



พฤติกรรมการตกผลึกของเนยโกโก้ผสมเนยอิลิปเป้และเนยโกโก้ผสมเนยอิลิปเป้สตีयरิน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

พฤติกรรมการณ์การตกลีคของเนยโกโก้ผสมเนยอิลิป้และเนยโกโก้ผสมเนยอิลิป้สเดียริน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาามหาบัณฑิต  
ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร  
มหาวิทยาลัยศิลปากร  
ปีการศึกษา 2565  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

CRYSTALLIZATION BEHAVIOR OF COCOA BUTTER AND ILLIPE BUTTER  
BLENDS AND COCOA BUTTER AND ILLIPE STEARIN BLENDS



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for Master of Science FOOD TECHNOLOGY  
Department of FOOD TECHNOLOGY  
Silpakorn University  
Academic Year 2022  
Copyright of Silpakorn University

หัวข้อ พุทธธรรมการตมกลีคของเนยโกโก้ผสมเนยอิลิปเป่และเนยโกโก้ผสม  
เนยอิลิปเป่สเดียริน  
โดย นางสาวชนันร์ศม์ เฉลิมชาติโกคิน  
สาขาวิชา เทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต  
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก รองศาสตราจารย์ ดร. โสภาค สอนไว

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติ  
ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

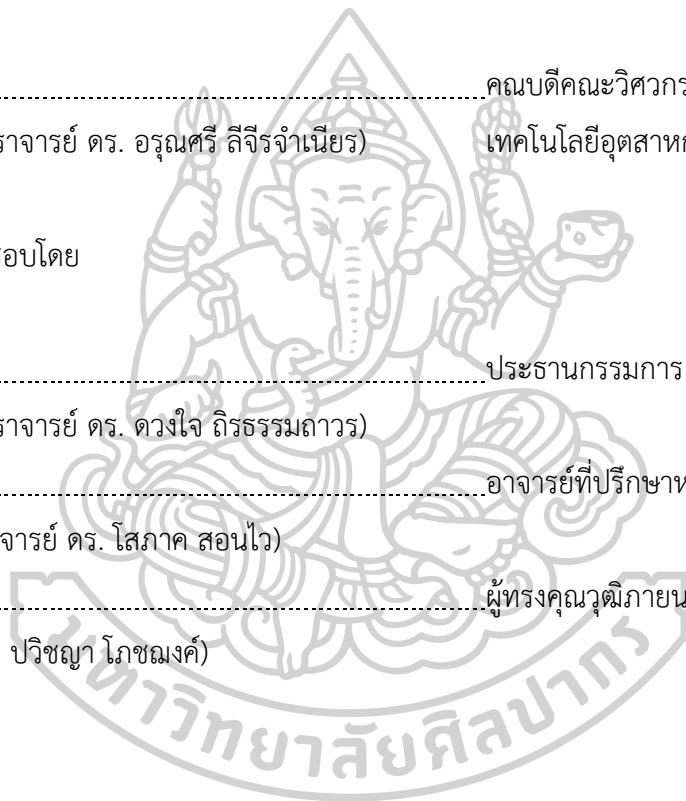
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์และ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรุณศรี ลีจรรย์เนียร) เทคโนโลยีอุตสาหกรรม

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดวงใจ ธีรธรรมถาวร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร. โสภาค สอนไว)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก  
(อาจารย์ ดร. ปวีญา โภชฌงค์)



630920018 : เทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทบัณฑิต

คำสำคัญ : เนยโกโก้, ไขมันทดแทนเนยโกโก้, เนยอิลิปเป้, เนยอิลิปเป้สเตียรีน, ช็อกโกแลตทนความร้อน, การเกิดฝ้าขาว

นางสาว ชนัณรัตน์ เฉลิมชาติโกคิน: พฤติกรรมการตกผลึกของเนยโกโก้ผสมเนยอิลิปเป้และเนยโกโก้ผสมเนยอิลิปเป้สเตียรีน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รองศาสตราจารย์ ดร. โสภาค สอนไว

เนยโกโก้ (cocoa butter: CB) เป็นส่วนประกอบหลักที่สำคัญของช็อกโกแลต ซึ่งปัจจุบันความต้องการของช็อกโกแลตเพิ่มขึ้นอย่างมาก แต่ผลิต CB ได้ลดลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศและสิ่งแวดล้อม ทำให้ราคาของ CB สูงขึ้น ดังนั้นจึงมีความต้องการในการผลิตไขมันทดแทนเนยโกโก้ประเภท cocoa butter equivalents (CBE) จากไขมันพืชชนิดอื่น ซึ่ง CBE เป็นไขมันที่มีคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพที่คล้ายกับ CB และสามารถใช้ทดแทน CB ได้ทั้งเพียงบางส่วนและโดยสมบูรณ์ นอกจากนี้การบริโภคในพื้นที่เขตร้อนส่วนใหญ่จะมีข้อจำกัดเนื่องมาจากปัญหาของการหลอมเหลวและการอ่อนตัวลง ส่งผลให้เกิดลักษณะของฝ้าขาวบนผิวของช็อกโกแลต ซึ่งเป็นปัญหาหลักที่สำคัญสำหรับอุตสาหกรรมช็อกโกแลต ในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะนำเนยอิลิปเป้ (illipe butter: IB) มาผลิตเป็น CBE เนื่องจากมีคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพที่ใกล้เคียงกับ CB และนำมาผ่านกระบวนการตกผลึกแยกส่วน (fractionation) เพื่อให้ได้เป็นเนยอิลิปเป้สเตียรีน (illipe butter stearin: IBS) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็น cocoa butter improver หรือ CBI งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาสมบัติและพฤติกรรมการตกผลึกของ CB/IB และ CB/IBS ที่อัตราส่วนต่าง ๆ การศึกษาพบว่าปริมาณไขมันแข็งในรูปผลึก (solid fat content: SFC) ของ CB, IB, IBS และไขมันผสมระหว่าง CB/IB และ CB/IBS มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ IB และ IBS ในไขมันผสม จะทำให้ค่า SFC เพิ่มขึ้นในทุก ๆ อุณหภูมิ เนื่องจาก IB และ IBS มีปริมาณ ไตรเอซิลกลีเซอรอล ชนิด 1,3-distearoyl-2-oleoyl-glycerol (SOS) ที่สูง และจะหลอมเหลวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิร่างกาย (37 °C) และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ IB และ IBS จะทำให้พีคของการตกผลึกและการหลอมเหลวขยับไปยังอุณหภูมิที่สูงขึ้น ทั้ง CB, IB และ IBS มีลักษณะรูปผลึกเป็นทรงกลม เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ IB และ IBS จะทำให้ผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยที่อัตราส่วน 85/15 (CB/IB และ CB/IBS) มีช่วงของการหลอมเหลวและมีรูปร่างผลึกใกล้เคียงกับ CB มากที่สุด พีคหลักของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของทั้ง CB และ ไขมันผสม 85/15 อยู่ที่ตำแหน่ง 4.58 Å ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะโครงสร้างแบบ  $\beta_2$  จึงกล่าวได้ว่าไขมันผสมระหว่าง CB/IB และ CB/IBS สามารถเข้ากันได้ดี (มีพฤติกรรมการผสมแบบ monotectic) เมื่อเติม IB และ IBS ลงในดาร์คช็อกโกแลต (5% w/w ของผลิตภัณฑ์

สุดท้าย) จะมีค่า SFC, ค่าความแข็ง (hardness) และค่าดัชนีการคงรูปร่าง (shape retention index) สูงกว่าช็อกโกแลตที่ผลิตจากเนยโกโก้ (สูตรควบคุม) นอกจากนี้ยังสามารถชะลอและต้านทานการเกิดฝ้าขาว (fat bloom) ที่ผิวหน้าของช็อกโกแลตได้ดีกว่าช็อกโกแลตสูตรควบคุม โดยช็อกโกแลตที่เติม IBS จะมีความเสถียรต่อความร้อนและต้านทานการเกิดฝ้าขาวได้มากที่สุด



630920018 : Major FOOD TECHNOLOGY

Keyword : Cocoa butter, cocoa butter equivalent, cocoa butter improver, illipé butter, illipé butter stearin, heat resistance chocolate, fat bloom

MISS Chanunras CHALERMCHADPHOKHIN : Crystallization behavior of cocoa butter and illipe butter blends and cocoa butter and illipe stearin blends Thesis advisor : Associate Professor Sopark Sonwai

Cocoa butter (CB) is the main fat ingredient in chocolate. Currently, demand for chocolate is increasing while CB production is decreasing because of climate and environmental change, resulting in higher CB prices. Therefore, some manufacturers are trying to find alternative fats to replace CB. Cocoa butter equivalents (CBE) are vegetable fats with both physical and chemical properties similar to CB and subsequently can be used to partially or fully replace CB. Consumption in the most tropical zone is limited due to problems of melting and softening resulting fat bloom formation in chocolate products, which is a major concern for many chocolate manufacturers. In this research, illipé butter (IB) was used to produce CBE because it has chemical and physical properties that are very close to CB. It was processed through fractionation to obtain illipé butter stearin (IBS), which has properties as cocoa butter improver (CBI). This research studied the properties and crystallization behavior of CB/IB and CB/IBS blends in different ratios. It was found that the solid fat content (SFC) of CB, IB, IBS, CB/IB and CB/IBS blends decreased with increasing temperature. When the content of IB and IBS increased, the SFC increased at all temperatures because IB and IBS had the high content of 1,3-distearoyl-2-oleoyl-glycerol (SOS) and the blends melted completely at body temperature (37 °C). The crystallization and melting peaks shifted to higher temperatures as IB and IBS content increased. The crystal microstructure of CB, IB and IBS were spherulites. The crystal size of the CB/IB and CB/IBS blends increased with increasing of IB and IBS content. The 85/15 (CB/IB and CB/IBS) blends had the melting peak temperature and crystal microstructure closest to CB. Both CB and the 85/15 blend showed a strong diffraction peak at 4.58 Å, indicating that they crystallized into  $\beta_2$  structure (form V). The results have shown that CB/IB and CB/IBS blends were very compatible

(monotectic effect). When IB and IBS were added to dark chocolate (5% w/w of the final product), SFC, hardness and shape retention index of the chocolate increased from those of the conventional dark chocolate made without IB and IBS addition. Furthermore, it was able to delay and resist fat bloom on the surface of chocolate better than the control chocolate. The results indicated that chocolate with IBS was the most heat resistance and fat bloom stability.





## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.โสภาค สอนไฉ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือ คอยให้คำปรึกษา ชี้แนะ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้อง ครบถ้วน และเสร็จสิ้นอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดวงใจ ธีรธรรมถาวร ประธานกรรมการการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร. ปวีณา โภชฌงค์ กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิตรวจสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลาให้คำปรึกษาและแนะนำเพิ่มเติมในการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาเทคโนโลยีอาหารทุกท่าน ที่อบรมสั่งสอนวิชาความรู้ เพื่อให้สามารถนำความรู้ไปใช้ในวิชาชีพได้อย่างดียิ่ง ขอขอบคุณนักวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ภาควิชาเทคโนโลยีอาหารทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และอำนวยความสะดวกด้านต่างๆ จนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงผ่านพ้นไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่อยู่ในความดูแลของอาจารย์ที่ปรึกษาเดียวกัน และเพื่อนๆ ในภาควิชาเทคโนโลยีอาหารทุกคนที่คอยให้คำแนะนำ ให้ความช่วยเหลือในการทำงานวิจัย และเป็นกำลังใจในยามเหนื่อยท้อเสมอมา

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา พี่สาว ที่คอยเป็นแรงผลักดัน สนับสนุนในทุกๆ ด้าน คอยให้คำปรึกษา ให้กำลังใจ ให้ความช่วยเหลือ รับฟังปัญหาทุกอย่าง เสมอมา

นางสาว ชันฉัตรม์ เฉลิมชาติโกคิน

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ฌ
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญรูปภาพ.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	4
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	4
บทที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 เนยโกโก้ (Cocoa butter).....	5
2.1.1 กระบวนการผลิตเนยโกโก้.....	5
2.1.2 คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของเนยโกโก้.....	6
2.2 ไขมันทดแทนเนยโกโก้ (Cocoa butter alternatives : CBA).....	9
2.2.1 Cocoa butter substitutes (CBS).....	10
2.2.2 Cocoa butter replacers (CBR).....	11
2.2.3 Cocoa butter equivalents (CBE).....	12
2.2.3.1 Cocoa butter extenders (CBEX).....	14
2.2.3.2 Cocoa butter improvers (CBI).....	15

2.3 โครงสร้างของผลึกไขมัน (Polymorphism).....	15
2.4 เนยอิลิปเป้ (Illipé butter).....	18
2.5 กระบวนการดัดแปลงคุณสมบัติของไขมันเพื่อผลิตไขมันทดแทนเนยโกโก้.....	20
2.5.1 การตกผลึกแยกส่วน (Fractionation).....	20
2.5.1.1 Dry fractionation .....	21
2.5.1.2 Solvent fractionation .....	22
2.5.1.3 Surfactant fractionation.....	23
2.5.2 กระบวนการไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation) .....	23
2.5.3 การทำอินเทอร์เอสเทอริฟิเคชัน (Interesterification).....	24
2.5.4 การผสมน้ำมัน (Blending).....	24
2.6 ช็อกโกแลต (Chocolate).....	25
2.6.1 ประเภทของช็อกโกแลต.....	25
2.6.1.1 ดาร์คช็อกโกแลต (Dark chocolate).....	25
2.6.1.2 ไวท์ช็อกโกแลต (White chocolate).....	26
2.6.1.3 ช็อกโกแลตนม (Milk chocolate).....	26
2.6.2 กระบวนการผลิตช็อกโกแลต .....	26
2.6.3 การตกผลึกของไขมันในช็อกโกแลต.....	29
2.6.4 การเกิดฝ้าขาว (Fat bloom) ของช็อกโกแลต .....	30
2.6.4.1 ทฤษฎีการแยกเฟส (The phase separation theory).....	31
2.6.4.2 ทฤษฎีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง (The polymorphic.....	31
transition theory).....	31
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย .....	32
3.1 วัสดุอุปกรณ์.....	32
3.2 การเตรียมตัวอย่าง.....	32

3.3 การศึกษาคุณสมบัติและพฤติกรรมการตกผลึกของเนยโกโก้ผสมกับเนยอิลิปเป้ และเนยโกโก้ผสมกับเนยอิลิปเป้สเตียร์น.....	33
3.3.1 การศึกษาปริมาณไขมันแข็งในรูปผลึกและความเข้ากันได้กับเนยโกโก้ .....	33
3.3.2 การศึกษาพฤติกรรมการตกผลึกและการหลอมเหลว.....	34
3.3.3 การศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของผลึก (crystal microstructure).....	34
3.3.4 การศึกษารูปแบบโครงสร้างผลึก (polymorphism).....	35
3.3.5 การศึกษาองค์ประกอบกรดไขมัน .....	35
3.4 การศึกษาคุณสมบัติการต้านทานความร้อนและพฤติกรรมการเกิดฝ้าขาวบนผิวของ .....	36
ช็อกโกแลต .....	36
3.4.1 การเตรียมตัวอย่างช็อกโกแลต.....	36
3.4.2 การศึกษาปริมาณไขมันแข็งในรูปผลึกของช็อกโกแลต .....	36
3.4.3 การศึกษาคุณสมบัติด้านความแข็งของช็อกโกแลต.....	37
3.4.4 การศึกษาการต้านทานอุณหภูมิสูงโดยการวัดค่าดัชนีการคงรูปร่างของช็อกโกแลต .....	37
3.4.5 การศึกษาพฤติกรรมการเกิดฝ้าขาวของช็อกโกแลต.....	38
3.4.6 การศึกษาพฤติกรรมการหลอมเหลวของช็อกโกแลต .....	38
3.5 สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ .....	38
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล และอภิปรายผล .....	39
4.1 การศึกษาคุณสมบัติและพฤติกรรมการตกผลึกของเนยโกโก้ผสมกับเนยอิลิปเป้ และเนยโกโก้ผสมกับเนยอิลิปเป้สเตียร์น.....	39
4.1.1 การศึกษาคุณสมบัติและพฤติกรรมการตกผลึกของเนยโกโก้ผสมกับเนยอิลิปเป้.....	39
4.1.1.1 ปริมาณไขมันแข็งในรูปผลึกและความเข้ากันได้กับเนยโกโก้ .....	39
4.1.1.2 พฤติกรรมการตกผลึกและการหลอมเหลว.....	43
4.1.1.3 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของผลึก .....	46
4.1.1.4 รูปแบบโครงสร้างผลึก.....	48

4.1.2 การศึกษาคุณสมบัติและพฤติกรรมการตกผลึกของเนยโกโก้ผสมกับเนยอิลิปเป่ สเตียร์น	49
4.1.2.1 ปริมาณไขมันแข็งในรูปผลึกและความเข้ากันได้กับเนยโกโก้	49
4.1.2.2 พฤติกรรมการตกผลึกและการหลอมเหลว	53
4.1.2.3 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของผลึก	56
4.1.2.4 รูปแบบโครงสร้างผลึก	58
4.1.2.5 การศึกษาองค์ประกอบกรดไขมัน	59
4.2 การศึกษาคุณสมบัติการต้านทานความร้อนและพฤติกรรมการเกิดฝ้าขาวบนผิวของ	61
ช็อกโกแลต	61
4.2.1 การศึกษาปริมาณไขมันแข็งในรูปผลึกของช็อกโกแลต	61
4.2.2 การศึกษาคุณสมบัติด้านความแข็งของช็อกโกแลต	63
4.2.3 การศึกษาการต้านทานอนุมูลอิสระสูงโดยการวัดค่าดรชนีการคงรูปร่างของช็อกโกแลต	64
4.2.4 การศึกษาพฤติกรรมการเกิดฝ้าขาวของช็อกโกแลต	66
4.2.5 การศึกษาพฤติกรรมการหลอมเหลวของช็อกโกแลต	70
บทที่ 5 สรุป	74
รายการอ้างอิง	75
ภาคผนวก	86
ภาคผนวก ก	87
ภาคผนวก ข	89
ภาคผนวก ค	91
ภาคผนวก ง	92
ประวัติผู้เขียน	95

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ และสมบัติทางความร้อนของเนยโกโก้ .....	7
ตารางที่ 2 องค์ประกอบและคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของไขมันทดแทนเนยโกโก้ (Cocoa butter alternatives) .....	9
ตารางที่ 3 องค์ประกอบและกระบวนการการผลิต CBE จากไขมันพืช .....	14
ตารางที่ 4 ช่วงของอุณหภูมิการหลอมเหลวของโครงสร้างผลึกเนยโกโก้ .....	16
ตารางที่ 5 รูปแบบโครงสร้างของผลึกเนยโกโก้ที่แสดงตำแหน่งพีคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) .....	17
ตารางที่ 6 ส่วนผสมของดาร์คช็อกโกแลต, ไวท์ช็อกโกแลต และช็อกโกแลตนม .....	28
ตารางที่ 7 พารามิเตอร์ DSC ของการตกผลึกและการหลอมเหลวของเนยโกโก้ (CB) ผสมเนยอิลิป์ (IB) ที่อัตราส่วนต่าง ๆ .....	45
ตารางที่ 8 พารามิเตอร์ DSC ของการตกผลึกและการหลอมเหลวของเนยโกโก้ (CB) ผสมเนยอิลิป์สเตียริน (IBS) ที่อัตราส่วนต่าง ๆ .....	55
ตารางที่ 9 องค์ประกอบกรดไขมันของ CB, IB, IBS, CB/IB (85/15) และ CB/IBS (85/15) .....	60
ตารางที่ 10 ปริมาณไขมันแข็งในรูปผลึกของช็อกโกแลต ในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 4 สัปดาห์ .....	62
ตารางที่ 11 ความแข็งของช็อกโกแลต (hardness) .....	64
ตารางที่ 12 ดรรชนีการคงรูปร่างของช็อกโกแลต (Shape retention index: SRI) .....	65
ตารางที่ 13 ค่าดรรชนีความขาว (whiteness index) ของช็อกโกแลตที่เก็บรักษาเป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์ .....	68
ตารางที่ 14 อุณหภูมิการหลอมเหลวและค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลว (Enthalpy) ของช็อกโกแลตที่เก็บรักษาเป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์ .....	73

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 กระบวนการผลิตเนยโกโก้.....	6
ภาพที่ 2 Iso-solid phase diagram ของเนยโกโก้กับไขมันทดแทนเนยโกโก้ประเภท CBS.....	11
ภาพที่ 3 Iso-solid phase diagram ของเนยโกโก้กับไขมันทดแทนเนยโกโก้ประเภท CBR.....	12
ภาพที่ 4 Iso-solid phase diagram ของเนยโกโก้กับไขมันทดแทนเนยโกโก้ประเภท CBE.....	13
ภาพที่ 5 การจัดเรียงตัวของโมเลกุล TAG ตามความยาวสายโซ่ (a) และโครงสร้างของ sub-cell (b) .....	16
ภาพที่ 6 ลักษณะพีคโครงสร้างผลึกของเนยโกโก้ด้วยเทคนิคการทดลองการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) โดยใช้การสแกนแบบมุมกว้าง (short spacing).....	18
ภาพที่ 7 ผลอิลิปเป้ (Shorea stenoptera).....	19
ภาพที่ 8 กระบวนการตกผลึกแยกส่วน.....	21
ภาพที่ 9 กระบวนการผลิตช็อกโกแลต.....	29
ภาพที่ 10 อุณหภูมิและโปรไฟล์การตกผลึกที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในกระบวนการควบคุมผลึก (tempering).....	29
ภาพที่ 11 ปริมาณไขมันแข็งในรูปผลึกของเนยโกโก้ (CB) ผสมเนยอิลิปเป้ (IB) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	41
ภาพที่ 12 Iso-solid phase diagram ของเนยโกโก้ (CB) ผสมเนยอิลิปเป้ (IB).....	41
ภาพที่ 13 ความแตกต่างของปริมาณไขมันแข็งในรูปผลึกของเนยโกโก้ (CB) ผสมเนยอิลิปเป้ (IB).....	42
ภาพที่ 14 ปริมาณไขมันแข็งในรูปผลึกของเนยโกโก้ (CB) ผสมเนยอิลิปเป้ (IB) เพื่อแสดงความเข้ากันได้ของไขมันผสม.....	42
ภาพที่ 15 เทอร์โมแกรมการตกผลึก (a) และเทอร์โมแกรมการหลอมเหลว (b) ของเนยโกโก้ (CB) ผสมเนยอิลิปเป้ (IB) ที่อัตราส่วนต่าง ๆ.....	44
ภาพที่ 16 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของผลึกของเนยโกโก้ (CB) ผสมเนยอิลิปเป้ (IB) ที่อัตราส่วนต่าง ๆ โดยตกผลึกที่อุณหภูมิ 22 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง.....	47

ภาพที่ 17 โครงสร้างผลึกของเนยโกโก้ (CB) และเนยโกโก้ผสมเนยอิลิปส์ที่อัตราส่วน CB85/IB15 หลังการตกผลึกไขมันที่อุณหภูมิ 24 °C 48 ชั่วโมง.....	49
ภาพที่ 18 ปริมาณไขมันแข็งในรูปผลึกของเนยโกโก้ (CB) ผสมเนยอิลิปส์เตียริน (IBS) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ .....	51
ภาพที่ 19 Iso-solid phase diagram ของเนยโกโก้ (CB) ผสมเนยอิลิปส์เตียริน (IBS).....	51
ภาพที่ 20 ความแตกต่างของปริมาณไขมันแข็งในรูปผลึกของเนยโกโก้ (CB) ผสมเนยอิลิปส์เตียริน (IBS).....	52
ภาพที่ 21 ปริมาณไขมันแข็งในรูปผลึกของเนยโกโก้ (CB) ผสมเนยอิลิปส์เตียริน (IBS) เพื่อแสดงความเข้ากันได้ของไขมันผสม .....	52
ภาพที่ 22 เทอร์โมแกรมการตกผลึก (a) และเทอร์โมแกรมการหลอมเหลว (b) ของเนยโกโก้ (CB) ผสมเนยอิลิปส์เตียริน (IBS) ที่อัตราส่วนต่าง ๆ.....	54
ภาพที่ 23 รูปร่างลักษณะของผลึกของเนยโกโก้ (CB) ผสมเนยอิลิปส์เตียริน (IBS) ที่อัตราส่วนต่าง ๆ โดยตกผลึกที่อุณหภูมิ 22 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง.....	57
ภาพที่ 24 โครงสร้างผลึกของเนยโกโก้ (CB) และเนยโกโก้ผสมเนยอิลิปส์เตียรินที่อัตราส่วน CB85/IBS15 หลังการตกผลึกไขมันที่อุณหภูมิ 24 °C 48 ชั่วโมง.....	58
ภาพที่ 25 ปริมาณไขมันแข็งในรูปผลึกของช็อกโกแลตที่ทำการเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์. 62	
ภาพที่ 26 ความคงรูปร่างของช็อกโกแลตทั้งก่อนและหลังการทดลองวัดค่าดัชนีการคงรูป (SRI). 65	
ภาพที่ 27 ดรรชนีความขาว (whiteness index) ของช็อกโกแลตที่เก็บรักษาเป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์.....	67
ภาพที่ 28 พฤติกรรมการเกิดฝ้าขาวของช็อกโกแลตที่เก็บรักษาเป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์ .....	69
ภาพที่ 29 พฤติกรรมการหลอมเหลวของช็อกโกแลตที่เก็บรักษาเป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์.....	72



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนยโกโก้ (cocoa butter: CB) จัดเป็นองค์ประกอบไขมันหลักที่สำคัญของช็อกโกแลต เนื่องจากมีคุณสมบัติทางกายภาพที่เฉพาะตัว คือเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25 °C) และจะหลอมเหลวอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิ 25 - 35 °C จากนั้นจะหลอมเหลวจนหมดอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิร่างกาย (~ 37 °C) (S. T. Beckett, 2008) CB มีองค์ประกอบหลักของไตรเอซิลกลีเซอรอล (triacylglycerol: TAG) 3 ชนิด ได้แก่ 1,3-dipalmitoyl-2-oleoyl-*sn*-glycerol (POP, 13.8 - 21.8%), 1-palmitoyl-2-oleoyl-3-stearoyl-*sn*-glycerol (POS, 26.3 - 48.5%) และ 1,3-distearoyl-2-oleoyl-*sn*-glycerol (SOS, 20.0 - 29.7%) (P, O และ S คือกรดไขมันชนิดปาล์มิติก, โอเลอิก และสเตียริก ตามลำดับ) (N. Biswas et al., 2016; Kang et al., 2013; Sonwai et al., 2014) โดย CB จะช่วยปรับปรุงสมบัติทางเคมีและกายภาพของผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลต ได้แก่ ความมันวาว ความแข็งเปราะ ความเรียบเนียน และคุณสมบัติทางประสาทสัมผัส เป็นต้น ในปัจจุบันความต้องการของช็อกโกแลตเพิ่มขึ้นอย่างมาก ในขณะที่การผลิต CB นั้นลดลง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศและสิ่งแวดล้อม (Jahurul et al., 2013) ส่งผลให้ราคาของ CB ปรับตัวสูงขึ้น ดังนั้นเพื่อให้ CB เพียงพอต่อความต้องการของตลาดที่เพิ่มมากขึ้น ในบางอุตสาหกรรมจึงต้องการที่จะผลิตไขมันทดแทนเนยโกโก้ (cocoa butter equivalents : CBE) จากไขมันพืชชนิดอื่นเพื่อนำมาใช้ทดแทน CB ซึ่ง CBE เป็นไขมันพืชที่มีคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพที่คล้ายกับ CB และสามารถใช้ทดแทน CB ได้ทั้งเพียงบางส่วนและโดยสมบูรณ์ (Bahari & Akoh, 2018a; Kang et al., 2013) และเมื่อนำมาผลิตช็อกโกแลตจะไม่ทำให้คุณสมบัติของช็อกโกแลตเปลี่ยนแปลงไป โดยคณะกรรมการอาหารยุโรป (European Union Directive 2000/36/EC) ได้กำหนดแหล่งของไขมันพืชที่สามารถนำมาผลิต CBE มีทั้งหมด 6 ชนิด ได้แก่ illipé butter, sal fat, shea butter, kokum butter, palm oil และ mango kernel fat (I. Stewart & Kristott, 2004) โดยเฉพาะเนยอิลิปเป้ (illipé butter: IB) (*Shorea stenoptera*) ซึ่งเป็นพืชที่เติบโตในประเทศมาเลเซีย อินโดนีเซีย และฟิลิปปินส์ เป็นไขมันพืชที่มีคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพที่ใกล้เคียงกับ CB เป็นอย่างมาก มีองค์ประกอบของกรดไขมันชนิดกรดสเตียริกเป็นองค์ประกอบหลัก และมีองค์ประกอบ TAG หลัก ได้แก่ SOS (53.1%), POS

(36.0%) และ POP (6.6%) (Bahari & Akoh, 2018a) โดยมีลักษณะคล้ายกับ CB ซึ่งในปัจจุบันยังมีงานวิจัยที่นำ IB มาผลิตเป็น CBE จำนวนไม่มากนัก และก็เกิดจากการผสมระหว่าง IB กับไขมันชนิดอื่น เช่น น้ำมันปาล์มส่วนกลาง (palm mid-fraction: PMF) (Aumpai et al., 2022; Bahari & Akoh, 2018a, 2018b; Nesaretnam & Ali, 1992) งานวิจัยนี้สนใจที่จะศึกษาการนำ IB มาใช้เป็นไขมันเพียงชนิดเดียวในการผลิตเป็น CBE ซึ่งจะช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่าย ลดต้นทุน และลดการใช้ไขมันหลายชนิดในการนำมาผสมสำหรับผลิตเป็น CBE โดยจะศึกษาสมบัติและพฤติกรรมการตกผลึกของ CB ผสมกับ IB ที่อัตราส่วนต่างๆ ทั้งนี้เพื่อให้เข้าใจสมบัติด้านต่าง ๆ ของไขมันผสมในกรณีที่มีการใช้ IB เป็น CBE เพื่อทดแทน CB เพียงบางส่วน และเพื่อให้สามารถนำ IB มาผลิตเป็น CBE ในผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลตได้

อย่างไรก็ตามในพื้นที่เขตร้อนและกึ่งเขตร้อนส่วนใหญ่จะมีข้อจำกัดของการใช้งานและการบริโภคช็อกโกแลตเนื่องจากปัญหาของการหลอมเหลวและการอ่อนตัวลง ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดลักษณะของฝ้าขาวบนผิวของผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลต โดยลักษณะการเกิดฝ้าขาวนี้เป็นปัญหาหลักที่สำคัญสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตช็อกโกแลต (X. Wang et al., 2017) ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความต้องการที่จะศึกษาเกี่ยวกับไขมันพืชที่สามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติการหลอมเหลวของ CB (cocoa butter improver: CBI) โดย CBI จัดอยู่ในไขมันทดแทนเนยโกโก้ประเภท CBE ที่มีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงและมี TAG เหมือนกับ CB แต่จะมีปริมาณ SOS ที่สูงกว่า มีปริมาณไขมันแข็งในรูปผลึก (solid fat content: SFC) และมีจุดหลอมเหลวที่สูงกว่า CB (Norazlina et al., 2021) CBI ที่มีปริมาณ SOS ที่สูง สามารถได้มาจากการตกผลึกแยกส่วน (fractionation) ของไขมันพืชที่สามารถนำมาผลิต CBE ตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น (Bootello et al., 2012) เนื่องจาก SOS มีจุดหลอมเหลวสูง (43 °C) ที่อยู่ในโครงสร้างแบบ  $\beta$  (Norberg, 2006) โดยการผสมหรือเติมไขมันพืชบางชนิดหรือไขมันที่เกิดจากการตกผลึกแยกส่วนที่อุดมไปด้วย TAG ชนิด SOS ลงในช็อกโกแลตสามารถเพิ่มปริมาณ SFC และความแข็ง เพิ่มจุดหลอมเหลว ลดระยะเวลาในการควบคุมผลึก (tempering) และยังสามารถต้านทานการเกิดฝ้าขาว (fat bloom) บนผิวของช็อกโกแลต ทำให้ได้ช็อกโกแลตที่ทนความร้อน (heat resistance chocolate) (S. T. Beckett, 2008; Jeyarani & Reddy, 1999; Maheshwari & Reddy, 2005; Norazlina et al., 2021) และเมื่อเร็วๆ นี้ ได้มีงานวิจัยของ Norazlina et al. (2020) ที่ศึกษาการตกผลึกแยกส่วน 2 ครั้ง (2-stage fractionation) ของไขมันในเมล็ดจากมะม่วงป่า (Bambangan) โดยใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลาย การตกผลึกแยกส่วน 2 ครั้งนี้ทำให้ได้ไขมันสเตียอรินหรือไขมันส่วนแข็งที่อุดมไปด้วย SOS ซึ่งแสดงเทอร์โมแกรมของการหลอมเหลวที่

แหลมและคมชัดกว่าและมีจุดหลอมเหลวที่สูงกว่า CB และยังคงผลึกอยู่ในโครงสร้างแบบ  $\beta$  ซึ่งบ่งชี้ว่าเหมาะสมที่จะใช้เป็น CBI

ส่วนที่สองของงานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้น้ำมันอิลิปีสเตอริน หรือ นอยอิลิปีสเตอริน (illipé butter stearin: IBS) เป็น CBI โดยได้นำ IB มาทำการตกผลึกแยกส่วนด้วยตัวทำละลายอะซิโตน (acetone) เพื่อให้ได้ IBS ที่มี TAG ชนิด SOS ในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น เพื่อเพิ่มคุณสมบัติการทนความร้อนของช็อกโกแลต โดย IBS ที่อุณหภูมิด้วย SOS และมีศักยภาพที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้เป็น CBI ได้นั้นยังไม่ได้มีการรายงานจากงานวิจัยอื่นๆ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาสมบัติและพฤติกรรมการตกผลึกและการหลอมเหลวของ CB ผสมกับ IBS ที่อัตราส่วนต่างๆ รวมทั้งความเข้ากันได้ของไขมันผสม โดยในการศึกษาทั้ง 2 ส่วน จะมีการเลือกอัตราส่วนของไขมันผสมที่มีองค์ประกอบและพฤติกรรมการตกผลึกและการหลอมเหลวที่เหมือนหรือใกล้เคียงกับ CB (กรณีของ CBE) และไขมันผสมที่มีจุดหลอมเหลวที่สูงขึ้นมาจาก CB (กรณีของ CBI) นำมาผลิตเป็นช็อกโกแลต โดยใช้ CBE และ CBI ในปริมาณ 5% w/w ของผลิตภัณฑ์สุดท้ายตามข้อบังคับของสหภาพยุโรป (Union, 2000) และศึกษาคุณสมบัติการต้านทานความร้อนและพฤติกรรมการเกิดฝ้าขาว (fat bloom) บนผิวของช็อกโกแลตที่ผลิตจาก IB และ IBS โดยเปรียบเทียบกับช็อกโกแลตที่ผลิตจาก CB

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาสมบัติและพฤติกรรมการตกผลึกและการหลอมเหลวของ CB ผสมกับ IB ที่อัตราส่วนต่างๆ เพื่อดูความเป็นไปได้ในการนำ IB มาผลิตเป็น CBE ในผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลต
2. เพื่อศึกษาสมบัติและพฤติกรรมการตกผลึกและการหลอมเหลวของ CB ผสมกับ IBS ที่อัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อดูความเป็นไปได้ในการนำ IBS มาผลิตเป็น CBI ในผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลตทนความร้อน
3. เพื่อศึกษาคุณสมบัติการต้านทานความร้อนและพฤติกรรมการเกิดฝ้าขาวบนผิวของช็อกโกแลตที่ผลิตจาก IB และ IBS โดยเปรียบเทียบกับช็อกโกแลตที่ผลิตจาก CB

### 1.3 สมมติฐานของการวิจัย

1. ไขมันผสมระหว่าง CB กับ IB และ CB กับ IBS สามารถเข้ากันได้ดี ไม่ส่งผลทำให้พฤติกรรมการตกผลึกและการหลอมเหลวแตกต่างไปจาก CB แล้วสามารถนำ IB มาใช้เป็น CBE ในการผลิตช็อกโกแลต และ IBS มาใช้เป็น CBI ในการผลิตช็อกโกแลตทนความร้อนได้

2. ช็อกโกแลตทนความร้อนที่ผลิตจาก IBS สามารถต้านทานการเกิดฝ้าขาวบนผิวได้ดีกว่าช็อกโกแลตที่ผลิตจาก CB

### 1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1. การศึกษานี้ใช้ไขมันผสมระหว่าง CB/IB ในอัตราส่วนเท่ากับ 100/0, 85/15, 80/20, 60/40, 40/60, 20/80 และ 0/100 (% w/w) และ CB/IBS ในอัตราส่วนเท่ากับ 100/0, 90/10, 85/15, 80/20, 75/25, 50/50, 25/75 และ 0/100 (% w/w)

2. ศึกษาสมบัติและพฤติกรรมการตกผลึกและการหลอมเหลวของ CB/IB และ CB/IBS ที่อัตราส่วนต่างๆ

3. เลือกอัตราส่วนของไขมันผสมระหว่าง CB/IB ที่มีองค์ประกอบและพฤติกรรมการตกผลึกและการหลอมเหลวที่เหมือนหรือใกล้เคียงกับ CB มาเป็น CBE

4. เลือกอัตราส่วนของไขมันผสมระหว่าง CB/IBS ที่ให้จุดหลอมเหลวที่สูงขึ้นมาจาก CB แต่มีคุณสมบัติด้านการตกผลึกและการหลอมเหลวที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปจาก CB มากนักมาเป็น CBI

5. นำไขมันผสมในอัตราส่วนที่เลือกของทั้ง CB/IB และ CB/IBS มาผลิตเป็นช็อกโกแลตเพื่อศึกษาคุณสมบัติการต้านทานความร้อนและพฤติกรรมการเกิดฝ้าขาวบนผิวของช็อกโกแลต เปรียบเทียบกับช็อกโกแลตที่ผลิตจาก CB

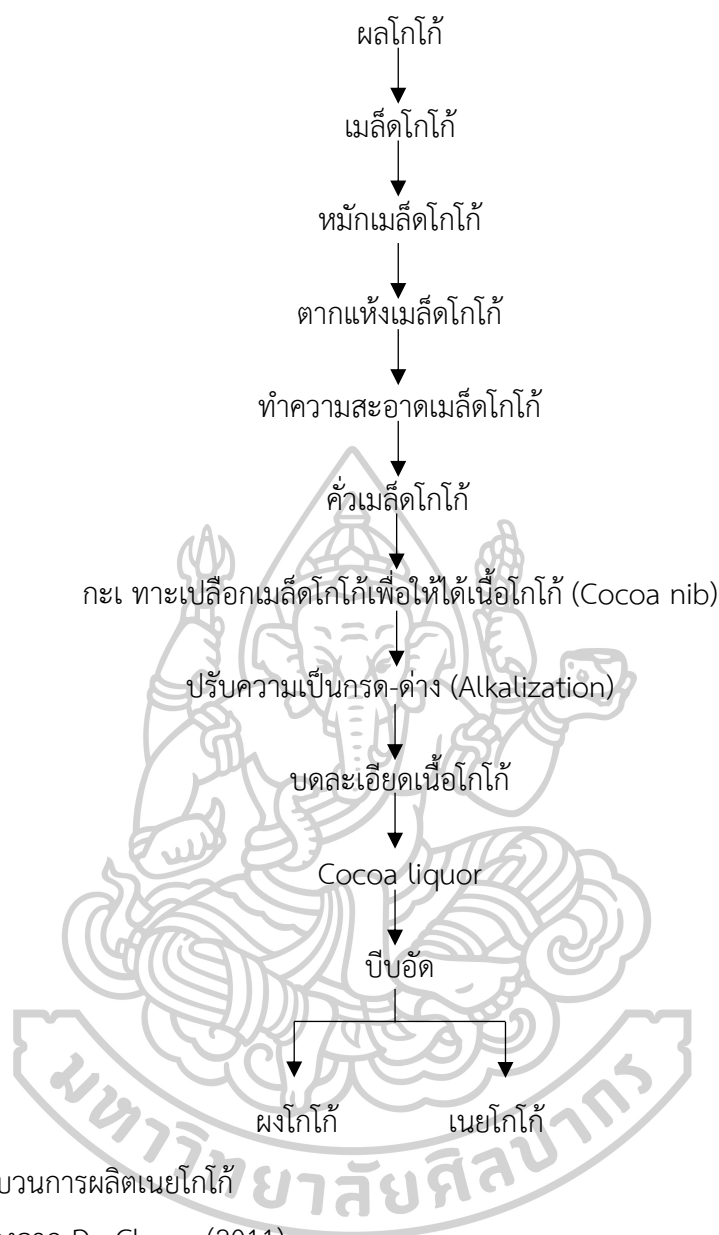
## บทที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 เนยโกโก้ (Cocoa butter)

CB ได้มาจากการสกัดเมล็ดจากต้นโกโก้ (*Theobroma cocoa*) (S. T. Beckett, 2008; Jahurul et al., 2013) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลตเนื่องจากเป็นเฟสต่อเนื่อง (continuous phase) ของช็อกโกแลต และมีกรดไขมันรวมทั้ง TAG ได้แก่ POP, POS และ SOS ที่ให้ลักษณะเฉพาะตัวในด้านของความมันวาว ความแข็งเปราะ กลิ่นรส การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผลึกที่ต้องการ พฤติกรรมการหลอมเหลวของช็อกโกแลต และคุณสมบัติทางประสาทสัมผัส เป็นต้น ซึ่งมีผลอย่างมากต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลต (Campos & Marangoni, 2012; G. Talbot, 2017) โดย CB ที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลตจะให้โครงสร้างผลึกแบบ  $\beta$  ซึ่งจะช่วยให้เกิดความรู้สึกนุ่มลิ้นเมื่อรับประทาน (G. Talbot, 2009)

#### 2.1.1 กระบวนการผลิตเนยโกโก้

กระบวนการผลิต CB จะเริ่มจากการนำเมล็ดโกโก้ที่ผ่านการหมักและการทำแห้งแล้วมาล้างทำความสะอาดแล้วทำการคั่วเมล็ดโกโก้ จากนั้นทำให้แตกเป็น 2 ซีกโดยผ่านการเข้าเครื่องกำจัดเปลือกหุ้มออกโดยใช้ลมเป่า ทำให้ได้ส่วนเนื้อที่เรียกว่า เนื้อโกโก้ (cocoa nib) แล้วนำมาทำปฏิกิริยากับสารละลายต่างเพื่อปรับค่าความเป็นกรด (Alkalization) เพื่อปรับปรุงสีและกลิ่นรสของโกโก้ จากนั้นนำเนื้อโกโก้มาบดละเอียดเพื่อลดขนาดและทำให้เซลล์ไขมันแตก ไขมันจะออกมานอกเซลล์ซึ่งจะมีลักษณะเป็นของเหลวเรียกว่า โกโก้ลิเควอร์ (cocoa liquor) จากนั้นนำไปบีบอัดเพื่อสกัดให้ได้ CB ออกมา กระบวนการผลิต CB จะแสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กระบวนการผลิตเนยโกโก้  
ที่มา : ดัดแปลงจาก De Clercq (2011)

### 2.1.2 คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของเนยโกโก้

CB มีองค์ประกอบหลักของ TAG 3 ชนิด ได้แก่ 1,3-dipalmitoyl-2-oleoyl-*sn*-glycerol (POP), 1-palmitoyl-2-oleoyl-3-stearoyl-*sn*-glycerol (POS) และ 1,3-distearoyl-2-oleoyl-*sn*-glycerol (SOS) (P, O และ S คือกรดไขมันชนิดปาล์มิติก, โอเลอิก และสเตียริกตามลำดับ) และมีกรดไขมันหลัก ได้แก่ กรดปาล์มิติก ( $C_{16}$ ), กรดสเตียริก ( $C_{18}$ ), กรดโอเลอิก ( $C_{18:1}$ ) ที่มีอยู่ร้อยละ 95 ของกรดไขมันทั้งหมด ถัดมาเป็น กรดลิโนเลอิก ( $C_{18:2}$ ) และกรดอะราคิติก ( $C_{20}$ ) องค์ประกอบของ

CB จะแตกต่างกันไปตามประเทศและสภาพอากาศที่เพาะปลูก (Foubert et al., 2004; G. Talbot, 2009) โดยจะแสดงสมบัติทางเคมีและกายภาพ รวมทั้งสมบัติทางความร้อนของ CB ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ และสมบัติทางความร้อนของเนยโกโก้

	Cocoa butter	Reference
<b>Physicochemical profiles</b>		
Iodine Value, IV (g iodine/g)	31.3-38.4	Jun Jin et al. (2018);
Acid Value, AV (mg KOH/g)	0.41-2.11	J. Jin et al. (2017);
Slip Melting Point, SMP (°C)	25.3-35.0	Jun Jin et al. (2016); Sonwai et al. (2014);
<b>Fatty acid, FA (%)</b>		
Palmitic acid (C <sub>16</sub> )	24.5-33.7	Norazura et al. (2020);
Stearic acid (C <sub>18</sub> )	33.3-40.2	Kadivar et al. (2016);
Oleic acid (C <sub>18:1</sub> )	26.3-36.5	Sonwai et al. (2014);
Linoleic acid (C <sub>18:2</sub> )	1.7-3.56	Gunstone (2011);
Arachidic acid (C <sub>20</sub> )	1.0-1.23	
<b>Triacylglycerols, TAGs (%)</b>		
OOO	0.2-0.9	Bahari and Akoh (2018a);
POO	1.2-5.5	Jun Jin et al. (2018);
POP	13.8-21.8	J. Jin et al. (2017);
POS	34.6-45.4	Jun Jin et al. (2016);
SOS	23.7-28.5	Gunstone (2011);
SOO	1.7-9.3	Lipp and Anklam (1998);
<b>Melting and crystallization behavior</b>		
<b>Melting properties</b>		
Onset temperature (°C)	13.00-27.9	Zhang et al. (2020);
Offset temperature (°C)	26.8-40.7	Huang et al. (2021);
Enthalpy (J/g)	55.84-120.7	Jun Jin et al. (2018);
<b>Crystallization properties</b>		
Onset temperature (°C)	15.5-17.71	Jun Jin et al. (2016);

Offset temperature (°C)	3.5-5.59	Kadivar et al. (2016)
Enthalpy (J/g)	49.98-77.7	

ที่มา : Norazlina et al. (2021)

CB มีคุณสมบัติแข็งตัวที่อุณหภูมิ 20 °C จะเริ่มหลอมที่อุณหภูมิ 30 – 32 °C และมีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 35 °C มีสีเหลืองอ่อนและหลอมละลายอย่างรวดเร็วในปาก โดย CB จะช่วยปรับปรุงสมบัติทางเคมีและกายภาพของช็อกโกแลตที่เป็นสมบัติเฉพาะตัวได้แก่ ความมันวาว และคุณสมบัติการหลอมเหลว เป็นต้น เนื่องจาก CB เป็นไขมันพืชที่มีองค์ประกอบของ mono-unsaturated triglyceride มากกว่าร้อยละ 80 ของ TAG ทั้งหมด ส่วน polyunsaturated และ triunsaturated triglyceride จะมีปริมาณร้อยละ 13 และ 3 ตามลำดับ (Loisel et al., 1998) โดย TAG ทั้ง 3 ชนิดนี้ จะเป็น 2-olefinated ทำให้สามารถตกผลึกรวมกันและซ้อนกันได้ดี ส่งผลให้ CB มีรูปผลึกที่คงตัวและมีความเสถียร โดย CB สามารถตกผลึกได้ทั้งหมด 6 โครงสร้าง ได้แก่ ได้แก่  $\gamma$  หรือแบบที่ I,  $\alpha$  หรือแบบที่ II,  $\beta_2'$  หรือแบบที่ III,  $\beta_1'$  หรือแบบที่ IV,  $\beta_2$  หรือแบบที่ V และ  $\beta_1$  หรือแบบที่ VI (เรียงจากโครงสร้างที่ไม่เสถียรไปจนถึงโครงสร้างที่เสถียรที่สุด) (Zou et al., 2022) โดยโครงสร้างแบบ  $\beta_2$  (แบบที่ V) เป็นโครงสร้างที่ต้องการในผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลต เนื่องจากทำให้ช็อกโกแลตมีความมันวาว ความแข็งเปราะ ความเรียบเนียน และคุณสมบัติทางประสาทสัมผัสที่ดี นอกจากนี้ยังสามารถต้านทานการเกิดฝ้าขาว (fat bloom) ของช็อกโกแลตได้

อย่างไรก็ตามจากความต้องการของช็อกโกแลตและผลิตภัณฑ์ขนมหวานที่เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่การผลิต CB นั้นลดลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศและสิ่งแวดล้อม ส่งผลให้ราคาของ CB ปรับตัวสูงขึ้น จึงต้องการที่จะผลิตไขมันทดแทนเนยโกโก้จากไขมันพืชชนิดอื่นที่มีคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพที่ใกล้เคียงกับ CB เพื่อทดแทน CB เพียงบางส่วนหรือทั้งหมดในอุตสาหกรรมขนมหวาน (Silva et al., 2017)



## 2.2 ไขมันทดแทนเนยโกโก้ (Cocoa butter alternatives : CBA)

ไขมันทดแทนเนยโกโก้เป็นไขมันที่ใช้ทดแทน CB ในการผลิตช็อกโกแลตมีลักษณะแข็ง (hard butter) โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพที่ใกล้เคียงกับ CB ได้แก่ องค์ประกอบของกรดไขมัน และ TAG ส่งผลให้เกิดการหลอมเหลวอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิร่างกายและมีความคงตัวสูง (Wainwright, 1996) ซึ่งในอุตสาหกรรมมีความสนใจที่จะศึกษาและพัฒนาไขมันทดแทน CB ที่มีคุณสมบัติและการใช้งานที่แตกต่างกัน เพื่อนำมาผสมกับ CB ในการผลิตช็อกโกแลตโดยการแทนที่ CB ในบางส่วนหรือทั้งหมด (Kevin W. Smith, 2012) สามารถแบ่งไขมันทดแทน CB ออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ Cocoa butter substitutes (CBS), Cocoa butter replacers (CBR) และ Cocoa butter equivalents (CBE) โดย CBR และ CBS มีราคาที่ไม่แพงมากเมื่อเทียบกับ CBE แต่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ eutectic หรือไขมันอ่อนตัวลง เนื่องจากความไม่เข้ากันกับ CB ส่งผลให้ไม่สามารถผสมกับ CB ได้ทุกอัตราส่วน (K. W. Smith, 2001) ซึ่งต่างจาก CBE ที่สามารถเข้ากันได้ดีกับ CB มากกว่าไขมันทดแทน CB อีก 2 ชนิด องค์ประกอบและคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของไขมันทดแทน CB (Cocoa butter alternatives) จะแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 องค์ประกอบและคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของไขมันทดแทนเนยโกโก้ (Cocoa butter alternatives)

	CBS	CBR	CBE
<b>Plant fat and oil</b>	- coconut oil - palm kernel oil	- soy bean oil - cotton oil - sunflower oil - palm olein	- pakm olein/stearin - illipé butter - shea butter - kokum butter - mango fat
<b>Function</b>	- lauric fat - suitable for 100% substitution only	- nonlauric fat - compatible with CB in small ratio	- nonlauric fat - compatible with CB

<b>Fatty acid</b>	- lauric acid - myristic acid	- elaidic acid - oleic acid - palmitic acid - stearic acid	- palmitic acid - stearic acid - oleic acid
<b>TAG</b>	- LLL - LLM - LMM	- PEE - SEE	- POP - POS - SOS
<b>Tempering</b>	No	No	Yes
<b>Stable crystal</b>	$\beta'$	$\beta'$	$\beta$

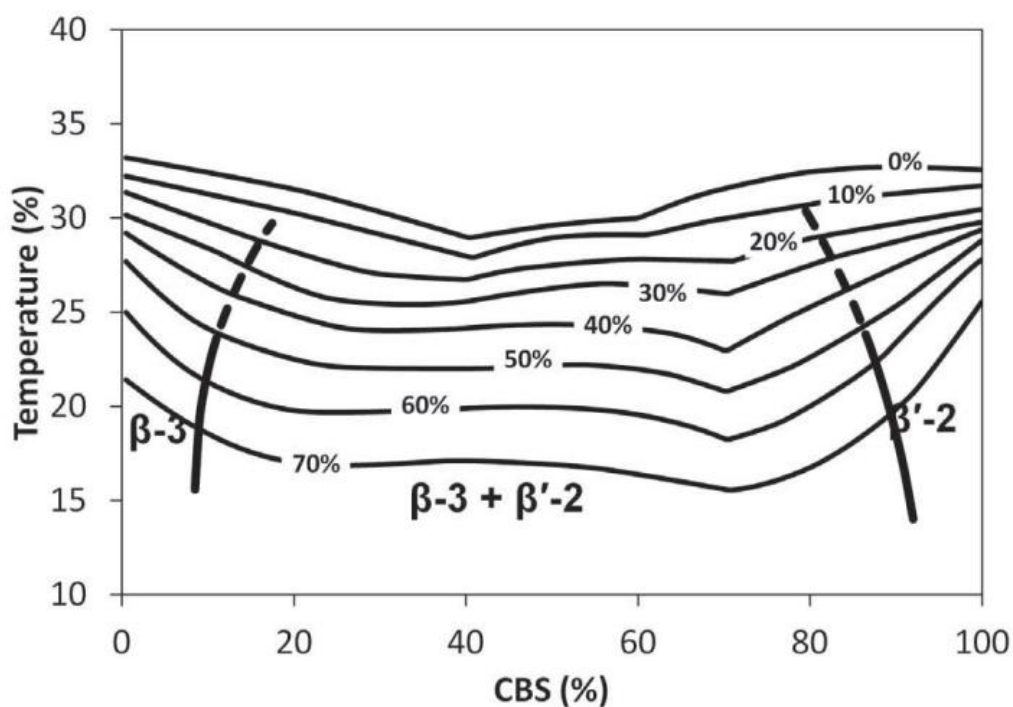
หมายเหตุ : L : Lauric acid, M : Myristic acid, P : Palmitic acid, O : Oleic acid, E : Elaidic acid, และ S : Stearic acid

ที่มา : ดัดแปลงจาก Lipp and Anklam (1998); Wainwright (1996)

### 2.2.1 Cocoa butter substitutes (CBS)

เป็นไขมันพืชในกลุ่ม lauric fat โดยมีปริมาณกรดลอริก ( $C_{12}$  : 45-55% ) และ กรดไมริสติก ( $C_{14}$  : 15-20%) ที่ได้จากน้ำมันเมล็ดปาล์มและน้ำมันมะพร้าวด้วยกระบวนการตกผลึกแยกส่วน การไฮโดรจีเนชัน หรือทำอินเตอร์เอสเทอร์ฟิเคชัน CBS จะมีสมบัติทางกายภาพที่ใกล้เคียงกับ CB แต่สมบัติทางเคมีจะแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง (I. M. Stewart & Timms, 2002) โดย CBS ประกอบไปด้วยกรดไขมันอิ่มตัว เมื่อนำมาเติมในผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลตจึงไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการควบคุมผลึก (tempering) (Shukla, 2005) CBS มีความยาวสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่สั้นกว่า CB และมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน ด้วยคุณสมบัติทางเคมีกายภาพที่แตกต่างกันของ CBS กับ CB จึงทำให้เกิดความไม่เข้ากันของไขมันผสมเป็นอย่างมาก เห็นได้จากภาพที่ 2 พบว่าสามารถใช้ CBS แทน CB ทั้งหมด (100%) หรือถ้านำมาผสมกับ CB ก็สามารถใช้ได้เพียงปริมาณเล็กน้อยเท่านั้น โดยใช้ในปริมาณสูงสุดที่ 5 % หากใช้ในปริมาณที่มากกว่านี้จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ eutectic หรือไขมันอ่อนตัวลง เนื่องจากเส้นกราฟที่ลากผ่านระหว่าง CB (ด้านซ้ายของภาพ) และ CBS (ด้านขวาของภาพ) เป็นเส้นโค้งและไม่ขนานกันอย่างมาก นำไปสู่การแยกเฟสไขมัน ทำให้เกิดฝ้าขาวที่ผลิตภัณฑ์

ช็อกโกแลตได้ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ผลิตโดยใช้ CBS นั้นมักจะใช้ผงโกโก้ที่มีไขมันต่ำเนื่องจากความเข้ากันไม่ได้กับ CB ส่งผลให้รสชาติของโกโก้มีความเข้มข้นลดลง (Kevin W. Smith, 2012)

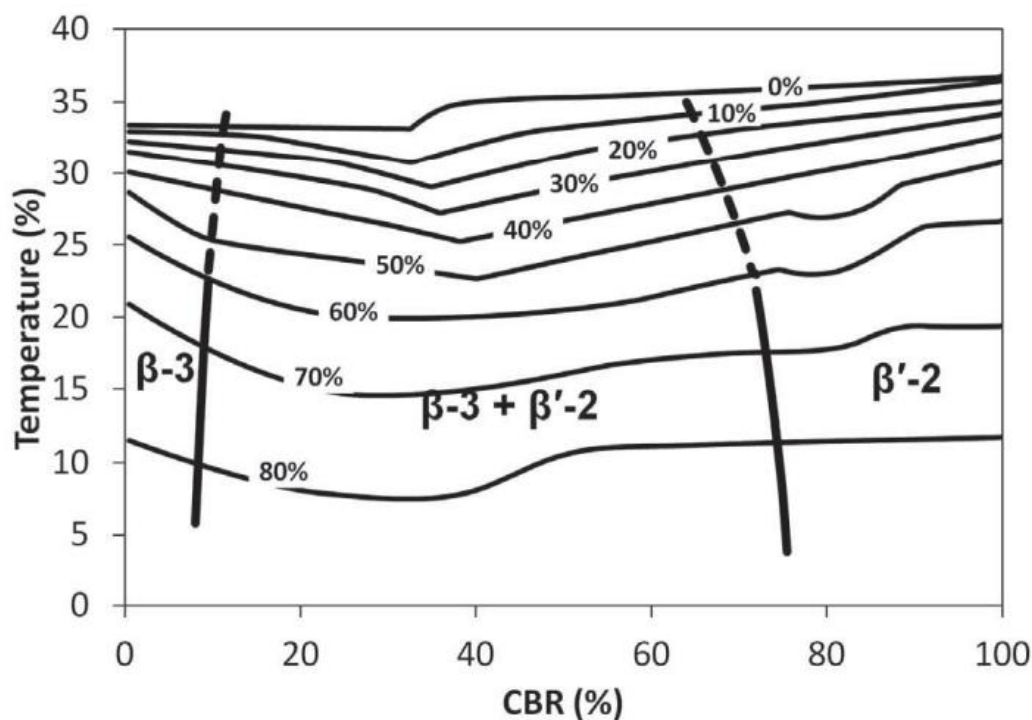


ภาพที่ 2 Iso-solid phase diagram ของเนยโกโก้กับไขมันทดแทนเนยโกโก้ประเภท CBS  
ที่มา : Kevin W. Smith (2012)

### 2.2.2 Cocoa butter replacers (CBR)

เป็นไขมันพืชในกลุ่ม non-lauric fat ที่ได้จากน้ำมันถั่วเหลือง, ปาล์ม, เมล็ดฝ้าย, ข้าวโพด, ถั่วลิสง, ดอกคำฝอย และดอกทานตะวัน เป็นต้น ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรจีเนชันบางส่วนและการตกผลึกแยกส่วน ทำให้มีสมบัติที่แตกต่างจาก CB โดยมีกรดไขมันหลักที่คล้ายกับ CB แต่มี TAG ที่แตกต่างจาก CB ดังนั้น CBR จึงสามารถใช้แทน CB ในปริมาณที่จำกัดเพื่อไม่ให้เกิดผลต่อผลิตภัณฑ์สุดท้าย (Bootello et al., 2012; Shukla, 2005; Verstringe et al., 2012) โดย CBR จะมีความเสถียรในโครงสร้างแบบ  $\beta'$  ซึ่งต่างจาก CB ที่เสถียรในโครงสร้างแบบ  $\beta$  อาจเนื่องมาจากความซับซ้อนของ TAG ดังนั้นจึงทำให้เกิดความไม่เข้ากันกับ CB เป็นอย่างมาก ซึ่งจะเห็นได้จากภาพที่ 3 แสดงให้เห็นว่า CBR สามารถผสมกับ CB ได้ประมาณ 20 % หากมีปริมาณที่มากกว่านี้ จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ eutectic หรือไขมันอ่อนตัวลง เนื่องจากเส้นกราฟที่ลากผ่านระหว่าง CB (ด้านซ้ายของ

ภาพ) และ CBR (ด้านขวาของภาพ) ไม่ตรงและไม่ขนานกัน นำไปสู่การแยกเฟสไขมันระหว่างโครงสร้างแบบ  $\beta'$  และ  $\beta$  ทำให้สูญเสียความมั่นคงของผลิตภัณฑ์ หรืออาจเกิดฝ้าขาวที่ผิวของช็อกโกแลต (Kevin W. Smith, 2012)

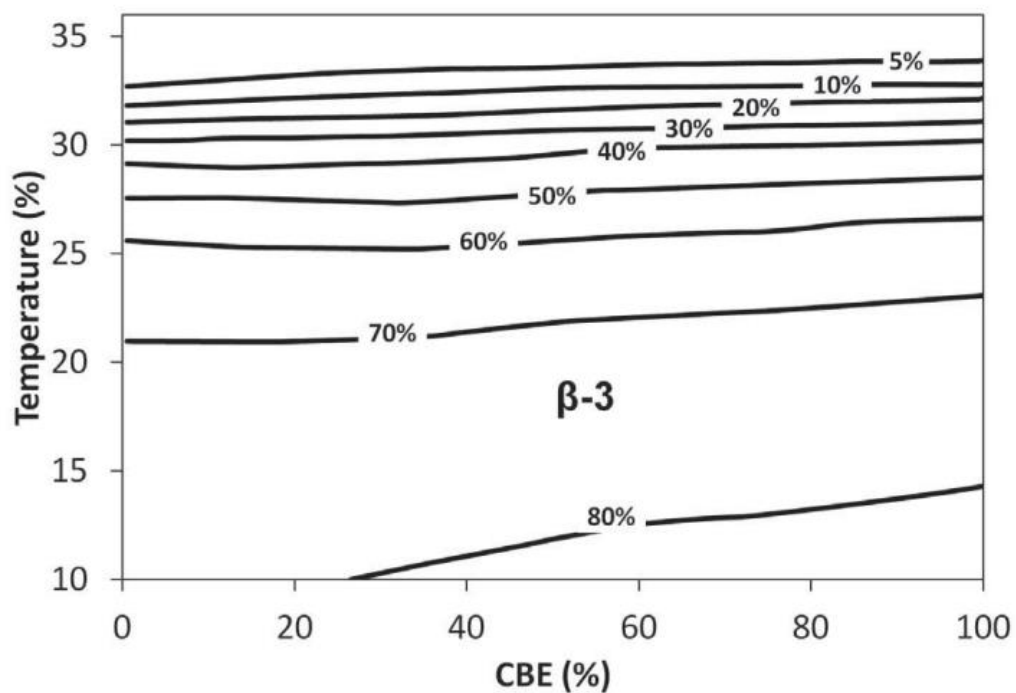


ภาพที่ 3 Iso-solid phase diagram ของเนยโกโก้กับไขมันทดแทนเนยโกโก้ประเภท CBR  
ที่มา : Kevin W. Smith (2012)

### 2.2.3 Cocoa butter equivalents (CBE)

เป็นไขมันพืชในกลุ่ม non-lauric fat ผลิตได้จากการกระบวนการกลั่นลำดับส่วน (refining) และการตกผลึกแยกส่วน (fractionation) สามารถใช้ทดแทน CB ได้ทั้งเพียงบางส่วนและทั้งหมด เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ทางเคมีและกายภาพ และสมบัติทางความร้อนเหมือนหรือใกล้เคียงกับ CB มีความเข้ากันได้และสามารถผสมกับ CB ในปริมาณเท่าไรก็ได้โดยไม่ทำให้คุณสมบัติของ CB เปลี่ยนแปลงไปในผลิตภัณฑ์สุดท้ายหรือผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลตเช่นการตกผลึกและการหลอมเหลว คุณสมบัติการไหล เป็นต้น (Bahari & Akoh, 2018b; Jahurul et al., 2013; Verstringe et al., 2012) ความเข้ากันได้ของ CB กับ CBE แสดงดังภาพที่ 4 จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟที่ลากผ่านระหว่าง CB โกโก้ (ด้านซ้ายของภาพ) และ CBE (ด้านขวาของภาพ) มีลักษณะเป็นเส้นตรงและแทบจะขนานกัน ซึ่งบ่งชี้ว่า CBE สามารถเข้ากันได้อย่างสมบูรณ์กับ CB ในทุกอัตราส่วน (Kevin W. Smith, 2012)

ไขมันที่เป็นส่วนประกอบของ CBE จะมี TAG ชนิด monounsaturated (SUS-TAG) มากกว่า 70% - 80% และมี TAG ชนิด tri-saturated (SSS-TAG) น้อยกว่า 5% CBE สามารถตกผลึกได้ 6 โครงสร้างเช่นเดียวกับ CB (Kevin W. Smith, 2012) โดยไขมันพืชที่สามารถใช้ผลิตเป็น CBE มีทั้งหมด 6 ชนิด ได้แก่ illipé butter, sal fat, shea butter, kokum butter, palm oil และ mango kernel fat ซึ่งองค์ประกอบและกระบวนการการผลิต CBE จากไขมันพืชชนิดอื่น ๆ จะแสดงดังตารางที่ 3 จะพบว่าไขมันที่สามารถนำไปใช้ได้โดยตรงโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการใด ได้แก่ IB กับไขมันโคคุม เนื่องจากมีปริมาณ TAG ชนิด SOS ที่สูงและมี SSS ที่ต่ำ ซึ่งไขมันชนิดอื่นต้องทำการตกผลึกแยกส่วนก่อนที่จะสามารถนำไปใช้งานได้



ภาพที่ 4 Iso-solid phase diagram ของเนยโกโก้กับไขมันทดแทนเนยโกโก้ประเภท CBE  
ที่มา : Kevin W. Smith (2012)

ตารางที่ 3 องค์ประกอบและกระบวนการการผลิต CBE จากไขมันพืช

Fat raw material	Original	Processing	Ingredient	Main TAG
Illipé butter	<i>Shorea stenoptera</i>	-	Fat	POS, SOS
Palm oil	<i>Elaeis Guineensis</i>	2 fractionations	Mid fraction	POP
Sal fat	<i>Shorea robusta</i>	1 fractionation	Stearin fraction	SOS, SOA
Shea butter	<i>Viellaria paradosa</i>	1 fractionation	Stearin fraction	SOS
Kokum butter	<i>Garcinia indica</i>	-	Fat	SOS
Mango kernel fat	<i>Mangifera india</i>	1 fractionation	Stearin fraction	SOS, POS

หมายเหตุ : P : Palmitic acid, O : Oleic acid, S : Stearic acid และ A : Arachidic acid

ที่มา : I. M. Stewart and Timms (2002)

โดยทั่วไปการผลิต CBE จะนิยมใช้ไขมัน 2 ชนิดผสมเข้าด้วยกันระหว่างไขมันที่อุดมไปด้วย TAG ชนิด POP กับไขมันที่อุดมไปด้วย TAG ชนิด SOS เพื่อให้มีองค์ประกอบของกรดไขมันและ TAG ที่ใกล้เคียงกับ CB แต่ทั้งนี้ก็สามารถใช้ไขมันเพียงชนิดเดียวในการผลิตเป็น CBE ได้หากไขมันชนิดนั้นมีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับ CB เช่น IB ที่อุดมไปด้วย TAG ชนิด POS และ SOS ซึ่งมีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับ CB โดยไม่ต้องนำไปผสมกับไขมันชนิดอื่น

CBE สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่

### 2.2.3.1 Cocoa butter extenders (CBEX)

CBEX ไม่สามารถผสมกับ CB ได้ทุกอัตราส่วน (Verstringe et al., 2012) และใช้ทดแทน CB ได้เพียงปริมาณน้อยโดยไม่ทำให้การหลอมเหลว กระบวนการผลิตและคุณลักษณะการไหลเปลี่ยนแปลงไปแต่ CBEX จะมีคุณลักษณะทางเคมีกายภาพที่ไม่เหมือนกับ CB ซึ่งในปัจจุบัน CBEX ยังมีความน่าสนใจน้อยกว่า CBI ดังนั้นงานวิจัยส่วนใหญ่จึงมุ่งเน้นศึกษา CBI เป็นหลัก

### 2.2.3.2 Cocoa butter improvers (CBI)

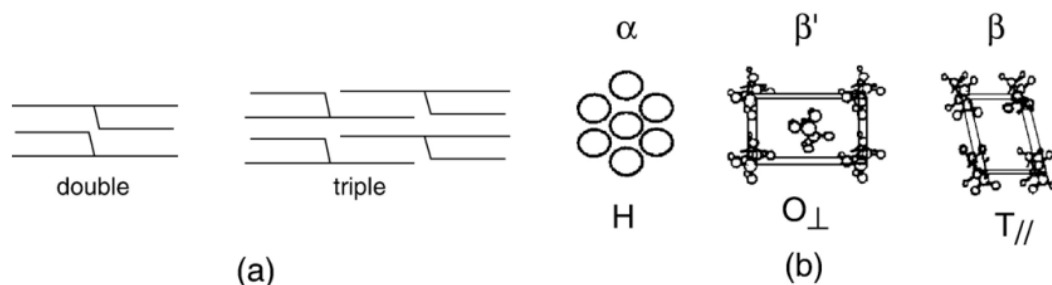
CBI หรือ heat-resistant CBE มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับ CB แต่จะมี TAG ชนิด SOS มีปริมาณไขมันแข็งในรูปผลึก (SFC) มีจุดหลอมเหลวที่สูงกว่า CB และยังมีความแข็งมากกว่า CB โกล์ จึงใช้ในการปรับปรุงความอ่อนตัวของ CB (Geoff Talbot, 2009) นอกจากนี้ยังช่วยลดระยะเวลาในการควบคุมผลึก (tempering) และยังสามารถต้านทานการเกิดฝ้าขาวบนผิว (fat bloom) ของช็อกโกแลต ทำให้ได้ช็อกโกแลตทนความร้อน (heat resistant chocolate)

Norberg (2006) รายงานว่าช็อกโกแลตนมที่อุดมไปด้วยไขมันนม ที่ผลิตโดยใช้ CBI สามารถช่วยลดปัญหาการอ่อนตัวของไขมันนมได้ โดยปริมาณของ CBI ที่แนะนำให้เติมลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติความคงตัวของช็อกโกแลตนมสามารถเติมได้ที่ 15 -30% โดยน้ำหนักของเฟสไขมัน และในงานวิจัยของ Maheshwari and Reddy (2005) ได้ใช้ไขมันโคคุม (kokum butter) ที่อุดมไปด้วยปริมาณ SOS โดยใช้เป็น CBI ในช็อกโกแลต ซึ่งพบว่าการเติมไขมันโคคุมสามารถเพิ่มความแข็งของคาร์คช็อกโกแลตและช็อกโกแลตนม ทำให้ค่า SFC เพิ่มขึ้นโดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 30 °C ขึ้นไป เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของ SOS ทำให้ช็อกโกแลตมีความต้านทานความร้อนสูงขึ้น นอกจากนี้การเติมไขมันโคคุมที่ 5% w/w ของผลิตภัณฑ์สุดท้ายนั้น ไม่มีความแตกต่างในเรื่องของความหนืดของของไหลแบบพลาสติก (plastic viscosity) และค่าความเค้นจุดคราก (yield stress) ของช็อกโกแลตอย่างมีนัยสำคัญ

### 2.3 โครงสร้างของผลึกไขมัน (Polymorphism)

โมเลกุล TAG สามารถตกผลึกในรูปแบบการบรรจุผลึกที่แตกต่างกัน (R.E. Timms, 2003) โดยโมเลกุลแบบสามขา (three legged) สามารถประกอบเข้าด้วยกันได้หลายวิธี เช่น การซ้อนกันของแก้อีหรือของโมเลกุล ซึ่งมี 2 แบบ คือ การบรรจุแบบ double-chain และการจัดเรียงตัวของโมเลกุล TAG แบบ triple-chain (ภาพที่ 5a) มุมที่เข้ากันได้พอดีจะเป็นตัวกำหนดความเสถียรของโครงสร้าง ความแตกต่างระหว่างโครงสร้างนั้นสามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจนที่สุดจากมุมมองด้านบนซึ่งแสดงโครงสร้างของ sub-cell สามารถกำหนดรูปแบบโครงสร้างได้ 3 รูปแบบ ได้แก่  $\alpha$ ,  $\beta'$  และ  $\beta$  ตามลำดับ ตามการเพิ่มขึ้นของความคงตัวหรือความเสถียรและจุดหลอมเหลว (ภาพที่ 5b) โดยโครงสร้างผลึกของ CB เป็นสิ่งที่ได้รับความสนใจจากงานวิจัยจำนวนมาก จึงได้มีการรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยอื่น ๆ จากตารางที่ 4 แสดงช่วงของอุณหภูมิการหลอมเหลวของโครงสร้างผลึก CB

รวมทั้งโครงสร้างของผลึก CB สามารถกำหนดได้โดยเทคนิคการทดลองการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) จากตารางที่ 5 และภาพที่ 6 (Himawan et al., 2006; Sato, 2001)



ภาพที่ 5 การจัดเรียงตัวของโมเลกุล TAG ตามความยาวสายโซ่ (a) และโครงสร้างของ sub-cell (b) ที่มา : Himawan et al. (2006)

ตารางที่ 4 ช่วงของอุณหภูมิการหลอมเหลวของโครงสร้างผลึกเนยโกโก้

Phase	Melting point (°C)				Chain packing
Wille and Lutton (1966)	Wille and Lutton (1966)	Huyghebaert and Hendrickx (1971)	Lovegren et al. (1976)	van Malssen et al. (1999)	Geoff Talbot (2009)
I หรือ $\gamma$	17.3	14.9 - 16.1	13	-5 - 5	Double
II หรือ $\alpha$	23.3	17 - 23.2	20	17 - 22	Double
III หรือ $\beta_2'$	25.5	22.8 - 27.1	23	20 - 27	Double
IV หรือ $\beta_1'$	27.5	25.1 - 27.4	25		Double
V หรือ $\beta_2$	33.8	31.3 - 33.2	30	29 - 34	Triple
VI หรือ $\beta_1$	36.3	33.8 - 36.0	33.5		Triple

ที่มา : De Clercq (2011)

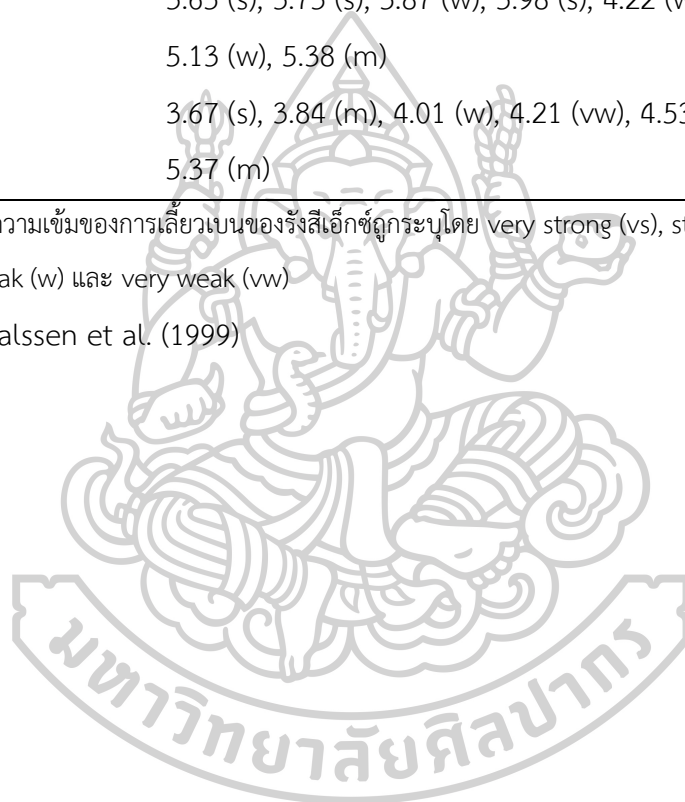


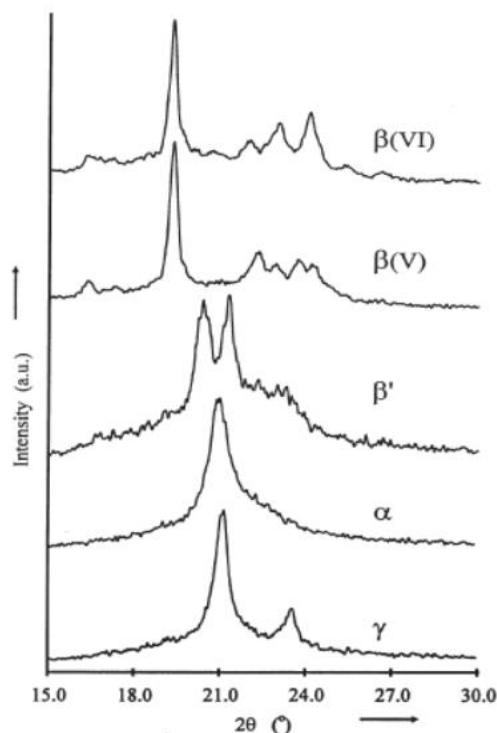
ตารางที่ 5 รูปแบบโครงสร้างของผลึกเนยโกโก้ที่แสดงตำแหน่งพีคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

Polymorphic form	Short spacing (Å)
I หรือ $\gamma$	3.87 (m), 4.17 (s)
II หรือ $\alpha$	4.20 (vs)
III หรือ $\beta_2'$	3.87 (vw), 4.20 (vs)
IV หรือ $\beta_1'$	3.75 (m), 3.88 (w), 4.13 (s), 4.32 (s)
V หรือ $\beta_2$	3.65 (s), 3.73 (s), 3.87 (w), 3.98 (s), 4.22 (w), 4.58 (vs), 5.13 (w), 5.38 (m)
VI หรือ $\beta_1$	3.67 (s), 3.84 (m), 4.01 (w), 4.21 (vw), 4.53 (vs), 5.09 (vw), 5.37 (m)

หมายเหตุ : ค่าความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ถูกระบุโดย very strong (vs), strong (s), medium (m), weak (w) และ very weak (vw)

ที่มา : van Malssen et al. (1999)



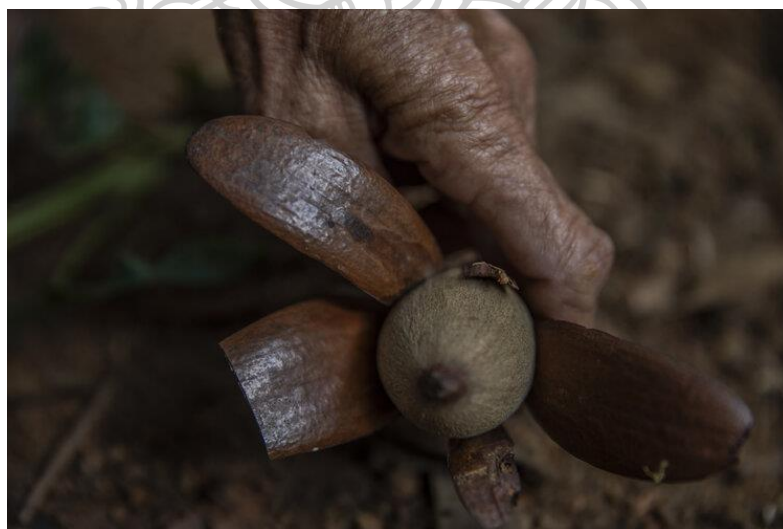


ภาพที่ 6 ลักษณะพีคโครงสร้างผลึกของเนยโกโก้ด้วยเทคนิคการทดลองการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) โดยใช้การสแกนแบบมุมกว้าง (short spacing)  
ที่มา : Marangoni and McGauley (2003)

## 2.4 เนยอิลิปเป้ (Illipé butter)

อิลิปเป้ (*Shorea stenoptera*) หรือมีชื่ออื่นได้แก่ Borneo tallow, engkabang หรือ tengkawang tallow เป็นพืชป่าที่เติบโตในเกาะบอร์เนียว, ซา, อินโดนีเซีย, มาเลเซีย และฟิลิปปินส์ อิลิปเป้เป็นไม้เต็งรังมีลำต้นที่ยาวและสูงถึง 49 เมตร ต้นอิลิปเป้จะผลิดอกระหว่างเดือนกันยายนถึงพฤศจิกายน โดยผลจะสุกในอีก 3-4 เดือนต่อมาและเมล็ดมีปีกยาวประมาณ 5 เซนติเมตร ซึ่งล้อมรอบด้วยใบ 5 ใบที่กระจายรอบเมล็ด (Blicher-Mathiesen, 1994) มีลักษณะคล้ายลูกยางดังแสดงตามภาพที่ 7 ไขมันได้มาจากเมล็ดของอิลิปเป้ (Illipé butter : IB) มีปริมาณ 40- 60% องค์ประกอบของกรดไขมันบางชนิดใน IB มีลักษณะคล้ายกับ CB คือมีกรดสเตียริกเป็นองค์ประกอบหลักและมีส่วนประกอบของ TAG หลักได้แก่ SOS (53.1%), POS (36.0%) และ POP (6.6%) (Bahari & Akoh, 2018a; Ghazani & Marangoni, 2018; Lipp & Anklam, 1998) ซึ่งอุดมไปด้วย

SUS-TAG องค์ประกอบของกรดไขมัน ได้แก่ กรดปาล์มิติก (19.71-20.22%), กรดสเตียริก (44.27-42.60%), กรดโอเลอิก (31.29-31.89%), กรดลิโนเลอิก (0.53-1.01%) และกรดอะราคิดิก (2.18-3.53%) ซึ่งเหมือนกับ CB (Darmawan et al., 2020) ด้วยองค์ประกอบของกรดไขมันและ TAG IB เป็นไขมันที่มีองค์ประกอบหลักที่ใกล้เคียงกับ CB มากที่สุดในไขมันทั้งหมด 6 ชนิดที่นำมาใช้เป็น CBE แม้ว่าจะมีกรดปาล์มิติกน้อยกว่าและมีกรดสเตียริกมากกว่าเนยโกโก้ก็ตาม โดยทั่วไปแล้วจะมี POS ประมาณ 34% ในการผสมไขมันเป็น CBE ซึ่งเนยอิลิเป้มีปริมาณ TAG ชนิดนี้ที่ใกล้เคียงกับปริมาณที่กำหนดไว้ (Geoff Talbot, 2009) โดย IB ที่มีกรดไขมัน (กรดปาล์มิติก, กรดสเตียริก และกรดโอเลอิก) ที่มีสัดส่วนสูงเหล่านี้สามารถใช้เป็น CBE ได้โดยตรงโดยไม่ต้องปรับปรุงคุณภาพไขมัน (กระบวนการไฮโดรจีเนชัน, การตกผลึกแยกส่วน และการทำอินเทอร์เอสเทอริฟิเคชัน) IB มีจุดหลอมเหลวระหว่างอุณหภูมิ 37-39 °C (Firestone, 1999; Gunstone, 2011) นอกจากนี้ IB จะนำมาผลิตเป็น CBE แล้วยังใช้ในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง เช่น สบู่, ลิปสติก และมอยส์เจอร์ไรเซอร์ เป็นต้น (Gusti & Waluyo, 2016; Kusumaningtyas & Sulaeman, 2012; Leksono & Hakim, 2018)



ภาพที่ 7 ผลอิลิเป้ (*Shorea stenoptera*)

การใช้ IB เป็น CBE ที่ใช้ทดแทน CB บางส่วนในผลิตภัณฑ์ซ็อกโกแลตจะต้องไม่เกิดปฏิกิริยาที่ไม่พึงประสงค์ระหว่างไขมันผสม ซึ่งจะพบว่าไขมันผสมระหว่าง CB กับ IB ไม่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ eutectic และปริมาณของแข็งในรูปผลึกจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของ IB เนื่องจากปริมาณของ POS และโดยเฉพาะ SOS ที่สูงขึ้นใน IB เมื่อเทียบกับ CB (G. Talbot, 2015)

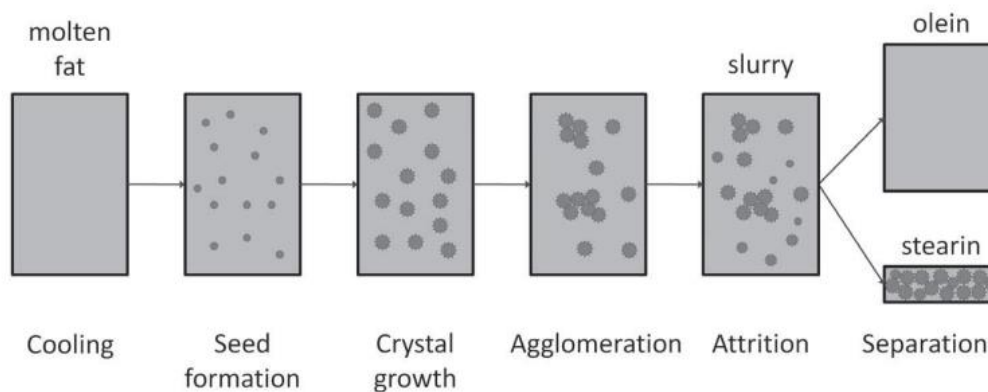
## 2.5 กระบวนการตัดแปลงคุณสมบัติของไขมันเพื่อผลิตไขมันทดแทนเนยโกโก้

น้ำมันและไขมันที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมขนมหวานนั้นมีจำนวนค่อนข้างน้อย แม้ว่าจะมีการใช้น้ำมันและไขมันอื่น ๆ ในการใช้งานเฉพาะด้านก็ตาม โดยทั่วไปน้ำมันจะถูกสกัดโดยการบดเมล็ดพืช แล้วขับน้ำมันออกโดยการบีบอัด ในบางกรณีน้ำมันจะถูกสกัดโดยใช้ตัวทำละลาย ในอุตสาหกรรมขนมหวานอาจใช้น้ำมันหลายชนิดโดยตรงหลังจากผ่านกระบวนการกลั่น (refining) โดยยังไม่ผ่านกระบวนการอื่นอย่างใดก็ตามน้ำมันบางชนิดอาจผ่านกระบวนการตัดแปลงเพื่อให้ได้คุณสมบัติที่เฉพาะตัว กระบวนการตัดแปลงที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดคือกระบวนการตกผลึกแยกส่วน (fractionation) นอกจากนี้ยังมีกระบวนการไฮโดรจีเนชัน (hydrogenation) การทำอินเตอร์เอสเทอริฟิเคชัน (interesterification) รวมทั้งการผสมน้ำมันเข้าด้วยกัน (blending) (Kevin W. Smith, 2012)

### 2.5.1 การตกผลึกแยกส่วน (Fractionation)

การตกผลึกแยกส่วนเป็นเทคนิคที่ใช้ในการตัดแปลงไขมันที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุด โดยให้ TAG ที่มีจุดหลอมเหลวสูงเกิดการตกผลึกและถูกแยกออกเป็นไขมันส่วนแข็ง (stearin) ในขณะที่ TAG ที่มีจุดหลอมเหลวที่ต่ำกว่ายังคงเป็นไขมันเหลว (olein) จากภาพที่ 8 แสดงกระบวนการการตกผลึกแยกส่วน ไขมันที่นำมาใช้ในการตกผลึกควรให้ความร้อนจนหลอมเหลวไปทั้งหมด แล้วตามด้วยการทำให้เย็นตัวลงช้า ๆ โดยไม่มีการกวน เพื่อให้ได้ผลึกที่มีขนาดใหญ่ แต่หากทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วก็จะทำให้ผลึกไขมันมีขนาดเล็ก เพื่อให้เกิดการแยกได้ดี ผลึกควรมีความหนาแน่นและมีขนาดที่สม่ำเสมอในระหว่างการทำให้เย็นตัว การตกผลึกจะเกิด 2 กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการเกิดนิวเคลียสและการเติบโตของผลึก ซึ่งทำให้สารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้น (Kellens et al., 2007) ไขมันที่มีจุดหลอมเหลวสูงจะเกิดการตกผลึกก่อน และไขมันที่มีจุดหลอมเหลวที่ต่ำก็ยังคงเป็นของเหลว โดยไขมันส่วนแข็งสามารถแยกออกจากไขมันเหลวได้โดยการกรอง การตกผลึกแยกส่วนทำ

ให้ได้ไขมันที่อุดมไปด้วย SOS มีคุณสมบัติทางความร้อนและการตกผลึกที่ดีขึ้น ซึ่งเหมาะสำหรับการผลิตช็อกโกแลต (Jun Jin et al., 2021)



ภาพที่ 8 กระบวนการตกผลึกแยกส่วน

ที่มา : Kevin W. Smith (2012)

สหภาพยุโรป (Directive 2000/36/EC) อนุญาตให้ใช้กระบวนการการตกผลึกแยกส่วน (fractionation) เพียงวิธีเดียวเท่านั้นในการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของน้ำมันสำหรับอุตสาหกรรมอาหารในการผลิต CBE และ CBI ซึ่งยังไม่อนุญาตให้ใช้การทำอินเทอร์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้เอนไซม์กับอาหาร เนื่องจากยังมีความกังวลในด้านความปลอดภัย (Norazlina et al., 2020) การจำแนกประเภทของการตกผลึกเกี่ยวข้องกับน้ำมันหรือไขมันที่สามารถตกผลึกจากการหลอมเหลวหรือจากสารละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

### 2.5.1.1 Dry fractionation

จะนำน้ำมันมาให้ความร้อนจนหลอมเหลวทั้งหมด และจะถูกทำให้เย็นลงเพื่อให้เกิดผลึกในอุณหภูมิที่มีการควบคุม ในระหว่างนี้อาจมีการกวนเข้าไปร่วมด้วย และแยกไขมันส่วนแข็งออกจากส่วนเหลวผ่านการกรอง ประสิทธิภาพของการแยกสารละลายออกเป็นเฟสของแข็งและของเหลวขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น อุณหภูมิ ความเร็วในการกวนผสม ถ้าน้ำมันถูกหล่อเย็นด้วยการกวนผสมที่ความเร็วรอบต่ำ จะทำให้เกิดการก่อตัวของผลึกที่ดีมีการจัดเรียงตัว และไขมันเหลว (olein) จะลดลงอย่างมาก (Zaliha et al., 2004) แต่ทั้งนี้ก็เป็นไปได้ยากที่จะแยกไขมันส่วนแข็ง (stearin) ออกจากไขมันเหลว (olein) เนื่องจากไขมันเหลวบางส่วนจะถูกกักเก็บไว้ในส่วนสเตียรีน ซึ่ง

ต้องใช้เครื่องบีบอัดความดันสูงจึงจะสามารถแยกโอเลอินและสเตียรีนออกจากกันได้ดี การตกผลึกด้วยวิธีนี้สามารถกำจัดไขมันเหลวส่วนใหญ่ที่อยู่ระหว่างผลึกออกไปได้ แต่ไขมันเหลวที่ติดอยู่ภายในผลึกจะกำจัดออกได้ยาก จึงทำให้ได้ไขมันแข็งในปริมาณที่ไม่สูงมากตามที่ต้องการ ดังนั้นวิธี dry fractionation จะทำให้ได้ไขมันเหลว (olein) ที่มีคุณภาพ แต่หากต้องการไขมันส่วนแข็ง (stearin) ที่มีคุณภาพสูงสุดที่เหมาะสมนำไปผลิตเป็น CBE ควรใช้การตกผลึกแยกส่วนด้วยวิธี solvent fractionation (Kevin W. Smith, 2012) น้ำมันที่ใช้การตกผลึกด้วยวิธีนี้ เช่น น้ำมันเมล็ดในปาล์ม (palm kernel oil) จะทำการตกผลึกเพียงครั้งเดียว ส่วนน้ำมันปาล์มจะทำการตกผลึก 2 ครั้งขึ้นไปเพื่อให้ได้น้ำมันที่มีคุณสมบัติเฉพาะ (Kellens et al., 2007) ซึ่งจะทำให้มีปริมาณของ POP สูง

### 2.5.1.2 Solvent fractionation

กระบวนการนี้ทำโดยนำน้ำมันมาละลายในตัวทำละลายอินทรีย์และถูกทำให้เย็นลงที่อุณหภูมิต่ำพร้อมการกวนผสมเพื่อให้ได้ไขมันส่วนแข็งที่อุดมด้วย SOS ผลึกจะถูกแยกออกโดยการกรองและกำจัดตัวทำละลายด้วยการระเหยตัวทำละลาย ตัวทำละลายอินทรีย์ที่ใช้ เช่น เฮกเซน (hexane) ที่เป็นตัวทำละลายไม่มีขั้ว, อะซิโตน (acetone), 2-ไนโตรโพรเพน (2-nitropropane) และไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (iso-propyl alcohol) ที่เป็นตัวทำละลายมีขั้ว โดยเฉพาะอะซิโตนจะเป็นตัวทำละลายที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมที่สุดสำหรับใช้แยกไขมันที่อุดมด้วย SOS เนื่องจากเป็นตัวทำละลายที่มีขั้ว สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของ TAG แบบสมมาตร ชนิด SOS, POS และ POP และกำจัดองค์ประกอบอื่น ๆ เช่น di-unsaturated, tri-unsaturated และกรดไขมันอิสระ เนื่องจากจะถูกกำจัดไปยังส่วนของไขมันเหลว (olein) (R. E. Timms, 2006) การตกผลึกด้วยวิธีนี้เป็นที่นิยมมากกว่าวิธี dry fractionation น้ำมันที่ทำการตกผลึกด้วยการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ ได้แก่ sal fat, shea butter และ palm mid-fraction (Kevin W. Smith, 2012) โดยไขมันแข็งจะนำไปใช้สำหรับ CBE ส่วนไขมันเหลวมักจะใช้ในการเติมเป็นไส้ในขนม (confectionery filling fat) Bootello et al. (2015) ได้ทำการตกผลึกแยกส่วน HOHS (high-oleic-high-stearic sunflower oil) กับอะซิโตน (1-stage fractionation) ที่อัตราส่วน 1/3 (v/v) ทำให้ได้ปริมาณสเตียรีน (stearin yields) ที่ 15% และมีปริมาณ SOS ที่เพิ่มขึ้น (41 %)

J. Jin et al. (2017) ได้ทำการผลิตไขมันแข็งจากการตกผลึกแยกส่วน 3 ครั้ง (3-stage fractionation) ของไขมันในเมล็ดมะม่วง (mango kernel fat: MKF) ไขมันสเตียรีนที่มีการตกผลึกถึง 3 ครั้งจะอุดมไปด้วยปริมาณของ SOS ที่สูงถึง 69.2% มีค่า SFC ที่สูงกว่า CB และเมื่อ

ผสมไขมันในเมล็ดมะม่วง 50 -80% w/w กับ CB จะแสดงความเข้ากันได้กับ CB ที่อุณหภูมิ 20-28 °C

### 2.5.1.3 Surfactant fractionation

เรียกอีกชื่อว่า Detergent fractionation เป็นเทคนิคที่ใช้สารซักฟอก (detergent) เช่น sodium lauryl sulphate กระบวนการนี้จะทำการแยกเฟสของแข็ง (stearin) ออกจากเฟสของเหลว (olein) โดยใช้สารซักฟอกทำในระบบ batch หรือระบบต่อเนื่อง การก่อตัวที่ซับซ้อนจะเกิดจากการแยกส่วนของเหลวกับของแข็ง การแยกเฟสของแข็งกับของเหลวออกจากกันทำได้โดยการปั่นเหวี่ยง สารซักฟอกที่อยู่ในส่วนไขมันเหลวโอเลอินจะถูกล้างด้วยน้ำกลั่น (Senanayake & Shahidi, 2005) และสารลดแรงตึงผิวที่แยกออกมาสามารถใช้กระบวนการแยกแบบอื่นได้ (Hasibuan et al., 2018)

### 2.5.2 กระบวนการไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation)

กระบวนการไฮโดรจีเนชันเป็นกระบวนการที่เติมไฮโดรเจนเพื่อให้ได้เฟสของแข็งจากน้ำมันพืชที่มีกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูง (mono, polyunsaturated fatty acids) เช่น น้ำมันถั่วเหลือง, น้ำมันดอกทานตะวัน เป็นต้น ไม่ว่าจะเป็นการลดจำนวนพันธะคู่, ไอโซเมอไรเซชัน (isomerization) หรือการกำจัดพันธะทั้งหมดออก โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาคือนิกเกิล (Nickel) (Kevin W. Smith, 2012) การเติมไฮโดรเจนที่พันธะคู่ของน้ำมันจะขึ้นอยู่กับสถานะของอุณหภูมิ ความดัน การผสม อัตราและชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ในระหว่างการเติมไฮโดรเจนของไขมันและน้ำมันจะทำให้เกิดปฏิกิริยาที่สำคัญสามอย่างเกิดขึ้นพร้อมกัน ได้แก่ การเติมไฮโดรเจนที่พันธะคู่ไม่สมบูรณ์ส่งผลให้เกิดพันธะคู่แบบทรานส์ (trans) การเกิด *cis/trans*-isomerization ของพันธะคู่ และพันธะคู่จะย้ายไปยังตำแหน่งใหม่ในสายโซ่คาร์บอนของกรดไขมัน (Senanayake & Shahidi, 2005) โดยกระบวนการไฮโดรจีเนชันมี 2 ประเภท ได้แก่ ไฮโดรจีเนชันแบบสมบูรณ์ (full hydrogenation) และไฮโดรจีเนชันบางส่วน (partial hydrogenation) ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันแบบสมบูรณ์คือการเติมไฮโดรเจนทั้งหมดที่พันธะคู่ของกรดไขมันไม่อิ่มตัว ซึ่งกระบวนการนี้จะไม่มีกรดไขมันทรานส์ (trans-fat) เกิดขึ้น น้ำมันที่มีการเติมไฮโดรเจนแบบสมบูรณ์สามารถใช้ในการผลิตเป็นไขมันทางเลือกหรือไขมันทดแทนโดยผสมกับน้ำมันพืชอื่น ๆ เช่น น้ำมันที่เติมไฮโดรเจนโดยสมบูรณ์กับปาล์มสเตียรีนหรือน้ำมันปาล์มโอเลอิน การ

เติมไฮโดรเจนบางส่วนเป็นปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดกรดไขมันทรานส์เนื่องจากปฏิกิริยาแบบ selective และนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์มาการีน (margarine) และเนยขาว (shortening) (Verstringe et al., 2012)

### 2.5.3 การทำอินเทอร์เอสเทอริฟิเคชัน (Interesterification)

การทำอินเทอร์เอสเทอริฟิเคชันเป็นกระบวนการที่กรดไขมันที่อยู่ใน TAG เริ่มต้นถูกจัดเรียงตำแหน่งใหม่บนแกนหลักของกลีเซอรอล (glycerol) ทำให้คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำมันหรือไขมันแตกต่างไปจากเดิม กระบวนการอินเทอร์เอสเทอริฟิเคชันสามารถแบ่งได้ 2 ประเภทคือการใช้เอนไซม์ (Enzymatic Interesterification) และการใช้สารเคมี (Chemical Interesterification) ในปฏิกิริยาที่ใช้สารเคมี ตำแหน่งของกรดไขมันจะถูกสับเปลี่ยนอย่างสมบูรณ์ ซึ่งหมายความว่ากรดไขมันอิ่มตัวที่เริ่มต้นอาจอยู่ตำแหน่ง 1 หรือ 3 สามารถอยู่ที่ตำแหน่ง 2 ได้เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการ ทำให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายไม่เหมาะสมสำหรับใช้ใน CBE ส่วนการใช้เอนไซม์นั้นมีความจำเพาะเจาะจงมากกว่า เอนไซม์ที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือเอนไซม์ไลเปส ซึ่งจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับกรดไขมันในตำแหน่ง 2 จะเลือกและสับเปลี่ยนกรดไขมันในตำแหน่ง 1 และ 3 เท่านั้น หรืออาจกล่าวได้ว่าไขมันหรือน้ำมันใด ๆ ที่อุดมไปด้วยกรดโอเลอิกในตำแหน่ง 2 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพด้วยกรดสเตียริกที่ตำแหน่ง 1 และ 3 เพื่อผลิต SOS ได้ (Kevin W. Smith, 2012)

### 2.5.4 การผสมน้ำมัน (Blending)

หลังจากกระบวนการกลั่นแยกลำดับส่วนของน้ำมัน (refining) ไขมันและน้ำมันอาจถูกผสมเข้าด้วยกันเพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีองค์ประกอบของกรดไขมันที่เฉพาะตัว หรือมีความสม่ำเสมอและความคงตัวตามคุณสมบัติที่กำหนดไว้ของไขมันและน้ำมัน การผสมไขมันตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปใช้กันอย่างแพร่หลายในการผลิตมาการีน เนยขาว น้ำมันสำหรับทอด น้ำมันสลัด และน้ำมันชนิดพิเศษบางชนิด โดยกระบวนการนี้จะประหยัดค่าใช้จ่าย ใช้เงินลงทุนเพียงเล็กน้อย และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีของน้ำมันผสม น้ำมันจะผสมกันเพื่อให้ได้องค์ประกอบกรดไขมันที่ต้องการและมีความสม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์สุดท้าย สามารถวิเคราะห์คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้โดยใช้เกณฑ์การวิเคราะห์ต่าง ๆ เช่น องค์ประกอบของกรดไขมัน, ดัชนีไขมันแข็ง (solid fat index), ค่าไอโอดีน (iodine value) และจุดหลอมเหลว เป็นต้น ตัวอย่างเช่น น้ำมันเนยขาวและมา



การันถูกผลิตขึ้นตามข้อกำหนดที่เหมือนกันโดยการผสมให้ได้ปริมาณไขมันแข็งตามที่กำหนด (Senanayake & Shahidi, 2005)

## 2.6 ช็อกโกแลต (Chocolate)

ช็อกโกแลตเป็นผลิตภัณฑ์ขนมหวานที่รสชาติหวานหอมโดดเด่นจนเป็นที่ดึงดูดใจทำให้ได้รับความนิยมแพร่หลายไปทั่วโลก โดยช็อกโกแลตเป็นอิมัลชันแบบน้ำในน้ำมัน (water in oil emulsion) เป็นระบบ multiphase ซึ่งเฟสต่อเนื่อง (continuous phase) คือการผสมผสานของไขมันต่าง ๆ (CB, ไขมันนม และไขมันพืชอื่น ๆ สำหรับบางสูตร) และเฟสการกระจายตัว (dispersed phase) ส่วนใหญ่จะเป็นน้ำตาลและผงโกโก้ ช็อกโกแลตมีส่วนประกอบหลักคือ CB ซึ่งมีลักษณะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้องและหลอมเหลวเมื่ออยู่ในปาก หรือที่อุณหภูมิร่างกาย (Li & Liu, 2019) โดย CB จะทำหน้าที่ยึดส่วนประกอบอื่น ๆ ของช็อกโกแลต เช่น น้ำตาล และ cocoa particles เข้าด้วยกัน ด้วยคุณลักษณะนี้ทำให้ CB เป็นองค์ประกอบที่ขาดไม่ได้ในอุตสาหกรรมขนมหวานเพราะจะทำให้ ช็อกโกแลตมีคุณสมบัติที่ดีตรงกับความต้องการของผู้บริโภค เช่น ความแข็งแรง มีพื้นผิวสัมผัสที่เนียนเรียบมันวาว และมีคุณสมบัติทางประสาทสัมผัสที่ดี

กระบวนการควบคุมผลึก (tempering) เป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญในการผลิตช็อกโกแลต เพื่อให้ได้มาซึ่งคุณภาพทางกายภาพ ลักษณะทางประสาทสัมผัสที่ดี และให้ไขมันอยู่ในโครงสร้างแบบ  $\beta$  (แบบ V) ซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องการต่อผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลตในด้านของ สี ความแข็งแรง ความมันวาว ลักษณะเนื้อสัมผัส ความรู้สึกในปาก (mouth feel) การหลอมเหลว และการลดการเกิดฝ้าขาว (Emmanuel Ohene Afoakwa et al., 2007) ถ้าในช็อกโกแลตมีผลึกของไขมันที่ไม่เสถียรต่ออุณหภูมิสูงก็จะทำให้ช็อกโกแลตนิ่มเหลวกว่าปกติ เนื่องจากเกิดการหลอมเหลวของไขมันนำไปสู่การเกิดฝ้าขาวบนผิวช็อกโกแลตได้ง่ายขึ้น

### 2.6.1 ประเภทของช็อกโกแลต

#### 2.6.1.1 ดาร์คช็อกโกแลต (Dark chocolate)

เป็นช็อกโกแลตที่ไม่มีนมเป็นส่วนผสม มีส่วนผสมหลักคือ น้ำตาล, CB และ โกโก้แมส โดยจะต้องมี CB ขั้นต่ำ 18 % และโกโก้แห้งทั้งหมดไม่น้อยกว่า 35% โกโก้แห้งที่ไม่มีไขมันอย่างน้อย 14%

### 2.6.1.2 ไวท์ช็อกโกแลต (White chocolate)

เป็นช็อกโกแลตที่ไม่มีส่วนผสมของโกโก้แมสเลย โดยจะประกอบไปด้วยน้ำตาล, CB, นมผง และมีการใส่กลิ่นวานิลลาลงไปด้วย ช็อกโกแลตชนิดนี้จะแตกหักง่าย และจัดเป็นช็อกโกแลตที่มีประโยชน์น้อยที่สุด เพราะมีแต่น้ำตาลและไขมันเป็นส่วนประกอบหลัก โดยไม่มีส่วนผสมที่มีประโยชน์จากโกโก้เลย

### 2.6.1.3 ช็อกโกแลตนม (Milk chocolate)

เป็นช็อกโกแลตที่มีส่วนผสมหลักเหมือนดาร์คช็อกโกแลต แต่มีการเติมนมผงเข้ามาด้วย ซึ่งนมผงที่เติมเข้ามาก็จะมีไขมันนมอยู่ด้วย ส่งผลให้ช็อกโกแลตนมมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าและมีความอ่อนตัวกว่าดาร์คช็อกโกแลต

## 2.6.2 กระบวนการผลิตช็อกโกแลต

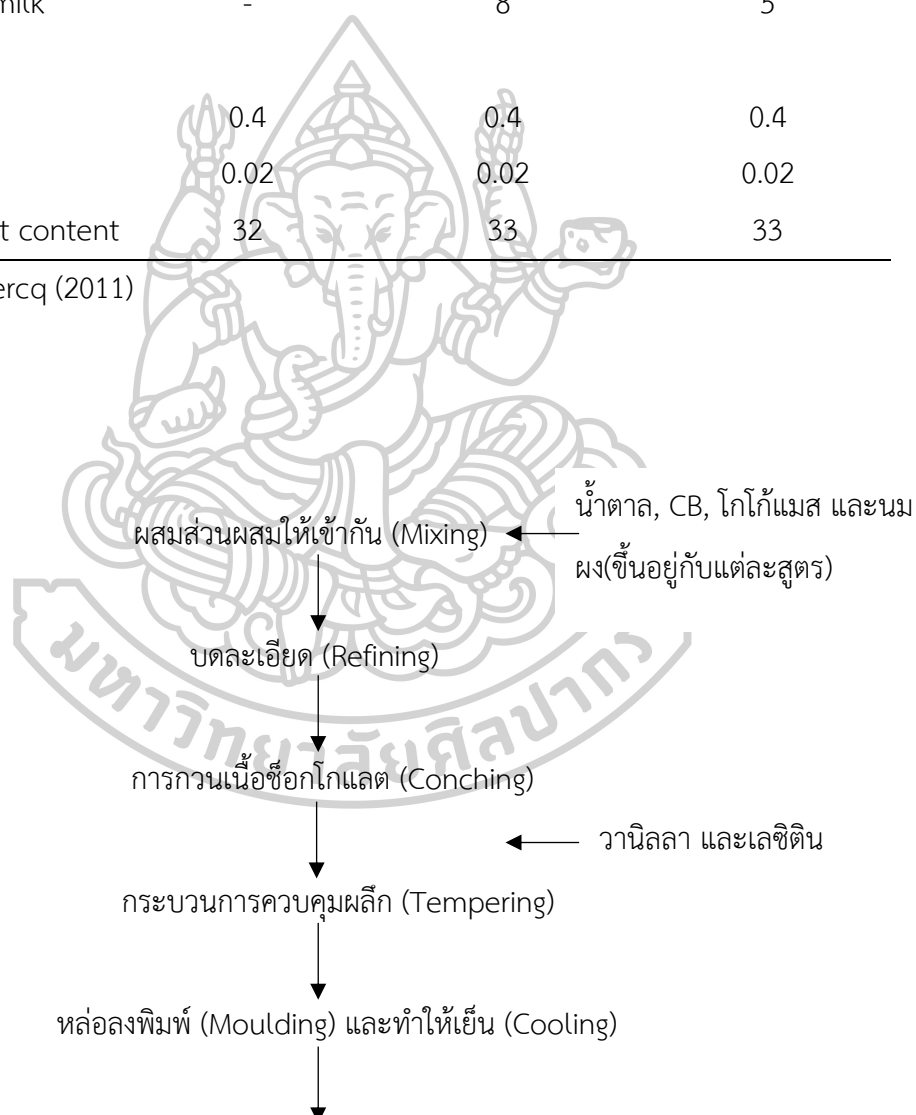
กระบวนการผลิตช็อกโกแลตมีส่วนผสมหลัก ได้แก่ น้ำตาล, โกโก้แมส (cocoa mass), CB และเลซิธิน (lecithin) สามารถใช้ผงโกโก้แทนโกโก้แมสได้ และสามารถเพิ่มส่วนผสมอื่น ๆ เช่น นมผง ไขมันนม หรือวานิลลาลงในช็อกโกแลตได้ จากตารางที่ 6 แสดงส่วนผสมของดาร์คช็อกโกแลต, ไวท์ช็อกโกแลต และช็อกโกแลตนม กระบวนการผลิตช็อกโกแลตจะแสดงดังภาพที่ 9 โดยจะนำส่วนผสม (น้ำตาล, โกโก้แมส, CB, นมผง และเลซิธิน) มาผสมเข้าด้วยกัน แล้วนำมาบดละเอียด (refining) เพื่อให้อนุภาคของแข็งมีขนาดเล็กลงทำให้ช็อกโกแลตมีเนื้อที่เนียนละเอียด ไม่มีความเป็นเนื้อทรายและหยาบเมื่อรับประทาน โดยต้องมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 30 ไมครอน โดยขนาดอนุภาคที่เหมาะสมสำหรับ “ดาร์คช็อกโกแลต” ควรต่ำกว่า 20 ไมครอน หากต้องการความเรียบเนียน (Hartel et al., 2018) การบดละเอียดนอกจากจะเป็นการลดขนาดอนุภาคแล้วยังเป็นการทำให้อนุภาคของแข็งกระจายตัวในเฟสต่อเนื่อง (Emmanuel Ohene Afoakwa et al., 2007; G.R. Ziegler & Hogg, 2009) จากนั้นนำมาผกวนเนื้อช็อกโกแลต (conching) ซึ่งน้ำจะถูกกำจัดออกในกระบวนการนี้ โดยช็อกโกแลตจะมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 1.6 % เมื่อสิ้นสุดกระบวนการควรมีความชื้นประมาณ 1 % ความชื้นมีผลทำให้ช็อกโกแลตขึ้นเหนียวขึ้น เนื่องจากทุก ๆ ความชื้น 0.3 % (ที่มากกว่า 1%) จะต้องเติมไขมันเพิ่ม 1% เพื่อรักษาความเหนียวให้เท่าเดิม ในระหว่างการผกวนเนื้อ

ซ็อกโกแลตในช่วงแรกอนุภาคมีการบดเนียนกันได้ดี มีประสิทธิภาพในการบดสูง ส่วนผสมและไขมันจะไปเคลือบรอบ ๆ อนุภาคของแข็งหรือน้ำตาลส่งผลให้เกิดการรับรู้กลิ่นรสที่สม่ำเสมอมากขึ้น เกิดการไหลผ่านกันได้ดี เนื้อสัมผัสของซ็อกโกแลตเนียนนุ่ม และทำให้ความหนืดลดลง ซึ่งส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากการกำจัดความชื้นด้วย นอกจากนี้ยังทำให้กรดที่ทำให้เกิดรสเปรี้ยว และสารอื่น ๆ ที่ทำให้เกิดรสขมและฝาดก็จะระเหยออกมาพร้อมกับน้ำ ทำให้ได้ซ็อกโกแลตที่มีรสชาติกลมกล่อมมากยิ่งขึ้น ในขั้นตอนสุดท้ายซ็อกโกแลตควรมีความหนืดที่ต่ำซึ่งทำได้โดยการเติมอิมัลซิไฟเออร์ เช่น เลซิตินที่มีราคาถูกแต่มีประสิทธิภาพในการลดความหนืดได้มากกว่า CB ถึง 10 เท่า ข้อควรระวังในการเติมเลซิตินคือไม่ควรเติมในซ็อกโกแลตที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 60 °C เพราะจะทำให้ประสิทธิภาพของเลซิตินลดลง (E.O. Afoakwa, 2010; S.T. Beckett, 2009) โดยเลซิตินจะไปจับกับน้ำตาลในส่วนที่อาจจะยังไม่ถูกไขมันเคลือบ ทำให้อนุภาคของน้ำตาลเคลื่อนที่ในซ็อกโกแลตได้ดี หากยังบดให้น้ำตาลมีอนุภาคเล็กก็ยังมีพื้นที่ผิวให้จับกับเลซิตินมากยิ่งขึ้นจากนั้นนำซ็อกโกแลตมาผ่านกระบวนการควบคุมผลึก (tempering) เพื่อให้ได้โครงสร้างและช่วงการหลอมเหลวที่ต้องการ โดยมีการทำให้เกิดผลึกก่อนนำมาผสมในขั้นตอนหลักของการควบคุมผลึก เนื่องจากเพื่อให้เกิดการสร้างผลึกนิวเคลียส และเกิดตัวล่อผลึก (seeding) ในโครงสร้างผลึกที่ต้องการ เพื่อในระหว่างขั้นตอนหลักจะสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการตกผลึกในโครงสร้างผลึกแบบ V ซึ่งทำให้ได้ซ็อกโกแลตที่มีความมันวาว แข็งเปราะ และยังสามารถต้านทานการเกิดฝ้าขาวบนผิวของซ็อกโกแลตได้ และเพื่อสร้างนิวเคลียสจำนวนมากเพื่อให้ผลึกมีขนาดเล็กจำนวนมากก่อตัวขึ้นระหว่างกระบวนการควบคุมผลึก การก่อตัวของโครงข่ายผลึกที่ดีเป็นผลมาจากเวลาและอุณหภูมิที่กำหนดในกระบวนการร่วมกับมีแรงเฉือนดังแสดงในภาพที่ 10 โดยเริ่มจากให้ความร้อนกับซ็อกโกแลตที่อุณหภูมิ 45 – 50 °C เพื่อกำจัดนิวเคลียสผลึก (ละลายซ็อกโกแลต) ต่อมาลดอุณหภูมิลง (supercooling) ที่ 27 - 29 °C เพื่อให้เกิดการตกผลึกในโครงสร้างที่ไม่เสถียร (แบบ II, III และ IV) และยังมีผลึกที่เสถียรเกิดขึ้นด้วย (แบบ V) ตามด้วยให้ความร้อนที่ 29 – 31 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าจุดหลอมเหลวของผลึกที่ไม่เสถียร  $\alpha$  และ  $\beta'$  แต่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของ  $\beta$  ที่เป็นผลึกที่ต้องการ โดยจุดหลอมเหลวและอุณหภูมิเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดของโกโก้ องค์ประกอบทางเคมีของ CB ปริมาณและองค์ประกอบของไขมันนม และปริมาณของ SOS (R.E. Timms, 2003) จากนั้นนำซ็อกโกแลตเทใส่พิมพ์ (moulding) และทำให้เย็นตัวลง (cooling) เพื่อให้เกิดการแข็งตัวให้ได้ผลึกที่ต้องการ จากนั้นทำการแกะออกจากพิมพ์ (de-moulding) ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ซ็อกโกแลต

ตารางที่ 6 ส่วนผสมของดาร์คช็อกโกแลต, ไวท์ช็อกโกแลต และช็อกโกแลตนม

Ingredient	Dark chocolate	White chocolate	Milk chocolate
sugar	50	44	40
cocoa mass	40	-	16
cocoa butter	10	28	19
full cream milk powder	-	20	20
skimmed milk powder	-	8	5
lecithin	0.4	0.4	0.4
flavour	0.02	0.02	0.02
Total fat content	32	33	33

ที่มา : De Clercq (2011)

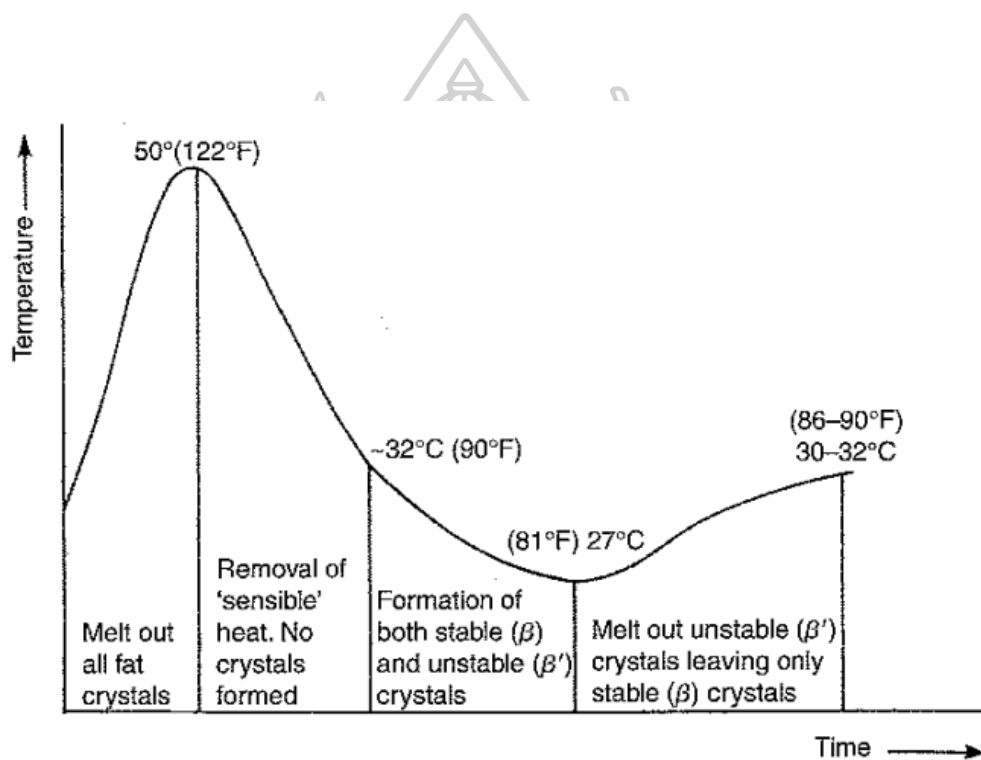


แกะช็อกโกแลตออกจากพิมพ์ (De-moulding)

ช็อกโกแลต (Chocolate)

ภาพที่ 9 กระบวนการผลิตช็อกโกแลต

ที่มา : ดัดแปลงจาก De Clercq (2011)



ภาพที่ 10 อุณหภูมิและโปรไฟล์การตกผลึกที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในกระบวนการควบคุมผลึก (tempering)

ที่มา : G. Talbot (2009)

### 2.6.3 การตกผลึกของไขมันในช็อกโกแลต

CB มีปริมาณไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยว (mono-unsaturated fats) ในปริมาณสูง (SOS) ซึ่งเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง และยังมีไขมันอิ่มตัวทั้งหมด (SSS) ประมาณ 1-2% จะละลายที่อุณหภูมิสูงกว่า SOS เนื่องจาก SOS มีไขมันไม่อิ่มตัวหรือกรดโอเลอิกอยู่ตรงกลาง นอกจากนี้ยังมีไขมันเหลว

SOO ในปริมาณ 5–20% การรวมกันของกรดไขมันที่แตกต่างกันเหล่านี้มีหน้าที่กำหนดองค์ประกอบและลักษณะการหลอมเหลวของ CB ไขมันที่ได้จะเป็นของเหลวบางส่วนที่อุณหภูมิห้อง CB ประกอบด้วยผลึกขนาดเล็กของไขมันเหลว (ผลึกของ SOO) โดยในสภาพอากาศแบบเขตร้อน ไขมันจะอยู่ในบริเวณที่มีอุณหภูมิลดลง ดังนั้นจึงทำให้จำนวนของผลึกที่กระจายอยู่รอบ ๆ ไขมันเหลวลดน้อยลงทำให้มีปริมาณไขมันเหลวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ไขมันอ่อนตัวและสูญเสียความแข็งแรง เมื่อ CB ละลายและเย็นตัวลง TAG ทั้งสามชนิดจะทำงานแตกต่างกัน โดย CB จะเกิดการตกผลึกผ่านกระบวนการการเกิดนิวเคลียส (nucleation) ผลึกของ SSS ที่เป็น TAG สายยาว (long-chain trisaturated triglycerides) จะเกิดการตกผลึกก่อนเนื่องจากมีไขมันเหลวอยู่ในปริมาณน้อย ทำให้ซ็อกโกแลตโดยรวมมีความหนาและเหนียวมากขึ้น จากนั้น TAG ชนิด SOS ที่มีปริมาณสูงใน CB ก็จะมีเริ่มเกิดการตกผลึก โดย SOS จะเป็นตัวกำหนดลักษณะเนื้อสัมผัสของซ็อกโกแลต อยู่ในโครงสร้างแบบ V ที่มีความเสถียร ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติการละลายของซ็อกโกแลต รวมทั้งการต้านทานการเกิดฝ้าขาว (fat bloom) และผลึกของ SOO ยังคงเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง โดยมีผลต่อการกำหนดโปรไฟล์การละลายของซ็อกโกแลตในช่วงอุณหภูมิหนึ่งเท่านั้น (S. T. Beckett, 2000; Garti & Widlak, 2012)

#### 2.6.4 การเกิดฝ้าขาว (Fat bloom) ของซ็อกโกแลต

ความมั่นใจของซ็อกโกแลตนั้นขึ้นอยู่กับว่าซ็อกโกแลตผ่านกระบวนการควบคุมการตกผลึกของ CB (tempering) มาอย่างดีเพียงใด ซ็อกโกแลตที่มีการควบคุมการตกผลึกที่ดีจะสามารถคงความมั่นใจได้นานหลายเดือนในอุณหภูมิที่เหมาะสมในการจัดเก็บ แต่หากซ็อกโกแลตไม่ได้มีการควบคุมการตกผลึกที่ดีก็จะเกิดฝ้าขาวปรากฏขึ้นที่ผิวหน้าของซ็อกโกแลตซึ่งเรียกว่า fat bloom แม้ว่าการเกิดฝ้าขาวของไขมันจะไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ แต่ก็ยังเป็นข้อบกพร่องของผลิตภัณฑ์ซ็อกโกแลตและเป็นปัญหาด้านคุณภาพอันดับหนึ่งในอุตสาหกรรมซ็อกโกแลต (Lonchamp & Hartel, 2004) การเกิดฝ้าขาวของไขมันอาจเกิดขึ้นได้เมื่อไขมันเหลว เช่น CB เคลื่อนผ่านไปยังผิวหน้าของซ็อกโกแลตและตกผลึกอีกครั้งเมื่ออุณหภูมิลดลง และยังมีสาเหตุมาจาก การควบคุมผลึกกระบวนการตกผลึกและการทำให้เย็นตัวลงที่ไม่ดี หรือการเก็บรักษาที่อุณหภูมิสูงกว่า 25 °C (Kevin W. Smith, 2012) ความไม่เข้ากันของไขมันผสมที่อุดมด้วย SOS กับ CB ในผลิตภัณฑ์ซ็อกโกแลตก็จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ eutectic ทำให้ความคงตัวต่อความร้อนลดลง การอ่อนตัวของไขมัน (eutectic effect) จะเกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนย้ายของส่วนประกอบที่เป็นของเหลวและ TAG ที่สามารถ

หลอมเหลวในอุณหภูมิที่สูงขึ้น (เช่น 30–36 °C) เคลื่อนที่มายังผิวหน้าและเกิดการตกผลึกอีกครั้งของ TAG และไขมันเหลวเมื่อเย็นตัวลง (เช่น 20–25 °C) โดยทำให้เกิดทั้งผลึกที่มีความเสถียรและไม่มี ความเสถียรปะปนผสมกัน ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนของโครงสร้างจากผลึกที่ไม่เสถียรให้พัฒนาไปสู่ โครงสร้างผลึกที่เสถียรมากขึ้นซึ่งการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกมีความสัมพันธ์กับการเกิดฝ้าขาวของ ช็อกโกแลต (Hartel et al., 2018; Hodge & Rousseau, 2002)

การเกิดฝ้าขาวสามารถแบ่งออกเป็น 2 ทฤษฎีหลักดังนี้

#### 2.6.4.1 ทฤษฎีการแยกเฟส (The phase separation theory)

TAG ที่มีการหลอมเหลวในอุณหภูมิสูงที่ขึ้น จะเคลื่อนที่มายังผิวหน้าและเกิดการตก ผลึกอีกครั้งเมื่ออุณหภูมิลดลง ส่งผลให้เกิดฝ้าขาว ซึ่งสามารถแก้ไขปัญหานี้ได้จากการใช้ไขมันที่อุดม ไปด้วย SOS เพื่อที่จะทำให้ไขมันมีความแข็งตัว คงตัวต่อความร้อนมากขึ้น

#### 2.6.4.2 ทฤษฎีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง (The polymorphic transition theory)

เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกแบบ V ไปเป็น VI ที่มีความเสถียรมากกว่า ทำให้มีผลึกขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งโครงสร้างแบบ VI ทำให้เกิดฝ้าขาวของช็อกโกแลต (Lonchamp & Hartel, 2004)

การยับยั้งหรือชะลอการเกิดฝ้าขาวในช็อกโกแลตสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การเติมอิมัลซิไฟเออร์ การเติมไขมันที่อุดมไปด้วย SOS ก็เป็นอีกหนึ่งวิธีที่นิยมทำให้ช็อกโกแลตมีความแข็ง และมีคุณสมบัติที่เสถียรทางความร้อนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถต้านทานการเกิดฝ้าขาวได้ จึงได้มีงานวิจัยที่ ศึกษาการนำไขมันที่อุดมไปด้วย SOS มาเติมในผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลต โดยในงานวิจัยของ Tran et al. (2015) ได้รายงานว่า การแทนที่ CB ที่ 30% w/w ในคาร์คช็อกโกแลตด้วยไขมันในเมล็ดมะม่วง (MKF) และไขมันสเตียรีนที่ได้จากการตกผลึกแยกส่วนของ MKF จะช่วยเพิ่มการทนความร้อนของ ช็อกโกแลตโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะด้านคุณภาพของช็อกโกแลตอย่างมีนัยสำคัญ และ งานวิจัยของ Ghazani et al. (2018) ยังรายงานว่า คาร์คช็อกโกแลตที่มี CB 26.5% และมีเชียบัตเตอร์สเตียรีน 4.7% (SOS = 67.6%) มีปริมาณไขมันแข็งในรูปผลึกเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและสามารถ ต้านทานการเกิดฝ้าขาวได้

### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 วัสดุอุปกรณ์

เนยโกโก้ (Cocoa butter : CB) ทางการค้าจาก MC Foods Co., Ltd. (ประเทศไทย) เนยอิลิปเป้ (IB) จาก PT Gunung Hijau Masarang (อินโดนีเซีย) เนยอิลิปเป้สเตียร์น (IBS) ได้มาจากการตกผลึกแยกส่วนของ IB โดยให้ความร้อนกับ IB ที่อุณหภูมิ 80 °C แล้วทำการตกผลึกโดยใช้อะซิโตน (acetone) เป็นตัวทำละลาย ที่อัตราส่วนระหว่าง IB ต่ออะซิโตน เท่ากับ 1:7 (% w/v) โดยตกผลึกที่อุณหภูมิ 22 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งการตกผลึกแยกส่วนนี้จะทำภายในโถทำปฏิกิริยาแบบ 2 ชั้น (double-jacketed reactor) พร้อมทั้งกวนผสมที่อัตราการกวนคงที่ 100 rpm จากนั้นกรองเพื่อแยกเอาส่วนที่ตกผลึกเป็นไขมันแข็ง (stearin) ออกจากส่วนเหลว (olein) แล้วนำส่วนแข็งไประเหยตัวทำละลายออก จะได้ผลผลิตของเนยอิลิปเป้ส่วนแข็ง หรือเนยอิลิปเป้สเตียร์นร้อยละ 32 (Sonprasert et al., 2022) สารมาตรฐาน (standard reagents) สำหรับการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบของกรดไขมัน โดยเทคนิค Gas chromatography จาก AccuStandard (สหรัฐอเมริกา) ตัวทำละลายอินทรีย์และสารเคมีจาก Labscan Asia Co. Ltd. (ประเทศไทย) สารเคมีทั้งหมดสำหรับการวิเคราะห์เป็นเกรดวิเคราะห์หรือเกรดโครมาโตกราฟี

#### 3.2 การเตรียมตัวอย่าง

นำ CB, IB และ IBS มาให้ความร้อนในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 10 นาที เพื่อหลอมเหลวผลึกไขมัน จากนั้นนำไขมันมาผสมกันในอัตราส่วนระหว่าง CB/IB เท่ากับ 100/0, 85/15 80/20, 60/40, 40/60, 20/80 และ 0/100 (% w/w) และอัตราส่วนระหว่าง CB/IBS เท่ากับ 100/0, 90/10, 85/15, 80/20, 75/25, 50/50, 25/75 และ 0/100 (% w/w) นำไขมันที่ผสมกันแล้วมาเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °C จนกระทั่งนำไปทำการวิเคราะห์



### 3.3 การศึกษาคุณสมบัติและพฤติกรรมการตกผลึกของเนยโกโก้ผสมกับเนยอิลิปี่ และเนยโกโก้ผสมกับเนยอิลิปี่สเตียริน

#### 3.3.1 การศึกษาปริมาณไขมันแข็งในรูปผลึกและความเข้ากันได้กับเนยโกโก้

ศึกษาปริมาณไขมันแข็งในรูปผลึก (solid fat content: SFC) โดยใช้เทคนิค pulsed-nuclear magnetic resonance (p-NMR) (Minispec-mq 20, BRUKER, Karlsruhe, Germany) ตามวิธีของ AOCS Official Method Cd 16b-93 (AOCS, 2017) ซึ่งระบุรายละเอียดไว้ในภาคผนวก ก โดยให้ความร้อนตัวอย่างที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำมาใส่ในหลอด NMR จากนั้นนำมาให้ความร้อนที่ 80 °C เป็นเวลา 10 นาที นำตัวอย่างเก็บรักษาที่ 4 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำไปต้มที่ 26 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และนำมาไว้ที่ 4 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างมาใส่ในอ่างน้ำร้อน ตามอุณหภูมิที่ต้องการวัด (15 ถึง 40 °C) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นวัดค่า SFC แล้วพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า SFC (แกน y) และอุณหภูมิ (แกน x)

พฤติกรรมของไขมันผสมระหว่าง CB/IB และ CB/IBS จะแสดงโดยกราฟ iso-solid phase diagram ที่ถูกสร้างขึ้นโดยใช้ข้อมูลของค่า SFC พล็อตระหว่างอุณหภูมิเทียบกับอัตราส่วนของไขมันผสม นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาความเข้ากันได้กับ CB โดยทำตามวิธีการเดียวกับการศึกษาหาปริมาณไขมันแข็งในรูปผลึกที่ระบุไว้ด้านบน ข้อมูลจะถูกพล็อตระหว่าง SFC เทียบกับอัตราส่วนของไขมันผสมระหว่าง CB/IB และ CB/IBS ในแต่ละอุณหภูมิ

ความแตกต่างของปริมาณไขมันแข็งในรูปผลึกของไขมันผสมระหว่าง CB/IB และ CB/IBS ศึกษาโดยการหาค่า SFC difference ที่ถูกสร้างขึ้นโดยใช้ข้อมูลของค่า SFC ที่วัดได้จริง หักลบกับค่า SFC ทางทฤษฎี คำนวณดังสมการ (1.1) โดยค่า SFC ทางทฤษฎีสามารถคำนวณได้จากสมการ (1.2):

$$\text{SFC difference} = \text{SFC}_{\text{จริง}} - \text{SFC}_{\text{ทฤษฎี}} \quad (1.1)$$

$$\text{SFC}_{\text{ทฤษฎี}} = \text{SFC}_x(x\%) + \text{SFC}_y(y\%) \quad (1.2)$$

โดยให้  $\text{SFC}_x$  แทนค่า SFC ที่วัดได้จริงของไขมันผสม CB/IB และ CB/IBS ที่อัตราส่วนเท่ากับ 100/0 ของแต่ละอุณหภูมิ,  $\text{SFC}_y$  แทนค่า SFC ที่วัดได้จริงของไขมันผสม CB/IB และ CB/IBS ที่อัตราส่วนเท่ากับ 0/100 ของแต่ละอุณหภูมิ,  $x\%$  แทนอัตราส่วนที่เป็นเปอร์เซ็นต์ของ CB ในไขมันผสม และ  $y\%$  แทนอัตราส่วนที่เป็นเปอร์เซ็นต์ของ IB และ IBS ในไขมันผสมของแต่ละ

อุณหภูมิ ซึ่งจะพล็อตได้กราฟของค่า SFC difference ของไขมันผสมแต่ละอัตราส่วนเทียบกับอุณหภูมิ

### 3.3.2 การศึกษาพฤติกรรมการตกผลึกและการหลอมเหลว

ศึกษาพฤติกรรมการตกผลึกและการหลอมเหลวของไขมันด้วยเทคนิค differential scanning calorimetry (DSC) (DSC 8000, PerkinElmer Co., Norwalk, CT, USA) ตามวิธีของ AOCS Official Method Cj 1-94 (AOCS, 2017) ซึ่งระบุรายละเอียดไว้ในภาคผนวก ข โดยใช้ตัวอย่าง 3-5 มิลลิกรัม ใส่ในภาชนะอะลูมิเนียม (aluminum pan) (ความจุ 30 ไมโครลิตร) และปิดผนึกอย่างหนาแน่น ตัวอย่างจะถูกทำให้ร้อนจาก 20 °C ถึง 80 °C ที่อัตรา 30 °C ต่อนาที และคงไว้ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นจึงลดอุณหภูมิลงจนถึง -60 °C ที่อัตรา 10 °C ต่อนาที และคงไว้ที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นตัวอย่างจะถูกให้ความร้อนอีกครั้งไปจนถึงอุณหภูมิที่ 80 °C ที่อัตรา 5 °C ต่อนาที เทอร์โมแกรมของการตกผลึกและการหลอมเหลวจะถูกสร้างขึ้นในระหว่างการทำให้เย็นลงและให้ความร้อนตามลำดับ โดยเทอร์โมแกรมจะได้รับการวิเคราะห์โดยซอฟต์แวร์ที่มาพร้อมกับเครื่อง DSC (Pyris software, Perkin-Elmer, Shelton, CT, USA)

### 3.3.3 การศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของผลึก (crystal microstructure)

ศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของผลึก โดยใช้เทคนิค polarized-light microscopy (PLM) (Carl Zeiss Primo Star, Carl Zeiss Microscopy GmbH, Jena, Germany) ร่วมกับการถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัล (Canon EOS 700D, Canon Inc., Taipei, Taiwan) ที่กำลังขยายของเลนส์ใกล้วัตถุเท่ากับ 20 เท่า โดยนำตัวอย่างมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 10 นาที เพื่อหลอมเหลวผลึกไขมัน จากนั้นใช้ไมโครปิเปตดูดตัวอย่างไขมันปริมาตร 15 ไมโครลิตร นำมาหยดลงบนกระจกสไลด์ (glass slide) แล้วปิดด้วยกระจกปิดสไลด์ (cover slip) จากนั้นทำการไล่ฟองอากาศออกให้หมด และนำตัวอย่างเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 22 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ส่องดูผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์ แล้วนำมาวัดขนาดของผลึกด้วยโปรแกรม Image J และนำภาพถ่ายผลึกที่ได้มาปรับให้อยู่ในโทนสีเทา (gray scale)

### 3.3.4 การศึกษารูปแบบโครงสร้างผลึก (polymorphism)

ศึกษารูปแบบโครงสร้างผลึกไขมันผสมที่อัตราส่วนที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการเป็น CBE หรือ CBI เทียบกับ CB ด้วยเทคนิคการทดลองการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction หรือ XRD) (Rigaku TTRAX III, Rigaku Corporation, Tokyo, Japan) โดยให้ความร้อนแก่ตัวอย่างที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 10 นาที แล้วเทใส่ในขวดแก้ว ขนาด 4 มิลลิลิตร จากนั้นทำการบ่มตัวอย่างตามวิธีของ Sonprasert et al. (2022) ซึ่งได้ระบุรายละเอียดไว้ในภาคผนวก ค นำตัวอย่างที่ใส่ขวดแก้วเรียบร้อยแล้วให้ความร้อนอุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 10 นาที แล้วบ่มตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบ่มต่อที่อุณหภูมิ 24 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และเก็บที่ 4 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงก่อนนำไปทำการวิเคราะห์ โดยใช้การสแกนแบบมุมกว้าง (wide-angle X-ray diffraction : WAXD) จาก  $15^{\circ}2\theta$  ถึง  $35^{\circ}2\theta$  สแกนด้วยความเร็ว  $4^{\circ}2\theta$  ต่อนาที และมีความกว้าง  $0.01^{\circ}2\theta$

### 3.3.5 การศึกษาองค์ประกอบกรดไขมัน

ศึกษาองค์ประกอบกรดไขมัน ด้วยวิธี Gas chromatography (Shimadzu gas chromatography) ร่วมกับ flame ionization detector (GC-FID) โดยเตรียมตัวอย่างน้ำมันให้อยู่ในรูป fatty acid methyl esters ทำตามวิธีของ AOAC official method 969.33 (AOAC, 1995) โดยขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างได้ระบุรายละเอียดไว้ในภาคผนวก ง คอลัมน์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ DB-WAX capillary column (ความยาว 30 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.32 มิลลิเมตร และความหนาของชั้นฟิล์ม 0.50 ไมโครเมตร) ใช้แก๊สฮีเลียม เป็นแก๊สตัวพา (carrier gas) ที่มีอัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันเริ่มต้นเท่ากับ 75 kPa ที่อุณหภูมิ 120 °C แก๊สที่ช่วยในการจุดติดไฟ (makeup gases) ได้แก่ แก๊สไนโตรเจน และแก๊ส air zero การกำหนดอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองได้ดัดแปลงมาจากงานวิจัยของ Pontoh (2016) อุณหภูมิของ injector เท่ากับ 210 °C อุณหภูมิเตาอบของโปรแกรมตั้งไว้ที่ 120 °C เป็นเวลา 3 นาที ก่อนที่จะเพิ่มขึ้นในอัตรา 10 °C ต่อนาที จนกระทั่งถึงอุณหภูมิที่ 240 °C และคงไว้ที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา 30 นาที split ratio เท่ากับ 1/10 ปริมาตรของตัวอย่างที่ใช้ในการฉีดเท่ากับ 1 ไมโครลิตร และอุณหภูมิของ detector เท่ากับ 280 °C ตัวอย่างน้ำมันผสมทั้งหมดถูกวิเคราะห์จาก chromatograms โดยจะระบุพีคของกรดไขมันเทียบจาก retention time กับสารมาตรฐาน ปริมาณกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของ

ตัวอย่างน้ำมันจะแสดงเป็นร้อยละของพื้นที่ใต้กราฟ เมื่อให้พื้นที่ใต้กราฟเป็นร้อยละ 100 (Sonwai et al., 2014)

### 3.4 การศึกษาคุณสมบัติการต้านทานความร้อนและพฤติกรรมการเกิดฝ้าขาวบนผิวของช็อกโกแลต

#### 3.4.1 การเตรียมตัวอย่างช็อกโกแลต

เตรียมช็อกโกแลตทั้งหมด 3 สูตร (CB, IB และ IBS) โดยเริ่มจากเตรียมวัตถุดิบดังนี้ : โกโก้แมส (44%), น้ำตาล (43.5%), ไขมันที่ต้องเติม (12%) และเลซิติน (0.5%) โดยช็อกโกแลตสูตรควบคุม (CB chocolate) จะใช้ CB 12% ในส่วนของปริมาณไขมันที่ต้องเติมทั้งหมด ส่วนช็อกโกแลตอีก 2 สูตรคือ ช็อกโกแลตที่ผลิตจากเนยอิลิปเป้ (IB chocolate) และช็อกโกแลตที่ผลิตจากเนยอิลิปเป้สเตียริน (IBS chocolate) ที่ต้องใช้ปริมาณ CBE ตามกฎหมายของสหภาพยุโรปที่สามารถเติม CBE ได้ 5% w/w ของผลิตภัณฑ์สุดท้าย ดังนั้นจึงเติม IB หรือ IBS 5% และ CB 7% โดยจะบดส่วนผสมทั้งหมดให้เป็นเนื้อเดียวกันเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ด้วยเครื่องบดช็อกโกแลตตรา Premier (Diamond Custom Machines Corps, Hillsborough, NJ, USA) จากนั้นนำมา tempering โดยใช้อุณหภูมิ 60 °C เพื่อให้ไขมันเกิดการหลอมเหลวและส่วนผสมเข้ากันเป็นเนื้อเดียว และลดอุณหภูมิลงที่ 27 °C เพื่อให้เกิดการตกผลึกในโครงสร้างแบบที่ III และ IV ของช็อกโกแลตที่ผลิตจาก CB แต่ในส่วนช็อกโกแลตที่ผลิตจาก IB และ IBS นั้นให้เพิ่มอุณหภูมิขึ้นมา 1 °C (Md Ali et al., 1998) จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิขึ้นมาที่ 30 °C เพื่อให้เกิดโครงสร้างแบบที่ V ซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างของช็อกโกแลตที่ต้องการ นำช็อกโกแลตมาเทใส่พิมพ์พลาสติก (plastic mould) (1 cm x 2 cm x 5 cm) และนำไปเก็บที่อุณหภูมิ 15 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการเซ็ตตัวของช็อกโกแลต จากนั้นแกะช็อกโกแลตออกจากพิมพ์ (de-mould) และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และอุณหภูมิ 29 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง สลับกัน (temperature-cycling) ที่เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเกิดฝ้าขาว (fat bloom) ของช็อกโกแลต (Aumpai et al., 2022)

#### 3.4.2 การศึกษาปริมาณไขมันแข็งในรูปผลึกของช็อกโกแลต

ศึกษาปริมาณไขมันแข็งในรูปผลึกโดยใช้เทคนิค p-NMR (Minispec-mq 20, BRUKER, Karlsruhe, Germany) โดยตัวอย่างช็อกโกแลตจะถูกเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนนำมาวิเคราะห์ โดยจะวัดค่า SFC ทุก ๆ 1 สัปดาห์เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์

### 3.4.3 การศึกษาคุณสมบัติด้านความแข็งของซ็อกโกแลต

ศึกษาคุณสมบัติด้านความแข็งของซ็อกโกแลต (hardness) ด้วยเครื่อง TA.XT2i texture analyzer (Stable Micro Systems Ltd., Surrey, England) โดยตัวอย่างซ็อกโกแลตจะถูกเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนนำมาวิเคราะห์ ใช้หัววัดรูปเข็ม P/2N needle probe วัดตัวอย่างสูง 10 มิลลิเมตร ความลึกของหัววัดที่ตกลงในตัวอย่าง เจาะเท่ากับ 5 มิลลิเมตร pre-speed 1 มิลลิเมตรต่อวินาที, test speed 2 มิลลิเมตรต่อวินาที และ post-speed 10 มิลลิเมตรต่อวินาที (Kadivar et al., 2016) โดยความแข็งคือค่าแรงสูงสุดที่ใช้ในการกดตัวอย่าง (g)

### 3.4.4 การศึกษาการต้านทานอุณหภูมิสูงโดยการวัดค่าดัชนีการคงรูปร่างของซ็อกโกแลต

วัดค่าดัชนีการคงรูปร่างของซ็อกโกแลต (shape retention index : SRI) โดยใช้วิธีการทดสอบตาม Best et al. (2005) นำแท่งซ็อกโกแลตมาซึ่งน้ำหนัก และวัดความกว้างของแท่งโดยวัดทั้งหมด 10 จุดจากด้านบนสุดลงมาด้านล่างสุด (ตลอดความยาวของชิ้นซ็อกโกแลต) และหาค่าความกว้างเฉลี่ยก่อนการทดสอบ แล้วนำแท่งซ็อกโกแลตที่วางบนภาตไปเก็บไว้ในตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปปล่อยให้ตกจากที่สูง โดยให้มีความสูงจากพื้นโต๊ะถึงบริเวณจุดที่จะปล่อยเท่ากับ 46 เซนติเมตร ทิ้งให้ซ็อกโกแลตเย็นตัวลง แล้วทำการวัดความกว้างของแท่งซ็อกโกแลตอีกครั้งตามจุดที่กำหนดไว้ในตอนแรกทั้งหมด 10 จุด และหาค่าความกว้างเฉลี่ยหลังการทดสอบ แล้วทำการคำนวณค่า SRI ดังสมการ (2):

$$SRI = 100 \left( 1 - \frac{d_2 - d_1}{d_2 - d_1} \cdot \frac{w^c}{w^s} \right) \quad (2)$$

เมื่อ  $d_1$  และ  $d_2$  คือ ค่าความกว้างเฉลี่ยของซ็อกโกแลตก่อนและหลังทำการทดสอบ  $w$  คือ น้ำหนักของแท่งซ็อกโกแลต ตัวอักษร  $s$  คือ ตัวอย่างซ็อกโกแลตที่ผลิตจาก CBE ส่วน  $c$  คือ ตัวอย่างควบคุมซึ่งก็คือซ็อกโกแลตที่ผลิตจาก CB ค่า SRI เป็น 0 หมายถึงไม่มีความแตกต่างระหว่างตัวอย่างที่ทดสอบและตัวอย่างควบคุม (ซึ่งหมายถึงการทนความร้อนได้น้อยเพราะตัวอย่างควบคุมทนความร้อนได้น้อย) ส่วนค่า SRI เป็น 100 หมายถึงตัวอย่างที่ทดสอบรักษารูปร่างได้เหมือนเดิมไม่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการเก็บที่อุณหภูมิสูง (ซึ่งหมายถึงการทนความร้อนได้ดีกว่าตัวอย่างควบคุมมาก)

### 3.4.5 การศึกษาพฤติกรรมการเกิดฝ้าขาวของซ็อกโกแลต

สีของผิวหน้าซ็อกโกแลต และโครงสร้างของผลึกจะเปลี่ยนแปลงไประหว่างการเก็บรักษาซึ่งสามารถใช้ในการติดตามพฤติกรรมการเกิดฝ้าขาวของซ็อกโกแลตได้จะศึกษาพฤติกรรมการเกิดฝ้าขาวของซ็อกโกแลตโดยการเก็บรักษาแบบสลับอุณหภูมิ คือเก็บรักษาซ็อกโกแลตที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และอุณหภูมิ 29 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์ แล้วติดตามการเกิดฝ้าขาวโดยที่ทุก ๆ 1 สัปดาห์ จะนำตัวอย่างมาวัดค่าสีของผิวหน้าซ็อกโกแลตด้วยเครื่อง HunterLab colorimeter (ColorFlex EZ, Hunter Associates Laboratory Inc., Virginia, USA) ให้ได้ค่า L\*, a\* และ b\* แล้วนำไปคำนวณเป็นค่าดัชนีความขาว (whiteness index : WI) พร้อมกับการถ่ายภาพ สมการ WI สามารถคำนวณได้ดังสมการ (3) (Jun Jin et al., 2019):

$$WI = 100 - [(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}]^{1/2} \quad (3)$$

### 3.4.6 การศึกษาพฤติกรรมการหลอมเหลวของซ็อกโกแลต

ศึกษาพฤติกรรมการหลอมเหลวของซ็อกโกแลตซึ่งจะใช้ในการติดตามการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผลึกในระหว่างการเก็บรักษา ด้วยเทคนิค DSC (DSC 8000, PerkinElmer Co., Norwalk, CT, USA) โดยใช้ตัวอย่าง 3-5 มิลลิกรัม ใส่ในภาชนะอะลูมิเนียม (aluminum pan) ความจุ 30 ไมโครลิตร และปิดผนึกอย่างหนาแน่น ตัวอย่างจะถูกทำให้ร้อนจากอุณหภูมิ 25 °C ถึง 60 °C ที่อัตรา 5 °C ต่อนาที โดยจะวัดทุก ๆ 1 สัปดาห์ เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์

### 3.5 สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์

ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance; ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี least significant difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (p<0.05) โดยใช้โปรแกรม SPSS และใช้ข้อมูลที่ได้มาจากการทดลอง 3 ซ้ำ ข้อมูลจะแสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)

## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล และอภิปรายผล

#### 4.1 การศึกษาคุณสมบัติและพฤติกรรมการตกผลึกของเนยโกโก้ผสมกับเนยอิลิปเป้ และเนยโกโก้ผสมกับเนยอิลิปเป้สเตียริน

##### 4.1.1 การศึกษาคุณสมบัติและพฤติกรรมการตกผลึกของเนยโกโก้ผสมกับเนยอิลิปเป้

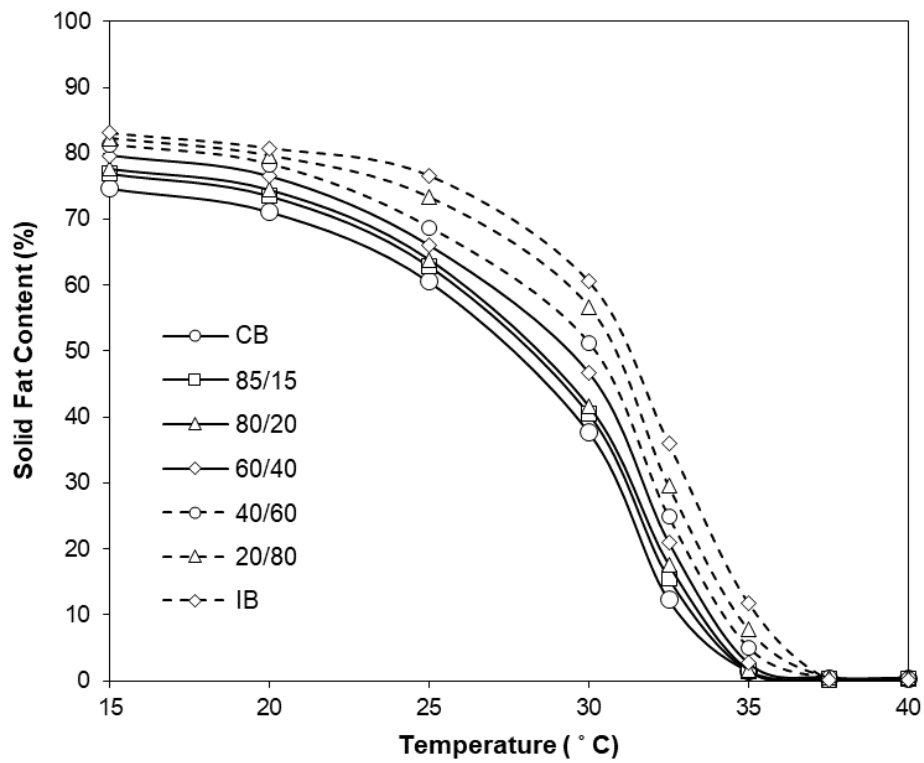
##### 4.1.1.1 ปริมาณไขมันแข็งในรูปผลึกและความเข้ากันได้กับเนยโกโก้

ปริมาณ SFC ที่วัดที่อุณหภูมิต่างๆ โดยทั่วไปไม่เพียงแต่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับความแข็งหรืออ่อนของไขมันที่อุณหภูมิต่างกัน แต่ยังรวมถึงพฤติกรรมการหลอมเหลวของไขมันอีกด้วย (Sonwai et al., 2014) ดังแสดงจากภาพที่ 11 พบว่าตัวอย่างไขมันทั้งหมดจะมีค่า SFC ที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการหลอมเหลวของไขมัน แต่ทั้งนี้ก็จะลดลงด้วยอัตราที่แตกต่างกัน โดย CB จะมีค่า SFC ที่ต่ำที่สุดตลอดช่วงอุณหภูมิที่ทำการศึกษา ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 25 °C CB จะมีค่า SFC ประมาณ 60 ถึง 75% และอุณหภูมิที่สูงกว่า 25 °C ค่า SFC จะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการหลอมเหลวของ TAG ที่เป็นไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยว (monounsaturated TAG) ซึ่งโดยส่วนใหญ่ คือ TAG ชนิด POP, POS และ SOS และจะหลอมเหลวจนหมดหรือมีค่า SFC เท่ากับ 0% ที่อุณหภูมิ 35 °C ซึ่งเป็นลักษณะการหลอมเหลวที่ต้องการสำหรับไขมันที่ใช้ในการผลิตช็อกโกแลต โดย SFC ที่มีค่าสูงที่อุณหภูมิห้องจะทำให้ไขมันแข็ง เนื้อสัมผัสไม่เกิดความเสียหาย และ SFC ที่มีค่าต่ำที่อุณหภูมิสูงก็จะทำให้ไขมันหลอมเหลวในปากได้ทั้งหมด ไม่เกิดความเป็นไข (Zhang et al., 2020) เส้นกราฟ SFC ของ CB ยังเหมือนกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่ได้รายงานไว้ (N. Biswas et al., 2016; Kadivar et al., 2016) IB มีค่า SFC ที่สูงกว่า CB โดยมีค่าประมาณ 76 ถึง 80 % ที่อุณหภูมิ 20 ถึง 25 °C สำหรับไขมันผสม CB/IB นั้น เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ IB จะทำให้ค่า SFC เพิ่มสูงขึ้นในทุก ๆ อุณหภูมิ เนื่องจาก IB มี TAG ที่มีจุดหลอมเหลวสูงอยู่ในปริมาณมาก หรือมี SOS ที่สูง และจะเห็นได้ว่าไขมันผสม CB/IB ที่อัตราส่วนต่าง ๆ จะสามารถทนความร้อนที่อุณหภูมิห้องได้สูงกว่า CB ซึ่งค่า SFC ในช่วงอุณหภูมิ 20 ถึง 25 °C จะมีความสัมพันธ์กับความแข็ง ความคงตัว และความต้านทานความร้อนที่อุณหภูมิห้อง (Ribeiro et al., 2012) และที่อุณหภูมิ 37 °C หรืออุณหภูมิร่างกาย ทั้งไขมันผสมทุกอัตราส่วน และ IB จะมีค่า SFC ที่เท่ากับหรือเข้าใกล้ 0% ซึ่งแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติการหลอมเหลวที่ดี เนื่องจากเมื่อนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลตก็จะสามารถหลอมเหลวได้ดีที่อุณหภูมิร่างกาย (35 ถึง 37 °C) โดยจะไม่ทำ

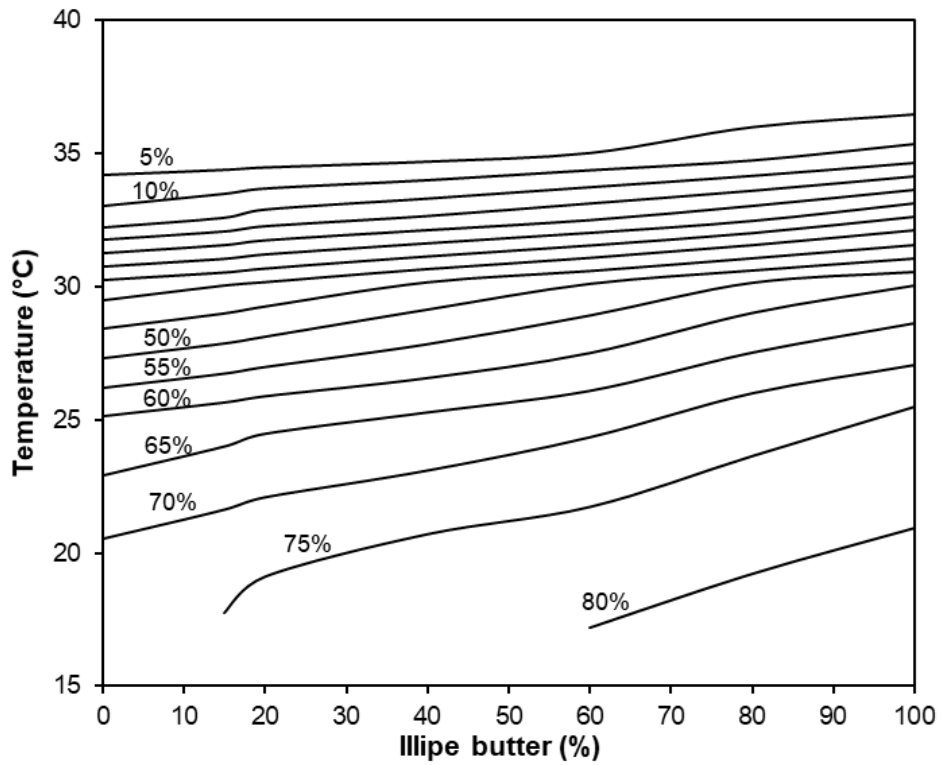
ให้เกิดลักษณะของไขเคลือบในปาก (Patel et al., 2014; Wainwright, 1996) ซึ่งเป็นสิ่งที่ผู้บริโภคไม่ต้องการ

ความเข้ากันได้ของไขมันต่างชนิดกันมีผลอย่างมากต่อสภาวะในกระบวนการแปรรูป คุณภาพ และอายุการเก็บรักษาของไขมันผสม (Aumpai et al., 2022) โดย iso-solid phase diagram เป็นตรรกะที่มีประสิทธิภาพในการอธิบายความเข้ากันได้ของไขมันผสมในระบบ (F. Wang et al., 2011) ซึ่งจากภาพที่ 12 จะพบการเกิดปรากฏการณ์ monotectic หรือความเข้ากันได้ของไขมันผสม (compatibility) โดยเส้น isosolid แต่ละเส้นแสดงถึงค่า SFC ที่แตกต่างกัน เส้นบนสุดคือเส้น SFC 5% ในขณะที่เส้นล่างสุดคือเส้น SFC 80% ซึ่งจะเห็นได้ว่าเส้นแสดงค่า SFC เกือบทุกเส้นมีลักษณะเป็นเส้นตรงแสดงให้เห็นว่าไขมันผสมระหว่าง CB/IB สามารถผสมเข้ากันได้ดี (Kadivar et al., 2016) ซึ่งการเกิดปรากฏการณ์ monotectic ได้นั้น เนื่องจากมีกรดไขมัน, TAG, คุณสมบัติการหลอมเหลว และโครงสร้างของผลึกที่คล้ายคลึงกัน (Kevin W. Smith, 2012) ซึ่ง IB มี TAG ชนิด POP, POS, SOS และมีกรดไขมันหลัก ได้แก่ P, O และ S (จากตารางที่ 9) ที่คล้ายคลึงกับ CB ดังนั้น CB กับ IB จึงสามารถเข้ากันได้ดี นอกจากนี้ภาพที่ 13 ยังได้อธิบายว่า CB กับ IB นั้นสามารถเข้ากันได้ดี เนื่องจากเกิดปรากฏการณ์ monotectic เพราะมีค่า SFC difference ไม่แตกต่างกันมากนัก และยังสามารถอธิบายเพิ่มเติมได้จากภาพที่ 14 ที่แสดงปริมาณไขมันแข็งในรูปผลึกของ CB/IB เพื่อแสดงความเข้ากันได้ของไขมันผสม พบว่าค่า SFC ของไขมันผสมทุกอัตราส่วนที่ทุกอุณหภูมิมีค่าอยู่บนเส้นตรงที่เชื่อมต่อกันของค่า SFC ของไขมันตั้งต้น บ่งชี้ได้ว่าไขมันผสมสามารถเข้ากันได้ดี Sonwai et al. (2014) ศึกษาความเข้ากันได้ของ CB กับ CBE ที่ผลิตจาก ไขมันในเมล็ดมะม่วง/น้ำมันปาล์ม ส่วนกลาง (80/20) โดยแสดงค่า SFC ที่อุณหภูมิ 20 °C พบว่าไขมันผสมทุกอัตราส่วนแสดงอยู่บนเส้นตรงที่เชื่อมต่อกันระหว่างค่า SFC ของ CBE และ CB บ่งชี้ว่าไขมันผสมเข้ากันได้อย่างสมบูรณ์ และสามารถใช้ได้ทุกอัตราส่วนโดยไม่ทำให้เกิดการอ่อนตัวลง

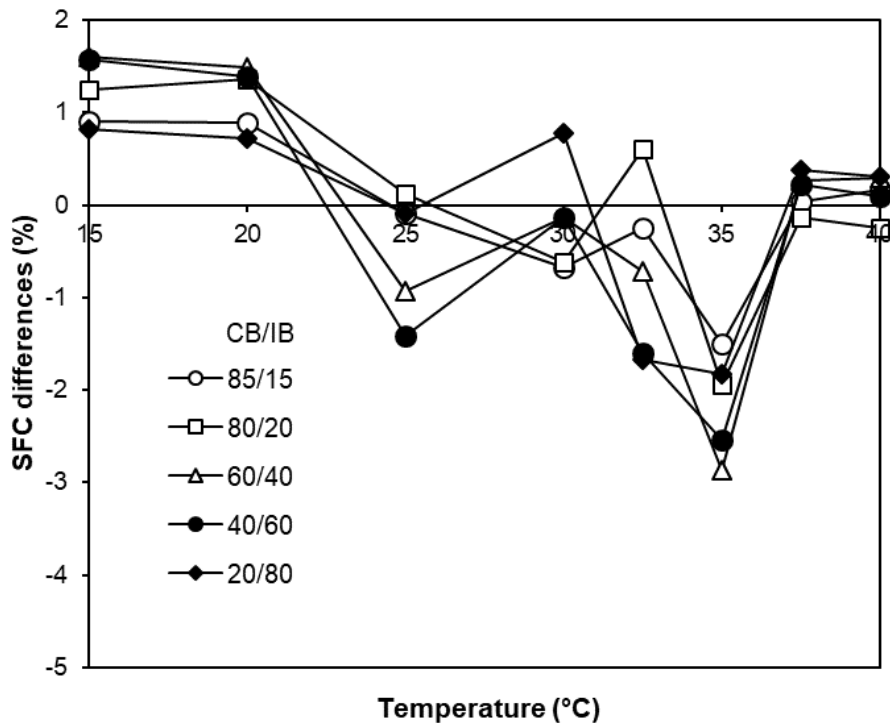




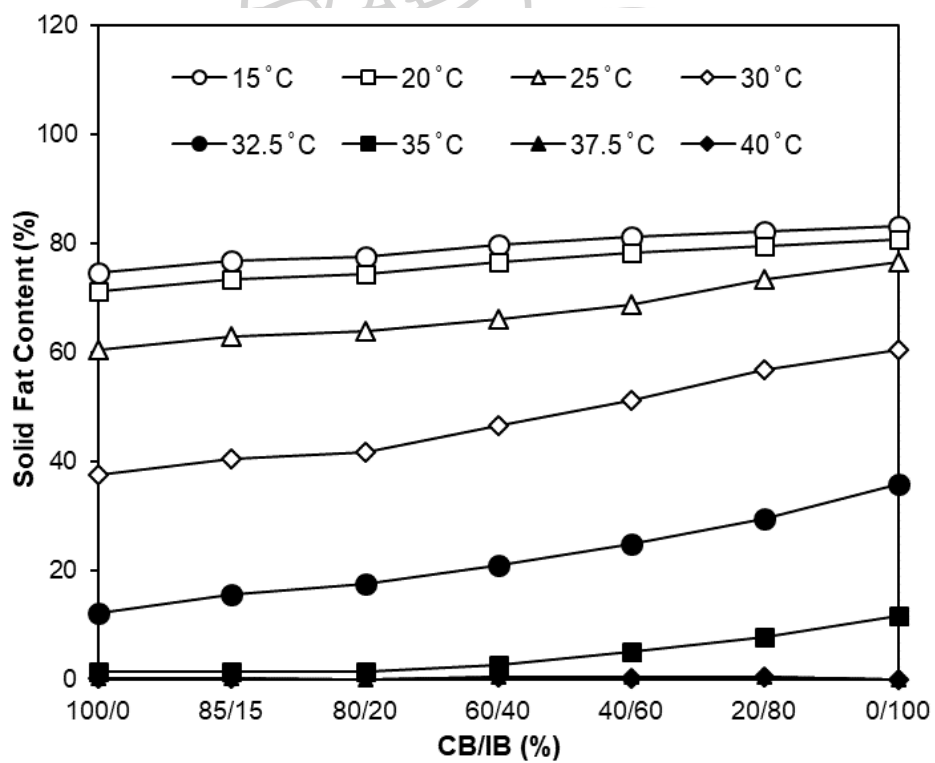
ภาพที่ 11 ปริมาณไขมันแข็งในรูปผลึกของเนยโกโก้ (CB) ผสมเนยอิลิปเป้ (IB) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ



ภาพที่ 12 Iso-solid phase diagram ของเนยโกโก้ (CB) ผสมเนยอิลิปเป้ (IB)



ภาพที่ 13 ความแตกต่างของปริมาณไขมันแข็งในรูปผลึกของเนยโกโก้ (CB) ผสมเนยอิลิปเป้ (IB)

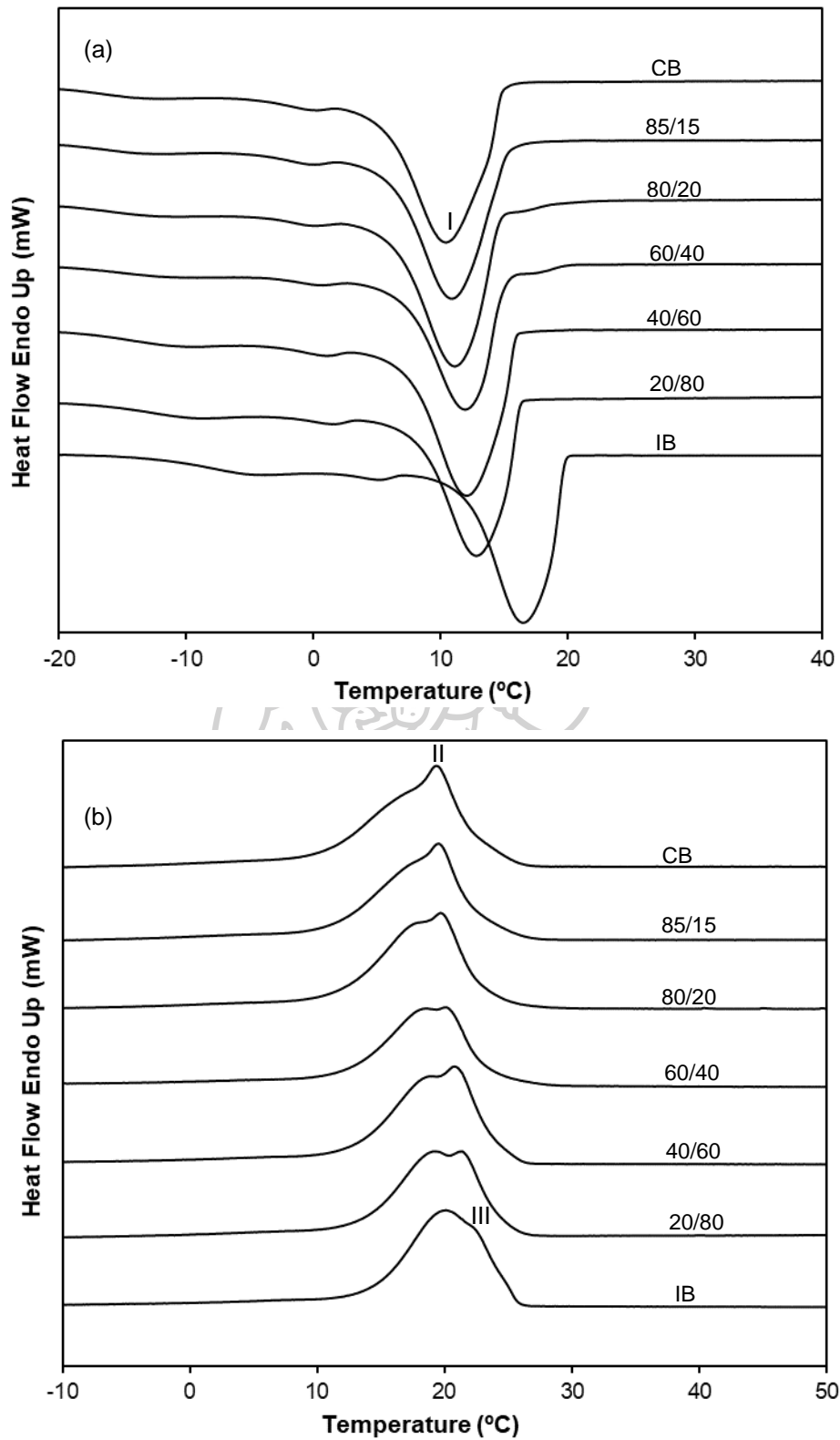


ภาพที่ 14 ปริมาณไขมันแข็งในรูปผลึกของเนยโกโก้ (CB) ผสมเนยอิลิปเป้ (IB) เพื่อแสดงความเข้ากันได้ของไขมันผสม

#### 4.1.1.2 พฤติกรรมการตกผลึกและการหลอมเหลว

พฤติกรรมการตกผลึกของ CB, IB และไขมันผสม CB/IB แสดงดังภาพที่ 15a พบว่า CB มีอุณหภูมิที่เริ่มเกิดการตกผลึก (crystallization onset temperature:  $T_{co}$ ) ที่ 16.42 °C (ตารางที่ 7) มีพีคหลักของการตกผลึกเพียงพีคเดียวที่อุณหภูมิ 10.43 °C ( $T_p$ ) ซึ่งเหมือนกับพฤติกรรมการตกผลึกของ CB ที่ได้มีการศึกษาในงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Huang et al., 2021; Jun Jin et al., 2018; Kang et al., 2013; Sonprasert et al., 2022; Sonwai et al., 2014) ส่วน IB มีอุณหภูมิการตกผลึกที่สูงกว่า CB หรือเกิดการตกผลึกที่เร็วกว่า โดยมีค่า  $T_{co}$  ที่ 19.38 °C มีพีคหลักของการตกผลึกเพียงพีคเดียวที่อุณหภูมิ 13.40 °C สอดคล้องกับงานวิจัยของ Aumpai et al. (2022) ที่ IB มีอุณหภูมิการตกผลึกที่สูงกว่า CB โดยมีค่า  $T_{co}$  ที่ 17.1 และ 15.6 °C ตามลำดับ เนื่องจาก IB มี TAG ที่มีจุดหลอมเหลวสูง (SOS, SSS) ในปริมาณมาก โดย TAG ที่มีกรดสเตียริกมากจะมีจุดหลอมเหลวที่สูงกว่า (Lutton, 1945) ซึ่งจากตารางที่ 9 จะเห็นได้ว่า IB มีปริมาณของกรดสเตียริกมากกว่า CB จึงทำให้เกิดการตกผลึกได้เร็วกว่า CB สำหรับไขมันผสม CB/IB นั้น เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ IB ที่ 15 ถึง 80 % จะทำให้พีคของการตกผลึกขยับไปยังอุณหภูมิที่สูงขึ้นจาก 10.89 ถึง 12.80 °C ( $p < 0.05$ ) ค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการตกผลึก (crystallization enthalpies:  $\Delta H_c$ ) จะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของ IB ( $p \geq 0.05$ ) และยังพบว่าเทอร์โมแกรมของการตกผลึกของไขมันผสมทุกอัตราส่วน และ IB มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับ CB

พฤติกรรมการหลอมเหลวของ CB, IB และไขมันผสม แสดงดังภาพที่ 15b พบว่า CB มีพีคหลักของการหลอมเหลวเพียงพีคเดียวที่อุณหภูมิ 19.43 °C ( $T_p$ ) และมีพีครองที่อุณหภูมิต่ำกว่า และมีช่วงการหลอมเหลวที่กว้าง โดยมีค่าการหลอมเหลวจนหมด (melting completion temperature:  $T_{mc}$ ) ที่อุณหภูมิ 27.44 °C ส่วน IB มีพีคของการหลอมเหลวที่ทับซ้อนกัน 2 พีค คือที่อุณหภูมิ 20.10 °C และ 22.44 °C ( $T_p$ ) (ตารางที่ 7) และมีค่า  $T_{mc}$  ที่มากกว่า CB เพียงเล็กน้อยที่อุณหภูมิ 27.52 °C ( $p \geq 0.05$ ) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Aumpai et al. (2022) ที่ IB มีพีคที่ซ้อนทับกัน (20.4 และ 22.5 °C) เช่นกัน สำหรับไขมันผสม CB/IB นั้น เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ IB ในไขมันผสมจะทำให้พีคของการหลอมเหลวขยับไปยังอุณหภูมิที่สูงขึ้น แต่ไม่ส่งผลต่อค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลว (melting enthalpies:  $\Delta H_m$ ) อย่างมีนัยสำคัญ ( $p \geq 0.05$ ) นอกจากนี้ยังพบว่าเทอร์โมแกรมของการหลอมเหลวของไขมันผสมที่อัตราส่วน 85/15 มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับ CB มากที่สุด



ภาพที่ 15 เทอร์โมแกรมการตกผลึก (a) และเทอร์โมแกรมการหลอมเหลว (b) ของเนยโกโก้ (CB) ผสมเนยอิลิป (IB) ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

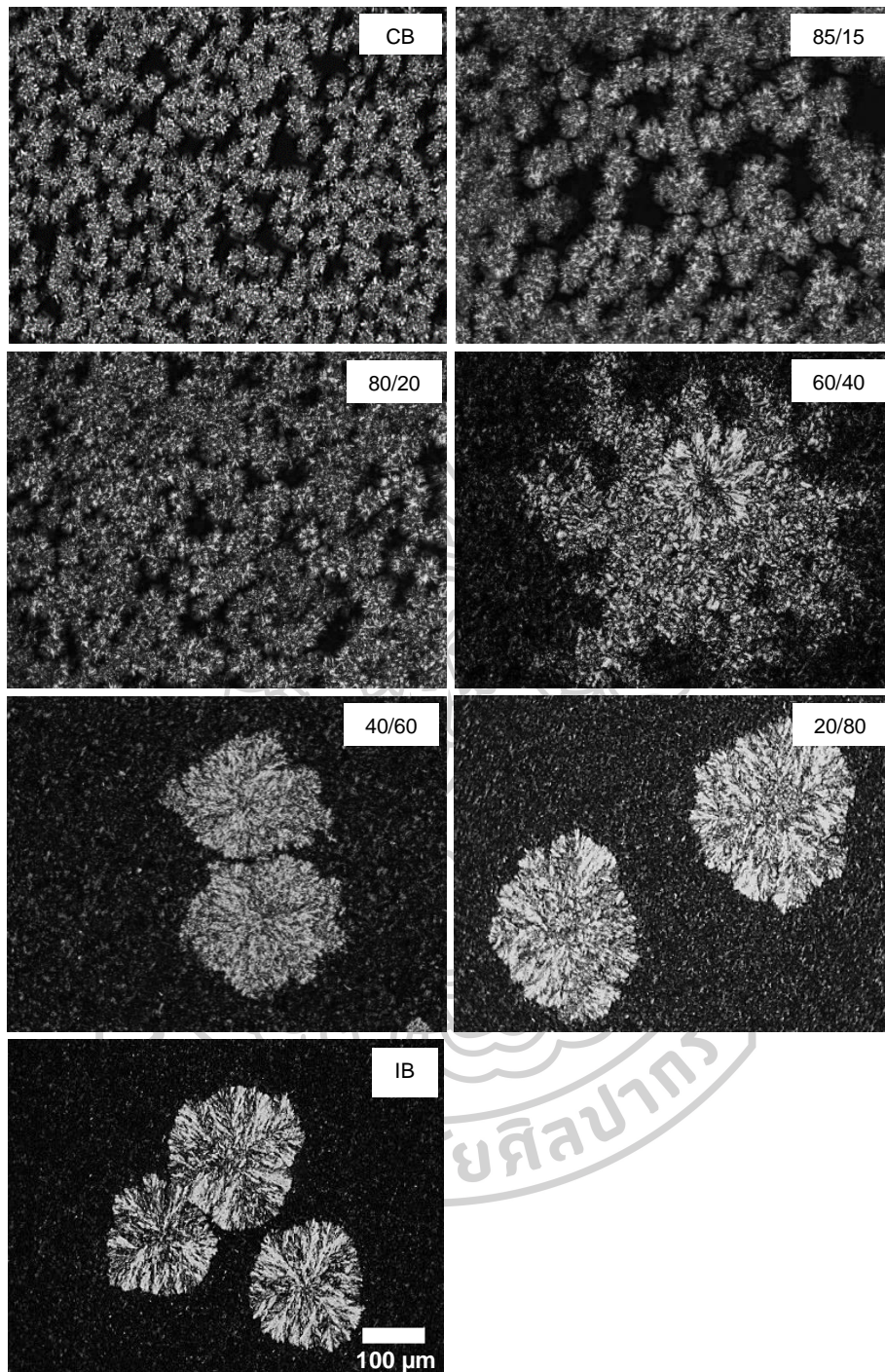
ตารางที่ 7 พารามิเตอร์ DSC ของการตกผลึกและการหลอมเหลวของเนยโกโก้ (CB) ผสมเนยอิลิปเป้ (IB) ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

Sample	Crystallization				Melting			
	T <sub>co</sub> (°C)	T <sub>pI</sub> (°C)	ΔH <sub>c</sub> (J/g)	T <sub>pII</sub> (°C)	T <sub>pIII</sub> (°C)	T <sub>mc</sub> (°C)	ΔH <sub>m</sub> (J/g)	
CB	16.42 ± 0.14 <sup>d</sup>	10.43 ± 0.03 <sup>g</sup>	102.61 ± 1.13 <sup>cde</sup>	19.43 ± 0.06 <sup>e</sup>		27.44 ± 0.26 <sup>b</sup>	105.48 ± 1.06 <sup>ab</sup>	
85/15	18.19 ± 1.29 <sup>c</sup>	10.89 ± 0.04 <sup>f</sup>	101.81 ± 0.53 <sup>de</sup>	19.62 ± 0.12 <sup>de</sup>		28.30 ± 0.67 <sup>b</sup>	106.18 ± 0.61 <sup>a</sup>	
80/20	20.58 ± 0.21 <sup>ab</sup>	11.09 ± 0.01 <sup>e</sup>	100.55 ± 2.52 <sup>e</sup>	19.69 ± 0.02 <sup>d</sup>		29.29 ± 0.34 <sup>a</sup>	101.87 ± 0.74 <sup>c</sup>	
60/40	20.91 ± 0.14 <sup>a</sup>	11.92 ± 0.04 <sup>d</sup>	103.49 ± 0.38 <sup>cd</sup>	19.96 ± 0.22 <sup>c</sup>		29.43 ± 0.40 <sup>a</sup>	104.25 ± 0.08 <sup>b</sup>	
40/60	20.42 ± 0.14 <sup>ab</sup>	12.05 ± 0.03 <sup>c</sup>	104.76 ± 0.01 <sup>bc</sup>	20.76 ± 0.01 <sup>b</sup>		27.56 ± 0.35 <sup>b</sup>	104.84 ± 0.37 <sup>ab</sup>	
20/80	19.52 ± 0.47 <sup>b</sup>	12.80 ± 0.00 <sup>b</sup>	106.31 ± 0.31 <sup>ab</sup>	21.37 ± 0.00 <sup>a</sup>		28.13 ± 0.34 <sup>b</sup>	105.32 ± 0.31 <sup>ab</sup>	
IB	19.38 ± 0.14 <sup>bc</sup>	13.40 ± 0.03 <sup>a</sup>	107.45 ± 0.02 <sup>a</sup>	20.10 ± 0.04 <sup>c</sup>	22.44 ± 0.01	27.52 ± 0.28 <sup>b</sup>	106.17 ± 0.08 <sup>a</sup>	

หมายเหตุ : T<sub>co</sub> : (crystallization onset temperature) อุณหภูมิที่เริ่มเกิดการตกผลึก, T<sub>p</sub> : อุณหภูมิที่แสดงค่าพีคของการตกผลึกและการหลอมเหลว, ΔH<sub>c</sub> : (crystallization enthalpies) ค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการตกผลึก, T<sub>mc</sub> : (melting completion temperature) อุณหภูมิที่หลอมเหลวจนหมด และ ΔH<sub>m</sub> : (The melting enthalpies) ค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลว ตัวอักษรที่ต่างกันในกลุ่มเดียวกันแสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p < 0.05)

#### 4.1.1.3 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของผลึก

ลักษณะของผลึกของ CB, IB และไขมันผสม หลังการตกผลึกที่อุณหภูมิ 22 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แสดงดังภาพที่ 16 พบว่า CB แสดงรูปผลึกที่มีลักษณะทรงกลม หรือ spherulites ที่ประกอบด้วยผลึกรูปร่างเข็ม (needle-like crystals) โตร่วมกันจากจุดศูนย์กลางเดียวกัน โดยมีขนาดผลึกเท่ากับ  $25 \pm 2 \mu\text{m}$  สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sonwai et al. (2014) ที่แสดงถึงลักษณะผลึก CB ที่มีลักษณะทรงกลมเช่นกัน ส่วน IB แสดงผลึกทรงกลมที่มีขนาดใหญ่มากผสมกับผลึกแบบเป็นเม็ด (granular crystals) ขนาดเล็ก มีขนาดของผลึก  $184 \pm 10 \mu\text{m}$  โดยผลึกที่เป็นแบบเม็ดและมีผลึกขนาดใหญ่ขึ้นสอดคล้องกับการก่อตัวของโครงสร้างแบบ  $\beta$  (Kadivar et al., 2016; Marangoni & McGauley, 2003) ลักษณะรูปร่างและขนาดของผลึก IB สอดคล้องกับงานวิจัยที่ได้ศึกษาไว้ก่อนหน้านี้ (Aumpai et al., 2022) สำหรับไขมันผสม CB/IB นั้น เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ IB จะทำให้รูปร่างผลึกมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น โดยเพิ่มขึ้นจาก  $48 \pm 6 \mu\text{m}$  สำหรับอัตราส่วน 85/15 ไปเป็น  $183 \pm 11 \mu\text{m}$  สำหรับอัตราส่วน 20/80 และมีความหนาแน่นของผลึกสูงกว่า CB ซึ่งแสดงให้เห็นว่า IB นั้นสามารถเกิดการก่อตัวของผลึกได้อย่างรวดเร็วกว่า CB เนื่องจากมีปริมาณ TAG ที่มีจุดหลอมเหลวสูง (SOS) มากกว่า ส่งผลให้มีความหนาแน่นของผลึกสูงกว่า (Bahari & Akoh, 2018a) โดยที่อัตราส่วน 85/15 และ 80/20 มีลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของผลึกที่ใกล้เคียงกับ CB มากที่สุด อย่างไรก็ตาม ตามกฎหมายของสหภาพยุโรปอนุญาตให้ใช้ไขมันพืชชนิดอื่นที่ไม่ใช่ CB ที่มี TAG ชนิด 1,3-disaturated แบบสมมาตรสูงที่สุดในซีอกโกแลตไม่เกิน 5% w/w ของผลิตภัณฑ์สุดท้าย โดยหากในซีอกโกแลตมี CB 33% และใช้ IB เป็น CBE 5% w/w ของผลิตภัณฑ์สุดท้าย อัตราส่วนระหว่าง CB/IB ที่สามารถใช้ได้เพื่อให้เป็นไปตามข้อบังคับของสหภาพยุโรปเท่ากับ 85/15 ในซีอกโกแลตเท่านั้น ดังนั้นการศึกษาในส่วนต่อไปจะใช้เพียงไขมันผสมที่อัตราส่วน 85/15 เทียบกับ CB รวมทั้งการนำไปผลิตเป็นซีอกโกแลตและศึกษาสมบัติและพฤติกรรมการเกิดฝ้าขาวของซีอกโกแลตในระหว่างการเก็บรักษา

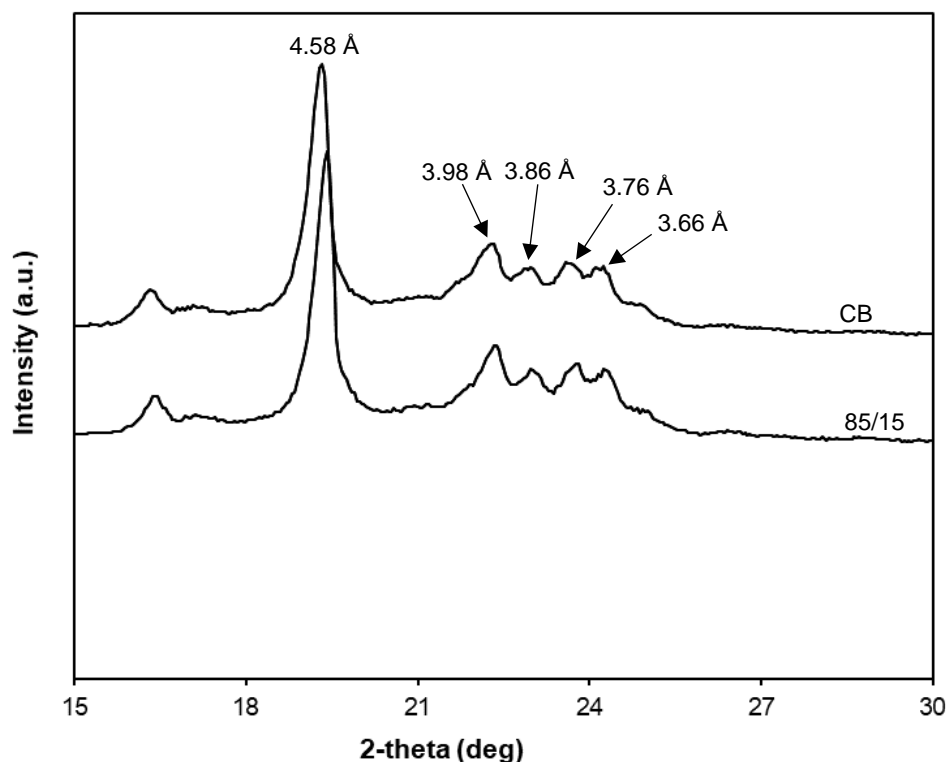


ภาพที่ 16 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของผลึกของเนยโกโก้ (CB) ผสมเนยอิลิปเป้ (IB) ที่อัตราส่วนต่าง ๆ โดยตกผลึกที่อุณหภูมิ 22 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

#### 4.1.1.4 รูปแบบโครงสร้างผลึก

การเลือกใช้ไขมันในการนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม จะต้องพิจารณาจากคุณสมบัติทางกายภาพของไขมัน ซึ่งมีความเกี่ยวข้องอย่างมากกับโครงสร้างของผลึกไขมัน โดยจะขึ้นอยู่กับสถานะของการทดลองและองค์ประกอบทางเคมี ไขมันและน้ำมันสามารถตกผลึกในโครงสร้างที่แตกต่างกัน (Marangoni & McGauley, 2003) ผลึกไขมันโดยทั่วไปจะสามารถตกผลึกโดยแบ่งได้ 3 โครงสร้าง ได้แก่ โครงสร้างแบบ  $\alpha$  (ที่มี unit cell แบบ hexagonal),  $\beta'$  (ที่มี unit cell แบบ orthorhombic) และ  $\beta$  (ที่มี unit cell แบบ triclinic) โดย CB สามารถตกผลึกได้ทั้งหมด 6 โครงสร้าง ได้แก่  $\gamma$  (แบบที่ I),  $\alpha$  (แบบที่ II),  $\beta_2'$  (แบบที่ III),  $\beta_1'$  (แบบที่ IV),  $\beta_2$  (แบบที่ V) และ  $\beta_1$  (แบบที่ VI) (เรียงจากโครงสร้างที่ไม่เสถียรไปจนถึงโครงสร้างที่เสถียรที่สุด) พิกของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (x-ray) ของ  $\beta'$  อยู่ที่ตำแหน่ง 4.2 และ 3.8 Å ในขณะที่  $\alpha$  จะมีพิกของการเลี้ยวเบนอยู่ที่ประมาณ 4.15 Å และ  $\beta$  จะมีพิกของการเลี้ยวเบนที่เด่นชัดที่สุดอยู่ที่ตำแหน่ง 4.6 Å (Zou et al., 2022) รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ใน WAXD จะแสดงดังภาพที่ 17 โดยทำการตกผลึกไขมันที่อุณหภูมิ 24 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง พบว่า CB แสดงพิกหลักของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่เด่นชัดที่สุดที่ตำแหน่ง 4.58 Å และมีพิกของการเลี้ยวเบนอีก 4 พิกย่อยคือ 3.98, 3.86, 3.76 และ 3.66 Å สอดคล้องกับงานวิจัยของ Bahari and Akoh (2018a) ที่ CB มีพิกหลักที่ตำแหน่ง 4.60 Å ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างผลึกแบบ  $\beta_2$  (แบบที่ V) ในส่วนของไขมันผสมระหว่าง CB/IB ในอัตราส่วน 85/15 มีพิกหลักของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่เด่นชัดที่สุดที่ตำแหน่ง 4.58 Å และมีพิกของการเลี้ยวเบนอีก 4 พิกย่อยที่คล้ายกับ CB บ่งชี้ว่าตกผลึกในรูปแบบ  $\beta_2$  เช่นเดียวกับ CB ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญสำหรับ CBE ที่จะต้องตกผลึกในรูปแบบ  $\beta_2$  (แบบที่ V) เพื่อให้ช็อกโกแลตมีเนื้อสัมผัสที่แข็ง มีความมันวาว สามารถหลอมเหลวที่อุณหภูมิร่างกาย นอกจากนี้ยังสามารถต้านทานการเกิดฝ้าขาวได้ (Bahari & Akoh, 2018a; S. T. Beckett, 2008) จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าการผสม CB กับ IB เข้าด้วยกัน ไม่ส่งผลทำให้พฤติกรรมการตกผลึกและการหลอมเหลวแตกต่างไปจากของ CB โดยเฉพาะในอัตราส่วน 85/15 (CB/IB) จึงสามารถนำ IB ไปใช้เป็น CBE ในการผลิตช็อกโกแลตได้





ภาพที่ 17 โครงสร้างผลึกของเนยโกโก้ (CB) และเนยโกโก้ผสมเนยอิลิปี่ที่อัตราส่วน CB85/IB15 หลังการตกผลึกไขมันที่อุณหภูมิ 24 °C 48 ชั่วโมง

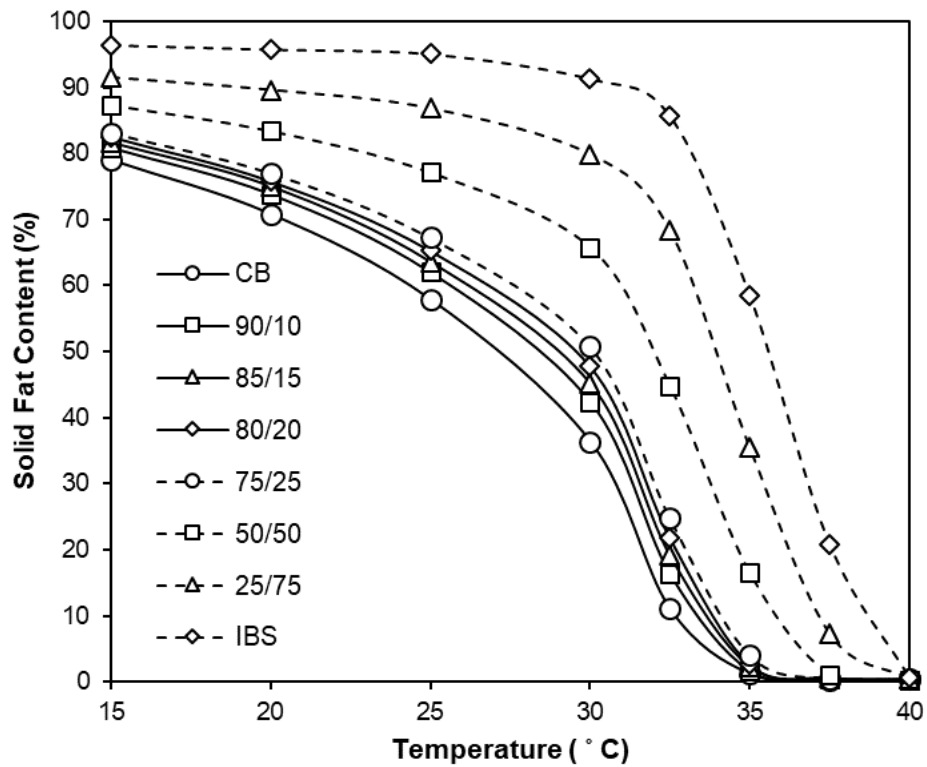
#### 4.1.2 การศึกษาคุณสมบัติและพฤติกรรมการตกผลึกของเนยโกโก้ผสมกับเนยอิลิปี่สเตียรีน

##### 4.1.2.1 ปริมาณไขมันแข็งในรูปผลึกและความเข้ากันได้กับเนยโกโก้

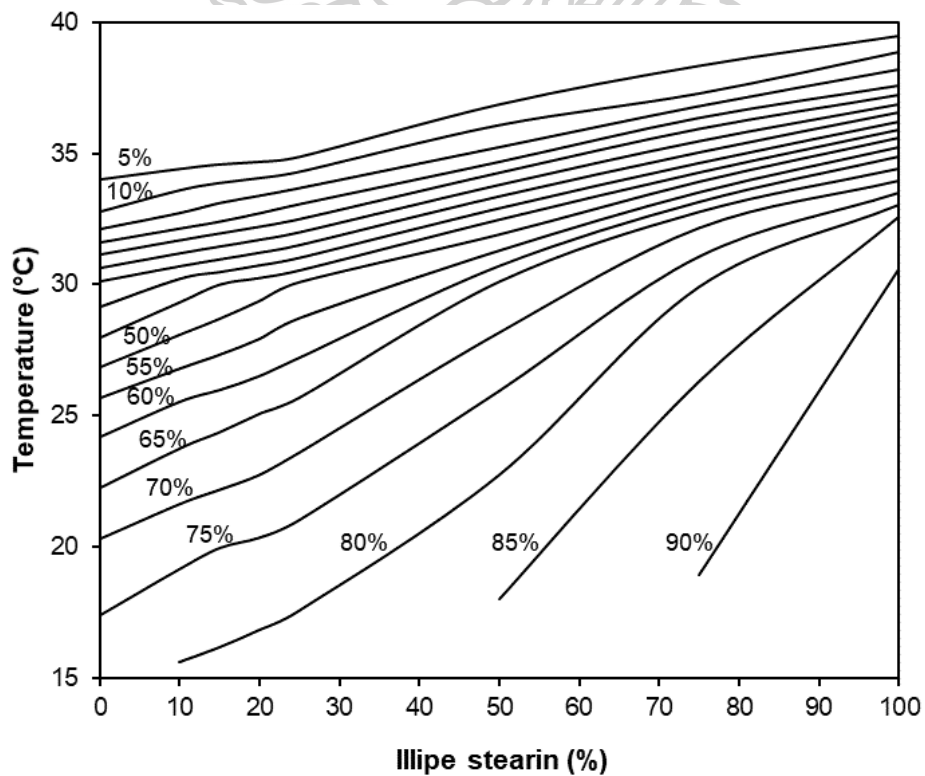
ปริมาณไขมันแข็งในรูปผลึก (SFC) ของ CB, IBS และไขมันผสม CB/IBS จากภาพที่ 18 พบว่าตัวอย่างไขมันทั้งหมดจะมีค่า SFC ที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการหลอมเหลวของไขมัน แต่ทั้งนี้ก็จะลดลงด้วยอัตราที่แตกต่างกัน โดย CB จะมีค่า SFC ที่ต่ำที่สุดตลอดช่วงอุณหภูมิที่ทำการศึกษา โดยได้อธิบายรายละเอียดปริมาณของแข็งในรูปผลึกของ CB ไว้ในหัวข้อที่ 4.1.1.1 IBS มีค่า SFC สูงที่สุด เนื่องจาก IBS มีองค์ประกอบของไตรกลีเซอไรด์ที่มีจุดหลอมเหลวสูงอยู่ในปริมาณมาก มีปริมาณ SOS ที่สูง หรือมีกรดสเตียริกในปริมาณมาก (ตารางที่ 9) จึงทำให้ IBS มีปริมาณไขมันที่เป็นของแข็งมากที่สุด ที่อุณหภูมิ 15 ถึง 30 °C IBS จะมีค่า SFC มากกว่า 90% และจะเริ่มลดลงอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิ 32.5 °C ที่ 37 °C ยังคงมีค่า SFC มากกว่า 20% ซึ่งแสดงให้เห็นว่า IBS ไม่สามารถใช้เป็นไขมันเพียงชนิดเดียวในผลิตภัณฑ์ขนมหวานในอุตสาหกรรมได้ เนื่องจากเมื่อบริโภคจะ

ทำให้รู้สึกถึงความเย็นในปาก IBS จะหลอมเหลวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 40 °C สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sonprasert et al. (2022) ที่แสดงค่า SFC ของ IBS ที่สูงกว่า CB และไขมันผสมระหว่าง IBS กับน้ำมันปาล์มส่วนกลาง (PMF) ในทุก ๆ อุณหภูมิ โดยที่ 37 °C ยังคงมีค่าสูงถึงประมาณ 20% และมีค่าเท่ากับ 0% ที่อุณหภูมิ 40 °C สำหรับไขมันผสม CB/IBS ที่อัตราส่วนต่าง ๆ เส้นกราฟ SFC จะอยู่ระหว่างเส้นกราฟของ CB และ IBS ในทุกอัตราส่วน และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ IBS ในไขมันผสม จะทำให้ค่า SFC เพิ่มสูงขึ้นในทุก ๆ อุณหภูมิ ไขมันผสมที่เติม IBS ที่ 10 ถึง 25% จะมีค่า SFC ที่เข้าใกล้ 0% ที่อุณหภูมิร่างกายซึ่งทำให้ไม่เกิดไขเมื่อผู้บริโภครับประทาน การต้านทานความร้อนเกี่ยวข้องกับค่า SFC ในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 35 °C (Bootello et al., 2018) โดยที่ค่า SFC ที่สูงขึ้นในช่วงอุณหภูมินี้แสดงถึงการต้านทานความร้อนที่สูงขึ้น ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นว่าไขมันผสม CB/IBS จะทำให้ค่า SFC เพิ่มสูงขึ้นในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว บ่งชี้ได้ว่าการเติม IBS สามารถเพิ่มการต้านทานความร้อนได้ ดังนั้น IBS จึงสามารถนำมาทำเป็น CBI เพื่อนำไปผลิตเป็นช็อกโกแลตทนความร้อนได้

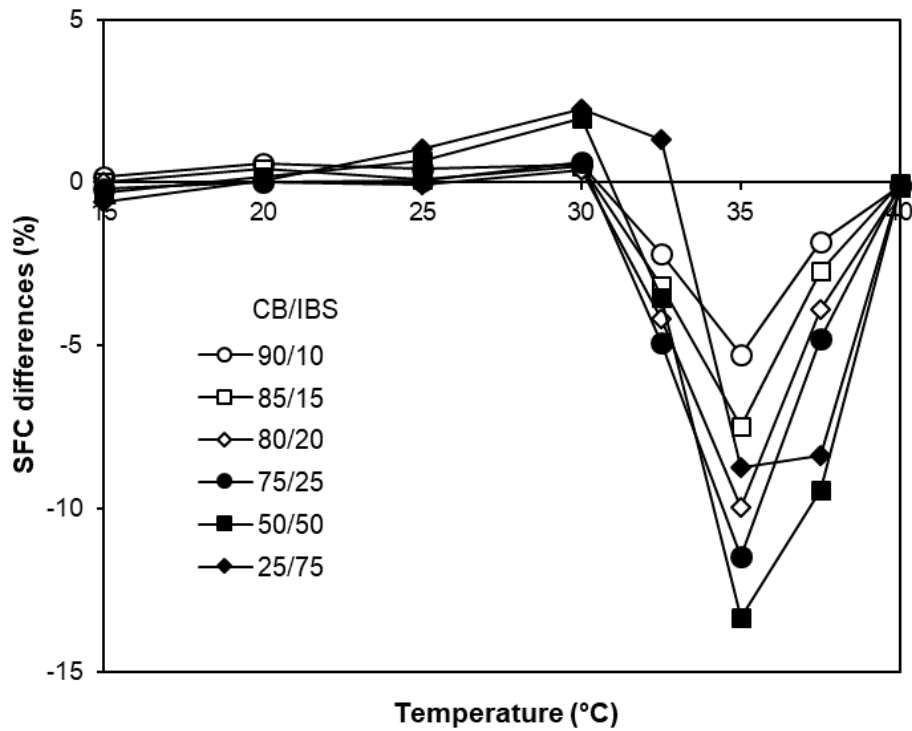
Iso-solid phase diagram ของไขมันผสม CB/IBS แสดงดังภาพที่ 19 พบว่าไขมันผสมเกิดปรากฏการณ์ monotectic แสดงถึงความเข้ากันได้ของไขมันผสม แต่จะมีความลาดเอียงของเส้นมากกว่า CB/IB ซึ่งอาจเป็นความไม่เข้ากันของไขมันผสมที่อุดมไปด้วย SOS กับ CB โดยอาจเกิดจากปริมาณของกรดสเตียริกของ IBS มีปริมาณที่แตกต่างจาก CB มากกว่า IB ทำให้ไม่สามารถผสมเข้ากันได้ดีมากนักเมื่อเทียบกับ CB/IB จึงทำให้ไขมันผสมอ่อนตัวลงในบางอัตราส่วนและในบางอุณหภูมิ โดยเมื่อดูจากภาพที่ 20 บ่งชี้ว่าที่อุณหภูมิ 35 °C ไขมันผสมทุกอัตราส่วนมีค่า % SFC difference มากที่สุด หรือแสดงถึงการเกิดปรากฏการณ์ eutectic (ความไม่เข้ากันของไขมัน) แต่การเกิดปรากฏการณ์ eutectic ที่อุณหภูมิ 35 °C นั้นเป็นสิ่งที่ดีเพราะทำให้ไขมันผสมอ่อนตัวลงที่อุณหภูมิร่างกาย ทำให้เมื่อบริโภคจะไม่เกิดลักษณะความเย็นในปาก แต่ทั้งนี้จากภาพที่ 21 แสดงปริมาณไขมันแข็งในรูปผลึกของ CB/IBS เพื่อแสดงความเข้ากันได้ของไขมันผสม พบว่าค่า SFC ของไขมันผสมที่อุณหภูมิโดยส่วนใหญ่แสดงอยู่บนเส้นตรงที่เชื่อมต่อกันกับ SFC ของไขมันเดิมแต่ละชนิด แม้ว่าอาจมีความลาดเอียงที่ลดลงเล็กน้อย (S. T. Beckett, 2008; Norberg, 2006) แต่ก็ยังบ่งชี้ว่าไขมันทั้ง 2 ชนิดสามารถเข้ากันได้



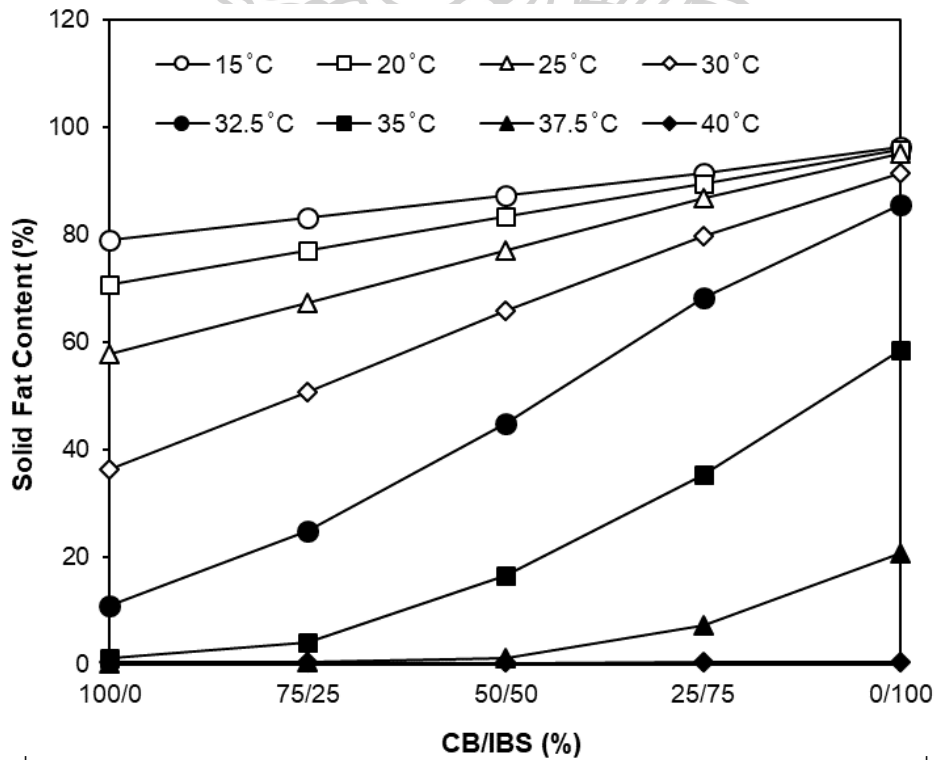
ภาพที่ 18 ปริมาณไขมันแข็งในรูปผลึกของเนยโกโก้ (CB) ผสมเนยอิลิปีสเตयरิน (IBS) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ



ภาพที่ 19 Iso-solid phase diagram ของเนยโกโก้ (CB) ผสมเนยอิลิปีสเตयरิน (IBS)



ภาพที่ 20 ความแตกต่างของปริมาณไขมันแข็งในรูปผลึกของเนยโกโก้ (CB) ผสมเนยอิลิปัสเตียร์ริน (IBS)

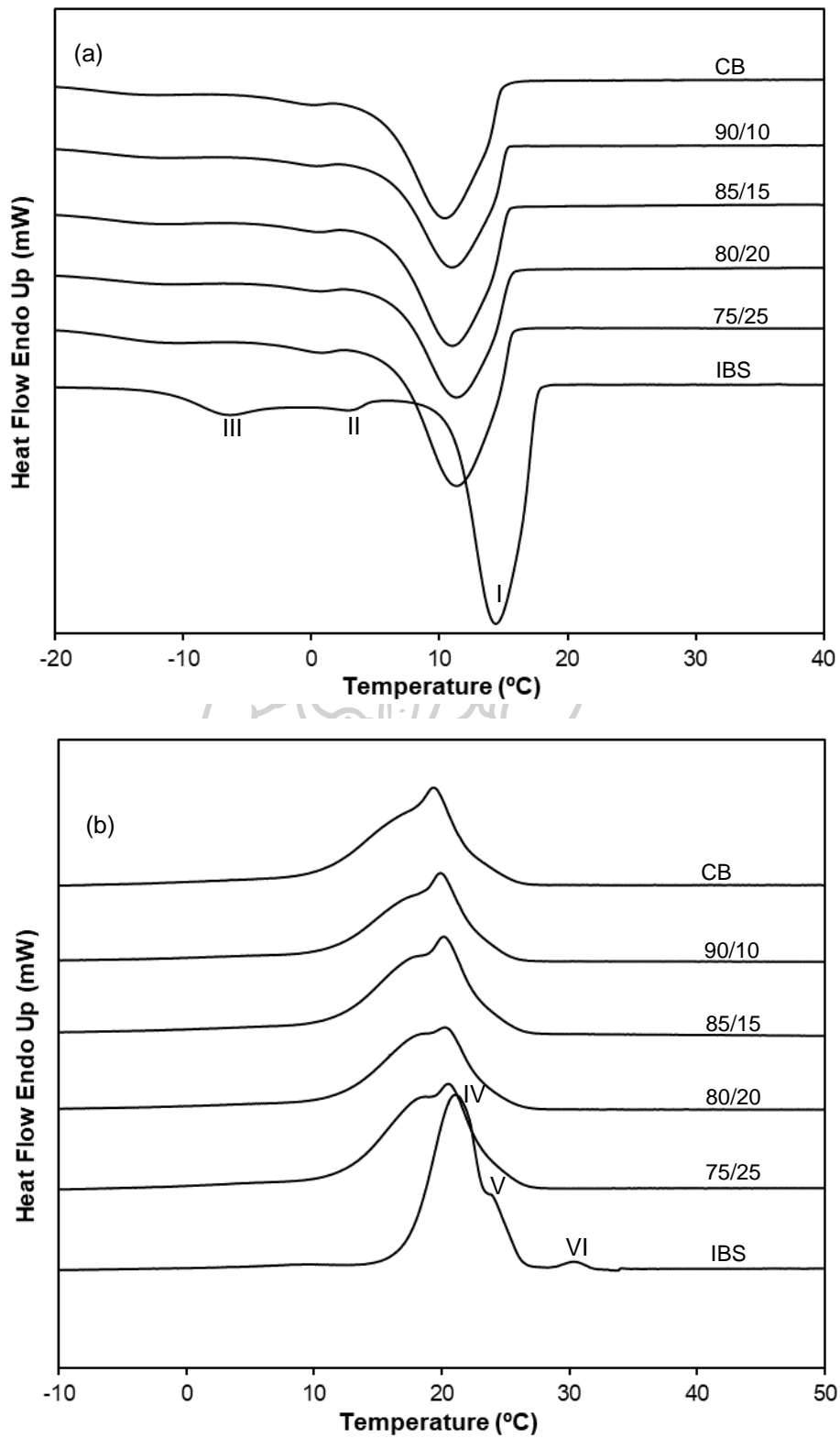


ภาพที่ 21 ปริมาณไขมันแข็งในรูปผลึกของเนยโกโก้ (CB) ผสมเนยอิลิปัสเตียร์ริน (IBS) เพื่อแสดงความเข้ากันได้ของไขมันผสม

#### 4.1.2.2 พฤติกรรมการตกผลึกและการหลอมเหลว

พฤติกรรมการตกผลึกของ CB, IBS และไขมันผสม CB/IBS แสดงดังภาพที่ 22a พบว่า IBS เริ่มเกิดการตกผลึกที่อุณหภูมิที่สูงกว่า CB หรือเกิดการตกผลึกที่เร็วกว่า (พฤติกรรมการตกผลึกของ CB ได้อธิบายรายละเอียดไว้ในหัวข้อ 4.1.1.2) โดยมีค่า  $T_{co}$  ที่  $19.25\text{ }^{\circ}\text{C}$  (ตารางที่ 8) มีพีคหลักของการตกผลึกที่อุณหภูมิ  $14.37\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $T_{pI}$ ) และมีพีคขนาดเล็กที่อุณหภูมิต่ำกว่าอีก 2 พีคที่อุณหภูมิ  $3.04\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $T_{pII}$ ) และ  $-6.65\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $T_{pIII}$ ) สำหรับไขมันผสม CB/IBS ทุกอัตราส่วนแสดงเทอร์โมแกรมการตกผลึกที่เหมือนกับ CB โดยมีพีคหลักที่อุณหภูมิ  $11.02$  ถึง  $11.31\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $T_{pI}$ ) เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ IBS จะทำให้ทั้งอุณหภูมิที่เริ่มเกิดการตกผลึกและพีคของการตกผลึกขยับไปยังอุณหภูมิที่สูงขึ้น ( $p \geq 0.05$ ) เนื่องจากมี TAG ชนิด SOS ในปริมาณที่มากขึ้น จึงทำให้เกิดการตกผลึกได้เร็วกว่า CB การเพิ่มปริมาณของ IBS ในไขมันผสมไม่ส่งผลต่อค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการตกผลึก (crystallization enthalpies:  $\Delta H_c$ ) ( $p \geq 0.05$ )

พฤติกรรมการหลอมเหลวของ CB, IBS และไขมันผสม CB/IBS แสดงดังภาพที่ 22b พบว่า IBS มีพีคของการหลอมเหลวที่ทับซ้อนกัน 2 พีค คือที่อุณหภูมิ  $21.08\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $T_{pIV}$ ) และ  $24.03\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $T_{pV}$ ) และมีพีคที่ขยับไปยังอุณหภูมิที่สูงอีก 1 พีค คือที่อุณหภูมิ  $30.34\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $T_{pVI}$ ) ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามี TAG ที่มีจุดหลอมเหลวสูงอยู่ในปริมาณมาก สำหรับไขมันผสม CB/IBS ที่เพิ่ม IBS ที่ 10 ถึง 25% มีผลต่อการหลอมเหลวของ CB เพียงเล็กน้อย (พฤติกรรมการหลอมเหลวของ CB ได้อธิบายรายละเอียดไว้ในหัวข้อ 4.1.1.2) เทอร์โมแกรมของการหลอมเหลวของไขมันผสมมีลักษณะที่เหมือนกับ CB กล่าวคือมีพีคการหลอมเหลวที่แหลมซึ่งเหมาะสำหรับนำมาผลิตช็อกโกแลตโดยจุดหลอมเหลวที่มีช่วงการหลอมเหลวที่แหลมจะช่วยทำให้ง่ายต่อกระบวนการควบคุมผลึก (tempering) (S. T. Beckett, 2008) พีคของการหลอมเหลวและอุณหภูมิที่ไขมันหลอมเหลวทั้งหมดจะขยับไปยังอุณหภูมิที่สูงขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ IBS ในไขมันผสม ( $p \geq 0.05$ ) และไม่ส่งผลต่อค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลว (melting enthalpies:  $\Delta H_m$ ) อย่างมีนัยสำคัญ ( $p \geq 0.05$ ) โดยเทอร์โมแกรมของทั้งการตกผลึกและการหลอมเหลวของ IBS มีลักษณะคล้ายกับงานวิจัยที่ได้รายงานก่อนหน้านี้ (Sonprasert et al., 2022)



ภาพที่ 22 เทอร์โมแกรมการตกผลึก (a) และเทอร์โมแกรมการหลอมเหลว (b) ของเนยโกโก้ (CB) ผสมเนยอิลิปัสเตียร์น (IBS) ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

ตารางที่ 8 พารามิเตอร์ DSC ของการตกผลึกและการหลอมเหลวของเนยโกโก้ (CB) ผสมเนยอิลีปัสเตียรีน (IBS) ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

Sample	Crystallization						Melting				
	T <sub>co</sub> (°C)	T <sub>pI</sub> (°C)	T <sub>pII</sub> (°C)	T <sub>pIII</sub> (°C)	ΔH <sub>c</sub> (J/g)	T <sub>pIV</sub> (°C)	T <sub>pV</sub> (°C)	T <sub>pVI</sub> (°C)	T <sub>mc</sub> (°C)	ΔH <sub>m</sub> (J/g)	
CB	16.42 ± 0.14 <sup>bc</sup>	10.43 ± 0.03 <sup>d</sup>			102.61 ± 1.13 <sup>b</sup>	19.43 ± 0.06 <sup>d</sup>			27.44 ± 0.26 <sup>c</sup>	105.48 ± 1.06 <sup>b</sup>	
90/10	16.21 ± 0.00 <sup>c</sup>	11.02 ± 0.04 <sup>c</sup>			103.11 ± 0.37 <sup>b</sup>	19.85 ± 0.04 <sup>c</sup>			27.58 ± 0.50 <sup>bc</sup>	104.68 ± 0.04 <sup>bc</sup>	
85/15	16.36 ± 0.06 <sup>bc</sup>	11.10 ± 0.17 <sup>bc</sup>			101.65 ± 0.11 <sup>b</sup>	20.17 ± 0.02 <sup>c</sup>			27.70 ± 0.27 <sup>bc</sup>	103.75 ± 0.84 <sup>c</sup>	
80/20	17.57 ± 0.82 <sup>abc</sup>	11.31 ± 0.03 <sup>b</sup>			102.05 ± 1.06 <sup>b</sup>	20.06 ± 0.28 <sup>c</sup>			28.34 ± 0.06 <sup>bc</sup>	104.38 ± 0.57 <sup>bc</sup>	
75/25	18.17 ± 1.52 <sup>ab</sup>	11.31 ± 0.11 <sup>b</sup>			102.34 ± 1.58 <sup>b</sup>	20.60 ± 0.18 <sup>b</sup>			28.43 ± 0.59 <sup>b</sup>	103.50 ± 0.32 <sup>c</sup>	
IBS	19.25 ± 0.21 <sup>a</sup>	14.37 ± 0.07 <sup>a</sup>	3.04 ± 0.07	-6.65 ± 0.00	112.18 ± 0.21 <sup>a</sup>	21.08 ± 0.01 <sup>a</sup>	24.03 ± 0.05	30.34 ± 0.07	32.46 ± 0.07 <sup>a</sup>	110.97 ± 0.06 <sup>a</sup>	

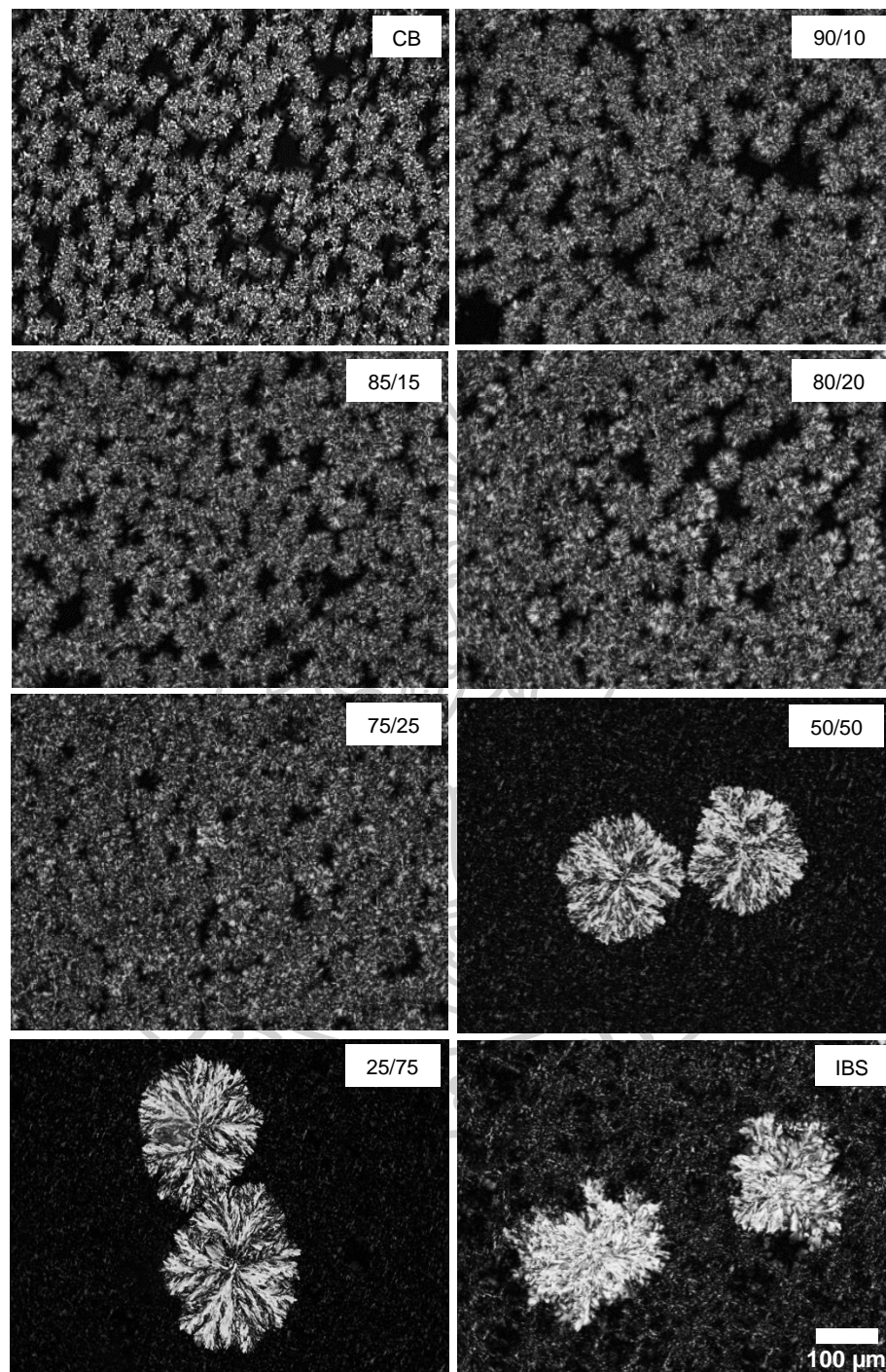
หมายเหตุ : T<sub>co</sub> : (crystallization onset temperature) อุณหภูมิที่เริ่มเกิดการตกผลึก, T<sub>p</sub> : อุณหภูมิที่แสดงค่าพีคของการตกผลึกและการหลอมเหลว, ΔH<sub>c</sub> : (crystallization enthalpies) ค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการตกผลึก, T<sub>mc</sub> : (melting completion temperature) อุณหภูมิที่หลอมเหลวจนหมด และ ΔH<sub>m</sub> : (melting enthalpies) ค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลว, ตัวอักษรที่ต่างกันโดยสิ้นเชิงกันแสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p < 0.05)

#### 4.1.2.3 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของผลึก

ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคผลึกของ CB, IBS และไขมันผสม หลังการตกผลึกที่อุณหภูมิ 22 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แสดงดังภาพที่ 23 พบว่า IBS แสดงผลึกแบบทรงกลมขนาดใหญ่กว่า CB (ลักษณะโครงสร้างผลึกของ CB ได้อธิบายรายละเอียดไว้ในหัวข้อที่ 4.1.1.3) และมีผลึกแบบเม็ด (granular) ขนาดเล็กกระจายอยู่โดยรอบ ขนาดของผลึก IBS เท่ากับ  $201 \pm 15 \mu\text{m}$  แสดงให้เห็นว่ามีโครงสร้างแบบ  $\beta$  โดยมีลักษณะโครงสร้างของผลึกสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sonprasert et al. (2022) ที่รายงานว่าขนาดผลึกของ IBS ( $93.3 \pm 9.3 \mu\text{m}$ ) มีขนาดใหญ่กว่า CB ( $29.5 \pm 5.4 \mu\text{m}$ ) ซึ่งแสดงโครงสร้างผลึกแบบ  $\beta$  สำหรับไขมันผสม CB/IBS นั้น เมื่อเติม IBS ที่ 10 ถึง 25% จะมีรูปร่างผลึกใกล้เคียงกับ CB มากที่สุด แม้ว่าจะมีขนาดที่ใหญ่กว่าก็ตาม ขนาดของผลึกจะใหญ่ขึ้นตามการเพิ่มปริมาณของ IBS โดยเพิ่มขึ้นจาก  $40 \pm 8 \mu\text{m}$  สำหรับอัตราส่วน 90/10 ไปเป็น  $195 \pm 13 \mu\text{m}$  สำหรับอัตราส่วน 25/75 เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณ TAG ที่มีจุดหลอมเหลวสูงมากกว่า (SOS) ซึ่งเป็นการเพิ่มอัตราการเกิดนิวเคลียสผลึก (nucleation) ของไขมันผสมและมีส่วนทำให้เกิดการเติบโตของผลึก (crystal growth) เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เริ่มเกิดการตกผลึกและอุณหภูมิของพิกหลัก (ตารางที่ 8) นำไปสู่ความเป็นผลึกที่สูงขึ้นและขนาดของผลึกที่ใหญ่ขึ้น นอกจากนี้ไขมันผสมยังมีความหนาแน่นของผลึกสูงกว่า CB ซึ่งแสดงให้เห็นว่า IBS นั้นสามารถเกิดการก่อตัวของผลึกได้อย่างรวดเร็วกว่า CB (Bahari & Akoh, 2018a)

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ไขมันผสมระหว่าง CB/IBS ที่มีปริมาณของ IBS 10 ถึง 25% นั้น มีศักยภาพที่จะสามารถนำมาใช้เป็น CBI ได้ เนื่องจากมีค่า SFC ที่อุณหภูมิ 15 ถึง 35 °C สูงกว่าของ CB แต่จะหลอมเหลวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิร่างกาย และยังมีพฤติกรรมการตกผลึกและการหลอมเหลวที่ใกล้เคียงกับ CB อย่างไรก็ตาม ตามกฎหมายของสหภาพยุโรปที่สามารถใช้ IBS เป็น CBI ในปริมาณที่สูงที่สุดที่ 5% w/w ของผลิตภัณฑ์สุดท้าย อัตราส่วนระหว่าง CB/IBS ที่สามารถใช้ได้เท่ากับ 90/10 และ 85/15 เท่านั้นที่จะเป็นไปตามข้อบังคับของสหภาพยุโรป ดังนั้นเพื่อที่จะสามารถใช้ IBS ในปริมาณที่สูงที่สุด จึงใช้ไขมันผสมที่อัตราส่วน 85/15 ในการศึกษาในส่วนต่อไปเทียบกับ CB รวมทั้งนำไปผลิตเป็นช็อกโกแลต และศึกษาสมบัติและพฤติกรรมการเกิดฝ้าขาวของช็อกโกแลตในระหว่างการเก็บรักษา

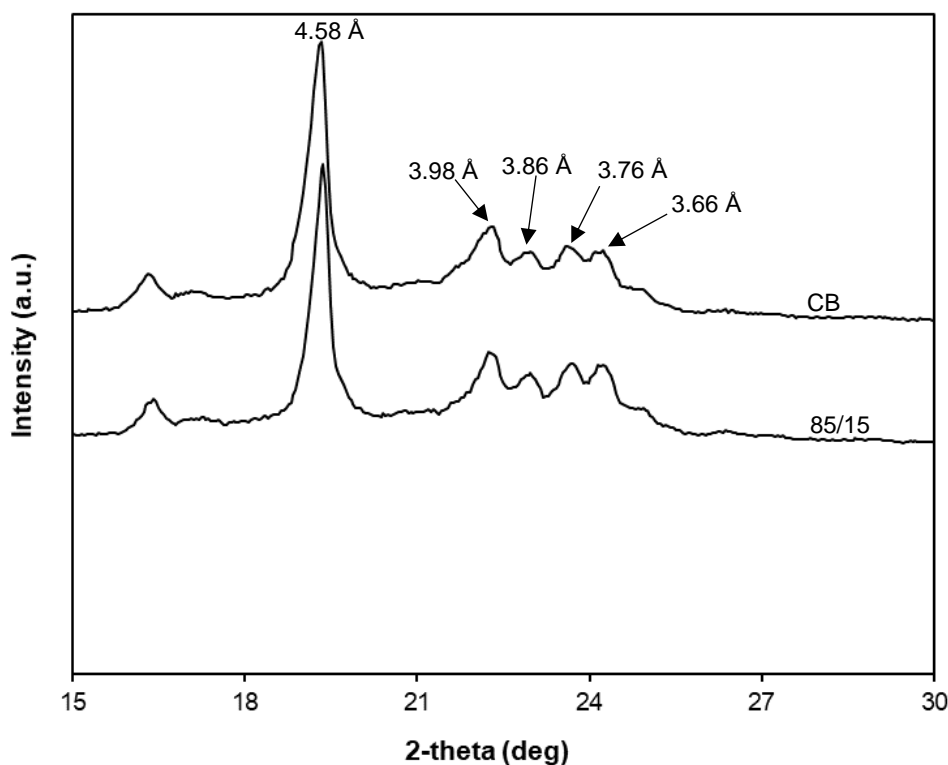




ภาพที่ 23 รูปร่างลักษณะของผลึกของเนยโกโก้ (CB) ผสมเนยอิลิปีสเตียรีน (IBS) ที่อัตราส่วนต่าง ๆ โดยตกผลึกที่อุณหภูมิ 22 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

#### 4.1.2.4 รูปแบบโครงสร้างผลึก

การศึกษาารูปแบบโครงสร้างของผลึก แสดงดังภาพที่ 24 โดยตกผลึกไขมันที่อุณหภูมิ 24 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง พบว่า CB และ ไขมันผสมระหว่าง CB/IBS ที่อัตราส่วน 85/15 แสดงพีคหลักของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่เด่นชัดที่สุดที่ตำแหน่ง 4.58 Å และมีพีคของการเลี้ยวเบนอีก 4 พีคย่อยคือ 3.98, 3.86, 3.76 และ 3.66 Å ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างผลึกแบบ  $\beta_2$  (แบบที่ V) (Loisel et al., 1998; Wille & Lutton, 1966) CB และไขมันผสมมี TAG ชนิด POP POS และ SOS เป็นหลัก โดย TAG ชนิด 1,3-disaturated แบบสมมาตรเหล่านี้มีแนวโน้มสูงที่จะตกผลึกเป็นรูปแบบ  $\beta$  ที่มีความเสถียรสูง (Buscato et al., 2018) ซึ่งจำเป็นสำหรับไขมันที่จะนำไปผลิตเป็นช็อกโกแลตเพื่อให้ช็อกโกแลตมีความแข็ง และสามารถต้านทานการเกิดฝ้าขาวบนผิวหน้าได้ จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าการผสม CB กับ IBS เข้าด้วยกัน จะไม่ส่งผลทำให้พฤติกรรมตกผลึกและการหลอมเหลวแตกต่างไปจากของ CB โดยเฉพาะในอัตราส่วน 85/15 (CB/IBS) บ่งชี้ให้เห็นว่าสามารถนำ IBS ไปใช้เป็น CBI ในการผลิตช็อกโกแลตทนความร้อนและต้านการเกิดฝ้าขาวได้



ภาพที่ 24 โครงสร้างผลึกของเนยโกโก้ (CB) และเนยโกโก้ผสมเนยอิลิปส์เตียรินที่อัตราส่วน CB85/IBS15 หลังการตกผลึกไขมันที่อุณหภูมิ 24 °C 48 ชั่วโมง

#### 4.1.2.5 การศึกษาองค์ประกอบกรดไขมัน

องค์ประกอบของกรดไขมันจะแสดงดังตารางที่ 9 พบว่าตัวอย่างไขมันมีองค์ประกอบกรดไขมันที่เหมือนกันทั้งหมดในทุกตัวอย่าง โดยเนยโกโก้มีกรดปาล์มติก (25.70 %), กรดสเตียริก (37.44 %) และกรดโอเลอิก (32.98 %) ในปริมาณสูง กรดไขมันทั้ง 3 ชนิดนี้จะมีสัดส่วนมากกว่า 90% ของไขมันทั้งหมด นอกจากนี้ยังมีกรดลิโนเลอิก (2.79 %) และกรดอะราคิติก (1.09 %) รองลงมาตามลำดับ ซึ่งมีชนิดและปริมาณขององค์ประกอบกรดไขมันที่เหมือนกับงานวิจัยที่ได้ศึกษามาก่อนหน้านี้ (Bootello et al., 2018; De Clercq et al., 2017; Lipp & Anklam, 1998; Sonwai et al., 2014) และปริมาณกรดไขมันของ IB ก็คล้ายกับงานวิจัยอื่น ๆ (Bahari & Akoh, 2018a; Bracco et al., 1970; Nesaretnam & Ali, 1992) จะเห็นได้ว่า IB มีกรดสเตียริกสูงกว่า CB และเมื่อนำมาผ่านกระบวนการตกผลึกแยกส่วน (fractionation) เพื่อต้องการไขมันแข็ง (stearin) ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งก็แสดงให้เห็นได้จากปริมาณของกรดสเตียริกของ IBS (53.47 %) ที่เพิ่มขึ้นอย่างมากจาก IB (45.30 %) อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) โดย IBS จะมีปริมาณของกรดสเตียริกมากที่สุดในทุกตัวอย่างไขมัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเป็นไขมันที่แข็งที่สุด รองลงมาเป็น IB ไขมันผสมที่อัตราส่วน 85/15 ของ CB/IBS (39.80 %) และ CB/IB (38.53 %) ตามลำดับ ซึ่งแปรผกผันกับกรดปาล์มติกที่มีปริมาณลดลงเมื่อไขมันมีความแข็งเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) ไขมันที่มีปริมาณกรดสเตียริกสูงมีความเกี่ยวข้องกับการต้านทานการเกิดฝ้าขาวของช็อกโกแลต เนื่องจากเมื่อใช้ไขมันแข็งหรือไขมันที่มีกรดสเตียริกสูงในการผลิตช็อกโกแลต จะไม่ทำให้เกิดการหลอมเหลวเมื่อช็อกโกแลตถูกจัดเก็บที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น เมื่อไขมันไม่ได้ถูกหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูงแล้วอุณหภูมิลดลงในภายหลัง จึงไม่เกิดการตกผลึกใหม่อีกครั้งซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดฝ้าขาว ดังนั้นจึงสามารถป้องกันการเกิดฝ้าขาวที่ผิวหน้าช็อกโกแลตได้ ไขมันที่มีคุณสมบัติและองค์ประกอบของ TAG และกรดไขมันที่คล้ายคลึงกันจะสามารถเข้ากันได้ดี (Kevin W. Smith, 2012) ซึ่งไขมันผสมระหว่าง CB/IB และ CB/IBS ก็มีองค์ประกอบกรดไขมันที่เหมือนกับ CB ดังนั้นจึงบ่งชี้ได้ว่าทั้ง IB และ IBS เข้ากันได้ดีกับ CB และสามารถนำ IB กับ IBS มาใช้เป็น CBE และ CBI ตามลำดับ เพื่อทดแทน CB บางส่วนในการผลิตเป็นช็อกโกแลตได้โดยไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของช็อกโกแลต

ตารางที่ 9 องค์ประกอบกรดไขมันของ CB, IB, IBS, CB/IB (85/15) และ CB/IBS (85/15)

Fatty acid	Fatty acid content (area %)				
	CB	IB	IBS	CB/IB (85/15)	CB/IBS (85/15)
Palmitic (C <sub>16</sub> )	25.70 ± 0.130 <sup>a</sup>	17.89 ± 0.082 <sup>d</sup>	10.61 ± 0.041 <sup>e</sup>	24.75 ± 0.227 <sup>b</sup>	23.30 ± 0.055 <sup>c</sup>
Stearic (C <sub>18</sub> )	37.44 ± 0.636 <sup>e</sup>	45.30 ± 0.109 <sup>b</sup>	53.47 ± 0.027 <sup>a</sup>	38.53 ± 0.249 <sup>d</sup>	39.80 ± 0.101 <sup>c</sup>
Oleic (C <sub>18:1</sub> )	32.98 ± 0.567 <sup>b</sup>	34.07 ± 0.080 <sup>a</sup>	33.28 ± 0.019 <sup>b</sup>	33.22 ± 0.069 <sup>b</sup>	33.21 ± 0.086 <sup>b</sup>
Linoleic (C <sub>18:2</sub> )	2.79 ± 0.012 <sup>a</sup>	0.76 ± 0.002 <sup>c</sup>	0.31 ± 0.008 <sup>d</sup>	2.33 ± 0.062 <sup>b</sup>	2.37 ± 0.002 <sup>b</sup>
Arachidic (C <sub>20</sub> )	1.09 ± 0.027 <sup>e</sup>	1.97 ± 0.031 <sup>b</sup>	2.33 ± 0.023 <sup>a</sup>	1.17 ± 0.026 <sup>d</sup>	1.31 ± 0.017 <sup>c</sup>

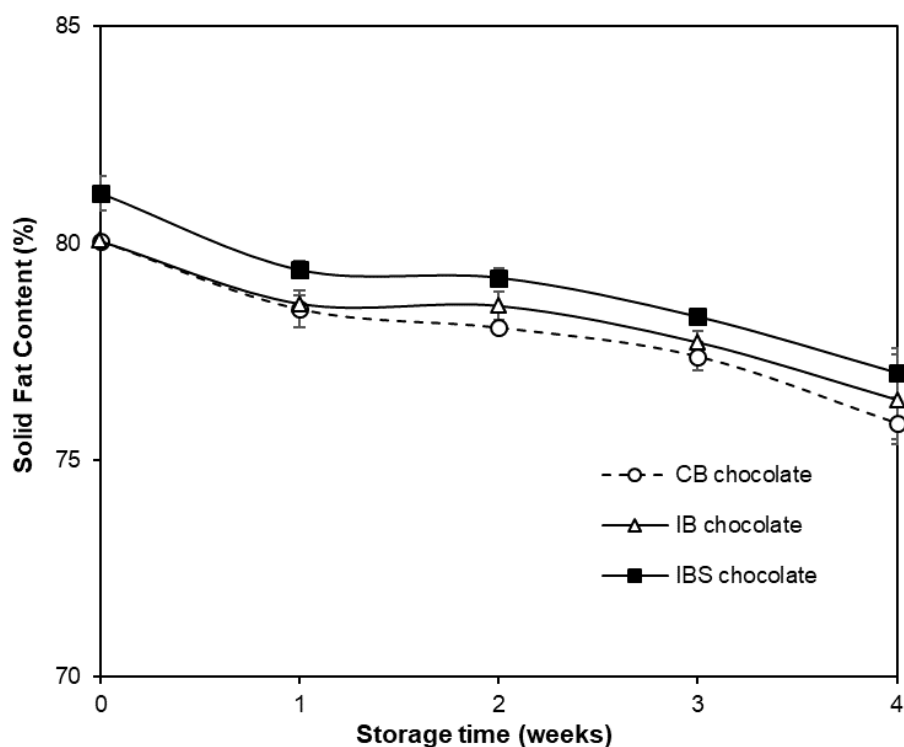
หมายเหตุ : ตัวอักษรที่ต่างกันแถวเดียวกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p < 0.05)



## 4.2 การศึกษาคุณสมบัติการต้านทานความร้อนและพฤติกรรมการเกิดฝ้าขาวบนผิวของช็อกโกแลต

### 4.2.1 การศึกษาปริมาณไขมันแข็งในรูปผลึกของช็อกโกแลต

การศึกษาระดับปริมาณไขมันแข็งในรูปผลึกของช็อกโกแลตได้ผลดังแสดงในภาพที่ 25 และตารางที่ 10 โดยเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 °C พบว่า สัปดาห์ที่ 0 CB chocolate, IB chocolate และ IBS chocolate มีค่า SFC เท่ากับ 80.05 %, 80.12 % และ 81.15 % ตามลำดับ และที่สัปดาห์ที่ 4 CB chocolate, IB chocolate และ IBS chocolate มีค่า SFC เท่ากับ 75.85 %, 76.40 % และ 77.02 % ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า IBS chocolate มีค่า SFC ที่สูงที่สุดตลอดการเก็บรักษาทั้ง 4 สัปดาห์ (ภาพที่ 25) เนื่องจาก IBS มีองค์ประกอบของ TAG ที่มีจุดหลอมเหลวสูงอยู่ในปริมาณมาก (SOS สูง) รองลงมาคือ IB chocolate และ CB chocolate สอดคล้องกับงานวิจัยของ Pajin and Jovanovic (2005) ที่รายงานว่าปริมาณไขมันแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อเติมไขมันนมที่ผ่านการตกผลึกแยกส่วนเพื่อให้ได้ไขมันนมที่มีจุดหลอมเหลวที่สูงขึ้นลงในช็อกโกแลต แต่ทั้งนี้ก็พบว่าเมื่อทำการเก็บรักษาผ่านไปจะเห็นได้ว่า SFC มีค่าลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องจากการสลับอุณหภูมิในระหว่างการเก็บรักษา เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเก็บรักษาที่ 29 °C ทำให้ช็อกโกแลตเกิดการหลอมเหลว และเมื่อลดอุณหภูมิลงมาที่ 25 °C ซึ่งไม่ใช่อุณหภูมิที่ต่ำมากนัก จึงต้องใช้เวลาในการตกผลึกใหม่ แต่เมื่อครบเวลาแล้วเปลี่ยนกลับไป 29 °C อีกครั้ง ทำให้ยังเกิดการตกผลึกไม่สมบูรณ์ ผลึกก็หลอมเหลวใหม่อีกครั้ง ดังนั้นจึงอาจเป็นสาเหตุให้ค่า SFC ลดลง นอกจากนี้อาจมาจากระบวนการผลิตช็อกโกแลตในขั้นตอนการแช่ตัวช็อกโกแลตที่ 15 °C แต่นำมาจัดเก็บที่ 25 °C จึงทำให้ SFC มีค่าลดลง



ภาพที่ 25 ปริมาณไขมันแข็งในรูปผลึกของช็อกโกแลตที่ทำการเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์

ตารางที่ 10 ปริมาณไขมันแข็งในรูปผลึกของช็อกโกแลต ในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 4 สัปดาห์

Week	Solid fat content (%)		
	CB chocolate	IB chocolate	IBS chocolate
0	80.05 ± 0.10 <sup>Ba</sup>	80.05 ± 0.12 <sup>Ba</sup>	81.15 ± 0.41 <sup>Aa</sup>
1	78.48 ± 0.43 <sup>Bb</sup>	78.61 ± 0.19 <sup>Bb</sup>	79.39 ± 0.19 <sup>Ab</sup>
2	78.05 ± 0.10 <sup>Cb</sup>	78.56 ± 0.32 <sup>Bb</sup>	79.21 ± 0.21 <sup>Ab</sup>
3	77.39 ± 0.33 <sup>Bc</sup>	77.72 ± 0.24 <sup>Bb</sup>	78.31 ± 0.12 <sup>Ac</sup>
4	75.85 ± 0.37 <sup>Ad</sup>	76.40 ± 1.04 <sup>Ac</sup>	77.02 ± 0.57 <sup>Ad</sup>

หมายเหตุ : ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในแถวเดียวกันแสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) และตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ )

#### 4.2.2 การศึกษาคุณสมบัติด้านความแข็งของช็อกโกแลต

ความแข็งเป็นดรชนีที่มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ความแน่น (firmness) ของช็อกโกแลต ซึ่งจากการทดลองได้เก็บรักษาที่ 25 °C จากตารางที่ 11 พบว่า สัปดาห์ที่ 0 ตัวอย่าง IBS chocolate ( $1587.6 \pm 60$  g) มีค่าความแข็งที่สูงกว่า CB chocolate ( $1520.6 \pm 59$  g) เล็กน้อย ( $p \geq 0.05$ ) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Aumpai et al. (2022) รายงานว่า chocolate ที่ผลิตจาก CBE ที่ผสมไขมันระหว่าง IB/PMF (75/25) ( $1851 \pm 60$  g) มีค่าความแข็งมากกว่า CB chocolate ( $1768 \pm 59$  g) ( $p \geq 0.05$ ) เล็กน้อย ในงานวิจัยนี้ที่แสดงถึงค่าความแข็งของ IBS chocolate และ CB chocolate ที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญอาจกล่าวได้ว่าคุณลักษณะด้านคุณภาพของช็อกโกแลต จะไม่ได้รับผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญจากการเติม IBS เพียง 5% w/w ลงในผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลต ในขณะที่ IB chocolate ( $1402.4 \pm 54$  g) มีค่าความแข็งน้อยที่สุด แต่ทั้งนี้ก็มีค่าที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับ CB chocolate ซึ่งได้มีงานวิจัยพบว่าไขมันที่นำมาใช้เป็นไขมันทดแทนเนยโกโก้ (cocoa butter alternatives) มักจะมีค่าความแข็งของช็อกโกแลตที่ลดลง ซึ่งอาจเนื่องจากผลของปรากฏการณ์ยูเทคติก (eutectic effect) ที่ไขมันผสมอาจจะเข้ากันไม่ได้ดี จึงทำให้ช็อกโกแลตอ่อนตัวลง (Osborn & Akoh, 2002; Zarringhalami et al., 2010) และยังพบว่าเมื่อเก็บรักษาที่ 4 สัปดาห์ตัวอย่างช็อกโกแลตทั้งหมดจะมีความแข็งเพิ่มมากขึ้น โดยที่ IBS chocolate ( $2426.8 \pm 70$  g) จะมีค่าความแข็งมากที่สุด สอดคล้องจากภาพที่ 29 ที่แสดงพฤติกรรมการหลอมเหลวของช็อกโกแลต ซึ่งจะพบว่าเมื่อเวลาผ่านไปพีคของการหลอมเหลวจะขยับไปยังอุณหภูมิที่สูงขึ้น บ่งบอกถึงการเปลี่ยนโครงสร้างจากแบบ V ไปเป็น VI ซึ่งโครงสร้างแบบ VI ทำให้ขนาดผลึกใหญ่ขึ้น มีความหนาแน่นมากขึ้น จึงมีค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้น และจะเห็นได้ว่า IBS chocolate มีค่า SFC มากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับค่าความแข็งของ IBS chocolate ที่มีค่ามากที่สุดเช่นกัน เนื่องจาก IBS มีปริมาณของ SOS หรือกรดสเตียริกสูงที่สุด จึงทำให้ช็อกโกแลตมีค่า SFC, ค่าความแข็งมากที่สุด สามารถทนต่อความร้อนได้มากที่สุด

ตารางที่ 11 ความแข็งของช็อกโกแลต (hardness)

Week	Hardness (g)		
	CB chocolate	IB chocolate	IBS chocolate
0	1520.6 ± 59 <sup>ab</sup>	1402.4 ± 54 <sup>b</sup>	1587.6 ± 60 <sup>a</sup>
4	2017.0 ± 60 <sup>b</sup>	2314.8 ± 59 <sup>a</sup>	2426.8 ± 70 <sup>a</sup>

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละแถวแสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ )

#### 4.2.3 การศึกษาการต้านทานอุณหภูมิสูงโดยการวัดค่าดัชนีการคงรูปร่างของช็อกโกแลต

ค่าดัชนีการคงรูปร่าง หรือ shape retention index (SRI) เป็นตัวบ่งชี้ระดับมหภาค (macroscopic) เพื่อบ่งชี้ความสามารถในการคงรูปของช็อกโกแลตที่อุณหภูมิ 40 °C โดยยิ่ง % SRI เข้าใกล้ 100 แสดงว่าช็อกโกแลตนั้นมีการคงรูปที่สมบูรณ์ไม่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการเก็บที่อุณหภูมิสูง และหากใกล้ 0 ก็แสดงว่าช็อกโกแลตไม่มีความแตกต่างจากช็อกโกแลตสูตรควบคุม (CB chocolate) หรือเกิดการอ่อนตัว (Best et al., 2005) โดยทั่วไปช็อกโกแลตจะมีความนิ่มที่อุณหภูมิ 28 °C และจะสูญเสียการคงรูปร่างที่อุณหภูมิสูงกว่า 32 °C ผลการทดลองดังแสดงจากตารางที่ 12 พบว่า IBS chocolate (SRI = 64.91 ± 4.66%) มีการคงรูปร่างได้ดีกว่า IB chocolate (SRI = 27.40 ± 8.48%) เมื่อเทียบกับช็อกโกแลตสูตรควบคุมหรือ CB chocolate (SRI = 0 ± 0.00%) อาจเป็นเพราะการเพิ่ม IBS ช่วยให้โครงสร้างของช็อกโกแลตแข็งแรงขึ้นมากกว่า IB และ CB นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการกักเก็บไขมันที่หลอมเหลวไว้ภายในโครงสร้าง (Lillah et al., 2017) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jun Jin et al. (2019) ที่รายงานว่าค่า SRI ของดาร์คช็อกโกแลตเพิ่มขึ้นอย่างมาก ด้วยการเติมไขมันที่อุดมไปด้วย SOS และจากภาพที่ 26 แสดงถึงความคงรูปร่างของช็อกโกแลต จะเห็นได้ว่า CB chocolate นั้นมีการแผ่ของขึ้นช็อกโกแลตกว้างออกมากที่สุดหรือกล่าวได้ว่ามีการคงรูปร่างน้อยที่สุด ในขณะที่ IBS chocolate มีความกว้างของขึ้นช็อกโกแลตน้อยที่สุดซึ่งก็กล่าวได้ว่ามีความคงรูปร่างมากที่สุด และเมื่อทิ้งไว้ให้เย็นตัวลงยังพบว่า CB chocolate มีความนิ่มไม่แข็งตัว ในขณะที่ IB chocolate มีความแข็งตัว และ IBS chocolate มีความแข็งตัวมากที่สุด ซึ่งทั้งนี้ค่า SRI ไม่ได้แสดงถึงความสัมพันธ์เชิงบวกกับความแข็ง (hardness) เสมอไป โดยงานวิจัยของ Wan Aidah et al. (2014) พบว่าช็อกโกแลตนมที่มีการเติมอิมัลซิไฟเออร์มีความนิ่มที่อุณหภูมิ 40



°C แต่รูปร่างยังคงไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นช็อกโกแลตจึงสามารถคงรูปร่างไว้ได้ในสภาพอากาศร้อนแต่จะหลอมเหลวได้ง่ายเมื่ออยู่ในปากและไม่เกิดความรู้สึกเป็นไข

ตารางที่ 12 ดรรชนีการคงรูปร่างของช็อกโกแลต (Shape retention index: SRI)

Chocolate	% SRI
CB chocolate	0.00 ± 0.00 <sup>c</sup>
IB chocolate	27.40 ± 8.48 <sup>b</sup>
IBS chocolate	64.91 ± 4.66 <sup>a</sup>

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่ต่างกันในกลุ่มเดียวกันแสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ )

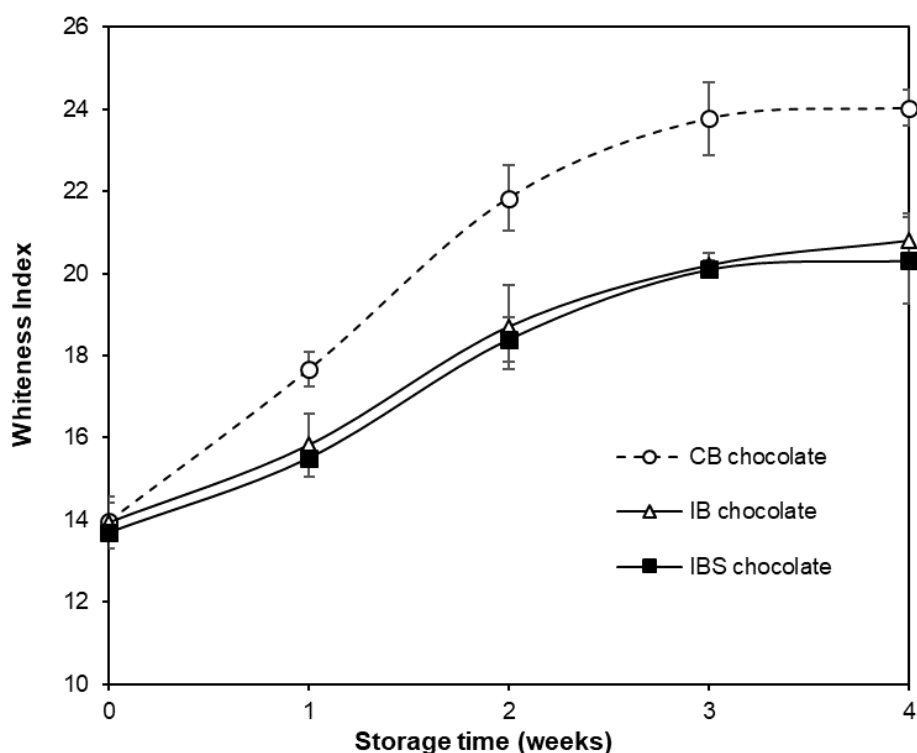


ภาพที่ 26 ความคงรูปร่างของช็อกโกแลตทั้งก่อนและหลังการทดลองวัดค่าดรรชนีการคงรูป (SRI)

#### 4.2.4 การศึกษาพฤติกรรมการเกิดฝ้าขาวของช็อกโกแลต

การเกิดฝ้าขาวเกี่ยวข้องกับการสูญเสียความมันวาว ความเรียบเนียน และการเปลี่ยนแปลงสีที่ไม่ต้องการหรือไม่พึงประสงค์บนผิวหน้าของช็อกโกแลต ซึ่งอาจส่งผลเสียต่อการบริโภค (Nirupam Biswas et al., 2017) การศึกษาพฤติกรรมการเกิดฝ้าขาวสามารถดูจากค่าดัชนีความขาว หรือ whiteness index (WI) ที่วิเคราะห์โดยเครื่องวัดสี ซึ่งค่า WI มีความสัมพันธ์กับการเกิดฝ้าขาว และค่าจะเพิ่มขึ้นตามการเกิดฝ้าขาวที่เพิ่มขึ้นที่ผิวหน้า การเก็บรักษาช็อกโกแลตที่อุณหภูมิที่ 25 °C และ 29 °C ได้ผลการทดลองดังแสดงดังภาพที่ 27 พบว่าเมื่อเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 3 สัปดาห์ตัวอย่าง CB chocolate มีค่า WI เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมากกว่าช็อกโกแลตอีก 2 ตัวอย่าง โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 17.66 ในสัปดาห์ที่ 1 ไปจนถึง 23.77 ในสัปดาห์ที่ 3 (ตารางที่ 13) ซึ่งบ่งบอกถึงการก่อตัวของฝ้าขาวอย่างรวดเร็วในผลิตภัณฑ์ก่อนจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยในสัปดาห์ที่ 4 (24.03) ในขณะที่ IB chocolate มีค่า WI จากสัปดาห์ที่ 1 ถึง 3 เท่ากับ 15.82 - 20.19 และ IBS chocolate มีค่า WI เท่ากับ 15.51 - 20.09 และเมื่อเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์ ก็ยังพบว่า IBS chocolate มีค่า WI น้อยที่สุด (20.31) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า IBS chocolate มีความเสถียรในการต้านทานการเกิดฝ้าขาวที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับ IB และ CB chocolate เนื่องจาก IBS อุดมไปด้วย TAG ชนิด SOS มีกรดสเตียริกในปริมาณที่มากที่สุด (ตารางที่ 9) จากงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่าการผสมหรือการเติมไขมันที่อุดมไปด้วย SOS หรือไขมันที่มีจุดหลอมเหลวสูงลงในช็อกโกแลตจะทำให้เพิ่มปริมาณไขมันที่เป็นของแข็งทำให้ได้ช็อกโกแลตที่ทนความร้อน (heat resistance chocolate) ซึ่งช่วยยับยั้งหรือชะลอการเกิดฝ้าขาว (fat bloom) ได้ (Buscato et al., 2018; Jeyarani & Reddy, 1999; Maheshwari & Reddy, 2005) และกล่าวได้ว่าช็อกโกแลตที่สามารถต้านทานการเกิดฝ้าขาวได้ดีเนื่องมาจากความเข้ากันได้ดีกับ CB (ภาพที่ 12 และ 19) (Torbica et al., 2014) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Md Ali et al. (1998) ได้เติม IB ลงใน dark chocolate shell ซึ่งช่วยลดการเคลื่อนย้ายของไขมันและเพิ่มความต้านทานการเกิดฝ้าขาวของช็อกโกแลต ในทำนองเดียวกับงานวิจัยของ Bahari and Akoh (2018b) พบว่า CB chocolate เกิดฝ้าขาวเมื่อทำการเก็บรักษาเป็นเวลา 18 วัน ในขณะที่ IB chocolate จะเกิดฝ้าขาวได้ช้ากว่า และมีค่า WI น้อยกว่า โดยเกิดฝ้าขาวเมื่อเวลาผ่านไป 30 วัน และเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งมีค่า WI ใกล้เคียงกับ CB chocolate เมื่อผ่านการเก็บรักษาเป็นเวลา 52 วัน เนื่องจาก IB มีปริมาณของกรดสเตียริกที่สูงกว่า CB ดังนั้นช็อกโกแลตที่ผลิตจาก IB จะมีจุดหลอมเหลวที่สูงกว่าและจะชะลอการเกิดฝ้าขาวได้ดีกว่า CB chocolate และยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jun Jin et al. (2019) ที่ได้ศึกษาการปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อน

และการเกิดฝ้าขาวของดาร์คช็อกโกแลตโดยการเติม MKF พบว่า CB chocolate แสดงค่า WI ที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนตั้งแต่เริ่มต้นหรือวันที่ 0 จนถึง 15 วัน ในขณะที่ช็อกโกแลตที่เติม mango kernel fat-third stearin (MKF-TS) ซึ่งเป็นไขมันที่อุดมไปด้วย SOS ที่สามารถนำมาใช้เป็น CBI ได้โดยการกำจัด TAG ชนิดไม่อิ่มตัว 2 ตำแหน่ง และ 3 ตำแหน่ง (di-unsaturated TAG, tri-unsaturated TAG) และ ไดเอซิลกลีเซอรอล (DAG) เป็นส่วนใหญ่ใน MKF ผ่านการตกผลึกแยกส่วนแบบหลายขั้นตอน มีค่า WI ที่ต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่า WI จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยหลังจากผ่านไป 45 วัน ซึ่งบ่งชี้ได้ว่ามีความเสถียรในการต้านการเกิดฝ้าขาวได้มากกว่า CB chocolate นอกจากนี้ได้แสดงภาพถ่ายของช็อกโกแลตซึ่งมีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมการเกิดฝ้าขาวตลอดการเก็บรักษา 4 สัปดาห์ ดังภาพที่ 28 พบว่า CB chocolate มีการเกิดฝ้าขาวบนผิวหน้ามากที่สุด รองลงมาคือ IB chocolate และ IBS chocolate มีการเกิดฝ้าขาวน้อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับค่าดรชนีความขาวที่ได้จากการทดลอง



ภาพที่ 27 ดรรชนีความขาว (whiteness index) ของช็อกโกแลตที่เก็บรักษาเป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์

ตารางที่ 13 ค่าดัชนีความขาว (whiteness index) ของช็อกโกแลตที่เก็บรักษาเป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์

Week	WI		
	CB chocolate	IB chocolate	IBS chocolate
0	13.97 ± 0.46 <sup>Ad</sup>	13.93 ± 0.63 <sup>Ad</sup>	13.70 ± 0.04 <sup>Ad</sup>
1	17.66 ± 0.42 <sup>Ac</sup>	15.82 ± 0.75 <sup>Bc</sup>	15.51 ± 0.03 <sup>Bc</sup>
2	21.84 ± 0.80 <sup>Ab</sup>	18.70 ± 1.02 <sup>Bb</sup>	18.40 ± 0.54 <sup>Bb</sup>
3	23.77 ± 0.90 <sup>Aa</sup>	20.19 ± 0.30 <sup>Ba</sup>	20.09 ± 0.21 <sup>Ba</sup>
4	24.03 ± 0.43 <sup>Aa</sup>	20.79 ± 0.69 <sup>Ba</sup>	20.31 ± 1.05 <sup>Ba</sup>

หมายเหตุ : ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันแถวเดียวกันแสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) และ ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันคอลัมน์เดียวกันแสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ )



สัปดาห์ที่ 2



สัปดาห์ที่ 3



สัปดาห์ที่ 4

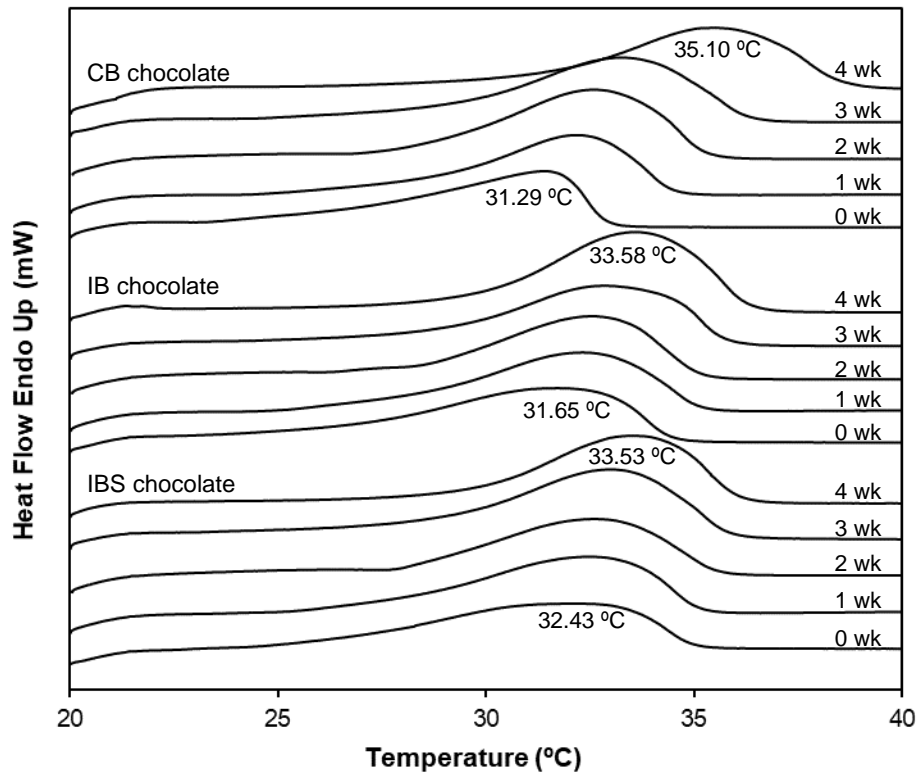


ภาพที่ 28 พฤติกรรมการเกิดฝ้าขาวของซ็อกโกแลตที่เก็บรักษาเป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์

#### 4.2.5 การศึกษาพฤติกรรมการหลอมเหลวของช็อกโกแลต

การศึกษาพฤติกรรมการหลอมเหลวของช็อกโกแลตที่เก็บรักษาเป็นเวลา 4 สัปดาห์ โดยใช้เครื่อง DSC ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการหลอมเหลวของช็อกโกแลต โดย DSC สามารถบอกได้ถึง การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ พลังงานความร้อน (Enthalpy) ที่ใช้ในการหลอมเหลวและการตกผลึก และยังสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผลึกไขมัน (Q. Jin et al., 2008) การเกิดฝ้าขาวในช็อกโกแลตมีอิทธิพลอย่างมากต่อพฤติกรรมการหลอมเหลวของช็อกโกแลต เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างของผลึกไขมัน โดยอุณหภูมิในการหลอมเหลวโครงสร้างแบบ  $\beta_1'$  (แบบ IV),  $\beta_2$  (แบบ V) และ  $\beta_1$  (แบบ VI) อยู่ที่ประมาณ 28.7 °C, 32.4 °C และ 35.5 °C ตามลำดับ (Emmanuel Ohene Afoakwa et al., 2009a, 2009b) จากผลการทดลองดังแสดงจากภาพที่ 29 และตารางที่ 14 พบว่า CB chocolate, IB chocolate และ IBS chocolate ในสัปดาห์ที่ 0 มีพีคของการหลอมเหลวที่ 31.29 °C, 31.65 °C และ 32.43 °C ตามลำดับ โดย IBS chocolate มีค่า  $T_{on}$ ,  $T_{peak}$  และ  $T_{mc}$  ที่สูงกว่า IB chocolate และ CB chocolate อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jun Jin et al. (2019) ที่แสดงให้เห็นว่าช็อกโกแลตที่ผลิตจากไขมันที่อุดมด้วย SOS นั้นมีค่า  $T_{on}$  และ  $T_{peak}$  สูงกว่า CB chocolate และแสดงให้เห็นว่า TAG ที่มีจุดหลอมเหลวสูง (SOS) มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มความต้านทานความร้อน จากอุณหภูมิในการหลอมเหลวของไขมันทั้ง 3 ตัวอย่างแสดงให้เห็นว่าการตกผลึกในโครงสร้างแบบ  $\beta_2$  เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาผ่านไปพบว่าตัวอย่างทั้งหมดมีค่า  $T_{on}$ ,  $T_{peak}$  และ  $T_{mc}$  ชยับไปทางอุณหภูมิที่สูงขึ้น และค่า  $\Delta H$  ก็เพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาในการเก็บรักษา ซึ่งบ่งชี้ถึงการเปลี่ยนโครงสร้างไปสู่โครงสร้างผลึกที่มีความเสถียรมากยิ่งขึ้น โดยที่สัปดาห์ที่ 4 CB chocolate มีพีคการหลอมเหลวที่ 35.10 °C ซึ่งบ่งชี้ได้ว่าไขมันเปลี่ยนโครงสร้างไปยังโครงสร้างแบบ VI สอดคล้องกับการเกิดฝ้าขาวของช็อกโกแลต โดยเมื่อช็อกโกแลตมีจุดหลอมเหลวประมาณ 34 - 35 °C ก็แสดงได้ว่าไขมันเปลี่ยนจากโครงสร้างแบบ V ไปเป็น VI จึงทำให้เกิดฝ้าขาวบนผิวหน้าช็อกโกแลตขึ้น ซึ่งการเกิดฝ้าขาวของไขมันเกิดขึ้นได้เมื่อ CB เกิดการหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูงทำให้ CB เคลื่อนที่มายังผิวหน้าของช็อกโกแลตและเกิดการตกผลึกอีกครั้งเมื่ออุณหภูมิลดลง ทำให้เกิดทั้งผลึกที่มีความเสถียรและไม่มีเสถียรปะปนผสมกัน ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนของโครงสร้างจากผลึกที่ไม่เสถียร (แบบ V) พัฒนาไปสู่โครงสร้างผลึกที่มีความเสถียรมากขึ้น (แบบ VI) ผลึกจึงมีขนาดใหญ่ขึ้น และเมื่อตกกระทบกับแสงจึงเกิดการกระเจิงของแสง ทำให้เรามองเห็นเป็นฝ้าขาวที่ผิวของช็อกโกแลต ในขณะที่ IB chocolate และ IBS chocolate มีพีคของการหลอมเหลวที่สัปดาห์ที่ 4 อยู่

ที่ 33.58 °C และ 33.53 °C ตามลำดับ ซึ่งมีการเปลี่ยนโครงสร้างของไขมันช้ากว่า CB chocolate อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) ดังนั้นจึงสามารถต้านทานหรือชะลอการเกิดฝ้าขาวได้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Aumpai et al. (2022) พบว่า CB chocolate และ CBE chocolate ที่ผลิตจาก IB/PMF (75/25) มีพีคของการหลอมเหลวเริ่มต้นที่ 31.9 °C และ 32.2 °C ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าไขมันตกผลึกในโครงสร้างแบบ  $\beta_2$  และเมื่อระยะเวลาผ่านไปพีคของการหลอมเหลวก็จะขยับไปยังอุณหภูมิที่สูงขึ้น และเมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 4 สัปดาห์ พบว่าพีคของการหลอมเหลวของ CB chocolate และ CBE chocolate เท่ากับ 34.6 °C และ 34.4 °C ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างของไขมันไปเป็น  $\beta_1$  โดย CBE chocolate มีอุณหภูมิการหลอมเหลวที่ต่ำกว่า การตกผลึกของไขมันที่แสดงจากเทอร์โมแกรมของ DSC พบว่าเมื่อปริมาณของ IBS ในไขมันผสมเพิ่มขึ้น (ปริมาณของ SOS ก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน) ทำให้เริ่มเกิดการตกผลึกที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น (ภาพที่ 22a และตารางที่ 8) เช่นเดียวกันกับเฟสไขมันใน IBS chocolate จะเริ่มตกผลึกที่อุณหภูมิที่สูงกว่าด้วยอัตราการเกิดนิวเคลียสที่สูงกว่า CB chocolate นำไปสู่การจัดเรียงตัวที่แน่นชิดกันยิ่งขึ้นภายใน (Tran et al., 2015) จึงทำให้โครงข่ายผลึกถูกจำกัด (Delbaere et al., 2016) การเติบโตของผลึกจึงช้าลง (Birkett, 2009) และการเคลื่อนย้ายของไขมันถูกขัดขวาง (G. R. Ziegler et al., 2004) ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนเฟสโครงสร้างจากแบบ V ไปเป็น VI ได้ช้าลง ซึ่งช่วยชะลอการเกิดฝ้าขาวได้ (ทำนองเดียวกันกับ IB chocolate ที่มีอุณหภูมิการตกผลึกสูงกว่า CB chocolate เช่นกัน) โดยจากผลการทดลองทั้งค่า WI และพฤติกรรมการหลอมเหลวที่วัดโดยเครื่อง DSC สามารถบ่งชี้ได้ว่าการเติม IB และ IBS ที่ 5% w/w ของผลิตภัณฑ์สุดท้ายจะเพิ่มความเร็วในการต้านทานการเกิดฝ้าขาวของช็อกโกแลต โดยที่ IBS chocolate มีความเสถียรต่อความร้อนและต้านทานการเกิดฝ้าขาวได้มากที่สุด



ภาพที่ 29 พฤติกรรมการหลอมเหลวของช็อกโกแลตที่เก็บรักษาเป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์





ตารางที่ 14 อุณหภูมิการหลอมเหลวและค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลว (Enthalpy) ของช็อกโกแลตที่เก็บรักษาเป็น

ระยะเวลา 4 สัปดาห์

week	T <sub>on</sub> (°C)			T <sub>peak</sub> (°C)			T <sub>mc</sub> (°C)			ΔH (J/g)		
	CB	IBS	IB	CB	IBS	IB	CB	IBS	IB	CB	IBS	IB
0	23.60±0.47 <sup>Cc</sup>	24.68±0.66 <sup>Be</sup>	24.77±0.11 <sup>Ae</sup>	31.29±0.13 <sup>Cc</sup>	31.65±0.16 <sup>Be</sup>	32.43±0.12 <sup>Ae</sup>	33.50±0.18 <sup>Cc</sup>	34.23±0.20 <sup>Be</sup>	35.41±0.58 <sup>Ae</sup>	53.59±0.77 <sup>Cc</sup>	56.20±1.60 <sup>Be</sup>	56.67±0.47 <sup>Ae</sup>
1	24.25±0.15 <sup>Cd</sup>	25.41±0.55 <sup>Bd</sup>	25.94±0.32 <sup>Ad</sup>	32.19±0.04 <sup>Cd</sup>	32.26±0.29 <sup>Bd</sup>	32.47±0.17 <sup>Ad</sup>	35.16±0.14 <sup>Cd</sup>	35.66±0.32 <sup>Bd</sup>	35.68±0.22 <sup>Ad</sup>	59.35±1.53 <sup>Cc</sup>	59.37±0.21 <sup>Bd</sup>	59.75±0.16 <sup>Ad</sup>
2	27.11±0.40 <sup>Cc</sup>	28.18±0.03 <sup>Ac</sup>	27.98±0.21 <sup>Bc</sup>	32.45±0.12 <sup>Bc</sup>	32.42±0.13 <sup>Cc</sup>	32.58±0.13 <sup>Ac</sup>	35.94±0.17 <sup>Bc</sup>	35.78±0.45 <sup>Cc</sup>	36.31±0.39 <sup>Ab</sup>	59.24±0.14 <sup>Cd</sup>	60.08±0.28 <sup>Bc</sup>	60.29±0.40 <sup>Ac</sup>
3	27.97±0.15 <sup>Cb</sup>	28.44±0.05 <sup>Ab</sup>	28.33±0.39 <sup>Bb</sup>	33.21±0.19 <sup>Ab</sup>	32.87±0.12 <sup>Cb</sup>	32.95±0.23 <sup>Bb</sup>	37.46±0.36 <sup>Ab</sup>	36.55±0.46 <sup>Bb</sup>	36.27±0.69 <sup>Cc</sup>	62.33±0.78 <sup>Ab</sup>	61.33±0.35 <sup>Cb</sup>	61.37±0.61 <sup>Bb</sup>
4	29.56±0.53 <sup>Ab</sup>	29.13±0.09 <sup>Ba</sup>	28.44±0.40 <sup>Ca</sup>	35.10±0.65 <sup>Ab</sup>	33.58±0.28 <sup>Ba</sup>	33.53±0.21 <sup>Ca</sup>	39.50±0.50 <sup>Ab</sup>	37.00±0.53 <sup>Ba</sup>	36.70±0.13 <sup>Ca</sup>	64.89±0.47 <sup>Ab</sup>	63.35±0.28 <sup>Ca</sup>	64.16±0.98 <sup>Ba</sup>

หมายเหตุ : T<sub>on</sub> : (melting onset temperature) อุณหภูมิที่เริ่มเกิดการหลอมเหลว, T<sub>peak</sub> : (melting peak temperature) อุณหภูมิที่แสดงค่าพีคสูงสุด, T<sub>mc</sub> : (melting completion temperature) อุณหภูมิที่หลอมเหลวจนหมด และ ΔH : (enthalpy) ค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลว, ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p < 0.05) และตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์เดียวกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p < 0.05)

## บทที่ 5

### สรุป

จากผลการทดลอง โดยทำการศึกษาปริมาณของแข็งในรูปผลึกของทั้ง CB, IB, IBS และไขมันผสม พบว่ามีค่า SFC ลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ IB และ IBS จะทำให้ค่า SFC เพิ่มสูงขึ้นที่ทุกๆ อุณหภูมิ เนื่องจาก IB และ IBS มีปริมาณ TAG ชนิด SOS ที่สูง โดยเฉพาะ IBS ที่มีปริมาณของกรดสเตียริกสูงที่สุด ซึ่งบ่งชี้ได้ว่าเป็นไขมันที่แข็งที่สุด และไขมันผสมระหว่าง CB/IB และ CB/IBS ที่อัตราส่วนต่างๆ จะสามารถทนความร้อนที่อุณหภูมิห้องได้สูงกว่า CB โดยเฉพาะ IBS ที่สามารถเพิ่มความต้านทานต่อความร้อนของ CB แต่หลอมเหลวหมดที่อุณหภูมิร่างกาย โดยไม่เกิดลักษณะของไขเคลือบในปาก และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ IB และ IBS จะทำให้พีคของการตกผลึกและการหลอมเหลวยับยั้งอุณหภูมิที่สูงขึ้น โดยพีคของไขมันผสม (CB/IB และ CB/IBS) ในอัตราส่วน 85/15 มีช่วงของการหลอมเหลวที่ใกล้เคียงกับ CB มากที่สุด ทั้ง CB, IB และ IBS มีรูปผลึกเป็นทรงกลม (spherulites) เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ IB และ IBS จะทำให้ผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้น โดย IBS จะมีขนาดผลึกใหญ่ที่สุด ไขมันผสม (CB/IB และ CB/IBS) ในอัตราส่วน 85/15 มีรูปร่างผลึกใกล้เคียงกับ CB มากที่สุด พีคหลักของการละลายเบนของรังสีเอ็กซ์ของทั้ง CB และไขมันผสม (CB/IB และ CB/IBS) ในอัตราส่วน 85/15 อยู่ที่ตำแหน่ง 4.58 Å ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะโครงสร้างแบบ  $\beta_2$  จึงกล่าวได้ว่าไขมันผสมระหว่าง CB/IB และ CB/IBS สามารถเข้ากันได้ดี (มีพฤติกรรมการผสมแบบ monotectic) ดังนั้น IB สามารถนำไปผลิตเป็น CBE เพื่อใช้เป็นไขมันทดแทนเนยโกโก้ในการผลิตช็อกโกแลตได้ และ IBS สามารถนำมาใช้เป็น CBI ในการผลิตช็อกโกแลตทนความร้อนได้ โดยเฉพาะการเติมลงไปเพื่อแทนที่ CB บางส่วนในช็อกโกแลตในอัตราส่วน 85/15% w/w และเมื่อเติม IB และ IBS ลงในคาร์คช็อกโกแลต (5% w/w ของผลิตภัณฑ์สุดท้าย) จะมีค่า SFC, ค่าความแข็ง และค่า SRI สูงกว่าช็อกโกแลตที่ผลิตจาก CB (สูตรควบคุม) โดยช็อกโกแลตที่เติม IBS จะมีค่าสูงที่สุด นอกจากนี้ยังสามารถชะลอและต้านทานการเกิดฝ้าขาวที่ผิวหน้าของช็อกโกแลตได้ดีกว่าช็อกโกแลตสูตรควบคุม โดยที่ช็อกโกแลตที่เติม IBS จะมีความเสถียรต่อความร้อนและต้านทานการเกิดฝ้าขาวได้มากที่สุด

## รายการอ้างอิง

- Afoakwa, E. O. (2010). *Chocolate Science and Technology* (1 ed.). Wiley-Blackwell, West Sussex, UK.
- Afoakwa, E. O., Paterson, A., & Fowler, M. (2007). Factors influencing rheological and textural qualities in chocolate – a review. *Trends in Food Science & Technology*, 18(6), 290-298. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2007.02.002>
- Afoakwa, E. O., Paterson, A., Fowler, M., & Vieira, J. (2009a). Fat bloom development and structure-appearance relationships during storage of under-tempered dark chocolates. *Journal of Food Engineering*, 91(4), 571-581. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.10.011>
- Afoakwa, E. O., Paterson, A., Fowler, M., & Vieira, J. (2009b). Influence of tempering and fat crystallization behaviours on microstructural and melting properties in dark chocolate systems. *Food Research International*, 42(1), 200-209. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2008.10.007>
- AOAC. (1995). *Official methods of analysis* (15 ed.). Washington: Association of Official Analytical Chemists.
- AOCS. (2017). *Official methods and recommended practices of the AOCS* (7 ed.). Champaign, IL: American Oil Chemists' Society.
- Aumpai, K., Tan, C. P., Huang, Q., & Sonwai, S. (2022). Production of cocoa butter equivalent from blending of illipe butter and palm mid-fraction. *Food Chem*, 384, 132535. doi:10.1016/j.foodchem.2022.132535
- Bahari, A., & Akoh, C. C. (2018a). Synthesis of a Cocoa Butter Equivalent by Enzymatic Interesterification of Illipe Butter and Palm Midfraction. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 95(5), 547-555. doi:10.1002/aocs.12083
- Bahari, A., & Akoh, C. C. (2018b). Texture, rheology and fat bloom study of 'chocolates' made from cocoa butter equivalent synthesized from illipe butter and palm mid-fraction. *LWT*, 97, 349-354. doi:<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.07.013>
- Beckett, S. T. (2000). *The science of chocolate*. London, England: Royal Society of Chemistry.

- Beckett, S. T. (2008). *The Science of Chocolate* (2nd edn ed.). Cambridge, UK: The Royal Society of Chemistry.
- Beckett, S. T. (2009). Conching. In S. T. Becket (Ed.), *Industrial Chocolate Manufacture and Use* (pp. 192-223). Wiley-Blackwell, West Sussex, UK.
- Best, E. T., Oakenfull, D. G., Maladen-Percy, M., Boehm, R., & Kibler, L. A. (2005). Patent No. WO2005053417A1. W. I. P. Organization.
- Birkett, J. (2009). Fat-based centres and fillings. In G. Talbot (Ed.), *Science and Technology of Enrobed and Filled Chocolate, Confectionery and Bakery Products* (pp. 101-122). Cambridge, UK: Woodhead Publishing Limited.
- Biswas, N., Cheow, Y. L., Tan, C. P., & Siow, L. F. (2016). Blending of Palm Mid-Fraction, Refined Bleached Deodorized Palm Kernel Oil or Palm Stearin for Cocoa Butter Alternative. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 93(10), 1415-1427. doi:10.1007/s11746-016-2880-z
- Biswas, N., Cheow, Y. L., Tan, C. P., & Siow, L. F. (2017). Physical, rheological and sensorial properties, and bloom formation of dark chocolate made with cocoa butter substitute (CBS). *LWT - Food Science and Technology*, 82, 420-428. doi:<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.04.039>
- Blicher-Mathiesen, U. (1994). Borneo Illipe, a fat product from different Shorea spp. (Dipterocarpaceae). *Economic Botany*, 48(3), 231-242.
- Bootello, M. A., Chong, P. S., Máñez, Á., Garcés, R., Martínez-Force, E., & Salas, J. J. (2018). Characterization of Sunflower Stearin-Based Confectionary Fats in Bulk and in Compound Coatings. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 95(9), 1139-1150. doi:<https://doi.org/10.1002/aocs.12126>
- Bootello, M. A., Garcés, R., Martínez-Force, E., & Salas, J. J. (2015). Effect of solvents on the fractionation of high oleic-high stearic sunflower oil. *Food Chemistry*, 172, 710-717. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.09.136>
- Bootello, M. A., Hartel, R. W., Garcés, R., Martínez-Force, E., & Salas, J. J. (2012). Evaluation of high oleic-high stearic sunflower hard stearins for cocoa butter equivalent formulation. *Food Chemistry*, 134(3), 1409-1417. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.03.040>
- Bracco, U., Rostagno, W., & Egli, E. (1970). A study of cocoa butter – illipé butter

- mixtures. *International Chocolate Review*, 25, 8-41.
- Buscato, M. H. M., Hara, L. M., Bonomi, É. C., Calligaris, G. d. A., Cardoso, L. P., Grimaldi, R., & Kieckbusch, T. G. (2018). Delaying fat bloom formation in dark chocolate by adding sorbitan monostearate or cocoa butter stearin. *Food Chemistry*, 256, 390-396. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.02.127>
- Campos, R., & Marangoni, A. G. (2012). Molecular composition dynamics and structure of cocoa butter. In N. Garti & N. R. Widlak (Eds.), *Cocoa butter and related compounds* (pp. 103-150). Urbana: AOCS press. .
- Darmawan, M. A., Muhammad, B. Z., Harahap, A. F. P., Ramadhan, M. Y. A., Sahlan, M., Haryuni, . . . Gozan, M. (2020). Reduction of the acidity and peroxide numbers of tengkawang butter (*Shorea stenoptera*) using thermal and acid activated bentonites. *Heliyon*, 6(12), e05742. doi:<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05742>
- De Clercq, N. (2011). *Changing the functionality of cocoa butter*.
- De Clercq, N., Kadivar, S., Van de Walle, D., De Pelsmaeker, S., Ghelleyck, X., & Dewettinck, K. (2017). Functionality of cocoa butter equivalents in chocolate products. *European Food Research and Technology*, 243(2), 309-321. doi:10.1007/s00217-016-2745-6
- Delbaere, C., Van de Walle, D., Depypere, F., Gellynck, X., & Dewettinck, K. (2016). Relationship between chocolate microstructure, oil migration, and fat bloom in filled chocolates. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 118(12), 1800-1826. doi:<https://doi.org/10.1002/ejlt.201600164>
- Firestone, D. (1999). *Physical and Chemical Characteristics of Oils, Fats, and Waxes*.
- Foubert, I., Vanrolleghem, P. A., Thas, O., & Dewettinck, K. (2004). Influence of Chemical Composition on the Isothermal Cocoa Butter Crystallization. *Journal of Food Science*, 69(9), E478-E487. doi:10.1111/j.1365-2621.2004.tb09933.x
- Garti, N., & Widlak, N. R. (2012). *Cocoa Butter and Related Compounds*. Urbana, IL: AOCS Press.
- Ghazani, S. M., & Marangoni, A. G. (2018). Facile lipase-catalyzed synthesis of a chocolate fat mimetic. *Scientific Reports*, 8(1), 15271. doi:10.1038/s41598-018-33600-x
- Ghazani, S. M., Zou, L., Rakitsky, W. G., & Marangoni, A. G. (2018). Algal Butter, a Novel Cocoa Butter Equivalent: Chemical Composition, Physical Properties, and

- Functionality in Chocolate. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 95(10), 1239-1251. doi:<https://doi.org/10.1002/aocs.12127>
- Gunstone, F. D. (2011). *Vegetable oils in food technology composition, properties and use*. Willy-Blackwell: CRC Press. .
- Gusti, R., & Waluyo, T. (2016). Formulasi lemak tengkawang sebagai bahan dasar lipstick. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 34, 297-307. doi:10.20886/jphh.2016.34.4.297-307
- Hartel, R. W., von Elbe, J. H., & Hofberger, R. (2018). *Confectionery Science and Technology*. Switzerland: Springer.
- Hasibuan, V., Aini, N., Febriyanti, & Pane, S. (2018). The Effect Of Additional Detergent In Crude Palm Oil In The Process Of Separation Stearin. *Journal of Physics: Conference Series*, 970, 012020. doi:10.1088/1742-6596/970/1/012020
- Himawan, C., Starov, V. M., & Stapley, A. G. F. (2006). Thermodynamic and kinetic aspects of fat crystallization. *Advances in Colloid and Interface Science*, 122(1), 3-33. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cis.2006.06.016>
- Hodge, S. M., & Rousseau, D. (2002). Fat bloom formation and characterization in milk chocolate observed by atomic force microscopy. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 79(11), 1115-1121. doi:10.1007/s11746-002-0613-4
- Huang, Z., Guo, Z., Xie, D., Cao, Z., Chen, L., Wang, H., . . . Shen, Q. (2021). *Rhizomucor miehei* lipase-catalysed synthesis of cocoa butter equivalent from palm mid-fraction and stearic acid: Characteristics and feasibility as cocoa butter alternative. *Food Chemistry*, 343, 128407. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128407>
- Huyghebaert, A., & Hendrickx, H. (1971). Polymorphism of Cocoa Butter, shown by differential scanning calorimetry. *Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie*, 4, 59-63.
- Jahurul, M. H. A., Zaidul, I. S. M., Norulaini, N. A. N., Sahena, F., Jinap, S., Azmir, J., . . . Omar, A. K. M. (2013). Cocoa butter fats and possibilities of substitution in food products concerning cocoa varieties, alternative sources, extraction methods, composition, and characteristics. *Journal of Food Engineering*, 117(4), 467-476. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.09.024>
- Jeyarani, T., & Reddy, S. Y. (1999). Heat-resistant cocoa butter extenders from mahua

- (*Madhuca latifolia*) and kokum (*Garcinia indica*) fats. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 76(12), 1431-1436. doi:<https://doi.org/10.1007/s11746-999-0180-6>
- Jin, J., Akoh, C. C., Jin, Q., & Wang, X. (2018). Preparation of mango kernel fat stearin-based hard chocolate fats via physical blending and enzymatic interesterification. *LWT*, 97, 308-316. doi:<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.07.018>
- Jin, J., Jin, Q., Akoh, C. C., & Wang, X. (2021). StOSt-rich fats in the manufacture of heat-stable chocolates and their potential impacts on fat bloom behaviors. *Trends in Food Science & Technology*, 118, 418-430. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.10.005>
- Jin, J., Jin, Q., Wang, X., & Akoh, C. C. (2019). Improving heat and fat bloom stabilities of “dark chocolates” by addition of mango kernel fat-based chocolate fats. *Journal of Food Engineering*, 246, 33-41. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.10.027>
- Jin, J., Warda, P., Qi, C., Sun, C., Jie, L., Xie, D., . . . Wang, X. (2016). Mango kernel fat based chocolate fat with heat resistant triacylglycerols: production via blending using mango kernel fat mid-fraction and palm mid-fractions produced in different fractionation paths. *RSC Advances*, 6(110), 108981-108988. doi:10.1039/C6RA19438A
- Jin, J., Zheng, L., Mwinyi Pembe, W., Zhang, J., Xie, D., Wang, X., . . . Wang, X. (2017). Production of sn-1,3-distearoyl-2-oleoyl-glycerol-rich fats from mango kernel fat by selective fractionation using 2-methylpentane based isohexane. *Food Chem*, 234, 46-54. doi:10.1016/j.foodchem.2017.04.165
- Jin, Q., Zhang, T., Shan, L., Liu, Y., & Wang, X. (2008). Melting and Solidification Properties of Palm Kernel Oil, Tallow, and Palm Olein Blends in the Preparation of Shortening. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 85(1), 23-28. doi:10.1007/s11746-007-1152-3
- Kadivar, S., De Clercq, N., Mokbul, M., & Dewettinck, K. (2016). Influence of enzymatically produced sunflower oil based cocoa butter equivalents on the phase behavior of cocoa butter and quality of dark chocolate. *LWT - Food Science and Technology*, 66, 48-55. doi:10.1016/j.lwt.2015.10.006
- Kang, K. K., Jeon, H., Kim, I.-H., & Kim, B. H. (2013). Cocoa butter equivalents prepared by

- blending fractionated palm stearin and shea stearin. *Food Science and Biotechnology*, 22(2), 347-352. doi:10.1007/s10068-013-0087-8
- Kellens, M., Gibon, V., Hendrix, M., & De Greyt, W. (2007). Palm oil fractionation. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 109(4), 336-349. doi:<https://doi.org/10.1002/ejlt.200600309>
- Kusumaningtyas, V. A., & Sulaeman, A. Y. (2012). Potensi lemak biji tengkawang terhadap kandungan mikroba pangan pada pembuatan mie basah. *Bionatura*, 14(2).
- Leksono, B. B., & Hakim, L. (2018). Keragaman Kandungan Lemak Nabati Spesies Shorea Penghasil Tengkawang dari Beberapa Provenans dan Ras Lahan. *Jurnal Ilmu Kehutanan*, 12, 212-222.
- Li, L., & Liu, G. (2019). Corn oil-based oleogels with different gelation mechanisms as novel cocoa butter alternatives in dark chocolate. *Journal of Food Engineering*, 263, 114-122. doi:10.1016/j.jfoodeng.2019.06.001
- Lillah, Asghar, A., Pasha, I., Murtaza, G., & Ali, M. (2017). Improving heat stability along with quality of compound dark chocolate by adding optimized cocoa butter substitute (hydrogenated palm kernel stearin) emulsion. *LWT- Food Science and Technology*, 80, 531-536. doi:<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.02.042>
- 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. doi:[https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(97\)00160-X](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(97)00160-X)
- Loisel, C., Keller, G., Lecq, G., Bourgaux, C., & Ollivon, M. (1998). Phase transitions and polymorphism of cocoa butter. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 75(4), 425-439. doi:10.1007/s11746-998-0245-y
- Lonchamp, P., & Hartel, R. W. (2004). Fat bloom in chocolate and compound coatings. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 106(4), 241-274. doi:<https://doi.org/10.1002/ejlt.200400938>
- Lovegren, N. V., Gray, M. S., & Feuge, R. O. (1976). Effect of liquid fat on melting point and polymorphic behavior of cocoa butter and a cocoa butter fraction. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 53(3), 108-112. doi:10.1007/BF02635960
- Lutton, E. (1945). The Polymorphism of Tristearin and Some of its Homologs. *Journal of the American Chemical Society*, 67, 524-527.



- Maheshwari, B., & Reddy, S. (2005). Application of Kokum (*Garcinia indica*) fat as cocoa butter improver in chocolate. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85, 135-140. doi:10.1002/jsfa.1967
- Marangoni, A. G., & McGauley, S. E. (2003). Relationship between Crystallization Behavior and Structure in Cocoa Butter. *Crystal Growth & Design*, 3(1), 95-108. doi:10.1021/cg025580l
- Md Ali, A. R., Moi, L. M., Fisal, A., Nazaruddin, R., & Sabariah, S. (1998). The application of Borneo tallow in dark chocolate shell. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 76(2), 285-288. doi:[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0010\(199802\)76:2<285::AID-JSFA952>3.0.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(199802)76:2<285::AID-JSFA952>3.0.CO;2-9)
- Nesaretnam, K., & Ali, A. R. B. M. (1992). Engkabang (Illipe)—An excellent component for cocoa butter equivalent fat. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 60, 15-20.
- Norazlina, M. R., Jahurul, M. H. A., Hasmadi, M., Mansoor, A. H., Norliza, J., Patricia, M., . . . Fan, H. Y. (2021). Trends in blending vegetable fats and oils for cocoa butter alternative application: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 116, 102-114. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.07.016>
- Norazlina, M. R., Jahurul, M. H. A., Hasmadi, M., Sharifudin, M. S., Patricia, M., Lee, J. S., . . . Riman, I. (2020). Effects of fractionation technique on triacylglycerols, melting and crystallisation and the polymorphic behavior of bambangan kernel fat as cocoa butter improver. *LWT*, 129, 109558. doi:<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109558>
- Norazura, A. M. H., Sivaruby, K., & Lida, H. M. D. (2020). Blended palm fractions as confectionery fats: A preliminary study. *Journal of Oil Palm Research*. doi:10.21894/jopr.2020.0101
- Norberg, S. (2006). Chocolate and confectionery fats. In (Modifying Lipids for Use in Food (edited by F. Gunstone) ed., pp. 488-516). Cambridge, UK: Woodhead Publishing Limited, and Boca Raton, Boston, New York, Washington, DC, USA: CRC Press.
- Osborn, H. T., & Akoh, C. C. (2002). Enzymatically Modified Beef Tallow as a Substitute for Cocoa Butter. *Journal of Food Science*, 67(7), 2480-2485. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2002.tb08762.x>

- Pajin, B., & Jovanovic, O. (2005). Influence of high-melting milk fat fraction on quality and fat bloom stability of chocolate. *European Food Research and Technology*, 220(3), 389-394. doi:10.1007/s00217-004-1077-0
- Patel, A. R., Rajarethinem, P. S., Grędowska, A., Turhan, O., Lesaffer, A., & De Vos, W. H. (2014). Edible applications of shellac oleogels: spreads, chocolate paste and cakes. *Food & Function*, 5(4), 645-652. doi:10.1039/C4FO00034J
- Pontoh, J. (2016). Gas Chromatographic Analysis of Medium Chain Fatty Acids in Coconut Oil. *The Journal of Pure and Applied Chemistry Research*, 5, 157-161. doi:10.21776/ub.jpacr.2016.005.03.255
- Ribeiro, A., Silva, R., Gioielli, L., Gonçalves, M., Grimaldi, R., Gonçalves, L., & Kieckbusch, T. (2012). Physico-chemical properties of Brazilian cocoa butter and industrial blends. Part I Chemical composition, solid fat content and consistency. *Grasas y Aceites*, 63, 79-88. doi:10.3989/gya.069011
- Sato, K. (2001). Crystallization behaviour of fats and lipids — a review. *Chemical Engineering Science*, 56(7), 2255-2265. doi:[https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(00\)00458-9](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(00)00458-9)
- Senanayake, S. P. J. N., & Shahidi, F. (2005). Modification of Fats and Oils via Chemical and Enzymatic Methods. In F. Shahidi (Ed.), *Bailey's Industrial Oil and Fat Products*.
- Shukla, K. S. (2005). Confectionery Lipids. In F. Shahidi (Ed.), *In Industrial Oil and Fat Products* (pp. 159-173). Bailey's John Wiley & Sons, New York City, USA.
- Silva, T., Grimaldi, R., Calligaris, G., Cardoso, L., & Gonçalves, L. (2017). Crystallinity properties and crystallization behavior of chocolate fat blends. *Journal of Food Science and Technology*, 54, 1-11. doi:10.1007/s13197-017-2634-4
- Smith, K. W. (2001). Cocoa butter and cocoa butter equivalents. In F. Gunstone & M. Dekker (Eds.), *Structured lipids and modified lipids* (pp. 401-422). New York: CRC Press
- Smith, K. W. (2012). 19 - Confectionery Fats. In N. Garti & N. R. Widlak (Eds.), *Cocoa Butter and Related Compounds* (pp. 475-495): AOCS Press.

- Sonprasert, T., Ornlai, P., & Sonwai, S. (2022). Synthesis of confectionery fat from illipé butter stearin and palm mid-fraction blend via enzymatic interesterification. *International Journal of Food Science & Technology*, 57(5), 3150-3161. doi:<https://doi.org/10.1111/ijfs.15648>
- Sonwai, S., Kaphueakngam, P., & Flood, A. (2014). Blending of mango kernel fat and palm oil mid-fraction to obtain cocoa butter equivalent. *Journal of Food Science and Technology*, 51. doi:10.1007/s13197-012-0808-7
- Stewart, I., & Kristott, J. (2004). European Union Chocolate Directive defines vegetable fats for chocolate. *Lipid Technol*, 16, 11-14.
- Stewart, I. M., & Timms, R. E. (2002). Fats for Chocolate and Sugar Confectionery. In K. K. Rajah (Ed.), *In Fats in Food Technology* (pp. 159-191). Sheffield Academy Press: Sheffield.
- Talbot, G. (2009). 4 - Fats for confectionery coatings and fillings. In G. Talbot (Ed.), *Science and Technology of Enrobed and Filled Chocolate, Confectionery and Bakery Products* (pp. 53-79): Woodhead Publishing.
- Talbot, G. (2009). Vegetable fats. In S. Beckett (Ed.), *Industrial chocolate manufacture and use* (pp. 415-433). England: Wiley-Blackwell.
- Talbot, G. (2015). 4 - Tropical exotic oils: Properties and processing for use in food. In G. Talbot (Ed.), *Specialty Oils and Fats in Food and Nutrition* (pp. 87-123): Woodhead Publishing.
- Talbot, G. (2017). Properties of cocoa butter and vegetable fats. In S. T. Beckett, M. S. Fowler, & G. R. Ziegler (Eds.), *Beckett's industrial chocolate manufacture and use* (pp. 153-184). Chichester: Wiley-Blackwell.
- Timms, R. E. (2003). *Confectionery Fat Handbook*. The Oily Press, Bridgwater, UK.
- Timms, R. E. (2006). Fractionation of palm oil: Current status, future possibilities. . In: *Timothy L. Mounts Award Address presented at the AOCS World Conference and Exhibition on Oilseed and Vegetable Oil Utilization*.
- Torbica, A. M., Pajin, B. S., Omorjan, R. P., Lončarević, I. S., & Tomić, J. M. (2014). Physical Properties of Chocolate with Addition of Cocoa Butter Equivalent of Moderate Hardness. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 91(1), 39-48. doi:10.1007/s11746-013-2357-2

- Tran, P. D., Van de Walle, D., Hinneh, M., Delbaere, C., De Clercq, N., Tran, D. N., & Dewettinck, K. (2015). Controlling the stability of chocolates through the incorporation of soft and hard StOst-rich fats. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 117(11), 1700-1713. doi:<https://doi.org/10.1002/ejlt.201400584>
- Union, E. (2000). *Directive 2000/36/EC of the European Parliament and of the Council of 23 June 2000 relating to cocoa and chocolate products intended for human consumption*.
- van Malssen, K., van Langevelde, A., Peschar, R., & Schenk, H. (1999). Phase behavior and extended phase scheme of static cocoa butter investigated with real-time X-ray powder diffraction. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 76(6), 669-676. doi:10.1007/s11746-999-0158-4
- Verstringe, S., De Clercq, N., Nguyen, T. M., Kadivar, S., & Dewettinck, K. (2012). 18 - Enzymatic and Other Modification Techniques to Produce Cocoa Butter Alternatives. In N. Garti & N. R. Widlak (Eds.), *Cocoa Butter and Related Compounds* (pp. 443-474): AOCS Press.
- Wainwright, R. E. (1996). *Oils and Fats in Confections, in Bailey's Industrial Oil and Fat Products* (Y. H. Hui Ed. Vol. 3). John Wiley & Sons Inc: New York.
- Wan Aidah, W. I., Azis, A. A., Roselina, K., & Sabariah, S. (2014). Development and characterisation of thermo-resistant milk chocolate containing cocoa butter emulsion. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 21, 968-974.
- Wang, F., Liu, Y., Jin, Q., Meng, Z., & Wang, X. (2011). Characterization of cocoa butter substitutes, milk fat and cocoa butter mixtures. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 113(9), 1145-1151. doi:<https://doi.org/10.1002/ejlt.201000488>
- Wang, X., Chen, Y., Zheng, L., Jin, Q., & Wang, X. (2017). Synthesis of 1,3-distearoyl-2-oleoylglycerol by enzymatic acidolysis in a solvent-free system. *Food Chem*, 228, 420-426. doi:10.1016/j.foodchem.2017.01.146
- Wille, R. L., & Lutton, E. S. (1966). Polymorphism of cocoa butter. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 43(8), 491-496. doi:10.1007/BF02641273
- Zaliha, O., Chong, C. L., Cheow, C. S., Norizzah, A. R., & Kellens, M. J. (2004). Crystallization properties of palm oil by dry fractionation. *Food Chemistry*, 86(2),

245-250. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2003.09.032>

Zarringhalami, S., Sahari, M. A., Barzegar, M., & Hamidi-Esfehani, Z. (2010). Enzymatically modified tea seed oil as cocoa butter replacer in dark chocolate. *International Journal of Food Science & Technology*, 45(3), 540-545.

doi:<https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2009.02162.x>

Zhang, Z., Song, J., Lee, W. J., Xie, X., & Wang, Y. (2020). Characterization of enzymatically interesterified palm oil-based fats and its potential application as cocoa butter substitute. *Food Chemistry*, 318, 126518.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126518>

Ziegler, G. R., & Hogg, R. (2009). Particle size reduction. In S. T. Becket (Ed.), *Industrial Chocolate Manufacture and Use* (pp. 142-168). Wiley-Blackwell, West Sussex, UK.

Ziegler, G. R., Shetty, A., & Anantheswaran, R. (2004). Nut oil migration through chocolate. *Manufacturing Confectioner*, 84, 118-126.

Zou, S., Zhang, Y., Wang, Q., Yang, L., Karrar, E., Jin, Q., . . . Wang, X. (2022). Effect of palm stearin on the physicochemical characterization and capsaicinoid digestion of Sichuan hotpot oil. *Food Chemistry*, 371, 131167.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131167>





ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

## วิธีการศึกษาปริมาณไขมันแข็งในรูปผลึก (Solid fat content : SFC)

AOCS Official Method Cd 16b-93 (AOCS, 2017)

## คำนิยาม

การศึกษาหาค่า SFC ทำโดยใช้เทคนิค pulsed-nuclear magnetic resonance (p-NMR)

## อุปกรณ์

1. หลอดแก้วทดลองและฝาปิดหลอดทดลอง
2. ตู้อุ่น และตู้บ่ม
3. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (water bath)
4. ชั้นตะแกรง (rack)

## วิธีการ

1. บรรจุไขมันเหลวที่ผสมตามอัตราส่วนที่กำหนดลงในหลอดแก้วทดลอง (หลอด NMR) ให้มีความสูงประมาณ 2 ถึง 3 เซนติเมตร แล้วทำการปิดฝาหลอดทดลองเพื่อป้องกันหยดน้ำ จากนั้นนำมาจัดเรียงใส่ชั้นตะแกรงให้เรียบร้อย
2. ให้ความร้อนแก่หลอดตัวอย่างไขมันที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 10 นาทีเพื่อหลอมเหลวผลึกไขมัน
3. บ่มตัวอย่างตามอุณหภูมิดังนี้
  - 3.1 นำตัวอย่างเก็บที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
  - 3.2 นำตัวอย่างเก็บที่อุณหภูมิ 26 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
  - 3.3 นำตัวอย่างเก็บที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
4. นำตัวอย่างมาใส่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (water bath) ตามอุณหภูมิที่ต้องการวัดโดยเริ่มต้นจากอุณหภูมิที่ 15 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
5. ทำการวัดค่า % SFC โดยนำหลอดทดลองออกมาจากอ่างน้ำเพื่อวัดค่าที่ละหลอดจนครบทุกหลอดตัวอย่าง

6. บ่มตัวอย่างตามขั้นตอนที่ 2-4 โดยเปลี่ยนอุณหภูมิที่ต้องการวัด เท่ากับ 20, 25, 30, 32.5, 35, 37.5 และ 40 °C
7. นำข้อมูลที่ได้มาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า SFC (แกน y) และอุณหภูมิ (แกน x) เพื่อเปรียบเทียบ SFC ของไขมันที่อัตราส่วนต่าง ๆ ตามอุณหภูมิต่าง ๆ





## ภาคผนวก ข

### วิธีการศึกษาพฤติกรรมการตกผลึกและการหลอมเหลว (Crystallization and Melting Behavior)

AOCS Official Method Cj 1-94 (AOCS, 2017)

#### คำนิยาม

การศึกษาพฤติกรรมการตกผลึกและการหลอมเหลว ทำโดยใช้เทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC)

#### อุปกรณ์

1. ภาตอะลูมิเนียม (aluminum pan) ที่มีความจุ 30 ไมโครลิตร
2. คอมพิวเตอร์และเครื่อง DSC
3. อุปกรณ์สำหรับแป็คตัวอย่างใส่ภาตอะลูมิเนียม
4. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด

#### วิธีการ

1. ชั่งตัวอย่างไขมันเหลว 3-5 มิลลิกรัม ใส่ในภาตอะลูมิเนียม (aluminum pan)
2. ปิดผนึกให้สนิท ด้วยเครื่องแป็คตัวอย่าง
3. ตั้งค่าโปรแกรมในคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ไขมัน ดังนี้
  - 3.1 ให้ความร้อนกับตัวอย่างไขมันจากอุณหภูมิ 20 °C ไปจนถึง 80 °C ที่อัตรา 30 °C

#### ต่อหน้าที่

- 3.2 คงไว้ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 10 นาที
- 3.3 ลดอุณหภูมิลงจาก 80 °C จนถึง -60 °C ที่อัตรา 10 °C ต่อหน้าที่
- 3.4 คงไว้ที่อุณหภูมิ -60 °C เป็นเวลา 30 นาที
- 3.5 ให้ความร้อนอีกครั้งจาก -60 °C ไปจนถึงอุณหภูมิที่ 80 °C ที่อัตรา 5 °C ต่อหน้าที่

4. นำภาตอะลูมิเนียมที่บรรจุตัวอย่างแล้วมาใส่เครื่อง DSC ผึ่งซ้าย และผึ่งขวาใช้เป็นภาตเปล่าสำหรับเป็นตัวอ้างอิง เพื่อทำการวิเคราะห์พฤติกรรมการตกผลึกและการหลอมเหลวตามสภาวะที่กำหนดไว้

5. เทอร์โมแกรมของการตกผลึกและการหลอมเหลวจะถูกสร้างขึ้นในระหว่างการทำให้เย็นลงและให้ความร้อนตามลำดับ โดยเทอร์โมแกรมจะได้รับการวิเคราะห์โดยซอฟต์แวร์ที่มาพร้อมกับเครื่อง DSC
6. วิเคราะห์หาค่าอุณหภูมิจนในการตกผลึก อุณหภูมิจนในการหลอมเหลว และค่าพลังงานความร้อนสำหรับการตกผลึกและการหลอมเหลว หรือค่าเอนทัลปี (Enthalpy)



## ภาคผนวก ค

### การศึกษารูปแบบโครงสร้างของผลึก (polymorphism)

#### อุปกรณ์

1. ขวดแก้ว ขนาด 4 มิลลิเมตร
2. ตู้เย็น และตู้บ่ม
3. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (water bath)
4. คอมพิวเตอร์และเครื่อง XRD

#### วิธีการ

1. นำไขมันเหลวมาบรรจุใส่ขวดแก้ว
2. ให้ความร้อนกับตัวอย่างไขมันที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 10 นาที เพื่อทำลายผลึก
3. บ่มตัวอย่างตามอุณหภูมิ ดังนี้
  - 3.1 เก็บตัวอย่างที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
  - 3.2 เก็บตัวอย่างที่อุณหภูมิ 24 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
  - 3.3 เก็บตัวอย่างที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
4. วิเคราะห์ตัวอย่างไขมันโดยใช้การสแกนแบบมุมกว้าง (wide-angle X-ray diffraction : WAXD) จาก  $15^{\circ}2\theta$  ถึง  $35^{\circ}2\theta$  สแกนด้วยความเร็ว  $4^{\circ}2\theta$  ต่อนาที และมีความกว้าง  $0.01^{\circ}2\theta$  โดยมีความยาวคลื่นเท่ากับ 1.5418 Å และระยะห่างระหว่างตัวอย่างกับ detector เท่ากับ 14.5 เซนติเมตร
5. การวิเคราะห์จะถูกประมวลผลโดยซอฟต์แวร์ของเครื่อง XRD

ที่มา : Sonprasert et al. (2022)

## ภาคผนวก ง

## วิธีการเตรียมตัวอย่างไขมันเพื่อใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบกรดไขมัน

AOAC official method 969.33 (AOAC, 1995)

## คำนิยาม

ตัวอย่างไขมันจะถูกเตรียมให้อยู่ในรูป fatty acid methyl esters เพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธี Gas chromatography

## อุปกรณ์

1. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
2. บีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร
3. หลอดหยดสาร 3 มิลลิลิตร
4. เตาความร้อน (hotplate)
5. ชุดอุปกรณ์ขาตั้ง
6. หลอดแก้วคอนเดนเซอร์แบบไส้ตรง (condensor reflux) และฝาปิด
7. ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ปริมาตร 250 มิลลิลิตร
8. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (water bath)
9. เม็ดกันเดือด (glass bead)
10. กระบอกฉีดยาแก้ว (glass syringe) และตัวกรองสาร
11. ขวด vial ขนาด 4 มิลลิลิตร

## สารเคมี

1. สารละลาย methanolic NaOH
2. สารละลายโบรอนไตรฟลูออไรด์ (boron trifluoride :  $\text{BF}_3$ ) เตรียมโดยชั่งน้ำหนักสาร  $\text{BF}_3$  125 กรัม ต่อ methyl alcohol 1 ลิตร
3. Heptane
4. สารละลาย saturated NaCl
5. Anhydrous  $\text{Na}_2\text{SO}_4$

## วิธีการ

1. ชั่งตัวอย่างไขมันเหลว 0.4 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask)
2. เติมสารละลาย methanolic NaOH (0.5 M) ปริมาตร 6 มิลลิลิตร และใส่เม็ดกันเดือด (glass bead) 5-6 เม็ด
3. นำไขมันที่บรรจุในขวดรูปชมพู่ไปต้มบน hotplate เป็นเวลา 10 นาที โดยติดตั้งอุปกรณ์ หลอดแก้วคอนเดนเซอร์แบบไส้ตรง (condensor reflux) เข้ากับอุปกรณ์ข้างต้นและให้ขวดรูปชมพู่อยู่ใต้หลอดแก้วคอนเดนเซอร์
4. หยดสารละลาย  $\text{BF}_3$  7 มิลลิลิตร โดยหยดผ่านหลอดแก้วคอนเดนเซอร์ด้านบนพร้อมกับ ปิดฝา และต้มต่อไปอีก 2 นาที
5. หยด heptane 5 มิลลิลิตร โดยหยดผ่านหลอดแก้วคอนเดนเซอร์ด้านบนพร้อมกับปิดฝา ต้มต่อไปอีก 1 นาที
6. เมื่อครบเวลาแล้วให้นำขวดรูปชมพู่ออกจาก hotplate พร้อมกับปรับอุปกรณ์หลอด คอนเดนเซอร์ให้ต่ำลง แล้วตั้งทิ้งไว้ให้สารผสมเย็นตัวลงประมาณ 5 นาที
7. เติมสารละลาย saturated NaCl 15 มิลลิลิตร พร้อมปิดฝาชวดแล้วเขย่าสารผสมอย่าง แรงเป็นเวลา 15 วินาที
8. เทสารผสมใส่ในหลอดทดลอง แล้วตั้งทิ้งไว้เพื่อให้เกิดการแยกชั้น (สารละลาย heptane จะแยกชั้นอยู่ด้านบน) จากนั้นทำการดูดสารละลาย heptane ที่อยู่ด้านบนไปยังบีกเกอร์
9. เติม anhydrous  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ปริมาณเล็กน้อยเพื่อกำจัดน้ำออก และดูดสารละลายมาใส่ใน ขวด vial ขนาด 4 มิลลิลิตร โดยใช้ glass syringe ผ่านตัวกรองสาร เพื่อนำไปทำการวิเคราะห์ด้วยวิธี Gas chromatography



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาว ชันณรงค์ม์ เฉลิมชาติโกคิน
วัน เดือน ปี เกิด	13 ตุลาคม 2540
สถานที่เกิด	นครปฐม
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะ วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	151 ถ.ไร่เกาเขตันสำโรง ต.พระประโทน อ.เมืองนครปฐม จ.นครปฐม 73000
ผลงานตีพิมพ์	<ol style="list-style-type: none"><li>1. ชันณรงค์ม์ เฉลิมชาติโกคิน และ โสภาค สอนไว. 2564. องค์ประกอบไตรเอซิลกลีเซอรอลและพฤติกรรมการตกผลึกของเนยมะม่วงส่วนแข็ง. การประชุมวิชาการบัณฑิตศึกษาระดับชาติ ครั้งที่ 11 เรื่อง "วิจัยและนวัตกรรมเพื่อเตรียมพร้อมรับการเปลี่ยนแปลง", 24-25 มิ.ย. 2564 มหาวิทยาลัยศิลปากร. หน้า S213-S220.</li><li>2. ชันณรงค์ม์ เฉลิมชาติโกคิน และ โสภาค สอนไว. 2565. คุณสมบัติและพฤติกรรมการตกผลึกของเนยโกโก้ผสมกับเนยอิลิปเป้. การประชุมวิชาการบัณฑิตศึกษาระดับชาติ ครั้งที่ 12 เรื่อง "บัณฑิตวิจัย สร้างสรรค์ และนวัตกรรม : การขับเคลื่อนสังคมเข้าสู่ยุคปกติใหม่ด้วยองค์ความรู้", 23-24 มิ.ย. 2565 มหาวิทยาลัยศิลปากร. หน้า S491-S500.</li><li>3. Pawitchaya Podchong, Chanunras Chalermchadpokin, Sopark Sonwai and Satoru Ueno. 2023. Improvement of chocolate heat resistance with illipé butter stearin addition. International Journal of Food Science and Technology. 58(4), 1868-1878</li></ol>