....	55
4.3 ชนิดและปริมาณโปรตีนที่ดูดซับบนอนุภาคเม็ดไขมันของส่วนผสม พร้อมทำไอศกรีมที่ทำจากโปรตีนนมและอิมัลซิไฟเออร์ชนิดต่าง ๆ.....	56
4.4 ขนาดอนุภาคเม็ดไขมัน (d _{3,2}) ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ทำจากโปรตีน และอิมัลซิไฟเออร์ชนิดต่าง ๆ ที่สภาวะการฆ่าเชื้อและระยะเวลาการบ่มที่ต่างกัน.....	73
4.5 ความหนืดของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ทำจากโปรตีนและอิมัลซิไฟเออร์ ชนิดต่าง ๆ ที่สภาวะการฆ่าเชื้อและระยะเวลาการบ่มที่ต่างกัน.....	74
4.6 คุณลักษณะทางกายภาพของไอศกรีมที่ทำจากโปรตีนและอิมัลซิไฟเออร์ ชนิดต่าง ๆ ที่สภาวะการฆ่าเชื้อและระยะเวลาการบ่มที่ต่างกัน.....	80
4.7 ลักษณะเนื้อสัมผัสของไอศกรีมที่ทำจากโปรตีนและอิมัลซิไฟเออร์ชนิดต่าง ๆ ที่สภาวะการฆ่าเชื้อและระยะเวลาการบ่มที่ต่างกัน.....	84
ข.1 ขนาดอนุภาคเม็ดไขมันและความหนืดของระบบอิมัลชันที่ประกอบด้วย ชนิดและปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์ที่ต่างกัน.....	101

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.2	ปริมาณโปรตีนของตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ทำจากโปรตีนนมและอิมัลซิไฟเออร์ชนิดต่าง ๆ ในส่วนที่เป็นส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมชีร์มและชั้นครีม (หลังปั๊ม 4°C/24 h).....103
ค.1	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของขนาดอนุภาคเม็ดไขมันด้วยวิธี Factorial in CRD ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม SMP (Control) ที่สภาวะการฆ่าเชื้อและระยะเวลาการปั๊มที่ต่างกัน.....105
ค.2	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของขนาดอนุภาคเม็ดไขมันด้วยวิธี Factorial in CRD ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม SMP+Tween 60 ที่สภาวะการฆ่าเชื้อและระยะเวลาการปั๊มที่ต่างกัน.....106
ค.3	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของขนาดอนุภาคเม็ดไขมันด้วยวิธี Factorial in CRD ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม SC (Control) ที่สภาวะการฆ่าเชื้อและระยะเวลาการปั๊มที่ต่างกัน.....107
ค.4	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของขนาดอนุภาคเม็ดไขมันด้วยวิธี Factorial in CRD ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม SC+Tween 80 ที่สภาวะการฆ่าเชื้อและระยะเวลาการปั๊มที่ต่างกัน.....108
ค.5	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของขนาดอนุภาคเม็ดไขมันด้วยวิธี Factorial in CRD ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม WPC (Control) ที่สภาวะการฆ่าเชื้อและระยะเวลาการปั๊มที่ต่างกัน.....109
ค.6	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของขนาดอนุภาคเม็ดไขมันด้วยวิธี Factorial in CRD ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม WPC+GMO ที่สภาวะการฆ่าเชื้อและระยะเวลาการปั๊มที่ต่างกัน.....110
ค.7	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของความหนืดด้วยวิธี Factorial in CRD ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม SMP (Control) ที่สภาวะการฆ่าเชื้อและระยะเวลาการปั๊มที่ต่างกัน.....111
ค.8	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของความหนืดด้วยวิธี Factorial in CRD ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม SMP+Tween 60 ที่สภาวะการฆ่าเชื้อและระยะเวลาการปั๊มที่ต่างกัน.....112

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค.9 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของความหนืดด้วยวิธี Factorial in CRD ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม SC (Control) ที่สภาวะการฆ่าเชื้อและ ระยะเวลาการบ่มที่ต่างกัน.....	113
ค.10 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของความหนืดด้วยวิธี Factorial in CRD ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม SC+Tween 80 ที่สภาวะการฆ่าเชื้อและ ระยะเวลาการบ่มที่ต่างกัน.....	114
ค.11 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของความหนืดด้วยวิธี Factorial in CRD ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม WPC (Control) ที่สภาวะการฆ่าเชื้อและ ระยะเวลาการบ่มที่ต่างกัน.....	115
ค.12 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของความหนืดด้วยวิธี Factorial in CRD ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม WPC+GMO ที่สภาวะการฆ่าเชื้อและ ระยะเวลาการบ่มที่ต่างกัน.....	116

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	กระบวนการผลิตไอศกรีม.....	16
2.2	โครงสร้างทางกายภาพของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมและ ไอศกรีม.....	17
2.3	โครงสร้างของอิมัลซิไฟเออร์.....	25
2.4	การดูดซับของอิมัลซิไฟเออร์บริเวณรอยต่อของน้ำและน้ำมัน.....	25
2.5	โครงสร้างทางเคมีของ Tween 60.....	27
2.6	โครงสร้างทางเคมีของ Tween 80.....	28
2.7	โครงสร้างทางเคมีของกลีเซอรอล โมโนสเตียเรท (GMS).....	29
2.8	โครงสร้างทางเคมีของกลีเซอรอล โมโนโอเลอเทท (GMO).....	29
4.1	ขนาดอนุภาคเม็ดไขมัน (d 3,2) ของตัวอย่างอิมัลชันที่ทำด้วย ชนิดและปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์ที่แตกต่างกัน (ก่อนและหลังบ่ม).....	45
4.2	การแยกชั้นระหว่างน้ำมันและน้ำ (Creaming) ของตัวอย่างอิมัลชัน ที่มีไขมันเนยเป็นส่วนประกอบ (หลังการบ่ม).....	46
4.3	ภาพถ่ายอนุภาคเม็ดไขมันในตัวอย่างอิมัลชันที่มีไขมันเนยเป็นส่วนประกอบ ที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ (หลังการบ่ม).....	48
4.4	ความหนืดของของระบบอิมัลชันที่ทำจากชนิดและปริมาณของ อิมัลซิไฟเออร์ที่แตกต่างกัน (ก่อนและหลังบ่ม 4°C/24 h).....	49
4.5	การเกิดเป็นผลึกของระบบอิมัลชันที่มีอิมัลซิไฟเออร์ชนิด (1% w/w) GMO.....	50
4.6	ค่า Fat destabilization ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม SMP, SC หรือ WPC และอิมัลซิไฟเออร์ชนิดต่าง ๆ.....	59
4.7	ภาพโครงสร้างระดับจุลภาคที่ส่องด้วยวิธี TEM ของส่วนผสม ทำไอศกรีม SMP และอิมัลซิไฟเออร์ชนิดต่าง ๆ.....	61
4.8	ภาพโครงสร้างระดับจุลภาคที่ส่องด้วยวิธี TEM ของส่วนผสม ทำไอศกรีม SC และอิมัลซิไฟเออร์ชนิดต่าง ๆ.....	62
4.9	ภาพโครงสร้างระดับจุลภาคที่ส่องด้วยวิธี TEM ของส่วนผสม ทำไอศกรีม WPC และอิมัลซิไฟเออร์ชนิดต่าง ๆ.....	63

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.10	ค่า Fat destabilization ของไอศกรีม SMP, SC หรือ WPC และอิมัลซิไฟเออร์ชนิดต่าง ๆ.....65
4.11	ค่าการขึ้นฟองของไอศกรีม SMP, SC หรือ WPC และอิมัลซิไฟเออร์ชนิดต่าง ๆ.....67
4.12	อัตราการละลายของไอศกรีม SMP, SC หรือ WPC และอิมัลซิไฟเออร์ชนิดต่าง ๆ.....69
4.13	การกระจายตัวของเซลล์อากาศที่ได้มาจากกล้องจุลทรรศน์ของไอศกรีม SMP, SC หรือ WPC และอิมัลซิไฟเออร์ชนิดต่าง ๆ.....70
4.14	ค่า Fat destabilization ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม SMP และอิมัลซิไฟเออร์ชนิดต่าง ๆ ที่สภาวะการฆ่าเชื้อและระยะเวลาการบ่มที่ต่างกัน.....76
4.15	ค่า Fat destabilization ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม SC และอิมัลซิไฟเออร์ชนิดต่าง ๆ ที่สภาวะการฆ่าเชื้อและระยะเวลาการบ่มที่ต่างกัน.....77
4.16	ค่า Fat destabilization ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม WPC และอิมัลซิไฟเออร์ชนิดต่าง ๆ ที่สภาวะการฆ่าเชื้อและระยะเวลาการบ่มที่ต่างกัน.....78
4.17	อัตราการละลายของไอศกรีมที่ทำจากโปรตีนและอิมัลซิไฟเออร์ชนิดต่าง ๆ ที่สภาวะการฆ่าเชื้อและระยะเวลาการบ่มที่ต่างกัน.....82
ก.1	ส่วนประกอบของ SMP ที่ได้จากเทคนิค SDS-PAGE.....98
ก.2	ส่วนประกอบของ SC ที่ได้จากเทคนิค SDS-PAGE.....98
ก.3	ส่วนประกอบของ WPC ที่ได้จากเทคนิค SDS-PAGE.....99
ข.1	การกระจายตัวของขนาดอนุภาคเม็ดไขมันที่ได้จากเครื่อง Laser particle size analyzer ของตัวอย่างอิมัลชันที่เติม 1% (w/w) GMO (ก่อนบ่ม).....102
ข.2	การกระจายตัวของขนาดอนุภาคเม็ดไขมันที่ได้จากเครื่อง Laser particle size analyzer ของตัวอย่างอิมัลชันที่เติม 1% (w/w) GMO (หลังบ่ม).....102

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

β -Lg	=	β -lactoglobulin
α -La	=	α -Lactalbumin
$\times g$	=	Gravitational acceleration
WPI	=	Whey protein isolate
WPC	=	Whey protein concentrate
Tween 80	=	Polyoxyethylene sorbitan monooleate
Tween 60	=	Polyoxyethylene sorbitan monostearate
TPA	=	Texture profile analysis
TEM	=	Transmission electron microscopy
SMP	=	Skim milk powder
SDS-PAGE	=	Sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel electrophoresis
SDS	=	Sodium dodecyl sulfate
SC	=	Sodium caseinate
s	=	Second
Pa	=	Pascal
p	=	Probability
$^{\circ}\text{F}$	=	Degree Fahrenheit
$^{\circ}\text{C}$	=	Degree Celsius
MSNF	=	Milk solid non fat
mL	=	Milliliter
min	=	Minute
M	=	Molar
m	=	Milli
lb	=	Pound
Kg	=	Kilogram
in	=	Inch
HLB	=	Hydrophilic-lipophilic balance

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

h	=	Hour
GMS	=	Glycerol monostearate
GMP	=	Glycerol monopalmitate
GMO	=	Glycerol monooleate
g	=	Gram
$d_{3,2}$	=	Surface weighted mean diameter
μm	=	Micrometer
μg	=	Microgram

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ไอศกรีม (Ice cream) ถือว่าเป็นระบบคอลลอยด์ที่มีความซับซ้อนหรือจัดอยู่ในระบบอิมัลชันประเภทน้ำมันในน้ำ (Oil-in-water emulsion) เนื่องจากไอศกรีมประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ได้แก่ ฟองอากาศ (Air bubble) ผลึกน้ำแข็ง (Ice crystal) เม็ดไขมันที่เกิดจากรวมตัวกันบางส่วน (Partially-coalesced fat globule) เพื่อขึ้นรูปเป็นโครงร่างตาข่ายของไขมัน (Fat network) โดยที่ส่วนประกอบเหล่านี้จะกระจายตัวอยู่ในชั้นของเหลวที่ไม่แข็งตัว (Unfrozen matrix) ที่มีน้ำตาล โปรตีน โพลีแซคคาไรด์ (polysaccharide) และน้ำ (Goff, 1997a; Goff, Verespej and Smith, 1999; Marshall, Goff and Hartel, 2003) จากข้างต้นจะเห็นได้ว่าวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตไอศกรีมจึงประกอบด้วยไขมันเนย สารให้ความหวาน (Sweetener) นมผงหรือน้ำมันนมสด สารเพิ่มความคงตัว (Stabilizer) และ/หรือ อิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier) โดยที่ส่วนประกอบต่าง ๆ เหล่านี้มีบทบาทและหน้าที่ที่แตกต่างกันออกไปเช่น สารเพิ่มความคงตัวช่วยเพิ่มความหนืดและลดจุดเยือกแข็งของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม (Ice cream mix) เพื่อให้ไอศกรีมมีความนุ่มและมีความสามารถในการตัก (Scoopability) ไขมันช่วยให้ไอศกรีมมีลักษณะเป็นเนื้ออาหาร (Body) และไม่ทำให้ไอศกรีมมีลักษณะแห้งแข็ง (Dryness) ซึ่งจะมีผลต่อคุณภาพสัมผัสของไอศกรีม โดยจะช่วยเพิ่มลักษณะเนื้อสัมผัสให้มีความเนียน (Smoothness) (Varnam and Sutherland, 1994; Marshall, Goff and Hartel, 2003) ส่วนโปรตีนนอกจากมีหน้าที่ช่วยปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสของไอศกรีมเช่นเดียวกับไขมันแล้ว โปรตีนในนมยังพบว่ามีส่วนเกี่ยวข้องกับการขึ้นโฟมของไอศกรีม (Overrun) และช่วยเพิ่มกลิ่นรส (Flavor) ส่วนอิมัลซิไฟเออร์มีความสามารถในการลดแรงตึงผิวบริเวณพื้นผิวระหว่างเฟสที่เป็นน้ำและน้ำมันและสามารถแทนที่โปรตีนนมที่พื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันเหนียวนำไปเกิดการสูญเสียความคงตัวของอนุภาคเม็ดไขมันภายในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม

โปรตีนนมที่นิยมใช้ในการผลิตไอศกรีมได้แก่ นมผงพร่องมันเนย (Skim milk powder : SMP) โซเดียม เคซีนเนต (Sodium caseinate : SC) โปรตีนเวย์บริสุทธิ์ (Whey protein isolate : WPI) และโปรตีนเวย์เข้มข้น (Whey protein concentrate : WPC) ซึ่งโปรตีนดังกล่าวจะทำหน้าที่ในการทำให้เกิดโฟม (Foaming agent) และลดแรงตึงผิวระหว่างรอยต่อของน้ำมันและน้ำ (Euston and Hirst, 2000) โดย SC เป็นโปรตีนที่ได้จากการแยกเคซีนออกจากโปรตีนนมโดยการตกตะกอนด้วยกรด

หรือเอนไซม์ (Rennet) ซึ่งขั้นตอนในการตกตะกอนนี้จะทำลายโครงสร้างเคซีน ไมเซลล์ (Casein micelle) ทำให้เคซีนที่แยกออกมาได้เป็นหน่วยย่อยอิสระ (Individual casein) เช่น แอลฟา-เคซีน (α -casein) เบต้า-เคซีน (β -casein) และแกมมา-เคซีน (κ -casein) โดยพบว่าเคซีนมีลักษณะโครงสร้างที่มีความยืดหยุ่น (Flexible structure) และทนต่อความร้อน ในขณะที่ SMP จะประกอบไปด้วยส่วนผสมระหว่างเคซีนและโปรตีนเวย์แต่โครงสร้างของเคซีนจะแตกต่างจากโซเดียม เคซีนท เนื่องจากการผลิตนมผงพร่องมันเนยไม่มีขั้นตอนในการตกตะกอนโปรตีนจึงทำให้โปรตีนที่ได้ยังคงมีโครงสร้างที่เป็นเคซีน ไมเซลล์ (Casein micelle) และบางส่วนที่เป็นโปรตีนที่เกาะตัวกัน (Aggregated protein) (Mulvihill, 1992; Sing and Newstead, 1992) ส่วน WPC ประกอบไปด้วย แอลฟา-แลคตาบูมิน (α -Lactalbumin : α -La) และเบต้า-แลคโตโกลบูลิน β -Lactoglobulin : β -Lg) โบวีน ซีรัม อัลบูมิน (Bovine serum albumin : BSA) และอิมโมโนโกลบูลิน (Immunoglobulin : Ig) ซึ่งโปรตีนเวย์เป็นโปรตีนก่อนกลั่นและมีความไวต่อความร้อน (Euston, Singh, Munro and Dalgleish, 1996; Parkinson and Dickinson, 2004) ชนิดของโปรตีนที่แตกต่างกันจึงส่งผลถึงคุณภาพของไอศกรีม (Euston et al., 1996)

อิมัลซิไฟเออร์เป็นส่วนประกอบที่มีความสำคัญในไอศกรีม อิมัลซิไฟเออร์สามารถแบ่งตามความสามารถในการละลายได้ออกเป็น 2 กลุ่มได้แก่ 1) อิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายได้ในน้ำ (Water-soluble emulsifier) ได้แก่ ซอร์บิแทน เอสเทอร์ (Sorbitan esters) เช่น Tween 60 และ Tween 80 และ 2) อิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายได้ในน้ำมัน (Oil-soluble emulsifier) เช่น กลีเซอรอล โมโนสเตียเรท (Glycerol monostearate : GMS) และกลีเซอรอล โมโนโอเลอเทท (Glycerol monooleate : GMO) เป็นต้น (Clarke, 2004) ซึ่งมีหน้าที่ในการเพิ่มลักษณะเนื้อสัมผัสของไอศกรีมให้มีความเนียนมากขึ้น ควบคุมการเกาะกลุ่ม (Agglomeration) ของอนุภาคเม็ดไขมัน ช่วยลดแรงตึงผิวและสามารถเคลื่อนที่ไปยังพื้นผิวระหว่างเฟสที่เป็นน้ำและน้ำมันมีผลช่วยให้ระบบอิมัลชันของไอศกรีมคงตัวยิ่งขึ้น (Marshall et al., 2003)

อย่างไรก็ตาม หน้าที่ของอิมัลซิไฟเออร์ในระบบไอศกรีมนั้นมีความแตกต่างจากระบบอิมัลชันทั่วไปตรงที่อิมัลซิไฟเออร์ช่วยให้ระบบอิมัลชันในไอศกรีมคงตัวในสภาวะปราศจากการรบกวนของระบบ (Quiescent stability) เช่น ในสภาวะการบ่มของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมแต่จะทำหน้าที่ลดความคงตัวของอนุภาคเม็ดไขมันในระบบโดยเหนี่ยวนำให้เกิดการเชื่อมต่อของไขมันบางส่วนเพื่อให้เกิดโครงร่างของผลึกไขมันในระหว่างสภาวะการตีปั่นและแช่แข็งไอศกรีม (Ice cream freezing stage) หรือในสภาวะที่มีแรงเฉือนมากกระทำต่อระบบอิมัลชัน (Shearing condition) ด้วยการแทนที่โปรตีนที่อยู่บริเวณพื้นผิวของอนุภาคไขมันซึ่งมีผลต่อความคงตัวของฟองอากาศในไอศกรีม (Goff, 1997a) อันจะส่งผลต่อเนื่องถึงคุณภาพและคุณลักษณะของไอศกรีมที่ได้เช่น ลักษณะเนื้อสัมผัสและช่วยต้านทานการละลาย (Meltdown) ของไอศกรีม การศึกษาผลและ

หน้าที่ของอิมัลซิไฟเออร์ในระบบอิมัลชันประเภทน้ำมันในน้ำมีอยู่อย่างแพร่หลาย (Euston, Singh, Munro and Dalgleish, 1995; Pelan, Watts, Campbell and Lips, 1997; Segall and Goff, 1999; Davies, Dickinson and Bee, 2000, 2001; Bolliger, Goff and Tharp, 2000; Barfod, 2001) การทดลองของ Euston และคณะ (1995) พบว่า อิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายได้ในน้ำมีประสิทธิภาพในการแทนที่เคซีนที่บริเวณพื้นผิวระหว่างเฟสที่เป็นน้ำและน้ำมันมากกว่าอิมัลซิไฟเออร์ชนิดที่ละลายได้ในน้ำมัน นอกจากนี้ Davies และคณะ (2000) ได้ศึกษาถึงผลของ GMO ซึ่งถือเป็นอิมัลซิไฟเออร์ประเภท Unsaturated monoglyceride emulsifier ที่นิยมใช้ในระบบอิมัลชันทั่วไปกับความคงตัวของระบบอิมัลชันที่มีเกลือของโปรตีนนมซึ่งได้แก่ SC พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ GMO ระบบอิมัลชันมีความคงตัวหรือเสถียรน้อยลงแต่การเพิ่มปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์ดังกล่าวส่งผลให้โปรตีนนมถูกแทนที่ด้วยอิมัลซิไฟเออร์ได้มากขึ้น ทั้งนี้ Davies และคณะ (2001) ยังได้ศึกษาผลของอิมัลซิไฟเออร์ที่แตกต่างกันได้แก่ GMO, GMS และกลีเซอรอล โมโนปาลมิเตท (Glycerol monopalmitate : GMP) ซึ่ง GMS และ GMP ถือเป็นอิมัลซิไฟเออร์ประเภท Saturated monoglyceride emulsifier ต่อการเกิด Fat destabilization ในระบบอิมัลชันที่มี SC พบว่า GMO มีผลต่อการเกิด Fat destabilization ในระบบอิมัลชันมากที่สุด รองลงมา คือ GMP และ GMS ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาการแทนที่ของโปรตีนนมพบว่า GMP มีความสามารถแทนที่โปรตีนนมในระบบอิมัลชันมากที่สุด รองลงมา คือ GMS และ GMO ตามลำดับ ทั้งนี้ระบบอิมัลชันดังกล่าวใช้ไขมันจากถั่วลิสง (Groundnut) ในการศึกษา อย่างไรก็ตามผลการทดลองดังกล่าวได้ทำการศึกษาในระบบอิมัลชันต้นแบบจึงไม่สามารถที่จะอธิบายในระบบไอศกรีมได้เนื่องจากในระบบไอศกรีมเป็นระบบที่มีซับซ้อน (Multi-component) มากกว่าในระบบอิมัลชันที่มีการศึกษาใน Euston และคณะ (1995) และ Davies และคณะ (2000, 2001)

การศึกษาผลและหน้าที่ของอิมัลซิไฟเออร์ในระบบไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SMP พบในการทดลองของ Goff และ Jordan (1989) โดยเป็นการศึกษาผลของ Tween 60, Tween 80, GMS หรือ GMO ต่อการเกิด Fat destabilization พบว่า GMO และ Tween 60 ทำให้เกิด Fat destabilization ได้มากกว่า GMS และ Tween 80 ตามลำดับ นอกจากนี้ Bolliger และคณะ (2000) พบว่าการใช้อิมัลซิไฟเออร์ร่วมกันระหว่างโมโนและไดกลีเซอไรด์ (Mono- and diglycerides) และ Tween 80 ในไอศกรีมที่ผลิตจาก SMP จะให้ค่า Fat destabilization สูงที่สุด อย่างไรก็ตาม Zhang และ Goff (2005) ยังได้ศึกษาผลของ GMO เปรียบเทียบกับ GMS ต่อความคงตัวของระบบอิมัลชันของไอศกรีมและการเกิด Fat destabilization ในระบบอิมัลชันที่แปรชนิดของโปรตีนนม 2 ชนิดได้แก่ WPI และ SMP ผลที่ได้พบว่า GMO มีความสามารถในการแทนที่เคซีนและทำให้เกิด Fat destabilization มากกว่า GMS ส่วน GMS จะมีผลมากกว่า GMO เพียงเล็กน้อยต่อการเกิด Fat destabilization ในระบบอิมัลชันที่มีโปรตีนเวย์เป็นแหล่งของโปรตีนเท่านั้น

อย่างไรก็ตาม การศึกษาข้างต้นเน้นถึงผลของชนิดของอิมัลซิไฟเออร์ต่อการเกิดความไม่คงตัวของอนุภาคเม็ดไขมันในระบบอิมัลชันต้นแบบที่มีการควบคุมชนิดและปริมาณของโปรตีนนมและพบว่าส่วนใหญ่ศึกษาในสถานะที่ระบบเทียบเท่าหรือเป็นระบบอิมัลชันที่มีการตีปั่นเป็นไอศกรีมแล้วซึ่งมีเพียงส่วนน้อยที่ทำการศึกษาในส่วนสถานะที่ระบบยังคงเป็นส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม (Ice cream mix) รวมทั้งการศึกษาถึงผลของการแข่งขันกันในการดูดซับ (Competitive adsorption) ระหว่างอิมัลซิไฟเออร์และโปรตีนนมที่บริเวณพื้นผิวระหว่างเฟสที่เป็นน้ำและน้ำมันในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมมีอยู่อย่างจำกัด โดย Dalgleish, Srinivasan และ Singh (1995) และ Euston และคณะ (1996) ได้กล่าวไว้ว่าการแข่งขันกันในการดูดซับระหว่างอิมัลซิไฟเออร์และโปรตีนนมจะขึ้นอยู่กับชนิดของโปรตีนนมและอิมัลซิไฟเออร์ด้วย อย่างไรก็ตาม ลักษณะโครงสร้างและคุณภาพของไอศกรีมน่าจะมีผลต่อเนื่องมาจากลักษณะโครงสร้างและคุณภาพของการเกิด Fat destabilization ที่อาจเกิดขึ้นในช่วงของการเตรียมและการบ่มส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาผลของชนิดและปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์และชนิดของโปรตีนนมต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับจุลภาค (Microstructure) คุณภาพของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมและไอศกรีม นอกจากนี้ปัจจัยที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการเตรียมส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมอื่นได้แก่สถานะในการฆ่าเชื้อและระยะเวลาการบ่มส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมซึ่งน่าจะมีผลต่อคุณภาพและโครงสร้างดังกล่าวข้างต้นก็จะได้รับการศึกษาด้วยเช่นกัน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อให้ทราบถึงผลของชนิดและปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์ต่อความคงตัวของระบบอิมัลชันทั่วไป

1.2.2 เพื่อให้ทราบถึงผลของชนิดของอิมัลซิไฟเออร์และโปรตีนนมที่ใช้ในการเตรียมส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมต่อความคงตัวและคุณภาพของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมและไอศกรีม

1.2.3 เพื่อให้ทราบถึงผลของสถานะในการฆ่าเชื้อและระยะเวลาการบ่มส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมต่อความคงตัวและคุณภาพของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมและไอศกรีมที่มีโปรตีนนมและอิมัลซิไฟเออร์ที่แตกต่างกัน

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

1.3.1 ชนิดและปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์และชนิดของโปรตีนนมที่ใช้ในกระบวนการผลิตส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมจะมีผลต่อความคงตัวและคุณภาพของระบบอิมัลชันในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมและไอศกรีม

1.3.2 สภาวะในการฆ่าเชื้อและระยะเวลาการบ่มส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีโปรตีนนมและอิมัลซิไฟเออร์ที่แตกต่างกันจะมีผลต่อการแทนที่โปรตีนนมด้วยอิมัลซิไฟเออร์ซึ่งจะมีผลโดยตรงต่อลักษณะโครงสร้างและคุณภาพของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมและไอศกรีมที่ได้

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.4.1 ไอศกรีมนมดัดแปลงจากไอศกรีมสูตรทางการค้า (Marshall, Goff and Hartel, 2003) ประกอบด้วยไขมันเนย (Butter fat) ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก น้ำตาลทรายขาว (Sucrose) ร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก กวักัม (Guar gum) ร้อยละ 0.275 โดยน้ำหนัก แคลปโป-การจีแนน (K-carrageenan) ร้อยละ 0.015 โดยน้ำหนัก อิมัลซิไฟเออร์ชนิด Tween 60, Tween 80, GMS หรือ GMO ร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก และส่วนของแข็งที่ไม่ใช่ไขมันเนย (Milk Solid Non Fat : MSNF) ร้อยละ 10.5 โดยน้ำหนักซึ่งได้จาก SMP โดยเปรียบเทียบกับ SC หรือ WPC โดยกำหนดให้มีความเข้มข้นของโปรตีนเท่ากันทุกสูตรไอศกรีม (2.9 กรัมโปรตีน ต่อ 100 กรัมตัวอย่าง) และปรับปริมาณของแข็งทั้งหมดด้วยน้ำตาลแลคโตส (Lactose) ซึ่งจะมีปริมาณของแข็งทั้งหมดประมาณร้อยละ 30-33 โดยน้ำหนัก

1.4.2 ไอศกรีมนมที่เป็นสูตรควบคุม (Control) มีส่วนประกอบเหมือนไอศกรีมนมในข้อ 1.4.1 แต่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์

1.5 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาผลของชนิดและปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์และชนิดของโปรตีนนม รวมทั้งผลของสภาวะในการฆ่าเชื้อและระยะเวลาการบ่มส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมในสภาวะของการผลิตไอศกรีม 3 สภาวะได้แก่ การลดขนาดอนุภาคเม็ดไขมัน การบ่มและการตีปั่นเพื่อให้ได้ไอศกรีมต่อคุณลักษณะทางกายภาพโดยเปรียบเทียบกับสูตรควบคุมดังนี้

- ค่าความหนืดของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม
- ขนาดของอนุภาคเม็ดไขมันของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม
- ค่าการสูญเสียความคงตัวของอนุภาคเม็ดไขมันของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม
- โครงสร้างระดับจุลภาคของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ศึกษาด้วยวิธี Transmission electron microscopy (TEM)
- ปริมาณและชนิดของโปรตีนที่ดูดซับที่พื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม
- ปริมาณการขึ้นโฟมของไอศกรีม
- ค่าการสูญเสียความคงตัวของอนุภาคเม็ดไขมันของไอศกรีม

- การกระจายตัวของเซลล์อากาศของไอศกรีม
- ความคงทนต่อการหลอมละลายหรืออัตราการละลายของไอศกรีม
- ลักษณะเนื้อสัมผัสของไอศกรีม

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้รับองค์ความรู้เกี่ยวกับผลของชนิดและปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์ต่อความคงตัวของระบบอิมัลชันต้นแบบที่มีไขมันเนยเป็นส่วนประกอบ

1.6.2 ได้รับองค์ความรู้เกี่ยวกับผลของชนิดและปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์และชนิดของโปรตีนนมที่ใช้ในการผลิตไอศกรีมรวมทั้งการแทนที่โปรตีนนมด้วยอิมัลซิไฟเออร์ซึ่งผลที่ได้มีผลโดยตรงต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไอศกรีมหรือผลิตภัณฑ์อิมัลชันที่ใกล้เคียงกัน

1.6.3 ได้รับองค์ความรู้เกี่ยวกับการเลือกใช้อิมัลซิไฟเออร์และโปรตีนนมรวมทั้งขั้นตอนในการเตรียมส่วนผสมให้มีความเหมาะสมต่อการผลิตผลิตภัณฑ์ไอศกรีมหรือผลิตภัณฑ์อิมัลชันที่ใกล้เคียงกันเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดี อีกทั้งสามารถนำความรู้ที่ได้ไปเผยแพร่แก่ผู้วิจัยในสาขาที่เกี่ยวข้องเช่น นักวิจัยที่ศึกษาระบบอิมัลชันในมหาวิทยาลัยต่าง ๆ ที่มีการวิจัยเกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ไอศกรีมหรืออิมัลชัน นักวิจัยในหน่วยงานวิจัยและพัฒนาของโรงงานอุตสาหกรรมประเภทผลิตภัณฑ์นมหรือผู้ประกอบการธุรกิจขนาดเล็กและขนาดกลาง (SMEs) อันก่อให้เกิดการผลิตในเชิงพาณิชย์ได้ต่อไป

บทที่ 2

ปรีทศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไอศกรีม

ไอศกรีมเป็นของหวานแช่แข็งที่มีการอัดอากาศเข้าไปในโครงสร้าง ส่วนผสมที่ใช้ในการผลิตไอศกรีมได้แก่ ไขมัน ส่วนของของแข็งในนมที่ไม่ใช่ไขมัน (MSNF) สารให้ความหวาน สารเพิ่มความคงตัว อิมัลซิไฟเออร์ และสารปรุงแต่งกลิ่นรสและสี (Flavors and colors) โดยไอศกรีมจะต้องมีส่วนประกอบของไขมันและของแข็งในนมที่ไม่ใช่ไขมันไม่น้อยกว่าร้อยละ 10 และ 20 ตามลำดับ (Marshall, Goff and Hartel, 2003) ส่วนผสมต่าง ๆ ที่ใช้ในการผลิตไอศกรีมเหล่านี้มีบทบาทและหน้าที่ที่แตกต่างกันออกไปดังนี้

ก. ไขมัน

ไขมันเป็นส่วนประกอบที่มีความสำคัญในไอศกรีม ไขมันที่ใช้ในการผลิตไอศกรีมอาจได้จากสัตว์ (ไขมันนม) หรือจากพืช (ไขมันพืช) ก็ได้ โดยชนิดของไขมัน จุดหลอมเหลวและส่วนประกอบของไขมันมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสและความคงตัวระหว่างการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ไอศกรีม (Andreasen and Nielsen, 1998) ในผลิตภัณฑ์ไอศกรีมไขมันจะมีหน้าที่ให้กลิ่นรส ความรู้สึกในปาก (Mouth-feel) ช่วยให้ไอศกรีมมีลักษณะเป็นเนื้ออาหารและไม่ทำให้ไอศกรีมมีลักษณะแข็งแข็ง นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มลักษณะเนื้อสัมผัสให้มีความเนียน เนื่องจากไขมันช่วยให้ฟองอากาศในโครงสร้างของไอศกรีมมีขนาดเล็กและละเอียด (Varnam and Sutherland, 1994; Marshall et al., 2003) ปริมาณไขมันจะเป็นตัวกำหนดคุณภาพและมูลค่าของไอศกรีม แต่ปริมาณไขมันที่ใช้ในไอศกรีมจะถูกจำกัดด้วยหลายปัจจัย เช่น ราคา ปริมาณพลังงาน (แคลอรี) และคุณภาพของไอศกรีมเนื่องจากการใช้ไขมันในปริมาณที่มากจะทำให้ไอศกรีมมีราคาและปริมาณพลังงานสูง และด้านทานความสามารถในการปั่นไอศกรีมหรือการตีขึ้นโฟมของไอศกรีม (วรรณ ดั่งเจริญชัย และวิบูลย์ศักดิ์ กาวีละ, 2531)

ข. ส่วนของของแข็งในนมที่ไม่ใช่ไขมัน

ส่วนของของแข็งในนมที่ไม่ใช่ไขมันประกอบด้วยแลคโตส (Lactose) เคซีน (Casein) โปรตีนเวย์ (Whey protein) วิตามิน เกลือแร่ แอช (Ash) กรด และเอนไซม์ ซึ่งโปรตีนนมนอกจากมีหน้าที่ช่วยปรับปรุงลักษณะเป็นเนื้ออาหารและเนื้อสัมผัส (Texture) ของไอศกรีมเช่นเดียวกับไขมัน

แล้ว โปรตีนในนมยังพบว่ามีส่วนเกี่ยวข้องกับการขึ้นโฟมของไอศกรีมและช่วยเพิ่มกลิ่นรส (Varnam and Sutherland, 1994; Marshall et al., 2003) นอกจากนี้โปรตีนยังช่วยทำให้อนุภาคเม็ดไขมันมีความคงตัวหลังจากผ่านกระบวนการโฮโมจีไนเซชัน (Homogenization) ด้วยการสร้างโครงข่ายที่มีความเหนียวและยืดหยุ่น (Visco-elastic network) ที่บริเวณพื้นผิวระหว่างเฟสที่เป็นน้ำและน้ำมัน (Oil-water interface) และโปรตีนก็มีหน้าที่ในการควบคุมความไม่คงตัวของไขมัน (Fat destabilization) ในระหว่างการตีปั่นไอศกรีม (Goff, 1997a; Wild, Nino, Clark and Patino, 1997) นอกจากนี้ โปรตีนยังสามารถเกิดอันตรกิริยากับสารเพิ่มความคงตัวบางชนิดได้เช่น คาราจีแนน (Andreasen and Nielsen, 1998; Spagnuolo, Dalgleish, Goff and Morris, 2005; Ji, Corredig and Goff, 2008) อย่างไรก็ตาม ส่วนของของแข็งในนมที่ไม่ใช่ไขมันอาจมีผลทำให้เกิดลักษณะเนื้อทราย (Sandiness) ในผลิตภัณฑ์ไอศกรีมและอาจทำให้รสชาติเค็มและมีกลิ่นไหม้ (Cooked flavor) (วรรณ ตังเจริญชัย และวินุญศักดิ์ กาวิละ, 2531)

ค. สารให้ความหวาน

สารให้ความหวานมักนิยมใช้น้ำตาลทรายและสารให้ความหวานอีกหลายชนิด เช่น แลคโตส คอนไซรป (Corn syrup) มอลโตเดสติน (Maltodextrin) สารให้ความหวานมีหน้าที่หลัก ๆ คือ เพิ่มการยอมรับของผลิตภัณฑ์โดยทำให้ไอศกรีมมีรสหวาน นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มความหนืดและปรับปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solid) ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม (Ice cream mix) ซึ่งจะมีผลต่อลักษณะเป็นเนื้ออาหาร เนื้อสัมผัสของไอศกรีม จุดเยือกแข็ง (Freezing point) ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมและควบคุมปริมาณน้ำที่แข็งตัวในไอศกรีมส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ไอศกรีมสุดท้ายมีลักษณะนุ่ม มีความสามารถตักได้และมีลักษณะเคี้ยวได้ (Chewable characteristic) (Varnam and Sutherland, 1994; Andreasen and Nielsen, 1998; Marshall et al., 2003)

ง. สารเพิ่มความคงตัว

สารเพิ่มความคงตัวที่นิยมใช้ได้แก่ โลคัส บีน กัม (Locus bean gum) กัวกัม (Guar gum) โซเดียมอัลจีเนต (Sodium alginate) คาราจีแนน (Carrageenan) และโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Sodium carboxy methylcellulose) เป็นต้น (Andreasen and Nielsen, 1998) สารเพิ่มความคงตัวมีหน้าที่ช่วยเพิ่มความหนืดให้กับส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมทำให้ไอศกรีมมีความคงตัวไม่เกิดการแยกชั้นระหว่างโปรตีนนมและโพลีแซคคาไรด์ (Wheying off) เช่น คาราจีแนน นอกจากนี้ยังช่วยให้ไอศกรีมละลายช้าลงและมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่มีความเนียนมากขึ้น (Marshall et al., 2003) หากใช้สารเพิ่มความคงตัวในปริมาณมากจะส่งผลให้ไอศกรีมมีเนื้อสัมผัสที่แน่นเกินไปและละลายได้ยาก (วรรณ ตังเจริญชัย และวินุญศักดิ์ กาวิละ, 2531)

จ. สารอิมัลซิไฟเออร์

สารอิมัลซิไฟเออร์เช่น กลีเซอรอล เอสเทอร์ของกรดไขมัน หรือที่เรียกว่า โมโน-ไดกลีเซอไรด์ เป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่นิยมใช้กันมากในผลิตภัณฑ์ไอศกรีม (Andreasen and Nielsen, 1998) โดยอิมัลซิไฟเออร์มีหน้าที่ช่วยลดแรงตึงผิวและสามารถเคลื่อนที่ไปยังพื้นผิวระหว่างเฟสที่เป็นน้ำและน้ำมันซึ่งเป็นระบบที่ไม่ละลายซึ่งกันและกัน อีกทั้งช่วยควบคุมการเกาะกลุ่ม (Agglomeration) ของอนุภาคเม็ดไขมันและเหนียวน้ำให้เกิดการสูญเสียความคงตัวของอนุภาคเม็ดไขมันส่งผลให้เกิดโครงสร้าง 3 มิติของไขมันซึ่งถือเป็นโครงสร้างที่สำคัญของไอศกรีมและช่วยให้ไอศกรีมมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่มีความเนียนมากขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยปรับปรุงความสามารถในการตีปั่นไอศกรีมเนื่องจากคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของอิมัลซิไฟเออร์ที่พื้นผิวระหว่างเฟสที่เป็นอากาศและน้ำ (Air-water interface) ส่งผลให้ขนาดของเซลล์อากาศในโครงสร้างไอศกรีมเล็กลงและปรับปรุงการละลายของไอศกรีมให้ช้าลง (Varnam and Sutherland, 1994; Andreasen and Nielsen, 1998; Marshall et al., 2003)

ฉ. สารปรุงแต่งกลิ่นรสและสี

สารปรุงแต่งกลิ่นรสที่ใช้ในไอศกรีมมีทั้งที่ละลายได้ในน้ำและน้ำมันโดยสารปรุงแต่งกลิ่นรสที่ละลายในน้ำจะอยู่ในส่วนที่เป็นซีรัมเมื่อบริโภคจะปล่อยกลิ่นออกมาอย่างรวดเร็ว ในขณะที่สารปรุงแต่งกลิ่นรสที่ละลายในน้ำมันจะปล่อยกลิ่นออกมาอย่างช้า ๆ สารปรุงแต่งสีในไอศกรีมมีผลต่อการยอมรับของผู้บริโภคอย่างมากซึ่งสารปรุงแต่งสีอาจได้จากธรรมชาติ (Natural colors) หรือจากการสังเคราะห์ (Synthetic colors) โดยสารสีที่ได้จากธรรมชาติมีความสามารถในการละลายดีแต่ราคาค่อนข้างแพงและอาจต้องใช้ในปริมาณที่มาก (Clarke, 2004)

ผลิตภัณฑ์ไอศกรีมสามารถแบ่งได้เป็นหลายประเภทขึ้นอยู่กับส่วนประกอบและปริมาณที่ใช้การผลิตไอศกรีมอย่างเช่น ไอศกรีมสูตรทางการค้า (Economy ice cream) ประกอบด้วยไขมันนมร้อยละ 10 ถึง 11 โดยน้ำหนัก ส่วนของของแข็งที่ไม่ใช่ไขมันเนย (MSNF) ร้อยละ 10 ถึง 11 โดยน้ำหนัก สารให้ความหวานร้อยละ 14 ถึง 17 โดยน้ำหนัก สารเพิ่มความคงตัวและสารอิมัลซิไฟเออร์ร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนักและของแข็งทั้งหมดร้อยละ 35 ถึง 37 โดยน้ำหนัก โดยไอศกรีมระดับพรีเมียม (Premium ice cream) จะแตกต่างจากไอศกรีมสูตรทางการค้าตรงที่ปริมาณไขมันนมที่ใช้ในส่วนผสมซึ่งไอศกรีมระดับพรีเมียมจะใช้ปริมาณไขมันในระดับที่สูงกว่า (ประมาณร้อยละ 14 ถึง 16 โดยน้ำหนัก) แต่จะมีปริมาณอากาศภายในโครงสร้างต่ำกว่าและใช้วัตถุดิบที่มีคุณภาพดีกว่าจึงส่งผลให้ไอศกรีมดังกล่าวมีราคาที่ค่อนข้างแพง ในขณะที่ไอศกรีมที่มีไขมันต่ำ (Low-fat ice cream) จะมีส่วนของไขมันนมเพียงร้อยละ 2 ถึง 4 โดยน้ำหนัก (Marshall et al., 2003; Clarke, 2004)

2.1.1 กระบวนการผลิตไอศกรีม

ก. การผสมส่วนผสม (Mixing)

การผสมส่วนผสมมีหลายวิธีขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของของเหลว และของแข็ง และการผสมมีทั้งการผสมแบบเย็นหรือร้อนโดยเริ่มจากการผสมในส่วนที่เป็นของเหลวก่อน แล้วตามด้วยส่วนที่เป็นของแข็ง ถ้าใช้น้ำ ไขมันเนย หรือน้ำมันพืชเป็นแหล่งไขมัน ควรทำละลายก่อนการผสม ในกรณีของการผสมแบบร้อนไขมันที่ละลายแล้วจะเติมลงในส่วนผสม แต่ถ้าในกรณีของการผสมแบบเย็นไขมันจะเกิดเป็นผลึกเมื่อทำการผสม ดังนั้นจึงต้องทำละลายไขมันก่อนแล้วจึงเติมลงในส่วนผสมก่อนเข้าสู่กระบวนการโฮโมจีไนเซชัน นอกจากนี้การเติมสารเพิ่มความคงตัวซึ่งเป็นสารที่มีความสามารถในการละลายต่ำควรจะผสมกับส่วนผสมที่เป็นของแข็ง ได้แก่ น้ำตาล ก่อนที่จะผสมลงในส่วนผสมแล้วทำการผสมลงในส่วนผสมที่เป็นของเหลวอย่างช้า ๆ เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดตะกอนของสารเพิ่มความคงตัวที่ละลายไม่สมบูรณ์ (Andreasen and Nielsen, 1998) ปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในขั้นตอนของการผสมคือ ในกรณีที่มีอากาศอยู่ในส่วนผสมอาจเกิดปัญหาในระหว่างกระบวนการพาสเจอร์ไรเซชัน โฮโมจีไนเซชันหรือการบ่มส่วนผสม (Andreasen and Nielsen, 1998; Marshall et al., 2003)

ข. การพาสเจอร์ไรเซชัน (Pasteurization)

ในอดีตกระบวนการพาสเจอร์ไรเซชันจะทำในลักษณะที่เป็น Batch โดยใช้อุณหภูมิประมาณ 65 ถึง 70 องศาเซลเซียส นาน 15 ถึง 30 นาที ในขณะที่ปัจจุบันใช้ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) ซึ่งให้ความร้อนได้สูงแต่ใช้เวลาสั้นหรือที่เรียกว่า กระบวนการ High Temperature / Short Time (HTST) โดยให้อุณหภูมิสูงถึง 82 ถึง 87 องศาเซลเซียส นาน 15 ถึง 30 วินาที แต่เนื่องจากส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมมีความหนืดมากกว่าผลิตภัณฑ์นมชนิดอื่น ๆ ดังนั้น แผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน (Plate heat exchanger) ที่ใช้ในการให้ความร้อนจึงคล้ายกับที่ใช้ในผลิตภัณฑ์ครีม (Andreasen and Nielsen, 1998) จุดประสงค์หลักในการพาสเจอร์ไรเซชันคือ ทำลายแบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรค (Pathogenic bacteria) และลดจำนวนแบคทีเรียชนิดอื่นลงโดยนิยมตรวจหาเชื้อจุลินทรีย์ชนิด *Listeria monocytogenes* เป็นดัชนีการฆ่าเชื้อเพื่อให้มั่นใจว่ากระบวนการพาสเจอร์ไรเซชันมีประสิทธิภาพดีเนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์ดังกล่าวเป็นจุลินทรีย์ที่พบในนมและมีความสามารถในการทนความร้อนได้สูง (Varnam and Sutherland, 1994) ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 222) พ.ศ. 2544 ว่าด้วยเรื่อง ไอศกรีม ได้ระบุว่าปริมาณแบคทีเรียได้ไม่เกิน 100,000 แบคทีเรียในอาหาร 1 กรัม และไม่พบแบคทีเรียชนิด อี.โคไล (*Escherichia coli*) ในอาหาร 0.1 กรัม นอกจากนี้เอนไซม์ที่มีอยู่ตามธรรมชาติในนมดิบซึ่งทำลายกลีโคไลและเนื้อสัมผัสของนม จะถูกทำลายได้ด้วยกระบวนการพาสเจอร์ไรเซชัน (Marshall et al., 2003)

ในระหว่างกระบวนการพาสเจอร์ไรเซชัน โปรตีนเวย์ที่มีลักษณะโครงสร้างแบบก้อนกลม (Globular) จะเกิดการเสียสภาพธรรมชาติ (Denaturation) และคลายเกลียวออก (Unfolding) ส่วนที่ละลายในไขมัน (Lipophilic part) ซึ่งอยู่ภายในของโครงสร้างโปรตีนเวย์จะออกมาอยู่ภายนอก ดังนั้นโปรตีนเวย์จึงสามารถลดแรงตึงผิวบริเวณพื้นผิวระหว่างเฟสที่เป็นน้ำและน้ำมันได้และยังช่วยเพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำ (Water-binding capacity) ได้อีกด้วยซึ่งการเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีนจะส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของไอศกรีมทำให้ไอศกรีมที่ได้มีเนื้อสัมผัสที่มีความเนียนและมีลักษณะเป็นเนื้ออาหารดีขึ้น นอกจากนี้อุณหภูมิและระยะเวลาของการให้ความร้อนในกระบวนการพาสเจอร์ไรเซชันเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญเกี่ยวกับกลิ่นรสของไอศกรีมเนื่องจากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิที่สูงเกินไปหรือใช้ระยะเวลานานเกินไปอาจส่งผลให้เกิดกลิ่นไหม้ (Cooked flavor) และ/หรือกลิ่นน้ำตาลไหม้ (Caramelized flavor) ในผลิตภัณฑ์ไอศกรีม (Andreasen and Nielsen, 1998) โดยเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ใช้ในกระบวนการพาสเจอร์ไรเซชันส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมได้แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เวลาและอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่ใช้ในกระบวนการพาสเจอร์ไรเซชันส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม

Method	Time	Temperature (°C/°F)
Batch	30 min	69/155
High-Temperature Short Time (HTST)	25 s	80/175
High-Heat Short Time (HHST)	1-3 s	90/194
Ultra High Temperature	≥ 2 s	138/280

แหล่งที่มา : Marshall et al. (2003)

ค. การโฮโมจีไนเซชัน

กระบวนการโฮโมจีไนเซชันเป็นขั้นตอนที่ใช้ในการลดขนาดอนุภาคไขมันให้เล็กลง (ประมาณ 2 ไมโครเมตร) หรือเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของอนุภาคเม็ดไขมันให้มากขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้ส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenous) ทำให้เกิดสภาพที่เป็นอิมัลชันอย่างแท้จริง Berger (1997) กล่าวว่ากระบวนการโฮโมจีไนเซชันทำให้ระบบอิมัลชันมีความคงตัวและเป็นกระบวนการที่จำเป็นในระหว่างกระบวนการผลิตส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม หลังจากกระบวนการโฮโมจีไนเซชันพบว่าโปรตีนจะเข้าดูซับบริเวณพื้นผิวที่ว่างของอนุภาคเม็ดไขมันที่สร้างขึ้นใหม่โดยโปรตีน

ที่ต่างชนิดกันจะมีความสามารถในการดูดซับได้แตกต่างกันเช่น เคซีนมีความสามารถในการดูดซับได้มากกว่าโปรตีนเวย์ซึ่งโปรตีนจะช่วยทำให้ระบบอิมัลชันมีความคงตัวโดยการสร้างเมมเบรนที่มีความหนาและแข็งแรงรอบ ๆ อนุภาคของไขมันช่วยให้ป้องกันการรวมตัวกันของอนุภาคเม็ดไขมัน พฤติกรรมของโปรตีนที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า Steric stabilization (Clarke, 2004)

นอกจากโปรตีนที่เข้าดูดซับบริเวณพื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันแล้วยังพบว่าอิมัลซิไฟเออร์ก็สามารถเข้าดูดซับบริเวณดังกล่าวได้เช่นกัน (Andreasen and Nielsen, 1998) ซึ่งจะทำหน้าที่ในการลดแรงดึงดูดระหว่างรอยต่อของน้ำมันและน้ำเช่นเดียวกับโปรตีน ด้วยเหตุนี้จึงอาจเกิดการแข่งขันกันในการดูดซับ (Competitive adsorption) ระหว่างสารทั้ง 2 ชนิดนี้บริเวณพื้นผิวระหว่างเฟสที่เป็นน้ำและน้ำมันได้

ประสิทธิภาพของกระบวนการโฮโมจีไนเซชันขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยได้แก่

1) อุณหภูมิ กระบวนการโฮโมจีไนเซชันจะมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น เมื่อส่วนผสมมีอุณหภูมิสูงถึง 80 องศาเซลเซียสเนื่องจากที่อุณหภูมิดังกล่าวช่วยปรับปรุงความสามารถในการเคลื่อนที่ของสารลดแรงดึงดูดไปยังบริเวณพื้นผิวระหว่างเฟสที่เป็นน้ำและน้ำมันให้ดีขึ้นส่งผลให้ได้อนุภาคไขมันที่มีขนาดเล็กมาก (Andreasen and Nielsen, 1998; Marshall et al., 2003)

2) ลำดับขั้นตอนของกระบวนการโฮโมจีไนเซชัน กรณีที่คำนึงถึงความปลอดภัยของอาหารด้านเชื้อจุลินทรีย์จะนิยมวางเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ไว้ที่ตำแหน่ง Up-stream เช่น ก่อนกระบวนการพาสเจอร์ไรเซชันและจำเป็นต้องละลายสารอิมัลซิไฟเออร์ที่อุณหภูมิสูง (65 ถึง 70 องศาเซลเซียส) ก่อนผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ แต่ถ้าวางเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ไว้ที่ตำแหน่ง Down-stream คือ หลังจากกระบวนการพาสเจอร์ไรเซชันพบว่า กระบวนการโฮโมจีไนเซชันจะมีประสิทธิภาพดีเนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการพาสเจอร์ไรส์มีความเหมาะสมต่อกระบวนการโฮโมจีไนซ์หลังจากนั้นลดอุณหภูมิส่วนผสมลงอย่างรวดเร็วเพื่อป้องกันการกลับมารวมตัวกันของอนุภาคเม็ดไขมันที่เกิดขึ้นใหม่ (Andreasen and Nielsen, 1998)

3) ความดัน ความดันที่ใช้ในกระบวนการโฮโมจีไนเซชันจะมีผลต่อขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคเม็ดไขมัน ถ้าให้ความดันต่ำเกินไปจะส่งผลให้อนุภาคเม็ดไขมันที่ได้มีขนาดใหญ่ แต่ถ้าให้ความดันในระดับที่สูงเกินไปจะส่งผลให้อนุภาคเม็ดไขมันเกิดการเกาะกลุ่มกัน (Agglomerate) (Andreasen and Nielsen, 1998) ในกรณีที่ให้ความดัน 2 ระดับความดันโดยที่ระดับความดันแรกจะใช้ความดันสูง (โดยทั่วไปสูงถึง 150 ความดันบรรยากาศ) พบว่าอนุภาคเม็ดไขมันจะแตกเป็นเม็ดเล็ก ๆ ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 ไมโครเมตรเกิดเป็นระบบอิมัลชัน ส่วนระดับความดันที่สองจะใช้ความดันต่ำ (ประมาณ 35 ความดันบรรยากาศ) เพื่อลดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคเม็ดไขมันที่มีขนาดเล็กที่ผ่านออกมาจากการให้ความดันที่ระดับแรกแล้ว (Clarke, 2004)

4) ส่วนประกอบของส่วนผสม ประสิทธิภาพของกระบวนการโฮโมจีไนเซชันขึ้นอยู่กับ

วัตถุดิบที่ใช้ เช่น ถ้าใช้ Emulsified fat ได้แก่ ครีมหรือนมดิบ (Whole milk) เป็นส่วนประกอบควรใช้ความดันสูงกว่าส่วนผสมที่ประกอบด้วยน้ำมันพืชหรือไขมันเนย เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราส่วนระหว่างไขมันและส่วนของของแข็งในนมไม่รวมมันเนยมีผลต่อการเลือกใช้ความดันที่ระดับต่างกันอีกด้วย (Andreasen and Nielsen, 1998) โดยส่วนผสมที่มีปริมาณไขมันมากพบว่าอนุภาคไขมันจะมีโอกาสเกิดการชนกันได้มากทำให้ใช้ความดันในการลดขนาดที่ต่ำกว่าสูตรส่วนผสมที่มีปริมาณไขมันน้อย ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ความดันโดยประมาณที่ใช้ในกระบวนการโฮโมจีไนเซชันของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีปริมาณไขมันที่แตกต่างกัน

Fat (%)	Single stage (lb/in ²)	Two stage	
		First stage (lb/in ²)	Second stage (lb/in ²)
1-8	2500-3000	2500-3000	500
10-14	2000-2500	2000-2500	500
15-17	1500-2000	1500-2000	500
18	1200-1800	1200-1800	500
> 18	800-1200	800-1200	500

แหล่งที่มา : Marshall et al. (2003)

ง. การบ่ม (Aging) ส่วนผสม

ในกรณีที่เป็นการผลิตแบบต่อเนื่อง (Continuous process) ส่วนผสมถูกทำให้เย็นโดยใช้แผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนที่อุณหภูมิ 0 ถึง 5 องศาเซลเซียส จากนั้นบ่มในถังบ่มที่อุณหภูมิเดียวกัน โดยถังบ่มจะป้องกันส่วนผสมสัมผัสกับบรรยากาศเพื่อป้องกันการปนเปื้อนจากภายนอก ส่วนผสมที่อยู่ในถังบ่มจะถูกกวนอย่างเบา ๆ เพื่อป้องกันการเกิดความร้อนในระหว่างการกวน นอกจากนี้ส่วนผสมอื่น ๆ ที่เสื่อมสลายจากความร้อนเช่น สี สารเพิ่มกลิ่นรสและเนื้อผลไม้จะใส่ในส่วนผสมในขั้นตอนนี้ (Clarke, 2004) จุดประสงค์ของการบ่มส่วนผสมก็เพื่อให้ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมมีความหนืดมากขึ้น เนื้อไอศกรีมมีความนุ่ม ไม่เหลวตัวง่ายและทำให้การตีปั่นเป็นไอศกรีมง่ายขึ้น (วรรณ ตังเจริญชัย และวิบูลย์ศักดิ์ กาวิลละ, 2531)

กลไกสำคัญที่เกิดขึ้นในระหว่างการบ่มได้แก่

1) การดูดซับน้ำของส่วนประกอบแห้งได้อย่างสมบูรณ์ ส่วนประกอบแห้งเช่น สารเพิ่มความคงตัวต้องการระยะเวลาในการดูดซับน้ำและพองตัว (Swelling) อย่างสมบูรณ์ซึ่งจะส่งผลต่อ

ความหนืดของส่วนผสมที่เพิ่มขึ้น (Andreasen and Nielsen, 1998; Clarke, 2004) โดยความหนืดที่เพิ่มขึ้นนี้จะช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่ได้มีลักษณะเป็นเนื้ออาหาร เนื้อสัมผัสมีความเนียน อัตราการละลายต่ำและมีความคงตัวในสภาวะการเก็บรักษา

2) การเกิดผลึกของไขมัน (Fat crystallization) ไขมันที่อยู่ภายในอนุภาคเมื่อดไขมันเริ่มเกิดผลึก การเกิดผลึกจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ เนื่องจากการเกิดนิวเคลียส (Nucleation) จะเกิดขึ้นภายในอนุภาคเมื่อดไขมันของแต่ละอนุภาคโดยผลึกของไขมันที่เกิดขึ้นนี้บางครั้งอาจแทงทะลุผ่านออกมาจากผิวของอนุภาคเมื่อดไขมันได้ (Andreasen and Nielsen, 1998; Marshall et al., 2003; Clarke, 2004) โดยระยะเวลาในการบ่มส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมจะอยู่ในช่วง 4 ถึง 24 ชั่วโมง เพื่อให้ไขมันเกิดเป็นผลึกได้อย่างสมบูรณ์ (Marshall et al., 2003)

3) การแทนที่โปรตีนบางส่วนด้วยอิมัลซิไฟเออร์บริเวณพื้นผิวของอนุภาคเมื่อดไขมัน การแทนที่โปรตีนด้วยอิมัลซิไฟเออร์จะขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการบ่ม เมื่อระยะเวลาในการบ่มนานขึ้นพบว่าปริมาณโปรตีนที่ดูดซับอยู่บริเวณพื้นผิวของอนุภาคเมื่อดไขมันลดลง (Andreasen and Nielsen, 1998) เนื่องจากการแทนที่โปรตีนบางส่วนด้วยอิมัลซิไฟเออร์จะทำให้ลักษณะของพื้นผิวที่มีลักษณะบาง (Weak membrane) ซึ่งมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะทำให้ระบบอิมัลชันมีความคงตัวในสภาวะที่ปราศจากการให้แรงกระทำ (สภาวะของการบ่ม) แต่ระบบอิมัลชันจะไม่มี ความคงตัวเมื่อได้รับแรงกระทำ (สภาวะที่ทำการตีปั่นไอศกรีม) (Clarke, 2004)

จ. การปั่นไอศกรีม (Freezing)

หลังจากการบ่มส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมแล้วส่วนผสมจะถูกทำให้แข็งด้วยเครื่องปั่นไอศกรีม (Freezer) โดยหลักการคล้ายกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบมีใบมีดขูดผิว (Scraped surface heat exchanger) ซึ่งจะมีสารฟรียอนหรือแอมโมเนียเป็นสารทำให้เย็น (Coolant) และมีใบมีดขูดผิวภายในเครื่องปั่นเพื่อให้ส่วนที่แข็งตัวเป็นน้ำแข็งกระจายอยู่ในโครงสร้างของไอศกรีมได้อย่างทั่วถึง

ในขั้นตอนการปั่นไอศกรีมนี้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของไอศกรีมดังนี้

1) การเติมอากาศ (Air incorporation) ในระหว่างการปั่นส่วนผสมพบว่าการเติมอากาศเข้าไปในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมซึ่งเป็นการเพิ่มปริมาตรของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมสามารถบ่งบอกปริมาณอากาศที่บรรจุอยู่ในโครงสร้างของไอศกรีมได้ด้วยค่าโอเวอร์รัน (Overrun) Udabage, Augustin, Cheng และ Williams (2005) ได้กล่าวไว้ว่าความง่ายของการอัดอากาศในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมจะขึ้นอยู่กับชนิดของของแข็งในนมที่ไม่ใช่ไขมันที่ใช้และความหนืดของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม โดยทั่วไปแล้วไอศกรีมจะมีปริมาณอากาศอยู่ประมาณร้อยละ 50 โดยปริมาตรซึ่งอากาศที่บรรจุเข้ามาจะถูกทำให้มีขนาดเล็กลง (ประมาณ 50 ไมโครเมตร) ด้วยใบพัด

ในถังปั่น นอกจากนี้การกระจายตัวของอากาศก็มีความสำคัญต่อคุณภาพของไอศกรีม เช่น เนื้อสัมผัสของไอศกรีม (Andreasen and Nielsen, 1998)

2) การเปลี่ยนสถานะของน้ำ น้ำในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมประมาณร้อยละ 50 จะเกิดเป็นผลึกน้ำแข็ง (Andreasen and Nielsen, 1998) นอกจากนี้อัตราการทำให้แข็งตัวจะส่งผลต่อขนาดของผลึกน้ำแข็งภายในโครงสร้างของไอศกรีม โดยถ้าอัตราการทำให้แข็งตัวเร็วจะทำให้ผลึกน้ำแข็งที่ได้มีขนาดเล็กซึ่งจะส่งผลดีต่อคุณภาพของไอศกรีมคือ เมื่อรับประทานไอศกรีมจะไม่พบว่าผลึกน้ำแข็งในผลิตภัณฑ์ไอศกรีมสุดท้าย (Varnam and Sutherland, 1994)

3) การสูญเสียความคงตัวของอนุภาคเม็ดไขมัน (Fat destabilization) ในขณะที่ทำการปั่นส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม แรงเฉือนที่เกิดขึ้นเป็นสาเหตุทำให้อนุภาคไขมันเกิดการชนกันและรวมตัวกัน โดยในส่วนพื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันที่ถูกดูดซับด้วยอิมัลซิไฟเออร์พบว่าผลึกไขมันสามารถแทงทะลุออกมาจากพื้นผิวดังกล่าวเหนี่ยวนำให้เกิดการสูญเสียความคงตัวของอนุภาคเม็ดไขมันจะส่งผลให้อนุภาคเม็ดไขมันเกิดการรวมตัวกันบางส่วนหรือที่เรียกว่า Partial coalescence ซึ่งลักษณะดังกล่าวจะส่งผลดีต่อคุณภาพของไอศกรีม โดยอนุภาคเม็ดไขมันเกิดการรวมตัวกันบางส่วนนี้จะอยู่บริเวณพื้นผิวระหว่างเฟสที่เป็นอากาศและน้ำในระหว่างการตีปั่นซึ่งจะช่วยป้องกันการรวมตัวกันของอากาศทำให้โครงสร้างไอศกรีมมีความคงตัวมากขึ้น (Clarke, 2004)

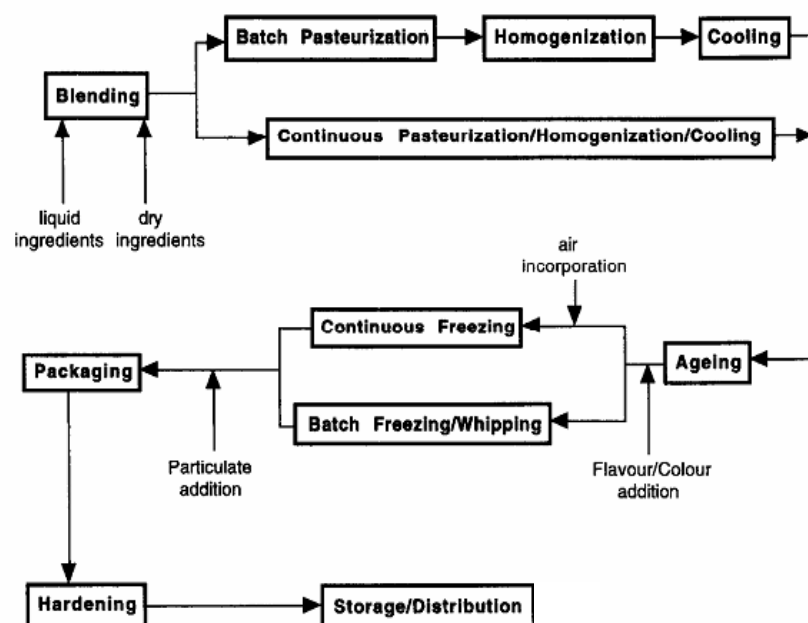
ฉ. การแช่แข็ง (Hardening)

ไอศกรีมที่ได้จากเครื่องปั่นไอศกรีมมีลักษณะที่ค่อนข้างเหลว ไม่มีรูปร่างที่คงตัว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีขั้นตอนในการแช่แข็งไอศกรีม โดยทั่วไปอุณหภูมิที่ใช้ในการแช่แข็งนิยมที่อุณหภูมิประมาณ -30 ถึง -45 องศาเซลเซียส เพื่อรักษาให้ลักษณะเนื้อสัมผัสและโอเวอร์รันของไอศกรีมยังคงอยู่ (Clarke, 2004) นอกจากนี้การแช่แข็งทันทีหลังจากปั่นไอศกรีมช่วยลดการเกิดผลึกใหม่ของผลึกน้ำแข็ง (Recrystallization) ระหว่างการเก็บไอศกรีม (Ruger, Baer and Kasperson, 2002) ปัจจัยที่มีผลต่อระยะเวลาในการแช่แข็งได้แก่ ขนาดและรูปร่างของภาชนะบรรจุ การหมุนเวียนของอากาศ อุณหภูมิของลม ตำแหน่งของผลิตภัณฑ์ในห้องแช่แข็ง อุณหภูมิของไอศกรีมขณะออกจากเครื่อง องค์ประกอบของไอศกรีม เปอร์เซนต์โอเวอร์รัน เป็นต้น (วรรณา ดังเจริญชัย และวิบูลย์ศักดิ์ กาวิละ, 2531)

ช. การเก็บไอศกรีม (Storage)

ผลิตภัณฑ์ไอศกรีมสุดท้ายควรเก็บรักษาที่อุณหภูมิคงที่เพื่อป้องกันการเกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ โดยทั่วไปใช้อุณหภูมิประมาณ -25 ถึง -30 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมินี้น้ำประมาณร้อยละ 90 กลายเป็นน้ำแข็ง (Andreasen and Nielsen, 1998) ในบางกรณีอาจเก็บรักษาที่อุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ

-13 ถึง -18 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิดังกล่าวเหมาะสำหรับการขนส่งหรือการเก็บในช่วงระยะเวลานาน (Varnam and Sutherland, 1994) โดยกระบวนการผลิตไอศกรีมทั้งที่เป็นการผลิตแบบต่อเนื่อง (Continuous process) และแบบ Batch ได้แสดงไว้ในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 กระบวนการผลิตไอศกรีม

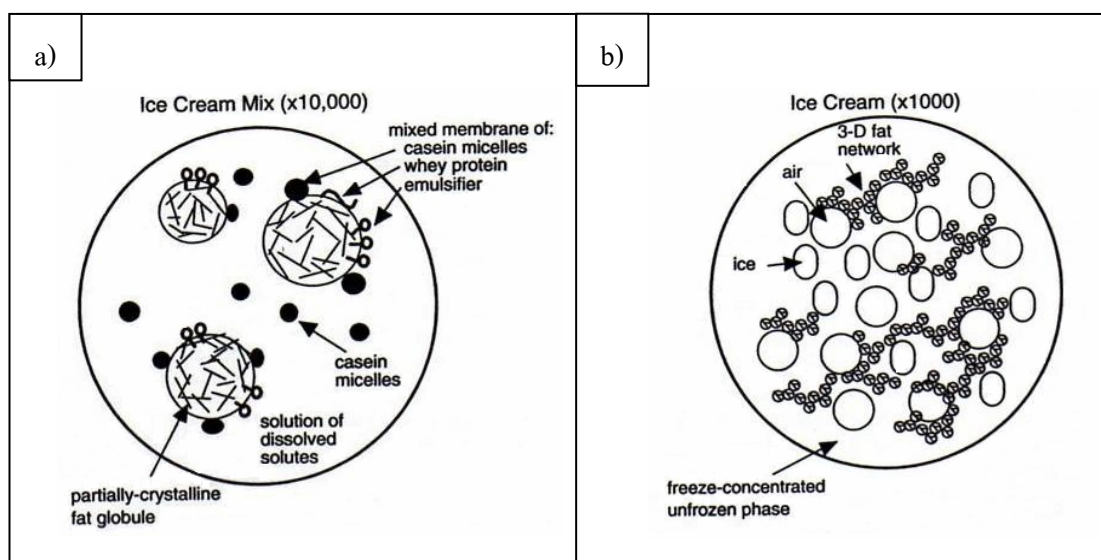
แหล่งที่มา : Goff (1997b)

2.1.2 โครงสร้างทางกายภาพของไอศกรีม

ไอศกรีมถือว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่จัดอยู่ในระบบคอลลอยด์ที่มีความซับซ้อน (Complex colloid) โดยส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมหรือที่เรียกว่า Ice cream mix หมายถึง ส่วนประกอบที่ผ่านการปั่นผสมแล้วแต่ยังไม่ผ่านการแช่เยือกแข็ง โดยส่วนผสมนี้ไม่รวมถึงฟองอากาศและสารปรุงแต่งกลิ่นรส ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมประกอบไปด้วยอนุภาคเม็ดไขมันซึ่งบริเวณพื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันประกอบด้วยโปรตีนและอิมัลซิไฟเออร์โดยที่อนุภาคเม็ดไขมันเหล่านี้จะกระจายตัวอยู่ในชั้นของเหลวที่ไม่แข็งตัว (Unfrozen matrix) ของเคซีน ไมเซลล์ (Casein micelle) โปรตีนเวย์บางส่วนที่ไม่ดูดซับที่พื้นผิวเม็ดไขมัน โพลีแซคคาไรด์ น้ำตาลและเกลือดังแสดงในภาพที่ 2.2 (a) (Marshall et al., 2003; Clarke, 2004) โดยทั่วไปแล้วไอศกรีมจะประกอบด้วยน้ำแข็งร้อยละ 30 อากาศร้อยละ 50 ไขมันร้อยละ 5 และชั้นของเหลวที่ไม่แข็งตัวร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก (Clarke, 2004) เมื่อพิจารณาโครงสร้างทางกายภาพของไอศกรีมพบว่า ไอศกรีมประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ได้แก่ ฟองอากาศ ผลึกน้ำแข็งซึ่งจะกระจายอยู่ในชั้นของเหลวที่ไม่แข็งตัว โดยผลึกน้ำแข็งและ

ฟองอากาศจะมีขนาดอยู่ในช่วง 20 ถึง 50 ไมโครเมตร และ 50 ถึง 100 ไมโครเมตร ตามลำดับ (Caldwell, Goff and Stanley, 1992)

นอกจากนี้ ในส่วนของเฟสกระจายยังประกอบไปด้วยเม็ดไขมันที่เกิดจากรวมตัวกันบางส่วน (Partially-coalesced fat globule) เพื่อขึ้นรูปเป็นโครงร่างตาข่ายของไขมัน (Fat network) ส่วนของโครงร่างตาข่ายของไขมันนี้เองมีส่วนช่วยให้ฟองอากาศและผลิตภัณฑ์น้ำแข็งในระบบไอศกรีมมีความคงตัวมากขึ้น (Clarke, 2004) ดังแสดงไว้ในภาพที่ 2.2 (b) นอกจากนี้ยังช่วยให้ไอศกรีมมีเนื้อสัมผัสที่เนียน (Smoothness) มีอัตราการละลายที่ช้าลงและมีการรักษารูปทรงขณะที่ละลายได้ดี (Barfod, Krog, Larsen and Buchneim, 1991)



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างทางกายภาพของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม (Ice cream mix) และไอศกรีม (Ice cream)

แหล่งที่มา : Marshall et al. (2003)

2.2 ปัจจัยทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีที่มีผลต่อลักษณะที่ดีของไอศกรีม

2.2.1 ปัจจัยทางด้านการผลิต

2.2.1.1 ขั้นตอนของการผสมส่วนผสม

ในการผลิตไอศกรีมพบว่า ขั้นตอนในการผสมส่วนผสมมีความสำคัญพอ ๆ กับ ขั้นตอนการปั่นและการแช่แข็งส่วนผสม โดยเฉพาะลำดับประเภทของวัตถุดิบก่อนการผสมเช่น ส่วนผสมที่เป็นของเหลวจะผสมลงไปแล้วให้ความร้อนจากนั้นจึงเติมส่วนผสมของแข็งอย่างช้า ๆ เพื่อป้องกันส่วนผสมไม่ให้จับตัวเป็นก้อน สีและกลิ่นควรเติมในส่วนผสมเป็นลำดับสุดท้ายก่อนที่จะนำส่วนผสมไปปั่นเนื่องจากสารปรุงแต่งสีและกลิ่นเป็นสารที่ไวต่อความร้อน (Heat-

sensitive) (วรรณดา ตั้งเจริญชัย และวิบูลย์ศักดิ์ กาวิละ, 2531) จากการศึกษาของ Goff และ Jordan (1989) กล่าวว่าไ้วการเติมอิมัลซิไฟเออร์ในขั้นตอนก่อนกระบวนการโฮโมจีไนเซชันจะให้ค่าการสูญเสียความคงตัวของไขมัน (Fat destabilization) สูงกว่าการเติมในขั้นตอนก่อนการตีปั่นไอศกรีม ซึ่งจะส่งผลให้ไอศกรีมที่ได้มีคุณภาพที่ดีขึ้น

2.2.1.2 อุณหภูมิในการพาสเจอร์ไรซ์

อุณหภูมิในการพาสเจอร์ไรซ์มีผลต่อการเสถียรภาพธรรมชาติของโปรตีนซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญมากในการผลิตไอศกรีมโดยเฉพาะโปรตีนเวย์ (Whey protein) เป็นโปรตีนที่มีรูปร่างเป็นก้อนกลม (Globular protein) และมีความไวต่อความร้อน (Heat sensitive) (Euston et al., 1996; Parkinson and Dickinson, 2004) โดยโปรตีนเวย์สามารถเกิดการเสถียรภาพธรรมชาติได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 70 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิของการพาสเจอร์ไรซ์ (Smits and Van Brouwershaven, 1980) การเสถียรภาพของโปรตีนดังกล่าวส่งผลให้โครงสร้างของโปรตีนเปิดตัวออกโดยส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic part) ซึ่งอยู่ภายในโมเลกุลของโปรตีนจะออกมาสู่ภายนอกทำให้คุณสมบัติของโปรตีนเปลี่ยนแปลงไปทำให้โปรตีนมีคุณสมบัติในการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่ดีขึ้นเนื่องจากโปรตีนที่เปิดตัวออกแล้วสามารถเคลื่อนที่ไปยังพื้นผิวระหว่างเฟสที่เป็นน้ำและน้ำมันโดยหันส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic part) เข้าสู่ น้ำและหันส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic part) เข้าสู่ น้ำมันทำให้สามารถลดแรงตึงผิวได้ (จิรวัดน์ ยงสวัสดิกุล, 2549; Andreasen and Nielsen, 1998) นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการจับกับน้ำ (Water-binding capacity) ให้มากขึ้นเท่ากับที่พบในเคซีนคือ ประมาณ 3 กรัม น้ำต่อกรัม โปรตีน (Andreasen and Nielsen, 1998) จากการทดลองของ Cano-Ruiz และ Richter (1997) พบว่าการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง (85 องศาเซลเซียส 15 นาที) ทำให้อนุภาคเม็ดไขมันในนมมีขนาดเล็กกว่าที่อุณหภูมิต่ำ (65 องศาเซลเซียส 30 นาที) และทำให้โปรตีนเวย์เสถียรภาพธรรมชาติและพบว่ามีปริมาณของ β -lactoglobulin (β -Lg) และ α -Lactalbumin (α -La) ลดลงได้โดยตรงที่พื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันมากขึ้นเนื่องจากที่อุณหภูมิดังกล่าวทำให้โปรตีนเวย์เกิดการเสถียรภาพธรรมชาติซึ่งจะส่งผลให้โปรตีนเคซีนดูดซับที่พื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันได้น้อยลง นอกจากนี้ Andreasen และ Nielsen (1998) กล่าวว่าไ้วการเสถียรภาพธรรมชาติของโปรตีนจะส่งผลดีต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้ายของไอศกรีมคือทำให้ไอศกรีมมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่มีความเนียนและมีลักษณะที่เป็นเนื้ออาหารมากขึ้น

2.2.1.3 การลดขนาดเม็ดไขมัน

การลดขนาดเม็ดไขมันมีความสำคัญมากในระหว่างการผลิตไอศกรีม โดยการลด

ขนาดเม็ดไขมันเพื่อป้องกันการ Churning และช่วยปรับปรุงคุณสมบัติในการตีปั่นไอศกรีมรวมทั้งการบรรจุอากาศเข้าไปในโครงสร้างของไอศกรีม (Varnam and Sutherland, 1994) การใช้ระดับความดันในการโฮโมจิไนซ์ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่แตกต่างกันจะส่งผลให้ส่วนผสมมีขนาดอนุภาคเม็ดไขมันและปริมาณโปรตีนที่ดูดซับที่พื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันที่ต่างกันคือ ถ้าใช้ความดันในการโฮโมจิไนซ์ที่สูงจะทำให้มีแรงเฉือนสูงส่งผลให้ขนาดอนุภาคไขมันมีขนาดเล็กลงและยังช่วยให้มีปริมาณโปรตีนดูดซับที่พื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันเพิ่มมากกว่าการใช้ความดันระดับที่ต่ำกว่า (Cano-Ruiz and Richter, 1997) นอกจากนี้การใช้ความดันที่สูงเกินไปอาจส่งผลให้อนุภาคเม็ดไขมันมีขนาดเล็กเกินไปและเกิดการเกาะกลุ่มกันของเม็ดไขมันซึ่งส่งผลเสียต่อคุณภาพของไอศกรีมคือ ทำให้เกิด Phase reversal เช่น การผลิตเนย (Buttering) ในระหว่างการตีปั่นไอศกรีม (Varnam and Sutherland, 1994) โดยระดับความดันที่เหมาะสมในการโฮโมจิไนซ์ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมจะขึ้นอยู่กับปริมาณของไขมันที่ใช้คือ ถ้าในสูตรส่วนผสมมีปริมาณไขมันมากพบว่าไขมันมีโอกาสที่จะเกิดการชนกันได้มากกว่าสูตรที่มีปริมาณไขมันน้อยกว่า ดังนั้นควรเลือกใช้ระดับความดันที่ต่ำกว่าสูตรส่วนผสมที่มีปริมาณไขมันน้อย (Andreasen and Nielsen, 1998)

นอกจากนี้ Ruger, Baer และ Kasperson (2002) ยังพบว่าการใช้กระบวนการโฮโมจิไนเซชัน 2 รอบ (Double homogenization) ในสูตรไอศกรีมที่มีสารเพิ่มความคงตัวเป็นส่วนประกอบส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่ได้มีขนาดเฉลี่ยของผลึกน้ำแข็งที่เล็กลงเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้กระบวนการโฮโมจิไนเซชันเพียงรอบเดียว (Single homogenization) และส่งผลให้การโตของผลึกน้ำแข็งในระหว่างการเก็บรักษาลดลงเช่นกัน แต่เมื่อพิจารณาถึงลักษณะทางประสาทสัมผัสพบว่าไอศกรีมที่ผ่านกระบวนการโฮโมจิไนเซชัน 2 รอบไม่มีความแตกต่างกับไอศกรีมที่ผ่านกระบวนการโฮโมจิไนเซชันเพียงรอบเดียว

2.2.1.4 ระยะเวลาในการบ่ม

การบ่มส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญต่อคุณภาพของไอศกรีมเนื่องจากการบ่มทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมอันได้แก่การดูดซับน้ำของส่วนประกอบแห้ง การเกิดผลึกของไขมันและการแทนที่โปรตีนนมด้วยอีมัลซิไฟเออร์ เป็นต้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้าย (Andreasen and Nielsen, 1998) ระยะเวลาในการบ่มถือว่าเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญมากในขั้นตอนของการบ่มส่วนผสม การทดลองของ Barfod และคณะ (1991) ได้ทำการศึกษาผลของการเกิดผลึกของไขมันที่ระยะเวลาในการบ่มที่ต่างกันในระบบอีมัลชันของไอศกรีมโดยใช้ไขมันมะพร้าวเป็นแหล่งไขมันพบว่าในระบบที่ไม่มีอีมัลซิไฟเออร์หลังจากบ่มเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ปริมาณไขมันที่เกิดผลึกที่เท่ากับร้อยละ 75 ในขณะที่ระบบมี GMS ซึ่ง

เป็นอิมัลซิไฟเออร์พบว่าการเกิดผลึกของไขมันเริ่มขึ้นเมื่อเริ่มบ่มส่วนผสมและปริมาณไขมันที่เกิดผลึกเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ และคงที่ที่ร้อยละ 96 หลังจากบ่มที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังพบว่าการเกิดผลึกของไขมันในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ประกอบด้วยไขมันนมร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต้องการเวลาในการบ่มอย่างน้อย 4 ชั่วโมงเพื่อให้ไขมันเกิดเป็นผลึกได้อย่างสมบูรณ์

ส่วนผลของระยะเวลาการบ่มต่อปริมาณการดูดซับของโปรตีนบริเวณพื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันในระบบอิมัลชันน้ำมันในน้ำที่มี SMP เป็นส่วนประกอบพบในการทดลองของ Granger, Barey, Veschambre และ Cansell (2005) ซึ่งพบว่าหลังจากบ่มส่วนผสมที่ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ปริมาณโปรตีนที่บริเวณพื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะก่อนบ่มทั้งนี้เนื่องจากอิมัลซิไฟเออร์เข้าแทนที่โปรตีนบนระหว่างกระบวนการบ่มส่วนผสมทำให้โปรตีนหลุด (Desorption) ออกจากพื้นผิวเม็ดไขมันซึ่งการแทนที่โปรตีนด้วยอิมัลซิไฟเออร์จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำเนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำ อิมัลซิไฟเออร์มีความสามารถในการลดพลังงานอิสระบริเวณพื้นผิวของน้ำมันและน้ำ (Interfacial free energy) ได้มากกว่าโปรตีน (Dickinson, 1999; Euston, 1997; Granger et al., 2003)

2.2.1.5 ระยะเวลาในตีปั่นไอศกรีม

ระยะเวลาในการตีปั่นไอศกรีมมีผลโดยตรงต่อคุณภาพของไอศกรีม เมื่อได้รับแรงเนื่องจากการตีปั่นพบว่า อนุภาคไขมันภายในโครงสร้างจะเกิดการสูญเสียความคงตัวซึ่งลักษณะดังกล่าวจะส่งผลดีต่อไอศกรีมในด้านต่าง ๆ ได้แก่ มีเนื้อสัมผัสที่มีความเนียนมากขึ้นและมีการละลายที่ช้าลงเนื่องจากโครงสร้างของฟองอากาศแข็งแรงขึ้นจากการที่มีโครงร่างตาข่ายของไขมัน (Fat network) ปกคลุมอยู่บริเวณรอบ ๆ ฟองอากาศ (Berger, 1976; Goff and Jordan, 1989) การศึกษาของ Goff และ Jordan (1989) และ Goff, Liboff, Jordan และ Kinsella (1987) ได้ศึกษาถึงผลของระยะเวลาในการตีปั่นไอศกรีมต่อค่า Fat destabilization ในตัวอย่างไอศกรีมพบว่าเมื่อใช้ระยะเวลาในการตีปั่นไอศกรีมนานขึ้นไอศกรีมที่ได้จะมีค่า Fat destabilization มากขึ้นซึ่งผลดังกล่าวจะทำให้ได้ไอศกรีมที่มีคุณภาพดีเช่น มีการละลายที่ช้าลงหรือมีการรักษารูปทรงขณะละลายได้ดีขึ้น โดย Muse และ Hartel (2004) ได้กล่าวไว้ว่าการรักษารูปทรงของไอศกรีมขณะละลายขึ้นอยู่กับค่า Fat destabilization โดยไอศกรีมที่มีค่า Fat destabilization น้อยกว่าร้อยละ 30 จะละลายอย่างรวดเร็วและไม่สามารถรักษารูปทรงของไอศกรีมไว้ได้ ในขณะที่ไอศกรีมที่มีค่า Fat destabilization มากกว่าร้อยละ 50 ยังคงสามารถรักษารูปทรงไว้ได้ดี นอกจากนี้ยังพบว่าระยะเวลาการตีปั่นไอศกรีมนานเกินไปจะทำให้ค่าการขึ้นโฟมของไอศกรีมลดลงหรือเรียกว่าเกิด Over whipping (Chang and Hartel, 2002)

2.2.2 ปัจจัยทางด้านองค์ประกอบทางเคมี

2.2.2.1 ไขมัน

ไขมันถือว่าเป็นส่วนประกอบหลักที่ใช้ในการผลิตไอศกรีม การใช้ไขมันที่ต่างชนิดกันเช่น ไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวซึ่งไขมันทั้งสองชนิดมีคุณสมบัติที่ต่างกันจะส่งผลต่อคุณภาพที่ต่างกันของไอศกรีม จากการศึกษาก่อนหน้านี้พบว่าไอศกรีมที่ใช้ไขมันชนิดอิ่มตัวเป็นส่วนประกอบจะมีขนาดของอนุภาคเม็ดไขมันใหญ่กว่าไอศกรีมที่ใช้ไขมันชนิดไม่อิ่มตัวแสดงว่าไอศกรีมที่ใช้ไขมันชนิดอิ่มตัวเกิดการรวมตัวกันของอนุภาคเม็ดไขมันได้มากกว่าไอศกรีมที่ใช้ไขมันชนิดไม่อิ่มตัว และยังพบว่าไอศกรีมที่ใช้ไขมันชนิดอิ่มตัวจะมีอัตราการละลายช้ากว่าไอศกรีมที่ใช้ไขมันชนิดไม่อิ่มตัว ทั้งนี้เนื่องมาจากโครงสร้างของไอศกรีมดังกล่าวมีไขมันชนิดอิ่มตัวเป็นส่วนประกอบทำให้มีการรวมตัวของอนุภาคไขมันมากขึ้นส่งผลให้ส่วนของของเหลวที่ไม่แข็งตัวไหลออกจากโครงสร้างของไอศกรีมได้ยาก (Granger et al., 2005) นอกจากนี้ Granger และคณะ (2005) ยังได้ทำการศึกษาดังกล่าวถึงผลของชนิดของไขมันต่อพฤติกรรมทางเคมีกายภาพ (Physicochemical behavior) ในระบบอิมัลชันประเภทน้ำมันในน้ำพบว่า ชนิดของไขมันมีผลต่อขนาดของอนุภาคเม็ดไขมัน พฤติกรรมการไหล รวมทั้งลักษณะของการดูดซับและการถูกแทนที่ของโปรตีนในระหว่างและหลังจากการบ่มโดยจะขึ้นอยู่กับความจำเพาะเจาะจงของส่วนที่ไม่ชอบน้ำของโมเลกุลและโดยเฉพาะอย่างยิ่งความเข้ากันได้พอดีระหว่างกรดไขมัน (Fatty acid) ของอิมัลซิไฟเออร์ชนิดโมโนและไดกลีเซอไรด์กับเฟสของไขมัน อย่างไรก็ตาม Keeney และ Kroger (1974) พบว่าการเพิ่มปริมาณไขมันในสูตรส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมช่วยให้ไอศกรีมที่ได้มีขนาดผลึกน้ำแข็งเล็กลงซึ่งจะส่งผลถึงคุณภาพทางประสาทสัมผัสที่ดีของไอศกรีม

2.2.2.2 โปรตีน

ชนิดของโปรตีนที่ใช้ในการผลิตไอศกรีมถือว่ามีความสำคัญต่อคุณภาพของไอศกรีมที่ได้ จากการทดลองของ Parsons และคณะ (1985) ซึ่งทำการศึกษารายละเอียดของผู้บริโภคในผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ WPC หรือ SC แทนการใช้นมผงพร่องมันเนย (Nonfat dry milk : NFDM) พบว่าไอศกรีมที่มีส่วนผสมของโปรตีนเวย์จะให้ลักษณะที่เหมือนหรือดีกว่าไอศกรีมที่ทำจากนมผงพร่องมันเนยเล็กน้อย และไอศกรีมที่มีส่วนผสมของโปรตีนเวย์จะให้ลักษณะที่เป็นครีม (Creaminess) และเนื้อสัมผัสมีความเนียนมากกว่าไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SC โดยไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SC ให้คุณภาพของไอศกรีมที่ไม่ดีและมีรสชาติหลังจากการรับประทาน (Aftertaste) เปรี้ยวหรือขม ในขณะที่ SC เป็น Emulsifying agent และ Foaming agent ที่ใช้ผลิตภัณฑ์ไอศกรีมช่วยให้ไอศกรีมที่ได้มีลักษณะเป็นเนื้ออาหารและมีความเนียน (Zayas, 1997) อย่างไรก็ตามวรรณาดังเจริญชัย และวิบูลย์ศักดิ์ กาวิละ (2531) และ Bird, Sandler และ Iverson (1935) พบว่า

การใช้เคซีนเป็นส่วนประกอบในการผลิตไอศกรีมจะช่วยทำให้ค่าการขึ้นโฟมของไอศกรีมเพิ่มขึ้น การทดลองของ Palanuwech และ Coupland (2003) และ Segall และ Goff (1999) ได้ศึกษาถึงผลของ ชนิดของโปรตีนนมต่อการเกิดการรวมตัวกันบางส่วนของอนุภาคเม็ดไขมันพบว่าโปรตีนเวย์มี แนวโน้มที่จะเกิดการรวมตัวกันบางส่วน (Partial coalescence) ของไขมันมากกว่าโปรตีนเคซีนเนื่องจาก โปรตีนเวย์มีรูปร่างเป็นก้อนกลมและจัดเรียงตัวบริเวณพื้นผิวระหว่างเฟสที่เป็นน้ำและน้ำมัน เป็นชั้นที่มีลักษณะบาง (Thin interfacial layer) จึงส่งผลให้ผลึกไขมันในอนุภาคเม็ดไขมันมีโอกาสที่จะ แทะทะลุออกมาจากพื้นผิวเม็ดไขมันได้มากกว่าซึ่งลักษณะของการเกิดการรวมตัวกันบางส่วน ของไขมันที่เกิดขึ้นจะส่งผลต่อคุณภาพของไอศกรีม ได้แก่ อัตราการละลายที่ช้าลง เป็นต้น จากการ วิจัยของ Cornec, Mackie, Wilde และ Clark (1996) และ Cornec และคณะ (1998) พบว่าระบบ อิมัลชันที่มีเบต้า-เคซีน (β casein) มีความไม่คงตัวมากกว่าระบบที่มี β -lactoglobulin (β -Lg) ใน สภาวะที่มีอิมัลซิไฟเออร์ชนิด Span 80 ภายใต้สภาวะที่ได้รับแรงเฉือนเนื่องจาก Span 80 ซึ่งเป็น อิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายในน้ำมันสามารถเข้าแทนที่เบต้า-เคซีนที่อยู่บริเวณพื้นผิวระหว่างเฟสที่เป็น น้ำและน้ำมันได้เร็วกว่าเบต้า-แลคโตโกลบูลินทำให้ระบบอิมัลชันมีความไม่คงตัวมากขึ้น

นอกจากนี้ Segall และ Goff (1999) ยังพบว่าโปรตีนจาก WPI หรือ SC มีความเหมาะสมใน การเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ในการผลิตไอศกรีมมากกว่าโปรตีนเวย์ที่ผ่านการย่อยแล้ว (Whey protein hydrolysate: WPH) และ SMP เนื่องจากการใช้โปรตีนจาก WPH หรือ SMP ในปริมาณที่มากแม้ว่า จะช่วยให้ระบบอิมัลชันมีความคงตัวในสภาวะที่ปราศจากแรงกระทำ (Quiescent stability) แต่จะมี ข้อเสียคือ ทำให้ระบบอิมัลชันมีความคงตัวมากเกินไป ดังนั้นเมื่อได้รับแรงกระทำส่งผลให้ระบบไม่ เกิดการสูญเสียความคงตัวซึ่งการสูญเสียความคงตัวของระบบอิมัลชันนี้เองเป็นสิ่งที่จำเป็นในการ สร้างโครงร่างของระบบไอศกรีม การศึกษาผลของชนิดโปรตีนนมต่อความคงตัวของระบบอิมัลชัน น้ำมันในน้ำภายใต้แรงเฉือนซึ่งเป็นสภาวะจำลองการให้แรงในระหว่างการตีปั่นไอศกรีมโดย Pelan, Watts, Campbell และ Lips (1997) พบว่า SMP ทำให้ระบบอิมัลชันมีความคงตัวหรือเสถียรมากที่สุด รองลงมาคือ SC และโปรตีนเวย์ ตามลำดับ เนื่องจากโปรตีนจาก SMP มีปริมาณสูงสุดที่บริเวณ พื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันในระบบอิมัลชันทำให้เกิด Steric effect ของโปรตีนส่งผลให้มีความ ด้านทานต่อการรวมตัว (Coalescence) ของอนุภาคเม็ดไขมันได้มากกว่า นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษา เกี่ยวกับการแข่งขันกันในการดูดซับระหว่างเคซีนและโปรตีนเวย์ในระบบอิมัลชันน้ำมันในน้ำ ภายใต้แรงเฉือน (Burn and Dalgleish, 1999; Dalgleish, Goff and Luan, 2002; Dalgleish, Goff, Burn and Luan, 2002) ผลการวิจัยพบว่าโปรตีนเวย์สามารถแทนที่เคซีนบริเวณพื้นผิวระหว่างเฟสที่ เป็นน้ำและน้ำมันได้ในสภาวะที่มีการให้ความร้อนเพื่อให้โปรตีนเวย์สูญเสียสภาพธรรมชาติและ แสดงความเป็น Surface active ของโปรตีนเวย์ได้มากขึ้น

2.2.2.3 สารเพิ่มความคงตัว

สารเพิ่มความคงตัวที่ใช้ในการผลิตไอศกรีมมีผลต่อคุณภาพของไอศกรีมได้แก่ ช่วยเพิ่มความหนืดให้กับส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม ป้องกันการยุบหรือการแตกตัว (Shrinkage) ของไอศกรีมในระหว่างการเก็บรักษา และให้เนื้อสัมผัสที่มีความเนียนระหว่างการบริโภค เป็นต้น (Marshall et al., 2003) สารเพิ่มความคงตัวส่วนมากจะเป็นสารประเภทไฮโดรคอลลอยด์ (Hydrocolloid) ที่นิยมใช้ในการผลิตไอศกรีมมีหลายชนิดได้แก่ เจลาติน (Gelatin) อะราบิกกัม (Arabic gum) โคลด์สปีนิกัม กัวกัม แซนแทนกัม (Xantan gum) โซเดียมอัลจีเนต (Sodium alginate) คาราจีแนน โซเดียม คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เป็นต้น (Andreasen and Nielsen, 1998; Marshall et al., 2003) นักวิจัยหลายกลุ่มได้ทำการศึกษาถึงบทบาทและหน้าที่ของสารเพิ่มความคงตัว โดยเฉพาะ คาราจีแนน ไว้อย่างมากมาย (Thaiudom and Goff, 2003; Spagnuolo et al., 2005; Ji et al., 2008) เนื่องจากสารดังกล่าวสามารถป้องกันหรือยับยั้งการแยกชั้นระหว่างโปรตีนนมและโพลีแซคคาไรด์ หรือที่เรียกว่า Wheying off ซึ่งปรากฏการณ์นี้ส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของไอศกรีมหรือผลิตภัณฑ์นมที่เกี่ยวข้อง จากการทดลองของ Spagnuolo และคณะ (2005) พบว่า แคปปา-คาราจีแนน (κ -carrageenan) จะเข้าดูดซับ (Adsorption) บริเวณพื้นผิวของเคซีน ไมเซลล์เนื่องจากแคปปา-คาราจีแนน มีกลุ่มของซัลเฟต (Sulfate group) ซึ่งมีประจุลบอยู่ภายในโครงสร้างที่สามารถทำอันตรกิริยากับ แคปปา-เคซีนซึ่งมีประจุบวกที่กรดอะมิโนตำแหน่งที่ 97 ถึง 112 ด้วยแรงกระทำทางไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic interaction) นอกจากนี้การเกาะกลุ่มกันเป็นเครือข่ายแบบฮีลิกซ์ (Helix) และเกิดเป็น เจลอ่อน ๆ (Weak gel) ของแคปปา-คาราจีแนนช่วยป้องกันการแยกชั้นของเคซีน ไมเซลล์กับโพลีแซคคาไรด์ได้ (Dalglish and Morris, 1988; Snoeren, Payens, Jeunink and Both, 1975) การทดลองของ Ji และคณะ (2008) ยังพบว่าเคซีน ไมเซลล์และแคปปา-คาราจีแนนสามารถเกิดการเกาะกลุ่มภายใต้แรงเฉือนได้ซึ่งความแข็งแรงของการเกาะกลุ่มกันขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ความเข้มข้นของแคปปา-คาราจีแนนและความเข้มข้นของโพลีแซคคาไรด์ โดยที่การเกาะกลุ่มกันนี้เองช่วยป้องกันการแยกชั้นระหว่างโพลีแซคคาไรด์และโปรตีนนมอาจเนื่องมาจากการที่เคซีน ไมเซลล์สามารถจับกับแคปปา-คาราจีแนนได้โดยตรงหรือเกิดจากการเกิดเจล (Gelation) ของแคปปา-คาราจีแนนทำให้เคซีนถูกกักขังไว้ในโครงสร้างเจลที่แคปปา-คาราจีแนนสร้างขึ้นนั่นเอง

2.3 ระบบอิมัลชัน

อิมัลชัน (Emulsion) เป็นระบบที่ประกอบด้วยของเหลว 2 ชนิด ที่ไม่ละลายซึ่งกันและกัน โดยทั่วไปจะเป็นน้ำและน้ำมันซึ่งประกอบด้วยเฟสกระจาย (Dispersed phase) และเฟสต่อเนื่อง (Continuous phase) ในระบบอาหารพบว่า อนุภาคของเฟสกระจายมีขนาดอยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 100 ไมโครเมตร (Dickinson and Stainsby, 1982; Dickinson, 1992)

ระบบอิมัลชันแบ่งออกเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ ตามการกระจายตัวของเฟสน้ำและน้ำมันได้แก่

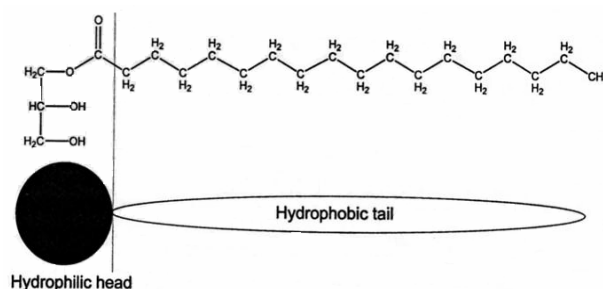
- 1) ระบบอิมัลชันประเภทน้ำในน้ำมัน (Water-in-oil emulsion) ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคของน้ำกระจายตัวอยู่ในเฟสของน้ำมันเช่น มาการีน เนย ผลิตภัณฑ์สำหรับทา (Spreads) และ 2) ระบบอิมัลชันประเภทน้ำมันในน้ำ (Oil-in-water emulsion) ประกอบด้วยอนุภาคของเมื่อน้ำมันกระจายตัวอยู่ในเฟสของน้ำ เช่น มายองเนส นม ชุป ซอส ไอศกรีม อย่างไรก็ตามอิมัลชันถือว่าเป็นระบบที่ไม่มีความคงตัวในเชิงเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic unstable) เนื่องจากความแตกต่างของแรงตึงผิวระหว่างน้ำและน้ำมันทำให้ระบบเกิดการจัดเรียงตัวใหม่เพื่อลดแรงตึงผิวหรือพลังงานอิสระที่ผิว (Surface free energy) ส่งผลให้ระบบอิมัลชันไม่มีความคงตัวนำไปสู่การแยกชั้นของอิมัลชัน (Phase separation) (Goff, 1997a) ความไม่คงตัวของอิมัลชันเป็นกระบวนการที่รวมหลายกลไกไว้ด้วยกันสามารถแบ่งได้เป็น 4 ชนิด ได้แก่ 1) การแยกชั้น (Creaming) เป็นปรากฏการณ์ที่เฟสกระจายเคลื่อนที่แยกออกจากเฟสต่อเนื่องเนื่องจากความแตกต่างของค่าความหนาแน่นระหว่างเฟสทั้งสองทำให้เฟสกระจายแยกตัวลอยขึ้น 2) Ostwald ripening เป็นปรากฏการณ์ลำเลียงแบบแพร่ (Diffusion transport) ของเฟสกระจายจากอนุภาคเมื่อน้ำมันขนาดเล็กไปเป็นขนาดอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ 3) การเกาะกลุ่ม (Flocculation) เป็นปรากฏการณ์ที่อนุภาคเมื่อน้ำมันเคลื่อนที่เข้าหากันเกาะกลุ่มกันเนื่องจากการชนกันและ 4) การรวมตัว (Coalescence) เป็นปรากฏการณ์ที่อนุภาคเคลื่อนที่เข้าหากันซึ่งฟิล์มที่ล้อมรอบอนุภาคเกิดการฉีกขาดทำให้อนุภาคเมื่อน้ำมันเกิดการรวมตัวเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น (Bergensstahl, 1995) ดังนั้นนักวิทยาศาสตร์จึงมีความพยายามที่จะพัฒนาระบบอิมัลชันให้มีความคงตัวซึ่งระบบดังกล่าวจะส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้าย การทำให้ระบบอิมัลชันมีความคงตัวสามารถทำได้ 2 วิธี ได้แก่ 1) การใช้เครื่องมือกล เช่น เครื่องโฮโมจิไนเซอร์เพื่อกระจายและลดขนาดของอนุภาคเมื่อน้ำมันนำไปสู่การลดการแยกชั้น (Creaming) และ 2) การเติมสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) เช่น อิมัลซิไฟเออร์ โพลีเมอร์ ซึ่งสารดังกล่าวจะช่วยลดแรงตึงผิวระหว่างน้ำมันและน้ำส่งผลให้ระบบอิมัลชันมีความคงตัวมากขึ้น

อย่างไรก็ตาม ในระบบอิมัลชันของไอศกรีมนั้นมีความแตกต่างจากระบบอิมัลชันทั่วไปตรงที่อิมัลซิไฟเออร์ช่วยให้ระบบอิมัลชันของไอศกรีมมีความคงตัวในสภาวะปราศจากการรบกวนของระบบเช่น ในสภาวะการบ่มของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมแต่จะทำหน้าที่ลดความคงตัวของอนุภาคเมื่อน้ำมัน (Fat destabilization) ในระบบเนื่องจากการแทนที่โปรตีนที่อยู่บริเวณผิวของอนุภาคน้ำมันทำให้เกิดเป็นชั้นที่มีลักษณะบางซึ่งจะมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะทำให้ระบบมีความคงตัวในสภาวะการบ่มแต่ระบบอิมัลชันไม่มีความคงตัวเมื่อได้รับแรงกระทำ (Clarke, 2004) และจะเหนี่ยวนำให้เกิดการเชื่อมต่อของไขมันบางส่วนเพื่อให้เกิดโครงร่างของผลึกไขมันในสภาวะที่มีแรงเฉือนมากกระทำต่อระบบอิมัลชันหรือในระหว่างสภาวะการตีปั่นและแช่แข็งไอศกรีมซึ่งโครงร่างของผลึกไขมันนี้เองจะมีผลต่อความคงตัวของฟองอากาศในไอศกรีม (Goff, 1997a) ส่งผลต่อเนื่อง

ถึงคุณภาพและคุณลักษณะของไอศกรีมที่ได้เช่น ช่วยให้ไอศกรีมมีลักษณะเนื้อสัมผัสเนียน ช่วย
 ด้านทานการละลายของไอศกรีม

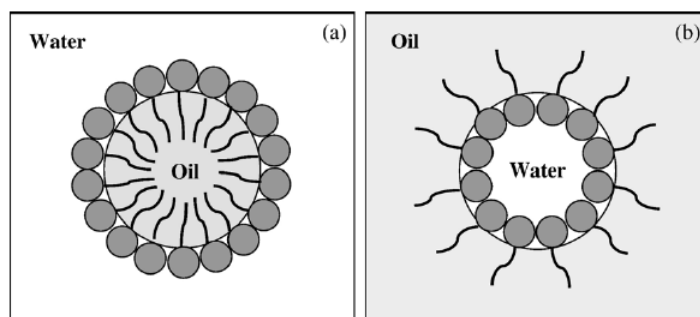
2.4 สารอิมัลซิไฟเออร์

อิมัลซิไฟเออร์เป็นสารที่มีลักษณะโมเลกุลทั้ง 2 แบบอยู่ในตัวมันเอง (Amphiphilic molecule) ประกอบด้วยส่วนที่มีขั้วหรือส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic part) และส่วนที่ไม่มีขั้วหรือส่วนที่ชอบน้ำมัน (Lipophilic part) ดังแสดงในภาพที่ 2.3 ด้วยเหตุนี้ทำให้อิมัลซิไฟเออร์มีคุณสมบัติที่เข้ากันได้ดีกับน้ำและน้ำมันในระดับหนึ่งและเรียงตัวอยู่ที่รอยต่อของน้ำมันและน้ำโดยหันส่วนที่มีขั้วเข้าหาน้ำและส่วนที่ไม่มีขั้วเข้าหาน้ำมันดังแสดงในภาพที่ 2.4 การจัดเรียงตัวบริเวณรอยต่อของอิมัลซิไฟเออร์จะช่วยทำให้ระบบอิมัลชันมีความคงตัวได้โดยลดแรงตึงผิวระหว่างทั้งสองเฟสหรือส่งเสริมการกระจายตัวของอนุภาคเมื่อน้ำมันในเฟสต่อเนื่องได้อย่างสม่ำเสมอ เพิ่มความยืดหยุ่น



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของอิมัลซิไฟเออร์ ประกอบด้วยส่วนที่มีขั้ว (Hydrophilic head) และส่วนที่ไม่มีขั้ว (Hydrophobic tail)

แหล่งที่มา : Clarke (2004)



ภาพที่ 2.4 การดูดซับของอิมัลซิไฟเออร์บริเวณรอยต่อของน้ำและน้ำมัน โดย
 (a) อิมัลชันประเภทน้ำมันในน้ำ และ (b) อิมัลชันประเภทน้ำในน้ำมัน

แหล่งที่มา : Lal, O'Connor and Eyres (2006)

แก่พื้นผิว (Surface elasticity) เพิ่มแรงผลักเนื่องจาก Electric double layer (กรณีของอิมัลซิไฟเออร์ประเภทที่มีประจุ) และยังสามารถเพิ่มความหนืดแก่พื้นผิว (Surface viscosity) อีกด้วย (Schramm, Stasiuk and Marangoni, 2003) เมื่อพิจารณาตามความสามารถในการละลายของอิมัลซิไฟเออร์ตามกฎของ Bancroft (1913) สามารถแบ่งอิมัลซิไฟเออร์ออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ อิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายได้ดีในน้ำ (Water-soluble emulsifier) และอิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายได้ดีในน้ำมัน (Oil-soluble emulsifier) โดยอิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายได้ในน้ำและน้ำมันจะสร้างระบบอิมัลชันที่มีน้ำและน้ำมันเป็นเฟสต่อเนื่อง ตามลำดับดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ความสามารถในการเกิดอิมัลชัน (Emulsifiability) เปรียบเทียบกับความสามารถในการละลายตามกฎของ Bancroft

Emulsifier	Solubility/Dispersibility	Type of emulsion
Sorbitan ester (Span)	Oil-soluble	Oil-continuous
Etoxylated sorbitan ester (Tween)	Water-soluble	Water-continuous
Hydrophobic lecithin (normal technical lecithin)	Oil-dispersible	Oil-continuous
Hydrophilic lecithin (High LPC or low PE)	Water-dispersible	Water-continuous
Protein	Water-soluble	Water-continuous
Fat crystal	Oil-dispersible	Oil-continuous

แหล่งที่มา : Ostberg, Bergenstahl and Hulden (1995)

ปัจจุบันพบว่าอิมัลซิไฟเออร์ที่นิยมใช้ในการผลิตไอศกรีมแบ่งออกเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ ได้แก่ โพลีซอลเบท (Polysorbate) และ โมโนและไดกลีเซอไรด์ (Mono- and diglycerides) (Marshall et al., 2003) เมื่อพิจารณาค่าสมดุลความชอบน้ำ-น้ำมัน (Hydrophilic-lipophilic balance : HLB) ซึ่งเป็นดัชนีที่บอกลักษณะความเป็นอิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifying characteristics) โดยเฉพาะอิมัลซิไฟเออร์ประเภทที่ไม่มีประจุ (Non-ionic surfactant) พบว่าโพลีซอลเบท เช่น Tween 60 และ Tween 80 เป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายได้ดีในน้ำเนื่องจากมีค่า HLB สูง ในขณะที่โมโนและไดกลีเซอไรด์ (Mono- and diglycerides) เช่น GMS และ GMO เป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายได้ดีในน้ำมันเนื่องจากมีค่า HLB ต่ำ ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่า Hydrophilic-lipophilic balance (HLB) ของอิมัลซิไฟเออร์ที่นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์ไอศกรีม

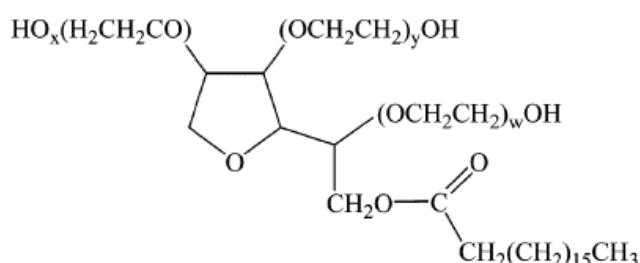
Chemical name	Common name	HLB value
Glycerol monostearate	GMS	3.8
Glycerol monooleate	GMO	2.8
Polyoxyethylene sorbitan monostearate	Tween 60	14.9
Polyoxyethylene sorbitan monooleate	Tween 80	15.0

แหล่งที่มา : Goff and Jordan (1989)

โดยทั่วไปแล้วความเข้มข้นของอิมัลซิไฟเออร์ที่ใช้ในการผลิตไอศกรีมคือ ร้อยละ 0.1 ถึง 0.2 โดยน้ำหนักสำหรับโมนและโคกลีเซอไรด์ และร้อยละ 0.02 ถึง 0.04 โดยน้ำหนักสำหรับ Tween 80 (Marshall et al., 2003) ซึ่งอิมัลซิไฟเออร์แต่ละชนิดจะมีลักษณะโครงสร้างและคุณลักษณะเฉพาะตัวที่แตกต่างกันออกไปดังนี้

2.4.1 โพลีออกซีเอทิลีน ซอบิแทน โมโนสเตียเรท (Tween 60)

Tween 60 เป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่จัดอยู่ในประเภทโพลีซอลเบท (Polysorbate) ประกอบด้วยซอลบิทอล (Sorbitol) เกาะอยู่กับกรดไขมันสเตียริก (Stearic acid: C18:0) ซึ่งเป็นกรดไขมันอิ่มตัว (ภาพที่ 2.5) ดังนั้น Tween 60 จึงถือว่าเป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่มีความอิ่มตัว (Saturated emulsifier) และเนื่องจากภายในโครงสร้างมีกลุ่มของโพลีออกซีเอทิลีน (Polyoxyethylene group) จับอยู่กับซอลบิทอลจึงส่งผลให้มีความสามารถในการละลายในน้ำได้ดี (Marshall et al., 2003)

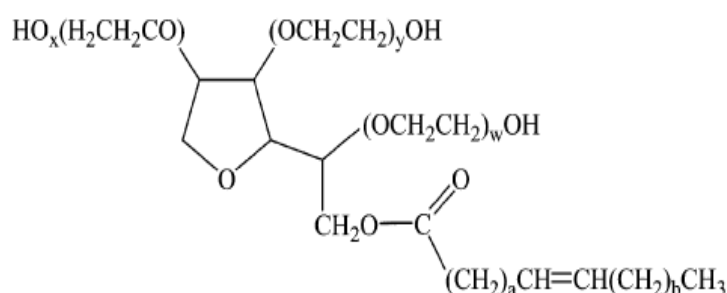


ภาพที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของ Tween 60

แหล่งที่มา: Lee, Kim and Chang (2005)

2.4.2 โพลีออกซีเอทิลีน ซอบีแทน โมโนโอเลอเทท (Tween 80)

Tween 80 ถือว่าเป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายได้ในน้ำ ไม่มีประจุและจัดอยู่ในประเภทโพลีซอลเบทเช่นเดียวกับ Tween 60 แต่มีโครงสร้างของโมเลกุลต่างกันตรงที่ชนิดของกรดไขมันที่เกาะอยู่กับซอลบิทอล (Sorbitol) โดยโครงสร้างของ Tween 80 ประกอบด้วยกรดไขมันโอเลอิก (Oleic acid: C18:1) ดังนั้นจึงถือว่าเป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่มีความไม่อิ่มตัว (Unsaturated emulsifier) (ภาพที่ 2.6) นอกจากนี้ยังพบว่า Tween 80 เป็นสารเพิ่มความแห้ง (Active drying agent) ในไอศกรีม จึงนิยมใช้เป็นส่วนประกอบหนึ่งในส่วนผสมระหว่างสารเพิ่มความคงตัวและอิมัลซิไฟเออร์ทางการค้า (Commercial stabilizer/emulsifier blend) ที่ใช้ในการผลิตไอศกรีม (Marshall et al., 2003)



ภาพที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของ Tween 80

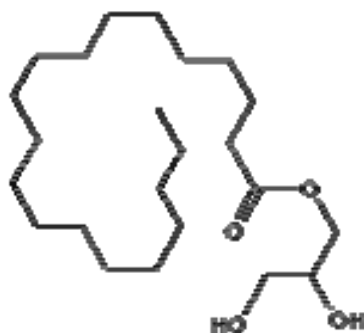
แหล่งที่มา : Lee et al. (2005)

2.4.3 กลีเซอรอล โมโนสเตียเรท (GMS)

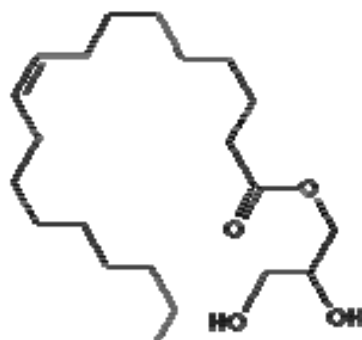
GMS มีสูตรโมเลกุล คือ $C_{21}H_{42}O_4$ ถือว่าเป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายได้ในน้ำมัน ไม่มีประจุและจัดอยู่ในประเภทโมโนกลีเซอไรด์ ซึ่งเป็นเอสเทอร์ของกลีเซอรอลกับกรดไขมันสเตียริก โดยส่วนของกลีเซอรอลเป็นส่วนที่ชอบน้ำ และส่วนของกรดไขมันสเตียริกเป็นส่วนที่ชอบน้ำมัน และเนื่องจากโครงสร้างของกรดไขมันดังกล่าวไม่มีพันธะคู่จึงเรียกได้ว่าเป็นโมโนกลีเซอไรด์ที่มีความอิ่มตัว (Saturated monoglyceride) (ภาพที่ 2.7)

2.4.4 กลีเซอรอล โมโนโอเลอเทท (GMO)

GMO มีสูตรโมเลกุล คือ $C_{21}H_{40}O_4$ ถือว่าเป็น อิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายได้ในน้ำมัน และไม่มีประจุเช่นเดียวกับ GMS แต่มีโครงสร้างของโมเลกุลต่างกันตรงที่ชนิดของกรดไขมันในโครงสร้าง โดย GMO ประกอบด้วยกรดไขมันโอเลอิก (Oleic acid, C18:1) ซึ่งมีพันธะคู่อยู่ในโครงสร้าง จึงเรียกว่าเป็นโมโนกลีเซอไรด์ที่มีความไม่อิ่มตัว (Unsaturated monoglyceride) (ภาพที่ 2.8)



ภาพที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของ GMS
แหล่งที่มา : นิรนาม (www, ม.ป.ป. (ก))



ภาพที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของ GMO
แหล่งที่มา : นิรนาม (www, ม.ป.ป. (ข))

ทั้งนี้ GMS และ GMO ถือว่าเป็นกลีเซอรอล เอสเทอร์ที่มีความจำเพาะ (Specific glycerol Ester) จึงนิยมใช้ในไอศกรีมมากกว่าโมโนและไดกลีเซอไรด์เนื่องจากมีความบริสุทธิ์สูงกว่าแต่มีข้อเสียคือ ราคาค่อนข้างสูง (Marshall et al., 2003)

2.5 ระบบอิมัลชันของไอศกรีม

ระบบไอศกรีมถือว่าเป็นระบบอิมัลชันประเภทน้ำมันในน้ำ ที่มีการศึกษาถึงผลและหน้าที่ของอิมัลซิไฟเออร์ในระบบอิมัลชันต้นแบบประเภทน้ำมันในน้ำค่อนข้างมาก (Euston, Singh, Munro and Dalgleish, 1995, 1996; Dalgleish et al., 1995; Chen and Dickinson, 1999; Davies, Dickinson and Bee, 2000, 2001; Granger, Barey, Veschambre and Cansell, 2005b) ซึ่งการศึกษาเหล่านี้ส่วนใหญ่พบในระบบอิมัลชันต้นแบบภายใต้แรงเฉือนหรือในสถานะที่มีการให้แรงกระทำต่อระบบเพื่อให้ระบบอิมัลชันดังกล่าวเป็นตัวแทนหรือสะท้อนต่อสถานะการผลิตไอศกรีมจากการ

ทดลองของ Euston และคณะ (1995) ซึ่งได้ศึกษาการแข่งขันกันในการดูดซับของโปรตีนจาก SC กับอิมัลซิไฟเออร์ 2 ชนิดคือ อิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายในน้ำหรือที่ละลายในน้ำมันในระบบอิมัลชันน้ำมันในน้ำที่มีน้ำมันถั่วเหลือง (Soybean oil) เป็นแหล่งไขมัน ผลงานวิจัยนี้พบว่าอิมัลซิไฟเออร์ทั้ง 2 ชนิดสามารถแทนที่โปรตีนนมบริเวณพื้นผิวระหว่างเฟสที่เป็นน้ำและน้ำมันได้บางส่วนแต่ Tween 60 ซึ่งเป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายได้ในน้ำมีประสิทธิภาพในการแทนที่โปรตีนนมได้ดีกว่าอิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายได้ในน้ำมันคือ Span 60 นอกจากนี้ Euston และคณะ (1996) ยังได้ศึกษาถึงผลของ GMS ในระบบอิมัลชันน้ำมันในน้ำที่มีโปรตีนนม 2 ชนิดได้แก่ SC หรือ WPI จากการวิจัยนี้พบว่าการเติม GMS ส่งผลให้เกิดการแทนที่โปรตีนนมบริเวณพื้นผิวของน้ำและน้ำมันได้บางส่วนและพบว่าโปรตีนที่เป็นส่วนประกอบของ SC โดยเฉพาะเบต้า-เคซีน ที่ดูดซับบริเวณพื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันมีปริมาณลดลง สำหรับระบบอิมัลชันที่มีโปรตีนเวย์เป็นส่วนประกอบพบว่า การกระจายตัวของแอลฟา-แลคตาบูมิน และเบต้า-แลคโตโกลบูลินในส่วนของของเหลว (Aqueous bulk phase) และบริเวณพื้นผิวของไขมัน (Fat surface) ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโปรตีนหรืออิมัลซิไฟเออร์ การศึกษาถึงคุณสมบัติทางพื้นผิว (Surface properties) ของอนุภาคเม็ดไขมันในระบบอิมัลชันน้ำมันในน้ำที่มีเคซีนและ Tween 60 พบในการทดลองของ Dalgleish และคณะ (1995) ผลงานวิจัยนี้พบว่า Tween 60 สามารถเข้าแทนที่โปรตีนนมได้เนื่องจากในระบบอิมัลชันที่มี Tween 60 ทำให้ความหนาของชั้น (Layer thickness) ที่บริเวณพื้นผิวอนุภาคเม็ดไขมันบางหรือลดลงทั้งนี้เนื่องมาจากการที่มีปริมาณโปรตีนดูดซับอยู่บริเวณพื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันมีปริมาณน้อยลง อย่างไรก็ตามโปรตีนดังกล่าวจะถูกแทนที่ด้วยอิมัลซิไฟเออร์บางส่วนหรือทั้งหมดขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างโปรตีนและอิมัลซิไฟเออร์ การศึกษาของ Chen และ Dickinson (1999) ซึ่งได้ศึกษาถึงการแข่งขันกันในการดูดซับของ GMO กับ WPI ในระบบอิมัลชันประเภทน้ำมันในน้ำพบว่า การมี GMO ที่ความเข้มข้นต่ำทำให้ค่า Elastic modulus ที่พื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันลดลงซึ่งสัมพันธ์กับการแทนที่โปรตีนนมบริเวณพื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมัน เนื่องจากการที่มีโปรตีนอยู่บริเวณพื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันจะสร้างชั้นที่มีความยืดหยุ่นส่งผลให้ค่า Elastic modulus เพิ่มขึ้น เมื่อค่า Elastic modulus ลดลงแสดงว่าเกิดการแทนที่โปรตีนนมด้วยอิมัลซิไฟเออร์และการลดลงของปริมาณของโปรตีนเวย์จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อเพิ่มปริมาณของ GMO นอกจากนี้ Davies และคณะ (2000) ได้ศึกษาถึงผลของ GMO ที่นิยมใช้ในระบบอิมัลชันทั่วไปกับความคงตัวของระบบอิมัลชันที่มี SC ผลจากงานวิจัยนี้พบว่า การเพิ่มปริมาณ GMO ทำให้สามารถในการแทนที่โปรตีนนมบริเวณพื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันได้มากขึ้นและทำให้ระบบอิมัลชันมีความคงตัวหรือเสถียรน้อยลงหรือเหนียวนำไปให้เกิดการรวมตัวกันบางส่วนของอนุภาคเม็ดไขมันมากขึ้นภายใต้สภาวะการให้แรงเฉือน Davies และคณะ (2001) ได้ศึกษาผลของอิมัลซิไฟเออร์ 3 ชนิดได้แก่ GMS, GMO หรือกลีเซอรอล โมโนปาลมิเตท (GMP) ซึ่ง GMS และ GMP ถือเป็นอิมัลซิไฟเออร์ประเภทโมโนกลีเซอไรด์ชนิดที่มีความอิ่มตัว (Saturated

monoglyceride emulsifier) ต่อการเกิดการสูญเสียความคงตัวของอนุภาคเม็ดไขมันที่มีไขมันจาก ถั่วลิสง (Groundnut oil) เป็นแหล่งของไขมันในระบบอิมัลชันต้นแบบที่มี SC เป็นส่วนประกอบ พบว่า GMO มีผลต่อการเกิด Fat destabilization ในระบบอิมัลชันมากที่สุด รองลงมา คือ GMP และ GMS ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาการแทนที่ของโปรตีนนมพบว่า GMP มีความสามารถแทนที่ โปรตีนนมในระบบอิมัลชันมากที่สุด รองลงมา คือ GMS และ GMO ตามลำดับ ทั้งนี้ในการศึกษา ระบบอิมัลชันดังกล่าวใช้ไขมันจากถั่วลิสง การศึกษาถึงผลของระยะเวลาในการบ่มต่อปริมาณการ ดูดซับของโปรตีนบริเวณพื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันในระบบอิมัลชันน้ำมันในน้ำที่มี SMP เป็น ส่วนประกอบพบในการทดลองของ Granger และคณะ (2005b) โดยทำการแปรชนิดของอิมัลซิไฟ-เออร์ 2 ชนิดได้แก่ โมโนและไดกลีเซอไรด์ชนิดอิ่มตัว (Saturated mono- and diglycerides : SMDG) หรือชนิดไม่อิ่มตัวบางส่วน (Partially unsaturated mono- and diglycerides : PUMDG) ผลการวิจัย พบว่าในสภาวะหลังจากลดขนาดอนุภาคเม็ดไขมันหรือสภาวะก่อนบ่มปริมาณโปรตีนบริเวณพื้นผิว อนุภาคเม็ดไขมันในระบบที่มี SMDG มีปริมาณน้อยกว่าระบบที่มี PUMDG และเมื่อนำส่วนผสมไป บ่มที่ 4 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมงพบว่า ปริมาณโปรตีนบริเวณพื้นผิวอนุภาค เม็ดไขมันในระบบที่มี PUMDG มีปริมาณน้อยกว่าระบบที่มี SMDG ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับส่วนของไขมันภายในโครงสร้าง ของอิมัลซิไฟเออร์และการบ่มส่วนผสมโดย PUMDG จะมีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวมากกว่าในเฟส ของไขมันส่งผลให้โปรตีนหลุด (Desorption) ออกจากพื้นผิวอนุภาคเม็ดไขมันได้มากกว่า SMDG ที่ สภาวะหลังการบ่มส่วนผสม

สำหรับการศึกษาผลและหน้าที่ของอิมัลซิไฟเออร์ในระบบอิมัลชันในส่วนผสมพร้อมทำ ไอศกรีมและไอศกรีมได้มีการศึกษาบางส่วนแล้วแต่เป็นส่วนน้อย อย่างเช่น การทดลองของ Goff และ Jordan (1989) ได้ศึกษาบทบาทของอิมัลซิไฟเออร์ในการส่งเสริมการเกิด Fat destabilization ระหว่างการผลิตไอศกรีมที่มีครีม (Cream) และ SMP เป็นส่วนประกอบ โดยทำการแปรชนิดของ อิมัลซิไฟเออร์ 6 ชนิด ได้แก่ Tween 60, Tween 80, Span 60, Span 80, GMS หรือ GMO ผลการวิจัย นี้พบว่า Tween 60 และทำให้ระบบอิมัลชันในไอศกรีมเกิด Fat destabilization มากกว่า Span 60 และ Tween 80 ทำให้ระบบเกิด Fat destabilization ได้มากกว่า Span 80 นอกจากนี้ยังพบว่า Tween 60 ทำให้ระบบเกิด Fat destabilization มากกว่า Tween 80 ในขณะที่ GMO ก็ส่งผลให้เกิด Fat destabilization มากกว่า GMS จากงานวิจัยสรุปได้ว่า Tween 80 เป็นสารที่ทำให้ระบบอิมัลชันมี ความคงตัวลดลง (Destabilizing agent) โดยสามารถลดปริมาณโปรตีนที่ดูดซับบริเวณพื้นผิวของ อนุภาคเม็ดไขมันและลดแรงดึงดูดผิวบริเวณพื้นผิวระหว่างเฟสที่เป็นน้ำและน้ำมันได้มากที่สุดซึ่ง สอดคล้องกับ Dickinson และ McClement (1995) ที่พบว่าที่ความเข้มข้นของอิมัลซิไฟเออร์สูงพบว่า อิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายในน้ำเช่น Tween 60 สามารถแทนที่โปรตีนได้มากกว่าอิมัลซิไฟเออร์ที่ ละลายในน้ำมันเช่น GMS และ Span 60 และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอิมัลซิไฟเออร์ส่งผลให้การ

แทนที่โปรตีนด้วยอิมัลซิไฟเออร์เพิ่มขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้ Pelan และคณะ (1997) ได้ศึกษาถึงผลของอิมัลซิไฟเออร์ต่อความคงตัวของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมและคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่ประกอบด้วยไขมันเนย SMP และอิมัลซิไฟเออร์โดยทำการแปรชนิดของอิมัลซิไฟเออร์ 3 ชนิดได้แก่ Tween 60, โมโนกลีเซอไรด์ชนิดอิ่มตัว (Saturated monoglyceride) หรือชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated monoglyceride) พบว่า Tween 60 มีประสิทธิภาพในการแทนที่โปรตีนนมบริเวณพื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันได้ดีกว่าอิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายได้ในน้ำมันเช่น โมโนกลีเซอไรด์ (Monoglyceride) และยังพบว่า Tween 60 มีผลทำให้ระบบอิมัลชันมีความคงตัวหรือเสถียรน้อยกว่าการใช้โมโนกลีเซอไรด์ชนิดไม่อิ่มตัว แม้ว่าโมโนกลีเซอไรด์ชนิดอิ่มตัวจะแทนที่โปรตีนนมบริเวณพื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันได้แต่พบว่าระบบอิมัลชันมีความคงตัวที่ความเข้มข้นของอิมัลซิไฟเออร์สูงภายใต้การให้แรงเฉือน นอกจากนี้ยังพบว่า การใช้โมโนกลีเซอไรด์ชนิดไม่อิ่มตัวทำให้อิศกรีมมีความสามารถในการต้านทานต่อการละลายได้มากกว่าการใช้โมโนกลีเซอไรด์ชนิดอิ่มตัวและไม่ใช้อิมัลซิไฟเออร์ ตามลำดับ การแทนที่โปรตีนเนื่องจากการแข่งขันกันในการดูดซับของโมโนกลีเซอไรด์ในระหว่างการบ่มส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมพบว่า โมโนกลีเซอไรด์ชนิดไม่อิ่มตัว (GMO) สามารถแทนที่โปรตีนนมได้มากกว่าโมโนกลีเซอไรด์ชนิดอิ่มตัว (GMS) (Barfod et al., 1991) สำหรับการศึกษาความสัมพันธ์ของสมบัติทางคอลลอยด์ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมและไอศกรีมพบในการทดลองของ Bolliger, Kornbrust, Goff, Tharp และ Windhab (2000) เมื่อมีการใช้ชนิดและปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์ที่แตกต่างกันคือ โมโนและไดกลีเซอไรด์ (Mono- and diglycerides) ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0, 0.075 และ 0.15 โดยน้ำหนัก และ Tween 80 ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0, 0.02, 0.04 และ 0.06 โดยน้ำหนัก ต่อการแทนที่โปรตีนนมด้วยอิมัลซิไฟเออร์ในระบบอิมัลชันพบว่าเมื่อปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์เพิ่มขึ้นการแทนที่ของอิมัลซิไฟเออร์ต่อโปรตีนนมบนผิวของอนุภาคเม็ดไขมันในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมมีค่ามากขึ้นเช่นกัน ส่วนการใช้ Tween 80 ร่วมกับการใช้โมโนและไดกลีเซอไรด์ (Mono- and diglycerides) มีความสามารถในการแทนที่โปรตีนนมบนเม็ดไขมันได้ดีกว่าการใช้อิมัลซิไฟเออร์เพียงตัวใดตัวหนึ่ง และพบว่าการใช้ Tween 80 ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.06 โดยน้ำหนักร่วมกับโมโนและไดกลีเซอไรด์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.15 โดยน้ำหนักมีความสามารถในการแทนที่โปรตีนนมบนเม็ดไขมันได้ดีที่สุด ซึ่งการแทนที่โปรตีนนมด้วยอิมัลซิไฟเออร์นี้มีผลโดยตรงต่อการเพิ่ม Fat destabilization และการต้านทานต่อการละลายของไอศกรีม อย่างไรก็ตาม Zhang และ Goff (2005) ได้ศึกษาผลของ GMO เปรียบเทียบกับ GMS ต่อความคงตัวและการเกิด Fat destabilization ในระบบอิมัลชันในไอศกรีมที่แปรชนิดของโปรตีนนม 2 ชนิดได้แก่ WPI หรือ SMP พบว่า GMO มีความสามารถในการแทนที่เคซีนและทำให้เกิด Fat destabilization มากกว่า GMS

บทที่ 3

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ

เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง วิเคราะห์และทดสอบคุณสมบัติทั้งหมด ดังนี้

- 3.1.1 เครื่องลดขนาดอนุภาคเม็ดไขมัน (Homogenizer รุ่น Kika T25 basic, Kiki Laborortechnik, Germany)
- 3.1.2 เครื่องลดขนาดอนุภาคเม็ดไขมันระบบสองระดับความดัน (Homogenizer รุ่น 15 MR-8TA, APV Gaulin, Inc., USA)
- 3.1.3 เครื่องปั่นไอศกรีม (Freezer Model 103, Taylor Company, USA)
- 3.1.4 ห้องแช่เย็นที่ 4 องศาเซลเซียส (PTV 19T/43, Montecchio, Italy)
- 3.1.5 ห้องแช่แข็งที่ -20 องศาเซลเซียส (NT30T/404/43, Montecchio, Italy)
- 3.1.6 ตู้แช่แข็งที่ -35 องศาเซลเซียส (ULT2540-5V36, Kendro Laboratory Products, USA)
- 3.1.7 เครื่องวัดค่าความหนืด (Brookfield DV-III Ultra, Brookfield Engineering Laboratories Inc., USA)
- 3.1.8 เครื่องวัดขนาดอนุภาคเม็ดไขมัน (Laser particle size analyzer Model Mastersizer S, Malvern Instruments, Ltd., UK)
- 3.1.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM Model EM 10 CR, ZEISS, West Germany)
- 3.1.10 เครื่องตัดตัวอย่างแบบบางพิเศษ (Ultramicrotome Model MTX 75500, RMC, USA)
- 3.1.11 กล้องจุลทรรศน์ (Optical light microscope รุ่น Nikon 641463, Nikon Corp., Japan)
- 3.1.12 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (GBC UV/VIS 916, GBC Scientific Instruments, Australia)
- 3.1.13 เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (TA-XT2, Stable Microsystems, Kent, England)
- 3.1.14 อุปกรณ์ชุดตรวจสอบโปรตีน (Sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel

electrophoresis : SDS-PAGE)

- 3.1.15 เครื่อง Slab gel dryer (Drygel Sr Slab Gel Dryer Model SE 1160, Hoefer Scientific Instruments, San Francisco)

3.2 วัตถุดิบ

- 3.2.1 นมผงพร่องมันเนย (Skim milk powder: SMP) ปริมาณโปรตีนร้อยละ 26.14 (ประกอบด้วยเคซีนร้อยละ 56 และโปรตีนเวย์ร้อยละ 44) จากบริษัท Eligo a.s., สาธารณรัฐเชค
- 3.2.2 โซเดียม เคซีน (Sodium caseinate: SC) ปริมาณโปรตีนร้อยละ 86.50 (ประกอบด้วยเคปตา-เคซีนร้อยละ 12 เบต้า-เคซีนร้อยละ 49 แอลฟา-เคซีนร้อยละ 32 และเบต้า-แลคโตโกลบูลินปริมาณเพียงเล็กน้อย) จากบริษัท DMV International, เนเธอร์แลนด์
- 3.2.3 โปรตีนเวย์เข้มข้น (Whey protein concentrate: WPC) ปริมาณโปรตีนร้อยละ 75.53 (ประกอบด้วยเบต้า-แลคโตโกลบูลิน (β -Lg) ร้อยละ 74 แอลฟา-แลคตาบูมิน (α -La) ร้อยละ 23 และโบวีน ซีรัม อัลบูมิน (BSA) และอิมโมโนโกลบูลิน (Ig) ปริมาณเพียงเล็กน้อย) จากบริษัท Agri-Mark, อเมริกา
- 3.2.4 ไขมันเนย (Butter fat) ปริมาณไขมันร้อยละ 99.9 จากบริษัท Talent Co., Ltd., นิวซีแลนด์
- 3.2.5 น้ำตาลแลคโตส จากบริษัท Hilmar ingredients, อเมริกา
- 3.2.6 น้ำตาลทรายขาว จากบริษัท รวมเกษตรกรอุตสาหกรรม จำกัด, ประเทศไทย
- 3.2.7 กวักัม (Guar gum) จากบริษัท Degussa, ฝรั่งเศส
- 3.2.8 แคลปตา-คาราจีแนน (K-carrageenan) จากบริษัท MSC, เกาหลีใต้
- 3.2.9 Tween 60 และ Tween 80 จากบริษัท Seppic S.A., ฝรั่งเศส
- 3.2.10 กลีเซอรอล โมโนสเตียเรท (GMS) และ กลีเซอรอล โมโนโอเลอเอท (GMO) จากบริษัท อิมพีเรียล อินดัสเตรียล เคมิคอลส์ จำกัด, ประเทศไทย

3.3 สูตรส่วนผสมและการเตรียมตัวอย่าง

3.3.1 สูตรตัวอย่างส่วนผสมอิมัลชันต้นแบบที่มีไขมันเนยเป็นส่วนประกอบ

สูตรตัวอย่างส่วนผสมอิมัลชันต้นแบบประกอบด้วยน้ำเปล่าและไขมันเนย (Butter fat) ในอัตราส่วนน้ำต่อไขมันเนยเท่ากับ 90:10 ตามลำดับ และทำการแปรชนิดและระดับความเข้มข้นของอิมัลซิไฟเออร์ดังนี้ 1) อิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายได้ดีในน้ำ ได้แก่ Tween 60 และ Tween 80 ที่ระดับ

ความเข้มข้นร้อยละ 0, 0.04, 0.08 และ 1 โดยน้ำหนัก และ 2) อิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายได้ดีในน้ำมัน ได้แก่ กลีเซอรอล โมโนสเตียเรท (GMS) และกลีเซอรอล โมโนโอเลอเท (GMO) ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับอิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายได้ในน้ำ

3.3.2 การเตรียมตัวอย่างส่วนผสมอิมัลชันต้นแบบที่มีไขมันเนยเป็นส่วนประกอบ

นำน้ำเปล่ากับไขมันเนยไปอุ่นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50-60 องศาเซลเซียส จากนั้นนำส่วนผสมดังกล่าวไปผ่านเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ (Kika T25 basic, Kiki Laboratortechnik, Germany) ที่ความเร็วรอบ 8000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที เพื่อผสมตัวอย่างอย่างหยาบและนำส่วนผสมที่ได้ไปอุ่นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที ซึ่งเป็นขั้นตอนของการพาสเจอร์ไรซ์จึงเติมอิมัลซิไฟเออร์ลงในส่วนผสมดังกล่าวหลังจากส่วนผสมผ่านกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์แล้วนำส่วนผสมมาลดขนาดอนุภาคเม็ดไขมันด้วยเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ระบบสองระดับความดัน (15 MR-8TA, APV Gaulin, Inc., USA) ได้แก่ ที่ระดับความดันแรกเท่ากับ 2500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และระดับความดันที่สองเท่ากับ 500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จากนั้นลดอุณหภูมิส่วนผสมอิมัลชันที่ได้อย่างรวดเร็วในอ่างน้ำแข็งก่อนนำไปบ่มในห้องแช่เย็น (PTV 19T/43, Montecchio, Italy) ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อรอการทดสอบต่อไป

3.3.3 สูตรส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม

สูตรส่วนผสมของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมดัดแปลงจากไอศกรีมสูตรทางการค้า (Marshall et al., 2003) ประกอบด้วย 1) ไขมันเนย ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก 2) น้ำตาลทรายขาว (Sucrose) ร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก 3) สารเพิ่มความคงตัว (Stabilizer) ร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก (กัว กัม (Guar gum) ร้อยละ 0.275 โดยน้ำหนัก และแคลป-การาจีนแนน (K-carrageenan ร้อยละ 0.015 โดยน้ำหนัก) 4) อิมัลซิไฟเออร์ชนิด Tween 60, Tween 80, GMS หรือ GMO ร้อยละ 0 และ 0.04 โดยน้ำหนัก และ 5) ส่วนของแข็งที่ไม่ใช่ไขมันเนย (Milk Solid Non Fat: MSNF) ร้อยละ 10.5 โดยน้ำหนัก ซึ่งได้จาก 5.1) นมผงพร่องมันเนย (SMP) หรือ 5.2) โซเดียม เคซีน (SC) หรือ 5.3) โปรตีนเวย์เข้มข้น (WPC) โดยกำหนดให้มีความเข้มข้นของโปรตีนเท่ากันทุกสูตรไอศกรีมและปรับปริมาณของแข็งทั้งหมดด้วยน้ำตาลแลคโตสโดยส่วนประกอบที่เหลือเป็นน้ำเปล่า ซึ่งส่วนผสมดังกล่าวจะมีปริมาณของแข็งทั้งหมดประมาณร้อยละ 30-33 โดยน้ำหนัก

3.3.4 การเตรียมตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมและตัวอย่างไอศกรีมแช่แข็ง ดัดแปลง

จากวิธีการของ Marshall และ Arbuckle (1996) และ Goff, Verespej และ Smith (1999)

ละลายนมผงพร่องมันเนย (SMP) ในน้ำเปล่า จากนั้นนำไปอุ่นให้ร้อนที่อุณหภูมิ 45

องศาเซลเซียส จึงเติมส่วนผสมของแห้งได้แก่ น้ำตาลทราย น้ำตาลแลคโตสและสารเพิ่มความคงตัว โดยระหว่างการผสมให้คนส่วนผสมตลอดเวลาจนของแข็งทั้งหมดละลายอย่างสมบูรณ์ ในกรณีที่ใช้ โปรตีนนมชนิดโซเดียม เคซีน (SC) หรือโปรตีนเวย์เข้มข้น (WPC) ต้องละลายในน้ำเปล่าที่ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส แล้วจึงเติมส่วนผสมของแห้ง เพิ่มอุณหภูมิของส่วนผสมเป็น 75 องศาเซลเซียส จึงใส่ไขมันเนยที่ละลายแล้วทำการพาสเจอร์ไรซ์ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที ในส่วนที่ทำการศึกษาผลของสภาวะในการพาสเจอร์ไรซ์จะทำการศึกษาสภาวะในการพาสเจอร์ไรซ์ที่ 2 ระดับ ได้แก่ อุณหภูมิ 69 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที หรืออุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที หลังจากผ่านกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์แล้วจึงเติมอิมัลซิไฟเออร์ลงในส่วนผสมและคนให้ เข้ากัน นำส่วนผสมดังกล่าวไปลดขนาดอนุภาคเม็ดไขมันด้วยเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ 2 ระดับความดัน โดยกำหนดระดับความดันแรกเท่ากับ 2500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และระดับความดันที่สองเท่ากับ 500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จากนั้นทำให้เย็นโดยเร็วและนำตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมไปบ่มใน ห้องแช่เย็นที่ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในส่วนที่ทำการศึกษาผลของระยะเวลาในการบ่ม ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมจะทำการแปรระยะเวลาในการบ่มที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0, 2, 4 หรือ 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำส่วนผสมดังกล่าวไปตีปั่นเป็นไอศกรีมแช่แข็ง

ส่วนการเตรียมตัวอย่างไอศกรีมแช่แข็งทำได้โดยนำส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมหลังจากบ่ม ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส มาเข้าเครื่องปั่นไอศกรีม (Model 103, Taylor Company, USA) โดย กำหนดเวลาในการปั่นไอศกรีม 15 นาที หลังจากนั้นจึงบรรจุไอศกรีมที่ได้ลงในภาชนะและเก็บใน ตู้แช่แข็ง (ULT2540-5V36, Kendro Laboratory Products, USA) ที่อุณหภูมิ -35 องศาเซลเซียส เป็น เวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงย้ายไปเก็บในห้องแช่แข็ง (ULT2540-5V36, Kendro Laboratory Products, USA) ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อรอการทดสอบต่อไป

3.4 การศึกษาและการทดสอบคุณลักษณะต่างๆ

3.4.1 การทดสอบความคงตัวของตัวอย่างอิมัลชันต้นแบบที่มีไขมันเนยเป็นส่วนประกอบ

ทำการแปรชนิดและความเข้มข้นของปริมาณอิมัลซิไฟเออร์ที่ใช้ คือ Tween 60, Tween 80, GMS หรือ GMO ที่ระดับความเข้มข้น 4 ระดับ คือ ร้อยละ 0, 0.04, 0.08 และ 1 โดยน้ำหนัก ซึ่ง สอดคล้องกับแผนการทดลองแบบ Complete Randomized Design (CRD) ขนาด 13 สิ่งการทดลอง จำนวน 3 ซ้ำ และทำการทดสอบความคงตัวของตัวอย่างอิมัลชันต้นแบบดังนี้

3.4.1.1 วัดขนาดอนุภาคเม็ดไขมัน ตามวิธีของ Segall และ Goff (1999)

นำตัวอย่างอิมัลชันทั้ง 2 สภาวะ ได้แก่ ก่อนบ่มและหลังจากการบ่มที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มาทำการเจือจางด้วยน้ำกลั่นในอัตราส่วนตัวอย่างอิมัลชันต่อ น้ำกลั่นเท่ากับ 1:1000 จากนั้นนำตัวอย่างดังกล่าวไปวัดค่าขนาดอนุภาคเม็ดไขมันด้วยเครื่อง Laser

particle size analyzer (Mastersizer S, Malvern Instruments, Ltd., UK) ที่ 632.8 นาโนเมตร ซึ่งจะรายงานผลเป็นค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบ $d_{3,2}$ (Surface-weighted mean diameter) แต่ละตัวอย่างทำการวัด 3 ซ้ำ

3.4.1.2 วัดค่าความหนืด

นำตัวอย่างอิมัลชันทั้ง 2 สภาวะได้แก่ ก่อนบ่มและหลังการบ่มที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้ตัวอย่างปริมาตร 15 มิลลิเมตร ใส่ในชุดวิเคราะห์ Low viscosity มีหัววัดแบบทรงกระบอก (UL/Y Adapter, Brookfield Engineering Laboratories Inc., USA) จากนั้นวัดค่าความหนืดด้วยเครื่อง Brookfield ที่อุณหภูมิ 5 ± 1 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที แต่ละตัวอย่างทำการวัด 3 ซ้ำ

3.4.1.3 ศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์

นำตัวอย่างอิมัลชันที่ได้หลังจากผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มาหยดลงบนแผ่นสไลด์แล้วปิดด้วยกระจกปิดสไลด์ นำสไลด์ไปส่องดูโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Nikon 641463, Nikon Corp., Japan) ที่กำลังขยาย 400 และ 1000 เท่า ที่อุณหภูมิห้องและถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัล (Model MTV-62VIP, MEIJI, Japan) แต่ละตัวอย่างเตรียมตัวอย่างอย่างน้อย 2 ซ้ำและถ่ายภาพอย่างน้อย 20 ภาพ

3.4.2 การทดสอบความคงตัวของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม

นำตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม (Ice cream mix) มาทำการทดสอบความคงตัว ตามแผนการทดลอง Complete Randomized Design (CRD) ขนาด 18 สิ่งทดลอง จำนวน 3 ซ้ำ ดังนี้

3.4.2.1 วัดขนาดอนุภาคเม็ดไขมันของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่สภาวะก่อนและหลังบ่มที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตามข้อที่ 3.4.1.1

3.4.2.2 วัดค่าความหนืดของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่สภาวะก่อนและหลังบ่มที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตามข้อที่ 3.4.1.2 แต่ใช้ชุดวิเคราะห์ตัวอย่างแบบใช้ปริมาตรตัวอย่างน้อย (Small sample Adapter, Brookfield Engineering Laboratories Inc., USA)

3.4.2.3 ศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน คัดแปลงจากวิธีของ Thaiudom และ Goff (2003)

นำตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ได้หลังจากผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 4 องศา-

เซลเซียส 24 ชั่วโมง มาเตรียมด้วยเทคนิค Agar rod sleeve ตัวอย่างจะถูกสอดเข้าไปในหลอดอะการ์ (Agar) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 มิลลิเมตร ตัดหลอด Agar ให้มีความยาวประมาณ 5 ถึง 7 มิลลิเมตร แล้วจึงปิดปลายหัวท้ายของหลอด Agar ที่มีตัวอย่างอยู่ด้วย Agar เหลวรอจน Agar แข็งตัว จึงนำหลอด Agar ดังกล่าวแช่ลงใน 2% (w/w) Glutaraldehyde เป็นเวลา 1 คืน ล้างหลอด Agar ใน ฟอสเฟต บัฟเฟอร์ (pH 7.2) จำนวน 3 ครั้ง โดยทิ้งช่วงห่างครั้งละ 10 นาที จากนั้นจึงแช่หลอด Agar ที่มีตัวอย่างทิ้งไว้ในฟอสเฟต บัฟเฟอร์เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วตรึงตัวอย่างด้วย 2% (w/w) Osmium tetroxide เป็นเวลา 1 คืน ล้างตัวอย่างด้วยน้ำกลั่นจำนวน 3 ครั้ง แล้วแช่ทิ้งไว้ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำตัวอย่างที่ผ่านการตรึงแล้วมาทำการขจัดน้ำ (dehydrate) ด้วยเอทานอลตามลำดับความเข้มข้นร้อยละ 50, 60, 70, 80, 90, 95 และ 100 โดยน้ำหนักโดยแช่ตัวอย่างในแต่ละความเข้มข้นของเอทานอลเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นแช่ตัวอย่างในเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก จำนวน 2 ครั้ง ครั้งละ 15 นาที และแช่ในโพรพิลีน ออกไซด์ (Propylene oxide) ความเข้มข้นร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก จำนวน 2 ครั้ง ครั้งละ 15 นาที เพื่อให้ขจัดน้ำออกจากตัวอย่างได้อย่างสมบูรณ์ แล้วจึงนำตัวอย่างไปใส่ในสารละลายผสมระหว่างโพรพิลีน ออกไซด์และ Embedding medium ที่อุณหภูมิห้องในอัตราส่วน 3:1 เป็นเวลา 1.30 ชั่วโมง ซึ่ง Embedding medium ประกอบด้วย Jembed 812 Resin ร้อยละ 47.82 โดยน้ำหนัก Dodecenyl succinic anhydride (DDSA) ร้อยละ 21.52 โดยน้ำหนัก Nadic methyl anhydride (NMA) ร้อยละ 28.69 โดยน้ำหนักและ Tri-(dimethylaminomethyl) phenol (DMP) ร้อยละ 1.96 โดยน้ำหนักหลังจากนั้นจึงแช่ตัวอย่างในสารละลายผสมดังกล่าวในอัตราส่วน 1:1 เป็นเวลา 1.30 ชั่วโมง และอัตราส่วน 1:2 อีกจำนวน 2 ครั้ง ครั้งละ 1 ชั่วโมง แล้วแช่ใน Embedding medium เข้มข้นร้อยละ 100 โดยน้ำหนักเป็นเวลา 1 คืน นำตัวอย่างที่ผ่านการตรึงแล้วไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้ตัวอย่างเย็นจนถึงอุณหภูมิห้องก่อนนำตัวอย่างดังกล่าวข้างต้นมาตัดให้มีความหนา 70 ถึง 100 นาโนเมตร ด้วยเครื่องตัดตัวอย่างแบบบางพิเศษ (Ultramicrotome Model MTX 75500, RMC, USA) หลังจากนั้นติดตัวอย่างบน Gold grid แล้วทำการย้อมตัวอย่างด้วยซิลเวอร์ โปรตีนเทต (Silver proteinate) ยูรานิล อะซิเตท (Uranium acetate) และเลด ซิเตรท (Lead citrate) ตามลำดับ นำตัวอย่างไปวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคด้วยเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM รุ่น EM 10 CR, ZEISS, West Germany) โดยกำหนดให้ค่าความต่างศักย์ของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 60 กิโลโวลต์ ทำการถ่ายภาพและบันทึกภาพด้วยกล้องดิจิตอล (Nikon digital sight DS-Fi1, Nikon Corp., Japan) โดยถ่ายภาพอย่างน้อย 20 ภาพของแต่ละตัวอย่าง

3.4.2.4 วัดค่าการสูญเสียความคงตัวของอนุภาคเม็ดไขมัน (Fat destabilization) ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม ดัดแปลงจากวิธีของ Segall และ Goff (2002)

นำตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยแบ่งส่วนผสมออกเป็น 2 ส่วนเพื่อทำการวิเคราะห์ โดยส่วนที่ 1 นำตัวอย่างมาเจือจางด้วยน้ำเปล่าในอัตราส่วน 1:500 ทำการวัดค่าความขุ่นด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (GBC UV/VIS 916, GBC Scientific Instruments, Australia) ที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตรและ ส่วนที่ 2 นำมาตีปั่นด้วยเครื่องผสมอาหารแบบมือถือ (Moulinex BM9, Spain) โดยใช้ความเร็วสูงสุด เป็นเวลา 4 นาทีที่อุณหภูมิห้อง ทำการสุ่มตัวอย่างทุก ๆ 40 วินาทีแล้วเจือจางด้วยน้ำเปล่าใน อัตราส่วน 1:500 หลังจากนั้นวัดค่าความขุ่นของส่วนผสมดังกล่าวที่ความยาวคลื่นเดิมและ คำนวณหาการสูญเสียความคงตัวของอนุภาคเมื่อดไขมัน (Fat destabilization) ดังสมการที่ 1

$$\% \text{ Fat destabilization} = \frac{[A_{540}(\text{mix ก่อนทำการตีปั่น}) - A_{540}(\text{mix ที่ตีปั่นที่เวลาใดๆ})]}{A_{540}(\text{mix ก่อนทำการตีปั่น})} \times 100 \quad \text{---- (1)}$$

3.4.2.5 การวิเคราะห์หาปริมาณโปรตีนที่ดูดซับและล้อมรอบบนอนุภาคเมื่อดไขมัน ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม คัดแปลงจากวิธีของ Granger และคณะ (2005)

นำตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมหลังบ่ม ปริมาตร 100 กรัม มาแยกส่วนที่เป็น ครีม (ไขมัน) ออกจากส่วนที่เป็นชีรัม โดยนำตัวอย่างไปปั่นเหวี่ยงที่ระดับ 15,000 x g เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เมื่อส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมเกิดการแยกชั้นแล้วนำตัวอย่างชั้น ครีมจากหลอดปั่นเหวี่ยงแผ่นกระดาษกรอง (Whatman เบอร์ 1) เพื่อดูดซับส่วนของชีรัมที่ติดอยู่ บนเมื่อดไขมัน จากนั้นวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนทั้งหมดในตัวอย่างทั้ง 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนผสมพร้อม ทำไอศกรีม ส่วนที่เป็นครีมและส่วนที่เป็นชีรัม โดยนำตัวอย่างทั้งสามมาสกัดโปรตีนด้วย 5% (w/v) Sodium dodecyl sulfate (SDS) ในอัตราส่วนตัวอย่างต่อ SDS เท่ากับ 1:5 แล้วให้ความร้อนที่ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้ตัวอย่างเย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นปั่นเหวี่ยงที่ระดับ 1,000 x g เป็นเวลา 10 นาทีและเก็บตัวอย่างส่วนใสที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณโปรตีนทั้งหมด ด้วยวิธี Lowry method นอกจากนี้ในส่วนที่เป็นครีมจะนำมาทำการวิเคราะห์โปรตีนที่ดูดซับอยู่บน ผิวของอนุภาคเมื่อดไขมันด้วยวิธี Sodium dodecyl sulfate -polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE) โดยนำตัวอย่างชั้นครีมที่ทำการสกัดโปรตีนแล้วละลายในสารละลาย Treatment buffer (0.125 M Tris-Cl, pH 6.8; 4 g SDS/100 mL; 20 g glycerol/100 mL; 10 g β-mercaptoethanol/100 mL; 0.01 g bromophenol blue/100 mL) และปิเปตตัวอย่างปริมาตร 10 ไมโครลิตร ลงใน 12.5% อะคริลาไมด์เจลแล้วจึงทำการย้อม (Stain) ด้วย Coomassie blue และล้างสีย้อม (Destain) ด้วย สารละลายผสมระหว่างน้ำกลั่น กรดอะซิติก และเมทานอล ในอัตราส่วนเท่ากับ 6:1:3 เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำเจลที่ได้ไปทำให้แห้งด้วยเครื่อง Slab gel dryer ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

เป็นเวลา 1.30 ชั่วโมง และวัดค่าความเข้มของแถบโปรตีนด้วยโปรแกรม Densitometer (Labwork™ Image Acquisition and analysis software, UVP Inc., Upland, CA) คำนวณหาปริมาณโปรตีนที่ดูดซับบนอนุภาคเม็ดไขมันจากการเปรียบเทียบค่าความเข้มและความกว้างของโปรตีนมาตรฐานที่ทราบปริมาณโปรตีนที่แน่นอน

3.4.3 การทดสอบความคงตัวและคุณภาพของไอศกรีม

ตัวอย่างไอศกรีมดังกล่าวไปทำการทดสอบความคงตัวและคุณภาพของไอศกรีมต่างๆ ดังนี้

3.4.3.1 วัดค่าการสูญเสียความคงตัวของอนุภาคเม็ดไขมัน (Fat destabilization) ของไอศกรีม ตามวิธีของ Goff และ Jordan (1989)

นำตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม (Ice cream mix) และไอศกรีมที่ละลายแล้วมาเจือจางด้วยน้ำกลั่นในอัตราส่วนตัวอย่างไอศกรีมต่อน้ำกลั่นเท่ากับ 1:500 แล้ววัดค่าความขุ่นเช่นเดียวกับวิธีในข้อ 3.4.2.4 แต่ละตัวอย่างทำการวัด 3 ซ้ำ ทั้งนี้ค่า Fat destabilization index คำนวณได้จากสมการที่ 2

$$\% \text{ Fat destabilization} = \frac{[A_{540}(\text{Ice cream mix}) - A_{540}(\text{ไอศกรีมที่ละลาย})] \times 100}{A_{540}(\text{Ice cream mix})} \quad \text{----- (2)}$$

3.4.3.2 การวัดค่าการขึ้นโฟมของไอศกรีม (%Overrun) ตามวิธีของ Segall และ Goff (2002)

นำตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมหลังการบ่มแล้วมาบรรจุในภาชนะที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอนแล้วชั่งน้ำหนักของส่วนผสมดังกล่าว จากนั้นนำส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมไปปั่นด้วยเครื่องปั่นไอศกรีม (Freezer Model 103, Taylor Company, USA) เป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นตักไอศกรีมที่ผ่านการปั่นแล้วบรรจุในภาชนะเดิมแล้วชั่งน้ำหนักของไอศกรีมที่ได้ แต่ละตัวอย่างทำการวัด 3 ซ้ำ และคำนวณค่าการขึ้นโฟมของไอศกรีมดังสมการที่ 3

$$\% \text{Overrun} = \frac{\text{น.น.ต่อหน่วยปริมาตรของ mix} - \text{น.น.ต่อหน่วยปริมาตรของไอศกรีม}}{\text{น.น.ต่อหน่วยปริมาตรของไอศกรีม}} \times 100 \quad \text{---- (3)}$$

3.4.3.3 ศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ คัดแปลงจากวิธีของ Clarke (2004)

นำตัวอย่างไอศกรีมหลังจากการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา

24 ชั่วโมง มาตัดสไลด์ให้เป็นแผ่นบาง ๆ ประมาณ 1 ถึง 2 มิลลิเมตร วางบนแผ่นสไลด์แล้วหยดด้วย กลีเซอรอลเพื่อป้องกันไม่ให้เซลล์อากาศเกิดการรวมตัวกัน (Coalescing) หลังจากนั้นปิดด้วยกระจก ปิดสไลด์แล้วกดเบา ๆ และนำสไลด์ไปส่องดูโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Nikon 641463, Nikon Corp., Japan) ที่กำลังขยาย 10, 40 และ 100 เท่า และถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัล (Model MTV-62VIP, MEIJI, Japan) แต่ละตัวอย่างเตรียมตัวอย่างอย่างน้อย 2 ซ้ำ และถ่ายภาพอย่างน้อย 20 ภาพ

3.4.3.4 วัดค่าความคงทนต่อการหลอมละลาย หรืออัตราการละลายของไอศกรีม คัดแปลงจากวิธีของ Bolliger และคณะ (2000)

ตัดตัวอย่างไอศกรีมด้วยช้อนตักไอศกรีมให้มีลักษณะเป็นทรงกลมโดยให้ตัวอย่าง ไอศกรีมมีน้ำหนักประมาณ 50 กรัม และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 เซนติเมตร ชั่งน้ำหนักเริ่มต้น ของไอศกรีมด้วยเครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง หลังจากนั้นวางไอศกรีมบนตะแกรงลวดขนาด 15 x 15 เซนติเมตรและขนาดรูตะแกรงลวดเท่ากับ 2 x 2 มิลลิเมตร ซึ่งวางอยู่บนบีกเกอร์ที่ทราบน้ำหนัก แน่นอนในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิ (25 องศาเซลเซียส) เริ่มจับเวลาเมื่อหยดแรกของไอศกรีมที่ละลาย สัมผัสกับบีกเกอร์ชั่งน้ำหนักทุก ๆ 10 นาที เป็นเวลา 90 นาที และคำนวณหาร้อยละการละลายของ ไอศกรีมดังสมการที่ 4

$$\text{ร้อยละการละลาย (\%Mass loss)} = \frac{\text{น้ำหนักไอศกรีมในส่วนที่ละลาย}}{\text{น้ำหนักไอศกรีมเริ่มต้น}} \times 100 \quad \text{----- (4)}$$

3.4.3.5 การวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture) ของไอศกรีม คัดแปลงจากวิธี ของ Prindiville, Marshall และ Heymann (1999)

นำตัวอย่างไอศกรีมที่บรรจุในถ้วยพลาสติกปริมาตร 155 มิลลิลิตรและเก็บไว้ที่ อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มาวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสแบบการประเมิน เค้าโครงเนื้อสัมผัส (Texture profile analysis: TPA) ด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (TA-XT2, Stable Microsystems, Kent, England) ซึ่งมีสภาวะการวิเคราะห์ดังนี้คือ ใช้หัววัดแบบทรงกระบอกที่มี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร (Cylinder Probe : P/2) แทะลงในไอศกรีมลึก 22.5 มิลลิเมตร จำนวน 2 จุดต่อถ้วย โดยกำหนดให้ใช้แรง 5 กรัม ความเร็วของหัววัดก่อนและหลังจากการทะ เก้ากันเท่ากับ 3.0 มิลลิเมตรต่อวินาทีและความเร็วของหัววัดระหว่างการทะตัวอย่างเท่ากับ 3.3 มิลลิเมตรต่อวินาทีและสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับเวลา

3.5 การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้ ANOVA และหาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) โดยใช้โปรแกรม SPSS version 13 (SPSS Inc., Illinois, USA)

3.6 สถานที่ทำการทดลองและเก็บข้อมูล

ห้องปฏิบัติการแปรรูปอาหาร ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมอาหาร ห้องปฏิบัติการเคมีอาหาร ห้องพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร ณ อาคารเครื่องมือ 3 และฝ่ายวิเคราะห์ด้วยเครื่องมืออาคารเครื่องมือ 1 ศูนย์เครื่องวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 ผลของชนิดและปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์ต่อความคงตัวของระบบอิมัลชันต้นแบบที่มีไขมันเนยเป็นส่วนประกอบ

การศึกษาในส่วนนี้เป็นการศึกษาผลของชนิดและปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์ ได้แก่ อิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายได้ในน้ำ ได้แก่ Tween 60 และ Tween 80 และอิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายได้ในน้ำมัน ได้แก่ GMS และ GMO ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0, 0.04, 0.08 และ 1 โดยน้ำหนัก ต่อระบบอิมัลชันต้นแบบประเภทน้ำมันในน้ำ

4.1.1 ผลของชนิดและปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์ต่อขนาดอนุภาคเม็ดไขมันในระบบอิมัลชัน

การใช้อิมัลซิไฟเออร์ที่ระดับความเข้มข้นและชนิดที่ต่างกันมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของขนาดอนุภาคเม็ดไขมันในระบบอิมัลชันที่แตกต่างกันดังแสดงในภาพที่ 4.1 เมื่อพิจารณาผลของชนิดและปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์ที่ใช้ในระบบอิมัลชันที่มีไขมันเนยเป็นส่วนประกอบต่อขนาดอนุภาคเม็ดไขมันพบว่า ที่ระดับความเข้มข้นต่ำ (ร้อยละ 0.04 และ 0.08 โดยน้ำหนัก) ของอิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายได้ในน้ำ ได้แก่ Tween 60 หรือ Tween 80 ทำให้ระบบอิมัลชันมีขนาดอนุภาคเม็ดไขมันเฉลี่ยใหญ่กว่าการใช้ GMS หรือ GMO ซึ่งถือเป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายได้ในน้ำมันและในระบบอิมัลชันที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ (Control) (ภาพที่ 4.1) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการใช้อิมัลซิไฟเออร์ชนิด Tween 60 หรือ Tween 80 ซึ่งเป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายได้ในน้ำ (HLB ~ 15) ในระดับความเข้มข้นที่ต่ำมากทำให้อิมัลซิไฟเออร์เกิดการละลายอยู่ในเฟสต่อเนื่อง (Continuous phase) ในรูปของไมเซลล์ (Micelle) มากกว่าที่จะดูดซับอยู่ที่บริเวณพื้นผิวระหว่างเฟสที่เป็นน้ำและน้ำมัน (Oil-water interface) (Bergenstahl, 1997; Krog, 1977) เนื่องจากปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์ที่ใช้ (ร้อยละ 0.04 และ 0.08 โดยน้ำหนัก) มีความเข้มข้นสูงกว่าจุด Critical micelle concentration (CMC) ของอิมัลซิไฟเออร์ชนิด Tween 60 และ Tween 80 ซึ่งเท่ากับร้อยละ 0.03 และ 0.015 ตามลำดับ (Cottrell and van Peji, 2004) พฤติกรรมของอิมัลซิไฟเออร์ที่อยู่ในรูปไมเซลล์อาจทำให้เกิด Depletion flocculation ระหว่างอนุภาคเม็ดไขมัน 2 อนุภาคซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างของ Osmotic pressure ทำให้อนุภาคเม็ดไขมันเกิดแรงดึงดูด (Attractive force) ซึ่งกันและกันส่งผลให้อนุภาคเม็ดไขมันเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กัน (McClement, 1999) เหนียวนำไปให้เกิดการรวมกลุ่มกันหรือที่

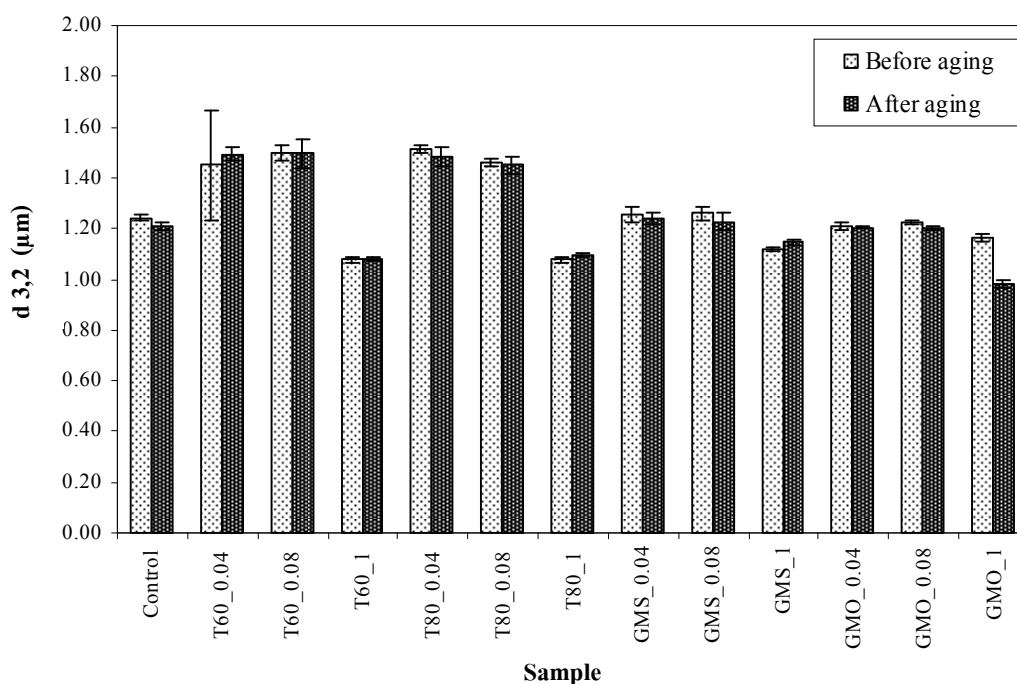
เรียกว่า Flocculation และเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันแต่บริเวณพื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันมีอิมัลซิไฟเออร์ดูดซับในปริมาณที่น้อยมากอาจส่งผลให้อนุภาคเม็ดไขมันเกิดการชนกันและรวมกันเกิดการชนกันและรวมตัวเป็นอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นหรือที่เรียกว่า Droplet coalescence

นอกจากนี้ Taisne, Walstra และ Cabane (1996) ได้กล่าวไว้ว่าขนาดอนุภาคเม็ดไขมันที่สร้างขึ้นในเครื่องลดขนาดอนุภาคเม็ดไขมันที่ใช้ความดันสูง (High-pressure homogenizer) มีผลมาจากการแตกของอนุภาค (Fragmentation) และการกลับมารวมตัวกันใหม่ของอนุภาคไขมัน (Recoalescence) และยังพบว่าในระหว่างกระบวนการสร้างอิมัลชัน (Emulsification) ในระบบอิมัลชันที่มีปริมาณอิมัลซิไฟเออร์ที่ความเข้มข้นต่ำ ๆ (Surfactant-poor region) สามารถเกิดการกลับมารวมตัวกันของอนุภาคเม็ดไขมันที่ทำให้แตกแล้วในระหว่างขั้นตอนในการโฮโมจีไนเซชันส่งผลให้อนุภาคเม็ดไขมันที่ได้มีขนาดใหญ่ ส่วนการทดลองของ Tcholakova, Denkov และ Danner (2004) สรุปไว้ว่าที่ความเข้มข้นของอิมัลซิไฟเออร์ต่ำ ๆ (ประมาณร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนัก) การดูดซับ (Adsorption) ของอิมัลซิไฟเออร์เกิดช้ากว่ากระบวนการเสียรูปทรง (Droplet deformation) และการชนกันของอนุภาคเม็ดไขมัน (Droplet collision) ซึ่งการชนกันของอนุภาคเม็ดไขมันส่งผลให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคเม็ดไขมันกลายเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้นได้เช่นกัน

ในขณะที่อิมัลซิไฟเออร์ชนิด GMS หรือ GMO ที่ระดับความเข้มข้นต่ำ ๆ ส่งผลให้ระบบมีขนาดอนุภาคเม็ดไขมันใกล้เคียงหรือเล็กกว่าในระบบอิมัลชันที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ (Control) เพียงเล็กน้อยทั้งนี้อาจเนื่องมาจากที่ความเข้มข้นต่ำ ๆ อิมัลซิไฟเออร์มีการดูดซับที่บริเวณพื้นผิวระหว่างเฟสที่เป็นน้ำและน้ำมันได้น้อยเช่นเดียวกับกรณีของ Tween แต่ GMS และ GMO ถือว่าเป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายได้ในน้ำมันเนื่องจากมีค่า HLB เท่ากับ 3.8 และ 2.8 ตามลำดับ (Goff and Jordan, 1989) จึงเกิดการละลายอยู่ในเฟสของน้ำมัน (Dispersed phase) ทำให้ไม่เกิด Depletion flocculation เหมือนกับในกรณีของ Tween ที่อยู่ในรูปของไมเซลล์กระจายตัวในน้ำ ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้ระบบอิมัลชันมีขนาดอนุภาคเม็ดไขมันใกล้เคียงหรือเล็กกว่าระบบที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ (Control) เพียงเล็กน้อย

จากผลการทดลองที่ได้ (ภาพที่ 4.1) พบว่ามีความสอดคล้องกับการทดสอบการแยกชั้นของระบบอิมัลชัน โดยระบบอิมัลชันที่ใช้อิมัลซิไฟเออร์ชนิด Tween 60 หรือ Tween 80 ในระดับความเข้มข้นต่ำ ๆ ซึ่งมีขนาดอนุภาคเม็ดไขมันเฉลี่ยที่ใหญ่ (ภาพที่ 4.1) ส่งผลให้ระบบอิมัลชันไม่มีความคงตัวเมื่อระยะเวลาผ่านไป (4 องศาเซลเซียส/24 ชั่วโมง) เนื่องจากเกิดการแยกชั้นระหว่างน้ำมันและน้ำ (Creaming) (ภาพที่ 4.2) ในขณะที่ระบบอิมัลชันที่มีอิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายได้ในน้ำมันและระบบที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ (Control) ไม่พบการแยกชั้นระหว่างน้ำมันและน้ำ ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับกฎของสโตกส์ (Stokes' law) ที่กล่าวไว้ว่าอัตราการแยกชั้น (Creaming rate) แปรผันตรงกับเส้นผ่านศูนย์กลาง (ขนาด) ของอนุภาคในเฟสกระจายนั้นคือ อนุภาคเม็ดไขมันขนาด

ใหญ่จะมีการเคลื่อนที่ได้เร็วส่งผลให้มีโอกาสในการชนกันมากขึ้นและเกิดการแยกชั้นได้เร็วกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคเม็ดไขมันขนาดเล็ก (McClement, 1999)



ภาพที่ 4.1 ขนาดอนุภาคเม็ดไขมัน ($d_{3,2}$) ของระบบอิมัลชันที่ประกอบด้วยชนิดและปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์ที่แตกต่างกันที่สภาวะก่อนบ่มและหลังบ่ม 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

เมื่อพิจารณาการใช้อิมัลซิไฟเออร์ที่ระดับความเข้มข้นสูง (ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก) พบว่าทุกชนิดของอิมัลซิไฟเออร์ที่ใช้ส่งผลให้ระบบอิมัลชันมีขนาดอนุภาคเม็ดไขมันเฉลี่ยเล็กกว่าในระบบที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ (Control) ทั้งนี้เนื่องจากในระบบอิมัลชันที่มีความเข้มข้นของอิมัลซิไฟเออร์ในปริมาณที่สูงทำให้ขั้นตอนการโฮโมจิไนเซชันหรือขั้นตอนของการลดขนาดอนุภาคเม็ดไขมันมีประสิทธิภาพมากขึ้น เนื่องจากการที่มีปริมาณอิมัลซิไฟเออร์ในปริมาณที่มากเพียงพอส่งผลให้อิมัลซิไฟเออร์สามารถดูดซับบริเวณพื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันได้ทั้งหมดและลดแรงดึงบริเวณพื้นผิวระหว่างเฟสที่เป็นน้ำและน้ำมัน (Interfacial tension) ได้มาก ทำให้มีความง่ายในการทำลายอนุภาคเม็ดไขมันส่งผลให้ขนาดอนุภาคเม็ดไขมันที่ได้มีขนาดเล็ก (McClement, 1999) และเมื่ออนุภาคเม็ดไขมันถูกทำให้แตกเป็นอนุภาคเล็กๆ แล้ว ยังพบว่าอิมัลซิไฟเออร์สามารถเข้าดูดซับบริเวณพื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันที่สร้างขึ้นใหม่ได้อย่างรวดเร็ว และชั้นของอิมัลซิไฟเออร์ที่สร้างขึ้นรอบอนุภาคเม็ดไขมันช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการกลับมารวมตัวกันของอนุภาคเม็ดไขมัน (Recoalescence) ในระหว่างกระบวนการสร้างระบบอิมัลชัน (Emulsification) (Taisne et al., 1996;

Tcholakova et al, 2004) จากผลการทดลองดังกล่าวพบว่าปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์ที่ระดับความเข้มข้นสูงทำให้อนุภาคเม็ดไขมันที่ได้มีขนาดเล็กส่งผลให้ระบบอิมัลชันมีความคงตัว โดยผลการทดลองนี้ยืนยันได้จากการทดสอบการแยกชั้นพบว่า อิมัลซิไฟเออร์ทุกชนิดที่ระดับความเข้มข้นสูงจะไม่พบการแยกชั้นระหว่างน้ำมันและน้ำและผลการทดลองดังกล่าวยังสอดคล้องกับ McClement (1998) ที่กล่าวว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอิมัลซิไฟเออร์ทำให้ขนาดของอนุภาคเฟสกระจายมีขนาดเล็กส่งผลให้ระบบอิมัลชันมีความคงตัวด้วย



แยกชั้นระหว่างน้ำมันและน้ำ
(Creaming)

ภาพที่ 4.2 การแยกชั้นระหว่างน้ำมันและน้ำ (Creaming) ของตัวอย่างอิมัลชันที่มีไขมันเนยเป็นส่วนประกอบที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ (ภาพซ้าย) และตัวอย่างอิมัลชันที่มี Tween 80 ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก (ภาพขวา) หลังจากบ่มที่ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

หมายเหตุ: - อิมัลชันทุกตัวอย่างไม่พบการแยกชั้นระหว่างน้ำมันและน้ำที่สภาวะก่อนบ่ม

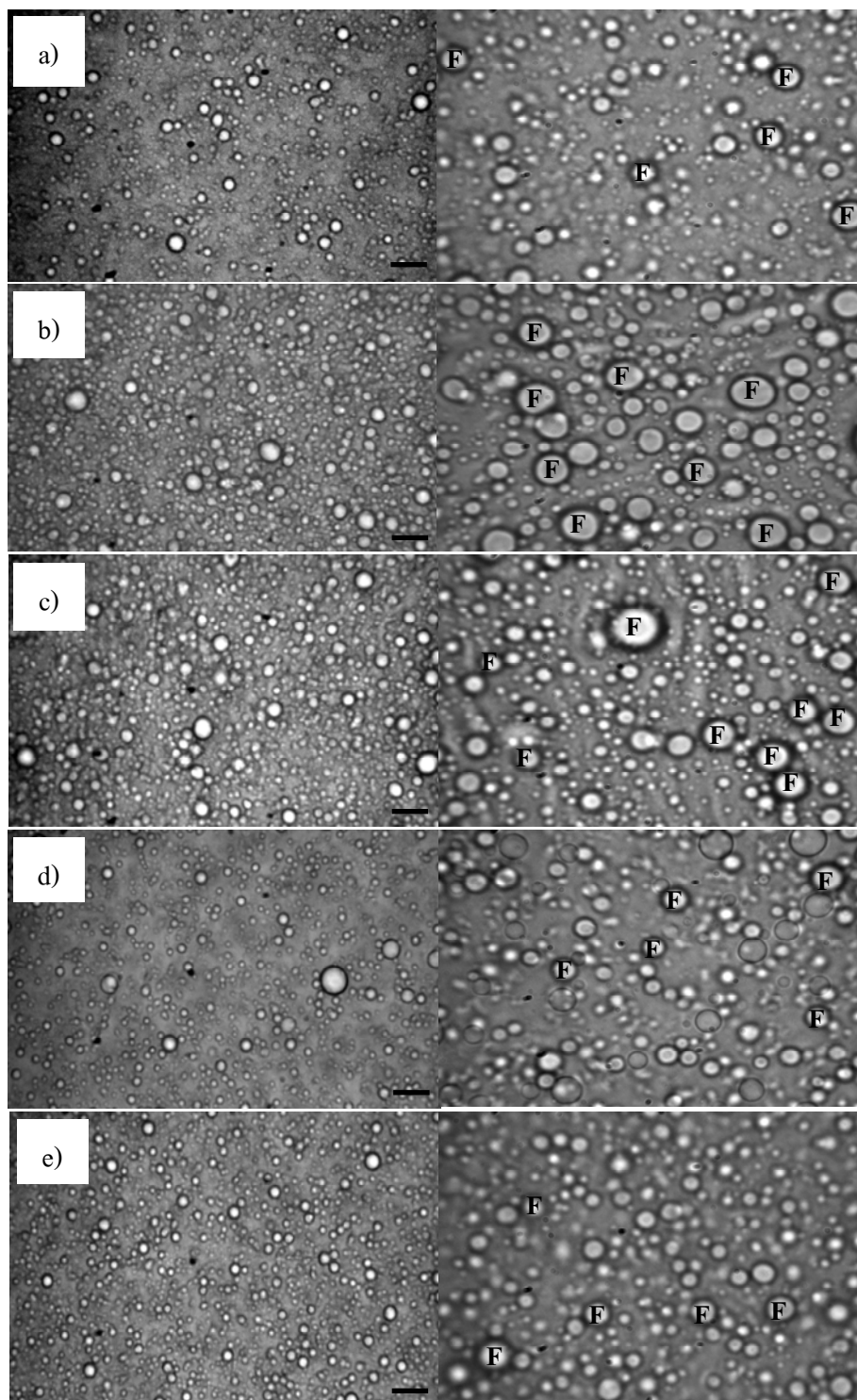
เมื่อพิจารณาระยะเวลาในการบ่มพบว่า ระยะเวลาในการบ่มไม่มีผลต่อขนาดของอนุภาคเม็ดไขมันของระบบอิมัลชัน ($p > 0.05$) (ภาพที่ 4.1) ยกเว้น ตัวอย่างอิมัลชันที่เติม GMO ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักพบขนาดอนุภาคเล็กลงหลังจากบ่มที่ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง อย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเกาะตัวกันเองของ GMO ที่มีมากเกินไปในรูปของไมเซลล์ในระหว่างที่บ่ม 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำให้เมื่อวัดขนาดอนุภาคเม็ดไขมันด้วยเครื่อง Laser particle size analyzer อาจวัดขนาดไมเซลล์ของ GMO ที่เกิดขึ้นด้วยจึงส่งผลให้ได้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเม็ดไขมันลดลง เมื่อพิจารณากราฟการกระจายตัวของขนาดอนุภาคเม็ดไขมันที่สภาวะหลังบ่มพบว่า มีฟิสิกขนาดเล็กเพิ่มขึ้นอีก 1 ฟิสิก ซึ่งฟิสิกดังกล่าวอาจเป็นฟิสิกของขนาดไมเซลล์ของ GMO ในตัวอย่างอิมัลชัน (ภาคผนวกภาพที่ ข.1 และ 2)

4.1.2 ผลของชนิดและปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์ต่อโครงสร้างระดับจุลภาคในระบบอิมัลชัน

จากการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของอนุภาคเม็ดไขมันในตัวอย่างอิมัลชัน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 400 และ 1000 เท่า (ภาพที่ 4.3) พบว่าการเติมอิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายได้ในน้ำ ได้แก่ Tween 60 หรือ Tween 80 (ภาพที่ 4.3 b และ c) ที่ระดับความเข้มข้นต่ำ ๆ (ร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก) ส่งผลให้ระบบอิมัลชันมีขนาดอนุภาคเม็ดไขมันใหญ่กว่าระบบอิมัลชันที่ไม่มีการเติมอิมัลซิไฟเออร์ (ภาพที่ 4.3 a) และระบบอิมัลชันที่เติมอิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายได้ในน้ำมัน ได้แก่ GMS หรือ GMO (ภาพที่ 4.3 d และ e) นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดอนุภาคเม็ดไขมันในระบบอิมัลชันที่เติม Tween 60 หรือ Tween 80 มีขนาดใหญ่ขึ้นทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคเม็ดไขมันเกิดการเกาะกลุ่มกัน (Flocculation) และเกิดการรวมตัวกันกลายเป็นอนุภาคเม็ดไขมันที่มีขนาดใหญ่ขึ้น (Coalescence) ดังที่ได้กล่าวแล้วข้างต้น ในขณะที่ระบบอิมัลชันที่เติม GMS หรือ GMO มีขนาดอนุภาคเม็ดไขมันใกล้เคียงกับระบบที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ (Control) ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับผลที่ได้จากการวัดขนาดอนุภาคเม็ดไขมัน (d 3,2) ของตัวอย่างอิมัลชันด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค (Laser particle size analyzer) (ภาพที่ 4.1)

4.1.3 ผลของชนิดและปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์ต่อความหนืดของระบบอิมัลชัน

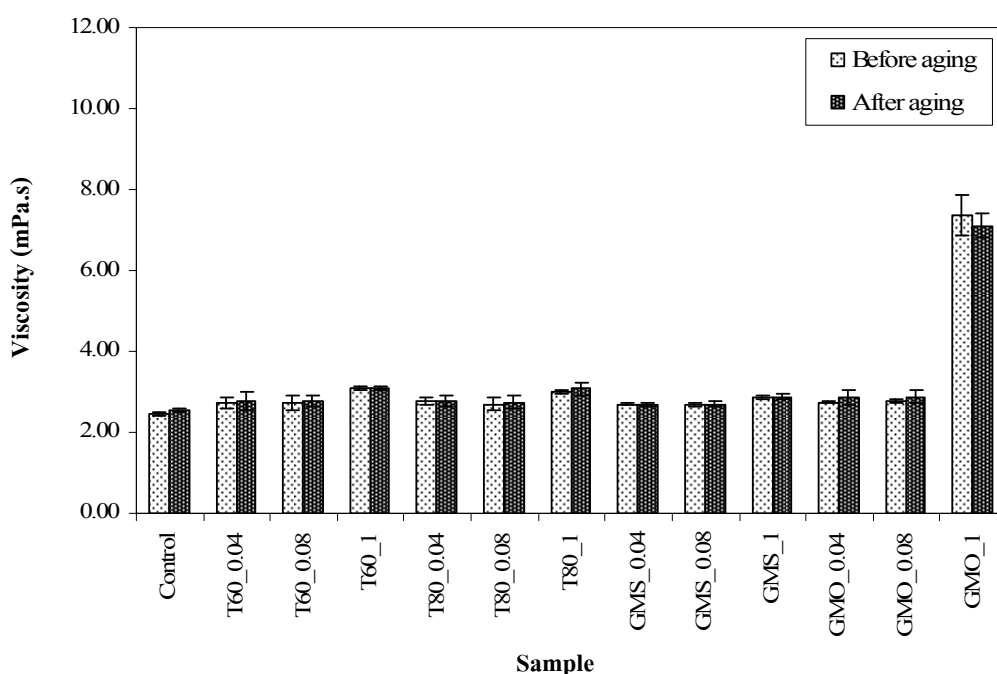
เมื่อพิจารณาผลของชนิดและปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์ต่อความหนืดของระบบอิมัลชันที่มีไขมันเนยเป็นส่วนประกอบ (ภาพที่ 4.4) พบว่าการเติมอิมัลซิไฟเออร์ส่งผลให้ระบบอิมัลชันมีความหนืดมากกว่าในระบบอิมัลชันที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ (Control) โดยที่ระดับความเข้มข้นต่ำ (ร้อยละ 0.04 และ 0.08 โดยน้ำหนัก) ของอิมัลซิไฟเออร์ทุกชนิดส่งผลให้ระบบอิมัลชันมีความหนืดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอิมัลซิไฟเออร์มากขึ้น (ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก) พบว่าระบบอิมัลชันมีความหนืดเพิ่มมากขึ้นและไม่แตกต่างกันที่ทุกชนิดของอิมัลซิไฟเออร์ ยกเว้น GMO ที่ส่งผลให้ระบบอิมัลชันมีความหนืดสูงมากอย่างเห็นได้ชัด จากผลการทดลองดังกล่าวพบว่า การเติมอิมัลซิไฟเออร์ส่งผลให้ระบบอิมัลชันมีความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอิมัลซิไฟเออร์จะมีส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic part) ไม่ว่าจะอยู่ในรูปไมเซลล์ในเฟสต่อเนื่องหรือจัดเรียงตัวอยู่ที่พื้นผิวระหว่างเฟสที่เป็นน้ำและน้ำมันจะหันส่วนที่ชอบน้ำเข้าสู่ น้ำและอาจเกิดอันตรกิริยากับน้ำส่งผลให้มีความหนืดของระบบอิมัลชันเพิ่มขึ้น ส่วนในกรณีของ GMO ที่ระดับความเข้มข้นสูง ๆ พบว่าระบบอิมัลชันมีความหนืดสูงมากอย่างเห็นได้ชัด (ภาพที่ 4.4) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในขณะที่ทำการวัดความหนืดที่อุณหภูมิต่ำ (5°C) พบว่าตัวอย่างอิมัลชันที่เติม GMO มีลักษณะเป็นเม็ดเล็ก ๆ ดังแสดงในภาพที่ 4.5 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเกิดการเกาะตัวกันเองบางส่วนของ GMO ที่มีมากเกินไปหรืออาจเกิดเนื่องจากการจัด



ภาพที่ 4.3 ภาพถ่ายอนุภาคเม็ดไขมันในตัวอย่างอิมัลชันหลังปั๊ม 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 400 เท่า (ภาพซ้าย) และ 1000 เท่า (ภาพขวา) โดย (a) ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ (b) Tween 60 (c) Tween 80 (d) GMS และ (e) GMO ที่ความเข้มข้นอิมัลซิไฟเออร์เท่ากันเท่ากับร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก (1 bar = 10 μm) (F : Fat droplet)

เรียงตัวใหม่ของ GMO ในรูปของ Cubic liquid crystalline phase เมื่อสัมผัสกับน้ำซึ่งจะเกิดขึ้นได้เมื่อมีปริมาณน้ำที่มากเกินไป (Excess water)

ในขณะที่การศึกษาก่อนหน้านี้ของ Boyd, Whittakar, Khoo และ Davey (2006) พบว่า GMO จะสร้างเป็น Cubic phase เมื่อในระบบมีปริมาณน้ำอย่างน้อยร้อยละ 20 ซึ่งในการทดลองนี้มีปริมาณน้ำสูงถึงร้อยละ 90 จึงมีโอกาที่จะสร้างเป็น Cubic phase ได้ และ Bergenstahl (1997) ได้กล่าวว่า อิมัลซิไฟเออร์ชนิด Monoolein หรือ GMO สามารถเปลี่ยนโครงสร้างเป็น Cubic phase ได้ที่อุณหภูมิต่ำ (ต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส) ในขณะที่โมโนกลีเซอไรด์ที่มีความอืดหรือ GMS จะเกิดที่อุณหภูมิสูง (70 องศาเซลเซียส) ในการศึกษานี้ได้วัดความหนืดที่อุณหภูมิต่ำจึงส่งผลให้มีโอกาสพบการเกิด Cubic phase ใน GMO มากกว่าที่จะพบใน GMS นอกจากนี้ Golding และ Sein (2004) ยังได้กล่าวไว้ว่าในกรณีที่ไม่มีโปรตีนเป็นส่วนประกอบภายในระบบพบว่าโมโนกลีเซอไรด์ชนิดที่ไม่อืด (GMO) สามารถเกิดการสร้างเป็น Cubic phase ได้ โดยอิมัลซิไฟเออร์ชนิด GMO ที่เกิดเป็นโครงสร้าง Cubic phase นี้จะให้ลักษณะคล้ายของแข็ง (Solid-like) มีความหนืดสูง (Highly viscous) และมีความคงตัวทางพลศาสตร์วิทยา (Thermodynamically stable) (Boyd et al., 2007; Rangelov and Almgren, 2005; Shah and Paradkar, 2005) ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้ในระบบอิมัลชันที่มีปริมาณของ GMO ที่มากเกินไปมีความหนืดเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด



ภาพที่ 4.4 ความหนืดที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสของระบบอิมัลชันที่ประกอบด้วยชนิดและปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์ที่แตกต่างกันในสภาวะก่อนบ่มและหลังบ่มที่ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.5 การเกิดผลึกในระหว่างวัดความหนืดที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสของระบบอิมัลชันที่มีอิมัลซิไฟเออร์ชนิด GMO ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

ทั้งนี้เมื่อพิจารณาถึงผลของระยะเวลาในการบ่มที่มีต่อความหนืดของระบบอิมัลชันพบว่า เวลาในการบ่มไม่มีผลต่อความหนืดของระบบอิมัลชันที่มีการใช้อิมัลซิไฟเออร์ทุกชนิดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ทั้งนี้เนื่องมาจากการที่มีอิมัลซิไฟเออร์ห่อหุ้มอนุภาคเม็ดไขมันทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคเม็ดไขมันในระบบอิมัลชันหลังจากบ่ม 24 ชั่วโมง (ภาพที่ 4.1) จึงทำให้ความหนืดของระบบไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

4.2 ผลของชนิดและปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์และชนิดของโปรตีนนมต่อความคงตัวของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม

การศึกษาได้แปรชนิดและปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์และชนิดของโปรตีนนม (ดังข้อ 3.3.3) และได้ศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ขนาดอนุภาคเม็ดไขมันและความหนืดของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่สภาวะก่อนและหลังบ่ม (4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง) ชนิดและปริมาณของโปรตีนที่ดูดซับที่พื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันและค่า Fat destabilization ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่สภาวะหลังบ่มซึ่งปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้แสดงถึงคุณลักษณะทางกายภาพและความคงตัวของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม

4.2.1 ผลของอิมัลซิไฟเออร์และโปรตีนนมต่อขนาดอนุภาคเม็ดไขมันในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม

เมื่อเปรียบเทียบขนาดอนุภาคเม็ดไขมันเฉลี่ยที่สภาวะก่อนบ่มของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมสูตรควบคุม (ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์) พบว่าตัวอย่างที่มีส่วนผสมของ SMP หรือ SC มีขนาด

อนุภาคเม็ดไขมันเฉลี่ยใกล้เคียงกัน ในขณะที่ตัวอย่างที่มีส่วนผสมของ WPC มีขนาดอนุภาคเม็ดไขมันใหญ่ที่สุด (ตารางที่ 4.1) ทั้งนี้โดยทั่วไปความสามารถของโปรตีนในการล้อมรอบอนุภาคเม็ดไขมันและการทำให้ระบบอิมัลชันมีความคงตัวขึ้นอยู่กับขนาด ความยืดหยุ่น ความสามารถในการคลายตัว การดูดซับและการกระจายตัว (Spread) บนพื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมัน (Fillery-Travis, Mills and Wilde, 2000; Udabage et al., 2005) โดย SMP และ SC มีเคซีนเป็นส่วนประกอบเหมือนกันซึ่งมีส่วนโดยประมาณร้อยละ 50 และ 100 ตามลำดับ จึงส่งผลให้ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ทำจาก SMP มีพฤติกรรมคล้าย SC ในแง่ของความสามารถเกิดอิมัลชัน (Emulsion activity) โดยระหว่างที่ลดขนาดอนุภาคเม็ดไขมันด้วยกระบวนการโฮโมจีไนเซชัน เคซีนซึ่งมีโครงสร้างแบบ Random coil และไม่มีโครงสร้างแบบตติยภูมิ (Tertiary structure) จะสามารถจัดเรียงตัวที่บริเวณพื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันได้อย่างรวดเร็วและลดแรงตึงผิวระหว่างรอยต่อ (Interfacial tension) ได้มาก (Zayas, 1997) ทำให้ความสามารถในการลดขนาดอนุภาคเม็ดไขมันให้เล็กลงเป็นไปได้ง่ายขึ้น (Walstra, 1993) ในขณะที่โปรตีนเวย์มีโครงสร้างก้อนกลม (Globular protein) ที่มีความแข็งแรงจากการที่มีพันธะไดซัลไฟด์ภายในโครงสร้าง (Dickinson, 1998, 2001) จะจัดเรียงตัวที่บริเวณพื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันได้อย่างช้า ๆ ส่งผลให้ระบบมีขนาดอนุภาคเม็ดไขมันใหญ่กว่าในระบบที่มีเคซีนเป็นส่วนประกอบ นอกจากนั้นโครงสร้างโปรตีนเวย์มีความเป็น Amphiphilic ที่น้อยกว่าเคซีนจึงทำให้การเคลื่อนที่ของเวย์ไปพื้นผิวระหว่างเฟสเกิดได้ยากกว่า (Damondaran, 1996) ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับการทดลองของ Udabage และคณะ (2005) ที่พบว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SMP มีขนาดอนุภาคเม็ดไขมันเล็กกว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ WPC

เมื่อพิจารณาผลของอิมัลซิไฟเออร์ต่อขนาดอนุภาคเม็ดไขมันในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่สภาวะก่อนการบ่ม (ตารางที่ 4.1) พบว่าตัวอย่างที่มีส่วนผสมของ SMP หรือ SC ที่เติมอิมัลซิไฟเออร์มีขนาดอนุภาคเม็ดไขมันเฉลี่ยที่เล็กกว่าตัวอย่างที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์อาจเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่เป็นยังพื้นผิวระหว่างเฟสที่เป็นน้ำและน้ำมันที่รวดเร็วของทั้งอิมัลซิไฟเออร์และเคซีนจึงมีผลส่งเสริมซึ่งกันและกันในการล้อมรอบเม็ดไขมันโดยเฉพาะ Tween 60 และ Tween 80 ทำให้ระบบอิมัลชันมีขนาดอนุภาคเม็ดไขมันเฉลี่ยที่เล็กกว่าตัวอย่างที่เติม GMS และ GMO อาจเนื่องมาจาก Tween 60 และ Tween 80 สามารถที่จะละลายอยู่ในเฟสต่อเนื่องเมื่อทำการลดขนาดอนุภาคเม็ดไขมันอิมัลซิไฟเออร์ดังกล่าวสามารถเคลื่อนที่ไปยังพื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันได้อย่างรวดเร็วทำให้ลดแรงตึงผิวระหว่างรอยต่อได้มากจึงเป็นการง่ายต่อการลดขนาดเม็ดไขมันด้วยโฮโมจีไนเซชันต่างจาก GMS และ GMO ที่ละลายในไขมันจะลดแรงตึงผิวได้น้อยกว่า (Walstra, 1993) สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Goff และ Jordan (1989) พบว่า Tween 60 และ Tween 80 มีความสามารถในการลดแรงตึงผิวระหว่างเฟสที่เป็นน้ำและน้ำมันได้มากกว่าโมโนกลีเซอไรด์

ตารางที่ 4.1 ขนาดอนุภาคเม็ดไขมันและความหนืดที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ทำจากโปรตีนและอิมัลซิไฟเออร์ชนิดต่างๆ ที่สภาวะก่อนและหลังบ่ม 4 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

Protein	Emulsifier	Fat particle size ($d_{3,2}$: μm)		Viscosity (mPa.s)	
		Before aging	After aging	Before aging	After aging
SMP	Control*	$1.64 \pm 0.03^{A, B, a}$	$1.64 \pm 0.05^{A, B, a}$	$126.50 \pm 4.58^{A, A, a}$	$127.83 \pm 3.84^{B, A, a}$
	Tween 60	$1.37 \pm 0.02^{C, C, a}$	$1.36 \pm 0.03^{C, C, a}$	$120.00 \pm 12.71^{AB, A, a}$	$133.37 \pm 6.32^{A, A, b}$
	Tween 80	$1.34 \pm 0.04^{D, C, a}$	$1.36 \pm 0.05^{C, C, a}$	$116.73 \pm 2.43^{B, A, a}$	$121.83 \pm 3.43^{B, A, b}$
	GMS	$1.42 \pm 0.03^{B, C, a}$	$1.41 \pm 0.03^{B, C, a}$	$120.00 \pm 2.79^{AB, A, a}$	$124.77 \pm 1.58^{B, A, b}$
	GMO	$1.38 \pm 0.03^{C, C, a}$	$1.39 \pm 0.03^{B, C, a}$	$121.27 \pm 2.25^{AB, A, a}$	$124.60 \pm 2.06^{B, A, b}$
SC	Control*	$1.64 \pm 0.03^{A, B, a}$	$1.64 \pm 0.03^{A, B, a}$	$112.83 \pm 7.14^{A, B, a}$	$115.00 \pm 6.54^{AB, B, a}$
	Tween 60	$1.59 \pm 0.06^{B, B, a}$	$1.61 \pm 0.05^{A, B, a}$	$112.10 \pm 1.41^{A, AB, a}$	$111.23 \pm 2.58^{BC, B, a}$
	Tween 80	$1.60 \pm 0.08^{B, B, a}$	$1.61 \pm 0.07^{A, B, a}$	$111.13 \pm 0.73^{A, B, a}$	$115.87 \pm 1.80^{A, B, b}$
	GMS	$1.59 \pm 0.05^{B, B, a}$	$1.62 \pm 0.05^{A, B, a}$	$104.90 \pm 1.72^{B, B, a}$	$107.20 \pm 1.25^{C, B, b}$
	GMO	$1.64 \pm 0.06^{A, B, a}$	$1.64 \pm 0.04^{A, B, a}$	$114.33 \pm 1.48^{A, B, a}$	$109.23 \pm 3.11^{C, B, b}$
WPC	Control*	$1.74 \pm 0.03^{A, A, a}$	$1.74 \pm 0.03^{C, A, a}$	$95.00 \pm 1.28^{B, C, a}$	$94.83 \pm 0.66^{B, C, a}$
	Tween 60	$1.73 \pm 0.02^{AB, A, a}$	$1.78 \pm 0.03^{A, A, b}$	$109.40 \pm 3.64^{A, B, a}$	$106.07 \pm 2.74^{A, B, a}$
	Tween 80	$1.72 \pm 0.04^{B, A, a}$	$1.79 \pm 0.04^{A, A, b}$	$94.57 \pm 3.43^{B, C, a}$	$95.00 \pm 1.28^{B, C, a}$
	GMS	$1.74 \pm 0.02^{A, A, a}$	$1.74 \pm 0.02^{C, A, a}$	$95.50 \pm 1.09^{B, C, a}$	$95.90 \pm 5.53^{B, C, a}$
	GMO	$1.72 \pm 0.03^{AB, A, a}$	$1.73 \pm 0.03^{C, A, a}$	$96.40 \pm 2.24^{B, C, a}$	$97.50 \pm 2.74^{B, C, a}$

หมายเหตุ:

- Control* หมายถึง สูตรส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์
- A, B, C, D เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งภายในโปรตีนชนิดเดียวกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
- A, B, C เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งภายในอิมัลซิไฟเออร์ชนิดเดียวกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
- a, b เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวนอน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ในขณะที่ตัวอย่างที่มีส่วนผสมของ WPC และอิมัลซิไฟเออร์มีขนาดอนุภาคเม็ดไขมันไม่แตกต่างจากตัวอย่างควบคุม (ตารางที่ 4.1) แสดงให้เห็นว่าอิมัลซิไฟเออร์ไม่มีผลต่อขนาดอนุภาคเม็ดไขมันในตัวอย่างที่เตรียมจากโปรตีนเวย์อาจเนื่องมาจากแม้ว่าอิมัลซิไฟเออร์สามารถเคลื่อนที่ไปพื้นผิวระหว่างสองเฟสได้อย่างรวดเร็วแต่ปริมาณที่เติมลงไปเพียงร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก ซึ่งวัตถุประสงค์การใช้อิมัลซิไฟเออร์ในไอศกรีมไม่ใช่เพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบอิมัลชัน ดังนั้นปริมาณที่ใช้ดังกล่าวจึงไม่เพียงพอกับพื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันที่เพิ่มขึ้นในระบบ กอปรกับการเคลื่อนที่ของโปรตีนเวย์ที่ช้าจึงอาจทำให้อนุภาคเม็ดไขมันเกิดการกลับมารวมตัวกันใหม่ได้หลังจากที่แตกเป็นอนุภาคเล็ก ๆ (Recoalescence) (McClement, 1999) ขนาดเม็ดไขมันที่ได้จึงเกิดจากความสามารถในการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ของโปรตีนเวย์ ดังนั้นการเติมอิมัลซิไฟเออร์จึงไม่มีผลต่อขนาดเม็ดไขมันในตัวอย่างที่มีส่วนผสมของ WPC

ระยะเวลาการบ่ม (4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง) ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคเม็ดไขมันในตัวอย่างที่มีส่วนผสมของ SMP, SC หรือ WPC ที่เติมและไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ ($p > 0.05$) ยกเว้นส่วนผสมของ WPC+Tween 60 หรือ WPC+Tween 80 ที่พบอนุภาคเม็ดไขมันมีขนาดใหญ่แสดงให้เห็นว่า SMP และ SC สามารถป้องกันการเกิดการรวมตัวกันของเม็ดไขมันได้ อาจเนื่องมาจากตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ได้จากการทดลองมีค่า pH ประมาณ 6.5-7 ซึ่งมีค่ามากกว่า Isoelectric point (pI) ของเคซีน (pI ~ 4.6) จึงทำให้เคซีนที่ล้อมอนุภาคเม็ดไขมันสามารถสร้างแรงผลัก (Repulsive interaction) จากประจุลบของฟอสโฟเซอรีน (Phosphoserine) บนโมเลกุลเบต้า-เคซีนจึงเกิดเป็นแรงผลักทางไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force) อีกทั้งเบต้า-เคซีนมีการจัดเรียงตัวที่พื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันแบบ Tail ยื่นออกสู่เฟสต่อเนื่อง (Continuous phase) เกิดเป็น Steric force ส่งผลให้ระบบมีความคงตัวต่อการรวมกัน (Coalescence) ในระหว่างการบ่มได้ (Wilde, Mackie, Husband, Gunning and Morris, 2004) เป็นที่น่าสังเกตว่าการเติม Tween 60 หรือ Tween 80 มีผลลดความคงตัวของเม็ดไขมันในตัวอย่างที่เตรียมจาก WPC อาจเป็นไปได้ว่า Tween 60 หรือ Tween 80 สามารถแทนที่โปรตีนเวย์บริเวณพื้นผิวเม็ดไขมันได้บางส่วนทำให้บริเวณดังกล่าวเกิดการเกาะตัวหรือรวมตัวกันของอนุภาคเม็ดไขมันจึงพบขนาดเม็ดไขมันที่ใหญ่มากขึ้น

4.2.2 ผลของอิมัลซิไฟเออร์และโปรตีนนมต่อความหนืดของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม

ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SMP ที่สภาวะก่อนบ่มพบความหนืดมากกว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SC และ WPC ตามลำดับ (ตารางที่ 4.1) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก SMP มีเคซีนเป็นส่วนประกอบทำให้มีความสามารถในการอุ้มน้ำได้เช่นเดียวกับ SC อีกทั้งเมื่อให้ความร้อนแก่ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมในขั้นตอนกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์ทำให้โปรตีนเวย์คลายตัวได้บางส่วนและอาจเกิดอันตรกิริยากับเคซีนโดยเฉพาะแอลฟา-และแคปปา-เคซีน

(α - and κ -caseins) ด้วยพันธะไดซัลไฟด์ได้ (Livney, Corredig and Dalgleish, 2003) ทำให้โครงสร้างโปรตีนมีขนาดใหญ่และเกิดแรงต้านการไหลได้มากขึ้นซึ่งไม่พบใน SC ขณะที่ SC มีโครงสร้างที่ยืดหยุ่นและเปิดกว้างกว่า WPC จะเกิดอันตรกิริยากับน้ำได้มากจึงพบความหนืดที่สูงกว่า (จิรวัดน์ ยงสวัสดิกุล, 2549; Damondaran, 1996) ทั้งนี้การเติมอิมัลซิไฟเออร์ไม่มีผลต่อการเพิ่มหรือลดความหนืดที่สภาวะก่อนบ่มของส่วนผสมของ SMP, SC หรือ WPC อย่างไรก็ตามความหนืดของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SMP หรือ SC ที่สภาวะหลังบ่ม (4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง) พบว่ามีค่าสูงมากขึ้น ($p \leq 0.05$) อาจเนื่องมาจากในระหว่างที่บ่มส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมอาจเกิดการแทนที่โปรตีนนมด้วยอิมัลซิไฟเออร์บริเวณพื้นผิวของอนุภาคเม็ดยังมันทำให้โปรตีนนมหลุดออกมาอยู่ในเฟสต่อเนื่องมากขึ้นและสามารถเกิดอันตรกิริยากับน้ำได้มากขึ้นส่งผลให้มีความหนืดสูงขึ้น ในขณะที่ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ WPC พบว่าความหนืดคงที่หลังจากบ่มทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอาจเกิดการแทนที่โปรตีนนมด้วยอิมัลซิไฟเออร์บริเวณพื้นผิวของอนุภาคเม็ดยังมันได้เช่นเดียวกัน แต่โปรตีนเวย์ที่หลุดจากบริเวณพื้นผิวของอนุภาคเม็ดยังมันอาจมีบางส่วนที่ยังคงมีโครงสร้างแบบก้อนกลมอยู่จึงทำให้เกิดอันตรกิริยากับน้ำในเฟสต่อเนื่องได้น้อยกว่ากรณีของเคซีนจึงส่งผลให้ไม่พบการเปลี่ยนแปลงความหนืดหลังจากบ่ม 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

4.2.3 ผลของอิมัลซิไฟเออร์และโปรตีนนมต่อปริมาณและชนิดของโปรตีนที่ดูดซับที่พื้นผิวของอนุภาคเม็ดยังมันของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม

การศึกษาปริมาณโปรตีนที่ดูดซับบริเวณพื้นผิวของอนุภาคเม็ดยังมัน (Protein surface coverage) ของตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่สภาวะหลังบ่ม (4 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง) เพื่อให้ทราบถึงความสามารถในการถูกดูดซับบนบริเวณพื้นผิวของเม็ดยังมันในโปรตีนแต่ละชนิด (SMP, SC หรือ WPC) การศึกษานี้ได้นำตัวอย่างไปปั่นเหวี่ยงเพื่อให้เกิดการแยกชั้นระหว่างส่วนที่เป็นซีรัม (Continuous phase) และส่วนที่เป็นครีม (Dispersed phase) และวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนทั้งสามชนิดด้วยวิธี Lowry method (ตารางที่ 4.2) และการศึกษาชนิดของโปรตีนที่ดูดซับบริเวณพื้นผิวของอนุภาคเม็ดยังมันเพื่อให้ทราบถึงผลของอิมัลซิไฟเออร์ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงชนิดของโปรตีน (α -casein, β -casein, κ -casein, β -Lg หรือ α -La) ที่บริเวณพื้นผิวของอนุภาคเม็ดยังมันทำได้โดยใช้วิธี Sodium dodecyl sulfate - polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE) (ตารางที่ 4.3)

เมื่อพิจารณาปริมาณโปรตีนที่ดูดซับบริเวณผิวของอนุภาคเม็ดยังมัน (ส่วนที่เป็นครีม) พบว่า ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SC มีปริมาณโปรตีนที่ดูดซับบริเวณผิวของอนุภาคเม็ดยังมันไม่แตกต่างจากตัวอย่างที่มีส่วนผสมของ WPC ($p > 0.05$) ในขณะที่ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SMP มีปริมาณโปรตีนที่ดูดซับที่บริเวณพื้นผิวของอนุภาคเม็ดยังมัน

ไขมันสูงที่สุด ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ 4.2) ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลวิจัยของ Pelan และคณะ (1997) พบว่าระบบอิมัลชันที่มีส่วนผสมของ SC และ WPC มีปริมาณโปรตีนที่ดูดซับบริเวณผิวของอนุภาคเม็ดไขมันที่ใกล้เคียงกันคือ ประมาณ 2.2 และ 2.4 mg/m² ตามลำดับ ส่วน SMP มีความสามารถในการดูดซับที่พื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันได้มากที่สุด (~ 6 mg/m²) ทั้งนี้อาจเนื่องจากโปรตีนมีลักษณะและโครงสร้างพื้นฐานที่แตกต่างกัน โดย SC เป็นโปรตีนที่ทำการแยกโปรตีนออกจากโปรตีนนมโดยการตกตะกอนด้วยกรดหรือเอนไซม์เรนเนต (Rennet) ซึ่งขั้นตอนในการตกตะกอนนี้จะทำลายโครงสร้างเคซีน ไมเซลล์ (Casein micelle) ตามธรรมชาติทำให้เคซีนที่แยก

ตารางที่ 4.2 ปริมาณโปรตีนของตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ทำจากโปรตีนนมและอิมัลซิไฟเออร์ชนิดต่าง ๆ ในส่วนที่เป็นชีร์และชั้นครีมที่ได้หลังบ่ม 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

Protein	Emulsifier	Approximate protein content (%) ^{1 ns}	
		Serum	Cream
SMP	Control*	62.55 ± 1.95	38.77 ± 0.52
	Tween 60	66.84 ± 1.72	40.57 ± 3.22
	Tween 80	65.37 ± 3.86	39.22 ± 7.96
	GMS	66.54 ± 2.68	38.65 ± 2.45
	GMO	65.74 ± 1.34	40.02 ± 1.25
SC	Control*	83.75 ± 1.85	12.35 ± 0.13
	Tween 60	84.78 ± 0.01	13.46 ± 5.88
	Tween 80	83.43 ± 2.69	13.25 ± 3.54
	GMS	83.81 ± 2.99	11.71 ± 1.53
	GMO	82.01 ± 1.85	13.31 ± 1.51
WPC	Control*	79.96 ± 1.03	11.85 ± 1.34
	Tween 60	81.15 ± 1.61	13.45 ± 0.42
	Tween 80	83.78 ± 1.97	12.21 ± 0.94
	GMS	80.34 ± 2.40	13.77 ± 0.62
	GMO	80.05 ± 2.33	15.26 ± 2.10

หมายเหตุ: - Control* หมายถึง สูตรส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์

- 1 ns เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของปริมาณโปรตีนทั้งในส่วนของชีร์และครีมภายในโปรตีนชนิดเดียวกัน หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางที่ 4.3 ชนิดและปริมาณโปรตีนที่ดูดซับบนอนุภาคเม็ดไขมัน (ส่วนที่เป็นครีม) ของตัวอย่าง ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่สภาวะหลังบ่ม 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

Protein Emulsifier		Protein content ($\mu\text{g Protein}$) ^{1 ns}					Total protein ($\mu\text{g Protein}$) ^{1 ns}
		α_s -casein	β -casein	κ -casein	β -Lg	α -La	
SMP	Control	3.41 $\pm$ 2.89	2.47 $\pm$ 0.65	0.79 $\pm$ 0.25	3.35 $\pm$ 1.10	0.83 $\pm$ 0.51	10.85 $\pm$ 3.64
	Tween 60	3.87 $\pm$ 1.04	2.51 $\pm$ 1.05	1.09 $\pm$ 0.51	3.03 $\pm$ 0.71	0.71 $\pm$ 0.33	10.21 $\pm$ 3.67
	Tween 80	3.18 $\pm$ 2.79	2.09 $\pm$ 1.41	0.70 $\pm$ 0.23	3.52 $\pm$ 1.69	0.88 $\pm$ 0.44	11.38 $\pm$ 1.36
	GMS	3.03 $\pm$ 2.03	2.80 $\pm$ 0.55	0.83 $\pm$ 0.30	3.59 $\pm$ 1.84	0.95 $\pm$ 0.57	11.26 $\pm$ 1.35
	GMO	2.85 $\pm$ 2.27	2.17 $\pm$ 1.13	0.77 $\pm$ 0.22	2.93 $\pm$ 0.82	1.21 $\pm$ 0.47	9.93 $\pm$ 3.36
SC	Control	4.29 $\pm$ 3.03	2.71 $\pm$ 1.54	0.99 $\pm$ 0.71	-	-	7.99 $\pm$ 3.47
	Tween 60	3.55 $\pm$ 0.34	1.41 $\pm$ 1.09	0.67 $\pm$ 0.31	-	-	7.58 $\pm$ 2.41
	Tween 80	4.67 $\pm$ 2.55	2.04 $\pm$ 1.19	0.87 $\pm$ 0.65	-	-	5.64 $\pm$ 1.19
	GMS	3.96 $\pm$ 2.34	1.98 $\pm$ 0.89	0.67 $\pm$ 0.35	-	-	6.61 $\pm$ 2.93
	GMO	5.64 $\pm$ 3.69	1.56 $\pm$ 0.67	0.55 $\pm$ 0.19	-	-	7.74 $\pm$ 3.63
WPC	Control	-	-	-	2.80 $\pm$ 0.58	1.80 $\pm$ 0.57	4.66 $\pm$ 1.03
	Tween 60	-	-	-	3.18 $\pm$ 0.58	1.57 $\pm$ 0.30	4.65 $\pm$ 0.99
	Tween 80	-	-	-	3.00 $\pm$ 0.59	1.65 $\pm$ 0.40	4.75 $\pm$ 0.85
	GMS	-	-	-	3.11 $\pm$ 1.06	1.68 $\pm$ 0.37	4.78 $\pm$ 1.37
	GMO	-	-	-	2.68 $\pm$ 0.71	1.49 $\pm$ 0.68	4.17 $\pm$ 1.38

หมายเหตุ: - β -Lg คือ β -Lactoglobulin และ α -La คือ α -Lactalbumin

- 1 ns เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยภายในโปรตีนชนิดเดียวกัน หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)

ออกมาได้เป็นโปรตีนที่มีหน่วยย่อยอิสระ (Individual casein) เช่น แอลฟา-เคซีน (α_s -casein) เบต้า-เคซีน (β -casein) และแกมมา-เคซีน (κ -casein) ในขณะที่ SMP จะผ่านกระบวนการทำแห้งแบบพ่นกระจาย (Spray drying) ไม่มีขั้นตอนในการตกตะกอนโปรตีนจึงทำให้โปรตีนที่ได้ยังคงมีโครงสร้างที่เป็นเคซีน ไมเซลล์ (Casein micelle) ตามธรรมชาติและมีบางส่วนที่เป็นโปรตีนที่เกาะตัวกัน (Aggregated protein) (Euston and Hirst, 2000; Mulvihill, 1992; Sing and Newstead, 1992)

อย่างไรก็ตาม Euston และ Hirst (1999) ยังพบว่าระบบอิมัลชันที่มีส่วนผสมของ SMP มีปริมาณโปรตีนดูดซับที่พื้นผิวอนุภาคเม็ดไขมันมากกว่า SC อาจเนื่องจาก SMP มีโครงสร้างธรรมชาติที่เกาะกัน (Aggregated nature of protein) ทำให้โปรตีนที่ดูดซับบริเวณผิวของอนุภาคเม็ด

ไขมันเหมือนกับเป็นโปรตีนกลุ่มใหญ่ (Large clumps) ส่งผลให้โปรตีนที่ดูดซับที่พื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันมีปริมาณที่มากกว่าโปรตีน SC ซึ่งเป็นโปรตีนที่มีขนาดเล็ก เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นโปรตีนที่มีหน่วยย่อยอิสระ (Individual casein) จึงดูดซับที่พื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันแบบชั้นเดียว (Monolayer) ส่วนการเติมอิมัลซิไฟเออร์ในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนทั้งในส่วนของชีร์มและชั้นครีม ($p > 0.05$)

ผลการวิเคราะห์ชนิดของโปรตีนของชั้นครีมในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่สภาวะหลังบ่ม 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงพบว่า ที่บริเวณพื้นผิวอนุภาคเม็ดไขมันของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SMP ประกอบไปด้วยโปรตีน 5 ชนิด ได้แก่ แอลฟา-เคซีน (α -casein) เบต้า-เคซีน (β -casein) แคปปา-เคซีน (κ -casein) เบต้า-แลคโตกลูบูลิน (β -Lg) และแอลฟา-แลคตาบูมิน (α -La) ในขณะที่ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SC ประกอบด้วยแอลฟา-เคซีน (α -casein) เบต้า-เคซีน (β -casein) และแคปปา-เคซีน (κ -casein) และส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ WPC ประกอบด้วยเบต้า-แลคโตกลูบูลิน (β -Lg) และแอลฟา-แลคตาบูมิน (α -La) (ภาพผนวกภาพที่ ก.1-3) และเมื่อพิจารณาปริมาณของโปรตีนในแต่ละชนิดที่ดูดซับบนผิวอนุภาคเม็ดไขมันพบว่า ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่เติมอิมัลซิไฟเออร์ทุกชนิดมีปริมาณโปรตีนในแต่ละชนิดไม่แตกต่างจากส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ไม่มีการเติมอิมัลซิไฟเออร์ ($p > 0.05$) (ตารางที่ 4.3)

4.2.4 ผลของอิมัลซิไฟเออร์และโปรตีนนมต่อความคงตัวของอนุภาคเม็ดไขมันของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม

การศึกษาผลของอิมัลซิไฟเออร์และโปรตีนนมต่อ Fat destabilization ในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมพบว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ให้ค่า Fat destabilization ต่ำกว่าตัวอย่างที่มีอิมัลซิไฟเออร์ (ภาพที่ 4.6) แสดงว่าอิมัลซิไฟเออร์สามารถเหนี่ยวนำให้เม็ดไขมันเกาะกลุ่มกันได้สูงมากขึ้นทั้งนี้เนื่องมาจากส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ผลิตจากโปรตีนนมเพียงอย่างเดียว (ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์) โปรตีนจะสร้างเมมเบรนที่มีความหนาและแข็งแรงล้อมรอบอนุภาคเม็ดไขมัน เมื่อระบบได้รับแรงกวนเพื่อเหนี่ยวนำให้อนุภาคเม็ดไขมันรวมตัวกัน (เป็นหลักการวิเคราะห์ Fat destabilization) ระบบจึงเกิดการรวมตัวกันระหว่างอนุภาคเม็ดไขมันได้ค่อนข้างต่ำ สอดคล้องกับ Goff และ Jordan (1989) พบว่าการที่มีอิมัลซิไฟเออร์ในระบบอิมัลชันจะลดปริมาณโปรตีนที่ดูดซับที่พื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันได้ ดังนั้นเมื่อระบบได้รับแรงกระทำจะทำให้เกิดการสูญเสียความคงตัวของไอศกรีมได้ง่ายส่งผลให้ระบบอิมัลชันมีความคงตัวน้อยลง

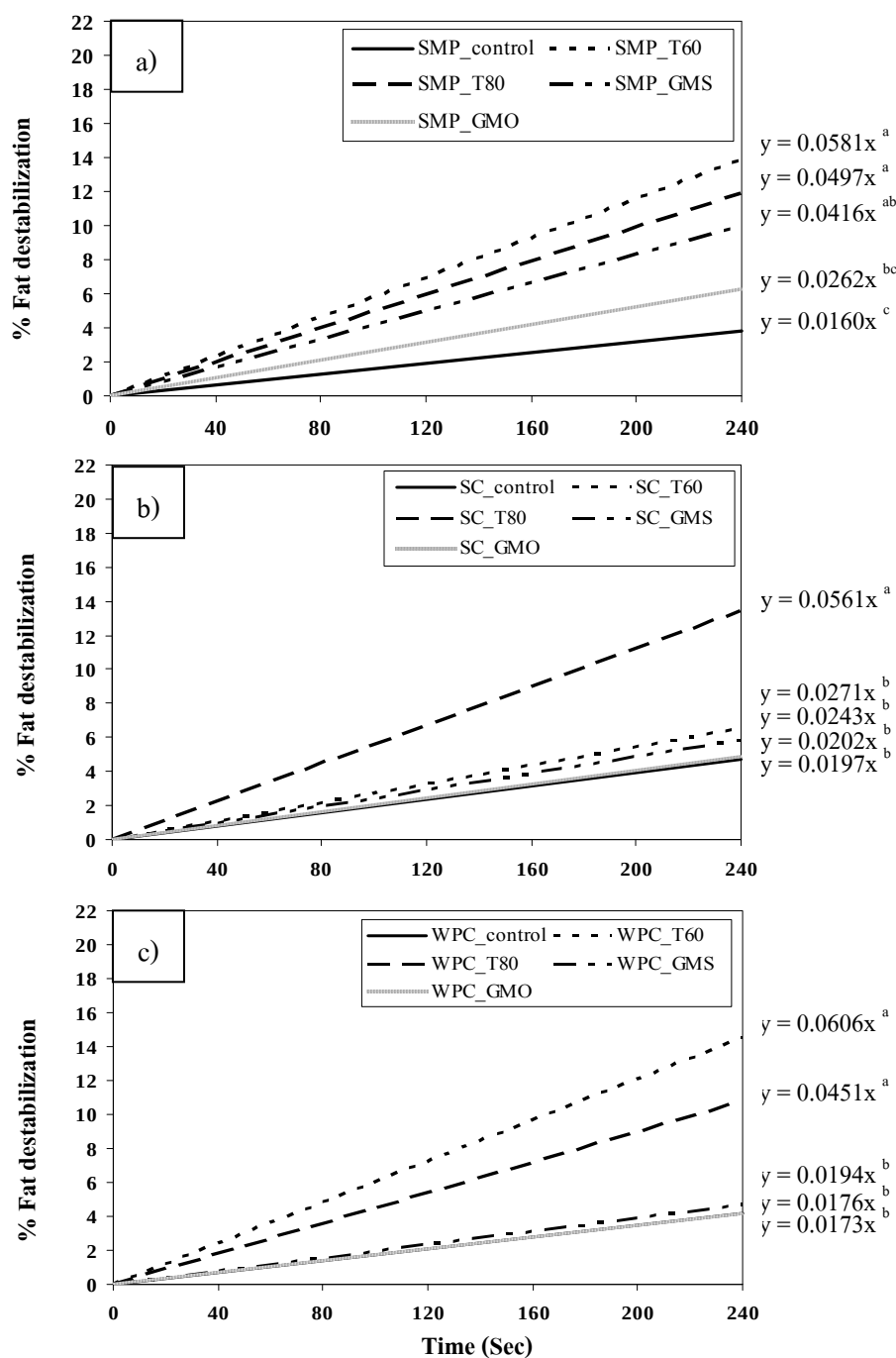
นอกจากนี้ยังพบว่า ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SMP+Tween 60, SC+Tween 80 และ WPC+Tween 60 ให้ค่า Fat destabilization สูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

($p \leq 0.05$) (ภาพที่ 4.6 a, b และ c) อาจเนื่องมาจากการแทนที่ของโปรตีนนมด้วยอิมัลซิไฟเออร์ที่บริเวณพื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันในระหว่างการบ่ม (4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง) ในขณะที่ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SMP+GMO, SC+GMO และ WPC+GMO สามารถเกิด Fat destabilization ได้เล็กน้อยแสดงให้เห็นว่า GMO สามารถแทนที่โปรตีนได้เล็กน้อย ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Palen และคณะ (1997) ที่พบว่าไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SMP+Tween 60 มีการแทนที่โปรตีนนมมากกว่าอิมัลซิไฟเออร์ชนิดโมโนกลีเซอไรด์ที่ไม่อิมิตัว (GMO)

นอกจากนี้ Euston และคณะ (1995) พบว่าอิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายได้ในน้ำมีประสิทธิภาพในการแทนที่โปรตีนนมบริเวณพื้นผิวระหว่างเฟสที่เป็นน้ำและน้ำมันได้ดีกว่าอิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายได้ในน้ำมันในระบบอิมัลชันประเภทน้ำมันในน้ำที่มี SC เป็นส่วนประกอบ และการศึกษาของ Chen และ Dickinson (1999) พบว่า GMO สามารถแทนที่โปรตีนเวย์ได้จึงอาจส่งผลให้ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ WPC+GMO สามารถเกิด Fat destabilization ได้เล็กน้อยและไม่แตกต่างจากสูตรควบคุม (ภาพที่ 4.6 c)

จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าอิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายได้ในน้ำช่วยส่งเสริมการเกิด Fat destabilization ได้ดีกว่าการใช้อิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายได้ในน้ำมัน (ภาพที่ 4.6 a) ซึ่งการเกิด Fat destabilization ในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม โดยอิมัลซิไฟเออร์มีความเป็น Surface activity ที่สูงกว่าโปรตีนจึงทำให้อิมัลซิไฟเออร์ถูกดูดซับบนบริเวณพื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันได้ดีกว่าโปรตีน ซึ่งชั้นของอิมัลซิไฟเออร์ที่ดูดซับบริเวณพื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันมีลักษณะบางกว่าชั้นของโปรตีน เมื่อให้แรงกระทำจะทำให้อนุภาคเม็ดไขมันเกิดการชนและรวมตัวกันอีกทั้งผลึกของไขมันที่อยู่ภายในอนุภาคเม็ดไขมันสามารถแทงทะลุบริเวณพื้นผิวของเม็ดไขมันที่มีความบางนี้ได้ทำให้เกิดการเชื่อมกันระหว่างอนุภาคเม็ดไขมันหรือที่เรียกว่า การรวมตัวกันบางส่วนของอนุภาคเม็ดไขมัน (Partial coalescence of fat) ส่งผลให้มีค่า Fat destabilization สูง (Boode and Walstra, 1993; Dickinson, Owusu and Williams, 1993)

นอกจากนี้ กลไกการรักษาเสถียรภาพของโปรตีนซึ่งทำให้เกิดชั้นที่หนาและมีความยืดหยุ่นทำให้เกิด Steric effect สูงโดยจะแตกต่างจากกลไกการรักษาเสถียรภาพของอิมัลซิไฟเออร์ที่จะให้ความคงตัวแก่ระบบอิมัลชันเนื่องจาก Gibbs-Marangoni effect ซึ่งเป็นกลไกที่อิมัลซิไฟเออร์สามารถเคลื่อนที่บริเวณพื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันเพื่อป้องกันลดแรงตึงผิวระหว่างรอยต่อได้ ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้เสถียรภาพของอิมัลชันที่มีสารทั้งสองชนิดลดลงเมื่อได้รับแรงกระทำเนื่องจากการเข้ากันไม่ได้ของสารทั้งสองชนิด (Incompatibility) (Clark, Wilde and Wilson, 1991; Fillery-Travis et al., 2000)



ภาพที่ 4.6 ค่า Fat destabilization ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของโปรตีนชนิดต่าง ๆ (a) SMP (b) SC และ (c) WPC และอิมัลซิไฟเออร์ ได้แก่ ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ (Control), Tween 60, Tween 80, GMS หรือ GMO ที่สภาวะหลังบ่ม 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

หมายเหตุ: - Slope ใช้ในการเปรียบเทียบค่า Fat destabilization

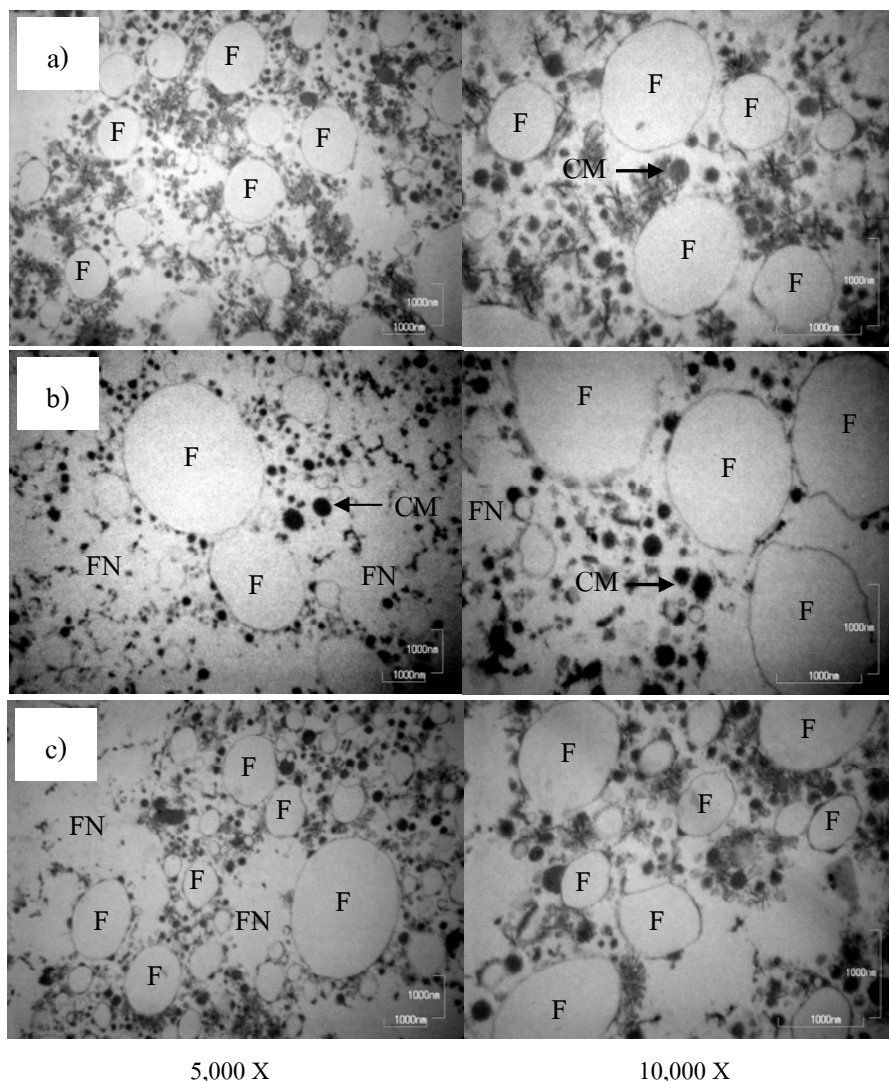
- a, b, c เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ตัวอักษรที่แตกต่างกันภายในโปรตีนชนิดเดียวกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4.2.5 ผลของอิมัลซิไฟเออร์และโปรตีนนมต่อโครงสร้างระดับจุลภาคของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม

การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคและการกระจายตัวของอนุภาคเม็ดไขมันด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscopy : TEM) ของตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SMP, SC หรือ WPC ที่สภาวะหลังบ่ม (4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง) โดยเลือกสูตรส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมในแต่ละชนิดโปรตีนที่เติมอิมัลซิไฟเออร์แล้วให้คุณลักษณะของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ดีโดยพิจารณาปัจจัยในด้านขนาดอนุภาคเม็ดไขมัน ความหนืดและ Fat destabilization ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม โดยคุณลักษณะของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ดีควรมีขนาดอนุภาคไขมันใหญ่ขึ้นและมีความหนืดของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมมากขึ้นหลังจากบ่มส่วนผสมที่ 4 องศาเซลเซียสและมีค่า Fat destabilization ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่สูงแต่ต้องไม่สูงมากจนอาจทำให้เกิดเป็นเนย (Butter) ได้ โดยเฉพาะปัจจัยในด้าน Fat destabilization เป็นปัจจัยที่สำคัญมากซึ่งจะบอกถึงการสูญเสียความคงตัวของอนุภาคเม็ดไขมันในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมส่งผลให้เกิดการรวมตัวกันบางส่วนของอนุภาคไขมันและเกิดเป็นโครงร่างตาข่ายของเม็ดไขมันได้มาก

จากผลการทดลองพบว่า ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ให้คุณลักษณะที่ดีที่สุดได้แก่ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SMP+Tween 60, SC+Tween 80 และ WPC+Tween 60 จึงเลือกตัวอย่างดังกล่าวเพื่อการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) อย่างไรก็ตามเพื่อการเปรียบเทียบและความเข้าใจที่ลึกซึ้งถึงโครงสร้างระดับจุลภาคของตัวอย่างที่มีส่วนผสมของอิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายได้ในน้ำและอิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายได้ในน้ำมันเนื่องจากอิมัลซิไฟเออร์ทั้งสองชนิดให้คุณลักษณะของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ต่างกันจึงทำการเตรียมส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่เติม GMO เพื่อศึกษาเปรียบเทียบด้วย

จากภาพโครงสร้างระดับจุลภาคของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมแสดงให้เห็นว่าอนุภาคเม็ดไขมันจะกระจายตัวอยู่ในเฟสต่อเนื่อง (Continuous phase) ซึ่งประกอบไปด้วยโปรตีนนม โพลีแซคคาไรด์ และน้ำตาล (ภาพที่ 4.7, 4.8 และ 4.9) และเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของอนุภาคเม็ดไขมันของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์พบว่า อนุภาคเม็ดไขมันอยู่ห่างกันและมีการกระจายตัวที่ดี ทั้งนี้ยังพบว่าโปรตีนนมมีแนวโน้มที่จะอยู่บริเวณเฟสต่อเนื่องรอบ ๆ อนุภาคเม็ดไขมัน (ภาพที่ 4.7 a และ 4.9 a) หรือบริเวณพื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันหรือพื้นผิวระหว่างเฟสที่เป็นน้ำและน้ำมัน (ภาพที่ 4.8 a) ซึ่งไม่ว่าจะเป็นการกระจายตัวของโปรตีนรอบ ๆ อนุภาคเม็ดไขมันหรือการจัดเรียงตัวของโปรตีนที่พื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันย่อมมีผลทำให้อนุภาคเม็ดไขมันมีโอกาสที่จะเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันได้ยากทั้งนี้เนื่องจากโปรตีนที่กระจายตัวอยู่รอบอนุภาคเม็ดไขมันจะทำให้อนุภาคเม็ดไขมันมีความคงตัวและโปรตีนที่อยู่บริเวณพื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันจะสร้าง

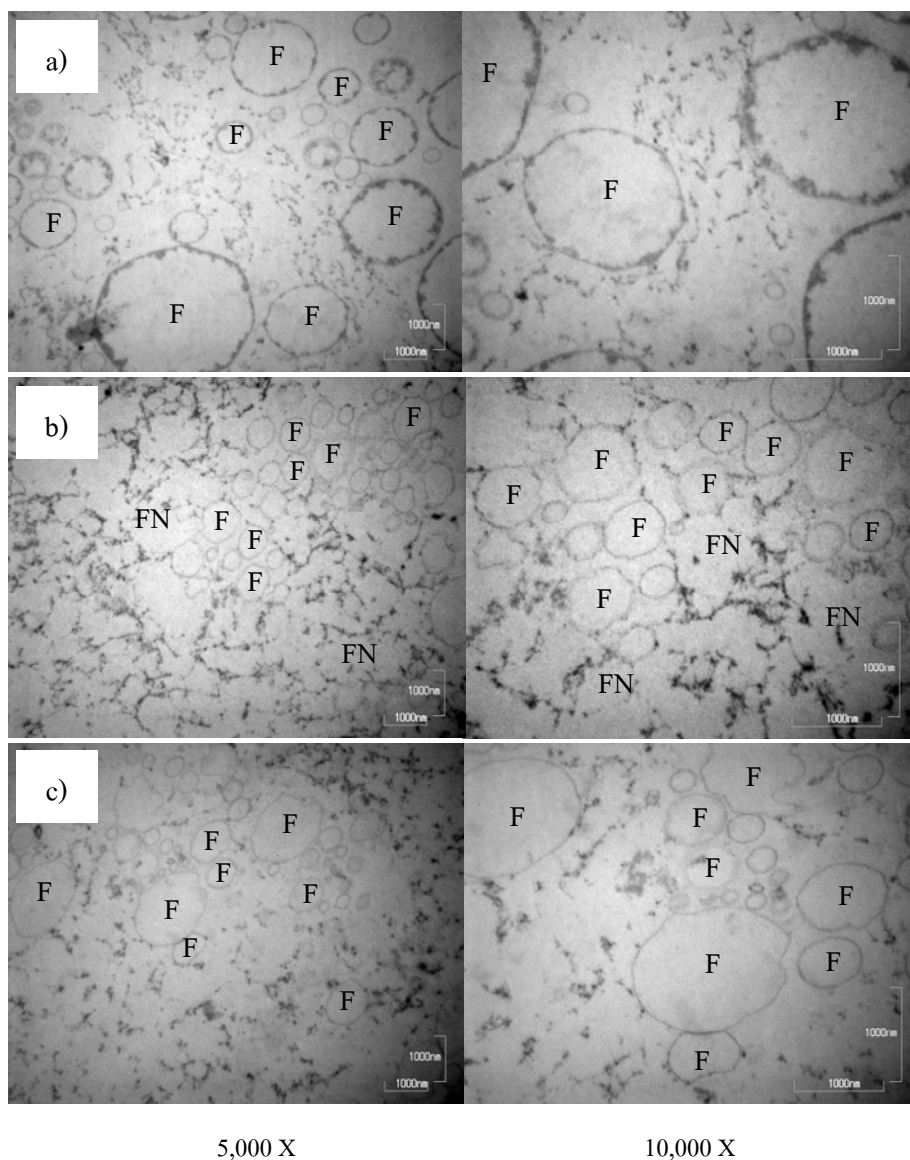


ภาพที่ 4.7 โครงสร้างระดับจุลภาคที่ส่องด้วยวิธี TEM เพื่อดูการกระจายตัวของอนุภาคเม็ดไขมันและโปรตีนนมของตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SMP และอีมัลซิไฟเออร์ชนิดต่าง ๆ กัน ได้แก่ (a) ไม่เติมอีมัลซิไฟเออร์ (Control) (b) Tween 60 และ (c) GMO ที่สภาวะหลังบ่ม ($4^{\circ}\text{C}/24\text{ h}$) (F : Fat droplet; FN : Fat network; CM : Casein micelle)

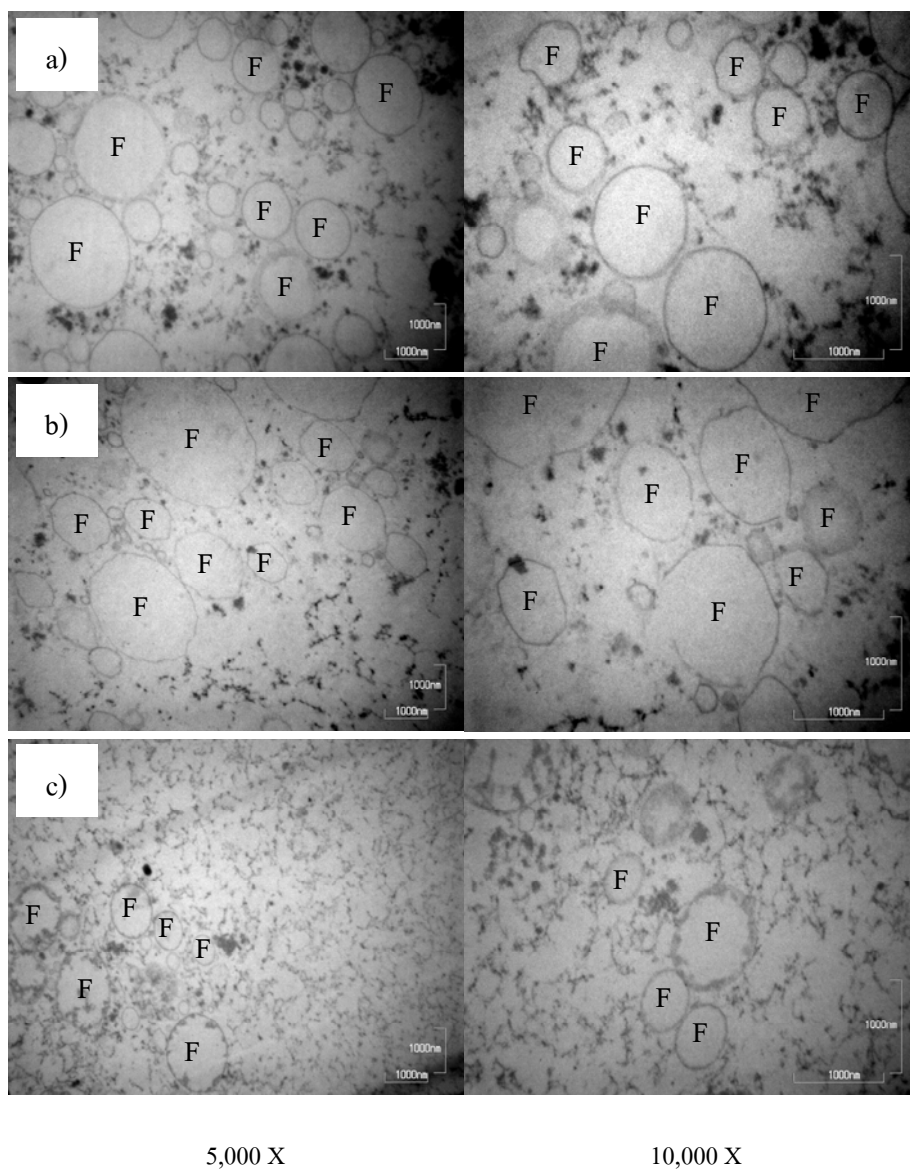
ชั้นที่มีความหนาส่งผลให้อนุภาคเม็ดไขมันมีความคงตัวมากขึ้นและเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันได้ยาก นอกจากนี้ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มี SC และไม่เติมอีมัลซิไฟเออร์จะมีปริมาณโปรตีนที่ถูกดูดซับบริเวณพื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันได้มาก (ภาพที่ 4.8 a) เนื่องจาก SC มีเคซีนซึ่งมีโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบและยืดหยุ่นได้ดีจึงเคลื่อนที่ไปจัดเรียงตัวบนพื้นผิวระหว่างเฟสได้มาก

นอกจากนี้ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีการเติมอีมัลซิไฟเออร์พบอนุภาคเม็ดไขมันอยู่ใกล้ชิดกันมากซึ่งมีโอกาสที่จะชนกันหรือรวมตัวกันได้มากกว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ไม่เติม

อิมัลซิไฟเออร์โดยเฉพาะส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SMP+Tween 60, SC+Tween 80 หรือ WPC+Tween 60 (ภาพที่ 4.7 b, 4.8 b และ 4.9 b) ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงการแทนที่โปรตีนนมด้วยอิมัลซิไฟเออร์ที่บริเวณพื้นผิวระหว่างเฟสที่เป็นน้ำและน้ำมันซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของอิมัลซิไฟเออร์ที่ใช้ เมื่อพิจารณาความสามารถในการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifying ability) ของโปรตีนนมและอิมัลซิไฟเออร์พบว่าขึ้นอยู่กับความยืดหยุ่นของโครงสร้างของโปรตีนนมด้วย



ภาพที่ 4.8 โครงสร้างระดับจุลภาคที่ส่องด้วยวิธี TEM เพื่อดูการกระจายตัวของอนุภาคเม็ดไขมันและโปรตีนนมของตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SC และอิมัลซิไฟเออร์ชนิดต่าง ๆ กัน ได้แก่ (a) ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ (Control) (b) Tween 80 และ (c) GMO ที่สภาวะหลังบ่ม ($4^{\circ}\text{C}/24\text{ h}$) (F : Fat droplet; FN : Fat network)



ภาพที่ 4.9 โครงสร้างระดับจุลภาคที่ส่องด้วยวิธี TEM เพื่อดูการกระจายตัวของอนุภาคเม็ดไขมันและโปรตีนนมของตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ WPC และอิมัลซิไฟเออร์ชนิดต่าง ๆ กัน ได้แก่ (a) ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ (Control) (b) Tween 60 และ (c) GMO ที่สภาวะหลังปั๊ม ($4^{\circ}\text{C}/24\text{ h}$) (F : Fat droplet)

ในขณะที่อิมัลซิไฟเออร์เป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กและมีความสามารถในการเป็น surface activity ได้มากกว่าโปรตีน ดังนั้นอิมัลซิไฟเออร์จึงสามารถแทนที่โปรตีนนมบริเวณพื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันซึ่งสามารถยืนยันผลการทดลองได้จากภาพถ่าย TEM โดยสังเกตได้จากปริมาณโปรตีนที่อยู่ในเฟสต่อเนื่องพบว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่เติมอิมัลซิไฟเออร์จะมี

ปริมาณโปรตีนอยู่ที่เฟสต่อเนื่องมากกว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ซึ่งการแทนที่โปรตีนนมด้วยอิมัลซิไฟเออร์นี้จะทำให้พื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันเกิดเป็นชั้นที่มีความบางลงส่งผลให้อนุภาคเม็ดไขมันมีความคงตัวน้อยลงและมีโอกาสที่จะเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันหรือรวมตัวกันได้มากขึ้นจนเกิด Fat destabilization ทั้งนี้ผลการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคด้วย TEM มีความสอดคล้องกับผลของ Fat destabilization ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม (ภาพที่ 4.6) นั่นคือส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่เติมอิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายได้ในน้ำทำให้อนุภาคเม็ดไขมันมีความคงตัวน้อยลงและมีโอกาสที่จะเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันหรือรวมตัวกันได้มากกว่าอิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายได้ในน้ำมันและไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ เมื่อให้แรงกระทำต่อระบบส่งผลให้ระบบมีความคงตัวน้อยลงแสดงให้เห็นถึงค่า Fat destabilization ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมดังกล่าวมีค่าสูงขึ้น

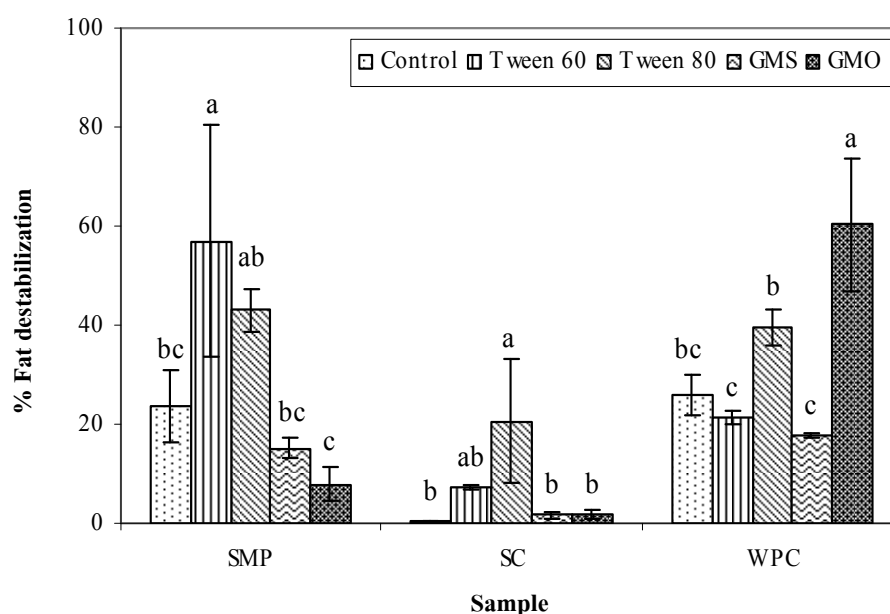
4.3 ผลของชนิดและปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์และชนิดของโปรตีนนมต่อความคงตัวและคุณภาพของไอศกรีม

การศึกษาผลของชนิดอิมัลซิไฟเออร์และโปรตีนนมต่อความคงตัวและคุณภาพของไอศกรีมซึ่งถือเป็นระบบที่มีความซับซ้อนมากกว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม เนื่องจากมีส่วนประกอบของเซลล์อากาศ ผลึกน้ำแข็ง เม็ดไขมันที่เกิดจากรวมตัวกันบางส่วนกระจายตัวอยู่ในชั้นของเหลวที่ไม่แข็งตัว (Unfrozen matrix) (Goff, 1997a) การศึกษาทำได้โดยนำส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมหลังจากบ่มที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่ได้จากข้อ 4.2 มาปั่นเป็นไอศกรีมและวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพและคุณภาพต่าง ๆ ของไอศกรีม ได้แก่ ค่า Fat destabilization การขึ้นโฟม การกระจายตัวของเซลล์อากาศ และความคงทนต่อการหลอมละลายหรืออัตราการละลายของไอศกรีม

4.3.1 ผลของชนิดของอิมัลซิไฟเออร์และโปรตีนนมต่อความคงตัวของอนุภาคเม็ดไขมันของไอศกรีม

เมื่อพิจารณาชนิดของโปรตีนนมต่อการเกิด Fat destabilization ของไอศกรีมพบว่าไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ WPC หรือ SMP ให้ค่า Fat destabilization ใกล้เคียงกันแต่สูงกว่าไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ภาพที่ 4.10) แสดงให้เห็นว่าโปรตีนเวย์มีบทบาทสำคัญต่อความคงตัวของอนุภาคเม็ดไขมันภายใต้แรงเฉือนผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Goff, Kinsella และ Jordan (1989) และ Palanuwech และ Coupland (2003) และ Segall และ Goff (1999) ที่ศึกษาผลของชนิดโปรตีนนมต่อ Fat destabilization ของระบบอิมัลชันและผลิตภัณฑ์ไอศกรีมพบว่าตัวอย่างที่มีส่วนผสมของโปรตีนเวย์หนึ่งย่นำให้ระบบเกิดการรวมตัวกันบางส่วน (Partial coalescence) ของอนุภาคเม็ดไขมันภายใต้แรงเฉือนได้มากกว่าส่วนผสมที่มีเคซีน

เป็นส่วนประกอบ ทำให้มีค่า Fat destabilization สูงทั้งนี้เนื่องจากโปรตีนเวย์ที่ล้อมรอบอนุภาคเม็ดไขมันจะสร้างชั้นฟิล์มที่มีลักษณะบาง (Thin interfacial layer) ประมาณ 2 นาโนเมตร ในขณะที่โครงสร้างที่เป็น Random coil ของเคซีนจะสร้างชั้นที่บริเวณพื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันที่มีความหนา (Thick interfacial layer) ประมาณ 8-10 นาโนเมตร (McClements et al., 1993) ชั้นที่มีความหนาของเคซีนนี้จะช่วยป้องกันการแทงทะลุ (Protrusion) ของผลึกไขมัน (Fat crystal) ผ่านชั้นเมมเบรนที่พื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันส่งผลให้ยากต่อการเกิด Partial coalescence ของอนุภาคเม็ดไขมันจึงส่งผลให้ไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SC มีค่า Fat destabilization ที่ต่ำกว่า นอกจากนี้การดูดซับของเบต้า-เคซีน (β -casein) จะเกิดเป็นแรงกระทำทางไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force) ได้เนื่องจากโปรตีนดังกล่าวมีประจุสุทธิเป็นลบที่ pH เป็นกลางซึ่งเป็นการเพิ่มแรงผลักระหว่างอนุภาคไขมันและการที่มีโมเลกุลฟอสโฟเซอรีน (Phosphoserine) ของเบต้า-เคซีนทำให้มีลักษณะการเรียงตัวอยู่ที่ผิวของอนุภาคเม็ดไขมันแบบ Tail ยื่นเข้าไปในเฟสต่อเนื่องส่งผลให้เกิดเป็น Steric force จึงทำให้ระบบอิมัลชันมีความคงตัวสูง (Dickinson, 1997, 1999)



ภาพที่ 4.10 ค่าการสูญเสียความคงตัวของอนุภาคเม็ดไขมัน (Fat destabilization) ของไอศกรีมที่มีส่วนผสมของโปรตีนนมชนิดต่าง ๆ ได้แก่ SMP, SC หรือ WPC และอิมัลซิไฟเออร์ ได้แก่ Tween 60, Tween 80, GMS หรือ GMO

หมายเหตุ: - Control คือ ไอศกรีมที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์

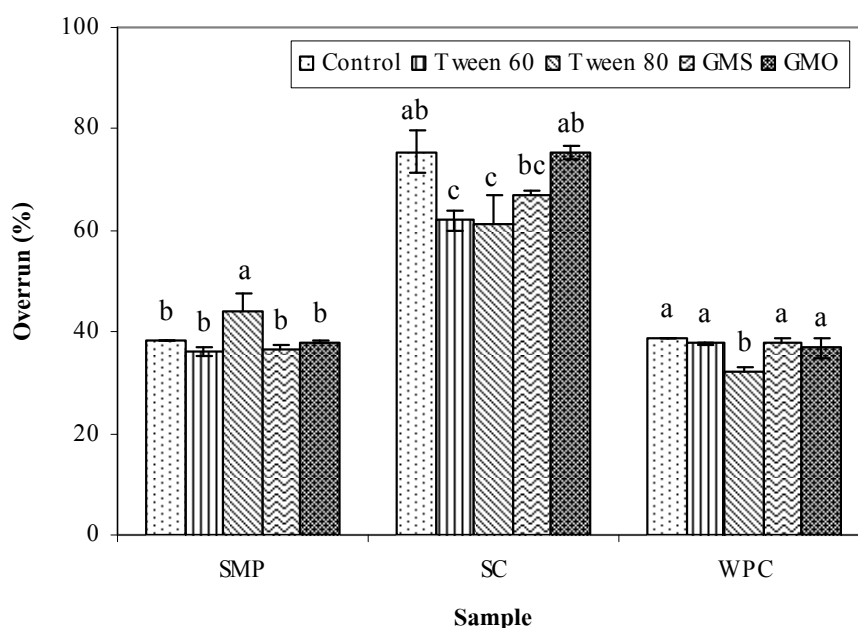
- a, b, c เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ตัวอักษรที่ต่างกันภายในโปรตีนชนิดเดียวกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SMP+Tween 60 หรือ SC+Tween 80 จะให้ค่า Fat destabilization ของไอศกรีมสูงที่สุด ($p \leq 0.05$) ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลของ Fat destabilization ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม (ภาพที่ 4.6 a และ b) แสดงให้เห็นว่าอิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายในน้ำจะให้ผลที่ดีในการเกิด Fat destabilization ในไอศกรีมที่มีเคซีนเป็นส่วนประกอบ ในขณะที่ไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ WPC+GMO มีค่า Fat destabilization สูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากเมื่อตีปั่นเป็นไอศกรีมแล้วพบว่าไอศกรีมที่ได้มีลักษณะที่คล้ายเจลซึ่งลักษณะดังกล่าวไม่พบในตัวอย่างอื่น ๆ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากโปรตีนเวย์สามารถเกิดเจล (Gelation) ได้เมื่อมีความเข้มข้นและการเปิดตัวของโปรตีนที่เหมาะสม (Zayas, 1997) การเกิดเจลดังกล่าวจะกักขัง (Trap) ส่วนประกอบต่าง ๆ เช่น อนุภาคเม็ดไขมัน และน้ำไว้ภายในโครงสร้างของเจลทำให้เมื่อนำส่วนของเหลวที่ได้จากการทำละลายไอศกรีมไปวัดค่าการดูดกลืนแสงจึงให้ค่าที่ต่ำและเมื่อคำนวณหาค่า Fat destabilization จึงได้ค่าที่สูงมาก ซึ่งผลดังกล่าวอาจไม่ได้แสดงถึงค่า Fat destabilization ที่แท้จริงของไอศกรีมที่มีส่วนผสมจาก WPC+GMO

จากผลการทดลองนี้ในส่วนนี้จึงสรุปได้ว่าปริมาณ Fat destabilization ของไอศกรีมขึ้นอยู่กับชนิดของโปรตีนนมและอิมัลซิไฟเออร์ (Goff and Jordan, 1989)

4.3.2 ผลของชนิดของอิมัลซิไฟเออร์และโปรตีนนมต่อค่าการขึ้นโฟมของไอศกรีม

ค่าการขึ้นโฟมของไอศกรีมที่มีส่วนผสมของโปรตีนนมและอิมัลซิไฟเออร์ชนิดต่าง ๆ แสดงไว้ในภาพที่ 4.11 จากผลการทดลองพบว่าไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SMP หรือ WPC ให้ค่าการขึ้นโฟมใกล้เคียงกันโดย SMP ประกอบด้วยเคซีนและโปรตีนเวย์สัดส่วนโดยประมาณ 50:50 แสดงให้เห็นว่าโปรตีนเวย์มีบทบาทสำคัญในการเกิดโฟมของ SMP ในขณะที่ไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SC มีค่าการขึ้นโฟมสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ผลที่ได้สอดคล้องกับผลของ Fat destabilization ของไอศกรีม (ภาพที่ 4.10) โดยไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SMP หรือ WPC มีค่า Fat destabilization ที่สูงแสดงให้เห็นว่าภายในโครงสร้างของไอศกรีมเกิดเป็นโครงร่างตาข่ายของไขมันได้มากทำให้การบรรจุอากาศเข้าไปในโครงสร้างเกิดได้ยากกว่าไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SC นอกจากนี้ความสามารถในการเกิดโฟมของโปรตีนอาจขึ้นอยู่กับความสามารถในการเปิดตัวและการเคลื่อนที่ของโปรตีนไปยังบริเวณพื้นผิวระหว่างเฟสที่เป็นอากาศและน้ำ (Air-water interface) โดยโปรตีนเวย์มีโครงสร้างที่เปิดตัวได้ยากกว่าเนื่องจากมีโครงสร้างที่เป็นก้อนกลมที่แข็งแรง (Compact globular structure) และมีพันธะไดซัลไฟด์ภายในโมเลกุล (Intra-molecular disulfide linkages) ส่งผลให้มีความสามารถในการเกิดโฟมได้ต่ำ ในขณะที่เคซีนมีโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบและยืดหยุ่นได้และไม่มีพันธะโคเวเลนต์ภายในโมเลกุล (Intra-molecular covalent crosslink) จึงทำให้โครงสร้างเปิดตัวออกได้ง่ายเมื่อได้รับแรงเฉือนในระหว่างการตีปั่นไอศกรีมส่งผลให้มีความ



ภาพที่ 4.11 ค่าการขึ้นโฟมของไอศกรีมที่มีส่วนผสมของโปรตีนนมชนิดต่าง ๆ ได้แก่ SMP, SC หรือ WPC และอิมัลซิไฟเออร์ ได้แก่ Tween 60, Tween 80, GMS หรือ GMO

หมายเหตุ:

- Control คือ ไอศกรีมที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์
- a, b, c เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ตัวอักษรที่ต่างกันภายในโปรตีนชนิดเดียวกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

สามารถในการเกิดโฟมได้สูงกว่าโปรตีนเวย์ (Dickinson, 1997, 1998, 2001) เมื่อเปรียบเทียบชนิดของอิมัลซิไฟเออร์พบว่า ไอศกรีมที่เติม Tween 60 หรือ Tween 80 ซึ่งเป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายได้ในน้ำให้ค่าการขึ้นโฟมที่ต่ำกว่าไอศกรีมที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ ยกเว้นไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SMP+Tween 80 (ภาพที่ 4.11) ตามกฎของ Bancroft ได้กล่าวว่าอิมัลซิไฟเออร์ที่ดีควรละลายได้ดีในเฟสต่อเนื่อง ดังนั้นอิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายในน้ำจะอยู่ในเฟสที่เป็นซีรัมหรือเฟสต่อเนื่อง (Continuous phase) ของไอศกรีมทำให้สามารถเคลื่อนที่ไปยังบริเวณพื้นผิวระหว่างเฟสที่เป็นอากาศและน้ำได้อย่างรวดเร็วแต่ชั้นที่ได้จะมีลักษณะบาง (Weak membrane) บริเวณรอบเซลล์อากาศส่งผลให้เซลล์อากาศมีความคงตัวน้อย (Clarke, 2004) จึงทำให้มีค่าการขึ้นโฟมที่ต่ำกว่าไอศกรีมที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ที่มีการสร้างชั้นของโปรตีนที่มีแข็งแรงและความหนาสามารถหุ้มรอบเซลล์อากาศจึงทำให้เซลล์อากาศมีความคงตัวอยู่ภายในโครงสร้างของไอศกรีมได้ดีกว่า

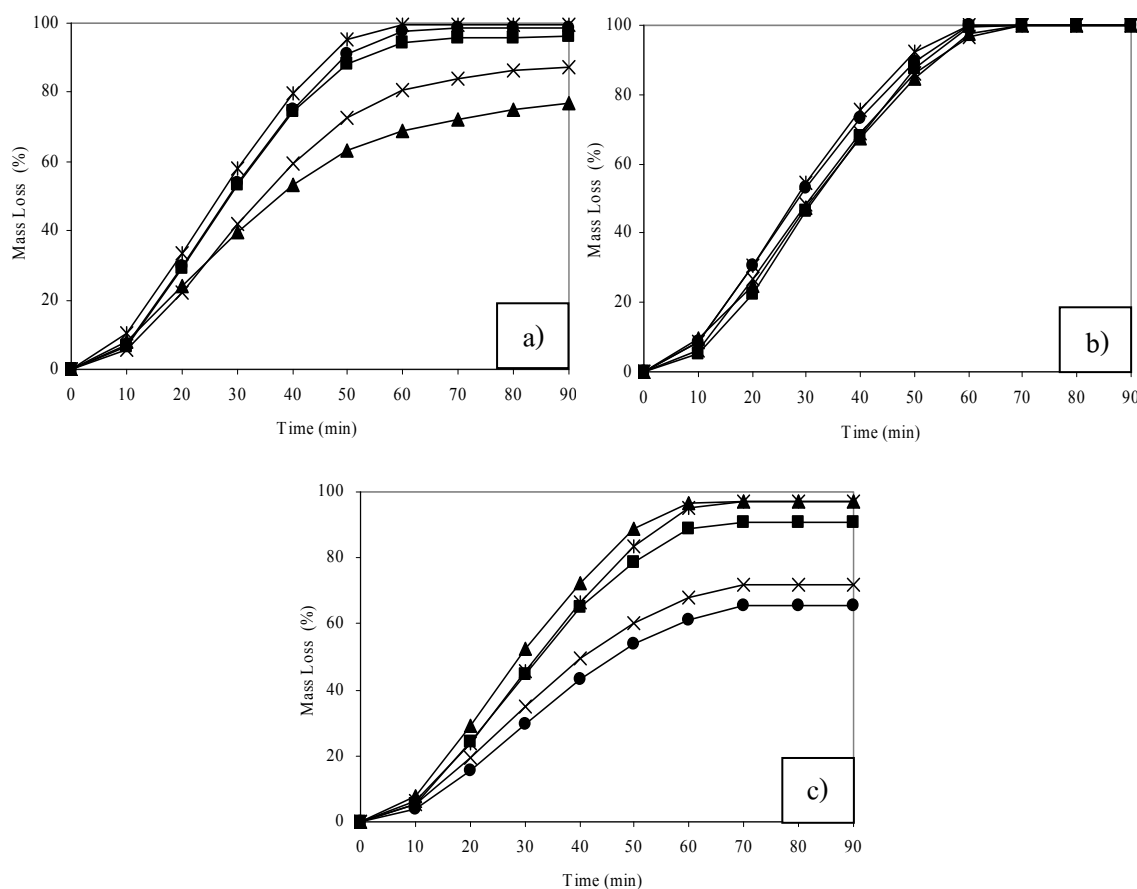
อย่างไรก็ตามไอศกรีมที่เติม GMS หรือ GMO มีค่าการขึ้นโฟมไม่แตกต่างจากไอศกรีมที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ ($p > 0.05$) อาจเนื่องจาก GMS และ GMO ซึ่งเป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายได้ใน

น้ำมันจะละลายอยู่ในเฟสกระจาย (Dispersed phase) หรืออนุภาคเม็ดไขมันน้ำมันของระบบ ดังนั้น อิมัลซิไฟเออร์ดังกล่าวจึงเคลื่อนที่ไปยังบริเวณพื้นผิวระหว่างเฟสที่เป็นอากาศและน้ำได้น้อยจึงส่งให้บริเวณรอบ ๆ เซลล์อากาศมีเฉพาะชั้นของโปรตีนเป็นส่วนใหญ่ ทำให้มีค่าการขึ้นโฟมไม่แตกต่างจากไอศกรีมที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า อิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายได้ในน้ำทำให้ค่าการขึ้นโฟมของไอศกรีมมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับอิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายได้ในน้ำมันและไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์

4.3.3 ผลของชนิดของอิมัลซิไฟเออร์และโปรตีนนมต่ออัตราการละลายของไอศกรีม

อัตราการละลายของไอศกรีมสามารถหาได้จากค่าความชันของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการละลายกับเวลาในการละลาย จากการทดลองพบว่าไอศกรีมที่เติมอิมัลซิไฟเออร์มีอัตราการละลายของไอศกรีมที่ต่ำกว่าไอศกรีมที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ (ภาพที่ 4.12) สอดคล้องกับ Bolliger และคณะ (2000) และ Zhang และ Goff (2005) ที่พบว่าการเติมอิมัลซิไฟเออร์ช่วยเพิ่มปริมาณไขมันที่ดูดซับบริเวณพื้นผิวระหว่างเฟสที่เป็นอากาศและน้ำของไอศกรีมส่งผลให้เซลล์อากาศภายในโครงสร้างไอศกรีมมีความคงตัวเพิ่มขึ้นส่งผลให้มีอัตราการละลายที่ช้าลง

ไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SMP+Tween 60, SMP+Tween 80 หรือ WPC+GMO ช่วยปรับปรุงความต้านทานต่อการละลายของไอศกรีมได้ (ภาพที่ 4.12) ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับค่า Fat destabilization ของไอศกรีม (ภาพที่ 4.10) ค่า Fat destabilization ที่สูงจะช่วยให้เพิ่มความต้านทานการต่อละลายของไอศกรีมเนื่องจากการเกิด Fat destabilization หรือการรวมตัวกันบางส่วน (Partial coalescence) ของอนุภาคเม็ดไขมันทำให้สามารถกักเก็บเซลล์อากาศผลึกน้ำแข็งและซีรัม (Serum) ไว้ในโครงร่าง 3 มิติของไขมันและโครงร่างตาข่ายของไขมันนี้ทำให้โครงร่างของโฟมหรือเซลล์อากาศภายในไอศกรีมมีความแข็งแรงมากขึ้นจึงเพิ่มความต้านทานต่อการละลายของไอศกรีมได้ดีขึ้น (Goff and Jordan, 1989; Marshall et al., 2003) ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Eisner, Jeelani, Bernhard และ Windhab (2007) ที่พบว่าอิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายในน้ำเช่น Tween มีความสามารถในการเพิ่มความคงตัวของเซลล์อากาศในระบบอิมัลชันที่มีส่วนผสมของ SMP ได้มากกว่าอิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายในน้ำมัน Schokker และคณะ (2002) ที่ศึกษาการกระจายตัว (Spreading) ของไขมันที่บริเวณพื้นผิวระหว่างเฟสที่เป็นอากาศและน้ำในระบบอิมัลชันที่มีโปรตีนเวย์เป็นส่วนประกอบพบว่าโมโนกลีเซอไรด์ชนิดที่ไม่อิ่มตัว (GMO) ช่วยปรับปรุงการกระจายตัวของไขมันที่บริเวณพื้นผิวระหว่างเฟสที่เป็นอากาศและน้ำได้ดีกว่าไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ส่งผลให้เซลล์อากาศภายในระบบมีความคงตัวมากขึ้นและช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการละลายของไอศกรีมที่ให้อย่างขึ้น อย่างไรก็ตามผลดังกล่าวไม่พบในไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SC ซึ่งพบว่าอิมัลซิไฟเออร์ทุกชนิดไม่สามารถช่วยปรับปรุงความต้านทานต่อการละลายของ



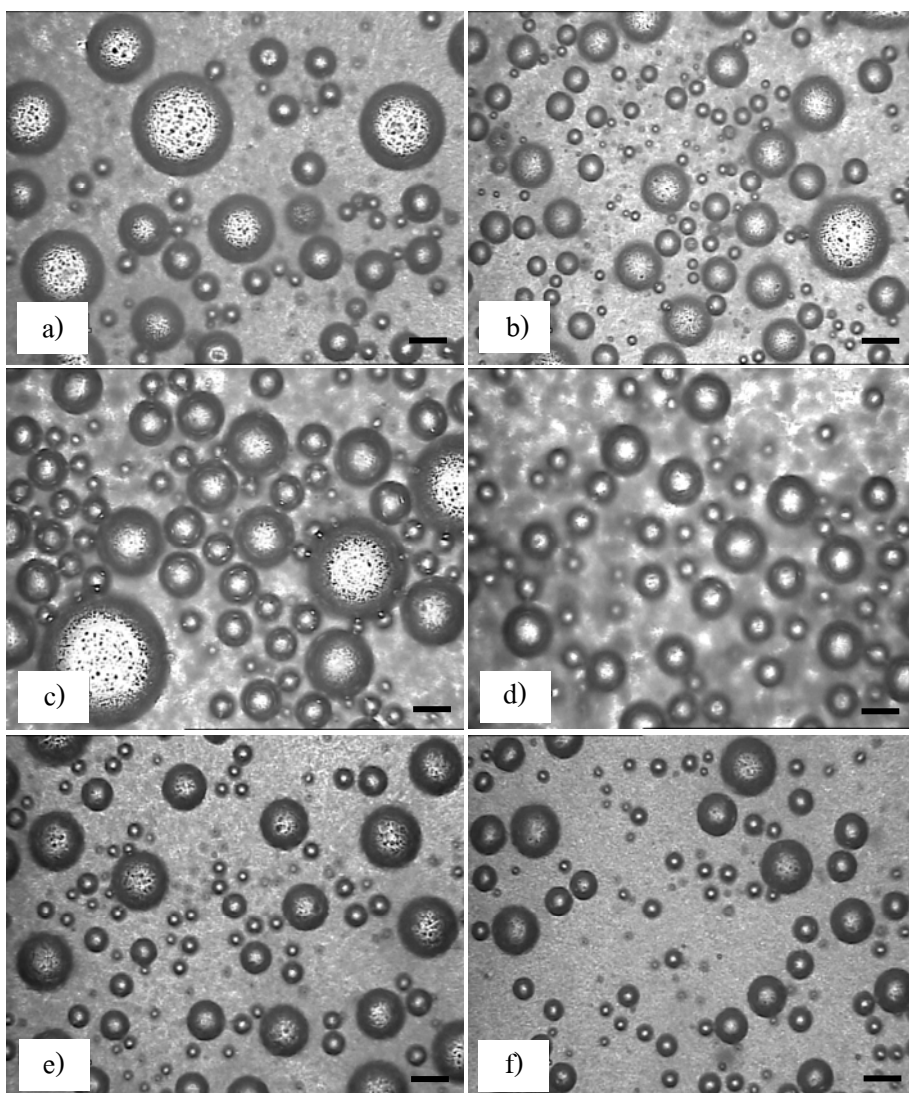
ภาพที่ 4.12 อัตราการละลายที่ 25 องศาเซลเซียสของไอศกรีมที่มีส่วนผสมของโปรตีนนมชนิดต่าง ๆ ได้แก่ (a) SMP (b) SC หรือ (c) WPC และอิมัลซิไฟเออร์ได้แก่ (■) ไม่มีอิมัลซิไฟเออร์ (Control) (▲) Tween 60 (×) Tween 80 (•) GMS หรือ (●) GMO

ไอศกรีมได้ถึงแม้ว่าโปรตีนเคซีนจะสามารถทำให้เกิดโฟมได้ดี (Foam ability) (ภาพที่ 4.11) แต่โปรตีนดังกล่าวที่ดูดซับบริเวณพื้นผิวระหว่างเฟสที่เป็นอากาศและน้ำมีลักษณะที่ยืดหยุ่นส่งผลให้โฟมที่เกิดขึ้นไม่มีความคงตัว (Poor foam stability) (จิรวัดน์ ยงสวัสดิกุล, 2549) อีกทั้งยังสอดคล้องกับค่า Fat destabilization ของไอศกรีม (ภาพที่ 4.10) เนื่องจากไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SC มีค่า Fat destabilization ที่ต่ำทำให้โครงสร้างของเซลล์อากาศภายในโครงสร้างของไอศกรีมไม่แข็งแรงส่งผลให้ไอศกรีมที่ได้มีอัตราการละลายอย่างรวดเร็ว

นอกจากนี้ Langevin (2000) ยังได้กล่าวไว้ว่าความยืดหยุ่น (Elasticity) ของชั้นระหว่างพื้นผิวของเฟสที่เป็นอากาศและน้ำมีความสำคัญมากต่อความคงตัวของโฟมและความไม่คงตัวของโฟมอาจเกิดขึ้นเนื่องจากการไหลของของเหลวผ่านชั้นฟิล์ม (Drainage of liquid film) และการรวมตัว (Coalescence) ของเซลล์อากาศ นำไปสู่การละลายของไอศกรีมอย่างรวดเร็ว

4.3.4 ผลของชนิดของอีมีลซิไฟเออร์และโปรตีนนมต่อโครงสร้างระดับจุลภาคในไอศกรีม

การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของไอศกรีมด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Optical microscope) เพื่อดูขนาดและการกระจายตัวของเซลล์อากาศในไอศกรีม โดยจะเลือกตัวอย่างไอศกรีมในแต่ละชนิดของโปรตีนนมที่ให้คุณลักษณะทางกายของไอศกรีมที่ดีที่สุดโดยพิจารณาคุณลักษณะทางกายของไอศกรีมในแง่ของค่า Fat destabilization และความต้านทานต่อการละลายของไอศกรีม จากการทดลองพบว่า ไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SMP+Tween 60, SC+Tween 80 และ WPC+GMO จะให้ค่า



ภาพที่ 4.13 ขนาดและการกระจายตัวของเซลล์อากาศในไอศกรีมที่ได้มาจากกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 100 เท่า โดย (a) ไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SMP และไม่มีอีมีลซิไฟเออร์ (b) ไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SMP+Tween 60 (c) ไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SC และไม่มีอีมีลซิไฟเออร์ (d) ไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SC+Tween 80 (e) ไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ WPC และไม่มีอีมีลซิไฟเออร์ และ (f) ไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ WPC+GMO (1 bar = 100 μ m)

Fat destabilization และมีความต้านทานต่อการละลายของไอศกรีมสูงซึ่งเป็นคุณลักษณะทางกายภาพที่ดีของไอศกรีมมาทำการศึกษาต่อในส่วนของการสร้างระดับจุลภาคของไอศกรีมโดยเปรียบเทียบกับสูตรไอศกรีมที่ไม่มีการเติมอิมัลซิไฟเออร์ในแต่ละชนิดโปรตีนนม (ตัวอย่างควบคุม)

ลักษณะของเซลล์อากาศในไอศกรีมที่ตรวจวัดจากกล้องจุลทรรศน์ดังแสดงในภาพที่ 4.13 พบว่าเซลล์อากาศมีโครงสร้างเป็นรูปทรงกลมและขนาดเล็กของเซลล์อากาศในไอศกรีมที่เติมอิมัลซิไฟเออร์ (ภาพที่ 4.13 b, d และ f) มีขนาดเล็กกว่าในไอศกรีมที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ (ภาพที่ 4.13 a, c และ e) อาจเนื่องจากอิมัลซิไฟเออร์ช่วยส่งเสริมการเกิด Fat destabilization (ภาพที่ 4.10) ซึ่งจะเกิดโครงร่างตาข่ายของไขมันอยู่รอบ ๆ เซลล์อากาศมีผลในการกักขัง (Trap) เซลล์อากาศไว้ในโครงสร้างไอศกรีมส่งผลให้เซลล์อากาศที่ได้มีขนาดเล็ก

เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของเซลล์อากาศในไอศกรีมพบว่าโปรตีนมีผลต่อการกระจายตัวของเซลล์อากาศภายในโครงสร้างของไอศกรีมโดยไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SC ซึ่งมีเคซีนเป็นส่วนประกอบพบว่าเซลล์อากาศอัดกันอยู่อย่างหนาแน่นมากกว่าไอศกรีมที่มีส่วนผสมของโปรตีนชนิดอื่น ๆ (ภาพที่ 4.13 c) ทั้งนี้เนื่องจากโปรตีนที่มีโครงสร้างเปิดกว้างสามารถเคลื่อนที่ไปยังบริเวณพื้นผิวระหว่างเฟสที่เป็นอากาศและน้ำได้อย่างรวดเร็วทำให้บรรจุอากาศไว้ในโครงสร้างของไอศกรีมได้มากจึงส่งผลให้มีการกระจายตัวของเซลล์อากาศในโครงสร้างของไอศกรีมอยู่อย่างหนาแน่นซึ่งผลการกระจายตัวของเซลล์อากาศนี้มีความสัมพันธ์กับค่าการขึ้นโฟมของไอศกรีมด้วย (ภาพที่ 4.10)

4.4 ผลของสถานะในการฆ่าเชื้อและระยะเวลาการบ่มส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมต่อความคงตัวและคุณภาพของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมและไอศกรีม

4.4.1 ผลของสถานะในการฆ่าเชื้อและระยะเวลาการบ่มส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมต่อความคงตัวของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม

จากการศึกษาชนิดและปริมาณอิมัลซิไฟเออร์และชนิดโปรตีนนมต่อความคงตัวและคุณภาพไอศกรีม (ข้อที่ 4.3) เมื่อพิจารณาคุณลักษณะทางกายภาพทั้งด้านการขึ้นโฟม ค่า Fat destabilization การกระจายตัวของเซลล์อากาศและความต้านทานต่อการละลายพบว่าไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SMP+Tween 60, SC+Tween 80 หรือ WPC+GMO ให้คุณลักษณะทางกายและคุณภาพของไอศกรีมที่ดีที่สุด โดยมีค่า Fat destabilization และความต้านทานต่อการละลายสูง อีกทั้งมีขนาดของเซลล์อากาศเล็กและการกระจายตัวของเซลล์อากาศภายในโครงสร้างไอศกรีมดี ด้วยเหตุนี้จึงเลือกสูตรไอศกรีมดังกล่าวมาศึกษาต่อในแง่ผลของสถานะในการฆ่าเชื้อและระยะเวลาการบ่มส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมต่อความคงตัวของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมและผลิตภัณฑ์ไอศกรีม

โดยสภาวะการฆ่าเชื้อในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ศึกษาคือ อุณหภูมิ 69 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที และอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที และระยะเวลาการบ่มคือ อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0, 2, 4 และ 24 ชั่วโมง

การศึกษาผลของสภาวะในการฆ่าเชื้อและระยะเวลาการบ่มต่อขนาดอนุภาคเม็ดไขมันและความหนืดของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม (ข้อที่ 4.4.1.1 และ 4.4.1.2) จะใช้แผนการทดลองแบบ Factorial in CRD โดยศึกษา 2 ปัจจัย ได้แก่ สภาวะในการฆ่าเชื้อและระยะเวลาการบ่มในแต่ละชนิดของตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมโดยใช้โปรแกรม SPSS version 13 (SPSS Inc., Illinois, USA) สำหรับการวิเคราะห์ผลทางสถิติ

4.4.1.1 ผลของสภาวะในการฆ่าเชื้อและระยะเวลาการบ่มต่อขนาดอนุภาคเม็ดไขมันของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม

เมื่อพิจารณาสภาวะการฆ่าเชื้อ ($69^{\circ}\text{C}/30\text{ min}$ หรือ $75^{\circ}\text{C}/15\text{ min}$) ต่อขนาดอนุภาคเม็ดไขมันพบว่าสภาวะที่ใช้การฆ่าเชื้อมีผลต่อขนาดอนุภาคเม็ดไขมันของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ภาคผนวกตารางที่ ค.1-6) โดยขนาดอนุภาคเม็ดไขมันของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SMP, SC หรือ WPC ผ่านการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที มีขนาดเล็กกว่าตัวอย่างที่ผ่านการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 69 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ 4.4) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการไฮโดรจิเนชันจะมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นเมื่อส่วนผสมมีอุณหภูมิสูงเพราะที่อุณหภูมิสูงช่วยเพิ่มพลังงานจลน์ในระบบและปรับปรุงความสามารถในการเคลื่อนที่ของสารลดแรงตึงผิวและโปรตีนให้เคลื่อนที่ไปยังบริเวณพื้นผิวระหว่างเฟสที่เป็นน้ำและน้ำมันได้เร็วขึ้นส่งผลให้ได้อนุภาคไขมันที่มีขนาดเล็ก (Andreasen and Nielsen, 1998; Marshall et al., 2003) นอกจากนี้ Zayas (1997) ได้กล่าวว่าความสามารถเป็นอิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifying properties) ของโปรตีนจะสูงขึ้นเมื่อให้ความร้อนทำให้บางส่วนของโปรตีนคลายตัวซึ่งจะความสัมพันธ์กับการเพิ่ม surface hydrophobicity ของโปรตีนโดยโปรตีนเวย์มีโครงสร้าง คล้ายกับโปรตีนทั่วไปคือโครงสร้างตติยภูมิมีการจัดเรียงตัวแบบก้อนกลมซึ่งคลายตัวในระหว่างการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ (75-80 องศาเซลเซียส) เนื่องจากความร้อนจะไปทำลายพันธะที่เสถียรโครงสร้างของโปรตีนเวย์ ได้แก่ พันธะไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic bond) และพันธะไดซัลไฟด์ (Fitzsimons, Livney et al., 2003; Mulvihill and Morris, 2007) โดยเปลี่ยนลักษณะโครงสร้างแบบก้อนกลมอยู่ในรูป Random coil (จิรวัดน์ ยงสวัสดิ์ศฤง, 2549; Zayas, 1997) ทำให้กรดอะมิโนที่ไม่ชอบน้ำที่ซ่อนอยู่ภายในโครงสร้างเปิดตัวออกส่งผลให้โปรตีนมีความเป็น Surface active ได้มากขึ้น

ตารางที่ 4.4 ขนาดอนุภาคเม็ดไขมันของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ทำจากโปรตีนและอีมีลซิไฟเออร์ชนิดต่าง ๆ ที่สภาวะการฆ่าเชื้อและระยะเวลาการบ่ม (4°C) ที่แตกต่างกัน

Protein	Emulsifier	Pasteurization condition	Fat particle size ($d_{3,2}$: μm) ^{1 ns}			
			0 h	2 h	4 h	24 h
SMP	Control*	69°C, 30 min	1.68 ± 0.07	1.70 ± 0.07	1.70 ± 0.08	1.70 ± 0.09
		75°C, 15 min	1.56 ± 0.03	1.55 ± 0.04	1.56 ± 0.03	1.56 ± 0.05
	Tween 60	69°C, 30 min	1.60 ± 0.02	1.61 ± 0.02	1.62 ± 0.03	1.62 ± 0.04
		75°C, 15 min	1.52 ± 0.03	1.52 ± 0.03	1.53 ± 0.03	1.53 ± 0.04
SC	Control*	69°C, 30 min	1.77 ± 0.08	1.76 ± 0.06	1.77 ± 0.04	1.80 ± 0.03
		75°C, 15 min	1.68 ± 0.04	1.70 ± 0.04	1.70 ± 0.03	1.69 ± 0.04
	Tween 80	69°C, 30 min	1.70 ± 0.09	1.71 ± 0.05	1.71 ± 0.05	1.74 ± 0.06
		75°C, 15 min	1.56 ± 0.05	1.56 ± 0.04	1.58 ± 0.03	1.58 ± 0.04
WPC	Control*	69°C, 30 min	1.60 ± 0.07	1.61 ± 0.09	1.63 ± 0.09	1.62 ± 0.09
		75°C, 15 min	1.55 ± 0.10	1.57 ± 0.07	1.57 ± 0.08	1.59 ± 0.07
	GMO	69°C, 30 min	1.57 ± 0.05	1.58 ± 0.05	1.58 ± 0.04	1.57 ± 0.05
		75°C, 15 min	1.50 ± 0.04	1.50 ± 0.05	1.52 ± 0.03	1.51 ± 0.02

หมายเหตุ: - Control* หมายถึง สูตรส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ไม่เติมอีมีลซิไฟเออร์
 - 1 ns เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของสภาวะในการฆ่าเชื้อและระยะเวลาการบ่ม หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)

ระยะเวลาการบ่มไม่มีผลต่อขนาดอนุภาคเม็ดไขมันของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SMP, SC หรือ WPC ที่ผ่านการฆ่าเชื้อทั้ง 2 สภาวะ ($p > 0.05$) แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่มีส่วนผสมของโปรตีนทั้งที่มีและไม่มีอีมีลซิไฟเออร์สามารถทำให้อนุภาคเม็ดไขมันมีความคงตัวได้ในระหว่างที่บ่ม 4 องศาเซลเซียส

4.4.1.2 ผลของสภาวะในการฆ่าเชื้อและระยะเวลาการบ่มต่อความหนืดของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม

สภาวะที่ใช้การฆ่าเชื้อและระยะเวลาการบ่มมีผลต่อความหนืดของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ภาคผนวกตารางที่ ค.7-12) โดยเฉพาะส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SMP หรือ WPC (ตารางที่ 4.5) โดยพบว่าตัวอย่างที่ผ่านการฆ่าเชื้อที่

อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที มีความหนืดสูงกว่าตัวอย่างที่ผ่านการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 69 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที เนื่องมาจากการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิสูงมีผลต่อการละลายและการดูดซับน้ำ (Hydrate) ของส่วนผสมต่างๆ เช่น โปรตีน สารเพิ่มความคงตัว (การาจีแนน) และน้ำตาลแลคโตส ซึ่งมีอัตราการละลายสูงขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น (Marshall et al., 2003)

ตารางที่ 4.5 ความหนืดที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ทำจากโปรตีนและอิมัลซิไฟเออร์ชนิดต่าง ๆ ที่สภาวะการฆ่าเชื้อและระยะเวลาในการบ่ม (4°C) ที่แตกต่างกัน

Protein Emulsifier Pasteurization		Viscosity (mPa.s)			
	condition	0 h	2 h	4 h	24 h
SMP	Control* 69°C, 30 min	103.33±4.55 ^{B, ns}	104.83±2.86 ^{B, ns}	104.53±1.21 ^{B, ns}	107.07±1.98 ^{B, ns}
	75°C, 15 min	115.33±3.78 ^{A, ns}	116.93±2.68 ^{A, ns}	117.50±2.09 ^{A, ns}	118.63±1.26 ^{A, ns}
	Tween 60 69°C, 30 min	98.13±1.42 ^{B, c}	100.27±0.95 ^{B, b}	100.87±0.74 ^{B, b}	102.27±0.70 ^{B, a}
	75°C, 15 min	108.67±2.26 ^{A, b}	110.30±1.95 ^{A, ab}	110.43±2.44 ^{A, ab}	112.63±2.48 ^{A, a}
SC	Control* 69°C, 30 min	100.37±0.65 ^{A, ns}	98.13±2.93 ^{A, ns}	99.77±0.82 ^{A, ns}	99.57±1.44 ^{A, ns}
	75°C, 15 min	101.23±6.02 ^{A, ns}	100.83±5.19 ^{A, ns}	99.33±5.22 ^{A, ns}	93.93±6.46 ^{A, ns}
	Tween 80 69°C, 30 min	99.97±2.11 ^{A, b}	101.23±2.03 ^{A, ab}	98.40±2.02 ^{A, ab}	100.27±1.64 ^{A, a}
	75°C, 15 min	100.97±2.16 ^{A, b}	100.37±3.85 ^{A, b}	101.17±1.58 ^{A, b}	104.43±0.98 ^{A, a}
WPC	Control* 69°C, 30 min	79.00±1.43 ^{B, ns}	77.90±2.05 ^{B, ns}	78.40±2.43 ^{B, ns}	79.73±2.16 ^{B, ns}
	75°C, 15 min	93.33±2.52 ^{A, a}	91.77±2.01 ^{A, ab}	90.53±1.77 ^{A, b}	91.49±1.73 ^{A, ab}
	GMO 69°C, 30 min	78.90±2.16 ^{B, ns}	79.93±1.24 ^{B, ns}	79.20±0.78 ^{B, ns}	80.27±1.17 ^{B, ns}
	75°C, 15 min	91.83±2.91 ^{A, ns}	91.50±2.03 ^{A, ns}	91.65±3.25 ^{A, ns}	92.57±3.39 ^{A, ns}

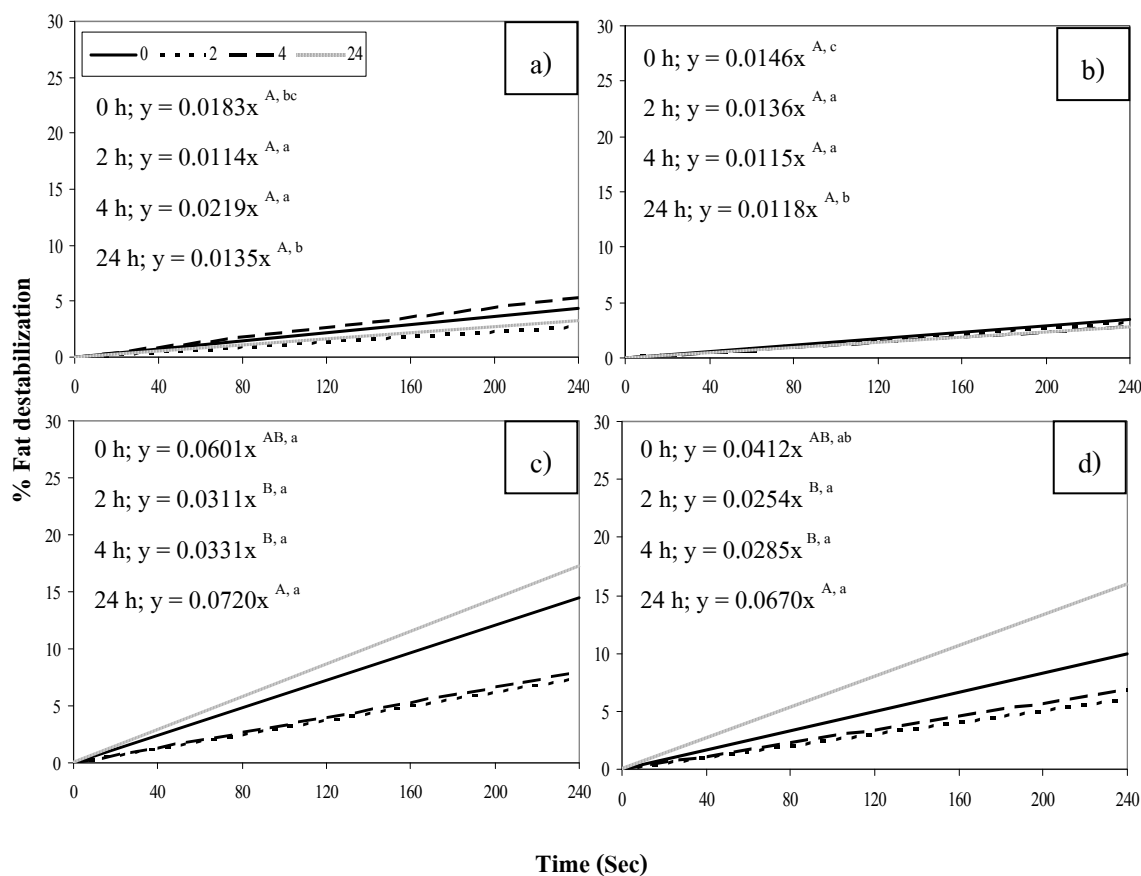
หมายเหตุ:

- Control* หมายถึง สูตรส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์
- A, B เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวตั้งภายในโปรตีนและอิมัลซิไฟเออร์ชนิดเดียวกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
- a, b, c เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวนอน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
- ns เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยตามแนวนอน หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)

Zayas (1997) และ Mulvihill และ Morris (2007) กล่าวว่าอุณหภูมิสูง (75-80 องศาเซลเซียส) ส่งผลต่อการเสถียรภาพธรรมชาติของโปรตีนใน SMP หรือ WPC ทำให้โครงสร้างของโปรตีนดังกล่าวคลายตัวและจับกับโมเลกุลของน้ำได้มาก เป็นที่น่าสังเกตว่าอุณหภูมิในการฆ่าเชื้อทั้งสองสภาวะ (69°C/30 min หรือ 75°C/15 min) ไม่มีผลต่อความหนืดของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SC และไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ (สูตรควบคุม) ($p > 0.05$) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก SC มีโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นโครงสร้างปฐมภูมิพบโครงสร้างแบบทุติยภูมิเพียงเล็กน้อยและไม่มีโครงสร้างแบบตติยภูมิจึงทำให้ความร้อนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโปรตีนเคซีนน้อยมาก (Parkinson and Dickinson, 2004; Zayas, 1997) ในขณะที่ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SC+Tween 80 พบว่า สภาวะในการฆ่าเชื้อและระยะเวลาการบ่มมีอิทธิพลซึ่งกันและกัน เมื่อพิจารณาระยะเวลาในการบ่มต่อความหนืดของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมพบว่า ระยะเวลาการบ่มไม่มีผลต่อความหนืดยกเว้น ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SMP+Tween 60 และ SC+Tween 80 ที่ผ่านการฆ่าเชื้อทั้งสองสภาวะ ($p \leq 0.05$) พบว่ามีความหนืดสูงขึ้นหลังบ่ม (4°C/ 24 h) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเกิดการแทนที่โปรตีนนมด้วยอิมัลซิไฟเออร์บริเวณพื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันทำให้มีปริมาณโปรตีนในเฟสต่อเนื่องมากขึ้นส่งผลให้มีความหนืดสูงขึ้น (ตารางที่ 4.5)

4.4.1.3 ผลของสภาวะในการฆ่าเชื้อและระยะเวลาการบ่มต่อความคงตัวของอนุภาคเม็ดไขมันของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม

ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SMP+Tween 60 และ SC+Tween 80 พบค่า Fat destabilization สูงกว่าตัวอย่างที่ไม่มีอิมัลซิไฟเออร์ (ภาพที่ 4.14 และ 4.15) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองข้างต้น (ข้อ 4.2) ที่ศึกษาชนิดของอิมัลซิไฟเออร์และโปรตีนนมต่อความคงตัวของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม (ภาพที่ 4.6) ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ผ่านการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 69 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที พบการเกิด Fat destabilization สูงกว่าตัวอย่างที่ผ่านการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการให้ความร้อนที่ 69 องศาเซลเซียส นาน 30 นาทีทำให้ประสิทธิภาพในการเคลื่อนที่ของโปรตีนไปยังพื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันต่ำกว่าการให้ความร้อนที่ 75 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที (ตารางที่ 4.4) และอาจมีผลต่อการสูญเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีนโดยที่อุณหภูมิ 69 องศาเซลเซียส นาน 30 นาทีอาจมีโปรตีนบางส่วนที่ยังไม่เปิดตัวได้อย่างสมบูรณ์ซึ่งไม่สามารถเกิดการสร้างเป็นชั้นฟิล์มที่มีแข็งแรงได้ เมื่อให้แรงกับระบบเพื่อเหนี่ยวนำให้อนุภาคเม็ดไขมันมีโอกาสนชนกันได้มากขึ้นจึงพบว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SMP+Tween 60 และ SC+Tween 80 และผ่านการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 69 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ทำให้ระบบมีความคงตัวน้อยลงเมื่อได้รับแรงกระทำ

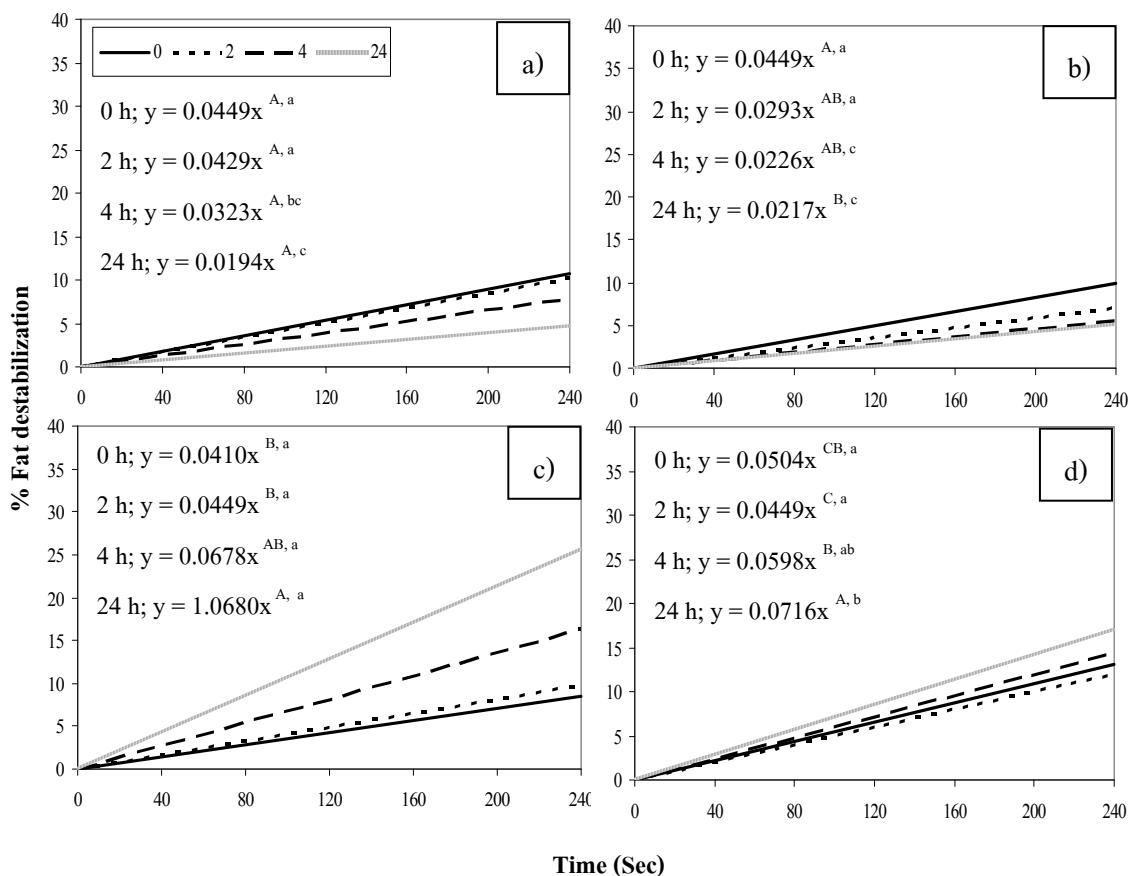


ภาพที่ 4.14 ค่า Fat destabilization ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SMP และผ่านการฆ่าเชื้อที่ 69 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที หรือ 75 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที และระยะเวลาการบ่ม (4°C) ที่ต่างกันโดย (a) SMP_Control_69 (b) SMP_Control_75 (c) SMP_Tween 60_69 และ (d) SMP_Tween 60_75

- หมายเหตุ:**
- Slope ใช้ในการเปรียบเทียบค่า Fat destabilization
 - A, B เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ตัวอักษรที่แตกต่างกันภายในตัวอย่างเดียวกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
 - a, b, c เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ตัวอักษรที่แตกต่างกันภายในระยะเวลาการบ่มเดียวกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

เมื่อพิจารณาระยะเวลาการบ่มต่อค่า Fat destabilization ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม พบว่าระยะเวลาการบ่มที่ 24 ชั่วโมงทำให้เกิด Fat destabilization ในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม SMP+Tween 60 และ SC+Tween 80 ได้มากกว่าการบ่มที่เวลาอื่นๆ อาจเนื่องจากระยะเวลาการบ่ม

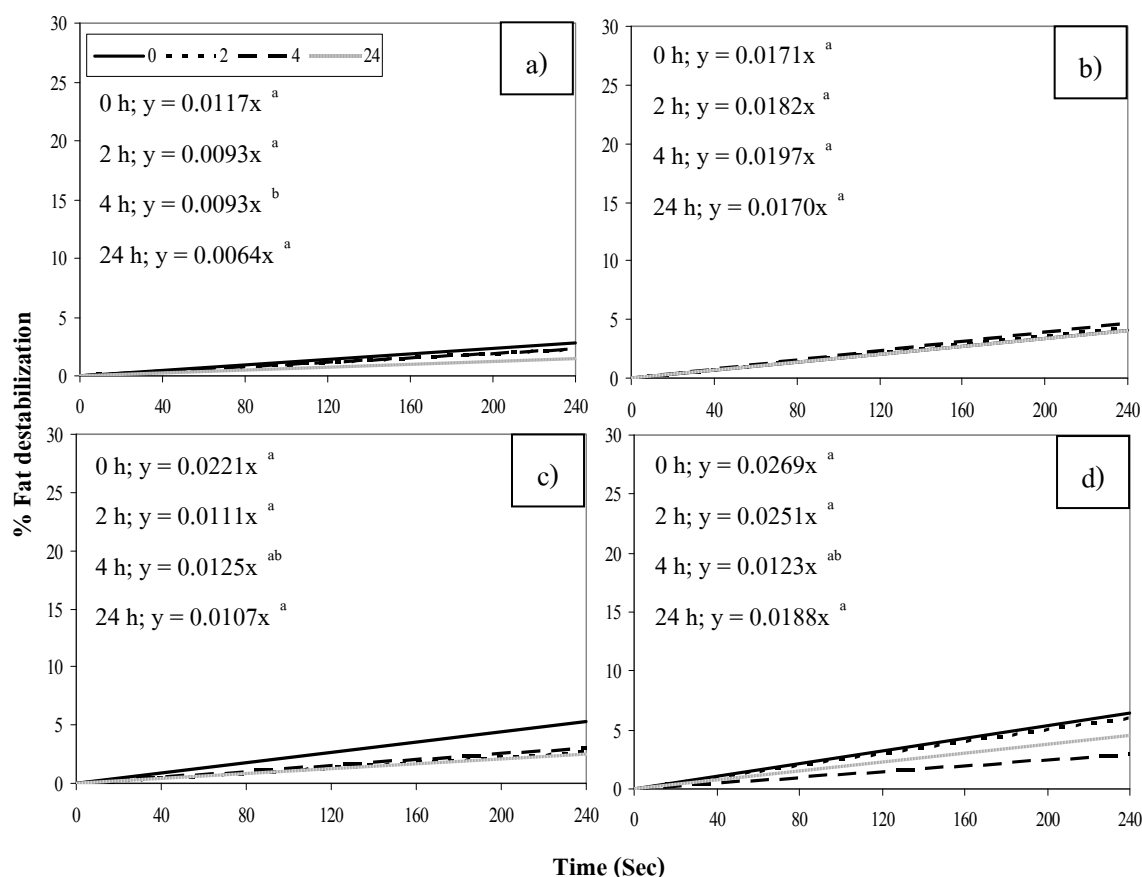
ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมนานขึ้นทำให้พบการแทนที่ของโปรตีนนมด้วยอิมัลซิไฟเออร์ที่บริเวณพื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันได้มากขึ้นทำให้พื้นผิวมีลักษณะบางและง่ายต่อการเชื่อมกันระหว่างอนุภาคเม็ดไขมันจึงส่งผลให้ระบบไม่มีความคงตัวมากขึ้นเช่นกัน



ภาพที่ 4.15 ค่า Fat destabilization ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SC และผ่านการฆ่าเชื้อที่ 69 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที หรือ 75 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที และระยะเวลาการบ่ม(4°C) ที่ต่างกัน โดย (a) SC_Control_69 (b) SC_Control_75 (c) SC_Tween_80_69 และ (d) SC_Tween_80_75

หมายเหตุ:

- Slope ใช้ในการเปรียบเทียบค่า Fat destabilization
- A, B, C เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ตัวอักษรที่แตกต่างกันภายในตัวอย่างเดียวกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
- a, b, c เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ตัวอักษรที่แตกต่างกันภายในระยะเวลาการบ่มเดียวกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)



ภาพที่ 4.16 ค่า Fat destabilization ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ WPC และผ่านการฆ่าเชื้อที่ 69 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที หรือ 75 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที และระยะเวลาการบ่ม (4°C) ที่ต่างกันโดย (a) WPC_Control_69 (b) WPC_Control_75 (c) WPC_GMO_69 และ (d) WPC_GMO_75

หมายเหตุ:

- Slope ใช้ในการเปรียบเทียบค่า Fat destabilization
- a, b เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ตัวอักษรที่แตกต่างกันภายในระยะเวลาการบ่มเดียวกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
- ค่าเฉลี่ยของ Fat destabilization ภายในตัวอย่างเดียวกัน ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)

เมื่อพิจารณาค่า Fat destabilization ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ WPC (ภาพที่ 4.16) พบว่าสอดคล้องกับผลกับผลการทดลองในหัวข้อ 4.2 โดยส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ WPC+GMO มีค่า Fat destabilization ไม่แตกต่างจากตัวอย่างที่ไม่มีอีมีลซิไฟเออร์ (ภาพที่ 4.6) และสภาวะการฆ่าเชื้อทั้งสองสภาวะ (69°C/30 min หรือ 75°C/15 min) ไม่มีผลต่อค่า

Fat destabilization ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก GMO เป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายในน้ำมันและมีประสิทธิภาพในการแทนที่โปรตีนนมได้น้อยกว่าอิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายในน้ำ (Euston, et al., 1995; Goff and Jordan, 1989) ดังนั้นสภาวะในการฆ่าเชื้อและระยะเวลาการบ่มจึงไม่มีผลต่อค่า Fat destabilization ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ WPC

4.4.2 ผลของสภาวะในการฆ่าเชื้อและระยะเวลาการบ่มส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมต่อความคงตัวและคุณภาพของไอศกรีม

จากการศึกษาผลของสภาวะในการฆ่าเชื้อและระยะเวลาการบ่มต่อความคงตัวของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม (ข้อที่ 4.4.1) พบว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SMP+Tween 60 หรือ SC+Tween 80 ที่ผ่านการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 69 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที แม้ว่าจะให้ขนาดอนุภาคเม็ดไขมันที่ใหญ่และมีความหนืดที่น้อยกว่าตัวอย่างที่ผ่านการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที แต่จะพบว่าค่า Fat destabilization สูงมากอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้ปัจจัยในเรื่อง Fat destabilization ถือว่าเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมากต่อคุณภาพของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม เนื่องจากเป็นที่ทราบกันดีว่าในระบบของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีความคงตัวน้อย เมื่อทำการตีปั่นโดยให้แรงกับระบบจะส่งผลทำให้ระบบมีความไม่คงตัวมากยิ่งขึ้นซึ่งเป็นลักษณะที่ก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ไอศกรีมทำให้ผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่ได้มีการกระจายตัวของเซลล์อากาศที่ดีและมีอัตราการละลายที่ช้าลง ในขณะที่ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ WPC+GMO ที่ผ่านการฆ่าเชื้อทั้งสองสภาวะให้ค่า Fat destabilization ที่ไม่แตกต่างกันแต่ให้ผลดีกว่าตัวอย่างที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ ดังนั้นจึงเลือกส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ WPC+GMO ที่ผ่านการฆ่าเชื้อที่ 75 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที เพื่อศึกษาต่อเนื่องจากใช้ระยะเวลาในการฆ่าเชื้อที่สั้นกว่าและยังเป็นการประหยัดเวลาในการผลิตไอศกรีมอีกด้วย

เมื่อพิจารณาระยะเวลาในการบ่มส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม พบว่าระยะเวลาการบ่มที่ 24 ชั่วโมงจะให้ค่า Fat destabilization สูงมากอย่างเห็นได้ชัด (ภาพที่ 4.14 c และ 4.15 c) แต่จากงานวิจัยของ Adleman และ Hartel (2002) พบว่าการเกิดผลึกของไขมันในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมจะสมบูรณ์เมื่อระยะเวลาในการบ่มผ่านไป 4-5 ชั่วโมงสอดคล้องกับ Goff และ Jordan (1989) พบว่าการบ่มอย่างน้อย 4 ชั่วโมงจะเกิดการรวมตัวกันบางส่วนของอนุภาคเม็ดไขมันและเป็นเวลาที่เหมาะสมสำหรับการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันที่สร้างขึ้นด้วยอิมัลซิไฟเออร์ ดังนั้นจึงเลือกส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SMP+Tween 60 และ SC+Tween 80 ที่ผ่านการฆ่าเชื้อที่ 69 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที และ WPC+GMO ที่ผ่านการฆ่าเชื้อที่ 75 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที ทำการบ่มที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 หรือ 24 ชั่วโมงเพื่อทำการศึกษาต่อในส่วนที่เป็นผลิตภัณฑ์ไอศกรีมโดยพิจารณาคูณลักษณะทางกายภาพและคุณภาพ

ของไอศกรีมในด้านการขึ้นโฟม ค่า Fat destabilization อัตราการละลายและเนื้อสัมผัสของไอศกรีม

4.4.2.1 ผลของสถานะในการฆ่าเชื้อและระยะเวลาการบ่มต่อค่าการขึ้นโฟมของไอศกรีม

เมื่อพิจารณาค่าการขึ้นโฟม (Overrun) ของไอศกรีมพบว่าไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SC+Tween 80 ให้ค่าการขึ้นโฟมสูงที่สุด ในขณะที่ไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SMP+Tween 60 และ WPC+GMO ให้ค่าการขึ้นโฟมไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) (ตารางที่ 4.6) โดยทั้ง 3 ตัวอย่างพบวาระยะเวลาการบ่มไม่มีผลต่อค่าการขึ้นโฟมของไอศกรีม ($p > 0.05$) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SC มีเคซีนเป็นส่วนประกอบหลักซึ่งมีโครงสร้างที่ยึดหยุ่นสูงทำให้เคซีนมีความ

ตารางที่ 4.6 คุณลักษณะทางกายภาพของไอศกรีมที่มีส่วนผสมของโปรตีนและอิมัลซิไฟเออร์ต่างชนิดกัน และผ่านการฆ่าเชื้อที่ 69 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที หรือ 75 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที ที่การบ่ม (4°C) เป็นเวลา 4 หรือ 24 ชั่วโมง

Protein Emulsifier Pasteurization			Overrun (%)		Fat destabilization (%)	
condition			4 h	24 h	4 h	24 h
SMP	Tween 60	69°C , 30 min	$39.46 \pm 1.67^{\text{B}, \text{a}}$	$40.20 \pm 3.76^{\text{B}, \text{a}}$	$30.96 \pm 12.63^{\text{A}, \text{a}}$	$41.53 \pm 0.90^{\text{C}, \text{a}}$
SC	Tween 80	69°C , 30 min	$85.15 \pm 2.23^{\text{A}, \text{a}}$	$86.24 \pm 5.01^{\text{A}, \text{a}}$	$0.29 \pm 0.13^{\text{B}, \text{a}}$	$2.26 \pm 1.07^{\text{B}, \text{a}}$
WPC	GMO	75°C , 15 min	$38.69 \pm 2.63^{\text{B}, \text{a}}$	$32.64 \pm 2.01^{\text{B}, \text{a}}$	$6.95 \pm 1.50^{\text{B}, \text{a}}$	$78.77 \pm 0.85^{\text{A}, \text{b}}$

หมายเหตุ: - A, B, C เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยตัวอักษร ที่ต่างกันตามแนวตั้ง หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

- a, b เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวนอนภายในปัจจัยที่ศึกษาเดียวกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

สามารถในการเคลื่อนที่ไปบริเวณพื้นผิวระหว่างเฟสที่เป็นอากาศและน้ำได้อย่างรวดเร็ว อีกทั้งการที่มีโครงร่างเครือข่ายของไขมันอยู่ในปริมาณที่ต่ำ (ตารางที่ 4.6) ทำให้การบรรจุอากาศภายในโครงสร้างเป็นไปได้ง่าย ส่งผลให้มีค่าการขึ้นโฟมที่สูง (จิรวัดน์ ยงสวัสดิกุล, 2549; Dickinson, 1997, 1998, 2001; McClements, 1999) ในขณะที่ไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ WPC และ SMP ซึ่งประกอบด้วยโปรตีนเวย์ประมาณร้อยละ 100 และ 50 ตามลำดับ ซึ่งโปรตีนเวย์เป็นโครงสร้างก่อนกลั่นที่มีความเสถียรสูงกว่าเคซีนทำให้มีความสามารถเป็นโฟม (Foam ability) ต่ำเป็นเหตุให้

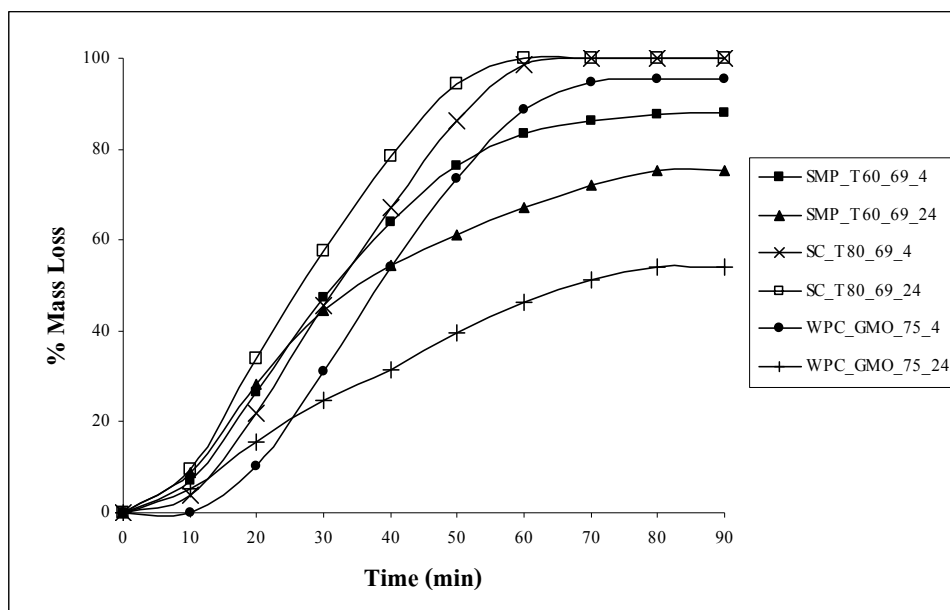
ไอศกรีมที่มีส่วนผสมของโปรตีนเวย์มีค่าการขึ้นโฟมต่ำ และเป็นที่น่าสังเกตว่าแม้ว่า SMP จะประกอบด้วยเคซีนประมาณร้อยละ 50 แต่เป็นเคซีนที่อยู่ในรูปเคซีน ไมเซลล์และมีบางส่วนเกาะกันเป็นก้อน (Aggregated protein) ทำให้มีความสามารถเป็นโฟมต่ำกว่า Individual casein ใน SC จึงทำให้มีค่าการขึ้นโฟมต่ำกว่า SC

4.4.2.2 ผลของสถานะในการฆ่าเชื้อและระยะเวลาการบ่มต่อความคงตัวของอนุภาคเม็ดไขมันในไอศกรีม

เมื่อพิจารณาค่า Fat destabilization (ตารางที่ 4.6) ของไอศกรีมที่การบ่ม 24 ชั่วโมง พบว่า ไอศกรีมที่มีส่วนผสมของโปรตีน WPC+GMO ให้ค่า Fat destabilization สูงที่สุด รองลงมาคือ ไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SMP+Tween 60 และ SC+Tween 80 ตามลำดับ (ตารางที่ 4.6) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ WPC+GMO อาจเกิดเจลของโปรตีนเวย์ที่สามารถสังเกตได้จากเนื้อสัมผัสของไอศกรีมที่ได้มีลักษณะคล้ายเจลและพบค่าความแข็งของไอศกรีมที่สูง (ตารางที่ 4.7) และเมื่อนำไอศกรีมที่ละลายพบปริมาณของแข็งที่เหลืออยู่สูงทั้งนี้เนื่องจากโปรตีนเวย์มีลักษณะพิเศษที่แตกต่างจากเคซีนคือ สามารถเกิดเจลได้เมื่อใช้ความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 6 (Zayas, 1997) แม้ว่าการทดลองนี้มีเวย์เข้มข้นประมาณร้อยละ 4 แต่เป็นระบบที่มีส่วนประกอบอื่นเช่น คาราจีแนน ซึ่งอาจเกิดอันตรกิริยากับโปรตีนได้ อาจเกิดการเชื่อมโยงระหว่างกันและกัน โดยโครงสร้างที่เป็นเจลนี้สามารถกักเก็บน้ำและไขมันไว้ภายในจึงทำให้เมื่อตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตรพบค่าที่ต่ำซึ่งหมายถึงค่า Fat destabilization ที่สูง

4.4.2.3 ผลของสถานะในการฆ่าเชื้อและระยะเวลาการบ่มต่ออัตราการละลายของไอศกรีม

ไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ WPC+GMO ที่ผ่านการฆ่าเชื้อที่ 75 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที และบ่มเป็นเวลา 24 ชั่วโมงพบอัตราการละลายช้าที่สุด (ความต้านทานต่อการละลายสูงที่สุด) (ภาพที่ 4.17) ซึ่งสอดคล้องกับค่า Fat destabilization ของไอศกรีม (ตารางที่ 4.6) โดยไอศกรีมที่มีค่า Fat destabilization ของไอศกรีมสูงจะทำให้อนุภาคไขมันในระบบไม่มีความคงตัวเกิดการสร้างเป็นโครงร่างตาข่ายของไขมัน (Fat network) ที่สามารถกักขังเซลล์อากาศ ผลึกน้ำแข็งและชีรัมของไอศกรีมที่ได้ส่งผลให้โครงร่างของไอศกรีมมีความคงตัวและมีอัตราการละลายที่ช้าลง Muse และ Hartel (2004) พบว่าอัตราการละลายของไอศกรีมจะมีผลมาจากค่า Fat destabilization นอกจากนี้ อาจเป็นผลเนื่องมาจากการเกิดเป็นเจลของโปรตีนเวย์ทำให้ไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ WPC+GMO มีอัตราการละลายที่ช้าลง



ภาพที่ 4.17 อัตราการละลายของไอศกรีมที่มีส่วนผสมของโปรตีนและอิมัลซิไฟเออร์ต่างชนิดกัน และผ่านการมาเชื้อที่ 69 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที หรือ 75 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที ที่การบ่ม (4°C) เป็นเวลา 4 หรือ 24 ชั่วโมง

4.4.2.4 ผลของสภาวะในการมาเชื้อและระยะเวลาการบ่มต่อเนื้อสัมผัสของ

ไอศกรีม

ลักษณะเนื้อสัมผัสของไอศกรีมที่ทำการวิเคราะห์ด้วย Texture profile analyzer (TPA) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของอาหารในการกัดครั้งแรก (First bite) ขณะที่เกี่ยวข้อง (Mastication) และการกัดครั้งที่สอง (Second bite) โดยอธิบายลักษณะเนื้อสัมผัสด้วยค่า Hardness Cohesiveness Adhesiveness Springiness Gumminess และ Chewiness (ตารางที่ 4.7) โดย Hardness คือ แรงที่ทำให้อาหารแตกหักหรือแยกออกจากกันอย่างสมบูรณ์ ซึ่งเป็นแรงสูงสุดที่ใช้ในการกัดครั้งแรก Cohesiveness คือ ปริมาณการเสียดรูปร่างของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นก่อนเกิดการแตกหักหรือแยกออกจากกันอย่างสมบูรณ์ Adhesiveness คือ แรงที่ต้องการในการเอาชนะการเกาะติดของอาหารกับผิวสัมผัสอื่น Springiness หรือ Elasticity คือ แรงที่ต้องการทำให้อาหารกลับสู่ขนาดหรือรูปร่างดั้งเดิมระหว่างเวลาที่สิ้นสุดการกัดครั้งแรกและเริ่มการกัดครั้งใหม่ Gumminess คือ ลักษณะอาหารกึ่งแข็งแตกตัวออกจนพร้อมที่จะกลืนได้ และ Chewiness คือ พลังงานที่ใช้ในการเคี้ยวอาหารแข็งจนสามารถกลืนลงไปได้ โดย Cohesiveness อาจแสดงในรูปของพารามิเตอร์ Gumminess หรือ Chewiness ก็ได้ (Lin, Xu and Guo, 2008)

จากตารางที่ 4.7 พบว่าเนื้อสัมผัสของไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ WPC+GMO มีความแข็งมากที่สุด รองลงคือไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SMP+Tween 60 และ SC+Tween 80 ตามลำดับ เนื่องมาจากโปรตีนเวย์สร้างพันธะไฮโดรโฟบิกและ/หรือพันธะไดซัลไฟด์ใหม่ระหว่างโปรตีนเวย์ โดยเฉพาะ β -Lg ซึ่งเป็นโปรตีนหลักในโปรตีนเวย์ที่มีผลต่อการเกาะตัวกันของโปรตีน (Fitzsimons et al., 2007; Havea, Singh and Creamer, 2001) เกิดเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรง ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ WPC มีความแข็งมากที่สุด ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับค่าการขึ้นโฟมของไอศกรีม (ตารางที่ 4.6) โดยไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ WPC+GMO พบการบรรจุอากาศเข้าไปในโครงสร้างของไอศกรีมได้น้อยเพียง 30 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 4.6) ส่งผลให้ไอศกรีมที่ได้มีเนื้อสัมผัสที่มีความแข็งมากอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่ไอศกรีมที่ทำจากโปรตีน SC มีลักษณะเนื้อสัมผัสที่มีความนุ่ม (Soft) มากที่สุดและมีค่า Hardness ต่ำที่สุด (ตารางที่ 4.7) ทั้งนี้เนื่องจากไอศกรีมที่ทำจากโปรตีน SC มีอากาศบรรจุอยู่ภายในโครงสร้างของไอศกรีมได้มาก สังเกตได้จากค่าการขึ้นฟองของไอศกรีม (ตารางที่ 4.6) ส่งผลให้ไอศกรีมที่ได้มีเนื้อสัมผัสที่มีความอ่อนนุ่ม Muse และ Hartel (2004) ได้กล่าวว่าความแข็งของไอศกรีมจะมีผลมาจากค่าการขึ้นโฟมและค่า Fat destabilization ของไอศกรีม นอกจากนี้ยังพบว่า Gumminess และ Chewiness ของไอศกรีมทั้ง 3 สูตรให้ผลเช่นเดียวกับผลของ Hardness เนื่องจากทั้ง 2 ค่าเป็นผลมาจากค่า Hardness ของตัวอย่าง

ตารางที่ 4.7 ลักษณะเนื้อสัมผัสของไอศกรีมที่มีส่วนผสมของโปรตีนและอิมัลซิไฟเออร์ต่างชนิดกันและผ่านการฆ่าเชื้อที่ 69 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที หรือ 75 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที ที่การบ่ม 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 หรือ 24 ชั่วโมง

Sample	Aging Time (h)	Force (Kg)					
		Hardness	Cohesiveness	Adhesiveness	Springiness	Gumminess	Chewiness
SMP_Tween 60_69	4	1.037±0.250 ^{B, ns}	0.192±0.038 ^{A, a}	- 0.913±0.141 ^{A, ns}	0.549±0.044 ^{A, ns}	0.191±0.017 ^{B, ns}	0.105±0.008 ^{B, a}
	24	1.250±0.187 ^{B, ns}	0.137±0.011 ^{B, b}	- 0.902±0.120 ^A	0.515±0.040 ^{B, ns}	0.171±0.029 ^{B, ns}	0.088±0.016 ^{B, b}
SC_Tween 80_69	4	0.500±0.336 ^{C, ns}	0.015±0.003 ^{C, ns}	- 0.137±0.024 ^{B, ns}	0.168±0.054 ^{B, ns}	0.008±0.006 ^{C, ns}	0.002±0.002 ^{C, ns}
	24	0.536±0.101 ^{C, ns}	0.015±0.006 ^{C, ns}	- 0.102±0.022 ^{B, ns}	0.209±0.056 ^{C, ns}	0.008±0.003 ^{C, ns}	0.002±0.001 ^{C, ns}
WPC_GMO_75	4	1.867±0.367 ^{A, b}	0.132±0.028 ^{B, b}	- 0.805±0.193 ^A	0.570±0.039 ^{A, b}	0.241±0.043 ^{A, b}	0.137±0.028 ^{A, b}
	24	2.555±0.147 ^{A, a}	0.173±0.027 ^{A, a}	- 0.917±0.178 ^A	0.814±0.194 ^{A, a}	0.441±0.069 ^{A, a}	0.366±0.127 ^{A, a}

หมายเหตุ: - A, B, C เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวตั้งภายในระยะเวลาในการบ่มเดียวกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

- a, b เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวนอนในโปรตีนชนิดเดียวกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

- ns เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยตามแนวตั้งภายในโปรตีนชนิดเดียวกัน หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

5.1.1 อิมัลซิไฟเออร์ชนิดที่ละลายได้ในน้ำ (Tween 60 และ Tween 80) และละลายได้ในน้ำมัน (GMS และ GMO) ที่ความเข้มข้นต่ำ (ร้อยละ 0.04 – 0.08 โดยน้ำหนัก) ทำให้อนุภาคเม็ดไขมันในระบบอิมัลชันมีขนาดใหญ่ส่งผลให้อิมัลชันไม่คงตัว แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอิมัลซิไฟเออร์ให้สูงขึ้นส่งผลให้ระบบอิมัลชันมีความคงตัวและมีผลต่อความหนืดของส่วนผสมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยอิมัลซิไฟเออร์ทุกชนิดช่วยเพิ่มความหนืดของระบบอิมัลชัน

5.1.2 ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SMP+Tween 60 หรือ SC+Tween 80 หรือ WPC+Tween 60 แสดงการสูญเสียความคงตัวของอนุภาคเม็ดไขมันสูง ส่วนผลในไอศกรีมที่มีส่วนประกอบของโปรตีนนมและอิมัลซิไฟเออร์ดังกล่าวมีการกระจายตัวของเซลล์อากาศดี การสูญเสียความคงตัวของอนุภาคเม็ดไขมันและมีความต้านทานการละลายของไอศกรีมได้สูง

5.1.3 สภาพในการฆ่าเชื้อด้วยการพาสเจอร์ไรซ์และระยะเวลาในการบ่มส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อคุณภาพของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมและผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่ได้ โดยไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SMP+Tween 60 หรือ SC+Tween 80 ที่ผ่านการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 69 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที และบ่มส่วนผสมที่ 4 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง และไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ WPC+GMO ที่ผ่านการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที และบ่มส่วนผสมที่ 4 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง มีการสูญเสียความคงตัวของอนุภาคเม็ดไขมันและมีความต้านทานการละลายที่สูงและมีลักษณะเนื้อสัมผัสของไอศกรีมที่ดี

5.1.4 คุณภาพของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมและไอศกรีมขึ้นอยู่กับชนิดของโปรตีนนมและอิมัลซิไฟเออร์ ตลอดจนอุณหภูมิในการฆ่าเชื้อในกระบวนการผลิตและระยะเวลาในการบ่มส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมก็มีผลต่อคุณภาพของไอศกรีมที่ได้เช่นกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การศึกษาผลของการแทนที่โปรตีนนมด้วยอิมัลซิไฟเออร์ที่บริเวณพื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันอาจทำการศึกษาโดยใช้เทคนิคการวัดความหนาของพื้นผิวของอนุภาคเม็ดไขมันที่มีโปรตีนนมและอิมัลซิไฟเออร์คู่ควบอยู่

5.2.2 ในกรณีของไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ WPC+GMO ที่มีลักษณะคล้ายเจลพบว่าการใช้เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยการวัดค่าความขุ่น (ค่าการดูดกลืนแสง) เพื่อหาค่า Fat destabilization อาจไม่เหมาะสมกับตัวอย่างดังกล่าว จึงควรทำการศึกษาเพิ่มเติมถึงวิธีการที่เหมาะสมต่อประเมินค่า Fat destabilization ในตัวอย่างดังกล่าว

5.2.3 งานวิจัยนี้ระบุได้ว่าการผลิตไอศกรีมจากเคซีนหรือโปรตีนเวย์เพียงอย่างเดียวให้คุณลักษณะไอศกรีมที่แตกต่างกัน ส่วนไอศกรีมที่ผลิตจากการผสมโปรตีนทั้งสองในอัตราส่วนที่เท่ากัน (SMP) ให้คุณลักษณะกำลังระหว่างไอศกรีมที่ผลิตจากเคซีนหรือโปรตีนเวย์อย่างใดอย่างหนึ่ง ดังนั้นการปรับเปลี่ยนสัดส่วนเคซีนและโปรตีนเวย์อาจทำให้ได้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ไอศกรีมสุดท้ายเป็นไปตามความต้องการหรือมีคุณภาพที่แตกต่างกันออกไป

รายการอ้างอิง

- จิรวัดน์ ขงสวัสดิกุล. (2549). เอกสารประกอบคำสอนรายวิชา โปรตีนอาหาร (**Food proteins**) สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 249 หน้า.
- วรรณ ตังเจริญชัย และวิบูลย์ศักดิ์ กาวิละ. (2531). ไอศกรีม ใน **นมและผลิตภัณฑ์นม**. กรุงเทพฯ : โอ.เอส.พรีนติ้ง เฮาส์. 184 หน้า.
- นิรนาม (ม.ป.ป. (ก)). **Glycerol monostearate** [ออนไลน์]. ได้จาก : <http://www.chemicalland21.com/lifescience/foco/GLYCEROL%20MONOSTEARATE.htm>
- นิรนาม (ม.ป.ป. (ข)). **Glycerol monooleate** [ออนไลน์]. ได้จาก : <http://www.chemicalland21.com/lifescience/foco/GLYCEROL%20MONOOLEATE.htm>
- Aldeman, R. And Hartel, R. (2002). Lipid crystallization and its effect on the physical structure of ice cream. In: N. Garti and K. Sato (eds.). **Crystallization process in fats and lipid systems**. New York: Marcel Dekker. 381-427.
- Andreasen, T.G. and Nielsen, H. (1998). Ice cream and aerated desserts In: R. Early (ed.) **The technology of dairy products** (2nd ed.). London: Blackie academic & professional. 301-324.
- Bancroft, W.D. (1913). The Theory of Emulsification V. In: G.L. Hasenhuettl and R.W. Hartel (eds.). **Food emulsifiers and their applications**. New York: Chapman & Hall. 173-194.
- Barfod, N.M., Krog, N., Larsen, G. and Buchneim, W. (1991). Effects of emulsifiers on protein-fat interaction in ice cream mix during aging. **Fat Sci. Technol.** 93: 24-35.
- Berger, K.G. (1976). Ice cream. In: S. E. Friberg and K. Larsson (eds.). (3th ed.). **Food emulsions**. New York: Marcel Dekker. 582 p.
- Berger, K.G. (1997). Ice cream. In: S. E. Friberg and K. Larsson (eds.). (3th ed.). **Food emulsions**. New York: Marcel Dekker. 582 p.
- Bergenstahl, B. (1995). Emulsions. In: S.T. Beckett (ed.). **Physico-chemical aspects of food processing**. London: Chapman & Hall. 49-64.
- Bergenstahl, B. (1997). Physicochemical aspects of an emulsifier functionality. In: G.L. Hasenhuettl and R.W. Hartel (eds.). **Food emulsifiers and their applications**. New York :

- Chapman & Hall. 173-194.
- Bird, E.W., Sandler, A.W. and Iverson, C.A. (1935). The preparation of a non-desiccated sodium caseinate sol and its use in ice cream. **Lowa Agric. Exp. Stn. Res. Bull.** 187.
- Bolliger, S., Kornbrust, B., Goff, H.D., Tharp, B.W. and Windhab, E.J. (2000). Influence of emulsions on ice cream produced by conventional freezing and low-temperature extrusion processing. **Int. Dairy J.** 10: 497-504.
- Boode, K. and Walstra, P. (1993). Partial coalescence in oil-in-water emulsions. 1. Nature of the aggregation. **Coll. Surf. A** 81: 121-137.
- Bolliger, S., Goff, H.D. and Tharp, B.W. (2000). Correlation between colloidal properties of ice cream mix and ice cream. **Int. Dairy J.** 10: 303-309.
- Boyd, B.J., Khoo, S.M., Whittaker, D.V., Davey, G. and Porter, C.J.H. (2007). A lipid-based liquid crystalline matrix that provides sustained release and enhanced oral bioavailability for a model poorly water soluble drug in rats. **Int. J. Pharm.** 340: 52-60.
- Boyd, B.J., Whittaker, D.V., Khoo, S.M. and Davey, G. (2006). Lyotropic liquid crystalline phases formed from glycerate surfactants as sustained release drug delivery systems. **Int. Dairy J.** 309: 218-226.
- Burn, J.M. and Dalgleish, D.G. (1999). Some effects of heat on the competitive adsorption of caseins and whey proteins in oil-in-water emulsions. **Int. Dairy J.** 9: 323-327.
- Caldwell, K.B., Goff, H.D. and Stanley, D.W. (1992). A low-temperature scanning electron microscopy study of ice cream. I. Techniques and general microstructure. **Food Struct.** 11: 1-23.
- Cano-Ruiz, M.E. and Richter, R.L. (1997). Effect of homogenization pressure on the milk fat globule membrane proteins. **J. Dairy Sci.** 80: 2732-2739.
- Chang, Y. and Hartel, R.W. (2002). Development of air cells in a batch ice cream freezer. **J. Food Eng.** 55: 71-79.
- Chen, J. and Dickinson, E. (1999). Effect of monoglycerides and diglycerol-esters on viscoelasticity of heat-set whey protein emulsion gels. **Int. J. Food Sci. Technol.** 34: 493-501.
- Clarke, C. (2004). **The science of ice cream.** UK: Cambridge : The royal society of chemistry. 187 p.

- Clark, D.C., Wilde, P.J. and Wilson, D.R. (1991). Destabilization of α -lactalbumin foams by competitive adsorption of the surfactant, Tween 20. **Coll. Surf.** 59: 209-223.
- Cornec, M., Mackie, A.R., Wilde, P.J. and Clark, D.C. (1996). Competitive adsorption of β -lactoglobulin and β -casein with span 80 at the oil-water interface and the effects on emulsion behaviour. **Coll. Surf. A** 114(1): 237-244.
- Cornec, M., Wilde, P.J., Guning, P.A., Mackie, A.R., Husband, F.A., Parker, M.L., Clark, D.C. (1998). Emulsion stability as affects by competitive adsorption between oil-soluble emulsifiers and milk proteins at the interface. **J. Food Sci.** 69: 39-43.
- Cottrell, T. and van Peji, J. (2004). Sorbitan esters and polysorbates. In: R.J. Whitenhurst (ed.). **Emulsifiers in food technology**. Conwall: Blackwell. 162-185.
- Dalgleish, D.G. and Morris, E.R. (1988). Interactions between carrageenans and casein micelles: electrophoretic and hydrodynamic properties of the particles. **Food Hydrocoll.** 2: 311-320.
- Dalgleish, D.G., Goff, H.D. and Luan, B. (2002). Exchange reactions between whey proteins and caseins in heated soya oil-in-water emulsion systems-behavior of individual proteins. **Food Hydrocoll.** 16: 295-302.
- Dalgleish, D.G., Goff, H.D., Brun, J.M. and Luan, B. (2002). Exchange reactions between whey proteins and caseins in heated soya oil-in-water emulsion systems-overall aspects of the reaction. **Food Hydrocoll.** 16: 303-311.
- Dalgleish, D.G., Srinivasan, M. and Singh, H. (1995). Surface properties of oil-in-water emulsion droplets containing casein and Tween 60. **J. Agric. Food Chem.** 43: 2351-2355.
- Damodaran, S. (1996). Amino acids, peptides, and proteins. In: O.R. Fennema (ed.) (3th ed.) **Food chemistry** New York: Marcel Dekker. 322-425.
- Davies, E., Dickinson, E and Bee, R.D. (2000). Shear stability of sodium caseinate emulsions containing monoglyceride and triglyceride crystals. **Food Hydrocoll.** 14: 145-153.
- Davies, E., Dickinson, E and Bee, R.D. (2001). Orthokinetic destabilization of emulsions by saturated and unsaturated monoglycerides. **Int. Dairy J.** 11: 872-836.
- Dickinson, E. (1992). Introduction of Food colloids. Oxford: Oxford University Press. Quoted in D.J. McClements (1999). **Food Emulsion: Principles, Practice and Techniques**. Boca Raton: CRC Press. 378 p.
- Dickinson, E. (1998). Proteins at interfaces and in emulsions: Stability, rheology and interactions.

- J. Chem. Soc.** 94(12): 1657-1669.
- Dickinson, E. (1999). Adsorbed protein layer at fluid interfaces: interactions, structure and surface rheology. **Coll. Surf B** 15: 161-176.
- Dickinson, E. (2001). Milk protein interfacial layers and the relationship to emulsion stability and rheology. **Coll. Surf. B** 20: 197-210.
- Dickinson, E. and McClements, D.J. (1995). **Advances in food colloids**. London: Blackie Academic & Professional. 333 p.
- Dickinson, E., Owusu, R.K. and Williams, A. (1993). Orthokinetic destabilization of a protein stabilized emulsion by a water-soluble surfactant. **J. Chem. Soc. Faraday Trans.** 89: 865–866.
- Dickinson, E. and Stainsby, G. (1982). Colloids in foods. London: Applied Science. Quoted in D.J. McClements (1999). **Food Emulsion: Principles, Practice and Techniques**. Boca Raton: CRC Press. 378 p.
- Eisner, M.D., Jeelani, S.A.K., Bernhard, L. and Windhab, E.J. (2007). Stability of foams containing proteins, fat particles and nonionic surfactants. **Chem. Eng. Sci.** 62: 1974-1987.
- Euston, S.R. (1997). Emulsifiers in dairy products and dairy substitutes. In: G.L. Hasenheuttl, and R.W. Hartel (eds.). **Food emulsifiers and their applications**. New York: Chapman & Hall. 173-210.
- Euston, S.R. and Hirst, R.L. (1999). Comparison of the concentration-dependent emulsifying properties of protein products containing aggregated and non-aggregated milk protein. **Int. Dairy J.** 9: 693-701.
- Euston, S.R. and Hirst, R.L. (2000). The emulsifying properties of commercial milk protein products in simple oil-in-water emulsions and in a model food system. **J. Food Sci.** 65(6): 934-940.
- Euston, S.E., Singh, H., Munro, P.A. and Dalgleish, D.G. (1995). Competitive adsorption between sodium caseinate and oil-soluble and water-soluble surfactants in oil-in-water emulsions during the manufacture of ice cream. **J. Food Sci.** 60: 1124-1131.
- Euston, S.E., Singh, H., Munro, P.A. and Dalgleish, D.G. (1996). Oil-in-water emulsions stabilized by sodium caseinate or whey protein isolate as influenced by glycerol monostearate. **J. Food Sci.** 60(5): 916-920.

- Fillery-Travis, A., Mills, E.N.C. and Wilde, P. (2000). Protein-lipid interactions at interfaces. **Grasasy Aceites** 51(1-2): 50-55.
- Fitzsimons, S.M., Mulvihill, D.M. and Morris, E.R. (2007). Denaturation and aggregation processes on thermal gelation of whey proteins resolved by differential scanning calorimetry. **Food Hydrocoll.** 21: 638-644.
- Goff, H.D. (1997a). Instability and partial coalescence in whippable dairy emulsions. **J. Dairy Sci.** 80: 2620-2630.
- Goff, H.D. (1997b). Colloidal aspects of ice cream-A review. **Int. Dairy J.** 7: 363-373.
- Goff, H.D. and Jordan, W.K. (1989). Action of emulsifiers in promoting fat destabilization during the manufacture of ice cream. **J. Dairy Sci.** 72: 18-29.
- Goff, H.D., Kinsella, J.E. and Jordan, W. K. (1989). Influence of various milk protein isolates on ice cream emulsion stability. **J. Dairy Sci.** 72: 385-397.
- Goff, H. D., Liboff, M. Jordan, W. K. and Kinsella, J. E. (1987). The effects of polysorbate 80 on the fat emulsion in ice cream mix: evidence from transmission electron microscopy studies. **Food Microstruct.** 6 : 193-198.
- Goff, H.D., Verespeg, E. and Smith, A.K. (1999). A study of fat and air structures in ice cream. **Int. Dairy J.** 9: 817-829.
- Golding, M. and Sein, A. (2004). Surface rheology of aqueous casein-monoglyceride dispersions. **Food Hydrocoll.** 18: 451-461.
- Granger, C., Barey, P., Combe, N., Veschamber, P. and Cansell, M. (2003). Influence of the fat characteristics on the physicochemical behavior of oil-in-water emulsions based on milk proteins- glycerol esters mixtures. **Coll. Surf. B** 32: 353-363.
- Granger, C., Barey, P., Veschambre, P. and Cansell, M. (2005a). Physicochemical behavior of oil-in-water emulsions: influence of milk protein mixtures, glycerol ester mixtures and fat characteristics. **Coll. Surf. B** 42: 235-243.
- Granger, C., Barey, P., Veschambre, P. and Cansell, M. (2005b). Physicochemical behaviour of oil-in-water emulsions: influence of milk protein mixtures, glycerol ester mixtures and fat characteristics. **Coll. Surf. B** 42: 235-243.
- Granger, C., Leger, A., Barey, P., Langendorff, V. and Cansell, M. (2005). Influence of formulation on the structural networks in ice cream. **Int. Dairy J.** 15: 255-262.

- Havea, P., Singh, H. and Creamer, L.K. (2001). Characterization of heat-induced aggregates of β -lactoglobulin, α -lactalbumin and bovine serum albumin in a whey protein concentrate environment. **J. Dairy Res.** 68: 483-497.
- Ji, S., Corredig, M. and Goff, H.D. (2008). Aggregation of casein micelles and K-carrageenan in reconstituted skim milk. **Food Hydrocoll.** 22: 56-64.
- Keeney, P.G. and Kroger, M. (1974). Frozen dairy products. In: B.H. Webb, A.H. Johnson and J.A. Alford (eds.). **Fundamentals of dairy chemistry** (2nd ed.) Westport: The AVI Publ. 879-913.
- Krog, N. (1977). Functions of emulsifiers in food system. **J. Am. Oil Chem. Soc.** 54: 124-131.
- Lal, S.N.D., O'Connor, C.J. and Eyres, L. (2006). Application of emulsifier/stabilizers in dairy products of high rheology. **Adv. Coll. Interf. Sci.** 123-126: 433-437.
- Langevin, D. (2000). Influence of interfacial rheology on foam and emulsion properties. **Adv. Coll. Interf. Sci.** 88: 209-222.
- Lee, D-H., Kim, E-S. and Chang, H-W. (2005). Effect of Tween surfactant components for remediation to toluene-contaminated groundwater. **Geosciences J.** 9: 261-267.
- Lin, H., Xu, X.M. and Guo, S.D. (2008). Comparison of full-fat cheese analogues with or without pectin gel through microstructure, texture, rheology, thermal and sensory analysis. **Int. J. Food Sci. Technol.** 43: 1581-1592.
- Livney, Y.D, Corredig, M. and Dalgleish, D.G. (2003). Influence of thermal processing on the properties of dairy colloids. **Coll. Interf. Sci.** 8: 359-364.
- Marshall, R.T., Goff, H.D. and Hartel, R.W. (2003). **Ice cream** (6th ed.). New York: Kluwer Academic/Plenum. 371 p.
- McClements, D.J. (1998). Lipids-based emulsions and emulsifiers. In: C.C. Akok and D.B. Min (eds.). **Food lipids: Chemistry, Nutrition and Biotechnology**. New York: Marcel Dekker. 55-87.
- McClements, D.J. (1999). **Food emulsions: Principles, Practice and Techniques**. New York: CRC Press. 378 p.
- McClements, D.J., Dickinson, E., Dungan, S.R., Kinsella, J.E., Ma, J.G. and Povey, M.J.W. (1993). Effect of emulsifier type on the crystallization kinetics of oil-in-water emulsion containing a mixture of solid and liquid droplets. **J. Coll. Interf. Sci.** 160: 293-297.

- Mulvihill, D.M. (1992). Production, functional properties and utilization of milk protein products
In: S.R. Euston and R.L. Hirst (1999). Comparison of the concentration-dependent emulsifying properties of protein products containing aggregated and non-aggregated milk protein. **Int. Dairy J.** 9: 693-701.
- Muse, M.R. and Hartel, R.W. (2004). Ice cream structural elements affect melting rate and hardness. **J. Dairy Sci.** 87: 1-10.
- Ostberg, G., Bergenstahl, B. and Hulden, M. (1995). Influence of emulsifier on the formation of alkyd emulsions. **Coll. Surf. A** 94: 161-171.
- Palanuwech, J. and Coupland, J.N. (2003). Effect of surfactant type on the stability of oil-in-water emulsions to dispersed phase crystallization. **Coll. Surf. A** 223: 251-262.
- Parkinson, E.L., and Dickinson, E. (2004). Inhibition of heat-induced aggregation of beta-lactoglobulin-stabilized emulsion by very small additions of casein **Coll. Surf. B** 39:23-30.
- Parsons, J.G., Dybing, S.T., Coder, D.S., Spurgeon, K.R. and Seas, S.W. (1985). Acceptability of ice cream made with processed whey and sodium caseinate. **J. Dairy Sci.** 68: 2880-2885.
- Pelan, B.M.C., Watts, K.M., Campbell, I.J. and Lips, A. (1997). The stability of aerated milk protein emulsions in the presence of small molecule surfactants. **J. Dairy Sci.** 80: 2631-2638.
- Prindiville, E.A., Marshall, R.T. and Heymann, H. (1999). Effect of milk fat on the sensory properties of chocolate ice cream. **J. Dairy Sci.** 82: 1425-1432.
- Rangelov, S. and Almgren, M. (2005). Particulate and bulk bicontinuous cubic phases obtained from mixtures of glyceryl monooleate and copolymers bearing blocks of lipid-mimetic anchors in water. **J. Phys. Chem. B** 109: 3921-3929.
- Ruger, P.R., Baer, R.J. and Kasperson, K.M. (2002). Effect of double homogenization and whey protein concentrate on the texture of ice cream. **J. Dairy Sci.** 85: 1684-1692.
- Udabage, P., Augustin, M.A., Cheng, L.J. and Williams, R.P.W. (2005). Physical behaviour of dairy ingredients during ice cream processing. **Lait** 85: 383-394.
- Varnam, A.H. and Sutherland, J.P. (1994). Ice cream and related products. In : **Milk and milk products: technology, chemistry and microbiology**. London: Chapman & Hall. 387-426.

- Schokker, E.P., Bos, M.A., Kuijpers, A.J., Wijnen, M.E. and Walstra, P. (2002). Spreading of oil from protein stabilized emulsions at air/water interfaces. **Coll. Surf. B** 26: 315-327.
- Schramm, L.L., Stasiuk, E.N. and Marangoni, D.G. (2003). Surfactants and their applications. **Annu. Rep. Prog. Chem.** 99: 3-48.
- Segall, K.I. and Goff, H.D. (1999). Influence of adsorbed milk protein type and surface concentration on the quiescent and shear stability of butter oil emulsions. **Int. Dairy J.** 9: 683-691.
- Segall, K.I. and Goff, H.D. (2002). A modified ice cream processing routine that promotes fat destabilization in the absence of added emulsifier. **Int. Dairy J.** 12: 1013-1018.
- Shah, M.H. and Paradkar, A. (2005). Cubic liquid crystalline glyceryl monooleate matrices for oral delivery of enzyme. **Int. J. Pharm.** 294: 161-171.
- Singh, H. and Newstead, D.F. (1992). Aspects of proteins in milk powder manufacture In: S.R. Euston and R.L. Hirst (1999). Comparison of the concentration-dependent emulsifying properties of protein products containing aggregated and non-aggregated milk protein. **Int. Dairy J.** 9: 693-701.
- Smits, P. and Van Brouwershaven, J.H. (1980). Heat-induced association of β -lactoglobulin and casein micelles. **J. Dairy Res.** 47: 313-325.
- Snoeren, T.H.M., Payens, T.A.J., Jeunink, J. and Both, P. (1975). Electrostatic interaction between K-carrageenan and K-casein. **Milchwissenschaft.** 30: 393-396.
- Spagnuolo, P.A., Dalgleish, D.G., Goff, H.D. and Morris, E.R. (2005). Kappa-carregeenan interactions in systems containing casein micelles and polysaccharide stabilizers. **Food Hydrocoll.** 19: 371-377.
- Taisne, L., Walstra, P. and Cabane, B. (1996). Transfer of oil between emulsion droplets. **J. Coll. Int. Sci.** 184: 378-390.
- Tcholakava, S., Denkov, N.D. and Danner, T. (2004). Role of surfactant type and concentration for the mean drop size during emulsification in turbulent flow. **Langmuir** 20: 7444-7458.
- Thaiudom, S. and Goff, H.D. (2003). Effect of K-carrageenan on milk protein polysaccharide mixtures. **Int. Dairy J.** 13: 763-771.
- Walstra, P. (1993). Principles of emulsion formation. **Chem. Eng. Sci.** 48:333.
- Wilde, P., Mackie, A., Husband, F., Gunning, P. and Morris, V. (2004). Proteins and emulsifiers at

liquid interfaces. **Adv. Coll. Interf. Sci.** 63-67: 108-109.

Wild, P.J., Nino, M.R.R., Clark, D.C. and Patino, J.M.R. (1997). Molecular diffusion and drainage of thin liquid films stabilized by bovine serum albumin Tween 20 mixtures in aqueous solutions of ethanol and sucrose. **Langmuir** 13: 7151-7157.

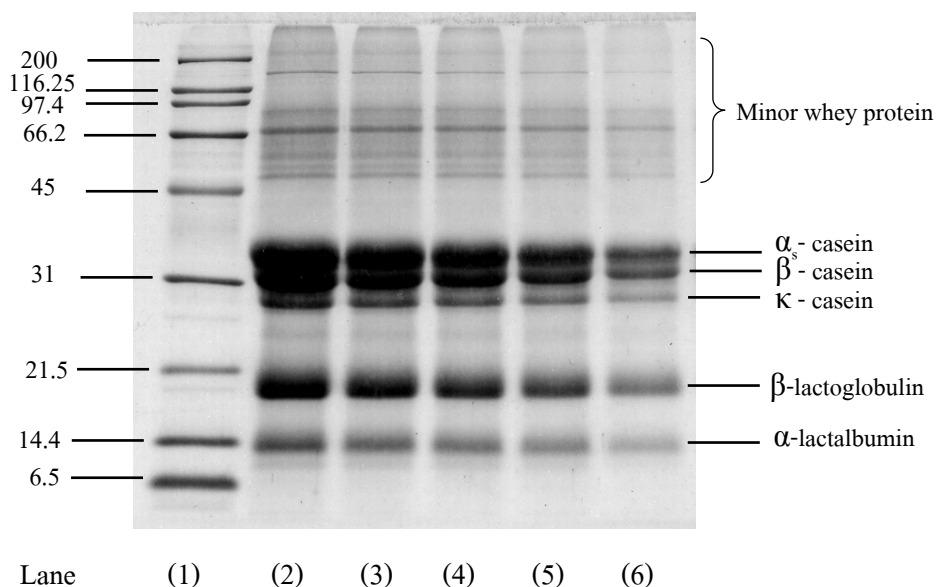
Zayas, J.F.(1997). **Functionality of proteins in food**. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 373 p.

Zhang, Z. and Goff, H. D. (2005). On fat destabilization and composition of the air interface in ice cream containing saturated and unsaturated monoglyceride. **Int. Dairy J.** 15: 495-500.

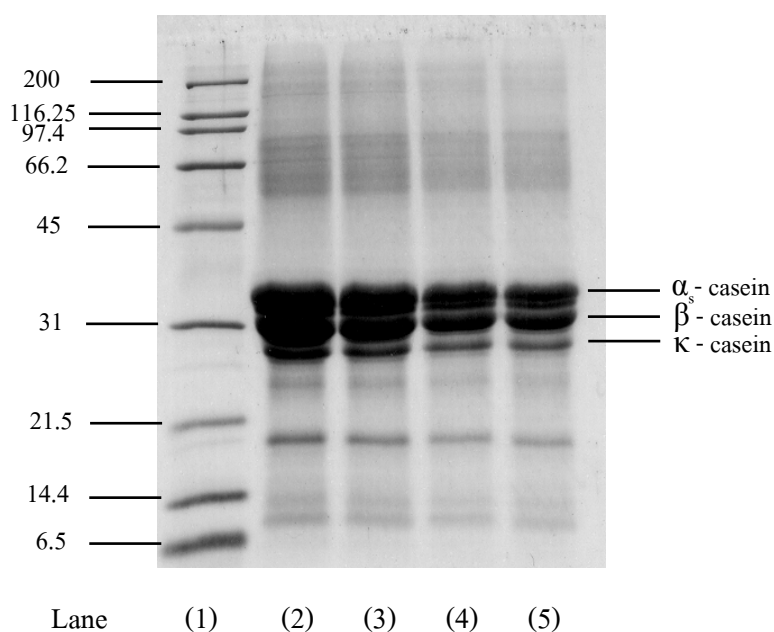
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

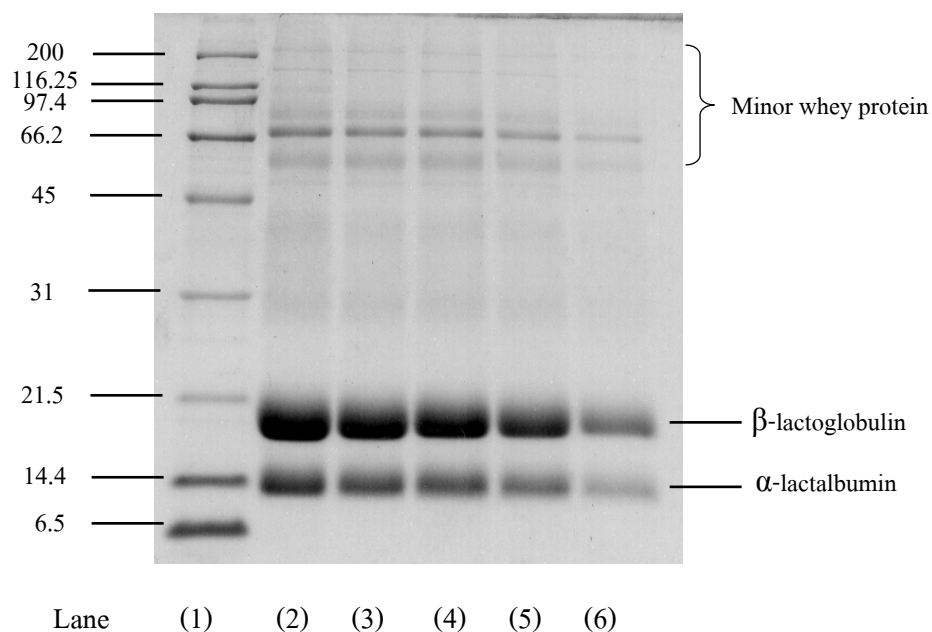
ส่วนประกอบของโปรตีนนม



ภาพที่ ก.1 ส่วนประกอบของนมผงพร่องมันเนย (SMP) ที่ได้จากเทคนิค Sodium dedecyl sulfate-polyacrylamide gel (SDS-PAGE) (Lane 1 = Molecular weight standards (Broad range) (kDa); Lane 2-6 = SMP standard ที่ความเข้มข้น 20, 15, 12, 9 และ 4.5 µg protein)



ภาพที่ ก.2 ส่วนประกอบของโซเดียม เคซีน (SC) ที่ได้จากเทคนิค Sodium dedecyl sulfate-polyacrylamide gel (SDS-PAGE) (Lane 1 = Molecular weight standards (Broad range) (kDa); Lane 2-5 = SC standard ที่ความเข้มข้น 20, 15, 12 และ 9 µg protein)



ภาพที่ ก.3 ส่วนประกอบของโปรตีนเวย์เข้มข้น (WPC) ที่ได้จากเทคนิค Sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel (SDS-PAGE) (Lane 1 = Molecular weight standards (Broad range) (kDa); Lane 2-6 = WPC standard ที่ความเข้มข้น 20, 15, 12, 9 และ 4.5 µg protein)

ภาคผนวก ข

ผลการทดลอง

ตารางที่ ข.1 ขนาดอนุภาคเม็ดไขมันและความหนืดที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสของระบบอิมัลชันที่ประกอบด้วยชนิดและปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์ที่แตกต่างกันที่สภาวะก่อนบ่มและหลังบ่ม 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

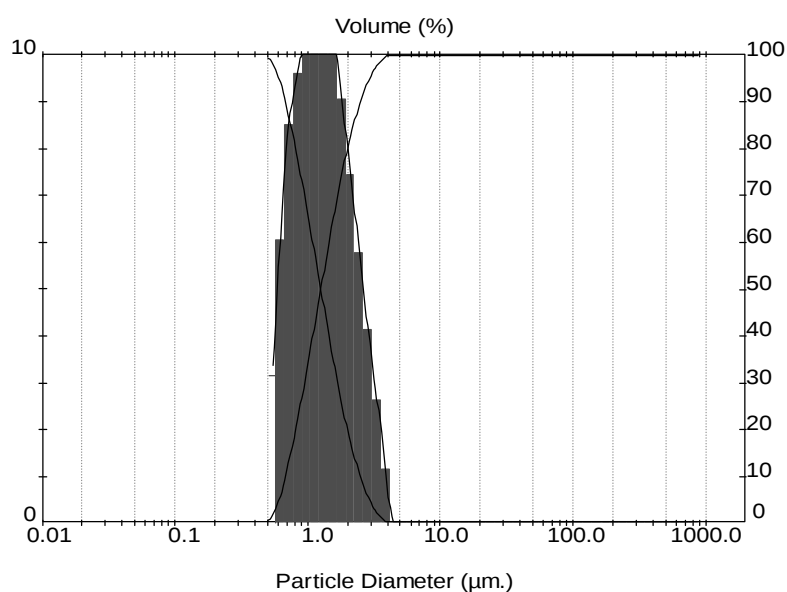
Emulsifier Concentration		Fat particle size (d _{3,2} : μm)		Viscosity (mPa.s)	
	(%w/w)	Before aging	After aging	Before aging	After aging
Control*	-	1.24 ± 0.01 ^{DC, a}	1.21 ± 0.01 ^{D, b}	2.46 ± 0.06 ^{E, a}	2.54 ± 0.03 ^{D, b}
Tween 60	0.04	1.45 ± 0.21 ^{B, ns}	1.49 ± 0.03 ^{A, ns}	2.73 ± 0.15 ^{D, ns}	2.78 ± 0.24 ^{C, ns}
	0.08	1.50 ± 0.03 ^{A, ns}	1.50 ± 0.05 ^{A, ns}	2.74 ± 0.18 ^{D, ns}	2.77 ± 0.15 ^{C, ns}
	1	1.08 ± 0.01 ^{G, ns}	1.08 ± 0.01 ^{G, ns}	3.10 ± 0.06 ^{B, ns}	3.09 ± 0.06 ^{B, ns}
Tween 80	0.04	1.51 ± 0.02 ^{A, a}	1.48 ± 0.04 ^{A, b}	2.78 ± 0.11 ^{D, ns}	2.77 ± 0.15 ^{C, ns}
	0.08	1.46 ± 0.01 ^{B, ns}	1.45 ± 0.03 ^{B, ns}	2.70 ± 0.18 ^{D, ns}	2.75 ± 0.16 ^{C, ns}
	1	1.08 ± 0.01 ^{G, a}	1.09 ± 0.01 ^{F, b}	2.99 ± 0.04 ^{CB, ns}	3.08 ± 0.17 ^{B, ns}
GMS	0.04	1.26 ± 0.03 ^{C, a}	1.24 ± 0.02 ^{C, b}	2.70 ± 0.04 ^{D, ns}	2.68 ± 0.06 ^{CD, ns}
	0.08	1.26 ± 0.03 ^{C, a}	1.23 ± 0.03 ^{C, b}	2.69 ± 0.03 ^{D, ns}	2.70 ± 0.06 ^{CD, ns}
	1	1.12 ± 0.01 ^{F, a}	1.15 ± 0.01 ^{E, b}	2.88 ± 0.04 ^{CD, ns}	2.88 ± 0.08 ^{C, ns}
GMO	0.04	1.21 ± 0.01 ^{D, ns}	1.20 ± 0.00 ^{D, ns}	2.74 ± 0.03 ^{D, ns}	2.87 ± 0.17 ^{C, ns}
	0.08	1.22 ± 0.01 ^{DC, a}	1.20 ± 0.01 ^{D, b}	2.78 ± 0.04 ^{D, ns}	2.87 ± 0.16 ^{C, ns}
	1	1.16 ± 0.01 ^{E, a}	0.98 ± 0.01 ^{H, b}	7.35 ± 0.50 ^{A, ns}	7.11 ± 0.30 ^{A, ns}

หมายเหตุ: - Control* หมายถึง ตัวอย่างอิมัลชันที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์

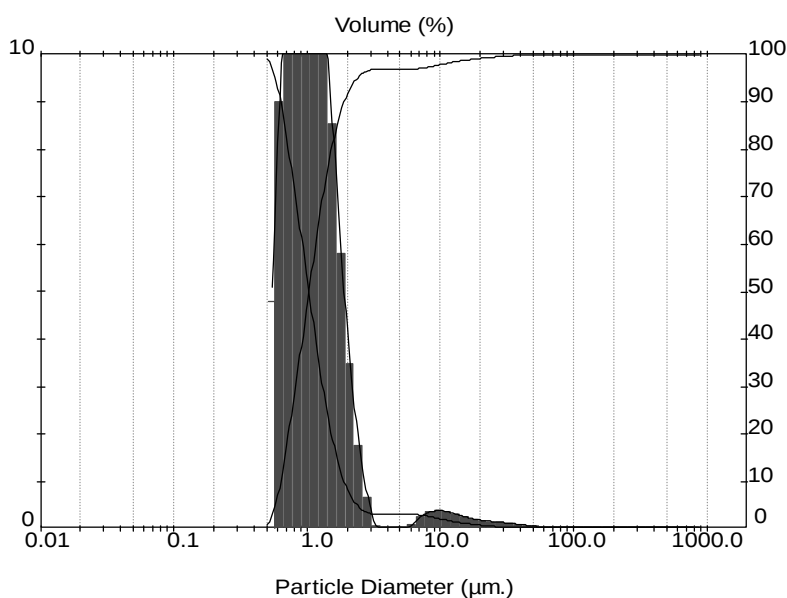
- A - G เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้ง หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

- a, b เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวนอน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

- ns เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยตามแนวนอน หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)



ภาพที่ ข.1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคเม็ดไขมันที่ได้จากเครื่อง Laser particle size analyzer ของตัวอย่างอีมีลชั้นที่เดิม 1% (w/w) GMO ที่สภาวะก่อนบ่ม 4 องศาเซลเซียส



ภาพที่ ข.2 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคเม็ดไขมันที่ได้จากเครื่อง Laser particle size analyzer ของตัวอย่างอีมีลชั้นที่เดิม 1% (w/w) GMO ที่สภาวะหลังบ่ม 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ตารางที่ ข.2 ปริมาณโปรตีนของตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ทำจากโปรตีนนมและอีมีลซิไฟเออร์ชนิดต่าง ๆ ทั้งในส่วนที่เป็นส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม และส่วนของชีรุ่มและชั้นครีมที่ได้หลังบ่มที่ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

Protein	Emulsifier	Protein content (mg Protein)		
		Ice cream mix	Serum	Cream
SMP	Control*	3,114.17 ± 120.62 ^{ns}	1,946.53 ± 121.84 ^{ns}	1,206.91 ± 48.35 ^{ns}
	Tween 60	3,073.13 ± 117.79 ^{ns}	2,052.92 ± 52.78 ^{ns}	1,248.67 ± 129.26 ^{ns}
	Tween 80	3,126.86 ± 106.71 ^{ns}	2,046.10 ± 169.11 ^{ns}	1,222.39 ± 173.89 ^{ns}
	GMS	3,094.01 ± 120.70 ^{ns}	2,057.17 ± 67.24 ^{ns}	1,197.20 ± 106.62 ^{ns}
	GMO	3,069.09 ± 82.36 ^{ns}	2,017.33 ± 7.93 ^{ns}	1,228.01 ± 57.90 ^{ns}
SC	Control*	3,184.29 ± 67.06 ^{ns}	2,666.31 ± 36.81 ^{ns}	393.36 ± 46.06 ^{ns}
	Tween 60	3,072.82 ± 148.13 ^{ns}	2,605.07 ± 78.17 ^{ns}	410.26 ± 140.12 ^{ns}
	Tween 80	3,207.81 ± 21.17 ^{ns}	2,676.33 ± 78.47 ^{ns}	424.83 ± 94.89 ^{ns}
	GMS	3,136.27 ± 129.67 ^{ns}	2,626.38 ± 76.55 ^{ns}	368.14 ± 56.84 ^{ns}
	GMO	3,138.12 ± 17.08 ^{ns}	2,573.69 ± 77.47 ^{ns}	417.49 ± 50.57 ^{ns}
WPC	Control*	3,516.65 ± 84.47 ^a	2,811.67 ± 58.60 ^{ns}	416.44 ± 52.14 ^b
	Tween 60	3,411.55 ± 82.96 ^{ab}	2,768.15 ± 34.92 ^{ns}	458.86 ± 60.74 ^{ab}
	Tween 80	3,375.85 ± 38.71 ^b	2,828.39 ± 116.77 ^{ns}	412.32 ± 34.74 ^b
	GMS	3,434.75 ± 86.90 ^{ab}	2,758.85 ± 76.12 ^{ns}	473.01 ± 46.86 ^{ab}
	GMO	3,430.40 ± 68.01 ^{ab}	2,746.62 ± 107.93 ^{ns}	522.98 ± 66.87 ^a

หมายเหตุ: - Control* หมายถึง สูตรส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ไม่เติมอีมีลซิไฟเออร์

- a, b เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวตั้งภายในโปรตีนชนิดเดียวกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

- ns เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยตามแนวตั้งภายในโปรตีนชนิดเดียวกัน หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)

ภาคผนวก ค

วิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ

ตารางที่ ค.1 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของขนาดอนุภาคเม็ดไขมันด้วยวิธี Factorial in CRD ของ ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SMP (Control) ที่สภาวะการฆ่าเชื้อ (69°C/30 min หรือ 75°C/15 min) และระยะเวลาการป่นที่ 4°C (0, 2, 4 หรือ 24 h)

Analysis of variance procedure

Class level information

Class	Levels	Values
A	2	69 75
B	4	0 2 4 24

Number of observations in data set = 192

Source	DF	Sum of Squares	Mean Squares	F value	Pr > F
Model	7	0.88411458	0.12630208	31.98	0.0001
Error	184	0.72668333	0.00394937		
Corrected total	191	1.61079792			

R-square	C.V.	Root MSE	Size Mean
0.548867	3.867074	0.06284398	1.62510417

Source	DF	Sum of Squares	Mean Squares	F value	Pr > F
A	1	0.87750208	0.87750208	222.19	0.0001
B	3	0.00378958	0.00126319	0.32	0.8110
A*B	3	0.00282292	0.00094097	0.24	0.8696

Duncan's Multiple Range test for variable: Size

A	N	Mean	Duncan Grouping
69	96	1.692708	A
75	96	1.557500	B

B	N	Mean	Duncan Grouping
4	48	1.62896	A
24	48	1.62813	A
2	48	1.62562	A
0	48	1.61771	A

ตารางที่ ค.2 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของขนาดอนุภาคเม็ดไขมันด้วยวิธี Factorial in CRD ของ ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SMP+Tween 60 ที่สภาวะการฆ่าเชื้อ (69°C/30 min หรือ 75°C/15 min) และระยะเวลาการบ่มที่ 4°C (0, 2, 4 หรือ 24 h)

Analysis of variance procedure

Class level information

Class	Levels	Values
A	2	69 75
B	4	0 2 4 24

Number of observations in data set = 192

Source	DF	Sum of Squares	Mean Squares	F value	Pr > F
Model	7	0.35432865	0.05061838	57.67	0.0001
Error	184	0.16149583	0.00087769		
Corrected total	191	0.51582448			

R-square	C.V.	Root MSE	Size Mean
0.686917	1.889571	0.02962591	1.56786458

Source	DF	Sum of Squares	Mean Squares	F value	Pr > F
A	1	0.34765052	0.34765052	396.10	0.0001
B	3	0.00650573	0.00216858	2.47	0.0633
A*B	3	0.00017240	0.00005747	0.07	0.9781

Duncan's Multiple Range test for variable: Size

A	N	Mean	Duncan Grouping
69	96	1.610417	A
75	96	1.525312	B

B	N	Mean	Duncan Grouping
4	48	1.573958	A
24	48	1.573125	A
2	48	1.563958	A
0	48	1.560417	A

ตารางที่ ค.3 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของขนาดอนุภาคเม็ดไขมันด้วยวิธี Factorial in CRD ของ ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SC (Control) ที่สภาวะการฆ่าเชื้อ (69°C/30 min หรือ 75°C/15 min) และระยะเวลาการป่นที่ 4°C (0, 2, 4 หรือ 24 h)

Analysis of variance procedure

Class level information

Class	Levels	Values
A	2	69 75
B	4	0 2 4 24

Number of observations in data set = 192

Source	DF	Sum of Squares	Mean Squares	F value	Pr > F
Model	7	0.34432031	0.04918862	22.88	0.0001
Error	184	0.39556250	0.00214980		
Corrected total	191	0.73988281			

R-square	C.V.	Root MSE	Size Mean
0.465371	2.673590	0.04030589	1.73421875

Source	DF	Sum of Squares	Mean Squares	F value	Pr > F
A	1	0.32422969	0.32422969	150.82	0.0001
B	3	0.00857240	0.00285747	1.33	0.2663
A*B	3	0.01151823	0.00383941	1.79	0.1514

Duncan's Multiple Range test for variable: Size

A	N	Mean	Duncan Grouping
69	96	1.775312	A
75	96	1.693125	B
B	N	Mean	Duncan Grouping
24	48	1.742292	A
4	48	1.738333	A
2	48	1.731458	A
0	48	1.724792	A

ตารางที่ ค.4 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของขนาดอนุภาคเม็ดไขมันด้วยวิธี Factorial in CRD ของ ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SC+Tween 80 ที่สภาวะการมาเชื้อ (69°C/30 min หรือ 75°C/15 min) และระยะเวลาการป่นที่ 4°C (0, 2, 4 หรือ 24 h)

Analysis of variance procedure

Class level information

Class	Levels	Values
A	2	69 75
B	4	0 2 4 24

Number of observations in data set = 192

Source	DF	Sum of Squares	Mean Squares	F value	Pr > F
Model	7	1.02719792	0.14674256	53.94	0.0001
Error	184	0.50060000	0.00272065		
Corrected total	191	1.52779792			

R-square	C.V.	Root MSE	Size Mean
0.672339	3.177049	0.05215987	1.64177083

Source	DF	Sum of Squares	Mean Squares	F value	Pr > F
A	1	1.00340833	1.00340833	368.81	0.0001
B	3	0.02030208	0.00676736	2.49	0.0620
A*B	3	0.00348750	0.00116250	0.43	0.7337

Duncan's Multiple Range test for variable: Size

A	N	Mean	Duncan Grouping
69	96	1.714069	A
75	96	1.569479	B
B	N	Mean	Duncan Grouping
24	48	1.65729	A
4	48	1.64417	A
2	48	1.63562	A
0	48	1.63000	A

ตารางที่ ค.5 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของขนาดอนุภาคเม็ดไขมันด้วยวิธี Factorial in CRD ของ ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ WPC (Control) ที่สภาวะการนำเชื้อ (69°C/30 min หรือ 75°C/15 min) และระยะเวลาการป่นที่ 4°C (0, 2, 4 หรือ 24 h)

Analysis of variance procedure

Class level information

Class	Levels	Values
A	2	69 75
B	4	0 2 4 24

Number of observations in data set = 192

Source	DF	Sum of Squares	Mean Squares	F value	Pr > F
Model	7	0.12485781	0.01783683	2.59	0.0145
Error	184	1.26940417	0.00689894		
Corrected total	191	1.39426198			

R-square	C.V.	Root MSE	Size Mean
0.089551	5.218931	0.08305983	1.59151042

Source	DF	Sum of Squares	Mean Squares	F value	Pr > F
A	1	0.09056719	0.09056719	13.13	0.0004
B	3	0.02888490	0.00962830	1.40	0.2456
A*B	3	0.00540573	0.00180191	0.26	0.8533

Duncan's Multiple Range test for variable: Size

A	N	Mean	Duncan Grouping
69	96	1.61323	A
75	96	1.56979	B
B	N	Mean	Duncan Grouping
24	48	1.60333	A
4	48	1.60021	A
2	48	1.59063	A
0	48	1.57188	A

ตารางที่ ค.6 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของขนาดอนุภาคเม็ดไขมันด้วยวิธี Factorial in CRD ของ ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ WPC+GMO ที่สภาวะการนำเชื้อ (69°C/30 min หรือ 75°C/15 min) และระยะเวลาการป่นที่ 4°C (0, 2, 4 หรือ 24 h)

Analysis of variance procedure

Class level information

Class	Levels	Values
A	2	69 75
B	4	0 2 4 24

Number of observations in data set = 192

Source	DF	Sum of Squares	Mean Squares	F value	Pr > F
Model	7	0.21811667	0.03115952	15.96	0.0001
Error	184	0.35925000	0.00195245		
Corrected total	191	0.57736667			

R-square	C.V.	Root MSE	Size Mean
0.377778	2.868476	0.04418649	1.54041667

Source	DF	Sum of Squares	Mean Squares	F value	Pr > F
A	1	0.20935208	0.20935208	107.23	0.0001
B	3	0.00542500	0.00180833	0.93	0.4293
A*B	3	0.00333958	0.00111319	0.57	0.6353

Duncan's Multiple Range test for variable: Size

A	N	Mean	Duncan Grouping
69	96	1.573438	A
75	96	1.507396	B
B	N	Mean	Duncan Grouping
4	48	1.546458	A
24	48	1.544792	A
2	48	1.536458	A
0	48	1.533958	A

ตารางที่ ค.7 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของความหนืดด้วยวิธี Factorial in CRD ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SMP (Control) ที่สภาวะการฆ่าเชื้อ (69°C/30 min หรือ 75°C/15 min) และระยะเวลาการป่นที่ 4°C (0, 2, 4 หรือ 24 h)

Analysis of variance procedure

Class level information

Class	Levels	Values
A	2	69 75
B	4	0 2 4 24

Number of observations in data set = 48

Source	DF	Sum of Squares	Mean Squares	F value	Pr > F
Model	7	1850.74145833	264.39163690	34.27	0.0001
Error	40	308.55833333	7.71395833		
Corrected total	47	2159.29979167			

R-square	C.V.	Root MSE	Viscosity Mean
0.857103	2.501835	2.77740136	111.01458333

Source	DF	Sum of Squares	Mean Squares	F value	Pr > F
A	1	1772.68520833	1772.68520833	229.80	0.0001
B	3	74.94395833	24.98131944	3.24	0.0320
A*B	3	3.11229167	1.03743056	0.13	0.9389

Duncan's Multiple Range test for variable: Viscosity

A	N	Mean	Duncan Grouping
75	24	117.0917	A
69	24	104.9375	B

B	N	Mean	Duncan Grouping
24	12	112.850	A
4	12	111.017	AB
2	12	110.867	AB
0	12	109.325	B

ตารางที่ ค.8 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของความหนืดด้วยวิธี Factorial in CRD ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SMP+Tween 60 ที่สภาวะการมาเชื้อ (69°C/30 min หรือ 75°C/15 min) และระยะเวลาการป่นที่ 4°C (0, 2, 4 หรือ 24 h)

Analysis of variance procedure

Class level information

Class	Levels	Values
A	2	69 75
B	4	0 2 4 24

Number of observations in data set = 48

Source	DF	Sum of Squares	Mean Squares	F value	Pr > F
Model	7	1331.0658333	190.15226190	60.91	0.0001
Error	40	124.8733333	3.12183333		
Corrected total	47	1455.93916667			

R-square	C.V.	Root MSE	Viscosity Mean
0.914232	1.675620	1.76687106	105.44583333

Source	DF	Sum of Squares	Mean Squares	F value	Pr > F
A	1	1230.18750000	1230.18750000	394.06	0.0001
B	3	99.2425000	33.08083333	10.60	0.0001
A*B	3	1.63583333	0.54527778	0.17	0.9129

Duncan's Multiple Range test for variable: Viscosity

A	N	Mean	Duncan Grouping
75	24	110.5083	A
69	24	100.3833	B

B	N	Mean	Duncan Grouping
24	12	107.4500	A
4	12	105.6500	B
2	12	105.2833	B
0	12	103.4000	C

ตารางที่ ค.9 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของความหนืดด้วยวิธี Factorial in CRD ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SC (Control) ที่สภาวะการฆ่าเชื้อ (69°C/30 min หรือ 75°C/15 min) และระยะเวลาการป่นที่ 4°C (0, 2, 4 หรือ 24 h)

Analysis of variance procedure

Class level information

Class	Levels	Values
A	2	69 75
B	4	0 2 4 24

Number of observations in data set = 48

Source	DF	Sum of Squares	Mean Squares	F value	Pr > F
Model	7	228.28741458	32.61248780	1.82	0.1108
Error	40	718.29468333	17.95736708		
Corrected total	47	946.58209792			

R-square	C.V.	Root MSE	Viscosity Mean
0.241170	4.270936	4.23761337	99.21979167

Source	DF	Sum of Squares	Mean Squares	F value	Pr > F
A	1	2.73130208	2.73130208	0.15	0.6986
B	3	108.84563958	36.28187986	2.02	0.1265
A*B	3	116.71047292	38.90349097	2.17	0.1070

Duncan's Multiple Range test for variable: Viscosity

A	N	Mean	Duncan Grouping
69	24	99.458	A
75	24	98.981	A
B	N	Mean	Duncan Grouping
0	12	100.80	A
4	12	99.850	A
2	12	99.481	A
24	12	96.748	A

ตารางที่ ค.10 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของความหนืดด้วยวิธี Factorial in CRD ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ SC+Tween 80 ที่สภาวะการฆ่าเชื้อ (69°C/30 min หรือ 75°C/15 min) และระยะเวลาการบ่มที่ 4°C (0, 2, 4 หรือ 24 h)

Analysis of variance procedure

Class level information

Class	Levels	Values
A	2	69 75
B	4	0 2 4 24

Number of observations in data set = 48

Source	DF	Sum of Squares	Mean Squares	F value	Pr > F
Model	7	122.74666667	17.53523810	3.67	0.0037
Error	40	190.89333333	4.77233333		
Corrected total	47	313.64000000			

R-square	C.V.	Root MSE	Viscosity Mean
0.391362	2.166155	2.18456708	100.85000000

Source	DF	Sum of Squares	Mean Squares	F value	Pr > F
A	1	37.45333333	37.45333333	7.85	0.0078
B	3	42.44666667	14.14888889	2.96	0.0434
A*B	3	42.84666667	14.28222222	2.99	0.0421

Duncan's Multiple Range test for variable: Viscosity

A	N	Mean	Duncan Grouping
75	24	101.7333	A
69	24	99.9667	B

B	N	Mean	Duncan Grouping
24	12	102.3500	A
2	12	100.8000	AB
0	12	100.4667	AB
4	12	99.7833	B

ตารางที่ ค.11 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของความหนืดด้วยวิธี Factorial in CRD ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ WPC (Control) ที่สภาวะการนำเชื้อ (69°C/30 min หรือ 75°C/15 min) และระยะเวลาการป่นที่ 4°C (0, 2, 4 หรือ 24 h)

Analysis of variance procedure

Class level information

Class	Levels	Values
A	2	69 75
B	4	0 2 4 24

Number of observations in data set = 48

Source	DF	Sum of Squares	Mean Squares	F value	Pr > F
Model	7	2070.45446458	295.77920923	71.04	0.0001
Error	40	166.53141667	4.16328542		
Corrected total	47	2236.98588125			

R-square	C.V.	Root MSE	Viscosity Mean
0.925555	2.392903	2.04041305	85.26937500

Source	DF	Sum of Squares	Mean Squares	F value	Pr > F
A	1	2034.89585208	2034.89585208	488.77	0.0001
B	3	21.07438958	7.02479653	1.69	0.1851
A*B	3	14.48422292	4.82807431	1.16	0.3371

Duncan's Multiple Range test for variable: Viscosity

A	N	Mean	Duncan Grouping
75	24	91.7804	A
69	24	78.7583	B

B	N	Mean	Duncan Grouping
0	12	86.1667	A
24	12	85.6108	A
2	12	84.8333	A
4	12	84.4667	A

ตารางที่ ค.12 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของความหนืดด้วยวิธี Factorial in CRD ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนผสมของ WPC+GMO ที่สภาวะการฆ่าเชื้อ (69°C/30 min หรือ 75°C/15 min) และระยะเวลาการบ่มที่ 4°C (0, 2, 4 หรือ 24 h)

Analysis of variance procedure

Class level information

Class	Levels	Values
A	2	69 75
B	4	0 2 4 24

Number of observations in data set = 48

Source	DF	Sum of Squares	Mean Squares	F value	Pr > F
Model	7	1830.41479167	261.48782738	48.87	0.0001
Error	40	214.04833333	5.35120833		
Corrected total	47	2044.46312500			

R-square	C.V.	Root MSE	Viscosity Mean
0.895303	2.698279	2.31326789	85.73125000

Source	DF	Sum of Squares	Mean Squares	F value	Pr > F
A	1	1819.17187500	1819.17187500	339.96	0.0001
B	3	8.36062500	2.78687500	0.59	0.6704
A*B	3	2.88229167	0.96076389	0.18	0.9097

Duncan's Multiple Range test for variable: Viscosity

A	N	Mean	Duncan Grouping
75	24	91.8879	A
69	24	79.5750	B

B	N	Mean	Duncan Grouping
24	12	86.4187	A
2	12	85.7167	A
4	12	85.4250	A
0	12	85.3667	A

ประวัติผู้เขียน

นางสาวธิดาวัลย์ โพธิ์จิตร เกิดเมื่อวันที่ 22 พฤศจิกายน พ.ศ. 2526 ที่อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนสุนารีวิทยาและสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปีการศึกษา 2548 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหารอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2549

ประสบการณ์ทำงาน/ฝึกอบรม

- ปฏิบัติงานโครงการสหกิจศึกษาในแผนกวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ (Research and Development : RD) ณ บริษัท เฟรชมิต ฟู้ด โปรดักส์ จำกัด จังหวัดนครปฐม (สิงหาคม-ธันวาคม 2548)
- ผู้ช่วยวิจัยโครงการ “การพัฒนากระบวนการผลิตและบรรจุภัณฑ์ผลิตภัณฑ์เห็ดหอมแปรรูประดับชุมชน” ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (พ.ศ. 2548)
- ผู้ช่วยวิจัยโครงการ “การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับจุลภาคและคุณภาพของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมโดยสารเพิ่มความคงตัวของน้ำมันและน้ำและโปรตีนนม” ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (พ.ศ. 2549-2550)

ผลงานทางวิชาการ

- ผลของชนิดของอิมัลซิไฟเออร์และโปรตีนนมต่อความคงตัวของไอศกรีม. ธิดาวัลย์ โพธิ์จิตร และ ศิวัม ไทยอุดม. การนำเสนอแบบบรรยาย (Oral presentation). การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วทท) ครั้งที่ 34, 31 ตุลาคม – 2 พฤศจิกายน 2551 ณ ศูนย์ประชุมแห่งชาติสิริกิติ์, กรุงเทพฯ