

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการดำเนินงานวิจัย

4.1 การสกัดน้ำมันเมล็ดมะม่วง

เมื่อทำการสกัดน้ำมันจากเมล็ดมะม่วงด้วยเครื่อง Soxhlet ตามกรรมวิธีของ Solis-Fuentes และ Duran-de-Bazua (2004) พบว่า เมล็ดมะม่วงสายพันธุ์แก้วมีปริมาณน้ำมัน (Crude fat) เฉลี่ยประมาณ $7.28 \pm 0.19\%$ (น้ำหนักแห้ง) ซึ่งเป็นปริมาณที่ใกล้เคียงกับน้ำมันที่สกัดได้จากเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อื่นที่มีรายงานไว้ดังนี้ เมล็ดมะม่วงสายพันธุ์มะนิลา มีปริมาณน้ำมันเฉลี่ยประมาณ 5.28-11.26% (น้ำหนักแห้ง) (Solis-Fuentes และ Duran-de-Bazua, 2004) เมล็ดมะม่วงที่ได้จากมะม่วงในเมืองกวารา ประเทศไนจีเรีย (Kwara state of Nigeria) มีปริมาณน้ำมันเฉลี่ยประมาณ $13.511 \pm 3.967\%$ (น้ำหนักแห้ง) (Afolabi, 2008) และเมล็ดมะม่วงในประเทศปากีสถานมีน้ำมันเฉลี่ยประมาณ 10.01% (น้ำหนักแห้ง) (Anwer และคณะ, 2006) นอกจากนี้ Lakshminarayana และคณะ (1983) ยังรายงานถึงน้ำมันเมล็ดมะม่วงของประเทศอินเดียกว่า 43 สายพันธุ์ว่า มีปริมาณน้ำมันเฉลี่ยตั้งแต่ 3.7-12.6% (น้ำหนักแห้ง)

4.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของไขมันผสมและเนยโกโก้

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

4.2.1 การวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของไขมันผสมในอัตราส่วนต่าง ๆ เปรียบเทียบกับ CB ด้วยเครื่อง GC-FID โดยเปรียบเทียบค่า Retention time ของกรดไขมันในตัวอย่างกับกรดไขมันมาตรฐานเพื่อยืนยันชนิดของกรดไขมัน ซึ่งโครมาโตแกรมของไขมันผสมอัตราส่วนต่าง ๆ และ CB จากการวิเคราะห์ด้วย GC-FID นั้นได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข จากนั้นวิเคราะห์หาอัตราส่วนของปริมาณกรดไขมันชนิดต่าง ๆ โดยพิจารณาจากร้อยละของพื้นที่ใต้กราฟของกรดไขมันในไขมันผสมแต่ละอัตราส่วนเปรียบเทียบกับ CB จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ไขมันผสมทุกอัตราส่วนมีร้อยละของปริมาณของกรดไขมันชนิดต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบแตกต่างจากของ CB อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยร้อยละของปริมาณของกรดไขมันชนิดต่าง ๆ ที่ทำการวิเคราะห์ในไขมันผสมทุกอัตราส่วนและ CB ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ฉ เฉพาะร้อยละของปริมาณของกรดไขมัน

ชนิดที่เป็นองค์ประกอบหลักของ CB คือ กรดปาล์มมิติก กรดสเตียริก และกรด โอเลอิก ได้นำมาแสดงไว้ในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ร้อยละของปริมาณของกรดไขมัน* ที่เป็นองค์ประกอบของไขมันผสมและเนยโกโก้

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

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

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

MAF หมายถึง น้ำมันเมล็ดมะม่วง

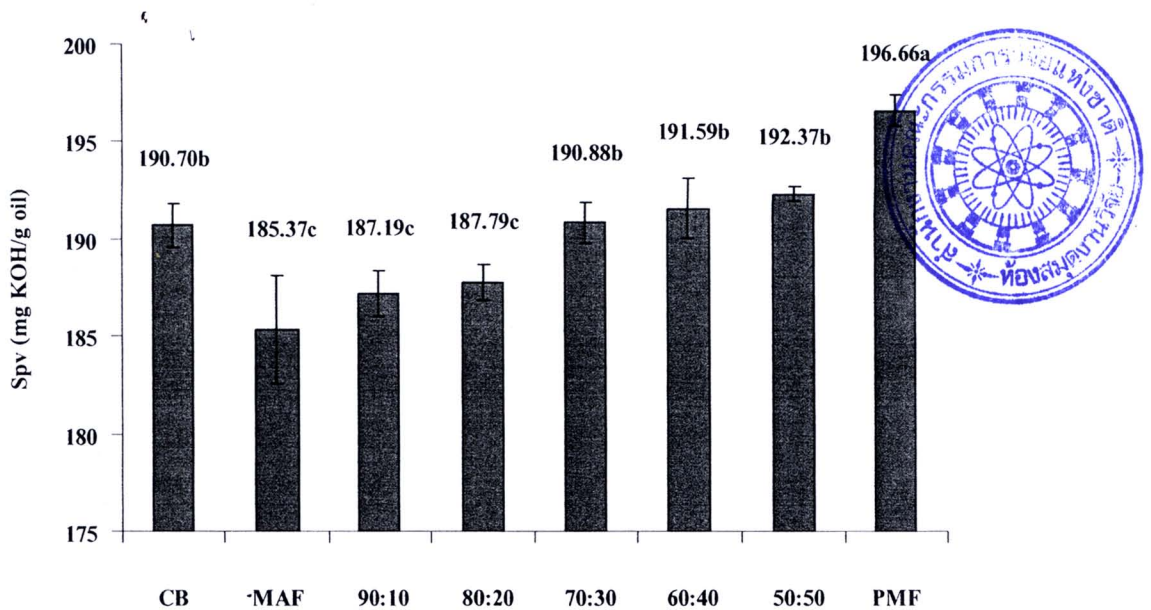
PMF หมายถึง น้ำมันปาล์มมิดเฟรคชั่น

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

จากตารางที่ 10 จะเห็นว่า MAF มีกรดสเตียริกและกรดโอเลอิกเป็นกรดไขมันหลัก ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Solis-Fuentes และ Duran-de-Bazua (2004) ในน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์ มะนิลา และการศึกษาของ Lakshminarayana และคณะ (1983) ใน MAF กว่า 43 สายพันธุ์ในประเทศ อินเดีย เนื่องจาก MAF เป็นแหล่งของไตรกลีเซอไรด์ชนิด StOst และ POSt ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ส่วน PMF ประกอบด้วยกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิกเป็นกรดไขมันหลัก เนื่องจากเป็นแหล่งของไตรกลีเซอไรด์ชนิด POP และ POSt อีกเล็กน้อย ดังนั้นเมื่อผสมน้ำมันทั้ง 2 ชนิด เข้าด้วยกันจะทำให้กรด

ไขมันที่เป็นองค์ประกอบเปลี่ยนแปลงไป โดยกรดปาล์มมิกจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ PMF ในไขมันผสมมีอัตราส่วนเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามกรดสเตียริกจะมีปริมาณลดลง สำหรับกรดโอเลอิกมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก แต่มีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อปริมาณของ PMF ในไขมันผสมมีอัตราส่วนเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นว่า ไขมันผสมทุกอัตราส่วนมีกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบหลักเหมือนกันและเหมือนกับของ CB คือ กรดปาล์มมิก กรดสเตียริก และกรดโอเลอิก

4.2.2 ค่าสaponification (Saponification value; Spv) คือ จำนวนมิลลิกรัมของ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ต้องการในการทำให้ไขมัน 1 กรัม เกิดสบู่ภายใต้สภาวะควบคุม หรือเป็นค่าที่แสดงถึงน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของกรดไขมันทั้งหมดที่มีในน้ำมันนั้นเอง กล่าวคือ หากกรดไขมันมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะมีค่า Spv สูง



ภาพที่ 9 แผนภูมิแสดงค่าสaponification (mg KOH/g oil) ของไขมันผสมและเนยโกโก้

หมายเหตุ ตัวอักษร a, b, c หมายถึง ตัวอักษรเดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ทางสถิติ ($p > 0.05$)

CB หมายถึง เนยโกโก้ MAF หมายถึง น้ำมันเมล็ดมะม่วง

PMF หมายถึง น้ำมันปาล์มมิดแฟรคชัน

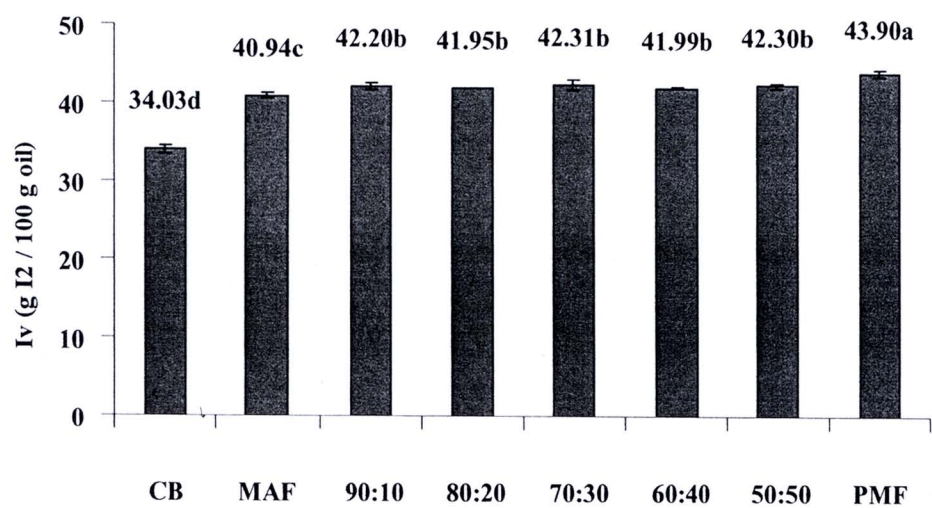
ผลการวิเคราะห์จากภาพที่ 9 แสดงให้เห็นว่า ค่า Spv ของ MAF มีค่าประมาณ 185.37 ± 2.79 mg KOH/g oil ซึ่ง Solis-Fuentes และ Duran-de-Bazua (2004) รายงานค่า Spv ของน้ำมันจากเมล็ดมะม่วงพันธุ์มะนิลาไว้เท่ากับ 189.0 mg KOH/g oil ในขณะที่ค่า Spv ของ PMF มีค่าประมาณ

196.66 $\pm$ 0.81 mg KOH/g oil ดังนั้นเมื่อผสมน้ำมัน 2 ชนิดเข้าด้วยกันแล้วจะเห็นว่า ค่า Spv ของไขมันผสมมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีปริมาณของ PMF เพิ่มขึ้น จากการวิเคราะห์กรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของไขมันผสมอัตราส่วนต่าง ๆ และ CB พบว่า PMF มีกรดปาล์มมิกซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่ากรดสเตียริกและกรดโอเลอิกในปริมาณที่สูงกว่าไขมันผสมอัตราส่วนอื่น ๆ และ CB จึงมีค่า Spv สูงที่สุด จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ค่า Spv ของ MAF และไขมันผสมอัตราส่วน 90:10 และ 80:20 (w/w) ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เช่นเดียวกันกับค่า Spv ของไขมันผสมอัตราส่วน 70:30, 60:40, 50:50 (w/w) และ CB ที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ค่า Spv ของ PMF มีความแตกต่างจากไขมันผสมอัตราส่วนอื่น ๆ และ CB อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เนื่องจากมีปริมาณของกรดปาล์มมิกสูงกว่าไขมันผสมอัตราส่วนอื่น ๆ และ CB มากนั่นเอง

4.2.3 ค่าไอโอดีน (Iodine value; Iv) หรือกรัมของไอโอดีนที่ถูกดูดซับ ณ ตำแหน่งพันธะคู่ของกรดไขมันไม่อิ่มตัวต่อ 100 กรัมของน้ำมัน เป็นดัชนีบ่งบอกความไม่อิ่มตัวของน้ำมัน โดยค่าไอโอดีนสูงหมายถึงไขมันหรือน้ำมันมีความไม่อิ่มตัวสูง จากผลการวิเคราะห์ที่แสดงดังภาพที่ 10 จะเห็นว่า ค่าไอโอดีนของไขมันผสมอัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50 (w/w) ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แต่มีความแตกต่างจากค่าไอโอดีนของ MAF, PMF และ CB ซึ่ง CB มีค่าไอโอดีนเท่ากับ 34.03 g I₂/น้ำมัน 100 g และมีค่าต่ำที่สุด กล่าวคือ CB มีระดับของความไม่อิ่มตัวต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับระดับความไม่อิ่มตัวของ MAF, PMF และไขมันผสมอัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50 (w/w) เนื่องจาก CB มีอัตราส่วนของกรดไขมันอิ่มตัวต่อกรดไขมันไม่อิ่มตัวเท่ากับ 1.76 ในขณะที่ MAF, ไขมันผสมอัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50 (w/w) และ PMF มีอัตราส่วนของกรดไขมันอิ่มตัวต่อกรดไขมันไม่อิ่มตัวเท่ากับ 1.20, 1.25, 1.27, 1.28, 1.27, 1.27 และ 1.35 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าของ CB แสดงว่ามีสัดส่วนของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวสูงกว่าจึงมีค่า Iv สูงกว่าของ CB

ความไม่อิ่มตัวของไขมันมีความสัมพันธ์โดยตรงกับจำนวนพันธะคู่ที่มีอยู่ในโมเลกุลของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของไตรกลีเซอไรด์ หากระดับความไม่อิ่มตัวสูงแสดงว่า ไขมันมีจำนวนพันธะคู่สูง ดังจะเห็นได้จากปริมาณของกรดไขมันไม่อิ่มตัวใน MAF, PMF และ CB โดยไขมันทั้ง 3 ชนิด มีปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวเรียงจากมากไปน้อยตามลำดับซึ่งสอดคล้องกับการที่ CB มีปริมาณของกรดโอเลอิกต่ำที่สุด โดยไขมันที่มีระดับความไม่อิ่มตัวสูงนั้นจะไม่เหมาะกับการนำไปผลิตเป็น CBE เพราะจะทำให้ได้ CBE ที่หลอมละลายได้ง่ายเกินไป นอกจากนี้ค่าไอโอดีนยังแสดงถึงความเป็นไปได้ที่จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอีกด้วย กล่าวคือ การมีค่าไอโอดีนในระดับสูงจะทำให้ไขมันหรือน้ำมันมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้สูง ทำให้อาจเกิดกลิ่นหืนขึ้นในผลิตภัณฑ์ที่มีไขมันหรือน้ำมันเป็นองค์ประกอบ แต่อย่างไรก็ตามการที่ไขมันหรือน้ำมันมีความไม่อิ่มตัวสูงจะมีคุณค่าทางโภชนาการสูง เนื่องจากกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเป็นกรดไขมันที่มีความจำเป็นต่อร่างกาย (นิรยา รัตนา

ปนนท์, 2548) โดยการรับประทานกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว เช่น กรดโอเลอิกในปริมาณที่พอเหมาะจะช่วยให้ระดับไขมันและคอเลสเตอรอลในเลือดลดลงได้ (วินัย คะห์ลัน, 2542)



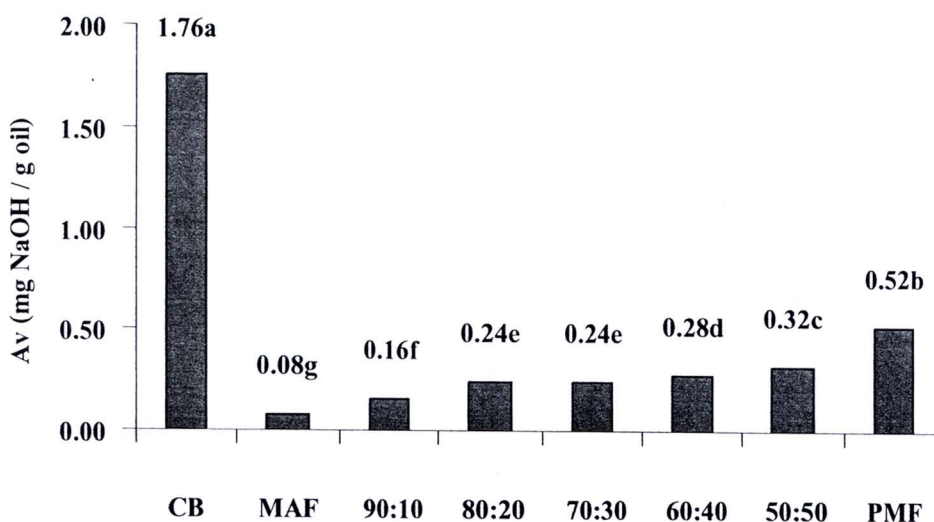
ภาพที่ 10 แผนภูมิแสดงค่าไอโอดีน (g I₂/น้ำมัน 100 g) ของไขมันผสมและเนยโกโก้

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

CB หมายถึง เนยโกโก้ MAF หมายถึง น้ำมันเมล็ดมะม่วง

PMF หมายถึง น้ำมันปาล์มชนิดแฟรคชัน

4.2.4 ค่าความเป็นกรดหรือค่า Av เป็นค่าที่แสดงถึงจำนวนมิลลิกรัมของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ใช้ในการทำให้กรดไขมันอิสระ 1 กรัมเป็นกลาง เมื่อไขมันเกิดการไฮโดรไลซ์จะทำให้ปริมาณกรดไขมันอิสระเกิดขึ้น ซึ่งกรดไขมันอิสระสามารถเกิดปฏิกิริยาก่อให้เกิดกลิ่นหืนได้ง่าย ดังนั้นจึงนิยมใช้ค่า Av เป็นตัวชี้สถานะหรือระดับการเหม็นหืนของไขมันหรือน้ำมัน กล่าวคือ หากค่า Av สูง แสดงว่า มีการเกิดกลิ่นหืนเนื่องจากปฏิกิริยา Hydrolytic rancidity มาก



ภาพที่ 11 แผนภูมิแสดงค่าความเป็นกรด (mg NaOH / g oil) ของไขมันผสมและเนยโกโก้

หมายเหตุ ตัวอักษร a ถึง g หมายถึง ตัวอักษรเดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ทางสถิติ ($p > 0.05$)

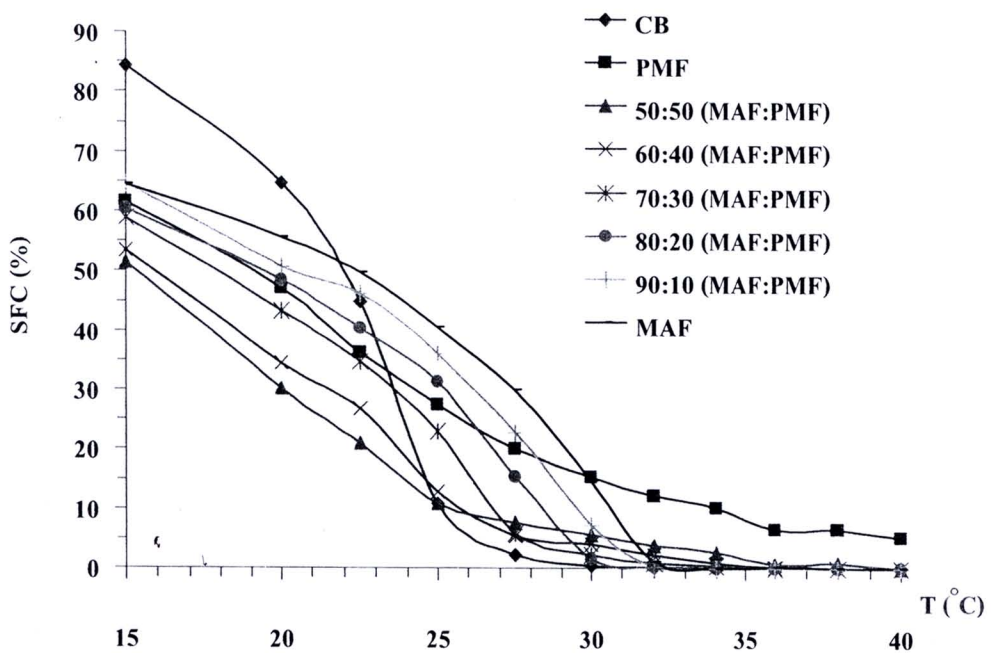
CB หมายถึง เนยโกโก้ MAF หมายถึง น้ำมันเมล็ดมะม่วง

PMF หมายถึง น้ำมันปาล์มชนิดแฟรคชัน

จากภาพที่ 11 ค่า Av ของ MAF มีค่าเท่ากับ 0.08 mg NaOH/ g oil และค่า Av ของ PMF มีค่าเท่ากับ 0.52 mg NaOH/ g oil ซึ่งทำให้ค่า Av ของไขมันผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของ PMF ในไขมันผสมเพิ่มมากขึ้น จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ค่า Av ของไขมันผสมทุกอัตราส่วนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ยกเว้นอัตราส่วน 80:20 และ 70:30 (w/w) ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) จะเห็นว่า CB มีค่า Av สูงที่สุดคือ 1.76 mg NaOH/ g oil (0.88% ของกรดไขมันอิสระในรูปของกรดโอเลอิก) แสดงว่า มีปริมาณของกรดไขมันอิสระสูงที่สุด นั่นคือ เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสซึ่งก่อให้เกิดกลิ่นหืนมากที่สุด โดยน้ำมันที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระในรูปของกรดโอเลอิกเท่ากับ 0.5-1.5% (คิดเป็นค่า Av เท่ากับ 1.00-2.99 mg NaOH/ g oil) จะเริ่มได้กลิ่นหืน (นิธินา รัตนูปนนท์, 2548) ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของน้ำมัน แต่ข้อกำหนดด้านคุณภาพของเนยโกโก้ระบุว่า อนุญาตให้เนยโกโก้มีค่า Av สูงสุดได้เท่ากับ 3.48 mg NaOH/ g oil (1.75% ของกรดไขมันอิสระในรูปของกรดโอเลอิก) (Beckett, 2000; Timms และ Stewart, 1999 อ้างถึงใน Stewart และ Timms, 2002) ดังนั้นเนยโกโก้จึงไม่เกิดกลิ่นหืนขึ้นเช่นเดียวกับตัวอย่างอื่น ๆ

4.2.5 ค่าความเป็นของแข็งในรูปผลึกของไขมัน (Solid fat content; SFC) เป็นการศึกษาระดับของการเป็นของแข็งในรูปผลึกที่อุณหภูมิต่าง ๆ และพฤติกรรมการหลอมเหลวของไขมันผสม

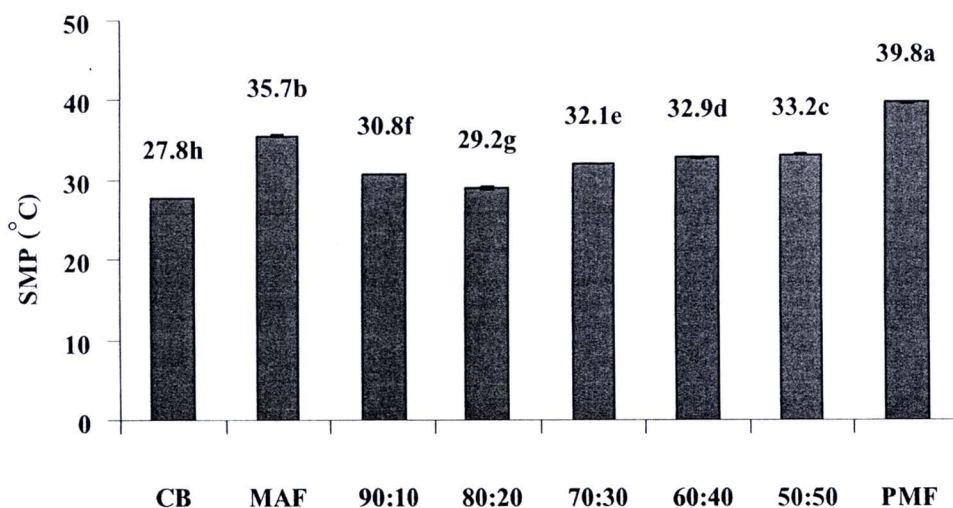
เปรียบเทียบกับ CB ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในช่วง 15-40°C โดยพบว่า ไขมันผสมและ CB เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า SFC ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 15-40°C ดังแสดงในภาพที่ 12 ซึ่งจะเห็นว่า CB มีค่า SFC ลดลงอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิในช่วง 20-30°C และเป็นศูนย์ที่อุณหภูมิประมาณ 34°C ทำให้ไม่รู้สึกเป็นไข (waxiness) เมื่อรับประทาน เนื่องจากผลึกของไขมันเกิดการหลอมละลายอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิของร่างกาย (~37°C) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ MAF พบว่า ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 15-22°C MAF มีค่า SFC ต่ำกว่า CB นั่นคือ MAF มีความแข็งแรงน้อยกว่า CB ในขณะที่อุณหภูมิตั้งแต่ 22°C ขึ้นไป MAF มีค่า SFC สูงกว่า CB นั่นคือ MAF มีความแข็งแรงมากกว่า CB ที่ช่วงอุณหภูมิดังกล่าว ซึ่ง Solis-Fuentes และ Duran-de-Bazua (2004) กล่าวว่า พฤติกรรมนี้อาจเกิดเนื่องจากความแตกต่างของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบ โดย MAF มีกรดโอเลอิกซึ่งเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัวในปริมาณสูงส่งผลให้เกิด dilution effect กับกรดไขมันอิ่มตัวในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ โดยไปลดปริมาณพลังงานที่ต้องการในการทำให้ไขมันเกิดการหลอมเหลว หรือทำให้ความเข้มข้นของกรดไขมันอิ่มตัวในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ซึ่งตกผลึกได้ง่ายกว่าลดลงซึ่งในแง่ของพลังงานความร้อนในการตกผลึกอาจกล่าวได้ว่า ไตรกลีเซอไรด์ต้องคายพลังงานสูงขึ้นในการตกผลึก เพราะกรดโอเลอิกต้องคายพลังงานความร้อนออกมาในปริมาณที่สูงกว่ากรดไขมันอิ่มตัวเพื่อให้เกิดการตกผลึกนั่นเอง ดังนั้น MAF จึงตกผลึกได้ยากกว่าเนยโกโก้ในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวทำให้ได้ไขมันที่มีลักษณะอ่อนกว่า ในทางตรงกันข้ามการที่ MAF มีกรดไขมันอิ่มตัวที่มีสายยาว เช่น กรดปาล์มิกและกรดลิโนเลอิก ซึ่งเป็นกรดไขมันที่มีจุดหลอมเหลวค่อนข้างสูงหรือต้องการพลังงานที่สูงกว่าในการทำให้เกิดการหลอมเหลวอย่างสมบูรณ์ (Solis-Fuentes และ Duran-de-Bazua, 2004) ไตรกลีเซอไรด์จึงยังคงอยู่ในรูปของของแข็งที่อุณหภูมิสูงกว่า 22°C MAF จึงมีค่า SFC สูงกว่า CB หรือมีลักษณะที่แข็งกว่านั่นเอง อย่างไรก็ตาม MAF จะเกิดการหลอมเหลวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิประมาณ 34°C เช่นเดียวกับ CB ในขณะที่ PMF มีค่า SFC ที่ต่ำกว่าทั้ง CB และ MAF ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 23°C แต่ยังคงมีค่า SFC คงเหลือเท่ากับ 10% ที่ 34°C และยังไม่เกิดการหลอมเหลวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 37°C ซึ่งจะทำให้เกิดความรู้สึกเป็นไขเมื่อรับประทาน นอกจากนี้ไขมันผสมทุกอัตราส่วนมีพฤติกรรมการหลอมเหลวที่แตกต่างกันขึ้นกับองค์ประกอบของกรดไขมันที่เกิดจากการผสมน้ำมัน 2 ชนิด ที่มีพฤติกรรมการหลอมเหลวแตกต่างกันเข้าด้วยกัน โดยที่ค่า SFC ของไขมันผสมทุกอัตราส่วนมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น และไขมันผสมเกือบทุกอัตราส่วนยกเว้นอัตราส่วน 50:50 (w/w) มีค่า SFC เป็น 0 หรือเข้าใกล้ 0 ที่ 37°C จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ที่อุณหภูมิ 32-40°C ไขมันผสมในอัตราส่วน 80:20 และ 90:10 (w/w) มีพฤติกรรมการหลอมเหลวไม่แตกต่างกับ CB อย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) นั่นคือ ค่า SFC ใกล้เคียงกันและลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวและมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ที่อุณหภูมิประมาณ 34°C เช่นเดียวกัน ทำให้คาดว่า ไขมันผสมอัตราส่วน 80:20 และ 90:10 (w/w) จะเกิดการละลายอย่างรวดเร็วในปากและไม่ให้ความรู้สึกเป็นไขเมื่อรับประทาน



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

หมายเหตุ CB หมายถึง เนยโกโก้ MAF หมายถึง น้ำมันเมล็ดมะม่วง
PMF หมายถึง น้ำมันปาล์มมิดแฟรคชั่น

4.2.6 จุดหลอมเหลว (Slip melting point; SMP) เป็นอีกคุณสมบัติหนึ่งที่มีความสำคัญในการคัดเลือกเนยโกโก้เลียนแบบชนิด CBE โดย CBE ที่ดีต้องมีช่วงของการหลอมเหลวที่คล้ายกับของ CB โดย SMP เป็นจุดที่แท่งไขมันในหลอดแคปิลลารีเกิดการเคลื่อนที่ขึ้นหลังจากการให้ความร้อนเนื่องจากแรงดันที่ทำให้เกิดการลอยตัว (buoyancy) ซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับแรงโน้มถ่วงของโลก เมื่อแรงดังกล่าวมีค่าเท่ากับน้ำหนักของน้ำที่ถูกแทนที่ด้วยไขมันปริมาตรเท่ากัน (Wikipedia encyclopedia, 2009)



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

หมายเหตุ ตัวอักษร a ถึง h หมายถึง ตัวอักษรเดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ทางสถิติ ($p > 0.05$)

CB หมายถึง เนยโกโก้ MAF หมายถึง น้ำมันเมล็ดมะม่วง

PMF หมายถึง น้ำมันปาล์มมิดแฟรคชัน

จากผลการวิเคราะห์ซึ่งแสดงดังภาพที่ 13 จะเห็นว่า ค่า SMP ของ CB มีค่าเท่ากับ 27.8°C ค่า SMP ของ MAF มีค่าเท่ากับ $35.7 \pm 0.1^\circ\text{C}$ และค่า SMP ของ PMF มีค่าเท่ากับ $39.8 \pm 0.1^\circ\text{C}$ ดังนั้นค่า SMP ของไขมันผสมน่าจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนของ PMF เพิ่มสูงขึ้น แต่จากภาพจะเห็นว่า เกิดการลดลงของค่า SMP ที่ไขมันผสมอัตราส่วน 90:10 และ 80:20 (w/w) ก่อนจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามปริมาณของ PMF ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากการเกิด eutectic effect ของการผสมน้ำมัน 2 ชนิด ที่มีรูปแบบของโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน กล่าวคือ MAF จะมีโครงสร้างผลึกที่เสถียรที่สุดเป็นแบบ β (Solis-Fuentes และคณะ, 2005) ในขณะที่ PMF ซึ่งได้จากน้ำมันปาล์มมีโครงสร้างผลึกที่เสถียรที่สุดเป็นแบบ β' (Samsudin และ Rahim, 1996; Ali และคณะ, 2001) ซึ่ง Koyano และ Sato (2002) กล่าวว่า การมีโครงสร้างผลึกหลายรูปแบบส่งผลให้เกิดเฟสที่เข้ากันได้และเฟสที่ไม่สามารถเข้ากันได้ของไขมัน โดยผลึกในรูปแบบ α สามารถเข้ากันได้กับรูปแบบ β' แต่มีแนวโน้มที่จะเกิดการแยกเฟส (phase separation) เมื่อมีผลึกในรูปแบบ β เกิดขึ้นในไขมันผสม หรือการเติมไขมันที่มีชนิดของไตรกลีเซอไรด์ที่มีการจัดเรียงตัว (chain length structure) แตกต่างกันเข้าด้วยกันนั้นส่งผลให้เกิดการลดลงของปริมาณไขมันที่เป็นของแข็งในรูปผลึกหรือค่า SFC เนื่องจากการแยกเฟสของไขมันเกิดขึ้น (Koyano

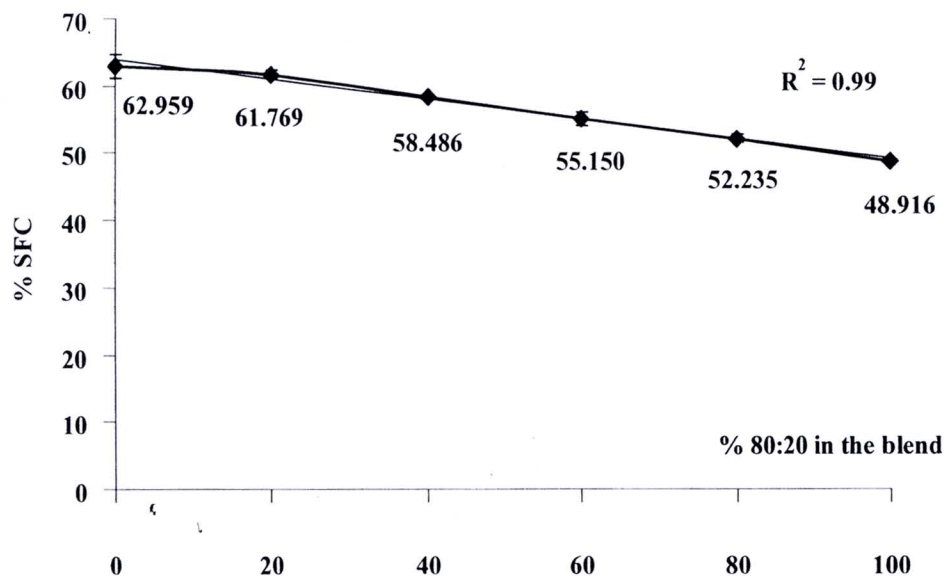
และ Sato, 2002) จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ค่า SMP ของไขมันผสมทุกอัตราส่วนมีความแตกต่างจากค่า SMP ของ CB อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตาม ค่า SMP ของไขมันผสมอัตราส่วน 80:20 (w/w) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 29.2°C มีความใกล้เคียงกับค่า SMP ของ CB มากที่สุด ทำให้ไขมันผสมอัตราส่วน 80:20 (w/w) มีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้เป็นเนยโกโก้เลียนแบบที่มีพฤติกรรมการหลอมเหลวใกล้เคียงกับ CB มากที่สุด

4.3 การคัดเลือกไขมันผสมในอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำไปใช้เป็น CBE

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

4.4 การวิเคราะห์ความเข้ากันได้ (Compatibility) ของไขมันผสมอัตราส่วนที่เลือกกับเนยโกโก้

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



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

หมายเหตุ ค่าที่แสดงในตารางได้มาจากค่าเฉลี่ยของ triplicate $\pm$ Standard deviation (S.D.)

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

4.5 การศึกษาพฤติกรรมการตกผลึกของเนยโกโก้เลียนแบบที่ผลิตได้ (CBE) และของ CBE ที่ผสมกับเนยโกโก้เปรียบเทียบกับพฤติกรรมการตกผลึกของเนยโกโก้

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

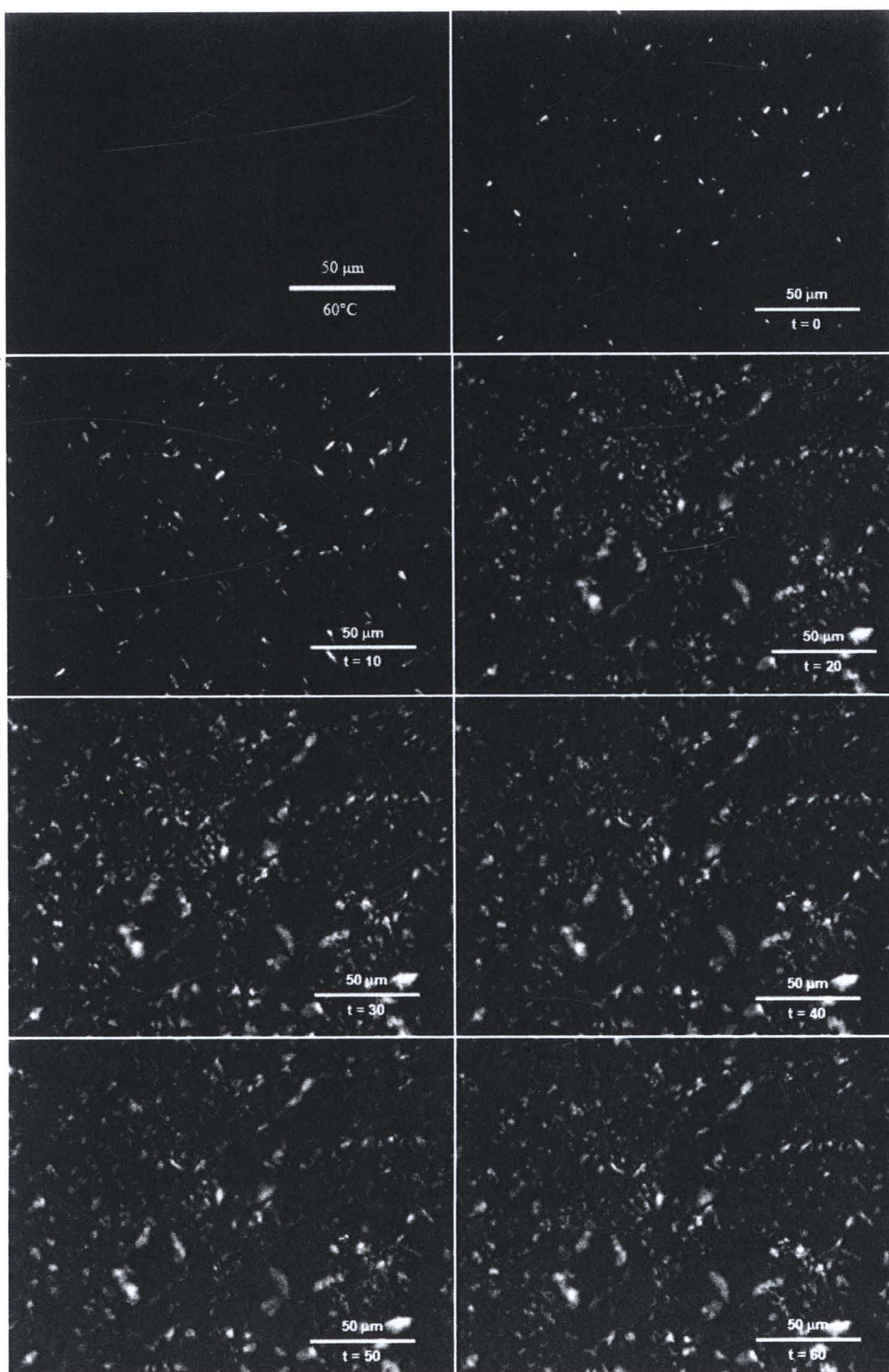
จากการถ่ายภาพการตกผลึกของ MAF ซึ่งแสดงไว้ในภาพที่ 15 จะพบว่า MAF จะเริ่มตกผลึกก่อนที่อุณหภูมิจะลดลงมาถึง 20°C และเมื่ออุณหภูมิลดลงเป็น 20°C ที่นาที่ที่ 0 พบว่า มีผลึกเป็นจำนวนมากในตัวอย่าง โดยผลึกมีขนาดเล็กและมีรูปร่างคล้ายเข็ม (needle-like) ซึ่งหลังจากนั้นมีการโตของขนาดของผลึกและมีการเพิ่มขึ้นของจำนวนผลึกอย่างต่อเนื่องซึ่ง Ghotra และคณะ (2002) กล่าวว่า ผลึกรูปเข็มมักจะเป็นผลึกที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลให้มีโครงสร้างแบบ β' ผลึกจะเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในนาที่ที่ 16 และเห็นเป็นผลึกขนาดใหญ่ชัดเจนในนาที่ที่ 18 ซึ่งคาดว่า บางส่วนของไขมันเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของผลึกจาก β' ไปเป็น β จากนั้นผลึกจะมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีจำนวนเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจนถึงนาที่ที่ 60 ส่วนไขมันชนิด PMF นั้นเริ่มตกผลึกก่อนที่อุณหภูมิจะลดลงมาถึง 20°C เช่นกันคือ เริ่มตกผลึกตั้งแต่อุณหภูมิประมาณ 24°C ดังภาพที่ 16 โดยมีผลึกที่ชัดเจนจำนวน 9 ผลึก มีรูปผลึกเป็นแบบทรงกลมที่มีผลึกแบบแผ่น (plate-like) มาโตเข้าด้วยกัน และเมื่ออุณหภูมิลดลงถึง 20°C (นาที่ที่ 0) พบว่า ผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผลึกขนาดของผลึกแตกต่างกันตั้งแต่ไม่น้อยกว่า 10 μm จนถึงมากกว่า 50 μm และมีการขยายขนาดขึ้นจนถึงนาที่ที่ 30 หลังจากนั้นจะมีการขยายขนาดขึ้นเพียงเล็กน้อยจนถึง 60 นาที่ ซึ่งผลึกที่ได้มีลักษณะเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Narine และ Humphrey (2004) ที่ถ่ายภาพผลึกของน้ำมันปาล์ม

เมื่อนำ CBE ที่ได้จากการนำ MAF มาผสมกับ PMF ในอัตราส่วน 80:20 (w/w) จะเห็นว่า CBE เริ่มเกิดการตกผลึกช้าลงดังแสดงในภาพที่ 17 โดยเริ่มตกผลึกในนาที่ที่ 2 ทั้งนี้อาจเนื่องจาก PMF ที่เติมลงไปมีชนิดของไตรกลีเซอไรด์ที่แตกต่างจาก MAF ส่งผลให้เกิดการขัดขวางการจัดเรียงตัวเป็นรูปผลึกของ MAF การตกผลึกจึงเกิดช้าลง โดยผลึกที่เกิดขึ้นมีลักษณะผสมกันระหว่างผลึกรูปเข็มและผลึกรูปทรงกลมซึ่งเกิดจากผลึกรูปเข็มมาประกอบกันอย่างสลับตามแนวรัศมีจากจุดศูนย์กลางของการโตของผลึก (Golden และคณะ, 2010) จากนั้นมีการเพิ่มขึ้นและการขยายขนาดของผลึกตามเวลา และเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผลึกในนาที่ที่ 35 ก่อนจะเห็นเป็นผลึกขนาดใหญ่ชัดเจนในนาที่ที่ 45 ซึ่งเป็นไปได้ว่า ผลึกที่เกิดขึ้นนั้นมีการผสมกันระหว่างผลึกขนาดเล็กของ β' และผลึกขนาดใหญ่ของ β การที่ผลึกเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างช้าลงเมื่อเทียบกับการตกผลึกของ MAF ในภาพที่ 15 มีความสอดคล้องกับที่ Persmark และคณะ (1976) กล่าวว่า ไขมันน้ำมันปาล์มลงใน

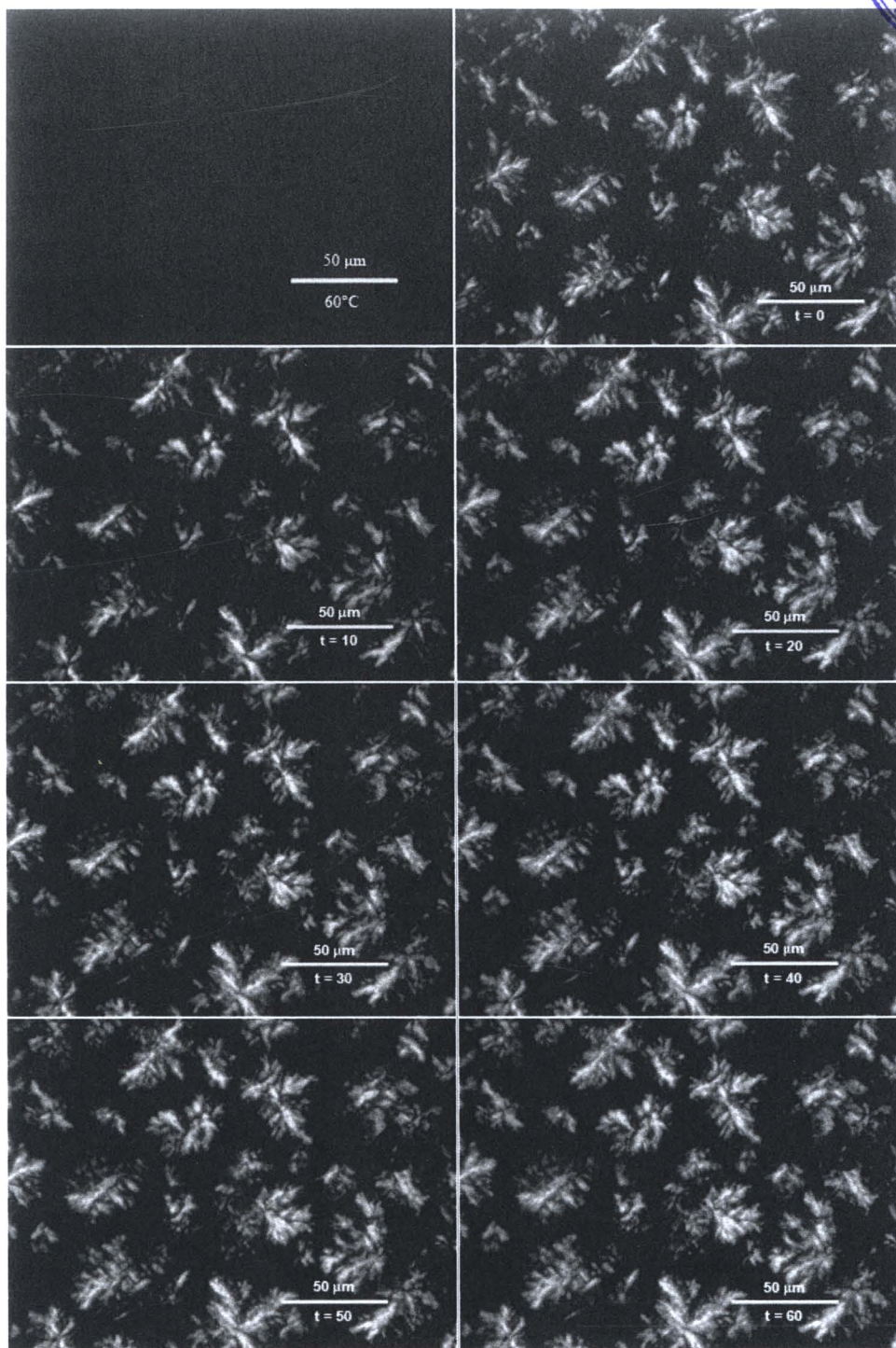
ไขมันผสมมีผลต่อความคงตัวของผลึกโดยจะชะลอหรือป้องกันการเปลี่ยนโครงสร้างจาก β' ไปเป็น β (Ghotra และคณะ, 2002)

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

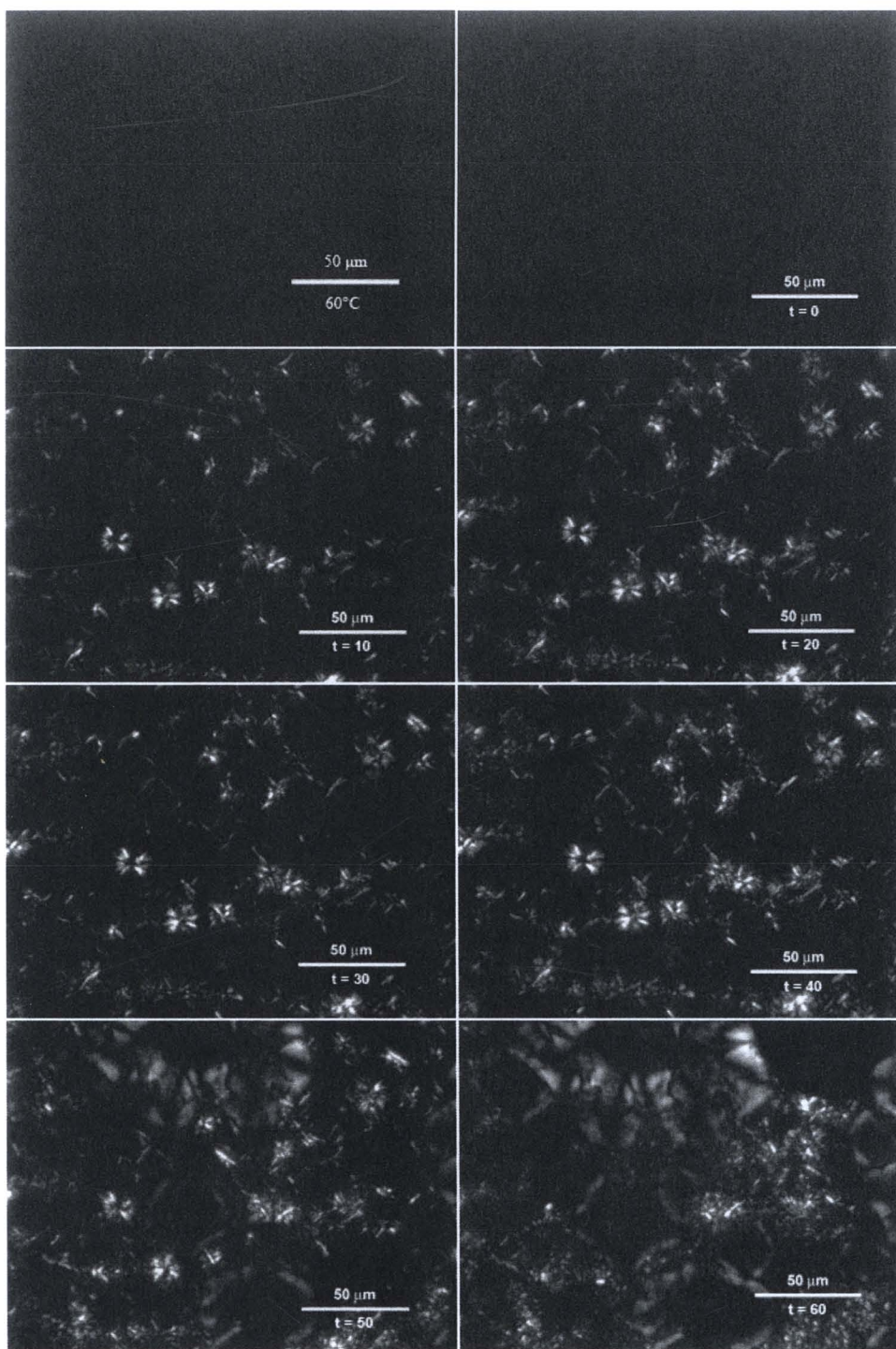
สำหรับตัวอย่าง MIX ที่ได้จากการนำ CBE มาผสมกับ CB ในอัตราส่วน 1:5.64 (w/w) นั้น พบว่า ไขมันเริ่มตกผลึกเป็นจำนวนมากในนาทีที่ 2 (ภาพที่ 19) เช่นเดียวกับ CBE โดยมีรูปร่างของผลึกเป็นแบบเข็ม จากนั้นผลึกมีจำนวนเพิ่มขึ้นและเกิดการซ้อนทับกันของผลึกจำนวนมากเช่นเดียวกับ CB ซึ่งจากการที่มีการผสมกันของไขมันถึง 3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



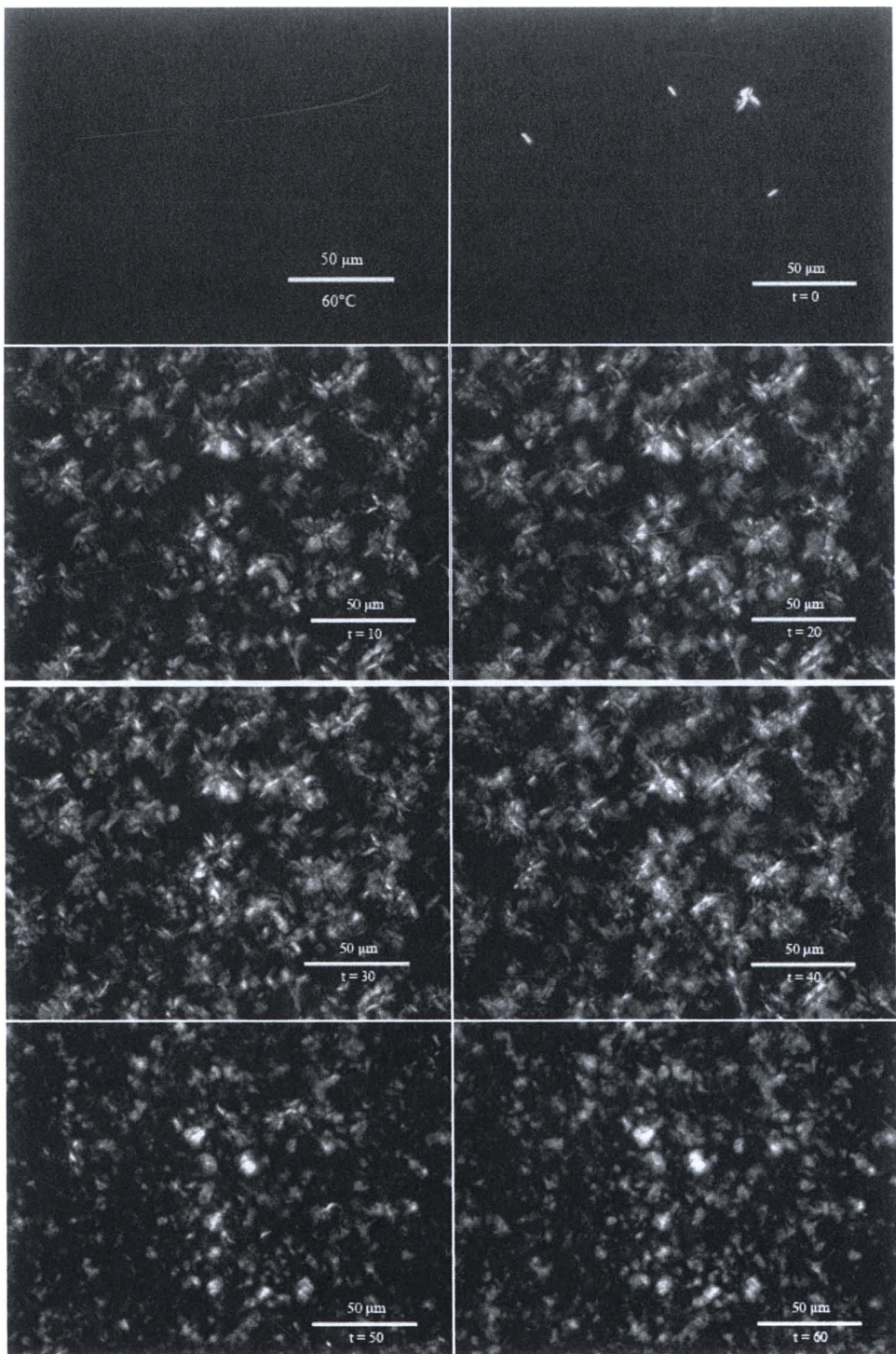
ภาพที่ 15 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของ MAF ตามเวลา (t มีหน่วยเป็นนาที)
 ทุก ๆ 10 นาที ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 500 เท่า



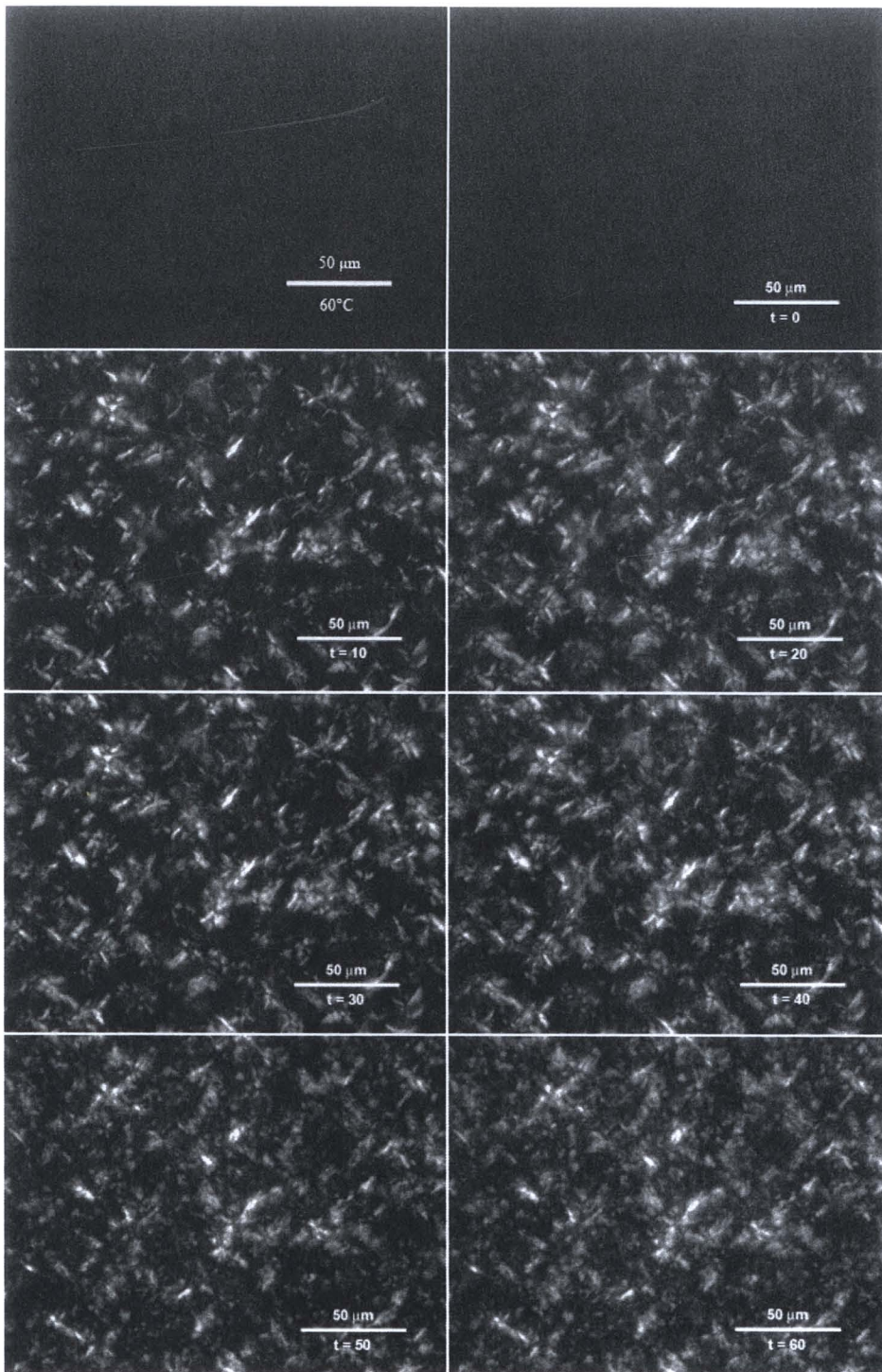
ภาพที่ 16 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของ-PMF ตามเวลา (t มีหน่วยเป็นนาที)
 ทุก ๆ 10 นาที ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 500 เท่า



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



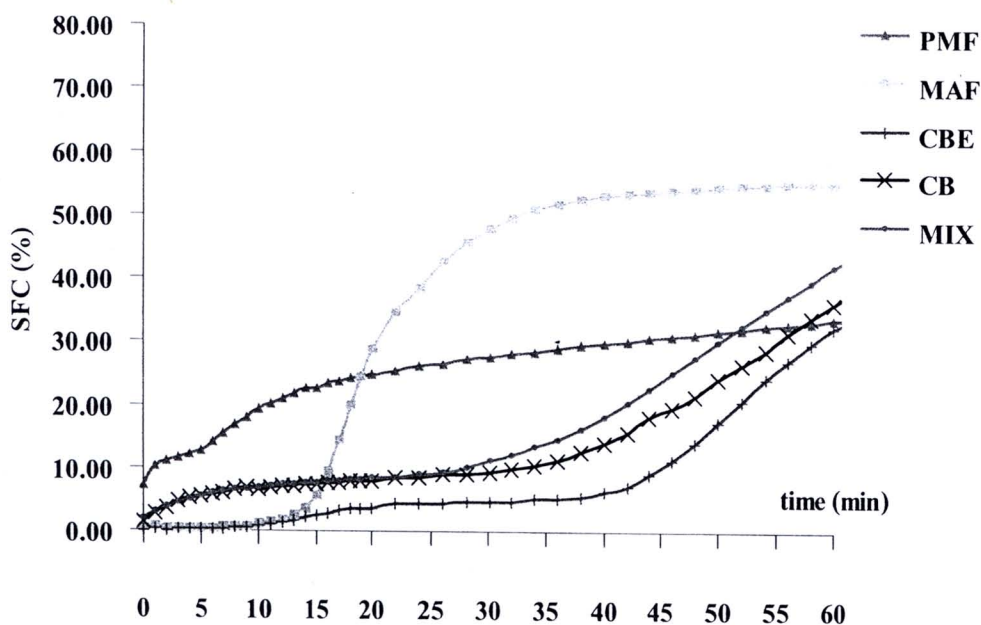
ภาพที่ 18 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของ CB ตามเวลา (t มีหน่วยเป็นนาที่)
 ทุกๆ 10 นาที่ ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 500 เท่า



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

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

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



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

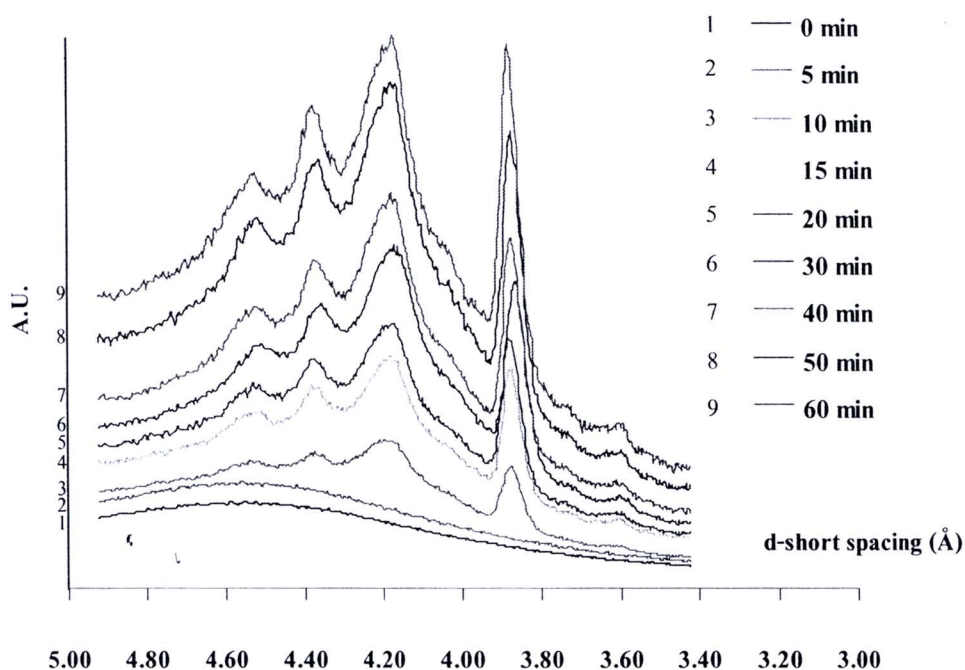
จากภาพที่ 20 จะสังเกตเห็นว่า ค่า SFC ของ MAF ในช่วงต้น (ประมาณ 10 นาทีแรก) มีค่าต่ำมากและค่อนข้างคงที่ซึ่งจากภาพถ่ายผลึกจะเห็นว่า ผลึกมีขนาดเล็กมาก จนกระทั่งเริ่มมีการเพิ่มขึ้นของค่า SFC ในนาที่ที่ 10 ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกตามเวลาด้วยเครื่อง XRD ว่ามีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกเกิดขึ้นซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป จากนั้นค่า SFC เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตั้งแต่นาทีที่ 15 ซึ่งใกล้เคียงมากกับผลที่ได้จากการถ่ายภาพผลึกที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผลึกในนาที่ที่ 16 ทำให้สามารถวัดค่า SFC ได้เพิ่มขึ้น ก่อนที่ค่า SFC จะเริ่มคงที่อีกครั้งในนาที่ที่ 35 โดยมีค่า SFC ประมาณ 55% เนื่องจากผลึกมีการเปลี่ยนแปลงขนาดเพียงเล็กน้อยเท่านั้นซึ่งค่า SFC ของ MAF ยังคงไม่เปลี่ยนแปลงจนถึงระยะเวลา 3 ชั่วโมง (ภาคผนวก ก) ในขณะที่ค่า SFC ของ PMF ที่นาที่ที่ 0 มีค่าสูงที่สุด (ประมาณ 7%) สอดคล้องกับการที่ PMF เกิดการตกผลึกก่อนที่อุณหภูมิจะลดลงมาถึง 20°C และมีผลึกให้เห็นชัดเจนเมื่ออุณหภูมิลดลงถึง 20°C ซึ่งค่า SFC ของ PMF มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแต่ไม่มากนัก เนื่องจากลักษณะผลึกที่ได้จากการถ่ายภาพยืนยันว่า ผลึกมีการเปลี่ยนแปลงทางด้านขนาดเท่านั้นโดยขนาดจะใหญ่ขึ้นจนถึงนาที่ที่ 30 ซึ่งจากภาพที่ 20 จะเห็นว่า เป็นช่วงที่มีการเพิ่มขึ้นของค่า SFC หลังจากนั้นค่า SFC เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเนื่องจากผลึกยังคงมีการขยายขนาดขึ้นจนถึงนาที่ที่ 60 เมื่อพิจารณา ค่า SFC ของ CBE พบว่า มีกลไกการตกผลึกในช่วงต้นที่เหมือนกับ MAF เนื่องจากใน CBE มี MAF เป็นองค์ประกอบในปริมาณมากถึง 80% แต่มีการเพิ่มขึ้นของค่า SFC ที่ค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับ MAF จนถึงนาที่ที่ 40 เพราะการเติมน้ำมันปาล์มลงในไขมันผสมมีผลชะลอการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างของผลึกดังที่กล่าวมาแล้ว (Ghotra และคณะ, 2002) ก่อนที่ค่า SFC จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในนาที่ที่ 45 ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่ายผลึกที่เห็นผลึกที่มีขนาดใหญ่ สำหรับกลไกการตกผลึกของ CB และ MIX มีลักษณะเหมือนกันจนถึง 25 นาที และมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนถึงนาที่ที่ 40 แล้วเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตั้งแต่นาทีที่ 45 สอดคล้องกับภาพถ่ายที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผลึก และเป็นการยืนยันว่า การเติม CBE ลงใน CB ไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของ CB

จากที่กล่าวมาจะเห็นว่า ระยะเวลาก่อนการเริ่มตกผลึกของ MAF และ CBE มีค่ามากที่สุด PMF มีความเร็วในการตกผลึกสูงที่สุดในขณะที่ MAF และ CBE มีความเร็วในการตกผลึกต่ำที่สุด แต่ MAF มีระดับของการตกผลึกสูงที่สุดจากค่า SFC ที่วัดได้ที่ 20°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงของค่า SFC ของไขมันตัวอย่างจนถึง 3 ชั่วโมง ซึ่งกราฟแสดงไว้ในภาคผนวก ก พบว่า CB และ MIX มีระดับของการตกผลึกสูงที่สุดโดยมีค่า SFC ประมาณ 68% และ 66% ตามลำดับ การที่สามารถศึกษากลไกของการตกผลึกได้จากการเปลี่ยนแปลงของค่า SFC ตามเวลาได้ เนื่องจากค่า SFC มีความไวต่อการเกิดผลึกและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผลึก (Marangoni และ Mcgauley, 2003)

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

4.5.3.1 โครงสร้างผลึกของ MAF

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

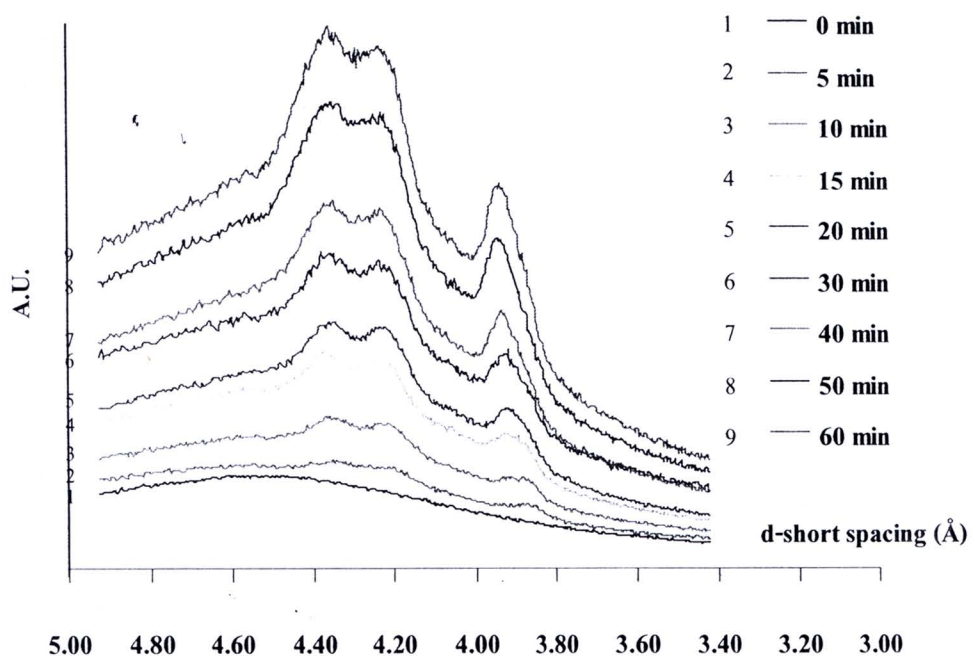


ภาพที่ 21 X-ray diffraction pattern ของ MAF ที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของการตกผลึกที่ 20°C

4.5.3.2 โครงสร้างผลึกของ PMF

จากภาพที่ 22 พบว่า ที่นาที่ที่ 0 เกิด peak ที่ d เท่ากับ 3.88 Å ซึ่งอาจเป็น peak ของ γ หรือเป็นของ β' เนื่องจากค่า d เท่ากับ 3.88 Å เป็นได้ทั้งของผลึกในรูปแบบ γ และ β' (Souza และคณะ, 1990 และ Brien, 1998 อ้างอิงใน Solis-Fuentes และคณะ, 2005; Czerniak, 2005) แต่ในงานวิจัยนี้คาดว่า ค่า d ดังกล่าวน่าจะสอดคล้องกับโครงสร้างแบบ β' ทั้งนี้เพราะจากการถ่ายภาพการตกผลึกด้วยเทคนิค PLM (ภาพที่ 16) พบว่า PMF เกิดการตกผลึกตั้งแต่อุณหภูมิประมาณ 24°C เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวค่อนข้างสูง (SMP เท่ากับ 39.8°C) จึงเป็นไปได้ที่ PMF ตกผลึกลงในโครงสร้างที่ไม่เสถียรที่ 24°C แล้วมีการเปลี่ยนแปลงของผลึกเกิดขึ้นไปเป็นโครงสร้างแบบ β' ก่อนที่อุณหภูมิจะลดลงมาที่ 20°C ต่อมาในนาที่ที่ 5 จะเห็นว่า ผลึกอยู่ในรูปแบบ β' จากการเกิด peak ที่ d เท่ากับ 3.88 และ 4.20 Å (Narine และ Humphrey, 2004) และมีผลึกในรูปแบบ pseudo- β' จากค่า d เท่ากับ 4.35 Å ซึ่งใกล้เคียงกับที่รายงานไว้โดยของ Souza และคณะ (1990) และ Brien (1998) ว่าผลึกรูปแบบ pseudo- β' มีค่า d ที่ 4.40 Å (Solis-Fuentes และคณะ, 2005) นอกจากนี้ยังมีผลึกแบบ β จากการเริ่มเกิด peak ที่ d เท่ากับ 4.55 Å (Ahmadi และ Marangoni, 2009) ซึ่งมีในปริมาณที่น้อยมากหากเทียบกับผลึกรูปแบบอื่น ๆ เช่นเดียวกับที่ Omar และคณะ (2005) รายงานว่า ในน้ำมันปาล์มอาจมีผลึกแบบ β อยู่ในปริมาณที่น้อยมาก จากนั้นผลึกทั้งหมดยังคงรูปแบบเช่นนี้จนถึงนาที่ที่ 60 แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงในด้านปริมาณของ

ผลึกของโครงสร้างต่าง ๆ โดยผลึกรูปแบบ β' และ pseudo- β' มีปริมาณเพิ่มขึ้นจากการเพิ่มขึ้นของค่าความเข้มสัมพัทธ์ของ peak ที่ 3.88 และ 4.20 Å สำหรับ β' และที่ 4.40 Å สำหรับ pseudo- β' ซึ่งเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนดังภาพที่ 22 (ความเข้มสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น 92.35%, 92.72% และ 95.63% ตามลำดับ จากนาที่ที่ 5 ถึงนาที่ที่ 60) ในขณะที่ไม่มีการเพิ่มขึ้นของผลึกรูปแบบ β โดย Sato (1999) และ Awad และ Sato (2000) กล่าวว่า ไขมันที่มีกรดปาล์มมิติกในปริมาณสูงจะถูกเร่งให้เกิดผลึกในรูปแบบ β' ซึ่งสอดคล้องกับการที่ PMF มีกรดปาล์มมิติกเป็นองค์ประกอบในปริมาณถึง 51.65%

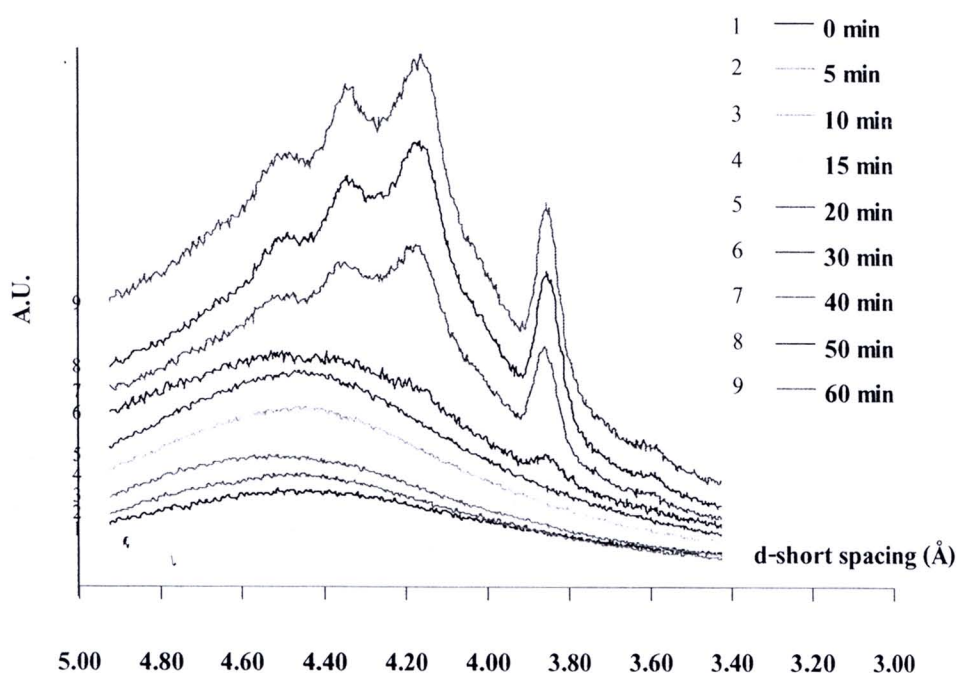


ภาพที่ 22 X-ray diffraction pattern ของ PMF ที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของการตกผลึกที่ 20°C

นอกจากนี้ Kheiri (1982) ได้รายงานไว้ว่า PMF จะตกผลึกในรูปแบบ β_2' เพราะมีองค์ประกอบของไตรกลีเซอไรด์ชนิด PPO และไตรกลีเซอไรด์ชนิดไม่อิ่มตัวอื่น ๆ จากน้ำมันปาล์มโอเลอิน (Ali และคณะ, 2001) นอกจากนี้งานวิจัยของ Ali และคณะ (2001) ที่ผสม PMF เข้ากับน้ำมันมะพร้าวพบว่า ไขมันมีโครงสร้างที่เสถียรที่สุดเป็นแบบ β' แต่เมื่อนำไปผสมกับ CB แล้วพบว่าที่ระยะเวลาของการเก็บรักษาเท่ากับ 8 สัปดาห์ อุณหภูมิ 18°C ไขมันผสมตกผลึกในโครงสร้างแบบ $\beta \gg \beta'$ ซึ่งอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางเทอร์โมไดนามิกส์เพื่อให้เกิดความเสถียรของระบบ และที่ 30°C ไขมันผสมมีโครงสร้างผสมกัน 2 รูปแบบ คือ β' และ β ในงานวิจัยนี้หลังจากตกผลึกเป็นเวลา 60 นาทีแล้วผลึกของ PMF ส่วนใหญ่อยู่ในโครงสร้างแบบ β' ซึ่งเหมือนกับตัวอย่าง MAF

4.5.3.3 โครงสร้างผลึกของ CBE

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

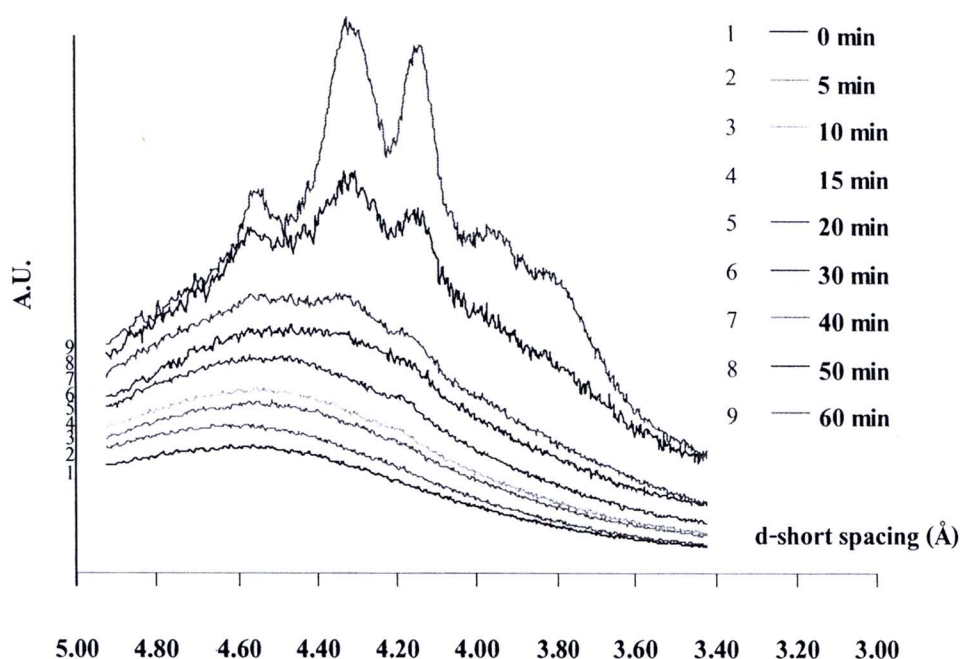


ภาพที่ 23 X-ray diffraction pattern ของ CBE ที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของการตกผลึกที่ 20°C

4.5.3.4 โครงสร้างผลึกของ CB

จากผลการวิเคราะห์ X-ray diffraction pattern ดังแสดงในภาพที่ 24 พบว่า CB จะเริ่มตกผลึกในรูปแบบที่ II หรือ α ตั้งแต่เวลาที่ 5 และคงรูปแบบนี้จนถึงเวลาที่ 30 เนื่องจากมีค่า d ที่ 4.18 Å ซึ่งใกล้เคียงกับค่า d ของรูปแบบที่ II ของผลึกของ CB ในงานวิจัยของ Marangoni และ Magualey (2003) และยังมีผลที่สอดคล้องกันกล่าวคือ ที่อุณหภูมิ 20°C ผลึกของ CB จะคงรูปแบบ α จนถึง 30 นาที และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sonwai และ Mackley (2006) ที่กล่าวไว้ว่า CB จะตกผลึกในรูปแบบที่ II ที่อุณหภูมิ 20°C จากนั้นในเวลาที่ 40 จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของผลึกในรูปแบบที่ II ไปเป็นรูปแบบที่เสถียรกว่าคือ รูปแบบที่ IV (β_1') และ V (β_2) ด้วยค่า d ที่ 3.81, 3.97, 4.18 และ 4.34 Å สำหรับรูปแบบที่ IV และเริ่มมีค่า d ที่ 4.54 Å สำหรับรูปแบบที่ V ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากเทคนิค PLM และการศึกษากลไกการตกผลึกที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงของผลึกและค่า SFC ในเวลาที่ 40 และเริ่มมีการเพิ่มขึ้นของค่า SFC จากการศึกษากลไกการตกผลึก จะเห็นว่า จำนวน peak ของรูปแบบที่ IV มีมากถึง 4 peaks ที่ชัดเจน ดังนั้นไขมันส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปแบบนี้ และบางส่วนของรูปแบบที่ IV เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วไปเป็นรูปแบบที่ V ในเวลาที่ 40 โดยไม่พบผลึกในรูปแบบที่ III เช่นเดียวกับ Sonwai และ Mackley (2006) เนื่องจากไม่มีฟีดของรูปแบบที่ III เกิดขึ้นที่ค่า d เท่ากับ 3.86, 4.62 และ 4.92 Å เช่นเดียวกัน ซึ่ง Marangoni และ Magualey (2003) กล่าวว่า ที่อุณหภูมิระหว่าง 5-22.5°

C ผลึกแบบ β' จะเป็นโครงสร้างหลักที่เกิดขึ้นใน CB และที่อุณหภูมิมากกว่า 15°C ผลึกในรูปแบบ β' สามารถเปลี่ยนเป็นแบบ β ได้ แต่ β จะไม่สามารถเกิดได้โดยตรงจากไขมันเหลว อย่างไรก็ตามในงานวิจัยของ Foubert และคณะ (2006) ไม่พบการตกผลึกในรูปแบบ β ที่ระยะเวลาการตกผลึกเท่ากับ 1 ชั่วโมง ที่ 20°C และการที่ผลึกเกิดการเปลี่ยนแปลงจากรูปแบบที่ II ไปเป็นรูปแบบที่ IV นั้นมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sonwai และ Mackley (2006) และ Van Malssen และคณะ (1999), McGuley และ Marangoni (2002) ที่กล่าวว่า ภายใต้อุณหภูมิที่ผลึกในรูปแบบที่ II จะเกิดขึ้นโดยตรงจากไขมันเหลว แล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นรูปแบบที่ IV เพื่อให้มีความเสถียรมากขึ้น (Maleky และ Marangoni, 2008) และสภาวะในการตกผลึก (คงที่ที่ 20°C) เหมาะสำหรับการตกผลึกในรูปแบบที่ IV ถึงแม้ว่า จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผลึกเกิดขึ้นในการศึกษาการรูปร่างของผลึกด้วยเทคนิค PLM (Sonwai และ Mackley, 2006)



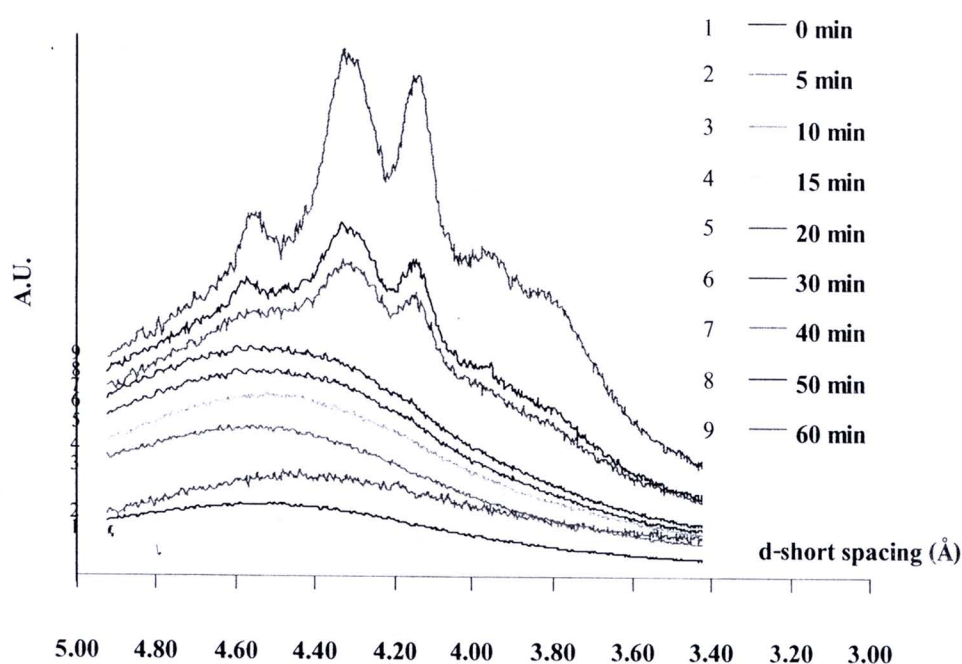
ภาพที่ 24 X-ray diffraction pattern ของ CB ที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของการตกผลึกที่ 20°C

หลังจากนั้นในนาที่ที่ 50 และ 60 จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบผลึกโดยเกิดการเพิ่มขึ้นของปริมาณผลึกรูปแบบที่ IV อย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับรูปแบบที่ V จากการเพิ่มขึ้นของความเข้มของ peaks ของรูปแบบที่ IV ที่ค่า d เท่ากับ 3.81, 3.97, 4.18 และ 4.34 Å เมื่อเทียบกับรูปแบบที่ V ที่ค่า d เท่ากับ 4.54 Å ซึ่งเพิ่มขึ้นแต่ในปริมาณที่น้อยกว่า โดยความเข้มสัมพัทธ์ของ peaks ของ

รูปแบบที่ IV เพิ่มขึ้นจากนาที่ที่ 40 ถึงนาที่ที่ 60 เท่ากับ 62.42% และ 58.73% ที่ 4.18 และ 4.34 Å ตามลำดับ เมื่อเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมง ผลึกยังคงมีรูปแบบที่ IV และ V โดยมีรูปแบบที่ IV เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่รูปแบบที่ V ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก แสดงว่า CB ส่วนจะเกิดการตกผลึกอยู่ในโครงสร้างผลึก รูปแบบที่ IV หรือ β_1' และมีเพียงบางส่วนที่อยู่ในโครงสร้างที่ V หรือ β_2 ซึ่งกราฟที่นาที่ที่ 180 แสดงไว้ในภาคผนวก ก

4.5.3.5 โครงสร้างผลึกของ MIX

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



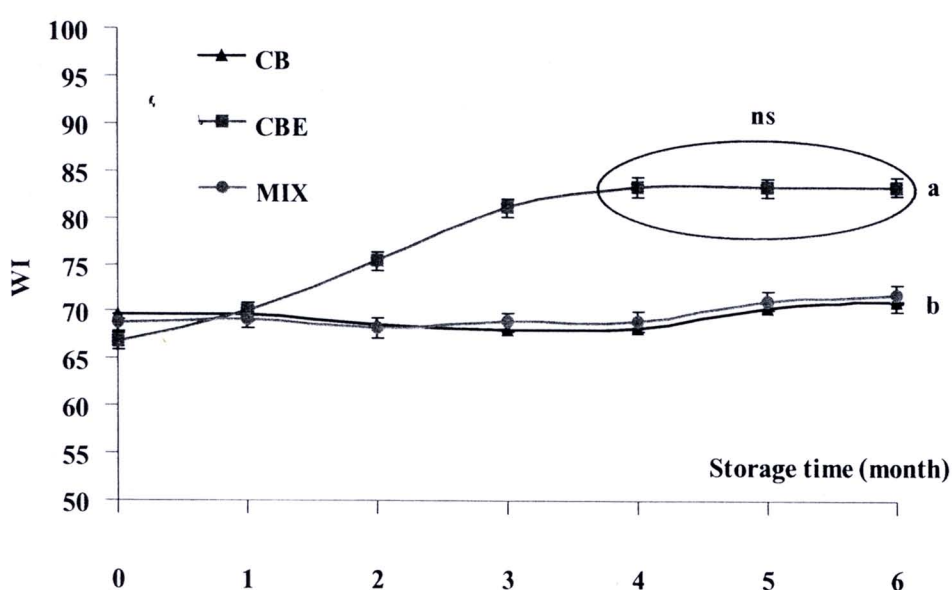
ภาพที่ 25 X-ray diffraction pattern ของ MIX ที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของการตกผลึกที่ 20°C

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

4.6 การศึกษาการเกิด fat bloom ของไขมันผสมอัตราส่วนที่เลือกไว้เป็น CBE

ปัญหาสำคัญที่มักเกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลตคือ การเกิด fat bloom ที่ผิวของช็อกโกแลต ซึ่งมีลักษณะเป็นจุดสีขาวกระจายอยู่ที่ผิวหน้า หรือเกิดการสูญเสียความมันเงาของผิวทำให้เห็นเป็นสีขาวหรือสีเทา (Nopens และคณะ, 2008) โดยเกิดจากไขมันเหลวเกิดการเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างหรือรอยแยกเล็ก ๆ มาที่ผิวหน้าของช็อกโกแลตแล้วเกิดการตกผลึกใหม่ (recrystallization) ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น (> 5 μm) ซึ่งผลึกขนาดใหญ่จะเกิดการสะท้อนแสงและเห็นเป็นสีขาวเทา (Lohman และ Hartel, 1994 อ้างอิงใน Sonwai และ Rousseau, 2006; Beckett, 2000) ซึ่งปัญหาดังกล่าวเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น

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



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

หมายเหตุ ตัวอักษร a, b และ ns หมายถึง ตัวอักษรเดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมี

นัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

CB หมายถึง เนยโกโก้

CBE หมายถึง ไขมันผสมอัตราส่วน 80:20 (w/w)

MIX หมายถึง ไขมันผสมระหว่าง CBE: CB ในอัตราส่วน 1:5.64 (w/w)

ลักษณะที่เกิดขึ้นของ fat bloom ทำให้ผู้บริโภคเกิดความเข้าใจผิดคิดว่า ผลิตภัณฑ์เกิดเชื้อรา และปฏิเสธที่จะซื้อผลิตภัณฑ์ซ็อกโกแลต ดังนั้นการศึกษากการเกิด fat bloom ตามระยะเวลาในการเก็บรักษาจึงมีส่วนสำคัญในการบ่งชี้คุณสมบัติของ CBE ซึ่งเมื่อถูกผสมกับ CB แล้วไม่ควรก่อให้เกิดปัญหา

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