การผลิตเนยโกโก้เลียนแบบจากน้ำมันเมล็ดมะม่วงและน้ำมันปาล์มมิดแฟรคชั่น

โดย
นางสาวพิมพ์นิภา กาเผือกงาม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร
ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การผลิตเนยโกโก้เลียนแบบจากน้ำมันเมล็ดมะม่วงและน้ำมันปาล์มมิดแฟรคชั่น

โดย
นางสาวพิมพ์นิภา กาเผือกงาม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร
ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2552
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

PRODUCTION OF COCOA BUTTER EQUIVALENT FROM MANGO SEED ALMOND FAT AND PLAM OIL MID - FRACTION

By

Phimnipha Kaphueakngam

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree

MASTER OF SCIENCE

Department of Food Technology

Graduate School

SILPAKORN UNIVERSITY

2009

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง " การผลิตเนยโกโก้เลียนแบบจากน้ำมันเมล็ดมะม่วงและน้ำมันปาล์มมิดแฟรคชั่น " เสนอโดย นางสาวพิมพ์นิภา กาเผือกงาม เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร

……..
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ชินะตังกูร)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
วันที่..........เดือน.................... พ.ศ. ....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โสภาค สอนไว
2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรุณศรี ลีจีรจำเนียร
3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ คูวิจิตรจารุ

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกพันธ์ แก้วมณีชัย)
............/......................../..............

.... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยณัตร ยิ้มศิริ)
............/......................../..............

.... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โสภาค สอนไว)
............/......................../..............

.... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรุณศรี ลีจีรจำเนียร)
............/......................../..............

.... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ คูวิจิตรจารุ)
............/......................../..............

51403208 : สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร
คำสำคัญ : เนยโกโก้เลียนแบบ/ น้ำมันเมล็ดมะม่วง/ น้ำมันปาล์มมิดแฟรคชั่น

พิมพ์นิภา กาเผือกงาม : การผลิตเนยโกโก้เลียนแบบจากน้ำมันเมล็ดมะม่วงและน้ำมันปาล์มมิดแฟรคชั่น. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผศ.ดร.โสภาค สอนไว , ผศ.ดร.อรุณศรี ลีจีรจำเนียร และ ผศ.ดร.ปราโมทย์ คูวิจิตรจารุ. 129 หน้า.

มะม่วงจัดเป็นหนึ่งในผลไม้ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทย โดยเฉพาะมะม่วงสายพันธุ์แก้วซึ่งถูกแปรรูปทางอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก ทำให้หลงเหลือเมล็ดมะม่วงเป็นของเสียจำนวนมากเช่นกัน ดังนั้นการนำเมล็ดมะม่วงมาใช้ประโยชน์จึงช่วยเพิ่มมูลค่าและลดปริมาณขยะซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาแก่สิ่งแวดล้อม เนื่องจากน้ำมันจากเมล็ดมะม่วงซึ่งมีกรดไขมันชนิดกรดสเตียริกในปริมาณสูงนั้น เป็นหนึ่งในน้ำมันจากพืชหกชนิดที่องค์กรควบคุมคุณภาพช็อกโกแลตของสหภาพยุโรป (EU Chocolate Directive) อนุญาตให้ใช้เป็นไขมันทดแทนเนยโกโก้หรือเนยโกโก้เลียนแบบในผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลตได้ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางในการผลิตเนยโกโก้เลียนแบบชนิด Cocoa Butter Equivalent (CBE) จากไขมันผสมระหว่างน้ำมันเมล็ดมะม่วงและน้ำมันปาล์มมิดแฟรคชั่นในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน 7 อัตราส่วน แล้วทำการวิเคราะห์กรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบด้วยเครื่อง Gas Chromatography-Flame Ionization Detector (GC-FID) เปรียบเทียบกับเนยโกโก้พบว่า ไขมันผสมทุกอัตราส่วนมีความแตกต่างจากเนยโกโก้อย่างมีนัยสำคัญ แต่มีกรดไขมันหลักที่เป็นองค์ประกอบเหมือนกับเนยโกโก้ ได้แก่ กรดปาล์มมิติก กรดสเตียริก และกรดโอเลอิก การศึกษาพฤติกรรมการหลอมเหลวจากค่าความเป็นของแข็งในรูปผลึกของไขมันด้วยเครื่อง pulse-Nuclear Magnetic Resonance แสดงให้เห็นว่า ไขมันผสมทุกอัตราส่วนยกเว้น 50:50 (w/w) และ 0:100 (w/w) ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงต่อน้ำมันปาล์มมิดแฟรคชั่นเกิดการหลอมเหลวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิร่างกาย (37°C) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ต้องการในผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลต อย่างไรก็ตามไขมันผสมอัตราส่วน 80:20 (w/w) มีพฤติกรรมการหลอมเหลวคล้ายคลึงกับเนยโกโก้อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ที่อุณหภูมิในช่วง 32-40°C และยังมีจุดหลอมเหลวใกล้เคียงกับเนยโกโก้มากที่สุด รวมถึงสามารถผสมเข้ากันได้กับ CB โดยไม่ก่อให้เกิด eutectic effect นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อใช้ไขมันผสมดังกล่าวร่วมกับเนยโกโก้แล้วไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการตกผลึกของเนยโกโก้ โดยตกผลึกในโครงสร้างแบบที่ V หรือ β_2 และไม่เปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการเกิด fat bloom ของเนยโกโก้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ดังนั้นไขมันผสมอัตราส่วน 80:20 (w/w) จึงน่าจะมีประสิทธิภาพดีในการใช้เป็นเนยโกโก้เลียนแบบตัวใหม่ชนิด CBE

ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2552

ลายมือชื่อนักศึกษา..

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ 1. .... 2. .... 3. ....

51403208 : MAJOR : FOOD TECHNOLOGY
KEY WORDS : COCOA BUTTER EQUIVALENT/ MANGO SEED ALMOND FAT/ PALM OIL MID-FRACTION

PHIMNIPHA KAPHUEAKNGAM : PRODUCTION OF COCOA BUTTER EQUIVALENT FROM MANGO SEED ALMOND FAT AND PLAM OIL MID - FRACTION. THESIS ADVISORS : ASST. PROF. SOPARK SONWAI, Ph.D., ASST. PROF. ARUNSRI LEEGEERAJUMNEAN, Ph.D., AND ASST. PROF. PRAMOTE KHUWIJITJARU, Ph.D.. 129 pp.

Mangoes (Mangifera indica *L*.) are one of Thailand's most economically important fruits. Particularly, the Keaw variety which has been used as raw materials for many canned fruit factories. Only the mango flesh is utilized by these factories, resulting in a vast amount of mango peels and seeds being discarded as waste. The mango seeds contain a type of fat called mango seed almond fat (MAF) that is high in stearic acid content. According to the 2003 EU regulations, only six vegetable oils can be used in EU chocolate and MAF is one of them. This research was aimed at producing cocoa butter equivalent from the blend of MAF and palm oil mid-fraction (PMF). Seven MAF-PMF blends with different proportions (100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50 and 0:100 (w/w) of MAF to PMF) including cocoa butter were characterized. Fatty acid composition was determined by Gas Chromatography-Flame Ionization Detector (GC-FID) and the result showed that all seven fat blends had palmitic acid, stearic acid and oleic acid as the main fatty acid components like cocoa butter, however with varying amount. The study of solid fat content (SFC) as a function of temperature using pulsed-Nuclear Magnetic Resonance revealed that all blends except 50:50 and 0:100 melted completely at the body temperature (37°C). However only 80:20 blend exhibited a melting behavior closest to that of cocoa butter ($p < 0.05$), especially between 32°C and 40°C where the fat experienced a sharp decrease in SFC as the temperature increased. The 80:20 blend did not exhibit "eutectic effect" by mixing it with cocoa butter at various proportions and had a slip melting point closest to that of cocoa butter. Moreover, the blend did not affect the crystallization behavior of cocoa butter which crystallized into form V or β_2 and did not change the fat bloom formation behavior of cocoa butter when mixed with cocoa butter in the ratio of 1:5.64 (w/w) of 80:20 blend to cocoa butter. As a result of this, the 80:20 blend has the most potential for future use as cocoa butter equivalent.

Department of Food Technology Graduate School, Silpakorn University Academic Year 2009

Student's signature..

Thesis Advisors' signature 1. .... 2. .... 3. …........................

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่อง การผลิตเนยโกโก้เลียนแบบจากน้ำมันเมล็ดมะม่วงและน้ำมันปาล์มมิดแฟรคชั่น (Production of cocoa butter equivalent from mango seed almond fat and palm oil mid-fraction) สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะได้รับความกรุณาจากบุคคล องค์กร และทุนสนับสนุนการวิจัย ดังต่อไปนี้

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.โสภาค สอนไว ที่ให้ความรู้ คำปรึกษา และความช่วยเหลือต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาและการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.อรุณศรี ลีจีรจำเนียร และ ผศ.ดร.ปราโมทย์ คูวิจิตรจารุ ที่ให้ความรู้และคำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาและการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณโรงงานแปรรูปมะม่วง จังหวัดราชบุรี ที่เอื้อเฟื้อเมล็ดมะม่วงสำหรับใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณบริษัท บรูเกอร์ ไบโอสปิน ประเทศไทย จำกัด ที่ให้การสนับสนุนและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่อง pulse-Nuclear Magnetic Resonance (p-NMR)

ขอขอบคุณบิดามารดา ที่สนับสนุนดิฉันในทุก ๆ ด้านรวมถึงการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ด้วย

ขอขอบคุณทุกท่านที่มีส่วนในการช่วยเหลือให้ดิฉันทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้อย่างสำเร็จลุล่วง

สุดท้ายนี้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสมบูรณ์มิได้หากไม่ได้รับการสนับสนุนเงินทุนการวิจัยจากทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่ของ ผศ.ดร.โสภาค สอนไว ตามโครงการความร่วมมือระหว่างสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษากับสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

นางสาวพิมพ์นิภา กาเผือกงาม
ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์

สารบัญ

		หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย		ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		จ
กิตติกรรมประกาศ		ฉ
สารบัญตาราง		ญ
สารบัญภาพ		ฎ
บทที่		
1	บทนำ	1
	ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
	วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
	สมมติฐานของการศึกษา	2
	ขอบเขตของการศึกษา	2
2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
	มะม่วงและน้ำมันเมล็ดมะม่วง	4
	น้ำมันปาล์มมิดแฟรคชั่น	8
	เนยโกโก้	10
	เนยโกโก้เลียนแบบ	12
	คุณสมบัติทางกายภาพของไขมันและน้ำมัน	17
	คุณสมบัติทางเคมีของไขมันและน้ำมัน	20
	การตกผลึกของไขมันและน้ำมัน	22
3	วิธีการดำเนินงานวิจัย	32
	วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	32
	การสกัดน้ำมันเมล็ดมะม่วง	34
	การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของไขมันผสมและเนยโกโก้	34
	การคัดเลือกไขมันผสมอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำไปใช้เป็น CBE	36
	การวิเคราะห์ความเข้ากันได้ของไขมันผสมอัตราส่วนที่เลือกกับเนยโกโก้	36

บทที่ หน้า

การศึกษาพฤติกรรมการตกผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วง น้ำมันปาล์มมิดแฟรคชั่น ไขมันผสมระหว่างน้ำมันเมล็ดมะม่วงและน้ำมันปาล์มมิดแฟรคชั่นในอัตราส่วนที่เลือกไว้ และไขมันผสมของอัตราส่วนที่เลือกที่ผสมกับเนยโกโก้เปรียบเทียบกับพฤติกรรมการตกผลึกของเนยโกโก้ 37

การศึกษาการเกิด fat bloom ของไขมัน 38

4 ผลและวิจารณ์ผลการดำเนินงานวิจัย 40

การสกัดน้ำมันเมล็ดมะม่วง 40

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของไขมันผสมและเนยโกโก้ 40

การคัดเลือกไขมันผสมในอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำไปใช้เป็น CBE 49

การวิเคราะห์ความเข้ากันได้ของไขมันผสมอัตราส่วนที่เลือกกับเนยโกโก้ 49

การศึกษาพฤติกรรมการตกผลึกของเนยโกโก้เลียนแบบที่ผลิตได้ (CBE) และของ CBE ที่ผสมกับเนยโกโก้เปรียบเทียบกับพฤติกรรมการตกผลึกของเนยโกโก้ 51

การศึกษาการเกิด fat bloom ของไขมันผสมอัตราส่วนที่เลือกไว้เป็น CBE 67

5 สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ 70

บรรณานุกรม 71

ภาคผนวก 78

ภาคผนวก ก การทำให้น้ำมันบริสุทธิ์ตามวิธีของ Wesson method 79

ภาคผนวก ข การเตรียมเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมัน 81

ภาคผนวก ค การวิเคราะห์ค่าสปอนนิฟิเคชันตามวิธีของ PORIM test method 83

ภาคผนวก ง การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดโดยประยุกต์ใช้วิธีของ AOCS 85

ภาคผนวก จ การวิเคราะห์ค่า SFC ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยใช้ pulse-Nuclear Magnetic Resonance 87

ภาคผนวก ฉ การหาค่า Slip Melting Point (SMP) 89

ภาคผนวก ช X-ray diffraction pattern จากการทำ tempering ตัวอย่างไขมัน 91

บทที่ หน้า

ภาคผนวก ซ โครมาโตแกรมของไขมันผสมและเนยโกโก้ 94
ภาคผนวก ฌ ตารางแสดงร้อยละของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของไขมันผสมอัตราส่วนต่าง ๆ และเนยโกโก้.. 99
ภาคผนวก ญ ภาพถ่ายพฤติกรรมการตกผลึกของไขมันจากกล้องจุลทรรศน์ 101
ภาคผนวก ฎ กลไกการตกผลึกของไขมันตัวอย่าง.. 117
ภาคผนวก ฏ X-ray diffraction pattern ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย X-ray diffractometer.. 119
ภาคผนวก ฐ ตารางสรุปผลการติดตามการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกในระหว่างการตกผลึกที่ 20°C.. 123
ภาคผนวก ฑ คำย่อ 127

ประวัติผู้วิจัย 129

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ปริมาณ (ตัน) มูลค่า (ล้านบาท) และตลาดหลักในการส่งออกมะม่วงของประเทศไทย..	5
2	ผลผลิตมะม่วงของประเทศไทยในปี 2547	6
3	ความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้น้ำมันปาล์มแยกส่วนในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ	10
4	ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%) ที่เป็นองค์ประกอบของเนยโกโก้	11
5	วัตถุดิบและไตรกลีเซอไรด์หลักของส่วนผสมของเนยโกโก้เลียนแบบชนิด CBE	13
6	จุดหลอมเหลวของกรดไขมันชนิดต่าง ๆ	18
7	จุดหลอมเหลวของไตรกลีเซอไรด์บางชนิด	19
8	คุณลักษณะและค่า X-ray short spacings (d; Å) ของผลึกรูปแบบต่าง ๆ ของเนยโกโก้	30
9	ตารางแสดงค่า X-ray short spacings (d; Å) ของผลึกรูปแบบต่าง ๆ ของไขมัน	31
10	ร้อยละของปริมาณของกรดไขมัน* ที่เป็นองค์ประกอบของไขมันผสมและเนยโกโก้	41
11	ตารางแสดงร้อยละของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของไขมันผสมอัตราส่วนต่าง ๆ และเนยโกโก้	100
12	ตารางแสดงค่า d-short spacing (Å) ของโครงสร้างผลึกแต่ละรูปแบบที่ระยะเวลาต่าง ๆ ในระหว่างการตกผลึก	124
13	ตารางสรุปโครงสร้างผลึกในนาทีที่ 60 ของไขมันแต่ละตัวอย่าง	126

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ภาพแสดงส่วนประกอบของผลมะม่วง	7
2	กระบวนการแยกส่วนแบบแห้งของน้ำมันปาล์ม	9
3	Iso-solids phase diagram for cocoa butter/CBS. Reprinted with the permission of Loders Croklaan	15
4	Iso-solids phase diagram for cocoa butter/CBR. Reprinted with the permission of Loders Croklaan	16
5	แผนภาพแสดงความสามารถในการละลาย ณ จุดอิ่มตัวและจุดอิ่มตัวยิ่งยวด	23
6	การจัดเรียงตัวของผลึกของไตรกลีเซอไรด์รูปแบบ α, β' และ β	25
7	ภาพแสดงทิศทางของแสงที่ทำให้เกิดภาพพื้นดำ	28
8	กฎการสะท้อนของแบรกก์ เมื่อรังสีเอ็กซ์เมื่อตกกระทบระนาบของผลึก	29
9	แผนภูมิแสดงค่าสปอนนิฟิเคชัน (mg KOH/g oil) ของไขมันผสมและเนยโกโก้	42
10	แผนภูมิแสดงค่าไอโอดีน (g I_2/น้ำมัน 100 g) ของไขมันผสมและเนยโกโก้	44
11	แผนภูมิแสดงค่าความเป็นกรด (mg NaOH/g oil) ของไขมันผสมและเนยโกโก้	45
12	ค่า Solid Fat Content (%) ของไขมันผสมอัตราส่วนต่าง ๆ และเนยโกโก้ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 15-40°C	47
13	แผนภูมิแสดงจุดหลอมเหลว (Slip melting point; °C) ของไขมันผสมอัตราส่วนต่าง ๆ และเนยโกโก้	48
14	ค่า Solid Fat Content (%) ของไขมันผสมอัตราส่วน 80:20 (w/w) และเนยโกโก้ที่อุณหภูมิ 20°C	50
15	การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของ MAF ตามเวลา (t มีหน่วยเป็นนาที) ทุก ๆ 10 นาที ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 500 เท่า	53
16	การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของ PMF ตามเวลา (t มีหน่วยเป็นนาที) ทุก ๆ 10 นาที ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 500 เท่า	54
17	การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของ CBE ตามเวลา (t มีหน่วยเป็นนาที) ทุก ๆ 10 นาที ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 500 เท่า	55

ภาพที่ หน้า

18 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของ CB ตามเวลา (t มีหน่วยเป็นนาที) ทุก ๆ 10 นาที ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 500 เท่า 56

19 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของ MIX ตามเวลา (t มีหน่วยเป็นนาที) ทุก ๆ 10 นาที ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 500 เท่า 57

20 การเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นของแข็งในรูปผลึก (SFC) ของไขมันชนิดต่าง ๆ ตามเวลาในระหว่างการตกผลึกที่อุณหภูมิคงที่ที่ 20°C 58

21 X-ray diffraction pattern ของ MAF ที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของการตกผลึกที่ 20°C........ 61

22 X-ray diffraction pattern ของ MAF ที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของการตกผลึกที่ 20°C........ 62

23 X-ray diffraction pattern ของ MAF ที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของการตกผลึกที่ 20°C........ 64

24 X-ray diffraction pattern ของ MAF ที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของการตกผลึกที่ 20°C........ 65

25 X-ray diffraction pattern ของ MAF ที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของการตกผลึกที่ 20°C........ 67

26 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า WI ของ CBE, CBE ผสมกับ CB ในอัตราส่วน 1:5.64 (w/w) เปรียบเทียบกับ CB เมื่อทำการเก็บรักษาไขมันที่อุณหภูมิ 25°C เป็นระยะเวลา 6 เดือน 68

27 X-ray diffraction pattern จากการทำ tempering ตัวอย่างเนยโกโก้ 92

28 X-ray diffraction pattern จากการทำ tempering ตัวอย่าง CBE 92

29 X-ray diffraction pattern จากการทำ tempering ตัวอย่างไขมันผสมระหว่าง CEB และ CB ในอัตราส่วน 1:5.64 (w/w) หรือ MIX 93

30 โครมาโตแกรมของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของไขมันผสมอัตราส่วน 0:100 (w/w)........ 95

31 โครมาโตแกรมของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของไขมันผสมอัตราส่วน 50:50 (w/w)........ 95

32 โครมาโตแกรมของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของไขมันผสมอัตราส่วน 60:10 (w/w)........ 96

33 โครมาโตแกรมของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของไขมันผสมอัตราส่วน 70:30 (w/w)........ 96

ภาพที่ หน้า

34 โครมาโตแกรมของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของไขมันผสมอัตราส่วน 80:20 (w/w) 97

35 โครมาโตแกรมของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของไขมันผสมอัตราส่วน 90:10 (w/w) 97

36 โครมาโตแกรมของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของไขมันผสมอัตราส่วน 100:0 (w/w) 98

37 โครมาโตแกรมของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของเนยโกโก้ 98

38 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของ MAF ตั้งแต่นาทีที่ 0-12 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 500 เท่า.... 102

39 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของ MAF ตั้งแต่นาทีที่ 14-40 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 500 เท่า.... 103

40 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของ MAF ตั้งแต่นาทีที่ 45-60 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 500 เท่า.... 104

41 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของ PMF ที่อุณหภูมิ 24°C, 23°C, 21°C และนาทีที่ 0-8 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 500 เท่า 105

42 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของ PMF ตั้งแต่นาทีที่ 10-30 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 500 เท่า.... 106

43 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของ PMF ตั้งแต่นาทีที่ 35-60 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 500 เท่า.... 107

44 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของ CBE ตั้งแต่นาทีที่ 0-12 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 500 เท่า.... 108

45 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของ CBE ตั้งแต่นาทีที่ 14-40 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 500 เท่า.... 109

46 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของ CBE ตั้งแต่นาทีที่ 45-60 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 500 เท่า.... 110

47 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของ CB ตั้งแต่นาทีที่ 0-12 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 500 เท่า.... 111

ภาพที่ หน้า

48 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของ CB ตั้งแต่นาทีที่ 14-40 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 500 เท่า.... 112

49 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของ CB ตั้งแต่นาทีที่ 45-60 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 500 เท่า.... 113

50 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของ MIX ตั้งแต่นาทีที่ 0-12 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 500 เท่า.... 114

51 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของ MIX ตั้งแต่นาทีที่ 14-40 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 500 เท่า.... 115

52 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของ MIX ตั้งแต่นาทีที่ 45-60 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 500 เท่า.... 116

53 การเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นของแข็งในรูปผลึก (SFC) ของไขมันชนิดต่าง ๆ ตามเวลาในระหว่างการตกผลึกที่อุณหภูมิคงที่ที่ 20°C ระยะเวลา 3 ชั่วโมง 118

54 X-ray diffraction pattern ของ MAF ซึ่งตกผลึกที่ 20°C ที่นาทีที่ 90 และ 180.............. 120

55 X-ray diffraction pattern ของ PMF ซึ่งตกผลึกที่ 20°C ที่นาทีที่ 90 และ 180 120

56 X-ray diffraction pattern ของ CBE ซึ่งตกผลึกที่ 20°C ที่นาทีที่ 90 และ 180 121

57 X-ray diffraction pattern ของ CB ซึ่งตกผลึกที่ 20°C ที่นาทีที่ 90 และ 180.................. 121

58 X-ray diffraction pattern ของ MIX ซึ่งตกผลึกที่ 20°C ที่นาทีที่ 90 และ 180 122

บทที่ 1

บทนำ (Introduction)

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

มะม่วง (*Mangifera indica* L.) จัดเป็นหนึ่งในผลไม้ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจต่อประเทศในภูมิภาคเขตร้อน สำหรับในประเทศไทยแล้วมีผลผลิตมะม่วงรวมในประเทศประมาณ 2.7 ล้านตันในปี 2551 (รายงานสถานการณ์มะม่วง, 2552) การผลิตมะม่วงในทางการค้าของประเทศไทยจำแนกได้เป็น 3 ประเภท คือ ใช้กินผลดิบ ผลสุก และแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์กระป๋อง โดยมีส่วนของเมล็ดมะม่วงที่เป็นของเหลือทิ้ง (waste) จากการบริโภคและการแปรรูปผลิตภัณฑ์มะม่วงในแต่ละปีเป็นปริมาณมาก โดยเฉพาะเพียงแค่มะม่วงสายพันธุ์แก้วพันธุ์เดียวนั้นมีผลผลิตถึง 387,017 ตัน ในปี 2547 ซึ่งก่อให้เกิดเมล็ดเหลือทิ้งถึง 49,247.84 ตัน ทำให้เกิดการสูญเสียโดยไร้ประโยชน์ ทั้ง ๆ ที่ส่วนเนื้อในเปลือกแข็งที่เป็นสีขาวของเมล็ดมะม่วงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้คือ นำไปผลิตเป็นแป้งหรือนำไปสกัดน้ำมัน ซึ่งหากนำเมล็ดเหลือทิ้งดังกล่าวมาผลิตเป็นน้ำมันเมล็ดมะม่วงพบว่า จะสามารถผลิตน้ำมันได้ถึง 2,695.00 ตัน คิดเป็นมูลค่ากว่า 1,705.34 ล้านบาท น้ำมันเมล็ดมะม่วงนี้มีความเป็นพิเศษอยู่ตรงที่ว่าเป็นหนึ่งในน้ำมันจากพืชเพียง 6 ชนิดที่ได้รับการยินยอมโดยองค์กรควบคุมคุณภาพช็อกโกแลตของสหภาพยุโรป (EU Chocolate Directive) ให้ใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตเนยโกโก้เลียนแบบ (cocoa butter alternative) ชนิด cocoa butter equivalent (หรือที่เรียกว่า CBE) สำหรับใช้ผสมหรือทดแทนเนยโกโก้ในช็อกโกแลต ในปัจจุบันเนยโกโก้ซึ่งเป็นไขมันจากต้นโกโก้ที่เป็นส่วนผสมหลักของช็อกโกแลตนั้นมีราคาแพงและมีการผันแปรของปริมาณการผลิตแบบปีต่อปี เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพดินฟ้าอากาศ และความไม่มั่นคงของสภาวะทางการเมืองของประเทศผู้ปลูกต้นโกโก้ ทำให้ปริมาณความต้องการของเนยโกโก้เลียนแบบพุ่งสูงขึ้น ประเทศไทยเองในปัจจุบันได้สั่งสินค้าประเภทเนยโกโก้เลียนแบบเข้ามาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตไอศกรีม ช็อกโกแลต เบเกอรี่ ลูกอม ลูกกวาด และขนมขบเคี้ยวต่อปีในปริมาณมาก ดังนั้นเพื่อเป็นการลดปริมาณการนำเข้าเนยโกโก้เลียนแบบในอนาคตและเพื่อเป็นการส่งเสริมให้มีการใช้ประโยชน์จากน้ำมันจากพืชที่ผลิตได้เองภายในประเทศ งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาถึงการผลิตเนยโกโก้เลียนแบบจากน้ำมันเมล็ดมะม่วง (สายพันธุ์แก้ว) โดยการผสมกับน้ำมันจากพืชชนิดอื่นในอัตราส่วนที่เหมาะสม เพื่อให้มีชนิดและอัตราส่วนของกรดไขมันคุณสมบัติต่าง ๆ ทั้งทางเคมี ทางกายภาพ รวมถึงพฤติกรรมการการตกผลึกที่เหมือนหรือใกล้เคียงกับ

ของเนยโกโก้ให้มากที่สุด เนื่องจากน้ำมันเมล็ดมะม่วงมีไตรกลีเซอไรด์ชนิด Stearo-oleo-stearin (StOSt) เป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง โดย StOSt เป็น 1 ใน 3 ของชนิดไตรกลีเซอไรด์ที่เป็นองค์ประกอบหลักของเนยโกโก้ อีก 2 ชนิดที่เหลือคือ Palmito-oleo-palmitin (POP) และ Palmito-oleo-stearin (POSt) จึงต้องมีการผสมน้ำมันจากพืชชนิดอื่น ๆ ที่มีไตรกลีเซอไรด์ชนิด POP และ POSt เข้าไปด้วย ซึ่งโครงการวิจัยนี้จะเลือกใช้น้ำมันปาล์มมิดแฟรคชั่น เนื่องจากมีไตรกลีเซอไรด์ทั้ง 2 ชนิด ดังกล่าวเป็นองค์ประกอบ อีกทั้งยังได้มาจากปาล์มน้ำมันซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจที่ปลูกกันอย่างแพร่หลายในภาคใต้ของประเทศไทย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาองค์ประกอบของกรดไขมัน คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพรวมถึงพฤติกรรมการตกผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์แก้ว

1.2.2 เพื่อผลิตเนยโกโก้เลียนแบบชนิด CBE จากน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์แก้วและน้ำมันปาล์มมิดแฟรคชั่นที่ผสมกันในอัตราส่วนที่เหมาะสม ซึ่งทำให้มีชนิดและปริมาณของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบ คุณสมบัติต่าง ๆ ทั้งทางเคมีและทางกายภาพ รวมถึงพฤติกรรมการตกผลึกที่เหมือนหรือใกล้เคียงกับของเนยโกโก้

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1.3.1 ทำให้เข้าใจถึงองค์ประกอบของกรดไขมัน คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ รวมถึงพฤติกรรมการตกผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์แก้ว

1.3.2 สามารถผลิตเนยโกโก้เลียนแบบชนิด CBE จากน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์แก้วและน้ำมันปาล์มมิดแฟรคชั่นที่มีชนิดและปริมาณของกรดไขมันองค์ประกอบ คุณสมบัติต่าง ๆ ทั้งทางเคมีและทางกายภาพ รวมถึงพฤติกรรมการตกผลึกที่เหมือนหรือใกล้เคียงกับของเนยโกโก้ได้

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1.4.1 การศึกษาองค์ประกอบของกรดไขมัน คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพรวมถึงพฤติกรรมการตกผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์แก้ว

1.4.2 การศึกษาคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของเนยโกโก้เลียนแบบชนิด CBE จากน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์แก้วและน้ำมันปาล์มมิดแฟรคชั่นที่ผสมกันในอัตราส่วนต่าง ๆ เปรียบเทียบกับเนยโกโก้ แล้วทำการคัดเลือกไขมันผสมมา 1 อัตราส่วน ที่ให้คุณสมบัติโดยรวมที่เหมือนหรือใกล้เคียงกับของเนยโกโก้มากที่สุดไปใช้งานเป็น CBE

1.4.3 การตรวจสอบว่า ไขมันผสมในอัตราส่วนที่เลือกไว้จะสามารถนำไปใช้งานเป็น CBE ได้อย่างมีประสิทธิภาพหรือไม่ โดยจะทำการศึกษาพฤติกรรมการตกผลึกของไขมันผสมในอัตราส่วนที่เลือกไว้เปรียบเทียบกับของเนยโกโก้ และศึกษาพฤติกรรมการตกผลึกของไขมันผสมดังกล่าวที่มีการผสมเข้ากับเนยโกโก้ด้วยอัตราส่วน 1:5.64 (w/w) ซึ่งเป็นอัตราส่วนสูงสุดที่ยินยอมให้เติม CBE ในช็อกโกแลตได้โดย EU Chocolate Directive นั่นคือ มีไขมันผสมที่เป็น CBE อยู่ 5% โดยน้ำหนักของช็อกโกแลต (Stewart และ Kristott, 2004)

1.4.4 การศึกษาการเกิด fat bloom ของไขมันผสมที่เลือกไว้ และไขมันผสมที่ผสมกับเนยโกโก้ด้วยอัตราส่วน 1:5.64 (w/w) เปรียบเทียบกับการเกิด fat bloom ของเนยโกโก้เป็นระยะเวลานาน 6 เดือน

บทที่ 2
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature review)

2.1 มะม่วงและน้ำมันเมล็ดมะม่วง (Mango and mango seed almond fat)

มะม่วง (*Mangifera Indica* Linn.) เป็นผลไม้เขตร้อนที่ได้รับความนิยมในการบริโภคอย่างแพร่หลายทั่วโลก เนื่องจากมีรสชาติดีและมีกลิ่นหอมเฉพาะตัว โดยอินเดียเป็นประเทศที่มีการผลิตมะม่วงมากที่สุดเป็นอันดับหนึ่งของโลก ซึ่งสามารถผลิตมะม่วงได้กว่า 46.3% ของผลผลิตทั่วโลก รองลงมาได้แก่ จีน (12.5%) ไทย (8.2%) อินโดนีเซีย (7.9%) เม็กซิโก (5%) ฟิลิปปินส์ (4.6%) และปากีสถาน (4.4%) ตามลำดับ (กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2547) มะม่วงจัดเป็นผลไม้เศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยซึ่งสามารถปลูกได้เกือบทุกภูมิภาคของประเทศ โดยประเทศไทยมีผลผลิตมะม่วงรวมประมาณ 2.09 ล้านตัน ในปี 2549 (กรมการค้าต่างประเทศ, 2550) ประมาณ 2.3 ล้านตันต่อปี ในปี 2550 และประมาณ 2.7 ล้านตันในปี 2551 (กรมการค้าต่างประเทศ, 2552) โดยผลผลิตส่วนใหญ่กว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ใช้ในการบริโภคภายในประเทศเป็นหลัก ที่เหลือส่งออกต่างประเทศทั้งในรูปของมะม่วงสด มะม่วงกระป๋อง มะม่วงอบแห้ง และมะม่วงแช่แข็ง ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งพบว่า ในปี 2551 ไทยส่งออกมะม่วงและผลิตภัณฑ์ในปริมาณ 36,377 ตัน มูลค่ากว่า 1,433 ล้านบาท โดยประเทศที่ต้องการมาก ได้แก่ ญี่ปุ่น อเมริกา ยุโรป มาเลเซีย เกาหลี สิงค์โปร์ อินโดนีเซีย สาธารณรัฐประชาชนจีน และฮ่องกง เป็นต้น (มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2552)

มะม่วงแก้ว เป็นหนึ่งในสายพันธุ์ที่มีการเพาะปลูกอย่างแพร่หลายในประเทศไทย โดยมีพื้นที่เพาะปลูกทั้งประเทศรวมประมาณ 358,711 ไร่ ให้ผลผลิตรวมทั้งประเทศประมาณ 387,017 ตัน ในปี 2547 ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งจังหวัดที่มีพื้นที่ปลูกมะม่วงแก้วมากที่สุด 5 อันดับแรก ได้แก่ จังหวัดเชียงใหม่มีพื้นที่เพาะปลูกประมาณ 31,075 ไร่ ตามมาด้วยจังหวัดตาก 28,745 ไร่ นครราชสีมา 26,541 ไร่ ขอนแก่น 20,271 ไร่ และศรีสะเกษ 17,852 ไร่ สำหรับจังหวัดที่ให้ผลผลิตมากที่สุด 5 ลำดับ ได้แก่ ตาก 59,157 ตัน เชียงใหม่ 25,679 ตัน อุบลราชธานี 23,548 ตัน นครราชสีมา 23,363 ตัน และหนองบัวลำพู 22,210 ตัน (กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2547)

ตารางที่ 1 ปริมาณ (ตัน) มูลค่า (ล้านบาท) และตลาดหลักในการส่งออกมะม่วงของประเทศไทย

รายการ	ปี 2548	ปี 2549	ปี 2550	ปี 2551
มะม่วงสด				
ปริมาณ	2,489	11,157	11,272	15,476
มูลค่า	133	258	294	354
มะม่วงแช่แข็ง				
ปริมาณ	832	679	5,254	3,061
มูลค่า	48	66	314	270
มะม่วงอบแห้ง				
ปริมาณ	180	217	638	587
มูลค่า	49	58	101	139
มะม่วงกระป๋อง				
ปริมาณ	10,680	12,446	12,455	17,253
มูลค่า	366	433	437	670
รวม				
ปริมาณ	14,181	24,299	29,619	36,377
มูลค่า	596	815	1,146	1,433

ที่มา : ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร สำนักงานปลัดกระทรวงพาณิชย์ โดยความร่วมมือของกรมศุลกากร (อ้างอิงในกรมการค้าต่างประเทศ, 2552)

เนื่องจากการผลิตมะม่วงในทางการค้าของประเทศไทยจำแนกได้เป็น 3 ประเภท คือ ใช้บริโภคในรูปผลดิบ ผลสุก และแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์กระป๋อง ทำให้มีส่วนของเมล็ดมะม่วงที่เป็นของเหลือทิ้ง (waste) จากการบริโภคและการแปรรูปมะม่วงกระป๋องในแต่ละปีเป็นปริมาณมาก จะเห็นว่า หากนำเมล็ดมะม่วงพันธุ์แก้วที่เป็นวัสดุเหลือใช้หรือของทิ้ง (residue/waste) จากโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปมาทำการผลิตเป็นน้ำมันเมล็ดมะม่วงจะให้ผลผลิตเป็นจำนวนมาก ซึ่งโดยเฉลี่ยแล้วมะม่วงพันธุ์แก้วหนึ่งผลจะหนักประมาณ 277.80 ± 26.28 กรัม เมล็ด (คิดจากเปลือกแข็งและเมล็ดในมะม่วง) หนักประมาณ 35.35 ± 0.37 กรัม และเมล็ดในมะม่วง (ส่วนที่ลูกศรชี้ในภาพที่ 1) หนักประมาณ 20.59 ± 0.50 กรัม (น้ำหนักเปียก) หรือ 17.18 ± 0.42 กรัม (น้ำหนักแห้ง) เนื่องจาก

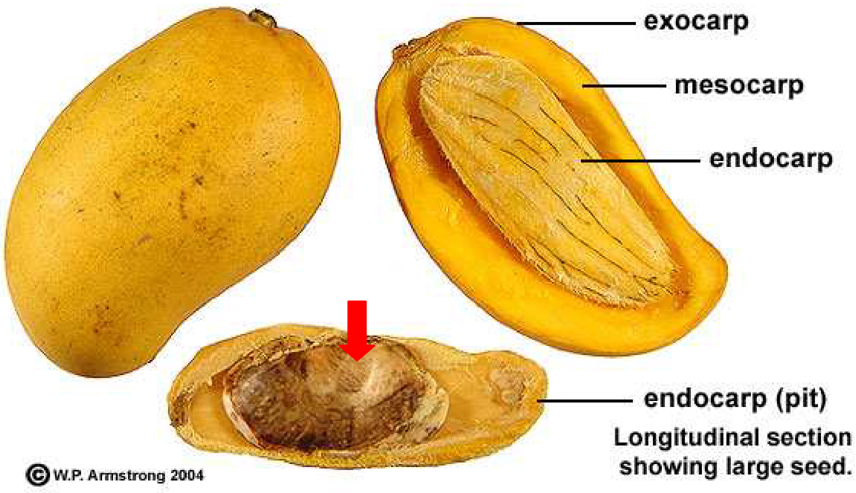
เมล็ดในมะม่วงมีความชื้นประมาณ 19.8% (น้ำหนักแห้ง) (Solis Fuentes และ Duran de bazua, 2005) จะเห็นว่า เพียงแค่มะม่วงพันธุ์แก้วสายพันธุ์เดียวนั้นจะก่อให้เกิดเมล็ดเหลือทิ้งในปี 2547 ถึง 49,247.84 ตัน คิดเป็นเมล็ดในมะม่วงเท่ากับ 23,934.31 ตัน (น้ำหนักแห้ง)

ตารางที่ 2 ผลผลิตมะม่วงของประเทศไทยในปี 2547

พันธุ์มะม่วง	พื้นที่เพาะปลูกรวมปี 2547 (ไร่)	ผลผลิตรวม ปี 2547 (ตัน)
มะม่วงทั้งหมด	1,458,913	1,340,552
แก้ว	358,711	387,017
เขียวเสวย	428,371	351,006
น้ำดอกไม้	300,587	255,662
อกร่อง	108,777	96,866
แรด	68,434	48,142
โชคอนันต์	70,214	70,915
หนังกลางวัน	44,151	34,490
หนองแซง	42,211	43,965
ทองดำ	37,457	52,489

ที่มา : กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (2547)

หากนำเมล็ดในมะม่วงไปทำการสกัดน้ำมันตามกรรมวิธีของ Solis-Fuentes และ Duran-de-Bazua (2004) ที่สกัดน้ำมันจากเมล็ดในมะม่วงเม็กซิกัน สายพันธุ์มะนิลา (Manila) ได้น้ำมันเมล็ดมะม่วงประมาณ 5.28–11.26% (น้ำหนักแห้ง) เมื่อนำมาคิดเป็นปริมาณน้ำมันที่จะสกัดได้จากเมล็ดมะม่วงพันธุ์แก้วตามกรรมวิธีดังกล่าวพบว่า จะสามารถผลิตน้ำมันได้ในปริมาณสูงสุดกว่า 2,695.00 ตัน เมื่อตรวจสอบข้อมูลราคาขายไขมันจากเมล็ดมะม่วงของเวบไซต์ชื่อ Majestic Mountain Sage ณ วันที่ 23 มิถุนายน 2552 พบว่า ไขมันเมล็ดมะม่วงที่มีค่าสปอนนิฟิเคชันเท่ากับ 184 mg KOH / g fat มีราคาประมาณ 632.78 บาทต่อกิโลกรัม (อัตราแลกเปลี่ยนเงินตรา ณ วันที่ 23 มิถุนายน 2552 พบว่า 1 USD เท่ากับ 34.17 บาท) เมื่อนำเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์แก้วทั้งหมดมาผลิตเป็นน้ำมันจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูงถึง 1,705.34 ล้านบาท



ภาพที่ 1 ภาพแสดงส่วนประกอบของผลมะม่วง
ที่มา : Armstrong (2004)

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ในเมล็ดมะม่วงมีน้ำมันที่มีองค์ประกอบของไตรกลีเซอไรด์คล้ายกับเนยโกโก้ โดยเมื่อนำเมล็ดมะม่วงมาสกัดด้วยตัวทำละลายจะทำให้ได้ไขมันแข็งที่รับประทานได้เป็นไขมันหรือน้ำมันเมล็ดมะม่วง ซึ่งมีคุณลักษณะและคุณสมบัติคล้ายกับของเนยโกโก้ (วิจิตร วังใน, 2529; Talbot, 1999; Solis-Fuentes และ Duran-de-Bazua, 2004) น้ำมันเมล็ดมะม่วงที่ผลิตได้ส่วนใหญ่สามารถนำไปใช้ในการผลิตเนยโกโก้เลียบแบบเพื่อลดการนำเข้าเนยโกโก้และเนยโกโก้เลียนแบบจากต่างประเทศได้ โดยเนยโกโก้เลียนแบบที่ผลิตได้จากน้ำมันเมล็ดมะม่วง (Mango seed almond fat; MAF) จะมีคุณสมบัติเด่นที่เพิ่มขึ้นมาคือ อุดมไปด้วยสารเสริมสุขภาพที่มีคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระ ทั้งนี้เนื่องจากเมล็ดมะม่วงที่นำมาสกัดน้ำมันนั้นมีสารต้านอนุมูลอิสระประเภทสารประกอบฟีโนลิก (phenolic compounds) อยู่ถึง 6 ชนิด ที่เด่นที่สุดคือ gallic acid, ellagic acid และ gallates (Puravankara และคณะ, 2000)

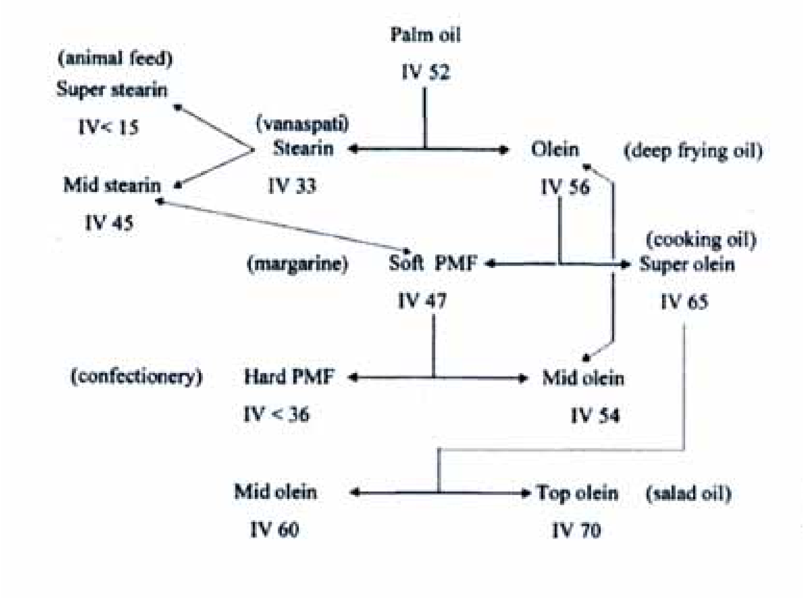
นับตั้งแต่อดีตมาจนถึงปัจจุบัน มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับน้ำมันเมล็ดมะม่วงที่มุ่งเน้นการใช้ประโยชน์ในด้านการนำไปผลิตเป็นเนยโกโก้เลียนแบบในปริมาณค่อนข้างจำกัด งานวิจัยที่โดดเด่นคือ งานของ Solis-Fuentes และ Duran-de-Bazua (2004) ซึ่งได้ศึกษาคุณสมบัติและองค์ประกอบต่าง ๆ ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์มะนิลาของประเทศเม็กซิโกพบว่า น้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์มะนิลา มีคุณลักษณะทางเคมีและทางกายภาพ ดังนี้ ค่าดัชนีการหักเหของแสง (refractive index) เท่ากับ 1.466 ค่าความเป็นกรด (acid value) เท่ากับ 0.60% (as oleic acid) ค่าสปอนนิฟิเคชัน (saponification value) เท่ากับ 189.0 mg KOH/ g oil และค่าไอโอดีน (iodine value) เท่ากับ 47.7 g

I_2/ 100 g oil และจากการวิเคราะห์กรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบด้วยเครื่อง Gas chromatography – Mass spectroscopy พบว่า มีกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบหลักคือ กรดโอเลอิก (Oleic acid; O), กรดสเตียริก (Stearic acid; St) และกรดปาล์มมิติก (Palmitic acid; P) ในปริมาณเท่ากับ 40.81%, 39.07% และ 9.29% (w/w) ตามลำดับ

2.2 น้ำมันปาล์มมิดแฟรคชั่น (Palm oil mid-fraction; PMF)

PMF ได้มาจากกระบวนการแยกส่วน (fractionation) น้ำมันปาล์ม ซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันให้มีคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพตรงตามความต้องการในการใช้งาน (Kellens, 2007) โดยการกำจัดโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ที่มีจุดหลอมเหลวสูงหรือต่ำเกินไปออกจากน้ำมัน ทำให้ได้น้ำมันที่มีความหลากหลายของชนิดของไตรกลีเซอไรด์ต่ำและมีช่วงการหลอมเหลวที่แคบลง (Hamm, 1995) ปัจจุบันนิยมใช้กระบวนแยกส่วนแบบแห้ง (dry fractionation) ซึ่งอาศัยกระบวนการตกผลึกที่สามารถแยกไขมันแข็งออกจากไขมันเหลวได้ตามความสามารถในการละลายที่แตกต่างกันของไตรกลีเซอไรด์ที่อยู่ในสถานะของแข็งและของเหลว ซึ่งขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุลและระดับความไม่อิ่มตัวของโมเลกุล เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและมีราคาถูกที่สุดเมื่อเทียบกับกระบวนการแยกส่วนอื่น ๆ และยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเพราะไม่มีการใช้สารเคมีและไม่มีการปลดปล่อยของเสียจากกระบวนการ (Kellens, 2007)

น้ำมันปาล์ม ถูกใช้ในกระบวนการแยกส่วนมาเป็นระยะเวลานาน โดยจะถูกแยกออกเป็นหลายส่วนเพื่อการใช้งานที่หลากหลาย ดังแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งในกระบวนการแยกส่วนแบบแห้ง ไตรกลีเซอไรด์ชนิดที่ประกอบด้วยกรดไขมันอิ่มตัวทั้งหมดหรือ trisaturated จะถูกแยกส่วนออกมาก่อน ตามมาด้วยไตรกลีเซอไรด์ที่ประกอบด้วยกรดไขมันอิ่มตัว 2 โมเลกุลและกรดไขมันไม่อิ่มตัว 1 โมเลกุลหรือ disaturated และไตรกลีเซอไรด์ที่ประกอบด้วยกรดไขมันอิ่มตัว 1 โมเลกุลและกรดไขมันไม่อิ่มตัว 2 โมเลกุลหรือ diunsaturated ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อน้ำมันปาล์มซึ่งประกอบด้วยไตรกลีเซอไรด์ชนิด POP เป็นองค์ประกอบหลักถูกแยกส่วนจะได้น้ำมันส่วนที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้เป็นเนยโกโก้เลียนแบบ โดยเฉพาะส่วนที่เรียกว่า hard palm mid fraction (Kellens, 2007) ซึ่ง PMF ประกอบด้วยไตรกลีเซอไรด์หลัก 3 ชนิด ได้แก่ 1,3-dipalmitoyl-2- oleoylglycerol (POP) ประมาณ 73%, 1-palmitoyl-2-oleoyl-3-syearoylglycerol (POSt) ประมาณ 13%, 1,3-distearoyl-2-oleoylglycerol (StOSt) ประมาณ 2% และอื่น ๆ อีก 12% (Undurraka, 2001)



ภาพที่ 2 กระบวนการแยกส่วนแบบแห้งของน้ำมันปาล์ม

หมายเหตุ PMF : น้ำมันปาล์มมิดแฟรคชั่น; IV : ค่าไอโอดีน

ที่มา : Kellens (2007)

PMF ถูกใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเนยโกโก้เลียนแบบ เพราะไม่ให้ความรู้สึกมันเลี่ยนเมื่อรับประทาน ไม่มีตัวทำละลายตกค้าง และไม่มีกรดไขมันประเภททรานส์ (trans) นอกจากนี้ยังมีกรดไขมันประเภทลิโนเลอิกในปริมาณน้อย จึงไม่มีแนวโน้มที่จะก่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) มากนัก (Samsudin และ Rahim, 1996) จากตารางที่ 3 ซึ่งแสดงความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้น้ำมันปาล์มแยกส่วนในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ จะเห็นว่า PMF ยังถูกใช้ในผลิตภัณฑ์อื่น ๆ อีกนอกเหนือจากเนยโกโก้เลียนแบบ เช่น ใช้เป็นไขมันสำหรับเคลือบ ใช้ทำมาร์การีน และเนยเทียม เป็นต้น

ตารางที่ 3 ความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้น้ำมันปาล์มแยกส่วนในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ

Products	Palm oil	Olein	Stearin	Super olein	Super stearin	Palm mid fraction
Shortenings	+++	+++	++	-	+++	+
Margarines	++	+++	+	-	+++	+
Frying fats	+++	+++	-	+++	++	+
Cooking oils	-	++	-	+++	++	+
Salad oils	-	+	-	+++	-	-
Specialty fats for coatings	-	-	-	-	+	++
Cocoa butter extenders	-	-	-	-	+	+++
Ice cream	+++	-	-	-	-	-
Icings	++	-	-	-	+	++
Biscuits	+++	+	+	-	++	-
Cakes	+++	-	+	-	++	-
Cookies	+++	-	+	-	++	-
Crackers	+++	+	+	-	++	-
Noodles	+++	+++	-	-	++	-
Fatty acids source	+	-	+++	-	-	-
Hard coatings	-	-	++	-	-	-

หมายเหตุ +++ เหมาะสมอย่างมาก ++ เหมาะสม + ใช้ได้อย่างจำกัด – ไม่เหมาะสม

ที่มา : Kellens (2007)

2.3 เนยโกโก้ (Cocoa butter)

เนยโกโก้ เป็นไขมันพืชที่ได้จากเมล็ดโกโก้ (*Theobroma cacao* L.) ที่ผ่านกระบวนการหมัก ทำแห้ง ทำความสะอาด อบ กะเทาะเปลือก และบดจนกลายเป็นของเหลวที่เรียกว่า โกโก้ลิเคอร์ (Cocoa liquor) แล้วนำมาบีบอัดด้วยความดันเพื่อแยกเนยโกโก้ออกมา ซึ่งเนยโกโก้จะมีสี

เหลืองอ่อน มีกลิ่นรสเฉพาะตัว และมีราคาสูง นิยมใช้ในอุตสาหกรรมขนมหวานและช็อกโกแลต โดย Perez-Martinez และคณะ (2007) กล่าวว่า มากกว่า 75% ของไตรกลีเซอไรด์ที่เป็นองค์ประกอบของเนยโกโก้จะมีกรดโอเลอิกอยู่ในตำแหน่งที่ 2 (sn-2) และมีกรดไขมันอิ่มตัวในตำแหน่งที่ 1 (sn-1) และ 3 (sn-3) เนื่องจากเนยโกโก้ประกอบไปด้วยไตรกลีเซอไรด์หลัก 3 ชนิด ได้แก่ POSt, StOSt และ POP ซึ่งมีปริมาณแตกต่างกันขึ้นกับแหล่งเพาะปลูกและสายพันธุ์ของต้นโกโก้ (Lipp และ Anklam, 1998; Lipp และคณะ, 2001) ทำให้เนยโกโก้มีพฤติกรรมการหลอมเหลวเฉพาะตัว กล่าวคือ เป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 25°C) และมีการหลอมเหลวอย่างรวดเร็วและสมบูรณ์ที่อุณหภูมิของร่างกาย (ประมาณ 37°C) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ต้องการในผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลต แต่เนื่องจากมีเพียงไม่กี่ประเทศเท่านั้นที่สามารถเพาะปลูกต้นโกโก้ได้ จึงทำให้ผลผลิตของเนยโกโก้ค่อนข้างแปรปรวนและมีราคาสูง (Hassan และคณะ, 1995; Moreton, 1988) หลายอุตสาหกรรมจึงพยายามที่จะหาไขมันจากพืชชนิดอื่นที่มีราคาถูกกว่า แต่ให้คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพที่คล้ายกับเนยโกโก้ มาใช้ทดแทนเนยโกโก้ ตารางที่ 4 แสดงปริมาณไตรกลีเซอไรด์ที่เป็นองค์ประกอบของเนยโกโก้จากแหล่งต่าง ๆ ที่มีรายงานไว้

ตารางที่ 4 ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%) ที่เป็นองค์ประกอบของเนยโกโก้

ที่มา	ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%)			หมายเหตุ
	POP	POS	SOS	(แหล่งเพาะปลูก)
Stewart and Timms (2002)	16	38	23	-
Podlaha et. al. (1984)	16.4	38.3	26.8	Samon
	15.9	36.6	23.8	Ivory Coast
	15.3	36.3	26.9	Ecuador
	13.8	36.6	28.4	Malaysia
	15.2	37.3	26.8	Ghana
	14.8	37.4	26.4	Nigeria
	14.0	34.6	23.7	Bahia

ที่มา : Stewart and Timms (2002); Podlaha et. al. (1984)

2.4 เนยโกโก้เลียนแบบ (Cocoa Butter Alternatives; CBA)

เนยโกโก้เลียนแบบ เป็นไขมันที่ใช้ผสมหรือทดแทนเนยโกโก้ในการผลิตช็อกโกแลต มีลักษณะแข็ง (hard butter) มีคุณสมบัติทางเคมี ได้แก่ กรดไขมันและไตรกลีเซอไรด์ที่เป็นองค์ประกอบ และคุณสมบัติทางกายภาพใกล้เคียงกับของเนยโกโก้ ส่งผลให้เกิดการหลอมเหลวอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิของร่างกายและมีความคงตัวสูง (Lipp และ Anklem, 1998) โดยเนยโกโก้เลียนแบบสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้

2.4.1 เนยโกโก้เลียนแบบชนิด Cocoa Butter Equivalents หรือ CBE เป็นไขมันพืชกลุ่ม non-lauric fat ที่มีคุณสมบัติและสูตรโครงสร้างทางเคมีเหมือนกับของเนยโกโก้ และสามารถใช้ทดแทนเนยโกโก้ได้ในทุกสัดส่วนในการผลิตช็อกโกแลต โดยไม่ทำให้คุณสมบัติทางกายภาพของช็อกโกแลต ได้แก่ การหลอมเหลว คุณลักษณะการไหลเมื่อหลอมละลาย และกระบวนการผลิตเปลี่ยนแปลงไป โดย Talbot (1999) กล่าวว่า การเลือกแหล่งของชนิดของไขมันที่เหมาะสมในการผลิตเนยโกโก้เลียนแบบชนิด CBE นั้นต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- ต้องมีช่วงของการหลอมเหลวที่คล้ายกับของเนยโกโก้
- ควรมีองค์ประกอบของกรดไขมันและไตรกลีเซอไรด์ที่ใกล้เคียงกับของเนยโกโก้
- ต้องผสมเข้ากันได้กับเนยโกโก้ โดยไม่ทำให้เกิดการอ่อนตัวของไขมันอันเนื่องมาจาก eutectic effect หรือการลดลงของปริมาณไขมันที่เป็นของแข็งในรูปผลึกหรือค่า Solid fat content
- เมื่อผ่านกระบวนการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลตควรมีพฤติกรรมคล้ายกับผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากเนยโกโก้
- ควรตกผลึกในโครงสร้างผลึกที่เสถียรเหมือนกับของเนยโกโก้ คือ อยู่ในรูป β-form
- ผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลตที่ผลิตจากเนยโกโก้เลียนแบบต้องมีลักษณะปรากฏและอายุในการเก็บรักษาโดยปราศจากการเกิด fat bloom เหมือนกับผลิตภัณฑ์ที่ผลิตโดยใช้เนยโกโก้เป็นองค์ประกอบเพียงอย่างเดียว
- ช่วยให้เกิดความคงตัวของกลิ่นรสที่ดีของผลิตภัณฑ์

ตารางที่ 5 วัตถุดิบและไตรกลีเซอไรด์หลักของส่วนผสมของเนยโกโก้เลียนแบบชนิด CBE

Raw material	Origin	Processing required[a]	Ingredient used in CBEs blend	Main triglycerides
Palm oil	Indonesia Malaysia	Two fractionation[b]	Mid-fraction[c]	POP
Shea butter	West Africa	Degumming and one fractionation	Stearin[d]	StOSt
Illipe butter[e]	Borneo	None	Fat	StOSt, POSt
Kokum butter[f]	India	None	Fat	StOSt
Sal fat	India	One fractionation	Stearin	StOSt, StOA
Mango kernel fat	India	One fractionation	Stearin	StOSt, POSt

หมายเหตุ a รวมถึงกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ การกำจัดสีและกลิ่น

b การแยกส่วนโดยการตกผลึก

c ส่วนที่มีช่วงการหลอมเหลวในช่วงกลาง

d ส่วนที่มีช่วงการหลอมเหลวสูง

e อาจเรียกว่า Borneo tallow หรือ Tengkawang fat

f อาจเรียกว่า Kokum Gurgi fat

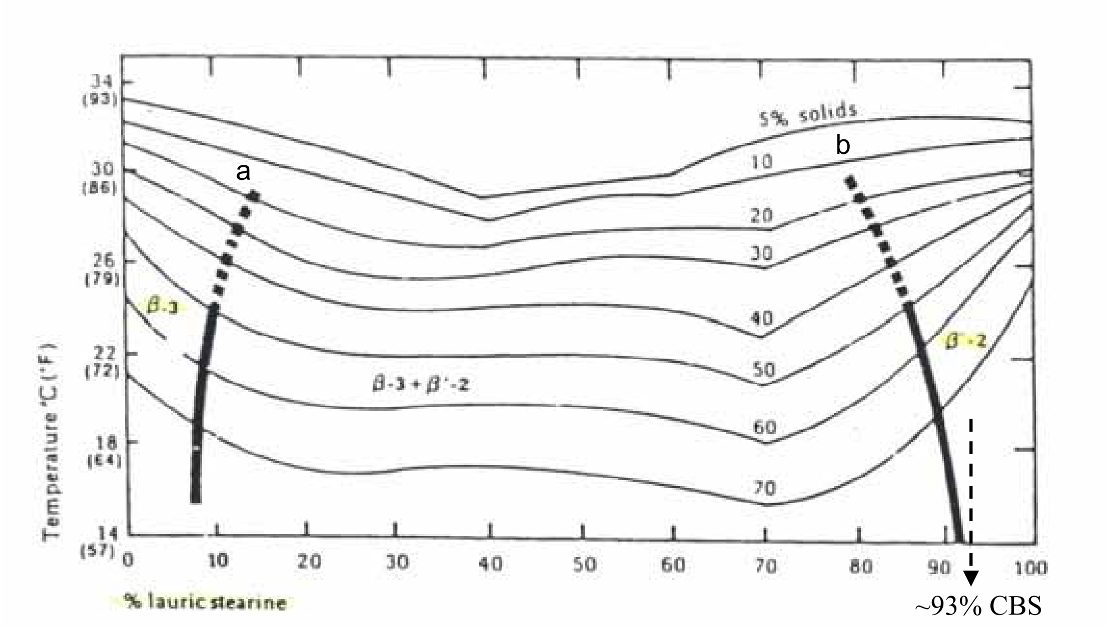
ที่มา : Stewart และ Timms (2002)

กฎหมายของทวีปยุโรปอนุญาตให้มีการใช้ CBE ที่ผลิตจากไขมันพืชชนิดต่าง ๆ เพียง 6 ชนิดเท่านั้น คือ น้ำมันปาล์ม (palm oil), ไขมันอิลลิป (illipé fat), ไขมันซอล (sal fat), ไขมันโคคัม (kokum fat), น้ำมันชี (shea oil) และน้ำมันเมล็ดมะม่วง (mango kernel oil หรือ mango seed almond fat) เป็นส่วนผสมของผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลต (Stewart และ Kristott, 2004; Stewart และ Timms, 2002) ดังแสดงในตารางที่ 5 และเนื่องจากเนยโกโก้เป็นไขมันที่มีไตรกลีเซอไรด์เป็นองค์ประกอบหลัก 3 ชนิด คือ POP, POSt และ StOSt การผลิต CBE จึงทำได้โดยการผสมน้ำมันจากพืช 6 ชนิดนี้ในอัตราส่วนที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ CBE ที่มีคุณสมบัติต่าง ๆ ทั้งทางเคมี ทางกายภาพ รวมถึงพฤติกรรมการตกผลึกที่เหมือนหรือใกล้เคียงกันกับของเนยโกโก้ จึงจะสามารถใช้ CBE ที่ผลิตได้ดังกล่าวทดแทนเนยโกโก้ในการผลิตช็อกโกแลตได้ โดยไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของ

คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลตและกระบวนการผลิตแต่อย่างใด ไตรกลีเซอไรด์ชนิด POP ส่วนใหญ่ และ POSt ในปริมาณเล็กน้อยนั้นสามารถหาได้จากน้ำมันปาล์มมิดแฟรคชั่น แต่การให้ได้มาซึ่ง StOSt และ POSt ส่วนที่เหลือนั้นจะมีความยุ่งยากมากกว่า โดยจะต้องได้มาจากน้ำมันจากพืชที่มี StOSt ในปริมาณสูง ได้แก่ illipé fat, sal fat และน้ำมันเมล็ดมะม่วง (Beckett, 2000) CBE ที่ผลิตได้จึงเกิดจากการผสมน้ำมันเหล่านี้เข้าด้วยกัน

European Commission (EU Council Directive) ได้ออกข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์โกโก้และช็อกโกแลต (Cocoa and Chocolate products Regulations, 2003) กล่าวว่า การเติมไขมันจากพืชชนิดอื่น ๆ แทนเนยโกโก้ในผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลตนั้นจะเติมได้ไม่เกิน 5% ของน้ำหนักผลิตภัณฑ์สุดท้าย (Afoakwa และคณะ, 2007; Simoneau และคณะ, 1998) แต่ถ้าใช้ CBE แทนเนยโกโก้เกินกว่า 5% หรือแทนทั้งหมดจะต้องเรียกผลิตภัณฑ์เหล่านั้นว่า ซูเปอร์โค้ตติง (supercoating) (Stewart และ Kristott, 2004; Talbot, 1999) หรือ คอมพาวน์ช็อกโกแลต (compound chocolate) (Stewart และ Timms, 2002)

2.4.2 เนยโกโก้เลียนแบบชนิด Cocoa Butter Substitutes หรือ CBS เป็นไขมันพืชในกลุ่ม lauric fat ที่ได้จากน้ำมันปาล์มและน้ำมันมะพร้าว โดยกระบวนการแยกส่วนและกระบวนการไฮโดรจีเนชัน (hydrogenation) แล้วทำให้บริสุทธิ์ ไขมันที่ได้จะมีความแข็งและมีคุณสมบัติทางกายภาพใกล้เคียงกับของเนยโกโก้ แต่คุณสมบัติทางเคมีและชนิดของไตรกลีเซอไรด์ที่เป็นองค์ประกอบต่างจากของเนยโกโก้ ไขมันชนิดนี้มีคุณลักษณะเด่น คือ มีลักษณะเนื้อสัมผัสและการปลดปล่อยกลิ่นรสคล้ายกับเนยโกโก้ ไขมันชนิดนี้มีกรดลอริกในปริมาณสูง ถ้านำไปผสมกับเนยโกโก้จะทำให้เกิดผลึกหลายโครงสร้างปะปนกัน เนื่องจากมีไตรกลีเซอไรด์ที่แตกต่างจากเนยโกโก้โดยสมบูรณ์ ดังนั้นการใช้ CBS ต้องมีการพิจารณาถึงการเข้ากันไม่ได้ระหว่าง CBS กับเนยโกโก้ โดยพิจารณาจาก Iso-solids phase diagram ของไขมันผสมระหว่าง CBS และเนยโกโก้ดังภาพที่ 3 ซึ่งพบว่า เมื่อมีการผสม CBS กับเนยโกโก้จะปรากฏการผสมของผลึกที่แตกต่างกันอันแสดงถึงการลดลงอย่างรวดเร็วของพฤติกรรมการหลอมเหลวเมื่อเทียบกับการผสม CBE กับเนยโกโก้ เนื่องจากการเกิด eutectic effect ดังนั้นจึงยอมให้ใช้ CBS ได้ในช่วงแคบที่บริเวณปลายทั้งสองด้านของแผนภาพ หรือบริเวณนอกขอบเขตของเส้น a และ b เท่านั้น



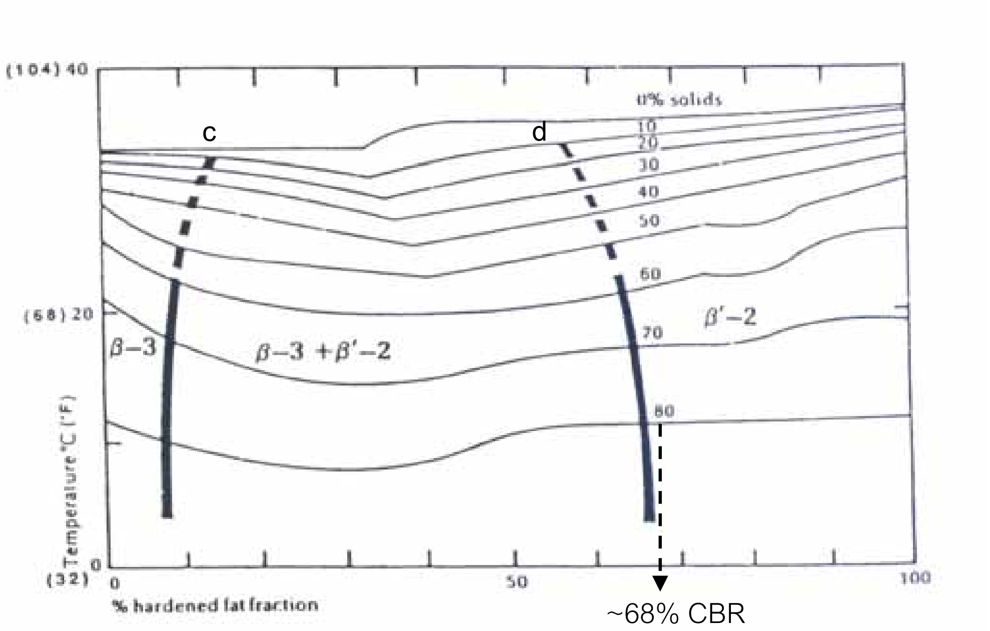
ภาพที่ 3 Iso-solids phase diagram for cocoa butter/CBS. Reprinted with the permission of Loders Croklaan.

ที่มา : Talbot (1999)

จากภาพที่ 3 พบว่า เนยโกโก้จะมีโครงร่างผลึกเป็นรูปแบบ β-3 จนกระทั่งมี CBS เป็นส่วนผสมถึง 5% หากมี CBS เกินกว่า 5% จะปรากฏการผสมกันของผลึกในรูปแบบ β-3 และ β'-2 ซึ่งจะส่งผลให้เกิดปัญหาขึ้นในกระบวนการผลิต เกิดผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะอ่อนนุ่ม และส่งผลให้เกิด fat bloom หรือการที่ไขมันเกิดการหลอมเหลวและเคลื่อนที่มาที่ผิวหน้าของช็อกโกแลตแล้วเกิดการตกผลึกใหม่ที่มีขนาดใหญ่ทำให้มองเห็นเป็นสีขาวในเวลาต่อมา ดังนั้นการเติม CBS จึงจำกัดอยู่ที่ประมาณ 5% หรือมากกว่า 93% ของไขมันทั้งหมด อย่างไรก็ตาม Lipp และ Anklam (1997) กล่าวว่า CBS เหมาะสำหรับใช้ทดแทนเนยโกโก้ 100% เท่านั้น เนยโกโก้เลียนแบบชนิด CBS เหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่ใช้ผงโกโก้ไขมันต่ำหรือผงโกโก้ที่ไม่มีไขมันมากกว่าผลิตภัณฑ์ที่ใช้โกโก้แมส (cocoa mass) เป็นส่วนผสม

2.4.3 เนยโกโก้เลียนแบบชนิด Cocoa Butter Replacers หรือ CBR เป็นไขมันพืชในกลุ่ม non-lauric fat ที่ผลิตได้จากน้ำมันที่มีกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิกในปริมาณมาก เช่น น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันฝ้าย น้ำมันข้าวโพด น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันปาล์ม และน้ำมันปาล์มโอเลอิน ซึ่งจะถูกนำมาผ่านกระบวนการไฮโดรจิเนชันและกระบวนการแยกส่วน การเติมไฮโดรเจนระหว่างการทำไฮโดรจีเนชันภายใต้สภาวะที่เลือกไว้จะทำให้เกิดกรดไขมันประเภททรานส์ (trans-acid) ซึ่งจะช่วย

เพิ่มปริมาณของไขมันแข็ง (SFC) โดย CBR ที่ได้จากวิธีการนี้จะมีกรดปาล์มมิติก กรดสเตียริก และกรดโอเลอิกเป็นกรดไขมันหลักเช่นเดียวกับเนยโกโก้ แต่การจัดเรียงสายไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbon chain) ของกรดไขมันในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์เป็นแบบสุ่มและมีโครงสร้างไม่เหมือนกับของเนยโกโก้ จึงมีสมบัติทางกายภาพแตกต่างจากเนยโกโก้ ทำให้เมื่อผสมกันกับเนยโกโก้แล้วทำการตกผลึกจะเกิดผลึกหลายโครงสร้างปะปนกัน และมีปรากฏการณ์ eutectic effect เกิดขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะไม่มีความมันวาวและเกิด fat bloom ขึ้นด้วย ไขมันในกลุ่มนี้จึงใช้ทดแทนเนยโกโก้ได้ในปริมาณจำกัด ดังแสดงในภาพที่ 4 ซึ่งพบว่า เมื่อมีการผสม CBR กับเนยโกโก้จะมีผลต่อคุณสมบัติการหลอมเหลวเนื่องจากการเกิด eutectic effect และเกิดการอ่อนตัวเนื่องจากการเข้ากันไม่ได้ของไขมันผสม ดังนั้นจึงยอมให้ใช้ CBR ผสมกับเนยโกโก้ได้ในช่วงนอกบริเวณขอบเขตของเส้น c และ d เท่านั้น ซึ่งพบว่า จะสามารถใช้ CBR ในส่วนผสมได้ประมาณ 5% หรือมากกว่า 68% ของไขมันทั้งหมด จากแผนภาพทางด้านขวาซึ่งกว้างกว่าของ CBS แสดงให้เห็นว่า เนยโกโก้เลียนแบบชนิด CBR มีความทนทานต่อความร้อนมากกว่าเนยโกโก้เลียนแบบชนิด CBS และสามารถใช้ได้กับผลิตภัณฑ์ที่มีโกโก้แมสเป็นองค์ประกอบ อย่างไรก็ตามปริมาณการใช้งานขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์และข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์



ภาพที่ 4 Iso-solids phase diagram for cocoa butter/CBR. Reprinted with the permission of Loders Croklaan.

ที่มา : Talbot (1999)

การใช้ CBR นั้นไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการเทมเพอริง (tempering) หรือกระบวนการก่อนการตกผลึกเพื่อทำให้ไขมันตกผลึกในรูปแบบที่เหมาะสม เนื่องจาก CBR มีองค์ประกอบที่แตกต่างจาก CBE ซึ่งต้องผ่านการ tempering สูตรของช็อกโกแลตเคลือบ (Coating) ที่ใช้ไขมันชนิดนี้จะมีลักษณะมันเลี่ยนแต่มีความมันเงาสูง (Pearson และคณะ, 2007)

2.5 คุณสมบัติทางกายภาพของไขมันและน้ำมัน (Physical properties of fats and oils)

คุณสมบัติทางกายภาพของไขมันและน้ำมันมีความสัมพันธ์โดยตรงกับองค์ประกอบทางเคมีในโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ของไขมันหรือน้ำมัน ใช้ในการจำแนกหรือบ่งชี้ชนิดของไขมันหรือน้ำมัน และใช้ในการพิจารณาถึงการนำไปใช้ประโยชน์อีกด้วย ตัวอย่างสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของไขมันหรือน้ำมัน ได้แก่

2.5.1 จุดหลอมเหลว (Melting point) หรืออุณหภูมิที่ทำให้ไขมันเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวจนหมด มักเป็นช่วงของอุณหภูมิซึ่งจะกว้างหรือแคบนั้นขึ้นกับชนิดของไตรกลีเซอไรด์ที่เป็นองค์ประกอบ และจุดหลอมเหลวของไตรกลีเซอไรด์จะสูงหรือต่ำขึ้นกับชนิดของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในโมเลกุล โดยตารางที่ 6 แสดงจุดหลอมเหลวของกรดไขมันชนิดต่าง ๆ จะเห็นว่า จุดหลอมเหลวของกรดไขมันจะเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนคาร์บอนในโมเลกุลเพิ่มขึ้น และจุดหลอมเหลวของกรดไขมันจะลดลงเมื่อจำนวนพันธะคู่ในโมเลกุลเพิ่มขึ้น (นิธิยา รัตนาปนนท์, 2548) สำหรับไตรกลีเซอไรด์จะเห็นว่า จุดหลอมเหลวจะแตกต่างกันตามชนิดของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบ และการจัดเรียงตำแหน่งของกรดไขมันในโมเลกุล กล่าวคือ ไตรกลีเซอไรด์ที่มีกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบเหมือนกันแต่มีการจัดเรียงตัวในตำแหน่งที่ต่างกันจะมีจุดหลอมเหลวแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 7

นอกจากนี้ ยังสามารถหาจุดหลอมเหลวของไขมันในรูปของค่า Slip melting point (SMP) หรือจุดหลอมเหลวของของแข็งที่มีลักษณะคล้ายขี้ผึ้ง (waxy solid) ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ไขมันเริ่มเคลื่อนที่ขึ้นภายในหลอดคาปิลลารีปลายเปิดเนื่องจากแรงที่ทำให้สารเกิดการลอยตัว (buoyancy หรือ upward force) หากแรงที่ทำให้ลอยตัวมีค่าเท่ากับน้ำหนักของไขมันในหลอดคาปิลลารีและพื้นผิวภายนอกของไขมันกลายเป็นไขมันเหลวหรือ molten จะทำให้ไขมันเกิดการเคลื่อนที่ขึ้น การหา SMP เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมสำหรับไขมันและแวกซ์ (waxes) ซึ่งเป็นของผสมของสารประกอบที่มีมวลโมเลกุลเป็นช่วงทำให้ไม่สามารถหาจุดหลอมเหลวที่แน่นอนได้ (Wikipedia encyclopedia, 2009)

ตารางที่ 6 จุดหลอมเหลวของกรดไขมันชนิดต่าง ๆ

กรดไขมันชนิดอิ่มตัว	**จำนวนคาร์บอน : พันธะคู่**	**จุดหลอมเหลว (°C)**
กรดคาพริก	10:0	31.3-31.6
กรดลอริก	12:0	44.0-44.2
กรดไมริสติก	14:0	53.9-54.4
กรดปาลมีติก	16:0	62.7-63.1
กรดสเตียริก	18:0	69.6
กรดอะราคิดิก	20:0	75.4-76.5
กรดบีฮีนิก	22:0	80.0-81.5
กรดลิกโนเซริก	24:0	84.2-86.0
กรดซีโรติก	26:0	87.7-88.5
กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว	**จำนวนคาร์บอน : พันธะคู่**	**จุดหลอมเหลว (°C)**
กรดปาลมิโตเลอิก	16:1	0-0.5
กรดโอเลอิก	18:1	10.5-16.0
กรดลิโนเลอิก	18:2	-5.0
กรดลิโนเลนิก	18:3	-11.0
กรดอะราคิโดนิก	18:4	-49.5

ที่มา : Hadziyev (1987), Mathews and van Holde (1990) และ Coultate (1999) อ้างอิงใน นิธิยา รัตนาปนนท์ (2548)

ตารางที่ 7 จุดหลอมเหลวของไตรกลีเซอไรด์บางชนิด

ไตรกลีเซอไรด์	**จุดหลอมเหลว (°C)**
Trisaturated	
Tristearin (StStSt)	73
Tripalmitin (PPP)	66
Strearo-dipalmitin (StPP)	62
Disaturated	
Palmito-oleo-palmitin (POP)	37
Palmito-oleo-stearin (POSt)	37
Oleo-dipalmitin (OPP)	34
Stearo-oleo-palmitin (StOP)	43
Stearo-oleo-stearin (StOSt)	43
Stearo-palmito-olein (StPO)	39
Palmito-stearo-olein (PStO)	36
Diunsaturated	
Dioleopalmitin (OOP)	5
Dioleostearin (OOSt)	-13
Triunsaturated	
Triolein (OOO)	5
Trilinolein (LLL)	-13

หมายเหตุ St = Stearic acid, P = Palmitic acid, O = Oleic acid และ L = Linoleic acid

ที่มา : Stauffer (1996) อ้างอิงใน นิธิยา รัตนาปนนท์ (2548)

2.5.2 การจัดเรียงตัวของรูปผลึก (Crystalline arrangements) เนื่องจากไขมันมีความแตกต่างจากน้ำมันกล่าวคือ เป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้องจึงมีการจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างผลึกซึ่งมีได้หลายรูปแบบ เรียกว่า polymorphism โดยรูปแบบผลึกที่พบส่วนใหญ่มี 3 รูปแบบ คือ α, β' และ β ขนาดและจำนวนของผลึกที่เกิดขึ้นขึ้นกับชนิดและอุณหภูมิของไขมันและน้ำมันกล่าวคือ ผลึกที่เกิดจากการลดอุณหภูมิของไขมันลงอย่างรวดเร็วจะมีโครงสร้างแตกต่างจากผลึกที่เกิดจากการลด

อุณหภูมิของไขมันลงอย่างช้า ๆ (นิธิยา รัตนาปนนท์, 2548) ซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดเกี่ยวกับการตกผลึกของไขมันต่อไป

2.5.3 การละลาย (Solubility) ไขมันและน้ำมันทุกชนิดไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ดีในตัวทำละลายไขมัน ได้แก่ ปิโตรเลียมอีเทอร์ เฮกเซน และเบนซีน เป็นต้น นอกจากนี้กรดไขมันยังมีการละลายในตัวทำละลายได้แตกต่างกัน ทำให้สามารถแยกกรดไขมันชนิดอิ่มตัวออกจากกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวได้ (นิธิยา รัตนาปนนท์, 2548)

2.6 คุณสมบัติทางเคมีของไขมันและน้ำมัน (Chemical properties of fats and oils)

คุณสมบัติทางเคมีของไขมันและน้ำมันแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน เนื่องจากองค์ประกอบและโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกัน ทำให้มีการเกิดปฏิกิริยากับสารแต่ละชนิดแตกต่างกัน ได้แก่

2.6.1 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ไขมันบางชนิดจะถูกไฮโดรไลซ์ได้ด้วยกรด ด่าง และเอนไซม์ การไฮโดรไลซ์ได้ด้วยด่าง เรียกว่า สปอนนิฟิเคชัน (Saponification) ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นเกลือของกรดไขมันเรียกว่า สบู่ ด่างที่ใช้นิยมในการไฮโดรไลซ์ไขมัน เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอาจเกิดจากไขมันหรือน้ำมันได้รับความร้อนสูง เช่น ขณะทอดอาหารที่มีน้ำในปริมาณมากไขมันจะถูกไฮโดรไลซ์เป็นกรดไขมันอิสระและกลีเซอรอล

ไขมันหรือน้ำมันที่ได้จากพืชและสัตว์แต่ละชนิด มักมีไตรกลีเซอไรด์เป็นส่วนประกอบในปริมาณที่ค่อนข้างแน่นอน ดังนั้นจำนวนด่างที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไขมันหรือน้ำมันจำนวนหนึ่งจึงมีค่าที่ค่อนข้างแน่นอนและเป็นค่าเฉพาะ ซึ่งสามารถใช้บ่งชี้ถึงสมบัติของไขมันหรือน้ำมันแต่ละชนิดได้ เรียกว่า ค่าสปอนนิฟิเคชัน (Saponification number หรือ Saponification value; Spv) หรือจำนวนมิลลิกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์ไขมันหรือน้ำมันอย่างสมบูรณ์ จำนวน 1 กรัม ให้ได้เป็นสบู่และกลีเซอรอล ค่า Spv ใช้เป็นตัวบ่งชี้ขนาดของโมเลกุลหรือน้ำหนักโมเลกุลของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ในไขมันหรือน้ำมัน กล่าวคือ หากไขมันหรือน้ำมันมีค่า Spv สูง แสดงว่า กรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ จึงมีจำนวนโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ต่อหน่วยน้ำหนักเป็นจำนวนมาก (นิธิยา รัตนาปนนท์, 2548)

2.6.2 ปฏิกิริยาฮาโลจีเนชัน (Halogenation) เป็นปฏิกิริยาการเติมสารพวกฮาโลเจน (Halogen) เข้าไปที่พันธะคู่ของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ สารฮาโลเจนตัวที่นิยมใช้ ได้แก่ ไอโอดีน ค่าที่ได้นั้นเรียกว่า ค่าไอโอดีน (Iodine number หรือ Iodine

value; Iv) หรือจำนวนกรัมของไอโอดีนที่เข้าไปทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ของกรดไขมันในไขมันหรือน้ำมันจำนวน 100 กรัม

ค่า Iv เป็นตัวบ่งชี้ว่า มีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเป็นองค์ประกอบในไขมันหรือน้ำมันมากน้อยเพียงใด หรือเป็นการบอกความไม่อิ่มตัวของไขมันหรือน้ำมัน หากค่า Iv สูงแสดงว่าไขมันหรือน้ำมันชนิดนั้นมีความไม่อิ่มตัวสูง ซึ่งจะมีคุณค่าทางโภชนาการสูงเนื่องจากกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเป็นกรดไขมันที่มีความจำเป็นต่อร่างกาย ในทางตรงกันข้ามไขมันหรือน้ำมันที่มีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวสูงจะเกิดการหืนได้ง่าย

2.6.3 การหืน (Rancidity) เป็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของไขมันหรือน้ำมันซึ่งทำให้ไขมันหรือน้ำมันเกิดกลิ่นที่ผิดปกติ และมีสมบัติทางเคมีและทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไป การหืนสามารถเกิดขึ้นได้ 3 รูปแบบ คือ

2.6.3.1 ไลโพไลซิส (Lipolysis) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อพันธะเอสเตอร์ในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์เกิดการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ไลเพส กรด ด่าง ความร้อน หรือสารเคมี ซึ่งจะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่มีผลต่อคุณภาพของไขมันหรือน้ำมัน โดยทำให้น้ำมันมีกลิ่นและรสชาติเปลี่ยนแปลงไป เช่น กรดไขมันอิสระที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (คาร์บอน 4-12 อะตอม) ซึ่งจะมีกลิ่นหืนมาก และเมื่อปริมาณกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้นจะมีผลให้ค่า smoke point หรืออุณหภูมิที่ไขมันหรือน้ำมันเกิดควันเมื่อได้รับความร้อนมีค่าต่ำลง ทำให้น้ำมันจะเกิดควันได้ง่ายขณะทอดอาหาร สำหรับปฏิกิริยาที่เกิดจากเอนไซม์ไลเพสและความชื้นจะเรียกว่า Hydrolytic rancidity

ไขมันหรือน้ำมันบางชนิดไม่สามารถสังเกตการเกิดไลโพไลซิสได้ด้วยการดมกลิ่นหรือชิมรส จึงต้องมีการตรวจวิเคราะห์ทางเคมี โดยการตรวจหาปริมาณกรดไขมันอิสระที่เกิดขึ้น ค่าที่ได้เรียกว่า ค่าความเป็นกรด (Acid value; Av) หรือจำนวนมิลลิกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทำให้กรดไขมันอิสระที่อยู่ในไขมันหรือน้ำมัน 1 กรัม เป็นกลาง ดังนั้นจึงนิยมใช้ค่า Av เป็นตัวชี้สภาวะหรือระดับการเหม็นหืนของไขมันหรือน้ำมัน กล่าวคือ หากค่า Av สูงแสดงว่า มีการเกิดกลิ่นหืน เนื่องจาก Hydrolytic rancidity มาก วิธีการชะลอการเกิดการหืนนี้ทำได้โดยเก็บไขมันหรือน้ำมันที่อุณหภูมิต่ำ

2.6.3.2 ออกซิเดทีฟ แรนซิดิตี้ (Oxidative rancidity) เป็นการหืนที่เกิดจากปฏิกิริยา autoxidation ที่พันธะคู่ของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวกับออกซิเจนในอากาศ เกิดพันธะเพอร์ออกไซด์ที่หมู่แอลฟาเมทิลีน (α-methylene) การหืนแบบนี้สามารถเกิดได้ทั้งกับไขมันและน้ำมันเอง และกับอาหารที่มีไขมันหรือน้ำมันประกอบอยู่ด้วย ปฏิกิริยานี้สามารถเร่งได้ด้วยโลหะ ความร้อน และแสง

การเกิดกลิ่นหืนด้วยวิธีนี้จะทำให้กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวถูกทำลาย ทำให้สูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ รวมทั้งสูญเสียวิตามินที่ละลายได้ในไขมันหรือน้ำมัน นอกจากนี้ยัง

สามารถเกิดจากการเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์ไลพอกซิเดส (lipoxidase) ได้อีกด้วย การตรวจวิเคราะห์การเกิด Oxidative rancidity สามารถทำได้โดยการหาค่าเพอร์ออกไซด์ (Peroxide value; Pv) หรือการหาปริมาณสารเพอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นในไขมันหรือน้ำมัน หรือจำนวนมิลลิลิตรของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตความเข้มข้น 0.002 N ที่ใช้ในการไตเตรตไขมันหรือน้ำมัน 1 กรัม ถ้าค่า Pv สูงแสดงว่า ไขมันหรือน้ำมันเกิด Oxidative rancidity มาก และส่งผลให้ค่า Iv ที่วิเคราะห์ได้ต่ำกว่าความเป็นจริง

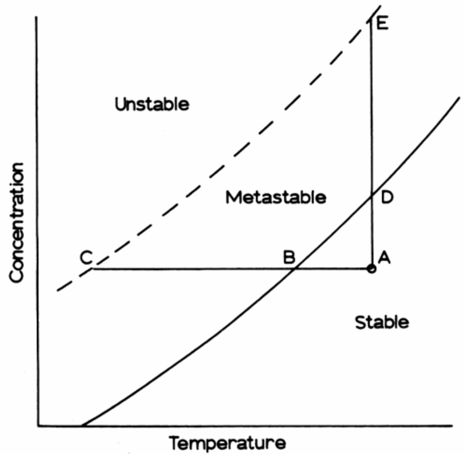
วิธีป้องกันสามารถทำได้โดยการเติมสารป้องกันการหืนลงไปในไขมัน น้ำมัน หรืออาหารที่มีไขมันหรือน้ำมันเป็นส่วนประกอบ

2.6.3.3 คีโตนิก แรนซิดิตี้ (Ketonic rancidity) เป็นการหืนที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยเอนไซม์ (enzymatic oxidation) กับโมเลกุลของกรดไขมันชนิดอิ่มตัวทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารจำพวกคีโตน ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (นิธิยา รัตนาปนนท์, 2548)

2.7 การตกผลึกของไขมันและน้ำมัน (crystallization)

กระบวนการตกผลึกของไขมันและน้ำมันสำหรับการบริโภคมีความสำคัญมากสำหรับกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมอาหาร โดยความรู้ในเรื่องพฤติกรรมของการตกผลึก (crystallization behavior) ของไขมันสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์อาหารได้หลาย ๆ ชนิด เช่น ลูกอม ลูกกวาด ช็อกโกแลต มาร์การีน สเปรด รวมถึงผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ต่าง ๆ (Gordon และ Rahman, 1991) การตกผลึกนั้นสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งกับสารละลายซึ่งจะประกอบไปด้วยตัวทำละลายและตัวถูกละลาย และกับ melt ซึ่งเป็นสารที่ถูกทำให้อยู่ในสภาพของเหลวโดยการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงกว่าจุดหลอมเหลวของสารนั้น (Myerson, 2002) การตกผลึกของสารละลายจะเกิดขึ้นได้เมื่อสารละลายนั้นมีความเข้มข้นสูงกว่าความเข้มข้น ณ จุดอิ่มตัว (saturation) ที่อุณหภูมิของการตกผลึกหรือเรียกว่า มีความเข้มข้นอิ่มตัวยิ่งยวด (supersaturation) นั่นเอง ส่วนการตกผลึกของ melt จะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิของการตกผลึกอยู่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของ melt นั้น (Mullin, 1993) หรือการเกิด supercooling (Ghotra, 2002) การตกผลึกของน้ำมันหรือไขมันสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งกับไขมันหรือน้ำมันที่อยู่ในสภาพ melt และกับไขมันหรือน้ำมันที่อยู่ในรูปสารละลายที่มีความเข้มข้นอิ่มตัวยิ่งยวดกับตัวทำละลาย อย่างไรก็ตามสารละลายที่มีความเข้มข้นอิ่มตัวยิ่งยวดไม่จำเป็นต้องเกิดการตกผลึกเสมอไป ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับระดับของความเข้มข้นอิ่มตัวยิ่งยวดของสารละลายนั้นเป็นหลัก ดังภาพที่ 5 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลาย หรือ saturation-supersaturation solubility diagram

เส้นทึบในภาพที่ 5 คือ เส้น solubility curve ซึ่งจะแสดงค่าความเข้มข้น ณ จุดอิ่มตัวของสารละลายที่อุณหภูมิต่าง ๆ พื้นที่ใต้กราฟที่อยู่ต่ำกว่าเส้น solubility curve เรียกว่า stable zone ซึ่งเป็นพื้นที่ที่จะไม่เกิดการตกผลึก เพราะความเข้มข้นของสารละลายมีค่าต่ำกว่าจุดอิ่มตัว เส้นประในภาพที่ 5 แบ่งพื้นที่เหนือเส้น solubility curve ออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่อยู่ระหว่างเส้น solubility curve และเส้นประเรียกว่า meta-stable zone ซึ่งการตกผลึกในพื้นที่นี้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีการใช้เทคนิคช่วยในการตกผลึก เช่น การล่อผลึก (crystal seeding) หรือการกวน (stirring) และสำหรับพื้นที่เหนือเส้นประเรียกว่า unstable zone หรือ labile zone ซึ่งเป็นพื้นที่ที่การตกผลึกของสารละลายจะเกิดขึ้นได้เองอย่างรวดเร็ว (เรียกว่า spontaneous crystallization) ตำแหน่งของเส้นประที่แบ่งพื้นที่ระหว่าง meta-stable zone และ unstable zone ขึ้นกับปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการตกผลึก เช่น อัตราการลดอุณหภูมิและการปั่นกวน เป็นต้น



ภาพที่ 5 แผนภาพแสดงความสามารถในการละลาย ณ จุดอิ่มตัวและจุดอิ่มตัวยิ่งยวด (Saturation-supersaturation solubility diagram)

ที่มา : Timms (1994)

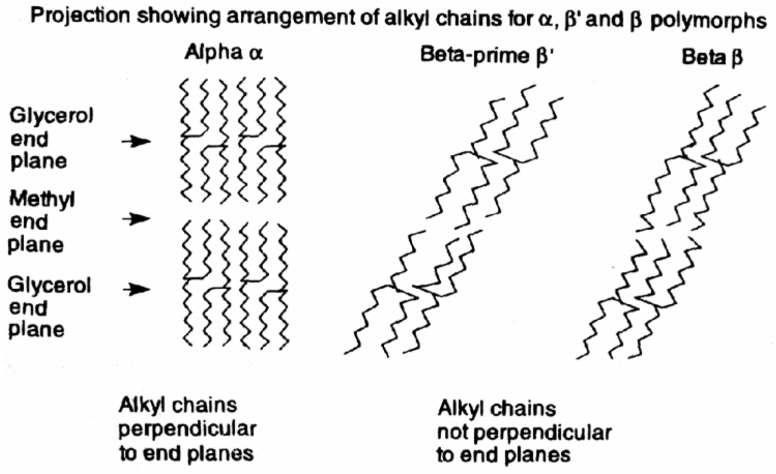
การตกผลึกของสารละลายใด ๆ ที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวยิ่งยวดนั้น จะเริ่มจากการสร้างจุดเริ่มต้นของการตกผลึกหรือที่เรียกว่า นิวเคลียสของผลึก ขึ้นมาก่อน โดยที่นิวเคลียสอาจประกอบไปด้วยโมเลกุลของตัวถูกละลายตั้งแต่จำนวนไม่กี่สิบโมเลกุลไปจนถึงระดับพันโมเลกุล ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดและธรรมชาติของสารละลาย (Mullin, 1993) หลังจากการสร้างนิวเคลียสให้มีขนาดเท่ากับขนาดวิกฤต (critical size) แล้วจะเกิดการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวถูกละลายในสารละลายเข้ามาเกาะติดที่ผิวของนิวเคลียสเพื่อเกิดการโตเป็นผลึกที่สมบูรณ์ต่อไป กระบวนการสร้างนิวเคลียสหรือ

ที่เรียกว่า nucleation process นั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือ primary nucleation และ secondary nucleation โดย primary nucleation คือ การสร้างนิวเคลียสขึ้นในระบบที่ยังไม่มีการตกผลึกเกิดขึ้นหรืออาจกล่าวได้ว่า เป็นการสร้างนิวเคลียสเพื่อการตกผลึกครั้งแรกของระบบ ซึ่ง primary nucleation สามารถแบ่งย่อยออกได้เป็น 2 ประเภท คือ homogeneous nucleation สำหรับการตกผลึกของสารละลายที่เกิดขึ้นได้เองเมื่อสารละลายนั้นมีความเข้มข้นอิ่มตัวยิ่งยวดที่สูงมากจนเข้าสู่ labile zone (Mullin, 1993) และ heterogeneous nucleation สำหรับการตกผลึกของสารละลายในสภาวะที่มีสิ่งเจือปนหรือสิ่งแปลกปลอมในระบบ โดยการสร้างนิวเคลียสสำหรับการตกผลึกแบบนี้สามารถเกิดขึ้นได้ที่สภาวะอิ่มตัวยิ่งยวดที่ไม่สูงมากนัก เนื่องจากสิ่งเจือปนหรือสิ่งแปลกปลอมในระบบจะช่วยลดพลังงานที่ต้องการใช้ในการสร้างนิวเคลียสหรือ free energy for nucleation ลง ส่วน secondary nucleation นั้นคือ การสร้างนิวเคลียสขึ้นในระบบที่มีผลึกของตัวถูกละลายเกิดขึ้นหรือปรากฏอยู่แล้ว ซึ่งการสร้างนิวเคลียสแบบนี้ไม่เป็นที่ต้องการสำหรับการตกผลึกทางอุตสาหกรรมอาหาร เช่น การผลิตน้ำตาลทรายหรือนมข้นหวาน เป็นต้น เนื่องจากจะทำให้เกิดการกระจายตัวของขนาดของผลึก (crystal size distribution) สูง หรือมีความสม่ำเสมอของขนาดของผลึกต่ำนั่นเอง (Myerson, 2002) ถึงแม้ว่ากระบวนการตกผลึกจะถูกแบ่งเป็นขั้นตอนของการเกิดนิวเคลียสของผลึก การโตของผลึก และการเกิด crystal ripening หรือการเกิดการเปลี่ยนแปลงการกระจายขนาดของผลึก (Aquilano และ Sgualdino, 2001 อ้างอิงใน Himawan และคณะ, 2006) แต่ในกระบวนการตกผลึกอาจไม่ได้เรียงเกิดตามขั้นตอน แต่อาจเกิดนิวเคลียสของผลึกแบบ primary nucleation แล้วเกิดการโตของผลึก เกิด secondary nucleation ขณะที่ยังมีการโตของผลึกต่อไป และมีการเกิด crystal ripening ขณะที่มีการโตของผลึก ดังนั้นการอธิบายกระบวนการตกผลึกที่เป็นรูปแบบจึงยากและซับซ้อนมาก (Ghotra, 2002)

การตกผลึกเป็นกระบวนการสำคัญในการอธิบายถึงคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของไขมันและน้ำมัน (Solis-Fuentes และคณะ, 2005) สารบางชนิดสามารถตกผลึกได้หลายโครงสร้างผลึก (crystallographic structure) ขึ้นอยู่กับสภาวะของปัจจัยต่าง ๆ ที่ควบคุมการตกผลึก ความสามารถในการตกผลึกได้หลายโครงสร้างนี้เรียกว่า polymorphism โดยแต่ละโครงสร้างจะมีคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น จุดหลอมเหลว ความหนาแน่น และความแข็งที่แตกต่างกัน (Sato, 2001) น้ำมันและไขมันมีไตรกลีเซอไรด์เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งมีคุณสมบัติ polymorphism หรือภาวะที่มีผลึกหลายรูปแบบ โดยทั่วไปน้ำมันและไขมันสามารถตกผลึกในโครงสร้างพื้นฐานได้ถึง 3 โครงสร้าง คือ α, β' และ β (Bailey, 1950) โดยแต่ละโครงสร้างมีลักษณะการจัดเรียงตัวของโมเลกุลที่แตกต่างกันไปดังแสดงในภาพที่ 6

โครงสร้างผลึกแบบ α มีโครงสร้างพื้นฐานของผลึก (unit cell) เป็นแบบ hexagonal นั่นคือ มีการจัดเรียงตัวของสายกรดไขมัน (fatty acid chain) เป็นเส้นตรงและขนานกันไปในทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบเมทิล (methyl end plane) ที่อยู่ตำแหน่งหัวและท้ายของโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ โครงสร้างแบบ α มีความเสถียรน้อย เนื่องจากสายของกรดไขมันมีการจับตัวกันแบบหลวม ๆ โดยทั่วไปโครงสร้างแบบ α ในเนยโกโก้ได้จากการลดอุณหภูมิของไขมันลงอย่างรวดเร็ว (ด้วยอัตราเร็วมากกว่า 20°C/min) จากไขมันเหลวไปที่ 0°C ภายใน 15 นาที (Solis-Fuentes และคณะ, 2005)

โครงสร้างผลึกแบบ β' มีโครงสร้างพื้นฐานของผลึกเป็นแบบ orthorhombic perpendicular โดยสายของกรดไขมันจะมีการทำมุมเอียงกับระนาบเมทิล ซึ่งจะทำให้การจัดเรียงตัวของโมเลกุลทำได้อย่างแน่นหนาขึ้น โครงสร้างแบบ β' จึงมีความเสถียรมากกว่าโครงสร้างแบบ α รวมทั้งมีจุดหลอมเหลวและความหนาแน่นสูงกว่า (Kaneko, 2001) โครงสร้างแบบ β' ในเนยโกโก้อาจได้จากการลดอุณหภูมิของไขมันเหลวไปที่ 16°C คงไว้ 1 ชั่วโมง แล้วลดอุณหภูมิของไขมันไปที่ 10°C ภายใน 15 นาที (Solis-Fuentes และคณะ, 2005)



ภาพที่ 6 การจัดเรียงตัวของผลึกของไตรกลีเซอไรด์รูปแบบ α, β' และ β
ที่มา : Talbot (1999)

สุดท้ายโครงสร้างผลึกแบบ β เป็นโครงสร้างที่มีความเสถียรมากที่สุดและมีจุดหลอมเหลวสูงที่สุด มีโครงสร้างพื้นฐานของผลึกเป็นแบบ triclinic parallel โดยสายกรดไขมันของโครงสร้างนี้มีการทำมุมเอียงกับระนาบเมทิลมากกว่าเมื่อเทียบกับโครงสร้างแบบ β' โครงสร้าง

แบบ β ในเนยโกโก้ได้จากการลดอุณหภูมิของไขมันเหลวไปที่ 0°C แล้วเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 20-30°C เป็นเวลามากกว่า 40 ชั่วโมง (Solis-Fuentes และคณะ, 2005) โดยผลึกในรูปแบบ β จะแนวโน้มที่จะเกิดผลึกขนาดใหญ่มีลักษณะเป็นแผ่น (plate-like) (Czerniak และคณะ, 2005; Koay และตณะ, 2009)

โดยทั่วไปแล้วน้ำมันจะตกผลึกลงในโครงสร้างแบบ α ได้ง่ายที่สุด เนื่องจากใช้พลังงานในการตกผลึกน้อยที่สุด ขณะที่ β' จะตกผลึกได้ยากกว่า α เนื่องจากใช้พลังงานมากกว่า α ในการตกผลึก ส่วนโครงสร้างแบบ β ใช้พลังงานในการตกผลึกสูงที่สุดจึงตกผลึกได้ยากที่สุด (Sato, 2001) การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผลึกไขมันจะเกิดขึ้นตามเวลา โดยโครงสร้างแบบ α จะเปลี่ยนไปเป็น β' และ β เพื่อให้เกิดความเสถียรมากขึ้น แต่จะไม่สามารถเปลี่ยนโครงสร้างแบบย้อนกลับได้ นอกเสียจากว่า จะนำไขมันนั้นไปหลอมเหลวแล้วทำการตกผลึกใหม่ (Timms, 1995) ไขมันหลายชนิด เช่น เนยโกโก้ สามารถตกผลึกได้ทั้ง 3 โครงสร้าง (Beckett, 2000) โดย StoSt ซึ่งเป็นไตรกลีเซอไรด์หลักที่พบในเนยโกโก้นั้น สามารถตกผลึกได้ถึง 5 รูปแบบ รวมถึงรูปแบบ β ทั้ง 2 แบบ คือ β_1 และ β_2 (Sato และคณะ, 1989 และ Sato, 2001) โดยเฉพาะ β_2 ซึ่งเทียบเท่ากับรูปแบบที่ V เป็นรูปแบบที่ถูกใช้มากในผลิตภัณฑ์ขนมหวาน (Sato, 1996 และ Sato, 2001) อย่างไรก็ตามไขมันบางชนิดสามารถตกผลึกได้เฉพาะโครงสร้าง α และ β' (Sato, 1999) เนื่องจากองค์ประกอบของไขมันที่มีความแตกต่างกันจะส่งผลให้ไขมันเกิดเป็นผลึกหลาย ๆ รูปแบบประกอบกัน และมีแนวโน้มที่จะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่เป็นผลึกรูปแบบเดียว (Solis-Fuentes และคณะ, 2005)

สำหรับน้ำมันเมล็ดมะม่วงนั้น มีการศึกษาการตกผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงอย่างคร่าว ๆ เปรียบเทียบกับของเนยโกโก้ด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC) และเทคนิค X-ray diffractrometer (XRD) โดย Solis-Fuentes และ Duran-de-Bazua (2004) และ Solis-Fuentes และคณะ (2005) ซึ่งพบว่า น้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์มะนิลาของประเทศเม็กซิโก เมื่อตกผลึกแล้วจะมีโครงสร้างที่เสถียรที่สุดเป็น β ที่มี X-ray diffraction characteristics (จำนวนและตำแหน่งของ diffraction peaks) เหมือนกับของเนยโกโก้ ซึ่งจะแตกต่างจากน้ำมันปาล์ม น้ำมันเมล็ดปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันมะพร้าว ที่เมื่อตกผลึกแล้วจะมีโครงสร้างที่เสถียรที่สุดเป็นแบบ β' นอกจากนี้ปริมาณไขมันที่อยู่ในสภาพของของแข็ง (SFC) ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงที่ตกผลึกเป็นของแข็งมีค่าต่ำกว่าของเนยโกโก้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 33°C ทำให้มีลักษณะอ่อนกว่าเนยโกโก้เล็กน้อย ในทางกลับกันค่า SFC ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงจะมีค่าสูงกว่าของเนยโกโก้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 33°C ทำให้มีความแข็งมากกว่าของเนยโกโก้ หรือมีลักษณะเป็น harder fat เมื่อเทียบกับของเนยโกโก้ ซึ่งถือเป็น

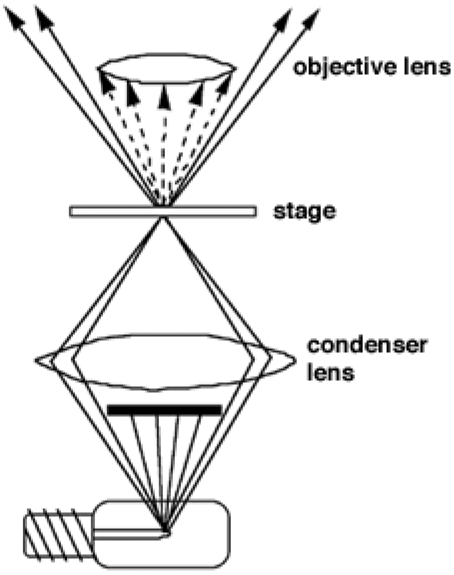
คุณสมบัติเด่นของน้ำมันเมล็ดมะม่วง เพราะสามารถนำไปผลิตเป็นเนยโกโก้เลียนแบบสำหรับใช้เป็นส่วนผสมในช็อกโกแลตทนอุณหภูมิสูงได้

สำหรับการศึกษาพฤติกรรมการตกผลึกของไขมันและน้ำมันสามารถทำได้โดยอาศัยเทคนิคการวิเคราะห์และตรวจสอบที่หลากหลาย เช่น การวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนของวัตถุโดยใช้เครื่อง Differential scanning calorimetry (DSC), Synchrotron radiation X-ray diffraction (SR-XRD) หรือ Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) สำหรับในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เทคนิควิเคราะห์ที่ถูกใช้โดยทั่วไป ได้แก่

2.7.1 การใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงทิศทางเดียว (Polarized light microscopy) เป็นการประยุกต์ใช้กล้องจุลทรรศน์แบบให้ภาพพื้นดำ (Dark field microscopy) โดยการตัดแสงจากแหล่งกำเนิดแสงให้ลำแสงที่ส่องผ่านวัตถุมีเพียงทิศทางเดียว ซึ่งจะให้ภาพของวัตถุบนพื้นสีดำ เป็นเทคนิคที่เพิ่มความคมชัดของการแสดงภาพ สามารถแยกความแตกต่างของภาพได้ดีกว่า และมีต้นทุนในการวิเคราะห์ต่ำ โดยการแสดงภาพของวัตถุด้วยแสงซึ่งไม่ถูกรวบรวมโดยเลนส์วัตถุ ทำให้เห็นวัตถุที่มีความสว่างบนพื้นสีดำ ซึ่งภาพพื้นดำจะปรากฏในลักษณะตรงข้ามกับภาพพื้นขาว โดยในภาพพื้นขาวแสงจากภายนอกที่เกี่ยวข้องจะทำให้เห็นเงาทอดลงบนผิวของวัตถุ หรือหากบางส่วนของพื้นผิววัตถุมีหลุมหรือรอยขีดข่วนจะทำให้การสะท้อนกลับของแสงต่ำลง ดังนั้นการที่ลักษณะพื้นผิวของวัตถุราบเรียบมากขึ้นจะไม่ทำให้เกิดเงาบนภาพพื้นขาว ในขณะที่ในภาพพื้นดำแสงจะสะท้อนออกจากด้านข้างของวัตถุที่มีความสว่าง (Wikipedia enclycopedia, 2010)

การเดินทางของแสงที่ส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์พื้นดำแสดงดังภาพที่ 7 โดยแสงจากแหล่งกำเนิดแสงเดินทางผ่านแผ่นตัดแสงซึ่งจะตัดแสงบางส่วนออก จากนั้นเลนส์รวมแสงทำการรวบรวมแสงที่เหลือส่องผ่านวัตถุ โดยแสงเกือบทั้งหมดส่องทะลุวัตถุ มีเพียงบางส่วนเกิดการสะท้อนออกจากวัตถุ แสงที่สะท้อนจะผ่านเลนส์วัตถุ ขณะที่แสงที่ส่องผ่านโดยตรงจะไม่ผ่านเลนส์วัตถุและไม่ถูกรวบรวม จึงมีเฉพาะแสงสะท้อนเท่านั้นที่จะทำให้เกิดภาพ

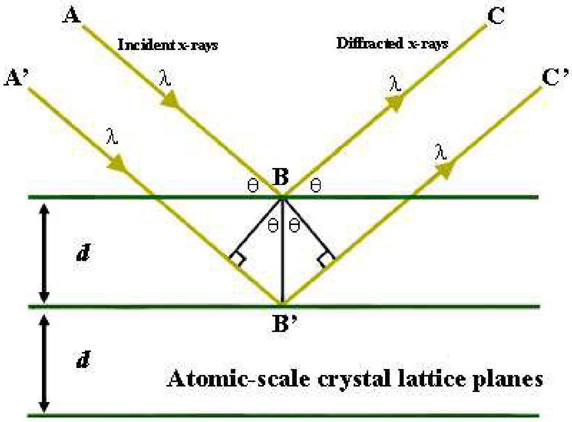
เพื่อแสดงวัตถุบนพื้นดำ แผ่นทึบแสงจะถูกวางไว้ใต้เลนส์รวมแสง มีเพียงแสงที่สะท้อนจากวัตถุเท่านั้นที่จะเข้าตา แสงจะถูกสะท้อนโดยอนุภาคบนสไลด์แทนการส่องผ่าน ในกล้องจุลทรรศน์เชิงซ้อน แผ่นตัดแสง (occulting disk) จะถูกวางระหว่างแหล่งกำเนิดแสงและเลนส์รวมแสง โดยการปรับเพิ่มแสงจะช่วยให้เกิดผลที่ดีขึ้น และการหรี่ช่องกั้นแสงลงช่วยทำให้ภาพระหว่างวัตถุและพื้นหลังคมชัดขึ้น (Caprette, 2005)



ภาพที่ 7 ภาพแสดงทิศทางของแสงที่ทำให้เกิดภาพพื้นดำ
ที่มา : Caprette (2005)

2.7.2 เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer) เป็นที่นิยมใช้ในการศึกษาโครงสร้างของผลึกและช่องว่างระหว่างอะตอม ความเครียดของโลหะ ขนาดของอนุภาค และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสาร ซึ่งผลึกของสารแต่ละชนิดมีขนาดของหน่วยเซลล์ที่ไม่เท่ากันและประกอบด้วยสารที่แตกต่างกัน เทคนิคนี้จึงเป็นการวิเคราะห์ที่รวดเร็วสำหรับการบ่งชี้โครงสร้างผลึกของสาร และสามารถให้ข้อมูลขนาด (ความกว้างและความยาว) ของหน่วยเซลล์จากการเลี้ยวเบนของรังสีไปตามช่องว่างระหว่างอะตอมภายในผลึกโดยไม่ทำลายชิ้นตัวอย่าง สารที่มักถูกวิเคราะห์ ได้แก่ สารที่ถูกบดละเอียดและสารที่ผ่านการโฮโมจีไนซ์

รูปแบบของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของการเลี้ยวเบนกับความเข้มสัมพัทธ์ของ peak ดังนั้นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่นใกล้เคียงกับขนาดของหน่วยเซลล์ คือ มีขนาดตั้งแต่ประมาณ 0.1-100 อังสตรอม จึงสามารถเลี้ยวเบนจากผลึกได้ดีเช่นเดียวกับแสงที่สามารถเลี้ยวเบนจากดิฟแฟรคชันเกรตติง โดยรังสีเอ็กซ์ถูกสร้างจากหลอดแคโทดและกรองให้มีความยาวคลื่นเดียว แล้วปรับให้มีความเข้มข้นก่อนยิงไปที่ตัวอย่าง เมื่อรังสีตกกระทบอะตอมของผลึกจะเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีทำให้เกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันและหักล้างกันของรังสี



ภาพที่ 8 กฎการสะท้อนของแบรกก์ เมื่อรังสีเอ็กซ์ตกกระทบระนาบของผลึก
ที่มา : Henry และคณะ (2007)

จากภาพที่ 8 จะพบว่า เมื่อรังสีคู่ขนานตกลงบนผลึกที่จุด B และ B' ตามลำดับ โดยทำมุม θ กับระนาบของผลึก การแทรกสอดแบบเสริมกันของรังสีจะเกิดขึ้นเมื่อระยะทางที่รังสี ABC และ A'B'C' เดินทางต่างกันเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นตามกฎของแบรกก์ (Bragg's law) ซึ่งมีสมการดังนี้

$$2d\sin\theta \;=\; n\lambda$$

ดังนั้นเมื่อรังสีเอ็กซ์มีความยาวคลื่นที่คงที่แล้ว มุมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จะขึ้นกับระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก ทำให้เกิดการแทรกสอดแบบเสริมกัน และมีสภาวะตรงกฎของแบรกก์ การกระเจิงของรังสีจะถูกตรวจจับ ผ่านกระบวนการ และคำนวณโดยการสแกนผ่านช่วงมุม 2θ ซึ่งทิศทางการกระเจิงที่เป็นไปได้ทั้งหมดได้มาจากสารที่มีลักษณะสุ่ม จากนั้นทำการแปลงค่า peak ของการกระเจิงเป็นค่า d-spacings ซึ่งจะบอกชนิดและค่า d เฉพาะของสารนั้น โดยทั่วไปค่า d จะถูกเทียบกับรูปแบบมาตรฐานของสารนั้น

จากที่กล่าวมาแล้วว่า โครงสร้างของผลึกมีความสำคัญต่อคุณสมบัติของไขมันและผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกจึงมีความสำคัญต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เทคนิคนี้จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดชนิดและโครงสร้างของโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ระหว่างกระบวนการตกผลึกซึ่งขึ้นกับระยะเวลาและอุณหภูมิในการตกผลึก โดยอาศัยการกระเจิงหรือการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ตามการจัดเรียงตัวของอะตอมในหน่วยเซลล์ที่เกิดจากการจัดเรียงตัวของสายไฮโดรคาร์บอนของไตรกลีเซอไรด์ ซึ่งจะให้ X-ray long spacing จากการสังเกตค่ามุม 2θ เท่ากับ 1-15 องศา และX-ray short spacing จาการสังเกตค่าตั้งแต่มุม 16-25 องศา (Gibon, 1986 และ Durant และคณะ, 1986 อ้างอิงใน Ghotra และคณะ, 2002) ค่า long spacing จะขึ้นกับความยาวของสาย

ไฮโดรคาร์บอนและมุมจากการจัดเรียงตัวของกรดไขมันในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ ในขณะที่ short spacing จะไม่ขึ้นกับความยาวของสายไฮโดรคาร์บอน (Jacobsberg และ Ho, 1976 อ้างอิงใน Ghotra และคณะ, 2002) ซึ่งจะถูกใช้ในการอธิบายลักษณะรูปแบบของผลึก โดยระยะห่างระหว่างอะตอมในรูป X-ray short spacings ของผลึกรูปแบบต่าง ๆ ของเนยโกโก้และของไขมันโดยทั่วไป แสดงดังตารางที่ 8 และ 9 ตามลำดับ

ตารางที่ 8 คุณลักษณะและค่า X-ray short spacings (d; Å) ของผลึกรูปแบบต่าง ๆ ของเนยโกโก้ *

Polymorphic form	Short spacings (Å)
γ (sub-α), (form I)	4.17(s), 3.87(m) c
	4.72(s), 3.88(s) g
α (form II)	4.20(vs) c
	4.15 e, f, g
$\beta'2$ (form III)	4.20(vs), 3.87(vw) c
$\beta'1$ (form IV)	4.32(s), 4.13(s), 3.75(m), 3.88(w) c
$\beta2$ (form V)	4.58(vs), 3.98(s), 3.73(s), 3.65(s), 5.38(m), 5.13(w), 4.22(w), 3.87(w) a, c, g
	4.60(vs), 5.43(m), 3.99(m), 3.76(m), 3.88(w), 3.68(w) b, g
	4.54(vs), 3.95(s), 5.34(m), 3.84(m), 3.73(m), 3.64(w) g
	4.58, 3.98, 3.86, 3.74, 3.67 d
$\beta1$ (form VI)	4.53(vs), 3.67(s), 5.37(m), 3.84(m), 4.01(w), 5.09(vw), 4.21(vw) c
	4.59(vs), 3.70(s), 5.43(m), 3.86(m), 5.15(w), 4.04(w), 4.27(vw), 3.36(vw) g

* ความเข้มสัมพัทธ์ถูกแสดงเป็น very strong (vs), strong (s), medium (m), weak (w) และ very weak (vw)

ที่มา : Chapman และคณะ (1985) อ้างอิงใน Solis-Fuentes และคณะ (2005)a; Hicklin และคณะ (1985) อ้างอิงใน Solis-Fuentes และคณะ (2005)b; Marangoni และ McGauley (2003)c; Marty and Marangoni (2009)d; Souza และคณะ (1990)e; Brien (1998)f อ้างอิงใน Solis-Fuentes และคณะ (2005)g

ตารางที่ 9 ตารางแสดงค่า X-ray short spacings (d; Å) ของผลึกรูปแบบต่าง ๆ ของไขมัน*

Polymorphic form	**Short spacings (Å)**
γ (sub-α)	4.72(s), 3.88(s) i, j, k
α	4.15 b, i, j, k
	4.20 c, d, h, l
β'	4.20(s), 3.80(s), 4.27, 3.97, 3.71 i, j, k
	4.23(s), 3.85(w) b
	4.20(vs), 3.83(s) b
	4.27(s), 3.88(m) b
	4.28(s), 3.90(m) b
	4.20, 3.80 e, g
	4.20-4.30, 3.70-4.00 c, l
β' (sub-α)	long spacing, β' ที่ m.p.< α i, j, k
pseudo-β'	3.96(s), 4.27(m), 4.15(m), 4.40(w) i, j, k
sub-β	4.74(s), 4.50(m), 3.90(m), 3.60(m) i, j, k
β	4.55 a
	4.60(s) b, c, d, i, j, k, l
	5.40(m), 4.57(vs), 3.99(s), 3.88(m), 3.76(m), 3.67(w) k
	4.60, 4.01, 3.89, 3.78, 3.69

* ความเข้มสัมพัทธ์ถูกแสดงเป็น very strong (vs), strong (s), medium (m) และ weak (w)

ที่มา : Ahmadi และ Marangoni (2009)a; Czerniak (2005)b; Ghotra และคณะ(2002)c; Himawan และคณะ (2006)d; Lawler และ Dimick (2002) และ van Langevelde และคณะ (1999) อ้างอิงใน Czerniak (2005)e; Marangoni และ McGauley (2003)f ; Narine (2004)g; Narine และ Humphrey (2004)h; Souza และคณะ (1990)i; Brien (1998)j อ้างอิงใน Solis-Fuentes และคณะ (2005)k; Narine และ Marangoni (1999)l

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 วัตถุดิบหลัก

3.1.1.1 เมล็ดมะม่วงสายพันธุ์แก้ว

จัดหาเมล็ดมะม่วงสุกสายพันธุ์แก้วที่เป็นของเหลือทิ้งจากโรงงานแปรรูปมะม่วงอบแห้งในจังหวัดราชบุรี หลังจากได้เมล็ดมะม่วงแล้วนำมาแกะเปลือกแข็งออกให้เหลือแต่ส่วนเนื้อสีขาวด้านในที่เรียกว่า เมล็ดในมะม่วง (mango kernel หรือ mango seed almond) เก็บใส่ถุงพลาสติกโพลีเอทิลีนและปิดปากถุงให้สนิท แล้วนำไปเก็บในตู้แช่แข็งที่อุณหภูมิ -18°C เพื่อรอการนำไปสกัดน้ำมัน

3.1.1.2 เนยโกโก้ (Delfi DF 200, Pure prime press deodorised) จากบริษัท ซีโน แปซิฟิค เทรดดิ้ง (ไทยแลนด์) จำกัด

3.1.1.3 น้ำมันปาล์มมิดแฟรคชั่น ได้จากบริษัท มรกต อินดัสตรี้ส์ จำกัด (มหาชน)

3.1.1.4 เมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมันมาตรฐาน จากบริษัท แอคคิวสแตนดาร์ด อินคอร์เปอเรชัน (AccuStandard, Inc.)

3.1.2 สารเคมี

3.1.2.1 เฮกเซน (Hexanes, Mallinckrodt chemical, UN 1208)

3.1.2.2 ปิโตรเลียมอีเทอร์ (Petroleum ether, Mallinckrodt chemical, UN 1268)

3.1.2.3 โพรพานอล (2-Propanol, Merck, UN 1219)

3.1.2.4 โทลูอีน (Toluene, Panreac quimica sau, UN 1294)

3.1.2.5 เมทานอล (Methanol (Died) $\geq$ 99.9% assay, Ajax finechem, UN 1230)

3.1.2.6 เอ็น-เฮปเทน (n-Heptane $\geq$ 99.5% assay, Ajax finechem, UN 1206)

3.1.2.7 สารละลายวิจส์ (Wijs solution, c(ICI) = 0.1 mol/l, Merck, UN 2789)

3.1.2.8 เอทานอล (Ethanol 95% (v/v))

3.1.2.9 โบรอนไตรฟลูออไรด์ในเมทานอล ความเข้มข้นประมาณ 1.3 โมลาร์ (Boron trifluoride (~1.3 M) in methanol, Fluka 15715)

3.1.2.10 กรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 0.5 นอร์มอล (Hydrochloric acid, c(HCl) = 0.5 N, Merck)

3.1.2.11 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide ≥ 85% assay, Merck, UN 1813)

3.1.2.12 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide ≥ 99% assay, Merck, UN 1823)

3.1.2.13 โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride ≥ 99.5% assay, Merck)

3.1.2.14 โซเดียมไธโอซัลเฟต (Sodium thiosulphate ≥ 99.5% assay, Ajax finechem)

3.1.2.15 ฟีนอฟทาลีน อินดิเคเตอร์ (Phenolphthalein indicator, Labchem, Asia pacific specialty chemicals limited.)

3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.3.1 เครื่องสกัดน้ำมัน (Soxhlet, Tecator Soxtec HT6)

3.1.3.2 ตู้อบสุญญากาศ (Vacuum oven VOS-300SD, Eyela)

3.1.3.3 อ่างน้ำ (water bath) แบบควบคุมอุณหภูมิได้

3.1.3.4 เครื่อง Gas Chromatography-Flame Ionization Detector (GC-FID, Shimadzu GC-2010)

3.1.3.5 เครื่อง pulse-Nuclear Magnetic Resonance (p-NMR) ของบริษัท BRUKER รุ่น the minispec mq20

3.1.3.6 เครื่อง Polarized Light Microscopy (PLM) (Olympus CH-2, Japan)

3.1.3.7 กล้องถ่ายรูปแบบ digital พร้อมชุด adapter สำหรับเชื่อมต่อเข้ากับ PLM Olympus CAMEDIA digital camera (model NO. C-7070 Wide Zoom, 7.1 Megapixel, Japan)

3.1.3.8 เครื่อง X-ray Powder Diffractometer (XRD) Rigaku TTRAX III, 18kW

3.1.3.9 เครื่องวัดสี (Color–view™ Spectrophotometer, (D65), Gardner)

3.1.3.10 ตู้บ่มควบคุมอุณหภูมิ (Refrigerated incubators with microprocessor program controller RD3, Binder)

3.1.3.11 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ FP90 Central Processor และ FP82 Microscope Hot Stage (Mettler Toledo FP900 Thermosystem, Mettler-Toledo AG, Switzerland)

3.2 การสกัดน้ำมันเมล็ดมะม่วง

ทำการสกัดน้ำมันจากเมล็ดมะม่วงโดยประยุกต์ใช้กรรมวิธีของ Solis-Fuentes และ Duran-de-Bazua (2004) ดังต่อไปนี้

3.2.1 นำเมล็ดในมะม่วงแช่แข็งไปอบแห้งในสภาวะสุญญากาศด้วยตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 65°C จนมีปริมาณความชื้นหลงเหลืออยู่ไม่เกิน 10% (น้ำหนักแห้ง) ซึ่งใช้เวลาประมาณ 6 ชั่วโมง

3.2.2 บดเมล็ดมะม่วงอบแห้งที่ได้จนละเอียดเป็นผงด้วยเครื่องปั่นละเอียด

3.2.3 สกัดน้ำมันจากเมล็ดมะม่วงผงด้วยเครื่อง Soxhlet ที่อุณหภูมิ 140°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ด้วยตัวทำละลายเฮกเซน (n-Hexane) กำจัดตัวทำละลายออกโดยใช้ rotary evaporator

3.2.4 นำน้ำมันที่สกัดได้ไปทำให้บริสุทธิ์โดยการประยุกต์ใช้วิธี Wesson method ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ก จากนั้นกรองน้ำมันที่ได้ด้วยกระดาษกรอง (Whatman No. 1 ขนาดของรูกรองเท่ากับ 11 μm) จำนวน 2 ชั้น ในตู้อบที่อุณหภูมิ 50°C เก็บน้ำมันที่ได้ให้พ้นจากแสงและอากาศที่อุณหภูมิ ~4°C จนกว่าจะทำการศึกษาในขั้นตอนถัดไป

3.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของไขมันผสมและเนยโกโก้

ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของไขมันผสมระหว่างน้ำมันเมล็ดมะม่วง (MAF) และน้ำมันปาล์มมิดแฟรคชั่น (PMF) อัตราส่วนต่าง ๆ เปรียบเทียบกับเนยโกโก้ (CB) เพื่อหาไขมันผสมอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเนยโกโก้เลียนแบบชนิด CBE ที่มีชนิดและปริมาณของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบ คุณสมบัติต่าง ๆ ทั้งทางเคมีและทางกายภาพ ที่เหมือนหรือใกล้เคียงกับของ CB โดยประกอบไปด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

3.3.1 เตรียมตัวอย่างสำหรับใช้ในการวิเคราะห์ ได้แก่ ไขมันผสมระหว่างน้ำมัน MAF และ PMF ในอัตราส่วนดังต่อไปนี้คือ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50 และ 0:100 โดยน้ำหนักของ MAF ต่อ PMF และตัวอย่าง CB ทางการค้า

3.3.2 วิเคราะห์ชนิดและปริมาณของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของไขมันผสมอัตราส่วนต่าง ๆ เปรียบเทียบกับของ CB ด้วยเครื่อง GC-FID โดยใช้ Column AT^{TM}-wax (เฟสอยู่นิ่งหรือ stationary phase คือ 100% polyethyleneglycol ความยาว 50 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.25 มิลลิเมตร ความหนาของฟิล์ม 0.20 ไมโครเมตร) โดยปริมาณของกรดไขมันองค์ประกอบแต่ละชนิดที่วิเคราะห์ได้นั้นจะแสดงผลเป็นร้อยละของพื้นที่ใต้กราฟ เมื่อคิดเทียบให้ร้อยละของพื้นที่ใต้กราฟ ของกรดไขมันองค์ประกอบทั้งหมดรวมกันเป็นร้อยละ 100 ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

3.3.2.1 เตรียมตัวอย่างเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมัน (Fatty Acid Methyl Ester; FAME) ตามกรรมวิธีของ AOAC (2000) ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ข

3.3.2.2 หาสภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์กรดไขมันองค์ประกอบ ซึ่งพิจารณาจากการเกิด peaks โดยไม่เกิด fronting หรือ tailing และมีการแยกกันของ peaks อย่างชัดเจน ซึ่งได้สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่างดังนี้ อุณหภูมิของ Injector เท่ากับ 210°C อุณหภูมิของ FID Detector เท่ากับ 280°C อุณหภูมิของ Oven เริ่มต้นที่ 120°C คงไว้ 3 นาที เพิ่มอุณหภูมิขึ้นด้วยอัตรา 10°C/min จนถึง 220°C คงไว้ 30 นาที และเพิ่มอุณหภูมิขึ้นอีกครั้งด้วยอัตรา 5°C/min จนถึง 240°C คงไว้ 30 นาที (รวมเวลาทั้งสิ้น 77 นาที) ความดันเริ่มต้นเท่ากับ 93.2 kPa ใช้ก๊าซฮีเลียมเป็นตัวพา (Carrier gas) และ Split ratio เท่ากับ 1:100

3.3.2.3 วิเคราะห์ค่า retention time ของเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมันมาตรฐาน ซึ่งถูกใช้เป็น external standard ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับไขมันผสมและ CB ได้แก่ กรดลอริก (Lauric acid; C12:0) กรดไมริสติก (Myristic acid; C14:0) กรดปาล์มมิติก (Palmitic acid; C16:0) กรดปาลมิโตเลอิก (Palmitoleic acid; C16:1) กรดสเตียริก (Stearic acid; C18:0) กรดโอเลอิก (Oleic acid; C18:1) กรดลิโนเลอิก (Linoleic acid; C18:2) กรดลิโนเลนิก (Linolenic acid; C18:3) กรดอราคิดิก (Arachidic acid; C20:0) กรดบีฮีนิก (Behenic acid; C22:0) และกรดลิกโนเซริก (Lignoceric acid; C24:0) ตามสภาวะที่ได้จากข้อ 3.3.2.2

3.3.2.4 หาองค์ประกอบและอัตราส่วนของปริมาณเป็นร้อยละของพื้นที่ใต้กราฟของกรดไขมันในไขมันผสมอัตราส่วนต่าง ๆ และ CB ที่เตรียมเป็นเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมันตามข้อ 3.3.2.1 โดยเปรียบเทียบค่า Retention time กับเอสเตอร์ของกรดไขมันมาตรฐานในข้อ 3.3.2.3

3.3.3 วิเคราะห์ค่าสปอนนิฟิเคชัน (Saponification value; Spv) ตามกรรมวิธีของ PORIM test method no. p3.1 (1995) ดังแสดงในภาคผนวก ค โดยกลีเซอไรด์ทั้งหมดจะถูกไฮโดรไลซ์เป็นกรดไขมันและกลีเซอรอลด้วยแอลกอฮอลิกอัลคาไลน์ (alcoholic alkali; KOH in ethanol) และกรดไขมันอิสระจะถูกทำให้เป็นกลางหรือทำให้เกิดสบู่ จากนั้นอัลคาไลน์ส่วนเกินจะถูกไตเตรตกลับด้วยสารละลายไฮโดรเจนคลอไรด์ (HCl) โดยใช้ 1% Phenolphthalein เป็นอินดิเคเตอร์ แล้วคำนวณค่า Spv ตามสมการต่อไปนี้

$$Spv = \frac{[(A-B)\times N\times 56.11]}{g\ oil}$$

เมื่อ A คือ ปริมาตร (ml) ของ HCl ที่ใช้ในการไตเตรตสารตัวอย่าง

B คือ ปริมาตร (ml) ของ HCl ที่ใช้ในการไตเตรต blank

N คือ ความเข้มข้นของ HCl (N)

g oil คือ น้ำหนักเป็นกรัมของน้ำมันที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.3.4 วิเคราะห์ค่าไอโอดีน (Iodine value; Iv) โดยใช้เครื่องไตเตรตอัตโนมัติ (Mettler Toledo DL58 titrator)

3.3.5 วิเคราะห์ค่าความเป็นกรด (Acid value; Av) โดยประยุกต์ใช้กรรมวิธีของ AOCS (1989) ดังแสดงในภาคผนวก ง โดยกรดไขมันอิสระจะถูกทำให้เป็นกลางหรือทำให้เกิดสบู่ด้วยการไตเตรตกับสารละลายมาตรฐาน 0.1 N โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยใช้ 1% Phenolphthalein เป็นอินดิเคเตอร์ แล้วคำนวณค่า Av ตามสมการต่อไปนี้

$$Av = \frac{[A \times N]}{g\ oil}$$

เมื่อ A คือ ปริมาตร (ml) ของ NaOH ที่ใช้ในการไตเตรตสารตัวอย่าง

N คือ ความเข้มข้นของ NaOH (N)

g oil คือ น้ำหนักเป็นกรัมของน้ำมันที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.3.6 วิเคราะห์ปริมาณของไขมันแข็ง (เป็น %) ที่อยู่ในรูปผลึกหรือ solid fat content (SFC) และพฤติกรรมการหลอมเหลวด้วยเครื่อง p-NMR ตามวิธีของ AOCS: direct method (2000) ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 15-40°C ด้วยกรรมวิธีดังแสดงไว้ในภาคผนวก จ ซึ่งจะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า SFC (%; แกน y) และอุณหภูมิ (°C; แกน x)

3.3.7 วิเคราะห์จุดหลอมเหลวแบบ slip melting point (SMP) ตามกรรมวิธีของ PORIM test method no. p4.2, 1995 ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ฉ

3.4 การคัดเลือกไขมันผสมอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำไปใช้เป็น CBE

ทำการคัดเลือกไขมันอัตราส่วนที่เหมาะสมโดยดูจากไขมันผสมที่มีองค์ประกอบกรดไขมัน (จากการศึกษาในข้อ 3.3.2) ค่า SFC ซึ่งแสดงพฤติกรรมการหลอมเหลว (จากการศึกษาในข้อ 3.3.6) และค่า SMP (จากการศึกษาในข้อ 3.3.7) ที่ใกล้เคียงกับของ CB มากที่สุด ซึ่ง CBE คุณภาพสูงนั้นควรมีคุณสมบัติทั้ง 3 ประการ ใกล้เคียงกับของ CB

3.5 การวิเคราะห์ความเข้ากันได้ (Compatibility) ของไขมันผสมอัตราส่วนที่เลือกกับเนยโกโก้

ทำการวิเคราะห์ความเข้ากันได้ของไขมันผสมจากข้อ 3.4 กับ CB โดยผสมไขมันผสมอัตราส่วนที่เลือกกับ CB ด้วยอัตราส่วนต่าง ๆ ดังนี้ 100:0, 80:20, 60:40, 40:60, 20:80 และ 0:100 (w/w) แล้ววัดค่า SFC ที่อุณหภูมิ 20°C โดยการเตรียมตัวอย่างตามวิธีของ AOCS (2000) จากนั้นสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า SFC (%) กับปริมาณ (%) ของไขมันผสมอัตราส่วนที่เลือก

3.6 การศึกษาพฤติกรรมการตกผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วง น้ำมันปาล์มมิดแฟรคชั่น ไขมันผสมระหว่างน้ำมันเมล็ดมะม่วงและน้ำมันปาล์มมิดแฟรคชั่นในอัตราส่วนที่เลือกไว้ และไขมันผสมของอัตราส่วนที่เลือกที่ผสมกับเนยโกโก้เปรียบเทียบกับพฤติกรรมการตกผลึกของเนยโกโก้ ดังนี้

3.6.1 เตรียมตัวอย่างสำหรับการศึกษาพฤติกรรมการตกผลึก 5 ตัวอย่าง ดังต่อไปนี้

3.6.1.1 MAF

3.6.1.2 PMF

3.6.1.3 ไขมันผสมระหว่าง MAF และ PMF ที่คัดเลือกได้จากไขมันผสมในหัวข้อ 3.4 ซึ่งแทนว่า cocoa butter equivalent หรือ CBE

3.6.1.4 ไขมันผสมระหว่าง CBE กับ CB ตามอัตราส่วนสูงสุดที่ยินยอมให้เติม CBE ในผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลตได้โดย EU Chocolate Directive นั่นคือ อนุญาตให้เติม CBE ลงไปในผลิตภัณฑ์ได้ไม่เกิน 5% โดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์สุดท้าย ถ้าให้ค่าเฉลี่ยของปริมาณไขมันทั้งหมดในช็อกโกแลตธรรมดา (dark chocolate) เป็น 33.2% (w/w) ของน้ำหนักผลิตภัณฑ์สุดท้าย (Talbot, 1999) แสดงว่า ช็อกโกแลตที่มีการเติมไขมันผสมที่เป็น CBE ปริมาณ 5% โดยน้ำหนักของช็อกโกแลต จะมีปริมาณเนยโกโก้อยู่ 33.2% - 5% = 28.2% และจะมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของไขมันผสมที่เป็น CBE ต่อเนยโกโก้เป็น 5:28.2 หรือ 1:5.64 นั่นเอง ซึ่งตัวอย่างนี้จะเรียกว่า MIX

3.6.1.5 CB

3.6.2 ศึกษาพฤติกรรมการตกผลึกของ MAF, PMF, CBE, MIX และ CB ที่อุณหภูมิของการตกผลึก 20°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาพฤติกรรมการตกผลึกของ CB ตามที่มีรายงานไว้โดย Sonwai และ Mackley (2006) ว่า เป็นอุณหภูมิที่ใช้เวลาไม่นานเกินไปก่อนที่การตกผลึกจะเริ่มต้น (หรือใช้เวลาไม่เกิน 5 นาที นับจากจุดที่เริ่มจับเวลา)

3.6.2.1 ศึกษาระยะเวลาที่ใช้ก่อนการเริ่มตกผลึก รูปร่างผลึก จำนวนและขนาดของผลึก และการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างผลึก จำนวนและขนาดของผลึกตามเวลาโดยใช้เทคนิค PLM ร่วมกับกล้องถ่ายภาพแบบ digital และกำลังขยายของเลนส์วัตถุเท่ากับ x50

การทดลองจะเริ่มจากการให้ความร้อนกับตัวอย่างไขมันที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 10 นาที เพื่อเป็นการทำลายโครงสร้างผลึกของส่วนที่เป็นของแข็ง (memory effect) ให้หมดไป จากนั้นลดอุณหภูมิลงเพื่อให้เกิดการตกผลึกที่ 20°C ในสภาวะนิ่ง (หรือไม่มีการปั่นกวนระหว่างการตกผลึก) ด้วยอัตราเร็ว 2°C/min เริ่มจับเวลาทันทีที่อุณหภูมิลดลงมาถึง 20°C และให้เวลาที่ใช้ในการตกผลึกสำหรับแต่ละการทดลองเป็น 1 ชั่วโมง ทั้งนี้ระหว่าง 1 ชั่วโมงของการทดลองจะต้องรักษาอุณหภูมิของตัวอย่างให้คงที่ตลอดเวลา (± 0.2°C) โดยเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่ตั้งค่าไว้ที่อุณหภูมิที่ใช้ตกผลึก เพื่อไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของรูปร่าง ขนาด และจำนวนของ

ผลึกระหว่างการบันทึกภาพ และเพื่อให้การตกผลึกเป็นไปในแบบที่อุณหภูมิคงที่ตลอดการตกผลึก (isothermal) ทำการส่องดูลักษณะของผลึกที่เกิดขึ้นพร้อมบันทึกภาพ ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ ของการตกผลึก (ทุก ๆ 2 นาทีในช่วง 20 นาทีแรก และทุก ๆ 5 นาทีหลังจากนั้น) แล้วนำภาพที่บันทึกได้ไปประมวลผลด้วยโปรแกรม Adobe Photoshop CS3 Extended version 10.0 (Adobe Systems Incorporated, United States) เพื่อทำการนับจำนวนและวัดขนาดของผลึก

3.6.2.2 ศึกษากลไกการตกผลึกของไขมันตัวอย่างด้วยเครื่อง p-NMR โดยประยุกต์ใช้กรรมวิธีของ AOCS (2000) ติดตามการเปลี่ยนแปลงของค่า SFC ของไขมันตัวอย่างตามเวลาที่อุณหภูมิ 20°C ตลอดระยะเวลา 1 ชั่วโมง โดยเตรียมตัวอย่างไขมันใส่หลอด p-NMR สูงประมาณ 4 เซนติเมตร แล้วละลายไขมันที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำไปใส่ในเครื่อง p-NMR ที่ควบคุมอุณหภูมิของที่ใส่หลอดตัวอย่างไว้ที่ 20°C เริ่มจับเวลา (t = 0 min) เมื่ออุณหภูมิของตัวอย่างลดลงเป็น 20°C วัดค่า SFC ตามเวลาโดยวัดทุก ๆ 1 นาที เป็นเวลา 20 นาที ทุก ๆ 2 นาทีจนครบ 1 ชั่วโมง เพื่อศึกษาระยะเวลาก่อนการเริ่มตกผลึก ความเร็วช้าของการตกผลึก และระดับการตกผลึกสูงสุดจากค่า SFC ที่วัดได้ของไขมันแต่ละตัวอย่าง โดยการสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า SFC กับระยะเวลาในการตกผลึก (นาที)

3.6.2.3 ศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกและการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกตามเวลาโดยใช้เครื่อง XRD และเก็บข้อมูลในช่วง 2θ เท่ากับ 18-26 องศา (step width เท่ากับ 0.02 องศา อัตราเร็วเท่ากับ 2.7 องศาต่อนาที) ทำการติดตามการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผลึกโดยละลายตัวอย่างที่ 60°C เป็นระยะเวลา 10 นาที แล้วลดอุณหภูมิไปที่ 20°C เริ่มจับเวลาทันที (t = 0 min) วิเคราะห์โครงสร้างผลึกทุก ๆ 5 นาที เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นวัดทุก ๆ 10 นาที จนครบ 60 นาที แล้วคำนวณค่า d-short spacing จากสมการของแบรกก์ (1) ซึ่งมีค่าความยาวคลื่น (λ) ที่ใช้ในการคำนวณค่า d-short spacing เท่ากับ 1.5404 Å (Cu/K-alpha)

$$2d\sin\theta = n\lambda \tag{1}$$

3.7 การศึกษาการเกิด fat bloom ของไขมัน

ศึกษาการเกิด fat bloom ของ CBE และไขมันผสมระหว่าง CBE กับ CB ด้วยอัตราส่วน 1:5.64 (w/w) หรือ MIX เปรียบเทียบกับพฤติกรรมการเกิด fat bloom ของ CB โดยทำการ tempering ไขมันตัวอย่างทั้ง 3 ตัวอย่าง ในหม้อตกผลึกแบบ double-jacket ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่างได้พร้อมกับมีการปั่นกวนตัวอย่างตลอดเวลา โดยให้ความร้อนกับตัวอย่างที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นลดอุณหภูมิไปที่ 24°C จนกระทั่งเริ่มเกิดการตกผลึกในโครงสร้างที่ไม่เสถียรขึ้นเป็นจำนวนมากซึ่งตัวอย่างมีลักษณะขุ่น มีความหนืดเพิ่มขึ้น และมี

อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 24°C เล็กน้อย แล้วจึงเพิ่มอุณหภูมิไปที่ 30°C ทันทีคงไว้เป็นเวลา 6 นาที เพื่อให้ผลึกที่ได้อยู่ในรูปแบบที่ V หรือ β_2 ซึ่งเป็นรูปแบบที่ต้องการ (ตรวจสอบโครงสร้างผลึกที่ได้ด้วย XRD ดังแสดงในภาคผนวก ช) แล้วเทลงแบบพิมพ์ จากนั้นทำให้แข็งตัวที่อุณหภูมิ 18°C เป็นระยะเวลา 30 นาที แล้วนำไปเก็บที่อุณหภูมิ 25°C ในตู้บ่มควบคุมอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 6 เดือน ทำการวัดสีเริ่มต้นด้วยเครื่องวัดสี และติดตามการเปลี่ยนแปลงสีระหว่างการเก็บรักษาทุก ๆ 1 เดือน ซึ่งจะได้ค่าพารามิเตอร์ L*, a* และ b* แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่า whiteness index (WI) โดยใช้สมการ (2) (Sonwai และ Rousseau, 2006)

$$WI = 100 - \left[\left(100 - L^* \right)^2 + a^{*2} + b^{*2} \right]^{1/2} \qquad (2)$$

บทที่ 4
ผลและวิจารณ์ผลการดำเนินงานวิจัย

4.1 การสกัดน้ำมันเมล็ดมะม่วง

เมื่อทำการสกัดน้ำมันจากเมล็ดมะม่วงด้วยเครื่อง Soxhlet ตามกรรมวิธีของ Solis-Fuentes และ Duran-de-Bazua (2004) พบว่า เมล็ดมะม่วงสายพันธุ์แก้วมีปริมาณน้ำมัน (Crude fat) เฉลี่ยประมาณ 7.28 ± 0.19% (น้ำหนักแห้ง) ซึ่งเป็นปริมาณที่ใกล้เคียงกับน้ำมันที่สกัดได้จากเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อื่นที่มีรายงานไว้ดังนี้ เมล็ดมะม่วงสายพันธุ์มะนิลามีปริมาณน้ำมันเฉลี่ยประมาณ 5.28-11.26% (น้ำหนักแห้ง) (Solis-Fuentes และ Duran-de-Bazua, 2004) เมล็ดมะม่วงที่ได้จากมะม่วงในเมืองกวารา ประเทศไนจีเรีย (Kwara state of Nigeria) มีปริมาณน้ำมันเฉลี่ยประมาณ 13.511 ± 3.967% (น้ำหนักแห้ง) (Afolabi, 2008) และเมล็ดมะม่วงในประเทศปากีสถานมีน้ำมันเฉลี่ยประมาณ10.01% (น้ำหนักแห้ง) (Anwer และคณะ, 2006) นอกจากนี้ Lakshminarayana และคณะ (1983) ยังรายงานถึงน้ำมันเมล็ดมะม่วงของประเทศอินเดียกว่า 43 สายพันธุ์ว่า มีปริมาณน้ำมันเฉลี่ยตั้งแต่ 3.7-12.6% (น้ำหนักแห้ง)

4.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของไขมันผสมและเนยโกโก้

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ทั้งทางเคมีและทางกายภาพ เพื่อหาไขมันผสมระหว่าง MAF และ PMF ในอัตราส่วนที่เหมาะสมที่มีชนิดและปริมาณเป็นร้อยละของพื้นที่ใต้กราฟของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบ รวมถึงมีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับของ CB สำหรับใช้เป็นเนยโกโก้เลียนแบบชนิด CBE ได้ผลการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

4.2.1 การวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของไขมันผสมในอัตราส่วนต่าง ๆ เปรียบเทียบกับ CB ด้วยเครื่อง GC-FID โดยเปรียบเทียบค่า Retention time ของกรดไขมันในตัวอย่างกับกรดไขมันมาตรฐานเพื่อยืนยันชนิดของกรดไขมัน ซึ่งโครมาโตแกรมของไขมันผสมอัตราส่วนต่าง ๆ และ CB จากการวิเคราะห์ด้วย GC-FID นั้นได้แสดงไว้ในภาคผนวก ซ จากนั้นวิเคราะห์หาอัตราส่วนของปริมาณกรดไขมันชนิดต่าง ๆ โดยพิจารณาจากร้อยละของพื้นที่ใต้กราฟของกรดไขมันในไขมันผสมแต่ละอัตราส่วนเปรียบเทียบกับ CB จากการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า ไขมันผสมทุกอัตราส่วนมีร้อยละของปริมาณของกรดไขมันชนิดต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบแตกต่างจากของ CB อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยร้อยละของปริมาณของกรดไขมันชนิดต่าง ๆ

ที่ทำการวิเคราะห์ในไขมันผสมทุกอัตราส่วนและ CB ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ฌ เฉพาะร้อยละของปริมาณของกรดไขมันชนิดที่เป็นองค์ประกอบหลักของ CB คือ กรดปาล์มมิติก กรดสเตียริก และกรดโอเลอิก ได้นำมาแสดงไว้ในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ร้อยละของปริมาณของกรดไขมัน* ที่เป็นองค์ประกอบของไขมันผสมและเนยโกโก้

อัตราส่วนของไขมันผสม x : y	**ร้อยละของพื้นที่ใต้กราฟของ**			
	กรดปาล์มมิติก (C16)	**กรดสเตียริก (C18)**	**กรดโอเลอิก (C18:1)**	**อื่น ๆ**
100:0 (MAF)	5.39 ± 0.03	46.55 ± 0.09	41.09 ± 0.09	6.97 ± 0.16[c]
90:10	10.34 ± 0.10	42.84 ± 0.07	40.02 ± 0.11	6.80 ± 0.28[c]
80:20	16.26 ± 0.07	37.25 ± 0.05	39.60 ± 0.02	6.88 ± 0.05[c]
70:30	19.84 ± 0.15	33.93 ± 0.06	39.22 ± 0.03[a]	7.01 ± 0.12[c]
60:40	24.93 ± 0.05	28.64 ± 0.07	39.12 ± 0.07[a]	7.31 ± 0.10[b]
50:50	29.11 ± 0.05	24.67 ± 0.03	38.69 ± 0.05	7.52 ± 0.11[b]
0:100 (PMF)	51.65 ± 0.13	4.21 ± 0.01	35.63 ± 0.08	8.51 ± 0.04
เนยโกโก้	25.82 ± 0.13	36.53 ± 0.04	33.49 ± 0.10	4.17 ± 0.02

หมายเหตุ * ค่าที่แสดงเป็นร้อยละของพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโตแกรม (ค่าเฉลี่ยของ triplicates ± standard deviation (SD))

a, b, c หมายถึง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

MAF หมายถึง น้ำมันเมล็ดมะม่วง

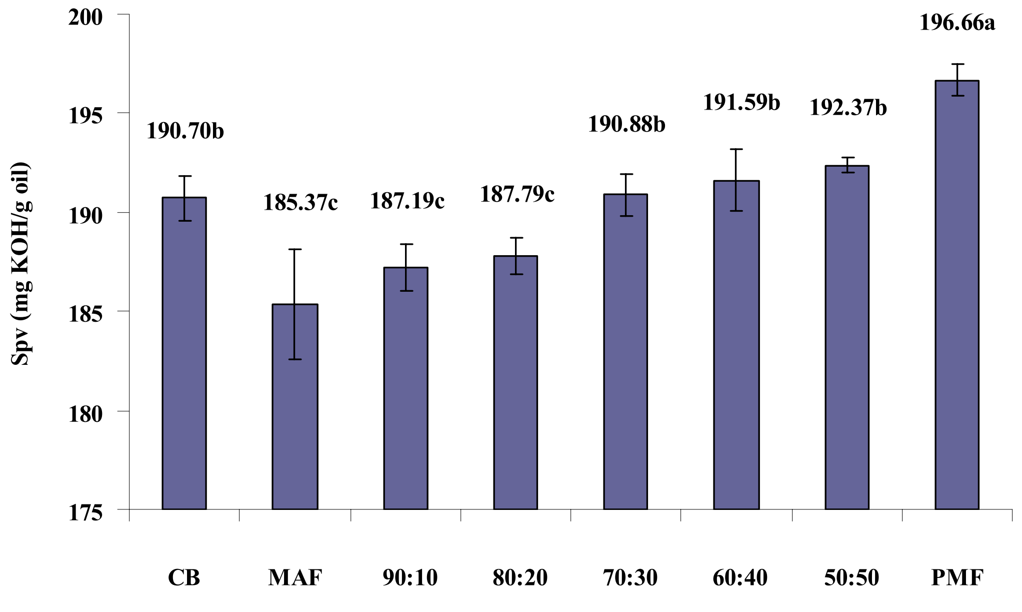
PMF หมายถึง น้ำมันปาล์มมิดแฟรคชั่น

อัตราส่วน x : y แสดงถึงอัตราส่วนของไขมันผสม 2 ชนิด (โดยน้ำหนัก) เมื่อ x คือ MAF และ y คือ PMF

จากตารางที่ 10 จะเห็นว่า MAF มีกรดสเตียริกและกรดโอเลอิกเป็นกรดไขมันหลัก ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Solis-Fuentes และ Duran-de-Bazua (2004) ในน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์มะนิลา และการศึกษาของ Lakshminarayana และคณะ (1983) ใน MAF กว่า 43 สายพันธุ์ในประเทศอินเดีย เนื่องจาก MAF เป็นแหล่งของไตรกลีเซอไรด์ชนิด StOSt และ POSt ดังที่ได้

กล่าวมาแล้ว ส่วน PMF ประกอบด้วยกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิกเป็นกรดไขมันหลัก เนื่องจากเป็นแหล่งของไตรกลีเซอไรด์ชนิด POP และ POSt อีกเล็กน้อย ดังนั้นเมื่อผสมน้ำมันทั้ง 2 ชนิดเข้าด้วยกันจะทำให้กรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบเปลี่ยนแปลงไป โดยกรดปาล์มมิติกจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ PMF ในไขมันผสมมีอัตราส่วนเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามกรดสเตียริกจะมีปริมาณลดลง สำหรับกรดโอเลอิกมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก แต่มีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อปริมาณของ PMF ในไขมันผสมมีอัตราส่วนเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นว่า ไขมันผสมทุกอัตราส่วนมีกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบหลักเหมือนกันและเหมือนกับของ CB คือ กรดปาล์มมิติก กรดสเตียริก และกรดโอเลอิก

4.2.2 ค่าสปอนนิฟิเคชัน (Saponification value; Spv) คือ จำนวนมิลลิกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ต้องการในการทำให้ไขมัน 1 กรัม เกิดสบู่ภายใต้สภาวะควบคุม หรือเป็นค่าที่แสดงถึงน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของกรดไขมันทั้งหมดที่มีในน้ำมันนั่นเอง กล่าวคือ หากกรดไขมันมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะมีค่า Spv สูง



ภาพที่ 9 แผนภูมิแสดงค่าสปอนนิฟิเคชัน (mg KOH/g oil) ของไขมันผสมและเนยโกโก้

หมายเหตุ ตัวอักษร a, b, c หมายถึง ตัวอักษรเดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

CB หมายถึง เนยโกโก้ MAF หมายถึง น้ำมันเมล็ดมะม่วง

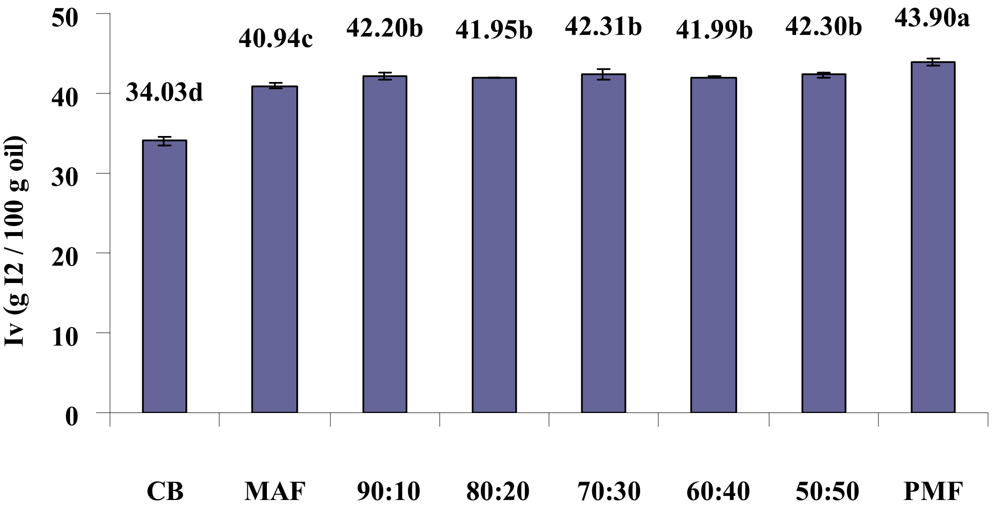
PMF หมายถึง น้ำมันปาล์มมิดแฟรคชั่น

ผลการวิเคราะห์จากภาพที่ 9 แสดงให้เห็นว่า ค่า Spv ของ MAF มีค่าประมาณ 185.37 ± 2.79 mg KOH/g oil ซึ่ง Solis-Fuentes และ Duran-de-Bazua (2004) รายงานค่า Spv ของน้ำมันจากเมล็ดมะม่วงพันธุ์มะนิลาไว้เท่ากับ 189.0 mg KOH/g oil ในขณะที่ค่า Spv ของ PMF มีค่าประมาณ 196.66 ± 0.81 mg KOH/g oil ดังนั้นเมื่อผสมน้ำมัน 2 ชนิดเข้าด้วยกันแล้วจะเห็นว่า ค่า Spv ของไขมันผสมมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีปริมาณของ PMF เพิ่มขึ้น จากการวิเคราะห์กรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของไขมันผสมอัตราส่วนต่าง ๆ และ CB พบว่า PMF มีกรดปาล์มมิติกซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่ากรดสเตียริกและกรดโอเลอิกในปริมาณที่สูงกว่าไขมันผสมอัตราส่วนอื่น ๆ และ CB จึงมีค่า Spv สูงที่สุด จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ค่า Spv ของ MAF และไขมันผสมอัตราส่วน 90:10 และ 80:20 (w/w) ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เช่นเดียวกันกับค่า Spv ของไขมันผสมอัตราส่วน 70:30, 60:40, 50:50 (w/w) และ CB ที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ค่า Spv ของ PMF มีความแตกต่างจากไขมันผสมอัตราส่วนอื่น ๆ และ CB อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เนื่องจากมีปริมาณของกรดปาล์มมิติกสูงกว่าไขมันผสมอัตราส่วนอื่น ๆ และ CB มากนั่นเอง

4.2.3 ค่าไอโอดีน (Iodine value; Iv) หรือกรัมของไอโอดีนที่ถูกดูดซับ ณ ตำแหน่งพันธะคู่ของกรดไขมันไม่อิ่มตัวต่อ 100 กรัมของน้ำมัน เป็นดัชนีบ่งบอกความไม่อิ่มตัวของน้ำมันโดยค่าไอโอดีนสูงหมายถึงไขมันหรือน้ำมันมีความไม่อิ่มตัวสูง จากผลการวิเคราะห์ที่แสดงดังภาพที่ 10 จะเห็นว่า ค่าไอโอดีนของไขมันผสมอัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50 (w/w) ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แต่มีความแตกต่างจากค่าไอโอดีนของ MAF, PMF และ CB ซึ่ง CB มีค่าไอโอดีนเท่ากับ 34.03 g I_2/น้ำมัน 100 g และมีค่าต่ำที่สุด กล่าวคือ CB มีระดับของความไม่อิ่มตัวต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับระดับความไม่อิ่มตัวของ MAF, PMF และไขมันผสมอัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50 (w/w) เนื่องจาก CB มีอัตราส่วนของกรดไขมันอิ่มตัวต่อกรดไขมันไม่อิ่มตัวเท่ากับ 1.76 ในขณะที่ MAF, ไขมันผสมอัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50 (w/w) และ PMF มีอัตราส่วนของกรดไขมันอิ่มตัวต่อกรดไขมันไม่อิ่มตัวเท่ากับ 1.20, 1.25, 1.27, 1.28, 1.27, 1.27 และ 1.35 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าของ CB แสดงว่ามีสัดส่วนของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวสูงกว่าจึงมีค่า Iv สูงกว่าของ CB

ความไม่อิ่มตัวของไขมันมีความสัมพันธ์โดยตรงกับจำนวนพันธะคู่ที่มีอยู่ในโมเลกุลของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของไตรกลีเซอไรด์ หากระดับความไม่อิ่มตัวสูงแสดงว่าไขมันมีจำนวนพันธะคู่สูง ดังจะเห็นได้จากปริมาณของกรดไขมันไม่อิ่มตัวใน MAF, PMF และ CB โดยไขมันทั้ง 3 ชนิด มีปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวเรียงจากมากไปน้อยตามลำดับซึ่งสอดคล้องกับการที่ CB มีปริมาณของกรดโอเลอิกต่ำที่สุด โดยไขมันที่มีระดับความไม่อิ่มตัวสูงนั้นจะไม่เหมาะ

กับการนำไปผลิตเป็น CBE เพราะจะทำให้ได้ CBE ที่หลอมละลายได้ง่ายเกินไป นอกจากนี้ค่าไอโอดีนยังแสดงถึงความเป็นไปได้ที่จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอีกด้วย กล่าวคือ การมีค่าไอโอดีนในระดับสูงจะทำให้ไขมันหรือน้ำมันมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้สูง ทำให้อาจเกิดกลิ่นหืนขึ้นในผลิตภัณฑ์ที่มีไขมันหรือน้ำมันเป็นองค์ประกอบ แต่อย่างไรก็ตามการที่ไขมันหรือน้ำมันมีความไม่อิ่มตัวสูงจะมีคุณค่าทางโภชนาการสูง เนื่องจากกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเป็นกรดไขมันที่มีความจำเป็นต่อร่างกาย (นิธิยา รัตนาปนนท์, 2548) โดยการรับประทานกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว เช่น กรดโอเลอิกในปริมาณที่พอเหมาะจะช่วยให้ระดับไขมันและคอเลสเตอรอลในเลือดลดลงได้ (วินัย ดะห์ลัน, 2542)



ภาพที่ 10 แผนภูมิแสดงค่าไอโอดีน (g I_2/น้ำมัน 100 g) ของไขมันผสมและเนยโกโก้

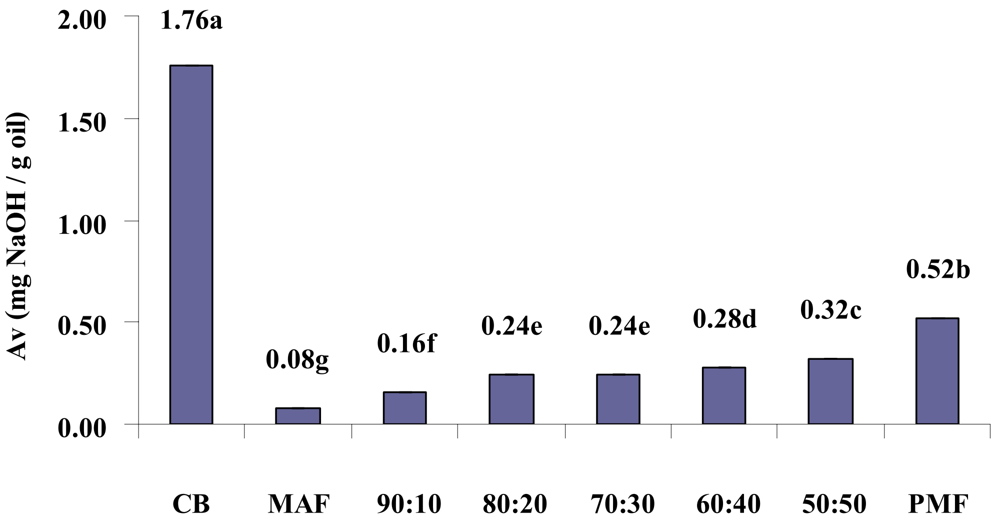
หมายเหตุ ตัวอักษร a, b, c และ d หมายถึง ตัวอักษรเดียวกันไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

CB หมายถึง เนยโกโก้ MAF หมายถึง น้ำมันเมล็ดมะม่วง

PMF หมายถึง น้ำมันปาล์มมิดแฟรคชั่น

4.2.4 ค่าความเป็นกรดหรือค่า Av เป็นค่าที่แสดงถึงจำนวนมิลลิกรัมของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ใช้ในการทำให้กรดไขมันอิสระ 1 กรัมเป็นกลาง เมื่อไขมันเกิดการไฮโดรไลซ์จะทำให้ปริมาณกรดไขมันอิสระเกิดขึ้น ซึ่งกรดไขมันอิสระสามารถเกิดปฏิกิริยาก่อให้เกิดกลิ่นหืนได้ง่าย

ดังนั้นจึงนิยมใช้ค่า Av เป็นตัวชี้สภาวะหรือระดับการเหม็นหืนของไขมันหรือน้ำมัน กล่าวคือ หาก ค่า Av สูงแสดงว่า มีการเกิดกลิ่นหืนเนื่องจากปฏิกิริยา Hydrolytic rancidity มาก



ภาพที่ 11 แผนภูมิแสดงค่าความเป็นกรด (mg NaOH / g oil) ของไขมันผสมและเนยโกโก้

หมายเหตุ ตัวอักษร a ถึง g หมายถึง ตัวอักษรเดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

CB หมายถึง เนยโกโก้ MAF หมายถึง น้ำมันเมล็ดมะม่วง

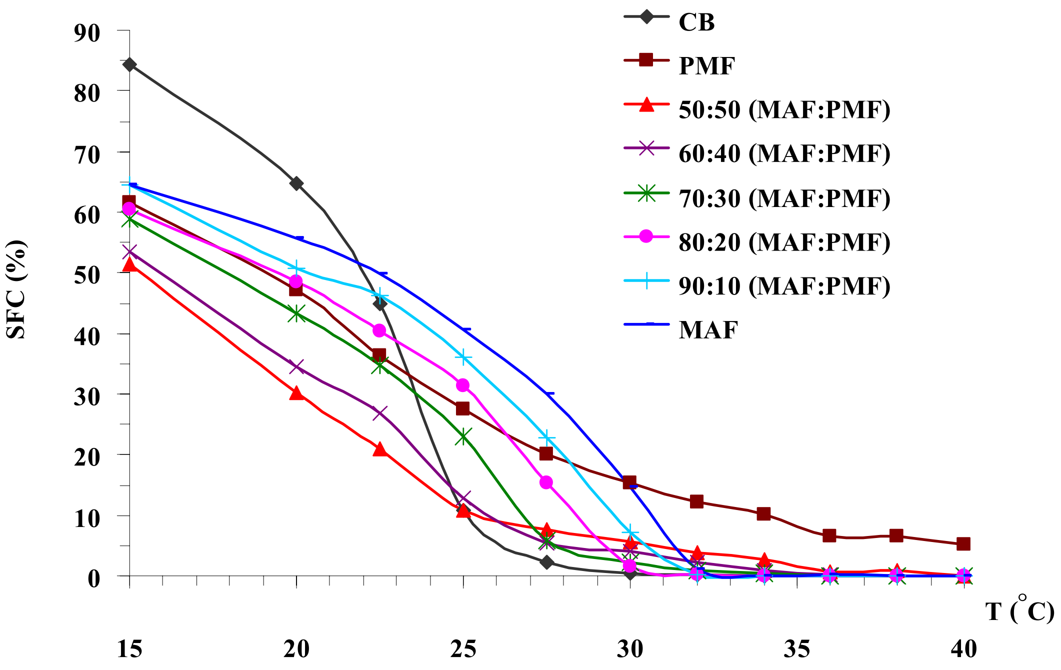
PMF หมายถึง น้ำมันปาล์มมิดแฟรคชั่น

จากภาพที่ 11 ค่า Av ของ MAF มีค่าเท่ากับ 0.08 mg NaOH/ g oil และค่า Av ของ PMF มีค่าเท่ากับ 0.52 mg NaOH/ g oil ซึ่งทำให้ค่า Av ของไขมันผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของ PMF ในไขมันผสมเพิ่มมากขึ้น จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ค่า Av ของไขมันผสมทุกอัตราส่วนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ยกเว้นอัตราส่วน 80:20 และ 70:30 (w/w) ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) จะเห็นว่า CB มีค่า Av สูงที่สุดคือ 1.76 mg NaOH/ g oil (0.88% ของกรดไขมันอิสระในรูปของกรดโอเลอิก) แสดงว่า มีปริมาณของกรดไขมันอิสระสูงที่สุด นั่นคือ เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสซึ่งก่อให้เกิดกลิ่นหืนมากที่สุด โดยน้ำมันที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระในรูปของกรดโอเลอิกเท่ากับ 0.5-1.5% (คิดเป็นค่า Av เท่ากับ 1.00-2.99 mg NaOH/ g oil) จะเริ่มได้การหืน (นิธินา รัตนาปนนท์, 2548) ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของน้ำมัน แต่ข้อกำหนดด้านคุณภาพของเนยโกโก้ระบุว่า อนุญาตให้เนยโกโก้มีค่า Av สูงสุดได้

เท่ากับ 3.48 mg NaOH/ g oil (1.75% ของกรดไขมันอิสระในรูปของกรดโอเลอิก) (Beckett, 2000; Timms และ Stewart, 1999 อ้างถึงใน Stewart และ Timms, 2002) ดังนั้นเนยโกโก้จึงไม่เกิดกลิ่นหืนขึ้นเช่นเดียวกับตัวอย่างอื่น ๆ

4.2.5 ค่าความเป็นของแข็งในรูปผลึกของไขมัน (Solid fat content; SFC) เป็นการศึกษาระดับของการเป็นของแข็งในรูปผลึกที่อุณหภูมิต่าง ๆ และพฤติกรรมการหลอมเหลวของไขมันผสมเปรียบเทียบกับ CB ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในช่วง 15-40°C โดยพบว่า ไขมันผสมและ CB เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า SFC ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 15-40°C ดังแสดงในภาพที่ 12 ซึ่งจะเห็นว่า CB มีค่า SFC ลดลงอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิในช่วง 20-30°C และเป็นศูนย์ที่อุณหภูมิประมาณ 34°C ทำให้ไม่รู้สึกเป็นไข (waxiness) เมื่อรับประทาน เนื่องจากผลึกของไขมันเกิดการหลอมละลายอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิของร่างกาย (~37°C) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ MAF พบว่า ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 15-22°C MAF มีค่า SFC ต่ำกว่า CB นั่นคือ MAF มีความแข็งน้อยกว่า CB ในขณะที่อุณหภูมิตั้งแต่ 22°C ขึ้นไป MAF มีค่า SFC สูงกว่า CB นั่นคือ MAF มีความแข็งมากกว่า CB ที่ช่วงอุณหภูมิดังกล่าว ซึ่ง Solis-Fuentes และ Duran-de-Bazua (2004) กล่าวว่า พฤติกรรมนี้อาจเกิดเนื่องจากความแตกต่างของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบ โดย MAF มีกรดโอเลอิกซึ่งเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัวในปริมาณสูงส่งผลให้เกิด dilution effect กับกรดไขมันอิ่มตัวในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ โดยไปลดปริมาณพลังงานที่ต้องการในการทำให้ไขมันเกิดการหลอมเหลว หรือทำให้ความเข้มข้นของกรดไขมันอิ่มตัวในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ซึ่งตกผลึกได้ง่ายกว่าลดลงซึ่งในแง่ของพลังงานความร้อนในการตกผลึกอาจกล่าวได้ว่า ไตรกลีเซอไรด์ต้องคายพลังงานสูงขึ้นในการตกผลึก เพราะกรดโอเลอิกต้องคายพลังงานความร้อนออกมาในปริมาณที่สูงกว่ากรดไขมันอิ่มตัวเพื่อให้เกิดการตกผลึกนั่นเอง ดังนั้น MAF จึงตกผลึกได้ยากกว่าเนยโกโก้ที่ช่วงอุณหภูมิดังกล่าวทำให้ได้ไขมันที่มีลักษณะอ่อนกว่า ในทางตรงกันข้ามการที่ MAF มีกรดไขมันอิ่มตัวที่มีสายยาว เช่น กรดบีฮีนิกและกรดลิกโนเซริกซึ่งเป็นกรดไขมันที่มีจุดหลอมเหลวค่อนข้างสูงหรือต้องการพลังงานที่สูงกว่าในการทำให้เกิดการหลอมเหลวอย่างสมบูรณ์ (Solis-Fuentes และ Duran-de-Bazua, 2004) ไตรกลีเซอไรด์จึงยังคงอยู่ในรูปของของแข็งที่อุณหภูมิสูงกว่า 22°C MAF จึงมีค่า SFC สูงกว่า CB หรือมีลักษณะที่แข็งกว่านั่นเอง อย่างไรก็ตาม MAF จะเกิดการหลอมเหลวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิประมาณ 34°C เช่นเดียวกับ CB ในขณะที่ PMF มีค่า SFC ที่ต่ำกว่าทั้ง CB และ MAF ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 23°C แต่ยังคงมีค่า SFC คงเหลือเท่ากับ 10% ที่ 34°C และยังไม่เกิดการหลอมเหลวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 37°C ซึ่งจะทำให้เกิดความรู้สึกเป็นไขเมื่อรับประทาน นอกจากนี้ไขมันผสมทุกอัตราส่วนมีพฤติกรรมการหลอมเหลวที่แตกต่างกันขึ้นกับองค์ประกอบของกรดไขมันที่เกิดจากการผสมน้ำมัน 2 ชนิด ที่มีพฤติกรรมการหลอมเหลวแตกต่างกันเข้าด้วยกัน โดยที่ค่า SFC ของไขมันผสมทุก

อัตราส่วนมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น และไขมันผสมเกือบทุกอัตราส่วนยกเว้นอัตราส่วน 50:50 (w/w) มีค่า SFC เป็น 0 หรือเข้าใกล้ 0 ที่ 37°C จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ที่อุณหภูมิ 32-40°C ไขมันผสมในอัตราส่วน 80:20 และ 90:10 (w/w) มีพฤติกรรมการหลอมเหลวไม่แตกต่างกับ CB อย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) นั่นคือ ค่า SFC ใกล้เคียงกันและลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวและมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ที่อุณหภูมิประมาณ 34°C เช่นเดียวกัน ทำให้คาดว่า ไขมันผสมอัตราส่วน 80:20 และ 90:10 (w/w) จะเกิดการละลายอย่างรวดเร็วในปากและไม่ให้ความรู้สึกเป็นไขเมื่อรับประทาน

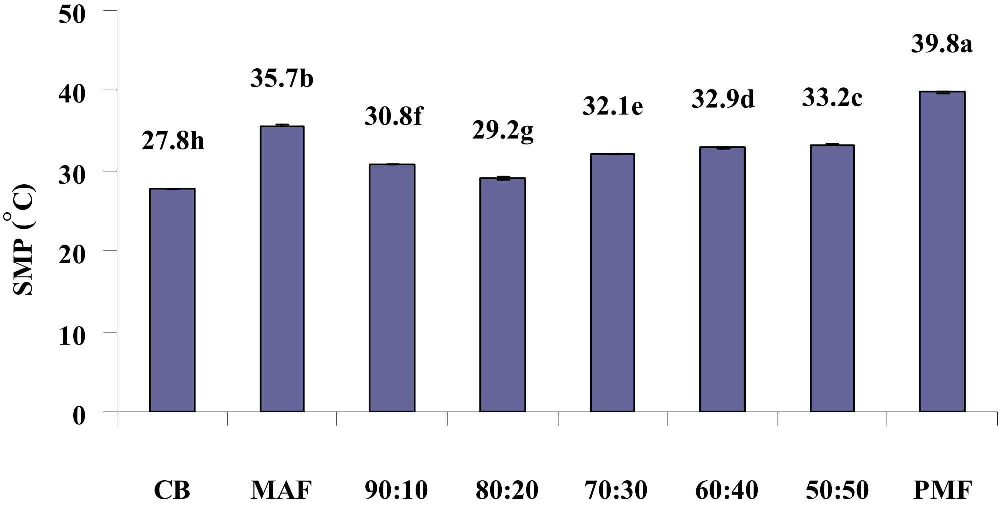


ภาพที่ 12 ค่า Solid Fat Content (%) ของไขมันผสมอัตราส่วนต่าง ๆ และเนยโกโก้ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 15 - 40°C

หมายเหตุ CB หมายถึง เนยโกโก้ MAF หมายถึง น้ำมันเมล็ดมะม่วง
PMF หมายถึง น้ำมันปาล์มมิดแฟรคชั่น

4.2.6 จุดหลอมเหลว (Slip melting point; SMP) เป็นอีกคุณสมบัติหนึ่งที่มีความสำคัญในการคัดเลือกเนยโกโก้เลียนแบบชนิด CBE โดย CBE ที่ดีต้องมีช่วงของการหลอมเหลวที่คล้ายกับของ CB โดย SMP เป็นจุดที่แท่งไขมันในหลอดแคปิลลารีเกิดการเคลื่อนที่ขึ้นหลังจากการให้ความร้อน เนื่องจากแรงดันที่ทำให้เกิดการลอยตัว (buoyancy) ซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับแรงโน้มถ่วงของ

โลก เมื่อแรงดังกล่าวมีค่าเท่ากับน้ำหนักของน้ำที่ถูกแทนที่ด้วยไขมันปริมาตรเท่ากัน (Wikipedia enclycopedia, 2009)



ภาพที่ 13 แผนภูมิแสดงจุดหลอมเหลว (Slip melting point; °C) ของไขมันผสมอัตราส่วนต่าง ๆ และเนยโกโก้

หมายเหตุ ตัวอักษร a ถึง h หมายถึง ตัวอักษรเดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

CB หมายถึง เนยโกโก้ MAF หมายถึง น้ำมันเมล็ดมะม่วง

PMF หมายถึง น้ำมันปาล์มมิดแฟรคชั่น

จากผลการวิเคราะห์ซึ่งแสดงดังภาพที่ 13 จะเห็นว่า ค่า SMP ของ CB มีค่าเท่ากับ 27.8°C ค่า SMP ของ MAF มีค่าเท่ากับ 35.7 ± 0.1°C และค่า SMP ของ PMF มีค่าเท่ากับ 39.8 ± 0.1°C ดังนั้นค่า SMP ของไขมันผสมน่าจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนของ PMF เพิ่มสูงขึ้น แต่จากภาพจะเห็นว่า เกิดการลดลงของค่า SMP ที่ไขมันผสมอัตราส่วน 90:10 และ 80:20 (w/w) ก่อนจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามปริมาณของ PMF ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากการเกิด eutectic effect ของการผสมน้ำมัน 2 ชนิด ที่มีรูปแบบของโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน กล่าวคือ MAF จะมีโครงสร้างผลึกที่เสถียรที่สุดเป็นแบบ β (Solis-Fuentes และคณะ, 2005) ในขณะที่ PMF ซึ่งได้จากน้ำมันปาล์มมีโครงสร้างผลึกที่เสถียรที่สุดเป็นแบบ β' (Samsudin และ Rahim, 1996; Ali และคณะ, 2001) ซึ่ง Koyano และ Sato (2002) กล่าวไว้ว่า การมีโครงสร้างผลึกหลายรูปแบบส่งผลให้เกิดเฟสที่เข้ากันได้

และเฟสที่ไม่สามารถเข้ากันได้ของไขมัน โดยผลึกในรูปแบบ α สามารถเข้ากันได้กับรูปแบบ β' แต่มีแนวโน้มที่จะเกิดการแยกเฟส (phase separation) เมื่อมีผลึกในรูปแบบ β เกิดขึ้นในไขมันผสม หรือการเติมไขมันที่มีชนิดของไตรกลีเซอไรด์ที่มีการจัดเรียงตัว (chain length structure) แตกต่างกันเข้าด้วยกันนั้นส่งผลให้เกิดการลดลงของปริมาณไขมันที่เป็นของแข็งในรูปผลึกหรือค่า SFC เนื่องจากมีการแยกเฟสของไขมันเกิดขึ้น (Koyano และ Sato, 2002) จากการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า ค่า SMP ของไขมันผสมทุกอัตราส่วนมีความแตกต่างจากค่า SMP ของ CB อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตาม ค่า SMP ของไขมันผสมอัตราส่วน 80:20 (w/w) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 29.2°C มีความใกล้เคียงกับค่า SMP ของ CB มากที่สุด ทำให้ไขมันผสมอัตราส่วน 80:20 (w/w) มีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้เป็นเนยโกโก้เลียนแบบที่มีพฤติกรรมการหลอมเหลวใกล้เคียงกับ CB มากที่สุด

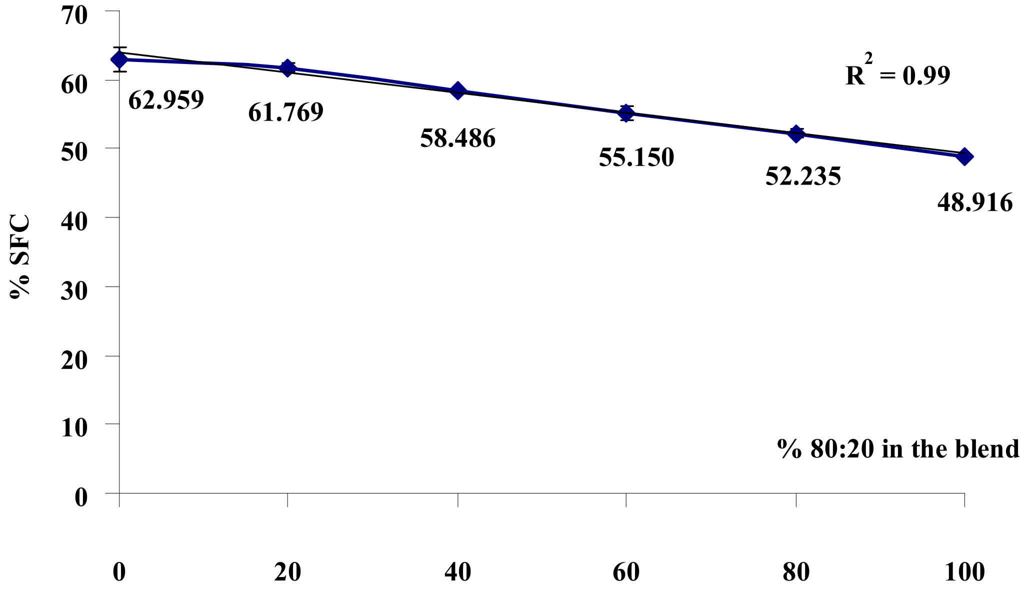
4.3 การคัดเลือกไขมันผสมในอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำไปใช้เป็น CBE

ทำการคัดเลือกไขมันผสมโดยดูจากไขมันผสมในอัตราส่วนที่มีองค์ประกอบกรดไขมัน ค่า SFC ซึ่งแสดงพฤติกรรมการหลอมเหลว และค่า SMP ที่ใกล้เคียงกับของ CB มากที่สุด ซึ่งพบว่า ไขมันผสมอัตราส่วน 80:20 (w/w) มีคุณสมบัติทั้ง 3 ใกล้เคียงกับของ CB มากที่สุด โดยมีกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบหลักคือ กรดปาล์มมิติก กรดโอเลอิก และกรดสเตียริก มีค่า SFC ไม่แตกต่างจาก CB อย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ที่อุณหภูมิในช่วง 32-40°C ซึ่งเป็นช่วงที่มีความสำคัญกล่าวคือ ไขมันในช็อกโกแลตจะเกิดการละลายอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิของร่างกายประมาณ 37°C ซึ่งจะไม่ก่อให้เกิดความรู้สึกเป็นไขเมื่อรับประทานดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น และมีค่า SMP ใกล้เคียงกับ CB มากที่สุดคือ มีค่า SMP เท่ากับ 29.2°C ดังนั้นจึงคาดว่า ไขมันผสมอัตราส่วนดังกล่าวจะสามารถนำไปใช้เป็น CBE ได้โดยไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของ CB และไม่ทำให้กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลตมีความแตกต่างจากกระบวนการที่ใช้ CB เพียงอย่างเดียว

4.4 การวิเคราะห์ความเข้ากันได้ (Compatibility) ของไขมันผสมอัตราส่วนที่เลือกกับเนยโกโก้

เมื่อนำ CBE ซึ่งเป็นไขมันผสมในอัตราส่วนที่เลือกไว้ในหัวข้อ 4.3 คือ 80:20 (w/w) มาผสมกับ CB ที่อัตราส่วนต่าง ๆ แล้ววัดค่า SFC ที่อุณหภูมิ 20°C ซึ่งได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า SFC กับปริมาณ (%) ของ CBE ในส่วนผสมของไขมันทั้งหมดดังแสดงในภาพที่ 14 โดยค่า SFC ของ CB นั้นมีค่าเท่ากับ 62.96% สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sabariah และคณะ (1998) ที่รายงานว่าค่า SFC ของ CB ที่ 20°C มีค่าเท่ากับ 63% ซึ่งสูงกว่าของ CBE ที่ 20°C ที่เท่ากับ 48.92% และค่า

SFC ของไขมันผสมระหว่าง CB และ CBE จะลดลงอย่างเป็นสัดส่วนเมื่ออัตราส่วนของ CBE มีปริมาณเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 14 ค่า Solid Fat Content (%) ของไขมันผสมอัตราส่วน 80:20 (w/w) และเนยโกโก้ ที่อุณหภูมิ 20°C

หมายเหตุ ค่าที่แสดงในตารางได้จากค่าเฉลี่ยของ triplicate ± Standard deviation (S.D.)

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า CBE ที่เป็นไขมันผสมอัตราส่วน 80:20 (w/w) สามารถผสมเข้ากันได้กับ CB โดยไม่ก่อให้เกิด eutectic effect (softening effect) หรือการลดลงของปริมาณของไขมันแข็งจากการผสมไขมันที่มีชนิดของไตรกลีเซอไรด์แตกต่างกันเข้าด้วยกัน เนื่องจากมีค่า SFC เปลี่ยนแปลงไปตามอัตราส่วนของ 80:20 (w/w) ที่เติมเข้าไปใน CB หรือมีการเปลี่ยนแปลงเชิงเส้นโดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.99 ซึ่งเป็นการยืนยันข้อสันนิษฐานที่ว่า ไขมันผสมอัตราส่วน 80:20 (w/w) ที่เลือกมาเป็น CBE จะสามารถนำไปใช้งานได้โดยไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพและกระบวนการผลิตซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของเนยโกโก้เลียนแบบชนิด CBE

4.5 การศึกษาพฤติกรรมการตกผลึกของเนยโกโก้เลียนแบบที่ผลิตได้ (CBE) และของ CBE ที่ผสมกับเนยโกโก้เปรียบเทียบกับพฤติกรรมการตกผลึกของเนยโกโก้

4.5.1 การศึกษาระยะเวลาที่ใช้ก่อนการเริ่มตกผลึก รูปร่างผลึก จำนวนและขนาดของผลึก และการเปลี่ยนแปลงของรูปร่าง จำนวน และขนาดของผลึกตามเวลาโดยใช้เครื่อง PLM ที่อุณหภูมิ 20°C โดยมีอัตราการลดลงของอุณหภูมิเท่ากับ 2°C/min กำลังขยายของภาพเท่ากับ 500 เท่า ได้ผลการทดลองซึ่งเป็นภาพถ่ายผลึกที่ระยะเวลาต่าง ๆ ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ญ และได้เลือกภาพถ่ายที่เฉพาะบางช่วงเวลาของการตกผลึกของแต่ละตัวอย่างมาแสดงไว้ในภาพที่ 15-19

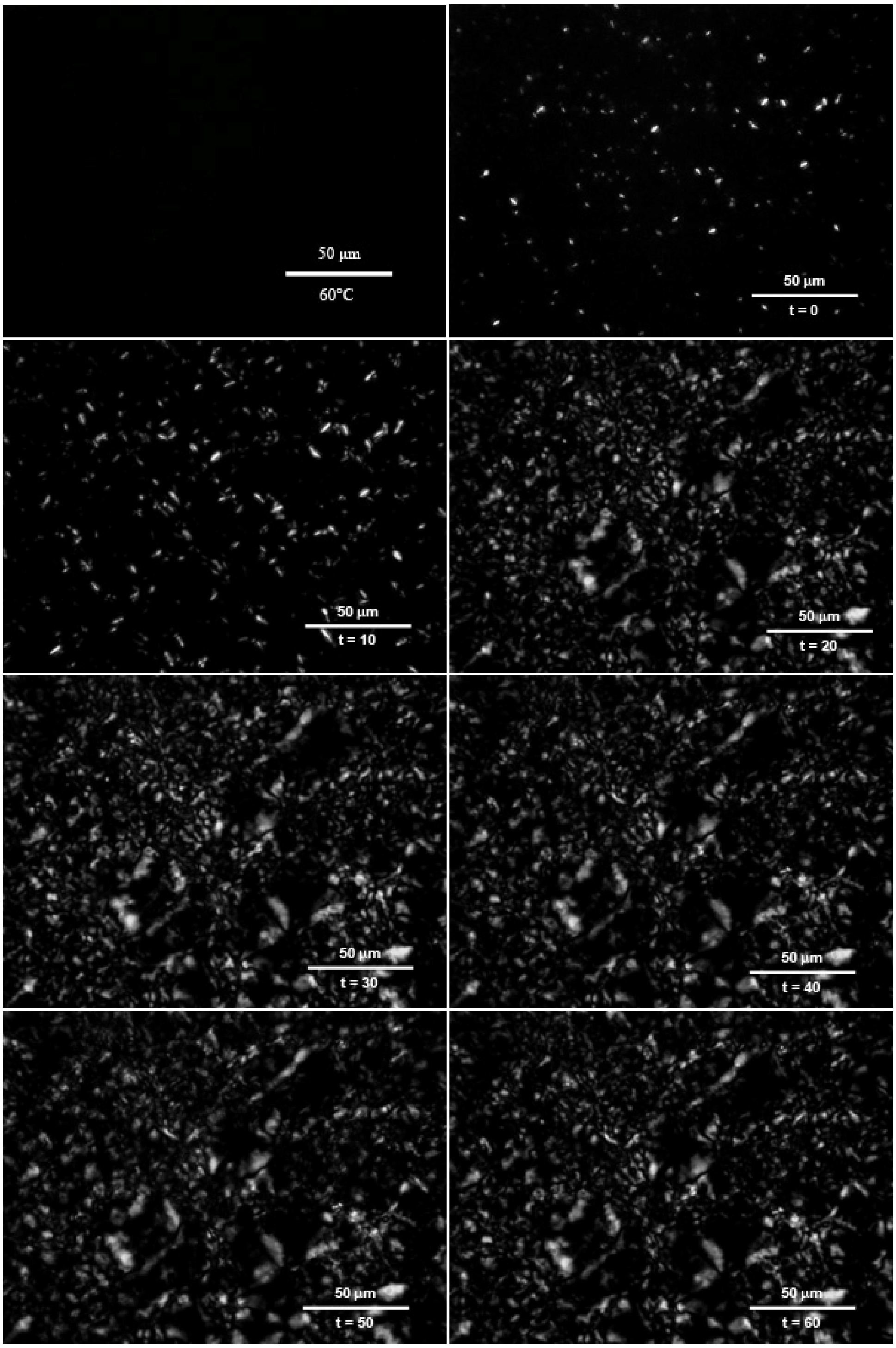
จากการถ่ายภาพการตกผลึกของ MAF ซึ่งแสดงไว้ในภาพที่ 15 จะพบว่า MAF จะเริ่มตกผลึกก่อนที่อุณหภูมิจะลดลงมาถึง 20°C และเมื่ออุณหภูมิลดลงเป็น 20°C ที่นาทีที่ 0 พบว่า มีผลึกเป็นจำนวนมากในตัวอย่าง โดยผลึกมีขนาดเล็กและมีรูปร่างคล้ายเข็ม (needle-like) ซึ่งหลังจากนั้นมีการโตของขนาดของผลึกและมีการเพิ่มขึ้นของจำนวนผลึกอย่างต่อเนื่องซึ่ง Ghotra และคณะ (2002) กล่าวไว้ว่า ผลึกรูปเข็มมักจะเป็นผลึกที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลให้มีโครงสร้างแบบ β' ผลึกจะเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในนาทีที่ 16 และเห็นเป็นผลึกขนาดใหญ่ชัดเจนในนาทีที่ 18 ซึ่งคาดว่า บางส่วนของไขมันเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของผลึกจาก β' ไปเป็น β จากนั้นผลึกจะมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีจำนวนเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจนถึงนาทีที่ 60 ส่วนไขมันชนิด PMF นั้นเริ่มตกผลึกก่อนที่อุณหภูมิจะลดลงมาถึง 20°C เช่นกันคือ เริ่มตกผลึกตั้งแต่อุณหภูมิประมาณ 24°C ดังภาพที่ 16 โดยมีผลึกที่ชัดเจนจำนวน 9 ผลึก มีรูปผลึกเป็นแบบทรงกลมที่มีผลึกแบบแผ่น (plate-like) มาโตเข้าด้วยกัน และเมื่ออุณหภูมิลดลงถึง 20°C (นาทีที่ 0) พบว่า ผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผลึก ขนาดของผลึกแตกต่างกันตั้งแต่น้อยกว่า 10 μm จนถึงมากกว่า 50 μm และมีการขยายขนาดขึ้นจนถึงนาทีที่ 30 หลังจากนั้นจะมีการขยายขนาดขึ้นเพียงเล็กน้อยจนถึง 60 นาที ซึ่งผลึกที่ได้มีลักษณะเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Narine และ Humphrey (2004) ที่ถ่ายภาพผลึกของน้ำมันปาล์ม

เมื่อนำ CBE ที่ได้จากการนำ MAF มาผสมกับ PMF ในอัตราส่วน 80:20 (w/w) จะเห็นว่า CBE เริ่มเกิดการตกผลึกช้าลงดังแสดงในภาพที่ 17 โดยเริ่มตกผลึกในนาทีที่ 2 ทั้งนี้อาจเนื่องจาก PMF ที่เติมลงไปมีชนิดของไตรกลีเซอไรด์ที่แตกต่างจาก MAF ส่งผลให้เกิดการขัดขวางการจัดเรียงตัวเป็นรูปผลึกของ MAF การตกผลึกจึงเกิดช้าลง โดยผลึกที่เกิดขึ้นมีลักษณะผสมกันระหว่างผลึกรูปเข็มและผลึกรูปทรงกลมซึ่งเกิดจากผลึกรูปเข็มมาประกอบกันอย่างสุ่มตามแนวรัศมีจากจุดศูนย์กลางของการโตของผลึก (Golden และคณะ, 2010) จากนั้นมีการเพิ่มขึ้นและการขยายขนาดของผลึกตามเวลา และเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผลึกในนาทีที่ 35 ก่อนจะเห็นเป็นผลึกขนาดใหญ่ชัดเจนในนาทีที่ 45 ซึ่งเป็นไปได้ว่า ผลึกที่เกิดขึ้นนั้นมีการผสมกันระหว่าง

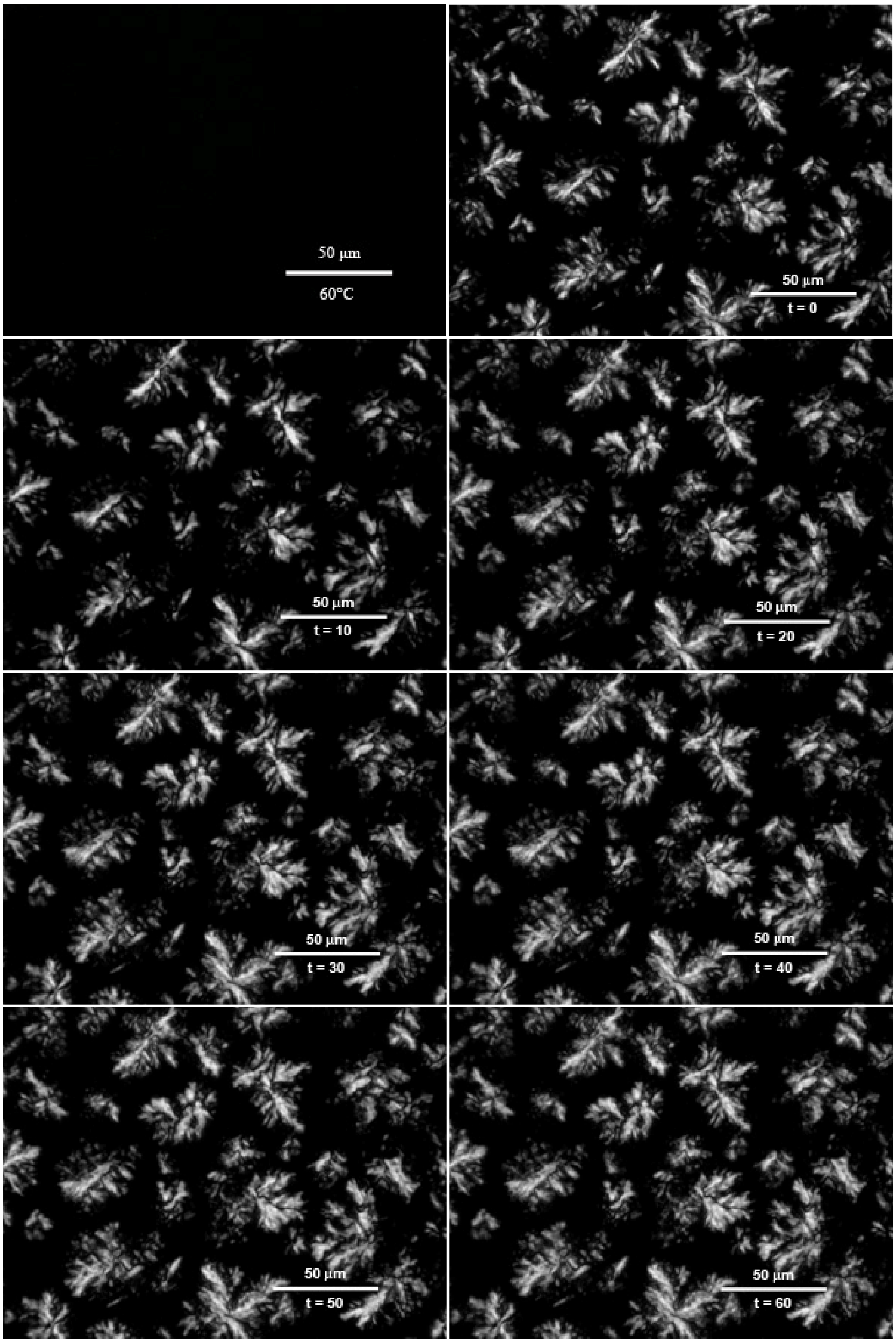
ผลึกขนาดเล็กของ β' และผลึกขนาดใหญ่ของ β การที่ผลึกเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างช้าลงเมื่อเทียบกับการตกผลึกของ MAF ในภาพที่ 15 มีความสอดคล้องกับที่ Persmark และคณะ (1976) กล่าวไว้ว่า การเติมน้ำมันปาล์มลงในไขมันผสมมีผลต่อความคงตัวของผลึกโดยจะชะลอหรือป้องกันการเปลี่ยนโครงสร้างจาก β' ไปเป็น β (Ghotra และคณะ, 2002)

จากการถ่ายภาพการตกผลึกของ CB ดังแสดงในภาพที่ 18 พบว่า เริ่มตกผลึกตั้งแต่นาทีที่ 0 โดยมีผลึกเริ่มต้น 5 ผลึก เป็นผลึกที่มีลักษณะยาวและแคบคล้ายหูกระต่าย (bow-tie) หรือเส้นใย (filamentous-shaped) (Manning และ Dimick, 1985 อ้างถึงใน Sonwai และ Mackley, 2006) ซึ่งผลึกจะเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมากอย่างรวดเร็วตั้งแต่นาทีที่ 2 และเกิดการซ้อนทับกันของผลึกซึ่งมีขนาดเล็กเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Sonwai และ Mackley (2006) จนกระทั่งนาทีที่ 45 มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผลึกเป็นผลึกขนาดใหญ่ขึ้นเล็กน้อยและมีการขยายขนาดขึ้นอย่างช้า ๆ จนถึงนาทีที่ 60 จะเห็นว่า ผลึกของ CB มีการกระจายของขนาดค่อนข้างมากซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Marty และ Marangoni (2009) ที่ทำการถ่ายภาพผลึกของ CB ที่ 20°C พบว่า การตกผลึกของ CB ในสภาวะคงที่ จะให้ผลึกที่มีลักษณะไม่สม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน และมีเส้นผ่านศูนย์กลางของผลึกในช่วงกว้างตั้งแต่ 2-3 μm จนถึง 100 μm นอกจากนี้ Marangoni และ McGauley (2003) ยังกล่าวว่า ที่ 20°C ผลึกของ CB จะเกิดการจับกันเป็นกลุ่ม (aggregation) ซึ่งเป็นผลให้ผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้น (Smith, 2005) โดยการจับกลุ่มกันของไขมันนั้นบางส่วนเกิดจากคุณสมบัติทางกายภาพของไตรกลีเซอไรด์ และบางส่วนเกิดจากเฟสที่ต่างกันของไตรกลีเซอไรด์ในไขมันซึ่งปัจจัยหลักที่มีผลร่วมกันคือ การมีโครงสร้างของผลึกหลายรูปแบบและปฏิสัมพันธ์ระหว่างสายของโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ (Sato, 2001; Koyano และ Sato, 2002)

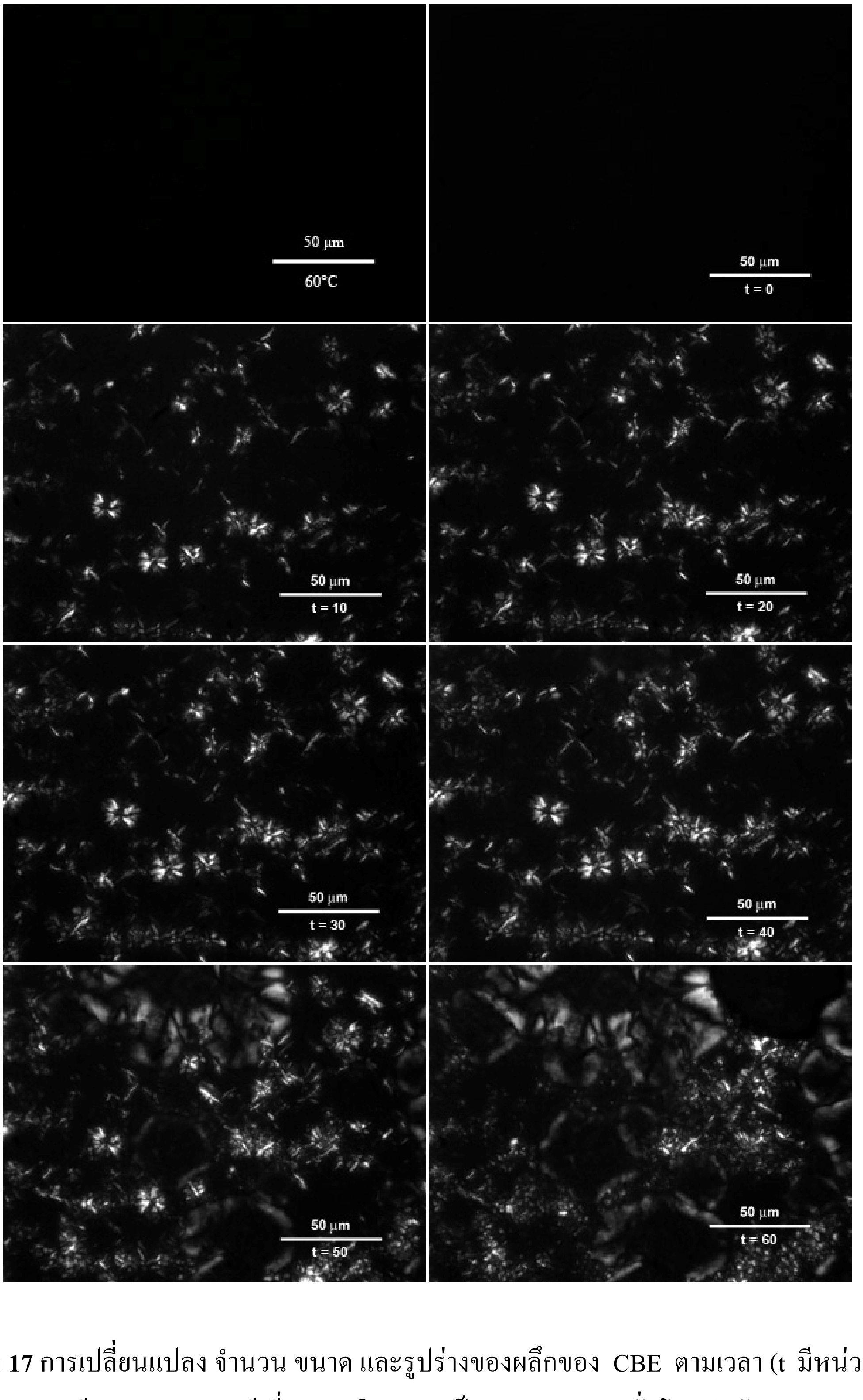
สำหรับตัวอย่าง MIX ที่ได้จากการนำ CBE มาผสมกับ CB ในอัตราส่วน 1:5.64 (w/w) นั้น พบว่า ไขมันเริ่มตกผลึกเป็นจำนวนมากในนาทีที่ 2 (ภาพที่ 19) เช่นเดียวกับ CBE โดยมีรูปร่างของผลึกเป็นแบบเข็ม จากนั้นผลึกมีจำนวนเพิ่มขึ้นและเกิดการซ้อนทับกันของผลึกจำนวนมากเช่นเดียวกับ CB ซึ่งจากการที่มีการผสมกันของไขมันถึง 3 ชนิด ทำให้การตกผลึกเป็นไปอย่างซับซ้อน จึงไม่สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ชัดเจนได้จากภาพที่ถ่ายซึ่งคาดว่า มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นในนาทีที่ 45 เช่นเดียวกับ CB และโดยรวมแล้วรูปร่างของผลึกยังคล้ายคลึงกับของ CB อีกด้วย อย่างไรก็ตามในงานวิจัยของ Perez-Martinez และคณะ (2007) พบว่า การผสม CB กับน้ำมันพืชในอัตราส่วนของ CB ต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 30% (w/v) จะทำให้มีการตกผลึกในรูปแบบที่ผสมกันระหว่าง β' และ β ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย XRD ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป



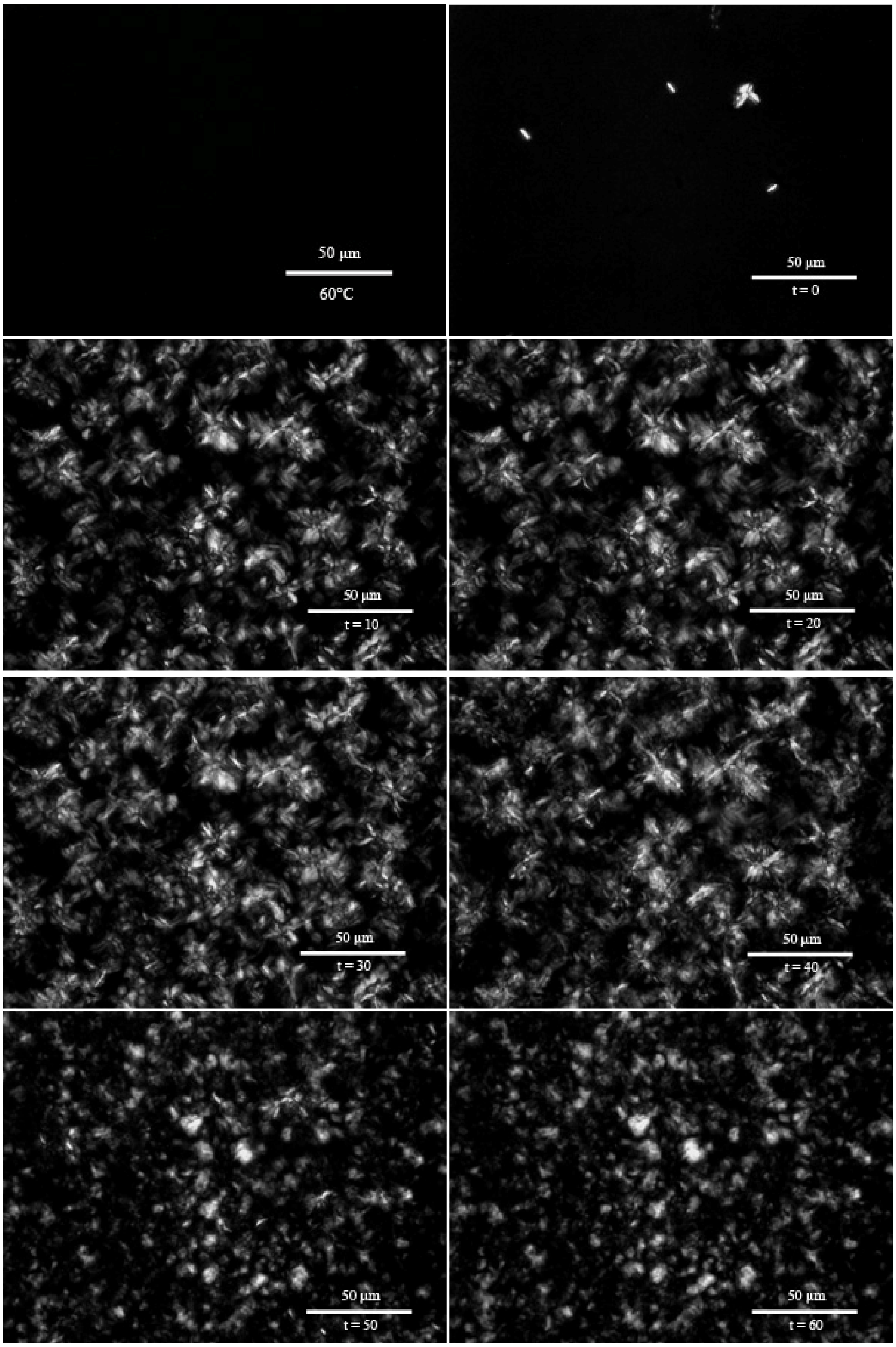
ภาพที่ 15 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของ MAF ตามเวลา (t มีหน่วยเป็นนาที) ทุก ๆ 10 นาที ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 500 เท่า



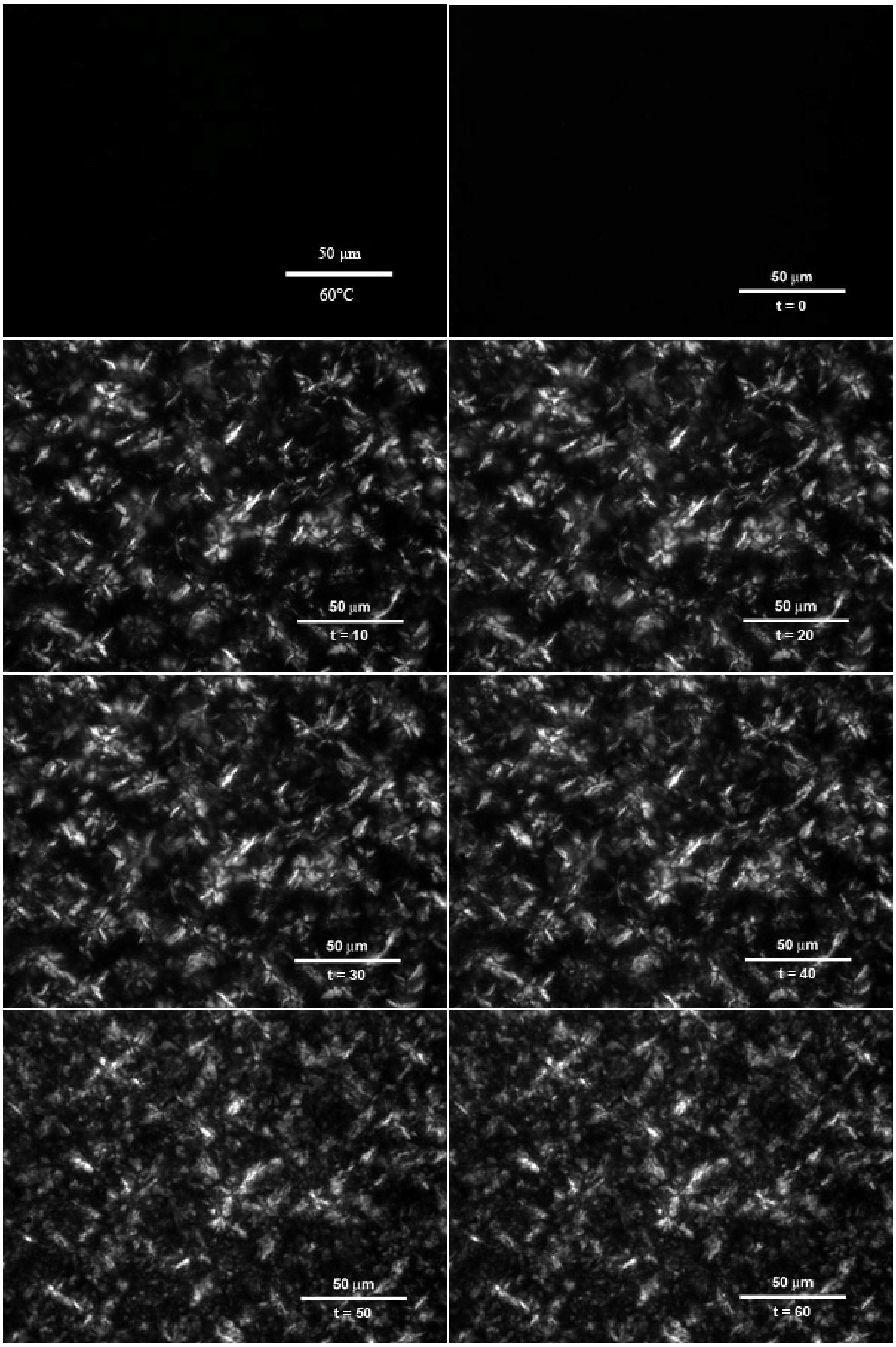
ภาพที่ 16 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของ PMF ตามเวลา (t มีหน่วยเป็นนาที) ทุก ๆ 10 นาที ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 500 เท่า



ภาพที่ 17 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของ CBE ตามเวลา (t มีหน่วยเป็นนาที) ทุก ๆ 10 นาที ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 500 เท่า



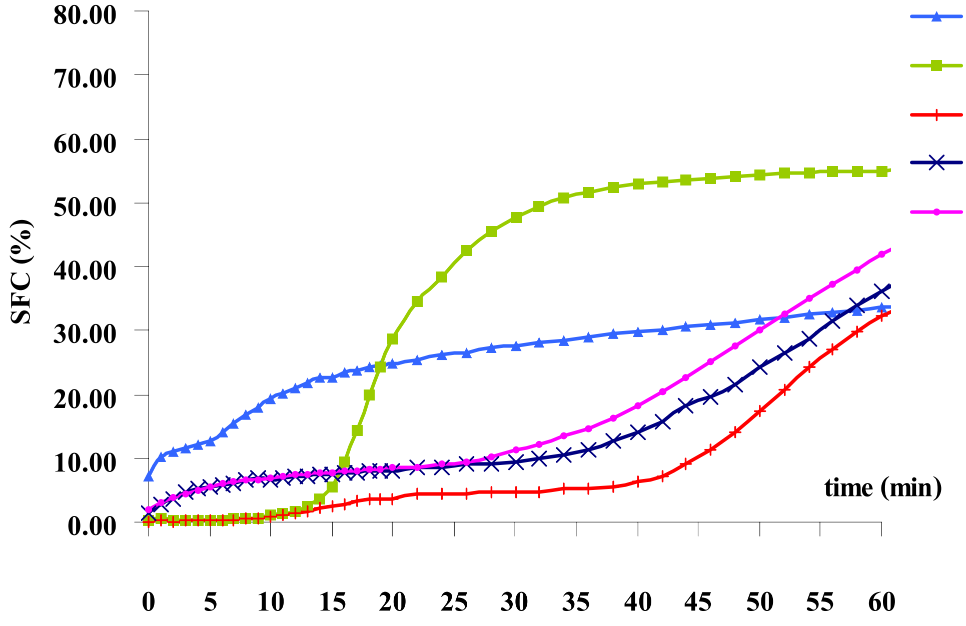
ภาพที่ 18 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของ CB ตามเวลา (t มีหน่วยเป็นนาที) ทุก ๆ 10 นาที ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 500 เท่า



ภาพที่ 19 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของ MIX หรือไขมันผสมระหว่าง CBE: CB ในอัตราส่วน 1:5.64 (w/w) ตามเวลา (t มีหน่วยเป็นนาที) ทุก ๆ 10 นาที ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 500 เท่า

จากการถ่ายภาพผลึกด้วยเทคนิค PLM ในงานวิจัยนี้ไม่สามารถนับจำนวนและวัดขนาดของผลึกที่แน่นอนได้ เนื่องจากส่วนใหญ่ผลึกมีขนาดค่อนข้างเล็ก มีจำนวนมาก และมีการซ้อนทับกันของผลึก ซึ่งถือเป็นข้อด้อยของเทคนิคนี้ ดังที่ Ghotra และคณะ (2002) ได้กล่าวไว้ว่า การใช้เทคนิค PLM จะมีความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการที่ไม่สามารถแสดงภาพผลึกทั้งหมดภายใต้กล้องได้หรือการเกิด missing mass ในภาพที่แสดง ซึ่งผู้วิจัยได้ทดลองนำตัวอย่างไขมันไปทำการวัดการกระจายตัวของขนาดของผลึกหรือ particle size distribution โดยประยุกต์ใช้เทคนิค Laser diffraction particle size analyzer ตามวิธีของ Afoakwa และคณะ (2008) แล้วพบว่า ไม่สามารถวัดขนาดของผลึกได้ เนื่องจากเกิดการจับตัวเป็นก้อนแข็งของไขมัน และไม่สามารถทำให้ผลึกแตกได้ด้วยเครื่อง Ultrasonic dispersion และเมื่อพยายามเพิ่มระดับความถี่ของการกระตุ้นด้วย ultrasonic พบว่า ทำให้เกิดความร้อนขึ้นในระบบและผลึกเกิดการละลาย

4.5.2 การศึกษากลไกการตกผลึกของไขมันตัวอย่างด้วยเครื่อง p-NMR ได้ผลการเปลี่ยนแปลงของค่า SFC ของไขมันตัวอย่างตามเวลาที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพที่ 20



ภาพที่ 20 การเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นของแข็งในรูปผลึก (SFC) ของไขมันชนิดต่าง ๆ ตามเวลาในระหว่างการตกผลึกที่อุณหภูมิคงที่ที่ 20°C

จากภาพที่ 20 จะสังเกตเห็นว่า ค่า SFC ของ MAF ในช่วงต้น (ประมาณ 10 นาทีแรก) มีค่าต่ำมากและค่อนข้างคงที่ซึ่งจากภาพถ่ายผลึกจะเห็นว่า ผลึกมีขนาดเล็กมาก จนกระทั่งเริ่มมีการเพิ่มขึ้นของค่า SFC ในนาทีที่ 10 ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกตามเวลาด้วยเครื่อง XRD ว่ามีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกเกิดขึ้นซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป จากนั้นค่า SFC เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตั้งแต่นาทีที่ 15 ซึ่งใกล้เคียงมากกับผลที่ได้จากการถ่ายภาพผลึกที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผลึกในนาทีที่ 16 ทำให้สามารถวัดค่า SFC ได้เพิ่มขึ้น ก่อนที่ค่า SFC จะเริ่มคงที่อีกครั้งในนาทีที่ 35 โดยมีค่า SFC ประมาณ 55% เนื่องจากผลึกมีการเปลี่ยนแปลงขนาดเพียงเล็กน้อยเท่านั้นซึ่งค่า SFC ของ MAF ยังคงไม่เปลี่ยนแปลงจนถึงระยะเวลา 3 ชั่วโมง (ภาคผนวก ฎ) ในขณะที่ค่า SFC ของ PMF ที่นาทีที่ 0 มีค่าสูงที่สุด (ประมาณ 7%) สอดคล้องกับการที่ PMF เกิดการตกผลึกก่อนที่อุณหภูมิจะลดลงมาถึง 20°C และมีผลึกให้เห็นชัดเจนเมื่ออุณหภูมิลดลงถึง 20°C ซึ่งค่า SFC ของ PMF มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแต่ไม่มากนัก เนื่องจากลักษณะผลึกที่ได้จากการถ่ายภาพยืนยันว่า ผลึกมีการเปลี่ยนแปลงทางด้านขนาดเท่านั้นโดยขนาดจะใหญ่ขึ้นจนถึงนาทีที่ 30 ซึ่งจากภาพที่ 20 จะเห็นว่า เป็นช่วงที่มีการเพิ่มขึ้นของค่า SFC หลังจากนั้นค่า SFC เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเนื่องจากผลึกยังคงมีการขยายขนาดขึ้นจนถึงนาทีที่ 60 เมื่อพิจารณาค่า SFC ของ CBE พบว่า มีกลไกการตกผลึกในช่วงต้นที่เหมือนกับ MAF เนื่องจากใน CBE มี MAF เป็นองค์ประกอบในปริมาณมากถึง 80% แต่มีการเพิ่มขึ้นของค่า SFC ที่ค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับ MAF จนถึงนาทีที่ 40 เพราะการเติมน้ำมันปาล์มลงในไขมันผสมมีผลชะลอการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างของผลึกดังที่กล่าวมาแล้ว (Ghotra และคณะ, 2002) ก่อนที่ค่า SFC จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในนาทีที่ 45 ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่ายผลึกที่เห็นผลึกที่มีขนาดใหญ่ สำหรับกลไกการตกผลึกของ CB และ MIX มีลักษณะเหมือนกันจนถึง 25 นาที และมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนถึงนาทีที่ 40 แล้วเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตั้งแต่นาทีที่ 45 สอดคล้องกับภาพถ่ายที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผลึก และเป็นการยืนยันว่า การเติม CBE ลงใน CB ไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของ CB

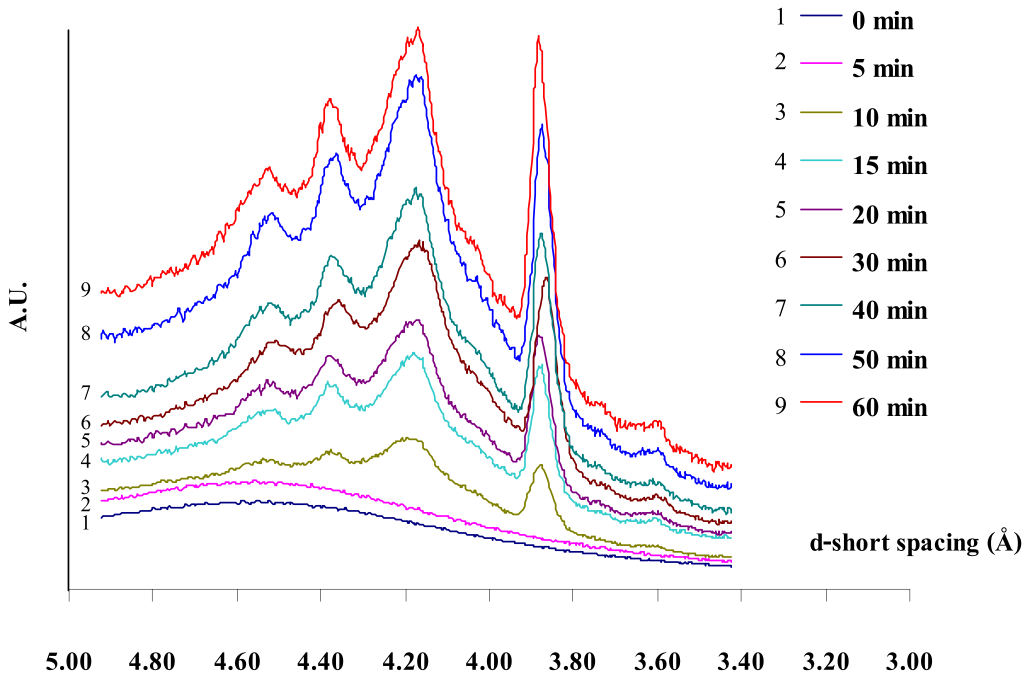
จากที่กล่าวมาจะเห็นว่า ระยะเวลาก่อนการเริ่มตกผลึกของ MAF และ CBE มีค่ามากที่สุด PMF มีความเร็วในการตกผลึกสูงที่สุดในขณะที่ MAF และ CBE มีความเร็วในการตกผลึกต่ำที่สุด แต่ MAF มีระดับของการตกผลึกสูงที่สุดจากค่า SFC ที่วัดได้ที่ 20°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงของค่า SFC ของไขมันตัวอย่างจนถึง 3 ชั่วโมง ซึ่งกราฟแสดงไว้ในภาคผนวก ฎ พบว่า CB และ MIX มีระดับของการตกผลึกสูงที่สุดโดยมีค่า SFC ประมาณ 68% และ 66% ตามลำดับ การที่สามารถศึกษากลไกของการตกผลึกได้จากการ

เปลี่ยนแปลงของค่า SFC ตามเวลาได้ เนื่องจากค่า SFC มีความไวต่อทั้งการเกิดผลึกและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผลึก (Marangoni และ Mcgauley, 2003)

4.5.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกและการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกตามระยะเวลาที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 60 นาที โดยใช้เครื่อง XRD ทำให้ได้ X-ray diffraction pattern ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณที่ได้ (intensity) กับค่า d-short spacing (d; Å) เมื่อนำค่า d ไปเปรียบเทียบกับค่า d ของผลึกแต่ละรูปแบบที่ได้จากการสืบค้นในงานวิจัยที่ผ่านมา ได้ผลจากการวิเคราะห์ ดังต่อไปนี้

4.5.3.1 โครงสร้างผลึกของ MAF

จากการวิเคราะห์ X-ray diffraction pattern ในภาพที่ 21 พบว่า นาทีที่ 5 MAF เกิดการตกผลึกในรูปแบบ α จากการแสดงค่า d ที่ 4.19 Å เพียงค่าเดียวซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Ghotra และคณะ (2002) และ Himawan และคณะ (2006) ดังตารางที่ 9 ที่ระบุว่า ผลึกรูปแบบ α จะแสดงค่า d ที่ 4.20 Å จากนั้นในนาทีที่ 10 เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของผลึกจาก α ไปเป็น β' เนื่องจากมีค่า d ที่ 3.72, 3.88 และ 4.19 Å ซึ่งค่า d เท่ากับ 4.19 Å นอกจากจะแสดงถึงผลึกแบบ α แล้วยังแสดงถึงผลึกแบบ β' ได้อีกด้วย เช่นเดียวกับหลายงานวิจัยที่ระบุว่า ผลึกแบบ β' มีค่า d ที่ 3.80-3.90 Å และ 4.20-4.30 Å ดังตารางที่ 9 โดย peak ที่ 3.72 และ 3.88 Å ของ β' มีความเข้มค่อนข้างสูง จึงเป็นไปได้ว่า ผลึกส่วนใหญ่อยู่ในรูปแบบ β' ขณะเดียวกันจะเห็นค่า d ที่ 4.38 Å ซึ่งแสดงถึงผลึกรูปแบบ pseudo β' และค่า d ที่ 3.61 Å ซึ่งเป็นของผลึกรูปแบบ sub β หรือแม้แต่การเกิด peak ที่ d เท่ากับ 4.55 Å ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sabariah และคณะ (1998) และ Ahmadi และ Marangoni (2009) ที่ว่า เป็นผลึกรูปแบบ β และเมื่อพิจารณาโครงสร้างผลึกตั้งแต่นาทีที่ 15 ถึง 60 พบว่า ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของผลึก แต่มีการเปลี่ยนแปลงในด้านปริมาณของผลึกในโครงสร้างต่าง ๆ โดยมีการเพิ่มขึ้นของผลึกรูปแบบ β' เนื่องจากค่าความเข้มสัมพัทธ์ของ peak ที่ 3.88 และ 4.19 Å เพิ่มขึ้นประมาณ 85.79% และ 84.55% ตามลำดับ จากนาทีที่ 10 ถึงนาทีที่ 60 จากผลการวิเคราะห์รูปแบบผลึกของ MAF พบว่า มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Solis-Fuentes และคณะ (2005) ที่กล่าวว่า MAF จะไม่แสดงรูปแบบผลึกที่เฉพาะเพียงรูปแบบเดียวที่อุณหภูมิประมาณ 22°C เป็นเวลาถึง 5 วัน แต่จะมีการผสมกันของผลึกในรูปแบบ β', pseudo β', sub β และ β และหลังจากการตกผลึกเป็นเวลา 60 นาที ผลึกส่วนใหญ่อยู่ในโครงสร้างแบบ β'

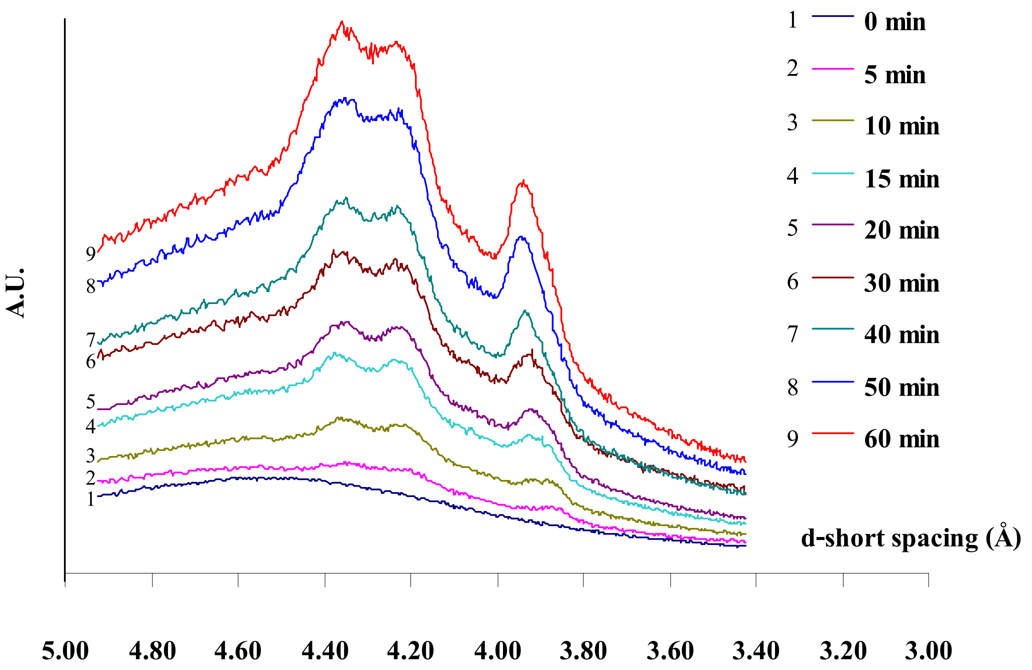


ภาพที่ 21 X-ray diffraction pattern ของ MAF ที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของการตกผลึกที่ 20°C

4.5.3.2 โครงสร้างผลึกของ PMF

จากภาพที่ 22 พบว่า ที่นาทีที่ 0 เกิด peak ที่ d เท่ากับ 3.88 Å ซึ่งอาจเป็น peak ของ γ หรือเป็นของ β' เนื่องจากค่า d เท่ากับ 3.88 Å เป็นได้ทั้งของผลึกในรูปแบบ γ และ β'(Souza และคณะ, 1990 และ Brien, 1998 อ้างอิงใน Solis-Fuentes และคณะ, 2005; Czerniak, 2005) แต่ในงานวิจัยนี้คาดว่า ค่า d ดังกล่าวน่าจะสอดคล้องกับโครงสร้างแบบ β' ทั้งนี้เพราะจากการถ่ายภาพการตกผลึกด้วยเทคนิค PLM (ภาพที่ 16) พบว่า PMF เกิดการตกผลึกตั้งแต่อุณหภูมิประมาณ 24°C เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวค่อนข้างสูง (SMP เท่ากับ 39.8°C) จึงเป็นไปได้ที่ PMF ตกผลึกลงในโครงสร้างที่ไม่เสถียรที่ 24°C แล้วมีการเปลี่ยนแปลงของผลึกเกิดขึ้นไปเป็นโครงสร้างแบบ β' ก่อนที่อุณหภูมิจะลดลงมาที่ 20°C ต่อมาในนาทีที่ 5 จะเห็นว่า ผลึกอยู่ในรูปแบบ β' จากการเกิด peak ที่ d เท่ากับ 3.88 และ 4.20 Å (Narine และ Humphrey, 2004) และมีผลึกในรูปแบบ pseudo-β' จากค่า d เท่ากับ 4.35 Å ซึ่งใกล้เคียงกับที่รายงานไว้โดยของ Souza และคณะ (1990) และ Brien (1998) ว่า ผลึกรูปแบบ pseudo-β' มีค่า d ที่ 4.40 Å (Solis-Fuentes และคณะ, 2005) นอกจากนี้ยังมีผลึกแบบ β จากการเริ่มเกิด peak ที่ d เท่ากับ 4.55 Å (Ahmadi และ Marangoni, 2009) ซึ่งมีในปริมาณที่น้อยมากหากเทียบกับผลึกรูปแบบอื่น ๆ เช่นเดียวกับที่ Omar และคณะ

(2005) รายงานว่า ในน้ำมันปาล์มอาจมีผลึกแบบ β อยู่ในปริมาณที่น้อยมาก จากนั้นผลึกทั้งหมดยังคงรูปแบบเช่นนี้จนถึงนาทีที่ 60 แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงในด้านปริมาณของผลึกของโครงสร้างต่าง ๆ โดยผลึกรูปแบบ β′ และ pseudo-β′ มีปริมาณเพิ่มขึ้นจากการเพิ่มขึ้นของค่าความเข้มสัมพัทธ์ของ peak ที่ 3.88 และ 4.20 Å สำหรับ β′ และที่ 4.40 Å สำหรับ pseudo-β′ ซึ่งเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนดังภาพที่ 22 (ความเข้มสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น 92.35%, 92.72% และ 95.63% ตามลำดับ จากนาทีที่ 5 ถึงนาทีที่ 60) ในขณะที่ไม่มีการเพิ่มขึ้นของผลึกรูปแบบ β โดย Sato (1999) และ Awad และ Sato (2000) กล่าวว่า ไขมันที่มีกรดปาล์มมิติกในปริมาณสูงจะถูกเร่งให้เกิดผลึกในรูปแบบ β′ ซึ่งสอดคล้องกับการที่ PMF มีกรดปาล์มมิติกเป็นองค์ประกอบในปริมาณถึง 51.65%



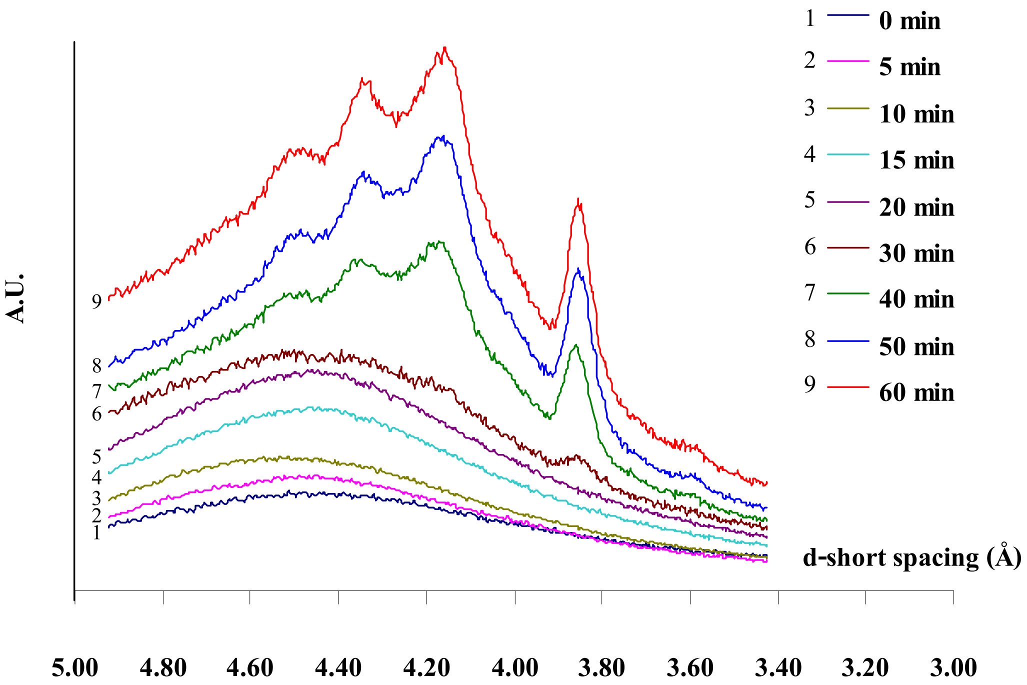
ภาพที่ 22 X-ray diffraction pattern ของ PMF ที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของการตกผลึกที่ 20°C

นอกจากนี้ Kheiri (1982) ได้รายงานไว้ว่า PMF จะตกผลึกในรูป β_2' เพราะมีองค์ประกอบของไตรกลีเซอไรด์ชนิด PPO และไตรกลีเซอไรด์ชนิดไม่อิ่มตัวอื่น ๆ จากน้ำมันปาล์มโอเลอิน (Ali และคณะ, 2001) นอกจากนี้งานวิจัยของ Ali และคณะ (2001) ที่ผสม PMF เข้ากับน้ำมันมะพร้าวพบว่า ไขมันมีโครงสร้างที่เสถียรที่สุดเป็นแบบ β′ แต่เมื่อนำไปผสมกับ CB แล้วพบว่า ที่ระยะเวลาของการเก็บรักษาเท่ากับ 8 สัปดาห์ อุณหภูมิ 18°C ไขมันผสมตกผลึกใน

โครงสร้างแบบ β >> β′ ซึ่งอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางเทอร์โมไดนามิกส์เพื่อให้เกิดความเสถียรของระบบ และที่ 30°C ไขมันผสมมีโครงสร้างผสมกัน 2 รูปแบบ คือ β′ และ β ในงานวิจัยนี้หลังจากตกผลึกเป็นเวลา 60 นาทีแล้วผลึกของ PMF ส่วนใหญ่อยู่ในโครงสร้างแบบ β′ ซึ่งเหมือนกับตัวอย่าง MAF

4.5.3.3 โครงสร้างผลึกของ CBE

จากภาพที่ 23 พบว่า CBE เกิดการตกผลึกที่ค่อนข้างช้าเช่นเดียวกับผลที่ได้จากการถ่ายภาพผลึกที่ไขมันเริ่มเกิดการตกผลึกช้าลง และยังสอดคล้องกับค่า SFC จากการศึกษากลไกการตกผลึกที่มีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับการตกผลึกและค่า SFC ของน้ำมันที่ไม่มีการผสมกันคือ MAF และ PMF โดยที่นาทีที่ 20 มี peak ขนาดเล็กเกิดขึ้นที่ d เท่ากับ 4.20 Å ซึ่งน่าจะเป็นของผลึกรูปแบบ α และมีการเปลี่ยนรูปแบบเป็น β′ ที่นาทีที่ 30 โดยน่าจะมีการซ้อนทับกันของ peak ของ α และ β′ ที่ d เท่ากับ 4.18 Å และเกิด peak ที่ค่า d เท่ากับ 3.86 Å ซึ่งเป็นของ β′ ดังตารางที่ 9 จากนั้นในนาทีที่ 40 มีผลึกแบบ β′ เป็นรูปแบบหลักจากค่า d เท่ากับ 3.86 และ 4.17 Å ซึ่งมีความเข้มสูงขึ้นมากจากนาทีที่ 30 นอกจากนี้ยังมีรูปแบบ sub-β จาก d เท่ากับ 3.59, 4.51 และ 4.75 Å และรูปแบบ pseudo-β′ จาก d เท่ากับ 4.36 Å โดยลักษณะผลึกที่เกิดขึ้นมีความใกล้เคียงกับ MAF มากเนื่องจากใน CBE มี MAF ในปริมาณมากถึง 80% และสังเกตได้ว่า PMF ซึ่งมีผลึกแบบ pseudo-β′ ปริมาณมาก แต่เมื่อผสมกับ MAF แล้วพบว่า มีปริมาณน้อยลงเนื่องจากมีปริมาณในส่วนผสมน้อยกว่า MAF มาก โดยใน CBE มีผลึกแบบ β′ เป็นโครงสร้างหลัก ซึ่งผลึกจะคงรูปแบบนี้จนกระทั่ง 60 นาที หรือแม้แต่ที่ 120 นาที ดังภาคผนวก ฏ จะเห็นว่า ไม่มี peak ที่แสดงถึงผลึกแบบ β เกิดขึ้น ซึ่งจะต่างกับในกรณีของผลึก MAF ที่มีโครงสร้างแบบ β เป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย สอดคล้องกับที่ Persmark และคณะ (1976) กล่าวไว้ว่า การเติมน้ำมันปาล์มลงในไขมันผสมมีผลต่อความคงตัวของผลึกโดยจะชะลอหรือป้องกันการเปลี่ยนโครงสร้างจาก β′ ไปเป็น β (Ghotra และคณะ, 2002) โดยรวมแล้วจะเห็นได้ว่า การเติม PMF ลงใน MAF เพื่อผลิตเป็น CBE มีผลต่อกลไกของการตกผลึกคือ ทำให้ตกผลึกได้ช้าลงแต่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อโครงสร้างผลึกซึ่งสอดคล้องกันกับผลที่ได้จากการถ่ายภาพและการศึกษากลไกการตกผลึกดังที่ได้กล่าวไปข้างต้น

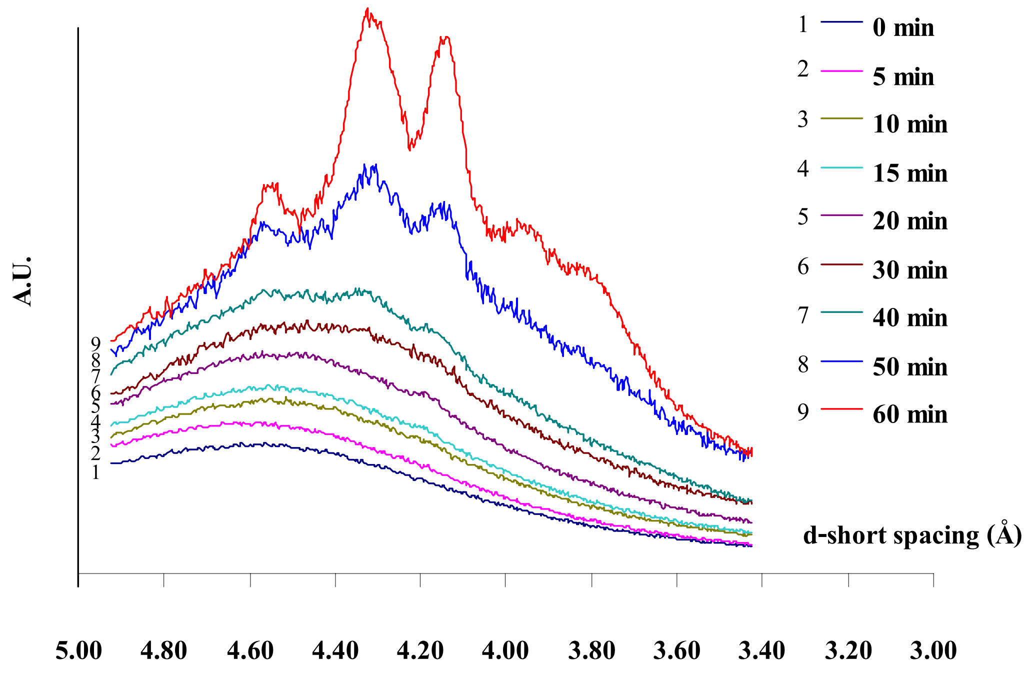


ภาพที่ 23 X-ray diffraction pattern ของ CBE ที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของการตกผลึกที่ 20°C

4.5.3.4 โครงสร้างผลึกของ CB

จากผลการวิเคราะห์ X-ray diffraction pattern ดังแสดงในภาพที่ 24 พบว่า CB จะเริ่มตกผลึกในรูปแบบที่ II หรือ α ตั้งแต่นาทีที่ 5 และคงรูปแบบนี้จนถึงนาทีที่ 30 เนื่องจากมีค่า d ที่ 4.18 Å ซึ่งใกล้เคียงกับค่า d ของรูปแบบที่ II ของผลึกของ CB ในงานวิจัยของ Marangoni และ Magualey (2003) และยังมีผลที่สอดคล้องกันกล่าวคือ ที่อุณหภูมิ 20°C ผลึกของ CB จะคงรูปแบบ α จนถึง 30 นาที และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sonwai และ Mackley (2006) ที่กล่าวไว้ว่า CB จะตกผลึกในรูปแบบที่ II ที่อุณหภูมิ 20°C จากนั้นในนาทีที่ 40 จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของผลึกในรูปแบบที่ II ไปเป็นรูปแบบที่เสถียรกว่าคือ รูปแบบที่ IV (β_1') และ V (β_2) ด้วยค่า d ที่ 3.81, 3.97, 4.18 และ 4.34 Å สำหรับรูปแบบที่ IV และเริ่มมีค่า d ที่ 4.54 Å สำหรับรูปแบบที่ V ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากเทคนิค PLM และการศึกษากลไกการตกผลึกที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงของผลึกและค่า SFC ในนาทีที่ 40 และเริ่มมีการเพิ่มขึ้นของค่า SFC จากการศึกษากลไกการตกผลึก จะเห็นว่า จำนวน peak ของรูปแบบที่ IV มีมากถึง 4 peaks ที่ชัดเจน ดังนั้นไขมันส่วนใหญ่น่าจะอยู่ในรูปแบบนี้ และบางส่วนของรูปแบบที่ IV เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วไปเป็นรูปแบบที่ V ในนาทีที่ 40 โดยไม่พบผลึกในรูปแบบที่ III เช่นเดียวกับ Sonwai และ Mackley (2006) เนื่องจากไม่มี

พีคของรูปแบบที่ III เกิดขึ้นที่ค่า d เท่ากับ 3.86, 4.62 และ 4.92 Å เช่นเดียวกัน ซึ่ง Marangoni และ Magualey (2003) กล่าวว่า ที่อุณหภูมิระหว่าง 5-22.5°C ผลึกแบบ β′ จะเป็นโครงสร้างหลักที่เกิดขึ้นใน CB และที่อุณหภูมิมากกว่า 15°C ผลึกในรูปแบบ β′ สามารถเปลี่ยนเป็นแบบ β ได้ แต่ β จะไม่สามารถเกิดได้โดยตรงจากไขมันเหลว อย่างไรก็ตามในงานวิจัยของ Foubert และคณะ (2006) ไม่พบการตกผลึกในรูปแบบ β ที่ระยะเวลาการตกผลึกเท่ากับ 1 ชั่วโมง ที่ 20°C และการที่ผลึกเกิดการเปลี่ยนแปลงจากรูปแบบที่ II ไปเป็นรูปแบบที่ IV นั้นมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sonwai และ Mackley (2006) และ Van Malssen และคณะ (1999), McGuley และ Marangoni (2002) ที่กล่าวว่า ภายใต้สภาวะคงที่ ผลึกในรูปแบบที่ II จะเกิดขึ้นโดยตรงจากไขมันเหลว แล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นรูปแบบที่ IV เพื่อให้มีความเสถียรมากขึ้น (Maleky และ Marangoni, 2008) และสภาวะในการตกผลึก (คงที่ที่ 20°C) เหมาะสำหรับการตกผลึกในรูปแบบที่ IV ถึงแม้ว่า จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผลึกเกิดขึ้นในการศึกษารูปร่างของผลึกด้วยเทคนิค PLM (Sonwai และ Mackley, 2006)

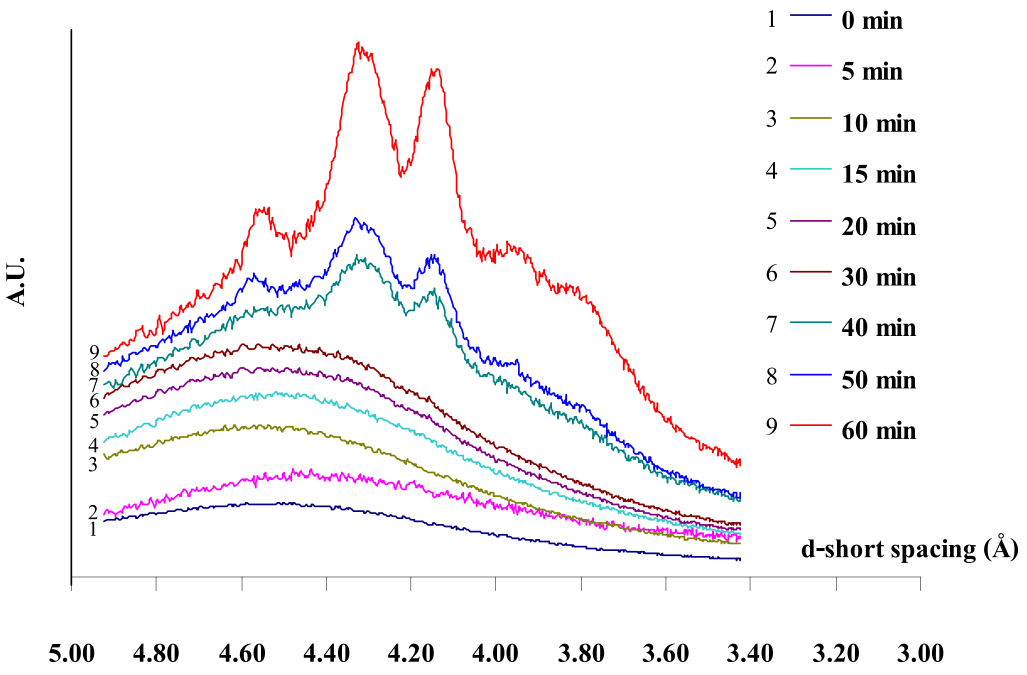


ภาพที่ 24 X-ray diffraction pattern ของ CB ที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของการตกผลึกที่ 20°C

หลังจากนั้นในนาทีที่ 50 และ 60 จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบผลึก โดยเกิดการเพิ่มขึ้นของปริมาณผลึกรูปแบบที่ IV อย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับรูปแบบที่ V จากการเพิ่มขึ้นของความเข้มของ peaks ของรูปแบบที่ IV ที่ค่า d เท่ากับ 3.81, 3.97, 4.18 และ 4.34 Å เมื่อเทียบกับรูปแบบที่ V ที่ค่า d เท่ากับ 4.54 Å ซึ่งเพิ่มขึ้นแต่ในปริมาณที่น้อยกว่า โดยความเข้มสัมพัทธ์ของ peaks ของรูปแบบที่ IV เพิ่มขึ้นจากนาทีที่ 40 ถึงนาทีที่ 60 เท่ากับ 62.42% และ 58.73% ที่ 4.18 และ 4.34 Å ตามลำดับ เมื่อเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมง ผลึกยังคงมีรูปแบบที่ IV และ V โดยมีรูปแบบที่ IV เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่รูปแบบที่ V ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก แสดงว่า CB ส่วนจะเกิดการตกผลึกอยู่ในโครงสร้างผลึกรูปแบบที่ IV หรือ β_1' และมีเพียงบางส่วนที่อยู่ในโครงสร้างที่ V หรือ β_2 ซึ่งกราฟที่นาทีที่ 180 แสดงไว้ในภาคผนวก ฎ

4.5.3.5 โครงสร้างผลึกของ MIX

จาก X-ray diffraction pattern ของ MIX ดังแสดงในภาพที่ 25 พบว่า การตกผลึกเกิดขึ้นช้าลงเมื่อเทียบกับ CB เนื่องจากการที่ CBE เริ่มเกิดการตกผลึกช้า (นาทีที่ 20) จึงมีผลชะลอการตกผลึกของ CB ลง แต่อย่างไรก็ตามพบว่า ตำแหน่งและจำนวนของ peak ของ MIX ไม่มีความแตกต่างจาก CB และการที่ MIX ตกผลึกช้าลงก็มีความสอดคล้องกับการตกผลึกที่ได้จากเทคนิค PLM ที่นาทีที่ 0 ถึง 15 ไม่มีการตกผลึกเกิดขึ้น จนกระทั่งนาทีที่ 20 และ 30 เกิดการตกผลึกในรูปแบบที่ II หรือ α จากค่า d ที่ 4.19 Å ซึ่งใกล้เคียงกับของ CB มาก จากนั้นในนาทีที่ 40 เริ่มมีผลึกในรูปแบบที่ IV และ V เกิดขึ้นจาก peak ที่ 3.97, 4.15 และ 4.33 Å สำหรับรูปแบบที่ IV และ 4.55 สำหรับรูปแบบที่ V โดยมีผลึกในรูปแบบที่ IV ในปริมาณมากกว่า แสดงให้เห็นว่า รูปแบบผลึกของ MIX มีการเปลี่ยนแปลงจากรูปแบบที่ II ไปเป็นรูปแบบที่ IV และ V เช่นเดียวกับ CB ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การใช้ CBE ในอัตราส่วนนี้ถึงแม้ว่าจะมีผลต่อกลไกของการตกผลึกคือ ทำให้การตกผลึกเริ่มเกิดช้าลง แต่ไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของพฤติกรรมการตกผลึกของ CB ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ต้องการในเนยโกโก้เลียนแบบชนิด CBE และงานวิจัยของ Marangoni และ Narine (2002) พบว่า เมื่อเติมไขมันนมที่มีจุดหลอมเหลวสูง (ประมาณ 50.5°C) ลงใน CB เป็นปริมาณไม่เกิน 20% ไขมันผสมจะแสดงพฤติกรรมการตกผลึกที่คล้ายกับ CB คือ ตกผลึกในโครงสร้างแบบ β' และจะเกิดโครงสร้างแบบ β เมื่อระยะเวลาผ่านไป 7 วัน ที่อุณหภูมิ 22°C



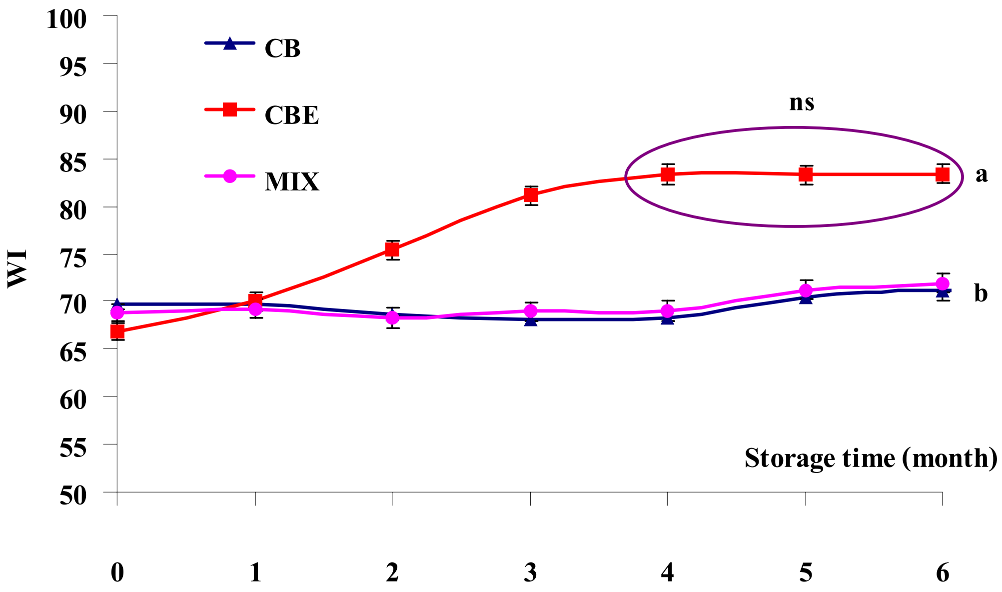
ภาพที่ 25 X-ray diffraction pattern ของ MIX ที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของการตกผลึกที่ 20°C

ตารางสรุปผลของการติดตามการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกในระหว่างการตกผลึกที่ 20°C ของทุกตัวอย่างได้ให้ไว้ในภาคผนวก ฐ อย่างไรก็ตามในทางอุตสาหกรรม ยังมีปัจจัยอื่น ๆ อีกที่มีผลต่อพฤติกรรมการตกผลึกของไขมัน เช่น การแปรปรวนของอุณหภูมิของการตกผลึก กระบวนการที่ทำให้เกิดการเฉือน (shearing) ซึ่งอาจทำให้การตกผลึกของไขมันมีการเปลี่ยนแปลงไป (Perez-Martinez และคณะ, 2007) จากสภาวะการตกผลึกแบบคงที่ (Static conditions) ดังนั้นเพื่อให้เกิดความเข้าใจและสามารถประยุกต์ใช้ไขมันได้อย่างเหมาะสม จึงควรมีงานวิจัยที่ศึกษาถึงอิทธิพลของปัจจัยอื่น ๆที่มีผลต่อพฤติกรรมการตกผลึกของไขมันต่อไป

4.6 การศึกษาการเกิด fat bloom ของไขมันผสมอัตราส่วนที่เลือกไว้เป็น CBE

ปัญหาสำคัญที่มักเกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลตคือ การเกิด fat bloom ที่ผิวของช็อกโกแลตซึ่งมีลักษณะเป็นจุดสีขาวกระจายอยู่ที่ผิวหน้า หรือเกิดการสูญเสียความมันเงาของผิวทำให้เห็นเป็นสีขาวหรือสีเทา (Nopens และคณะ, 2008) โดยเกิดจากไขมันเหลวเกิดการเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างหรือรอยแยกเล็ก ๆ มาที่ผิวหน้าของช็อกโกแลตแล้วเกิดการตกผลึกใหม่ (recrystallization) ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น (> 5 μm) ซึ่งผลึกขนาดใหญ่จะเกิดการสะท้อนแสงและเห็นเป็นสีขาวเทา

(Lohman และ Hartel, 1994 อ้างอิงใน Sonwai และ Rousseau, 2006; Beckett, 2000) ซึ่งปัญหาดังกล่าวเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น 1) เกิดจากการที่ CB เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผลึกจากรูปแบบที่ V ไปเป็นรูปแบบที่ VI ในช็อกโกแลตที่ผ่านการ tempering มาอย่างดีแล้ว (Beckett, 2000; Stewart และ Timms, 2002; Sonwai และ Rousseau, 2006) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นโดยธรรมชาติ (Pajin และ Jovanovic, 2005) หรือการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิระหว่างการขนส่งและการเก็บรักษา หรือ 2) การทำ tempering ที่ไม่เหมาะสมทำให้ CB ตกผลึกในโครงสร้างที่ไม่เสถียร เช่น โครงสร้างที่ IV หรือ β_1' ซึ่งมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนเป็นโครงสร้างที่เสถียรมากขึ้นคือโครงสร้างที่ V หรือ β_2 (Beckett, 2000 และ Hartel, 1999) เป็นต้น



ภาพที่ 26 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า WI ของ CBE, CBE ผสมกับ CB ในอัตราส่วน 1:5.64 (w/w) (MIX) เปรียบเทียบกับ CB เมื่อทำการเก็บรักษาไขมันที่อุณหภูมิ 25°C เป็นระยะเวลา 6 เดือน

หมายเหตุ ตัวอักษร a, b และ ns หมายถึง ตัวอักษรเดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

CB หมายถึง เนยโกโก้

CBE หมายถึง ไขมันผสมอัตราส่วน 80:20 (w/w)

MIX หมายถึงไขมันผสมระหว่าง CBE: CB ในอัตราส่วน 1:5.64 (w/w)

ลักษณะที่เกิดขึ้นของ fat bloom ทำให้ผู้บริโภคเกิดความเข้าใจผิดคิดว่า ผลิตภัณฑ์เกิดเชื้อราและปฏิเสธที่จะซื้อผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลต ดังนั้นการศึกษาการเกิด fat bloom ตามระยะเวลาในการเก็บรักษาจึงมีส่วนสำคัญในการบ่งชี้คุณสมบัติของ CBE ซึ่งเมื่อถูกผสมกับ CB แล้วไม่ควรก่อให้เกิดปัญหาดังกล่าวขึ้น รวมถึงสามารถต้านทานต่อการเกิด fat bloom ได้ดี ซึ่งผลของการศึกษาจะแสดงในรูปของค่า WI หรือค่าดัชนีความขาวที่สามารถแสดงถึงการเพิ่มขึ้นของการเกิด fat bloom ที่ผิวของไขมันได้ กล่าวคือ เมื่อค่าความขาวของไขมันผสมเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิด fat bloom จะมีค่า WI เพิ่มขึ้นนั่นเอง โดยภาพที่ 26 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า WI ของ CBE และ MIX เปรียบเทียบกับ CB เมื่อทำการเก็บรักษาไขมันที่อุณหภูมิ 25°C เป็นระยะเวลา 6 เดือน จะเห็นว่าค่า WI ของ CBE มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเริ่มคงที่เมื่อเก็บรักษาไว้เป็นระยะเวลา 3 เดือน โดยค่า WI ตั้งแต่เดือนที่ 4-6 ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ในขณะที่ค่า WI ของ MIX และ CB มีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา ซึ่งผลการวิเคราะห์ทางสถิติแสดงให้เห็นว่า ค่า WI ของ CBE มีความแตกต่างจากค่า WI ของ MIX และ CB ($p < 0.05$) แต่ค่า WI ของ MIX ไม่มีความแตกต่างจาก CB อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ตลอดระยะเวลาในการเก็บรักษา ซึ่งแสดงให้เห็นว่า CBE ที่ได้จากการผสม MAF และ PMF เข้าด้วยกันในอัตราส่วน 80:20 (w/w) สามารถนำไปใช้ในการผสมกับ CB เพื่อใช้ในผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลตได้โดยไม่เปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการเกิด fat bloom ของ CB ภายในระยะเวลาการเก็บรักษาอย่างน้อย 6 เดือน

บทที่ 5
สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

เมล็ดมะม่วงซึ่งเป็นของเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปนั้น สามารถนำมาสกัด MAF ได้ โดยเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์แก้วมีน้ำมันประมาณ 7.28 ± 0.19% (น้ำหนักแห้ง) ซึ่ง MAF เป็นหนึ่งในน้ำมันที่ได้รับอนุญาตโดยองค์กรควบคุมคุณภาพช็อกโกแลตของสหภาพยุโรปให้ใช้ในการผลิตเนยโกโก้เลียนแบบชนิด CBE ได้ การศึกษาถึงความเป็นไปได้ของการผลิต CBE จาก MAF ผสมกับ PMF ในอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับ CB สามารถทำได้โดยการพิจารณาจากกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบ ค่า SFC ค่า SMP และความเข้ากันได้กับ CB (ไม่ก่อให้เกิด eutectic effect) เป็นสำคัญ เนื่องจากเป็นคุณสมบัติที่สำคัญสำหรับการนำไปใช้เป็น CBE ซึ่งจากการดำเนินการวิจัยพบว่า ไขมันผสมระหว่าง MAF และ PMF ในอัตราส่วน 80:20 (w/w) มีกรดไขมันหลักที่เป็นองค์ประกอบเหมือนกับ CB ได้แก่ กรดปาล์มมิติก กรดโอเลอิก และกรดสเตียริก มีค่า SFC ในช่วงอุณหภูมิ 32-40°C เหมือนกับ CB อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) มีจุดหลอมเหลวใกล้เคียงกับ CB รวมถึงสามารถผสมเข้ากันได้กับ CB โดยไม่ก่อให้เกิด eutectic effect เมื่อนำไขมันผสมอัตราส่วน 80:20 (w/w) ไปศึกษาพฤติกรรมการตกผลึกโดยผสมกับ CB ในอัตราส่วน 1:5.64 (w/w) ซึ่งเป็นอัตราส่วนสูงสุดที่ยินยอมให้เติมลงในผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลตเปรียบเทียบกับของ CB พบว่า ไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของพฤติกรรมการตกผลึกของ CB โดยจะตกผลึกในโครงสร้างแบบที่ V หรือ β_2 ที่ระยะเวลาและอุณหภูมิที่ทำการศึกษา รวมถึงไม่เปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการเกิด fat bloom ของ CB ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาอย่างน้อย 6 เดือน ดังนั้นจากผลการศึกษาดังกล่าวคาดว่า ไขมันผสมอัตราส่วน 80:20 (w/w) สามารถนำไปใช้เป็นเนยโกโก้เลียนแบบชนิด CBE ได้

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาถึงองค์ประกอบของไตรกลีเซอไรด์ในไขมันตัวอย่าง เพื่อให้สามารถวิเคราะห์การจัดเรียงโครงสร้างและพฤติกรรมการตกผลึกของตัวอย่างได้ชัดเจนมากขึ้น
2. ควรมีการศึกษาถึงพฤติกรรมการหลอมเหลวของ MIX จากการเปลี่ยนแปลงค่า SFC ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ด้วยเครื่อง p-NMR เทียบกับของ CB เพื่อให้แน่ใจว่า MIX มีพฤติกรรมการหลอมเหลวที่ไม่แตกต่างจากของ CB

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

กรมการค้าต่างประเทศ. (2550). สถานการณ์สินค้ามะม่วงและผลิตภัณฑ์ [ออนไลน์]. เข้าถึงเมื่อ 2 กุมภาพันธ์ 2552, เข้าถึงได้จาก http://www.dft.moc.go.th/the_files/$$16/level4/ **มะม่วง**%20ปี%202550(ม.ค.-ต.ค.).doc.

กรมการค้าต่างประเทศ. (2552). สถานการณ์ผลไม้และผลิตภัณฑ์ (สถิติ ม.ค. - ธ.ค. 2552) [ออนไลน์]. เข้าถึงเมื่อ 23 มิถุนายน 2552, เข้าถึงได้จาก http://www.dft.moc.go.th/level4Frame.asp?sPage =the_files/$$16/level4/สถานการณ์ผลไม้ 2551 .doc&level4=2091.

กรมส่งเสริมการเกษตร. (2552). รายงานสถานการณ์มะม่วง [ออนไลน์]. เข้าถึงเมื่อ 4 มิถุนายน 2552, เข้าถึงได้จาก http://agriman.doae.go.th/home/news/15-28%20February%202009/0004_mango (1528% 20February%202009).pdf.

กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2547). สถานการณ์มะม่วง [ออนไลน์]. เข้าถึงเมื่อ 4 มิถุนายน 2552, เข้าถึงได้จาก http://job.haii.or.th/moac/index.php?method=subject&action=detail&category_id=2&subcategory_id=4&content_id=167.

นิธิยา รัตนาปนนท์. (2548). *วิทยาศาสตร์การอาหารของไขมันและน้ำมัน*. กรุงเทพมหานคร : โอเดียนสโตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ร่วมกับ สมาพันธ์พลเมืองฐานรากแห่งประเทศไทยและนิตยสารเมืองไม้ผล. (2552). สัมมนา เรื่อง ศักยภาพมะม่วงไทยในตลาดโลก [ออนไลน์]. เข้าถึงเมื่อ 4 มิถุนายน 2552, เข้าถึงได้จาก http://same111.blogspot.com /2009/05/12-2552-830-1700-4.html.

วิจิตร วังใน. (2529). *มะม่วง*. กรุงเทพมหานคร : บริษัท ศรีสมบัติการพิมพ์ จำกัด.

วินัย ดะห์ลัน. (2542). ไขมันไม่อิ่มตัวต่ำ. เนชั่นสุดสัปดาห์. 8(391) [ออนไลน์]. เข้าถึงเมื่อ 6 พฤษภาคม 2553, เข้าถึงได้จาก http://www.elib-online.com/doctors/food_fat01.html.

สุวรรณา สุภิมารส. (2543). *เทคโนโลยีการผลิตลูกกวาดและช็อกโกแลต*. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาต่างประเทศ

Afoakwa, E. O., Paterson, A. & Fowler, M. (2008). Effects of particle size distribution and composition on rheological properties of dark chocolate. *European Food Research and Technology, 226,* 1259-1268.

Afolabi, I. S. (2008). Chemical qualities of oils from some fresh and market vegetable crops within Kwara State of Nigeria. *Nigerian Society for Experimental Biology, 20*(2), 71-75.

Ahmadi, L. & Marangoni, A. G. (2009). Functionality and physical properties of interesterified high oleic shoetening structured with stearic acid. *Food Chemistry, 117,* 668-673.

Ali, A., Selamat, J., Che Man, Y.b. & Suria, A. M. (2001). Effect of storage temperature on texture, polymorphic structure, bloom formation and sensory attributes of filled dark chocolate. *Food Chemical, 72,* 491-497.

Anwer, T., Bhanger, M. I., Anwar, F., Khan, M., Shahaid, R. & Iqbal, S. (2006). A comparative characterization of different non-conventional oilseeds found in Pakistan. *Journal of the Chemistry Society of Pakistan, 28*(2), 144-148.

AOAC. (2000). Oils and Fats In: H. William, *Official Methods of Analysis of AOAC International*, vol. 2 (pp. 1-69). Maryland: AOAC International suite 500.

AOCS. (1989). In: D. Firestone, *Official Methods and Recommended Practices of the American Oil Chemists' Society*, Champaign: American Oil Chemists' Society.

Armstrong, W. P. (2004). Fruits Called Nuts: Mango, Pistachio & Gum Mastic: Sumac Family (Anacardiaceae) [Online]. Accessed 23 July 2009. Available from http://waynesword.palomar.edu/ecoph8. htm.

Awad, T. & Sato, K. (2002). Acceleration of crystallization of palm kernel oil in oil-in-water emultion by hydrophobic emulsifier additives. *Colloid and Surface B, 25,* 45-53.

Bailey, A.E. (1950). *Melting and Solidification of Fats and Fatty Acids*, New York: Interscience.

Bannon, C. D., Craske, J. D., Hai, N. T., Harper, N. L. & O'Rourke, K. L. (1982). Analysis of fatty acid methyl esters with accuracy and reliability. *Journal of Chromatography*, *247*, 63-69.

Beckett, S. T. (2000). *The Science of Chocolate*. Cambrige: The Royal Society of Chemistry.

Caprette, D. R. (2005). Experimental Biosciences: Introduction laboratory-Bios 211 [Online]. Accessed 2 March 2010. Available from http://www.ruf.rice.edu/~bioslabs/methods/microscopy/dfield.html.

Chong, C. L., Omar, Z., Kamaruddin, Z., Ahmad, R. & Puteh, J. (2006). Polymorphic determination of crystals of palm oil and its products using TTRAX III rotating anode diffractometer. *Malaysian Palm Oil Board, 11.*

Czerniak, A. S., Karlovits, G., Lach, M. & Szlyk, E. (2005). X-ray diffraction and differential scanning calorimetry studies of $\beta' \rightarrow \beta$ transitions in fat mixtures. *Food Chemistry, 92,* 133-141.

Dutrow, B. L. & Clark, C. M. (2009). Geochemical Instrumentation and Analysis: X-ray powder diffraction (XRD) [Online]. Accessed 24 February 2010. Available from http://serc.carleton.edu/research _education/geochemsheets/techniques/XRD.html.

Foubert, I., Dewettinck, K., Janssen, G. & Vanrolleghem, P. A. (2006). Modelling two-step isothermal fat crystallization. *Journal of Food Engineering, 75,* 551-559.

Ghotra, B. S., Dyal, S. D. & Narine, S. S. (2002). Lipid shortenings: a review. *Food Research International 35,* 1015-1048.

Golden, D. C., Ming, D. W. & Morris, R. V. (2010). Spherulitic growth of hematite under hydrothermal conditions: Insights into the growth mechanism of hematite spherules at Meridiani planum, Mars. *Lunar and Planetary Science Conference*: NASA-JSC.

Gordon, M. H., & Rahman, I. A. (1991). Effects of minor component on the crystallization of coconut oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, *68*(8), 577-579.

Hamm, W. (1995). Trends in edible oil fractionation. *Trends in Food Science & Technology, 6*, 121-126.

Hartel, R. W. (1999). Chocolate: Fat bloom during storage-The Influence of Structural Elements. [Online]. Accessed 14 May 2010. Available from http://www.pmca.com/firstpage/1999_13.pdf.

Henry, D., Eby, N., Goodge, J. & Mogk, D. (2007). Geochemical Instrumentation and Analysis: X-ray reflection in accordance with Bragg's Law [Online]. Accessed 1 April 2010. Available from http://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/BraggsLaw.html

Himawan, C., Starov, V. M. & Stapley, A. G. F. (2006). Thermodynamic and kinetic aspects of fat crystallization. *Advances in Colloid and Interface Science, 122,* 3-33.

Kaneko, F. (2001). Polymorphism and Phase Transitions of Fatty Acids and Acylglycerols. *Crystallization Processes in Fats and Lipid Systems*. New York: Marcel Dekker Inc.

Kellens, M., Gibon, V., Hendrix, M. & Greyt, W. D. (2007). Palm oil fractionation. *European Journal of Lipid Science and Technology, 109,* 336-349.

Koay, G. F. L., Guan, C. T., Abidin, S. Z., Ahmad, S. & Choong, T. S. Y. (2009). Habit and morphology study on the palm oil-based 9,10-dihydroxystearic acid (DHSA) crystals. *Materials Chemical and Physics, 114,* 14-17.

Koyano, T., & Sato, K. (2002). Physical Properties of Fats in Food. In: K. K. Rajah, *Fats in Food Technology* (pp. 1-29). Sheffield: Sheffield Academic Press.

Lakshminarayana, G., Chandrasekhara, T. R., & Ramalingaswamy, P. A. (1983). Varietal variation in content, characteristics and composition of mango seeds and fat. *Journal of the American Oil Chemists' Society, 60*(1)*,* 12-13.

Lipp, M. & Anklam, E. (1998). Review of cocoa butter and alternative fats for use in chocolate--Part A. Compositional data. *Food Chemistry*, *62*(1), 73-97.

Lipp, M., Simoneau, C., Ulberth, F., Anklam, E., Crews, C., Brereton, P., de Greyt, W., Schwack, W. & Wiedmaier, C. (2001). Composition of genuine cocoa butter and cocoa butter equivalents. *Journal of Food Composition and Analysis, 14*, 399-408.

Maleky, F. & Marangoni, A. G. (2008). Process development for continuous crystallization of fat under laminar shear. *Journal of Food Engineering, 89,* 399-407.

Marangoni, A. G. & Narine, S. S. (2002). Identifying key structural indicators of mechanical strength in networks of fat crystals. *Food Research International, 35,* 957-969.

Marangoni, A. G. & Mcgauley, S. E. (2003). Relationship between crystallization behavior and structure in cocoa butter. *Crystal Growth & Design, 3*(1), 95-108.

Marty, S. & Marangoni, A. G. (2009). Effects of cocoa butter origin, tempering procedure, and structure on oil migration kinetics. *Crystal Growth & Design, 9*(10), 4415-4423.

Minific, B. W. (1989). *Chocolate, Cocoa, and Confectionery*. New York: Science and Technology.

Mullin, J. W. (1993). *Crystallization*. Oxford: Butterworth-Heinemann Ltd.

Myerson, A. S. (2002). *Handbook of Industrial Crystallization*. Oxford: Butterworth-Heinemann Ltd.

Narine, S. S. & Humphrey, K. L. (2004). A comparison of lipid shortening functionality as a function of molecule ensemble and shear: microstructure, polymorphism, solid fat content and texture. *Food Research International, 37,* 28-38.

Narine, S. S. & Marangoni, A. G. (1999). Relating structure of fat crystal networks to mechanical properties: a review. *Food Research International, 32,* 227-248.

Nopens, I., Foubert, I., Graef, V. D., Laere, D. V., Dewettinck, K. & Vanrolleghem. (2008). Automated image analysis tool for migration fat bloom evaluation of chocolate coated food products. *Food Science and Technology, 41,* 1884-1891.

Omar, Z., Let, C. C., Seng, C. C. & Rashid, N. A. (2005). Crystallisation and rheological properties of hydrogenated palm oil and palm oil blends in relation to crystal networking. *European Journal of Lipid Science and Technology, 107*(9), 634-640.

Pajin, B. & Javanovic, O. (2005). Influence of high-melting milk fat fraction on quality and fat bloom stability of chocolate. *European Food Researchand Technology, 220,* 389-394.

Pearson, S. M., Karobliene, S., Skurkiene, J. & Zsigmond, I. (2006). Heat resistant confectionery. U.S. Patent No. 12106833

Perez-Martinez, D., Alvarez-Salas, C., Charo-Alonso, M., Dibildox-Alvarado, E. & Toro-Vazquez, J. F. (2007). The cooling rate effect on the microstructure and rheological properties of blends of cocoa butter with vegetable oils. *Food Research International 40,* 47-62.

Podmore, J. (2002). Bakery Fats. In: K. K. Rajah, *Fats in Food Technology.* (pp. 30-68). Sheffield: Sheffield Academic Press.

PORIM. (1995). *Palm oil Research Institute of Malaysia (PORIM) Test Method*. Bangi.

Puravankara, D., Boghra, V. & Sharma, R. S. (2000). Effect of antioxidant principles isolated from mango seed kernels on oxidative stability of buffalo ghee, *Journal of the Science of Food and Agriculture, 80,* 522-526.

Sabariah, S., Ali, A. R. M. & Chong, C. L. (1998). Chemical and physical characteristics of cocoa butter substitutes, milk fat and Malaysian cocoa butter blends. *Journal of the American Oil Chemists Society, 75*(8), 905-910.

Samsudin, S., & Rahim, M. A. A. (1996). Use of palm mid-fraction in white chocolate formulation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *71*, 483-490.

Sato, K. (1999). Solidification and phase transformation behavior of food fats - a review. *European Journal of Lipid Science and Technology, 101*, 467-474.

Sato, K. (2001). Molecular Aspects in Fat Polymorphism. *Crystallization and Solidification Properties of Lipids.* Illinois: AOCS Press.

Sato, K. (2001). Crystallization behaviour of fats and lipids - a review. *Journal of Chemical Engineering Science 56,* 2255-2265.

Simoneau, C., Hannaert, P. & Anklam, E. (1998). Detection and quantification of cocoa butter equivalents in chocolate model systems: analysis of triglyceride profiles by high resolution GC. *Food Chemistry*, *65*, 111-116.

Smith, K. W. (2005). *Fat Crystallization - Fundamentals*. Bedford: Unilever Research Colworth.

Solis-Fuentes, J. A., & Duran-de-Bazua, M. C. (2004). Mango seed uses: thermal behaviour of mango seed almond fat and its mixtures with cocoa butter. *Bioresource Technology*, *92*(1), 71-78.

Solis-Fuentes, J. A., & Duran-de-Bazua, M. C. (2005). Recovery fats and oils from agro-industrial wastes and by-products for use in industrial applications. *Journal of Applied Sciences*, *5(6)*, 983-987.

Solis-Fuentes, J. A., Hernandez-Medel, M. R. & Duran-de-Bazua, M. C. (2005). Determination of the predominant polymorphic form of mango almond fat by DSC and XRD. *European Journal of Lipid Science and Technology*, *107*, 395-401.

Sonwai, S. & Mackley, M. R. (2006). The effect of shear on the crystallization of cocoa butter. *Journal of the American Oil Chemists Society, 83*(7), 583-596.

Sonwai, S. & Roussean, D. (2006). Structure evolution and bloom formation in temperd cocoa butter during long-term storage. *European Journal of Lipid Science and Technology, 108*, 735-745.

Stewart, I., & Kristott, J. (2004). European union chocolate directive defines vegetable fats for chocolate. *Journal of Lipid Technology*, *16*, 11-14.

Stewart, I. M. & Timms, R. E. (2002). Fats for Chocolate and Sugar Confectionery. In: K. K. Rajah, *Fats in Food Technology.* (pp. 159-191). Sheffield: Sheffield Academic Press.

Talbot, G. (1999). Vegetable Fats. In: S. T. Beckett, *Industrual Chocolate Manufacture and Use.* (pp. 307-322). Oxford: Blackie Academic & Professional.

Timms, R. E. (1994). Physical Chemistry of Fats. In: D. P. J. Moran, & K. K. Rajah, *Fats in Food Products.* (pp. 1-28). London: Blackie Academic & Professional.

Undurraga, D., Markovits, A., & Erazo, S. (2001). Cocoa butter equivalent through enzymic interesterification of palm oil midfraction. *Journal of Process Biochemistry*, *36*(10), 933-939.

Wikipedia enclycopedia. (2009). Slip melting point [Online]. Accessed 27 August 2009. Available from http://en.wikipedia.org/wiki/Slip_melting_point.

Wikipedia enclycopedia. (2010). Dark field microscopy [Online]. Accessed 2 March 2010. Available from http://en.wikipedia.org/wiki/Dark_field_microscopy.

Wikipedia enclycopedia. (2010). X-ray scattering techniques [Online]. Accessed 24 February 2010. Available from http://en.wikipedia.org/wiki/X-ray_scattering_techniques

Wolniak, S. M. (2004). Principles of Microscopy [Online]. Accessed 2 March 2010. Available from http://www.life.umd.edu/CBMG/faculty/wolniak/wolniakmicro.html.

Zaidul, I. S. M., Nik Norulaini, N. A., Mohd Omar, A. K., & Smith, J. R. L. (2007). Blending of supercritical carbon dioxide (SC-CO2) extracted palm kernel oil fractions and palm oil to obtain cocoa butter replacers. *Journal of Food Engineering*, *78*(4), 1397-1409.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การทำให้น้ำมันบริสุทธิ์ตามวิธีของ Wesson method

การทำให้น้ำมันบริสุทธิ์ตามวิธีของ Wesson method (Mehlenbacher, 1970)

ละลายน้ำมัน (crude fat) ที่สกัดได้ใน petroleum ether ด้วยอัตราส่วนของ
น้ำมัน : petroleum ether เท่ากับ 1 : 5 (w/v)

↓

เติม 14% โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 ml : 1 กรัมของน้ำมัน

↓

คนอย่างรุนแรงเป็นเวลา 3 นาที

↓

เติม 50% เอทานอล ในอัตราส่วนของ
น้ำมัน : เอทานอล เท่ากับ 1:2.5 (w/v) ขณะคน

↓

ตั้งทิ้งไว้ให้เกิดการแยกชั้นโดยชั้นบนเป็นชั้นของอีเทอร์ที่มีน้ำมันละลายอยู่

↓

เติมอีเทอร์เพื่อสกัดซ้ำ

↓

ตั้งไว้ให้เกิดการแยกชั้นใช้ส่วนบน

↓

ระเหยสารละลายอีเทอร์โดยเครื่อง rotavapour

↓

เก็บน้ำมันที่ได้ที่ 5°C ให้พ้นจากแสงจนกว่าจะทำการวิเคราะห์

ที่มา : Solis-Fuentes และ Duran-de-Bazua (2004)

ภาคผนวก ข

การเตรียมเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมัน

การเตรียมเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมัน

(Preparation of methyl eters; Boron trifluoride method)

ชั่งตัวอย่างลง flask ประมาณ 0.4000 g เติม NaOH/MtOH 6 ml และ boiling chip

↓

ต่อเข้ากับ condenser และ reflux จนกระทั่งหยดน้ำมันหายไป 10 นาที

↓

เติม BF_3 7 ml ผ่าน condenser ต้มต่อ 2 นาที

↓

เติม heptane 5 ml ผ่าน condenser ต้มต่อ 1 นาทีหรือนานกว่า

↓

ทิ้งให้เย็นเพื่อให้เกิดการควบแน่น

↓

เติมสารละลายเกลืออิ่มตัวประมาณ 15 ml

↓

ปิด flask และเขย่าอย่างรุนแรงเป็นเวลา 15 วินาที ขณะที่สารละลายยังอุ่นอยู่

↓

เติมสารละลายเกลืออิ่มตัวจนชั้นของ heptane ขึ้นมาที่คอ flask

↓

ปิเปตสารละลายส่วนบนไปใส่ glass stopper test tube

↓

เติม anhydrous Na_2SO_4 เล็กน้อยเพื่อกำจัด H_2O

↓

ถ้าจำเป็นให้เจือจางสารละลายให้มีความเข้มข้น 5-10% สำหรับ GC

ที่มา : AOAC (2000)

ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์ค่าสปอนนิฟิเคชันตามวิธีของ PORIM test method

การวิเคราะห์ค่าสปอนนิฟิเคชันตามวิธีของ PORIM test method no. p 3.1, 1995

ละลายตัวอย่างที่อุณหภูมิ 70-80°C และทำการ homogenize และกรองด้วยกระดาษกรอง เพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนออกก่อน

↓

ชั่งตัวอย่างเหลวให้มีน้ำหนักแน่นอน 2 ± 0.005 กรัม ลงใน conical flask

↓

เติมสารละลายเอทานอลิกโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 25 ml และ boiling aids เล็กน้อย

↓

ต่อ conical flask กับ reflux condenser จากนั้นต้มเพื่อ reflux อย่างช้า ๆ เป็นเวลาอย่างน้อย 60 นาที เขย่า flask เป็นระยะตลอดการต้ม

↓

conical flask กับ reflux condenser ถูกทำให้เย็นลงเล็กน้อยก่อนล้างภายใน condenser ด้วยน้ำกลั่นจำนวนเล็กน้อย

↓

เติม Phenolphthalein 1 ml แล้วไตเตรตด้วยสารละลาย 0.5 N HCl จนกระทั่งสีชมพูหมดไป

ที่มา : Zaidul และคณะ (2007)

ภาคผนวก ง

การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดโดยประยุกต์ใช้วิธีของ AOCS

การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด

โดยประยุกต์ใช้วิธีของ AOCS Methods Cd 3a-63

วิเคราะห์ค่าความเป็นกรดโดยประยุกต์ใช้วิธีของ AOCS Methods Cd 3a-63 (1989) ดังนี้

ชั่งตัวอย่างเหลว 5 กรัมลงใน Erlenmeyer flask ขนาด 500 มิลลิลิตร

↓

เติมสารละลาย neutralized solvent (isopropanol:toluene = 50:50 v/v) 100 มิลลิลิตร

↓

จุ่มลงใน water bath ที่ควบคุมให้มีอุณหภูมิประมาณ 40°C

↓

เติม 1% Phenolphthalein 0.5 มิลลิลิตร และไตเตรตทันทีด้วยสารละลายมาตรฐาน 0.1 N โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เขย่าเบา ๆ ตลอดจนกระทั่งเป็นสีชมพูประมาณ 30 วินาที

หมายเหตุ ทำตัวอย่างละ 2 ซ้ำ พร้อมกับทำ blank ไปด้วยภายใต้สภาวะเดียวกัน

ที่มา : AOCS (1989)

ภาคผนวก จ

การวิเคราะห์ค่า SFC ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยใช้ pulse-Nuclear Magnetic Resonance

การวิเคราะห์ค่า SFC ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

โดยใช้ pulse-Nuclear Magnetic Resonance หรือ p-NMR

ทำการควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่างก่อนการวัดค่า SFC ด้วยเครื่อง p-NMR ตามกรรมวิธีของ AOCS Cd 16b-93 revised in 2000; Direct Method ดังนี้

ให้ความร้อนกับตัวอย่างไขมันที่อุณหภูมิ 80-100°C เป็นเวลา 15 นาที
เพื่อให้ตัวอย่างเกิดการละลาย

↓

บรรจุตัวอย่างลงในหลอดทดลองสำหรับเทคนิค p-NMR
(เส้นผ่าศูนย์กลาง = 10 mm.) ให้มีระดับของตัวอย่างสูงประมาณ 4 เซนติเมตร

↓

ให้ความร้อนกับตัวอย่างที่บรรจุในหลอดทดลองจนมีอุณหภูมิประมาณ 60°C
เป็นเวลามากกว่า 5 นาทีแต่ไม่เกิน 15 นาที เพื่อทำการละลายผลึกไขมันที่เป็นของแข็งทั้งหมด

↓

ลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็วไปที่ประมาณ 0°C เป็นเวลา 60 นาที (±2นาที)

↓

เพิ่มอุณหภูมิไปที่อุณหภูมิที่ต้องการวัดค่า SFC แล้วทำการคงไว้
ที่อุณหภูมินั้น 30-35 นาที เพื่อให้ตัวอย่างไขมันเข้าสู่สภาวะสมดุล

↓

วัดค่า SFC ด้วยเครื่อง p-NMR

↓

พลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า SFC กับอุณหภูมิ (°C)

ที่มา : AOCS (2000)

ภาคผนวก ฉ

การหาค่า Slip Melting Point (SMP)

การหาค่า Slip Melting Point (SMP)

เป็นการหาอุณหภูมิที่ตัวอย่างเกิดการหลอมเหลวอย่างรวดเร็วเมื่อได้รับความร้อน แล้วเกิดการเคลื่อนที่ขึ้นภายใน capillary tubes ซึ่งเป็นหลอดสำหรับบรรจุตัวอย่าง โดยมีขั้นตอนตาม PORIM test method no. p 4.2, 1995 (Zaidul และคณะ, 2007) ดังนี้

ละลายตัวอย่างและกรองด้วยกระดาษกรอง

↓

นำ capillary tubes ที่สะอาด 3 หลอด จุ่มลงในตัวอย่างเหลวให้ตัวอย่างในหลอดสูง 10 มิลลิเมตร

↓

ทำให้ตัวอย่างแข็งตัวด้วยน้ำแข็ง (ระวังไม่ให้ปลายเปิดด้านที่มีไขมันสัมผัสกับน้ำแข็ง)

↓

เช็ดปลายหลอดอย่างรวดเร็วด้วยทิชชู ใส่หลอดตัวอย่างในหลอดทดลอง

↓

นำหลอดทดลองใส่เครื่องทำความเย็นที่อุณหภูมิ $10 \pm 0.1^{\circ}C$ เป็นเวลา 16 ชั่วโมง

↓

นำหลอดตัวอย่างออกมารัดติดกับเทอร์โมมิเตอร์ให้ปลายของหลอดตัวอย่าง
และเทอร์โมมิเตอร์มีระดับเท่ากัน

↓

นำไปจุ่มลงในบีกเกอร์ที่มีน้ำกลั่น 400 มิลลิลิตร ให้ปลายลึก 30 มิลลิเมตร

↓

ปรับอุณหภูมิของบีกเกอร์ให้มีอุณหภูมิเริ่มต้นต่ำกว่าค่า SMP ของตัวอย่าง 5-10$^{\circ}C$ โดยใช้น้ำแข็ง

↓

กวนน้ำในบีกเกอร์ด้วย magnetic stirrer แล้วเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา $1 \pm 0.1^{\circ}C/min$

↓

เมื่อถึง slip point ลดอัตราการให้ความร้อนลงเหลือ $0.5 \pm 0.1^{\circ}C/min$

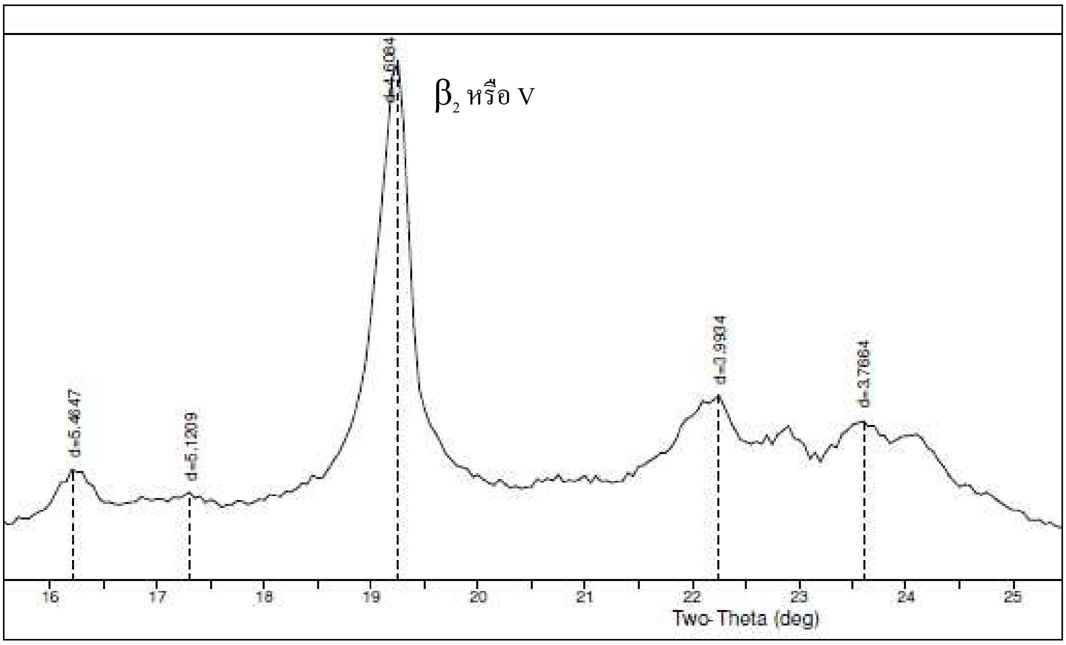
↓

ให้ความร้อนจนกระทั่งระดับของไขมันในหลอดสูงขึ้น จดอุณหภูมิของน้ำ ณ จุดนั้น
และคำนวณหาค่าเฉลี่ย

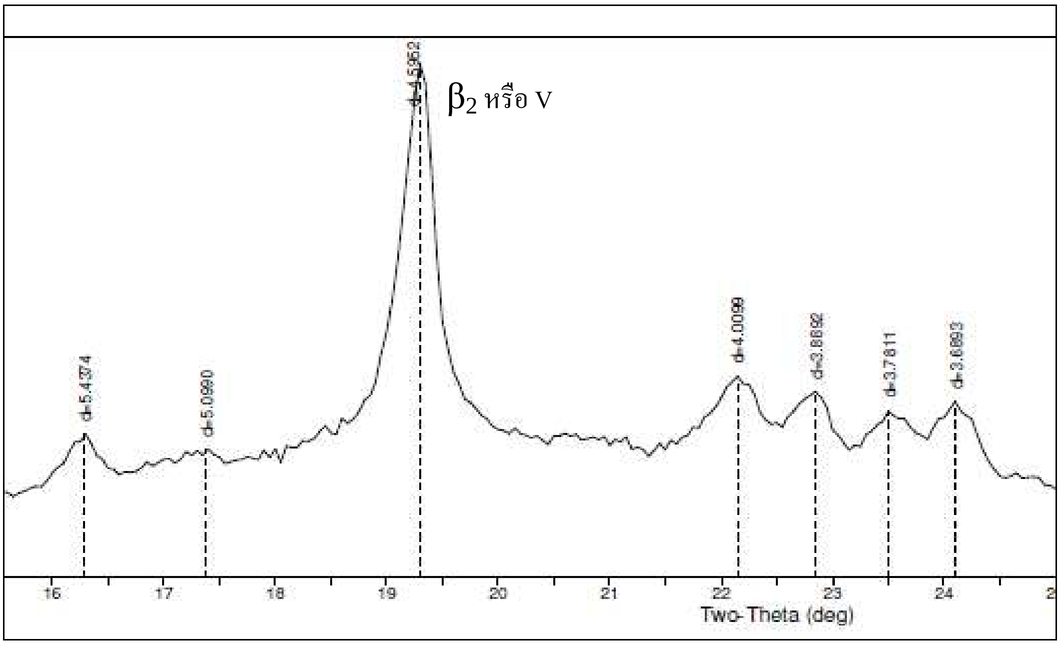
ภาคผนวก ช

X-ray diffraction pattern จากการทำ tempering ตัวอย่างไขมัน

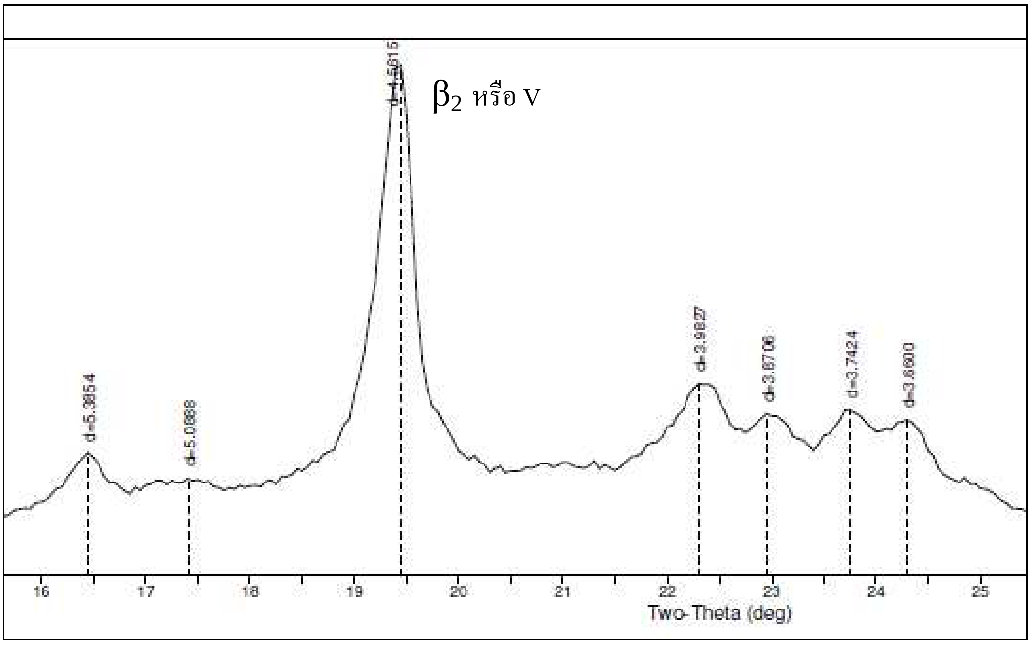
X-ray diffraction pattern จากการทำ tempering ตัวอย่างไขมัน



ภาพที่ 27 X-ray diffraction pattern จากการทำ tempering ตัวอย่างเนยโกโก้



ภาพที่ 28 X-ray diffraction pattern จากการทำ tempering ตัวอย่าง CBE

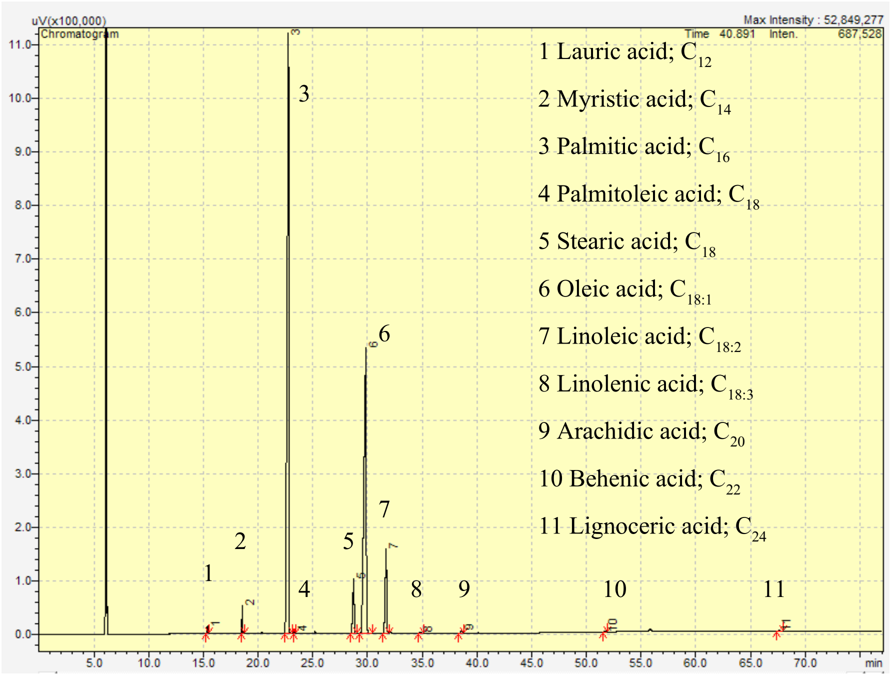


ภาพที่ 29 X-ray diffraction pattern จากการทำ tempering ตัวอย่างไขมันผสมระหว่าง CEB และ CB ในอัตราส่วน 1:5.64 (w/w) หรือ MIX

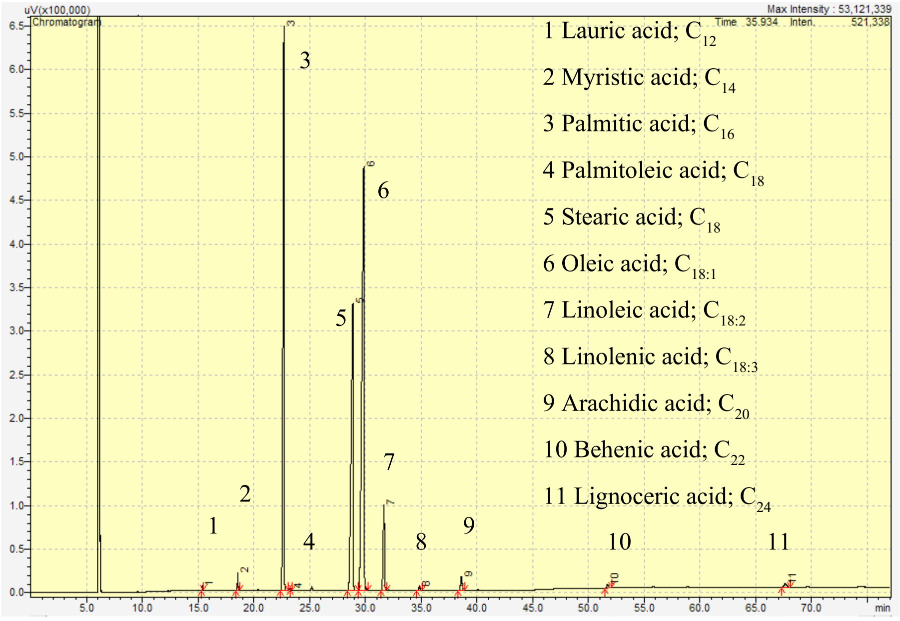
ภาคผนวก ซ

โครมาโตแกรมของไขมันผสมและเนยโกโก้

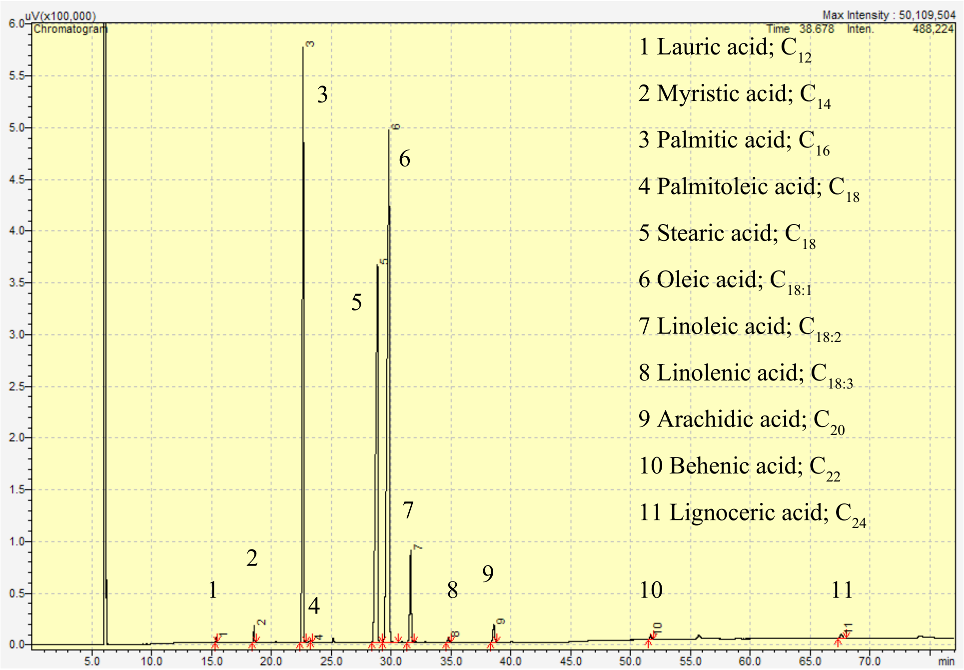
โครมาโตแกรมของไขมันผสมและเนยโกโก้



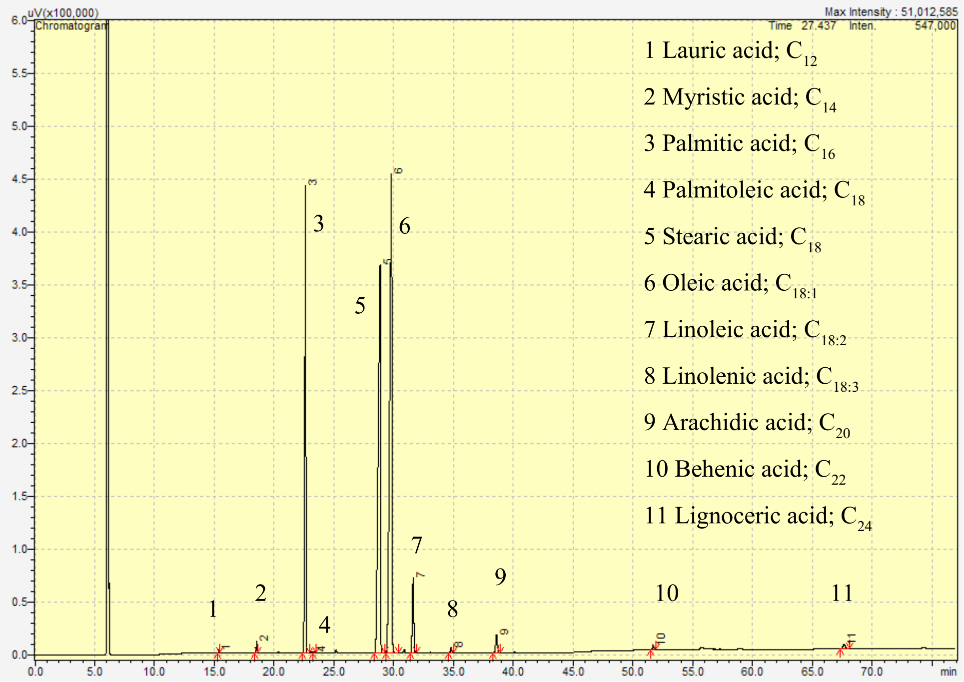
ภาพที่ 30 โครมาโตแกรมของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของไขมันผสมอัตราส่วน 0:100 (w/w)



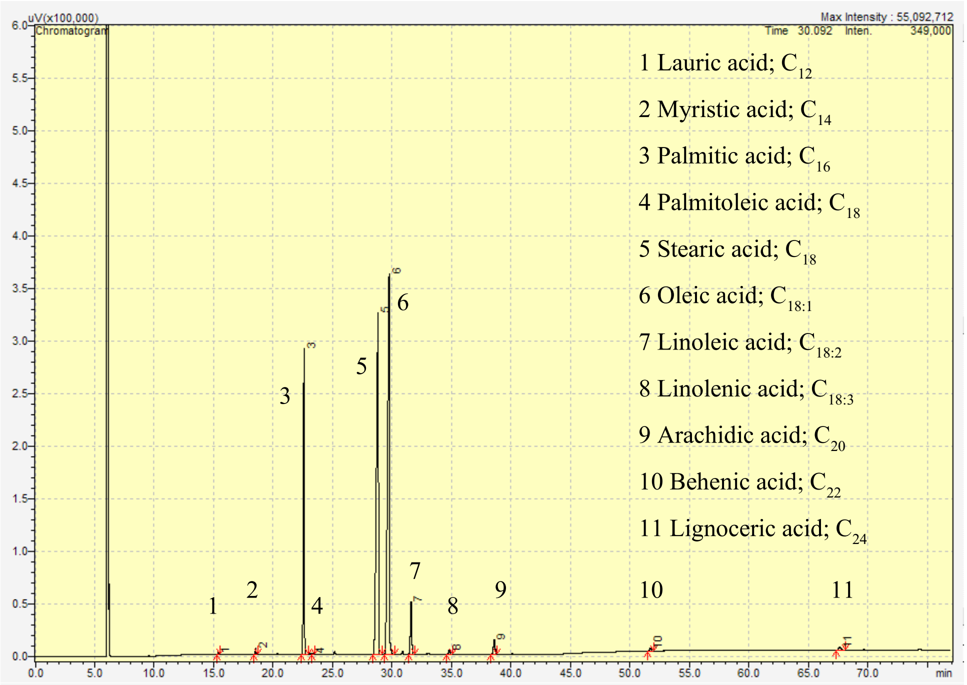
ภาพที่ 31 โครมาโตแกรมของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของไขมันผสมอัตราส่วน 50:50 (w/w)



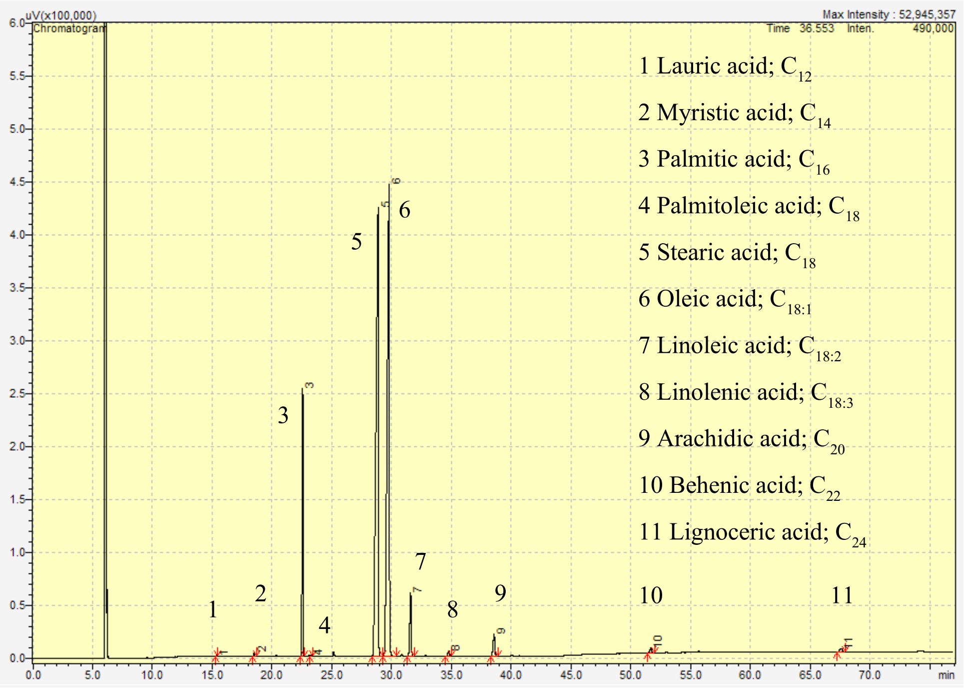
ภาพที่ 32 โครมาโตแกรมของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของไขมันผสมอัตราส่วน 60:40 (w/w)



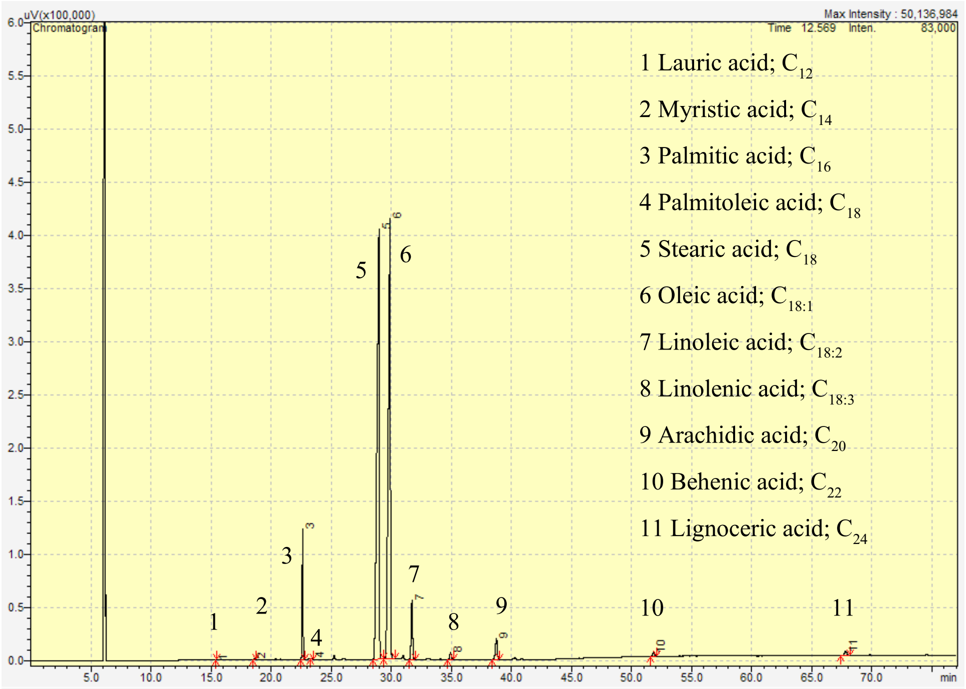
ภาพที่ 33 โครมาโตแกรมของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของไขมันผสมอัตราส่วน 70:30 (w/w)



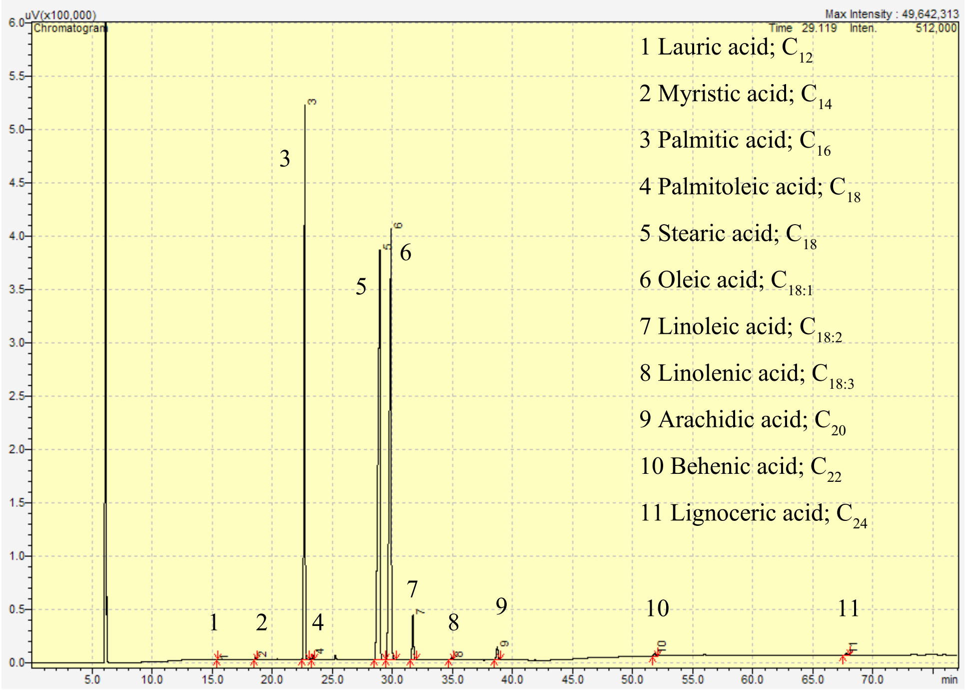
ภาพที่ 34 โครมาโตแกรมของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของไขมันผสมอัตราส่วน 80:20 (w/w)



ภาพที่ 35 โครมาโตแกรมของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของไขมันผสมอัตราส่วน 90:10 (w/w)



ภาพที่ 36 โครมาโตแกรมของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของไขมันผสมอัตราส่วน 100:0 (w/w)



ภาพที่ 37 โครมาโตแกรมของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของเนยโกโก้

ภาคผนวก ฌ

ตารางแสดงร้อยละของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของ
ไขมันผสมอัตราส่วนต่าง ๆ และเนยโกโก้

ตารางที่ 11 ตารางแสดงร้อยละของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของไขมันผสมอัตราส่วนต่าง ๆ และเนยโกโก้

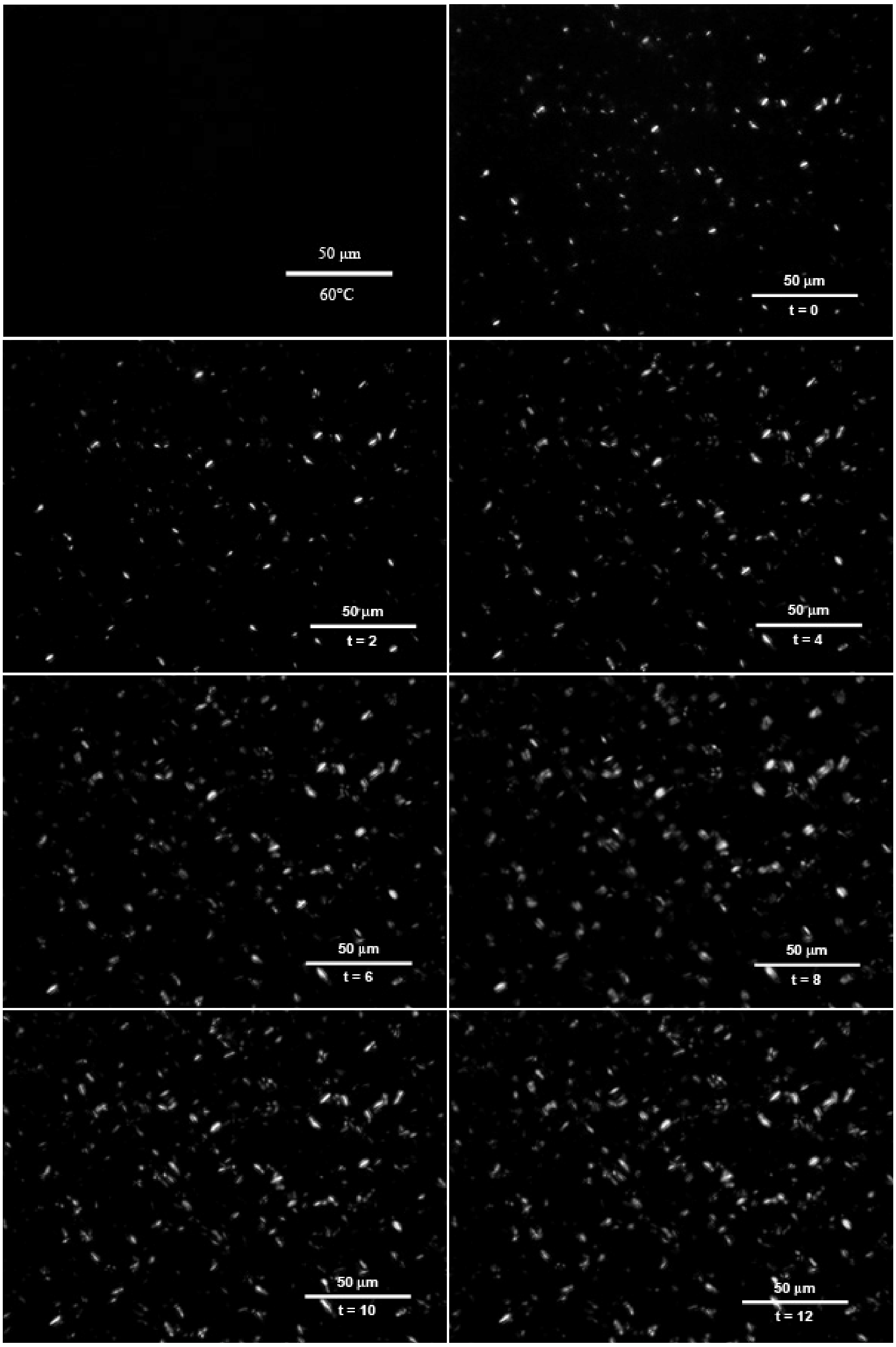
ชนิดของกรดไขมัน	ร้อยละของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของ							
	MAF (100:0)	**90:10**	**80:20**	**70:30**	**60:40**	**50:50**	**PMF (0:100)**	**เนยโกโก้**
กรดลอริก (C12)	0.011 ± 0.001	0.047 ± 0.002	0.080 ± 0.002	0.090 ± 0.004	0.122 ± 0.004	0.134 ± 0.000	0.245 ± 0.004	-
กรดไมริสติก (C14)	0.033 ± 0.001	0.138 ± 0.003	0.258 ± 0.003	0.327 ± 0.008	0.432 ± 0.003	0.516 ± 0.001	1.000 ± 0.007	0.072± 0.002
กรดปาล์มมิติก (C16)	5.387 ± 0.026	10.338 ± 0.096	16.264 ± 0.071	19.844 ± 0.148	24.926 ± 0.051	29.112 ± 0.051	51.645 ± 0.134	25.816 ± 0.133
กรดปาลมิโตเลอิก (C16:1)	0.045 ± 0.036	0.044 ± 0.000	0.081 ± 0.000	0.070 ± 0.001	0.056 ± 0.001	0.053 ± 0.002	0.092 ± 0.000	0.169 ± 0.001
กรดสเตียริก (C18)	46.551 ± 0.090	42.837 ± 0.073	37.249 ± 0.051	33.932 ± 0.056	28.641 ± 0.067	24.673 ± 0.027	4.211 ± 0.014	36.531 ± 0.036
กรดโอเลอิก (C18:1)	41.094 ± 0.088	40.022 ± 0.114	39.604 ± 0.024	39.217 ± 0.031	39.121 ± 0.074	38.691 ± 0.050	35.632 ± 0.084	33.485 ± 0.101
กรดลิโนเลอิก (C18:2)	3.779 ± 0.010	3.578 ± 0.010	3.942 ± 0.009	4.160 ± 0.016	4.608 ± 0.011	5.039 ± 0.008	6.636 ± 0.025	2.447 ± 0.007
กรดลิโนเลนิก (C18:3)	0.508 ± 0.003	0.389 ± 0.002	0.359 ± 0.001	0.324 ± 0.001	0.283 ± 0.002	0.269 ± 0.008	0.104 ±0.001	0.142 ± 0.001
กรดอราคิดิก (C20)	1.699 ± 0.008	1.609 ± 0.051	1.371 ± 0.016	1.282 ± 0.017	1.110 ± 0.008	0.969 ± 0.012	0.277 0.004±	0.931 ± 0.004
กรดบีฮีนิก (C22)	0.351 ± 0.029	0.425 ± 0.087	0.314 ± 0.011	0.312 ± 0.041	0.281 ± 0.033	0.223 ± 0.040	0.054 ±0.003	0.202 ± 0.007
กรดลิกโนเซริก (C24)	0.544 ± 0.132	0.573 ± 0.153	0.479 ± 0.038	0.444 ± 0.068	0.421 ± 0.058	0.322 ± 0.070	0.104 ±0.016	0.201 ± 0.016

หมายเหตุ ค่าที่แสดงเป็นร้อยละของพื้นที่ใต้กราฟของโครมาโตรแกรม (ค่าเฉลี่ยของ triplicates ± standard deviation (SD))

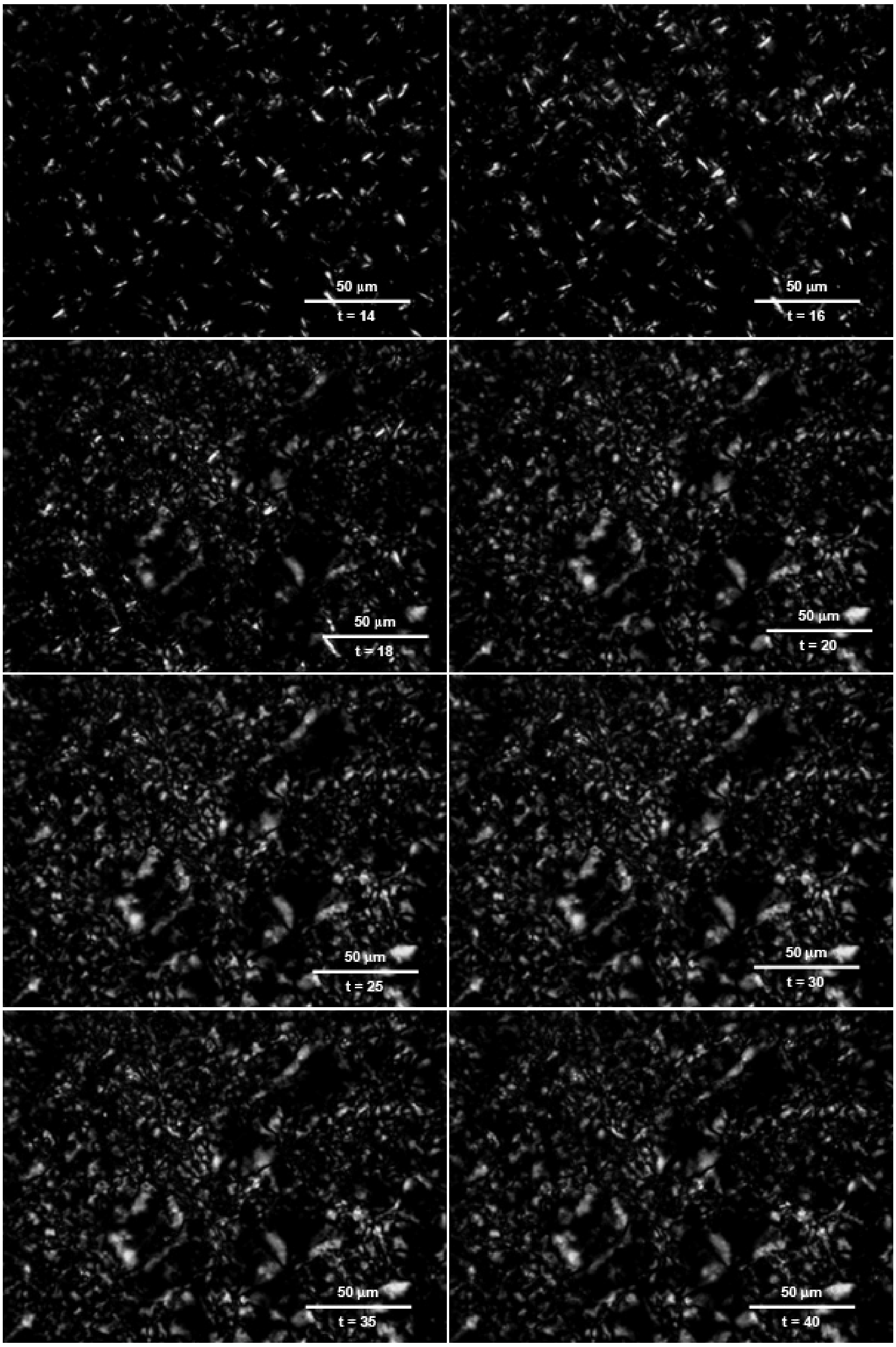
ภาคผนวก ญ

ภาพถ่ายพฤติกรรมการตกผลึกของไขมันจากกล้องจุลทรรศน์

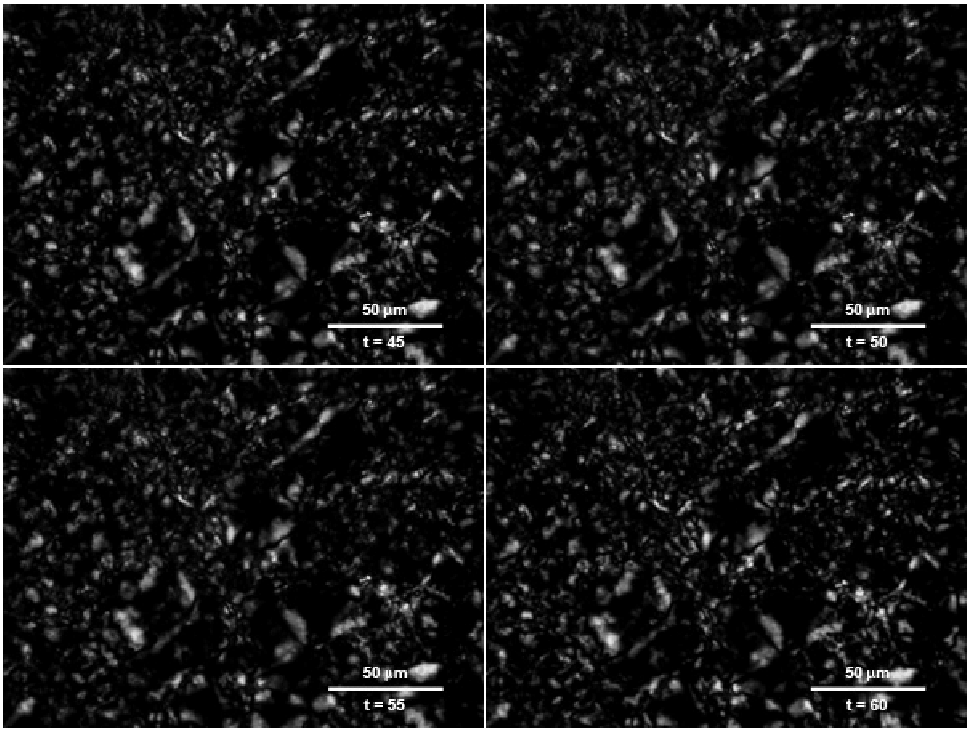
ภาพถ่ายพฤติกรรมการตกผลึกของไขมันจากกล้องจุลทรรศน์ (Polarized light microscopy)



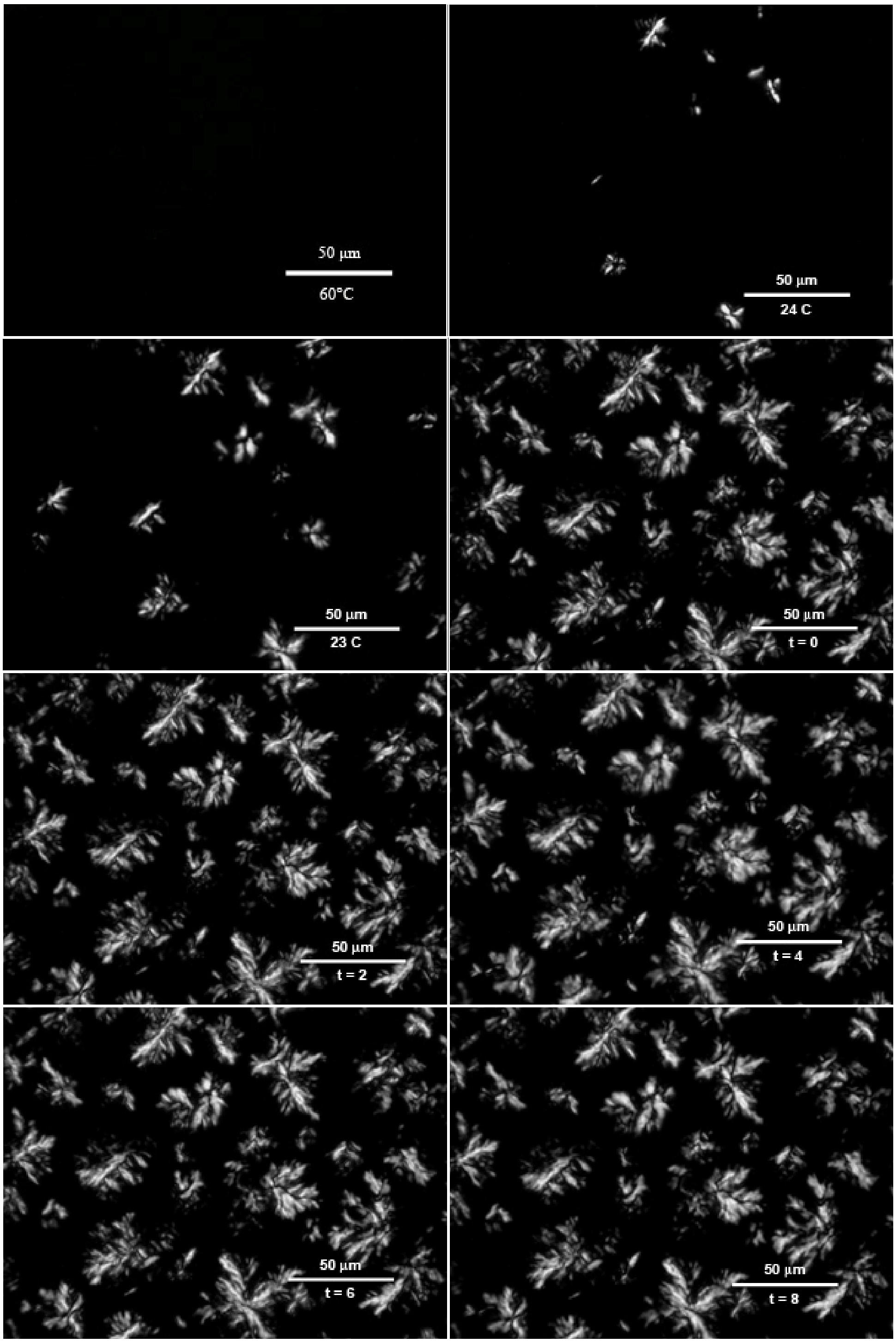
ภาพที่ 38 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของ MAF ตั้งแต่นาทีที่ 0-12 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 500 เท่า



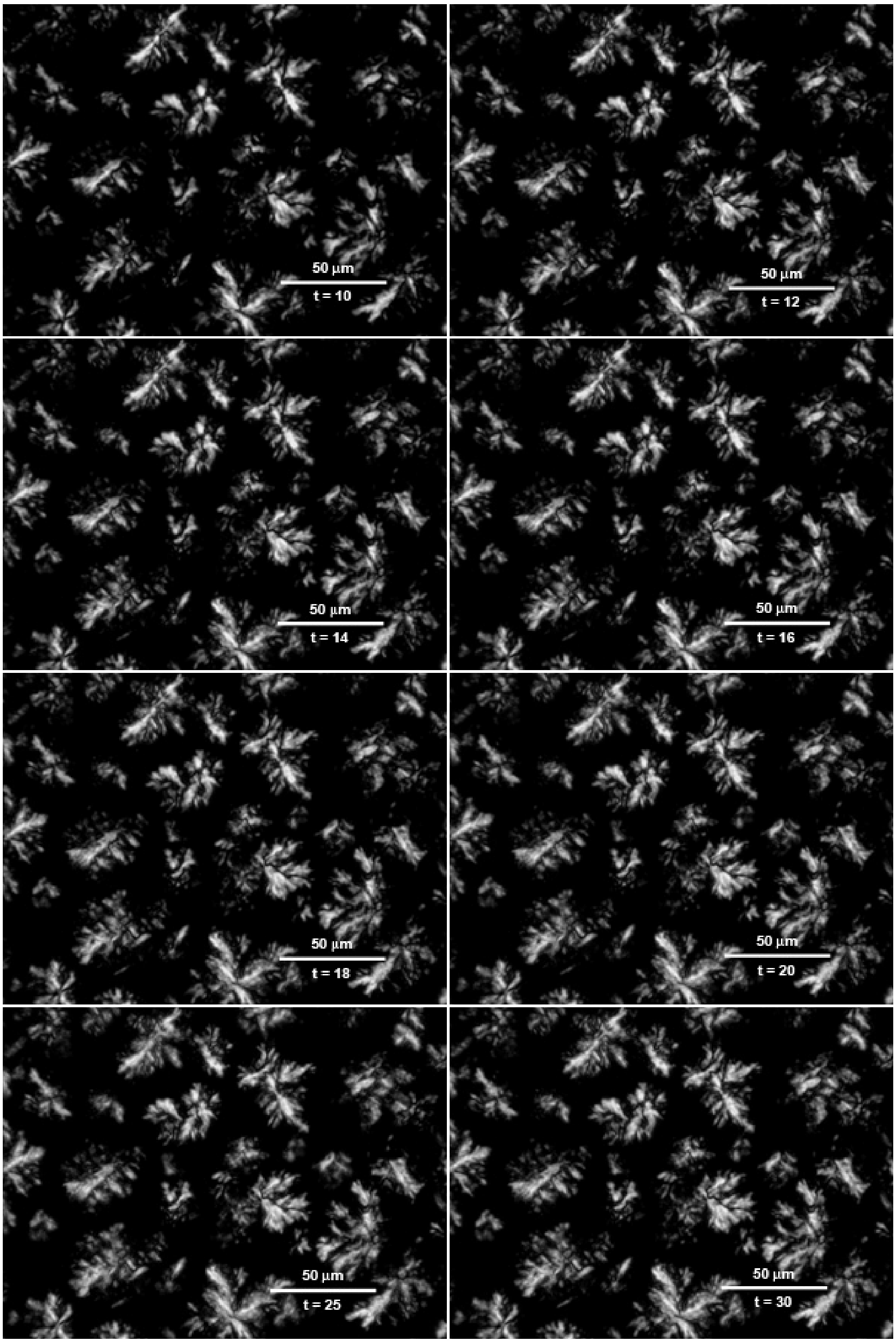
ภาพที่ 39 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของ MAF ตั้งแต่นาทีที่ 14-40 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 500 เท่า



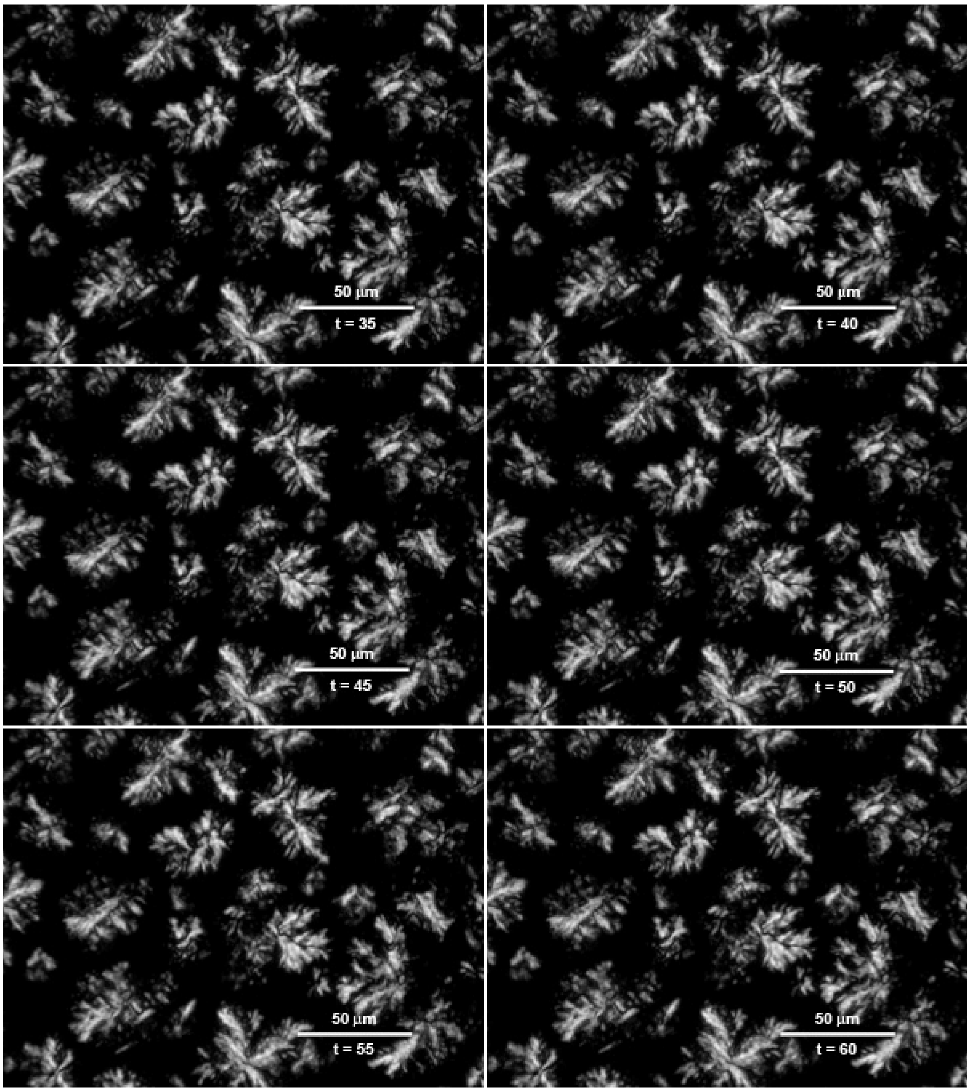
ภาพที่ 40 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของ MAF ตั้งแต่นาทีที่ 45-60 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 500 เท่า



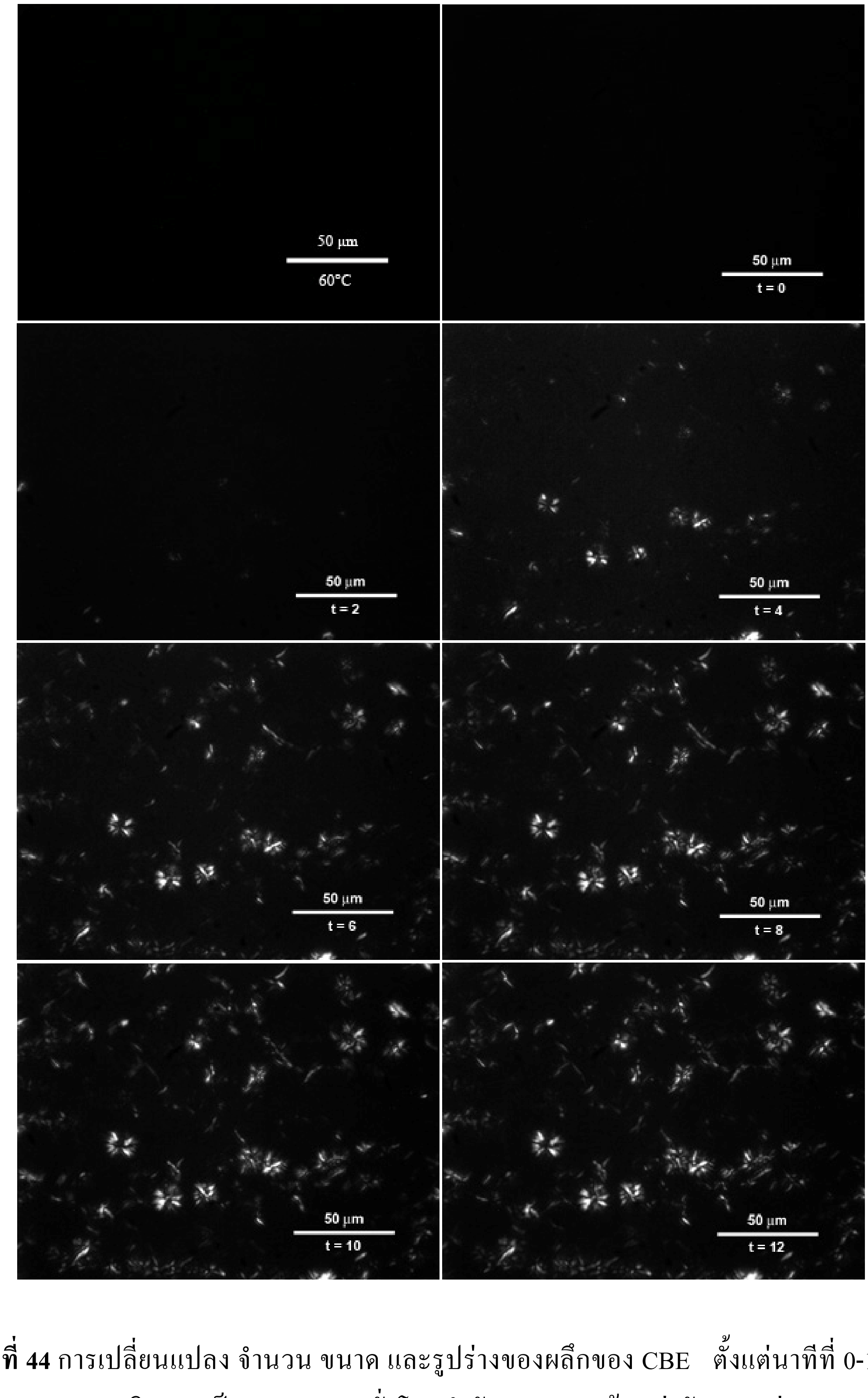
ภาพที่ 41 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของ PMF ที่อุณหภูมิ 24°C, 23°C, 21°C และนาทีที่ 0-8 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 500 เท่า



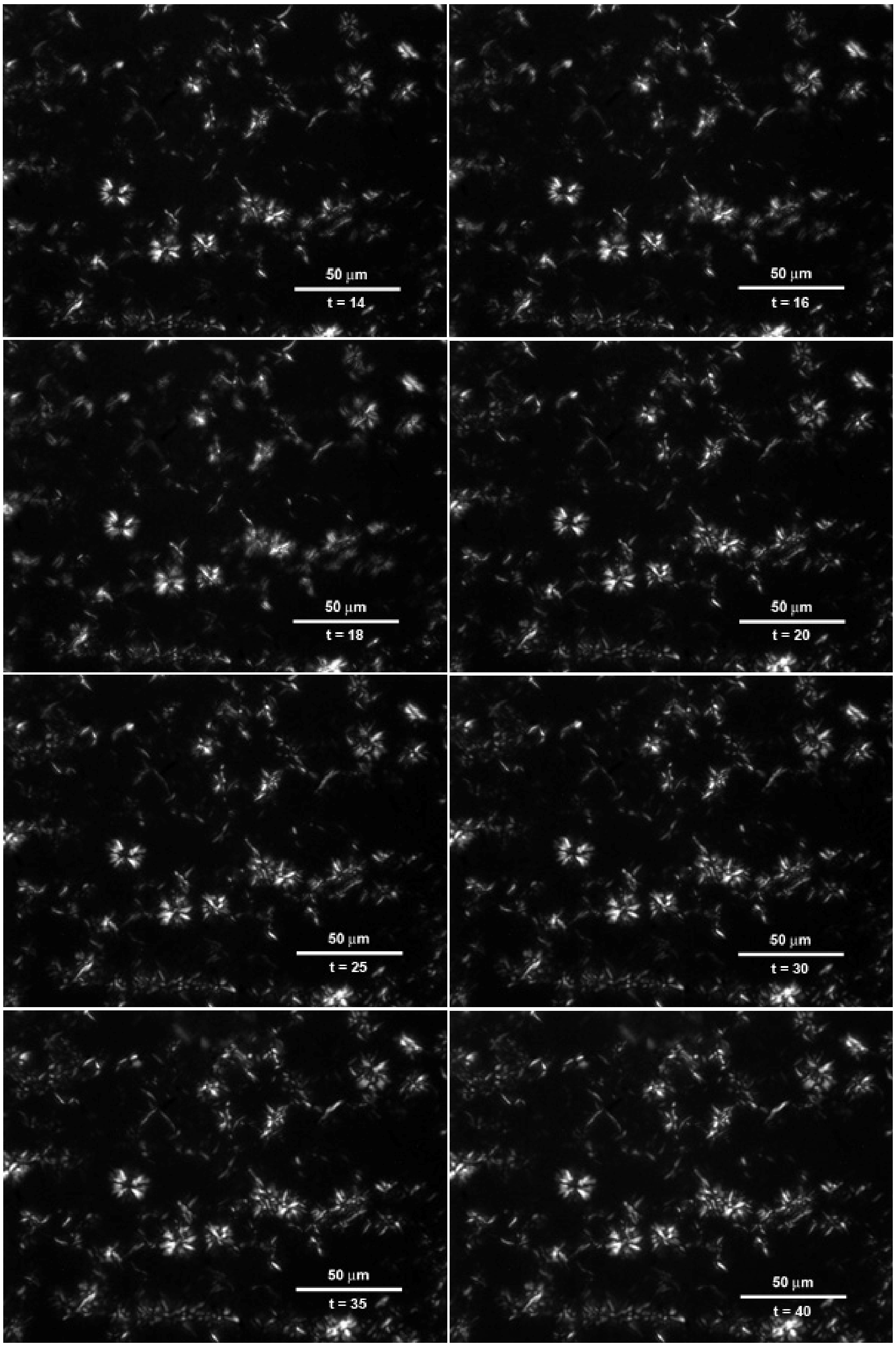
ภาพที่ 42 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของ PMF ตั้งแต่นาทีที่ 10-30 ที่ อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 500 เท่า



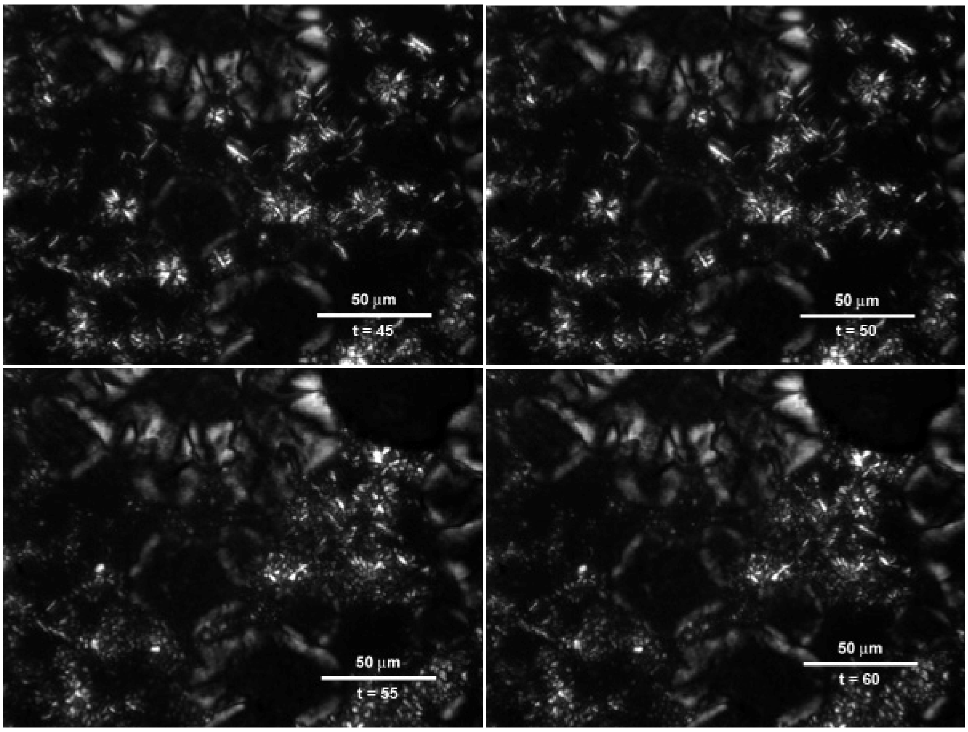
ภาพที่ 43 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของ PMF ตั้งแต่นาทีที่ 35-60 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 500 เท่า



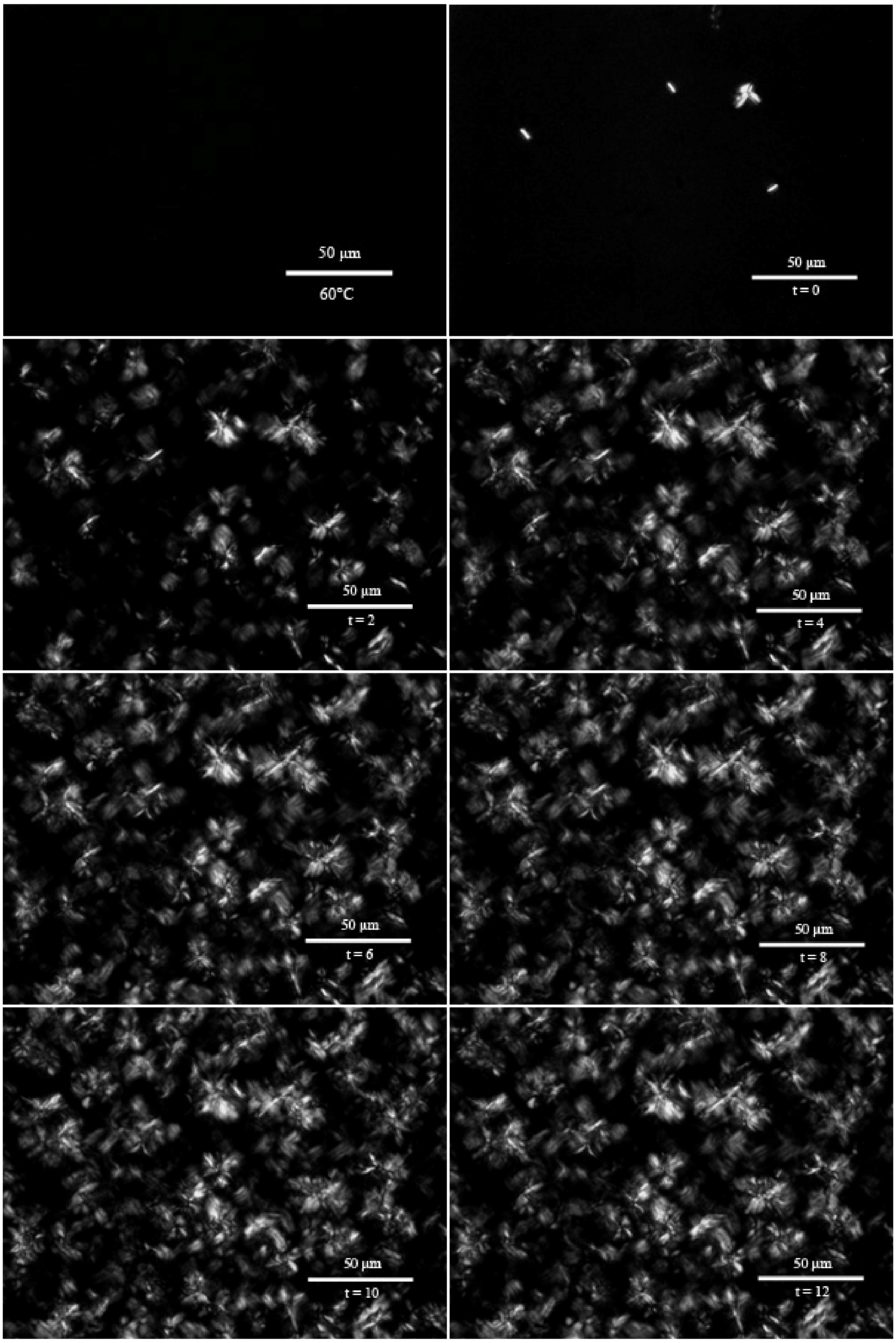
ภาพที่ 44 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของ CBE ตั้งแต่นาทีที่ 0-12 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 500 เท่า



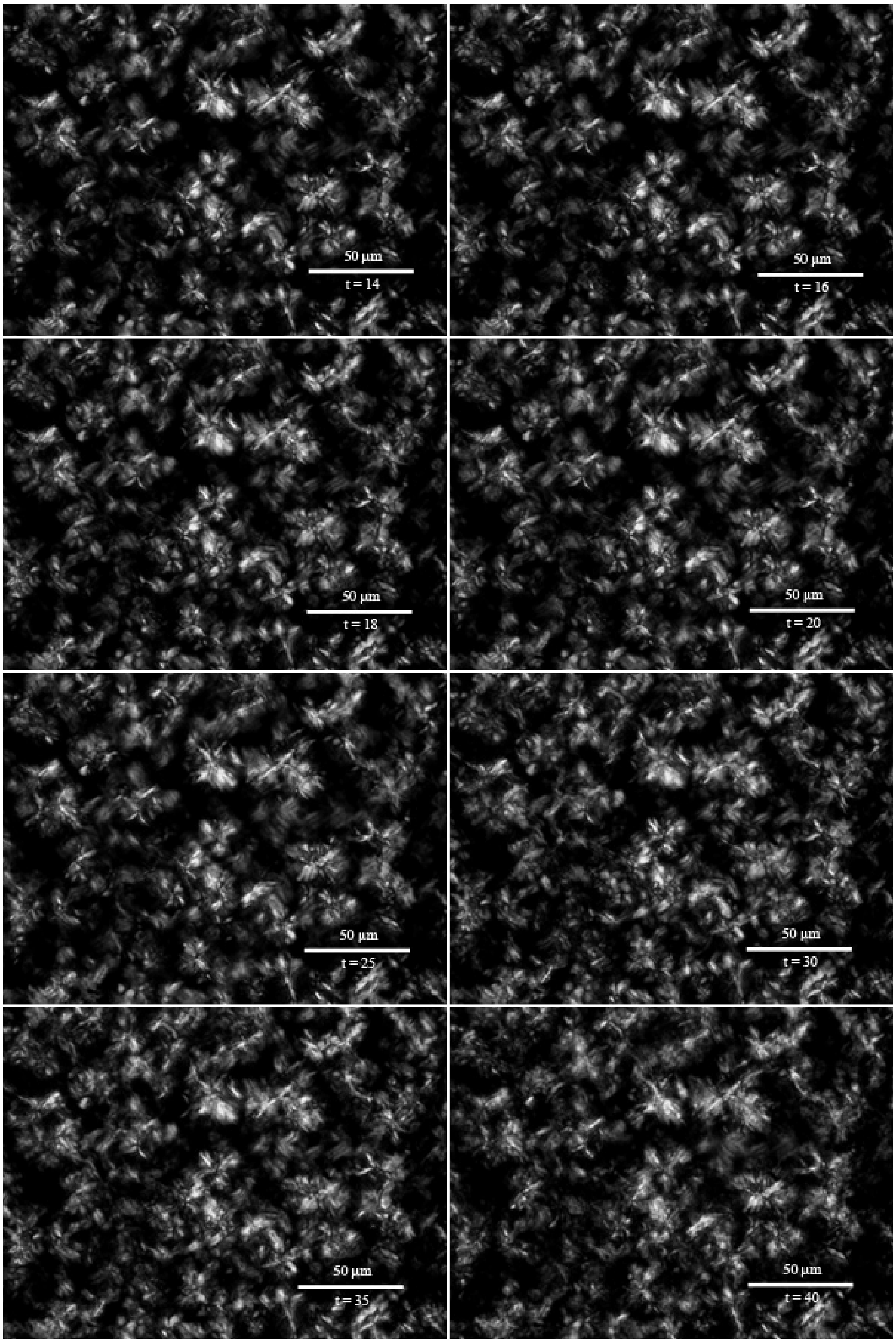
ภาพที่ 45 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของ CBE ตั้งแต่นาทีที่ 14-40 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 500 เท่า



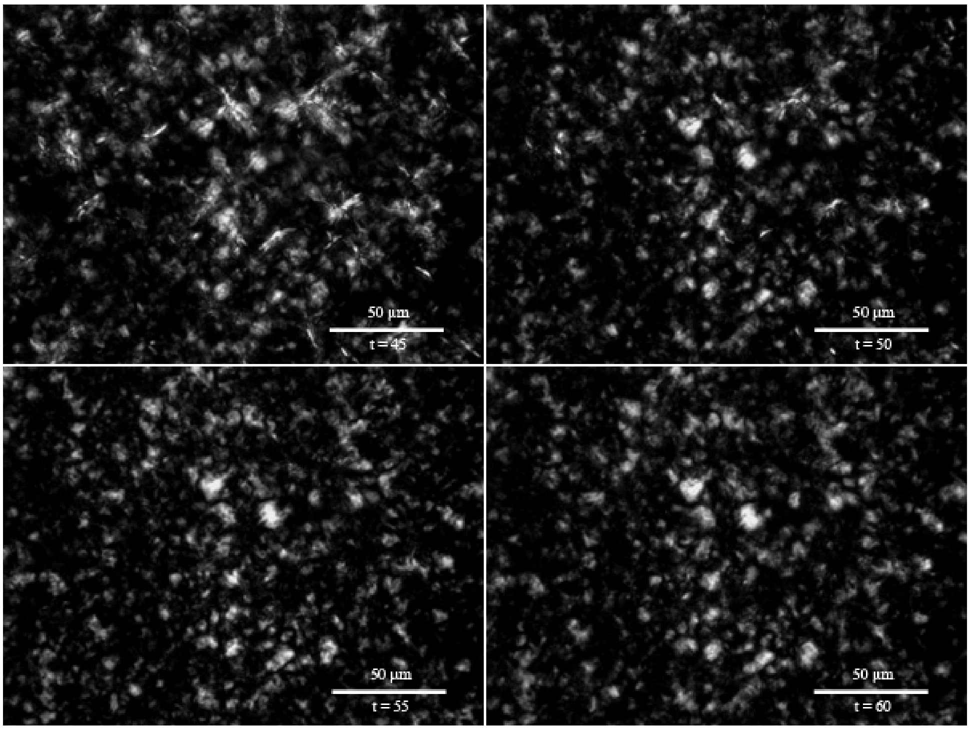
ภาพที่ 46 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของ CBE ตั้งแต่นาทีที่ 45-60 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 500 เท่า



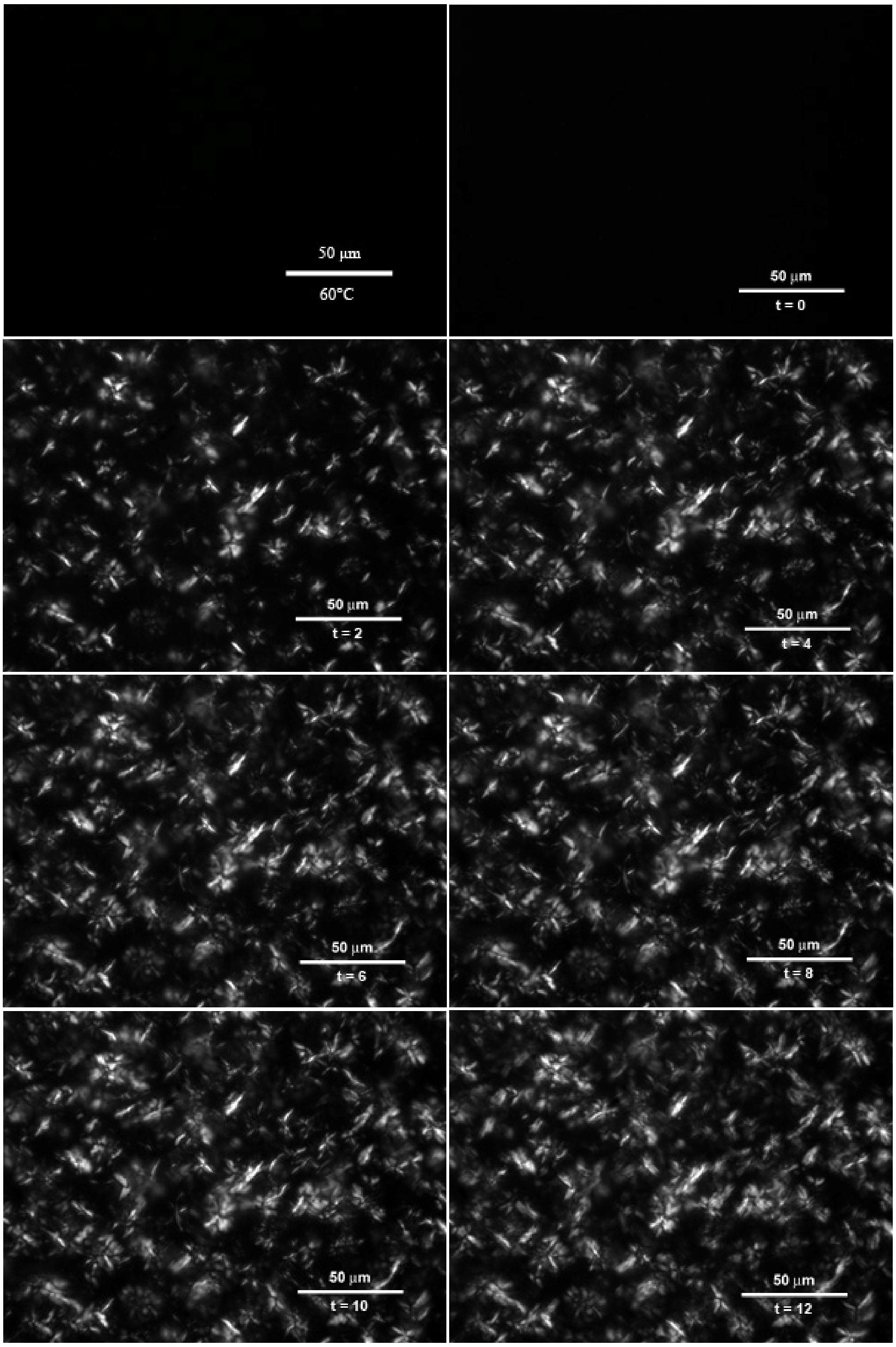
ภาพที่ 47 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของ CB ตั้งแต่นาทีที่ 0-12 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 500 เท่า



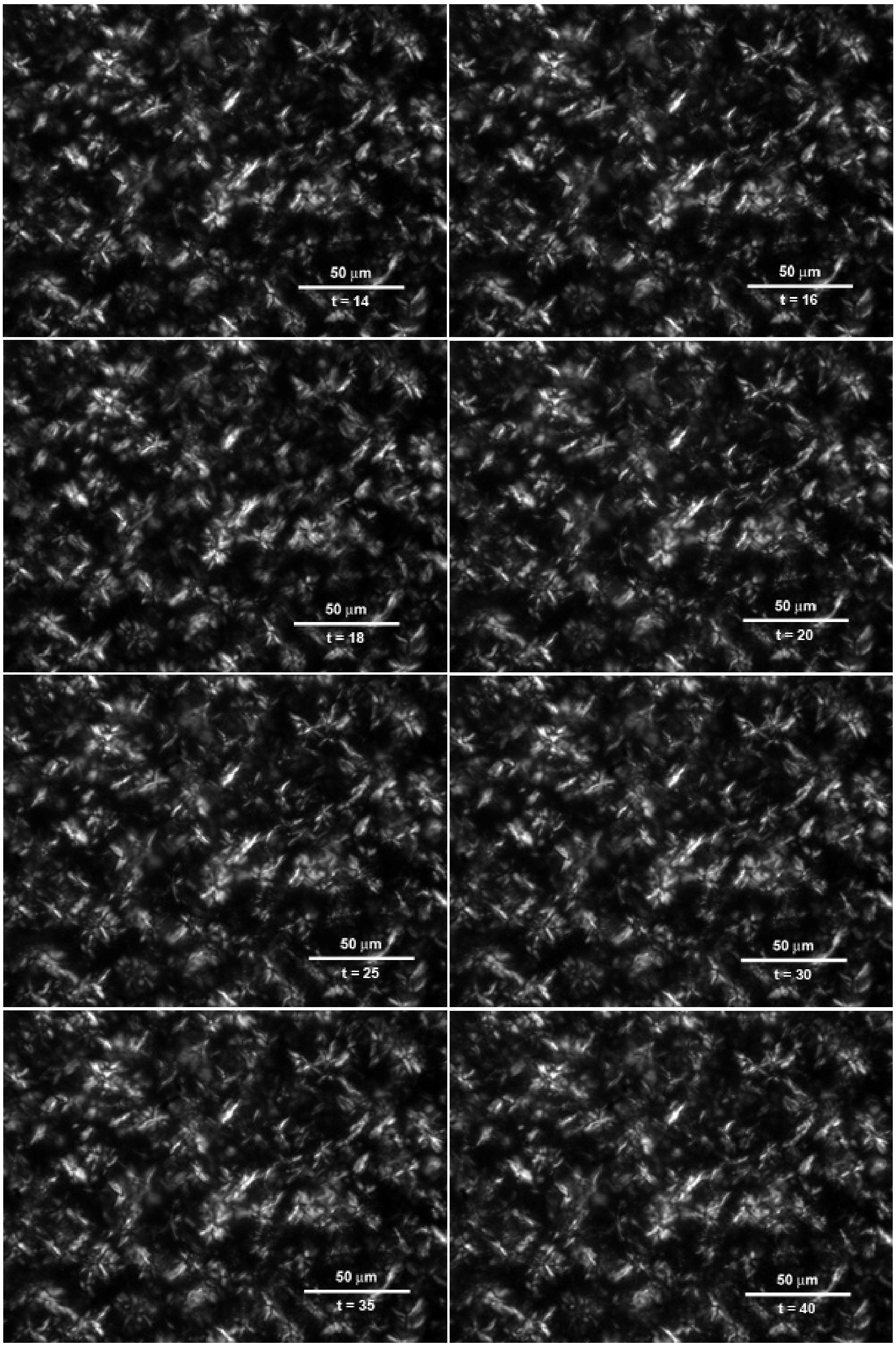
ภาพที่ 48 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของ CB ตั้งแต่นาทีที่ 14-40 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 500 เท่า



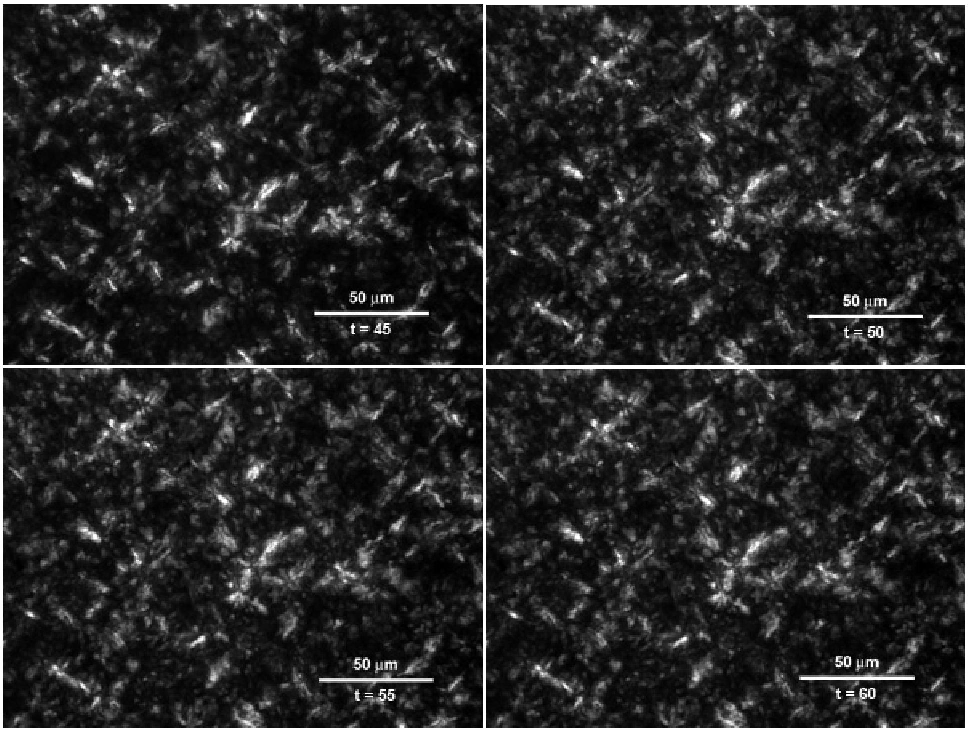
ภาพที่ 49 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของ CB ตั้งแต่นาทีที่ 45-60 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 500 เท่า



ภาพที่ 50 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของ MIX ตั้งแต่นาทีที่ 0-12 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 500 เท่า



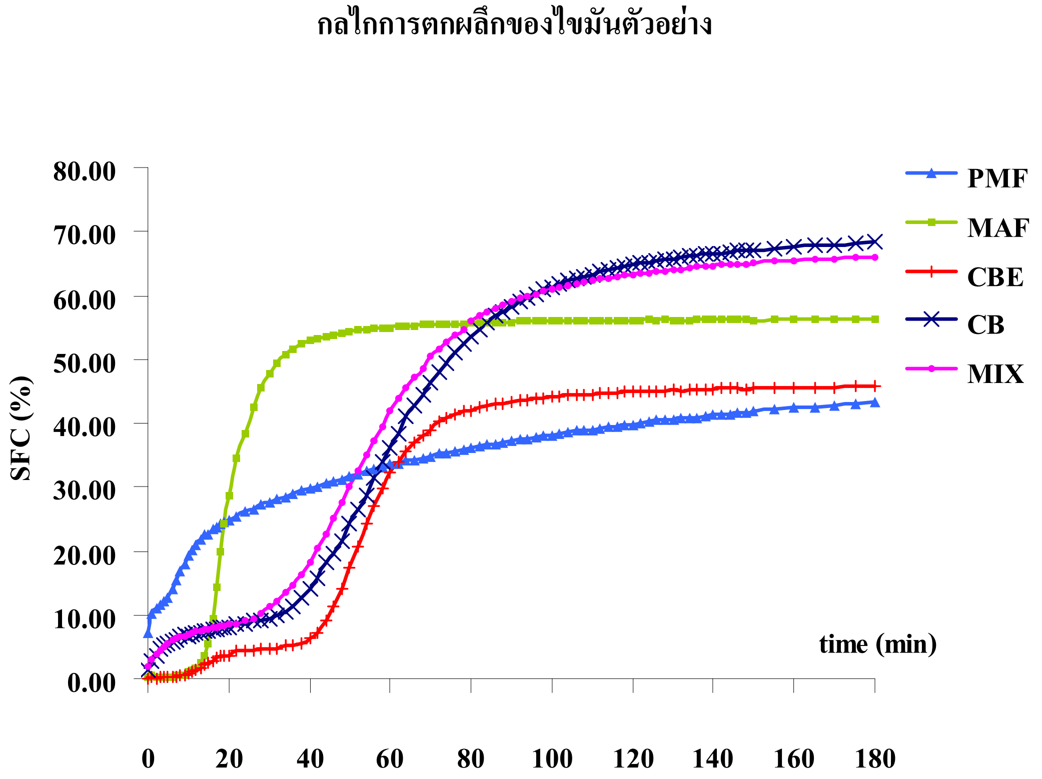
ภาพที่ 51 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของ MIX ตั้งแต่นาทีที่ 14-40 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 500 เท่า



ภาพที่ 52 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของ MIX ตั้งแต่นาทีที่ 45-60 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 500 เท่า

ภาคผนวก ฎ

กลไกการตกผลึกของไขมันตัวอย่าง

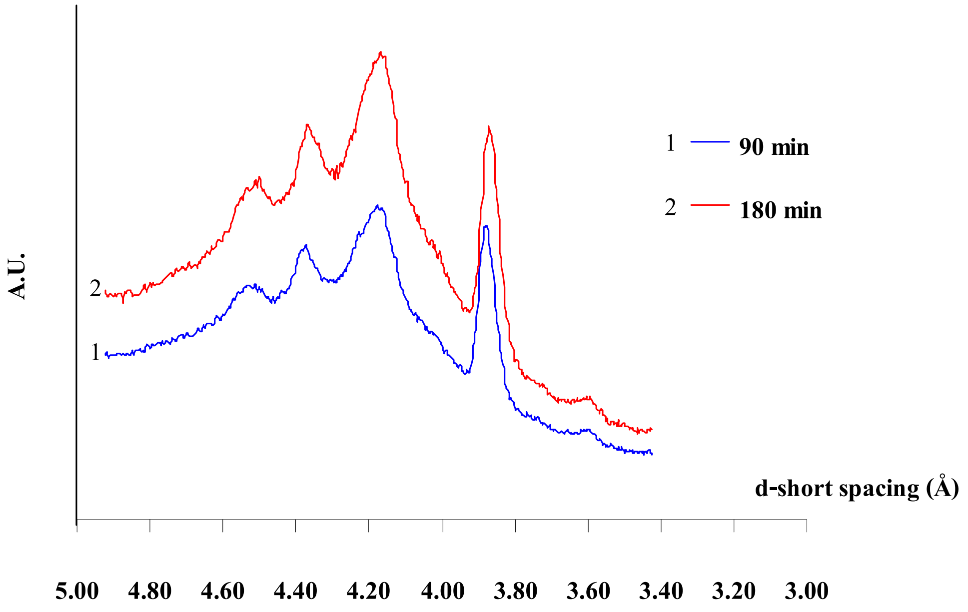


ภาพที่ 58 การเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นของแข็งในรูปผลึก (SFC) ของไขมันชนิดต่าง ๆ ตามเวลาในระหว่างการตกผลึกที่อุณหภูมิคงที่ที่ 20°C ระยะเวลา 3 ชั่วโมง

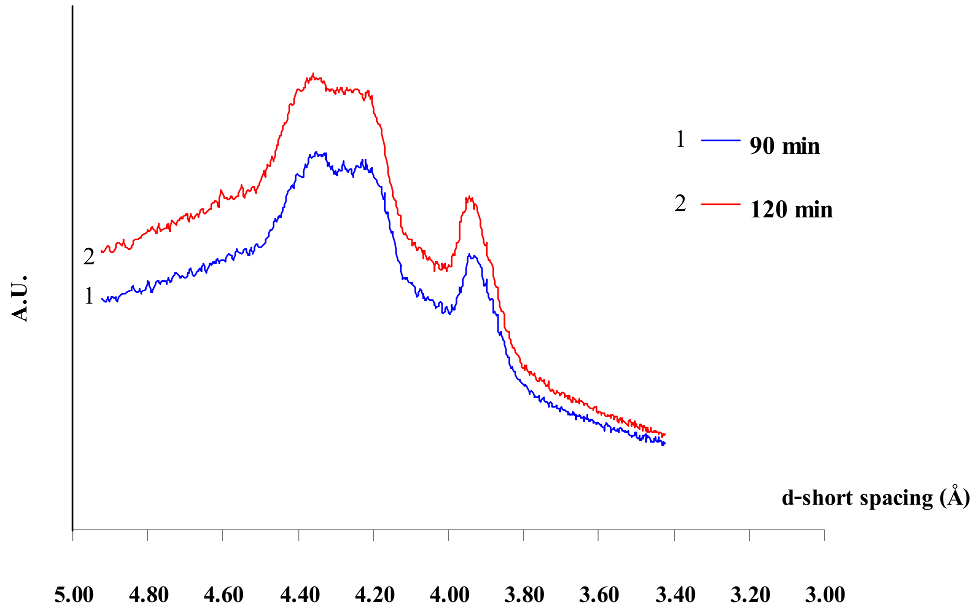
ภาคผนวก ฎ

X-ray diffraction pattern ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย X-ray diffractometer

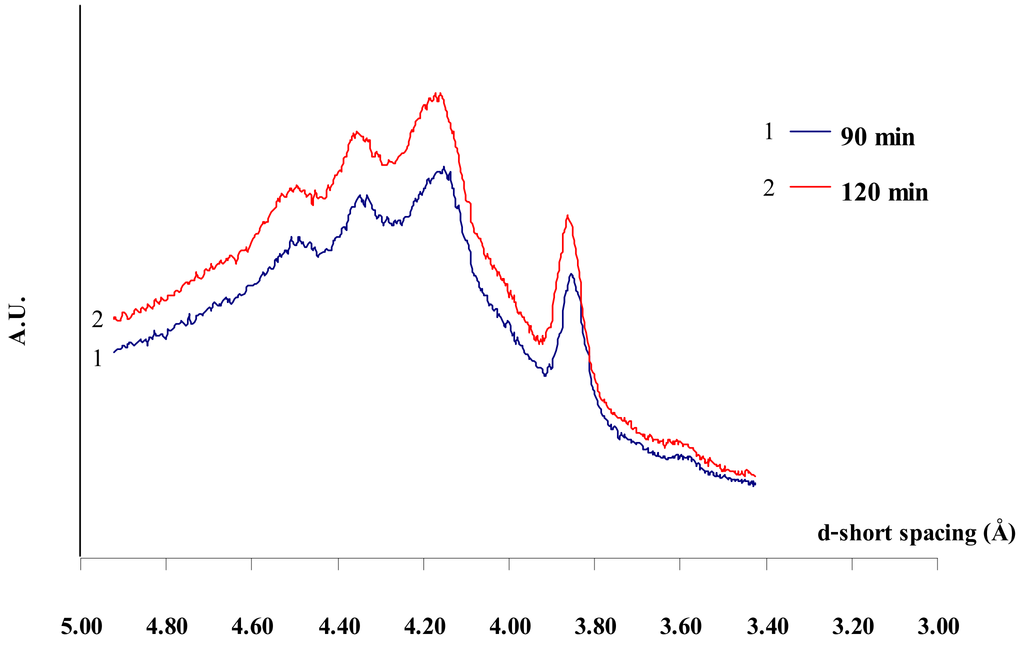
X-ray diffraction pattern ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย X-ray diffractometer



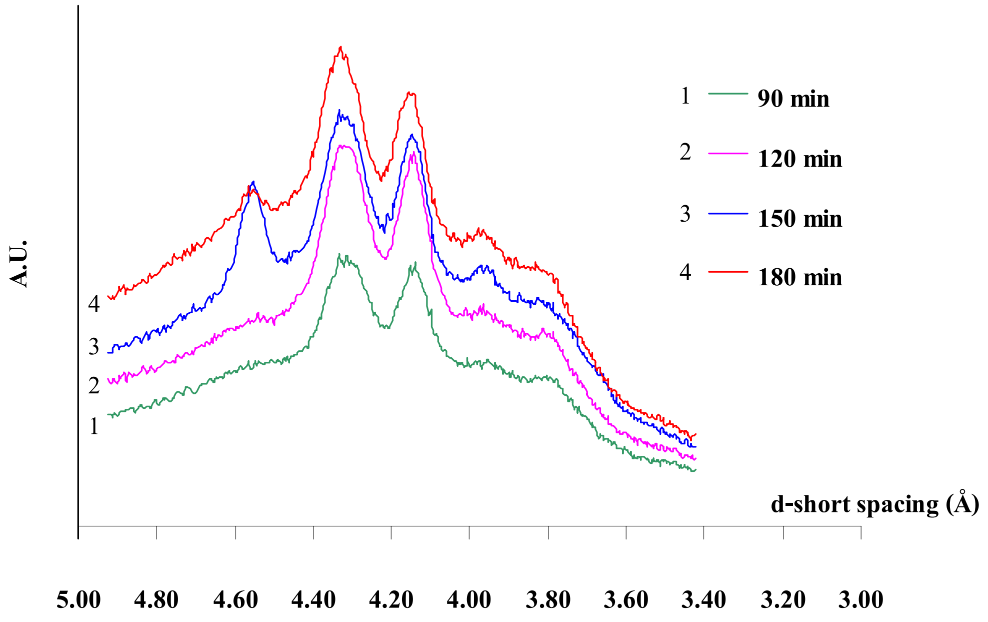
ภาพที่ 53 X-ray diffraction pattern ของ MAF ซึ่งตกผลึกที่ 20°C ที่นาทีที่ 90 และ 180



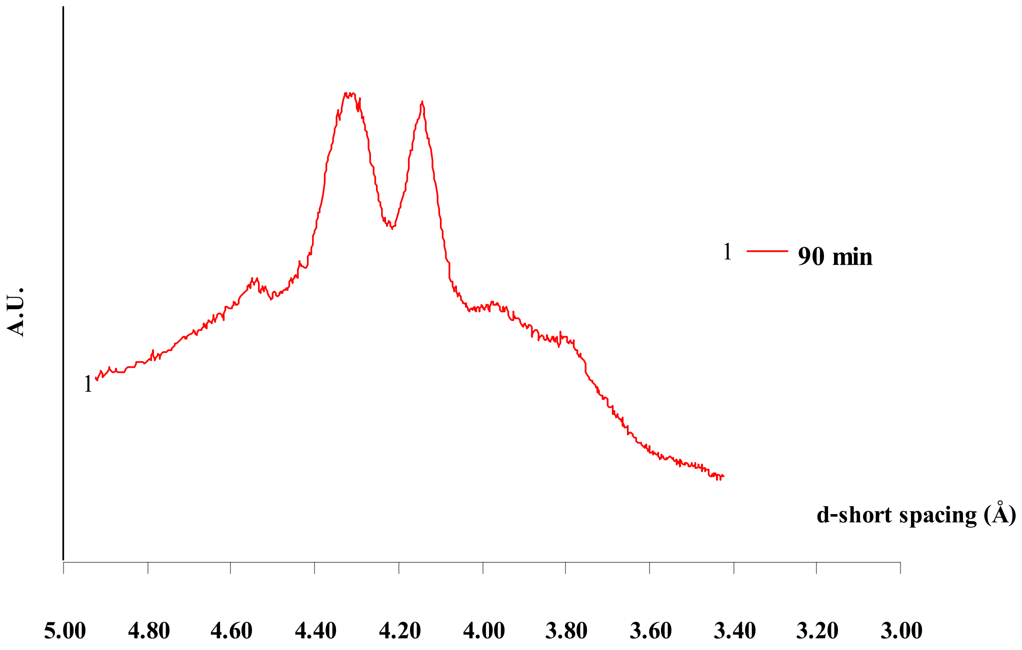
ภาพที่ 54 X-ray diffraction pattern ของ PMF ซึ่งตกผลึกที่ 20°C ที่นาทีที่ 90 และ 120



ภาพที่ 55 X-ray diffraction pattern ของ CBE ซึ่งตกผลึกที่ 20°C ที่นาทีที่ 90 และ 120



ภาพที่ 56 X-ray diffraction pattern ของ CB ซึ่งตกผลึกที่ 20°C ที่นาทีที่ 90 ถึง 120



ภาพที่ 57 X-ray diffraction pattern ของ MIX ซึ่งตกผลึกที่ 20°C ที่นาทีที่ 90

ภาคผนวก ฐ

ตารางสรุปผลการติดตามการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกในระหว่างการตกผลึกที่ 20°C

ตารางสรุปผลการติดตามการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกในระหว่างการตกผลึกที่ 20°C

ตารางที่ 12 ตารางแสดงค่า d-short spacing (Å) ของโครงสร้างผลึกแต่ละรูปแบบที่ระยะเวลาต่าง ๆ ในระหว่างการตกผลึก

ตัวอย่าง	นาทีที่	ค่า d-short spacing (Å) ของ				
		α (II)	β′ (IV)	pseudo-β′	β (V)	sub-β
MAF	5	4.19	-	-	-	-
	10	-	4.19, 3.88, 3.72	4.38	4.55	3.61
	15	-	4.18, 3.88, 3.72	4.38	4.54	3.60
	20	-	4.18, 3.88, 3.71	4.38	4.54	3.60
	30	-	4.17, 3.87, 3.73	4.37	4.52	3.60
	40	-	4.18, 3.88, 3.74	4.38	4.53	3.60
	50	-	4.18, 3.87, 3.73	4.37	4.53	3.60
	60	-	4.17, 3.88, 3.73	4.38	4.54	3.60
	90	-	4.18, 3.88, 3.75	4.38	4.53	3.60
	180	-	4.16, 3.87, 3.71	4.37	4.52	3.60
PMF	0	-	3.88	-	-	-
	5	-	4.20, 3.86	4.35	4.55	-
	10	-	4.21, 3.88	4.36	4.57	-
	15	-	4.24, 3.90	4.37	4.58	-
	20	-	4.23, 3.91	4.36	4.57	-
	30	-	4.23, 3.91	4.35	4.59	-
	40	-	4.23, 3.92	4.35	4.62	-
	50	-	4.24, 3.92	4.35	4.58	-
	60	-	4.23, 3.92	4.36	4.59	-
	90	-	4.22, 3.92	4.35	4.59	-
	120		4.22, 3.92	4.36	4.62	-

ตารางแสดงค่า d-short spacing (Å) ของโครงสร้างผลึกแต่ละรูปแบบที่ระยะเวลาต่าง ๆ ในระหว่างการตกผลึก (ต่อ)

ตัวอย่าง	**นาทีที่**	**ค่า d-short spacing (Å) ของ**				
		α (II)	**β′ (IV)**	**pseudo-β′**	**β (V)**	**sub-β**
CBE	20	4.20	-	-	-	-
	30	-	4.18, 3.86	-	-	-
	40	-	4.17, 3.86	4.36	-	4.75, 4.51, 3.59
	50	-	4.16, 3.85	4.35	-	4.75, 4.51, 3.59
	60	-	4.16, 3.85	4.35	-	4.75, 4.51, 3.59
	90	-	4.16, 3.86	4.34	-	4.75, 4.51, 3.59
	120	-	4.17, 3.86	4.36	-	4.75, 4.51, 3.59
CB	5	4.18	-	-	-	-
	10	4.18	-	-	-	-
	15	4.18	-	-	-	-
	20	4.18	-	-	-	-
	30	4.18	-	-	-	-
	40	-	4.34, 4.18, 3.97, 3.81	-	4.54	-
	50	-	4.32, 4.16, 3.97, 3.81	-	4.55	-
	60	-	4.32, 4.16, 3.97, 3.81	-	4.54	-
	90	-	4.31, 4.15, 3.96, 3.80	-	4.56	-
	120	-	4.32, 4.16, 3.97, 3.80	-	4.55	-
	150	-	4.32, 4.16, 3.97, 3.81	-	4.54	-
	180	-	4.32, 4.16, 3.96, 3.81	-	4.54	-
MIX	20	4.19	-	-	-	-
	30	4.19	-	-	-	-
	40	-	4.33, 4.15, 3.97	-	4.55	-
	50	-	4.33, 4.15, 3.97	-	4.55	-
	60	-	4.32, 4.16, 3.96	-	4.55	-
	90	-	4.31, 4.16, 3.96	-	4.53	-

ตารางที่ 13 ตารางสรุปโครงสร้างผลึกในนาทีที่ 60 ของไขมันแต่ละตัวอย่าง

ตัวอย่าง	โครงสร้างผลึก
MAF	β', pseudo-β', sub-β และ β
PMF	β' และ pseudo-β' >> β
CBE	β', pseudo-β' และ sub-β
CB	IV (β_1') >> V (β_2)
MIX	IV (β_1') >> V (β_2)

ภาคผนวก ฑ

คำย่อ

คำย่อ

(Abbreviations)

Av	Acid value
CB	Cocoa butter
CBA	Cocoa butter alternative
CBE	Cocoa butter equivalent
CBR	Cocoa butter replacer
CBS	Cocoa butter substitute
EU	European Union
Iv	Iodine value
MAF	Mango seed almond fat
O	Oleic acid
P	Palmitic acid
PMF	Palm mid-fraction
Pv	Peroxide value
SFC	Solid fat content
SMP	Slip melting point
Spv	Saponification value
St	Stearic acid
WI	Whiteness index

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล นางสาวพิมพ์นิภา กาเผือกงาม

MISS PHIMNIPNA KAPHUEAKNGAM

ที่อยู่ 96/115 หมู่ 10 ตำบลอ้อมน้อย อำเภอกระทุ่มแบน จังหวัดสมุทรสาคร 74130

โทรศัพท์ (มือถือ) (086) 908-5901

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2546 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนมัธยมสาธิต มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา กรุงเทพฯ

พ.ศ. 2550 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับ 2) สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยศิลปากร

พ.ศ. 2551 ศึกษาต่อระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ผลงานวิจัย

พ.ศ. 2551 แสดงผลงานในหัวข้อ การพัฒนาผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลตเคลือบทนอุณหภูมิสูงโดยใช้ไขมันทดแทนเนยโกโก้ประเภทไขมันลอริค ในงานประชุมวิชาการ Industrial and Research Projects for Undergraduate Students (IRPUS), 2007 ณ หอประชุม รอยัลพารากอนฮอล์ ชั้น 5 สยามพารากอน กรุงเทพฯ

พ.ศ. 2552 แสดงผลงานในหัวข้อ Production of cocoa butter equivalent from mango seed almond fat and palm oil mid-fraction ในงานประชุมวิชาการ Food Innovation Asia Conference (FIAC) 2009 ระหว่างวันที่ 18-19 มิถุนายน 2552 ณ ศูนย์แสดงสินค้าและการประชุมนานาชาติกรุงเทพ (ไบเทค) กรุงเทพฯ

ได้รับการตีพิมพ์วารสารทางวิชาการใน Asian Journal of Food and Agro-Industry (2009), 2(04), 441-447. ในหัวข้อ Production of cocoa butter equivalent from mango seed almond fat and palm oil mid-fraction