

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature review)

2.1 มะม่วงและน้ำมันเมล็ดมะม่วง (Mango and mango seed almond fat)

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

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

ตารางที่ 1 ปริมาณ (ตัน) มูลค่า (ล้านบาท) และตลาดหลักในการส่งออกมะม่วงของประเทศไทย

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

ที่มา : ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร สำนักงานปลัดกระทรวงพาณิชย์ โดยความร่วมมือของกรมศุลกากร (อ้างอิงในกรมการค้าต่างประเทศ, 2552)

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

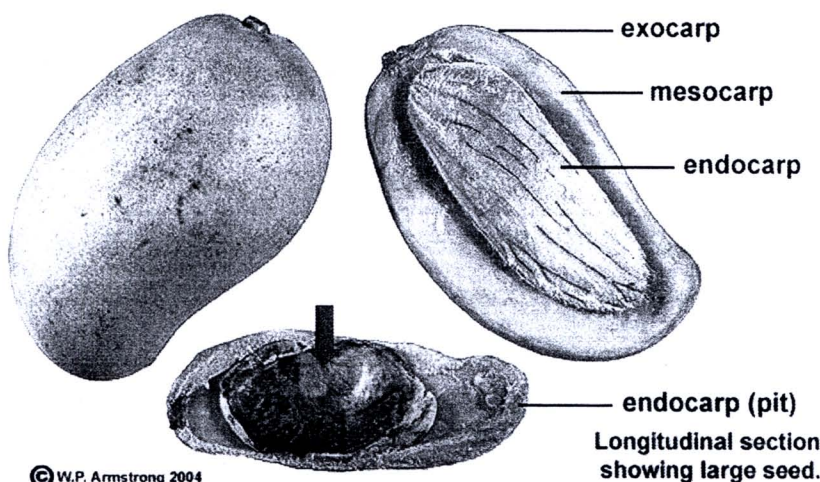
19.8% (น้ำหนักแห้ง) (Solis Fuentes และ Duran de bazua, 2005) จะเห็นว่า เพียงแค่มะม่วงพันธุ์แก้วสายพันธุ์เดิวนั้นจะก่อให้เกิดเมล็ดเหลือทิ้งในปี 2547 ถึง 49,247.84 ตัน คิดเป็นเมล็ดในมะม่วงเท่ากับ 23,934.31 ตัน (น้ำหนักแห้ง)

ตารางที่ 2 ผลผลิตมะม่วงของประเทศไทยในปี 2547

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

ที่มา : กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (2547)

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



ภาพที่ 1 ภาพแสดงส่วนประกอบของผลมะม่วง

ที่มา : Armstrong (2004)

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

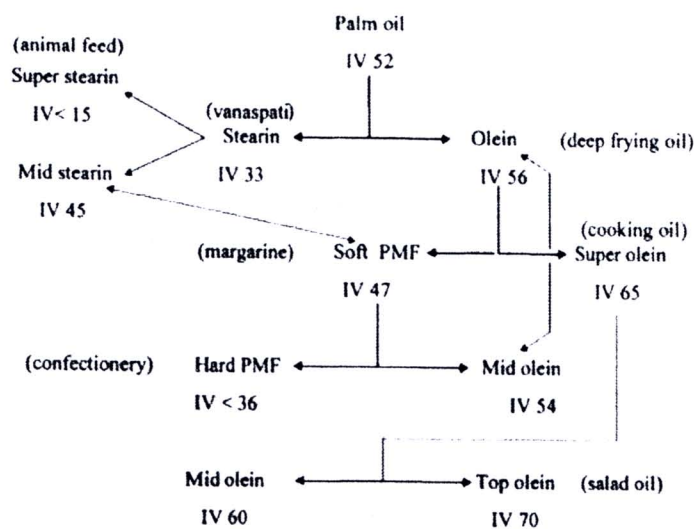
นับตั้งแต่อดีตมาจนถึงปัจจุบัน มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับน้ำมันเมล็ดมะม่วงที่มุ่งเน้นการใช้ประโยชน์ในด้านการนำไปผลิตเป็นเนยโกโก้เลียนแบบในปริมาณค่อนข้างจำกัด งานวิจัยที่โดดเด่นคืองานของ Solis-Fuentes และ Duran-de-Bazua (2004) ซึ่งได้ศึกษาคุณสมบัติและองค์ประกอบต่าง ๆ ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์มะนิลาของประเทศเม็กซิโกพบว่า น้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์มะนิลา มีคุณลักษณะทางเคมีและทางกายภาพ ดังนี้ ค่าดัชนีการหักเหของแสง (refractive index) เท่ากับ 1.466 ค่าความเป็นกรด (acid value) เท่ากับ 0.60% (as oleic acid) ค่าสaponification (saponification value) เท่ากับ 189.0 mg KOH/ g oil และค่าไอโอดีน (iodine value) เท่ากับ 47.7 g I₂/ 100 g oil และจากการวิเคราะห์กรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบด้วยเครื่อง Gas chromatography – Mass spectroscopy พบว่า มี

กรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบหลักคือ กรดโอเลอิก (Oleic acid; O), กรดสเตียริก (Stearic acid; St) และ กรดปาล์มมิก (Palmitic acid; P) ในปริมาณเท่ากับ 40.81%, 39.07% และ 9.29% (w/w) ตามลำดับ

2.2 น้ำมันปาล์มมิดแฟรคชัน (Palm oil mid-fraction; PMF)

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

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



ภาพที่ 2 กระบวนการแยกส่วนแบบแห้งของน้ำมันปาล์ม

หมายเหตุ PMF : น้ำมันปาล์มมิดเฟรคชั่น; IV : ค่าไอโอดีน

ที่มา : Kellens (2007)

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

ตารางที่ 3 ความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้น้ำมันปาล์มแยกส่วนในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ

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

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

ที่มา : Kellens (2007)

2.3 เนยโกโก้ (Cocoa butter)

เนยโกโก้ เป็นไขมันพืชที่ได้จากเมล็ด โกโก้ (*Theobroma cacao* L.) ที่ผ่านกระบวนการหมัก ทำแห้ง ทำความสะอาด อบ กะเทาะเปลือก และบดจนกลายเป็นของเหลวที่เรียกว่า โกโก้ลิเควอร์ (Cocoa liquor) แล้วนำมาบีบอัดด้วยความดันเพื่อแยกเนยโกโก้ออกมา ซึ่งเนยโกโก้จะมีสีเหลืองอ่อน มีกลิ่นรสเฉพาะตัว และมีราคาสูง นิยมใช้ในอุตสาหกรรมขนมหวานและช็อกโกแลต โดย Perez-Martinez และคณะ (2007) กล่าวว่า มากกว่า 75% ของไตรกลีเซอไรด์ที่เป็นองค์ประกอบของเนยโกโก้จะมีกรดโอเลอิก

อยู่ในตำแหน่งที่ 2 (sn-2) และมีกรดไขมันอิ่มตัวในตำแหน่งที่ 1 (sn-1) และ 3 (sn-3) เนื่องจากเนยโกโก้ประกอบไปด้วยไตรกลีเซอไรด์หลัก 3 ชนิด ได้แก่ POSt, StOSt และ POP ซึ่งมีปริมาณแตกต่างกันขึ้นกับแหล่งเพาะปลูกและสายพันธุ์ของต้นโกโก้ (Lipp และ Anklam, 1998; Lipp และคณะ, 2001) ทำให้เนยโกโก้มีพฤติกรรมการหลอมเหลวเฉพาะตัว กล่าวคือ เป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 25°C) และมีการหลอมเหลวอย่างรวดเร็วและสมบูรณ์ที่อุณหภูมิของร่างกาย (ประมาณ 37°C) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ต้องการในผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลต แต่เนื่องจากมีเพียงไม่กี่ประเทศเท่านั้นที่สามารถเพาะปลูกต้นโกโก้ได้ จึงทำให้ผลผลิตของเนยโกโก้ค่อนข้างแปรปรวนและมีราคาสูง (Hassan และคณะ, 1995; Moreton, 1988) หลายอุตสาหกรรมจึงพยายามที่จะหาไขมันจากพืชชนิดอื่นที่มีราคาถูกกว่า แต่ให้คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพที่คล้ายกับเนยโกโก้ มาใช้ทดแทนเนยโกโก้ ตารางที่ 4 แสดงปริมาณไตรกลีเซอไรด์ที่เป็นองค์ประกอบของเนยโกโก้จากแหล่งต่าง ๆ ที่มีรายงานไว้

ตารางที่ 4 ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%) ที่เป็นองค์ประกอบของเนยโกโก้

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

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

2.4 เนยโกโก้เลียนแบบ (Cocoa Butter Alternatives; CBA)

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

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

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

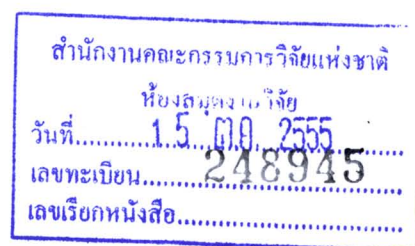


ตารางที่ 5 วัตถุดิบและไตรกลีเซอไรด์หลักของส่วนผสมของเนยโกโก้เลียนแบบชนิด CBE

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

- หมายเหตุ
- a รวมถึงกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ การกำจัดสีและกลิ่น
 - b การแยกส่วนโดยการตกผลึก
 - c ส่วนที่มีช่วงการหลอมเหลวในช่วงกลาง
 - d ส่วนที่มีช่วงการหลอมเหลวสูง
 - e อาจเรียกว่า Borneo tallow หรือ Tengkwang fat
 - f อาจเรียกว่า Kokum Gurgi fat

ที่มา : Stewart และ Timms (2002)

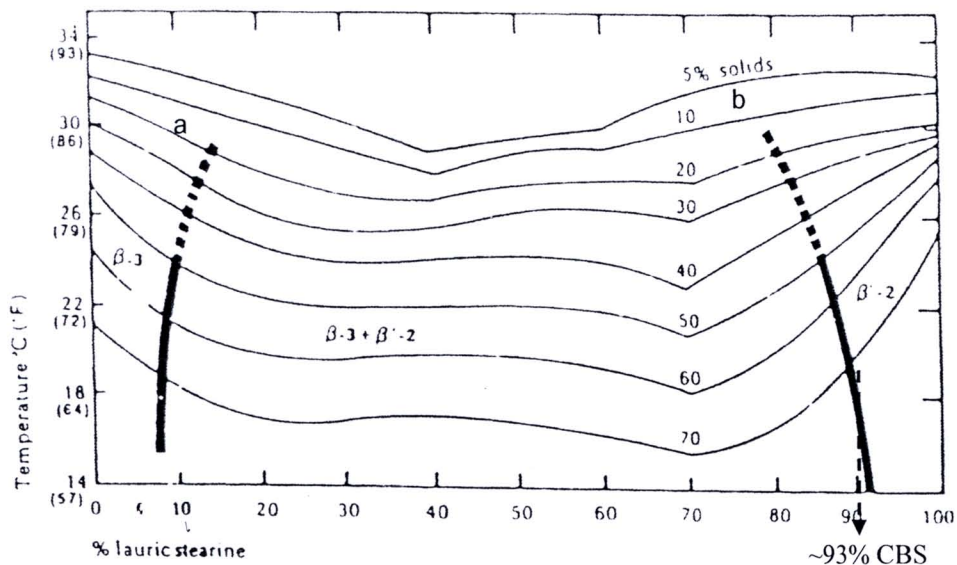


กฎหมายของทวีปยุโรปอนุญาตให้มีการใช้ CBE ที่ผลิตจากไขมันพืชชนิดต่าง ๆ เพียง 6 ชนิด เท่านั้น คือ น้ำมันปาล์ม (palm oil), ไขมันอิลลิป (illipe fat), ไขมันซอล (sal fat), ไขมันโคคัม (kokum fat), น้ำมันชี (shea oil) และน้ำมันเมล็ดมะม่วง (mango kernel oil หรือ mango seed almond fat) เป็นส่วนผสมของผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลต (Stewart และ Kristott, 2004; Stewart และ Timms, 2002) ดังแสดงในตารางที่ 5 และเนื่องจากเนยโกโก้เป็นไขมันที่มีไตรกลีเซอไรด์เป็นองค์ประกอบหลัก 3 ชนิด คือ POP, POST และ StOSt การผลิต CBE จึงทำได้โดยการผสมน้ำมันจากพืช 6 ชนิดนี้ในอัตราส่วนที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ CBE ที่มีคุณสมบัติต่าง ๆ ทั้งทางเคมี ทางกายภาพ รวมถึงพฤติกรรมการตกผลึกที่เหมาะสมหรือใกล้เคียงกับของเนยโกโก้ จึงจะสามารถใช้ CBE ที่ผลิตได้ดังกล่าวทดแทนเนยโกโก้ในการผลิตช็อกโกแลตได้ โดยไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลตและกระบวนการผลิตแต่อย่างใด ไตรกลีเซอไรด์ชนิด POP ส่วนใหญ่ และ POST ในปริมาณเล็กน้อยนั้นสามารถหาได้จากน้ำมันปาล์มมิดเฟรคชัน แต่การให้ได้มาซึ่ง StOSt และ POST ส่วนที่เหลือนั้นจะมี

ความยุ่งยากมากกว่า โดยจะต้องได้มาจากน้ำมันจากพืชที่มี StOst ในปริมาณสูง ได้แก่ illipé fat, sal fat และน้ำมันเมล็ดมะม่วง (Beckett, 2000) CBE ที่ผลิตได้จึงเกิดจากการผสมน้ำมันเหล่านี้เข้าด้วยกัน

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

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



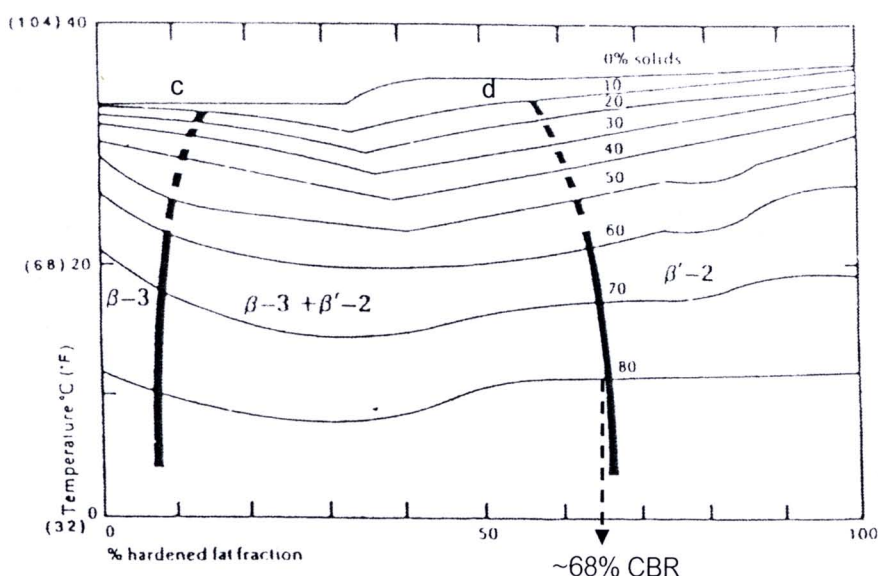
ภาพที่ 3 Iso-solids phase diagram for cocoa butter/CBS. Reprinted with the permission of Loders Croklaan.

ที่มา : Talbot (1999)

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

2.4.3 เนยโกโก้เลียนแบบชนิด Cocoa Butter Replacers หรือ CBR เป็นไขมันพืชในกลุ่ม non-lauric fat ที่ผลิตได้จากน้ำมันที่มีกรดปาล์มมิกและกรดโอเลอิกในปริมาณมาก เช่น น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันฝ้าย น้ำมันข้าวโพด น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันปาล์ม และน้ำมันปาล์มโอเลอิก ซึ่งจะถูกนำมาผ่านกระบวนการไฮโดรจิเนชันและกระบวนการแยกส่วน การเติมไฮโดรเจนระหว่างการทำให้ไฮโดรจิเนชันภายใต้สภาวะที่เลือกไว้จะทำให้เกิดกรดไขมันประเภททรานส์ (trans-acid) ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มปริมาณของไขมันแข็ง (SFC) โดย CBR ที่ได้จากวิธีการนี้จะมีกรดปาล์มมิก กรดสเตียริก และกรดโอเลอิกเป็นกรดไขมันหลักเช่นเดียวกับเนยโกโก้ แต่การจัดเรียงสายไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbon chain) ของกรด

ไขมันในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์เป็นแบบสุ่มและมีโครงสร้างไม่เหมือนกับของเนยโกโก้ จึงมีสมบัติทางกายภาพแตกต่างจากเนยโกโก้ ทำให้เมื่อผสมกันกับเนยโกโก้แล้วทำการตกผลึกจะเกิดผลึกหลายโครงสร้างปะปนกัน และมีปรากฏการณ์ eutectic effect เกิดขึ้น ผลึกภัณฑ์ที่ได้จะไม่มีความมันวาวและเกิด fat bloom ขึ้นด้วย ไขมันในกลุ่มนี้จึงใช้ทดแทนเนยโกโก้ได้ในปริมาณจำกัด ดังแสดงในภาพที่ 4 ซึ่งพบว่า เมื่อมีการผสม CBR กับเนยโกโก้จะมีผลต่อคุณสมบัติการหลอมเหลวเนื่องจากการเกิด eutectic effect และเกิดการอ่อนตัวเนื่องจากการเข้ากันไม่ได้ของไขมันผสม ดังนั้นจึงยอมให้ใช้ CBR ผสมกับเนยโกโก้ได้ในช่วงนอกบริเวณขอบเขตของเส้น c และ d เท่านั้น ซึ่งพบว่า จะสามารถใช้ CBR ในส่วนผสมได้ประมาณ 5% หรือมากกว่า 68% ของไขมันทั้งหมด จากแผนภาพทางด้านขวาซึ่งกว้างกว่าของ CBS แสดงให้เห็นว่า เนยโกโก้เลียนแบบชนิด CBR มีความทนทานต่อความร้อนมากกว่า เนยโกโก้เลียนแบบชนิด CBS และสามารถใช้ได้กับผลิตภัณฑ์ที่มีโกโก้แมสเป็นองค์ประกอบ อย่างไรก็ตามปริมาณการใช้งานขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์และข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์



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

ที่มา : Talbot (1999)

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

2.5 คุณสมบัติทางกายภาพของไขมันและน้ำมัน (Physical properties of fats and oils)

คุณสมบัติทางกายภาพของไขมันและน้ำมันมีความสัมพันธ์โดยตรงกับองค์ประกอบทางเคมีในโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ของไขมันหรือน้ำมัน ใช้ในการจำแนกหรือบ่งชี้ชนิดของไขมันหรือน้ำมัน และใช้ในการพิจารณาถึงการนำไปใช้ประโยชน์อีกด้วย ตัวอย่างสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของไขมันหรือน้ำมัน ได้แก่

2.5.1 จุดหลอมเหลว (Melting point) หรืออุณหภูมิที่ทำให้ไขมันเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวทั้งหมด มักเป็นช่วงของอุณหภูมิซึ่งจะกว้างหรือแคบขึ้นขึ้นกับชนิดของไตรกลีเซอไรด์ที่เป็นองค์ประกอบ และจุดหลอมเหลวของไตรกลีเซอไรด์จะสูงหรือต่ำขึ้นกับชนิดของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในโมเลกุล โดยตารางที่ 6 แสดงจุดหลอมเหลวของกรดไขมันชนิดต่าง ๆ จะเห็นว่า จุดหลอมเหลวของกรดไขมันจะเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนคาร์บอนในโมเลกุลเพิ่มขึ้น และจุดหลอมเหลวของกรดไขมันจะลดลงเมื่อจำนวนพันธะคู่ในโมเลกุลเพิ่มขึ้น (นิธิยา รัตนปิ่นนัท, 2548) สำหรับไตรกลีเซอไรด์จะเห็นว่า จุดหลอมเหลวจะแตกต่างกันตามชนิดของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบ และการจัดเรียงตำแหน่งของกรดไขมันในโมเลกุล กล่าวคือ ไตรกลีเซอไรด์ที่มีกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบเหมือนกันแต่มีการจัดเรียงตัวในตำแหน่งที่ต่างกันจะมีจุดหลอมเหลวแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 7

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



ตารางที่ 6 จุดหลอมเหลวของกรดไขมันชนิดต่าง ๆ

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

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

ตารางที่ 7 จุดหลอมเหลวของไตรกลีเซอไรด์บางชนิด

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

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

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

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

ไขมันลงอย่างช้า ๆ (นิธิยา รัตนานนท์, 2548) ซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดเกี่ยวกับการตกผลึกของไขมันต่อไป

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

2.6 คุณสมบัติทางเคมีของไขมันและน้ำมัน (Chemical properties of fats and oils)

คุณสมบัติทางเคมีของไขมันและน้ำมันแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน เนื่องจากองค์ประกอบและโครงสร้างทางเคมีที่ต่างกัน ทำให้มีการเกิดปฏิกิริยากับสารแต่ละชนิดแตกต่างกัน ได้แก่

2.6.1 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ไขมันบางชนิดจะถูกไฮโดรไลซ์ได้ด้วยกรด ค่าง และเอนไซม์ การไฮโดรไลซ์ได้ด้วยด่าง เรียกว่า สaponification) ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นเกลือของกรดไขมันเรียกว่า สบู่ ดังที่ใช้นิยมในการไฮโดรไลซ์ไขมัน เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอาจเกิดจากไขมันหรือน้ำมันได้รับความร้อนสูง เช่น ขณะทอดอาหารที่มีน้ำในปริมาณมากไขมันจะถูกไฮโดรไลซ์เป็นกรดไขมันอิสระและกลีเซอรอล

ไขมันหรือน้ำมันที่ได้จากพืชและสัตว์แต่ละชนิด มักมีไตรกลีเซอไรด์เป็นส่วนประกอบในปริมาณที่ค่อนข้างแน่นอน ดังนั้นจำนวนค่าที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไขมันหรือน้ำมันจำนวนหนึ่งจึงมีค่าที่ค่อนข้างแน่นอนและเป็นค่าเฉพาะ ซึ่งสามารถอ้างอิงถึงสมบัติของไขมันหรือน้ำมันแต่ละชนิดได้ เรียกว่า ค่าสaponification (Saponification number หรือ Saponification value; Spv) หรือจำนวนมิลลิกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์ไขมันหรือน้ำมันอย่างสมบูรณ์ จำนวน 1 กรัม ให้ได้เป็นสบู่และกลีเซอรอล ค่า Spv ใช้เป็นตัวบ่งชี้ขนาดของโมเลกุลหรือน้ำหนักโมเลกุลของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ในไขมันหรือน้ำมัน กล่าวคือ หากไขมันหรือน้ำมันมีค่า Spv สูง แสดงว่า กรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ จึงมีจำนวนโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ต่อหน่วยน้ำหนักเป็นจำนวนมาก (นิธิยา รัตนานนท์, 2548)

2.6.2 ปฏิกิริยาฮาโลจิเนชัน (Halogenation) เป็นปฏิกิริยาการเติมสารพวกลฮาโลเจน (Halogen) เข้าไปที่พันธะคู่ของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ สารฮาโลเจนตัวที่นิยมใช้ ได้แก่ ไอโอดีน ค่าที่ได้นั้นเรียกว่า ค่าไอโอดีน (Iodine number หรือ Iodine value; Iv) หรือจำนวนกรัมของไอโอดีนที่เข้าไปทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ของกรดไขมันในไขมันหรือน้ำมันจำนวน 100 กรัม

ค่า Iv เป็นตัวบ่งชี้ว่า มีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเป็นองค์ประกอบในไขมันหรือน้ำมัน มากน้อยเพียงใด หรือเป็นการบอกความไม่อิ่มตัวของไขมันหรือน้ำมัน หากค่า Iv สูงแสดงว่า ไขมันหรือน้ำมันชนิดนั้นมีความไม่อิ่มตัวสูง ซึ่งจะมีคุณค่าทางโภชนาการสูงเนื่องจากกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเป็นกรดไขมันที่มีความจำเป็นต่อร่างกาย ในทางตรงกันข้ามไขมันหรือน้ำมันที่มีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวสูงจะเกิดการหืนได้ง่าย

2.6.3 การหืน (Rancidity) เป็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของไขมันหรือน้ำมันซึ่งทำให้ไขมันหรือน้ำมันเกิดกลิ่นที่ผิดปกติ และมีสมบัติทางเคมีและทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไป การหืนสามารถเกิดขึ้นได้ 3 รูปแบบ คือ

2.6.3.1 ไลโพลซิส (Lipolysis) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อพันธะเอสเทอร์ในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์เกิดการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ไลเปส กรด ค้าง ความร้อน หรือสารเคมี ซึ่งจะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่มีผลต่อคุณภาพของไขมันหรือน้ำมัน โดยทำให้น้ำมันมีกลิ่นและรสชาติเปลี่ยนแปลงไป เช่น กรดไขมันอิสระที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (คาร์บอน 4-12 อะตอม) ซึ่งจะมีกลิ่นหืนมาก และเมื่อปริมาณกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้นจะมีผลให้ค่า smoke point หรืออุณหภูมิที่ไขมันหรือน้ำมันเกิดควันเมื่อได้รับความร้อนมีค่าต่ำลง ทำให้น้ำมันจะเกิดควันได้ง่ายขณะทอดอาหาร สำหรับปฏิกิริยาที่เกิดจากเอนไซม์ไลเปสและความชื้นจะเรียกว่า Hydrolytic rancidity

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

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

การเกิดกลิ่นหืนด้วยวิธีนี้จะทำให้กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวถูกทำลาย ทำให้สูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ รวมทั้งสูญเสียวิตามินที่ละลายได้ในไขมันหรือน้ำมัน นอกจากนี้ยังสามารถเกิดจากการเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์ไลพอกซิเดส (lipoxidase) ได้อีกด้วย การตรวจวิเคราะห์การเกิด Oxidative rancidity สามารถทำได้โดยการหาค่าเพอร์ออกไซด์ (Peroxide value; Pv) หรือการหาปริมาณสารเพอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นในไขมันหรือน้ำมัน หรือจำนวนมิลลิลิตรของสารละลายโซเดียมไธ

ไอซัลเฟตความเข้มข้น 0.002 N ที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์ไขมันหรือน้ำมัน 1 กรัม ถ้าค่า Pv สูงแสดงว่า ไขมันหรือน้ำมันเกิด Oxidative rancidity มาก และส่งผลให้ค่า Iv ที่วิเคราะห์ได้ต่ำกว่าความเป็นจริง

วิธีป้องกันสามารถทำได้โดยการเติมสารป้องกันการหืนลงไปในไขมัน น้ำมัน หรืออาหารที่มีไขมันหรือน้ำมันเป็นส่วนประกอบ

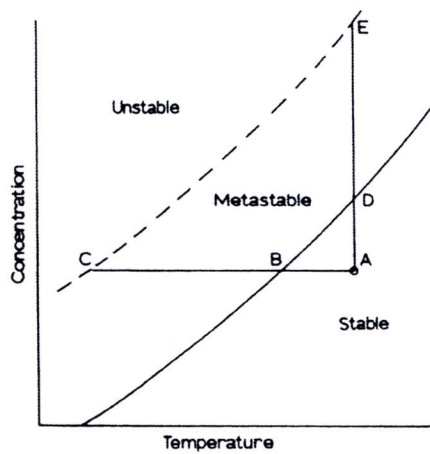
2.6.3.3 คีโตนิก แรนซิดิตี (Ketonic rancidity) เป็นการหืนที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยเอนไซม์ (enzymatic oxidation) กับโมเลกุลของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นสารจำพวกคีโตน ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (นิธิยา รัตนูปนันท, 2548)

2.7 การตกผลึกของไขมันและน้ำมัน (crystallization)

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

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

รวดเร็ว (เรียกว่า spontaneous crystallization) ตำแหน่งของเส้นประที่แบ่งพื้นที่ระหว่าง meta-stable zone และ unstable zone ขึ้นกับปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการตกผลึก เช่น อัตราการลดอุณหภูมิและการปั่นกววน เป็นต้น



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

ที่มา : Timms (1994)

การตกผลึกของสารละลายใด ๆ ที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวยิ่งยวดนั้น จะเริ่มจากการสร้างจุดเริ่มต้นของการตกผลึกหรือที่เรียกว่า นิวเคลียสของผลึก ขึ้นมาก่อน โดยที่นิวเคลียสอาจประกอบไปด้วยโมเลกุลของตัวถูกละลายตั้งแต่จำนวนไม่กี่สิบโมเลกุลไปจนถึงระดับพันโมเลกุล ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดและธรรมชาติของสารละลาย (Mullin, 1993) หลังจากการสร้างนิวเคลียสให้มีขนาดเท่ากับขนาดวิกฤต (critical size) แล้วจะเกิดการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวถูกละลายในสารละลายเข้ามาเกาะติดที่ผิวของนิวเคลียสเพื่อเกิดการโตเป็นผลึกที่สมบูรณ์ต่อไป กระบวนการสร้างนิวเคลียสหรือที่เรียกว่า nucleation process นั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือ primary nucleation และ secondary nucleation โดย primary nucleation คือ การสร้างนิวเคลียสขึ้นในระบบที่ยังไม่มีการตกผลึกเกิดขึ้นหรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการสร้างนิวเคลียสเพื่อการตกผลึกครั้งแรกของระบบ ซึ่ง primary nucleation สามารถแบ่งย่อยออกได้เป็น 2 ประเภท คือ homogeneous nucleation สำหรับการตกผลึกของสารละลายที่เกิดขึ้นได้เองเมื่อสารละลายนั้นมีความเข้มข้นอิ่มตัวยิ่งยวดที่สูงมากจนเข้าสู่ labile zone (Mullin, 1993) และ heterogeneous nucleation สำหรับการตกผลึกของสารละลายในสภาวะที่มีสิ่งเจือปนหรือสิ่งแปลกปลอมในระบบ โดยการสร้างนิวเคลียสสำหรับการตกผลึกแบบนี้สามารถเกิดขึ้นได้ที่สภาวะอิ่มตัวยิ่งยวดที่ไม่สูงมากนัก เนื่องจากสิ่งเจือปนหรือสิ่งแปลกปลอมในระบบจะช่วยลดพลังงานที่

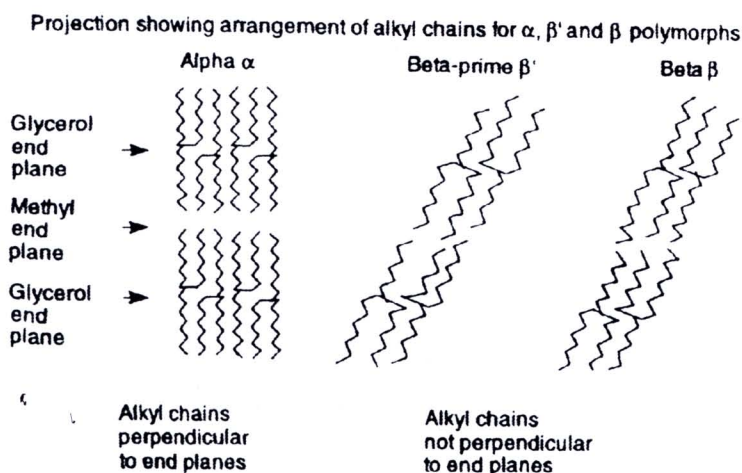
ต้องการใช้ในการสร้างนิวเคลียสหรือ free energy for nucleation ลง ส่วน secondary nucleation นั้นคือการสร้างนิวเคลียสขึ้นในระบบที่มีผลึกของตัวถูกละลายเกิดขึ้นหรือปรากฏอยู่แล้ว ซึ่งการสร้างนิวเคลียสแบบนี้ไม่เป็นที่ต้องการสำหรับการตกผลึกทางอุตสาหกรรมอาหาร เช่น การผลิตน้ำตาลทรายหรือนมข้นหวาน เป็นต้น เนื่องจากจะทำให้เกิดการกระจายตัวของขนาดของผลึก (crystal size distribution) สูง หรือมีความสม่ำเสมอของขนาดของผลึกต่ำนั่นเอง (Myerson, 2002) ถึงแม้ว่ากระบวนการตกผลึกจะถูกแบ่งเป็นขั้นตอนของการเกิดนิวเคลียสของผลึก การโตของผลึก และการเกิด crystal ripening หรือการเกิดการเปลี่ยนแปลงการกระจายขนาดของผลึก (Aquilano และ Sgualdino, 2001 อ้างอิงใน Himawan และคณะ, 2006) แต่ในกระบวนการตกผลึกอาจไม่ได้เรียงเกิดตามขั้นตอน แต่อาจเกิดนิวเคลียสของผลึกแบบ primary nucleation แล้วเกิดการโตของผลึก เกิด secondary nucleation ขณะที่ยังมีการโตของผลึกต่อไป และมีการเกิด crystal ripening ขณะที่มีการโตของผลึก ดังนั้นการอธิบายกระบวนการตกผลึกที่เป็นรูปแบบจึงยากและซับซ้อนมาก (Ghotra, 2002)

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

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

โครงสร้างผลึกแบบ β' มีโครงสร้างพื้นฐานของผลึกเป็นแบบ orthorhombic perpendicular โดยสายของกรดไขมันจะมีการทำมุมเอียงกับระนาบเมทิล ซึ่งจะทำให้การจัดเรียงตัวของโมเลกุลทำได้ อย่างแน่นหนาขึ้น โครงสร้างแบบ β' จึงมีความเสถียรมากกว่าโครงสร้างแบบ α รวมทั้งมีจุดหลอมเหลวและความหนาแน่นสูงกว่า (Kaneke, 2001) โครงสร้างแบบ β' ในเนยโกโก้ อาจได้จากการ

ลดอุณหภูมิของไขมันเหลวไปที่ 16°C คงไว้ 1 ชั่วโมง แล้วลดอุณหภูมิของไขมันไปที่ 10°C ภายใน 15 นาที (Solis-Fuentes และคณะ, 2005)



ภาพที่ 6 การจัดเรียงตัวของผลึกของไตรกลีเซอไรด์รูปแบบ α , β' และ β

ที่มา : Talbot (1999)

สุดท้ายโครงสร้างผลึกแบบ β เป็นโครงสร้างที่มีความเสถียรมากที่สุดและมีจุดหลอมเหลวสูงที่สุด มีโครงสร้างพื้นฐานของผลึกเป็นแบบ triclinic parallel โดยสายกรดไขมันของโครงสร้างนี้มีการทำมุมเอียงกับระนาบเมทิลมากกว่าเมื่อเทียบกับโครงสร้างแบบ β' โครงสร้างแบบ β ในเนยโกโก้ได้จากการลดอุณหภูมิของไขมันเหลวไปที่ 0°C แล้วเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 20-30°C เป็นเวลามากกว่า 40 ชั่วโมง (Solis-Fuentes และคณะ, 2005) โดยผลึกในรูปแบบ β จะแนวโน้มที่จะเกิดผลึกขนาดใหญ่มีลักษณะเป็นแผ่น (plate-like) (Czemiak และคณะ, 2005; Koay และคณะ, 2009)

โดยทั่วไปแล้วน้ำมันจะตกผลึกลงในโครงสร้างแบบ α ได้ง่ายที่สุด เนื่องจากใช้พลังงานในการตกผลึกน้อยที่สุด ขณะที่ β' จะตกผลึกได้ยากกว่า α เนื่องจากใช้พลังงานมากกว่า α ในการตกผลึก ส่วนโครงสร้างแบบ β ใช้พลังงานในการตกผลึกสูงที่สุดจึงตกผลึกได้ยากที่สุด (Sato, 2001) การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผลึกไขมันจะเกิดขึ้นตามเวลา โดยโครงสร้างแบบ α จะเปลี่ยนไปเป็น β' และ β เพื่อให้เกิดความเสถียรมากขึ้น แต่จะไม่สามารถเปลี่ยนโครงสร้างแบบย้อนกลับได้ นอกเสียจากว่า จะนำไขมันนั้นไปหลอมเหลวแล้วทำการตกผลึกใหม่ (Timms, 1995) ไขมันหลายชนิด เช่น เนยโกโก้ สามารถตกผลึกได้ทั้ง 3 โครงสร้าง (Beckett, 2000) โดย StoSt ซึ่งเป็นไตรกลีเซอไรด์หลักที่พบในเนยโกโก้ นั้น สามารถตกผลึกได้ถึง 5 รูปแบบ รวมถึงรูปแบบ β ทั้ง 2 แบบ คือ β_1 และ β_2 (Sato และคณะ, 1989 และ Sato, 2001) โดยเฉพาะ β_2 ซึ่งเทียบเท่ากับรูปแบบที่ v เป็นรูปแบบที่ถูกใช้มากใน

ผลิตภัณฑ์ขนมหวาน (Sato, 1996 และ Sato, 2001) อย่างไรก็ตามไขมันบางชนิดสามารถตกผลึกได้เฉพาะโครงสร้าง α และ β' (Sato, 1999) เนื่องจากองค์ประกอบของไขมันที่มีความแตกต่างกันจะส่งผลให้ไขมันเกิดเป็นผลึกหลาย ๆ รูปแบบประกอบกัน และมีแนวโน้มที่จะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่เป็นผลึกรูปแบบเดียว (Solis-Fuentes และคณะ, 2005)

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

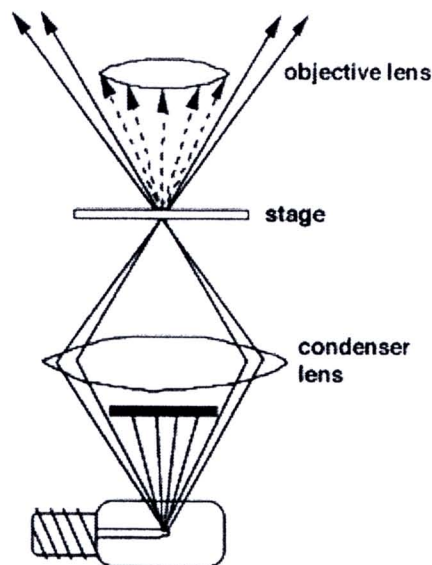
สำหรับการศึกษาพฤติกรรมการตกผลึกของไขมันและน้ำมันสามารถทำได้โดยอาศัยเทคนิคการวิเคราะห์และตรวจสอบที่หลากหลาย เช่น การวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนของวัตถุโดยใช้เครื่อง Differential scanning calorimetry (DSC), Synchrotron radiation X-ray diffraction (SR-XRD) หรือ Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR)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

2.7.1 การใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงทิศทางเดียว (Polarized light microscopy) เป็นการประยุกต์ใช้กล้องจุลทรรศน์แบบให้ภาพพื้นดำ (Dark field microscopy) โดยการตัดแสงจากแหล่งกำเนิดแสงให้ลำแสงที่ส่องผ่านวัตถุมีเพียงทิศทางเดียว ซึ่งจะให้ภาพของวัตถุบนพื้นสีดำ เป็นเทคนิคที่เพิ่มความคมชัดของการแสดงภาพ สามารถแยกความแตกต่างของภาพได้ดีกว่า และมีต้นทุนในการวิเคราะห์ต่ำ โดยการแสดงภาพของวัตถุด้วยแสงซึ่งไม่ถูกรวบรวมโดยเลนส์วัตถุ ทำให้เห็นวัตถุที่มีความสว่างบนพื้นสีดำ ซึ่งภาพพื้นดำจะปรากฏในลักษณะตรงข้ามกับภาพพื้นขาว โดยในภาพพื้นขาวแสงจากภายนอกที่เกี่ยวข้องจะทำให้เห็นเงาทอกลงบนผิวของวัตถุ หรือหากบางส่วนของพื้นผิววัตถุมีหลุมหรือรอยขีดข่วนจะทำให้การสะท้อนกลับของแสงต่ำลง ดังนั้นการที่ลักษณะพื้นผิวของวัตถุ

ราบเรียบมากขึ้นจะไม่ทำให้เกิดเงาบนภาพพื้นขาว ในขณะที่ในภาพพื้นดำแสงจะสะท้อนออกจากด้านข้างของวัตถุที่มีความสว่าง (Wikipedia encyclopedia, 2010)

การเดินทางของแสงที่ส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์พื้นดำแสดงดังภาพที่ 7 โดยแสงจากแหล่งกำเนิดแสงเดินทางผ่านแผ่นตัดแสงซึ่งจะตัดแสงบางส่วนออก จากนั้นเลนส์รวมแสงทำการรวบรวมแสงที่เหลือส่องผ่านวัตถุ โดยแสงเกือบทั้งหมดสะท้อนวัตถุ มีเพียงบางส่วนเกิดการสะท้อนออกจากวัตถุ แสงที่สะท้อนจะผ่านเลนส์วัตถุ ขณะที่แสงที่ส่องผ่านโดยตรงจะไม่ผ่านเลนส์วัตถุและไม่ถูกรวบรวม จึงมีเฉพาะแสงสะท้อนเท่านั้นที่จะทำให้เกิดภาพ

เพื่อแสดงวัตถุนบนพื้นดำ แผ่นทึบแสงจะถูกวางไว้ใต้เลนส์รวมแสง มีเพียงแสงที่สะท้อนจากวัตถุเท่านั้นที่จะเข้าตา แสงจะถูกสะท้อนโดยอนุภาคบนสไลด์แทนการส่องผ่าน ในกล้องจุลทรรศน์เชิงซ้อน แผ่นตัดแสง (occluding disk) จะถูกวางระหว่างแหล่งกำเนิดแสงและเลนส์รวมแสง โดยการปรับเพิ่มแสงจะช่วยให้เกิดผลที่ดีขึ้น และการหรี่ช่องกั้นแสงลงช่วยทำให้ภาพระหว่างวัตถุและพื้นหลังคมชัดขึ้น (Caprette, 2005)



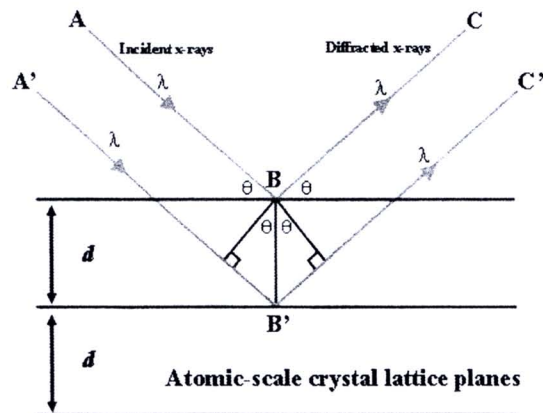
ภาพที่ 7 ภาพแสดงทิศทางของแสงที่ทำให้เกิดภาพพื้นดำ

ที่มา : Caprette (2005)

2.7.2 เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer) เป็นที่นิยมใช้ในการศึกษาโครงสร้างของผลึกและช่องว่างระหว่างอะตอม ความเครียดของโลหะ ขนาดของอนุภาค และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสาร ซึ่งผลึกของสารแต่ละชนิดมีขนาดของหน่วยเซลล์ที่ไม่เท่ากันและประกอบด้วยสารที่แตกต่างกัน เทคนิคนี้จึงเป็นการวิเคราะห์ที่รวดเร็วสำหรับการบ่งชี้โครงสร้างผลึก

ของสาร และสามารถให้ข้อมูลขนาด (ความกว้างและความยาว) ของหน่วยเซลล์จากการเลี้ยวเบนของรังสีไปตามช่องว่างระหว่างอะตอมภายในผลึกโดยไม่ทำลายชิ้นตัวอย่าง สารที่มักถูกวิเคราะห์ ได้แก่ สารที่ถูกบดละเอียดและสารที่ผ่านการโฮโมจีไนซ์

รูปแบบของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของการเลี้ยวเบนกับความเข้มสัมพัทธ์ของ peak ดังนั้นการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นใกล้เคียงกับขนาดของหน่วยเซลล์ คือ มีขนาดตั้งแต่ประมาณ 0.1-100 อังสตรอม จึงสามารถเลี้ยวเบนจากผลึกได้ คีเช่นเดียวกับแสงที่สามารถเลี้ยวเบนจากคิฟเฟอเรนซ์เกรตติง โดยรังสีเอกซ์ถูกสร้างจากหลอดแคโทดและกรองให้มีความยาวคลื่นเดียว แล้วปรับให้มีความเข้มข้นก่อนยิงไปที่ตัวอย่าง เมื่อรังสีตกกระทบบนอะตอมของผลึกจะเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีทำให้เกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันและหักล้างกันของรังสี



ภาพที่ 8 กฎการสะท้อนของแบรกก์ เมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบบนระนาบของผลึก
ที่มา : Henry และคณะ (2007)

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

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

ดังนั้นเมื่อรังสีเอกซ์มีความยาวคลื่นที่คงที่แล้ว มุมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะขึ้นกับระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก ทำให้เกิดการแทรกสอดแบบเสริมกัน และมีสภาวะตรงกฎของแบรกก์ การกระเจิงของรังสีจะถูกตรวจจับ ผ่านกระบวนการ และคำนวณโดยการสแกนผ่านช่วงมุม 2θ

ซึ่งทิศทางการกระเจิงที่เป็นไปได้ทั้งหมดได้มาจากสารที่มีลักษณะสุ่ม จากนั้นทำการแปลงค่า peak ของการกระเจิงเป็นค่า d-spacings ซึ่งจะบอกชนิดและค่า d เฉพาะของสารนั้น โดยทั่วไปค่า d จะถูกเทียบกับรูปแบบมาตรฐานของสารนั้น

จากที่กล่าวมาแล้วว่า โครงสร้างของผลึกมีความสำคัญต่อคุณสมบัติของไขมันและผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกจึงมีความสำคัญต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เทคนิคนี้จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดชนิดและโครงสร้างของโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ระหว่างกระบวนการตกผลึกซึ่งขึ้นกับระยะเวลาและอุณหภูมิในการตกผลึก โดยอาศัยการกระเจิงหรือการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ตามการจัดเรียงตัวของอะตอมในหน่วยเซลล์ที่เกิดจากการจัดเรียงตัวของสายไฮโดรคาร์บอนของไตรกลีเซอไรด์ ซึ่งจะให้ X-ray long spacing จากการสังเกตค่ามุม 2θ เท่ากับ 1-15 องศา และ X-ray short spacing จากการสังเกตค่าตั้งแต่มุม 16-25 องศา (Gibon, 1986 และ Durant และคณะ, 1986 อ้างอิงใน Ghotra และคณะ, 2002) ค่า long spacing จะขึ้นกับความยาวของสายไฮโดรคาร์บอนและมุมจากการจัดเรียงตัวของกรดไขมันในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ ในขณะที่ short spacing จะไม่ขึ้นกับความยาวของสายไฮโดรคาร์บอน (Jacobsberg และ Ho, 1976 อ้างอิงใน Ghotra และคณะ, 2002) ซึ่งจะถูกใช้ในการอธิบายลักษณะรูปแบบของผลึก โดยระยะห่างระหว่างอะตอมในรูปแบบ X-ray short spacings ของผลึกรูปแบบต่าง ๆ ของเนยโกโก้และของไขมันโดยทั่วไปแสดงดังตารางที่ 8 และ 9 ตามลำดับ

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

Polymorphic form	Short spacings (Å)
γ (sub- α), (form I)	4.17(s), 3.87(m) c 4.72(s), 3.88(s) g
α (form II)	4.20(vs) c 4.15 e, f, g
β'_2 (form III)	4.20(vs), 3.87(vw) c
β'_1 (form IV)	4.32(s), 4.13(s), 3.75(m), 3.88(w) c
β_2 (form V)	4.58(vs), 3.98(s), 3.73(s), 3.65(s), 5.38(m), 5.13(w), 4.22(w), 3.87(w) a, c, g 4.60(vs), 5.43(m), 3.99(m), 3.76(m), 3.88(w), 3.68(w) b, g 4.54(vs), 3.95(s), 5.34(m), 3.84(m), 3.73(m), 3.64(w) g 4.58, 3.98, 3.86, 3.74, 3.67 d
β_1 (form VI)	4.53(vs), 3.67(s), 5.37(m), 3.84(m), 4.01(w), 5.09(vw), 4.21(vw) c 4.59(vs), 3.70(s), 5.43(m), 3.86(m), 5.15(w), 4.04(w), 4.27(vw), 3.36(vw) g

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

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

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

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

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

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