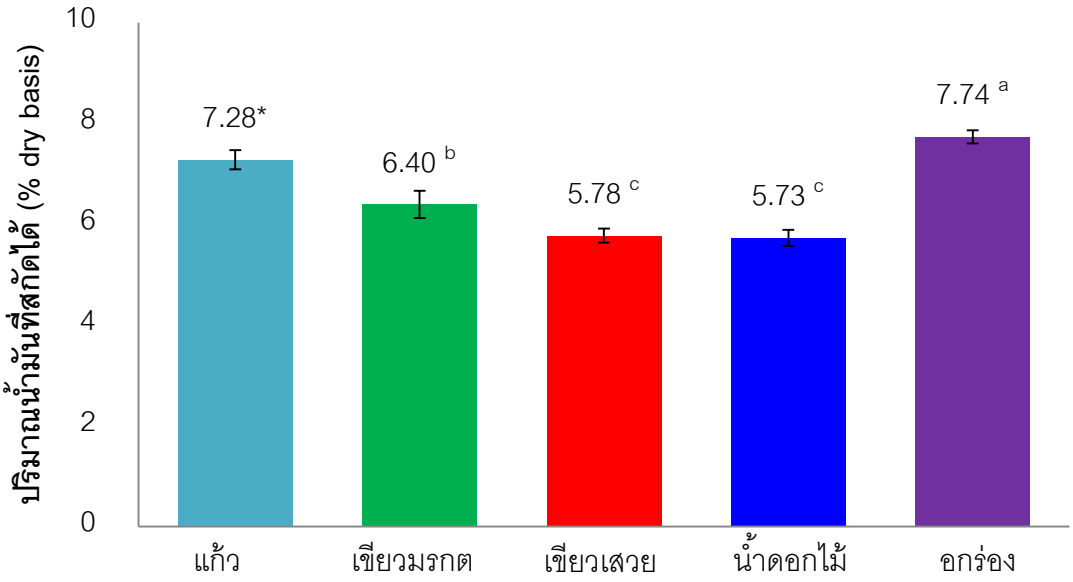
บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการดำเนินงานวิจัย

4.1 การสกัดน้ำมันเมล็ดมะม่วง

เมื่อทำการสกัดน้ำมันจากเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์ คือ พันธุ์เขียวมรกต พันธุ์เขียวเสวย พันธุ์น้ำดอกไม้ และพันธุ์อกร่อง ด้วยชุดสกัด Soxhlet ตามกรรมวิธีของ Solís-Fuentes และ Durán-de-Bazúa (2004) แล้วพบว่าเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อกร่องมีปริมาณน้ำมันที่สกัดได้มากสุดเฉลี่ยประมาณ 7.74 ± 0.14% (น้ำหนักแห้ง) รองลงมาเป็นพันธุ์เขียวมรกต (6.40 ± 0.27%) พันธุ์เขียวเสวย (5.78 ± 0.14 %) และพันธุ์น้ำดอกไม้ (5.73 ± 0.16%) ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 17 ซึ่งปริมาณน้ำมันที่สกัดได้จากเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์มีปริมาณใกล้เคียงกับปริมาณน้ำมันที่สกัดได้จากเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อื่นที่มีรายงานไว้ ดังนี้ โดยจากรายงานของ Lakshminarayana และคณะ (1983) พบว่าเมล็ดมะม่วงที่พบในประเทศอินเดียกว่า 43 สายพันธุ์ มีปริมาณน้ำมันที่สกัดได้เฉลี่ยตั้งแต่ 3.7-12.6% (น้ำหนักแห้ง) Solís-Fuentes และ Durán-de-Bazúa (2004) ได้ทำการสกัดน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์มะนิลาพบว่ามีปริมาณเฉลี่ยโดยน้ำหนักแห้ง 5.28-11.26% เมล็ดมะม่วงสายพันธุ์ในประเทศปากีสถานมีปริมาณน้ำมันเฉลี่ยประมาณ 10.01% (น้ำหนักแห้ง) (Anwer และคณะ, 2006) และเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์ที่พบในเมืองกวารา ประเทศไนจีเรีย มีปริมาณน้ำมันที่สกัดได้เฉลี่ย 13.511 ± 3.567% (น้ำหนักแห้ง) (Afolabi, 2008) นอกจากเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณน้ำมันที่สกัดได้ของสายพันธุ์แก้ว ซึ่งเป็นสายพันธุ์ที่มีการปลูกมากที่สุดในประเทศไทยนั้น (พิมพ์นิภา, 2552) พบว่ามีปริมาณใกล้เคียงกันกับปริมาณน้ำมันที่สกัดได้ (7.28 ± 0.19%) โดยเฉพาะสายพันธุ์อกร่องซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด



ภาพที่ 17 แผนภูมิแสดงปริมาณน้ำมันที่สกัดได้ (% น้ำหนักแห้ง) ของเมล็ดมะม่วง 4 สายพันธุ์ เปรียบเทียบกับสายพันธุ์แก้ว

หมายเหตุ * จากงานวิจัยของ พิมพ์นิภา กาเผือกงาม (2552)

a-c หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่มีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

4.2 ชนิดและปริมาณของกรดไขมันและไตรกลีเซอไรด์ของน้ำมันเมล็ดมะม่วง

4.2.1 ชนิดและปริมาณของกรดไขมันของน้ำมันเมล็ดมะม่วงที่สกัดได้

การวิเคราะห์ชนิดและปริมาณกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันเมล็ดมะม่วงในแต่ละสายพันธุ์ ด้วยเครื่อง GC-FID โดยเปรียบเทียบค่า retention time ของกรดไขมันตัวอย่างกับของกรดไขมันมาตรฐานเพื่อเป็นการยืนยันชนิดของกรดไขมัน โดยโครมาโตแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ฌ จากนั้นวิเคราะห์หาปริมาณของกรดไขมันแต่ละชนิดโดยพิจารณาจากร้อยละของพื้นที่ใต้กราฟของกรดไขมัน ซึ่งจากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า น้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์มีกรดโอเลอิกมากที่สุด โดยพบในน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อกร่องมากที่สุด ส่วนกรดไขมันที่พบรองลงมาในทั้ง 4 สายพันธุ์ คือ กรดสเตียริก ซึ่งพบมากที่สุดในน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้ ดังจะเห็นได้ในตารางที่ 9 ซึ่งจากผลการวิเคราะห์กรดไขมันจะสอดคล้องกับการศึกษาของ Solís-Fuentes และ Durán-de-Bazúa (2004) ในน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์มะนิลาซึ่งพบว่ากรดไขมันที่พบมากคือ กรดสเตียริกและกรดโอเลอิก โดยปริมาณกรดไขมันที่พบในน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์นั้น มีค่าอยู่

ในช่วงของรายงานการวิจัยหลายๆ งาน ซึ่งพบว่า มีกรดโอเลอิกเท่ากับ 43.7–54.5%, กรดเสตียริก 32.4–44.0%, กรดปาล์มิติก 5.9–9.1% และ กรดลิโนเลอิก 3.6–6.7% กรดไขมันที่พบเล็กน้อย ได้แก่ กรดไมริสติก 0.7–8.0%, กรดอราคิดิก 0.1–6.7%, กรดลิโนเลนิก 0.64%, กรดบีฮีนิก 0.64%, กรดลิกโนเซลิก 0.49% และอื่นๆ 0.52% (Hilditch และ Williams, 1964; Lakshminarayana, 1977; Van Pee และคณะ,1980; Baliga และ Shitole, 1981; Solís–Fuentes และ Durán–de–Bazúa, 2004; Solís–Fuentes และ Durán–de–Bazúa, 2005)

จากชนิดและปริมาณกรดไขมันที่พบในมะม่วง 4 สายพันธ์ สามารถนำมาหาอัตราส่วนระหว่างกรดไขมันอิ่มตัวกับกรดไขมันไม่อิ่มตัว โดยน้ำมันเมล็ดมะม่วงน้ำดอกไม้มีอัตราส่วนระหว่างกรดไขมันอิ่มตัวกับกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูงเท่ากับ 1.069 รองลงมาเป็นสายพันธุ์เขียวเสวย อกร่อง และเขียวมรกต โดยมีค่าเท่ากับ 1.012, 0.907 และ 0.884 ตามลำดับโดยจากรายงานวิจัยของ Hilditch และ Williams (1964) และ Solís–Fuentes และ Durán–de–Bazúa (2005) พบว่า องค์ประกอบของไขมันจากเมล็ดมะม่วงมีกรดไขมันอิ่มตัว 30–65% และกรดไขมันไม่อิ่มตัว 43.9–47.5% ซึ่ง Solís–Fuentes และ Durán–de–Bazúa (2004) กล่าวว่าอัตราส่วนระหว่างกรดไขมันอิ่มตัวกับกรดไขมันไม่อิ่มตัวของมะม่วงสายพันธุ์มะนิลามีค่าเท่ากับ 1.09 ซึ่งจะเห็นได้ว่าน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวเสวยมีค่าใกล้เคียงมากที่สุด

ตารางที่ 9 ร้อยละของปริมาณกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์เปรียบเทียบกับสายพันธุ์แก้ว

ชนิดของกรดไขมัน	ร้อยละของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันเมล็ดมะม่วง				
	แก้ว*	เขียวมรกต	เขียวเสวย	น้ำดอกไม้	อกร่อง
กรดลอริก (C12)	0.011 ± 0.001	0.042 ± 0.007 ^{b}	0.022 ± 0.008 ^{c}	0.031 ± 0.040 ^{c}	0.065 ± 0.005 ^{a}
กรดไมริสติก (C14)	0.033 ± 0.001	0.062 ± 0.012 ^{b}	0.069 ± 0.005 ^{b}	0.072 ± 0.003 ^{b}	0.092 ± 0.009 ^{a}
กรดปาล์มมิติก (C16)	5.387 ± 0.026	6.235 ± 0.214 ^{c}	7.409 ± 0.039 ^{b}	7.381 ± 0.146 ^{b}	7.690 ± 0.050 ^{a}
กรดสเตียริก (C18)	46.551 ± 0.090	37.383 ± 0.174 ^{c}	39.635 ± 0.201 ^{b}	41.404 ± 0.240 ^{a}	36.779 ± 0.203 ^{d}
กรดโอเลอิก (C18:1)	41.094 ± 0.088	45.717 ± 0.043 ^{b}	44.159 ± 0.116 ^{c}	42.850 ± 0.231 ^{d}	46.786 ± 0.157 ^{a}
กรดลิโนเลอิก (C18:2)	3.779 ± 0.010	5.885 ± 0.024 ^{a}	4.181 ± 0.008 ^{c}	4.255 ± 0.068 ^{c}	4.426 ± 0.081 ^{b}
กรดลิโนเลนิก (C18:3)	0.508 ± 0.003	0.546 ± 0.007 ^{a}	0.448 ± 0.003 ^{b}	0.394 ± 0.008 ^{d}	0.417 ± 0.008 ^{c}
กรดอราคิดิก (C20)	1.699 ± 0.008	1.674 ± 0.038 ^{a}	1.565 ± 0.015 ^{b}	1.396 ± 0.017 ^{c}	1.554 ± 0.029 ^{b}
กรดบีฮีนิก (C22)	0.351 ± 0.029	0.324 ± 0.014 ^{a}	0.294 ± 0.012 ^{b}	0.249 ± 0.004 ^{c}	0.300 ± 0.012 ^{b}
กรดลิกโนเซริก (C24)	0.351 ± 0.029	0.392 ± 0.008 ^{a}	0.400 ± 0.057 ^{a}	0.231 ± 0.012 ^{b}	0.362 ± 0.019 ^{a}
อื่นๆ	0.544 ± 0.132	1.740 ± 0.126 ^{ab}	1.818 ± 0.181 ^{a}	1.737 ± 0.152 ^{ab}	1.528 ± 0.109 ^{b}
กรดไขมันอิ่มตัว (รวม)	54.383	46.112 ± 0.101 ^{d}	49.394 ± 0.215 ^{b}	50.763 ± 0.383 ^{a}	46.842 ± 0.221 ^{c}
กรดไขมันไม่อิ่มตัว (รวม)	45.381	52.166 ± 0.039 ^{a}	48.788 ± 0.116 ^{c}	47.500 ± 0.283 ^{d}	51.629 ± 0.209 ^{b}

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

* จากงานวิจัยของ พิมพ์นิภา กาเผือกงาม (2552), $^{a-d}$ หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแถวเดียวกันที่มีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

4.2.2 ชนิดและปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันเมล็ดมะม่วงที่สกัดได้

จากการวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันเมล็ดมะม่วงแต่ละสายพันธุ์ด้วยเครื่อง HPLC–DAD โดยเปรียบเทียบค่า retention time ของไตรกลีเซอไรด์ตัวอย่างกับไตรกลีเซอไรด์มาตรฐานเพื่อเป็นการยืนยันชนิดของไตรกลีเซอไรด์ โดยโครมาโตแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ได้แสดงในภาคผนวก ฎ จากนั้นวิเคราะห์หาปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ โดยพิจารณาจากร้อยละของพื้นที่ใต้กราฟของไตรกลีเซอไรด์ที่พบในน้ำมันเมล็ดมะม่วงแต่ละสายพันธุ์ โดยร้อยละของปริมาณไตรกลีเซอไรด์ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงแต่ละสายพันธุ์ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ฎ เฉพาะร้อยละของปริมาณไตรกลีเซอไรด์ที่พบในปริมาณมากในน้ำมันเมล็ดมะม่วง คือ OOP, POP, SOO, POS และ SOS ได้นำมาแสดงไว้ในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ร้อยละของปริมาณไตรกลีเซอไรด์* ที่เป็นองค์ประกอบที่พบมากในน้ำมันเมล็ดมะม่วง

สายพันธุ์	ร้อยละของปริมาณไตรกลีเซอไรด์					
	OOP	POP	SOO	POS	SOS	อื่นๆ
เขียวมรกต	13.00±0.40 [a]	6.39±0.07 [d]	15.85±0.26 [b]	3.68±0.05 [c]	12.45±0.12 [d]	48.62±0.82
เขียวเสวย	9.93±0.03 [c]	8.99±0.02 [b]	14.09±0.14 [c]	5.86±0.06 [a]	16.55±0.11 [a]	44.57±0.33
น้ำดอกไม้	10.79±0.20 [b]	9.29±0.14 [a]	14.28±0.17 [c]	5.65±0.10 [b]	15.64±0.08 [b]	44.34±0.31
อกร่อง	10.05±0.11 [c]	7.58±0.03 [c]	17.69±0.22 [a]	5.56±0.05 [b]	14.25±0.14 [c]	44.86±0.10

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

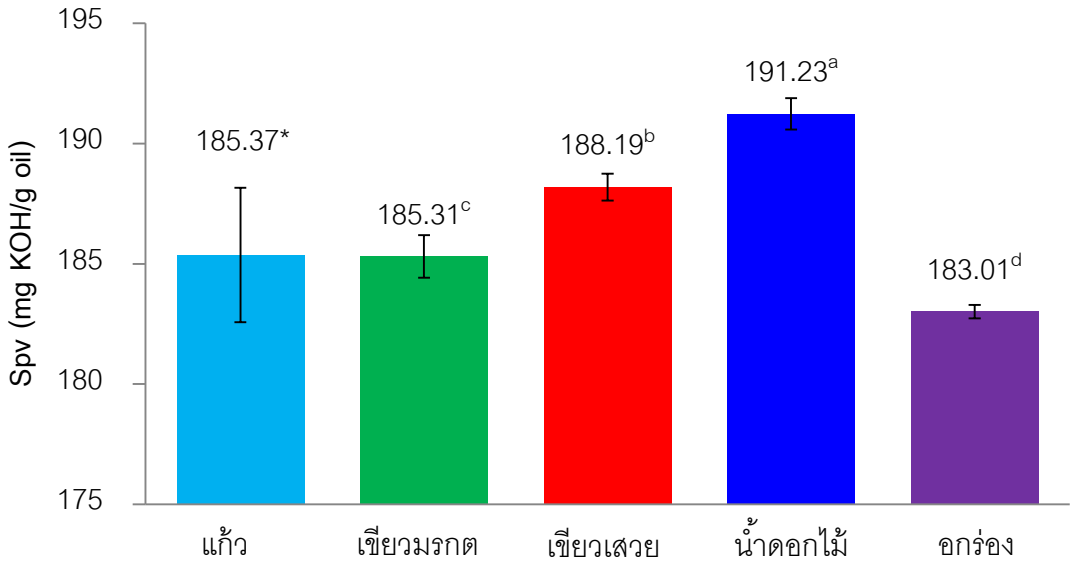
[a–d] หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแถวเดียวกันที่มีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

จากตารางที่ 10 จะเห็นว่าน้ำมันจากเมล็ดมะม่วงแต่ละสายพันธุ์มีปริมาณไตรกลีเซอไรด์หลักทั้ง 5 ชนิดที่แตกต่างกัน โดยไตรกลีเซอไรด์ชนิด SOS พบมากที่สุดในน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวเสวย รองลงมาก็เป็น น้ำดอกไม้ อกร่อง และเขียวมรกต ตามลำดับ ไตรกลีเซอไรด์ชนิด SOO พบมากที่สุดในน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อกร่อง รองลงมาก็เป็น เขียวมรกต น้ำดอกไม้ และเขียวเสวย ตามลำดับ โดยมีการรายงานของ Lidefelt (2007) ว่ามีการพบไตรกลีเซอไรด์ชนิด SOS ในน้ำมันเมล็ดมะม่วงในปริมาณมากที่สุด (40%) รองลงมาเป็น SOO (23%) และ POS (10%) ตามลำดับ นอกจากนี้ยัง

มีรายงานการศึกษาของ Lakshminarayana และคณะ (1983) พบว่าเมล็ดมะม่วงที่พบในประเทศอินเดียกว่า 43 สายพันธุ์ มีไตรกลีเซอไรด์ชนิด SOS และ POS ในปริมาณที่มาก โดยชนิดและปริมาณไตรกลีเซอไรด์ที่แตกต่างกันมีผลทำให้น้ำมันเมล็ดมะม่วงแต่ละสายพันธุ์มีความแตกต่างกันในด้านคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ โดยจากรายงานของ Takeuchi และคณะ (2002) กล่าวว่า SOS เป็นไตรกลีเซอไรด์ที่มีโครงสร้างผลึก 5 รูปแบบ คือ α, γ, β', β_2 และβ_1 โดยโครงสร้างที่เสถียรที่สุดคือ β ซึ่งมีช่วงอุณหภูมิในการหลอมเหลวคือ 41–43°C จึงทำให้ไขมันหรือน้ำมันที่มี SOS เป็นองค์ประกอบมีจุดหลอมเหลวที่สูง ตัวอย่างเช่นในเนยโกโก้ ซึ่งทำให้สามารถแข็งตัวได้และไม่หลอมละลายที่อุณหภูมิห้อง

4.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของน้ำมันเมล็ดมะม่วง

4.3.1 ค่าสปอนนิฟิเคชั่น (Saponification value; Spv) คือ จำนวนน้ำหนักของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นมิลลิกรัม ที่ใช้ในการไฮโดรไลซิสด้วยด่าง ไขมันหรือน้ำมันจำนวน 1 กรัม เป็นตัวบ่งชี้ให้ทราบขนาดและน้ำหนักโมเลกุลของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในไตรกลีเซอไรด์ที่มีอยู่ในไขมันหรือน้ำมัน หากกรดไขมันมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะมีค่า Spv สูง



ภาพที่ 18 แผนภูมิแสดงค่าสปอนนิฟิเคชันของน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์

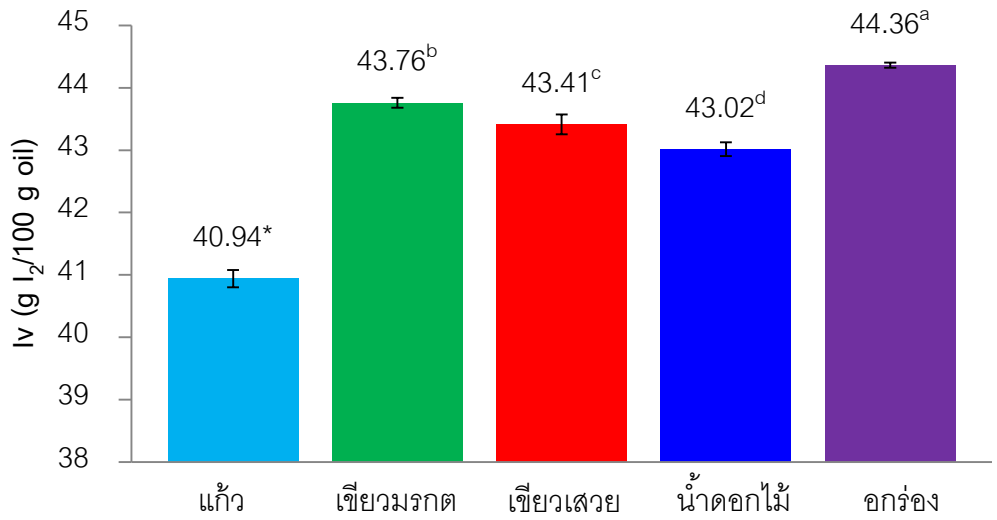
หมายเหตุ * จากงานวิจัยของ พิมพ์นิภา กาเผือกงาม (2552)

$^{a-d}$ หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่มีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

จากผลการวิเคราะห์ดังแสดงในภาพที่ 18 แสดงให้เห็นว่า ค่า Spv ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงแต่ละสายพันธุ์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) โดยค่า Spv ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้มีค่าสูงสุด คือ 191.23±0.65 mg KOH/g oil ส่วนน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อกร่องมีค่า Spv ต่ำสุดคือ 183.01±0.28 mg KOH/g oil ซึ่งจากรายงานการวิจัยของพิมพ์นิภา (2552) พบว่าค่า Spv ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์แก้วมีค่าประมาณ 185.37±2.79 mg KOH/g oil และตามรายงานของ Solís-Fuentes และ Durán-de-Bazúa (2004) รายงานค่า Spv ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์มะนิลาไว้เท่ากับ 189.0 mg KOH/g oil ซึ่งค่า Spv ที่ได้จากการวิเคราะห์ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์ต่างๆ สอดคล้องกับชนิดและปริมาณกรดไขมันที่วิเคราะห์ได้ด้วย GC-FID โดยน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้ที่มีค่า Spv สูงนั้น พบว่ามีกรดไขมันชนิดกรดสเตียริกมากที่สุด (41.404±0.240%) โดยเป็นกรดไขมันสายยาวที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมถึง 18 ตัว ซึ่งปริมาณของกรดสเตียริกที่พบในปริมาณที่สูงนั้นน่าจะมีผลต่อค่า Spv ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงแต่ละสายพันธุ์มากที่สุด

4.3.2 ค่าไอโอดีน (Iodine value; Iv) หรือกรัมของไอโอดีนที่ถูกดูดซับ ณ ตำแหน่งพันธะคู่ของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวต่อ 100 กรัมของไขมัน เป็นดัชนีบ่งบอกความไม่อิ่มตัวของน้ำมัน โดยค่าไอโอดีนสูงหมายถึงไขมันหรือน้ำมันมีความไม่อิ่มตัวสูง จากผลการวิเคราะห์ที่แสดงในภาพที่ 19 จะเห็นว่า ค่าไอโอดีนของน้ำมันเมล็ดมะม่วงแต่ละสายพันธุ์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) โดยค่าไอโอดีนของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อกร่องมีค่าสูงสุดคือ 44.36±0.04 g I_2/100 g oil โดยที่ค่าไอโอดีนของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้มีค่าต่ำสุดคือ 43.02±0.11 g I_2/100 g oil จากรายงานของ Knothe (2002) กล่าวว่า กรดไขมันอิสระ (free fatty acid) จะให้ค่า Iv สูงสุด เมื่อเทียบกับไตรกลีเซอไรด์และเมทิลเอสเตอร์ ซึ่งสอดคล้องกับค่า A.V. ที่วิเคราะห์ที่ได้ โดยอกร่องมีค่า A.V สูงสุดและมีค่า Iv สูงสุด เช่นกัน รองลงมาเป็น เขียวมรกต เขียวเสวย และน้ำดอกไม้ ตามลำดับ นอกจากนี้ Knothe (2002) ยังกล่าวว่า ค่า Iv จะขึ้นกับมวลโมเลกุล (Molecular weight; M.W.) และจำนวนพันธะคู่ของกรดไขมัน แต่ถ้าเป็นการผสมกันของกรดไขมันหลายชนิด เช่น ในไขมันหรือน้ำมัน ปริมาณกรดไขมันแต่ละชนิดก็จะมีผลต่อค่า Iv เช่นกัน โดยถ้า M.W. ของกรดไขมันไม่อิ่มตัวนั้นมากจะทำให้ได้ค่า Iv ต่ำ ในทางกลับกันถ้ามีจำนวนพันธะคู่มากและปริมาณที่พบสูงก็จะทำให้ไขมันหรือน้ำมันนั้นมีค่า Iv สูง ซึ่งจะเห็นได้จากตารางที่ 9 ว่าน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์ มีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวคือ กรดโอเลอิก กรดลิโนเลอิก และกรดลิโนเลนิก ซึ่งกรดไขมันทั้ง 3 ชนิด มี M.W. เท่ากัน แต่มีปริมาณที่แตกต่างกันมาก โดยกรดโอเลอิกที่พบในปริมาณสูงสุดในทุกสายพันธุ์ น่าจะมีผลต่อค่า Iv มากที่สุด โดยจากเหตุผลข้างต้นที่ว่าปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวมีผลต่อค่า Iv จึงทำให้สายพันธุ์อกร่องที่มีปริมาณกรดโอเลอิกสูงสุดมีค่า Iv สูงสุด รองลงมาเป็นเขียวมรกต เขียวเสวย น้ำดอกไม้ ตามลำดับ

ความไม่อิ่มตัวของไขมันจะสัมพันธ์โดยตรงกับจำนวนพันธะคู่ที่มีอยู่ในโมเลกุลของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของไตรกลีเซอไรด์ หากระดับความไม่อิ่มตัวสูงแสดงว่าไขมันหรือน้ำมันนั้นมีจำนวนพันธะคู่สูง ดังจะเห็นได้จากปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัว โดยกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่น่าจะมีผลต่อค่าไอโอดีนมากที่สุดคือ กรดโอเลอิก เพราะพบในปริมาณมากที่สุด โดยไขมันหรือน้ำมันที่มีระดับความไม่อิ่มตัวสูงนั้นไม่เหมาะในการนำไปผลิตเป็นไขมันทดแทนเนยโกโก้ เพราะจะทำให้ได้ไขมันที่ทดแทนเนยโกโก้ที่มีการหลอมละลายได้ง่ายเกินไป ซึ่งมีผลในการคงรูป เช่นในผลิตช็อกโกแลต นอกจากนี้ค่าไอโอดีนยังแสดงถึงความเป็นไปได้ที่จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอีกด้วย โดยไขมันหรือน้ำมันที่มีค่าไอโอดีนสูงจะมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้สูง ทำให้เกิดกลิ่นหืนขึ้นในผลิตภัณฑ์ที่มีไขมันหรือน้ำมันเป็นองค์ประกอบ อย่างไรก็ตามไขมันหรือน้ำมันที่มีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวจะมีคุณค่าทางโภชนาการสูง เนื่องจากกรดไขมันไม่อิ่มตัวเป็นกรดไขมันที่มีความจำเป็นต่อร่างกาย (นิธิยา, 2548) โดยการรับประทานกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว เช่น กรดโอเลอิกในปริมาณที่พอเหมาะจะช่วยให้ระดับไขมันและคอเลสเตอรอลในเลือดลดลงได้ (วินัย, 2542)



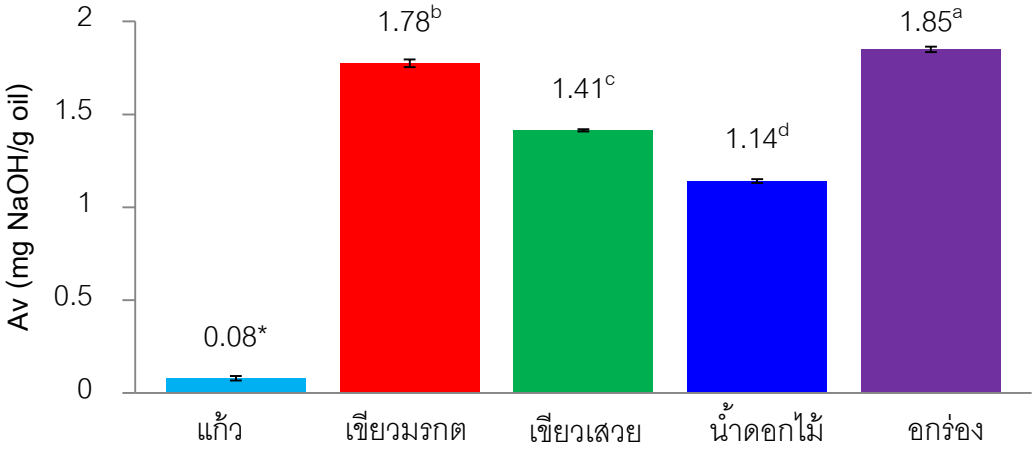
ภาพที่ 19 แผนภูมิแสดงค่าไอโอดีนของน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์

หมายเหตุ * จากงานวิจัยของ พิมพ์นิภา กาเผือกงาม (2552)

$^{a-d}$ หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่มีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

4.3.3 ค่าความเป็นกรด (Acid value; A.V.) เป็นค่าที่แสดงถึงจำนวนมิลลิกรัมของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ใช้ในการทำให้กรดไขมันอิสระ 1 กรัมเป็นกลาง เมื่อไขมันเกิดการไฮโดรไลซ์จะทำให้ปริมาณกรดไขมันอิสระเกิดขึ้น ซึ่งกรดไขมันอิสระสามารถเกิดปฏิกิริยาก่อให้เกิดกลิ่นหืนได้ง่ายดังนั้นจึง

นิยมใช้ค่าความเป็นกรดเป็นตัวชี้สภาวะหรือระดับการเกิดกลิ่นหืนของไขมันกล่าวคือ หากค่าความเป็นกรดสูงแสดงว่า มีการเกิดกลิ่นหืนเนื่องจากปฏิกิริยา Hydrolytic rancidity มาก หรืออาจกล่าวได้ว่าไขมันหรือน้ำมันที่มีค่าความเป็นกรดสูงนั้น แสดงว่าเกิดกลิ่นหืนมาก



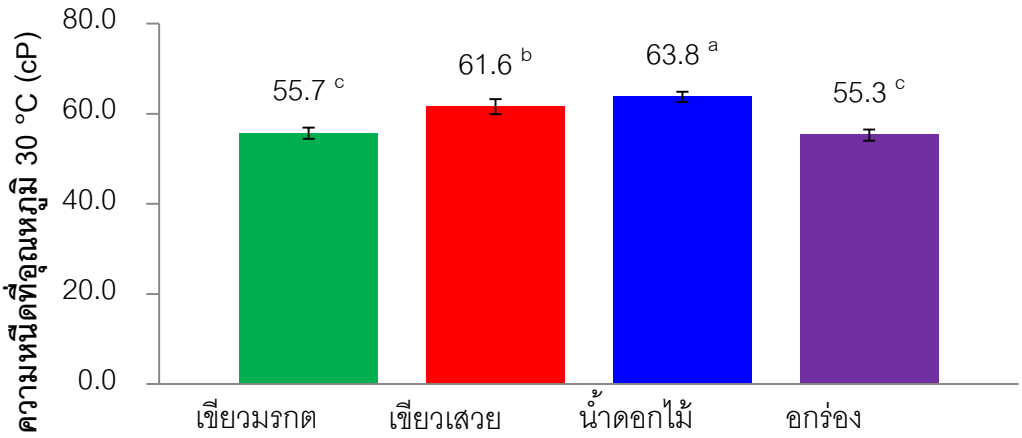
ภาพที่ 20 แผนภูมิแสดงค่าความเป็นกรดของน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์

หมายเหตุ * จากงานวิจัยของ พิมพ์นิภา กาเผือกงาม (2552)

$^{a-d}$ หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่มีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

จากภาพที่ 20 จะเห็นได้ว่าค่าความเป็นกรดของน้ำมันจากเมล็ดมะม่วงแต่ละสายพันธุ์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) โดยน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อกร่องมีค่าความเป็นกรดสูงสุดคือ 1.85±0.01 mg NaOH/ g oil รองลงมาก็จะเป็นสายพันธุ์เขียวมรกต เขียวเสวย และน้ำดอกไม้ ตามลำดับ ซึ่งจากค่าความเป็นกรดที่แสดงให้เห็นว่าน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อกร่องมีปริมาณกรดไขมันอิสระสูงที่สุด นั่นคือ เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสซึ่งก่อให้เกิดกลิ่นหืนมากที่สุด โดยน้ำมันที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระเมื่อคิดเป็นค่าความเป็นกรดเท่ากับ 1.00 – 2.99 mg NaOH/ g oil จะเริ่มเกิดกลิ่นหืน (นิธิยา, 2548) ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของน้ำมัน แต่ข้อกำหนดด้านคุณภาพของเนยโกโก้ระบุว่าอนุญาตให้เนยโกโก้มีค่าความเป็นกรดสูงสุดได้เท่ากับ 3.48 mg NaOH/ g oil (Beckett, 2000; Timms และ Stewart, 1999 อ้างอิงใน Stewart และ Timms, 2002) ทั้งนี้การชะลอการเกิดไฮโดรไลซิสของไขมันและน้ำมันทำได้โดยเก็บรักษาไขมันและน้ำมันไว้ที่อุณหภูมิต่ำหรือในตู้เย็น ทำให้ปราศจากน้ำและจุลินทรีย์ (นิธิยา, 2548)

4.3.4 ค่าความหนืด (viscosity) วัดโดยเครื่อง Brookfield ที่อุณหภูมิตัวอย่าง 30°C ด้วยความเร็ว 50 rpm หัววัดชนิด S34 โดยค่าความหนืดของไขมันและน้ำมันจะเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนคาร์บอนในโมเลกุลของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของไตรกลีเซอไรด์เพิ่มขึ้น และความหนืดจะลดลงเมื่อจำนวนพันธะคู่ในโมเลกุลของกรดไขมันเพิ่มขึ้นและเมื่ออุณหภูมิของไขมันและน้ำมันเพิ่มขึ้น (นิธิยา, 2548)



ภาพที่ 21 แผนภูมิแสดงค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 30°C ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์

หมายเหตุ $^{a-c}$ หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่มีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

จากภาพที่ 21 จะเห็นได้ว่าน้ำมันจากเมล็ดมะม่วงแต่ละสายพันธุ์มีความหนืด (ที่อุณหภูมิขณะวัด 30°C) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) โดยน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้มีความหนืดสูงสุดคือ 63.8±1.13 cP ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วย GC-FID พบว่าน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้มีชนิดของกรดไขมันที่มีจำนวนคาร์บอนสูง เช่น กรดสเตียริกในปริมาณที่สูงและมีกรดไขมันที่มีพันธะคู่ต่ำสุด จึงทำให้ความหนืดของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้นั้นสูงสุด และในทางกลับกันน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อกร่องและเขียวมรกตมีกรดไขมันที่มีจำนวนคาร์บอนสูง เช่น กรดสเตียริกในปริมาณต่ำและมีกรดไขมันที่มีพันธะคู่สูง จึงทำให้ความหนืดของน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้งสองสายพันธุ์มีความหนืดต่ำ

4.3.5 ค่าสี (color) วัดโดยใช้เครื่อง Colormeter Color-view™ Spectrophotometer Model:9000 ซึ่งจะวัดค่า L*, a* และ b* ค่าสีสามารถนำมาใช้ในการเป็นตัวบ่งชี้คุณภาพของน้ำมันได้ โดยน้ำมันแต่ละชนิดจะมีสีที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับสารที่เป็นรงควัตถุในวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการสกัด

น้ำมันและวิธีการกำจัดสีโดยการฟอกสี น้ำมันที่มีสีเหลืองอ่อนจะมีคุณภาพดีกว่าน้ำมันที่มีสีเหลืองเข้ม (นิธิยา, 2548)

ตารางที่ 11 ค่าสีของน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์ ขณะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิ 20°C

สายพันธุ์	ค่าสี		
	L*	a*	b*
เขียวมรกต	68.02 ± 0.24 [c]	6.05 ± 0.28 [a]	25.14 ± 0.23 [a]
เขียวเสวย	72.35 ± 0.28 [b]	3.10 ± 0.25 [b]	23.77 ± 0.21 [b]
น้ำดอกไม้	76.14 ± 0.45 [a]	2.97 ± 0.42 [c]	-7.70 ± 0.52 [d]
อกร่อง	65.89 ± 0.32 [d]	1.44 ± 0.31 [d]	4.91 ± 0.23 [c]

หมายเหตุ [a-d] หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแถวคอลัมน์เดียวกันที่มีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

การวัดค่าสีด้วยเครื่องวัดสี Colormeter Color-view™ Spectrophotometer นั้นจะวัดค่าออกมาเป็นค่า L*, a* และ b* โดยที่ถ้ามีค่า L*เท่ากับ 0 จะเป็นสีดำ ถ้าค่า L* เท่ากับ 100 แสดงว่าเป็นสีขาว ส่วนค่า a* นั้นถ้ามีค่าเป็นลบจะบงชี้ว่ามีสีเขียวแต่ถ้ามีค่าเป็นบวกจะมีสีแดง และค่า b* ถ้ามีค่าเป็นลบแสดงว่ามีสีน้ำเงินแต่ถ้ามีค่าเป็นบวกจะมีสีเหลือง (Wikipedia enclycopedia, 2011b) จากตารางที่ 11 แสดงให้เห็นค่าสีของน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์ ขณะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิ 20°C มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยที่น้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้มีค่า L* มากที่สุด ซึ่งค่า L* แสดงให้เห็นว่าน้ำมันมีความสว่างมากที่สุด โดยน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อกร่องมีค่า L* ต่ำสุดแสดงให้เห็นว่ามีความสว่างน้อยที่สุด โดยน้ำเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวมรกตมีค่า a* สูงสุดแสดงว่ามีสีแดงมากกว่าน้ำมันเมล็ดมะม่วงอีก 3 สายพันธุ์ และเมื่อพิจารณาค่า b* จะเห็นได้ว่าน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวมรกตมีค่ามากที่สุด แสดงให้เห็นว่ามีสีเหลืองที่เข้มกว่าเมื่อเทียบกับน้ำเมล็ดมะม่วงจากทั้งหมด 4 สายพันธุ์

ตารางที่ 12 ค่าสีของน้ำมันเมล็ดมะม่วง 4 สายพันธุ์ ขณะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง (~30°C)

สายพันธุ์	ค่าสี		
	L*	a*	b*
เขียวมรกต	28.81 ± 0.34 [d]	6.20 ± 0.21 [b]	30.41 ± 0.32 [a]
เขียวเสวย	31.85 ± 0.21 [c]	2.05 ± 0.23 [c]	18.51 ± 0.45 [b]
น้ำดอกไม้	33.92 ± 0.32 [a]	8.73 ± 0.34 [a]	-11.01 ± 0.23 [d]
อกร่อง	32.18 ± 0.51 [b]	1.27 ± 0.43 [d]	17.50 ± 0.41 [c]

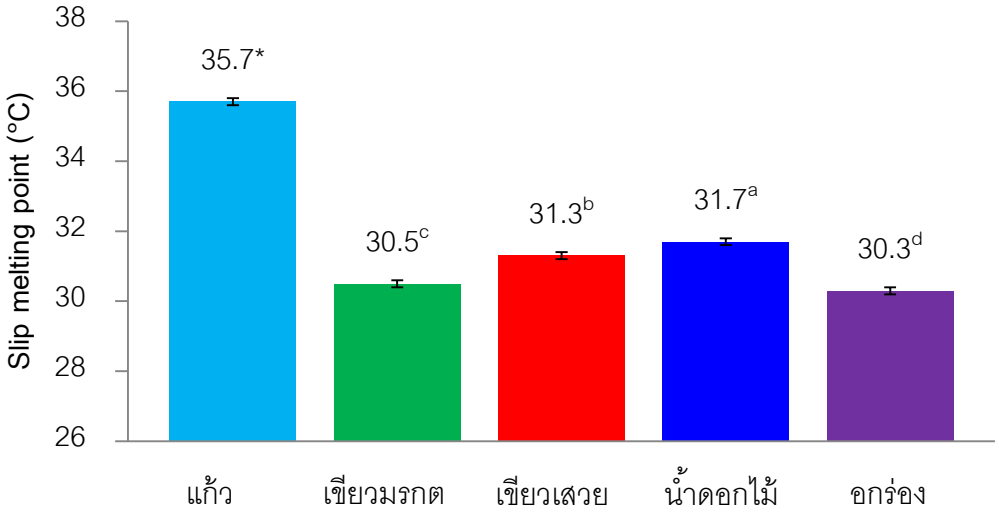
หมายเหตุ [a-d] หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแถวคอลัมน์เดียวกันที่มีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ค่าสีของน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์ ขณะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง (~30°C) แสดงในตารางที่ 12 พบว่าน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยที่น้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้มีค่า L* มากที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่ออยู่ในสถานะของเหลวน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้มีความสว่างสุด โดยน้ำเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้มีค่า a* สูงสุดแสดงว่ามีสีแดงมากกว่าน้ำมันเมล็ดมะม่วงอีก 3 สายพันธุ์ และเมื่อพิจารณาค่า b* พบว่าน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวมรกตมีค่ามากที่สุด แสดงให้เห็นว่ามีสีเหลืองที่เข้มกว่าเมื่อเทียบกับน้ำเมล็ดมะม่วงจากทั้งหมด 4 สายพันธุ์

สารสีที่ละลายได้ดีในไขมันและน้ำมัน คือ แคโรทีนอยด์ เป็นสารที่ให้สีเหลืองถึงสีแดงเข้ม ขึ้นอยู่กับชนิดของแคโรทีนอยด์ ชนิดที่พบมากที่สุด คือ เบต้า-แคโรทีน สารพวกแคโรทีนอยด์ไม่สามารถแยกออกจากไขมันหรือน้ำมันได้โดยการรีไฟน์ด้วยด่าง แต่การทำไฮโดรจิเนชันจะช่วยลดจำนวนพันธะคู่ในโมเลกุลของแคโรทีนอยด์ในน้อยลง มีผลทำให้สีจางลงด้วย สารพวกแคโรทีนอยด์ไม่ค่อยทนความร้อน ดังนั้นการฟอกสีที่อุณหภูมิสูงหรือการกำจัดกลิ่นโดยใช้ไอน้ำจะช่วยทำให้สีจางลงได้ และสามารถกำจัดสารแคโรทีนอยด์ออกจากน้ำมันได้โดยใช้ Fuller's earth หรือ activated carbon (นิธิยา, 2548) ในน้ำมันบางชนิด เช่น น้ำมันมะกอกและน้ำมันถั่วเหลือง ที่สกัดได้จากวัตถุดิบที่มีสีเขียว น้ำมันที่ได้อาจมีสีเขียวของคลอโรฟิลล์ปนออกมาด้วย โดยปกติน้ำมันถั่วเหลืองจะมีคลอโรฟิลล์ประมาณ 1,500 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยแคโรทีนอยด์เป็นรงควัตถุในพืชที่มีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ สารตั้งต้นในการสร้างฮอร์โมน สารให้สี และสารประกอบที่สำคัญในการสังเคราะห์ด้วยแสง แคโรทีนอยด์จะถูกสะสมในพลาสติด (plastids) ซึ่งไม่ใช่ส่วนคลอโรพลาสต์ (chloroplast) และจะพบมากในส่วนต่างๆ ของ

พืชและส่วนของเนื้อเยื่อ แต่จะพบในเนื้อเยื่อบางชนิดเพียงเล็กน้อย (Howitt และ Pogson, 2006) ในมะม่วงพบแคโรทีนอยด์หลักๆ คือ เบต้า-แคโรทีน (β-carotene) ซึ่งพบในรูปของ violaxanthin esters ทั้งนี้พบว่าแคโรทีนอยด์ที่พบในมะม่วงนั้นจะขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของมะม่วง ลักษณะภูมิประเทศและภูมิอากาศ และระยะของความสุก นอกจากนี้ยังพบว่าสภาวะการเก็บรักษาและระดับการแปรรูปก็มีผลต่อแคโรทีนอยด์ที่พบในมะม่วงด้วยเช่นกัน (Pott และคณะ, 2003) โดยลูทีน (lutein) เป็นแคโรทีนอยด์ที่สำคัญที่พบมากในเมล็ดพืชที่ให้น้ำมันหลายชนิด เช่น น้ำมันของคาโลนาและน้ำมันดอกทานตะวัน (Kirk และ Bassett, 1978)

4.3.6 จุดหลอมเหลวแบบ slip melting point (SMP) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่นำมาใช้ในการหาพฤติกรรมในการหลอมเหลว โดย SMP เป็นจุดที่แท่งไขมันในหลอดแคปิลลารีเกิดการเคลื่อนที่ขึ้นหลังจากให้ความร้อน เนื่องจากแรงดันที่ทำให้เกิดการลอยตัว (buoyancy) ซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับแรงโน้มถ่วงของโลก เมื่อแรงดังกล่าวมีค่าเท่ากับน้ำหนักของน้ำที่ถูกแทนที่ด้วยไขมันปริมาตรเท่ากัน



ภาพที่ 22 แผนภูมิแสดงจุดหลอมเหลว (Slip melting point) ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์ เทียบกับสายพันธุ์แก้ว

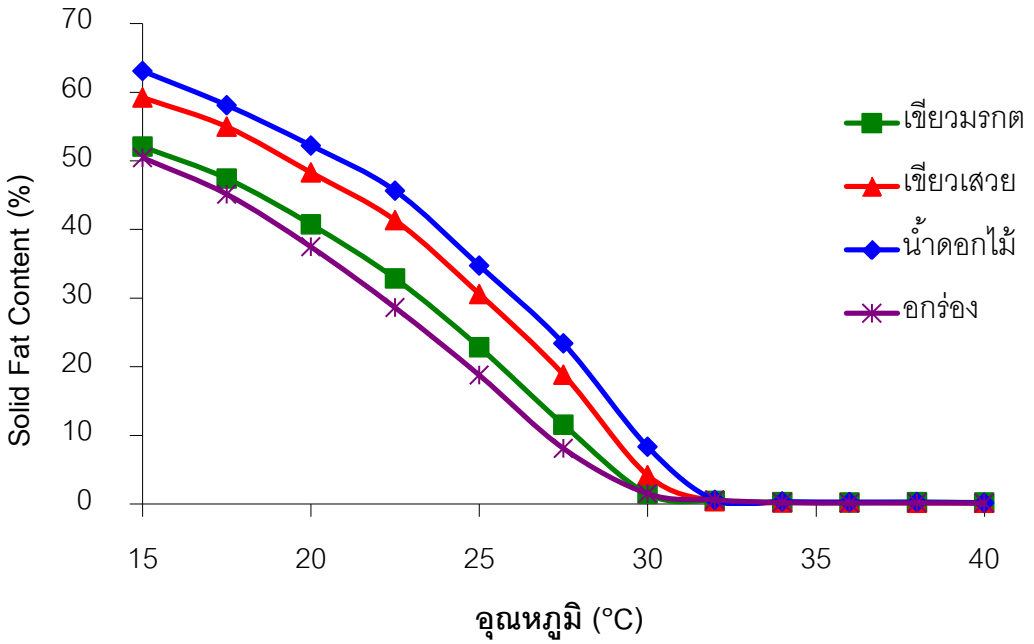
หมายเหตุ * จากงานวิจัยของ พิมพ์นิภา กาเผือกงาม (2552)

$^{a-d}$ หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่มีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

จากภาพที่ 22 แสดงให้เห็นว่า ค่า SMP ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้มีค่าสูงสุด คือ 31.7±0.1°C รองลงมาเป็นสายพันธุ์เขียวเสวย เขียวมรกต และอกร่อง ตามลำดับโดยค่า SMP ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงแต่ละสายพันธุ์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ซึ่งต่ำกว่าค่าจากรายงานการวิจัยของพิมพ์นิภา (2552) ค่า SMP ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์แก้วที่มี

ค่าเท่ากับ 35.7±0.1°C โดยค่า SMP จะสัมพันธ์กับชนิดของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในไตรกลีเซอไรด์ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของน้ำมัน เนื่องจากน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้มีกรดสเตียริกมากที่สุด และมีกรดโอเลอิกในปริมาณที่น้อยสุดเมื่อเทียบกับน้ำมันเมล็ดมะม่วงอีก 3 สายพันธุ์ น้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อกร่องในทางตรงกันข้ามมีกรดโอเลอิกมากที่สุด และมีกรดสเตียริกในปริมาณที่น้อยสุด โดยกรดสเตียริกซึ่งเป็นกรดไขมันชนิดอิ่มตัวจึงมีจุดหลอมเหลวที่สูงกว่ากรดโอเลอิกซึ่งเป็นกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว

4.3.7 ปริมาณไขมันที่เป็นของแข็ง (solid fat content; SFC) บอกให้ทราบถึงระดับการเป็นของแข็งในรูปของผลึกที่อุณหภูมิต่างๆ นอกจากนี้การพล็อตระหว่างค่า SFC และอุณหภูมิยังบอกให้ทราบถึงพฤติกรรมการหลอมเหลวของน้ำมัน จากการศึกษาพบว่าน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์ต่างๆ เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า SFC ในช่วงอุณหภูมิ 15–40°C ดังแสดงในภาพที่ 23 และตารางที่ 16 แสดงค่า SCF ซึ่งแสดงในภาคผนวก ฏ ซึ่งจะเห็นว่ามีค่า SFC ที่แตกต่างกันกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ตั้งแต่อุณหภูมิ 15–30°C โดยในช่วงดังกล่าวจะเห็นได้ว่าน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้มีค่า SFC สูงสุด รองลงมาเป็นสายพันธุ์เขียวเสวย เขียวมรกต และอกร่อง ตามลำดับ และเริ่มเข้าใกล้ศูนย์ที่อุณหภูมิ 32°C โดยพฤติกรรมการตกผลึกในช่วงอุณหภูมิ 15–30°C ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงที่แตกต่างกันในแต่ละสายพันธุ์อาจเกิดจากความแตกต่างของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบ โดยน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อกร่องมีกรดโอเลอิกซึ่งเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัวในปริมาณที่สูงส่งผลให้เกิดการเจือจาง (dilution effect) กับกรดไขมันอิ่มตัวในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ โดยไปลดปริมาณพลังงานที่ต้องการในการทำให้ไขมันเกิดการหลอมเหลว หรือทำให้ความเข้มข้นของกรดไขมันอิ่มตัวในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ซึ่งตกผลึกได้ง่ายกว่าลดลง ซึ่งในแง่ของพลังงานความร้อนในการตกผลึกอาจกล่าวได้ว่าไตรกลีเซอไรด์ต้องคายพลังงานสูงขึ้นในการตกผลึก เพราะกรดโอเลอิกต้องคายพลังงานความร้อนออกมาในปริมาณที่สูงกว่ากรดไขมันอิ่มตัวเพื่อให้เกิดการตกผลึกนั่นเอง ดังนั้นน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อกร่องจึงตกผลึกได้ยากกว่าน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อื่นที่ช่วงอุณหภูมิดังกล่าวทำให้ได้ไขมันที่มีลักษณะที่อ่อนกว่า (Solís-Fuentes และ Durán-de-Bazúa, 2004) จากค่า SFC ที่มากที่สุดของสายพันธุ์น้ำดอกไม้ จึงอาจจะเหมาะกับการนำไปใช้ผสมกับไขมันชนิดอื่น เช่น ปาล์ม จะทำให้ได้ไขมันทดแทนเนยโกโก้ที่มีลักษณะแข็งกว่า ทนต่อความร้อนมากกว่า



ภาพที่ 23 ค่า Solid Fat Content ของน้ำมันจากเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์ ที่อุณหภูมิ 15 – 40°C

4.3.8 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของการตกผลึกและการหลอมเหลวของน้ำมันจากเมล็ดมะม่วงแต่ละสายพันธุ์ที่สกัดได้ด้วยเทคนิค Differential Scanning Colorimetry (DSC) เป็นวิธีในการศึกษาพฤติกรรมการตกผลึกและการหลอมเหลวของไขมัน โดยอาศัยหลักการที่ว่าไขมันมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ หรือการเปลี่ยนแปลงเฟส จะมีการดูดหรือคายความร้อน โดยสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างจะถูกวัดเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป โดย DSC จะช่วยให้สามารถศึกษาพฤติกรรมของการหลอมเหลวที่สมบูรณ์และการแข็งตัวของไขมัน ซึ่งจะมีประโยชน์ในการอธิบายคุณลักษณะของพฤติกรรมโดยรวมของผลิตภัณฑ์ได้ (Lidefelt, 2007)

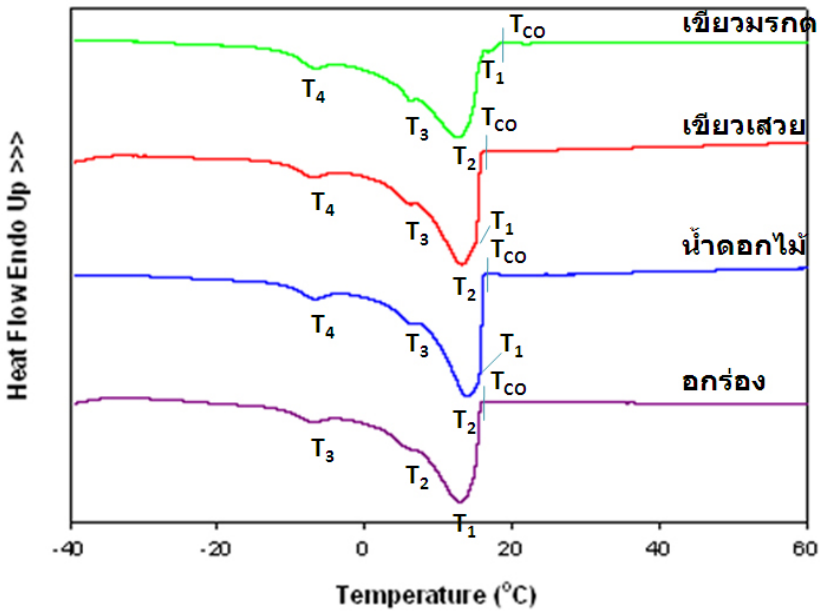
จากภาพที่ 24 เป็น DSC thermogram จากการตกผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงแต่ละสายพันธุ์ หลังจากการให้ความร้อนที่ 80°C นาน 10 นาที และทำการลดอุณหภูมิจาก 80°C จนถึง –40°C ด้วยอัตรา 5°C/นาที โดยอุณหภูมิที่แสดงถึง การเปลี่ยนแปลงต่างๆ ในระหว่างการตกผลึกได้ แสดงในตารางที่ 13 พบว่า น้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวมรกตเริ่มมีการตกผลึกที่อุณหภูมิ 18.52°C (T_{CO}) ที่อุณหภูมิ 17.25°C (T_1) พบพีคแรกในการตกผลึกซึ่งอาจเกิดจากตกผลึกของกรดไขมันที่มีจุดหลอมเหลวสูงหรือกรดไขมันชนิดอิ่มตัว และมีการตกผลึกสูงสุดที่อุณหภูมิ 12.84°C (T_2) และยังพบพีคจากการตกผลึกที่อุณหภูมิ 6.05°C (T_3) และ –6.89°C (T_4) ซึ่งอาจเกิดจากการแข็งตัวของส่วนที่จุดหลอมเหลวต่ำที่มีไตรกลีเซอไรด์ที่มีกรดไขมันไม่อิ่มตัวเป็นองค์ประกอบ โดยมีเอนทาลปีในการตกผลึก (ΔH_c) เท่ากับ

66.55 J/g ด้านน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวเสวยนั้น เริ่มมีการตกผลึกที่อุณหภูมิ 16.19°C (T_{CO}) และเกิดพีคที่อุณหภูมิ 15.27°C (T_1) ซึ่งไม่พบในน้ำมันเมล็ดมะม่วงอีกสองสายพันธุ์คือเขียวมรกตและอกร่อง โดยมีการตกผลึกสูงสุดที่อุณหภูมิ 13.26°C (T_2) และยังพบพีคที่อุณหภูมิ 5.90°C (T_3) และ –7.13°C (T_4) ซึ่งอาจเกิดจากการแข็งตัวของส่วนที่มีจุดหลอมเหลวต่ำที่มีไตรกลีเซอไรด์ที่มีกรดไขมันไม่อิ่มตัวเป็นองค์ประกอบ โดยมีค่า ΔH_c เท่ากับ 66.39 J/g ส่วนพฤติกรรมการตกผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้พบว่าเริ่มมีการตกผลึกที่อุณหภูมิสูงที่ 16.61°C (T_{CO}) และพบพีคที่ 15.66°C (T_1) ซึ่งมีตำแหน่งใกล้เคียงกับของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวเสวย โดยน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้มีการตกผลึกสูงสุดที่อุณหภูมิ 14.05°C (T_2) และยังพบพีคในตำแหน่งใกล้เคียงกับของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวมรกตและเขียวเสวยที่อุณหภูมิ 5.96°C (T_3) และ –6.92°C (T_4) มีค่า ΔH_c ต่ำสุด เท่ากับ 64.73 J/g เมื่อเทียบกันทั้ง 4 สายพันธุ์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้เกิดการตกผลึกได้ง่ายซึ่งสอดคล้องกับผลของการตกผลึกที่อุณหภูมิคงที่ที่ 20°C โดยน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้มีการเพิ่มขึ้นก่อนของค่า SFC และยังสอดคล้องกับผลของการศึกษาการตกผลึกด้วย XRD ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป สำหรับการตกผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อกร่อง พบว่า อุณหภูมิที่เริ่มมีการตกผลึกคือ 16.08°C ซึ่งมีค่าต่ำสุดเมื่อเทียบกับอุณหภูมิที่เริ่มมีการตกผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อื่นๆ และมี ΔH_c เท่ากับ 66.70 J/g ทั้งอาจเนื่องมาจากองค์ประกอบซึ่งก็คือไตรกลีเซอไรด์ที่มีองค์ประกอบของกรดไขมันไม่อิ่มตัวอยู่ เช่น SOO และ OOO ที่พบมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับมะม่วงสายพันธุ์อื่น โดย Solís–Fuentes และ Durán–de–Bazúa (2004) กล่าวว่า น้ำมันเมล็ดมะม่วงมีกรดโอเลอิกซึ่งเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัวในปริมาณที่สูงส่งผลให้เกิดการเจือจางกับกรดไขมันอิ่มตัวในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ โดยทำให้ความเข้มข้นของกรดไขมันอิ่มตัวในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ซึ่งตกผลึกได้ง่ายกว่าลดลง ซึ่งในแง่ของพลังงานความร้อนในการตกผลึกอาจกล่าวได้ว่า ไตรกลีเซอไรด์ต้องคายพลังงานสูงขึ้นในการตกผลึกเพราะกรดโอเลอิกต้องคายพลังงานความร้อนออกมาในปริมาณที่สูงกว่ากรดไขมันอิ่มตัวเพื่อให้เกิดการตกผลึกนั่นเอง ดังนั้นน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อกร่องจึงตกผลึกได้ยากกว่าน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อื่น

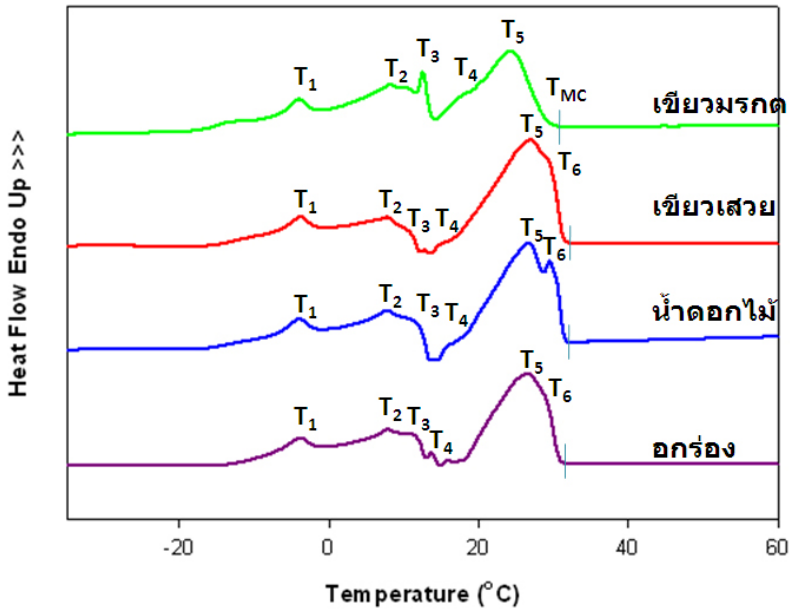
จากพฤติกรรมการหลอมเหลวที่แสดงในภาพที่ 25 พบว่า น้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวมรกตเริ่มมีการหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ –18°C โดย จะมีการหลอมเหลวสูงสุดที่ 24.60°C (T_5) และเกิดการเหลอมเหลวอย่างสมบูรณ์ที่ 30.54°C (T_{MC}) ซึ่งมีค่าเอนทาลปีของการหลอมเหลว (ΔH_f) เท่ากับ 75.90 J/g สำหรับการหลอมเหลวของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวเสวยนั้น พบว่าเริ่มมีการหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ –15°C โดยการหลอมเหลวของผลึกส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 26.75°C (T_5) และพบพีคอีกครั้งที่อุณหภูมิ 29.19°C (T_6) ซึ่งมีการหลอมเหลวที่สมบูรณ์ที่ 31.94°C

(T_{MC}) มีค่า ΔH_f เท่ากับ 75.94 J/g ส่วนน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้นั้นเริ่มเกิดการหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ –16°C โดยการหลอมเหลวของผลึกส่วนใหญ่เกิดที่อุณหภูมิ 26.69°C (T_5) นอกจากนี้ยังเกิดไหล่ของพีคที่อุณหภูมิ 29.58°C (T_6) อย่างเด่นชัดกว่าสายพันธุ์อื่น ซึ่งอาจเกิดจากการหลอมเหลวของไตรกลีเซอไรด์ที่มีกรดไขมันอิ่มตัวเป็นองค์ประกอบ โดยน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้และเขียวเสวย พบพีคการหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 29°C อย่างเด่นชัด โดยจากการวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณไตรกลีเซอไรด์ พบว่า ทั้งสองสายพันธุ์มีปริมาณไตรกลีเซอไรด์ชนิด POP และ SOS ในปริมาณสูงโดยจากรายงานของ Sato และ Ueno (2005) กล่าวว่า ผลึกรูปแบบ δ ของ POP จะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 29.2°C และผลึกรูปแบบ β'_2 จะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 30.3°C จากช่วงอุณหภูมิดังกล่าวมีความใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ได้จาก DSC thermogram โดยพีคที่อุณหภูมิประมาณ 29°C จะเห็นได้ชัดมากที่สุดใน DSC thermogram ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้รองลงมาเป็น เขียวเสวย โดยพบไม่ชัดในสายพันธุ์อกร่องและเขียวมรกต ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณ POP ที่วิเคราะห์ได้ในน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 10 โดยน้ำดอกไม้พบ POP ในปริมาณสูงสุด รองลงมาเป็น เขียวเสวย อกร่อง และเขียวมรกต ตามลำดับ น้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้เกิดการหลอมเหลวอย่างสมบูรณ์ที่ 32.14°C (T_{MC}) และมีค่า ΔH_f เท่ากับ 76.72 J/g และพฤติกรรมการหลอมเหลวของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อกร่องนั้น พบว่าเริ่มเกิดการหลอมเหลวที่อุณหภูมิ –15°C โดยที่อุณหภูมิ 26.17°C (T_5) เป็นอุณหภูมิที่เกิดการหลอมเหลวสูงสุดของผลึกส่วนใหญ่ และพบพีคที่ 29.11°C (T_6) เพียงเล็กน้อย และเกิดการหลอมเหลวอย่างสมบูรณ์ที่ 31.32°C (T_{MC}) โดยมีค่า ΔH_f เท่ากับ 75.17 J/g

จากค่า ΔH_f ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์ พบว่าค่า ΔH_f ของสายพันธุ์น้ำดอกไม้มีค่าสูงสุด แสดงให้เห็นว่ามีผลึกในปริมาณสูงจึงต้องใช้พลังงานสูงในการหลอมละลายผลึก ซึ่งสอดคล้องกับผลของการหาค่า SFC ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยน้ำมันเล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้มีค่า SFC สูงสุดในทุกอุณหภูมิดังจะได้กล่าวต่อไป และเมื่อพิจารณาถึงอุณหภูมิที่เกิดการหลอมเหลวอย่างสมบรูณ์เมื่อเปรียบเทียบกันทั้ง 4 สายพันธุ์ พบว่า สายพันธุ์น้ำดอกไม้มีอุณหภูมิสูงสุด รองลงมาคือ เขียวเสวย เขียวมรกต และอกร่อง ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลของการหาค่า SMP โดยแสดงให้เห็นว่าน้ำมันเล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้มีจุดหลอมเหลวสูงสุด



ภาพที่ 24 พฤติกรรมการตกผลึกของจากมะม่วงแต่ละสายพันธุ์ โดยเครื่อง DSC
หมายเหตุ T_1, T_2, T_3 และ T_4 หมายถึง อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งจะแสดงค่าในตารางที่ 13



ภาพที่ 25 พฤติกรรมการหลอมเหลวของจากมะม่วงแต่ละสายพันธุ์ โดยเครื่อง DSC
หมายเหตุ T_1, T_2, T_3, T_4, T_5 และ T_6 หมายถึง อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งจะแสดงค่าในตารางที่ 13

ตารางที่ 13 อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของการตกผลึกและการหลอมเหลวของน้ำมันเมล็ดมะม่วง

Sample	Enthalpy (J/g)	อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลง (°C)							
		T_{CO}	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_{MC}
การตกผลึก									
เขียวมรกต	66.55 ± 0.18[a]	18.52 ± 0.28[a]	17.25 ± 0.17	12.84 ± 0.26	6.05 ± 0.02	−6.89 ± 0.18			
เขียวเสวย	66.39 ± 0.54[ab]	16.19 ± 0.02[b]	15.27 ± 0.20	13.26 ± 0.01	5.90 ± 0.04	−7.13 ± 0.01			
น้ำดอกไม้	64.73 ± 0.86[b]	16.61 ± 0.47[a]	15.66 ± 0.16	14.05 ± 0.05	5.96 ± 0.05	−6.92 ± 0.16			
อกร่อง	66.70 ± 0.77[a]	16.08 ± 0.16[b]	12.70 ± 0.49	5.58 ± 0.11	−7.23 ± 0.15				
การหลอมเหลว									
เขียวมรกต	75.90 ± 0.29[ab]		−4.00 ± 0.03	8.18 ± 0.03	12.86 ± 0.26	17.49 ± 0.49	24.60 ± 0.23		30.54 ± 0.64[a]
เขียวเสวย	75.94 ± 0.64[ab]		−3.91 ± 0.35	7.65 ± 0.28	10.75 ± 0.21	14.52 ± 0.20	26.75 ± 0.35	29.19 ± 0.19	31.94 ± 0.21[a]
น้ำดอกไม้	76.72 ± 0.21[a]		−4.07 ± 0.12	7.55 ± 0.06	11.79 ± 0.20	15.71 ± 0.11	26.69 ± 0.14	29.58 ± 0.06	32.14 ± 0.57[a]
อกร่อง	75.17 ± 0.71[a]		−3.88 ± 0.18	7.74 ± 0.09	11.22 ± 0.62	13.46 ± 0.47	26.17 ± 0.64	29.11 ± 0.10	31.32 ± 0.98[a]

หมายเหตุ T_{CO} หมายถึง อุณหภูมิที่เริ่มเกิดการตกผลึก, T_{MC} หมายถึง อุณหภูมิที่เกิดการหลอมเหลวอย่างสมบูรณ์

[a–d] หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแถวคอลัมน์เดียวกันที่มีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

4.4 การศึกษาพฤติกรรมการตกผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วง

4.4.1 การศึกษารูปร่างผลึก การเปลี่ยนแปลงรูปร่างผลึก จำนวนและขนาดเฉลี่ยของผลึกตามเวลาโดยการใช้เครื่อง Polarized Light Microscopy (PLM) ที่อุณหภูมิ 20°C โดยทำการลดและควบคุมอุณหภูมิโดยใช้ตู้ควบคุมอุณหภูมิ และใช้เลนส์ที่มีกำลังขยาย 40x ซึ่งได้ผลการทดลองเป็นภาพถ่ายผลึกที่ระยะเวลาต่างๆ ดังแสดงในภาคผนวก ฐ และได้เลือกภาพถ่ายมาเฉพาะบางช่วงเวลาของการตกผลึกของแต่ละตัวอย่างมาแสดงในภาพที่ 26–29

จากภาพถ่ายของการตกผลึกของน้ำมันจากเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวมรกต ดังแสดงในภาพที่ 26 พบว่ามีการตกผลึกจำนวนมากในนาทีที่ 10 (โดยเริ่มตกผลึกตั้งแต่นาทีที่ 5) โดยผลึกมีขนาดเล็กและมีรูปร่างคล้ายเข็ม (needle–like) ซึ่งหลังจากนั้นก็มีการโตของขนาดผลึกและมีการเพิ่มขึ้นของจำนวนผลึกอย่างต่อเนื่อง ซึ่ง Ghotra และคณะ (2002) กล่าวว่า ผลึกรูปเข็มมักจะเป็นผลึกที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลให้มีโครงสร้างแบบ β' ผลึกเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างนาทีที่ 20 และเห็นเป็นผลึกขนาดใหญ่ชัดเจนในนาทีที่ 80 ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่า บางส่วนของไขมันเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของผลึกจาก β' ไปเป็น β จากนั้นผลึกก็มีการเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ขึ้นและมีจำนวนเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจนถึงนาทีที่ 120

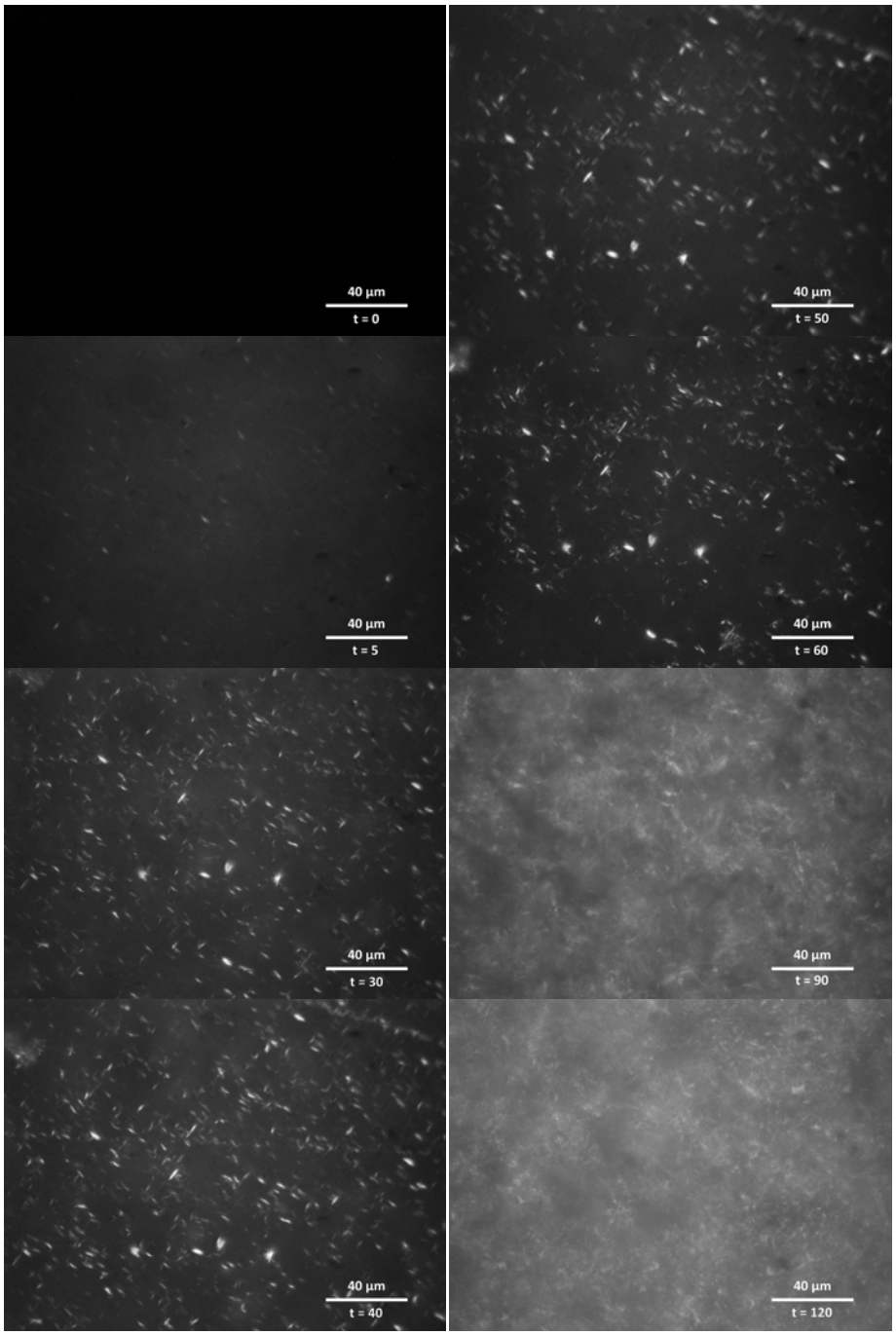
จากภาพถ่ายของการตกผลึกของน้ำมันจากเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวเสวย ดังแสดงในภาพที่ 27 พบว่าเริ่มเห็นการตกผลึกที่ชัดเจนในนาทีที่ 30 โดยผลึกที่เกิดขึ้นมีลักษณะที่ผสมกันระหว่างผลึกรูปเข็มกับผลึกรูปทรงกลมซึ่งเกิดจากผลึกรูปเข็มมาประกอบกันอย่างสุ่มตามแนวรัศมีจากจุดศูนย์กลางของการโตของผลึก (Golden และคณะ, 2010) และเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผลึกในนาทีที่ 40 หลังจากนั้นก็มีการเพิ่มขึ้นและการขยายขนาดตามเวลา

สำหรับภาพถ่ายของการตกผลึกของน้ำมันจากเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้ แสดงในภาพที่ 28 พบว่าเริ่มเห็นการตกผลึกที่ชัดเจนในนาทีที่ 35 โดยผลึกที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นผลึกรูปทรงกลม และเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผลึกเป็นทรงกลมที่มีความสมบูรณ์มากขึ้นและมีขนาดใหญ่ขึ้นในนาทีที่ 40 หลังจากนั้นก็มีการเพิ่มขึ้นและการขยายขนาดตามเวลาจนถึงนาทีที่ 120

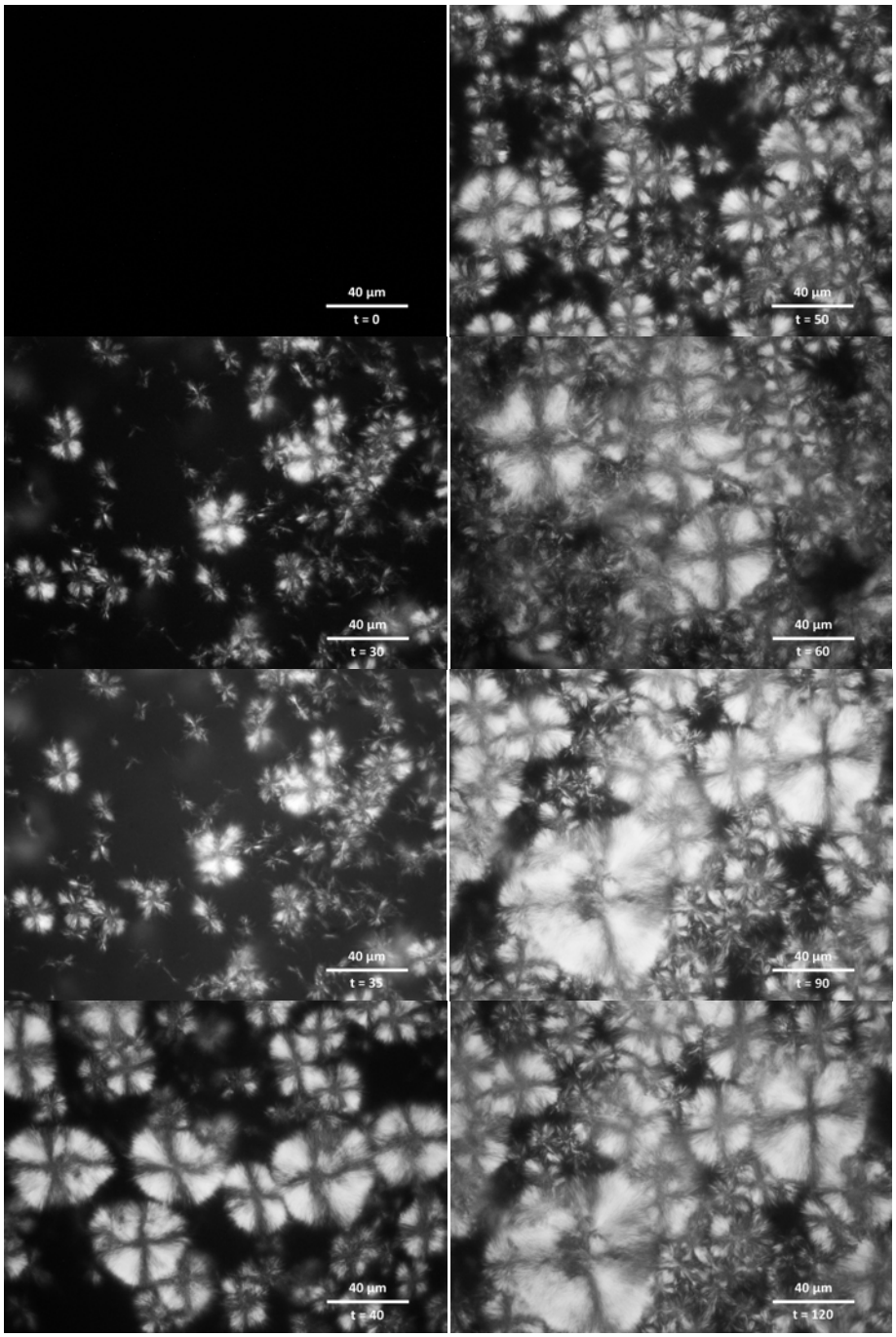
จากภาพถ่ายของการตกผลึกของน้ำมันจากเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อกร่อง แสดงในภาพที่ 29 พบว่าเริ่มเห็นการตกผลึกในนาทีที่ 30 และเห็นการตกผลึกที่ชัดเจนได้ในนาทีที่ 35 โดยผลึกมีลักษณะยาวและแคบคล้ายหูกระต่าย (bow–tie) หรือเส้นใย (filamentous–shaped) (Manning และ Dimick, 1985 อ้างอิงใน Sonwai และ Mackley, 2006) และผลึกจะมีการเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมากอย่างรวดเร็ว และเกิดการซ้อนทับกันของผลึกในนาทีที่ 40 โดยตั้งแต่นาทีที่ 50 ผลึกมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยมีขนาดใหญ่ขึ้นเพียงเล็กน้อยและมีการขยายขนาดขึ้นอย่างช้าๆ จนถึงนาทีที่ 120 นอกจากนี้ยังมีผลึกบางส่วนอยู่ในทรงกลม

จากภาพถ่ายผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์ พบว่า มีการกระจายตัวของขนาดผลึกค่อนข้างมาก โดยจะเห็นได้ชัดในสายพันธุ์เขียวเสวยและเขียวมรกต โดยมีผลึกส่วนใหญ่จับกันเป็นกลุ่ม (aggregation) (Smith, 2005) โดยการจับกลุ่มกันของผลึกไขมันบางส่วนเกิดจากคุณสมบัติทางกายภาพของไตรกลีเซอไรด์ และบางส่วนเกิดจากเฟสที่ต่างกันของไตรกลีเซอไรด์ในไขมัน ซึ่งปัจจัยหลักที่มีผลคือ การมีโครงสร้างของผลึกหลายรูปแบบและปฏิสัมพันธ์ระหว่างสายโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ (Sato, 2001; Koyano และ Sato, 2002)

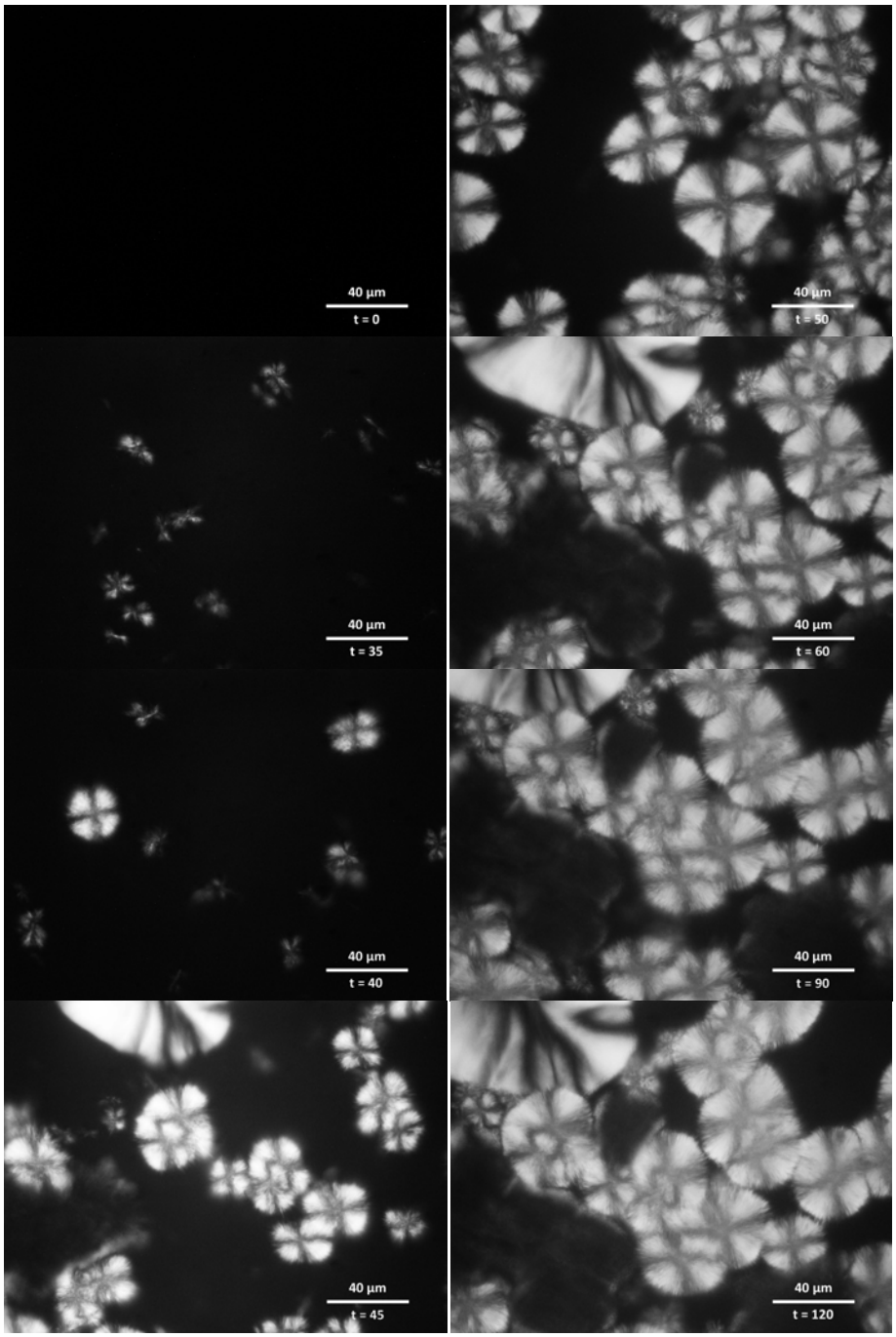
จากภาพถ่ายผลึกด้วยเทคนิค PLM ในงานวิจัยนี้ไม่สามารถนับจำนวนและวัดขนาดของผลึกที่แน่นอนได้ เนื่องจากส่วนใหญ่ผลึกมีขนาดค่อนข้างเล็ก มีการกระจายตัวของขนาดผลึกค่อนข้างมาก มีจำนวนผลึกมาก และมีการซ้อนทับกันของผลึก ซึ่งถือเป็นข้อด้วยของเทคนิคนี้ ดังที่ Ghotra และคณะ (2002) ได้กล่าวไว้ว่าการใช้เทคนิค PLM จะมีความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากที่ไม่สามารถแสดงภาพผลึกทั้งภายใต้กล้องได้หรือการเกิด missing mass ในภาพที่แสดง แต่อย่างไรก็ตาม การใช้เทคนิคภาพถ่ายจาก PLM นั้นก็ยังเป็นที่นิยมเนื่องจากสามารถให้ภาพที่คมชัดการเตรียมตัวอย่างทำได้ง่ายและมีขั้นตอนที่ไม่ยุ่งยาก (Tang และ Marangoni, 2006)



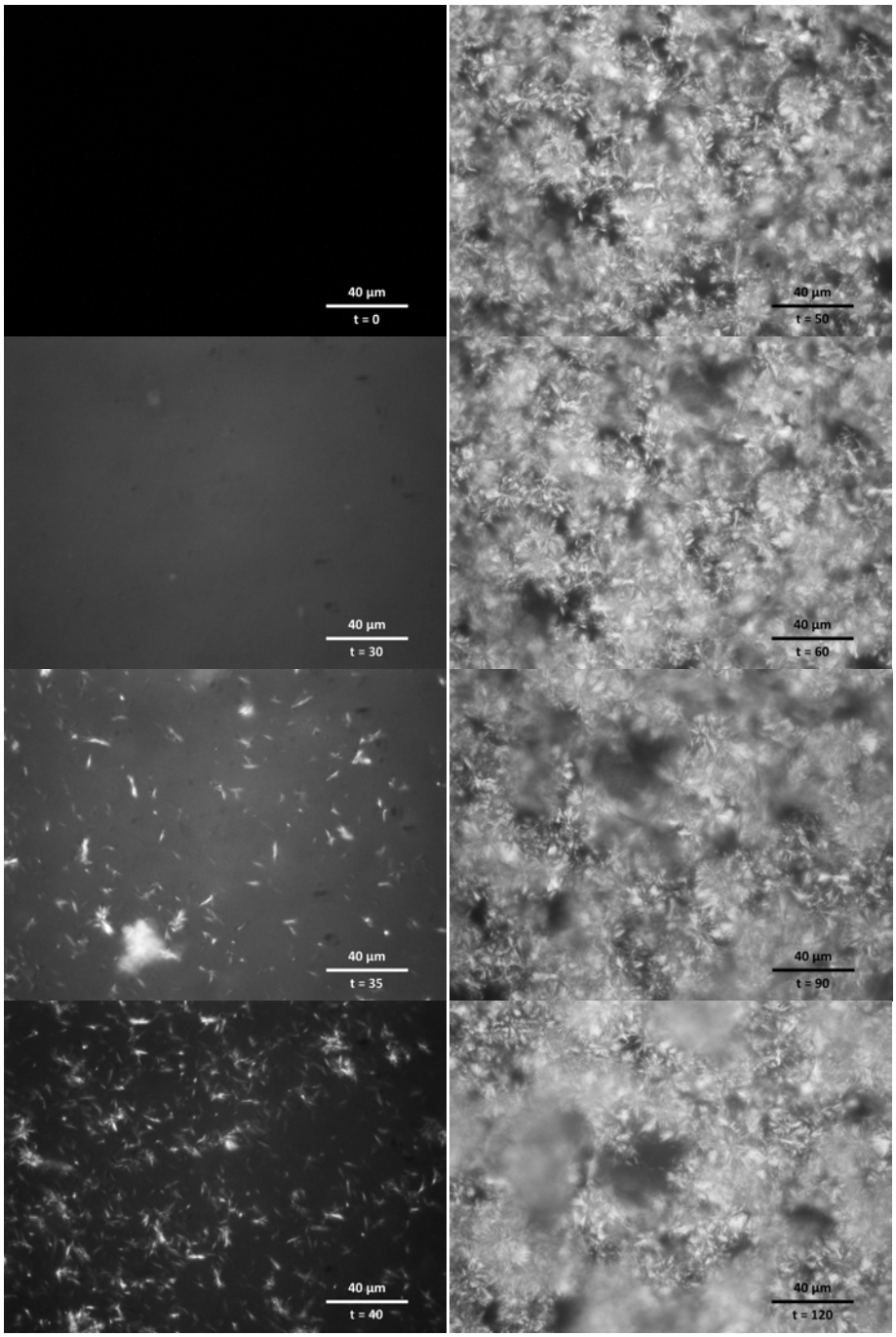
ภาพที่ 26 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวมรกต ตามเวลา (t มีหน่วยเป็นนาที) ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 400 เท่า



ภาพที่ 27 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวเสวย ตามเวลา (t มีหน่วยเป็นนาที) ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 400 เท่า



ภาพที่ 28 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้ ตามเวลา (t มีหน่วยเป็นนาที) ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 400 เท่า



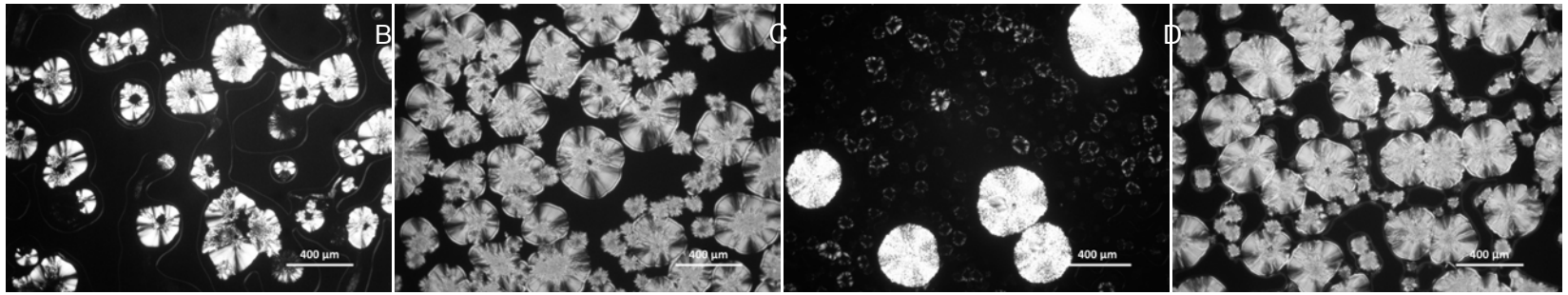
ภาพที่ 29 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อกร่อง ตามเวลา (t มีหน่วยเป็นนาที) ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 400 เท่า

นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษารูปร่างผลึก จำนวนและขนาดเฉลี่ยของผลึกเมื่อเก็บตัวอย่างไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 20 และ 25°C หลังจากบ่ม 24 และ 48 ชั่วโมง (ทั้ง 2 อุณหภูมิ) นำมาส่องดูผลึกด้วย PLM ร่วมกับกล้องถ่ายภาพดิจิตอลและกำลังขยายของเลนส์วัตถุเท่ากับ x4 ดังแสดงในภาพที่ 30–33

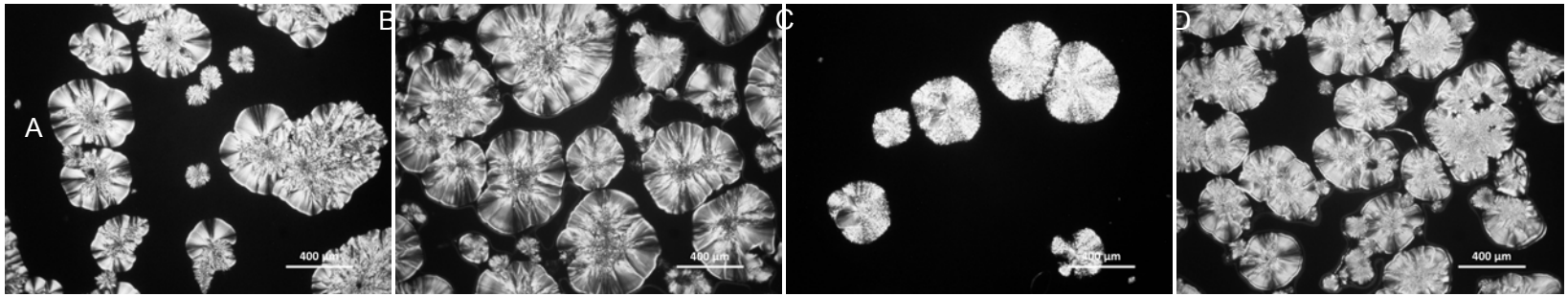
จากภาพถ่ายผลึกหลังจากบ่มที่อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 40 เท่า ดังแสดงในภาพที่ 30 พบว่าผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์มีลักษณะเป็นทรงกลม (spherulitic) ที่ส่วนกลางและส่วนขอบของทรงกลมมีลักษณะที่แตกต่างไปขากส่วนกลาง โดยผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้มีขนาดใหญ่ที่สุดแต่มีจำนวนน้อยที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 30C โดยพบผลึกขนาดเล็กเพียงเล็กน้อย ในขณะที่น้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวมรกต เขียวเสวย และอกร่อง พบทั้งผลึกขนาดใหญ่และขนาดเล็กโดยเขียวเสวยและอกร่องให้จำนวนผลึกที่ใกล้เคียงกัน และเมื่อทำการเก็บที่อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพที่ 31 พบว่าขนาดของผลึกที่ได้มีขนาดใหญ่ขึ้นทั้ง 4 สายพันธุ์ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มให้นานขึ้นขนาดของผลึกที่ได้ก็จะมีขนาดใหญ่ขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการโตของผลึก (crystal growth) โดยยังมีจำนวนผลึกใกล้เคียงกันที่ 24 ชั่วโมง เช่นเดียวกันกับการบ่มที่อุณหภูมิ 25°C (ภาพที่ 32 และ 33) เมื่อทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิในการบ่มระหว่าง 20°C กับ 25°C พบว่าผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์ที่บ่มที่อุณหภูมิ 25°C มีขนาดใหญ่กว่าและมีจำนวนผลึกที่น้อยลง โดยที่ไม่พบผลึกขนาดเล็ก ซึ่งปัจจัยหลายอย่างที่มีผลกระทบกับรูปร่างของผลึกไขมัน เช่น สภาวะในกระบวนผลิตสามารถมีผลต่อขนาดของผลึกไขมัน (fat crystal clusters) โดยการศึกษาหลายงานแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการตกผลึก การลดลงของอัตราการทำเย็นและอัตราการกวน นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของขนาดผลึก (Herrera และ Hartel, 2000; Campos และคณะ, 2002; Martini และคณะ, 2002 อ้างถึงใน Tang และ Marangoni, 2006) ผลกระทบของสภาวะในกระบวนผลิตโดยเฉพาะอย่างยิ่งผลกระทบจากอุณหภูมิในการตกผลึกที่มีผลต่อขนาดของผลึกอธิบายได้โดยอัตราการเกิดนิวเคลียสที่แตกต่างกันโดยเกี่ยวกับสภาวะในกระบวนผลิตที่แตกต่างกัน (Singh และคณะ, 2004 อ้างถึงใน Tang และ Marangoni, 2006) ที่อุณหภูมิการตกผลึกสูงหรืออัตราการทำเย็นที่ช้า อัตราการเกิดนิวเคลียสจะลดลง โดยการลดลงของจำนวนนิวเคลียสมักจะเกิดขึ้นไปพร้อมกับการเพิ่มขึ้นในการโตของผลึก (Herrera และ Hartel, 2000 อ้างถึงใน Tang และ Marangoni, 2006) ดังนั้นขนาดของผลึกจะเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิการตกผลึกสูงกว่าและ/หรืออัตราการทำเย็นที่ช้า (Tang และ Marangoni, 2006)

โดยทั่วไปรูปร่างและขนาดของผลึกไขมันจะขึ้นอยู่กับ สภาวะในกระบวนผลิต และปริมาณไขมันที่เป็นของแข็ง และจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างผลึกที่มีหลายรูปแบบ (polymorphism) ของผลึกไขมันเพียงเล็กน้อย โดยตัวอย่างไขมันที่มีภาวะที่มีโครงสร้างผลึกที่เหมือนกันสามารถมีผลึกไขมันที่มี

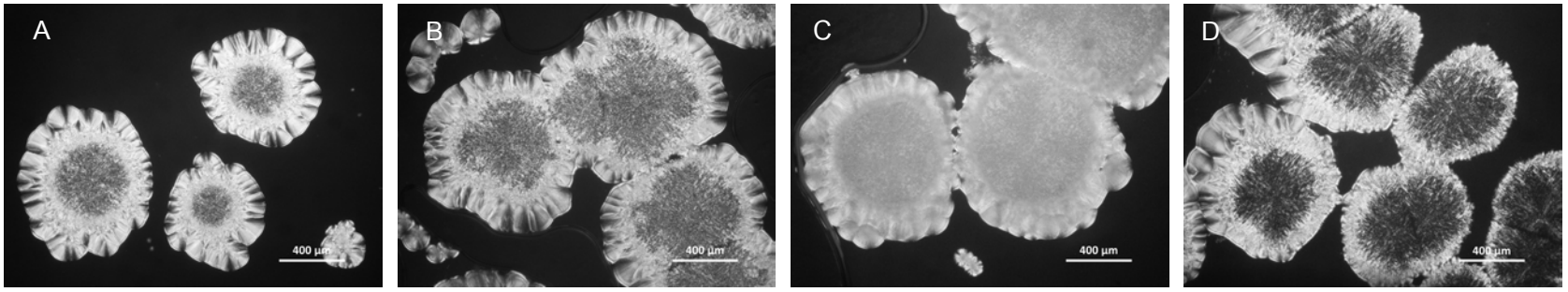
รูปร่างและขนาดแตกต่างขึ้นอยู่กับสภาวะในกระบวนผลิตและปริมาณไขมันที่เป็นของแข็ง (Tang และ Marangoni, 2006) โดย Manning และ Dimick (1985) อ้างถึงใน Tang และ Marangoni (2006) ได้ศึกษาสัณฐานวิทยา (morphology) ของตัวอย่างเนยโกโก้ที่มีภาวะที่มีหลายรูปแบบที่แตกต่างกัน โดย SEM (scanning electron microscopy) และ PLM พบว่ากลุ่มผลึกไขมันที่มีรูปแบบไม่สม่ำเสมอ เหมือน spine (spine–like) เหมือนขนนก (feathery) และเหมือนเข็ม (needle–like) ถูกพบว่ามีโครงสร้างในรูปแบบ β และ β' ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการตกผลึกและเวลาในการบ่ม นอกจากนี้การศึกษาของ Herrera และ Hartel (2000) อ้างถึงใน Tang และ Marangoni (2006) ได้แสดงให้เห็นว่าการใช้อัตราในการทำให้เย็นลงที่แตกต่างกันไปยังอุณหภูมิที่แตกต่างกันจะทำให้ได้ผลึกไขมันที่มีขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกัน แต่อย่างไรก็ตามก็พบว่าในทุกตัวอย่างไขมันที่ทำการศึกษาจะมีรูปแบบโครงสร้างเป็น β' ซึ่ง Tang และ Marangoni (2006) กล่าวว่าภาวะที่มีหลายรูปแบบเกิดจากการจัดเรียงตัวของโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ที่แตกต่างกัน ที่โครงสร้างในช่วงนาโน (nanostructural range) ภายในผลึกไขมันระยะแรก เมื่อเกิดผลึกไขมันระยะแรกขึ้น ผลึกเหล่านี้จะเกิดการรวมตัวหรือโต ในแต่ละผลึก จากนั้นจะเกิดเป็นกลุ่มของผลึกไขมันซึ่งเกิดจากการเชื่อมข้ามในสร้างเป็นโครงสร้างผลึกไขมันแบบสามมิติ (3D) กล้องจุลทรรศน์จะมีความไวในโครงสร้างระดับไมโครในโครงสร้างผลึกไขมันและการเกิดรูปร่างของกลุ่มผลึกไขมัน ซึ่งถูกควบคุมโดยทางจลนศาสตร์ของการจัดเรียงตัวหรือการเกิดนิวเคลียสของผลึกในช่วงแรก



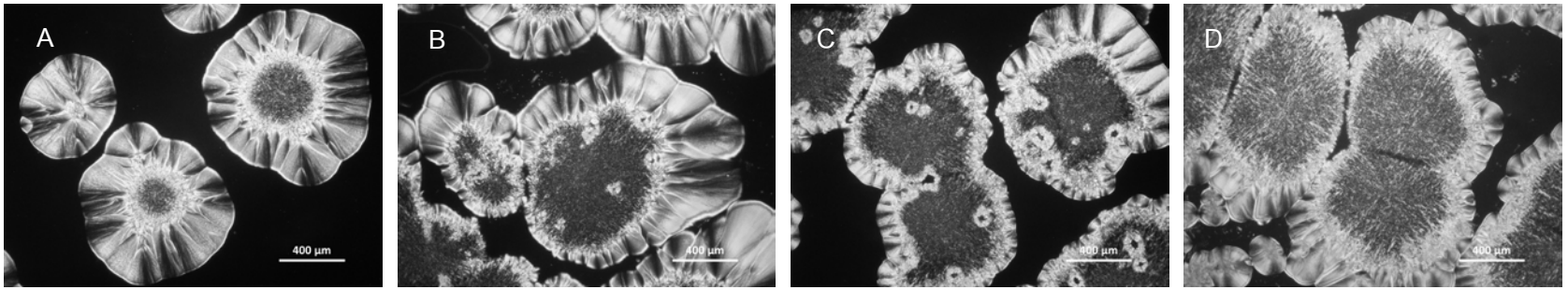
ภาพที่ 30 ผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวมรกต (A), เขียวเสวย (B), น้ำดอกไม้ (C) และอกร่อง (D) หลังจากตกผลึกที่อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 40 เท่า



ภาพที่ 31 ผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวมรกต (A), เขียวเสวย (B), น้ำดอกไม้ (C) และอกร่อง (D) หลังจากตกผลึกที่อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 40 เท่า

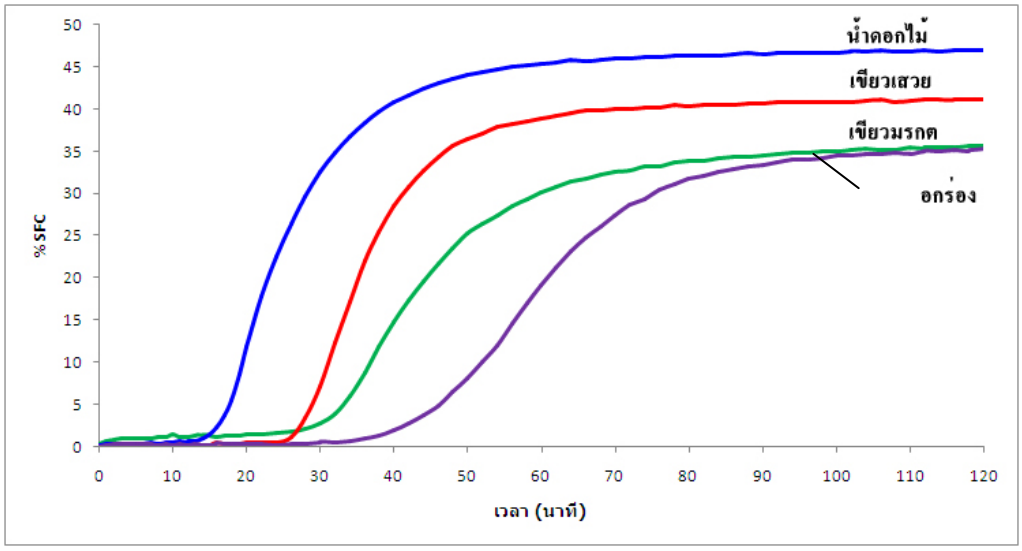


ภาพที่ 32 ผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวมรกต (A), เขียวเสวย (B), น้ำดอกไม้ (C) และอกร่อง (D) หลังจากตกผลึกที่อุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 40 เท่า

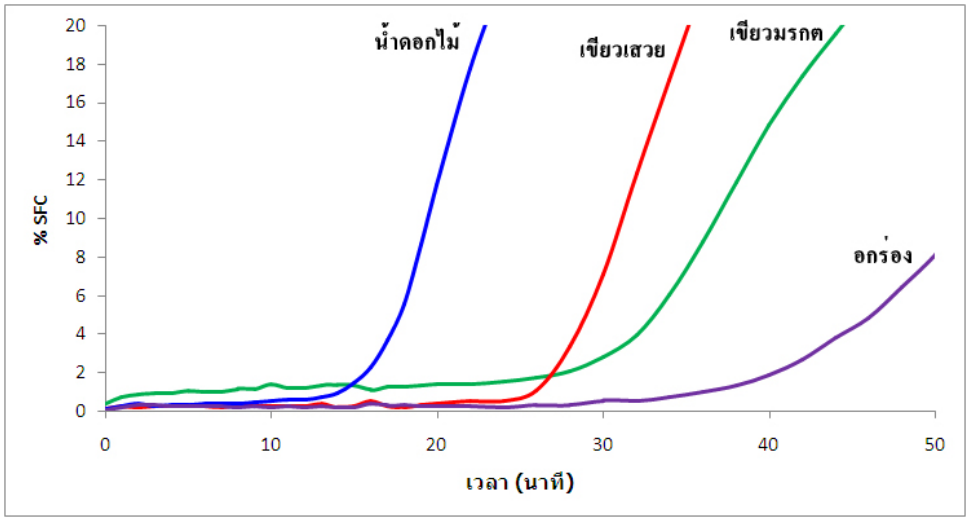


ภาพที่ 33 ผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวมรกต (A), เขียวเสวย (B), น้ำดอกไม้ (C) และอกร่อง (D) หลังจากตกผลึกที่อุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 40 เท่า

4.4.2 การศึกษาระดับการตกผลึกและการเปลี่ยนแปลงของระดับการตกผลึกตามเวลา โดยใช้เครื่อง pulse-Nuclear Magnetic Resonance (p-NMR) ได้ผลการเปลี่ยนแปลงของค่า SFC ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงตามเวลาที่อุณหภูมิ 20 °C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพที่ 34 โดยค่า SFC ที่เวลาต่างๆ แสดงในตารางที่ 17 ภาคผนวก ฑ



ภาพที่ 34 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณไขมันที่เป็นของแข็ง (Solid Fat Content; SFC) ของน้ำมันเมล็ดมะม่วง 4 สายพันธุ์ ที่อุณหภูมิในการตกผลึกคงที่ที่ 20°C



ภาพที่ 35 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณไขมันที่เป็นของแข็ง (Solid Fat Content; SFC) ในช่วงแรกของการตกผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วง 4 สายพันธุ์ ที่อุณหภูมิในการตกผลึกคงที่ที่ 20°C

จากภาพที่ 34 จะเห็นได้ว่าค่า SFC ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวมรกตเริ่มตกผลึกก่อนที่เวลาประมาณนาทีที่ 2 ดังแสดงในภาพที่ 35 ซึ่งเป็นภาพขยายให้เห็นช่วงเวลาช่วงเริ่มต้นของการทดลองในช่วงแรก (ประมาณ 50 นาที) ค่า SFC ของเขียวมรกตมีค่าต่ำและค่อนข้างคงที่ (แต่มีค่า SFC ในช่วงแรกมากกว่าสายพันธุ์อื่น) ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่ายผลึกในภาพที่ 26 ซึ่งเห็นได้ว่ามะม่วงชนิดดังกล่าวเริ่มตกผลึกก่อนและผลึกมีขนาดเล็กมาก จนกระทั่งเริ่มมีการเพิ่มขึ้นของค่า SFC หลังจากนาทีที่ 30 เป็นต้นไป และเริ่มคงที่ที่เวลาประมาณ 80 นาที เป็นต้นไป ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่ายผลึกโดยจะเห็นได้ว่าทั้งจำนวนและขนาดผลึกหลังจากนาทีที่ 80 มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ค่า SFC สูงสุดคือ 35.64% จากค่า SFC ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวเสวยจะเห็นได้ว่าเริ่มมีการตกผลึกที่เวลาประมาณ 26 นาที หลังจากนั้นค่า SFC เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเมื่อพิจารณาจากภาพถ่ายผลึกจะพบว่าที่นาทีที่ 30 เริ่มมีการเห็นผลึกอย่างชัดเจน (ภาพที่ 27) จากนั้นผลึกก็จะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง เพิ่มจำนวนและขยายขนาดอย่างรวดเร็ว จากนั้นค่า SFC จะเริ่มคงที่ที่เวลาประมาณ 70 นาที โดยมีค่า SFC สูงสุดภายในระยะเวลา 2 ชั่วโมง ประมาณ 41% สำหรับการตกผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้จะเห็นได้จากค่า SFC ซึ่งในช่วงประมาณ 10 นาทีแรกนั้นยังไม่เกิดการตกผลึก โดยสังเกตได้ว่ามีค่า SFC เข้าใกล้ศูนย์ แต่หลังจากนาทีที่ 15 เกิดการตกผลึกโดยค่า SFC เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเริ่มคงที่ที่เวลาประมาณ 60 นาที ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่ายผลึกที่แสดงให้เห็นว่าหลังจากที่เวลาประมาณ 60 นาที ผลึกมีการเปลี่ยนแปลงทางด้านขนาดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (ภาพที่ 28)โดยมีค่า SFC สูงสุดประมาณ 47% ส่วนการตกผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อกร่องนั้นเริ่มเกิดขึ้นช้าที่สุดเมื่อเทียบกับมะม่วงอีกสามสายพันธุ์ โดยในช่วงแรกประมาณ 30 นาทีมีค่า SFC ต่ำมาก หลังจากนาทีที่ประมาณ 42 ค่า SFC ก็เพิ่มสูงขึ้นอย่างช้าๆ และเริ่มคงที่ที่เวลาประมาณ 110 นาที โดยภาพถ่ายผลึกของสายพันธุ์อกร่องแสดงให้เห็นว่าการตกผลึกเป็นไปอย่างช้าเช่นกัน และผลึกมีขนาดเล็ก โดยมีค่า SFC สูงสุดประมาณ 35% จากภาพที่ 34 จะเห็นได้ว่าระยะเวลาที่ใช้ก่อนการเริ่มตกผลึก (crystallization induction time) เรียงลำดับจากน้อยไปมากคือ เขียวมรกต น้ำดอกไม้ เขียวเสวย และอกร่อง นอกจากนี้ค่า SFC สูงสุดที่เวลา 120 นาที ของการตกผลึกเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยคือ น้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้ เขียวเสวย เขียวมรกต และอกร่อง ตามลำดับ

จากภาพที่ 34 ได้นำ SFC curve มา fit เข้ากับสมการของ Avrami ที่แสดงในสมการที่ 1 บทที่ 2 โดยใช้ Solver ในโปรแกรม MS Excel 2007 ในการหาค่าคงที่ต่างๆ คือ ค่า k และ n จากนั้นทดสอบค่า coefficient of determination โดยใช้ Data analysis regression ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% การหา coefficient of determination เป็นการคำนวณหาตัวชี้วัดว่า model นี้จะได้รับการยอมรับมากน้อยเพียงใด ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของ R^2 โดยค่า R^2 ควรมีค่าเข้มใกล้ 1 ดีที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 14 จากผลการวิเคราะห์พบว่าน้ำมันเมล็ดมะม่วง 4 สายพันธุ์ โดยน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้มีค่า k

สูงสุด เท่ากับ 4.23×10^{-5} นาที$^{-1}$ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.005$) รองลงมาเป็น เขียวเสวย เขียวมรกต และอกร่อง ตามลำดับโดยค่า k เป็นค่าคงที่ที่จะสัมพันธ์กับอัตราในการตกผลึก ซึ่งจะขึ้นกับอุณหภูมิในการตกผลึก โดยค่า k จะบอกได้ทั้งอัตราในการเกิดนิวเคลียสและอัตราในการโตของผลึก (Sharples, 1996 อ้างอิงใน Wright และคณะ, 2000) จากค่า k ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้แสดงว่ามีอัตราในการเกิดนิวเคลียสและอัตราในการโตของผลึกสูงสุด หรือตกผลึกได้เร็วที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณกรดไขมัน ทั้งนี้เนื่องจากน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้มีกรดไขมันชนิดอิ่มตัว เช่น กรดสเตียริก สูงกว่าสายพันธุ์อื่น ส่วนค่า n หรือ Avrami exponent นั้น ในบางครั้งจะเรียกว่าดัชนีการตกผลึกซึ่งจะแสดงถึงกลไกการโตของผลึก โดยปกติแล้วการรายงานค่า n จะรายงานในรูปของจำนวนเต็มโดยปัดขึ้นจากเศษของค่า ดังนั้นแสดงว่าค่า n จากผลการวิเคราะห์ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์ทั้ง 4 สายพันธุ์ มีค่าเป็น 4 โดยจากการรายงานของ Sharples (1996) อ้างอิงใน Wright และคณะ (2000) เกี่ยวกับค่า n ที่จะบอกถึงชนิดของการโตของผลึกและการเกิดนิวเคลียสที่คาดว่าจะเกิดขึ้น ซึ่งค่า n ของมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์ มาจาก 3+1โดยทั่วไปมีหมายความว่าการโตของผลึกเป็นแบบทรงกลม (spherulitic) (เลข 3) ซึ่งเกิดจากนิวเคลียสที่เกิดขึ้นเป็นระยะๆ และกระจัดกระจาย (เลข 1) แต่จากผลการศึกษาด้วย PLM พบว่าเฉพาะพันธุ์เขียวมรกตและอกร่องเท่านั้นที่แสดงการโตของผลึกในแบบ rod–like หรือ แบบ needle–like (ภาพที่ 26–29) ซึ่งควรจะมีค่า n เป็น 2 ซึ่งมาจาก 1+1 โดยเลข 1 (ตัวแรก) หมายความว่าการโตของผลึกเป็นแบบ rod–like ส่วนเลข 1 (ตัวที่สอง) มีความหมายว่านิวเคลียสมีการเกิดขึ้นเป็นระยะๆ ส่วนพันธุ์เขียวเสวยแสดงการโตแบบทรงกลมซึ่งควรจะมีค่า n เป็น 3 หรือ 3+0 ซึ่งหมายความว่า โดยเลข 3 หมายถึงการโตแบบทรงกลมและหมายเลข 0 หมายถึง การเกิดของนิวเคลียสเพียงครั้งเดียว ไม่มีการเพิ่มขึ้นของนิวเคลียสในระหว่างการตกผลึก ส่วนค่า n ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้ที่ได้จากการทดลองเท่ากับ 3.19 มีค่า n แบบ 3+1=4 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการโตของผลึกเป็นแบบทรงกลม (spherulitic) และการเกิดของนิวเคลียสมีการเกิดขึ้นเป็นระยะๆ ในระหว่างการตกผลึก ซึ่งไม่สอดคล้องกับภาพถ่าย PLM (ภาพที่ 28) โดยพันธุ์น้ำดอกไม้น่าจะมีค่า n เป็น 3 หรือ 3+0 ซึ่งผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้มีการโตอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะในช่วงนาทีที่ 40–45 ที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดอย่างเห็นได้ชัด และการโตของผลึกเป็นแบบทรงกลม (spherulitic) จากผลการทดลองพบว่า ค่า n ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงไม่ตรงกับภาพถ่าย PLM ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการตกผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์นั้นยังไม่เข้าสู่สภาวะสมดุล (equilibrium) แบบสมบูรณ์ โดยยังมีการเพิ่มขึ้นของค่า SFC ตามเวลาอยู่อย่างช้า นอกนี้อาจเนื่องมาจากอัตราการทำเย็นหรืออัตราการลดลงของอุณหภูมิที่ผลต่ออัตราการตกผลึกและรูปร่างของผลึกนั้น มีความแตกต่างกัน โดยหากต้องการความถูกต้องมากขึ้น อาจจะต้องมีการใช้เครื่องมือในการควบคุมอุณหภูมิชนิดเดียวกันและมีสภาวะในการตกผลึกที่ไม่ต่างกัน

ตารางที่ 14 ค่าคงที่ต่างๆ ในสมการ Avrami ของน้ำมันเมล็ดมะม่วง 4 สายพันธุ์ ที่ได้จากการตกผลึกที่อุณหภูมิคงที่ที่ 20°C เป็นเวลา 120 นาที

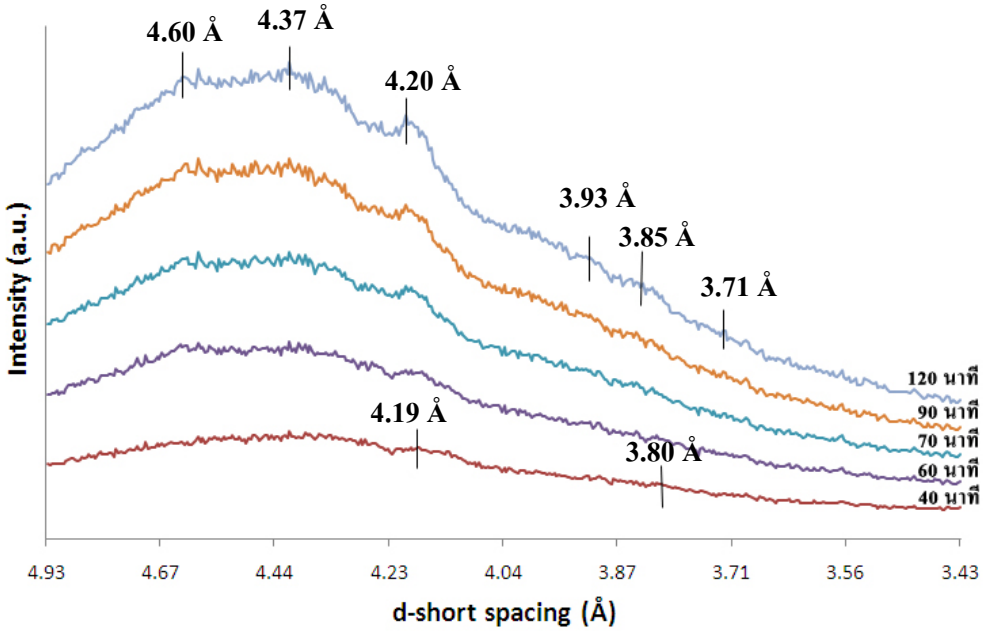
สายพันธุ์	ตัวแปรในสมการ Avrami		
	ค่า k (นาที$^{-1}$)	n	R^2
เขียวมรกต	$1.62\times10^{-6} \pm 8.45\times10^{-8c}$	3.20 ± 0.16^{b}	0.990
เขียวเสวย	$8.86\times10^{-6} \pm 1.25\times10^{-7b}$	3.59 ± 0.08^{a}	0.987
น้ำดอกไม้	$4.23\times10^{-5} \pm 9.42\times10^{-7a}$	3.19 ± 0.15^{b}	0.991
อกร่อง	$7.55\times10^{-7} \pm 3.03\times10^{-8c}$	3.31 ± 0.15^{b}	0.998

หมายเหตุ $^{a-c}$ หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแถวคอลัมน์เดียวกันที่มีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

4.4.3 การศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกและการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกตามเวลาโดยใช้เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) ตามระยะเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 20°C ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ (intensity) การกระเจิงของรังสีเอกซ์กับค่า d-short spacing (d; Å) ได้แสดงในภาพที่ 36-39 ซึ่งสามารถนำค่า d ไปเปรียบเทียบกับค่า d ของผลึกแต่ละรูปแบบที่ได้จากการสืบค้นในงานวิจัยที่ผ่านมาได้ นอกจากนี้ตารางสรุปผลของการติดตามการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกในระหว่างการตกผลึกที่อุณหภูมิ 20°C ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ฒ

จากการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกและการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกตามเวลาด้วย XRD นั้นพบว่านาทีที่ 40 เริ่มสามารถมองเห็นผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวมรกตได้อย่างชัดเจนซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการศึกษาปริมาณไขมันที่เป็นของแข็งด้วยเทคนิค p-NMR โดยที่นาทีที่ 40 เป็นช่วงที่มีค่า SFC มีค่าเพิ่มสูงขึ้น จึงเริ่มนำไขมันแข็งที่ได้จากช่วงเวลาดังกล่าวไปทำการวิเคราะห์ผลทำให้ได้ XRD pattern ในภาพที่ 35 ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวมรกต โดยพบว่า นาทีที่ 40 มีค่า d ที่ 3.80 และ 4.19 Å แสดงให้เห็นว่ามีการตกผลึกในรูปแบบ β' ซึ่งมีค่าสอดคล้องกับรายงานการวิจัยหลายงานที่ระบุว่าผลึกรูปแบบ β' มีค่า d ที่ 3.80-3.90 Å และ 4.20-4.30 Å ดังแสดงไว้ในตารางที่ 7 และ 8 โดย XRD pattern ของนาทีที่ 50 มีค่า d เช่นเดียวกับนาที

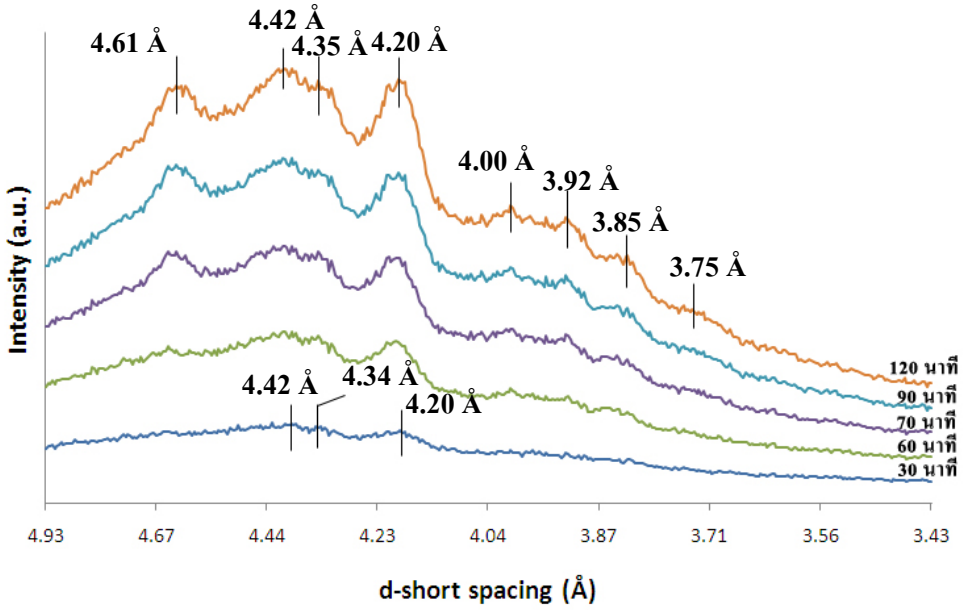
ที่ 40 จากนั้นนาทีที่ 60 ก็เกิดการเปลี่ยนแปลงโดยค่า d ที่ 3.93 และ 4.37 Å โดยค่า d ดังกล่าวตรงกับผลึกรูปแบบ pseudo-β' ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์มะนิลาที่อุณหภูมิในการเก็บ 22°C ซึ่งเป็นงานวิจัยของ Solís-Fuentes และคณะ (2005) และเริ่มพบค่า d ที่ 4.60 Å ด้วยความเข้มเพียงเล็กน้อย ซึ่งที่ค่า d ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าผลึกอยู่ในรูปแบบ β ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Narine และ Marangoni (1999) และจากหลายงานวิจัยที่มีการอ้างอิงใน Solís-Fuentes และคณะ (2005) จากนั้นจนถึงนาทีที่ 120 ก็ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของผลึก แต่มีการเปลี่ยนแปลงในด้านปริมาณของผลึกในโครงสร้างต่างๆ ซึ่งจากค่า d ในช่วงเดิมคือ ในช่วง 3.71-4.20 Å ที่แสดงให้เห็นว่ามีการตกผลึกในรูปแบบ β' ค่า d ที่ 4.60 Å ที่แสดงให้เห็นว่าผลึกอยู่ในรูปแบบ β แต่ความเข้มของพีคเปลี่ยนแปลงไปโดยค่า d ที่ 4.60 Å มีความเข้มเพิ่มมากขึ้นแสดงให้เห็นว่าผลึกมีการเปลี่ยนแปลงจาก β' ไปเป็น β ในปริมาณที่มากขึ้น



ภาพที่ 36 X-ray diffraction patterns ของน้ำมะเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวมรกต ที่ระยะเวลาต่างๆ ของการตกผลึกที่ 20°C

จากผลการวิเคราะห์ XRD pattern ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวเสวยดังแสดงในภาพที่ 37 พบว่า ที่นาทีที่ 30 เริ่มมีการตกผลึก โดยเกิดพีคที่ค่า d เท่ากับ 4.20 Å ซึ่งอาจเป็นพีคของผลึกในรูปแบบ β' และค่า d ที่ 4.42 และ 4.34 Å ซึ่งมีผลึกรูปแบบ pseudo-β' (Souza และคณะ,

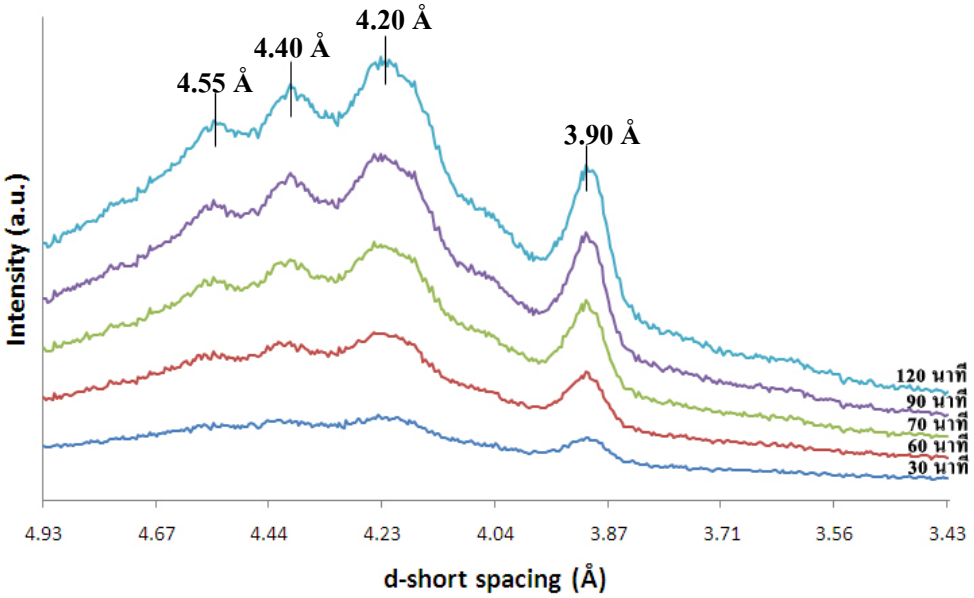
1990 และ Brien, 1998 อ้างอิงใน Solís–Fuentes และคณะ, 2005) ต่อมาในนาทีที่ 40 จะเห็นว่าผลึกอยู่ในรูปแบบ β' จากการเกิดพีคที่ค่า d เท่ากับ 3.75, 3.85, 3.92 และ 4.20 Å และมีผลึกรูปแบบ pseudo–β' เกิดขึ้นด้วย จากค่า d เท่ากับ 4.00, 4.35 และ 4.43 Å ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับที่รายงานไว้โดย Souza และคณะ (1990) และ Brien (1998) อ้างอิงใน Solís–Fuentes และคณะ (2005) จนเมื่อนาทีที่ 60 ก็พบพีคของค่า d ที่ 4.61 ซึ่งเป็นผลึกรูปแบบ β โดยมีค่าใกล้เคียงกับที่รายงานไว้โดย Ghotra และคณะ (2002); Czerniak (2005); Himawan และคณะ (2006); Souza และคณะ (1990); Brien (1998) อ้างอิงใน Solís–Fuentes และคณะ (2005) และ Narine และ Marangoni (1999) จากนั้นจนถึงนาทีที่ 120 ก็ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของผลึก แต่มีการเปลี่ยนแปลงในด้านปริมาณของผลึกในโครงสร้างต่างๆ ซึ่งเกิดจากผลึกที่มีรูปแบบโครงสร้างที่ไม่เสถียรมีการเปลี่ยนแปลงมาเป็นรูปแบบที่เสถียรมากกว่า



ภาพที่ 37 X–ray diffraction patterns ของน้ำมะเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวเสวย ที่ระยะเวลาต่างๆ ของการตกผลึกที่ 20°C

จากภาพที่ 38 แสดง XRD pattern ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้ที่ตกผลึกที่อุณหภูมิคงที่ที่ 20°C โดยนาทีที่ 30 เริ่มเห็นไขมันแข็งที่เกิดจากการตกผลึกชัดเจน จึงทำการวิเคราะห์ด้วย XRD พบว่า เกิดการตกผลึกในรูปแบบ β' จากการแสดงค่า d ที่ 3.90 และ 4.20 Å ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Marangoni และ McGauley (2003) และ Czerniak (2005) นอกจากนี้ยังพบผลึกรูปแบบ pseudo–β' จากการแสดงค่า d ที่ 4.40 Å ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับที่รายงานไว้โดย Souza และคณะ (1990)

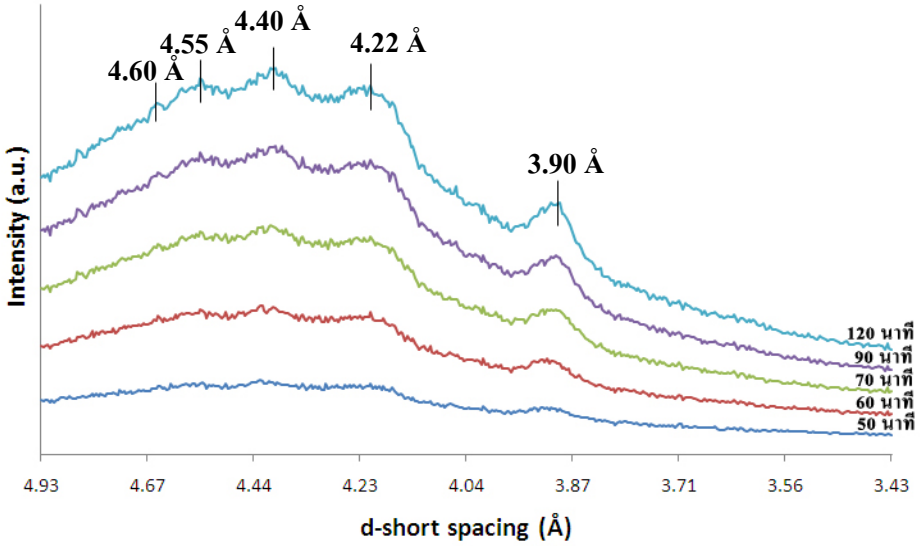
และ Brien (1998) อ้างอิงใน Solís-Fuentes และคณะ (2005) จากนั้นจนถึงนาทีที่ 50 ก็ไม่พบการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของผลึก แต่มีการเปลี่ยนแปลงในด้านปริมาณของผลึกในโครงสร้างต่างๆ สังเกตได้จากความเข้ม (ความสูง) ของพีคที่มากขึ้น ต่อมาในนาทีที่ 60 พบว่า ผลึกมีทั้งอยู่ในรูปแบบ β' และ pseudo-β' และยังพบว่าผลึกอยู่ในรูปแบบ β จากค่า d เท่ากับ 4.55 Å ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่มีการรายงานไว้ซึ่งรวบรวมและแสดงในตารางที่ 7 และ 8 จากนั้นจนถึงนาทีที่ 120 ก็ไม่พบการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของผลึก แต่มีการเปลี่ยนแปลงในด้านปริมาณของผลึกในโครงสร้างต่างๆ



ภาพที่ 38 X-ray diffraction patterns ของน้ำมะเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้ ที่ระยะเวลาต่างๆ ของการตกผลึกที่ 20°C

จากการศึกษาการตกผลึกที่อุณหภูมิคงที่ (20°C) ด้วยการวัดค่า SFC ด้วยเทคนิค p-NMR ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อกร่องพบว่า มีค่า SCF เพิ่มขึ้นและเห็นการตกผลึกที่ชัดเจนที่นาทีที่ 50 เป็นต้นไป ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่ายผลึก PLM จึงทำการวิเคราะห์ด้วย XRD ที่เวลาดังกล่าว ทำให้ได้ภาพที่ 39 ซึ่งพบว่า ที่นาทีที่ 50 เกิดการตกผลึกในรูปแบบ β' จากการแสดงค่า d ที่ 3.90 และ 4.20 Å สอดคล้องกับรายงานของ Marangoni และ McGauley (2003) และ Czerniak (2005) จากนั้นนาทีที่ 60 พบว่า เกิดการตกผลึกในรูปแบบ β' จากการแสดงค่า d ที่ 3.90 และ 4.20 Å และผลึกรูปแบบ pseudo-β' จากการแสดงค่า d ที่ 4.40 Å ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับที่รายงานไว้โดย Souza และคณะ (1990) และ Brien (1998) อ้างอิงใน Solís-Fuentes และคณะ (2005) และผลึกรูปแบบ β จากค่า d ที่

4.56 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่มีการรายงานไว้ดังแสดงในตารางที่ 8 จากนั้นจนถึงนาทีที่ 120 ก็ไม่พบการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของผลึก แต่มีการเปลี่ยนแปลงในด้านปริมาณของผลึกในโครงสร้างต่างๆ



ภาพที่ 39 X-ray diffraction patterns ของน้ำมะเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อกร่อง ที่ระยะเวลาต่างๆ ของการตกผลึกที่ 20°C

จากการติดตามการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกในระหว่างการตกผลึกที่อุณหภูมิคงที่ที่ 20°C ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์ พบว่า ผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์ มีการผสมของผลึกหลายรูปแบบ (ผลึกรูปแบบ β', pseudo-β' และ β) โดยน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวเสวยและน้ำดอกไม้ซึ่งมีปริมาณ SOS และกรดสเตียริกในปริมาณสูงนั้น มีปริมาณผลึกรูปแบบ β มากกว่าอีก 2 สายพันธุ์ โดยสังเกตได้จากความเข้มของพีคที่ค่า d ในช่วง 4.55-4.60 Å แต่โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปแบบ β' ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการวิจัยของ Solís-Fuentes และคณะ (2005) ที่กล่าวว่า น้ำมันเมล็ดมะม่วงจะไม่แสดงรูปแบบผลึกที่เฉพาะรูปแบบเดียวที่อุณหภูมิประมาณ 22°C เป็นเวลาถึง 5 วัน แต่จะมีการผสมกันของผลึกในรูปแบบ β', pseudo-β', และ β นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของพิมพ์นิภา (2552) ที่แสดงให้เห็นว่า น้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์แก้วที่ทำการตกผลึกที่อุณหภูมิ 20°C มีผลึกหลายรูปแบบ แต่หลังจากการตกผลึกเป็นเวลา 60 นาที ผลึกส่วนใหญ่อยู่ในโครงสร้างแบบ β'