



การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของกะทิ

โดย

นางสาวกิตติมา ขวาลตีกุล

การค้นคว้าอิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร

ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของกะทิ

โดย

นางสาวกิตติมา ขวาลสุทธิกุล

การค้นคว้าอิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร

ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

**STUDY OF FACTORS AFFECTING FREEZE-THAW STABILITY
OF COCONUT MILK**

**By
Kittima Chavalratikul**

An Independent Study Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree

MASTER OF SCIENCE

Department of Food Technology

Graduate School

SILPAKORN UNIVERSITY

2009

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้การค้นคว้าอิสระเรื่อง “การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของกะทิ” เสนอโดย นางสาวกิตติมา ชวาลรติกุล เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริชัย ชินะดังกูร)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาการค้นคว้าอิสระ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกพันธ์ แก้วมณีชัย

คณะกรรมการตรวจสอบการค้นคว้าอิสระ

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศิริวงศ์ไผ่ชาติ)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. โสภาค สอนไว)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกพันธ์ แก้วมณีชัย)

...../...../.....

51403302 : สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร

คำสำคัญ : กะทิ/ การแช่แข็ง-ละลาย/ ความคงตัว/ ซูโครส/ โซเดียมคลอไรด์/ โซเดียมเคซิเนท/ Tween 60/
ระดับการให้ความร้อน

กิตติมา ชวาลศิริกุล: การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของกะทิ.

อาจารย์ที่ปรึกษาการค้นคว้าอิสระ: ผศ.ดร. เอกพันธ์ แก้วมณีชัย. 100 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของกะทิที่มีไขมัน 18%v/v ได้แก่ 1) ความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครส 2) ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 3) ชนิดและความเข้มข้นของอิมัลซิไฟเออร์ และ 4) ระดับการให้ความร้อนก่อนการแช่แข็ง จึงได้ทำการศึกษาผลของน้ำตาลซูโครสและโซเดียมคลอไรด์ โดยนำตัวอย่างกะทิไปผ่านการพาสเจอร์ไรส์ที่อุณหภูมิ 74 °C เป็นเวลา 15 วินาทีและโฮโมจิไนซ์ที่ความดัน (ขั้นที่1/ ขั้นที่2) 1500/500 psi เติมน้ำตาลซูโครส (10, 20, 30 และ 40%w/v) หรือโซเดียมคลอไรด์ (1, 2, 3 และ 4%w/v) ลงในตัวอย่างกะทิ ทำการศึกษาผลของอิมัลซิไฟเออร์ โดยนำตัวอย่างกะทิไปผ่านการพาสเจอร์ไรส์ที่อุณหภูมิ 74 °C เป็นเวลา 15 วินาที ปั่นผสมกับโซเดียมเคซิเนท (0.3, 0.5 และ 0.7%w/v) หรือ Tween 60 (0.1, 0.3 และ 0.5%w/v) จากนั้นนำไปโฮโมจิไนซ์ที่ความดัน 1500/500 psi และทำการศึกษาผลของระดับการให้ความร้อนก่อนการแช่แข็ง โดยนำตัวอย่างกะทิไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70, 80 และ 90 °C เป็นเวลา 1 นาที โดยไม่มีการเติมสารผสมอาหารใดๆลงในตัวอย่างกะทิ จากนั้นนำไปโฮโมจิไนซ์ที่ความดัน 1500/500 psi นำตัวอย่างกะทิทั้งหมดไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ -18 °C เป็นเวลา 45 ชั่วโมง และนำมาละลายในอ่างน้ำที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำไปวิเคราะห์ค่า creaming index ความหนืด ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ความถ่วงจำเพาะ และลักษณะทางจุลภาคของครีมอบเล็ด

ผลการวิจัยพบว่า ความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครส โซเดียมคลอไรด์ โซเดียมเคซิเนท และ Tween 60 ที่สูงขึ้นจะส่งผลให้กะทิมีแนวโน้มที่จะคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายมากขึ้น การเติมน้ำตาลซูโครสความเข้มข้น 40%w/v โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 4%w/v โซเดียมเคซิเนทความเข้มข้น 0.5%w/v และ Tween 60 ความเข้มข้น 0.1%w/v ลงในตัวอย่างกะทิจะทำให้กะทิมีค่า creaming index ต่ำที่สุด มีความหนืดมากที่สุด และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กที่สุด เมื่อเทียบกับการเติมที่ความเข้มข้นต่ำกว่า เมื่ออุณหภูมิในการให้ความร้อนก่อนการแช่แข็งสูงขึ้น จะทำให้กะทิมีความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายลดลง การให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C นาน 1 นาที จะทำให้กะทิมีค่า creaming index ต่ำที่สุด มีความหนืดมากที่สุด และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กที่สุด เมื่อเทียบกับการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า

ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2552

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาการค้นคว้าอิสระ

51403302 : MAJOR : FOOD TECHNOLOGY

KEY WORD : COCONUT MILK/ FREEZE-THAW/ STABILITY/ SUCROSE/ SODIUM

CHLORIDE/ SODIUM CASEINATE/ TWEEN 60/ PREHEAT TREATMENT

KITTIMA CHAVALRATIKUL: STUDY OF FACTORS AFFECTING FREEZE-THAW
STABILITY OF COCONUT MILK. INDEPENDENT STUDY ADVISOR: ASST. PROF. EAKAPHAN
KEOWMANEECHAI, Ph. D. 100 pp.

The purposes of this research were to study of factors affecting freeze-thaw stability of coconut milk (18%v/v fat) which include 1) concentration of sucrose 2) concentration of sodium chloride 3) type and concentration of emulsifier and 4) preheating temperature. Influence of sucrose and sodium chloride was investigated by pasteurizing the coconut milk at 74°C for 15 seconds, homogenizing at a pressure of (first stage/ second stage) 1500/500 psi and adding sucrose (10, 20, 30 and 40%w/v) or sodium chloride (1, 2, 3 and 4%w/v) to the homogenized coconut milk. Effect of emulsifier was studied by pasteurizing the coconut milk at 74°C for 15 seconds, blending with sodium caseinate (0.3, 0.5 and 0.7%w/v) or Tween 60 (0.1, 0.3 and 0.5%w/v), then homogenizing at a pressure of 1500/500 psi. Impact of preheating temperature was examined by heating the coconut milk at 70, 80 and 90 °C for 1 minute before being passed through a homogenizer at a pressure of 1500/500 psi, no food ingredient was added into the coconut milk samples. After being prepared, all of the coconut milk samples were frozen at -18°C for 45 hours and then thawed in a water bath at 40°C for 3 hours. The samples were determined for creaming index, viscosity, mean particle size, specific gravity and microstructure.

The results of the research were as follows: As concentration of sucrose, sodium chloride, sodium caseinate and Tween 60 increased, the coconut milk tended to have higher freeze-thaw stability. The coconut milk containing 40%w/v sucrose, 4%w/v sodium chloride, 0.5%w/v sodium caseinate and 0.1%w/v Tween 60 had lowest creaming indices, highest viscosities and smallest mean particle sizes. Increasing preheating temperature decreased freeze-thaw stability of the coconut milk. The coconut milk preheated at 70 °C for 1 minute exhibited lowest creaming index, highest viscosity and smallest mean particle size.

Department of Food Technology	Graduate School, Silpakorn University	Academic Year 2009
Student's signature		
Independent Study Advisor's signature		

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. เอกพันธ์ แก้วมณีชัย อาจารย์ที่ปรึกษาการวิจัยที่กรุณาให้ความรู้ แนวคิด คำปรึกษา และข้อเสนอแนะในการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนการแก้ไขปัญหาดังกล่าวอันเป็นประโยชน์แก่งานวิจัย นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะกรรมการตรวจสอบการค้นคว้าอิสระทุกท่าน ได้แก่ ผศ.ดร. ประสงค์ ศิริวงศ์วิไลชาติ และ ผศ.ดร. โสภาค สอนไว อาจารย์ประจำภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่กรุณาให้คำชี้แนะ และแนวคิดอันเป็นประโยชน์แก่งานวิจัย รวมถึงผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่กรุณาให้คำแนะนำและตรวจสอบแก้ไขสารนิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้ทุนอุดหนุนงานวิจัยครั้งนี้ และบริษัทเทพผดุงพรมะพร้าว จำกัด ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่าง สารเคมี และอุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัย ขอขอบคุณเหล่าคณาจารย์ทุกท่านที่ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร ที่ช่วย ประสิทธิ์ประสาทความรู้ต่างๆ ให้ ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ทุกคนจากบริษัทเทพผดุงพรมะพร้าว จำกัด ที่ให้คำแนะนำ และความช่วยเหลือในการดำเนินการวิจัย รวมถึงพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ทุกคนที่ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจในระหว่างดำเนินงานวิจัย สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคุณแม่และพี่ๆ ที่สนับสนุนให้การศึกษาและเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา ประโยชน์อันใดที่ได้จากงานวิจัยนี้ย่อมเป็นผลมาจากความกรุณาจากท่านดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่งจึงใคร่ขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ในการวิจัย	2
สมมติฐานในการวิจัย.....	3
ขอบเขตของการวิจัย.....	3
2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	4
น้ำกะทิ.....	4
ระบบอิมัลชัน.....	5
กลไกในการเกิดอิมัลชัน.....	6
ความคงตัวของอิมัลชัน	7
กลไกในการรักษาความคงตัวของอิมัลชัน.....	7
การรักษาความคงตัวโดยประจุบนพื้นผิวของอนุภาค	
คอลลอยด์ (Charge Stabilization)	7
การรักษาความคงตัวโดยโมเลกุลที่ผิวร่วมระหว่างวัฏภาคที่	
กระจายตัวกับวัฏภาคต่อเนื่อง (Steric Stabilization)	9
การรักษาความคงตัวโดยอนุภาคที่ผิวร่วมระหว่างวัฏภาคที่	
กระจายตัวกับวัฏภาคต่อเนื่อง (Particle Stabilization).....	11
ความไม่คงตัวของอิมัลชัน.....	12
การเกาะกลุ่มกัน (Flocculation).....	13
การหลอมรวมตัวกัน (Coalescence).....	14
การแยกชั้นครีม (Creaming).....	15
การหลอมรวมตัวกันบางส่วน (Partial Coalescence)	16

บทที่	หน้า
การเกิดออสวอลด์ไรเพนิง (Oswald Ripening)	17
การกลับวัฏภาค (Phase Inversion)	18
การเกิดผลึกในอิมัลชัน.....	19
ขั้นตอนการเกิดผลึก (Crystallization)	19
Nucleation.....	20
Crystal Growth.....	20
การเกิดผลึกไขมัน (Fat Crystallization)	21
Solid Fat Content	21
Nucleation.....	22
การหลอมรวมตัวบางส่วน (Partial Coalescence).....	22
การเกิดผลึกน้ำ (Water Crystallization).....	23
ส่วนผสมต่างๆในอิมัลชัน	24
น้ำตาล	24
เกลือ (NaCl)	25
อิมัลซิไฟเออร์.....	27
ชนิดของอิมัลซิไฟเออร์	27
รูปแบบของอิมัลซิไฟเออร์ที่ผิวสัมผัสร่วม.....	28
ผลของอิมัลซิไฟเออร์ต่อการเกิดผลึกในอิมัลชัน.....	29
ผลของอุณหภูมิต่อคุณสมบัติของอิมัลชัน	30
3 วิธีดำเนินการวิจัย	32
วัตถุประสงค์	32
สารผสมอาหาร (Food Ingredients).....	32
อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	32
การทดลองเบื้องต้น (Preliminary Experiment)	33
การศึกษาความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสที่มีผลต่อความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของกะทิ.....	35
การศึกษาความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่มีผลต่อความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของกะทิ.....	36

บทที่	หน้า
การศึกษานิตและความเข้มข้นของอิมัลซิไฟเออร์ที่มีผลต่อความคงตัวต่อ	
การแช่แข็ง-ละลายของกะทิ.....	36
การศึกษาระดับการให้ความร้อนก่อนการแช่แข็ง.....	37
การวิเคราะห์ผลทางสถิติ.....	38
4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	39
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	73
บรรณานุกรม.....	74
ภาคผนวก.....	79
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์.....	80
ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์.....	86
ภาคผนวก ค การทดลองการเติมเกลือลงในตัวอย่างกะทิที่ผ่านและไม่ผ่าน	
การให้ความร้อนในระดับพาสเจอไรซ์.....	97
ประวัติผู้วิจัย.....	100

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของน้ำกะทิที่สกัดโดยใช้ เนื้อมะพร้าวชูดต่อน้ำเท่ากับ 1:1.....	4
2	ปัจจัยทางกายภาพที่มีผลต่อความคงตัวและสมบัติทางกระแสวิทยาของ อิมัลชัน.....	19
3	ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติมน้ำตาลซูโครสที่ระดับ ความเข้มข้นต่างๆ.....	47
4	ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติมเกลือ โซเดียมคลอไรด์ที่ ระดับความเข้มข้นต่างๆ	53
5	ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติมโซเดียมเคซิเนทที่ระดับ ความเข้มข้นต่างๆ.....	60
6	ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติม Tween 60 ที่ระดับความ เข้มข้นต่างๆ.....	65
7	ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างกะทิที่ผ่านการให้ความร้อนที่ระดับอุณหภูมิ ต่างๆ.....	71
8	ค่า %creaming index ของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการแช่แข็ง-ละลายที่จำนวนครั้ง ต่างๆ.....	87
9	ค่า %creaming index ของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเก็บรักษาที่เวลาต่างๆ.....	88
10	ค่า %creaming index ของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการแช่แข็งที่เวลาต่างๆ.....	88
11	ค่า %creaming index และ oiling off index ของตัวอย่างกะทิจากหลังผ่านการ แช่แข็ง-ละลาย	99

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ชนิดของอิมัลชัน.....	5
2	การสูญเสียความคงตัวของอิมัลชัน.....	7
3	ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า (electrical potentials) กับระยะห่างระหว่างคอลลอยด์.....	8
4	ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์กับระยะห่างระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของประจุ.....	9
5	แบบจำลองการคูดัซที่ผิวร่วมระหว่างน้ำมันกับน้ำโดยโมเลกุลที่มีความยืดหยุ่นสูง (train-loop-tail model).....	10
6	แบบจำลองการรักษาความคงตัวของระบบคอลลอยด์โดยโมเลกุลที่ผิวร่วม.....	11
7	การรักษาความคงตัวของระบบคอลลอยด์โดยใช้อนุภาคที่ผิวร่วมระหว่าง	
	วัฏภาคที่กระจายตัวกับวัฏภาคต่อเนื่อง.....	12
8	โครงสร้างของอิมัลชัน (O/W) ซึ่งรักษาความคงตัวด้วยโปรตีน	
	โมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไฮโดรคอลลอยด์.....	12
9	การสูญเสียความคงตัวของระบบคอลลอยด์.....	13
10	การเกาะกลุ่มกัน (flocculation) ในอิมัลชัน.....	13
11	การหลอมรวมตัวกัน (coalescence) ในอิมัลชัน.....	15
12	การแยกครีม (creaming) ในอิมัลชัน.....	15
13	การหลอมรวมตัวกันบางส่วน (partial coalescence) ในอิมัลชัน.....	17
14	การเกิดออสวอลด์ไรเพนิง (Oswald ripening) ในอิมัลชัน.....	18
15	การกลับวัฏภาค (phase inversion) ของอิมัลชัน.....	18
16	การเกิด supercooling ในอิมัลชันแบบน้ำมันในน้ำหลังจากการให้ความร้อน	
	และทำให้เย็น.....	21
17	การหลอมรวมตัวบางส่วนของเม็ดไขมัน.....	22
18	โครงสร้างของโมเลกุลน้ำที่ล้อมรอบไอออนในวัฏภาคน้ำ.....	26
19	การปรับตัวและรูปแบบของโมเลกุลที่ผิวสัมผัสร่วม.....	29
20	ค่า %creaming index ของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการแช่แข็ง-ละลายที่จำนวนครั้ง	
	ต่างๆ.....	39
21	ค่า %creaming index ของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเก็บรักษาที่เวลาต่างๆ.....	41

ภาพที่		หน้า
22	ค่า %creaming index ของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการแช่แข็งที่เวลาต่างๆ	42
23	ค่าความหนืดของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติมน้ำตาลซูโครสที่ระดับความ เข้มข้นต่างๆที่เวลาต่างๆ.....	44
24	ขนาดอนุภาคของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติมน้ำตาลซูโครสที่ระดับความ เข้มข้นต่างๆ.....	45
25	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ (กำลังขยาย 40 เท่า) ของกะทิที่ผ่านการเติมน้ำตาลซูโครสที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ.....	46
26	ค่าความหนืดของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติมเกลือ โซเดียมคลอไรด์ที่ระดับ ความเข้มข้นต่างๆที่เวลาต่างๆ	50
27	ขนาดอนุภาคของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติมเกลือ โซเดียมคลอไรด์ที่ระดับ ความเข้มข้นต่างๆ.....	51
28	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ (กำลังขยาย 40 เท่า) ของกะทิที่ผ่านการเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ.....	52
29	ค่าความหนืดของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติมโซเดียมเคซิเนทที่ระดับความ เข้มข้นต่างๆที่เวลาต่างๆ.....	57
30	ขนาดอนุภาคของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติมโซเดียมเคซิเนทที่ระดับ ความเข้มข้นต่างๆ.....	58
31	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ (กำลังขยาย 40 เท่า) ของกะทิที่ผ่านการเติมโซเดียมเคซิเนทที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ	59
32	ค่าความหนืดของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติม Tween 60 ที่ระดับความ เข้มข้นต่างๆที่เวลาต่างๆ.....	62
33	ขนาดอนุภาคของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติม Tween 60 ที่ระดับความ เข้มข้นต่างๆ.....	63
34	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ (กำลังขยาย 40 เท่า) ของกะทิที่ผ่านการเติม Tween 60 ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ	64
35	ค่าความหนืดของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆที่ เวลาต่างๆ.....	68

ภาพที่		หน้า
36	ขนาดอนุภาคของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ.....	69
37	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ (กำลังขยาย 40 เท่า) ของกะทิที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ.....	70
38	ค่า %creaming index ของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติมน้ำตาลซูโครสที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ.....	89
39	ค่าความหนืดเฉลี่ยของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติมน้ำตาลซูโครสที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ.....	89
40	ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติมน้ำตาลซูโครสที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ.....	90
41	ค่า %creaming index ของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ.....	90
42	ค่าความหนืดเฉลี่ยของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ	91
43	ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ	91
44	ค่า %creaming index ของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติมโซเดียมเคซิเนทที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ.....	92
45	ค่าความหนืดเฉลี่ยของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติมโซเดียมเคซิเนทที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ.....	92
46	ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติมโซเดียมเคซิเนทที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ.....	93
47	ค่า %creaming index ของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติม Tween 60 ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ.....	93
48	ค่าความหนืดเฉลี่ยของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติม Tween 60 ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ.....	94
49	ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติม Tween 60 ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ.....	94
50	ค่า %creaming index ของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ.....	95

ภาพที่		หน้า
51	ค่าความหนืดเฉลี่ยของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ.....	95
52	ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ	96
53	ตัวอย่างกะทิหลังผ่านการแช่แข็ง-ละลาย	99

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันอาหารไทยได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในประเทศต่างๆทั่วโลก รัฐบาลไทยจึงได้เล็งเห็นศักยภาพของอาหารไทยที่จะสามารถเติบโตและแข่งขันได้ในตลาดโลก และได้ให้การสนับสนุนอุตสาหกรรมอาหารไทย โดยผลักดันให้อาหารไทยเป็นหนึ่งในยุทธศาสตร์สำคัญของประเทศ ส่งผลให้อุตสาหกรรมอาหารไทยมีการพัฒนาและเติบโตอย่างต่อเนื่อง ชนิด ปริมาณ และมูลค่าของอาหารไทยส่งออกได้เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

อาหารไทยหลายชนิดมีส่วนผสมของกะทิ ทำให้เกิดความต้องการกะทิในปริมาณสูง อุตสาหกรรมกะทิกลายเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมอาหารที่มีความสำคัญเชิงเศรษฐกิจของประเทศ ตั้งแต่ในระดับชุมชนเกษตรกรผู้ปลูกมะพร้าว ไปจนถึงโรงงานแปรรูปกะทิขนาดใหญ่

ผลิตภัณฑ์กะทิแปรรูปมีหลายชนิด ได้แก่ กะทิพาสเจอร์ไรซ์ กะทิกระป๋องสเตอริไรซ์ กะทิกล่องยูเอชที กะทิผง รวมทั้งผลิตภัณฑ์อาหารแช่แข็งที่มีกะทิเป็นส่วนผสมหลัก เช่น แยมเผ็ดแดง แยมเขียวหวาน แยมกะหรี่ แยมมัสมั่น พะแนง คัมข่าไก่ คัมย่าน้ำข้น หลน กลัวยบวชชี ลอดช่อง บัวลอย รวมมิตร เป็นต้น

ปัญหาสำคัญของผลิตภัณฑ์อาหารแช่แข็งที่มีกะทิคือ เมื่อทำการละลาย (thawing) หรือให้ความร้อนใหม่อีกครั้ง (reheating) แล้ว จะเกิดการแยกชั้นครีม (creaming) และการแตกมัน (oiling off) ของกะทิมาก จนอาจกลายเป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของกะทิที่ไม่พึงประสงค์ได้

กะทิเป็นระบบอิมัลชันตามธรรมชาติ โดยประกอบด้วยส่วนที่เป็นเฟสหรือวัฏภาคของน้ำ (aqueous phase) และเฟสหรือวัฏภาคของน้ำมันมะพร้าว (oil phase) ซึ่งไม่ละลายซึ่งกันและกัน กะทิที่ใช้ประกอบหรือผลิตอาหารส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของอิมัลชันแบบน้ำมันในน้ำ (oil-in-water emulsion) โดยวัฏภาคของน้ำมันมะพร้าวจะกระจายตัว (dispersed phase) เป็นเม็ดเล็ก ๆ เรียกว่า ครอบเล็ก (droplet) อยู่ในวัฏภาคของน้ำที่เป็นเฟสต่อเนื่อง (continuous phase) ในกะทิจะมีโปรตีน

เป็นองค์ประกอบอยู่ โดยโปรตีนกะทิทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ตามธรรมชาติ ซึ่งจะหุ้มเป็นเมมเบรนรอบๆครีโอล์เพื่อช่วยป้องกันไม่ให้ครีโอล์เล็ดรวมตัวกัน

จากการศึกษาพบว่าการสูญเสียความคงตัวของอิมัลชันแบบน้ำมันในน้ำ ที่ผ่านการแช่แข็ง-ละลาย มีกลไกการเกิดเป็นลำดับขั้น เริ่มจากการแช่แข็งที่ทำให้วฏฏภาคน้ำมันมีผลึกไขมันและวฏฏภาคน้ำมีผลึกน้ำแข็งเกิดขึ้นตามลำดับ (น้ำมันมีจุดหลอมเหลวสูงกว่าน้ำ) ผลึกที่เกิดขึ้นนี้จะทำละลายทะลุเมมเบรนที่หุ้มครีโอล์ ผลึกจะเบียดเสียดและเกาะจับกัน ต่อมาเมื่อเกิดการละลาย ผลึกน้ำแข็งจะละลายก่อน เหลือผลึกไขมันที่ยังคงเกาะจับกันอยู่ หากอุณหภูมิสูงขึ้นไปอีกกลุ่มผลึกไขมันก็จะหลอมละลายและรวมตัวกันอย่างรวดเร็ว เป็นครีโอล์น้ำมันที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและจะลอยตัวขึ้นสู่ด้านบน รวมตัวหนาแน่นเป็นชั้นครีมชั้นเรียกว่าการแยกชั้นครีม(creaming) ถ้าหากครีโอล์ในชั้นครีมรวมตัวกันอย่างสมบูรณ์เป็นเนื้อเดียวกัน ในที่สุดจะเห็นเป็นชั้นน้ำมันใสแยกออกจากวฏฏภาคน้ำ ลอยตัวอยู่ที่ผิวหน้าเรียกว่า การแตกมัน (oiling off) ความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของอิมัลชันจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ องค์ประกอบของวฏฏภาคน้ำมัน ชนิดและความเข้มข้นของน้ำตาลและเกลือในวฏฏภาคน้ำ ชนิดและความเข้มข้นของสารอิมัลซิไฟเออร์ (Ghosh และคณะ, 2008)

การศึกษาทางด้านความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของอิมัลชัน ส่วนใหญ่จะทำการในระบบอิมัลชันจำลองและระบบอิมัลชันที่ไม่มีน้ำมันมะพร้าวหรือไขมันกะทิเป็นองค์ประกอบ ยังมี การวิจัยเกี่ยวกับความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของระบบกะทิโดยตรงน้อยมาก ทำให้ขาดองค์ความรู้ที่จะนำไปใช้ในการแก้ปัญหาความไม่คงตัวหลังการละลายของกะทิ และผลิตภัณฑ์กะทิที่ผ่านการแช่แข็ง ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีเป้าหมายที่จะศึกษาถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของกะทิ อันได้แก่ ความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครส ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ ชนิดและความเข้มข้นของอิมัลซิไฟเออร์ และระดับการให้ความร้อนก่อนการแช่แข็ง เนื่องจากปัจจัยต่างๆเหล่านี้เป็นปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของกะทิ ผู้วิจัยจึงมุ่งที่จะศึกษาเฉพาะผลของปัจจัยต่างๆเหล่านี้

1.2 วัตถุประสงค์ในการวิจัย

ในงานวิจัยนี้มีเป้าหมายที่จะศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของกะทิ ได้แก่ ความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสและโซเดียมคลอไรด์ ชนิดและความเข้มข้นของอิมัลซิไฟเออร์ รวมทั้งระดับการให้ความร้อนก่อนการแช่แข็ง เพื่อให้ได้องค์ความรู้ใหม่ที่สามารถ

นำไปแก้ไขปรับปรุงกะทิและผลิตภัณฑ์อาหารผสมกะทิ ที่ต้องผ่านกระบวนการแช่เยือกแข็งให้มีความคงตัวหลังการละลายมากขึ้น

1.3 สมมติฐานในการวิจัย

ความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสและโซเดียมคลอไรด์ ชนิดและความเข้มข้นของอิมัลซิไฟเออร์ รวมทั้งระดับการให้ความร้อนก่อนการแช่แข็ง เป็นปัจจัยที่มีผลต่อความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของกะทิ ถ้าหากมีความรู้ความเข้าใจถึงอิทธิพลของปัจจัยดังกล่าวมากพอ ก็จะทำให้สามารถนำไปใช้แก้ไขปรับปรุงให้กะทิมีความคงตัวหลังผ่านการแช่แข็ง-ละลายได้มากขึ้น

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสที่มีผลต่อความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของกะทิ โดยใช้น้ำตาลซูโครสความเข้มข้น 10, 20, 30 และ 40%w/v
2. ศึกษาความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่มีผลต่อความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของกะทิ โดยใช้โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1, 2, 3 และ 4%w/v
3. ศึกษาชนิดและความเข้มข้นของอิมัลซิไฟเออร์ที่มีผลต่อความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของกะทิ โดยใช้โซเดียมเคซิเนทความเข้มข้น 0.3, 0.5 และ 0.7%w/v และใช้ Tween 60 ความเข้มข้น 0.1, 0.3 และ 0.5%w/v
4. ศึกษาวิธีการให้ความร้อนก่อนการแช่แข็ง โดยใช้ระดับความร้อนที่ 70, 80 และ 90 °C เป็นเวลา 1 นาที

บทที่ 2

วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำกะทิ

“น้ำกะทิ” เป็นของเหลวที่ได้จากการบีบคั้นเนื้อมะพร้าวสด อาจเติมน้ำหรือไม่เติมน้ำก็ได้ นิยมใช้เป็นส่วนประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งในการปรุงอาหารทั้งอาหารคาว และอาหารหวานของคนไทยและคนในแถบเอเชียอีกหลายประเทศ น้ำกะทิสามารถนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลายชนิด เช่น กะทิผง น้ำกะทิบรรจุกล่อง UHT น้ำกะทิบรรจุกระป๋อง เพื่อให้สามารถเก็บรักษาได้นานยิ่งขึ้นและสะดวกในการใช้ รวมทั้งผลิตภัณฑ์อาหารแช่แข็งที่มีกะทิเป็นส่วนผสมหลัก เช่น แยมเผ็ดแดง แยมเขียวหวาน แยมกะหรี่ แยมมัสมั่น พะแนง ต้มข่าไก่ ต้มยำน้ำข้น หลน กล้วยวาชชิ ลอดช่อง บัวลอย รวมมิตร เป็นต้น โดยทั่วไปสัดส่วนขององค์ประกอบของกะทิที่ได้จากการบีบเนื้อมะพร้าวสดโดยไม่เติมน้ำ มีดังนี้คือ โปรตีน 2.6-4.4% น้ำ 50-54% ไขมัน 32-40% เกลือ 1-1.5% (Seow and Gwee, 1997) และของแข็งที่ไม่ใช่ไขมัน 11% (Peamprasart and Chiewchan, 2006) จัดเป็นอาหารที่มีความเป็นกรดต่ำ (low acid food) มีค่า pH ประมาณ 6 สมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของน้ำกะทิ ดังแสดงในตารางที่ 1 (Gonzalez, de Leon and Sanchez, 1990)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของน้ำกะทิที่สกัดโดยใช้เนื้อมะพร้าวสด
ต่อน้ำเท่ากับ 1:1

สมบัติทางกายภาพ	ช่วงของค่าที่วัดได้
ความถ่วงจำเพาะ	1.0029-1.0080
แรงตึงผิว (dynes/cm ²)	97.76-125.43
ความหนืด (centipoises)	1.61-2.02
ดัชนีหักเหแสง	1.3412-1.3446
pH	5.95-6.30

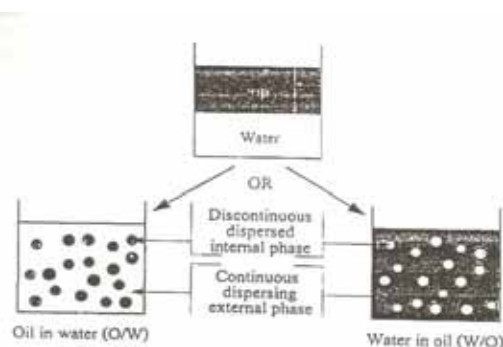
องค์ประกอบทางเคมี	ช่วงของปริมาณที่วิเคราะห์ได้
ความชื้น	73.74-76.84%
ไขมัน	18.83-21.09%
โปรตีน	2.14-2.97%
เถ้า	0.63-0.96%
น้ำตาลทั้งหมด	0.82-1.62%

ที่มา : Gonzalez et al. (1990)

2.2 ระบบอิมัลชัน

เทวี โพธิ์ผละ (2536) กล่าวไว้ว่า ระบบอิมัลชัน คือของผสมของของเหลว 2 ชนิด ซึ่งปกติจะไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน โดยที่ของเหลวชนิดหนึ่งจะแพร่กระจายเป็นเม็ดเล็กๆอยู่ในของเหลวอีกชนิดหนึ่ง ของเหลวที่แพร่กระจายอยู่นี้เรียกว่า วัฏภาคที่กระจายตัว (disperse phase) ส่วนของเหลวที่ล้อมรอบนั้นเรียกว่า วัฏภาคต่อเนื่อง (continuous phase) สมบัติที่สำคัญของอิมัลชันคือ อนุภาคในวัฏภาคที่กระจายตัวมีขนาดเล็ก และมีแรงตึงผิว (surface tension) สูง จึงมีความคงตัว (stability) ในเวลาจำกัดเท่านั้น (ปาริฉัตร หงสประภาส, 2545) ชนิดของอิมัลชันในอาหารแบ่งออกได้ ดังนี้

- อิมัลชันแบบน้ำมันในน้ำ (oil-in-water emulsions) เป็นอิมัลชันที่ประกอบด้วยไขมันหรือน้ำมันเม็ดเล็กๆกระจายอยู่ในน้ำ ตัวอย่างเช่น น้ำสลัดชนิดต่างๆ นม กะทิ และไอศกรีม เป็นต้น
- อิมัลชันแบบน้ำในน้ำมัน (water-in-oil emulsions) เป็นอิมัลชันที่ประกอบด้วยหยดน้ำเม็ดเล็กๆ กระจายตัวอยู่ในน้ำมัน ตัวอย่างเช่น เนยและมาการีน เป็นต้น



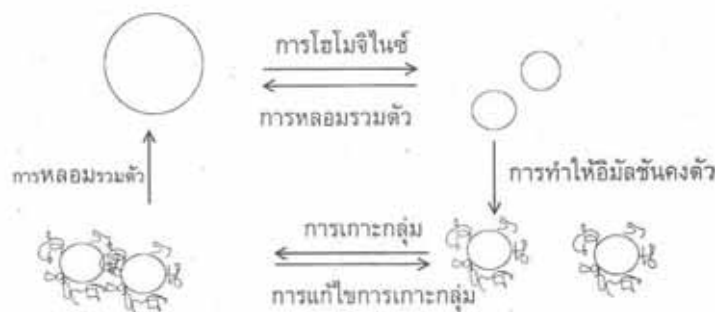
ภาพที่ 1 ชนิดของอิมัลชัน

ที่มา : ปรัชญา วงศ์ธนบัตร (2543)

2.2.1 กลไกในการเกิดอิมัลชัน

ปาริฉัตร หงสประภาส (2545) กล่าวว่า การเกิดอิมัลชันจะต้องมีงาน (work) กระทำต่อระบบเพื่อชนะความต้านทานที่ก่อให้เกิดผิวสัมผัสร่วม (interface) ระหว่างวัฏภาค ซึ่งเกิดจากแรงตึงระหว่างผิว เช่น การกวน เพื่อทำให้อนุภาคขนาดใหญ่ของวัฏภาคที่กระจายตัวได้รับแรงเฉือน ในลักษณะเช่นนี้อนุภาคจะเสียรูปและแตกออกเปลี่ยนเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กลง ทำให้มีการกระจายตัวที่ดีในส่วนของน้ำ (continuous phase) ถ้ากวนอิมัลชันด้วยงานที่เหมาะสมจะทำให้ฟิล์มของสารอิมัลซิไฟเออร์ ถูกดูดซับที่ระหว่างผิวน้ำร่วมของทั้งสองวัฏภาคและเกิดอิมัลชันที่คงตัว เวลาที่ใช้ในการทำให้เกิดความคงตัวในอิมัลชันจะแตกต่างกันขึ้นกับสูตรของอิมัลชันและเทคนิคที่ใช้ และมักจะ ได้จากการทดลอง โดยจะต้องมีช่วงเวลาที่เหมาะสม ถ้าต่ำกว่าเวลาดังกล่าวอิมัลชันที่เกิดขึ้นจะไม่คงตัว แต่ถ้าการกวนดำเนินต่อไปเกินระยะเวลาที่เหมาะสม อิมัลชันอาจได้รับความเสียหาย เนื่องจากฟิล์มที่ทำหน้าที่ป้องกันการหลอมรวมตัวกันของวัฏภาคที่กระจายตัวเกิดการเสื่อมเสียด้วยการกวนที่มากเกินไป (Friberg and Larsson, 1997)

ผลิตภัณฑ์อิมัลชันเหลวหรืออิมัลชันกึ่งแข็งกึ่งเหลว ที่ไม่ได้มีการรักษาความคงตัวโดยโครงสร้างของเจลมักจะผ่านกระบวนการลดขนาดของเม็ดไขมันโดยการโฮโมจิไนซ์ การเติมสารอิมัลซิไฟเออร์ในขณะที่ทำให้เกิดเป็นอิมัลชันจะช่วยลดแรงตึงผิวของวัฏภาคที่กระจายตัว และวัฏภาคต่อเนื่อง ทำให้เกิดเป็นอิมัลชันได้ง่ายขึ้น สารอิมัลซิไฟเออร์เป็นสารประกอบที่สามารถละลายได้ทั้งในวัฏภาคที่กระจายตัวและวัฏภาคต่อเนื่อง เนื่องจากสามารถละลายหรือกระจายตัวได้ทั้งในน้ำและในน้ำมันหรือที่เรียกว่าเป็น โมเลกุลแอมฟิฟิล์ การเติมสารอิมัลซิไฟเออร์ลงในส่วนผสมจึงเป็นการเพิ่มความสามารถในการทำให้เกิดเป็นอิมัลชัน สารอิมัลซิไฟเออร์แต่ละชนิดจะลดแรงตึงผิวได้แตกต่างกัน แต่การลดแรงตึงผิวเพียงอย่างเดียวจะไม่ทำให้อิมัลชันนั้นๆ คงตัว เนื่องจากเม็ดไขมันยังสามารถเคลื่อนที่เข้าหากันแบบบราวเนียน และรวมตัวกันได้ในระหว่างการเก็บรักษา ดังนั้นหากระบบอิมัลชันมีสารที่สามารถขัดขวางการเข้ารวมตัวกันของเม็ดไขมัน ไม่ว่าจะเป็นโดยโมเลกุลหรืออนุภาคที่ผิวร่วมระหว่างน้ำมันกับน้ำ (ดังแสดงในภาพที่ 2) ก็จะทำให้อิมัลชันนั้นๆ มีความคงตัวตามระยะเวลาที่ต้องการได้



ภาพที่ 2 การสูญเสียความคงตัวของอิมัลชัน
ที่มา : ปาริฉัตร หงสประภาส (2545)

2.2.2 ความคงตัวของอิมัลชัน

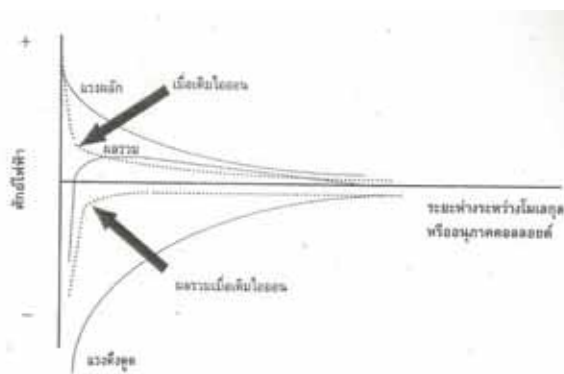
ความคงตัวของอิมัลชันคือ การต้องการให้วัฏภาคที่กระจายตัวซึ่งมีขนาดประมาณ 1-100 ไมโครเมตร (ปาริฉัตร หงสประภาส, 2545) กระจายตัวในวัฏภาคต่อเนื่อง ซึ่งโดยทั่วไประบบอิมัลชันของอาหารจะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เนื่องจากปัจจัยภายนอก เช่น การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในระหว่างการแปรรูปและการเก็บรักษา นอกจากจะไม่เสถียรแล้วระบบอิมัลชันยังเข้าสู่สภาพสมดุล (equilibrium) ได้ยากอีกด้วย การรักษาความคงตัวของระบบอิมัลชันสามารถทำได้โดยการทำให้พื้นผิวของอนุภาคในวัฏภาคที่กระจายตัวมีประจุ (charge stabilization) หรือการทำให้ผิวสัมผัสร่วม (interface) ระหว่างอนุภาคในวัฏภาคที่กระจายตัวกับวัฏภาคต่อเนื่องมีโมเลกุลหรืออนุภาคล้อมรอบ (steric stabilization หรือ particle stabilization) เพื่อกีดขวางการชนและรวมมวลของอนุภาคไขมัน การขัดขวางการรวมตัวของอนุภาคในวัฏภาคที่กระจายตัว ไม่ว่าจะเป็นการเกาะกลุ่ม (flocculation) หรือการหลอมรวมตัวเป็นอนุภาคเดียวกัน (coalescence) อาจทำได้โดยการเพิ่มความหนืดให้แก่วัฏภาคต่อเนื่องเพื่อหน่วงการเคลื่อนที่ของอนุภาคในวัฏภาคที่กระจายตัวให้ช้าลง (ปาริฉัตร หงสประภาส, 2545; McClements, 1999)

2.2.3 กลไกในการรักษาความคงตัวของอิมัลชัน

2.2.3.1 การรักษาความคงตัวโดยประจุบนพื้นผิวของอนุภาคคอลลอยด์ (Charge Stabilization)

ได้มีการอธิบายบทบาทของประจุไฟฟ้าบนพื้นผิวของคอลลอยด์โดย DLVO theory (Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek) ไว้ว่า ความคงตัวของระบบคอลลอยด์ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ซึ่งสามารถเกิดพันธะต่อกันได้ (Friberg and Larsson, 1997)

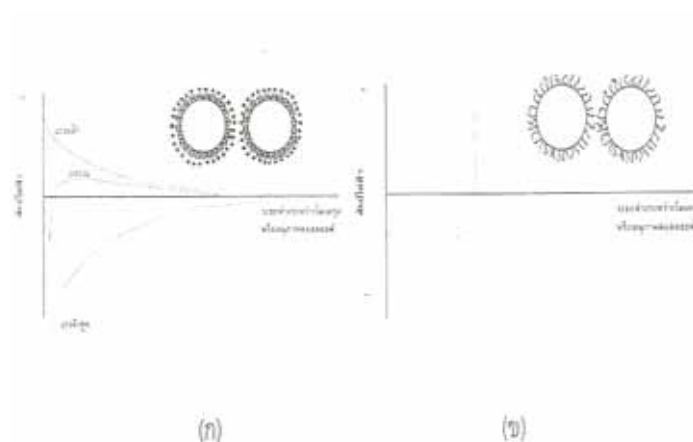
พันธะที่เกี่ยวข้องนี้เป็นพันธะในกลุ่มของแรงช่วงยาว ซึ่งได้แก่ แรงดึงดูดแวนเดอร์วาลส์ และแรงผลักระหว่างอนุภาคของคอลลอยด์ที่มีประจุเหมือนกัน (electrical repulsion) ดังแสดงในภาพที่ 3 ผลรวมของแรงดึงดูดและแรงผลักระหว่างอนุภาคของคอลลอยด์ที่มีประจุเหมือนกัน (electrical potentials) ขึ้นอยู่กับระยะห่างของอนุภาคคอลลอยด์ เมื่ออนุภาคของคอลลอยด์อยู่ห่างกัน ถึงแม้ผลรวมของศักย์ไฟฟ้าจะมีค่าเป็นลบ คือ แรงดึงดูดมากกว่าแรงผลักระหว่างอนุภาคคอลลอยด์จะไม่เกิดการเกาะกลุ่ม เนื่องจากอนุภาคอยู่ไกลกันเกินไปที่จะเกิดพันธะในกลุ่มของแรงช่วงสั้น เช่น พันธะโคเวเลนต์ เมื่ออนุภาคของคอลลอยด์เข้าใกล้กันมากขึ้น ผลรวมของศักย์ไฟฟ้าจะมีค่าเป็นบวก คือ แรงผลักระหว่างอนุภาคคอลลอยด์มากกว่าแรงดึงดูด อนุภาคคอลลอยด์จะไม่เกิดการเกาะกลุ่มกันหรือรวมตัวกัน ทำให้ระบบคอลลอยด์รักษาความคงตัวไว้ได้ ไม่เกิดการตกตะกอนหรือแยกชั้น



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า (electrical potentials) กับระยะห่างระหว่างคอลลอยด์
ที่มา : ปาริฉัตร หงสประภาส (2545)

เมื่อมีการเติมไอออนลงในระบบคอลลอยด์ ประจุไฟฟ้าของไอออนจะไปเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าของระบบคอลลอยด์ทั้งในภูมิภาคที่กระจายตัวและภูมิภาคต่อเนื่อง ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างอนุภาคของคอลลอยด์จะเปลี่ยนไป ทำให้แรงผลักระหว่างอนุภาคคอลลอยด์สั้นๆ ผลรวมของศักย์ไฟฟ้าจะมีค่าเป็นลบ คือ แรงดึงดูดมากกว่าแรงผลักระหว่างอนุภาคคอลลอยด์จึงเกิดการเกาะกลุ่มกันและทำให้ระบบคอลลอยด์เสียความคงตัว

ผลของการลดแรงผลักระหว่างอนุภาคจากการเติมไอออนจะขึ้นอยู่กับชนิดของไอออนที่สามารถทำให้ประจุบนพื้นผิวของอนุภาคเป็นกลาง (charge neutralization) ดังแสดงในภาพที่ 4 ความเข้มข้นของไอออนที่เติมและความเป็นกรด-ด่างของระบบคอลลอยด์นั้นๆ ที่จะทำให้ประจุรวมของอนุภาคคอลลอยด์เปลี่ยนไป



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์กับระยะห่างระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของประจุโดย (ก) การเติมไอออน และ (ข) การเติมโมเลกุลที่มีประจุและมีคุณสมบัติกระจายตัวที่ผิวร่วมระหว่างวัฏภาคที่กระจายตัวกับวัฏภาคต่อเนื่อง
ที่มา : ปาริฉัตร หงสประภาส (2545)

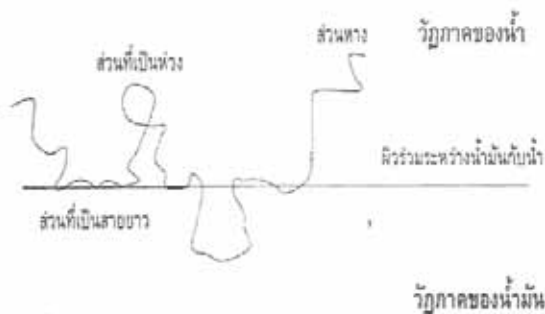
2.2.3.2 การรักษาความคงตัวโดยโมเลกุลที่ผิวร่วมระหว่างวัฏภาคที่กระจายตัวกับวัฏภาคต่อเนื่อง (Steric Stabilization)

การรักษาความคงตัวของระบบคอลลอยด์โดยโมเลกุลที่ผิวร่วม เกิดขึ้นได้เนื่องจากสารประกอบที่มีส่วนของโมเลกุลที่ละลายได้ทั้งในวัฏภาคที่กระจายตัวและวัฏภาคต่อเนื่องมีขนาดโมเลกุลใหญ่เพียงพอที่จะกีดขวางการรวมตัวของอนุภาคคอลลอยด์ เช่น โปรตีน ซึ่งมีโมเลกุลค่อนข้างใหญ่จะถูกดูดซับหรือละลายได้ในวัฏภาคของน้ำมัน (oil phase) และมีบางส่วนที่ละลายน้ำได้จะอยู่ในวัฏภาคของน้ำ (aqueous phase) ดังนั้นที่ผิวร่วมระหว่างน้ำมันกับน้ำ (oil-water interface) จึงเกิดโครงสร้างซึ่งสามารถทำหน้าที่กีดขวางการรวมตัวกันของเม็ดไขมัน เพราะโปรตีนมีโมเลกุลขนาดใหญ่พอที่จะทำหน้าที่เป็นเครื่องกีดขวาง (barrier) ไม่ให้อนุภาคของคอลลอยด์เกาะกลุ่มกันได้

การรักษาความคงตัวโดยโมเลกุลที่ผิวร่วมนี้ทำได้เนื่องจากโมเลกุลขนาดใหญ่ที่อยู่ระหว่างพื้นผิวของอนุภาคในวัฏภาคที่กระจายตัวกับวัฏภาคต่อเนื่องมีความยืดหยุ่น และ/หรือมีความหนาเพียงพอ ส่วนใหญ่แล้วโมเลกุลเหล่านี้มักมีคุณสมบัติเป็น โมเลกุลแอมฟิไฟล์ (amphiphilic molecule) เช่น โปรตีน ซึ่งมีส่วนที่กระจายตัวได้ดีในน้ำ (hydrophilic region) เพราะมีหมู่ที่มีประจุ (charge side-chain) หรือโพลาร์ (polar side-chain) และส่วนที่กระจายตัวหรือละลายได้ดีในน้ำมัน (hydrophobic หรือ lyophilic region) เพราะมีหมู่ที่เป็นนอนโพลาร์ (non-polar side-

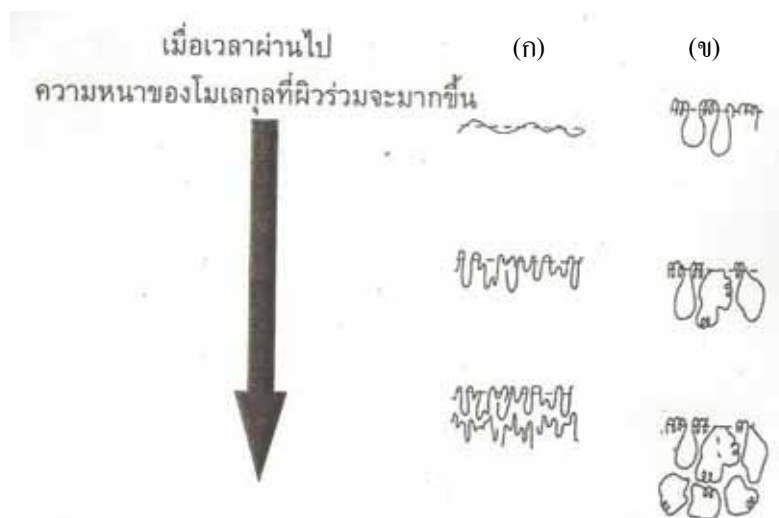
chain) ดังแสดงในภาพที่ 5 ส่วนหาง (tail) มักจะเป็นหมู่ที่กระจายตัวหรือละลายได้ดีในน้ำ ซึ่งก็คือปลายโมเลกุลด้านหมู่อะมิโน (N-terminus) และปลายโมเลกุลด้านหมู่คาร์บอกซิล (C-terminus) ของโปรตีนนั่นเอง ส่วนที่เป็นห่วง (loop) คือ บางส่วนของโปรตีนที่กระจายตัวในน้ำได้ และทำหน้าที่เป็นเครื่องกีดขวาง ส่วนที่เป็นสายยาว (train) คือส่วนของโปรตีนที่กระจายตัวหรือละลายในไขมันได้ (Dickinson and Stainsby, 1982)

การที่โปรตีนชนิดใดชนิดหนึ่งจะถูกดูดซับที่ผิวร่วมระหว่างน้ำมันกับน้ำได้ดีหรือไม่ ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของเม็ดไขมันที่ยังว่างอยู่ให้โปรตีนถูกดูดซับได้ (surface availability) และแรงผลักระหว่างโมเลกุลของโปรตีนและอนุภาคคอลลอยด์ (charge repulsion) หลังจากโปรตีนถูกดูดซับแล้ว จะเกิดการเสียสภาพหรือคลายเกลียวที่พื้นผิวของอนุภาคคอลลอยด์ต่อไป (surface denaturation) ทำให้โปรตีนเกิดโครงสร้างใหม่ที่ผิวร่วมระหว่างน้ำมันกับน้ำซึ่งทำหน้าที่กีดขวางการรวมตัวของเม็ดไขมัน ดังแสดงในภาพที่ 5 และ 6 ระบบคอลลอยด์ในอาหารที่รักษาความคงตัวโดยใช้โมเลกุลที่ผิวร่วม เช่น ในนมพร้อมดื่ม โปรตีนจะสูญเสียโครงสร้างระดับจตุรภูมิ (quaternary structure) ตติยภูมิ (tertiary structure) และทุติยภูมิ (secondary structure) ในระหว่างการพาสเจอร์ไรซ์ เมื่อทำการโฮโมจิไนซ์น้ำมันให้เม็ดไขมันมีขนาดเล็กลง และมีจำนวนมากขึ้น เคซีนซึ่งเป็นโมเลกุลยืดหยุ่น (flexible) กว่าโปรตีนเวย์จะสามารถแผ่กระจายได้ที่ผิวร่วมระหว่างน้ำมันกับน้ำ (ภาพที่ 6 (ก)) ในขณะที่โปรตีนเวย์มีขนาดเล็กและเกาะกันแน่น (compact) จะเกิดโครงสร้างที่ผิวร่วมดังแสดงในภาพที่ 6 (ข)



ภาพที่ 5 แบบจำลองการดูดซับที่ผิวร่วมระหว่างน้ำมันกับน้ำโดยโมเลกุลที่มีความยืดหยุ่นสูง (train-loop-tail model)

ที่มา : ปาริฉัตร หงสประภาส (2545)



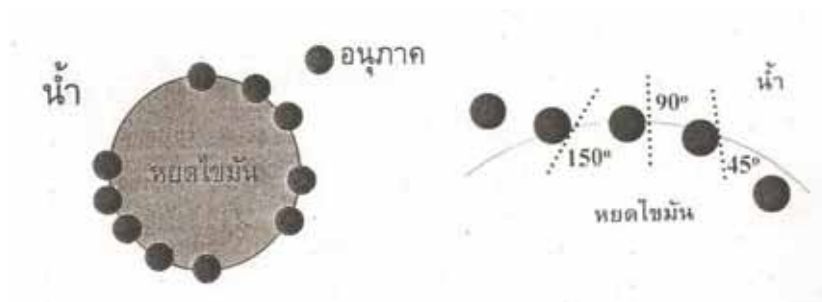
ภาพที่ 6 แบบจำลองการรักษาความคงตัวของระบบคอลลอยด์โดยโมเลกุลที่ผิวร่วมโดยใช้

(ก) โมเลกุลที่มีความยืดหยุ่นสูง และ (ข) โมเลกุลที่เกาะกันแน่น

ที่มา : ปาริฉัตร หงสประภาส (2545)

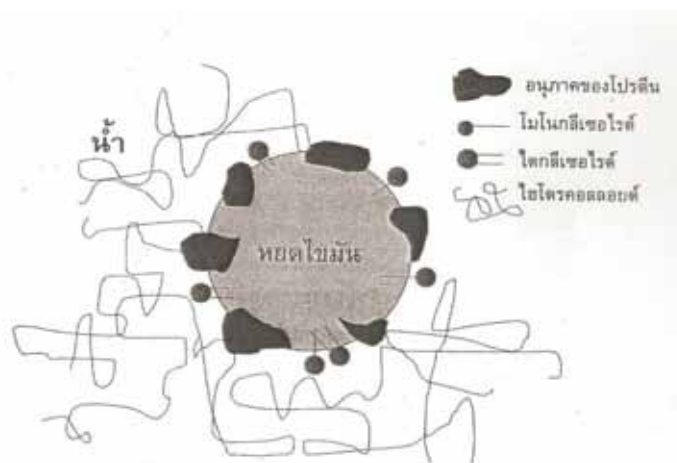
2.2.3.3 การรักษาความคงตัวโดยอนุภาคที่ผิวร่วมระหว่างวัฏภาคที่กระจายตัวกับวัฏภาคต่อเนื่อง (Particle Stabilization)

ความสามารถในการรักษาความคงตัวของระบบคอลลอยด์โดยอนุภาค (particle) จะขึ้นอยู่กับความสามารถในการจัดเรียงตัวของอนุภาคนั้นๆ ที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคที่กระจายตัวกับวัฏภาคต่อเนื่อง การที่อนุภาคคอลลอยด์ เช่น เม็ดน้ำมัน (oil droplet) ถูกล้อมรอบด้วยอนุภาค จะทำให้การรวมตัวของเม็ดน้ำมันเกิดขึ้นได้ยากเมื่อมีการชนกัน เพราะอนุภาคจะทำหน้าที่เป็นเครื่องกีดขวาง ดังแสดงในภาพที่ 7 ความสามารถในการรักษาความคงตัวโดยกลไกนี้ จะขึ้นอยู่กับชนิดของอนุภาคและมุมที่อนุภาคสัมผัสกับผิวร่วม ซึ่งเรียกมุมสัมผัส (contact angle) ถ้าอนุภาคละลายได้ง่ายในน้ำมัน อนุภาคจะมีส่วนที่อยู่ในน้ำมันมากกว่าในน้ำ (มุมน้อยกว่า 90°) ประสิทธิภาพในการเป็นเครื่องกีดขวางจะไม่มากเท่าอนุภาคที่สามารถละลายในน้ำและน้ำมันเท่าๆกัน (มุม $= 90^\circ$) และถ้าอนุภาคละลายน้ำได้ดี อนุภาคจะมีส่วนที่อยู่ในน้ำมากกว่าในน้ำมัน (มุมมากกว่า 90°) ทำให้เป็นเครื่องกีดขวางได้ไม่ดีเท่ากับเมื่อมีมุม 90° เพราะอนุภาคจะหลุดออกจากส่วนที่เป็นน้ำมันได้ง่าย (Friberg and Larsson, 1997)



ภาพที่ 7 การรักษาความคงตัวของระบบคอลลอยด์โดยใช้อนุภาคที่ผิวร่วมระหว่างวัฏภาคที่กระจายตัวกับวัฏภาคต่อเนื่อง

ที่มา : ปาริฉัตร หงสประภาส (2545)

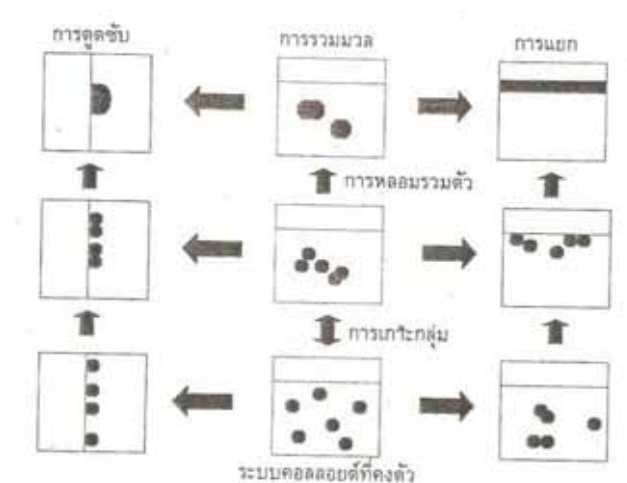


ภาพที่ 8 โครงสร้างของอิมัลชัน (O/W) ซึ่งรักษาความคงตัวด้วยโปรตีน โมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไฮโดรคอลลอยด์

ที่มา : ปาริฉัตร หงสประภาส (2545)

2.2.4 ความไม่คงตัวของอิมัลชัน

การสูญเสียความคงตัวของระบบอิมัลชันมีหลายระดับดังแสดงในภาพที่ 9 โดยแต่ละลักษณะจะมีกลไกการเกิด ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง และผลกระทบต่อคุณลักษณะของอิมัลชันแตกต่างกันออกไป



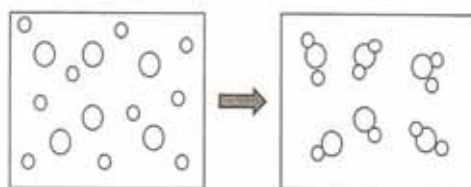
ภาพที่ 9 การสูญเสียความคงตัวของระบบคอลลอยด์

ที่มา : ปาริฉัตร หงสประภาส (2545)

ความไม่คงตัวทางกายภาพของอิมัลชันอาจเกิดได้หลายลักษณะ ดังต่อไปนี้

2.2.4.1 การเกาะกลุ่มกัน (Flocculation)

เกิดขึ้นเมื่อครีโอลีฟตั้งแต่ 2 ครีโอลีฟขึ้นไป เข้ามาใกล้และเกาะจับกันโดยไม่เกิดการหลอมรวมตัวกันของครีโอลีฟ ดังนั้นครีโอลีฟยังมีจำนวนและขนาดเท่าเดิม เพียงแต่เกาะกันเป็นกลุ่มเท่านั้น (ภาพที่ 10) ความไม่คงตัวแบบนี้อาจเป็นขั้นแรกที่น่าไปสู่ความไม่คงตัวแบบอื่นๆได้ เช่น การรวมตัวกันหรือการแยกชั้นครีม



ภาพที่ 10 การเกาะกลุ่มกัน (flocculation) ในอิมัลชัน ครีโอลีฟจะเข้ามาใกล้และเกาะจับกันโดยไม่

เกิดการหลอมรวมตัว ครีโอลีฟยังมีจำนวนและขนาดเท่าเดิม

ที่มา : ดัดแปลงจาก Walstra (1996) และ McClements (1999)

การเกาะกลุ่มกันของครีโอลีตจะมีผลต่อคุณสมบัติทางกระแสวิทยา (rheological properties) ของอิมัลชัน ขึ้นกับลักษณะโครงสร้างที่เกิดขึ้นจากการเกาะกลุ่มกันของครีโอลีต คือ

- ในอิมัลชันที่มีความเข้มข้นของครีโอลีตน้อย การเกาะกลุ่มกันของครีโอลีตจะทำให้อิมัลชันมีความหนืดเพิ่มขึ้น แต่เมื่อทำการกวน (ถูกกระทำด้วยแรงเฉือนในการกวนอย่างต่อเนื่อง) ความหนืดจะลดลงเนื่องจากครีโอลีตแตกกลุ่มกระจายออกมา เรียกว่า เกิด shear-thinning

- ในอิมัลชันที่มีความเข้มข้นของครีโอลีตมาก การเกาะกลุ่มกันของครีโอลีตจะทำให้เกิดโครงสร้างร่างแหสามมิติ (three dimension network) ที่แข็งแรงเกิดขึ้นในอิมัลชัน ทำให้อิมัลชันมีคุณสมบัติยืดหยุ่น (elastic properties) เช่น เกิดเป็นเจลได้

2.2.4.2 การหลอมรวมตัวกัน (Coalescence)

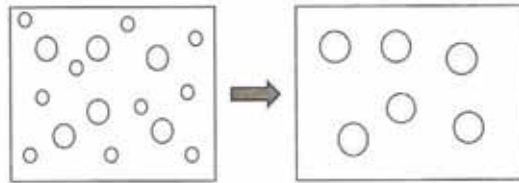
เกิดขึ้นเมื่อครีโอลีตตั้งแต่ 2 ครีโอลีตขึ้นไปเข้ามาใกล้แล้วรวมตัวกันเกิดเป็นครีโอลีตที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้นครีโอลีตจะมีจำนวนน้อยลงแต่มีขนาดใหญ่ขึ้น (ภาพที่ 11) เมื่อครีโอลีตที่เป็นเมื่อน้ำมันรวมตัวกัน พื้นที่ผิวสัมผัสร่วม (interfacial area) โดยรวมของอิมัลชันจะลดลง ดังนั้นพลังงานพื้นผิว (surface energy) จึงลดลงด้วย ซึ่งเป็นไปได้ง่ายทางเทอร์โมไดนามิก (thermodynamically favorable) การหลอมรวมตัวกันของครีโอลีตจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อครีโอลีตเข้ามาใกล้กันและเมมเบรนที่ผิวสัมผัสร่วม (interfacial membranes) แตกออก ปฏิสัมพันธ์ระยะไกลระหว่างครีโอลีตจะมีความสำคัญต่อการเกิดการรวมตัวกันของครีโอลีตมาก

อัตราการหลอมรวมตัวกันของครีโอลีตจะเพิ่มขึ้นเมื่อเชื่อมุมที่ผิวสัมผัสร่วมละลาย หรือถูกทำลายมากขึ้น เชื่อมุมที่หนาและยืดหยุ่นจะทำให้ครีโอลีตเกิดการรวมตัวได้ยาก ดังนั้นอัตราการหลอมรวมตัวกันของครีโอลีต จะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของอิมัลซิไฟเออร์ที่ผิวสัมผัสร่วมอย่างมาก โดยปกติโปรตีนจะเกิดเป็นเชื่อมุมที่ต้านทานการหลอมรวมตัวกันได้ดีกว่าสารลดแรงตึงผิวโมเลกุลเล็ก (surfactants)

การหลอมรวมตัวกันของครีโอลีตไม่สามารถทำให้ย้อนกลับได้โดยการกวนธรรมดา ต่างจากการเกาะกลุ่มกันหรือการเกิดชั้นครีมที่อาจทำให้ย้อนกลับได้โดยการกวนให้ครีโอลีตในอิมัลชันแยกและกระจายตัวใหม่ได้อีก

ในอิมัลชันแบบน้ำมันในน้ำ การหลอมรวมตัวกันของครีโอลีตจะทำให้เกิดการแยกชั้นครีมได้เร็วขึ้น เนื่องจากครีโอลีตมีขนาดใหญ่ขึ้น (รัศมียาวขึ้น)

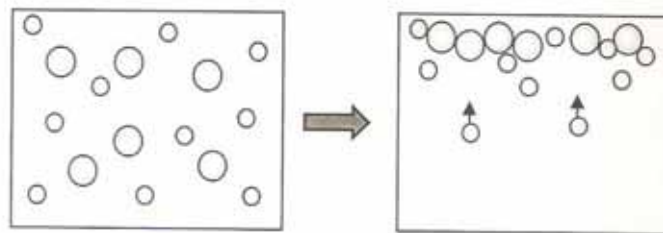
การหลอมรวมตัวกันของครีโอล์อย่างต่อเนื่องในที่สุดจะทำให้เกิดชั้นของน้ำมันลอยอยู่ที่ด้านบนของอิมัลชัน เรียกว่า oiling off



ภาพที่ 11 การหลอมรวมตัวกัน (coalescence) ในอิมัลชัน ครีโอล์เล็ดเข้ามาใกล้กันและรวมตัวกันเกิดเป็นครีโอล์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ครีโอล์จะมีจำนวนน้อยลงแต่มีขนาดใหญ่ขึ้น
ที่มา : ดัดแปลงจาก Walstra (1996) และ McClements (1999)

2.2.4.3 การแยกชั้นครีม (Creaming)

เกิดขึ้นเมื่อครีโอล์หรือกลุ่มของครีโอล์ที่เป็นน้ำมันมีความหนาแน่นน้อยกว่าวัฏภาคต่อเนื่อง จึงลอยตัวขึ้นไปรวมตัวกันบริเวณผิวหน้าด้านบนของอิมัลชันที่อยู่ในภาชนะ (ภาพที่ 12) จนในที่สุดอาจเกิดเป็นชั้นน้ำมัน แยกตัวอยู่เหนือส่วนที่เหลือของอิมัลชัน



ภาพที่ 12 การแยกครีม (creaming) ในอิมัลชัน ครีโอล์ที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าวัฏภาคต่อเนื่อง จึงลอยตัวขึ้นไปรวมตัวกันบริเวณผิวหน้าด้านบน ครีโอล์ขนาดใหญ่จะเคลื่อนที่ได้เร็วกว่า

ที่มา : ดัดแปลงจาก Walstra (1996) และ McClements (1999)

อัตราเร็วของการแยกชั้นครีม (creaming velocity) อาจคำนวณได้จากสมการของสโตกส์ (Stoke's equation) ดังต่อไปนี้

$$v = \frac{2r^2(\rho_o - \rho_i)g}{9\eta_o}$$

เมื่อ

v = อัตราเร็วในการแยกชั้นครีม

ρ_0 = ความหนาแน่นของวัฏภาคต่อเนื่อง

ρ_1 = ความหนาแน่นของวัฏภาคกระจายตัว (ครีโอล์)

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

r = รัศมีของครีโอล์

η_0 = ความหนืดของวัฏภาคต่อเนื่อง

จากสมการของสโตคส์ จะเห็นได้ว่า

- ถ้าครีโอล์ยังมีขนาดใหญ่ (r มาก) อัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของครีโอล์ และอัตราเร็วของการแยกชั้นครีมจะยิ่งเร็ว (v มาก) หรือกล่าวได้ว่าครีโอล์ยังมีขนาดเล็ก อิมัลชัน ยังมีความคงตัวมาก กระบวนการโฮโมจิไนเซชันให้อิมัลชันมีครีโอล์ขนาดเล็กจึงมีความสำคัญมาก

- ถ้าวัฏภาคต่อเนื่องยังมีความหนืดสูง (η มาก) จะทำให้อัตราเร็วของการแยกชั้นครีมยิ่งช้า (v น้อย) การเติมสารเพิ่มความข้นหนืด (thickening agent) ในวัฏภาคต่อเนื่องจะทำให้ อิมัลชันมีความคงตัวมากขึ้น

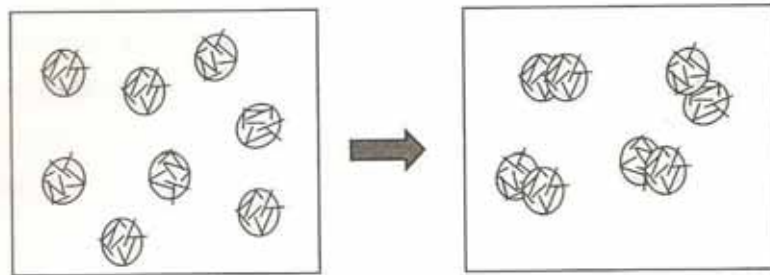
ลักษณะการแยกชั้นครีมของอิมัลชันจะขึ้นอยู่กับกระบวนการกระจายตัวของขนาดครีโอล์เมื่อเริ่มต้น ถ้าหากมีทั้งครีโอล์ที่มีขนาดเล็กและขนาดใหญ่ปนกัน ครีโอล์ขนาดใหญ่จะเคลื่อนที่ลอยขึ้นสู่ด้านบนได้เร็วกว่า ดังนั้นหลังการแยกชั้นครีมจะมีชั้นของครีโอล์ที่มีขนาดเล็ก ลงเรื่อยๆ จากด้านบนสู่ด้านล่างของภาชนะที่บรรจุอิมัลชันนั้น

การเกาะหรือรวมตัวกันของครีโอล์จะทำให้เกิดอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้นในอิมัลชัน ทำให้กระบวนการแยกชั้นครีมเกิดเร็วขึ้น

2.2.4.4 การหลอมรวมตัวกันบางส่วน (Partial Coalescence)

เกิดขึ้นเมื่อครีโอล์ที่มีผลึกไขมัน เข้ามาใกล้กันและเกิดการรวมตัวได้เพียงบางส่วน เนื่องจากผลึกไขมันขัดขวางไม่ให้ครีโอล์เกิดการรวมตัวได้อย่างสมบูรณ์ (ภาพที่ 13) ความไม่คงตัวแบบนี้มักเกิดกับอิมัลชันที่มีครีโอล์เป็นไขมันอิมัลต์ ซึ่งตกผลึกได้ง่ายที่อุณหภูมิต่ำ เช่น กะทิที่เก็บไว้ในตู้เย็น และเมื่อดำเนินการจะมีผลึกเกิดขึ้นบางส่วนที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อมีการใช้แรงเฉือนในการปั่นกวนจะทำให้เม็ดไขมันเกิดการหลอมรวมตัวกันบางส่วน ทำให้มีความหนืดสูงขึ้น

การหลอมรวมตัวกันบางส่วนมีความสำคัญต่อไอศกรีมและวิปครีม ซึ่งเมื่อไขมันนมจะเกาะจับกันเป็นร่างแหหุ้มรอบๆ ฟองอากาศ และยังเป็นต่อกระบวนการผลิตเนยสดและมาการีน ซึ่งการหลอมรวมตัวกันบางส่วนจะนำไปสู่การกลับวัฏภาค เปลี่ยนจากอิมัลชันแบบน้ำมันในน้ำเป็นอิมัลชันแบบน้ำในน้ำมัน



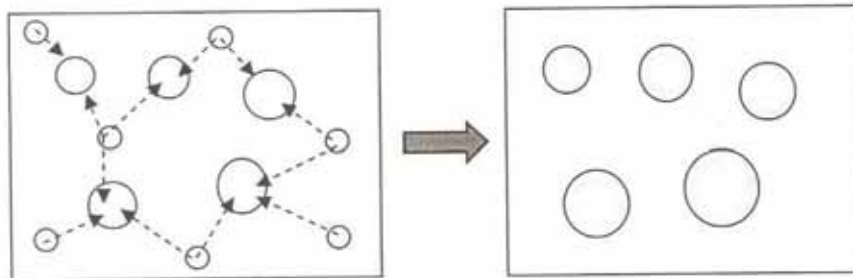
ภาพที่ 13 การหลอมรวมตัวกันบางส่วน (partial coalescence) ในอิมัลชัน เมื่อครีโอล์เล็ทที่มีผลึกไขมันเข้ามาใกล้กันจะเกิดการรวมตัวได้เพียงบางส่วน เนื่องจากผลึกไขมันขัดขวางไม่ให้ครีโอล์เล็ทเกิดการหลอมรวมตัวได้อย่างสมบูรณ์

ที่มา : ดัดแปลงจาก Walstra (1996) และ McClements (1999)

2.2.4.5 การเกิดออสวอลด์ไรเพนิง (Oswald Ripening)

เกิดจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลในครีโอล์เล็ทขนาดเล็ก ผ่านวัฏภาคต่อเนื่องไปรวมตัวกับครีโอล์เล็ทที่มีขนาดใหญ่กว่า เป็นผลให้ครีโอล์เล็ทขนาดเล็กหายไป และครีโอล์เล็ทขนาดใหญ่ขยายใหญ่ยิ่งขึ้น (ภาพที่ 14) ความไม่คงตัวแบบนี้มักเกิดขึ้นกับอิมัลชันที่วัฏภาคในครีโอล์เล็ทสามารถละลายในวัฏภาคต่อเนื่องได้บ้าง

ในอาหารส่วนใหญ่การเกิดออสวอลด์ไรเพนิงมีน้อยมาก เพราะน้ำและน้ำมันในรูปไตรกลีเซอไรด์ละลายซึ่งกันและกันได้เล็กน้อย แต่ก็อาจมีบ้าง ออสวอลด์ไรเพนิงจะมีความสำคัญมากขึ้นในอิมัลชันแบบน้ำมันในน้ำที่มีน้ำมันที่ละลายน้ำได้มากขึ้น (เช่น น้ำมันที่เป็นสารให้กลิ่นรส) หรือมีแอลกอฮอล์อยู่ในวัฏภาคน้ำ (เช่น เครื่องดื่มแอลกอฮอล์ที่ใส่ครีม และสารให้กลิ่นรส)

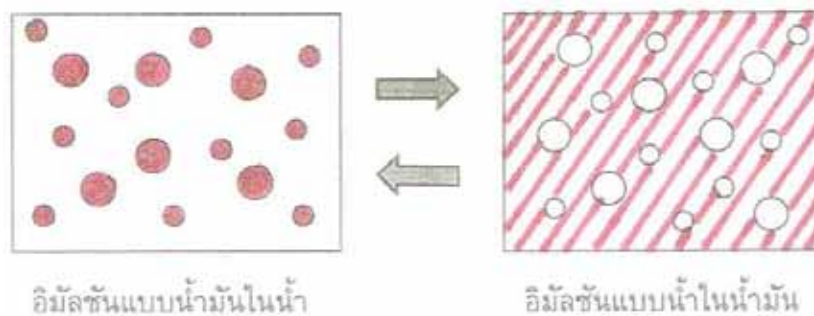


ภาพที่ 14 การเกิดออสวอลด์ไรเพนิง (Oswald ripening) ในอิมัลชัน โมเลกุลหรือปเล็ทขนาดเล็กเคลื่อนที่ผ่านวฏภาคต่อเนื่องไปรวมตัวกับหรือปเล็ทที่มีขนาดใหญ่กว่า เป็นผลให้หรือปเล็ทขนาดเล็กหายไป และหรือปเล็ทขนาดใหญ่ขยายใหญ่ยิ่งขึ้น

ที่มา : ดัดแปลงจาก Walstra (1996) และ McClements (1999)

2.2.4.6 การกลับวฏภาค (Phase Inversion)

เกิดขึ้นเมื่ออิมัลชันแบบน้ำมันในน้ำเปลี่ยนเป็นอิมัลชันแบบน้ำในน้ำมัน หรืออิมัลชันแบบน้ำในน้ำมันเปลี่ยนแปลงเป็นอิมัลชันแบบน้ำมันในน้ำ (ภาพที่ 15) โดยมีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงของสัดส่วนขององค์ประกอบในอิมัลชัน ชนิดและความเข้มข้นของอิมัลซิไฟเออร์ หรือ ionic strength ในอิมัลชัน หรือเกิดจากการกวนเขย่าอิมัลชัน



ภาพที่ 15 การกลับวฏภาค (phase inversion) ของอิมัลชัน

ที่มา : McClements (1999)

การกลับวฏภาคมีความสำคัญในการผลิตเนยสดและมาการีน แต่ก็อาจทำให้เกิดผลเสียต่อลักษณะปรากฏ เนื้อสัมผัส ความคงตัว และกลิ่นรสในผลิตภัณฑ์อาหารอื่นๆ ได้

ตารางที่ 2 แสดงถึงปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดชั้นครีม (creaming) การเกาะกลุ่มกัน (flocculation) และการหลอมรวมตัวกัน (coalescence) โดยมีหัวข้อสมบัติทางกระแสวิทยา

(rheology) เพิ่มขึ้นอีก 1 หัวข้อในตารางที่ 2 เนื่องจากมีความสัมพันธ์กันระหว่างความคงตัวของอิมัลชันและสมบัติทางกระแสวิทยาของอิมัลชัน

ตารางที่ 2 ปัจจัยทางกายภาพที่มีผลต่อความคงตัวและสมบัติทางกระแสวิทยาของอิมัลชัน (0= ไม่มีความสำคัญ 1= มีความสำคัญเล็กน้อย 2= มีความสำคัญปานกลาง และ 3= มีความสำคัญมาก)

Factor	Creaming	Flocculation	Coalescence	Rheology
Droplet size	3	2	1	1
Droplet size distribution	3	2	0	2
Droplet volume fraction	3	3	3	3
Density difference between phases	3	0	0	0
Rheology of continuous phase	3	3	2	3
Rheology of dispersed phase	0	0	0	1
Rheology of adsorbed layer	0	0	3	2
Thickness of adsorbed layer	1	2	3	2
Electrostatic interactions	1	3	2	1
Steric (polymeric) interactions	0	3	2	2
Fat crystallization	0	0	3	3
Liquid crystalline phases	1	2	2	2

ที่มา : Dickinson (1992)

2.3 การเกิดผลึกในอิมัลชัน

2.3.1 ขั้นตอนการเกิดผลึก (Crystallization)

การเกิดผลึกเป็นกระบวนการที่ของเหลวเริ่มเปลี่ยนแปลงเป็นของแข็ง ซึ่งมาจากน้ำในสารละลาย และตัวถูกละลายที่อยู่ในสารละลายก็ทำได้ โดยทั้งสองนี้ก็จะเกิดขึ้นและกระจายไปรอบๆ

การเกิดผลึกจะประกอบด้วยขั้นตอนของ nucleation และ crystal growth โดย nucleation จะเป็นการเกิดผลึกที่มีขนาดเล็กๆ ส่วน crystal growth จะเป็นการขยายตัวของผลึกที่มีขนาดเล็กๆเหล่านั้น

2.3.1.1 Nucleation

ถ้าในสารละลายปราศจากผลึกน้ำแข็งอยู่ก่อน และเมื่ออุณหภูมิลดลงจนเข้าใกล้จุดเริ่มต้นของ freezing point (อุณหภูมิที่ผลึกน้ำแข็งเล็กๆสามารถอยู่ในสมดุลกับเฟสที่เป็นของเหลว) ซึ่งเป็นช่วงก่อนที่จะเกิด nucleation ซึ่งจะเกิดขึ้นชั่วคราว และไม่อยู่ตัว nucleation ยังแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ homogeneous และ heterogeneous ถ้าในสารละลายมีน้ำบริสุทธิ์อยู่มากๆ จะเป็นพวก homogeneous

- Homogeneous nucleation โดยมากจะเกิดที่ 0°C หรือต่ำกว่าเล็กน้อย ถ้าในตัวอย่างมีอนุภาคที่เล็กมากๆ

- Heterogeneous nucleation เป็นชนิดที่พบในอาหารส่วนมาก โดยจะเกิดขึ้นจากการฟอร์มตัว โดยมีอนุภาคอื่นที่ไม่ใช่ น้ำ มารวมด้วย heterogeneous nucleation เป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างมากในการเกิด supercooling (อุณหภูมิของสารละลาย ลดอุณหภูมิลงต่ำกว่า freezing point แต่ยังไม่เกิดผลึกของน้ำแข็งในสารละลายนั้น ซึ่งโดยปกติ น้ำจะแข็งตัวที่ 0°C) เพราะอนุภาคอื่นๆ จะเร่งให้เกิดลักษณะโครงสร้างตาข่าย เกิด nucleation ได้เร็วขึ้น

นอกจากนี้การลดอุณหภูมิ ยังเป็นลักษณะเฉพาะตัวของอุณหภูมิของตัวอย่างต่างๆ ที่ nucleation เริ่มเกิดขึ้น

2.3.1.2 Crystal Growth

เป็นขั้นตอนที่ 2 ของการเกิดผลึกไม่เหมือนกับ nucleation การเกิด crystal growth สามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลว

อัตราการเกิด crystallization ของสารประกอบ จะขึ้นกับอัตราของมวล และการถ่ายเทความร้อน ระหว่างการเกิด crystallization น้ำจะเคลื่อนที่ไปส่วนที่เป็น crystal surface และโมเลกุลของตัวถูกละลายต้องแพร่ออกมาจากผลึก เมื่ออุณหภูมิลดต่ำกว่าค่าความหนืดก็จะเพิ่มขึ้น

อาหารส่วนมากจะประกอบด้วย ส่วนประกอบหลายๆอย่าง ตัวถูกละลายเหล่านี้ จะทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อลดอุณหภูมิลง เมื่อเกิดผลึกน้ำแข็งจะผลึกโมเลกุลเหล่านี้ ออกนอกตัว แล้วผลึกที่ได้จะมีขนาดโตขึ้นเรื่อยๆ อัตราการเกิดนี้ยังขึ้นกับความชื้นของตัวอย่างด้วย

การแช่แข็งมักจะนำมาใช้ในการป้องกันการอาหารจากการเสื่อมเสียเนื่องจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และป้องกันการเสื่อมเสียเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีเช่น lipid oxidation (Fellows, 2000) มีอาหารประเภทนมไขมันมากมายที่ต้องผ่านกระบวนการแช่แข็ง-ละลายก่อนการบริโภค เช่น อาหารแช่แข็งและเครื่องดื่ม

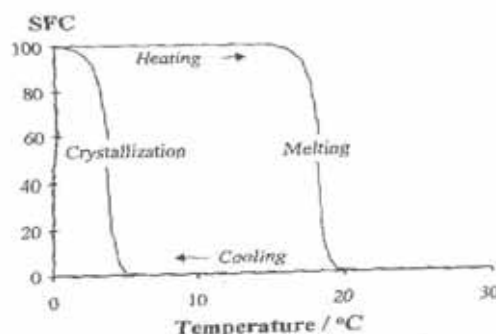
การวางแผนการผลิตอาหารประเภทอิมัลชันเพื่อให้มีความคงทนต่อการแช่แข็ง-ละลายจะขึ้นอยู่กับกลไกพื้นฐานทางเคมีกายภาพที่เกิดขึ้นตลอดช่วงการแช่แข็ง-ละลายของอิมัลชัน กลไกทางเคมีกายภาพเหล่านี้ได้แก่ การเกิดผลึกไขมัน (fat crystallization) การฟอร์มตัวของน้ำแข็ง (ice formation) การเกิดทรานซิชันที่ผิวสัมผัสร่วม (interfacial phase transitions) และการเปลี่ยนแปลง conformation ของ biopolymer (biopolymer conformational changes)

2.3.2 การเกิดผลึกไขมัน (Fat Crystallization)

ในบางครั้งส่วนของไขมันในอาหารประเภทอิมัลชันจะเกิดผลึกทั้งหมดหรือเพียงบางส่วนในช่วงการผลิต การเก็บรักษาและการนำมาใช้งาน ซึ่งจะส่งผลอย่างมากต่อความคงตัวของผลิตภัณฑ์ ลักษณะทางกายภาพของครีโอล์ในอิมัลชันจะมีบทบาทสำคัญต่อการศึกษาด้านสมบัติทางเคมีกายภาพ เช่น ความคงตัว สมบัติทางกระแสวิทยา และลักษณะปรากฏรวมถึงการกระจายตัวและปฏิกิริยาของส่วนประกอบต่างๆ

2.3.2.1 Solid Fat Content

การเกิดผลึกไขมันเป็นลักษณะหนึ่งที่สำคัญในอิมัลชัน ปริมาณไขมันส่วนที่เป็นของแข็ง (SFC) เป็นส่วนของไขมันซึ่งกลายเป็นผลึกที่บางอุณหภูมิ สามารถวัดได้โดยใช้เทคนิคต่างๆ เช่น การวัดความหนาแน่น, differential scanning calorimetry (DSC), nuclear magnetic resonance, ultrasonic velocity measurements และ electron spin resonance (McClements, 1999; Dickinson and McClements, 1995) emulsified oil มักจะเย็นตัวลงที่อุณหภูมิต่ำกว่าปกติก่อนที่จะเกิดผลึก ตัวอย่างเช่น ในช่วงการทำใหเย็น น้ำมันจะกลายเป็นผลึกที่จุดที่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวทางเทอร์โมไดนามิกส์ (ภาพที่ 16) ในขณะที่ bulk oil phase จะเกิดผลึกที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่า supercooling เล็กน้อย



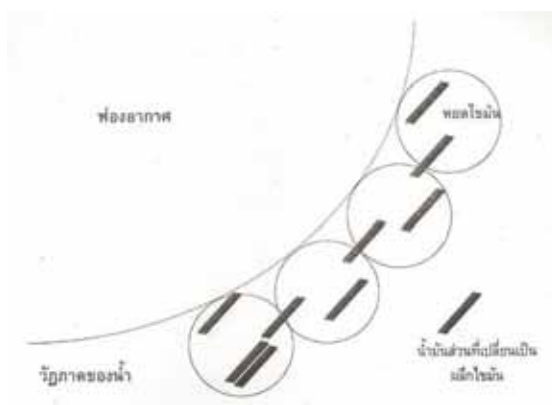
ภาพที่ 16 การเกิด supercooling ในอิมัลชันแบบน้ำมันในน้ำหลังจากการให้ความร้อนและทำให้เย็น
ที่มา : Dickinson and McClements (1995)

2.3.2.2 Nucleation

จากที่กล่าวมาแล้วว่าการเกิดผลึกสามารถแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน คือ nucleation และ crystal growth ก่อนที่จะเกิด nucleation ตัว mother phase จะเกิด supercooling ทำให้เกิดแรงขับเคลื่อนทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับการเกิดผลึก หลังจากนั้นจะเกิดการก่อตัวของ nuclei เกิดการพัฒนาและการโตของผลึก การเกิด nucleation ในกรณีของอิมัลชันเป็นได้ทั้ง heterogeneous และ homogeneous (Vanapalli, Palanuwech and Coupland, 2000; Martin, Herrera and Hartel, 2001)

2.3.2.3 การหลอมรวมตัวบางส่วน (Partial Coalescence)

เมื่ออิมัลชันแบบน้ำมันในน้ำเกิดการเย็นตัวลงที่อุณหภูมิที่วิกฤตไขมันบางส่วนเริ่มเกิดผลึก (แต่วิกฤตน้ำยังคงเป็นของเหลว) จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า การหลอมรวมตัวบางส่วน ซึ่งเป็นการทำให้อนุภาคในวิกฤตที่กระจายตัวมีการเกาะกลุ่มและการหลอมรวมตัวดังแสดงในภาพที่ 17 ตัวอย่างเช่น การเปลี่ยนสถานะของน้ำมันในวิกฤตของไขมันเป็นของแข็งเมื่อลดอุณหภูมิ ซึ่งจะยังเห็นรูปร่างของเม็ดไขมันเป็นอนุภาคชัดเจน การลดอุณหภูมิจะทำให้ไขมันบางส่วนเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งเชื่อมต่อกับเม็ดไขมันเข้าด้วยกัน โครงสร้างของเม็ดไขมันที่เกิดการหลอมรวมตัวบางส่วนนี้ นิยมทำให้เกิดในผลิตภัณฑ์ที่มีการตีอัดอากาศ เช่น ไอศกรีมและวิปครีม เพื่อให้โครงสร้างของเม็ดไขมันอุ้มฟองอากาศไว้



ภาพที่ 17 การหลอมรวมตัวบางส่วนของเม็ดไขมัน
ที่มา : ปาริฉัตร หงสประภาส (2545)

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดการหลอมรวมตัวกันบางส่วน ได้แก่ solid fat content ความหนาของพื้นที่ผิวสัมผัสร่วมของเมมเบรนที่หุ้มครีโอลีท ขนาดของครีโอลีท และแรงที่ใช้ในการการตีกวน (ปาริฉัตร หงสประภาส, 2545)

2.3.2.4 การเกิดผลึกน้ำ (Water Crystallization)

polymorphism และปริมาณการเกิดผลึกของไขมันและพฤติกรรมของวฏภาคน้ำ มีผลต่อความคงตัวทางเคมีและกายภาพของอิมัลชันตลอดช่วงการแช่แข็งและการเก็บรักษา (Rao and Hartel, 1998) น้ำเริ่มแข็งตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0°C เนื่องจากผลของ supercooling และการลดลงของจุดแช่แข็ง การแช่แข็งทำให้ส่วนที่เป็นของแข็งมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นและไปลดสมดุลของอุณหภูมิแช่แข็งที่มีในส่วนของน้ำที่ไม่แข็งตัว (Pongsawatmanit and Miyawaki, 1993) ดังนั้นอาหารแช่แข็งจะประกอบด้วยส่วนของน้ำแข็งและส่วนที่ยังไม่แข็งตัวและ freeze-concentrate phase (Rao and Hartel, 1998) เมื่อแช่แข็งอิมัลชัน เม็ดไขมันจะพัฒนาความเข้มข้นเข้าสู่ freeze-concentrate phase ทำให้เม็ดไขมันเคลื่อนที่เข้ามาใกล้ชิดกับเม็ดไขมันที่อยู่ข้างเคียงในช่องว่างของส่วนของน้ำที่ยังไม่แข็งตัวระหว่างผลึกน้ำแข็ง ความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของเม็ดไขมันในช่องว่างแคบๆนี้ทำให้เกิดการรวมมวล การเกาะกลุ่ม และการหลอมรวมตัว ตลอดช่วงการแช่แข็ง-ละลาย (Komatsu, Okada and Handa, 1997; Saito et al., 1999)

เมื่ออิมัลชันแบบน้ำมันในน้ำเย็นตัวลงถึงอุณหภูมิที่เกิดผลึกน้ำ มีกระบวนการทางเคมีกายภาพต่างๆมากมายที่จะสนับสนุนให้เกิดความไม่คงตัวของอิมัลชัน อย่างแรก เมื่อเกิดการฟอร์มตัวของผลึกน้ำแข็งในส่วนของวฏภาคน้ำทำให้เมื่อน้ำมันเคลื่อนที่เข้ามาใกล้ชิดกัน (Saito et al., 1999) อย่างที่สอง ปริมาณน้ำอิสระมีไม่เพียงพอที่จะเกิดการคายน้ำออกอย่างเต็มที่ที่พื้นผิวของครีโอลีท ทำให้เพิ่มปฏิสัมพันธ์ระหว่างครีโอลีทกับครีโอลีท (Komatsu et al., 1997; Strauss and Hauser, 1986) อย่างที่สาม ผลึกน้ำแข็งชักนำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของ ionic strength ของ freeze-concentrated ที่ไม่แข็งตัวในวฏภาคน้ำที่อยู่ล้อมรอบครีโอลีทอิมัลชัน ทำให้เกิด electrostatic repulsion ระหว่างครีโอลีท (Komatsu et al., 1997; Saito et al., 1999) อย่างที่สี่ การฟอร์มตัวของผลึกน้ำแข็งในช่วงการแช่แข็งจะไปกีดขวางเข้าสู่เม็ดไขมันและรบกวนผิวสัมผัสร่วมของเมมเบรน ทำให้มีแนวโน้มที่จะเกิดการหลอมรวมตัวเมื่อเกิดการละลาย อย่างที่ห้า อิมัลซิไฟเออร์ถูกดูดซับที่พื้นผิวของผลึกน้ำแข็ง จึงไปลดจำนวนที่จะไปหุ้มครีโอลีทของอิมัลชัน (Hillgren, Lindgren and Alden, 2000) และสุดท้าย อิมัลซิไฟเออร์จะสูญเสียคุณสมบัติของมันเมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่าระดับที่สามารถรับได้ เช่น โพรตีนก้อนกลมจะเกิดการเสียสภาพ เกิดการเปลี่ยนสภาพความยืดหยุ่นของของ surfactants โมเลกุลเล็ก (Carvajal, MacDonald and Lanier, 1999)

2.4 ส่วนผสมต่างๆในอิมัลชัน

ส่วนผสมต่างๆ ได้แก่ น้ำตาล เกลือ และอิมัลซิไฟเออร์ในอาหารประเภทอิมัลชันจะส่งผลทั้งทางด้านกายภาพและเคมีต่อลักษณะโดยรวมของอิมัลชัน

2.4.1 น้ำตาล

น้ำตาลนิยมใช้ในอาหารเพื่อทำหน้าที่เป็น cryoprotectants ซึ่งมีผลต่อความเข้มข้นในการแช่แข็งและสามารถปรับปรุงรูปแบบและโครงสร้างของการเกิดผลึก

ในอิมัลชันที่ทำให้คงตัวด้วยโปรตีนก๊องกลม น้ำตาลจะช่วยในด้านความคงตัวและคุณสมบัติของอิมัลชัน โดยจะป้องกันโปรตีนก๊องกลมตลอดช่วงการแช่แข็ง ด้วยการไปจับกับกลุ่มของโปรตีนที่พื้นผิว หรือเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและสมบัติทางเคมีกายภาพของน้ำ (Ebel, Eisenberg and Ghilando, 2000; Kim, Decker and McClements, 2003) น้ำตาลสามารถช่วยป้องกันการเปลี่ยนรูปแบบและปฏิสัมพันธ์ของโปรตีนกับหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ได้ 2 วิธีคือ อย่างแรก น้ำตาลจะไปเพิ่มอุณหภูมิที่จะทำให้โปรตีนเกิดการเสียสภาพ (Carvajai et al., 1999) ชูโครสสามารถเพิ่ม energy barrier ระหว่างโปรตีนธรรมชาติและโปรตีนที่เสียสภาพ และยับยั้งการเข้ามาใกล้ชิดกันของโปรตีนที่ผิวสัมผัสร่วมในส่วนของสารละลาย (Lee and Timasheff, 1981) ดังนั้นการเติมชูโครสลงในอิมัลชันจะไปขัดขวางการคลายเกลียวของโปรตีนเนื่องจากการแช่แข็ง อย่างที่สองการเพิ่มความเข้มข้นของชูโครสจะทำให้อุณหภูมิของกลาสทรานซิชันเพิ่มขึ้น ถ้าโปรตีนก๊องกลมถูกทำให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันก่อนที่จะเกิดการคลายเกลียว ทำให้โปรตีนเกิดการคลายเกลียวช้าลง (McClements, 2002)

การเติมน้ำตาลจะไปทำให้ β -lactoglobulin และโปรตีนก๊องกลมชนิดอื่นๆทนต่อความร้อนได้มากขึ้น ทำให้การเสียสภาพเกิดช้าลง (Lee and Timasheff, 1981) การเติมชูโครสจะไปมีอิทธิพลต่ออุณหภูมิที่ทำให้เกิดการคลายเกลียว และเกิดการรวมมวลของโปรตีน

น้ำจะมีผลต่อโครงสร้างขององค์ประกอบในอาหารผ่านผลของการเป็นพลาสติกไซเซอร์ ทำให้เพิ่มความสามารถในการเคลื่อนที่ของโมเลกุล (Le Meste, Simatos and Gervais, 1995) เมื่อมีการเติมชูโครสลงในน้ำ โมเลกุลน้ำจะไม่จับกับโมเลกุลชูโครสอย่างแน่นหนา แต่จะทำให้วฏภาคต่อเนื่องเกิดการแยกตัวและทำให้ส่วนที่เหลือเข้ามาแนบชิดกัน ดังนั้นจึงเกิดการเคลื่อนย้ายของโมเลกุลน้ำและการฟอร์มตัวของโมเลกุลชูโครส (Hartel, 2001) เมื่อปริมาณของชูโครสเพิ่มขึ้นจะไปทำให้ free volume ที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ลดต่ำลง (Le Meste et al., 1995) การเพิ่มขึ้นของปริมาณชูโครสในอิมัลชันจะทำให้ส่วนที่ไม่แข็งตัวในชั้นน้ำเพิ่มตลอดช่วงการแช่แข็ง (Walstra, 2003) จึงไปลดผลกระทบของ freeze concentration ในอิมัลชัน

Ghosh, Cramp and Coupland (2006) ได้ศึกษาผลของน้ำตาลต่างๆ 6 ชนิด (0–3%wt ซูโครส กลูโคส ฟรุคโตส มอลโตส ทรีฮาโลส และ corn syrup solids) ต่อความคงตัวในการแช่แข็ง-ละลายของ 20% n-hexadecane emulsions โดยใช้โซเดียมเคซิเนทเป็นอิมัลซิไฟเออร์ พบว่าที่จำนวนโมลเท่ากัน ฟรุคโตสจะให้ประสิทธิภาพต่ำที่สุดต่อความคงตัวของอิมัลชัน ในขณะที่ corn syrup solids จะให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด

Thanasukarn, Pongsawatmanit and McClements (2004a) ได้ทำการศึกษาผลของการเติมน้ำตาลซูโครสความเข้มข้น 0-20%wt ต่อความคงตัวในการแช่แข็ง-ละลายของ 20%wt hydrogenated palm oil emulsions โดยใช้ whey protein isolate หรือ WPI เป็นอิมัลซิไฟเออร์ พบว่าเมื่อความเข้มข้นของซูโครสเพิ่มขึ้น จะทำให้ความคงตัวของอิมัลชันเพิ่มขึ้น

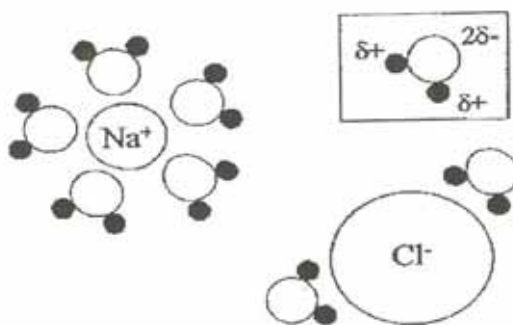
Thanasukarn et al. (2006) ได้ศึกษาผลของการเติมซูโครสความเข้มข้น 0-40%wt ต่อความคงตัวในการแช่แข็ง-ละลายของ 20%wt hydrogenated palm oil emulsions โดยใช้ Tween 20 เป็นอิมัลซิไฟเออร์ พบว่าการเติมซูโครส (มากถึง 40%wt) ลงในอิมัลชันที่ใช้ Tween 20 เป็นอิมัลซิไฟเออร์ ก็ยังไม่สามารถช่วยปรับปรุงความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายได้ดีเมื่อเทียบกับการเติมซูโครสลงในอิมัลชันที่ใช้ WPI เป็นอิมัลซิไฟเออร์

2.4.2 เกลือ (NaCl)

เกลือ (NaCl) เป็นส่วนผสมที่นิยมใช้ในอาหาร เกลือมีผลต่อความคงตัวของอิมัลชันผ่านกลไกต่างๆเช่น electrostatic screening, ion binding, ion bridging และการเปลี่ยนโครงสร้างของน้ำ (McClements, 1999)

โครงสร้างและปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุลน้ำกับการใกล้ชิดกันของไอออน มีผลต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของน้ำ โมเลกุลน้ำที่มีไอออนอยู่มีแนวโน้มที่จะปรับตัวโดยหันส่วนที่มีประจุตรงข้ามเข้าหาไอออนนั้น (ภาพที่ 18) เกิดการจับตัวกันของน้ำกับไอออน ทำให้เคลื่อนที่ได้ช้าลง ลดแรงกดดัน ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น จุดเยือกแข็งลดต่ำลง และจุดเดือดเพิ่มขึ้นสูงกว่าน้ำ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของน้ำจะไปมีผลต่อปฏิสัมพันธ์ของ hydrophobic strength ระหว่างครีโอลีอิมัลชัน (McClements, 1999) ปฏิสัมพันธ์ไฮโดรโฟบิกมีลักษณะเป็นแรงดึงดูดที่แข็งแรง เกิดระหว่างสารไม่มีขั้วที่กระจายตัวอยู่ในน้ำ โดยมีสาเหตุมาจากความสามารถของโมเลกุลน้ำที่สร้างพันธะไฮโดรเจนอันแข็งแกร่งกับโมเลกุลน้ำที่อยู่ใกล้เคียง ในขณะที่สารไม่มีขั้วสร้างพันธะแวนเดอร์วาลส์ที่ค่อนข้างอ่อนแอระหว่างกัน ระบบจะไม่คงตัวเชิงเทอร์โมไดนามิก และพยายามที่จะลดการสัมผัสของน้ำกับสารไม่มีขั้ว โดยเกิดเป็นแรงกดดันให้สารไม่มีขั้วดึงดูด รวมตัวกัน และแยกตัวออกจากน้ำในที่สุด (Evan and Wennerstrom, 1994) ทั้งนี้ไม่ใช่เพราะสารไม่มีขั้วเกาะจับกันได้ดี แต่

เป็นเพราะโมเลกุลน้ำเกาะจับกับน้ำด้วยตัวเองได้ดีเป็นสำคัญ (เหมือนกับว่าโมเลกุลน้ำได้บีบให้สารไม่มีขั้วรวมเข้าด้วยกัน)



ภาพที่ 18 โครงสร้างของโมเลกุลน้ำที่ล้อมรอบไอออนในวัฏภาคน้ำ
ที่มา : McClements (1999)

ความคงตัวต่อการรวมมวลของโปรตีนที่ไปเคลือบหรือปเล็ทอิมัลชัน ได้จากการคำนวณ droplet-droplet interaction potential ($w(h)$) ในรูปฟังก์ชันของผิวสัมผัสของหรือปเล็ทต่อการแยกตัวที่ผิวสัมผัส ปฏิสัมพันธ์โดยรวมระหว่างหรือปเล็ทอิมัลชันทั้ง 2 ที่ทำให้คงตัวด้วยโปรตีนก่อนกลม สามารถคำนวณได้จากผลรวมของ van der Waals (w_{VDV}), electrostatic (w_E), steric (w_S) และ hydrophobic interaction (w_H)

$$w(h) = w_{VDV}(h) + w_E(h) + w_S(h) + w_H(h)$$

ที่ ionic strengths สูงๆ แรงดึงดูดแวนเดอร์วาลส์ส่งผลต่อระบบมากกว่าแรงผลักระหว่างอนุภาคของคอลลอยด์ที่มีประจุเหมือนกัน (electrostatic repulsion) ดังนั้น energy barrier จึงไม่ปรากฏหรือไม่ยาวนานพอที่จะป้องกันหรือปเล็ทจากการตกลงไปสู่ primary minimum ภายใต้สถานะนี้หรือปเล็ทจะเคลื่อนที่เข้ามาใกล้ชิดกันส่งผลให้เกิดการเกาะกลุ่มหรือรวมตัวกัน (Kim et al., 2002; Demetriades, Coupland and McClements, 1997)

การเกาะกลุ่มกันของหรือปเล็ทเป็นลักษณะที่ไม่เป็นที่ต้องการในอาหารประเภทอิมัลชันส่วนมากเพราะจะนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของการแยกชั้นครีมและความหนืดของอิมัลชัน (McClements, 1999; Demetriades et al., 1997) Kim et al. (2002) ได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของการเสื่อสภาพของโปรตีนก่อนกลมหลังจากถูกดูดซับเข้าสู่พื้นผิวของหรือปเล็ทของไฮโดรคาร์บอนต่อการเกาะกลุ่มกันในอิมัลชันแบบน้ำมันในน้ำ พบว่าโปรตีนก่อนกลมจะไม่เกิดการคลายตัวที่ผิวสัมผัสร่วม

ของดริอปเล็ต ซึ่งมีการเพิ่มขึ้นของแรงดึงดูดของ hydrophobic และเกิดการฟอร์มตัวของพันธะไดซัลไฟด์ระหว่างดริอปเล็ต ในสถานะที่ไม่มีเกลือ electrostatic repulsion ระหว่างดริอปเล็ตจะมีเพียงพอที่จะป้องกันการเกาะกลุ่มกัน แต่ในสถานะที่มีการเติมเกลือ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงดูดจะมีมากกว่า และทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกัน

Thanasukarn et al. (2004a) ได้ศึกษาผลของการเติมเกลือ (NaCl) ความเข้มข้น 0 และ 150 mmol/kg ต่อความคงตัวในการแช่แข็ง-ละลายของ 20%wt hydrogenated palm oil emulsions โดยใช้ WPI เป็นอิมัลซิไฟเออร์ พบว่าเมื่อมีการเติมเกลือลงในอิมัลชันจะทำให้ความคงตัวของอิมัลชันลดลง

เช่นเดียวกับผลงานวิจัยของ Thanasukarn et al. (2006) ที่ศึกษาผลของการเติมเกลือ (NaCl) ความเข้มข้น 0 และ 150 mmol/kg ต่อความคงตัวในการแช่แข็ง-ละลายของ 20%wt hydrogenated palm oil emulsions โดยใช้ Tween 20 เป็นอิมัลซิไฟเออร์ พบว่าเมื่อมีการเติมเกลือลงในอิมัลชันจะทำให้ความคงตัวของอิมัลชันลดลง และพบว่าการเติมเกลือลงในอิมัลชันที่ใช้ WPI เป็นอิมัลซิไฟเออร์จะทำให้อิมัลชันมีความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายมากกว่าใช้ Tween 20 เป็นอิมัลซิไฟเออร์

2.4.3 อิมัลซิไฟเออร์

2.4.3.1 ชนิดของอิมัลซิไฟเออร์

อิมัลซิไฟเออร์สามารถเป็นได้ทั้ง biopolymer (เช่น โปรตีน) หรืออิมัลซิไฟเออร์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก (เช่น Tween) สารอิมัลซิไฟเออร์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็กและโปรตีน สามารถทำหน้าที่ลดแรงตึงผิวและรักษารูปร่างของเม็ดไขมันให้มีขนาดเล็กโดยที่ความหนืดของวัฏภาคของน้ำไม่สูงมากนัก ในขณะที่การเติมสาร โพลีแซ็กคาไรด์ เช่น เมทิลเซลลูโลส (methyl cellulose) หรือไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลส (hydroxypropylmethylcellulose) มีประสิทธิภาพต่ำในการลดขนาดของเม็ดไขมัน แต่ช่วยรักษาความคงตัวของอิมัลชัน โดยการเพิ่มความหนืด

แม้ว่าโปรตีนจะไม่สามารถลดแรงตึงผิวได้มากเท่ากับสารอิมัลซิไฟเออร์ที่มีขนาดเล็ก แต่โปรตีนจะมีบทบาทสำคัญในการรักษาความคงตัวของอิมัลชันในระยะยาวโดยโมเลกุลหรืออนุภาคที่ผิวร่วม การดูดซับของโปรตีนที่ผิวร่วมระหว่างน้ำมันกับน้ำเกิดขึ้นเนื่องจากการคลายเกลียวหรือการเสียสภาพของโปรตีนในระหว่างกระบวนการผลิต เช่น การให้แรงเฉือนในระหว่างการโฮโมจิไนซ์ ทำให้โปรตีนส่วนที่กระจายตัวในน้ำมันได้ดี หันเข้าหาพื้นผิวของไขมัน ในขณะที่ส่วนที่กระจายตัวในน้ำได้ดี หันเข้าหาวัฏภาคของน้ำ ดังนั้นเม็ดไขมันที่ถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของโปรตีนจะกระจายตัวอยู่ในวัฏภาคของน้ำได้ แม้ว่าการเกิดอิมัลชันจะเป็นปรากฏการณ์

ที่ไม่มีเสถียรภาพทางเทอร์โมไดนามิกส์ ความคงตัวของอิมัลชันหรือเสถียรภาพของระบบคอลลอยด์เกิดขึ้นเพราะ โมเลกุลโปรตีนทำหน้าที่กีดขวางไม่ให้เม็ดไขมันรวมตัวกัน โปรตีนที่จะมีคุณสมบัติเป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่ดีจะต้องคลายเกลียวได้ง่ายที่ผิวร่วมระหว่างน้ำมันกับน้ำ การที่โปรตีนจะคลายเกลียวได้มากน้อยเพียงใดจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโปรตีนที่มีอยู่ในระบบ พื้นที่ผิวของเม็ดไขมัน ระยะเวลาที่โปรตีนสัมผัสกับผิวร่วมระหว่างน้ำมันกับน้ำ และโครงสร้างระดับโมเลกุลของโปรตีนก่อนการดูดซับที่ผิวร่วมระหว่างน้ำมันกับน้ำ (Dickinson, 1993)

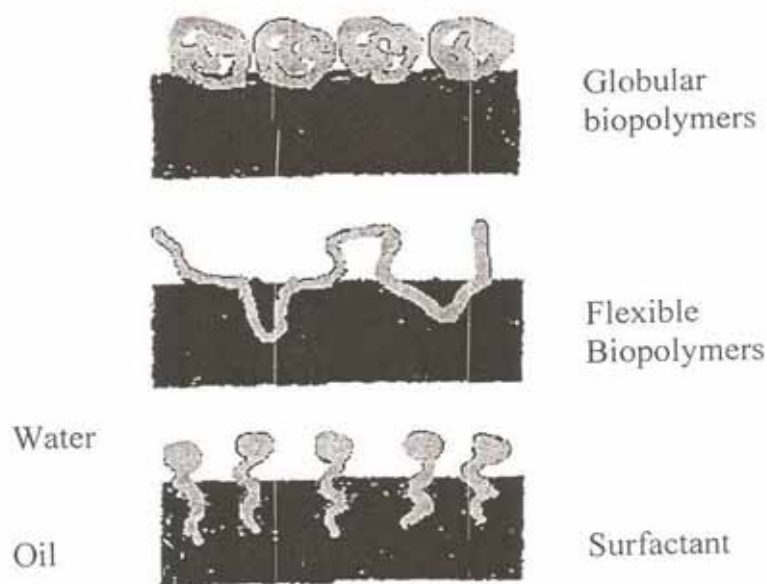
วัตถุดิบที่ใช้ในการแปรรูปอาหารหลายชนิดเป็นแหล่งที่ดีของโปรตีน สารผสมอาหารที่นิยมใช้ในระดับอุตสาหกรรมจะเป็นโปรตีนนมในรูปของหางนมผงและเคซีนต โครงสร้างระดับโมเลกุลของเคซีนและเคซีนในหางนมผงจะแตกต่างกัน เคซีนในหางนมจะยังอยู่ในรูปของเคซีนไมเซลล์ ซึ่งเป็นโครงสร้างขนาดใหญ่ ไม่ละลายน้ำ แต่อยู่ในรูปของคอลลอยด์ที่กระจายตัวในน้ำ ในขณะที่เคซีนในรูปของเกลือโซเดียมหรือเกลือโพแทสเซียมจะละลายน้ำได้ และสูญเสียโครงสร้างของไมเซลล์ไปในระหว่างกระบวนการผลิตเคซีนต ดังนั้นประสิทธิภาพของเคซีนและเคซีนในการเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์จึงแตกต่างกัน รวมถึงความคงทนต่อการคั่ว อุณหภูมิ แรงเฉือน และไอออน โปรตีนเวย์เป็นโปรตีนนมอีกชนิดหนึ่งที่มีการใช้ในอุตสาหกรรมอาหารมากขึ้น เนื่องจากมีความคงตัวต่อความเป็นกรด-ด่างในช่วงกว้างเมื่อเปรียบเทียบกับเคซีนและเคซีนต แต่จะตกตะกอนหรือเกิดเป็นเจลได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน หรือเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นของไอออนสูง จึงนิยมใช้กับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการคุณสมบัติในการเกิดเจลและการเกิดฟองมากกว่าในผลิตภัณฑ์อิมัลชันเหลว (ปาริฉัตร หงสประภาส, 2545)

2.4.3.2 รูปแบบของอิมัลซิไฟเออร์ที่ผิวสัมผัสร่วม

รูปแบบและการปรับตัวของโมเลกุลที่ผิวสัมผัสร่วมเกิดจากการพยายามที่จะลด free energy ในระบบลง (Evans and Wennerstorm, 1994) ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อสมบัติทางเคมีกายภาพโดยรวมของอาหารประเภทอิมัลชัน (McClements, 1999) surfactants โมเลกุลเล็กมีแนวโน้มที่จะหันส่วนหัวที่มีขั้วเข้าหาตัวภาคน้ำและหันส่วนหางที่เป็นไฮโดรคาร์บอนเข้าสู่ตัวภาคน้ำมัน (ภาพที่ 19) และจะถูกดูดซับที่ผิวสัมผัสร่วมระหว่างน้ำและน้ำมันได้รวดเร็วกว่า biopolymer

รูปแบบของ biopolymer ที่บริเวณผิวสัมผัสร่วมและคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของการเกิดเมมเบรนจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของโมเลกุลและการเกิดปฏิสัมพันธ์ การหลอมรวมตัวของอิมัลชันขึ้นอยู่กับส่วนที่ไม่สามารถคลายเกลียวได้และปฏิสัมพันธ์ของโมเลกุลโปรตีนที่ผิวสัมผัสของคอลลอยด์ หลังจากถูกดูดซับที่ผิวสัมผัสร่วม โปรตีนที่เป็น random-coil จะมีความ

ยืดหยุ่นและสามารถจัดเรียงโครงสร้างได้อย่างรวดเร็ว ในขณะที่โปรตีนก่อนกลมจะแข็ง ไม่มีความยืดหยุ่น ทำให้การจัดเรียงตัวเป็นไปอย่างช้าๆ (Dickinson, 1992; McClements, 1999)



ภาพที่ 19 การปรับตัวและรูปแบบของโมเลกุลที่ผิวสัมผัสร่วม
ที่มา : McClements (1999)

2.4.3.3 ผลของอิมัลซิไฟเออร์ต่อการเกิดผลึกในอิมัลชัน

ชนิดของอิมัลซิไฟเออร์มีผลต่อลักษณะของผลึกในอิมัลชัน อุณหภูมิที่ทำให้ครีโอล์เกิดเป็นผลึกขึ้นอยู่กับชนิดของอิมัลซิไฟเออร์ที่ใช้ทำให้ครีโอล์มีความคงตัว ถ้าส่วนของ hydrophobic ของอิมัลชันมีลักษณะคล้ายกับโครงสร้างของน้ำมันจะทำให้อัตราการเกิด nucleation ของผลึกไขมันเพิ่มขึ้น (Dickinson, 1995) ครีโอล์ที่มีโมเลกุลเล็กจะมีอัตราการเกิดช้ากว่าครีโอล์ที่มีโมเลกุลใหญ่ ขนาดของครีโอล์ในอิมัลชันและชนิดของ surfactants มีผลอย่างมากต่อการเกิดผลึกมากกว่าการหลอมเหลว

สมบัติทางเคมีกายภาพของอิมัลชันที่ผิวสัมผัสร่วมของเมื่อน้ำมันจะส่งผลสำคัญต่อความคงตัวและสมบัติทางกายภาพของอิมัลชันที่เกิดการหลอมรวมตัวบางส่วน อิมัลซิไฟเออร์ที่มีความหนาและให้ฟิล์มที่มีความยืดหยุ่นที่ผิวสัมผัสร่วมของน้ำมันกับน้ำจะสามารถป้องกันการเกาะของผลึกไขมันและทำให้อิมัลชันมีความคงตัวได้มากกว่า อัตราของการหลอมรวมตัวกันบางส่วนสำหรับครีโอล์ที่ทำให้คงตัวด้วยโปรตีนจะน้อยกว่าเมื่อทำให้คงตัวด้วย surfactants โมเลกุลเล็ก

Cramp et al. (2004) ได้ศึกษาผลของการใช้อิมัลซิไฟเออร์ชนิดต่างๆ ได้แก่ 2%wt Tween 20, 2%wt SDS, 2%wt WPI และ 2%wt โซเดียมเคซิเนต ต่อความคงตัวในการแช่แข็ง-ละลายของ 40%wt hexadecane emulsions พบว่าอิมัลซิไฟเออร์ที่เป็นโปรตีน (โซเดียมเคซิเนต, WPI) จะทำให้อิมัลชันมีความคงตัวได้ดีกว่า surfactants โมเลกุลเล็ก (Tween 20, SDS)

Thanasukarn et al. (2004b) ได้ศึกษาผลของการใช้อิมัลซิไฟเออร์ชนิดต่างๆ ได้แก่ 2%wt Tween 20, 1%wt เคซีน และ 1%wt WPI ต่อความคงตัวในการแช่แข็ง-ละลายของ 20%wt hydrogenated palm oil emulsions พบว่าอิมัลชันที่ใช้ WPI เป็นอิมัลซิไฟเออร์จะมีความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายมากกว่าใช้ Tween 20 และเคซีนเป็นอิมัลซิไฟเออร์

Tangsuphoom and Coupland (2009) ได้ศึกษาผลของการใช้อิมัลซิไฟเออร์ชนิดต่างๆ ได้แก่ 1%wt เคซีน, 1%wt WPI, 1%wt SDS และ 1%wt Tween 20 ต่อความคงตัวในการแช่แข็ง-ละลายของกะทิที่มีไขมัน 10%wt พบว่าอิมัลซิไฟเออร์ที่เป็นโปรตีน (เคซีน, WPI) จะทำให้อิมัลชันมีความคงตัวได้ดีกว่า surfactants โมเลกุลเล็ก (Tween 20, SDS)

2.5 ผลของอุณหภูมิต่อคุณสมบัติของอิมัลชัน

อุณหภูมิเป็นหนึ่งในปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพของวัสดุไขมัน มีส่วนสำคัญต่อการฟอร์มพ่นระไดซ์ไฟด์ภายในโมเลกุล และปฏิสัมพันธ์อันอ่อนโยนในอาหารประเภทอิมัลชัน อุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นนำไปสู่การเพิ่มการเคลื่อนที่เข้าหากันแบบบราวเนียน และมีความโน้มที่จะเพิ่มอัตราการเกาะกลุ่มกัน การให้ความร้อนเบื้องต้นก่อนผ่านกระบวนการโฮโมจิไนเซชันมีผลต่อสมบัติทางวิทยากระแสของอาหารประเภทอิมัลชัน อุณหภูมิในการให้ความร้อนเบื้องต้นมีผลต่อขนาดของครีโอล์ในช่วงการโฮโมจิไนเซชัน การให้ความร้อนแก่อิมัลชันจะปลดแรงดึงที่ผิวสัมผัสระหว่างภาคน้ำมันและน้ำ ทำให้เกิดครีโอล์ที่มีขนาดเล็กได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ อิมัลชันที่มีความเข้มข้นของน้ำมันมากกว่าจะส่งผลให้มีค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของครีโอล์ที่ใหญ่กว่าเมื่อใช้สภาวะในการโฮโมจิไนเซชันเหมือนกัน

Rynne et al. (2004) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการพาสเจอร์ไรซ์นม (72, 77, 82 และ 87 °C เป็นเวลา 25 วินาที) ต่อสมบัติทางวิทยากระแสของ half-fat cheddar cheese พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการพาสเจอร์ไรซ์จาก 72 °C เป็น 87 °C จะทำให้ความสามารถในการไหลของชีสลดลงและทำให้มีความหนืดปรากฏที่เพิ่มสูงขึ้น

Shaker, Jumah and Abu-Jdayil (2000) ได้ศึกษาผลของการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่นม (65 °C เป็นเวลา 30 นาที, 90 °C เป็นเวลา 3 นาที และ 137 °C เป็นเวลา 2 วินาที) ต่อสมบัติทาง

วิทยากระแสนของ plain yogurt พบว่านมที่ผ่านการให้ความร้อนที่ 137°C จะมีความหนืดมากที่สุด ในขณะที่นมที่ผ่านการให้ความร้อนที่ 65°C จะมีความหนืดต่ำสุด

Buccat, Gonzalez and Manalac (1973) ได้ศึกษาถึงผลของอุณหภูมิ ($10-80^{\circ}\text{C}$) ต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของน้ำกะทิ พบว่าความหนาแน่นและ pH ของน้ำกะทิจะแปรผกผันกับอุณหภูมิ ส่วนค่าแรงตึงผิว (surface tension) และความหนืดจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิจนถึง 60°C หลังจากนั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าแรงตึงผิวและความหนืดจะลดลง เป็นผลเนื่องมาจากโปรตีนเกิดการรวมตัวกันที่อุณหภูมิประมาณ 60°C อย่างไรก็ตามโปรตีนของน้ำกะทิจะรวมตัวกันทั้งหมดเมื่ออุณหภูมิถึง 80°C โปรตีนของน้ำกะทิทั้งหมด เช่น อัลบูมิน โกลบูลิน โปรลามีน และกลูเตลิน จะรวมตัวกันโดยความร้อนอย่างง่ายดาย และตกตะกอนที่ pH 4

จิตติมา เปี่ยมประสาธน์ (2547) ได้ศึกษาผลของการให้ความร้อนเบื้องต้น ($70, 80$ และ 90°C เป็นเวลา 1 นาที) ต่อความหนืดปรากฏของน้ำกะทิ (ปริมาณไขมัน 15, 20, 25 และ 30%) พบว่าที่ความเข้มข้นของไขมันระดับเดียวกัน ค่าความหนืดจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการให้ความร้อนเพิ่มมากขึ้น และปรากฏการณ์นี้จะเห็นผลชัดเจนมากขึ้นที่ความเข้มข้นของไขมันสูง

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น พบว่าการศึกษาทางด้านความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของอิมัลชันส่วนใหญ่จะทำในระบบอิมัลชันจำลอง และระบบอิมัลชันที่ไม่มีน้ำมันมะพร้าวหรือน้ำมันกะทิเป็นองค์ประกอบ และยังมีงานวิจัยเกี่ยวกับความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของระบบกะทิโดยตรงน้อยมาก ทำให้ขาดองค์ความรู้ที่จะนำไปใช้ในการแก้ปัญหาความไม่คงตัวหลังการละลายของกะทิและผลิตภัณฑ์กะทิที่ผ่านการแช่แข็ง ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีเป้าหมายที่จะศึกษาถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของกะทิอันได้แก่ ความเข้มข้นของน้ำตาล ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ ชนิดและความเข้มข้นของอิมัลซิไฟเออร์ และระดับการให้ความร้อนก่อนการแช่แข็ง

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัตถุดิบ

เนื้อมะพร้าวชนิดที่ปอกผิวแล้วจากอำเภอทับสะแก จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

3.2 สารผสมอาหาร (Food Ingredients)

- 3.2.1 น้ำตาลซูโครส (บริษัท รวมเกษตรกรอุตสาหกรรม จำกัด)
- 3.2.2 โซเดียมคลอไรด์ (บริษัท อุตสาหกรรมเกลือบริสุทธิ์ จำกัด)
- 3.2.3 โซเดียมเคซิเนต (Lactalis Ingredients, France)
- 3.2.4 Tween 60 (Lonza Inc., USA)

3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 3.3.1 เครื่องโฮโมจิไนเซอร์แบบ 2 ขั้นตอน (two-stage homogenizer) (APV, 15MR-8TA, Gaulin Corporation, USA)
- 3.3.2 เครื่องปั่นผสม (high speed blender) (Hitachi, Powerful Blender, Hitachi Co., Ltd., Japan)
- 3.3.3 เครื่องหมุนเหวี่ยงหาไขมัน (Gerber centrifuge) (Funke Gerber, Super Vario-N, Team Medical & Scientific Sdn. Bhd, Malaysia)
- 3.3.4 เครื่องวัดความหนืด (viscometer) (Brookfield, LVDV-I+, Brookfield Engineering Laboratories Inc., USA)
- 3.3.5 กล้องจุลทรรศน์ (Olympus, CHS, Japan) พร้อมกล้องถ่ายภาพ (Olympus, C-7070WZ, Japan)
- 3.3.6 เครื่องวัดการกระเจิงแสงเลเซอร์ (laser light scattering instrument) (Coulter, LS 100Q, USA)
- 3.3.7 ขวดหาความถ่วงจำเพาะ (pycnometer) ขนาด 10 ml
- 3.3.8 เทอร์โมมิเตอร์
- 3.3.9 pH meter (Orion, 420A+, 078789, Thermo Electron Corporation, USA)

3.3.10 เครื่องชั่งน้ำหนัก (AND, GX-4000, 14509421, Japan)

3.3.11 อุปกรณ์เครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการ

3.3.12 หม้อต้มไอน้ำสองชั้น (double-jacket steam kettle)

3.4 การทดลองเบื้องต้น (Preliminary Experiment)

3.4.1 การศึกษาการแช่แข็ง-ละลายของกะทิสด กะทิที่ผ่านการเติมน้ำในอัตราส่วน 1:1 และกะทิที่ผ่านการเติมน้ำในอัตราส่วน 1:1 แล้วนำไปผ่านการพาสเจอไรซ์

3.4.1.1 นำตัวอย่างกะทิที่ต้องการทดสอบบรรจุลงในขวดเก็บตัวอย่างขนาด 70 ml ตัวอย่างละ 2 ขวด ดังนี้

- กะทิสดไขมัน 36%v/v (ไม่ผ่านการโฮโมจิไนซ์)
- กะทิที่ผ่านการเติมน้ำในอัตราส่วน 1:1 (ไขมัน 18%v/v ไม่ผ่านการโฮโมจิไนซ์)
- กะทิที่ผ่านการเติมน้ำในอัตราส่วน 1:1 (ไขมัน 18%v/v) นำไปผ่านการพาสเจอไรซ์ในหม้อต้มไอน้ำสองชั้นที่อุณหภูมิ 74 °C เป็นเวลา 15 วินาที จากนั้นนำไปโฮโมจิไนซ์ด้วยเครื่องโฮโมจิไนเซอร์แบบ 2 ขั้นตอนที่มีความดัน (ขั้นที่1/ ขั้นที่2) 1500/500 psi แล้วบรรจุในขวดพลาสติก โดยปริมาตรที่บรรจุในแต่ละขวดคือ 60 ml จากนั้นนำไปทำให้เย็น จนกระทั่งตัวอย่างกะทิมีอุณหภูมิ 20 °C

3.4.1.2 นำตัวอย่างกะทิทั้งหมดใส่ช่องแช่แข็งในตู้เย็น (อุณหภูมิ -18 °C) ทิ้งไว้ 45 ชั่วโมง นำมาละลายในอ่างน้ำ (อุณหภูมิ 40 °C) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง วัดค่า %creaming index, %oiling off index, ลักษณะทางด้านกลิ่นรสของกะทิ

3.4.1.3 หลังจากตรวจสอบผลเสร็จแล้ว นำกะทิกลับไปแช่ที่ช่องแช่แข็งในตู้เย็น ทิ้งไว้ 45 ชั่วโมง นำมาละลายในอ่างน้ำ (อุณหภูมิ 40 °C) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง สังเกตผลที่ได้ แล้วนำกลับไปแช่แข็ง-ละลายจนกว่า %creaming index จะมีค่าคงที่หรือจนกว่ากะทิจะเสีย (กลิ่นรสผิดปกติ)

3.4.2 การศึกษาเวลาที่ใช้ในการเก็บรักษาของกะทิสด กะทิที่ผ่านการเติมน้ำในอัตราส่วน 1:1 และกะทิที่ผ่านการเติมน้ำในอัตราส่วน 1:1 แล้วนำไปผ่านการพาสเจอไรซ์

3.4.2.1 นำตัวอย่างกะทิที่ต้องการทดสอบบรรจุลงในขวดเก็บตัวอย่างขนาด 70 ml ตัวอย่างละ 2 ขวด ดังนี้

- กะทิสดไขมัน 36%v/v (ไม่ผ่านการโฮโมจิไนซ์)
- กะทิที่ผ่านการเติมน้ำในอัตราส่วน 1:1 (ไขมัน 18%v/v ไม่ผ่านการโฮโมจิไนซ์)

- กะทิที่ผ่านการเติมน้ำในอัตราส่วน 1:1 (ไขมัน 18%v/v) นำไปผ่านการพาสเจอไรซ์ในหม้อต้มไอน้ำสองชั้นที่อุณหภูมิ 74 °C เป็นเวลา 15 วินาที จากนั้นนำไปโฮโมจิไนซ์ด้วยเครื่องโฮโมจิไนเซอร์แบบ 2 ขั้นตอนที่มีความดัน 1500/500 psi แล้วบรรจุในขวดพลาสติก โดยปริมาตรที่บรรจุในแต่ละขวดคือ 60 ml จากนั้นนำไปทำให้เย็น จนกระทั่งตัวอย่างกะทิมีอุณหภูมิ 20 °C

3.4.2.2 นำตัวอย่างกะทิทั้งหมดใส่ช่องแช่แข็งในตู้เย็น (อุณหภูมิ -18 °C) ทำการสังเกตผลทุกๆ 2 สัปดาห์ โดยนำตัวอย่างกะทิ 3 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 1 ขวด (รวม 3 ขวด) ออกจากตู้เย็นมาละลายในอ่างน้ำ (อุณหภูมิ 40 °C) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง วัดค่า %creaming index, %oiling off index, ลักษณะทางด้านกลิ่นรสของกะทิ

3.4.3 ศึกษาหาเวลาที่เหมาะสมในการแช่แข็ง-ละลายเพื่อจะนำไปใช้กำหนดเวลาที่จะนำตัวอย่างกะทิที่ผ่านการแช่แข็งมาทำการละลาย โดยทำการศึกษากับกะทิที่ผ่านการเติมน้ำในอัตราส่วน 1:1 และกะทิที่ผ่านการเติมน้ำในอัตราส่วน 1:1 แล้วนำไปผ่านการพาสเจอไรซ์

3.4.3.1 นำตัวอย่างกะทิที่ต้องการทดสอบบรรจุลงในขวดเก็บตัวอย่างขนาด 70 ml ตัวอย่างละ 2 ขวด ดังนี้

- กะทิที่ผ่านการเติมน้ำในอัตราส่วน 1:1 (ไขมัน 18%v/v ไม่ผ่านการโฮโมจิไนซ์)
- กะทิที่ผ่านการเติมน้ำในอัตราส่วน 1:1 (ไขมัน 18%v/v) นำไปผ่านการพาสเจอไรซ์ในหม้อต้มไอน้ำสองชั้นที่อุณหภูมิ 74 °C เป็นเวลา 15 วินาที จากนั้นนำไปโฮโมจิไนซ์ด้วยเครื่องโฮโมจิไนเซอร์แบบ 2 ขั้นตอนที่มีความดัน 1500/500 psi แล้วบรรจุในขวดพลาสติก โดยปริมาตรที่บรรจุในแต่ละขวดคือ 60 ml จากนั้นนำไปทำให้เย็น จนกระทั่งตัวอย่างกะทิมีอุณหภูมิ 20 °C

3.4.3.2 นำตัวอย่างกะทิทั้งหมดใส่ช่องแช่แข็งในตู้เย็น(อุณหภูมิ -18 °C) ทิ้งไว้ที่เวลา 21, 45, 69, 93, 117, 141 และ 165 ชั่วโมง จากนั้นนำมาละลายในอ่างน้ำ (อุณหภูมิ 40 °C) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำตัวอย่างวัดค่า %creaming index, %oiling off index, ลักษณะทางด้านกลิ่นรสของกะทิ

3.4.3.3 สังเกตผลที่ได้ทุกวันจนกว่า %creaming index จะมีค่าคงที่หรือจนกว่ากะทิจะเสีย (กลิ่นรสผิดปกติ) ทดลองเป็นเวลา 7 วัน

3.5 การศึกษาความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสที่มีผลต่อความคงตัวต่อการแช่แข็งและละลายของกะทิ

โดยใช้น้ำตาลซูโครสความเข้มข้น 10, 20, 30 และ 40%w/v

3.5.1 นำกะทิที่ผ่านการปรับไขมันเป็น 18%v/v ไปผ่านการพาสเจอร์ไรซ์ในหม้อต้มไอน้ำสองชั้นที่อุณหภูมิ 74 °C เป็นเวลา 15 วินาที จากนั้นนำไปผ่านการโฮโมจิไนซ์ด้วยเครื่องโฮโมจิไนเซอร์แบบ 2 ขั้นตอนที่มีความดัน 1500/500 psi

3.5.2 บรรจุตัวอย่างกะทิที่ได้ใส่ขวดพลาสติกขนาด 70 ml ทำเป็น control (ไม่เติมน้ำตาล) 2 ขวด โดยปริมาตรที่บรรจุในแต่ละขวดคือ 60 ml จากนั้นนำไปทำให้เย็นจนกระทั่งตัวอย่างกะทิตีมีอุณหภูมิ 20 °C

3.5.3 นำกะทิที่ผ่านการปรับไขมันเป็น 18.5, 19.5, 21 และ 22.5%v/v ไปผ่านการพาสเจอร์ไรซ์ในหม้อต้มไอน้ำสองชั้นที่อุณหภูมิ 74 °C เป็นเวลา 15 วินาที จากนั้นนำไปผ่านการโฮโมจิไนซ์ด้วยเครื่องโฮโมจิไนเซอร์แบบ 2 ขั้นตอนที่มีความดัน 1500/500 psi

3.5.4 เติมน้ำตาลซูโครสความเข้มข้น 10, 20, 30 และ 40%w/v ลงในตัวอย่างกะทิไขมัน 18.5, 19.5, 21 และ 22.5%v/v จะได้ตัวอย่างกะทิที่มีปริมาณไขมันหลังเติมน้ำตาลซูโครสแล้วเท่ากับ 18%v/v ทุกตัวอย่าง (ตัวอย่างการคำนวณอยู่ในภาคผนวก ก) ทำการวิเคราะห์ปริมาณไขมันในกะทิที่เตรียมได้ (Gerber method) เพื่อยืนยันว่ากะทิทุกตัวอย่างมีปริมาณไขมัน 18%v/v

การเติมน้ำตาลซูโครสลงในตัวอย่างกะทิจะเติมหลังผ่านการโฮโมจิไนซ์ เพื่อควบคุมไม่ให้เกิดการเติมซูโครสส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการโฮโมจิไนซ์

3.5.5 บรรจุตัวอย่างกะทิที่ได้ใส่ขวดพลาสติกขนาด 70 ml ความเข้มข้นละ 2 ขวด โดยปริมาตรที่บรรจุในแต่ละขวดคือ 60 ml จากนั้นนำไปทำให้เย็นจนกระทั่งตัวอย่างกะทิตีมีอุณหภูมิ 20 °C

3.5.6 นำตัวอย่างกะทิทั้งหมดใส่ช่องแช่แข็งในตู้เย็น (อุณหภูมิ -18 °C) ทิ้งไว้ 45 ชั่วโมง นำมาละลายในอ่างน้ำ (อุณหภูมิ 40 °C) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำตัวอย่างกะทิไปวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (Gerber method) แล้วทำการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

- ลักษณะจุลภาคของครีโอล้างด้วยกล้องจุลทรรศน์
- ขนาดอนุภาค (particle size) ด้วย laser light scattering instrument
- %creaming index (Onsaard et al., 2005)
- %oiling off index
- ความหนืดด้วยเครื่องวัดความหนืด
- ความหนาแน่นของวัฏภาคน้ำและน้ำมันโดยใช้ขวดหาความถ่วงจำเพาะ

3.6 การศึกษาความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่มีผลต่อความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของกะทิ

โดยใช้โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1, 2, 3 และ 4%w/v

3.6.1 นำกะทิที่ผ่านการปรับไขมันเป็น 18%v/v ไปผ่านการพาสเจอร์ไรซ์ในหม้อต้มไอน้ำสองชั้นที่อุณหภูมิ 74 °C เป็นเวลา 15 วินาที จากนั้นนำไปผ่านการโฮโมจิไนซ์ด้วยเครื่องโฮโมจิไนเซอร์แบบ 2 ขั้นตอนที่มีความดัน 1500/500 psi

3.6.2 บรรจุตัวอย่างกะทิที่ได้ใส่ขวดพลาสติกขนาด 70 ml ทำเป็น control (ไม่เติมโซเดียมคลอไรด์) 2 ขวด โดยปริมาตรที่บรรจุในแต่ละขวดคือ 60 ml จากนั้นนำไปทำให้เย็นจนกระทั่งตัวอย่างกะทิจมีอุณหภูมิ 20 °C

3.6.3 นำกะทิที่ผ่านการปรับไขมันเป็น 18%v/v ไปผ่านการพาสเจอร์ไรซ์ในหม้อต้มไอน้ำสองชั้นที่อุณหภูมิ 74 °C เป็นเวลา 15 วินาที จากนั้นนำไปผ่านการโฮโมจิไนซ์ด้วยเครื่องโฮโมจิไนเซอร์แบบ 2 ขั้นตอนที่มีความดัน 1500/500 psi

3.6.4 เติมโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1, 2, 3 และ 4%w/v ลงในตัวอย่างกะทิ จะได้ตัวอย่างกะทิที่มีปริมาณไขมันหลังเติมโซเดียมคลอไรด์แล้วเท่ากับ 18%v/v ทุกตัวอย่าง (ตัวอย่างการคำนวณอยู่ในภาคผนวก ก) ทำการวิเคราะห์ปริมาณไขมันในกะทิที่เตรียมได้ (Gerber method) เพื่อยืนยันว่ากะทิทุกตัวอย่างมีปริมาณไขมัน 18%v/v

การเติมโซเดียมคลอไรด์ลงในตัวอย่างกะทิจะเติมหลังผ่านการโฮโมจิไนซ์ เพื่อควบคุมไม่ให้เกิดการเติมโซเดียมคลอไรด์ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการโฮโมจิไนซ์

3.6.5 บรรจุตัวอย่างกะทิที่ได้ใส่ขวดพลาสติกขนาด 70 ml ความเข้มข้นละ 2 ขวด โดยปริมาตรที่บรรจุในแต่ละขวดคือ 60 ml จากนั้นนำไปทำให้เย็นจนกระทั่งตัวอย่างกะทิจมีอุณหภูมิ 20 °C

3.6.6 นำตัวอย่างกะทิทั้งหมดใส่ช่องแช่แข็งในตู้เย็น(อุณหภูมิ -18 °C) ทิ้งไว้ 45 ชั่วโมง นำมาละลายในอ่างน้ำ (อุณหภูมิ 40 °C) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำตัวอย่างกะทิไปวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (Gerber method) แล้วทำการวิเคราะห์เช่นเดียวกับข้อ 3.5.6

3.7 การศึกษาชนิดและความเข้มข้นของอิมัลซิไฟเออร์ที่มีผลต่อความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลาย

ของกะทิ โดยใช้โซเดียมเลซิเนทความเข้มข้น 0.3, 0.5 และ 0.7%w/v และใช้ Tween 60 ความเข้มข้น 0.1, 0.3 และ 0.5%w/v

3.7.1 นำกะทิที่ผ่านการปรับไขมันเป็น 18%v/v ไปผ่านการพาสเจอร์ไรซ์ในหม้อต้มไอน้ำสองชั้นที่อุณหภูมิ 74 °C เป็นเวลา 15 วินาที จากนั้นนำไปผ่านการโฮโมจิไนซ์ด้วยเครื่องโฮโมจิไนเซอร์แบบ 2 ขั้นตอนที่มีความดัน 1500/500 psi

3.7.2 บรรจุตัวอย่างกะทิที่ได้ใส่ขวดพลาสติกขนาด 70 ml ทำเป็น control (ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์) 2 ขวด โดยปริมาตรที่บรรจุในแต่ละขวดคือ 60 ml จากนั้นนำไปทำให้เย็นจนกระทั่งตัวอย่างกะทิมีอุณหภูมิ 20 °C

3.7.3 นำกะทิที่ผ่านการปรับไขมันเป็น 18%v/v ไปผ่านการพาสเจอร์ไรซ์ในหม้อต้มไอน้ำสองชั้นที่อุณหภูมิ 74 °C เป็นเวลา 15 วินาที

3.7.4 เติมโซเดียมเคซิเนทความเข้มข้น 0.3, 0.5, 0.7%w/v หรือ Tween 60 ความเข้มข้น 0.1, 0.3 และ 0.5%w/v ลงในตัวอย่างกะทิ ปั่นผสมด้วย high speed blender เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นนำไปผ่านการโฮโมจิไนซ์ด้วยเครื่องโฮโมจิไนเซอร์แบบ 2 ขั้นตอนที่มีความดัน 1500/500 psi จะได้ตัวอย่างกะทิที่มีปริมาณไขมันหลังเติมอิมัลซิไฟเออร์แล้วเท่ากับ 18%v/v ทุกตัวอย่าง (ตัวอย่างการคำนวณอยู่ในภาคผนวก ก) ทำการวิเคราะห์ปริมาณไขมันในกะทิที่เตรียมได้ (Gerber method) เพื่อยืนยันว่ากะทิทุกตัวอย่างมีปริมาณไขมัน 18%v/v

การเติมอิมัลซิไฟเออร์ลงในตัวอย่างกะทิจะเติมก่อนผ่านการโฮโมจิไนซ์ เพื่อให้อิมัลซิไฟเออร์ถูกดูดซับที่พื้นผิวของครีโอลีตได้อย่างเต็มที่ในช่วงของการโฮโมจิไนซ์

3.7.5 บรรจุตัวอย่างกะทิที่ได้ใส่ขวดพลาสติกขนาด 70 ml ความเข้มข้นละ 2 ขวด โดยปริมาตรที่บรรจุในแต่ละขวดคือ 60 ml จากนั้นนำไปทำให้เย็นจนกระทั่งตัวอย่างกะทิมีอุณหภูมิ 20 °C

3.7.6 นำตัวอย่างกะทิทั้งหมดใส่ช่องแช่แข็งในตู้เย็น(อุณหภูมิ -18 °C) ทิ้งไว้ 45 ชั่วโมง นำมาละลายในอ่างน้ำ (อุณหภูมิ 40 °C) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำตัวอย่างกะทิไปวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (Gerber method) แล้วทำการวิเคราะห์เช่นเดียวกับข้อ 3.5.6

3.8 การศึกษาระดับการให้ความร้อนก่อนการแช่แข็ง โดยใช้ระดับความร้อนที่ 70, 80 และ 90 °C

3.8.1 นำกะทิที่ผ่านการปรับไขมันเป็น 18%v/v ไปผ่านการโฮโมจิไนซ์ด้วยเครื่องโฮโมจิไนเซอร์แบบ 2 ขั้นตอนที่มีความดัน 1500/500 psi

3.8.2 บรรจุตัวอย่างกะทิที่ได้ใส่ขวดพลาสติกขนาด 70 ml ทำเป็น control (ไม่ผ่านการให้ความร้อน) 2 ขวด โดยปริมาตรที่บรรจุในแต่ละขวดคือ 60 ml จากนั้นนำไปทำให้เย็นจนกระทั่งตัวอย่างกะทิมีอุณหภูมิ 20 °C

3.8.3 นำกะทิที่ผ่านการปรับไขมันเป็น 18%v/v ไปผ่านการให้ความร้อนในหม้อต้มไอน้ำสองชั้นที่อุณหภูมิ 70, 80 และ 90 °C เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นนำไปผ่านการโฮโมจิไนซ์ด้วยเครื่องโฮโมจิไนเซอร์แบบ 2 ขั้นตอนที่มีความดัน 1500/500 psi

3.8.4 บรรจุตัวอย่างกะทิที่ได้ใส่ขวดพลาสติกขนาด 70 ml ความเข้มข้นละ 2 ขวด โดย

ปริมาตรที่บรรจุในแต่ละขวดคือ 60 ml จากนั้นนำไปทำให้เย็นจนกระทั่งตัวอย่างกะทิมีอุณหภูมิ 20 °C

3.8.5 นำตัวอย่างกะทิทั้งหมดใส่ช่องแช่แข็งในตู้เย็น(อุณหภูมิ -18 °C) ทิ้งไว้ 45 ชั่วโมง นำมาละลายในอ่างน้ำ (อุณหภูมิ 40 °C) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำตัวอย่างกะทิไปวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (Gerber method) แล้วทำการวิเคราะห์เช่นเดียวกับข้อ 3.5.6

3.9 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบ CRD ทดสอบความแปรปรวนของข้อมูลแบบ One-way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 เปอร์เซนต์ ($\alpha = 0.05$) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Tukey โดยใช้โปรแกรม Minitab 14

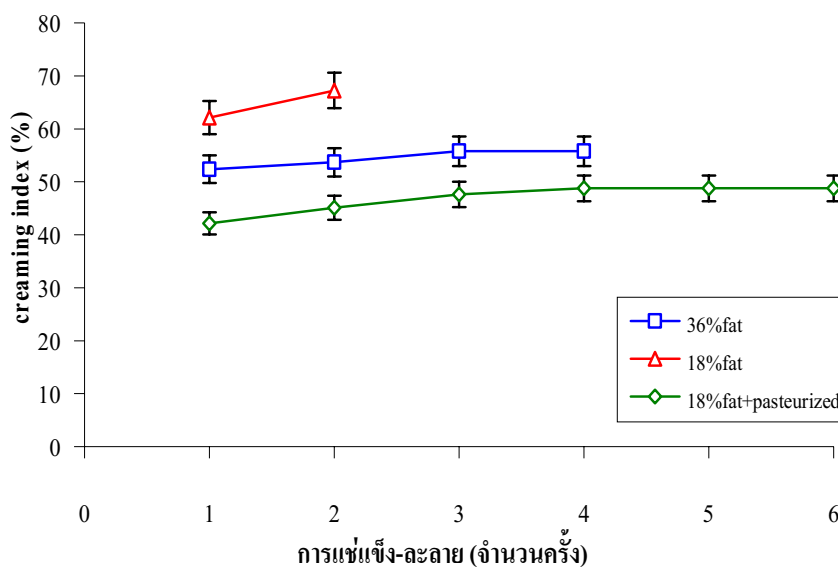
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 การทดลองเบื้องต้น

4.1.1 การศึกษาการแช่แข็ง-ละลาย

จากผลการศึกษาการแช่แข็ง-ละลาย (ภาพที่ 20) พบว่ากะทิไขมัน 18% จะเน่าเสียเร็วที่สุด โดยจะได้กลิ่นเหม็นเปรี้ยวหลังผ่านการแช่แข็ง-ละลาย 2 ครั้ง กะทิไขมัน 36% จะได้กลิ่นเหม็นเปรี้ยวหลังจากผ่านการแช่แข็ง-ละลาย 4 ครั้ง ส่วนกะทิไขมัน 18% ที่ผ่านการพาสเจอไรซ์ แม้ว่าจะผ่านการแช่แข็ง-ละลายถึง 6 ครั้งก็ยังคงมีกลิ่นหอมของกะทิลงเหลืออยู่ กะทิไขมัน 36% หลังผ่านการแช่แข็ง-ละลาย 3 ครั้ง ชั่นน้ำจะเริ่มมีสีออกเหลืองๆ ในขณะที่กะทิไขมัน 18% และกะทิไขมัน 18% ที่ผ่านการพาสเจอไรซ์ชั่นน้ำยังคงมีสีปกติ



ภาพที่ 20 ค่า %creaming index ของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการแช่แข็ง-ละลายที่จำนวนครั้งต่างๆ

ค่า %creaming index ของกะทิไขมัน 18% ที่ผ่านการพาสเจอไรซ์จะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงการแช่แข็ง-ละลายครั้งที่ 4 จากนั้นจะมีค่าคงที่ตั้งแต่การแช่แข็ง-ละลายครั้งที่ 5 จนถึงการแช่แข็ง-

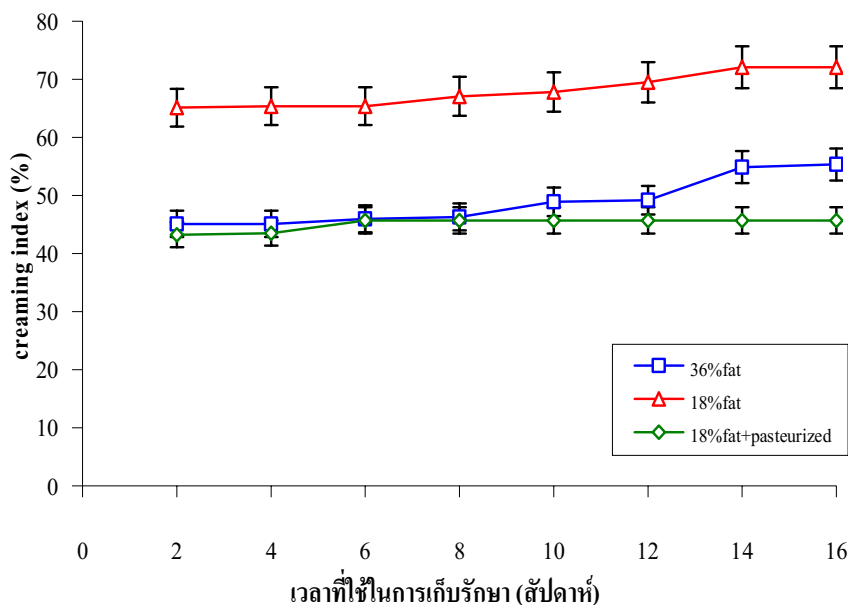
ละลายครั้งที่ 6 ในขณะที่กะทิไขมัน 18% ที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนค่า %creaming index จะมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนกะทิไขมัน 36% ที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนค่า %creaming index จะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงการแช่แข็ง-ละลายครั้งที่ 3 และในการแช่แข็ง-ละลายครั้งที่ 4 จะเริ่มมีค่าคงที่

การที่กะทิไขมัน 18% เน่าเสียเร็วที่สุดเพราะมีการเติมน้ำเพื่อปรับไขมัน ซึ่งในน้ำที่ใช้ในการปรับไขมันอาจมีจุลินทรีย์ปนเปื้อนอยู่ ทำให้กะทิมีปริมาณจุลินทรีย์มากที่สุดใน 3 ตัวอย่าง กะทิจึงเกิดการเน่าเสียเร็วที่สุด ในขณะที่ตัวอย่างกะทิที่มีปริมาณไขมันเท่ากันคือ ไขมัน 18% แต่ผ่านการให้ความร้อนระดับพาสเจอร์ไรซ์ ทำให้มีการทำลายจุลินทรีย์ไปบางส่วน กะทิจึงเน่าเสียช้าที่สุด %creaming index ของกะทิไขมัน 18% ที่ผ่านการให้ความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงแรกอย่างต่อเนื่อง โดยในช่วงการแช่แข็ง-ละลาย 1-3 ครั้ง การแยกชั้นจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่วนในช่วงการแช่แข็ง-ละลายครั้งที่ 3-4 จะพบว่า %creaming index เริ่มมีแนวโน้มคงที่ และเมื่อผ่านการแช่แข็ง-ละลายไป 4 ครั้งการแยกชั้นเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ %creaming index จึงมีค่าคงที่ แม้ว่า จะผ่านการแช่แข็ง-ละลายอีก 2 ครั้งก็ไม่เกิดการแยกชั้นเพิ่มมากขึ้น ส่วนกะทิไขมัน 36% ที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนถึงแม้ว่าค่า %creaming index จะเริ่มมีค่าคงที่หลังผ่านการแช่แข็ง-ละลาย 4 ครั้ง แต่ก็ส่งผลให้เกิดกลิ่นเหม็นเปรี้ยวเกิดขึ้นด้วย

4.1.2 การศึกษาเวลาที่ใช้ในการเก็บรักษาตัวอย่างกะทิ

จากผลการศึกษาเวลาที่ใช้ในการเก็บรักษาตัวอย่างกะทิ (ภาพที่ 21) พบว่ากะทิไขมัน 18% จะเริ่มเกิดการเน่าเสียหลังผ่านการแช่แข็งเป็นเวลา 2 สัปดาห์สังเกตได้จากการที่เริ่มได้กลิ่นหืนและค่า pH ของกะทิที่ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด (เกณฑ์ที่กำหนดของทางบริษัทคือ pH ต้องมีค่ามากกว่า 6.0) และเริ่มได้กลิ่นเหม็นเปรี้ยวหลังจากผ่านการแช่แข็งเป็นเวลา 8 สัปดาห์ ส่วนกะทิไขมัน 36% จะเริ่มได้กลิ่นหืนและมีค่า pH ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดเมื่อผ่านการแช่แข็งเป็นเวลา 4 สัปดาห์ และเริ่มได้กลิ่นเหม็นเปรี้ยวหลังจากผ่านการแช่แข็งเป็นเวลา 10 สัปดาห์ สีของกะทิไขมัน 36 % หลังผ่านการแช่แข็งเป็นเวลา 2 สัปดาห์ ชื้นน้ำจะเริ่มมีสีออกเหลืองๆ ในขณะที่กะทิไขมัน 18% และกะทิไขมัน 18% ที่ผ่านการพาสเจอร์ไรซ์ ชื้นน้ำยังคงมีสีปกติ ส่วนกะทิไขมัน 18% ที่ผ่านการพาสเจอร์ไรซ์พบว่าถึงแม้ว่าจะผ่านการแช่แข็งเป็นเวลา 16 สัปดาห์ (4 เดือน) แล้วนำมาละลาย กะทิก็กยังไม่เกิดการเน่าเสีย สังเกตได้จากการที่กะทียังคงมีกลิ่นคล้ายกะทิสดอยู่ ถึงแม้ว่ากลิ่นจะเริ่มจางลงหลังจากแช่แข็งเป็นเวลานานขึ้น แต่ก็ยังไม่พบกลิ่นหืนในกะทิ และค่า pH ที่วัดได้ก็ยังคงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดอยู่ (pH มากกว่า 6.0) แต่ pH มีแนวโน้มที่จะลดลงตามเวลาการแช่แข็งที่นานขึ้น ซึ่งการที่กะทียังไม่เกิดการเน่าเสียน่าจะเป็นเพราะกะทิผ่านการฆ่าเชื้อด้วยความร้อนในระดับพาสเจอร์ไรซ์ ทำให้เชื้อจุลินทรีย์บางส่วนถูกทำลาย ส่วนจุลินทรีย์ที่ยังคงเหลือรอดอยู่ก็

ถูกยับยั้งการเจริญเติบโตด้วยการแช่แข็ง ทำให้กะทิยังคงความสดอยู่แม้ว่าจะผ่านการเก็บรักษาด้วยการแช่แข็งเป็นเวลา 4 เดือนแล้วก็ตาม



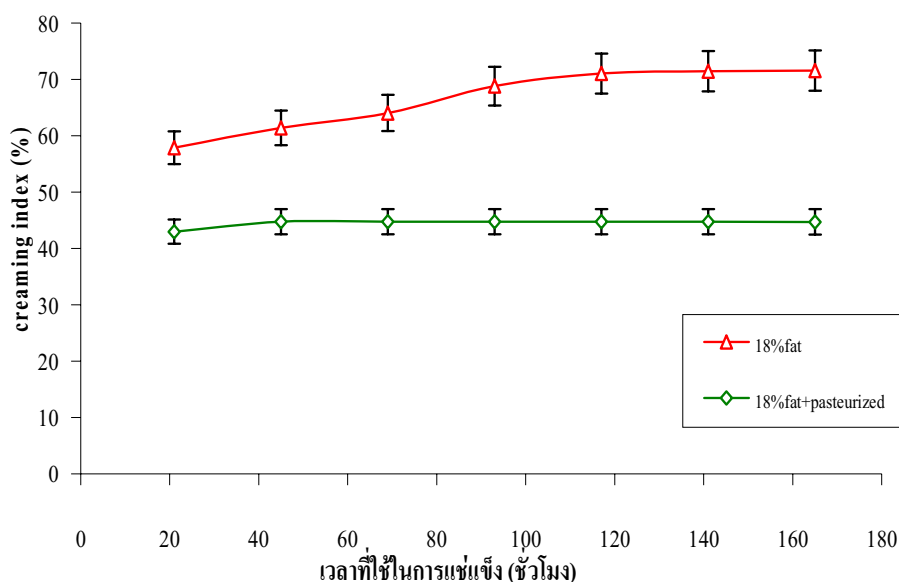
ภาพที่ 21 ค่า %creaming index ของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเก็บรักษาที่เวลาต่างๆ

ค่า %creaming index ของตัวอย่างกะทิล้างผ่านการแช่แข็ง-ละลายเป็นเวลา 16 สัปดาห์ พบว่า %creaming index ของกะทิไขมัน 36% และ 18% จะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการเก็บรักษา ในขณะที่กะทิไขมัน 18% ที่ผ่านการพาสเจอร์ไรส์ ค่า %creaming index จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเก็บรักษาจนถึงสัปดาห์ที่ 4 และจะเริ่มมีค่าคงที่หลังจากผ่านการเก็บรักษาเป็นเวลา 6 สัปดาห์ เป็นต้นไป โดยค่า %creaming index ของตัวอย่างกะทิไขมัน 18% จะมีค่ามากกว่ากะทิไขมัน 18% ที่ผ่านการพาสเจอร์ไรส์และกะทิไขมัน 36% เนื่องจากกะทิไขมัน 18% ผ่านการเติมน้ำในอัตราส่วน 1:1 และไม่ได้ผ่านการโฮโมจิไนซ์ทำให้มีความคงตัวน้อยกว่าจึงเกิดการแยกชั้นได้มากกว่า ส่วนกะทิไขมัน 18% ที่ผ่านการพาสเจอร์ไรส์นั้นผ่านการโฮโมจิไนซ์ทำให้เนื้อกะทิตงความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่า จึงเกิดการแยกชั้นช้ากว่ากะทิไขมัน 18% ที่ไม่ผ่านการโฮโมจิไนซ์ ส่วนกะทิไขมัน 36% เป็นกะทิสดที่ไม่ผ่านการเติมน้ำจึงเกิดการแยกชั้นได้ช้า โดยจะพบว่ากะทิไขมัน 18% ที่ผ่านการพาสเจอร์ไรส์และการโฮโมจิไนซ์จะมีค่า %creaming index ต่ำกว่ากะทิไขมัน 36% เล็กน้อย แสดงว่าแม้ว่าจะมีการเติมน้ำลงไปในกะทิเพื่อทำการปรับไขมัน แต่การที่ตัวอย่าง

กะทิผ่านการโฮมจิโนซ์ช่วยให้เนื้อกะทิตั้งความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่า จึงเกิดการแยกชั้นช้ากว่า กะทิไขมัน 36%

4.1.3 การศึกษาหาเวลาที่เหมาะสมที่จะใช้ในการแช่แข็งตัวอย่างกะทิ

จากผลการศึกษาหาเวลาที่เหมาะสมในการแช่แข็งตัวอย่างกะทิ (ภาพที่ 22) พบว่ากะทิ ไขมัน 18% จะเริ่มเกิดการเน่าเสียหลังผ่านการแช่แข็งเป็นเวลา 21 ชั่วโมงสังเกตได้จากการที่เริ่มได้กลิ่นหืน และค่า pH ของกะทิที่ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด (เกณฑ์ที่กำหนดของทางบริษัทคือ pH ต้องมีค่ามากกว่า 6.0) และเมื่อผ่านการแช่แข็งเป็นเวลา 69 ชั่วโมงจะเริ่มได้กลิ่นเหม็นเปรี้ยว ส่วนกะทิ ไขมัน 18% ที่ผ่านการพาสเจอไรซ์พบว่าถึงแม้ว่าจะผ่านการแช่แข็งเป็นเวลาถึง 165 ชั่วโมงแล้ว นามาละลาย กะทียังไม่เกิดการเน่าเสีย สังเกตได้จากการที่กะทียังคงมีกลิ่นคล้ายกะทิสดอยู่ ถึงแม้ว่ากลิ่นจะเริ่มจางลงหลังจากแช่แข็งเป็นเวลานานขึ้น แต่ก็ยังไม่พบกลิ่นหืนในกะทิ และค่า pH ที่วัดได้ก็ยังคงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดอยู่ (pH มากกว่า 6.0) แต่ pH มีแนวโน้มที่จะลดลงตาม เวลาการแช่แข็งที่นานขึ้น ซึ่งการที่กะทียังไม่เกิดการเน่าเสียน่าจะเป็นเพราะกะทิผ่านการฆ่าเชื้อ ด้วยความร้อนในระดับพาสเจอไรซ์ ทำให้เชื้อจุลินทรีย์บางส่วนถูกทำลาย ส่วนจุลินทรีย์ที่ยังคง เหลือรอดอยู่ก็ถูกยับยั้งการเจริญเติบโตด้วยการแช่แข็ง ทำให้กะทียังคงความสดอยู่แม้ว่าจะผ่านไป หลายวันแล้วก็ตาม



ภาพที่ 22 ค่า %creaming index ของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการแช่แข็งที่เวลาต่างๆ

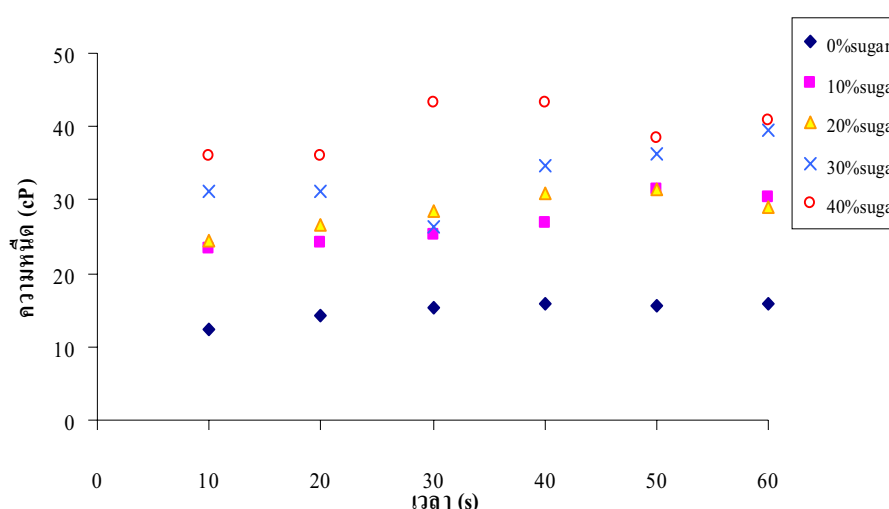
ค่า %creaming index หลังผ่านการแช่แข็งที่เวลาต่างๆ พบว่า %creaming index ของกะทิไขมัน 18% มีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการแช่แข็งเป็นเวลา 21-165 ชั่วโมง ในขณะที่ค่า %creaming index ของกะทิไขมัน 18% ที่ผ่านการพาสเจอร์ไรซ์จะเพิ่มขึ้นหลังจากผ่านการแช่แข็งเป็นเวลา 21-45 ชั่วโมง และมีแนวโน้มที่จะมีค่าคงที่หลังจากผ่านการแช่แข็งเป็นเวลา 69-165 ชั่วโมง การที่ %creaming index ของตัวอย่างกะทิไขมัน 18% ที่ผ่านการพาสเจอร์ไรซ์มีค่าต่ำกว่าตัวอย่างกะทิไขมัน 18% อาจจะเนื่องมาจากตัวอย่างกะทิไขมัน 18% ที่ผ่านการพาสเจอร์ไรซ์นั้นผ่านการโฮโมจิไนซ์ทำให้เนื้อกะทิตั้งความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่า จึงเกิดการแยกชั้นช้ากว่ากะทิไขมัน 18% ที่ไม่ผ่านการโฮโมจิไนซ์

จากการทดลองเบื้องต้นในหัวข้อที่ 4.1.1 พบว่ากะทิไขมัน 18% ที่ผ่านการพาสเจอร์ไรซ์ แม้ว่าจะผ่านการแช่แข็ง-ละลายถึง 6 ครั้ง ก็ยังคงมีกลิ่น-รสของกะทิเหลืออยู่ โดยที่ยังไม่เกิดการเน่าเสีย และในการทดลองในหัวข้อที่ 4.1.2 ก็ยังพบว่าแม้ว่าจะผ่านการแช่แข็งเป็นเวลาถึง 4 เดือน กะทิก็ยังคงมีกลิ่น-รสปกติ และค่า pH ที่วัดได้ก็ยังไม่ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด จึงได้เลือกตัวอย่างกะทิไขมัน 18 % ที่ผ่านการพาสเจอร์ไรซ์ที่อุณหภูมิ 74 °C เป็นเวลา 15 วินาที จากนั้นนำไปโฮโมจิไนซ์ที่ความดัน 1500/500 psi มาใช้ในการศึกษาความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครส โซเดียมคลอไรด์ ชนิดและความเข้มข้นอิมัลซิไฟเออร์ ที่มีผลต่อความคงตัวต่อการแช่แข็งละลายของกะทิ ส่วนในการทดลองในหัวข้อ 4.1.3 พบว่าเวลาที่เหมาะสมที่จะทำการศึกษาความคงตัวต่อการแช่แข็งและละลายของกะทิคือ ทำการแช่แข็ง (อุณหภูมิ -18°C) เป็นเวลา 45 ชั่วโมง จากนั้นนำมาทำการละลายในอ่างน้ำ (อุณหภูมิ 40 °C) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

4.2 การศึกษาความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสที่มีผลต่อความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของกะทิ

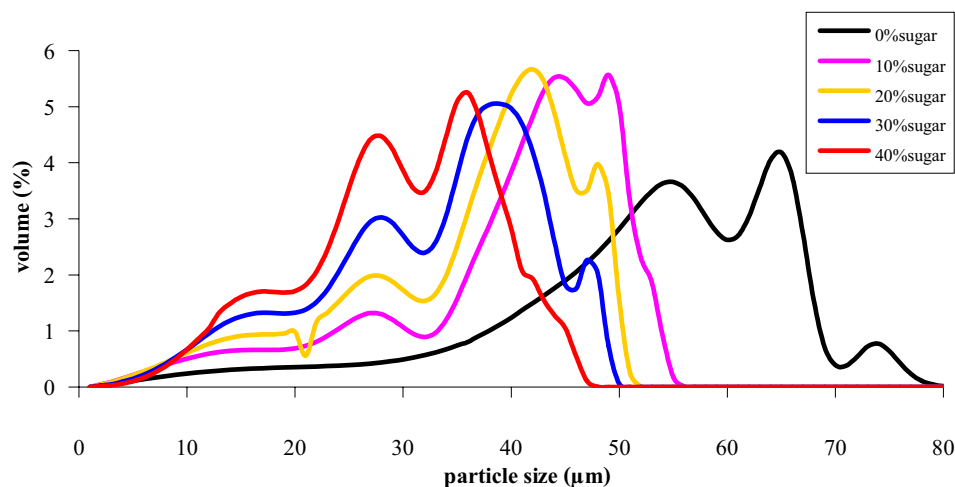
เมื่อนำตัวอย่างกะทิแช่แข็งที่ผ่านการเติมน้ำตาลซูโครสที่ระดับความเข้มข้นต่างๆมาทำการละลาย พบว่าค่า %creaming index มีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลเพิ่มมากขึ้น (ตารางที่ 3) เนื่องจากน้ำตาลทำหน้าที่เป็น cryoprotectant ทำให้ส่วนที่ไม่แข็งตัวในชั้นน้ำเพิ่มขึ้นตลอดช่วงการแช่แข็ง (Walstra, 2003) ช่วยลดผลกระทบของ freeze concentration ในอิมัลชัน ช่วยลดอัตราการโตของผลึกน้ำแข็ง (Hartel, 2001) ทำให้เม็ดไขมันเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันช้าลง และช่วยลดการเกิดผลึกที่จะทิ่มทำลายทะเลวมเบรนนที่หุ้มครีโอลีท ทำให้กะทิมีความคงตัวมากขึ้น ส่งผลให้ค่า %creaming index ที่วัดได้มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลที่เติมลงในตัวอย่างกะทิเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาในด้านลักษณะปรากฏของกะทิ จะพบว่าเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลเพิ่มมากขึ้นจะทำให้กะทิมีกลิ่นรสหวานมากขึ้น สีของตัวอย่างกะทิจะมีสีออกเหลืองมากขึ้น โดยตัวอย่างที่เติมน้ำตาล 40%w/v จะมีกลิ่นรสหวานมากที่สุด และจะมีสีออกเหลืองมากที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการเติมน้ำตาล (control) pH ของตัวอย่างกะทิจะมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อมีการเติมน้ำตาลมากขึ้น (ตารางที่ 3) แต่ pH ที่วัดได้ยังคงมีค่าใกล้เคียงกับ control และยังคงมีค่ามากกว่า 6 แสดงว่ากะทียังไม่เกิดการเน่าเสียหลังผ่านการเติมน้ำตาลและผ่านการแช่แข็งเป็นเวลา 45 ชั่วโมง



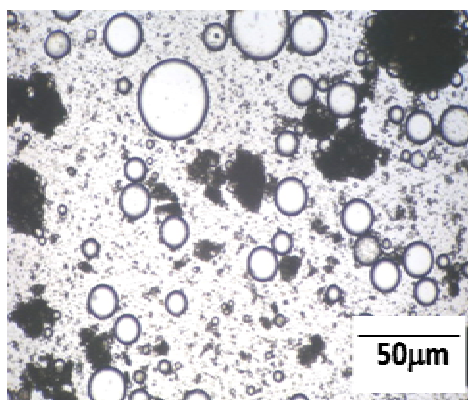
ภาพที่ 23 ค่าความหนืดของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติมน้ำตาลซูโครสที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาต่างๆ

จากภาพที่ 23 จะพบว่าค่าความหนืดของกะทิมีกลักษณะที่คล้ายกันคือความหนืดจะมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลา จัดเป็นของไหลนอนนิวโตเนียน โดยกะทิที่ผ่านการเติมน้ำตาลซูโครส 40%w/v จะมีค่าความหนืดมากที่สุด เมื่อนำค่าความหนืดที่วัด ณ เวลาต่างๆ มาหาค่าเฉลี่ย จะได้ผลดังแสดงตารางที่ 3 ซึ่งจะพบว่าเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลเพิ่มมากขึ้น จะทำให้กะทิมีกความหนืดเพิ่มขึ้น อันเป็นผลเนื่องมาจากการที่มีน้ำตาลละลายอยู่ในเฟสน้ำมากขึ้น จะไปทำให้วุ้นภาคน้ำมีความหนืดเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้กะทิมีกความหนืดเพิ่มขึ้น ทำให้เครื่องอุปเล็ทเคลื่อนที่ช้าลง อัตราการไหลโดยรวมตัวกันของเครื่องอุปเล็ทจึงเกิดช้าลงตามไปด้วย (McClements, 2001) ทำให้ค่าความหนืดของตัวอย่างกะทิล้นผ่านการแช่แข็ง-ละลาย มีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของน้ำตาลที่เพิ่มสูงขึ้น

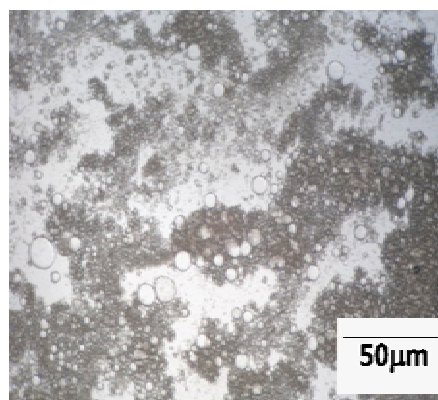


ภาพที่ 24 ขนาดอนุภาคของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติมน้ำตาลซูโครสที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ

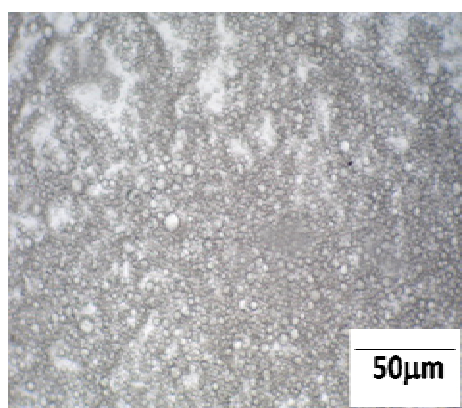
จากภาพที่ 24 พบว่าขนาดอนุภาคของตัวอย่างกะทิที่ไม่ผ่านการเติมน้ำตาลซูโครสจะมีฐานกราฟกว้างมากที่สุดแสดงว่าอนุภาคมีขนาดแตกต่างกันมาก ในขณะที่เมื่อมีการเติมน้ำตาลลงในตัวอย่างกะทิฐานของกราฟจะเริ่มแคบเข้า ซึ่งแสดงว่าอนุภาคเริ่มมีขนาดสม่ำเสมอมากขึ้นโดยตัวอย่างกะทิที่เติมน้ำตาล 40%w/v จะให้กราฟที่มีฐานแคบที่สุด แสดงว่าอนุภาคมีขนาดแตกต่างกันน้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจากขนาดอนุภาคเฉลี่ยดังแสดงในตารางที่ 3 จะพบว่าเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลเพิ่มมากขึ้นขนาดอนุภาคเฉลี่ยจะลดลง และเมื่อนำตัวอย่างกะทิไปส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ (ภาพที่ 25) พบว่าตัวอย่างกะทิที่ไม่ผ่านการเติมน้ำตาล ครอบเล็กจะมีขนาดใหญ่ (ภาพที่ 25 ก)) เมื่อปริมาณน้ำตาลเพิ่มมากขึ้นขนาดของครอบเล็กจะเล็กลง เมื่อเติมน้ำตาล 40%w/v (ภาพที่ 25 จ)) จะพบว่าครอบเล็กมีขนาดเล็กที่สุด เนื่องจากน้ำตาลช่วยลดอุณหภูมิที่จะทำให้เกิด heterogeneous nucleation ช่วยลดอัตราการโตของผลึกน้ำแข็ง (Hartel, 2001) ทำให้ครอบเล็กมีขนาดเล็กลง



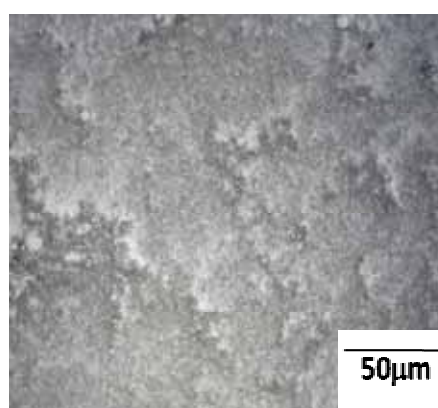
(ก)



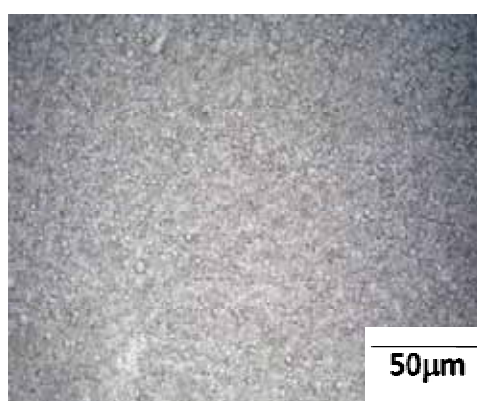
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

ภาพที่ 25 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ (กำลังขยาย 40 เท่า) ของกะทิที่ผ่านการเติมน้ำตาล

ซูโครสที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ: (ก) 0%, (ข) 10%, (ค) 20%, (ง) 30%, และ (จ) 40%w/v

เมื่อพิจารณาผลของความถ่วงจำเพาะ (ตารางที่ 3) จะพบว่าเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลเพิ่มมากขึ้นค่าความถ่วงจำเพาะในส่วนของวฏภาคน้ำจะเพิ่มมากขึ้น และค่าความถ่วงจำเพาะในส่วนของวฏภาคน้ำมันจะลดลง เนื่องจากเมื่อมีการเติมน้ำตาลในปริมาณที่มากขึ้นน้ำตาลจะไปละลายในส่วนของวฏภาคน้ำมากขึ้นทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะในวฏภาคน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ถึงแม้ว่าค่าความถ่วงจำเพาะในส่วนของวฏภาคน้ำจะเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของน้ำตาลที่มากขึ้น ซึ่งน่าจะส่งผลให้ตัวอย่างที่เติมน้ำตาลที่ระดับความเข้มข้นสูงๆเกิดการแยกชั้นครีมได้เร็วกว่า แต่เมื่อพิจารณาจากค่าความหนืดที่วัดได้ พบว่าเมื่อเติมน้ำตาลในปริมาณที่มากขึ้น ตัวอย่างกะทิจะมีความหนืดเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งผลของความหนืดที่เพิ่มขึ้นนี้น่าจะมีอิทธิพลต่อการเกิดการแยกชั้นครีมมากกว่าผลของความถ่วงจำเพาะ จึงส่งผลให้กะทิที่มีการเติมน้ำตาลในปริมาณที่มากขึ้นมีค่า creaming index ลดลง

ตารางที่ 3 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติมน้ำตาลซูโครสที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ

ตัวอย่างกะทิ ไขมัน 18%v/v ผ่านการ พาสเจอร์ไรซ์	pH	creaming index ^ว (%)	ความหนืด ^ข (cP)	ขนาดอนุภาค เฉลี่ย ^ย (μm)	ความถ่วงจำเพาะ ^จ	
					วฏภาคน้ำ	วฏภาคน้ำมัน
ไม่เติมซูโครส (control)	6.43	45.12 ± 0.99 ^า	14.89 ± 1.17 ^ด	12.77 ± 2.51 ^า	1.0177 ± 0.0001 ^ค	0.9210 ± 0.0001 ^า
เติมซูโครส 10%w/v	6.41	41.95 ± 2.00 ^า	26.93 ± 0.86 ^ค	6.20 ± 0.64 ^บ	1.0637 ± 0.0004 ^ด	0.9204 ± 0.0005 ^บ
เติมซูโครส 20%w/v	6.40	35.45 ± 1.89 ^บ	28.47 ± 1.48 ^{บค}	4.95 ± 0.44 ^บ	1.0977 ± 0.0047 ^ค	0.9160 ± 0.0004 ^ค
เติมซูโครส 30%w/v	6.39	18.72 ± 1.07 ^ค	33.20 ± 0.48 ^บ	4.17 ± 0.15 ^บ	1.1358 ± 0.0003 ^บ	0.9146 ± 0.0004 ^ด
เติมซูโครส 40%w/v	6.38	14.40 ± 1.93 ^ค	39.60 ± 3.34 ^า	3.62 ± 0.15 ^บ	1.1681 ± 0.0002 ^า	0.9132 ± 0.0003 ^ค

หมายเหตุ : ^ว เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง 3 ครั้ง ครั้งละ 2 ชั่วโมง

^ข เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง 3 ครั้ง ครั้งละ 2 ชั่วโมง

^ย เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง 2 ครั้ง

^จ เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง 2 ครั้ง

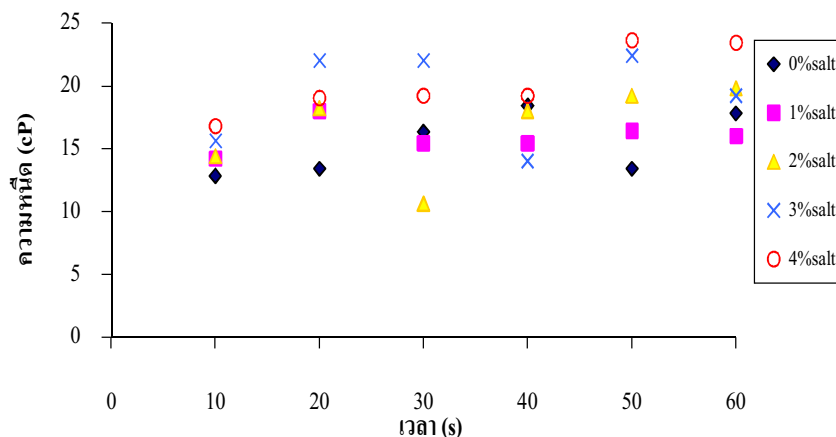
จากผลที่ได้จากตารางที่ 3 พบว่าความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ตัวอย่างกะทิมีความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายมากขึ้น ดังจะสังเกตได้จากการที่ค่า %creaming index ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงการเกิดการแยกชั้นครีมของกะทิที่มีค่าลดลงจาก 45.12% เป็น 14.40% เมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้นจาก 0% เป็น 40%w/v ในขณะที่ค่าความหนืดของกะทิจะมีค่ามากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มมากขึ้น โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 14.89 cP เป็น 39.60 cP เมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้นจาก 0% เป็น 40%w/v และค่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยก็มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้น โดยจะลดลงจาก 12.77 μm เป็น 3.62 μm เมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้นจาก 0% เป็น 40%w/v เมื่อพิจารณาผลของความถ่วงจำเพาะจะพบว่าเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มมากขึ้นค่าความถ่วงจำเพาะในส่วน of วัฏภาคน้ำจะเพิ่มมากขึ้น และค่าความถ่วงจำเพาะในส่วน of วัฏภาคน้ำมันจะลดลง และเมื่อพิจารณาจากลักษณะทางจุลภาคของครีโอลีท (ภาพที่ 25) จะพบว่าเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มมากขึ้นครีโอลีทจะมีขนาดเล็กลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Thanasukarn et al. (2006) ที่พบว่าเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้น จะทำให้อิมัลชันมีความคงตัวมากขึ้น เนื่องมาจากน้ำตาลมีสมบัติในการเป็น cryoprotectants การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของน้ำตาลในชั้นน้ำของอิมัลชันจะช่วยลดจำนวนการเกิดของผลึกน้ำแข็งในช่วงการแช่แข็ง (Ghosh et al., 2006) ทำให้ free volume ที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ลดต่ำลง (Le Meste et al., 1995) ความหนืดในส่วน of ชั้นน้ำเพิ่มมากขึ้น ทำให้เมื่อน้ำมันเคลื่อนที่เข้าหากันช้าลง เมื่อพิจารณาจากสมการของสโตกส์ ($v = 2r^2(\rho_o - \rho_i)g/9\eta_o$) จะพบว่าอัตราเร็วในการแยกชั้นครีมจะแปรผกผันกับความหนืด ถ้าวัฏภาคน้ำต่อเนื่องยังมีความหนืดสูง จะทำให้อัตราเร็วของการแยกชั้นครีมเกิดขึ้นช้า การเติมซูโครสจะช่วยลดอัตราการโตของผลึกน้ำแข็งเมื่อเทียบกับในน้ำบริสุทธิ์ (Hartel, 2001) การที่ผลึกน้ำแข็งมีขนาดเล็กจะช่วยลดอัตราการที่ทะลุของผลึกน้ำแข็งเข้าสู่เมื่อน้ำมันในช่วงการแช่แข็งได้ดีกว่าผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดใหญ่ การเกิดการหลอมรวมตัวกันของครีโอลีทเมื่อการเกิดละลายจึงเกิดน้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่เติมน้ำตาลซูโครส นอกจากนี้เมื่อพิจารณาในด้านบทบาทของน้ำ และการเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำระหว่างกระบวนการแช่แข็ง จะพบว่าอาหารที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบและมีตัวถูกละลาย ซึ่งในงานวิจัยนี้คือน้ำตาลซูโครสจะทำให้จุดเยือกแข็งจริงๆหรือเริ่มแรกของอาหารลดต่ำกว่าของน้ำบริสุทธิ์ (รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต, 2535) เมื่ออุณหภูมิลดลงจนถึงจุดเยือกแข็งของน้ำ จะก่อให้เกิดผลึกน้ำแข็งของน้ำทำให้ความเข้มข้นของสารละลายที่เหลืออยู่เพิ่มขึ้น ทำให้จุดเยือกแข็งของส่วนที่ยังไม่แข็งตัวลดต่ำลงไปอีก ดังนั้นการเติมน้ำตาลซูโครสลงในตัวอย่างกะทีก่อนนำไปแช่แข็ง จะทำให้การฟอร์มตัวของผลึกน้ำแข็งเกิดช้าลง ส่วนของน้ำที่ยังไม่แข็งตัวมีมากขึ้นทำให้อัตราการเคลื่อนที่เข้าหากันของเม็ดไขมันเนื่องจากการฟอร์มตัวของผลึกน้ำแข็งเกิดช้าลง การ

หลอมรวมตัวกันจึงเกิดซ้าลงตามไปด้วย ปัจจัยต่างๆเหล่านี้ส่งผลให้น้ำกะทิมีความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสที่เติมลงในตัวอย่างกะทิเพิ่มขึ้น

4.3 การศึกษาความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่มีผลต่อความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของกะทิ

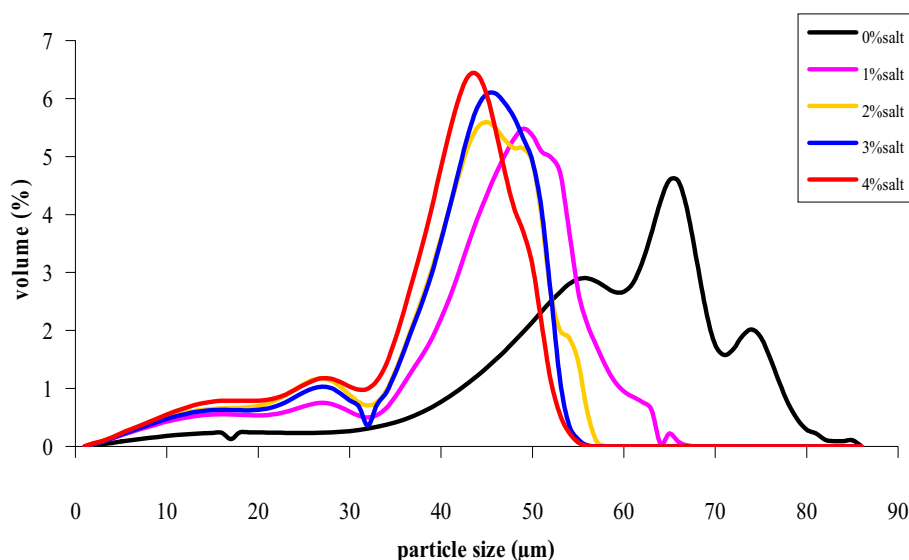
เมื่อนำตัวอย่างกะทิแช่แข็งที่ผ่านการเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆมาทำการละลาย พบว่าค่า %creaming index มีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เพิ่มมากขึ้น (ตารางที่ 4) เนื่องจากการเติมเกลือทำให้ความสามารถในการละลายของโปรตีนที่มีส่วนที่ไม่ชอบน้ำถูกเปิดออกทำให้การละลายลดลง (salting-out) โปรตีนเกิดการตกตะกอน ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น เครื่องปัดเคลือบที่เข้ามาใกล้ชิดกันได้ซ้าลง ทำให้กะทิมีความคงตัวมากขึ้น ส่งผลให้ค่า %creaming index ที่วัดได้มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่เติมลงในตัวอย่างกะทิเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาในด้านลักษณะปรากฏของกะทิ จะพบว่าเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เพิ่มมากขึ้นจะทำให้กะทิมืดสีเข้มมากขึ้น โดยจะเริ่มรู้สึกถึงรสเค็มได้เมื่อเติมโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นตั้งแต่ 1%w/v ลงในตัวอย่างกะทิ ส่วนกลิ่นของกะทียังคงกลิ่นของกะทิสดอยู่แม้ว่าจะเติมโซเดียมคลอไรด์ที่ระดับความเข้มข้น 4%w/v ก็จะไม่ส่งผลต่อกลิ่นของกะทิ สีของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติมโซเดียมคลอไรด์จะมีสีใกล้เคียงกับตัวอย่างกะทิที่ไม่ผ่านการเติมโซเดียมคลอไรด์ โดยตัวอย่างที่เติมโซเดียมคลอไรด์ 4%w/v จะมีรสเค็มมากที่สุด ในขณะที่สีและกลิ่นยังคงมีลักษณะใกล้เคียงกับกะทิที่ไม่ผ่านการเติมโซเดียมคลอไรด์ pH ของตัวอย่างกะทิจะมีค่าลดลงค่อนข้างมากเมื่อมีการเติมโซเดียมคลอไรด์มากขึ้น (ตารางที่ 4) ซึ่งค่า pH ที่ลดลงเป็นผลมาจาก ionic strengths ของโซเดียมคลอไรด์ที่เพิ่มมากขึ้น แต่ตัวอย่างกะทียังไม่เกิดการเน่าเสียแม้ว่าจะผ่านการเติมโซเดียมคลอไรด์และผ่านการแช่แข็งเป็นเวลา 45 ชั่วโมงแล้วก็ตาม



ภาพที่ 26 ค่าความหนืดของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆที่เวลาต่างๆ

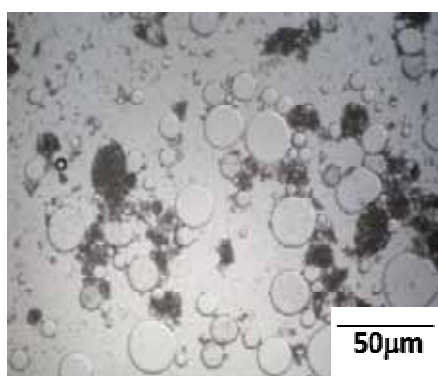
จากภาพที่ 26 จะพบว่าค่าความหนืดของกะทิมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลา ซึ่งเป็นพฤติกรรมการไหลของของไหลนอนนิวโตเนียน โดยกะทิที่ผ่านการเติมโซเดียมคลอไรด์ 4%w/v จะมีค่าความหนืดมากที่สุด เมื่อนำค่าความหนืดที่วัด ณ เวลาต่างๆ มาหาค่าเฉลี่ย จะได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งจะพบว่าเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เพิ่มมากขึ้น จะทำให้กะทิมีความหนืดเพิ่มขึ้น อันเป็นผลเนื่องมาจากการที่มีโซเดียมคลอไรด์ละลายอยู่ในวัฏภาคน้ำมากขึ้น เกิดแรงกระทำระหว่างประจุของอนุภาค (electro-viscous effect) ทำให้ความหนืดของอิมัลชันเพิ่มขึ้น (มณฑนา ภาณุมาภรณ์, 2552) ทำให้ค่าความหนืดของตัวอย่างกะทิล้างผ่านการแช่แข็ง-ละลายมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่เพิ่มสูงขึ้น



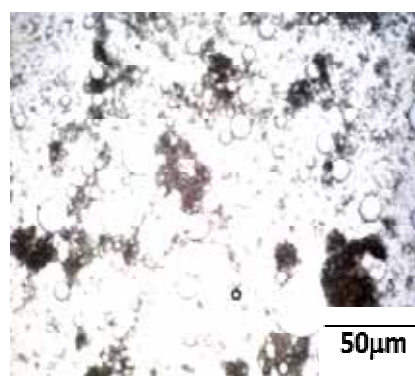
ภาพที่ 27 ขนาดอนุภาคของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ

จากภาพที่ 27 จะพบว่าขนาดอนุภาคของตัวอย่างกะทิที่ไม่ผ่านการเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์จะมีฐานของกราฟที่กว้างมากที่สุด เมื่อมีการเติมเกลือในปริมาณที่มากขึ้น ฐานของกราฟจะค่อยๆ แคบลง ซึ่งแสดงว่าขนาดของอนุภาคมีขนาดสม่ำเสมอมากขึ้น โดยจะพบว่าการเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ 4%w/v จะทำให้ได้กราฟที่มีฐานแคบที่สุด เมื่อพิจารณาจากผลของขนาดอนุภาคเฉลี่ยดังแสดงในตารางที่ 4 จะพบว่าเมื่อความเข้มข้นของเกลือเพิ่มมากขึ้นขนาดอนุภาคเฉลี่ยจะลดลง และเมื่อนำไปส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ (ภาพที่ 28) พบว่าตัวอย่างกะทิที่ไม่ผ่านการเติมเกลือ ครอบเล็กจะมีขนาดใหญ่ (ภาพที่ 28 ก)) แต่เมื่อมีการเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้ขนาดของครอบเล็กลดลง การเติมเกลือ 4%w/v (ภาพที่ 28 จ)) ลงในตัวอย่างกะทิจะทำให้ครอบเล็กมีขนาดเล็กที่สุด เนื่องจากเกลือทำให้เกิด electrostatic repulsion ในส่วนของชั้นน้ำทำให้ครอบเล็กเคลื่อนที่เข้าใกล้กันได้ช้าลง อัตราการหลอมรวมตัวกันจึงเกิดช้าลง (McClements, 1999) ขนาดของครอบเล็กที่สังเกตได้จากกล้องจุลทรรศน์จึงมีขนาดเล็ก

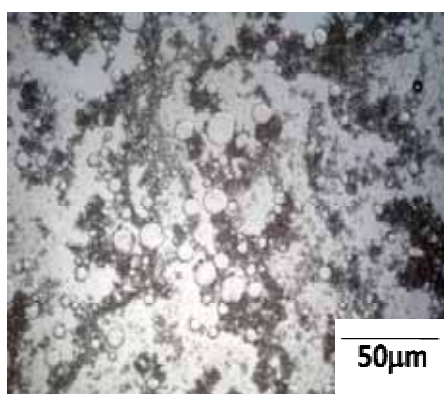
เมื่อพิจารณาผลของความถ่วงจำเพาะ (ตารางที่ 4) จะพบว่าเมื่อความเข้มข้นของเกลือเพิ่มมากขึ้นค่าความถ่วงจำเพาะในส่วนของวัฏภาคน้ำจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และค่าความถ่วงจำเพาะในส่วนของวัฏภาคน้ำมันจะลดลงจนอาจถือได้ว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)



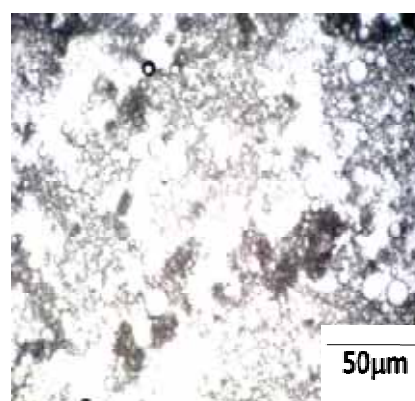
(ก)



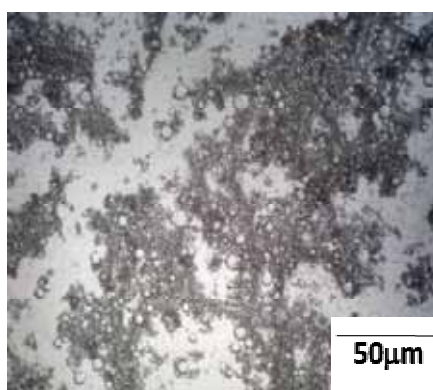
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

ภาพที่ 28 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ (กำลังขยาย 40 เท่า) ของกะทิที่ผ่านการเติมเกลือ

โซเดียมคลอไรด์ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ: (ก) 0%, (ข) 1%, (ค) 2%, (ง) 3%, และ

(จ) 4%w/v

ตารางที่ 4 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติมเกลือ โซเดียมคลอไรด์ที่ระดับ

ความเข้มข้นต่างๆ

ตัวอย่างกะทิ ไขมัน 18%v/v ผ่านการ พาสเจอร์ไรส์	pH	creaming index ^w (%)	ความหนืด ^x (cP)	ขนาดอนุภาค เฉลี่ย ^y (μ m)	ความถ่วงจำเพาะ ^z	
					วัตถุภาคน้ำ	วัตถุภาคน้ำมัน
ไม่เติม โซเดียมคลอไรด์ (control)	6.42	44.36 $\pm 2.96^a$	15.35 $\pm 1.17^c$	17.28 $\pm 1.04^a$	1.0176 $\pm 0.0001^a$	0.9212 $\pm 0.0001^a$
เติมโซเดียม คลอไรด์ 1%w/v	6.18	38.01 $\pm 2.19^{ab}$	15.90 $\pm 0.72^{bc}$	8.02 $\pm 1.79^b$	1.0242 $\pm 0.0001^a$	0.9206 $\pm 0.0002^a$
เติมโซเดียม คลอไรด์ 2%w/v	6.10	35.67 $\pm 0.94^{bc}$	16.70 $\pm 0.63^{bc}$	6.40 $\pm 0.46^b$	1.0250 $\pm 0.0001^a$	0.9204 $\pm 0.0002^a$
เติมโซเดียม คลอไรด์ 3%w/v	6.05	30.75 $\pm 2.64^{cd}$	19.20 $\pm 0.94^a$	6.77 $\pm 1.10^b$	1.0255 $\pm 0.0001^a$	0.9199 $\pm 0.0002^a$
เติมโซเดียม คลอไรด์ 4%w/v	5.97	27.26 $\pm 3.42^d$	20.20 $\pm 0.92^a$	5.74 $\pm 0.50^b$	1.0272 $\pm 0.0004^a$	0.9197 $\pm 0.0002^a$

หมายเหตุ : ^w เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง 3 ครั้ง ครั้งละ 2 ชั่วโมง

^x เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง 3 ครั้ง ครั้งละ 2 ชั่วโมง

^y เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง 2 ครั้ง

^z เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง 2 ครั้ง

จากผลที่ได้จากตารางที่ 4 พบว่าความเข้มข้นของเกลือ โซเดียมคลอไรด์ที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ตัวอย่างกะทิมีความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายมากขึ้น ดังจะสังเกตได้จากการที่ค่า %creaming index ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงการเกิดการแยกชั้นครีมของกะทิที่มีค่าลดลงจาก 44.36% เป็น 27.26% เมื่อความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้นจาก 0% เป็น 4%w/v ในขณะที่ค่าความหนืดของกะทิจะมีค่ามากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เพิ่มมากขึ้น โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 15.35 cP เป็น 20.20 cP เมื่อความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้นจาก 0% เป็น 4%w/v

และขนาดอนุภาคเฉลี่ยก็มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้น โดยจะลดลงจาก 17.28 μm เป็น 5.74 μm เมื่อความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้นจาก 0% เป็น 4%w/v เมื่อพิจารณาผลของความถ่วงจำเพาะจะพบว่าเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เพิ่มมากขึ้นค่าความถ่วงจำเพาะในส่วนของวัฏภาคน้ำจะเพิ่มมากขึ้น และค่าความถ่วงจำเพาะในส่วนของวัฏภาคน้ำมันจะลดลงเล็กน้อย และเมื่อพิจารณาจากลักษณะทางจุลภาคของครีโอลีท (ภาพที่ 28) จะพบว่าเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เพิ่มมากขึ้นครีโอลีทจะมีขนาดเล็กลง

จากผลที่ได้พบว่าจะขัดแย้งกับผลจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ของ Thanasukarn et al.

(2004a) ที่ศึกษาผลของการเติมเกลือ (NaCl) ความเข้มข้น 0 และ 150 mmol/kg ต่อความคงตัวในการแช่แข็ง-ละลายของ 20%wt hydrogenated palm oil emulsions โดยใช้ WPI เป็นอิมัลซิไฟเออร์ พบว่าเมื่อมีการเติมเกลือลงในอิมัลชันจะทำให้ความคงตัวของอิมัลชันลดลง เนื่องจากเกลือจะไปลดปฏิสัมพันธ์ของ electrostatic repulsion ระหว่างเม็ดน้ำมันที่ถูกทำให้ความด้วย WPI ทำให้ปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงดูดจะมีมากกว่า จึงเกิดการเกาะกลุ่มกัน และนำไปสู่การเกิดการหลอมรวมตัวกันบางส่วน ซึ่งเกิดจากครีโอลีทอยู่ใกล้กันมากขึ้นทำให้อิมัลชันตกตะกอน ส่งผลให้หยุดการที่ผลึกไขมันจากครีโอลีทหนึ่งจะแทรกผ่านส่วนของของเหลวไปสู่ครีโอลีทอื่นๆ และจากผลงานวิจัยของ Thanasukarn et al. (2006) ที่ศึกษาผลของการเติมเกลือ (NaCl) ความเข้มข้น 0 และ 150 mmol/kg ต่อความคงตัวในการแช่แข็ง-ละลายของ 20%wt hydrogenated palm oil emulsions โดยใช้ Tween 20 เป็นอิมัลซิไฟเออร์ พบว่าเมื่อมีการเติมเกลือลงในอิมัลชันจะทำให้ความคงตัวของอิมัลชันลดลง และพบว่าการเติมเกลือลงในอิมัลชันที่ใช้ WPI เป็นอิมัลซิไฟเออร์จะทำให้ให้อิมัลชันมีความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายมากกว่าใช้ Tween 20 เป็นอิมัลซิไฟเออร์ ซึ่งจากงานวิจัยดังกล่าวข้างต้นนั้นเป็นการศึกษาผลของการเติมเกลือลงในอิมัลชันในสถานะที่ไม่ได้มีการให้ความร้อนแก่อิมัลชันในระดับพาสเจอร์ไรซ์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการทดลองเพิ่มเติมโดยทดลองเติมเกลือลงในตัวอย่างกะทิที่ผ่านและไม่ผ่านการให้ความร้อนในระดับพาสเจอร์ไรซ์ (ผลดังแสดงในภาคผนวก ค) พบว่าการเติมเกลือลงในตัวอย่างกะทิที่ผ่านการให้ความร้อนในระดับพาสเจอร์ไรซ์จะทำให้กะทิมีความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายมากกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน ซึ่งผู้วิจัยสันนิษฐานว่าการให้ความร้อนร่วมกับการเติมเกลือจะช่วยทำให้อิมัลชันมีความคงตัวมากขึ้น โดยความร้อนจะไปทำให้โปรตีนที่มีในน้ำกะทิเช่น อัลบูมิน โกลบูลิน โปรลามีน และกลูเตลิน ซึ่งทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ตามธรรมชาติ เกิดการคลายเกลียวได้ง่ายขึ้น เกิดการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงตัวของโมเลกุลโปรตีน เพราะ side chain ของกรดอะมิโนที่เป็นส่วนที่ไม่ชอบน้ำในโมเลกุลของโปรตีนซึ่งในสภาพธรรมชาติ side chain ของกรดอะมิโนจะฝังอยู่ภายในโมเลกุลของโปรตีน แต่เมื่อโปรตีนเกิดการเสียสภาพเนื่องจากได้รับความร้อนจากการพาสเจอร์ไรซ์ ส่วนของ side chain

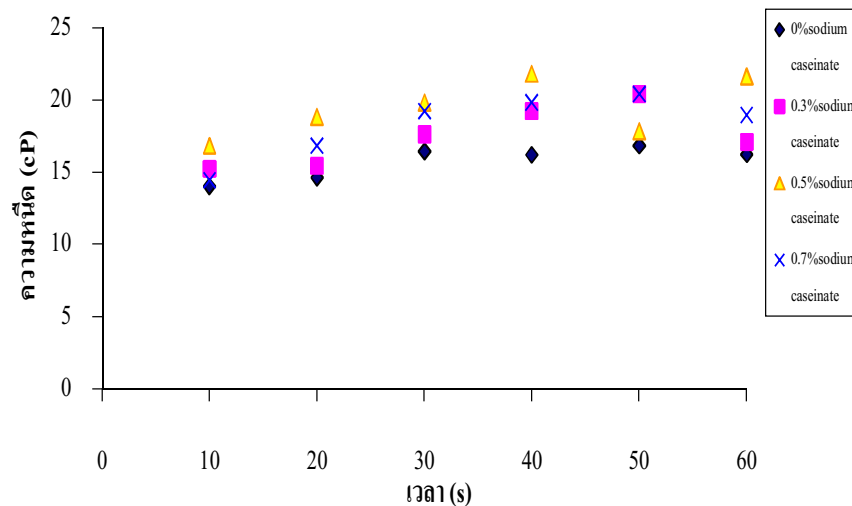
ดังกล่าวถูกเปิดออกและไปจับกับส่วนที่ชอบน้ำมันของสารอิมัลซิไฟเออร์ โดยจะเกิดการดูดซับอยู่ที่บริเวณพื้นผิวของสายยาวของโปรตีน ทำให้โปรตีนเกิดโครงสร้างใหม่ที่ผิวร่วมระหว่างน้ำมันกับน้ำซึ่งทำหน้าที่กีดขวางการรวมตัวของเม็ดไขมัน กะทิที่ผ่านการให้ความร้อนระดับพาสเจอร์ไรซ์จึงมีความคงตัวมากกว่ากะทิที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน เมื่อมีการเติมเกลือลงในกะทิที่ผ่านการให้ความร้อน โมเลกุลของเกลือและส่วนของน้ำที่ยังไม่แข็งตัวจะเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของโปรตีนที่ถูกดูดซับที่พื้นผิวของครีโอลีท ป้องกันการเปลี่ยนโครงสร้างของโปรตีนจากการสูญเสียน้ำออกจากโมเลกุลของโปรตีน ช่วยลดการเกิดปฏิสัมพันธ์ของไฮโดรโฟบิกที่จะทำให้ส่วนที่เป็น hydrophobic ในโปรตีนเกิดแรงดึงดูด รวมตัวกันและแยกออกจากน้ำในที่สุด เมื่อพิจารณาจากปฏิสัมพันธ์โดยรวมของอิมัลชัน จะพบว่าแม้ว่าการเติมเกลือจะทำให้ปฏิสัมพันธ์ไฟฟ้าสถิตลดลง แต่ก็ส่งผลให้ปฏิสัมพันธ์ไฮโดรโฟบิกลดลง และทำให้ปฏิสัมพันธ์สเทียริกเพิ่มมากขึ้นทำให้ปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงผลักมีมากกว่าทำให้กะทิมีความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของเกลือเพิ่มขึ้น นอกจากนี้อาจเกิดจากการเกิด salting-out ของโปรตีน เนื่องจากการเติมเกลือ ทำให้โปรตีนตกตะกอน ดังจะสังเกตได้จากภาพที่ 28 ที่พบกลุ่มก้อนสีดำในปริมาณที่มากขึ้นตามความเข้มข้นของเกลือที่เพิ่มขึ้น ซึ่งกลุ่มก้อนสีดำที่พบจากภาพถ่ายน่าจะเป็นกลุ่มของโปรตีนที่เกิดการตกตะกอน เกิดการเกาะจับกัน ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น (ผลดังแสดงในตารางที่ 4) ครีโอลีทเคลื่อนที่เข้ามาใกล้ชิดกันได้ช้าลง กะทิจึงมีความคงตัวมากขึ้น McClements (1999) กล่าวว่าเกลือโซเดียมคลอไรด์มีผลต่อความคงตัวของอิมัลชัน และการเปลี่ยนโครงสร้างของน้ำ โครงสร้างและปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุลน้ำกับการใกล้ชิดกันของไอออนมีผลต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของน้ำ โมเลกุลน้ำที่มีไอออนอยู่มีแนวโน้มที่จะปรับตัวโดยหันส่วนที่มีประจุตรงข้ามเข้าหาไอออนนั้นเกิดการจับตัวกันของน้ำกับไอออน ทำให้เคลื่อนที่ได้ช้าลง ลดแรงกดดัน ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น จุดเยือกแข็งลดต่ำลง ในช่วงของการแช่แข็ง ตัวอย่างที่ผ่านการเติมเกลือจะเกิดผลึกน้ำแข็งช้ากว่า เพราะเมื่ออุณหภูมิลดลงจนถึงจุดเยือกแข็งของน้ำ จะก่อให้เกิดผลึกน้ำแข็งของน้ำทำให้ความเข้มข้นของสารละลายเกลือที่เหลืออยู่เพิ่มขึ้น ทำให้จุดเยือกแข็งของส่วนที่ยังไม่แข็งตัวลดต่ำลงไปอีก การฟอร์มตัวของผลึกน้ำแข็งในส่วนของวฏภาคน้ำเกิดช้าลง ส่วนของน้ำที่ยังไม่แข็งตัวมีมากขึ้น อัตราการเคลื่อนที่เข้ามาใกล้ชิดกันของเมื่อน้ำมันเกิดช้าลง การหลอมรวมตัวกันหลังผ่านการละลายจึงเกิดช้าลงตามไปด้วย และจากสมการของสโตกส์จะพบว่าอัตราเร็วในการแยกชั้นครีมจะแปรผกผันกับความหนืด ถ้าวฏภาคต่อเนื่องยังมีความหนืดสูง จะทำให้อัตราเร็วของการแยกชั้นครีมเกิดขึ้นช้า จากปัจจัยต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้น จึงส่งผลให้กะทิมีความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของเกลือ โซเดียมคลอไรด์เพิ่มสูงขึ้น

4.4 การศึกษาความเข้มข้นของอิมัลซิไฟเออร์ที่มีผลต่อความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของกะทิ

4.4.1 การศึกษาความเข้มข้นของโซเดียมเคซิเนทที่มีผลต่อความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของกะทิ

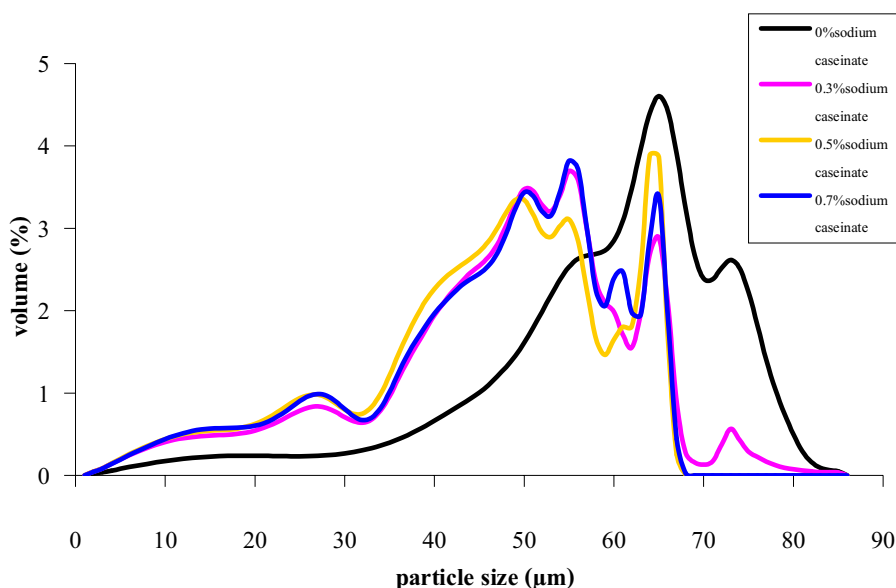
เมื่อนำตัวอย่างกะทิแช่แข็งที่ผ่านการเติมโซเดียมเคซิเนทที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ มาทำการละลายพบว่าค่า %creaming index มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมเคซิเนทมากขึ้น (ตารางที่ 5) เนื่องจากโซเดียมเคซิเนทจัดเป็นโปรตีนที่มีความยืดหยุ่น สามารถแพร่กระจายที่ผิวร่วมระหว่างน้ำมันกับน้ำ ปาริฉัตร หงสประภาส (2545) กล่าวว่า การรักษาความคงตัวของอิมัลชันโดยโมเลกุลที่ผิวสัมผัสร่วมทำได้เนื่องจากโมเลกุลขนาดใหญ่ที่อยู่ระหว่างพื้นผิวของอนุภาคในวัฏภาคที่กระจายตัวกับวัฏภาคต่อเนื่องมีความยืดหยุ่น และ/หรือมีความหนาเพียงพอ ส่วนใหญ่แล้วโมเลกุลเหล่านี้มักมีสมบัติเป็นโมเลกุลแอมฟิไฟล์ เช่น โปรตีน ซึ่งมีทั้งส่วนที่กระจายตัวได้ดีในน้ำ และส่วนที่กระจายตัวได้ดีในน้ำมัน ทำให้เกิดการดูดซับที่ผิวสัมผัสร่วมของอิมัลชัน หลังจากโปรตีนถูกดูดซับแล้ว จะเกิดการเสียสภาพที่พื้นผิวของอิมัลชัน ทำให้โปรตีนเกิดโครงสร้างใหม่ที่ผิวสัมผัสร่วมระหว่างน้ำกับน้ำมันซึ่งทำหน้าที่กีดขวางการรวมตัวกันของครีโอลีทไขมัน ทำให้กะทิมีความคงตัวมากขึ้น ส่งผลให้ค่า %creaming index ที่วัดได้มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมเคซิเนทที่เติมลงในตัวอย่างกะทิเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาในด้านลักษณะปรากฏของกะทิ จะพบว่าความเข้มข้นของโซเดียมเคซิเนทที่เพิ่มมากขึ้นไม่ส่งผลต่อกลิ่นรสของกะทิ กล่าวคือกะทิที่เติมโซเดียมเคซิเนทจะยังคงมีสี กลิ่นและรสชาติใกล้เคียงกับตัวอย่างกะทิที่ไม่เติมโซเดียมเคซิเนท (control) pH ของตัวอย่างกะทิจะมีค่าใกล้เคียงกับ control และยังคงมีค่ามากกว่า 6 (ตารางที่ 5) แสดงว่ากะทิยังไม่เกิดการเน่าเสียหลังผ่านการเติมโซเดียมเคซิเนทและผ่านการแช่แข็งเป็นเวลา 45 ชั่วโมง



ภาพที่ 29 ค่าความหนืดของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติมโซเดียมเคซิเนทที่ระดับความเข้มข้นต่างๆที่เวลาต่างๆ

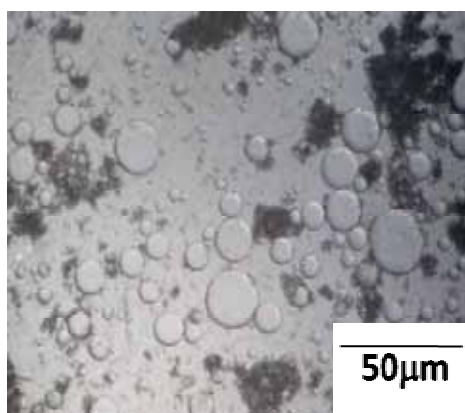
จากภาพที่ 29 จะพบว่าค่าความหนืดของกะทิมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลา ซึ่งเป็นพฤติกรรมการไหลของของไหลนอนนิวโตเนียน กะทิที่ผ่านการเติมโซเดียมเคซิเนท 0.5%w/v จะมีค่าความหนืดมากที่สุด เมื่อนำค่าความหนืดที่วัด ณ เวลาต่างๆมาหาค่าเฉลี่ย จะได้ผลดังแสดงในตารางที่ 5 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมเคซิเนทเพิ่มมากขึ้น ความหนืดของตัวอย่างกะทิมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น อันเป็นผลเนื่องมาจากการที่โซเดียมเคซิเนททำให้เกิดฟิล์มที่มีความยืดหยุ่นที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำกับน้ำมัน ช่วยป้องกันการตีแตกของผลึกน้ำแข็งเข้าสู่เม็ดไขมัน ทำให้รีโอปเล็คเคิลอนที่เข้าหากันได้ช้าลง อิมัลชันมีความคงตัวมากขึ้น (ปาริฉัตร หงสประภาส, 2545) โซเดียมเคซิเนทส่วนที่เหลือจากการเกิดเป็นฟิล์มจะเพิ่มความหนืดให้กับอิมัลชัน ส่งผลให้กะทิมีแนวโน้มที่จะมีความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกะทิที่ไม่ผ่านการเติมโซเดียมเคซิเนท



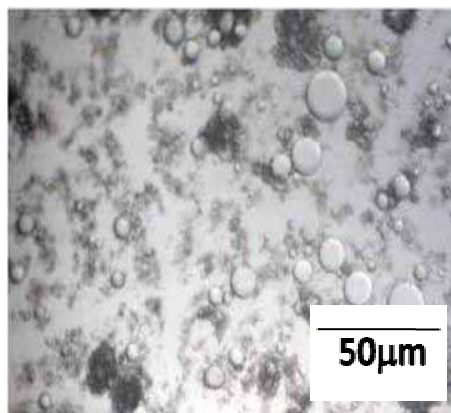
ภาพที่ 30 ขนาดอนุภาคของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติมโซเดียมเคซิเนทที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ

จากภาพที่ 30 จะพบว่าเส้นกราฟของกะทิที่ไม่ผ่านการเติมโซเดียมเคซิเนทจะมีฐานของกราฟที่กว้างที่สุด เมื่อมีการเติมโซเดียมเคซิเนทลงในตัวอย่างกะทิจะทำให้ขนาดของอนุภาคหลังผ่านการแช่แข็ง-ละลายมีขนาดที่สม่ำเสมอมากกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการเติมโซเดียมเคซิเนท ดังจะเห็นได้จากฐานของกราฟที่แคบลง โดยกราฟของตัวอย่างกะทิที่เติมโซเดียมเคซิเนท 0.5 และ 0.7%w/v จะมีขนาดใกล้เคียงกัน และกะทิที่เติมโซเดียมเคซิเนท 0.5%w/v จะมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กที่สุด (ตารางที่ 5) และเมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ (ภาพที่ 31) จะพบว่าตัวอย่างกะทิที่ไม่ผ่านการเติมโซเดียมเคซิเนท ครอบเล็กจะมีขนาดใหญ่ (ภาพที่ 31 (ก)) เมื่อปริมาณโซเดียมเคซิเนทเพิ่มมากขึ้นขนาดของครอบเล็กจะเล็กลง การเติมโซเดียมเคซิเนท 0.5%w/v (ภาพที่ 31 (ค)) ลงในตัวอย่างกะทิจะทำให้ครอบเล็กมีขนาดเล็กที่สุด เนื่องจากโซเดียมเคซิเนททำให้เกิดฟิล์มที่ผิวสัมผัสร่วม ทำให้เม็ดไขมันเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันช้าลง อัตราการหลอมรวมตัวกันของครอบเล็กจึงเกิดช้าลง ครอบเล็กจึงมีขนาดเล็ก

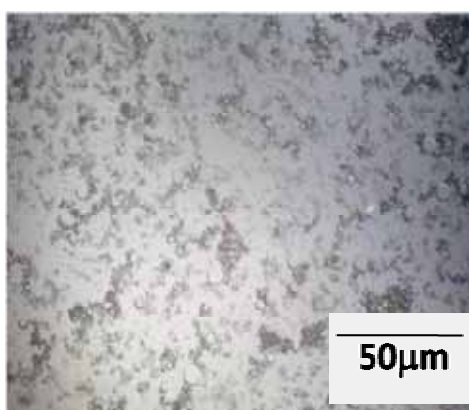
เมื่อพิจารณาผลของความถ่วงจำเพาะ (ตารางที่ 5) จะพบว่าเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมเคซิเนทเพิ่มมากขึ้นค่าความถ่วงจำเพาะในส่วนของวัฏภาคน้ำจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย และค่าความถ่วงจำเพาะในส่วนของวัฏภาคน้ำมันจะลดลงเพียงเล็กน้อยเช่นกัน จนอาจถือได้ว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางสถิติ ($p > 0.05$)



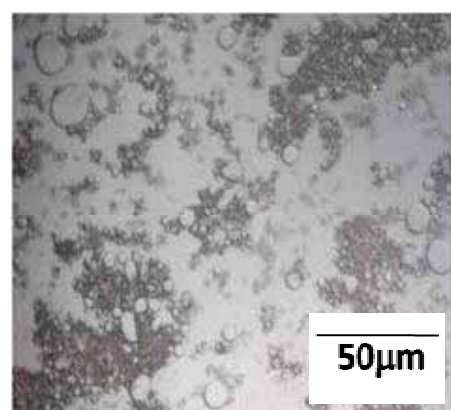
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 31 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ (กำลังขยาย 40 เท่า) ของกะทิที่ผ่านการเติมโซเดียม
 เลซิเนทที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ: (ก) 0%, (ข) 0.3%, (ค) 0.5% และ (ง) 0.7%w/v

ตารางที่ 5 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติมโซเดียมเคซิเนทที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ

ตัวอย่างกะทิ	pH	creaming index ^ว (%)	ความหนืด ^ข (cP)	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ^ย (μm)	ความถ่วงจำเพาะ ^จ	
ไขมัน 18%v/v					วัตถุภาคน้ำ	วัตถุภาคน้ำมัน
ผ่านการพาสเจอร์ไรซ์						
ไม่เติมโซเดียมเคซิเนท (control)	6.43	42.51 ± 3.89 ^ว	15.53 ± 0.33 ^ข	18.38 ± 0.85 ^ย	1.0176 ± 0.0001 ^จ	0.9212 ± 0.0001 ^จ
เติมโซเดียมเคซิเนท 0.3%w/v	6.41	38.23 ± 0.35 ^ว	17.48 ± 1.52 ^ข	8.40 ± 1.56 ^ย	1.0179 ± 0.0001 ^จ	0.9210 ± 0.0001 ^จ
เติมโซเดียมเคซิเนท 0.5%w/v	6.41	37.36 ± 2.09 ^ว	19.43 ± 2.64 ^ข	7.57 ± 0.50 ^ย	1.0181 ± 0.0001 ^จ	0.9208 ± 0.0002 ^จ
เติมโซเดียมเคซิเนท 0.7%w/v	6.41	37.44 ± 5.00 ^ว	18.26 ± 1.67 ^ข	7.67 ± 0.18 ^ย	1.0183 ± 0.0001 ^จ	0.9206 ± 0.0001 ^จ

หมายเหตุ : ^ว เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง 3 ครั้ง ครั้งละ 2 ชั่วโมง

^ข เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง 3 ครั้ง ครั้งละ 2 ชั่วโมง

^ย เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง 2 ครั้ง

^จ เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง 2 ครั้ง

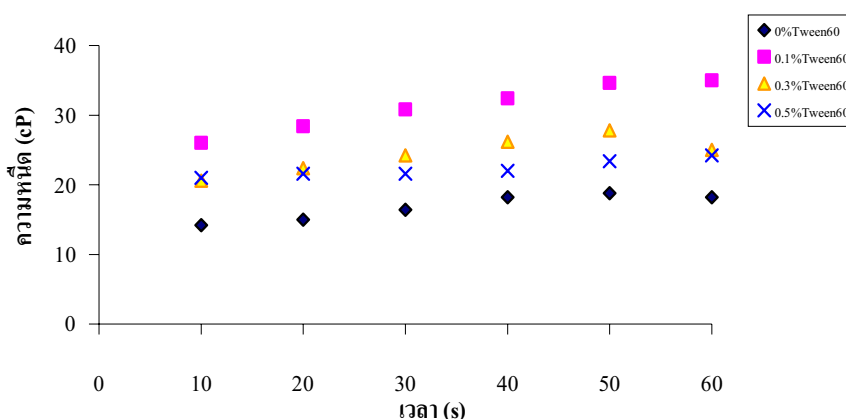
จากผลที่ได้จากตารางที่ 5 พบว่าความเข้มข้นของโซเดียมเคซิเนทที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ตัวอย่างกะทิมีความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายมากขึ้น ดังจะสังเกตได้จากการที่ค่า %creaming index มีค่าลดลงจาก 42.51% เป็น 37.36% เมื่อความเข้มข้นของโซเดียมเคซิเนทเพิ่มขึ้นจาก 0% เป็น 0.5%w/v ในขณะที่ค่าความหนืดของกะทิจมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 15.53 cP เป็น 19.43 cP เมื่อความเข้มข้นของโซเดียมเคซิเนทเพิ่มขึ้นจาก 0% เป็น 0.5%w/v และขนาดอนุภาคเฉลี่ยก็มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมเคซิเนทเพิ่มขึ้น โดยจะลดลงจาก 18.38 μm เป็น 7.57 μm เมื่อความเข้มข้นของโซเดียมเคซิเนทเพิ่มขึ้นจาก 0% เป็น 0.5%w/v เมื่อพิจารณาผลของความถ่วงจำเพาะจะพบว่าเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมเคซิเนทเพิ่มมากขึ้นค่าความถ่วงจำเพาะในส่วนของวัตถุภาคน้ำจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย และค่าความถ่วงจำเพาะในส่วนของวัตถุภาคน้ำมันจะลดลงเพียงเล็กน้อยเช่นกัน

และเมื่อพิจารณาจากลักษณะทางจุลภาคของครีมโปเลียท (ภาพที่ 31) จะพบว่าเมื่อความเข้มข้นของ โซเดียมเคซิเนตเพิ่มมากขึ้นครีมโปเลียทจะมีขนาดเล็กลง จากสมการของสโตกส์จะพบว่าอัตราเร็วในการแยกชั้นครีมจะแปรผกผันกับความหนืด Dickinson (1993) กล่าวว่าโปรตีนจะมีบทบาทสำคัญในการรักษาความคงตัวของอิมัลชันในระยะยาวโดยโมเลกุลหรืออนุภาคที่ผิวร่วม การดูดซับของโปรตีนที่ผิวร่วมระหว่างน้ำมันกับน้ำเกิดขึ้นเนื่องจากการคลายเกลียวหรือการเสียสภาพของโปรตีน ในระหว่างกระบวนการผลิต เช่น การให้แรงเฉือนในระหว่างการโฮโมจิไนซ์ ทำให้โปรตีนส่วนที่กระจายตัวในน้ำมันได้ดี หันเข้าหาพื้นผิวของไขมัน ในขณะที่ส่วนที่กระจายตัวในน้ำได้ดี หันเข้าหาผิวของน้ำ ดังนั้นเมื่อดำเนินการที่อุณหภูมิสูงโดยโมเลกุลของโปรตีนจะกระจายตัวอยู่ในวัฏภาคของน้ำได้ ความคงตัวของอิมัลชันเกิดขึ้นเพราะ โมเลกุลโปรตีนทำหน้าที่กีดขวางไม่ให้เม็ดไขมันรวมตัวกัน โปรตีนที่จะมีคุณสมบัติเป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่ดีจะต้องคลายเกลียวได้ง่ายที่ผิวร่วมระหว่างน้ำมันกับน้ำ การที่โปรตีนจะคลายเกลียวได้มากน้อยเพียงใดจะขึ้นอยู่กับ ความเข้มข้นของโปรตีนที่มีอยู่ในระบบ พื้นที่ผิวของเม็ดไขมัน ระยะเวลาที่โปรตีนสัมผัสกับผิวร่วมระหว่างน้ำมันกับน้ำ และโครงสร้างระดับโมเลกุลของโปรตีนก่อนการดูดซับที่ผิวร่วมระหว่างน้ำมันกับน้ำ ซึ่งจากงานวิจัยนี้พบว่าระดับความเข้มข้นของโซเดียมเคซิเนตที่เหมาะสมที่จะทำให้กะทิมีความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายคือ 0.5%w/v และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียม เคซิเนตมากขึ้นเป็น 0.7%w/v จะทำให้ความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของกะทิลดลงดังจะสังเกตได้จากค่า %creaming index ที่เพิ่มมากขึ้น ค่าความหนืดที่ลดลงและขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น

4.4.2 การศึกษาความเข้มข้นของ Tween 60 ที่มีผลต่อความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของกะทิ

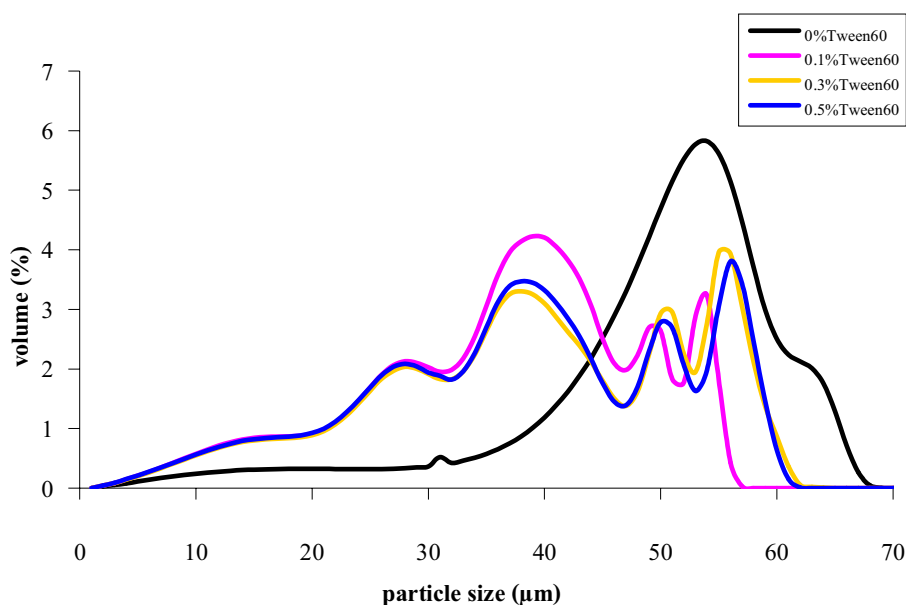
เมื่อนำตัวอย่างกะทิแช่แข็งที่ผ่านการเติม Tween 60 ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ มาทำการละลาย พบว่าค่า %creaming index มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของ Tween 60 เพิ่มขึ้น (ตารางที่ 6) เนื่องมาจากสมบัติการเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ของ Tween 60 ที่ใช้ส่วนหางที่ชอบน้ำมันในโมเลกุลไปจับที่บริเวณพื้นผิวของอนุภาคเม็ดน้ำมัน และใช้ส่วนที่ชอบน้ำที่มีขนาดใหญ่ในโมเลกุล ซึ่งก็คือส่วนของ polyoxyethylene chain ของ polysorbate จับกับ โมเลกุลของน้ำเกิดเป็นชั้นน้ำ (layer of bound water) ล้อมรอบอนุภาคของเม็ดน้ำมัน ทำให้การรวมตัวของเม็ดไขมันกับน้ำเกิดได้ดี และอนุภาคของเม็ดน้ำมันไม่สามารถรวมตัวกันได้ (ดวงพร กอละกัน และ เขียวภา ไหวพริบ, 2546) ทำให้กะทิจึงมีความคงตัวมากขึ้น ส่งผลให้ค่า %creaming index ที่วัดได้มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของ Tween 60 ที่เติมลงในตัวอย่างกะทิเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาในด้านลักษณะปรากฏของกะทิ จะพบว่าความเข้มข้นของ Tween 60 ที่เพิ่มมากขึ้นไม่ส่งผลต่อกลิ่นรสของกะทิ กล่าวคือกะทิที่เติม Tween 60 จะยังคงมีสี กลิ่นและรสชาติใกล้เคียงกับตัวอย่างกะทิที่ไม่เติม Tween 60 (control) ค่า pH ของตัวอย่างกะทิจะมีค่าใกล้เคียงกับ control และยังมีค่ามากกว่า 6 (ตารางที่ 6) แสดงว่ากะทิยังไม่เกิดการเน่าเสียหลังผ่านการเติม Tween 60 และผ่านการแช่แข็งเป็นเวลา 45 ชั่วโมง



ภาพที่ 32 ค่าความหนืดของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติม Tween 60 ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆที่เวลาต่างๆ

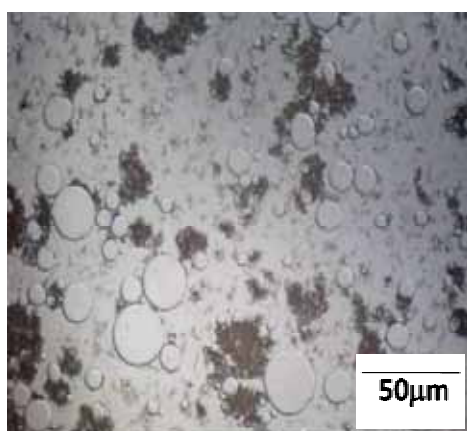
จากภาพที่ 32 จะพบว่าค่าความหนืดของกะทิมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลา ซึ่งเป็นพฤติกรรมการไหลของของไหลนอนนิวโตเนียน กะทิที่ผ่านการเติม Tween 60 ความเข้มข้น 0.1%w/v จะมีค่าความหนืดมากที่สุด และเมื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย จะได้ผลดังแสดงตารางที่ 6 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของ Tween 60 เพิ่มมากขึ้น จะทำให้กะทิมีแนวโน้มที่จะมีความหนืดเพิ่มขึ้น อันเป็นผลเนื่องมาจากการที่ Tween 60 ทำให้เกิดชั้นฟิล์มล้อมรอบครีโอลีทไขมัน ช่วยป้องกันการซึมแท่งของผลิตภัณฑ์เข้าสู่เม็ดไขมัน ทำให้ครีโอลีทเคลื่อนที่เข้าหากันได้ช้าลง อิมัลชันมีความคงตัวมากขึ้น (ปาริฉัตร หงสประภาส, 2545) Tween 60 ส่วนที่เหลือจากการเกิดเป็นฟิล์มจะเพิ่มความหนืดให้กับอิมัลชัน ส่งผลให้กะทิมีแนวโน้มที่จะมีความหนืดเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับกะทิที่ไม่ผ่านการเติม Tween 60



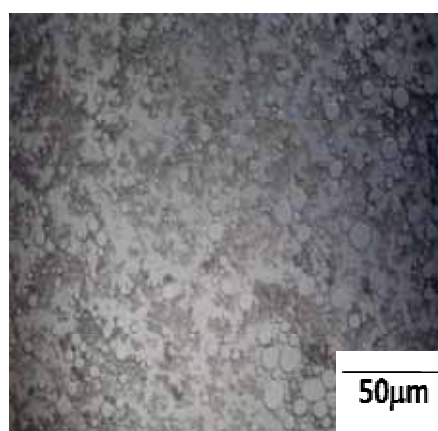
ภาพที่ 33 ขนาดอนุภาคของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติม Tween 60 ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ

จากภาพที่ 33 จะพบว่าเส้นกราฟของกะทิที่ไม่ผ่านการเติม Tween 60 จะมีฐานของกราฟที่กว้างที่สุด แต่เมื่อมีการเติม Tween 60 ลงไปในตัวอย่างกะทิ ส่งผลให้กราฟที่ได้มีฐานที่แคบมากขึ้น แสดงว่าอนุภาคมีขนาดที่สม่ำเสมอมากขึ้น เมื่อเทียบกับกะทิที่ไม่ผ่านการเติม Tween 60 เมื่อพิจารณาจากขนาดอนุภาคเฉลี่ยดังแสดงในตารางที่ 6 จะพบว่าเมื่อความเข้มข้นของ Tween 60 เพิ่มมากขึ้นขนาดอนุภาคเฉลี่ยมีแนวโน้มที่จะลดลง โดยกะทิที่เติม Tween 60 ความเข้มข้น 0.1%w/v จะมีขนาดเล็กที่สุด เมื่อนำตัวอย่างไปส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ (ภาพที่ 34) พบว่าตัวอย่างกะทิที่ไม่ผ่านการเติม Tween 60 ครีโอล์จะมีขนาดใหญ่ (ภาพที่ 34 (ก)) เมื่อปริมาณ Tween 60 เพิ่มมากขึ้นขนาดของครีโอล์จะเล็กลง เมื่อเติม Tween 60 ความเข้มข้น 0.1%w/v (ภาพที่ 34 (ข)) จะทำให้ครีโอล์มีขนาดเล็กที่สุด เนื่องจาก Tween 60 ทำให้เกิดขึ้นฟิล์มล้อมรอบครีโอล์ไขมัน ทำให้ผลึกไขมันเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันช้าลง อัตราการหลอมรวมตัวกันของครีโอล์จึงเกิดช้าลง ครีโอล์จึงมีขนาดเล็ก

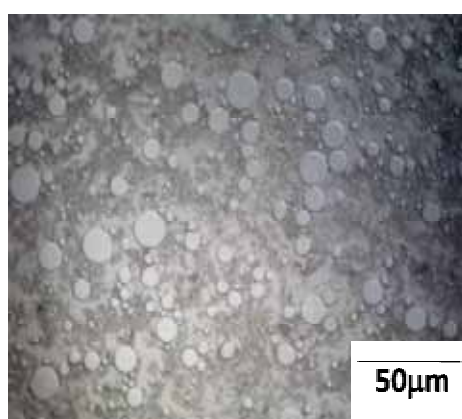
เมื่อพิจารณาผลของความถ่วงจำเพาะ (ตารางที่ 6) จะพบว่าเมื่อความเข้มข้นของ Tween 60 เพิ่มมากขึ้นค่าความถ่วงจำเพาะในส่วนของวัฏภาคน้ำจะลดลงเล็กน้อย และค่าความถ่วงจำเพาะในส่วนของวัฏภาคน้ำมันจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย จนอาจถือได้ว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางสถิติ ($p > 0.05$)



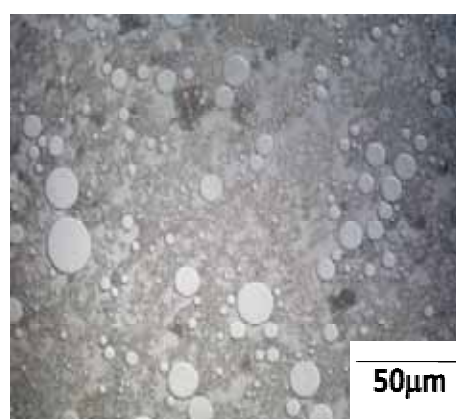
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 34 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ (กำลังขยาย 40 เท่า) ของกะทิที่ผ่านการเติม Tween 60 ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ: (ก) 0%, (ข) 0.1%, (ค) 0.3% และ (ง) 0.5%w/v

ตารางที่ 6 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติม Tween 60 ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ

ตัวอย่างกะทิ ไขมัน 18%v/v ผ่านการ พาสเจอร์ไรส์	pH	creaming index ^w (%)	ความหนืด ^x (cP)	ขนาดอนุภาค เฉลี่ย (μm) ^c	ความถ่วงจำเพาะ ^z	
					วัตถุภาคน้ำ	วัตถุภาคน้ำมัน
ไม่เติม Tween 60 (control)	6.43	44.75 ± 1.56 ^a	16.80 ± 1.60 ^c	12.48 ± 0.80 ^a	1.0174 ± 0.0001 ^a	0.9213 ± 0.0014 ^a
เติม Tween 60 0.1%w/v	6.42	25.28 ± 0.29 ^b	31.20 ± 0.78 ^a	5.09 ± 0.03 ^b	1.0163 ± 0.0001 ^a	0.9214 ± 0.0003 ^a
เติม Tween 60 0.3%w/v	6.41	25.41 ± 2.16 ^b	24.37 ± 0.89 ^b	5.46 ± 0.53 ^b	1.0159 ± 0.0001 ^a	0.9230 ± 0.0001 ^a
เติม Tween 60 0.5%w/v	6.41	25.36 ± 2.06 ^b	22.30 ± 1.06 ^b	5.29 ± 0.26 ^b	1.0156 ± 0.0001 ^a	0.9237 ± 0.0001 ^a

หมายเหตุ : ^w เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง 3 ครั้ง ครั้งละ 2 ชั่วโมง

^x เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง 3 ครั้ง ครั้งละ 2 ชั่วโมง

^y เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง 2 ครั้ง

^z เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง 2 ครั้ง

จากผลที่ได้จากตารางที่ 6 พบว่าความเข้มข้นของ Tween 60 ที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ตัวอย่างกะทิมีความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายมากขึ้น ดังจะสังเกตได้จากการที่ค่า %creaming index ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงการเกิดการแยกชั้นครีมของกะทิที่มีค่าลดลงจาก 44.75% เป็น 25.28% เมื่อความเข้มข้นของ Tween 60 เพิ่มขึ้นจาก 0% เป็น 0.1%w/v ในขณะที่ค่าความหนืดของกะทิจะมีค่ามากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ Tween 60 เพิ่มขึ้น โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 16.80 cP เป็น 31.20 cP เมื่อความเข้มข้นของ Tween 60 เพิ่มขึ้นจาก 0% เป็น 0.1%w/v และขนาดอนุภาคเฉลี่ยก็มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของ Tween 60 เพิ่มขึ้น โดยจะลดลงจาก 12.48 μm เป็น 5.09 μm เมื่อความเข้มข้นของ Tween 60 เพิ่มขึ้นจาก 0% เป็น 0.1%w/v เมื่อพิจารณาผลของความถ่วงจำเพาะจะพบว่าเมื่อความเข้มข้นของ Tween 60 เพิ่มขึ้นค่าความถ่วงจำเพาะในส่วนของวัตถุภาคน้ำจะลดลงเล็กน้อย และค่าความถ่วงจำเพาะในส่วนของวัตถุภาคน้ำมันจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และเมื่อพิจารณาจากลักษณะทางจุลภาคของครีโอล์เลท (ภาพที่ 34) จะพบว่าเมื่อความเข้มข้นของ Tween 60 เพิ่มขึ้นครีโอล์เลทจะมีขนาดเล็กลง เมื่อพิจารณาจากสมการของสโตกส์พบว่า อัตราเร็วในการแยกชั้นครีมจะแปรผกผันกับความหนืด ถ้าวัตถุภาคน้ำต่อเนื้อยังมีความหนืดสูง จะทำ

ให้อัตราเร็วของการแยกชั้นครีมเกิดขึ้นช้า และเนื่องจาก Tween 60 เป็น surfactant โมเลกุลเล็ก โดยจะหันส่วนหัวที่มีขั้วเข้าหาวัฏภาคน้ำและหันส่วนหางที่เป็นไฮโดรคาร์บอนเข้าสู่วัฏภาคน้ำมันและจะถูกดูดซับที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำและน้ำมัน ความสามารถในการรักษาความคงตัวของระบบคอลลอยด์โดยอนุภาค (particle) จะขึ้นอยู่กับความสามารถในการจัดเรียงตัวของอนุภาคนั้นๆ ที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคที่กระจายตัวกับวัฏภาคต่อเนื่อง การที่อนุภาคคอลลอยด์ เช่น เม็ดน้ำมัน (oil droplet) ถูกล้อมรอบด้วยอนุภาค จะทำให้การรวมตัวของเม็ดน้ำมันเกิดขึ้นได้ยากเมื่อมีการชนกัน เพราะอนุภาคจะทำหน้าที่เป็นเครื่องกีดขวาง ความสามารถในการรักษาความคงตัวโดยกลไกนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของอนุภาคและมุมที่อนุภาคสัมผัสกับผิวร่วม ซึ่งเรียกมุมสัมผัส (contact angle) ถ้าอนุภาคละลายได้ง่ายในน้ำมัน อนุภาคจะมีส่วนที่อยู่ในน้ำมันมากกว่าในน้ำ (มุมน้อยกว่า 90°) ประสิทธิภาพในการเป็นเครื่องกีดขวางจะไม่มากเท่าอนุภาคที่สามารถละลายในน้ำและน้ำมันเท่าๆกัน (มุม $= 90^\circ$) และถ้าอนุภาคละลายน้ำได้ดี อนุภาคจะมีส่วนที่อยู่ในน้ำมากกว่าน้ำมัน (มุมมากกว่า 90°) ทำให้เป็นเครื่องกีดขวางได้ไม่ดีเท่ากับเมื่อมีมุม 90° เพราะอนุภาคจะหลุดออกจากส่วนที่เป็นน้ำมันได้ง่าย (Friberg and Larsson, 1997) นอกจากนี้อาจเนื่องมาจาก side chain ของกรดอะมิโนที่เป็นส่วนที่ไม่ชอบน้ำในโมเลกุลของโปรตีนซึ่งในสภาพธรรมชาติ side chain ของกรดอะมิโนจะฝังอยู่ภายใน โมเลกุลของโปรตีน แต่เมื่อโปรตีนเกิดการเสียสภาพเนื่องจากได้รับความร้อนจากการพาสเจอร์ไรส์ ส่วนของ side chain ดังกล่าวถูกเปิดออกและไปจับกับส่วนที่ชอบน้ำมันของสารอิมัลซิไฟเออร์ โดยจะเกิดการดูดซับอยู่ที่บริเวณพื้นผิวของสายยาวของโปรตีน ทำให้โปรตีนละลายได้ดีขึ้นและกระจายตัวอยู่ในน้ำกะทิอย่างสม่ำเสมอ ไม่เกิดการรวมตัวกันเป็นตะกอนใหญ่ (Stauffer, 1996) โดยจะพบว่าการใช้ Tween 60 ที่ความเข้มข้น 0.1%w/v จะทำให้กะทิมีความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายดีที่สุด แต่เมื่อความเข้มข้นของ Tween 60 เพิ่มขึ้นจะทำให้ความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของกะทิมีค่าลดลง ดังจะสังเกตจากค่า %creaming index ที่เพิ่มสูงขึ้น ค่าความหนืดที่ลดลง และขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ใหญ่ขึ้น

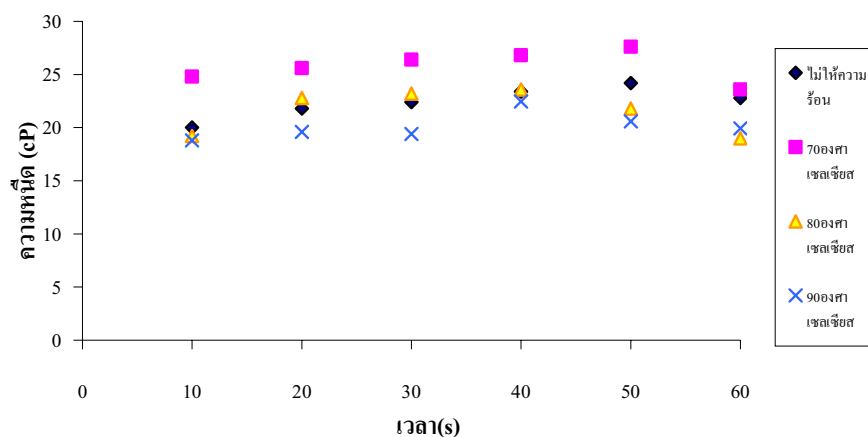
Walstra et al. (1999) พบว่าเมื่อตัวอย่างผ่านการให้ความร้อนเบื้องต้นในอุณหภูมิที่สูงขึ้น โปรตีนในตัวอย่างที่บริเวณผิวสัมผัสร่วมจะเกิดการสูญเสียสภาพได้มากขึ้น ทำให้อัตราส่วนมวลของโปรตีนต่อพื้นที่ผิวลดลง อิมัลซิไฟเออร์ที่เติมลงในตัวอย่างกะทิจะเข้าไปทำหน้าที่แทนส่วนของโปรตีนที่เกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากการให้ความร้อน และทำหน้าที่ดูดซับที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างน้ำกับน้ำมัน โดยทั่วไป surfactants เช่น โมโนกลีเซอไรด์ และ Tween มีแนวโน้มที่จะช่วยลดแรงตึงระหว่างผิวได้มากกว่าโปรตีน เช่น โซเดียมเลซิเนท สอดคล้องกับงานวิจัยนี้ที่พบว่าความเข้มข้นของ Tween 60 เพียงแค่ 0.1 %w/v ก็สามารถทำให้กะทิมีค่า %creaming index

เป็น 25.28% ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่า %creaming index ของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติมโซเดียมเคซิเนท 0.5 %w/v ซึ่งวัดค่า %creaming index ได้ 37.36%

4.5 การศึกษาผลของการให้ความร้อนเบื้องต้นที่มีผลต่อความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของกะทิ

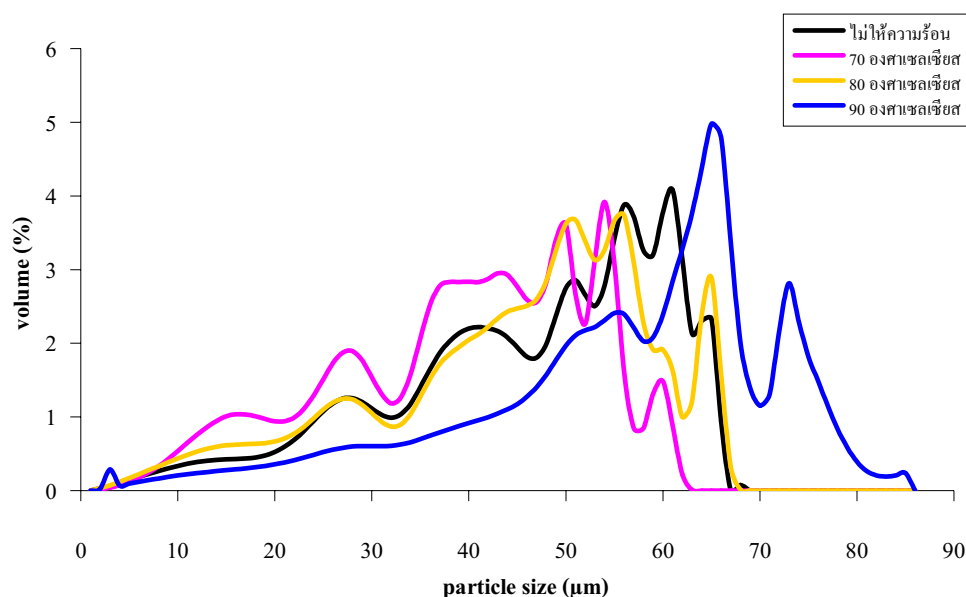
เมื่อนำตัวอย่างกะทิแช่แข็งที่ผ่านการให้ความร้อนที่ระดับอุณหภูมิต่างๆมาทำการละลาย พบว่าค่า %creaming index มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น โดยพบว่าเมื่อให้ความร้อนแก่ตัวอย่างกะทิที่อุณหภูมิ 70 °C จะทำให้กะทิมีค่า %creaming index ต่ำที่สุด ในขณะที่เมื่อให้ความร้อนแก่กะทิที่อุณหภูมิ 90 °C จะทำให้ค่า %creaming index มีค่าเพิ่มมากกว่ากะทิที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน (ตารางที่ 7) ความร้อนจะช่วยทำให้การเคลื่อนที่แบบบราวเนียนของเม็ดอนุภาคเพิ่มขึ้น อัตราเร็วในการเกิดการรวมกลุ่มจะเพิ่มขึ้น การเคลื่อนที่แบบบราวเนียนจะมีส่วนเกี่ยวข้องกับความคงตัวของอนุภาค เนื่องจากการปะทะกันระหว่างอนุภาคของอิมัลชัน ทำให้อนุภาคที่ปะทะกันนั้นจับกันเป็นอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น (มันทนา ภาณุมาภรณ์, 2552) โปรตีนที่มีในกะทิมีบทบาทสำคัญในการช่วยทำให้กะทิมีความคงตัว โดยโปรตีนมีทั้งส่วนที่กระจายตัวได้ดีในน้ำ และส่วนที่ไม่ละลายน้ำซึ่งทำหน้าที่คล้ายอิมัลซิไฟเออร์ล้อมรอบที่บริเวณพื้นผิวของเม็ดไขมัน การสูญเสียสภาพของโปรตีนจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 80 °C การให้ความร้อนที่ 90-95 °C เป็นเวลา 2-3 นาที จะสามารถทำลายโปรตีนได้เกือบหมด (Seow and Gwee, 1997) ดังนั้นการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างกะทิที่อุณหภูมิ 70 °C จึงทำให้กะทิมีค่า %creaming index ต่ำที่สุด และเมื่ออุณหภูมิให้แก่กะทิเพิ่มสูงขึ้นเป็น 80 และ 90 °C ค่า %creaming index จึงมีค่าเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาในด้านลักษณะปรากฏของกะทิ จะพบว่ากะทิที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น จะทำให้กะทิมีสีที่ออกจะคล้ำมากขึ้น แต่ยังคงมีกลิ่นและรสชาติใกล้เคียงกับตัวอย่างกะทิที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน (control) ในขณะที่ pH ของตัวอย่างกะทียังคงมีค่าใกล้เคียงกับ control และยังคงมีค่ามากกว่า 6 (ตารางที่ 7) แสดงว่ากะทียังไม่เกิดการเน่าเสียหลังผ่านการให้ความร้อนและผ่านการแช่แข็งเป็นเวลา 45 ชั่วโมง



ภาพที่ 35 ค่าความหนืดของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆที่เวลาต่างๆ

จากภาพที่ 35 จะพบว่าค่าความหนืดของกะทิมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลา ซึ่งเป็นพฤติกรรมการไหลของของไหลนอนนิวโตเนียน โดยกะทิที่ผ่านการให้ความร้อนที่ 70 °C จะมีค่าความหนืดมากที่สุด เมื่อนำค่าความหนืดที่วัด ณ เวลาต่างๆ มาหาค่าเฉลี่ย จะได้ผลดังแสดงในตารางที่ 7 พบว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้น จะทำให้กะทิมีความหนืดลดลง อันเป็นผลเนื่องมาจากความหนืดจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิจนถึง 60 °C หลังจากนั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าแรงตึงผิวและความหนืดจะลดลง เนื่องจากโปรตีนเกิดการรวมตัวกันที่อุณหภูมิประมาณ 60 °C (Buccat, Gonzalez and Manalac, 1973)

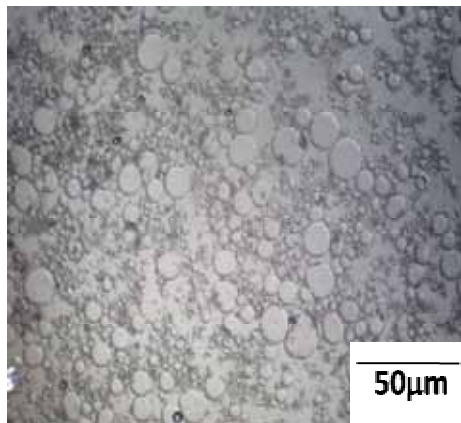


ภาพที่ 36 ขนาดอนุภาคของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ

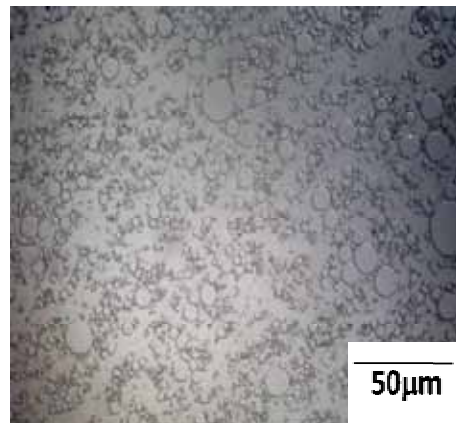
จากภาพที่ 36 จะพบว่าเส้นกราฟของกะทิที่ผ่านการให้ความร้อนที่ 90 °C จะมีฐานของกราฟที่กว้างที่สุด ส่วนตัวอย่างกะทิที่ผ่านการให้ความร้อนที่ 70 °C จะมีฐานของกราฟที่แคบที่สุด นั่นคืออนุภาคมีขนาดที่สม่ำเสมอมากกว่า เมื่อพิจารณาจากขนาดอนุภาคเฉลี่ยดังแสดงในตารางที่ 7 จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างกะทิมียิ่งสูงขึ้น ขนาดอนุภาคเฉลี่ยจะมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย เมื่อนำตัวอย่างกะทิไปส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ (ภาพที่ 37) จะให้ผลที่คล้ายกันคือเมื่ออุณหภูมิที่ให้แก่อะทิมียิ่งสูงขึ้นขนาดของครีโอลีทจะมีขนาดใหญ่มากขึ้น ตัวอย่างกะทิที่ผ่านการให้ความร้อนที่ 90 °C ครีโอลีทจะมีขนาดใหญ่ (ภาพที่ 37 (ง)) ในขณะที่การให้ความร้อนที่ 70 °C (ภาพที่ 37 (ข)) ครีโอลีทจะมีขนาดเล็กที่สุด เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นนำไปสู่การเพิ่มการเคลื่อนที่เข้าหากันแบบบราวเนียน และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มอัตราการเกาะกลุ่มกันมากขึ้น ทำให้ครีโอลีทมีแนวโน้มที่จะเกิดการหลอมรวมตัวกันเป็นครีโอลีทที่มีขนาดใหญ่ขึ้น (มณฑนา ภาณุมากรณ์, 2552)

เมื่อพิจารณาผลของความถ่วงจำเพาะ (ตารางที่ 7) จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิในการให้ความร้อนเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะในส่วนของวัฏภาคน้ำลดลง และค่าความถ่วงจำเพาะในส่วนของวัฏภาคน้ำมันเพิ่มขึ้น เพราะการให้ความร้อนจะทำให้โอกาสที่จะเกิดการรวมกลุ่มและเกิดการหลอมรวมตัวกันของอนุภาคเพิ่มมากขึ้น เมื่อนำตัวอย่างไปแช่แข็งจะทำให้วัฏภาคของน้ำบางส่วนกลายเป็นน้ำแข็ง ไปกีดเม้นน้ำมัน ทำให้เม้นน้ำมันแตกแยกออกมา (มณฑนา ภาณุมากรณ์,

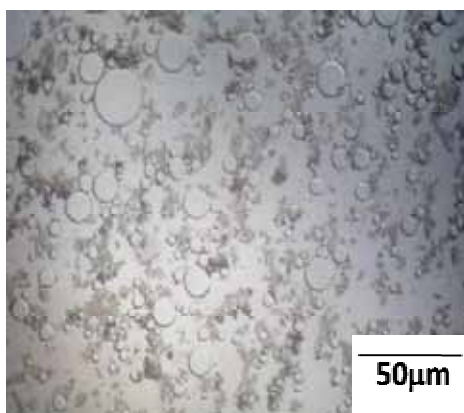
2552) หลังจากผ่านการละลายตัวอย่างที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงค่าความถ่วงจำเพาะในส่วนของวัฏภาคน้ำมันจึงมีค่าเพิ่มมากขึ้น



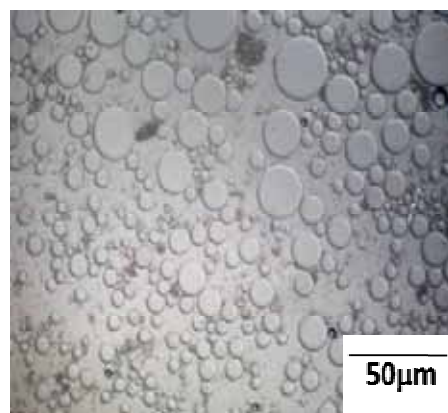
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 37 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ (กำลังขยาย 40 เท่า) ของกะทิที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ: (ก) ไม่ให้ความร้อน, (ข) 70°C, (ค) 80°C และ (ง) 90°C

ตารางที่ 7 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างกะทิที่ผ่านการให้ความร้อนที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ

ตัวอย่างกะทิ ไขมัน 18%v/v	pH	creaming index ^w (%)	ความหนืด ^x (cP)	ขนาดอนุภาค เฉลี่ย ^y (μm)	ความถ่วงจำเพาะ ^z	
					วัตถุภาคน้ำ	วัตถุภาคน้ำมัน
ไม่ให้ความร้อน (control)	6.38	60.30 ± 5.85 ^a	22.43 ± 2.03 ^{ab}	8.47 ± 0.91 ^a	1.0192 ± 0.0001 ^a	0.9195 ± 0.0004 ^b
ให้ความร้อน 70 °C	6.41	59.17 ± 0.42 ^a	25.80 ± 0.74 ^a	5.64 ± 0.02 ^a	1.0176 ± 0.0002 ^a	0.9213 ± 0.0002 ^a
ให้ความร้อน 80 °C	6.43	60.14 ± 5.03 ^a	21.60 ± 0.49 ^{acc}	7.32 ± 1.03 ^a	1.0174 ± 0.0001 ^a	0.9218 ± 0.0001 ^a
ให้ความร้อน 90 °C	6.43	67.53 ± 5.84 ^a	20.13 ± 2.12 ^{adc}	14.73 ± 5.18 ^a	1.0173 ± 0.0002 ^a	0.9223 ± 0.0003 ^a

หมายเหตุ : ^w เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง 3 ครั้ง ครั้งละ 2 ชั่วโมง

^x เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง 3 ครั้ง ครั้งละ 2 ชั่วโมง

^y เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง 2 ครั้ง

^z เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง 2 ครั้ง

จากผลที่ได้จากตารางที่ 7 พบว่าการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่ตัวอย่างกะทิ จะทำให้กะทิมีความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายมากขึ้น โดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C จะทำให้ค่า %creaming index ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงการเกิดการแยกชั้นครีมของกะทิที่มีค่าลดลงจาก 60.30% เป็น 59.17% ในขณะที่ค่าความหนืดของกะทิจะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 22.43 cP เป็น 25.80 cP และขนาดอนุภาคเฉลี่ยจะมีค่าลดลงจาก 8.47 μm เป็น 5.64 μm เมื่อพิจารณาจากลักษณะทางจุลภาคของครีโอล์ (ภาพที่ 37) จะพบว่าครีโอล์มีขนาดเล็กลง และเมื่อพิจารณาผลของความถ่วงจำเพาะจะพบว่าอุณหภูมิในการให้ความร้อนที่สูงขึ้นจะทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะในส่วนของ วัตถุภาคน้ำลดลง และค่าความถ่วงจำเพาะในส่วนของ วัตถุภาคน้ำมันเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาจากสมการของสโตกส์พบว่า อัตราเร็วในการแยกชั้นครีมจะแปรผกผันกับความหนืด Buccat, Gonzalez and Manalac (1973) ได้ศึกษาถึงผลของอุณหภูมิ (10-80 °C) ต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของน้ำกะทิ พบว่าความหนาแน่นและ pH ของน้ำกะทิจะแปรผกผันกับอุณหภูมิ ส่วนค่าแรงตึงผิว (surface tension) และความหนืดจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิจนถึง 60 °C หลังจากนั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าแรงตึงผิวและความหนืดจะลดลงเป็นผลเนื่องมาจากโปรตีนเกิดการรวมตัวกันที่อุณหภูมิประมาณ 60 °C อย่างไร

ก็ตามโปรตีนของน้ำกะทิจะรวมตัวกันทั้งหมดเมื่ออุณหภูมิถึง 80 °C โปรตีนของน้ำกะทิทั้งหมด เช่น อัลบูมิน โกลบูลิน โปรลามีน และกลูเตลิน จะรวมตัวกันโดยความร้อนอย่างง่ายดาย และตกตะกอนที่ pH 4 ความร้อนจะช่วยทำให้การเคลื่อนที่แบบบราวเนียนของเม็ดอนุภาคเพิ่มขึ้น อัตราเร็วในการเกิดการรวมกลุ่มจะเพิ่มขึ้น การเคลื่อนที่แบบบราวเนียนจะมีส่วนเกี่ยวข้องกับ ความคงตัวของอนุภาค เนื่องจากการปะทะกันระหว่างอนุภาคของอิมัลชัน ทำให้อนุภาคที่ปะทะกันนั้น จับกันเป็นก้อนที่ใหญ่ขึ้น นอกจากนี้ความร้อนยังช่วยทำให้ความหนืดของอิมัลชันลดลง ทำให้อนุภาคมีโอกาสที่จะเดินทางเข้ามาใกล้กันได้มากขึ้น โอกาสที่จะเกิดการรวมกลุ่มและการหลอมรวมตัวกันของอนุภาคจึงเพิ่มมากขึ้น (มัทธนา ภาณุมาภรณ์, 2552) โปรตีนที่มีในกะทิมีบทบาทสำคัญในการช่วยทำให้กะทิมีความคงตัว โดยโปรตีนมีทั้งส่วนที่กระจายตัวได้ดีในน้ำ และส่วนที่ไม่ละลายน้ำซึ่งทำหน้าที่คล้ายอิมัลซิไฟเออร์ล้อมรอบที่บริเวณพื้นผิวของเม็ดไขมัน การสูญเสียสภาพของโปรตีนจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 80 °C การให้ความร้อนที่ 90-95 °C เป็นเวลา 2-3 นาที จะสามารถทำลายโปรตีนได้เกือบหมด (Seow and Gwee, 1997) สอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยชิ้นนี้ โดยจะพบว่าเมื่อให้ความร้อนแก่ตัวอย่างกะทิที่อุณหภูมิ 80 และ 90 °C จะทำให้กะทิมีความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายลดลง ดังจะสังเกตได้จากค่า %creaming index ที่เพิ่มสูงขึ้น ค่าความหนืดที่ลดลง และขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้กะทิมีความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายมากขึ้น โดยพบว่าการเติมน้ำตาลซูโครสความเข้มข้น 40%w/v ลงในตัวอย่างกะทิ จะทำให้กะทิมีค่า %creaming index ต่ำที่สุด มีความหนืดมากที่สุดและมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กที่สุด

5.1.2 ความเข้มข้นของเกลือ โซเดียมคลอไรด์ที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้กะทิมีความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายมากขึ้น โดยพบว่าการเติมเกลือ โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 4%w/v ลงในตัวอย่างกะทิ จะทำให้กะทิมีค่า %creaming index ต่ำที่สุด มีความหนืดมากที่สุดและมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กที่สุด

5.1.3 ความเข้มข้นของอิมัลซิไฟเออร์ที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้กะทิมีแนวโน้มที่จะมีความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายมากขึ้น โดยพบว่าการเติมโซเดียมเคซิเนทความเข้มข้น 0.5%w/v และ Tween 60 ความเข้มข้น 0.1%w/v ลงในตัวอย่างกะทิ จะทำให้ตัวอย่างกะทิมีค่า %creaming index ต่ำที่สุด มีความหนืดมากที่สุดและมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กที่สุด

5.1.4 การให้ความร้อนเบื้องต้นแก่ตัวอย่างกะทิจะส่งผลต่อความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของกะทิ โดยพบว่าการให้ความร้อนเบื้องต้นที่อุณหภูมิ 70 °C แก่ตัวอย่างกะทิ จะทำให้กะทิมีค่า %creaming index ต่ำที่สุด มีความหนืดมากที่สุดและมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กที่สุด

ผลที่ได้จากการศึกษาปัจจัยต่างๆเหล่านี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติในด้านความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของกะทิและอาหารที่มีกะทิเป็นองค์ประกอบได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของกะทิไขมัน 18%v/v โดยทำการศึกษาที่ละปัจจัย ดังนั้นในงานวิจัยต่อไป จึงควรมีการศึกษาถึงผลของการใช้ปัจจัยต่างๆร่วมกันต่อความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของกะทิ นอกจากนี้ควรที่จะทำการศึกษาความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของกะทิที่ระดับไขมันต่างๆด้วย เนื่องจากปริมาณไขมันที่แตกต่างกัน จะส่งผลให้กะทิมีความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายแตกต่างกัน และควรมีการทดสอบในระบบผลิตภัณฑ์อาหารจริงด้วย

บรรณานุกรม

- ดวงพร กอดะกัน และเยาวภา ไหวพริบ. “การแปลงไขมันบางส่วนในน้ำกะทิบรรจุกระป๋องด้วย
น้ำมันรำข้าวและสารทดแทนไขมัน.” วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 8, 1 (2546): 47-56.
- เทวี โพธิ์ผล. การใช้วัตถุเจือปนอาหาร. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช,
2536.
- ธิติมา เปี่ยมประสาธน์. “ผลของปริมาณไขมันและการให้ความร้อนเบื้องต้นต่อความหนืด
ปรากฏของน้ำกะทิล้างผ่านการโฮโมจีไนส์.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร
มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าธนบุรี, 2547.
- ปรีชญา วงศ์ธนบัตร. “ผลของปัจจัยการแปรรูปต่อคุณภาพของน้ำกะทิอบแห้งแบบพ่นฝอย.”
วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2543.
- ปาริฉัตร หงสประภาส. เคมีกายภาพของอาหาร คอลลอยด์ อิมัลชัน และเจล. กรุงเทพมหานคร:
สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- มณฑนา ภาณุมาภรณ์. อิมัลชันและเยลลี่. สมุทรปราการ: โครงการสำนักพิมพ์มหาวิทยาลัย
หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ, 2552.
- รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต. วิศวกรรมแปรรูปอาหาร: การถนอมอาหาร. กรุงเทพมหานคร:
สำนักพิมพ์โอเคียนส ไตร์, 2535.
- Buccat, E.F., A.L., Gonzalez, and G.C., Manalac. “Production of proteins and other food
products from coconut.” Laboratory phase NIST Project Report, 1973.
- Carvajal, P.A., G.A., MacDonald, and T.C., Lanier. “Cryostabilization mechanism of fish
muscle proteins by maltodextrins.” Cryobiology. 38 (1999): 16-26.
- Cramp, G.L., A.M., Docking, S., Ghosh, and J.N., Coupland. “On the stability of oil-in-water
emulsions to freezing.” Food Hydrocolloids. 18, 6 (2004): 899-905.
- Demetriades, K., J.N., Coupland, and D.J., McClements. “Physical properties of whey protein
stabilized emulsions as related to pH and NaCl.” Journal of Food Science. 62 (1997):
342-347.

- Dickinson, E. An Introduction to Food Colloids. Oxford : Oxford University Press, 1992.
- _____. "Towards more natural emulsifiers." Trends in Food Science and Technology. 4, 10 (1993): 330.
- _____. , and D.J., McClements. Advances in Food Colloids. London: Blackie Academic & Professional, 1995.
- _____. , and G., Stainsby. Colloids in Food. London: Applied Science Publishers, 1982.
- Ebel, C., H., Eisenberg, and R., Ghilando. "Probing protein-sugar interactions." Biophysical Journal. 78 (2000): 385-393.
- Evans, D.F., and H., Wennerstorm. The Colloidal Domain: Where Physics, Chemistry, Biology and Technology Meet. New York: VCH Publisher, 1994.
- Fellows, P. Food Processing Technology: Principle and Practice. 2nd ed. Florida: CRC Press, 2000.
- Friberg, S. E. and K., Larsson. Food emulsions. New York: Marcel Dekker, 1997.
- Ghosh, S., G.L., Cramp, and J.N., Coupland. "Effect of aqueous composition on the freeze–thaw stability of emulsions." Colloids and Surfaces A-Physicochemical and Engineering Aspects. 272, 1–2 (2006): 82–88.
- _____. , and J.N., Coupland. "Factors affecting the freeze–thaw stability of emulsions." Food Hydrocolloids. 22, 1 (2008): 105–111.
- Gonzalez, O.N., S.Y., de Leon, and P.C., Sanchez. Coconut as Food. Philippines Coconut Research and Development Foundation Inc, 1990.
- Hartel, R.W. Crystallization in Foods. Gaithersburg: Aspen Publishers, 2001.
- Hillgren, A., J., Lindgren, and M., Alden. "Protection mechanism of Tween 80 during freeze–thawing of a model protein, LDH." International Journal of Pharmaceutics. 237 (2000): 57-69.
- Huang, R.M., W.H., Chang, Y.H., Chang, and C.Y., Lii. "Phase transitions of rice starch and flour gels." Cereal Chemistry. 71, 2 (1994): 202-207.
- Kim, H.J., E.A., Decker, and D.J., McClements. "Impact of protein surface denaturation on droplet flocculation in hexadecane oil-in-water emulsions stabilized by beta-lactoglobulin." Journal of Agricultural and Food Chemistry. 50 (2002): 7131-7137.

- _____. "Influence of sucrose on droplet flocculation in hexadecane oil-in-water emulsions stabilized by beta-lactoglobulin." Journal of Agricultural and Food Chemistry. 51 (2003): 766-772.
- Komatsu, H., S., Okada, and T., Handa. "Suppressive effects of salts on droplet coalescence in a commercially available fat emulsion during freezing for storage." Journal of Pharmaceutical Sciences. 86, 4 (1997): 497-502.
- Le Meste, M., D., Simatos, and P., Gervais. "Interaction of Water with Food Components." In Ingredient Interactions: Effect on Food Quality, 85-129. Edited by Gaonkar, A.G. New York: Marcel Dekker, 1995.
- Lee, J.C. and S.N., Timasheff. "The stabilization of protein by sucrose." Journal of Biological Chemistry. 256 (1981): 7193-7201.
- Martin, S., M.L., Herrera, and R.W., Hartel. "Effect of cooling rate on nucleation behavior of milk fat-sunflower oil blends." Journal of Agricultural and Food Chemistry. 49 (2001): 3223-3229.
- McClements, D. J. Food Emulsions Principles, Practice and Techniques. Florida: CRC Press, 1999.
- _____. "Modulation of globular protein functionality by weakly interacting cosolvents." Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 42 (2002): 417-471.
- Onsaard, E., M., Vittayanont, S., Sringam, and D.J., McClements. "Properties and stability of oil-in-water emulsions stabilized by coconut skim milk proteins." Journal of Agricultural and Food Chemistry. 53, 14 (2005): 5747-5753.
- Peamprasart, T. and N. Chiewchan. "Effect of fat content and preheat treatment on the apparent viscosity of coconut milk after homogenization." Journal of Food Engineering. 77 (2006): 653-658.
- Pongsawatmanit, R. and O., Miyawaki. "Measurement of temperature-dependent ice fraction in frozen foods." Bioscience Biotechnology and Biochemistry. 57 (1993): 1650-1654.
- Rao, M.A. and R.W., Hartel. Phase/State Transitions in Foods: Chemical, Structural and Rheological Changes. New York: Marcel Dekker, 1998.

- Rynne, N.M., T.P., Beresford, A.L., Kelly, and T.P., Guinee. "Effect of milk pasteurization temperature and in situ whey protein denaturation on the composition, texture and heat-induced functionality of half-fat Cheddar cheese." International Dairy Journal. 14, 11 (2004): 989-1001.
- Saito, H., A., Kawagishi, M., Tanaka, T., Tanimoto, S., Okada, H., Komatsu, and T., Handa. "Coalescence of lipid emulsions in floating and freeze-thawing processes: examination of the coalescence transition state theory." Journal of Colloid and Interface Science. 219, 1 (1999): 129–134.
- Seow, C.C. and C.N., Gwee. "Coconut milk: chemistry and technology." International Journal of Food Science Technology. 32, 3 (1997): 189–201.
- Shaker, R.R., R.Y., Jumah, and B., Abu-Jdayil. "Rheological properties of plain yogurt during coagulation process: impact of fat content and preheat treatment of milk." Journal of Food Engineering. 44, 3 (2000): 175-180.
- Stauffer, C.E. Fats and oils. Minnesota: Eagen Press, 1996.
- Strauss, G., and H., Hauser. "Stabilization of lipid bilayer vesicles by sucrose during freezing." Proceedings of the National Academy of Sciences. 83 (1986): 2422-2426.
- Tangsuphoom, N., and J.N., Coupland. "Effect of thermal treatments on the properties of coconut milk emulsions prepared with surface-active stabilizers." Food Hydrocolloids. 23, 7 (2009): 1792-1800.
- Thanasukarn, P., R., Pongsawatmanit, and D. J., McClements. "Impact of fat and water crystallization on the stability of hydrogenated palm oil-in-water emulsions stabilized by whey protein isolate." Colloids and Surfaces A-Physicochemical and Engineering Aspects. 246, 1–3 (2004a): 49–59.
- _____. "Influence of emulsifier type on freeze–thaw stability of hydrogenated palm oil-in-water emulsions." Food Hydrocolloids. 18, 6 (2004b): 1033–1043.
- _____. "Impact of fat and water crystallization on the stability of hydrogenated palm oil-in-water emulsions stabilized by a nonionic surfactant." Journal of Agricultural and Food Chemistry. 54, 10 (2006): 3591–3597.

- Vanapalli, S.A., J., Palanuwech, and J.N., Coupland. "Stability of emulsions to dispersed phase crystallization: effect of oil type, dispersed phase volume fraction, and cooling rate." Colloids and Surfaces A-Physicochemical and Engineering Aspects. 204, 1–3 (2000): 227–237.
- Walstra, P. Physical Chemistry of Foods. New York: Marcel Dekker, 2003.
- _____, T.J., Geurts, A., Noomen, A., Jellema, and M. A. J. S., Van Boekel. Dairy technology: Principle of milk properties and process. New York: Marcel Dekker, 1999.
- Walstra, S. "Dispersed systems: basic considerations." In Food Chemistry, 95-156. Edited by Fennema, O.R. New York: Marcel Dekker, 1996.
- Wang, Y., and J. Jane. "Correlation between glass transition temperature and starch retrogradation in the presence of sugars and maltodextrins." Cereal Chemistry. 71 (1994): 527-531.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์

ก.1 การวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ไขมันในกะทิ (Gerber Method)

หลักการ : Sulfuric acid จะแยกไขมันออกจากน้ำกะทิ เมื่อเติมกรดเข้าไป ซึ่งจะเห็นชั้นใสของไขมันได้ชัดเจน โดยการเติม amylalcohol และเข้าเครื่อง centrifuge ซึ่งปริมาณไขมันจะอ่านได้เป็นเปอร์เซ็นต์โดยตรงจาก scale บนหลอด butyrometer

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ปิเปต (pipette) 1 ml, 5 ml, 10 ml
2. จุกยาง (caoutchouc stoppers)
3. หลอด butyrometer-scale 0-50%
4. เครื่อง centrifuge ปรับอุณหภูมิได้

สารเคมีและวิธีการเตรียม

1. Sulfuric acid (H_2SO_4), d. 1.816 ± 0.003 g/ml, 90-91% เติม H_2SO_4 conc.
4 ส่วน ลงในน้ำ 1 ส่วน
2. Amylalcohol, d. 0.811 ± 0.002 g/ml

วิธีวิเคราะห์

1. เติมกรด H_2SO_4 10 ml ลงในหลอด butyrometer
2. ใส่ตัวอย่างกะทิ 5 ml
3. เติมน้ำกลั่น 5 ml
4. เติม Amylalcohol 1 ml ปิดจุกหลอด butyrometer ให้แน่น
5. เขย่าให้เข้ากัน นำไปเหวี่ยงในเครื่อง centrifuge ความเร็วรอบ 1,020 rpm และเปิด heating อุณหภูมิประมาณ 45°C เป็นเวลา 7 นาที
6. อ่านผลตามสเกลออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรไขมันของกะทิ

วิธีการคำนวณการปรับปริมาณไขมัน

ปริมาณไขมันในกะทิที่วัดได้ = A

ปริมาตร = V

ปริมาณไขมันในกะทิที่ต้องการ = B

ปริมาตร = X + V

ปริมาณไขมันในกะทินำมาเติมเพิ่ม = C

ปริมาตร = X

เข้าสมการ

$$A(V) + CX = B(X+V)$$

สูตร

$$X = \frac{V(B-A)}{(C-B)}$$

(C-B)

ตัวอย่างการคำนวณ

วัดไขมันในกะทิได้ = 17%

ปริมาตร = 200 ลิตร

ต้องการกะทิไขมัน = 20%

ปริมาตร = X + 200 ลิตร

กะทินำมาเติมมีไขมัน = 30%

ปริมาตร = X

$$X = \frac{200(20-17)}{(30-20)}$$

(30-20)

$$X = 60 \text{ ลิตร}$$

ก.2 การวิเคราะห์ลักษณะจุลภาคของครีโอลีพด้วยกล้องจุลทรรศน์

วิธีการวัด

1. หยดตัวอย่างกะทิลงบนสไลด์จำนวน 0.1 ml ปิดด้วย cover glass

2. นำแผ่นสไลด์ไปวางบนกล้องจุลทรรศน์เพื่อส่องดูลักษณะจุลภาคของครีโอลีพ

เล็ท โดยใช้กำลังขยาย 40 เท่า ถ่ายภาพลักษณะของครีโอลีพด้วยกล้องถ่ายภาพ (Olympus, C-7070WZ)

ก.3 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (particle size) โดยใช้เครื่องวัดการกระเจิงแสงเลเซอร์

หลักการ : เป็นการวัดขนาดอนุภาคโดยอาศัยหลักการกระเจิงแสงของลำแสงที่มีความยาวคลื่น 750 nm โดยสามารถวัดขนาดของอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางช่วง 0.375-948.2 μm

วิธีการวัด

1. เขย่าตัวอย่างให้เข้ากันด้วย Vortex
2. เจือจางตัวอย่างโดยสุ่มตัวอย่างจำนวน 0.2 ml (ประมาณ 4 หยด) ลงในน้ำกลั่น ปริมาณ 20 ml เขย่าให้เข้ากัน
3. สุ่มตัวอย่างที่เจือจางแล้วจำนวน 0.2 ml ลงใน chamber ใส่ตัวอย่างในเครื่องวัด ที่มีน้ำกลั่นบรรจุอยู่ประมาณ 250 ml จากนั้นเครื่องจะทำการวิเคราะห์และรายงานผลของ particle size ของตัวอย่าง โดยที่ความเข้มข้นของตัวอย่างที่เจือจางในการวิเคราะห์จะมีค่าประมาณร้อยละ 0.001 โดยปริมาตร

ก.4 %creaming index (Onsaard et al., 2005)

- วิเคราะห์โดยการวัดส่วนสูงของชั้นน้ำและส่วนสูงของน้ำกะทิทั้งหมด แล้วนำไปคำนวณตามสมการที่ 1 เพื่อตรวจสอบระดับการแยกชั้นครีมที่มองเห็นได้

$$\text{โดยที่} \quad \% \text{creaming index} = \frac{\text{ความสูงของชั้นน้ำ}}{\text{ความสูงของน้ำกะทิทั้งหมด}} \times 100 \quad (1)$$

ก.5 %oiling off index

- วิเคราะห์โดยการวัดส่วนสูงของชั้นน้ำมันและส่วนสูงของน้ำกะทิทั้งหมด แล้วนำไปคำนวณตามสมการที่ 2 เพื่อตรวจสอบระดับการแยกชั้นน้ำมันของกะทิที่มองเห็นได้

$$\text{โดยที่} \quad \% \text{oiling off index} = \frac{\text{ความสูงของชั้นน้ำมัน}}{\text{ความสูงของน้ำกะทิทั้งหมด}} \times 100 \quad (2)$$

ก.6 การวิเคราะห์ความหนืดโดยใช้เครื่อง Brookfield model LVDV-I+

วิธีการวัด

ตวงกะทิปริมาตร 600 ml นำไปวัดความหนืดด้วยเครื่อง Brookfield โดยใช้หัวเข็มเบอร์ 1 ตั้งความเร็วรอบไว้ที่ 2.5 rpm อ่านค่าความหนืดที่วัดได้ทุกๆ 10 วินาที เป็นเวลา 1 นาที

ก.7 การวิเคราะห์ความหนาแน่นของวัฏภาคน้ำและน้ำมันโดยใช้ขวดหาความถ่วงจำเพาะ

วิธีการวัด

1. นำตัวอย่างกะทิใส่หลอดทดลอง จากนั้นนำไปเหวี่ยงในเครื่อง centrifuge ความเร็วรอบ 1,020 rpm น้ำกะทิจะเกิดการแยกชั้นออกเป็น 2 ส่วน โดยมีส่วนใสอยู่ด้านล่างและส่วนที่เป็นครีมอยู่ด้านบนของหลอดทดลอง

2. ใช้ปิเปตดูดเอาส่วนใสออกมาใส่หลอดทดลอง จากนั้นนำไปเหวี่ยงในเครื่อง centrifuge จนกว่าจะได้เฉพาะส่วนใสที่ไม่มีส่วนของครีมเจือปน เก็บตัวอย่างที่ได้ใส่ในขวดเก็บตัวอย่าง

3. ส่วนที่เป็นชั้นครีมนำไปเคียน้ำมันโดยการกวนในกะทะไฟฟ้า จนกระทั่งเกิดการแตกมัน ใช้หลอดหยดดูดเอาส่วนของน้ำมันที่ได้ใส่ในขวดเก็บตัวอย่าง

4. นำเอาส่วนของชั้นน้ำและชั้นน้ำมันที่ได้ไปแช่ในอ่างน้ำเพื่อทำให้ตัวอย่างมีอุณหภูมิเป็น 20 °C ก่อนที่จะนำไปใส่ในขวดหาความถ่วงจำเพาะ

5. ชั่งน้ำหนักขวดหาความถ่วงจำเพาะโดยใช้เครื่องชั่งแบบดิจิตอลทศนิยม

4 ตำแหน่ง

6. ทำการทวนสอบความเที่ยงตรงของขวดหาความถ่วงจำเพาะ โดยบรรจุน้ำกลั่นอุณหภูมิ 20 °C ลงในขวดหาความถ่วงจำเพาะ นำไปชั่งน้ำหนัก คำนวณค่าความหนาแน่นของน้ำกลั่นตามสมการที่ 3

$$\text{ความหนาแน่นของตัวอย่าง} = \frac{\text{น้ำหนักของตัวอย่างที่บรรจุในขวด (g)} - \text{น้ำหนักขวดเปล่า (g)}}{\text{ปริมาตรของขวด (ml)}} \quad (3)$$

โดยที่ขวดหาความถ่วงจำเพาะขนาด 10 ml มีปริมาตรเท่ากับ 0.9981 ml

พบว่าความหนาแน่นของน้ำที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 0.9982 เมื่อนำไปเทียบกับตารางแสดงค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำพบว่ามีความเท่ากัน เนื่องจากในกรณีของน้ำค่าความหนาแน่นและค่าความถ่วงจำเพาะคือค่าเดียวกัน

7. เทส่วนของชั้นน้ำหรือน้ำมันในขวดเก็บตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เย็นจนมีอุณหภูมิ 20 °C ลงในขวดหาความถ่วงจำเพาะ นำไปชั่งน้ำหนัก คำนวณค่าความหนาแน่นของวัตถุน้ำหรือน้ำมันตามสมการที่ 3 และคำนวณค่าความถ่วงจำเพาะของตัวอย่างตามสมการที่ 4

$$\text{ความถ่วงจำเพาะของตัวอย่าง} = \frac{\text{ความหนาแน่นของตัวอย่าง (ที่อุณหภูมิ 20 °C)}}{\text{ความหนาแน่นของน้ำ (ที่อุณหภูมิ 20 °C)}} \quad (4)$$

ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์

ข.1.1 การศึกษาการแช่แข็ง-ละลาย

ตารางที่ 8 ค่า %creaming index ของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการแช่แข็ง-ละลายที่จำนวนครั้งต่างๆ

ตัวอย่างกะทิ	creaming index ^w (%)					
	แช่แข็ง- ละลาย 1 ครั้ง	แช่แข็ง- ละลาย 2 ครั้ง	แช่แข็ง- ละลาย 3 ครั้ง	แช่แข็ง- ละลาย 4 ครั้ง	แช่แข็ง- ละลาย 5 ครั้ง	แช่แข็ง- ละลาย 6 ครั้ง
36%fat	52.38 ± 2.23	53.69 ± 1.30	55.77 ± 3.99	55.77 ± 3.99 (กลั่นเหมัน เปรี้ยว)		
18%fat	62.12 ± 3.16	67.24 ± 1.51 (กลั่นเหมัน เปรี้ยว)				
18%fat	42.14	45.10	47.63	48.76	48.76	48.76
ผ่านการพาส เจอไรซ์	± 3.79	± 3.03	± 1.63	± 1.67	± 1.65	± 1.65

หมายเหตุ : ^w เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง 3 ครั้ง ครั้งละ 2 ชั่วโมง

ข.1.2 การศึกษาเวลาที่ใช้ในการเก็บรักษาตัวอย่างกะทิ

ตารางที่ 9 ค่า %creaming index ของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเก็บรักษาที่เวลาต่างๆ

ตัวอย่าง	creaming index ^w (%)							
กะทิ	2	4	6	8	10	12	14	16
	สัปดาห์	สัปดาห์	สัปดาห์	สัปดาห์	สัปดาห์	สัปดาห์	สัปดาห์	สัปดาห์
36%fat	45.10	45.10	45.98	46.31	48.90	49.19	54.89	55.33
	± 3.79	± 4.75	± 5.44	± 5.38	± 5.66	± 3.34	± 3.10	± 3.87
		(กลั่นหั่น)	(กลั่นหั่น)	(กลั่นหั่น)	(กลั่น	(กลั่น	(กลั่น	(กลั่น
					เหม็น	เหม็น	เหม็น	เหม็น
					เปรี้ยว)	เปรี้ยว)	เปรี้ยว)	เปรี้ยว)
18%fat	65.13	65.38	65.38	67.07	67.80	69.49	72.07	72.07
	± 2.87	± 5.01	± 2.49	± 3.13	± 5.53	± 4.98	± 4.11	± 4.11
	(กลั่นหั่น)	(กลั่นหั่น)	(กลั่นหั่น)	(กลั่น	(กลั่น	(กลั่น	(กลั่น	(กลั่น
				เหม็น	เหม็น	เหม็น	เหม็น	เหม็น
				เปรี้ยว)	เปรี้ยว)	เปรี้ยว)	เปรี้ยว)	เปรี้ยว)
18%fat+	43.25	43.52	45.71	45.71	45.71	45.71	45.71	45.71
pasteurized	± 2.16	± 3.58	± 3.87	± 2.44	± 2.83	± 3.15	± 2.24	± 2.96

หมายเหตุ : ^w เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง 2 ครั้ง

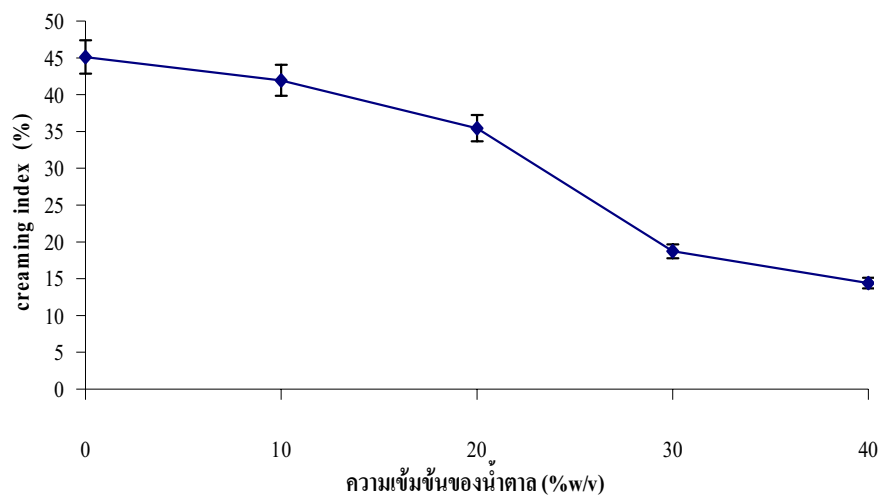
ข.1.3 การศึกษาหาเวลาที่เหมาะสมที่จะใช้ในการแช่แข็งตัวอย่างกะทิ

ตารางที่ 10 ค่า %creaming index ของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการแช่แข็งที่เวลาต่างๆ

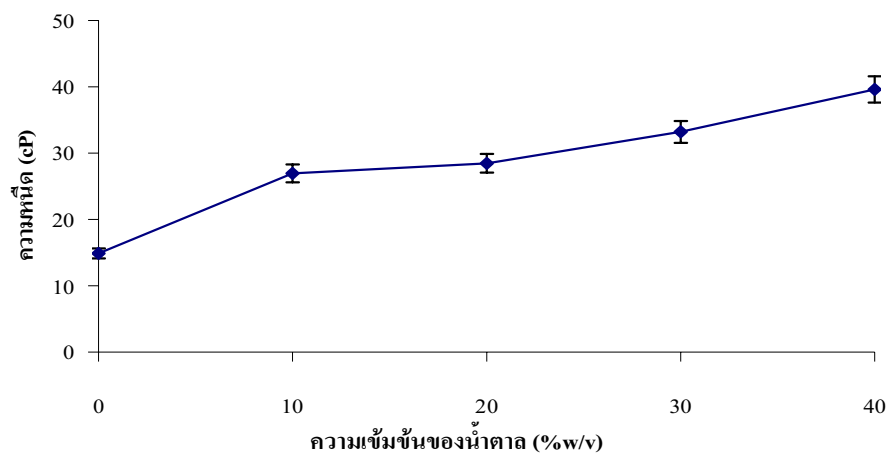
ตัวอย่าง	creaming index ^w (%)						
กะทิ	แช่แข็ง	แช่แข็ง	แช่แข็ง	แช่แข็ง	แช่แข็ง	แช่แข็ง	แช่แข็ง
	21	45	69	93	117	141	165
	ชั่วโมง	ชั่วโมง	ชั่วโมง	ชั่วโมง	ชั่วโมง	ชั่วโมง	ชั่วโมง
18%fat	57.89	61.40	64.04	68.82	71.05	71.44	71.56
	± 3.62	± 2.77	± 2.53	± 1.04	± 2.27	± 3.02	± 1.26
	(กลั่นหั่น)	(กลั่นหั่น)	(กลั่น	(กลั่น	(กลั่น	(กลั่น	(กลั่น
			เหม็น	เหม็น	เหม็น	เหม็น	เหม็น
			เปรี้ยว)	เปรี้ยว)	เปรี้ยว)	เปรี้ยว)	เปรี้ยว)
18%fat	42.98	44.74	44.73	44.74	44.74	44.74	44.72
ผ่านการ	± 2.22	± 3.11	± 2.02	± 1.56	± 2.31	± 2.40	± 1.48
พาสเจอร์ไรซ์							

หมายเหตุ : ^w เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง 3 ครั้ง ครั้งละ 2 ชั่วโมง

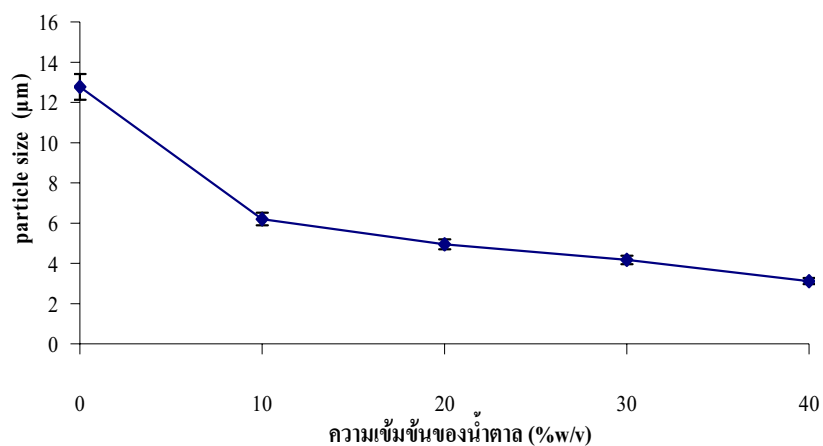
ข.2 การศึกษาความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสที่มีผลต่อความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของกะทิ



ภาพที่ 38 ค่า %creaming index ของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติมน้ำตาลซูโครสที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ

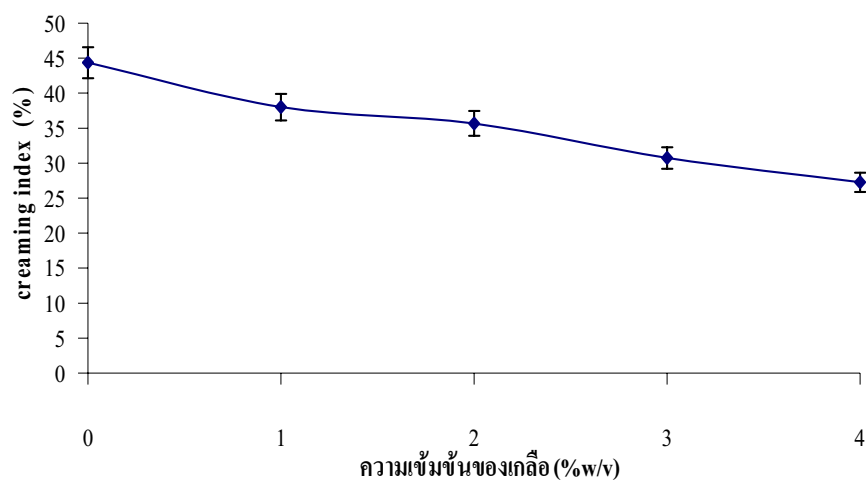


ภาพที่ 39 ค่าความหนืดเฉลี่ยของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติมน้ำตาลซูโครสที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ

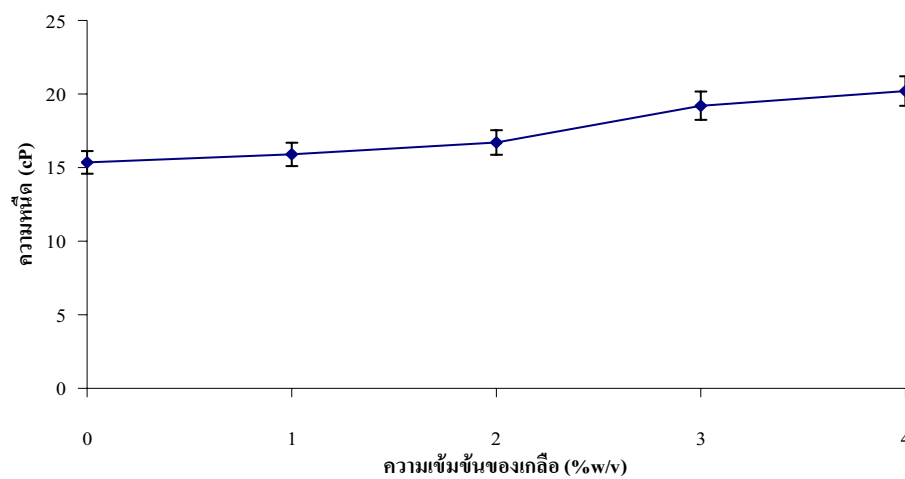


ภาพที่ 40 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติมน้ำตาลซูโครสที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ

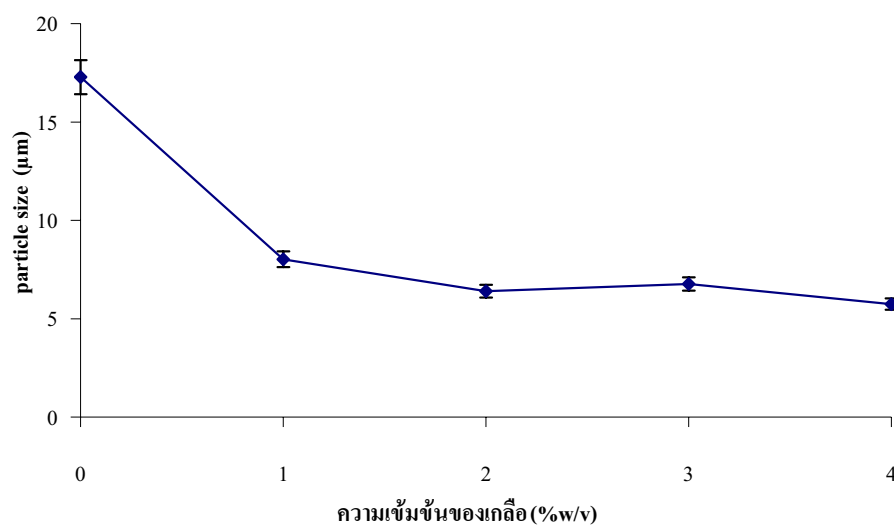
ข.3 การศึกษาความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่มีผลต่อความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของกะทิ



ภาพที่ 41 ค่า %creaming index ของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติมเกลือ โซเดียมคลอไรด์ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ

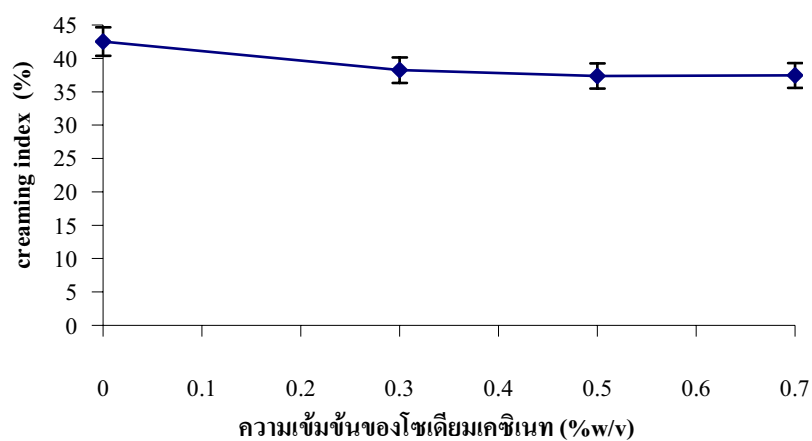


ภาพที่ 42 ค่าความหนืดเฉลี่ยของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติมกลีเซอรอลโซเดียมคลอไรด์ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ

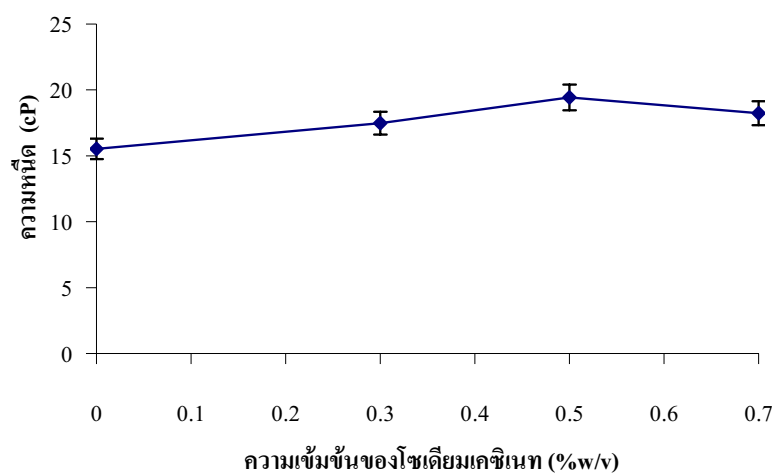


ภาพที่ 43 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติมกลีเซอรอลโซเดียมคลอไรด์ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ

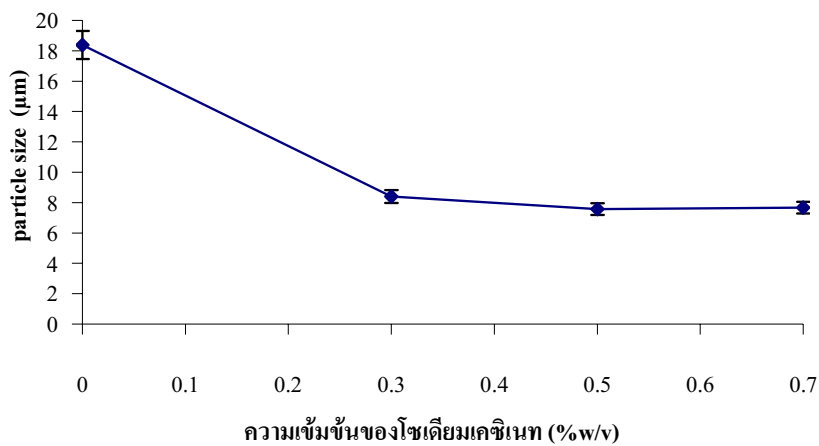
ข.4.1 การศึกษาความเข้มข้นของโซเดียมเคซิเนตที่มีผลต่อความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของกะทิ



ภาพที่ 44 ค่า %creaming index ของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติม โซเดียมเคซิเนตที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ

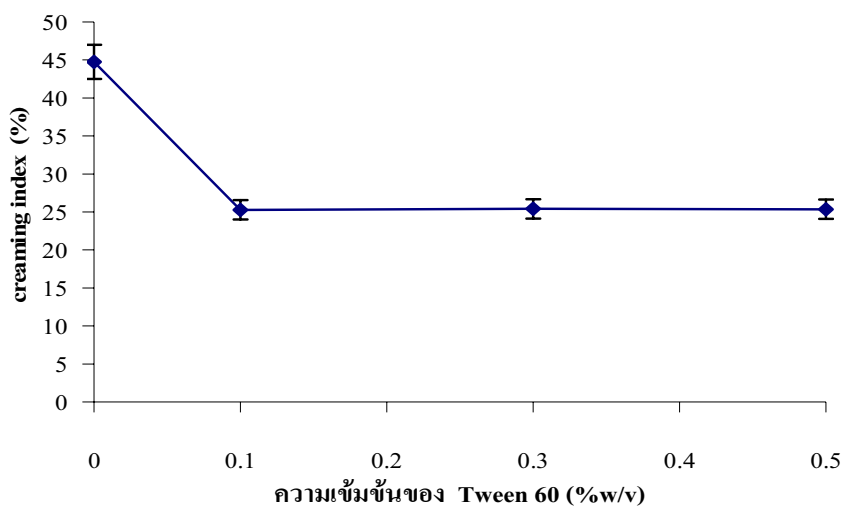


ภาพที่ 45 ค่าความหนืดเฉลี่ยของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติมโซเดียมเคซิเนตที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ

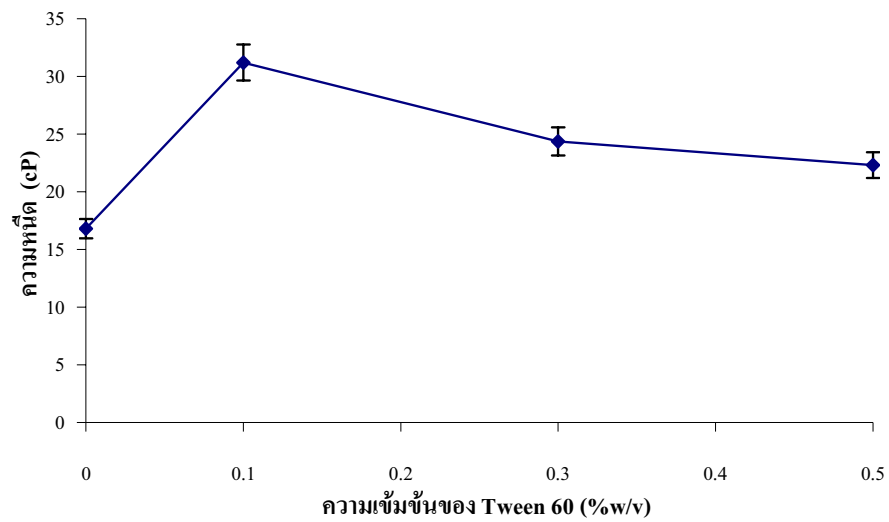


ภาพที่ 46 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติมโซเดียมเลซิเนทที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ

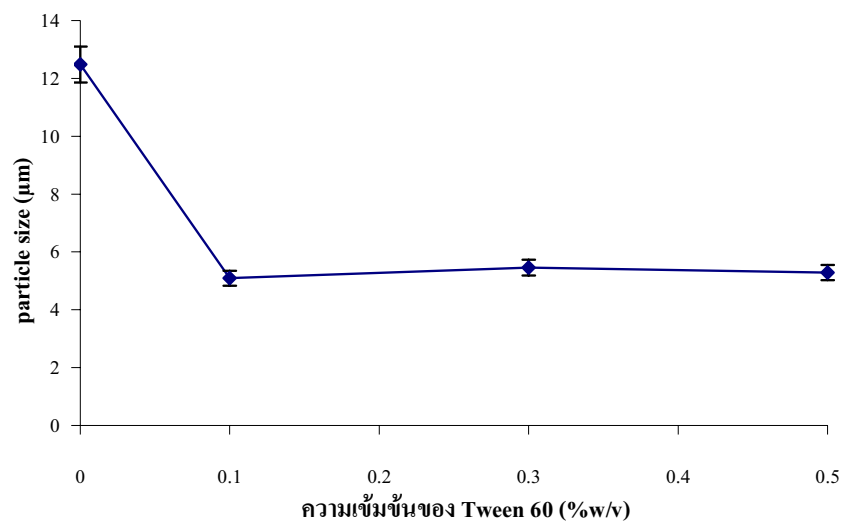
ข.4.2 การศึกษาความเข้มข้นของ Tween 60 ที่มีผลต่อความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของกะทิ



ภาพที่ 47 ค่า %creaming index ของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติม Tween 60 ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ

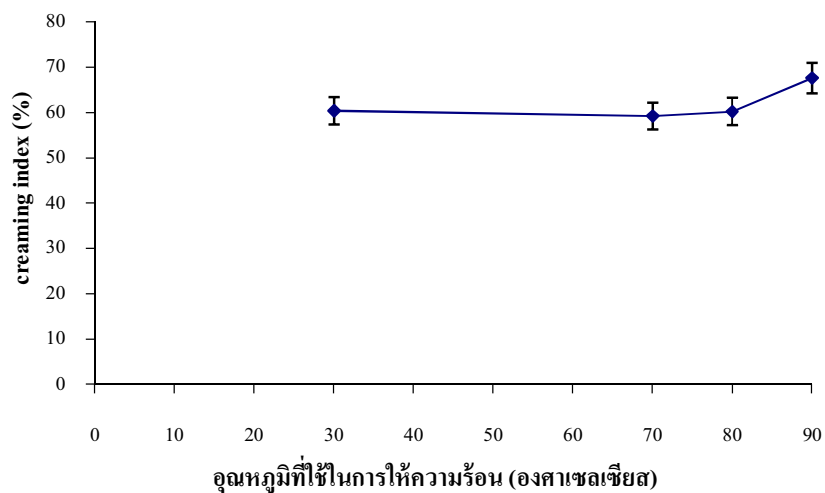


ภาพที่ 48 ค่าความหนืดเฉลี่ยของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติม Tween 60 ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ

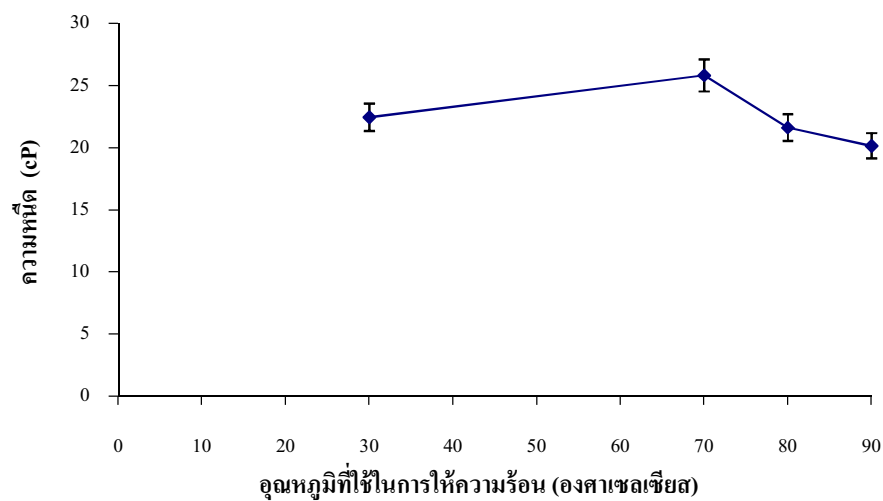


ภาพที่ 49 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการเติม Tween 60 ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ

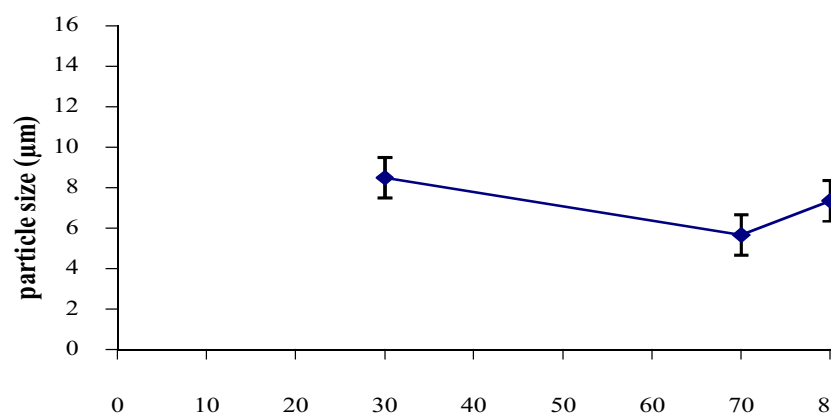
ข.5 การศึกษาผลของการให้ความร้อนเบื้องต้นที่มีผลต่อความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของกะทิ



ภาพที่ 50 ค่า %creaming index ของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ



ภาพที่ 51 ค่าความหนืดเฉลี่ยของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ



ภาพที่ 52 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของตัวอย่างกะทิที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ

ภาคผนวก ก

การทดลองการเติมเกลือลงในตัวอย่างกะทิที่ผ่านและไม่ผ่านการให้ความร้อน
ในระดับพาสเจอร์ไรซ์

การทดลองการเติมเกลือลงในตัวอย่างกะทิที่ผ่านและไม่ผ่านการให้ความร้อนในระดับพาสเจอร์ไรซ์

วิธีการทดลอง

1. เตรียมตัวอย่างกะทิไขมัน 18%v/v จำนวน 2 ตัวอย่าง โดยตัวอย่างที่ 1 เป็นกะทิที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนระดับพาสเจอร์ไรซ์ (อุณหภูมิ 74 °C) ส่วนตัวอย่างที่ 2 เป็นกะทิที่ผ่านการให้ความร้อนระดับพาสเจอร์ไรซ์ในหม้อต้มไอน้ำสองชั้นที่อุณหภูมิ 74 °C เป็นเวลา 15 วินาที
2. นำตัวอย่างทั้ง 2 ไปผ่านการโฮโมจิไนซ์ด้วยเครื่องโฮโมจิไนเซอร์แบบ 2 ขั้นตอนที่มีความดัน 1500/500 psi
3. เติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 4%w/v ลงในตัวอย่างกะทิทั้ง 2 ตัวอย่าง
4. บรรจุตัวอย่างกะทิที่ได้ใส่ขวดพลาสติกขนาด 70 ml ตัวอย่างละ 2 ขวด โดยปริมาตรที่บรรจุในแต่ละขวดคือ 60 ml จากนั้นนำไปทำให้เย็นจนกระทั่งตัวอย่างกะทิต่ำกว่าอุณหภูมิ 20 °C
5. นำตัวอย่างกะทิทั้งหมดใส่ช่องแช่แข็งในตู้เย็น (อุณหภูมิ -18 °C) ทิ้งไว้ 45 ชั่วโมง นำมาละลายในอ่างน้ำ (อุณหภูมิ 40 °C) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง วัดค่า %creaming index, %oiling off index

ผลการทดลอง

จากผลที่ได้ในตารางที่ 11 และภาพที่ 53 พบว่าการเติมเกลือลงในตัวอย่างกะทิที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนจะทำให้กะทิมีค่า %creaming index สูงกว่าและเกิดการแยกของชั้นน้ำมันที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ในขณะที่การเติมเกลือลงในตัวอย่างกะทิที่ผ่านการให้ความร้อนจะทำให้กะทิมีความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายมากกว่า และไม่พบการแยกของชั้นน้ำมันที่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า

เมื่อพิจารณาในด้านสี กลิ่น และรสชาติของกะทิ จะพบว่าสีของตัวอย่างทั้งสองจะมีสีใกล้เคียงกับกะทิสด มีรสเค็ม กะทิที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนจะมีกลิ่นหืน ในขณะที่กะทิที่ผ่านการให้ความร้อนจะยังคงมีกลิ่นของกะทิสดอยู่

ตารางที่ 11 ค่า %creaming index และ %oiling off index ของตัวอย่างกะทิหลังผ่านการแช่แข็ง-ละลาย

ตัวอย่างกะทิไขมัน 18%v/v	creaming index (%)	oiling off index (%)
ผ่านการให้ความร้อนระดับพาสเจอร์ไรส์ก่อน เติมเกลือความเข้มข้น 4%w/v	32.03	0.00
ไม่ผ่านการให้ความร้อนระดับพาสเจอร์ไรส์ ก่อนเติมเกลือความเข้มข้น 4%w/v	67.35	14.29



ภาพที่ 53 ตัวอย่างกะทิหลังผ่านการแช่แข็ง-ละลาย (ก) เติมเกลือลงในตัวอย่างกะทิที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนระดับพาสเจอร์ไรส์ (ข) เติมเกลือลงในตัวอย่างกะทิที่ผ่านการให้ความร้อนระดับพาสเจอร์ไรส์

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล ที่อยู่	นางสาวกิตติมา ชวาลศิริกุล 53/250 ถ. บางบอน 3 ตำบลบางบอน อำเภอบางบอน จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ที่ทำงาน	บริษัทเทพผดุงพรมะพร้าว จำกัด 58-59 ถ.พุทธมณฑลสาย 4 ตำบลกระทุ่มล้ม อำเภอสามปราชญ์ จังหวัดนครปฐม
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2545	สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร ภาควิชาจุลชีววิทยา จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร
พ.ศ. 2551	ศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
ประวัติการทำงาน	
พ.ศ. 2545-ปัจจุบัน	หัวหน้าแผนกประกันคุณภาพ บริษัทเทพผดุงพรมะพร้าว จำกัด จังหวัดนครปฐม