



การศึกษาเปรียบเทียบองค์ประกอบกรดไขมันและไตรกลีเซอไรด์ คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ และพฤติกรรมการตกผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงหลายสายพันธุ์ที่ปลูกในประเทศไทย

โดย

นางสาวพรรณิ พรประชาวุฒน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร

ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษาเปรียบเทียบองค์ประกอบกรดไขมันและไตรกลีเซอไรด์ คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ และพฤติกรรมการตกผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงหลายสายพันธุ์ที่ปลูกในประเทศไทย

โดย

นางสาวพรรณี พรประชาวัฒน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร

ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

**STUDIES OF FATTY ACID AND TRIGLYCERIDE COMPOSITION, CHEMICAL AND  
PHYSICAL PROPERTIES, AND CRYSTALLIZATION BEHAVIOR OF MANGO SEED  
ALMOND OILS FROM VARIOUS MANGO VARIETIES GROWN IN THAILAND**

**By**

**Punnee Ponprachanuvut**

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

**MASTER OF SCIENCE**

**Department of Food Technology**

**Graduate School**

**SILPAKORN UNIVERSITY**

**2011**

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “ การศึกษาเปรียบเทียบองค์ประกอบกรดไขมันและไตรกลีเซอไรด์ คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ และพฤติกรรมการตกผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงหอยพานธุ์ที่ปลูกในประเทศไทย ” เสนอโดย นางสาวพรรณี พรประชาวุฒน์ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร

.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ธารทัศน์วงศ์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โสภาค สอนไว

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปราโมทย์ ฤทธิจิตรจารุ)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิยนันท์ วัฒนชัย)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. โสภาค สอนไว)

...../...../.....

53403208 : สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร

คำสำคัญ : น้ำมันเมล็ดมะม่วง/การตกผลึก/กรดไขมัน/ไตรกลีเซอไรด์

พรรณี พรประชาวิวัฒน์ : การศึกษาเปรียบเทียบองค์ประกอบกรดไขมันและไตรกลีเซอไรด์ คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ และพฤติกรรมการตกผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงหลายสายพันธุ์ที่ปลูกในประเทศไทย. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผศ.ดร.โสภาค สอนไว. 140 หน้า.

ในการแปรรูปมะม่วงจะทำให้ได้เมล็ดมะม่วงเป็นของเหลือทิ้ง สามารถนำเนื้อภายในเมล็ดมะม่วงมาสกัดน้ำมันแล้วนำมาผลิตเป็นเนยโกโก้เลียนแบบชนิด CBE (cocoa butter equivalent) ได้ โดยน้ำมันเมล็ดมะม่วงเป็นหนึ่งในน้ำมันที่ได้รับอนุญาตโดยองค์การควบคุมคุณภาพช็อกโกแลตของสหภาพยุโรป โดยเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวมรกต เขียวเสวย น้ำดอกไม้ และอกร่อง มีน้ำมันประมาณ 6.40, 5.78, 5.73 และ 7.74 % (น้ำหนักแห้ง) ตามลำดับ เมื่อทำการวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของกรดไขมันของน้ำมันที่สกัดได้ของมะม่วงแต่ละสายพันธุ์ด้วย GC-FID พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบหลัก ได้แก่ กรดโอเลอิก กรดสเตียริก และกรดปาล์มมิก ซึ่งมีการกระจายในปริมาณสูงสุด และเมื่อทำการวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ด้วย HPLC-DAD พบว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในด้านปริมาณ โดยไตรกลีเซอไรด์ที่เป็นองค์ประกอบหลัก ได้แก่ OOP, POP, SOO, POS และ SOS โดยจากความแตกต่างดังกล่าวทำให้น้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์ มีความแตกต่างกันในด้านคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ โดยสายพันธุ์น้ำดอกไม้มีจุดหลอมเหลวสูงสุด รองลงมาเป็นสายพันธุ์เขียวเสวย เขียวมรกต และอกร่อง ตามลำดับ การศึกษาพฤติกรรมการตกผลึกที่อุณหภูมิคงที่ที่ 20°C (120 นาที) พบว่า สายพันธุ์น้ำดอกไม้มีอัตราในการตกผลึกสูงสุด รองลงมาเป็นเขียวเสวย เขียวมรกต และอกร่อง ตามลำดับ นอกจากนี้อัตราการตกผลึก การโตและรูปร่างของผลึกก็มีความแตกต่างกันซึ่งจะเห็นได้จากการวิเคราะห์ด้วยสมการ Avrami และภาพถ่าย PLM นอกจากนี้การวิเคราะห์ด้วย XRD พบว่า ผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์ มีการผสมของผลึกหลายรูปแบบ แต่โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปแบบ  $\beta'$  โดยคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ และพฤติกรรมในการตกผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์ มีความใกล้เคียงกับสายพันธุ์แก้วที่เคยมีการทดลองใช้เป็นไขมันในการผสมเพื่อทำเนยโกโก้เลียนแบบ ดังนั้นน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์ สามารถนำมาใช้ในการผลิตเนยโกโก้เลียนแบบที่มีคุณภาพดีได้เช่นกัน

---

ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2554

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ .....

53403208 : MAJOR : FOOD TECHNOLOGY

KEY WORD : MANGO SEED ALMOND OIL/CRYSTALLIZATION/FATTY ACID  
COMPOSITION/TRIGLYCERIDE COMPOSITION

PUNNEE PONPRACHANUVUT : STUDIES OF FATTY ACID AND TRIGLYCERIDE  
COMPOSITION, CHEMICAL AND PHYSICAL PROPERTIES, AND CRYSTALLIZATION  
BEHAVIOR OF MANGO SEED ALMOND OILS FROM VARIOUS MANGO VARIETIES GROWN IN  
THAILAND. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. SOPARK SONWAI, Ph.D. 140 pp.

Mango seed almond fat (MAF) has received attention in recent years due to the resemblance between its characteristics and those of CB. It is one of only six vegetable fats which are allowed to be used for up to 5% in chocolate. Mangoes (*Mangifera indica* L.) are one of Thailand's most economically important fruit. In this research, fatty acid (FA) and triglyceride (TG) compositions, physicochemical characterization, thermal properties and crystallization behavior of the oils extracted from seed kernels of four varieties of Thai mangoes: Keaw-Morakot (KM), Keaw-Sawoey (KS), Nam-Dokmai (ND) and Aok-Rong (AR), were characterized. The results showed that mango almond seeds from the four varieties contain about 6.40, 5.78, 5.73 and 7.74 % (dry basis) of oil for KM, KS, ND and AR, respectively. FA content was determined by GC-FID and it was found that all four cultivars had oleic, stearic, and palmitic acids as the main FA components. TG was determined by HPLC-DAD and the result showed all mangoes comprised mainly of POP, SOO, POS and SOS. The mangoes exhibited significantly different physicochemical properties ( $p < 0.05$ ). ND has the highest melting temperature followed by KS, KM and AR. During isothermal crystallization at 20°C, ND displayed the highest crystallization constant followed by KS, KM and AR. The growth mechanism and crystal morphology were also different, as can be seen from the Avrami parameter and the polarized light microscope study. The x-ray diffraction analysis showed that the crystal polymorphs of the fats from the four mango varieties were the mixture of various crystalline forms ( $\beta'$ , pseudo- $\beta'$  and  $\beta$  forms), but mostly in the  $\beta'$  form.

---

Department of Food Technology

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2011

Student's signature .....

Thesis Advisor's signature .....

.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่อง การศึกษาเปรียบเทียบองค์ประกอบกรดไขมันและไตรกลีเซอไรด์ คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ และพฤติกรรมการตกผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงหลายสายพันธุ์ที่ปลูกในประเทศไทย (Studies of fatty acid and triglyceride composition, chemical and physical properties, and crystallization behavior of mango seed almond oils from various mango varieties grown in Thailand) สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะได้รับความกรุณาจากบุคคล องค์กร และทุนสนับสนุนการวิจัย ดังต่อไปนี้

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. โสภาค สอนไว ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปราโมทย์ ฤวิจิตรจารุ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิยฉัตร วัฒนชัย ที่ให้ความรู้ คำปรึกษา และความช่วยเหลือต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาและการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณบริษัท ฟู้ดเอดจ์ กั๋วเมท (ไทยแลนด์) จำกัด จังหวัดนนทบุรี ที่เอื้อเฟื้อเมล็ดมะม่วงสำหรับใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณนางสาวญาณิศา เพื่อนพะยะ นางสาวสุรางค์สินี โสภา และนางสาวศุภรนนท์ ดลโสภณ ที่อำนวยความสะดวกและเอื้อเฟื้อเมล็ดมะม่วงที่นำมาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่ให้การช่วยเหลือทั้งในขั้นตอนการทำวิจัยและขั้นตอนการทำเล่มวิทยานิพนธ์นี้ด้วย

ขอขอบคุณบริษัท บรูเกอร์ ไบเอสปีน ประเทศไทย จำกัด ที่ให้การสนับสนุนและอำนวยความสะดวก ในการใช้เครื่อง pulse-Nuclear-Magnetic-Resonance (p-NMR)

ขอขอบคุณบิดามารดา ที่ให้การสนับสนุน ในทุกๆ ด้านในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการช่วยเหลือให้ดิฉันทำวิจัยและเล่มวิทยานิพนธ์นี้อย่างเสร็จลุล่วง

## สารบัญ

หน้า

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| บทคัดย่อภาษาไทย .....                                                 | ง  |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....                                              | จ  |
| กิตติกรรมประกาศ.....                                                  | ฉ  |
| สารบัญตาราง .....                                                     | ญ  |
| สารบัญภาพ .....                                                       | ฎ  |
| บทที่                                                                 |    |
| 1    บทนำ .....                                                       | 1  |
| 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....                       | 1  |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....                                  | 2  |
| 1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....                                          | 3  |
| 1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....                                            | 3  |
| 2    งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....                                      | 4  |
| 2.1 มะม่วงและน้ำมันเมล็ดมะม่วง .....                                  | 4  |
| 2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของไขมันและน้ำมัน .....                         | 9  |
| 2.3 คุณสมบัติทางเคมีของไขมันและน้ำมัน.....                            | 13 |
| 2.4 การวิเคราะห์กรดไขมันและไตรกลีเซอไรด์ในไขมันหรือน้ำมัน .....       | 15 |
| 2.5 การตกผลึกของไขมันและน้ำมัน.....                                   | 21 |
| 3    วิธีดำเนินการวิจัย .....                                         | 38 |
| 3.1 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....                           | 38 |
| 3.2 การสกัดน้ำมันเมล็ดมะม่วง .....                                    | 40 |
| 3.3 ชนิดและปริมาณของกรดไขมันและไตรกลีเซอไรด์ของน้ำมันเมล็ดมะม่วง..... | 41 |
| 3.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันเมล็ดมะม่วง..... | 42 |

| บทที่                                                                                             | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 3.5 การศึกษาพฤติกรรมการตกผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วง.....                                            | 43   |
| 3.6 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ .....                                                                  | 44   |
| 4 ผลและวิจารณ์ผลการดำเนินงานวิจัย.....                                                            | 45   |
| 4.1 การสกัดน้ำมันเมล็ดมะม่วง.....                                                                 | 45   |
| 4.2 ชนิดและปริมาณของกรดไขมันและไตรกลีเซอไรด์ของน้ำมันเมล็ดมะม่วง.....                             | 46   |
| 4.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของน้ำมันเมล็ดมะม่วง.....                             | 50   |
| 4.4 การศึกษาพฤติกรรมการตกผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วง.....                                            | 64   |
| 5 สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ .....                                                           | 82   |
| บรรณานุกรม.....                                                                                   | 83   |
| ภาคผนวก                                                                                           |      |
| ภาคผนวก ก การทำน้ำมันให้บริสุทธิ์ตามวิธีของ Wesson method.....                                    | 92   |
| ภาคผนวก ข การเตรียมเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน .....                                                 | 94   |
| ภาคผนวก ค การวิเคราะห์ค่าสaponification index ตามวิธีของ POIM test method .....                   | 96   |
| ภาคผนวก ง การวิเคราะห์ค่า Iodine value ตามรายงานของ AOCS method.....                              | 98   |
| ภาคผนวก จ การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดโดยประยุกต์ใช้วิธีของ AOCS .....                              | 100  |
| ภาคผนวก ฉ การหาค่า Slip melting Point (SMP).....                                                  | 102  |
| ภาคผนวก ช การวิเคราะห์ค่า SFC ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ <sup>1</sup> H-NMR.....                     | 104  |
| ภาคผนวก ซ การศึกษาคุณสมบัติทางความร้อนของน้ำมันด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter..... | 106  |
| ภาคผนวก ฌ โครมาโตแกรมในการวิเคราะห์กรดไขมันของน้ำมันเมล็ดมะม่วง.....                              | 108  |
| ภาคผนวก ฎ โครมาโตแกรมในการวิเคราะห์ไตรกลีเซอไรด์ของน้ำมันเมล็ดมะม่วง .....                        | 111  |

| บทที่                                                                                               | หน้า |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ภาคผนวก ก ตารางแสดงร้อยละของไตรกลีเซอไรด์ที่เป็นองค์ประกอบของ<br>น้ำมันเมล็ดมะม่วงสาย 4 พันธุ์..... | 113  |
| ภาคผนวก ก ตารางแสดงค่า SCF ของน้ำมันเมล็ดมะม่วง 4 สายพันธุ์<br>ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 15-40°C .....     | 115  |
| ภาคผนวก ข ภาพถ่ายพฤติกรรมการตกผลึกของไขมันจากกล้องจุลทรรศน์ .....                                   | 117  |
| ภาคผนวก ค ตารางสรุปผลการติดตามการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกในระหว่าง<br>การตกผลึกที่ 20°C.....        | 135  |
| ภาคผนวก ฉ คำย่อ .....                                                                               | 138  |
| ประวัติผู้วิจัย.....                                                                                | 140  |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่ |                                                                                                                                       | หน้า |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1        | ปริมาณ (ตัน) มูลค่า (ล้านบาท) และตลาดหลักในการส่งออกมะม่วงของประเทศไทย.....                                                           | 5    |
| 2        | ผลผลิตมะม่วงของประเทศไทยในปี 2547.....                                                                                                | 6    |
| 3        | จุดหลอมเหลวของกรดไขมันชนิดต่างๆ.....                                                                                                  | 11   |
| 4        | จุดหลอมเหลวของไตรกลีเซอไรด์บางชนิด.....                                                                                               | 12   |
| 5        | แสดงจุดหลอมเหลวของผลึกรูปแบบต่างๆ.....                                                                                                | 25   |
| 6        | พฤติกรรมรูปแบบโครงสร้างผลึกของไขมันแต่ละชนิด.....                                                                                     | 30   |
| 7        | คุณลักษณะและค่า X-ray short spacings (d; Å) ของผลึกรูปแบบต่างๆ<br>ของเนยโกโก้.....                                                    | 34   |
| 8        | ค่า X-ray short spacings (d; Å) ของผลึกรูปแบบต่างๆของไขมัน*.....                                                                      | 35   |
| 9        | ร้อยละของปริมาณกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์<br>เปรียบเทียบกับสายพันธุ์แก้ว*.....                     | 48   |
| 10       | ร้อยละของปริมาณไตรกลีเซอไรด์* ที่เป็นองค์ประกอบที่พบมากใน<br>น้ำมันเมล็ดมะม่วง.....                                                   | 49   |
| 11       | ค่าสีของน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์ ขณะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิ 20°C.....                                                         | 55   |
| 12       | ค่าสีของน้ำมันเมล็ดมะม่วง 4 สายพันธุ์ ขณะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง (~30°C).....                                                      | 56   |
| 13       | อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของการตกผลึกและการหลอมเหลวของ<br>น้ำมันเมล็ดมะม่วง.....                                                  | 63   |
| 14       | ค่าคงที่ต่างๆ ในสมการของ Avrami ของน้ำมันเมล็ดมะม่วง 4 สายพันธุ์<br>ที่ได้จากการตกผลึกที่อุณหภูมิคงที่ที่ 20°C เป็นเวลา 120 นาที..... | 77   |
| 15       | ร้อยละของไตรกลีเซอไรด์ที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันเมล็ดมะม่วง 4 สายพันธุ์.....                                                          | 114  |
| 16       | ค่า SCF ของน้ำมันเมล็ดมะม่วง 4 สายพันธุ์ ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 15-40°C.....                                                              | 116  |
| 17       | แสดงค่า SFC ที่เวลา 0-20 นาที ในการตกผลึกที่อุณหภูมิคงที่ที่ 20°C<br>เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ของน้ำมันเมล็ดมะม่วง 4 สายพันธุ์.....     | 131  |
| 18       | ค่า d-short spacing (Å) ของโครงสร้างผลึกแต่ละรูปแบบที่ระยะเวลาต่างๆ<br>ในระหว่างการตกผลึกที่ 20°C.....                                | 136  |

## สารบัญภาพ

| ภาพที่                                                                                                             | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1 ส่วนประกอบของผลมะม่วง .....                                                                                      | 8    |
| 2 การวัดค่าสีด้วยระบบ LAB .....                                                                                    | 10   |
| 3 องค์ประกอบหลักของเครื่อง GC .....                                                                                | 17   |
| 4 Flame Ionization Detector .....                                                                                  | 17   |
| 5 การเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน.....                                                                             | 18   |
| 6 องค์ประกอบและโครงสร้างของเครื่อง HPLC.....                                                                       | 19   |
| 7 หลักการทำงานของ photodiode array detector.....                                                                   | 20   |
| 8 กระบวนการตกผลึก.....                                                                                             | 22   |
| 9 คุณสมบัติทางกายภาพของรูปแบบโครงสร้างผลึกไขมัน .....                                                              | 24   |
| 10 โครงสร้างของไขมันต่อลักษณะทางประสาทสัมผัส .....                                                                 | 27   |
| 11 ลักษณะการเติบโตของผลึกที่มีผลต่อคุณสมบัติต่างๆของผลิตภัณฑ์.....                                                 | 28   |
| 12 อิทธิพลที่มีผลต่อคุณสมบัติของโครงสร้างตาข่ายผลึก.....                                                           | 29   |
| 13 การเกิด fat bloom ของช็อกโกแลต .....                                                                            | 30   |
| 14 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงทิศทางเดียวและองค์ประกอบ .....                                                           | 32   |
| 15 กฎของ Bragg.....                                                                                                | 33   |
| 16 เทอร์โมแกรมจากการวิเคราะห์ไตรสเตียรีน (tristearine) ด้วยวิธี DSC.....                                           | 37   |
| 17 แผนภูมิแสดงปริมาณน้ำมันที่สกัดได้ (% น้ำหนักแห้ง) ของเมล็ดมะม่วง 4 สายพันธุ์<br>เปรียบเทียบสายพันธุ์แก้ว.....   | 46   |
| 18 แผนภูมิแสดงค่าสปอนนิฟิเคชันของน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์ .....                                           | 50   |
| 19 แผนภูมิแสดงค่าไอโอดีนของน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์.....                                                  | 52   |
| 20 แผนภูมิแสดงค่าความเป็นกรดของน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์.....                                              | 53   |
| 21 แผนภูมิแสดงค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 30°C ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์.....                                | 54   |
| 22 แผนภูมิแสดงจุดหลอมเหลว (Slip melting point) ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์<br>เทียบกับสายพันธุ์แก้ว ..... | 57   |
| 23 ค่า Solid Fat Content ของน้ำมันจากเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์ ที่อุณหภูมิ 15 - 40°C.....                        | 59   |
| 24 พฤติกรรมการตกผลึกของจากมะม่วงแต่ละสายพันธุ์ โดยเครื่อง DSC .....                                                | 62   |
| 25 พฤติกรรมการหลอมเหลวของจากมะม่วงแต่ละสายพันธุ์ โดยเครื่อง DSC.....                                               | 62   |

|    |                                                                                                                                                                                                    |    |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 26 | การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียว<br>มรกต ตามเวลา (t มีหน่วยเป็นนาทิจ) ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง กำลังขยาย<br>ของกล้องเท่ากับ 400 เท่า ..... | 66 |
| 27 | การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์<br>เขียวเสวย ตามเวลา (t มีหน่วยเป็นนาทิจ) ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง<br>กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 400 เท่า.....   | 67 |
| 28 | การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์<br>น้ำดอกไม้ ตามเวลา (t มีหน่วยเป็นนาทิจ) ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง<br>กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 400 เท่า.....   | 68 |
| 29 | การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อกร่อง<br>ตามเวลา (t มีหน่วยเป็นนาทิจ) ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้อง<br>เท่ากับ 400 เท่า .....     | 69 |
| 30 | ผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวมรกต (A), เขียวเสวย (B), น้ำดอกไม้ (C) และ<br>อกร่อง (D) หลังจากตกผลึกที่ .....                                                                              | 72 |
| 31 | ผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวมรกต (A), เขียวเสวย (B), น้ำดอกไม้ (C) และ<br>อกร่อง (D) หลังจากตกผลึกที่ .....                                                                              | 72 |
| 32 | ผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวมรกต (A), เขียวเสวย (B), น้ำดอกไม้ (C) และ<br>อกร่อง (D) หลังจากตกผลึกที่ .....                                                                              | 73 |
| 33 | ผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวมรกต (A), เขียวเสวย (B), น้ำดอกไม้ (C) และ<br>อกร่อง (D) หลังจากตกผลึกที่ .....                                                                              | 73 |
| 34 | การเปลี่ยนแปลงของปริมาณไขมันที่เป็นของแข็ง (Solid Fat Content; SFC) ของน้ำมัน<br>เมล็ดมะม่วง 4 สายพันธุ์ ที่อุณหภูมิในการตกผลึกคงที่ที่ 20°C .....                                                 | 74 |
| 35 | การเปลี่ยนแปลงของปริมาณไขมันที่เป็นของแข็ง (Solid Fat Content; SFC) ในช่วงแรก<br>ของการตกผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วง 4 สายพันธุ์ ที่อุณหภูมิในการตกผลึกคงที่<br>ที่ 20°C .....                        | 74 |
| 36 | X-ray diffraction patterns ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวมรกต ที่ระยะเวลาต่างๆ<br>ของการตกผลึกที่ 20°C .....                                                                                   | 78 |
| 37 | X-ray diffraction patterns ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวเสวย ที่ระยะเวลาต่างๆ ของ<br>การตกผลึกที่ 20°C .....                                                                                  | 79 |

| ภาพที่                                                                                                                                                                                   | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 38 X-ray diffraction patterns ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้ ที่ระยะเวลาต่างๆ ของการตกผลึกที่ 20°C .....                                                                         | 80   |
| 39 X-ray diffraction patterns ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อกร่อง ที่ระยะเวลาต่างๆ ของการตกผลึกที่ 20°C .....                                                                            | 81   |
| 40 โครมาโตแกรมของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันจากเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวมรกต .....                                                                                                | 109  |
| 41 โครมาโตแกรมของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันจากเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวเสวย.....                                                                                                 | 109  |
| 42 โครมาโตแกรมของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันจากเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้.....                                                                                                 | 110  |
| 43 โครมาโตแกรมของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันจากเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อกร่อง.....                                                                                                    | 110  |
| 44 โครมาโตแกรมของไตรกลีเซอไรด์ของน้ำมันเมล็ดมะม่วง 4 สายพันธุ์ จากเครื่อง HPLC-DAD ที่ความยาวคลื่น 210 นาโนเมตร .....                                                                    | 112  |
| 45 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวมรกต ตั้งแต่วันที่ 0-30 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 400 เท่า.....   | 118  |
| 46 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวมรกต ตั้งแต่วันที่ 35-80 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 400 เท่า.....  | 119  |
| 47 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวมรกต ตั้งแต่วันที่ 90-120 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 400 เท่า..... | 120  |
| 48 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวเสวย ตั้งแต่วันที่ 0-30 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 400 เท่า.....   | 121  |
| 49 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวเสวย ตั้งแต่วันที่ 35-80 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 400 เท่า.....  | 122  |

- 50 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์  
เขียวเสวย ตั้งแต่หน้าที่ที่ 90-120 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง กำลังขยาย  
ของกล้องเท่ากับ 400 เท่า .....123
- 51 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์  
น้ำดอกไม้ ตั้งแต่หน้าที่ที่ 0-30 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง กำลังขยายของ  
กล้องเท่ากับ 400 เท่า.....124
- 52 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์  
น้ำดอกไม้ ตั้งแต่หน้าที่ที่ 35-80 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง กำลังขยายของ  
กล้องเท่ากับ 400 เท่า.....125
- 53 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์  
น้ำดอกไม้ ตั้งแต่หน้าที่ที่ 90-120 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง กำลังขยาย  
ของกล้องเท่ากับ 400 เท่า .....126
- 54 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อกร่อง  
ตั้งแต่หน้าที่ที่ 0-30 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้อง  
เท่ากับ 400 เท่า.....127
- 55 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อกร่อง  
ตั้งแต่หน้าที่ที่ 35-80 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้อง  
เท่ากับ 400 เท่า.....128
- 56 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อกร่อง  
ตั้งแต่หน้าที่ที่ 90-120 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้อง  
เท่ากับ 400 เท่า.....129

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

มะม่วง (*Mangifera indica* L.) จัดเป็นหนึ่งในผลไม้ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจต่อประเทศในภูมิภาคเขตร้อน การผลิตมะม่วงในทางการค้าของประเทศไทยจำแนกได้ 3 ประเภท คือ ใช้กินผลดิบ ผลสุก และแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์กระป๋อง โดยมีส่วนของเมล็ดมะม่วงที่เป็นของเหลือทิ้ง (waste) จากการบริโภคและการผลิตมะม่วงกระป๋องในแต่ละปีเป็นปริมาณมาก โดยเฉพาะแคะมะม่วงพันธุ์แก้วพันธุ์เดียนนั้นจะก่อให้เกิดเมล็ดเหลือทิ้งถึง 387,017 ตันต่อปี ทำให้เกิดการสูญเสียโดยเนื้อในเปลือกแข็งที่เป็นสีขาของเมล็ดมะม่วงสามารถนำไปผลิตเป็นแป้งหรือนำไปสกัดน้ำมัน ซึ่งน้ำมันมะม่วงนี้มีความเป็นพิษคือเป็นหนึ่งในน้ำมันจากพืช 6 ชนิด ที่ได้รับการยินยอมโดยองค์กรควบคุมคุณภาพช็อกโกแลตของสหภาพยุโรป (EU Chocolate Directive) ให้ใช้ในการผลิตเนยโกโก้เลียนแบบ (cocoa butter alternative) ชนิด cocoa butter equivalent: CBE สำหรับใช้แทนหรือผสมในการผลิตเนยโกโก้ในช็อกโกแลต ซึ่งเนยโกโก้เป็นไขมันจากต้นโกโก้ที่เป็นส่วนผสมหลักของช็อกโกแลต ในปัจจุบันเนยโกโก้มีราคาแพงและมีการผันแปรตามปริมาณการผลิตแบบปีต่อปี เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพดินฟ้าอากาศและความไม่มั่นคงทางด้านสถานะทางการเมืองของประเทศผู้ปลูกต้นโกโก้ ทำให้ปริมาณความต้องการของเนยโกโก้เลียนแบบพุ่งสูงขึ้น น้ำมันมะม่วงมีองค์ประกอบของไตรกลีเซอไรด์ชนิด SOS ในปริมาณสูง โดย SOS เป็น 1 ใน 3 ของชนิดไตรกลีเซอไรด์ที่เป็นองค์ประกอบหลักของเนยโกโก้ (อีก 2 ชนิดที่เหลือคือ POP และ POS) เมื่อนำน้ำมันมะม่วงมาผสมกับน้ำมันจากพืชชนิดอื่นๆ ในอัตราที่เหมาะสม จะทำให้ได้เนยโกโก้เลียนแบบที่มีคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพเหมือนกันกับของเนยโกโก้ ทำให้เนยโกโก้เลียนแบบที่ผลิตได้ดังกล่าวสามารถผสมเข้ากันได้ดีกับเนยโกโก้เมื่อทำการผลิตช็อกโกแลตโดยไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลตและกระบวนการผลิตแต่อย่างใด อย่างไรก็ตามองค์ประกอบทางเคมี เช่น ชนิดและอัตราส่วนของกรดไขมันและของไตรกลีเซอไรด์ คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของน้ำมันเมล็ดมะม่วงนั้นจะแปรผันไปตามหลายๆ ปัจจัย เช่น ชนิดของสายพันธุ์ ลักษณะภูมิประเทศและลักษณะภูมิอากาศที่ทำการปลูกต้นโกโก้ ทำให้มีความจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาคูณสมบัติด้านต่างๆ ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงแต่ละสายพันธุ์ที่มาจากแหล่งปลูกแตกต่างกัน เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการนำเอาน้ำมันจากเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์

ต่างๆ ดังกล่าวไปดัดแปลงเพื่อผลิตเป็นเนยโกโก้เลียนแบบที่มีองค์ประกอบทางเคมี คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพที่ใกล้เคียงกับเนยโกโก้มากที่สุด เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาเข้ากันไม่ได้ (non-compatibility) เมื่อใช้ร่วมกับเนยโกโก้ในช็อกโกแลต โดยประเทศไทยในปัจจุบันได้ส่งสินค้าประเภทเนยโกโก้และเนยโกโก้เลียนแบบเข้ามาเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตไอศกรีมผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ และช็อกโกแลต เป็นต้น ในปริมาณมากต่อปี และยังไม่เคยมีการศึกษาอย่างจริงจังถึงองค์ประกอบและคุณสมบัติด้านต่างๆ ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงหอยพานที่ปลูกในประเทศไทย ถ้าน้ำมันเมล็ดมะม่วงหอยพานพันธุ์ต่างๆ ที่เป็นของเหลือทิ้งในประเทศมาทำการสกัดน้ำมันแล้วทำการศึกษาถึงองค์ประกอบของน้ำมันและคุณสมบัติด้านต่างๆ ของน้ำมันที่สกัดได้อย่างละเอียดและเป็นระบบเพื่อให้สามารถนำไปสู่การผลิตเป็นเนยโกโก้เลียนแบบคุณภาพสูงได้เองในอนาคต จะสามารถลดปริมาณนำเข้าเนยโกโก้เลียนแบบจากต่างประเทศ นอกจากนี้การนำเมล็ดมะม่วงไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำมันยังจะเป็นประโยชน์จากของเหลือทิ้งอย่างมีประสิทธิภาพ ถือเป็นการเพิ่มมูลค่าสินค้าเพื่อพัฒนาศักยภาพการผลิตให้แก่ประเทศอีกด้วย ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะทำการศึกษาเปรียบเทียบองค์ประกอบ ของกรดไขมันชนิดของไตรกลีเซอไรด์ คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ และพฤติกรรมการตกผลึกของน้ำมันที่สกัดได้ด้วยวิธีการการสกัดแบบ Soxhlet extraction จากเมล็ดมะม่วง 4 สายพันธุ์ที่นิยมปลูกและที่ให้ผลผลิตสูงในประเทศไทยคือ เชื้อวมรกต เชื้อวเสวย น้ำดอกไม้และอกร่อง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบชนิดและอัตราส่วนของกรดไขมัน และชนิดของโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ และปริมาณของน้ำมันที่สกัดได้ด้วยวิธีการสกัดแบบ Soxhlet extraction ในน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เชื้อวมรกต เชื้อวเสวย อกร่อง และน้ำดอกไม้

1.2.2 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เชื้อวมรกต เชื้อวเสวย อกร่อง และน้ำดอกไม้

1.2.3 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมการตกผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เชื้อวมรกต เชื้อวเสวย อกร่อง และน้ำดอกไม้

### 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

เมื่อมะม่วงที่มีความแตกต่างกันของสายพันธุ์แล้วจะมีผลในด้านองค์ประกอบไขมันและไตรกลีเซอไรด์ คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ ที่แตกต่างกัน ซึ่งองค์ประกอบไขมันและไตรกลีเซอไรด์ที่แตกต่างกันก็จะส่งผลต่อการตกผลึกที่แตกต่างกันด้วยเช่นกัน

### 1.4 ขอบเขตของการศึกษา

โครงการวิจัยนี้จะเลือกใช้เมล็ดมะม่วงพันธุ์เขียวมรกต เขียวเสวย น้ำดอกไม้ และอกร่อง โดยจะนำเนื้อในเมล็ดมะม่วงมาทำการสกัดน้ำมันด้วยวิธีการสกัดแบบ Soxhlet extraction แล้วนำน้ำมันที่ได้มาทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบในหัวข้อต่อไปนี้

- 1.1 ปริมาณของน้ำมันเมล็ดมะม่วงที่สกัดได้ (เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของน้ำมันที่สกัดได้เทียบกับปริมาณของเมล็ดมะม่วงตั้งต้น)
- 1.2 ชนิดและอัตราส่วนของกรดไขมัน และชนิดของไตรกลีเซอไรด์
- 1.3 คุณสมบัติทางเคมีของน้ำมันเมล็ดมะม่วงที่สกัดได้ ซึ่งวิเคราะห์ค่าต่างๆดังต่อไปนี้
  - ค่าสaponification number (ค่าสaponification number)
  - ค่าไอโอดีน (iodine index)
  - ค่าความเป็นกรด (acid value)
- 1.4 คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันเมล็ดมะม่วงที่สกัดได้ ซึ่งวิเคราะห์ค่าต่างๆดังต่อไปนี้
  - ค่าสี (color)
  - ค่าความหนืด (viscosity)
  - ค่า slip melting point

หลังจากนั้นจะนำน้ำมันที่สกัดได้ไปทำการตกผลึกเพื่อศึกษาพฤติกรรมการตกผลึก โดยเน้นที่การศึกษากลไกต่างๆ ในการตกผลึก เช่นระดับการตกผลึก โครงสร้างผลึก รูปร่างผลึก จำนวนและขนาดผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงที่ระยะเวลาต่างๆ ของการตกผลึก

## บทที่ 2

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature review)

#### 2.1 มะม่วงและน้ำมันเมล็ดมะม่วง (Mango and mango seed almond oil)

มะม่วง (*Mangifera indica* L.) เป็นผลไม้ที่มีความสำคัญมากเนื่องจากเป็นผลไม้ที่ผู้บริโภคนิยมและเป็นที่ต้องการในตลาดโลกอย่างสูง โดยมะม่วงเป็นผลไม้ที่มีกลิ่น รสชาติดี และสามารถบริโภคได้ทั้งผลสดและผลที่ผ่านกระบวนการแปรรูปแล้ว สำหรับการเก็บรักษามะม่วงนั้น ขึ้นอยู่กับระดับความสุกขณะที่เก็บเกี่ยว นอกจากนี้ยังมีการค้นพบว่าภายในเนื้อในมะม่วงจะมีของเหลวอยู่ ซึ่งของเหลวนี้นี้มีประโยชน์มากในอุตสาหกรรม confectionary โดยสามารถใช้เป็นแหล่งทดแทนเนยโกโก้ โดยมะม่วงเป็นผลไม้ที่พบมากในประเทศเขตร้อนชื้น ได้แก่ ประเทศในแถบทวีปเอเชียและแอฟริกา (Arogba, 2000) โดยมีปริมาณการผลิตรวมระดับโลกสูงถึง 26 ล้านตันต่อปี ซึ่งอินเดียเป็นประเทศที่มีการผลิตมะม่วงมากที่สุดเป็นอันดับหนึ่งของโลก รองลงมา คือ จีน ไทย เม็กซิโก ปากีสถาน และฟิลิปปินส์ ในช่วงปี พ.ศ. 2546-2550 ที่ผ่านมา พบว่า ประเทศไทยมีปริมาณการผลิตมะม่วงเพิ่มขึ้นเกือบเท่าตัว โดยเพิ่มจาก 1 ล้านตันต่อปี เป็น 1.75 ล้านตันต่อปี ตามลำดับ (FAOSTAT Data, 2004) โดยผลผลิตส่วนใหญ่กว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ใช้ในการบริโภคภายในประเทศเป็นหลัก ส่วนที่เหลือส่งออกต่างประเทศทั้งในรูปของมะม่วงสด มะม่วงกระป๋อง มะม่วงอบแห้ง และมะม่วงแช่แข็ง ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งพบว่าในปี 2551 ไทยส่งออกมะม่วงและผลิตภัณฑ์ในปริมาณ 36,377 ตัน มูลค่ากว่า 1,433 ล้านบาท โดยประเทศที่ต้องการมากที่สุดได้แก่ ญี่ปุ่น อเมริกา ยุโรป มาเลเซีย เกาหลี สิงคโปร์ อินโดนีเซีย สาธารณรัฐประชาชนจีน และฮ่องกง เป็นต้น (มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2552)

ตารางที่ 1 ปริมาณ (ตัน) มูลค่า (ล้านบาท) และตลาดหลักในการส่งออกมะม่วงของประเทศไทย

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

ที่มา : ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร สำนักงานปลัดกระทรวงพาณิชย์ โดยความร่วมมือของกรมศุลกากร (อ้างอิงในกรมการค้าต่างประเทศ, 2552)

เนื่องจากการผลิตมะม่วงในทางการค้าของประเทศไทยจำแนกได้เป็น 3 ประเภท คือ ใช้ในการบริโภคในรูปของผลดิบ ผลสุก และการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์บรรจุกระป๋อง ทำให้เกิดส่วนของเมล็ดมะม่วงที่เป็นของเหลือทิ้ง (waste) จากการบริโภคและการแปรรูปมะม่วงบรรจุกระป๋องในแต่ละปีเป็นปริมาณมาก จะเห็นว่า หากนำเมล็ดมะม่วงมาใช้เป็นแหล่งไขมันหรือน้ำมัน โดยดูจากคุณสมบัติทางกายภาพและทางโภชนาศาสตร์ (Narashima Char และคณะ, 1977; Lakshminarayana

และคณะ, 1983; Jimenez-Bermudez และคณะ, 1995; Solis-Fuentes และ Duran-de-Bazua, 2005) โดยเมล็ดมะม่วงมีน้ำหนักเปียก (wet basis) และน้ำหนักแห้ง (dry basis) เท่ากับ 15 และ 16% ของน้ำหนักทั้งผล ตามลำดับ เมล็ดมะม่วงที่แห้งจะมีส่วนของเปลือกหุ้มและเมล็ดในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก โดยเมล็ดมะม่วงแห้งมีปริมาณน้ำมัน 5.28-15% (Solis-Fuentes และ Duran-de-Bazua, 2003; Lidefelt, 2007) โดยปริมาณผลผลิตของมะม่วงแต่ละสายพันธุ์ก็แตกต่างกันไป ดังแสดงในตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่ามะม่วงสายพันธุ์แก้วมีปริมาณมากที่สุด รองลงมาเป็น เชื้อขาว และอกร่องตามลำดับ

ตารางที่ 2 ผลผลิตมะม่วงของประเทศไทยในปี 2547

| พันธุ์มะม่วง | พื้นที่เพาะปลูกรวมปี 2547 (ไร่) | ผลผลิตรวมปี 2547 (ตัน) |
|--------------|---------------------------------|------------------------|
| แก้ว         | 358,711                         | 387,017                |
| เชื้อขาว     | 428,371                         | 351,006                |
| น้ำดอกไม้    | 300,587                         | 255,662                |
| อกร่อง       | 108,777                         | 96,866                 |
| โชคอนันต์    | 70,214                          | 70,915                 |
| ทองคำ        | 37,457                          | 52,489                 |
| หนองแซง      | 42,211                          | 43,965                 |
| หนังกลางวัน  | 44,151                          | 34,490                 |

ที่มา : กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (2547)

มะม่วงพันธุ์เขียวมรกต ชื่อวิทยาศาสตร์ คือ *Mangifera indica* L. cv. Keaw Morakot (กรมวิชาการเกษตร, 2547) เป็นสายพันธุ์ที่เกิดจากการกลายพันธุ์มาจากพันธุ์แก้ว และพันธุ์สามปีในตำบลเหล่าขาวของอำเภอบ้านไผ่ จังหวัดลำพูน จัดเป็นพันธุ์หนัก สามารถเก็บเกี่ยวได้ประมาณเดือนกรกฎาคม มีเนื้อแน่นเหมาะแก่การแปรรูปได้ดีและสามารถรับประทานสุกได้รสชาติดี เนื้อละเอียด มีสีเหลืองเข้มกลิ่นหอม (สุรินทร์, 2549) ใบป้อมโคนใบ ปลายใบเรียวแหลม ฐานใบแหลม ขอบใบเป็นคลื่นเปลือกลำต้นเรียบ ไม่มีการเลื้อยของกิ่ง (กรมวิชาการเกษตร, 2547) เริ่มแทงช่อดอก

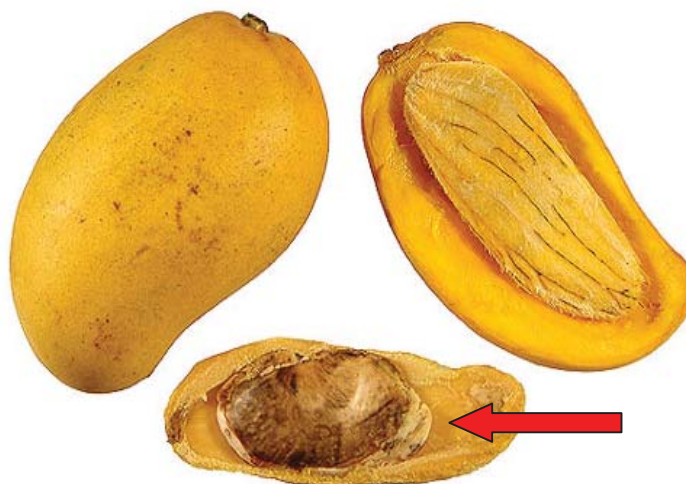
ตั้งแต่กลางเดือนธันวาคม ถึง มกราคม ก้านช่อดอกยาว ดอกสีขาวครีม มีกลิ่นหอม อัตราดอกสมบูรณ์เพศสูง และมีการออกดอกทะวาย

มะม่วงพันธุ์เขียวเสวย มีชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Mangifera indica* L. cv. Keaw Sawoey เป็นมะม่วงที่นิยมกินดิบ มีลักษณะผลโตปานกลาง ขนาดเฉลี่ย 14.7 เซนติเมตร กว้าง 6.9 เซนติเมตร หนา 6.4 เซนติเมตร ทรงผลยาว ส่วนหัวใหญ่หนาเรียวลงสู่ส่วนปลาย น้ำหนักต่อผลประมาณ 335 กรัม ตอนผลอ่อนมีรสเปรี้ยว เมื่อแก่จัดรสมัน ออกหวานอมเปรี้ยวเล็กน้อย เมื่อสุกเปลือกสีเขียวปนเหลือง เนื้อสีเหลืองและเนื้อละเอียด

มะม่วงน้ำดอกไม้ มีชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Mangifera indica* L. cv. Nam Dokmai เป็นมะม่วงประเภทรับประทานสุก มีการเจริญเติบโตรวดเร็ว ใบใหญ่เป็นคลื่น ทรงพุ่มโปร่ง ส่วนมากจะออกดอกทะวาย ออกดอกดก ติดผลปานกลางให้ผลทุกปี ผลมีขนาดใหญ่ หนักประมาณ 400 กรัม ผลอ่อนเกือบกลม หัวใหญ่ปลายแหลม ผลค่อนข้างยาว เนื้อมาก เมล็ดเล็ก มีผิวบาง เมื่อดิบมีรสเปรี้ยว ผิวสีเขียวปนขาว เนื้อแน่น เมื่อผลสุกมีผิวสีเหลือง กลิ่นหอม เนื้อละเอียดมีเสี้ยนน้อย รสหวาน พันธุ์ที่นิยมปลูกมากในปัจจุบัน คือ พันธุ์น้ำดอกไม้เบอร์ 4 และพันธุ์น้ำดอกไม้สีทอง

มะม่วงพันธุ์อกร่อง มีชื่อวิทยาศาสตร์ *Manafiera indica* Linn. ชื่อวงศ์คือ Anacardiaceae เป็นมะม่วงพันธุ์เก่าแก่ที่รู้จักกันทั่วไป ใช้สำหรับรับประทานสุก เป็นพันธุ์ที่ให้ผลดก จะออกผลปีเว้นปี คือปีใดที่ให้ผลดก ปีต่อไปจะมีผลน้อย ขนาดผลค่อนข้างเล็ก ลักษณะของผลค่อนข้างแบนตรงส่วนท้องเป็นทางยาวจนเห็นได้ชัด ผลดิบเนื้อละเอียดสีขาวปนขาว มีเสี้ยนน้อย รสเปรี้ยวจัดจนกระทั่งแก่ เมื่อผลสุกเปลือกเปลี่ยนเป็นสีเหลืองทอง มีกลิ่นหอม เนื้อสีเหลืองละเอียด รสหวานจัด เมล็ดมีลักษณะยาวแบน

หากนำเมล็ดในมะม่วง (ส่วนที่ลูกศรชี้ในภาพที่ 1) ไปทำการสกัดน้ำมันตามวิธีของ Solís-Fuentes และ Durán-de-Bazúa (2004) ที่สกัดน้ำมันจากเมล็ดในมะม่วงเม็กซิกัน สายพันธุ์มะนิลาได้น้ำมันเมล็ดมะม่วง 5.28-11.26 % (น้ำหนักแห้ง) น้ำมันจากเมล็ดในมะม่วงมีจุดหลอมเหลว 34-43 °C มีดัชนีการหักเห (refraction index) เท่ากับ 1.466 มีค่า saponification เท่ากับ 189.0-195.0 และค่า iodine index เท่ากับ 32-57 และเมื่อพิจารณาผลผลิตมะม่วงของประเทศไทยจะเห็นได้ว่าจะสามารถผลิตน้ำมันได้ปริมาณสูงเมื่อคำนวณจากปริมาณของมะม่วงที่สามารถผลิตได้ โดยจะสามารถเพิ่มมูลค่าของของเหลือทิ้งอย่างเมล็ดมะม่วงได้



ภาพที่ 1 ส่วนประกอบของผลมะม่วง

ที่มา : Armstrong (2004)

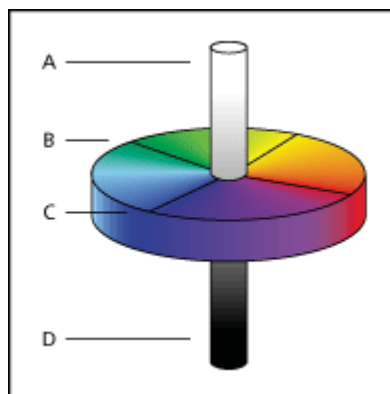
ในปัจจุบันมีการใช้เนยโกโก้เลียนแบบซึ่งผลิตจากน้ำมันและไขมันพืชจากแหล่งอื่นๆ เช่น palm oil, kokum butter และ shea butter เป็นต้น ทดแทนการใช้เนยโกโก้ที่ผลิตจากเมล็ดโกโก้ เพื่อลดต้นทุนการผลิต (Bernard, 1989; Talbot, 1999) โดยเนยโกโก้เทียมจะเป็นไขมันที่มีองค์ประกอบของกรดไขมันและไตรกลีเซอไรด์ คุณสมบัติทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น อุณหภูมิในการตกผลึกและจุดหลอมเหลวใกล้เคียงกับเนยโกโก้ (ณัฐยววรรณ, 2547) จากการศึกษาพบว่าในเมล็ดมะม่วงที่มีองค์ประกอบของไตรกลีเซอไรด์คล้ายกับเนยโกโก้ โดยเมื่อนำเมล็ดมะม่วงมาสกัดด้วยตัวทำละลายจะทำให้ไขมันแข็งที่รับประทานได้เป็นไขมันหรือน้ำมันเมล็ดมะม่วง ซึ่งพบว่ามีคุณลักษณะและคุณสมบัติคล้ายกับเนยโกโก้ (วิจิต วังใน, 2529; Talbot, 1999; Solís-Fuentes และ Durán-de-Bazúa, 2004) โดยพบกรดไขมันที่พบในปริมาณมากคือ กรดโอเลอิก กรดสเตียริก กรดปาล์มมิติก กรดลิโนเลอิก และอื่นๆ ตามลำดับ (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) และพบไตรกลีเซอไรด์ชนิด 1,3-distearoyl-2-oleoyl-glycerol (SOS), 1-stearoyl-2,3-dioleoyl glycerol (SOO) และ 1-plamitoyl-2-oleoyl-3-stearoyl-glycerol (POS) ตามลำดับ (Lidefelt, 2007)

นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาการตกผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงอย่างคร่าวๆ เปรียบเทียบกับเนยโกโก้ด้วยเทคนิค differential scanning calorimetry และเทคนิค X-ray diffraction โดย Solís-Fuentes และ Durán-de-Bazúa (2004) และ Solís-Fuentes และคณะ (2005) ซึ่งพบว่ามะม่วงสายพันธุ์ Manila ของประเทศ Mexico เมื่อตกผลึกแล้วมีโครงสร้างที่เสถียรที่สุดเป็น  $\beta$  ที่มี X-ray diffraction characteristics (ทั้งจำนวนและตำแหน่งของ diffraction peak) เหมือนกับเนยโกโก้ ซึ่งจะแตกต่างจากน้ำมันปาล์ม น้ำมันเมล็ดปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันมะพร้าว ที่เมื่อตกผลึกแล้วจะมีโครงสร้างที่เป็นแบบ  $\beta'$  การศึกษายังพบอีกว่าปริมาณไขมันที่เป็นของแข็ง (solid fat content หรือ SFC) ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงที่ตกผลึกเป็นของแข็งมีค่าต่ำกว่าของเนยโกโก้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $33^{\circ}\text{C}$  ทำให้มีลักษณะอ่อนกว่าเนยโกโก้เล็กน้อย ในทางกลับกันค่า SFC ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงจะมีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิสูงกว่า  $33^{\circ}\text{C}$  ทำให้มีความแข็งมากกว่าเนยโกโก้หรือมีลักษณะเป็น harder fat เมื่อเทียบกับเนยโกโก้ ซึ่งถือเป็นคุณสมบัติเด่นของน้ำมันเมล็ดมะม่วงเพราะสามารถนำไปผลิตเป็นเนยโกโก้เลียนแบบสำหรับใช้เป็นส่วนผสมในช็อกโกแลตทนอุณหภูมิสูงได้

## 2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของไขมันและน้ำมัน (Physical properties of fats and oils)

2.1 สี (color) ของไขมันหรือน้ำมัน เป็นตัวบ่งชี้คุณภาพของน้ำมันได้ น้ำมันแต่ละชนิดจะมีสีแตกต่างกันขึ้นอยู่กับรงควัตถุที่มีปนอยู่วัตถุดิบที่นำมาใช้ในการสกัดนั้นและวิธีการกำจัดสีโดยการฟองสี น้ำมันที่มีสีเหลืองอ่อนจะมีคุณภาพดีกว่าน้ำมันที่มีสีเหลืองเข้ม (นิธิยา, 2548)

LAB Model เป็นค่าสีที่ถูกกำหนดขึ้นโดย CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) ให้เป็นมาตรฐาน การวัดสีทุกรูปแบบ ครอบคลุมทุกสีใน RGB และ CMYK และใช้กับสีที่เกิดจากอุปกรณ์ทุกอย่าง ไม่ว่าจะเป็น Monitor, Printer, Scanner ฯลฯ ส่วนประกอบของโหมดสี ได้แก่ Luminance Model (L) คือ ความสว่าง a หมายถึง ส่วนประกอบที่แสดงการไล่สีจากสีเขียวไปยังสีแดง และ b หมายถึง ส่วนประกอบที่แสดงการไล่สีจากสีน้ำเงินไปถึงสีเหลือง



หมายเหตุ A. Luminance=100 (white) B. Green to red component C. Blue to yellow component D. Luminance=0 (black)

## ภาพที่ 2 การวัดค่าสีด้วยระบบ LAB

ที่มา : <http://cptd.chandra.ac.th/selfstud/graphics/introcolor1.htm> (เข้าถึงเมื่อ 19 ธันวาคม 2554)

2.2 ความหนืด (viscosity) ของไขมันและน้ำมัน เป็นปัจจัยที่สำคัญในการออกแบบการขนถ่ายไขมันและน้ำมัน ความหนืดของไขมันและน้ำมันจะเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนของคาร์บอนในโมเลกุลของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของไตรกลีเซอไรด์เพิ่มขึ้น ความหนืดจะลดลงเมื่อจำนวนพันธะคู่ในโมเลกุลของกรดไขมันเพิ่มสูง และเมื่ออุณหภูมิของไขมันและน้ำมันเพิ่มขึ้น (นิธิยา, 2548)

2.3 จุดหลอมเหลว (melting point) คือ อุณหภูมิที่ทำให้ไขมันเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวจนหมด ไขมันส่วนใหญ่มีจุดหลอมเหลวเป็นช่วงอุณหภูมิ อาจเป็นช่วงกว้างหรือแคบขึ้นอยู่กับชนิดของไตรกลีเซอไรด์ที่เป็นส่วนประกอบของไขมันหรือน้ำมันชนิดนั้น เช่น ไขมันที่ประกอบด้วยไตรกลีเซอไรด์ชนิดเดียวกันทั้งหมดจะมีจุดหลอมเหลวที่แน่นอน จุดหลอมเหลวของไขมันและน้ำมันจะสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับจุดหลอมเหลวของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในโมเลกุล จุดหลอมเหลวของกรดไขมันชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยกรดไขมันที่มีจำนวนคาร์บอนในโมเลกุลน้อยกว่า 10 อะตอม จะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง เมื่อมีจำนวนคาร์บอนเพิ่มขึ้นจะเป็นของแข็งมากขึ้น ดังนั้นจุดหลอมเหลวของกรดไขมันจะเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนคาร์บอนในโมเลกุลของกรดไขมันเพิ่มขึ้น และจุดหลอมเหลวของกรดไขมันจะลดลงเมื่อมีจำนวนพันธะคู่ในโมเลกุลของกรดไขมันเพิ่มขึ้น จุดหลอมเหลวของไตรกลีเซอไรด์บางชนิดแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งจะเห็นได้ว่าไตรกลีเซอไรด์ที่มีกรดไขมันชนิดเดียวกันเป็นองค์ประกอบ แต่มีการเรียงตัวที่ตำแหน่งที่ต่างกัน ก็มีผลทำให้จุดหลอมเหลวต่างกันด้วย (นิธิยา, 2548)

ตารางที่ 3 จุดหลอมเหลวของกรดไขมันชนิดต่างๆ

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

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

ตารางที่ 4 จุดหลอมเหลวของไตรกลีเซอไรด์บางชนิด

| ชนิดของไตรกลีเซอไรด์        | จุดหลอมเหลว (°C) |
|-----------------------------|------------------|
| <b>Trisaturated</b>         |                  |
| Tristearin (SSS)            | 73               |
| Tripalmitin (PPP)           | 66               |
| Stearo-dipalmitin (SPP)     | 62               |
| <b>Disaturated</b>          |                  |
| Palmito-oleo-palmitin (POP) | 37               |
| Palmito-oleo-stearin (POS)  | 37               |
| Oleo-dipalmitin (OPP)       | 34               |
| Stearo-oleo-palmitin (SOP)  | 43               |
| Stearo-oleo-stearin (SOS)   | 43               |
| Stearo-palmito-olein (SPO)  | 39               |
| Palmito-stearo-olein (PSO)  | 36               |
| <b>Diunsaturated</b>        |                  |
| Dioleopalmitin (OOP)        | 5                |
| Dioleostearin (OOS)         | -13              |
| <b>Triunsaturated</b>       |                  |
| Triolein (OOO)              | 5                |
| Trilinolein (LLL)           | -13              |

หมายเหตุ S = Stearic acid, P = Palmitic acid, O = Oleic acid, L = Linoleic acid

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

นอกจากนี้ยังสามารถหาจุดหลอมเหลวของไขมันในรูปของค่า slip melting point (SMP) หรือจุดหลอมเหลวของของแข็งที่มีลักษณะคล้ายขี้ผึ้ง (waxy solid) ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ไขมันเริ่มเคลื่อนที่ขึ้นภายในหลอดคาปิลลารีปลายเปิดเนื่องจากแรงที่ทำให้สารเกิดการลอยตัว (buoyancy

หรือ upward force) หากแรงที่ทำให้ลอยตัวมีค่าเท่ากับน้ำหนักของไขมันในหลอดคาปิลลารีและพื้นที่ผิวภายนอกของไขมันกลายเป็นไขมันเหลวหรือ molten จะทำให้ไขมันเกิดการเคลื่อนที่ขึ้น การหา SMP เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมสำหรับไขมันและแว็กซ์ (waxes) ซึ่งเป็นของผสมของสารประกอบที่มีโมเลกุลเป็นช่วงทำให้ไม่สามารถหาจุดหลอมเหลวที่แน่นอนได้ (Wikipedia encyclopedia, 2009)

## 2.3 คุณสมบัติทางเคมีของไขมันและน้ำมัน (Chemical properties of fats and oils)

คุณสมบัติทางเคมีของไขมันและน้ำมันแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน เนื่องจากองค์ประกอบและโครงสร้างทางเคมีที่ต่างกัน ทำให้มีการเกิดปฏิกิริยากับสารแต่ละชนิดแตกต่างกัน ได้แก่

2.3.1 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ไขมันและน้ำมันบางชนิดจะถูกไฮโดรไลซ์ได้ด้วยกรด ด่าง และเอนไซม์ การไฮโดรไลซ์ได้ด้วยด่าง เรียกว่า สaponification) ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นเกลือของกรดไขมันเรียกว่า สบู่ ด่างที่ใช้นิยมในการไฮโดรไลซ์ไขมัน เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอาจเกิดจากไขมันหรือน้ำมันได้รับความร้อนสูง เช่น ขณะทอดอาหารที่มีปริมาณน้ำในปริมาณมากไขมันจะถูกไฮโดรไลซ์เป็นกรดไขมันอิสระและกลีเซอรอล

ไขมันหรือน้ำมันที่ได้จากพืชและสัตว์แต่ละชนิด มักมีไตรกลีเซอไรด์เป็นส่วนประกอบในปริมาณค่อนข้างแน่นอน ดังนั้นจำนวนค่าที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไขมันหรือน้ำมันจำนวนหนึ่งจึงมีค่าค่อนข้างแน่นอนและเป็นค่าเฉพาะ ซึ่งสามารถใช้อย่างถึงคุณสมบัติของไขมันหรือน้ำมันแต่ละชนิดได้ เรียกว่า ค่าสaponification (Saponification value; Spv) หรือจำนวนมิลลิกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไฮโดรไลซิสไขมันหรือน้ำมันอย่างสมบูรณ์จำนวน 1 กรัม ให้ได้เป็นสบู่และกลีเซอรอล ค่า Spv ใช้เป็นตัวบ่งชี้ขนาดของโมเลกุลหรือน้ำหนักโมเลกุลของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ในไขมันและน้ำมัน กล่าวคือ หากไขมันหรือน้ำมันมีค่า Spv สูง แสดงว่า กรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ จึงมีจำนวนโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ต่อหน่วยน้ำหนักเป็นจำนวนมาก (นิธิยา, 2548)

2.3.2 ปฏิกิริยาฮาโลจีเนชัน (halogenation) เป็นปฏิกิริยาการเติมสารพวกฮาโลเจน (halogen) เข้าไปที่พันธะคู่ของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ สารฮาโลเจนที่นิยมใช้ได้แก่ ไอโอดีน ค่าที่ได้นั้นเรียกว่า ค่าไอโอดีน (Iodine value; Iv) หรือจำนวนกรัมของไอโอดีนที่เข้าทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ของกรดไขมันในไขมันหรือน้ำมันจำนวน 100 กรัม

ค่าไอโอดีนเป็นตัวบ่งชี้ว่า มีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเป็นองค์ประกอบในไขมันหรือน้ำมันมากน้อยเพียงใด หรือเป็นการบอกความไม่อิ่มตัวของไขมันและน้ำมัน หากค่า Iv สูง แสดงว่าไขมันหรือน้ำมันชนิดนั้นมีความไม่อิ่มตัวสูง ซึ่งจะมีคุณค่าทางโภชนาการสูง เนื่องจากกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเป็นกรดไขมันที่มีความจำเป็นต่อร่างกาย ในทางตรงกันข้ามไขมันหรือน้ำมันที่มีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวจะเกิดการหืนได้ง่าย (นิธิยา, 2548)

2.3.3 การหืน (rancidity) เป็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของไขมันหรือน้ำมันหรือน้ำมันซึ่งทำให้ไขมันหรือน้ำมันเกิดกลิ่นที่ผิดปกติ และสมบัติทางเคมีและทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไป การหืนเกิดขึ้นได้ 3 รูปแบบ คือ

2.3.3.1 ไลโพลิซิส (lipolysis) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อพันธะเอสเทอร์ใน โมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์เกิดการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ไลเปส กรด ค้าง ความร้อน หรือสารเคมี ซึ่งจะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่มีผลต่อสุขภาพของไขมันและน้ำมัน โดยทำให้น้ำมันมีกลิ่นและรสชาติเปลี่ยนแปลงไป เช่น กรดไขมันอิสระที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (คาร์บอน 4-12 อะตอม) ซึ่งจะมีกลิ่นหืนมาก และเมื่อปริมาณกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้นจะมีผลให้ค่า smoke point หรืออุณหภูมิที่ไขมันหรือน้ำมันเกิดควันเมื่อได้รับความร้อนมีค่าต่ำลง ทำให้น้ำมันจะเกิดควันได้ง่ายขณะทอดอาหาร สำหรับปฏิกิริยาที่เกิดจากเอนไซม์ไลเปสและความชื้นจะเรียกว่า hydrolytic rancidity

ไขมันและน้ำมันบางชนิดไม่สามารถสังเกตการณ์เกิดไลโพลิซิสได้ด้วยการดมกลิ่นหรือการชิมรส จึงต้องมีการตรวจวิเคราะห์ทางเคมี โดยการตรวจหาปริมาณกรดไขมันอิสระที่เกิดขึ้น ค่าที่ได้ว่า ค่าความเป็นกรด (Acid value; Av) หรือจำนวนมิลลิกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทำให้กรดไขมันอิสระที่อยู่ในไขมันหรือน้ำมัน 1 กรัม เป็นกลาง ดังนั้นจึงนิยมใช้ค่า Av เป็นตัวบ่งชี้สภาวะหรือระดับการหืนของไขมันหรือน้ำมัน กล่าวคือ หากค่า Av สูง แสดงว่ามีการเกิดกลิ่นหืน เนื่องจาก hydrolytic rancidity มาก วิธีการชะลอการเกิดกลิ่นนี้ทำได้โดยการเก็บไขมันหรือน้ำมันที่อุณหภูมิต่ำ (นิธิยา, 2548)

2.3.3.2 ออกซิเดทีฟ แรนซิดิตี (oxidative rancidity) เป็นการหืนที่เกิดจากปฏิกิริยา autoxidation ที่พันธะคู่ของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวกับออกซิเจนในอากาศ เกิดพันธะเพอร์ออกไซด์ที่หมู่แอลฟาเมทิลีน ( $\alpha$ -methylene) การหืนแบบนี้สามารถเกิดได้ทั้งกับไขมันและน้ำมันเอง และกับอาหารที่มีไขมันหรือน้ำมันเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย ปฏิกิริยานี้สามารถเร่งด้วยโลหะ ความร้อน และแสง

การเกิดกลิ่นหืนด้วยวิธีนี้จะทำให้เกิดกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวถูกทำลาย ทำให้เกิดการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ รวมทั้งสูญเสียวิตามินที่ละลายได้ในไขมันและน้ำมัน นอกจากนี้ยังสามารถเกิดจากการเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์ไลพอกซิเดส (lipoxygenase) ได้อีกด้วย

การตรวจวิเคราะห์การเกิด oxidative rancidity สามารถทำได้โดยการหาค่าเปอร์ออกไซด์ (Peroxide value; Pv) หรือการปริมาณสารเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นในไขมันหรือน้ำมัน หรือจำนวนมิลลิกรัมของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตความเข้มข้น 0.002 N ที่ใช้ในการไตเตรตไขมันหรือน้ำมัน 1 กรัม ถ้าค่า Pv สูง แสดงว่าไขมันหรือน้ำมันเกิด oxidative rancidity มาก และส่งผลให้ค่า Iv ที่วิเคราะห์ได้ต่ำกว่าความเป็นจริง

วิธีการป้องกันสามารถทำได้โดยการเติมสารป้องกันการหืนลงไปในไขมันหรือน้ำมัน หรืออาหารที่มีไขมันหรือน้ำมันเป็นส่วนประกอบ (นิธิยา, 2548)

2.3.3.3 คีโตนิก แรนซิดิตี (ketonic rancidity) เป็นการหืนที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยเอนไซม์ (enzymatic oxidation) กับโมเลกุลของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นสารพวกคีโตน ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (นิธิยา, 2548)

## 2.4 การวิเคราะห์กรดไขมันและไตรกลีเซอไรด์ในไขมันหรือน้ำมัน

น้ำมันและไขมันจากพืชเป็นสารที่มีองค์ประกอบที่เป็นของผสมที่มีความหลากหลาย โดยส่วนผสมหลักของน้ำมันและไขมันพืชนั้นคือไตรกลีเซอไรด์ ซึ่งไตรกลีเซอไรด์ประกอบไปด้วยกรดไขมันอิ่มตัว (saturated fatty acids) และกรดไขมันไม่อิ่มตัว (unsaturated fatty acids) ดังนั้นไตรกลีเซอไรด์ ในไขมันและน้ำมันที่ได้จากธรรมชาติจึงเป็นไตรกลีเซอไรด์ ผสม ชนิดและปริมาณของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ ที่มีอยู่ไขมันและน้ำมันชนิดต่างๆ จะเป็นตัวกำหนดสมบัติของไขมันและน้ำมันแต่ละชนิดให้แตกต่างกัน (Holcapek และคณะ, 2005)

การวิเคราะห์ชนิดของชนิดกรดไขมันและไตรกลีเซอไรด์ในไขมันและน้ำมันนั้นมีการศึกษากันมากขึ้นในช่วงสิบปีที่ผ่านมา โดยในอุตสาหกรรมน้ำมัน การวิเคราะห์ไตรกลีเซอไรด์นั้นถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือในการตรวจติดตามและควบคุมกระบวนการผลิต เช่น การบีบอัด การรีไฟน์ (refining) การแยก (fractionation) ไฮโดรเจเนชัน (hydrogenation) และอินเตอเอสเทอริฟิเคชัน (interesterification) ของน้ำมัน ในงานวิจัยด้านอาหารมีการใช้การวิเคราะห์ไตรกลีเซอไรด์ในการศึกษากระบวนการตกผลึก เพื่อสำหรับตรวจวัดการเจือปนของไขมันและน้ำมัน ตัวอย่างเช่น เนยโกโก้ (cocoa butter) ไขมันนม (milk fat) และน้ำมันมะกอก (olive oil) นอกจากนี้ยังใช้สำหรับการรับรองความบริสุทธิ์น้ำมันมะกอกอีกด้วย (Rombaut และคณะ, 2009)

เทคนิคและวิธีการที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์กรดไขมันและไตรกลีเซอไรด์ในปัจจุบันได้แก่

2.4.1 การวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของกรดไขมันด้วยเทคนิค Gas Chromatography-Flame Ionization Detector (GC-FID) เป็นเทคนิคใช้สำหรับแยกสารผสมที่มี

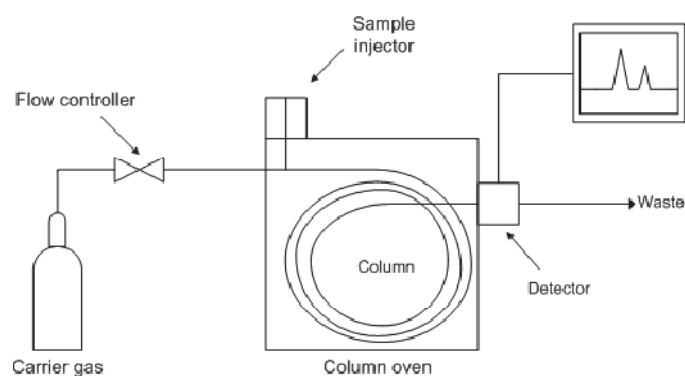
คุณสมบัติที่สามารถเป็นแก๊สได้ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณเทียบกับสารมาตรฐาน โดยใช้เฟสเคลื่อนที่เป็นแก๊สเช่นกัน แต่ไม่ทำปฏิกิริยากับสารผสม เช่น ฮีเลียม จะทำหน้าที่เป็นตัวพา (Carrier) สารผสม ส่วนเฟสอยู่กับที่อาจจะเป็นของแข็งหรือของเหลวที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์ เมื่อทั้งตัวพาและสารผสมเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์นี้ เฟสอยู่กับที่ในคอลัมน์จะดึงดูดด้วยแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิตตามความเป็นขั้วของสารกับโมเลกุลในสารผสมทำให้องค์ประกอบในสารผสมถูกพาไปด้วยอัตราเร็วที่ต่างกัน สารผสมก็จะแยกออกจากกัน เทคนิค GC นี้มักใช้ในการวิเคราะห์ทั้งคุณภาพและปริมาณในหลายด้าน อาทิเช่น ทางด้านอาหาร ยา ยาฆ่าแมลง น้ำมันหอมระเหย ทางการแพทย์ ปิโตรเลียม และทางสิ่งแวดล้อม เป็นต้น

องค์ประกอบหลักที่สำคัญของเครื่อง GC (ภาพที่ 3) สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน คือ

2.4.1.1 Injector คือ ส่วนที่สารผสมตัวอย่างจะถูกฉีดเข้าสู่เครื่องมือ และระเหยกลายเป็นไอก่อนที่จะเข้าสู่ column อุณหภูมิที่เหมาะสมของ injector ควรเป็นอุณหภูมิที่สูงพอที่จะทำให้ตัวอย่างระเหยได้แต่ต้องไม่ทำให้สารสลายตัว เช่น Split, Splitless injector, On column injector เป็นต้น

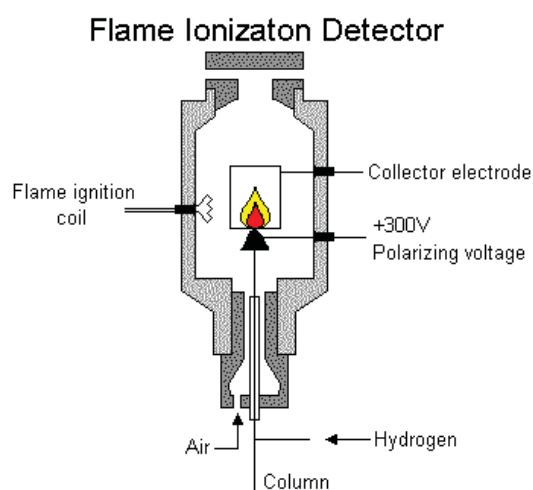
2.4.1.2 Oven คือ ส่วนที่ใช้สำหรับบรรจุ column และเป็นส่วนที่ควบคุมอุณหภูมิของ column ให้เปลี่ยนไปตามความเหมาะสมกับวิธีการที่ต้องการวิเคราะห์สารผสม การควบคุมอุณหภูมิของ oven นั้นมี 2 แบบ คือ Isothermal จะใช้อุณหภูมิเดียวตลอดการวิเคราะห์ และแบบ temperature program จะสามารถเปลี่ยนอุณหภูมิได้ในระหว่างการวิเคราะห์ มักจะนิยมใช้กับสารผสมที่มีช่วงของจุดเดือดกว้าง ทำให้ chromatogram ที่ได้มี peak shape ไม่ broad และยังช่วยลดเวลาในการวิเคราะห์

2.4.1.3 Detector คือ ส่วนที่ใช้สำหรับตรวจวัดองค์ประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และดูว่าสารตัวอย่างที่สนใจมีปริมาณอยู่เท่าใด มีหลายชนิดตามความเหมาะสม โดยในการศึกษาครั้งนี้ใช้ Flame Ionization Detector (FID) (ภาพที่ 4) ซึ่งเหมาะสำหรับตรวจวัดสารที่มี C-H bonds ในโมเลกุลหรือที่เรียกว่าเป็นสารอินทรีย์ (Organic compounds) เช่น ไขมันหรือน้ำมัน



ภาพที่ 3 องค์ประกอบหลักของเครื่อง GC

ที่มา : Wikipedia encyclopedia (2010)



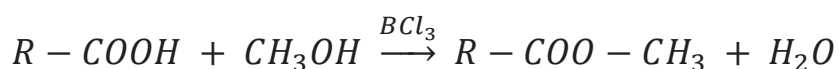
ภาพที่ 4 Flame Ionization Detector

ที่มา : Undergraduate Instrumentation Center (2011)

GC สามารถใช้ในการวิเคราะห์ชนิดของกรดไขมัน อย่างเช่น กรดไขมันอิสระ (free fatty acid) หรือเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (fatty acid methyl esters) โดยเหตุผลที่ต้องทำให้กรดไขมันอยู่ในรูปของเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ด้วย GC คือ ความเป็นอิสระของกรดไขมันซึ่งอยู่ในรูปแบบ underivatized กรดไขมันอาจจะมีความยากในการวิเคราะห์ เพราะความมีขั้วที่สูงที่เกิดจากพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bonds) ซึ่งนำไปสู่ปัญหาด้านการดูดซับ โดยการลดลงของความมีขั้วของกรดไขมันจะทำให้สามารถวิเคราะห์กรดไขมันได้ดี

ขึ้น และอีกเหตุผลหนึ่งคือการทำให้แตกต่างระหว่างความแตกต่างเพียงเล็กน้อย โดยกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว หมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลที่มีขั้ว ต้องทำให้เป็นกลางก่อน จากนั้นก็ทำการแยกด้วยคอลัมน์

การทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (esterification) ของกรดไขมันให้เป็นเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันโดยใช้สารพวก alkylation derivatization เมทิลเอสเทอร์มีเสถียรภาพที่ดีเยี่ยมและเตรียมได้รวดเร็ว ภาพที่ 5 แสดงปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันที่เกี่ยวข้องกับการรวมตัวของหมู่คาร์บอกซิล (carboxyl group) ของกรดและหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) ของแอลกอฮอล์ ตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันที่ดีที่สุดคือ โบรอนไตรคลอไรด์ (boron trichloride) ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ protonates อะตอมออกซิเจนของหมู่คาร์บอกซิล ทำให้กรดเกิดปฏิกิริยามากขึ้น แอลกอฮอล์จะเชื่อมกับกรดที่มีประจุบวกซึ่งให้ผลผลิตเป็นเอสเทอร์โดยการสูญเสียของน้ำ ตัวเร่งปฏิกิริยาถูกกำจัดออกด้วยน้ำ แอลกอฮอล์ที่ใช้จะเป็นตัวกำหนดความยาวของสายโซ่แอลคิลเอสเทอร์ที่เป็นผลลัพธ์ (การใช้เมทานอลจะมีผลในการก่อตัวของเมทิลเอสเทอร์ในขณะที่การใช้เอทานอลจะมีผลในเอทิลเอสเทอร์) (Sigma-Aldrich, 2011)

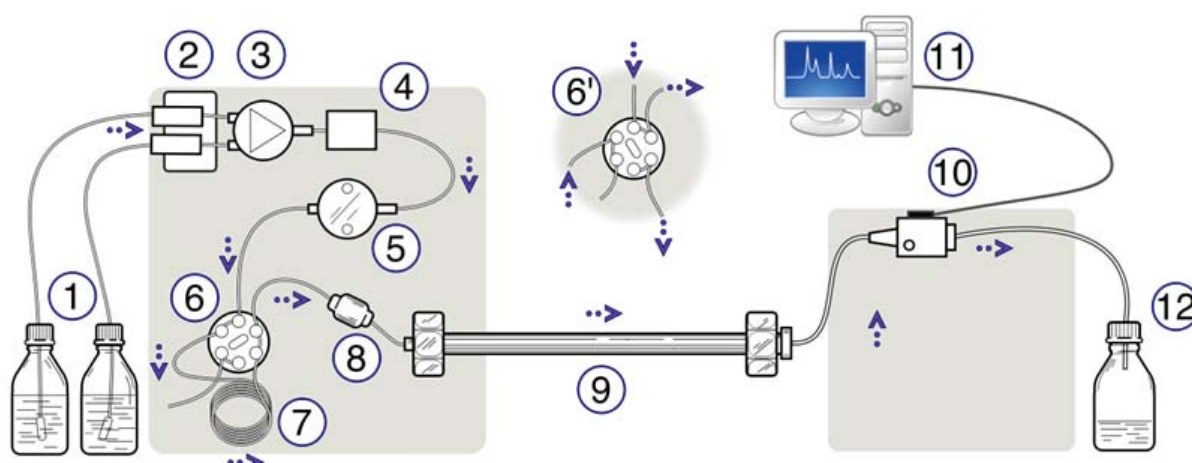


ภาพที่ 5 การเกิดปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน

ที่มา : Sigma-Aldrich (2011)

2.4.2 การวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ด้วยเทคนิค High Performance Liquid Chromatography (HPLC) เป็นกระบวนการพื้นฐานที่ใช้ในการแยกสารโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างตัวถูกละลาย (solutes) และของแข็ง (solid) stationary phase และของเหลว โดยส่วนใหญ่แล้วมี 2 ระบบของตัวทำละลายในการแยกคือ normal-phase (NP) และ reversed-phase (RP) ซึ่งนำมาใช้ในการวิเคราะห์ของเหลว โดยที่ normal-phase ซึ่งมีคุณสมบัติคือการดูดซับแบบผันกลับได้ของตัวถูกละลายไปยังกลุ่มของสารมีขั้วของตัวดูดซับที่เป็นของแข็ง (silica gel, alumina, Florisil) ในขณะที่แบบ reversed-phase จะมีผิวก้นของตัวถูกละลายระหว่าง mobile phase และ stationary phase ซึ่งมีของเหลว (liquid phase) ที่เหมาะสมในการพัฒนาสารมีที่ thin film หรือการเกิดพันธะเคมีของ inert solid support โดยทั่วไปแล้ว octadecylsilyl ( $C_{18}$ ) เป็นคอลัมน์แบบ RP ที่มีการใช้กันโดยทั่วไปในการแยกไตรเอซิลกลีเซอรอล ในการใช้ NP-HPLC นั้นระบบตัวทำละลายมีขั้วน้อยกว่า

stationary phase ในทางตรงกันข้าม RP-HPLC นั้นจะมีระบบตัวทำละลายมีขั้วมากกว่า stationary phase (Buchgraber และคณะ, 2004)



หมายเหตุ : หมายเลข 1 = solvent reservoirs, 2 = solvent degasser, 3 = gradient valve, 4 = mixer, 5 = high-pressure pump, 6 = inject position, 6' = switching valve in load position, 7 = sample injection loop, 8 = pre-column or guard column, 9 = analytical column, 10 = detector, 11 = data acquisition และ 12 = waste or fraction collector

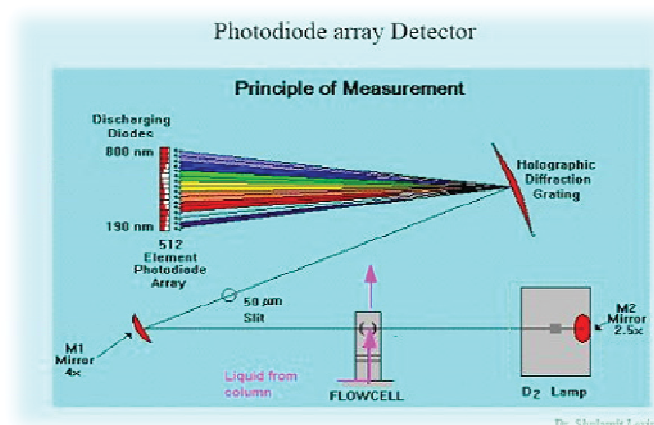
### ภาพที่ 6 องค์ประกอบและ โครงสร้างของเครื่อง HPLC

ที่มา : Yassine Mrabet (2011)

ในการวิเคราะห์โครมาโทกราฟีในปัจจุบันนิยมใช้ HPLC ที่มีคอลัมน์แบบ reverse phase (RP) ซึ่งคอลัมน์ชนิดนี้สารที่เป็น support เป็นสาร chemically bonded support กล่าวคือถูกยึดด้วย hydrocarbon chain เช่น octadecyl (C18), octyl (C8) group ทำให้มีคุณสมบัติ non-polar สารที่เป็น stationary phase จึงเป็นสารที่มีคุณสมบัติ non-polar ในขณะที่ mobile phase มีคุณสมบัติ polar เช่น น้ำ, methanol, acetonitrile เมื่อ solute ที่มีคุณสมบัติ non-polar เคลื่อนที่มากับ mobile phase จะเกิดการกระจายตัวได้ใน stationary phase มากกว่าสารที่มีคุณสมบัติ polar จึงเคลื่อนที่ออกจาก column ช้ากว่า ชนิดของ solute และคุณสมบัติการคงอยู่ (retained) กับ column สารที่เป็นกรดหรือเบสจะอยู่ใน column ที่เป็น normal phase ได้ดี ส่วน fluorocarbon ซึ่งมีคุณสมบัติ non-polar จะถูก retained ได้ดีใน column ชนิด reversed phase เทคนิคนี้ใช้ในการแยกสารที่มีคุณสมบัติ non-polar

เช่น steroids, fat-soluble vitamins (พิศิษฐ์, 2544) โดยทั่วไปแล้วมักมีการใช้ RP-HPLC ในการแยกโมเลกุลเป็นไตรกลีเซอไรด์ โดยการแยกจะเกิดโดยการ partition ระหว่าง non-polar stationary phases ของ  $C_{18}$  กับ polar mobile phases ซึ่งโดยทั่วไป mobile phase ที่นิยมใช้ในการแยกไตรกลีเซอไรด์จะเป็นของผสมระหว่าง acetonitrile กับ acetone หรือ chlorinated solvents (Buchgraber และคณะ, 2004)

ในวิเคราะห์ไตรกลีเซอไรด์ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้ RP-HPLC ที่มี detector เป็น Photodiode Array Detector (PDA) หรือ Diode Array Detector เป็นการตรวจวัดโดยวัดการดูดกลืนของแสงเช่นเดียวกับ UV Detector เพียงแต่ การเก็บข้อมูล มิใช่การเก็บเพียง 1 หรือ 2 ความยาวคลื่นเท่านั้น แต่สามารถ เก็บข้อมูลได้เป็นช่วงของความยาวคลื่นที่ผู้วิเคราะห์สามารถเลือกได้ และยังมีกลไกการเก็บข้อมูลซับซ้อนกว่า โดยเฉพาะระบบ Optic ใน Diode Array Detector ซึ่งจะมี Photodiode Array จำนวนมาก เป็นตัววัดการดูดกลืนแสง ดังนั้นสารถ้ามีสมบัติทางเคมีที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วง 190-800 nm



ภาพที่ 7 หลักการทำงานของ photodiode array detector

ที่มา : ชุมชนศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มอ. (2554)

การหาสถานะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ไตรกลีเซอไรด์มีความจำเป็นอย่างมากในการวิเคราะห์ เพราะมีปัจจัยหลายปัจจัยที่มีผลต่อการวิเคราะห์ เช่น ชนิดของตัวทำละลาย อุณหภูมิของคอลัมน์ และชนิดของคอลัมน์ เป็นต้น โดยตัวทำละลายที่ดีที่จะเลือกใช้นั้น ตัวอย่างควรละลายได้ดี และมีคุณสมบัติความมีขั้วตรงข้ามกับ stationary phase ที่ใช้ด้วย เมื่อผ่านการแยกด้วยเครื่อง HPLC แล้วควรให้ chromatogram ที่เด่นชัด พิกัดแยกออกจากกันอย่างชัดเจน อุณหภูมิของคอลัมน์ที่เลือกใช้

นั้นจะต้องสามารถทำให้เกิดฟีกที่แยกออกจากกันอย่างเด่นชัด และทำให้เกิดเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์เหมาะสม เพราะหากใช้อุณหภูมิต่ำมากอาจใช้เวลานานในการวิเคราะห์ แต่ถ้าใช้อุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้สารออกมาจากคอลัมน์เร็วทำให้เกิดการแยกที่ไม่สมบูรณ์ได้ ส่วนชนิดของคอลัมน์นั้นก็ยังเป็นอีกปัจจัยที่สำคัญเนื่องจากคอลัมน์แต่ละแบบมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน โดย NP-HPLC สามารถแยกโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ที่มีองค์ประกอบเป็น short-chain acyl residues ในขณะที่ RP-HPLC สามารถแยกได้เฉพาะโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ที่มีองค์ประกอบของ acyl moieties ต่างๆ การเลือกใช้ detector ที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ไตรกลีเซอไรด์นั้น จะสามารถทำให้ได้ข้อมูลที่ละเอียดและถูกต้องแม่นยำมากขึ้น

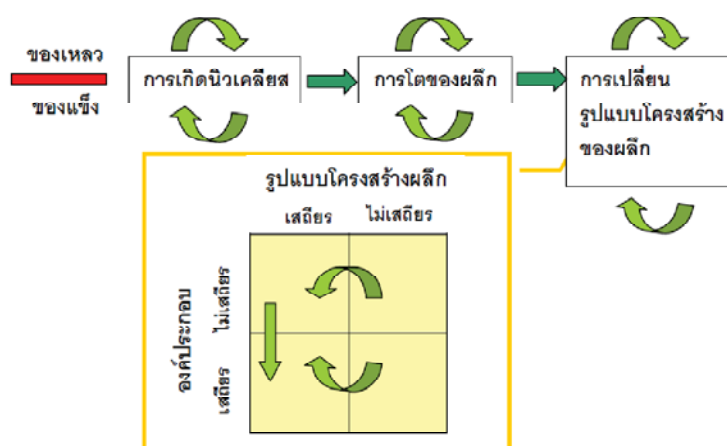
ประโยชน์ของ HPLC ในการวิเคราะห์ไตรกลีเซอไรด์นั้นสามารถนำมาใช้ในการตรวจติดตามคุณภาพของน้ำมันพืช โดยสามารถแยกการปลอมปนได้ และเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์เป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการตรวจวิเคราะห์ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ในไขมันและน้ำมันพืช

## 2.5 การตกผลึกของไขมันและน้ำมัน (Crystallization of fats and oils)

การตกผลึกมีความสำคัญทางอุตสาหกรรม เนื่องจากมีผลิตภัณฑ์หลายชนิดที่จำหน่ายในรูปของผลึก ซึ่งกระบวนการตกผลึกเป็นกระบวนการเกิดของแข็งภายใต้เฟสที่เป็นโฮโมจีเนียส ซึ่งอาจเกิดของแข็งในสภาวะไอ เช่น การเกิดหิมะ หรือเป็นอนุภาคของแข็งในสารละลายหลอมเหลว เช่น การตกผลึกของไขมัน หรือการแช่แข็งของน้ำไปเป็นของแข็งในสารละลายหลอมเหลว การตกผลึกจัดเป็นกระบวนการแยกของแข็ง-ของเหลว เช่น การตกผลึก เพื่อแยกเอาส่วนประกอบที่มีจุดหลอมเหลวสูงออกจากน้ำมันเพื่อให้ไม่เป็นไขเมื่ออยู่ในอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากไขมันและน้ำมันแต่ละชนิดมีส่วนผสมของไตรกลีเซอไรด์ที่ต่างกันผสมอยู่หลายชนิดขึ้นกับชนิดของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในไขมันและน้ำมัน ทำให้น้ำมันและไขมันมีจุดหลอมเหลวและจุดเยือกแข็งที่เป็นช่วงอุณหภูมิของไตรกลีเซอไรด์ที่เป็นองค์ประกอบ (นิธิยา, 2548) โดยการตกผลึกของไตรกลีเซอไรด์ในลักษณะสภาวะแวดล้อมที่ต่างกันจะส่งผลให้การพัฒนาสภาพของนิวเคลียสแตกต่างกันทำให้ได้ผลึกที่มีคุณสมบัติทางกายภาพที่ต่างกันด้วย เช่น ขนาดผลึกที่เกิดขึ้นและอุณหภูมิของการหลอมเหลวซึ่งคุณสมบัติทั้งสองนี้มีผลอย่างมากต่อลักษณะเนื้อสัมผัสและลักษณะปรากฏในผลิตภัณฑ์อาหารที่มีไขมันเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น เนย, มาการีน โดยเมื่อผลึกไขมันที่ไม่ต้องการที่อยู่ในมาการีน จะทำให้มาการีนมีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆเมื่อถึงมือผู้บริโภค จึงต้องมีการควบคุมแต่ละปัจจัย (จำนวนรูปร่าง ขนาด และการมีโครงสร้างผลึกหลายรูปแบบ) ซึ่งเป็น

สิ่งจำเป็นเพื่อผลิตสินค้าให้มีคุณภาพสูงสุดเพื่อให้เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค เป็นที่ยอมรับทางประสาทสัมผัสและด้านอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ (Hartel, 2001)

เมื่อก้าวถึงคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ (physicochemical) ของไขมันและน้ำมัน ก็จะต้องกล่าวถึงพฤติกรรมของการตกผลึก การตกผลึกจะเกิดในสถานะที่ไขมันหรือผลิตภัณฑ์ที่มีไขมันมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของไขมันชนิดนั้น ซึ่งสามารถทำได้โดยการลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็ว ภาพที่ 8 แสดงเค้าโครงของกระบวนการตกผลึก โดยแบ่งเหตุการณ์ออกเป็นสามส่วนคือการเกิดนิวเคลียส การโตของผลึก และการเปลี่ยนรูปร่างของผลึก (Lidefelt, 2007)



ภาพที่ 8 กระบวนการตกผลึก

ที่มา: Lidefelt (2007)

## 2.5.1 กระบวนการตกผลึก

กระบวนการตกผลึกมีขั้นตอนสำคัญ 3 ขั้นตอน ดังนี้

### 2.5.1.1 การเกิดนิวเคลียส (Nucleation)

กระบวนการตกผลึกทั้งหมดเริ่มโดยโมเลกุลแต่ละโมเลกุลมารวมตัวกันเกิดเป็นโมเลกุลที่เป็นกลุ่มก้อน (molecular clusters) ซึ่งในกรณีของไตรกลีเซอไรด์ที่อยู่ในรูปของเหลว จะมีการตกผลึก โดยโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์จำนวนมากรวมตัวกันเป็นกลุ่มหรือที่เรียกว่า คลัสเตอร์ (cluster) ถ้าองค์ประกอบมีความเสถียรหรือเมื่อคลัสเตอร์มีการโตถึงขนาดวิกฤต นิวเคลียสของผลึกก็จะมีการสร้างรูปแบบขึ้น ทำให้มีนิวเคลียสของไตรกลีเซอไรด์เพิ่มขึ้นจำนวนมากและจะเข้าสู่กระบวนการต่อไปคือ การโตของผลึก (Lidefelt, 2007)

### 2.5.1.2 การ โตของผลึก (Crystal growth)

การโตของผลึกเป็นกระบวนการแพร่ที่เกิดขึ้นบนผิวของของแข็งที่กำลังมีการโตเป็นผลึก โมเลกุลจะแพร่ผ่านเฟสที่เป็นของเหลวไปยังผิวหน้าของผลึกที่กำลังโต อัตราการเกิดของผลึกหนึ่งๆ ในสารละลายขึ้นกับการถ่ายเทของโมเลกุลของตัวถูกละลายไปยังผิวของผลึก และกลไกการเกาะติดที่ผิว การคนสารละลายระหว่างการตกผลึกจะช่วยลดอิทธิพลของการถ่ายเทของสารไปยังผิวของผลึก แต่ถึงแม้ว่าไม่มีการกวนระหว่างการตกผลึก การถ่ายเทสารไปที่ผิวก็มีใช้ปัจจัยที่เป็นตัวกำหนดอัตราการโตของผลึก

ในขั้นตอนการโตของผลึกจะเป็นตัวกำหนดรูปแบบโครงสร้างของผลึก โดยถ้าน้ำมันถูกลดอุณหภูมิลง โดยที่อัตราการโตของผลึกช้ากว่าอัตราการเกิดนิวเคลียส จะทำให้ได้ผลึกจำนวนมาก และมีขนาดเล็ก ในทางกลับกัน ถ้าน้ำมันถูกทำให้เย็นด้วยอัตราการลดลงของอุณหภูมิสูง โดยที่อัตราการเกิดนิวเคลียสช้ากว่าอัตราการโตของผลึก จะทำให้ได้ผลึกจำนวนน้อยและมีขนาดใหญ่ (Lidefelt, 2007)

#### 2.5.1.3 การเปลี่ยนรูปแบบโครงสร้างของผลึก (transformation)

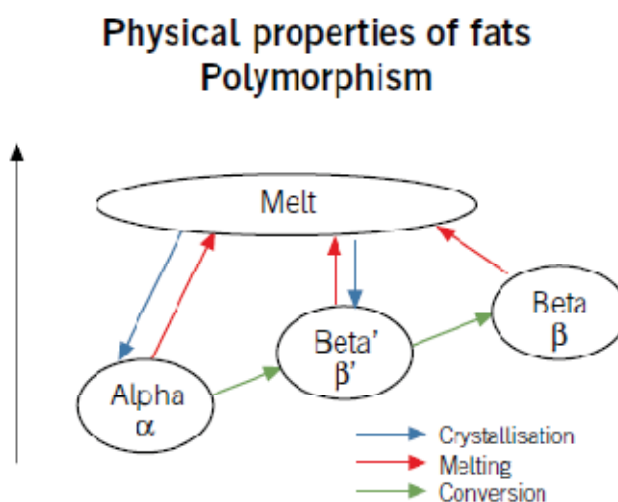
กระบวนการสุดท้ายของการตกผลึกคือ การเปลี่ยนรูปแบบโครงสร้างของผลึก (transformation) ขั้นตอนนี้จะเกิดขึ้นช้ากว่าการเกิดนิวเคลียสของผลึกและการโตของผลึก ปัจจัยที่มีความสำคัญ 2 ประการ ที่ใช้ในการพิจารณารูปแบบของผลึก คือ สภาวะการเกิดรูปแบบโครงสร้างของผลึก (polymorphism) และองค์ประกอบของผลึก

ภายใต้สภาวะในอุดมคติการโตของผลึกของไตรกลีเซอไรด์แต่ละโมเลกุล จะเกิดขึ้นภายในโครงสร้างผลึก อย่างไรก็ตาม ภายใต้สภาวะปกติไม่ค่อยพบการโตของผลึกไตรกลีเซอไรด์ภายในโครงสร้างผลึก แต่การโตของผลึกจะพบมากบริเวณผิวหน้าของโครงสร้างผลึก หากการโตของผลึกเกิดขึ้นเพียงบางส่วน จะทำให้เกิดรูปแบบโครงสร้างของผลึกที่ไม่เสถียร ต่อมาภายหลังผลึกอาจจะเกิดการละลายและเกิดการตกผลึกอีกครั้ง (recrystallization) ในรูปแบบโครงสร้างผลึกที่เสถียรกว่า ถ้ารูปแบบและองค์ประกอบของผลึกไม่เสถียร ผลึกจะถูกละลายอย่างสมบูรณ์และมีการโตของผลึกเริ่มขึ้นอีกครั้ง การเปลี่ยนรูปร่างจะหยุดเมื่อผลึกทั้งหมดมีรูปแบบโครงสร้างและองค์ประกอบที่เสถียรทั้งคู่ (Lidefelt, 2007)

#### 2.5.2 ประเภทและคุณสมบัติของผลึก

คำว่า polymorphism มาจากภาษากรีกแปลว่า “many form” คือ การเกิดผลึกหลายรูปแบบ การเกิดสภาวะโครงสร้างของผลึกที่มีหลายรูปแบบโครงสร้างนี้เกิดจากการลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็ว ทำให้ไขมันเกาะตัวกันอย่างรวดเร็วเป็นผลทำให้ผลึกที่เกิดขึ้นมีพลังงานสูง แต่มีความคงตัวต่ำ จึงสามารถที่จะมีโอกาสเกิดการจัดเรียงตัวใหม่กลายเป็นผลึกรูปแบบโครงสร้างต่างๆ ที่มีพลังงานต่ำและมีความคงตัวสูงกว่าเพื่อความเสถียรของผลึก

โดยทั่วไปผลึกของไขมันมี 3 รูปแบบโครงสร้างหลัก คือ เอลฟา ( $\alpha$ ) เบต้า-ไพรม ( $\beta'$ ) และ เบต้า ( $\beta$ ) โดยรูปแบบ  $\alpha$  มีพื้นฐานเป็นรูปทรงหกเหลี่ยม (hexagonal) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำและมีอัตราการลดลงของอุณหภูมิสูง รูปแบบโครงสร้างผลึกแบบ  $\alpha$  นี้ มีจุดหลอมเหลวต่ำสุด ทำให้ไม่เสถียรที่อุณหภูมิห้อง โดยส่วนใหญ่รูปแบบโครงสร้าง  $\alpha$  มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลอย่างหลวมๆ ทำให้มีความหนาแน่นน้อย รูปแบบโครงสร้างผลึกแบบที่ 2 คือ รูปแบบโครงสร้าง  $\beta'$  ซึ่งมีพื้นฐานเป็นรูปทรงมุมฉาก (orthorhombic) โดยอาจเกิดจากการลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็ว หรืออาจเกิดจากการที่รูปแบบโครงสร้าง  $\alpha$  หลอมเหลวที่อุณหภูมิห้องแล้วเปลี่ยนมาเป็นรูปแบบ  $\beta'$  ส่วนรูปแบบผลึกแบบที่ 3 คือ รูปแบบโครงสร้าง  $\beta$  ซึ่งมีพื้นฐานเป็น triclinic เกิดจากการลดลงของอุณหภูมิที่ช้ามาก หรืออาจเกิดจากการที่รูปแบบโครงสร้าง  $\beta'$  หลอมเหลวแล้วเปลี่ยนมาเป็นรูปแบบโครงสร้าง  $\beta$  ซึ่งรูปแบบผลึกแบบโครงสร้าง  $\beta$  นี้ มีขนาดของผลึกใหญ่และผลึกมีความคงตัวมาก โดยมีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลกันอย่างใกล้ชิด ทำให้มีความหนาแน่นมาก และมีจุดหลอมเหลวสูงกว่ารูปแบบโครงสร้าง  $\alpha$  และรูปแบบโครงสร้าง  $\beta'$  (Solís-Fuentes และคณะ, 2005) จะเห็นได้ว่ารูปแบบโครงสร้างผลึกแบบต่างๆ จะมีความสัมพันธ์กัน ทั้งในด้านการตกผลึกและการเปลี่ยนรูปแบบโครงสร้าง ดังแสดงในภาพที่ 9 โดยผลึกแต่ละรูปแบบโครงสร้างนั้นก็จะมีจุดหลอมเหลวที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 5



**ภาพที่ 9** คุณสมบัติทางกายภาพของรูปแบบโครงสร้างผลึกไขมัน  
ที่มา: Lidefelt (2007)

ตารางที่ 5 แสดงจุดหลอมเหลวของผลึกรูปแบบต่างๆ

| Polymorphic forms | Melting Point (°C) |
|-------------------|--------------------|
| Delta             | 86.7-88.3          |
| Alpha             | 90.0-91.7          |
| Beta              | 94.4-95.0          |
| Gamma             | 98.9-101.7         |

ที่มา : Hartel (2001)

อัตราการเปลี่ยนแปลงรูปแบบโครงสร้างของผลึกและอัตราการตกผลึกจะขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น ชนิดของไขมัน การละลายของน้ำมันในของเหลว และอุณหภูมิซึ่งส่งผลต่อจุดหลอมเหลวของผลึกที่แตกต่างกัน รูปแบบโครงสร้าง  $\alpha$  โดยปกติมีความเสถียรน้อยมาก สามารถคงรูปไว้ได้นานประมาณ 10 นาทีถึง 2 ชั่วโมง แต่ในไขมันที่ผ่านการทำไฮโดรจิเนชันอย่างสมบูรณ์ที่เก็บที่อุณหภูมิห้องอาจจะทำให้รูปแบบโครงสร้าง  $\alpha$  เสถียรนานเป็นปีได้ การเปลี่ยนรูปแบบโครงสร้างจากรูปแบบโครงสร้าง  $\beta'$  ไปเป็นรูปแบบโครงสร้าง  $\beta$  ที่สมบูรณ์จะเกิดขึ้นที่ระยะเวลา 2 หรือ 3 วัน ถึง 1 สัปดาห์ แต่อย่างไรก็ตามรูปแบบโครงสร้าง  $\beta'$  ก็สามารถคงรูปไว้ได้นานเป็นปี (Lidefelt, 2007)

#### 2.5.2.1 รูปร่างผลึก

รูปร่างของผลึกสุดท้ายกันจะมีหน้าตาและเหลี่ยมเฉพาะตัว โดยที่ไม่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของระบบผลึกเพียงอย่างเดียวแต่ยังขึ้นอยู่กับสภาวะที่ผลึกเกิดการฟอร์มตัวและเติบโตอีกด้วย รูปร่างของผลึกจะมีความหลากหลายจากที่เป็นแบบ tabular ซึ่งลักษณะเป็นแผ่นราบ (thin disks) ไปเป็นแบบ prismatic ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปทรงลูกบาศก์ (cubic or prismatic) ไปเป็น acicular ซึ่งมีลักษณะเป็นเข็ม (needles) รูปร่างปรากฏที่แตกต่างกันจะเกิดขึ้นเมื่อผลึกอยู่ภายใต้สภาวะการเติบโตที่แตกต่างกัน ปัจจัยที่มีผลต่อรูปร่างผลึก คือ ความเร็วของการเติบโต อุณหภูมิ และระดับความไม่บริสุทธิ์ของระบบ

เมื่อผลึกเติบโตภายในสภาวะการทำเย็นอย่างรวดเร็วมาก จะเกิดเป็นผลึกที่เป็นกิ่งก้าน สำหรับรูปร่างผลึก 3 แบบนี้จะเป็นสายหลักและก็จะมิกิ่งก้านแผ่ออกไปในสารละลาย

ผลึกไขมันที่มีโครงสร้างผลึกแตกต่างกันอาจจะมีรูปร่างที่แตกต่างกัน ผลึก  $\beta'$ -polymorph มีลักษณะเป็นแท่ง ซึ่งไม่เหมือนกับผลึกที่มีความคงตัวกว่าอย่างผลึก  $\beta$ -polymorph ที่มีลักษณะเป็นแผ่น (ไม่เสมอไป) เมื่อไขมันมีการจัดเรียงตัวใหม่ไปอยู่ในรูปแบบที่มีความคงตัวมากขึ้น มีผลทำให้รูปร่างของผลึกเปลี่ยนแปลงไปด้วย แม้ว่าโครงสร้างของโมเลกุลจะเหมือนเดิมซึ่งจะมีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์

#### 2.5.2.2 ขนาดผลึก

สำหรับรูปร่างอย่างง่ายของผลึก (ทรงกลม หรือ ลูกบาศก์) ขนาดผลึกจะวัดที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหรือความยาวของเส้นขอบซึ่งเป็นหน่วยในการวัดรูปร่าง อย่างไรก็ตามผลึกส่วนใหญ่จะไม่มีรูปร่างเป็นทรงกลมหรือลูกบาศก์ รูปร่างของผลึกอยู่ในช่วงเป็นแผ่นถึงเป็นรูปเข็มซึ่งถูกจัดอยู่ในประเภทรูปร่างที่เชื่อมหากันได้ นอกจากนี้เทคนิคในแต่ละเทคนิคการวัดขนาดผลึกจะเป็นการอธิบายเกี่ยวกับลักษณะเฉพาะของผลึก (น้ำหนัก พื้นที่ และอื่นๆ) และเกี่ยวเนื่องขนาดกับลักษณะเฉพาะของผลึก แม้ว่ารูปร่างผลึกที่ถูกวัดจะเหมือนกัน แต่ถ้าใช้เทคนิคการวัดที่ต่างกัน ก็จะได้ขนาดของผลึกที่ต่างกันด้วย ขนาดของผลึกสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์ได้ ผลิตภัณฑ์ที่มีผลึกที่เล็กกว่าจะมีสีซีดและไม่เงา ผลึกที่มีขนาดเล็กและละลายไม่รวดเร็วจะทำให้เกิดการละลายอย่างช้าๆ เมื่อเข้าปาก

#### 2.5.2.3 การกระจายของขนาดผลึก

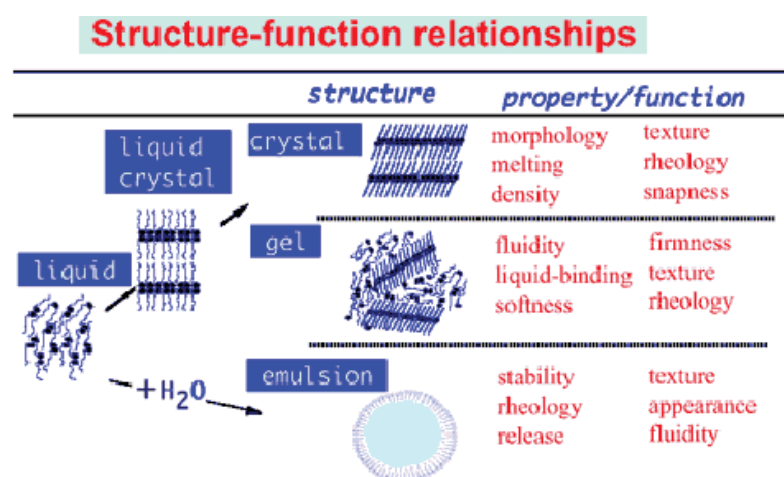
จำนวนของผลึกและการกระจายขนาดของผลึกนั้นเป็นตัวแปรสำคัญสำหรับการควบคุมอาหารที่เป็นผลึก จำนวนและการกระจายขนาดของผลึกนี้นำมาสู่คุณภาพของผลิตภัณฑ์และเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ การกระจายขนาดสามารถถูกวัดในเชิงปริมาณได้โดยนับจำนวนผลึกที่ขนาดต่างๆโดยใช้เทคนิคต่างๆ เช่น microscopy or light scattering techniques

ในกระบวนการทำให้ตกผลึกนี้จำเป็นต้องทำเพื่อควบคุมการกระจายของขนาดผลึก สิ่งที่กำหนดคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารนั้นไม่ได้มีเพียงจำนวนของผลึกทั้งหมดเพียงเท่านั้น แต่ยังมีลักษณะเฉพาะของผลึกด้วย นั่นคือ จำนวนผลึกและช่วงของขนาดผลึก รูปร่างและความคงตัวของรูปแบบผลึก ซึ่งพอๆ กันกับที่จะต้องพิจารณาการจัดเรียงตัวของผลึกกับส่วนผสมอื่นในอาหาร ซึ่งจะมีผลต่อคุณสมบัติการไหล (Hartel, 2001)

2.5.3 อิทธิพลของโครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure) ของผลึกต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์อาหาร

ลักษณะรูปร่างของผลึกที่เกิดในผลิตภัณฑ์อาหารที่แตกต่างกันทำให้ลักษณะปรากฏของอาหารแตกต่างกันด้วยเนื่องจากผลึกแต่ละรูปแบบมีคุณสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกัน เช่น การหักเหของแสง อุณหภูมิการหลอมเหลว เป็นต้น ภาพที่ 10 แสดงถึงลักษณะโครงสร้างการ

จัดเรียงตัวของโมเลกุลอาหารต่อลักษณะทางประสาทสัมผัสของอาหาร จะเห็นว่าเมื่ออาหารมีการเปลี่ยนแปลงจากสถานะที่เป็นของเหลวไปอยู่ในโครงสร้างอื่นๆ ได้แก่ โครงสร้างของผลึก โครงสร้างที่เป็นเจล และโครงสร้างที่เป็นอิมัลชัน ซึ่งโครงสร้างแต่ละแบบจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันทำให้ส่งผลต่อลักษณะทางประสาทสัมผัสแตกต่างกันด้วย โดยการเกิดเป็นโครงสร้างผลึกในอาหาร ลักษณะของผลึกจะมีผลต่อเนื้อสัมผัส อุณหภูมิการหลอมเหลวของผลึกมีผลต่อคุณสมบัติในการไหล ความหนาแน่นของผลึกมีผลต่อความเปรี้ยวของอาหาร สำหรับโครงสร้างที่เป็นเจลในอาหารนั้น ความสามารถในการไหลความเหลวมีผลต่อความแข็งแรงและความคงรูป การยึดเกาะกันระหว่างของเหลวในการเกิดเจลมีผลต่อเนื้อสัมผัสของเจล และความอ่อนนุ่มของเจล มีผลต่อคุณสมบัติในการไหล การเกิดโครงสร้างที่เป็นระบบอิมัลชันในอาหาร ความคงตัวมีผลต่อเนื้อสัมผัสและความหนืดมีผลต่อลักษณะปรากฏ เป็นต้น

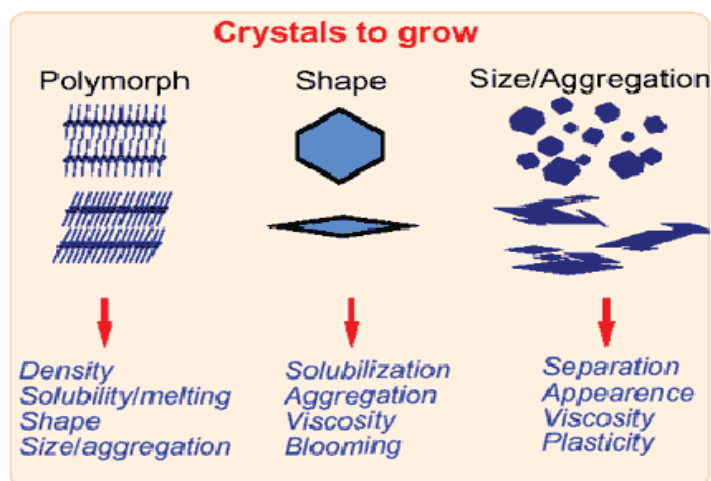


ภาพที่ 10 โครงสร้างของไขมันต่อลักษณะทางประสาทสัมผัส

ที่มา : Research Interests (2011)

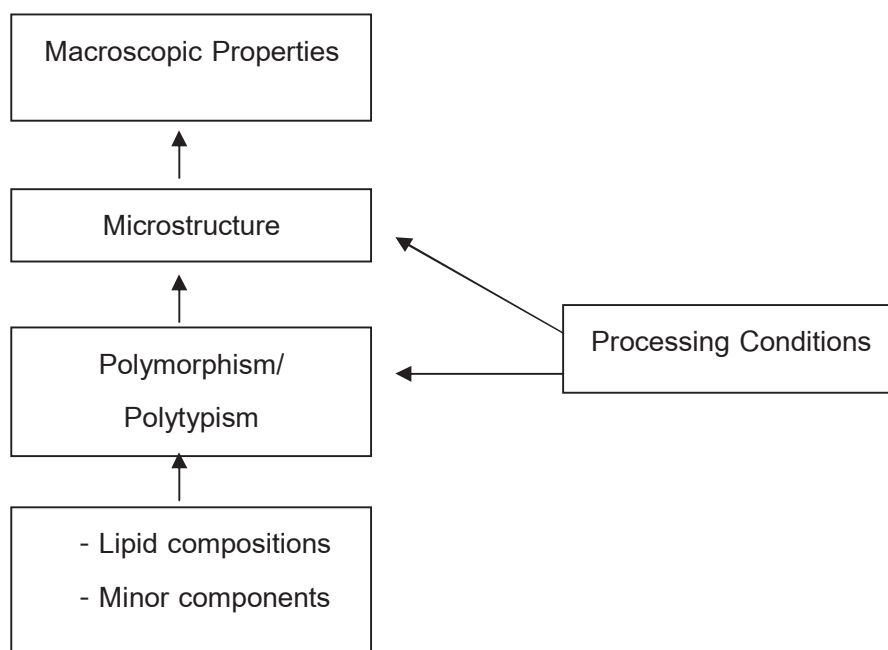
ภาพที่ 11 แสดงถึงความแตกต่างของผลึกที่เกิดต่อลักษณะที่แตกต่างด้านคุณสมบัติของผลึก จากภาพแสดงให้เห็นว่าการเกิดผลึกหลายโครงสร้าง (polymorph) ซึ่งผลึกแต่ละโครงสร้างจะมีรูปร่างและขนาดที่แตกต่างกันไป ผลึกที่เกิดในหลายโครงสร้างแต่ละโครงสร้างมีความหนาแน่น ความสามารถในการละลายหรือจุดหลอมเหลว รูปร่างและขนาดที่แตกต่างกัน ส่วนความแตกต่างของลักษณะรูปร่างของผลึกส่งผลต่อความสามารถในการละลาย ขนาดและการ

รวมตัวของผลึกส่งผลต่อลักษณะปรากฏ การแยกผลึกออกจากสารละลาย ความหนืดและคุณสมบัติความเป็นพลาสติก



ภาพที่ 11 ลักษณะการเติบโตของผลึกที่มีผลต่อคุณสมบัติต่างๆของผลึกภัณฑ์  
ที่มา : Research Interests (2011)

สำหรับผลิตภัณฑ์อาหารที่ต้องการการตกผลึกนั้น จะต้องมีการควบคุมกระบวนการตกผลึกให้ได้ลักษณะผลึกตามที่ต้องการ เช่น จำนวน ขนาดเฉลี่ยของผลึก ช่วงของขนาดผลึก รูปร่าง และรูปแบบของผลึกในระหว่างกระบวนการผลิตอาหาร ซึ่งจากภาพที่ 12 แสดงให้เห็นว่าสถานะกระบวนการตกผลึกมีผลต่อคุณสมบัติของผลึก สำหรับผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่จะมีผลึกขนาดเล็กเป็นจำนวนมากทำให้อาหารเนื้อสัมผัสเรียบเนียน แต่ถ้ามีผลึกขนาดใหญ่จำนวนน้อยจะมีเนื้อสัมผัสที่ขรุขระ ซึ่งจะสามารถสัมผัสลักษณะนี้ได้โดยเพดานปาก



ภาพที่ 12 อิทธิพลที่มีผลต่อคุณสมบัติของโครงสร้างตาข่ายผลึก

ที่มา : Marangoni และ คณะ (1999)

รูปแบบโครงสร้างผลึกของไขมันมีผลต่อลักษณะปรากฏของผลึกไขมัน ตัวอย่างเช่น ผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลต ซึ่งผลึกไขมันที่ดีจะทำให้เนื้อสัมผัสของช็อกโกแลตมีความเรียบเนียน และที่ผิวหน้าเป็นมันวาวเนื่องจากผลึกที่อยู่บนผิวหน้ามีขนาดเล็กมาก แต่ถ้ามีการโตของผลึกที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าจะทำให้ช็อกโกแลตไม่มีความมันวาว ถ้าเกิดการหลอมเหลวของไขมันบริเวณผิวหน้าของช็อกโกแลต และเกิดการไหลมารวมกันของไขมัน เมื่อเกิดการตกผลึกอีกครั้ง จะทำให้เห็นผลึกไขมันบริเวณผิวหน้าของช็อกโกแลต ลักษณะดังกล่าวเรียกว่า “fat bloom” (Lidefelt, 2007) ดังภาพที่ 13 การเกิด fat bloom สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า ซึ่งทำให้สีของช็อกโกแลตบริเวณผิวหน้าเปลี่ยนไป โดยมีลักษณะเป็นฝ้าสีขาว ซึ่งลักษณะปรากฏดังกล่าวไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค

Fat bloom



ภาพที่ 13 การเกิด fat bloom ของช็อกโกแลต

ที่มา: Lidefelt (2007)

การโตของผลึกสามารถทำได้ง่ายโดยใช้การหล่อผลึก รูปแบบโครงสร้างผลึกที่ไม่เสถียรจะเกิดการละลายและมีการตกผลึกซ้ำในรูปแบบผลึกที่เสถียรกว่าที่บริเวณผิวหน้าของผลึก พฤติกรรมการเกิดรูปแบบโครงสร้างผลึกของไขมันจะถูกกำหนดโดยไตรกลีเซอไรด์ ตารางที่ 6 แสดงลักษณะพฤติกรรมการเกิดรูปแบบโครงสร้างผลึกของไขมันชนิดต่างๆ

ตารางที่ 6 พฤติกรรมรูปแบบโครงสร้างผลึกของไขมันแต่ละชนิด

| รูปแบบโครงสร้าง $\alpha$ ที่เสถียร                                     | รูปแบบโครงสร้าง $\beta'$ ที่เสถียร                                           | รูปแบบโครงสร้าง $\beta$ ที่เสถียร                                                                                                    |
|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| — น้ำมันปาล์มและน้ำมันจากเมล็ดฝ้ายที่ผ่านการทำไฮโดรจิเนชันอย่างสมบูรณ์ | — ไขมันที่ใช้แทนเนยโกโก้<br>— เนยโกโก้<br>— เนยขาว<br>— มาการีน<br>— ไขมันนม | — ไตรสเตียรีน (tristearin)<br>— ไตรปาลมิติ (tripalmitin)<br>— ไตรกลีเซอไรด์ที่อิ่มตัว<br>— เนยโกโก้<br>— ไขมันที่เหมือนเนยโกโก้<br>— |

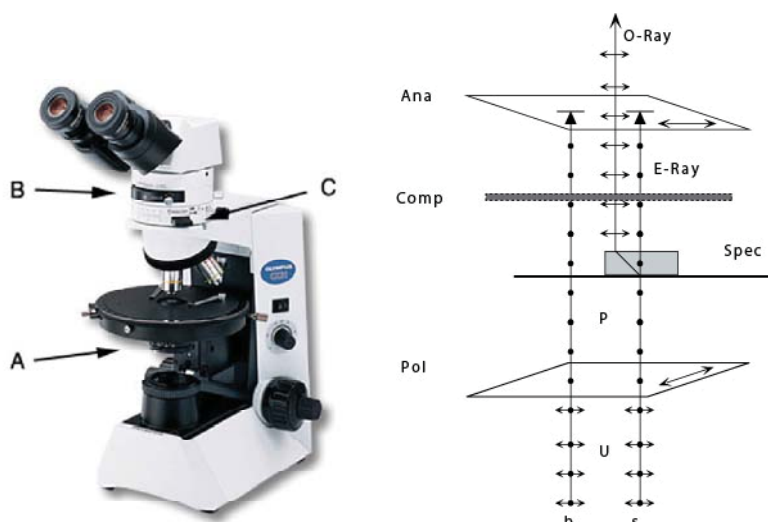
ที่มา: Lidefelt (2007)

#### 2.5.4 เทคนิคและวิธีการวิเคราะห์การตกผลึก

สำหรับการศึกษานี้พฤติกรรมของการตกผลึกของไขมันและน้ำมันสามารถทำได้หลายวิธีด้วย ซึ่งเทคนิคการวิเคราะห์ที่นิยมใช้กัน เช่น การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงความร้อนของวัตถุด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC), การวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) และการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของผลึกโดยใช้ภาพถ่ายจาก Polarized Light Microscopy (PLM) สำหรับในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เทคนิคในการวิเคราะห์ดังนี้

2.5.4.1 การใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงทิศทางเดียว (Polarized Light Microscopy) เป็นการประยุกต์ใช้กล้องจุลทรรศน์แบบให้ภาพพื้นดำ (dark field microscopy) โดยการตัดแสงจากแหล่งกำเนิดแสงให้ลำแสงที่ส่องผ่านวัตถุมีเพียงทิศทางเดียว ซึ่งจะให้ภาพของวัตถุบนพื้นสีดำ เป็นเทคนิคที่เพิ่มความคมชัดของการแสดงภาพ สามารถแยกความแตกต่างของภาพได้ดีกว่า และมีต้นทุนในการวิเคราะห์ต่ำ โดยการแสดงภาพวัตถุด้วยแสงซึ่งไม่ถูกรวบรวมโดยเลนส์วัตถุ ทำให้เห็นวัตถุที่มีความสว่างบนพื้นสีดำ ซึ่งภาพพื้นสีดำจะปรากฏในทิศทางตรงข้ามกับภาพพื้นขาว โดยภาพพื้นขาวแสงจากภายนอกที่เกี่ยวข้องจะทำให้เห็นเงาทอดลงบนผิวของวัตถุ หรือหากบางส่วนของพื้นผิวมีหลุมหรือรอยขีดข่วนจะทำให้การสะท้อนกลับของแสงต่ำลง ดังนั้นการที่ลักษณะพื้นผิวของวัตถุราบเรียบมากขึ้นจะทำให้เกิดเงาบนภาพพื้นขาว ในขณะที่ในภาพพื้นดำแสงจะสะท้อนออกจากด้านข้างของวัตถุที่มีความสว่าง (Wikipedia encyclopedia, 2011a)

การเดินของแสงและองค์ประกอบของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงทิศทางเดียวแบบพื้นดำแสดงดังภาพที่ 14 โดยประกอบไปด้วยส่วนของ Polarizer ที่ทำหน้าที่ในการทำให้แสงที่ทิศทางเดียว โดยแสงเมื่อออกจากแหล่งกำเนิดแสงจะเดินทางผ่านแผ่นตัดแสงซึ่งจะตัดแสงบางส่วนออกจากนั้นเลนส์รวมแสงจะรวบรวมแสงที่เหลือส่องผ่านวัตถุ โดยแสงเกือบทั้งหมดทะลุวัตถุ มีบางส่วนที่เกิดการสะท้อนของจากวัตถุ แสงที่สะท้อนจะผ่านเลนส์วัตถุ ขณะที่แสงส่องผ่านโดยตรงจะไม่ผ่านเลนส์วัตถุและไม่รวบรวม จึงมีเฉพาะแสงสะท้อนเท่านั้นที่ทำให้เกิดภาพ เพื่อแสดงวัตถุบนพื้นดำ แผ่นทึบแสงจะถูกลำไว้ได้เลนส์รวมแสงมีเพียงแสงที่สะท้อนเข้าตา แสงจะถูกสะท้อนโดยอนุภาคบนสไลด์แทนการส่องผ่าน ในกล้องจุลทรรศน์เชิงซ้อน แผ่นตัดแสง (occulting disk) จะถูกลำระหว่างแหล่งกำเนิดแสงและเลนส์รวมแสง โดยการปรับเพิ่มแสงจะช่วยให้เกิดผลที่ดีขึ้น และการหรี่ช่องกั้นแสงลงช่วยให้ภาพระหว่างวัตถุและพื้นหลังคมชัดขึ้น (Caprette, 2005)

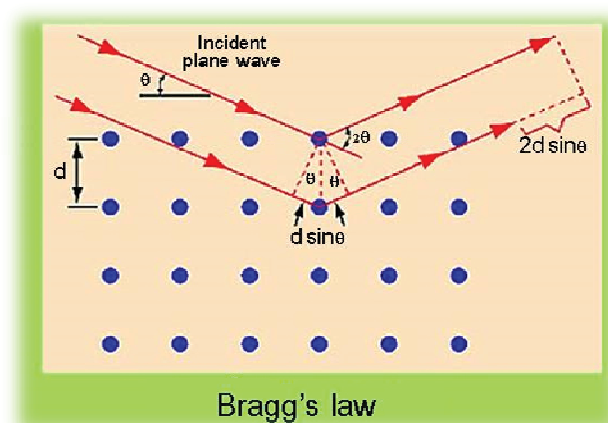


หมายเหตุ : A = Polarizer, B = Analyzer, C = Compensator

ภาพที่ 14 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงทิศทางเดียวและองค์ประกอบ

ที่มา : Microscopy Berkeley (2011)

2.5.4.2 เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer) ใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เมื่อผ่านชั้นต่างๆ ของอะตอมหรือโมเลกุลภายในวัสดุหรือสารตัวอย่างนั้น แล้วทำการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มุมต่างๆ โดยนำข้อมูลที่ได้ของสารตัวอย่างไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน จะทำให้รู้ถึงโครงสร้างผลึกของวัสดุหรือสารตัวอย่างนั้นๆ ได้ ซึ่งเทคนิคนี้ใช้ในการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยไม่ทำลายชิ้นงานตัวอย่าง (non-destructive method) โดยรังสีเอ็กซ์จะเลี้ยวเบนไปตามช่องว่างระหว่างอะตอมภายในผลึก ซึ่งวัสดุที่เป็นผลึกคือ วัสดุที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในโครงสร้างอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในผลึกจะมีลักษณะเป็นระนาบเส้นตรงขนานกัน ซึ่งแต่ละระนาบจะอยู่ห่างกันเป็นระยะ  $d$  (d-spacing) ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งค่าระยะห่าง  $d$  จะมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นกับธรรมชาติของผลึก ซึ่งในปี ค.ศ.1912 W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดที่ว่า เมื่อรังสีเอ็กซ์ตกกระทบบนระนาบของอะตอมภายในผลึกที่มุมตกกระทบ  $\theta$  รังสีเอ็กซ์บางส่วนจะเกิดการสะท้อนกลับ (เลี้ยวเบน) ที่มุมสะท้อน  $\theta$  เท่ากับมุมตกกระทบ ดังแสดงในภาพที่ 15 ซึ่งความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรต่างๆ ถูกเสนอในรูปของสมการ คือ  $2d \sin \theta = n\lambda$



ภาพที่ 15 กฎของ Bragg

ที่มา: ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (2554)

โครงสร้างของผลึกมีความสำคัญต่อคุณสมบัติของไขมันและน้ำมัน ดังนั้นการใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกจึงมีความจำเป็นที่จะนำมาใช้ประยุกต์ ซึ่งจะให้ X-ray long spacing จากการสังเกตค่ามุม  $2\theta$  เท่ากับ 1-15 องศา และ x-ray short spacing จากการสังเกตค่าตั้งแต่มุม 16-25 องศา (Gibon, 1986 และ Durant และคณะ, 1986 อ้างอิงใน Ghotra และคณะ, 2002) ค่า long spacing จะขึ้นอยู่กับความยาวของสายไฮโดรคาร์บอนและมุมจากการจัดเรียงตัวของกรดไขมันในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ ในขณะที่ short spacing จะไม่ขึ้นอยู่กับความยาวของสายไฮโดรคาร์บอน (Jacobsberg และ Ho, 1976 อ้างอิงใน Ghotra และคณะ, 2002) ซึ่งถูกใช้ในการอธิบายรูปแบบโครงสร้างของผลึก โดยระยะห่างระหว่างอะตอมในรูปแบบ X-ray short spacings ของผลึกรูปแบบต่างๆ ของเนยโกโก้และไขมัน โดยทั่วไปแสดงในตารางที่ 7 และ 8 ตามลำดับ

ตารางที่ 7 คุณสมบัติและค่า X-ray short spacings (d; Å) ของผลึกรูปแบบต่างๆของเนยโกโก้\*

| Polymorphic form                    | Short spacings (Å)                                                                                                                                                                                                                         |
|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\gamma$ (sub- $\alpha$ ), (form I) | 4.17(s), 3.87(m) c<br>4.72(s), 3.88(s) g                                                                                                                                                                                                   |
| $\alpha$ (form II)                  | 4.20(vs) c<br>4.15 e, f, g                                                                                                                                                                                                                 |
| $\beta'_2$ (form III)               | 4.20(vs), 3.87(vw) c                                                                                                                                                                                                                       |
| $\beta'_1$ (form IV)                | 4.32(s), 4.13(s), 3.75(m), 3.88(w) c                                                                                                                                                                                                       |
| $\beta_2$ (form V)                  | 4.58(vs), 3.98(s), 3.73(s), 3.65(s), 5.38(m), 5.13(w), 4.22(w), 3.87(w) a, c, g<br>4.60(vs), 5.43(m), 3.99(m), 3.76(m), 3.88(w), 3.68(w) b, g<br>4.54(vs), 3.95(s), 5.34(m), 3.84(m), 3.73(m), 3.64(w) g<br>4.58, 3.98, 3.86, 3.74, 3.67 d |
| $\beta_1$ (form VI)                 | 4.53(vs), 3.67(s), 5.37(m), 3.84(m), 4.01(w), 5.09(vw), 4.21(vw) c<br>4.59(vs), 3.70(s), 5.43(m), 3.86(m), 5.15(w), 4.04(w), 4.27(vw), 3.36(vw) g                                                                                          |

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

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

ตารางที่ 8 ค่า X-ray short spacings (d; Å) ของผลึกรูปแบบต่างๆของไขมัน\*

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

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

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

2.5.4.3 เทคนิคการหาปริมาณไขมันที่เป็นของแข็งด้วยเครื่อง pulsed-Nuclear Magnetic Resonance (p-NMR) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวัดปริมาณไขมันที่เป็นของแข็ง (solid fat content; SFC) จะรายงานค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ โดยเป็นตัวบ่งชี้ของช่วงพลาสติก (plastic range) ที่เป็นไปได้ของไขมันหรือไขมันผสม และมีการใช้ในการควบคุมความสม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์ โดยเทคนิค p-NMR จึงมีการใช้กันอย่างกว้างขวาง (Madison และ Hill, 1978)

การวิเคราะห์ SFC นั้นสามารถทำได้หลักๆ 2 แบบ คือ การหาค่า SCF ที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นช่วงของอุณหภูมิ) ซึ่งสามารถบอกได้ถึงพฤติกรรมการหลอมเหลว ส่วนการหาค่า SFC อีกแบบคือ การหาค่า SFC ที่อุณหภูมิตั้งแต่เวลาเปลี่ยนแปลงไป โดยเป็นการศึกษาพฤติกรรมการตกผลึกที่อุณหภูมิตั้งที่ ซึ่งสามารถอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าวได้โดยการใช้แบบจำลองของ Avrami (Avrami model)

ธรรมชาติของกระบวนการการตกผลึกถูกบังคับด้วยปัจจัย 2 อย่างคือ เทอร์โมไดนามิกส์และจลน์ศาสตร์ ซึ่งมีผลทำให้ยากต่อการควบคุมและมีความผันแปรที่สูง ปัจจัยอื่น เช่น ระดับสิ่งเจือปน รูปแบบการกวน รูปแบบของภาชนะ โครงร่างของการทำความเย็น และลักษณะของรูปร่างผลึกที่ผลิต ซึ่งการตกผลึกถูกควบคุมโดยปรากฏการณ์ทางจลน์ศาสตร์ 2 รูปแบบ คือ การเกิดนิวเคลียสและการโตของผลึก

แบบจำลองของ Avrami จะเป็นแบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับใช้อธิบายการตกผลึกที่อุณหภูมิตั้งที่ สัดส่วนของของแข็งสำหรับแต่ละเวลาระหว่างการเกิดการตกผลึกที่อุณหภูมิตั้งที่ (isothermal crystallization) ของไขมัน สมการของ Avrami คือ

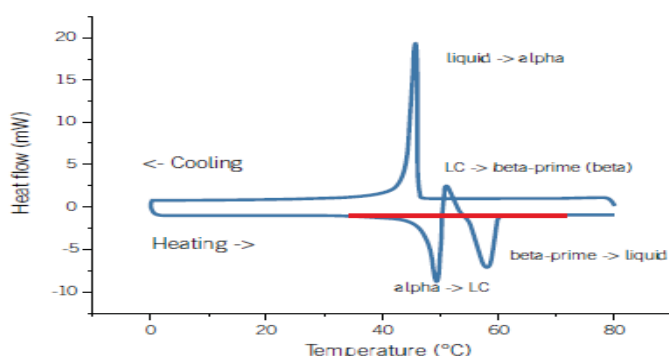
$$SFC_t = SFC_{\infty}(1 - e^{-kt^n}) \quad (1)$$

โดย  $SFC_t$  เป็นค่า SFC ที่เวลาต่างๆ  $SFC_{\infty}$  เป็นค่า SFC ที่มากที่สุดในตอนสุดท้ายของการวิเคราะห์ โดยที่ค่า  $k$  และ  $n$  เป็นค่าคงที่ที่เป็นอิสระจากเวลา (time-independence constant) แต่จะขึ้นอยู่กับระบบของการเกิดผลึก

การทดลองของ Avrami มีความสำคัญมาก โดยจะได้ค่า  $n$  ซึ่งจะบอกแนวโน้มของรูปร่างของนิวเคลียสผลึก อัตราการเกิดนิวเคลียส และการโตของรูปแบบผลึก ถ้าบริเวณที่เกิดนิวเคลียส มีการเกิดนิวเคลียสขึ้นอย่างรวดเร็ว ค่า  $n$  จะเท่ากับ 1 โดยนิวเคลียสไม่มีรูปแบบเป็นเข็มและการโตของผลึกจะเป็นไปในทิศทางเดียวเท่านั้น ถ้ามีการรวมตัวของโมเลกุลของนิวเคลียสใน 2 ทิศทาง ค่า  $n$  จะเท่ากับ 2 และถ้ามีการโตของนิวเคลียสใน 3 ทิศทาง ค่า  $n$  จะเท่ากับ 3 เมื่อมี

การเพิ่มบริเวณที่เกิดนิวเคลียสโดยการมีส่วนร่วมของรูปแบบของโมเลกุลที่แตกต่างกัน ด้วยเหตุนี้ทำให้พบนิวคลีโอแบบเดิมหลายๆ ครั้ง ทำให้ค่า  $n$  กลายเป็นตัวเลขที่กว้างมากขึ้น

2.5.4.4 เทคนิคการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุ (Differential Scanning Calorimetry; DSC) เป็นวิธีในการศึกษาพฤติกรรมการตกผลึกและการหลอมเหลวของไขมัน โดยอาศัยหลักการที่ว่า เมื่อใดที่วัสดุมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ หรือการเปลี่ยนแปลงเฟส หรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมี จะมีการดูดหรือคายความร้อน โดยสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างจะถูกวัดเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป โดยการวิเคราะห์ด้วยวิธี DSC จะวัดการดูดหรือคายความร้อน (พลังงาน) ในระหว่างการให้ความร้อนหรือการทำให้เย็น ข้อมูลที่ได้จะแสดงในรูปของเทอร์โมแกรมซึ่งพล็อตระหว่างอัตราของการดูดหรือคายพลังงาน หรืออุณหภูมิ กับเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป ดังภาพที่ 16 จะแสดงให้เห็นตัวอย่างของเทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DSC โดยข้อดีของเทคนิค DSC คือ พื้นที่ใต้พีค (peak) จะสัมพันธ์โดยตรงกับเอนทัลปี (enthalpy) หรือการเปลี่ยนแปลงความร้อนของตัวอย่าง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความจุความร้อน (heat capacity) ความร้อนของการหลอมเหลวหรือเอนทัลปีของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น (Lidefelt, 2007)



ภาพที่ 16 เทอร์โมแกรมจากการวิเคราะห์ไตรสเตียรีน (tristearine) ด้วยวิธี DSC

ที่มา: Lidefelt (2007)

โดยปกติแล้วจุดหลอมเหลวของไขมันจะบอกคุณสมบัติของไขมันชนิดนั้นได้น้อย ไขมันที่มีจุดหลอมเหลวเหมือนกันอาจจะมีความแตกต่างกันของลักษณะปรากฏที่อุณหภูมิห้อง เช่น ไขมันชนิดหนึ่งอาจจะเปราะ แตกง่าย แต่อีกชนิดอาจจะมียืดหยุ่นคล้ายพลาสติก คือ กิ่งแข็งกิ่งเหลว ซึ่งพฤติกรรมนี้เป็นผลมาจากโครงสร้างของปริมาณไขมันที่เป็นของแข็ง (solid fat content) ถ้าปริมาณไขมันที่เป็นของแข็งมีจำนวนมากเกินกว่า 50% ไขมันจะมีลักษณะเป็นของแข็งเปราะหรือแตกหักง่าย (Lidefelt, 2007)

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

##### 3.1.1 วัตถุดิบหลัก

##### 3.1.1.1 เมล็ดมะม่วง

จัดหาเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์ 4 สายพันธุ์ คือ พันธุ์เขียวมรกต ที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 110-120 วัน มีลักษณะที่ถึงสุกกิ่งดิบ (ห้าม) พันธุ์เขียวเสวยที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 105-110 วัน มีลักษณะที่ถึงสุกกิ่งดิบ (ห้าม) พันธุ์อกร่องที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 110-120 วัน มีลักษณะสุก จากร้านจำหน่ายผลไม้ จังหวัดนครปฐม และพันธุ์น้ำดอกไม้ ที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 110-120 วัน มีลักษณะสุก จากบริษัท ฟู้ดเอ็ดจ์ กั๋วเมท (ไทยแลนด์) จำกัด จังหวัดนนทบุรี โดยเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์ จะนำเมล็ดมาเป็นชุด ชุดละประมาณ 5-10 กิโลกรัม จำนวน 3 ชุด โดยให้แต่ละชุดจะรับมาระยะเวลาห่างกันไม่เกิน 1 เดือน และแต่ละชุดจะใช้เป็นซ้ำในการทดลอง และหลังจากได้เมล็ดมะม่วงแล้ว นำมาแกะเอาส่วนเปลือกแข็งออกให้เหลือแต่ส่วนเมล็ดภายในที่มีลักษณะเป็นสีขาวเรียกว่า เมล็ดในของมะม่วง (mango kernel หรือ mango seed almond) นำมาเก็บในถุงพลาสติกโพลีเอทิลีนและปิดปากถุงให้สนิท นำไปเก็บที่ตู้แช่เย็นที่อุณหภูมิ  $-5^{\circ}\text{C}$  เพื่อรอการนำไปสกัดน้ำมัน

##### 3.1.1.2 กรดไขมันมาตรฐาน จากบริษัท ซิกม่า จำกัด (Sigma Co.,Ltd.)

##### 3.1.1.3 ไตรกลีเซอไรด์มาตรฐาน จากบริษัท ซิกม่า จำกัด (Sigma Co.,Ltd.)

##### 3.1.2 สารเคมี

##### 3.1.2.1 เฮกเซน (Hexanes, Maillinckrodt chemical, UN 1208)

##### 3.1.2.2 ปีโตรเลียมอีเทอร์ (Petroleum ether, Maillinckrodt chemical, UN 1268)

##### 3.1.2.3 โพรพานอล (2-propanal, Merck, UN 1219)

##### 3.1.2.4 โทลูอิน (Toluene, Panreac quimica sua, UN 1294)

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

##### 3.1.2.6 เอ็น-เฮปเทน (n-Heptane $\geq 99.9\%$ assay, Ajax finechem, UN 1206)

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

##### 3.1.2.8 เอทานอล (Ethanol 95% (v/v)

3.1.2.9 โบรอนไตรฟลูออไรด์ในเมทานอล ความเข้มข้นประมาณ 1.3 โมลาร์ (Boron trifluoride ( $\sim 1.3$  M) in methanol, Fluka 15715)

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

3.1.2.11 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide  $\geq$  85% assay, Merck, UN 1813)

3.1.2.12 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide  $\geq$  99% assay, Merck, UN 1823)

3.1.2.13 โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride  $\geq$  99.5% assay, Merck)

3.1.2.14 โซเดียมไธโอซัลเฟต (Sodium thiosulphate  $\geq$  99.5% assay, Ajax finechem)

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

3.1.2.16 ไซโครเฮกเซน (Cyclohexane)

3.1.2.17 กรดอะซิติก (Acetic acid)

3.1.2.18 น้ำแข็ง

3.1.2.19 โพแทสเซียมไอโอไดด์ (Potassium iodide)

3.1.2.20 แอนไฮดรัส โซเดียมไดซัลเฟต (anhydrous Sodium sulphate  $\geq$  99% assay, Ajax finechem)

### 3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.3.1 ชุดสกัดน้ำมัน (Soxhlet)

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

3.1.3.3 อ่างน้ำ (water bath) ควบคุมอุณหภูมิได้

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

3.1.3.5 เครื่อง High Performance Liquid Chromatography- Diode Array Detector (HPLC, Shimadzu SPD- M20A)

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

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

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

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

3.1.3.10 เครื่อง X-ray Powder Diffractometer (XRD)

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

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

3.1.3.13 เครื่อง Brookfield รุ่น DVLVII+

3.1.3.14 เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) รุ่น DSC 8000 PerkinElmer

### 3.2 การสกัดน้ำมันมะเล็ดมะม่วง

ทำการสกัดน้ำมันจากเมล็ดมะม่วงโดยประยุกต์จากกรรมวิธีของ Solís-Fuentes และ Durán-de-Bazúa (2004) ดังนี้

3.2.1 นำเนื้อในเมล็ดมะม่วงแต่ละสายพันธุ์ไปทำการอบด้วยตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 65 °C จนกว่าจะมีความชื้นไม่เกิน 10%

3.2.2 นำเมล็ดที่อบแห้งแล้วมาบดให้ละเอียดและเก็บในถุง polyethylene ที่อุณหภูมิ 5 °C เพื่อรอการนำไปใช้

3.2.3 นำผงเมล็ดมะม่วงจากแต่ละสายพันธุ์ที่บดไว้มาสกัดน้ำมันด้วยวิธี Soxhlet extraction โดยใช้ตัวทำละลายเป็นเฮกเซน (n-Hexane) ด้วยอัตราส่วน 1:3 (ผงเมล็ดมะม่วง:เฮกเซน) ที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นกำจัดตัวทำละลายออกโดยใช้ rotary evaporator

3.2.4 นำน้ำมันที่สกัดได้ไปทำให้บริสุทธิ์โดยประยุกต์ตามกรรมวิธีของ Wesson method ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ก จากนั้นนำไปกรองที่อุณหภูมิ 65 °C ด้วยกระดาษกรอง (Whatman No.1 ขนาดของรูกรองเท่ากับ 11 µm) จำนวน 2 ชั้น เก็บในขวดสีชาที่อุณหภูมิ ~5 °C

3.2.5 หาปริมาณ (โดยน้ำหนัก) น้ำมันที่สกัดได้เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก) ของน้ำมันที่สกัดได้เทียบกับปริมาณของเมล็ดมะม่วงตั้งต้น

### 3.3 ชนิดและปริมาณของกรดไขมันและไตรกลีเซอไรด์ของน้ำมันเมล็ดมะม่วง

#### 3.3.1 ชนิดและปริมาณของกรดไขมันของน้ำมันเมล็ดมะม่วงที่สกัดได้

ทำการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของกรดไขมันของน้ำมันเมล็ดมะม่วงที่สกัดได้ด้วยเครื่อง GC-FID โดยใช้ Column VertiBond™ wax (stationary phase คือ 100% polyethyleneglycol ความยาว 50 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 มิลลิเมตร ความหนาของฟิล์ม 0.20 ไมโครเมตร) โดยปริมาณของกรดไขมันแต่ละชนิดที่วิเคราะห์ได้แสดงผลเป็นร้อยละของพื้นที่ใต้กราฟ เมื่อคิดเทียบให้ร้อยละของพื้นที่ใต้กราฟทั้งหมดเป็นร้อยละ 100 ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

3.3.1.1 เตรียมตัวอย่างเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (fatty acid methyl ester) ตามกรรมวิธีของ AOAC (2000) ดังแสดงในภาคผนวก ข

3.3.1.2 ใช้สภาวะในการวิเคราะห์ คือ อุณหภูมิ injector เท่ากับ 210°C อุณหภูมิ FID เท่ากับ 280°C อุณหภูมิ oven เริ่มต้นที่ 120°C คงไว้ 3 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิขึ้นด้วยอัตรา 10°C/min จนถึง 220°C คงไว้ 30 นาที และเพิ่มอุณหภูมิอีกครั้งด้วยอัตรา 5°C/min จนถึง 240°C คงไว้ 30 นาที ใช้ฮีเลียม (He) เป็น carrier gas

3.3.1.3 วิเคราะห์ค่า retention time ของเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันมาตรฐานซึ่งใช้เป็น external standard ในการวิเคราะห์ชนิดของกรดไขมันที่พบในน้ำมันเมล็ดมะม่วงแต่ละสายพันธุ์ โดยใช้กรดไขมันมาตรฐาน ได้แก่ กรดลอริก (Lauric acid; C12:0) กรดไมริสติก (Myristic acid; C14:0) กรดปาล์มมิติก (Palmitic acid; C16:0) กรดสเตียริก (Stearic acid; C18:0) กรดโอเลอิก (Oleic acid; C18:1) กรดลิโนเลอิก (Linoleic acid; C18:2) กรดลิโนเลนิก (Linolenic acid; C18:3) กรดอาราคิดิก (Arachidic acid; C20:0) กรดบีฮีนิก (Behenic acid; C22:0) กรดลิกโนเชริก (Lignoceric acid; C24:0) ตามสภาวะในข้อ 3.3.1.2

3.3.1.4 หาค่าประกอบและปริมาณเป็นร้อยละของพื้นที่ใต้กราฟของกรดไขมันที่เตรียมเป็นเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันตามข้อ 3.3.1.1 โดยเปรียบเทียบค่า retention time กับเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันมาตรฐานในข้อ 3.3.1.3

#### 3.3.2 ชนิดและปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันเมล็ดมะม่วงที่สกัดได้

ทำการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันเมล็ดมะม่วงด้วย HPLC-DAD โดยประยุกต์ใช้ตามกรรมวิธีของ Buchgraber และคณะ (2004) โดยใช้ Column เป็นแบบ reverse phase Inertsil® ODS-3 (5 ไมโครเมตร ขนาด 4.6 x 250 มิลลิเมตร จำนวน 2 column) Mobile phase คือ acetone : acetonitrile (75:25) diode array detector มีความยาวคลื่นเท่ากับ 210 นาโนเมตร Flow rate 0.75 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิคอลัมน์ที่ใช้เท่ากับ 30°C Injection volume 20

ไมโครลิตร โดยใช้ความเข้มข้นของตัวอย่างเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อมิลลิตร ซึ่งอยู่ละลายใน acetone ทำการวิเคราะห์โดยเทียบค่า retention time กับไตรกลีเซอไรด์มาตรฐาน โดยปริมาณของ ไตรกลีเซอไรด์แต่ละชนิดที่วิเคราะห์จะแสดงผลเป็นร้อยละของพื้นที่ใต้กราฟ เมื่อคิดเทียบให้ร้อยละของพื้นที่ใต้กราฟทั้งหมดเป็นร้อยละ 100

### 3.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันเมล็ดมะม่วง

ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันเมล็ดมะม่วง 4 สายพันธุ์ โดยศึกษาคุณสมบัติต่างๆ โดยมีวิธีการและขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

3.4.1 วิเคราะห์ค่าสaponification value (Spv) ตามกรรมวิธีของ PORIM test method no. p3.1 (1995) ดังแสดงในภาคผนวก ค โดยกลีเซอไรด์ทั้งหมดจะถูกไฮโดรไลซ์เป็น กรดไขมันและกลีเซอรอลด้วยแอลกอฮอล์อัลคาไลน์ (alcoholic alkali; KOH in ethanol) และกรดไขมันอิสระจะถูกทำให้เป็นกลางและเกิดสบู่ จากนั้นอัลคาไลน์ส่วนเกินจะถูกไทเทรตกลับด้วย สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) โดยใช้ 1% ฟีนอล์ฟทาไลน์เป็นอินดิเคเตอร์ แล้วคำนวณค่า Spv ตามสมการดังนี้

$$Spv = \frac{(B - A)}{W} \times N \times 56.1$$

เมื่อ  $A$  = ปริมาณของ 0.5 N HCl ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่าง (ml)

$B$  = ปริมาณของ 0.5 N HCl ที่ใช้ในการไทเทรต Blank (ml)

$W$  = น้ำหนักของตัวอย่าง (g)

$N$  = ความเข้มข้นของ HCl (N)

56.1 = น้ำหนักโมเลกุลของ KOH

Saponification Value หน่วยเป็น mg/g KOH

3.4.2 วิเคราะห์ค่าไอโอดีน (Iodine value; Iv) ตามกรรมวิธีของ AOCS Recommended Practice Cd 1b -87 (1997) ดังแสดงในภาคผนวก ง

3.4.3 วิเคราะห์ค่าความเป็นกรด (Acid value; A.V.) โดยประยุกต์ตามวิธีของ AOCS (1989) ดังแสดงในภาคผนวก จ โดยกรดไขมันอิสระจะถูกทำให้เป็นกลางหรือทำให้เกิดสบู่ด้วยการ ไทเทรตกับสารละลายมาตรฐาน 0.1 N โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยใช้ 1% ฟีนอล์ฟทาไลน์เป็น อินดิเคเตอร์ แล้วคำนวณค่า A.V. ตามสมการดังนี้

$$Acid \ Value = \frac{V \times 5.61}{W}$$

เมื่อ  $V$  = ปริมาณของ 0.1 M KOH ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่าง (ml)

$W =$  น้ำหนักของตัวอย่าง (g)

1 ml ของ 0.1 M KOH = 5.61 mg KOH

3.4.4 วิเคราะห์ค่าความหนืด (viscosity) โดยเครื่อง Brookfield ที่อุณหภูมิตัวอย่าง 30°C ด้วยความเร็ว 50 rpm ด้วยหัววัดชนิด S34 โดยนำน้ำมันตัวอย่างมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60°C นาน 10 นาที จากนั้นลดอุณหภูมิจนถึง 30°C โดยการปล่อยให้เย็นลงตามสภาวะปกติ

3.4.5 วิเคราะห์ค่าสี (color) โดยใช้ Colormeter Color-view™ Spectrophotometer Model:9000 D65 ซึ่งจะวัดค่า L\*, a\* และ b\* โดยวัดตัวอย่างที่อุณหภูมิของตัวอย่าง 20°C ทำได้โดยนำน้ำมันตัวอย่างไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60°C นาน 10 นาที จากนั้นเทใส่ plate ที่มีพื้นราบเรียบ โดยเทให้น้ำมันมีความสูงประมาณ 5 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปเก็บในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 20°C นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาวัดค่าสี และการวัดตัวอย่างที่อุณหภูมิตัวอย่าง 30°C ทำได้โดยโดยนำน้ำมันตัวอย่างมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60°C นาน 10 นาที จากนั้นลดอุณหภูมิจนถึง 30°C โดยการปล่อยให้เย็นลงตามสภาวะปกติ จากนั้นนำมาวัดค่าสี

3.4.6 วิเคราะห์จุดหลอมเหลวแบบ slip melting point ตามกรรมวิธีของ PORIM test method no. p4.2, 1995 ดังแสดงในภาคผนวก จ

3.4.7 วิเคราะห์ปริมาณไขมันที่เป็นของแข็ง (% solid fat content; SFC) และพฤติกรรม การหลอมเหลวด้วยเครื่อง pulsed-Nuclear Magnetic Resonance (p-NMR) ประยุกต์ตามวิธีของ AOCS: direct method (2000) ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 15-40°C ด้วยกรรมวิธีดังแสดงในภาคผนวก ข ซึ่งจะ ได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง SFC (%; แกน y) กับอุณหภูมิ (°C; แกน x)

3.4.8 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของการตกผลึกและการหลอมเหลวของน้ำมัน จากมะม่วงแต่ละสายพันธุ์ที่สกัดได้ โดยใช้เครื่อง differential scanning calorimeter (DSC) รุ่น DSC 8000 PerkinElmer ตามกรรมวิธีของ AOCS (2000) ด้วยกรรมวิธีดังแสดงในภาคผนวก ข

### 3.5 การศึกษาพฤติกรรมการตกผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วง

3.5.1 ศึกษารูปร่างผลึก การเปลี่ยนแปลงรูปร่างผลึก จำนวนและขนาดเฉลี่ยของผลึกตาม เวลาโดยใช้เครื่อง Polarized Light Microscopy (PLM) ร่วมกับกล้องถ่ายภาพดิจิทัลและ กำลังขยายของเลนส์วัตถุเท่ากับ 40x

ในขั้นตอนแรกของการทดลองจะมีการให้ความร้อนกับน้ำมันเมล็ดมะม่วงที่ อุณหภูมิ 60°C นาน 10 นาที เพื่อทำลายโครงสร้างผลึกส่วนที่เป็นของแข็ง (memory effect) ให้หมด ไป จากนั้นลดอุณหภูมิลงมาเพื่อให้เกิดการตกผลึกที่อุณหภูมิ 20°C ในสภาวะนิ่ง (ไม่มีการปั่นกวน) โดยเก็บในตู้บ่มที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ เริ่มจับเวลาและให้เวลาที่ใช้ในการตกผลึกเป็นเวลา 2

ชั่วโมง โดยจะถ่ายภาพที่อุณหภูมิ 20°C ทุกๆ 5 นาที จนถึงนาทีที่ 60 จากนั้นถ่ายภาพทุกๆ 10 นาที จนครบ 120 นาที ทั้งในระหว่างการทดลองต้องมีการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตลอดเวลา ( $\pm 0.2^\circ\text{C}$ ) เพื่อไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของรูปร่าง จำนวนและขนาดของผลึก นำภาพที่ได้มาประมวลผลด้วยโปรแกรม Adobe® Photoshop เพื่อนับจำนวนและวัดขนาดเฉลี่ยของผลึก

นอกจากนี้ยังศึกษารูปร่างผลึก จำนวนและขนาดเฉลี่ยของผลึกเมื่อเก็บตัวอย่างไว้ในตู้บ่มที่อุณหภูมิ 20 และ 25°C หลังจากบ่ม 24 และ 48 ชั่วโมง (ทั้ง 2 อุณหภูมิ) นำมาส่องดูผลึกด้วย PLM ร่วมกับกล้องถ่ายภาพดิจิทัลและกำลังขยายของเลนส์วัตถุเท่ากับ x4 นำภาพที่ได้มาประมวลผลด้วยโปรแกรม Adobe® Photoshop เพื่อนับจำนวนและวัดขนาดเฉลี่ยของผลึก

3.5.2 ศึกษากระบวนการตกผลึกและการเปลี่ยนแปลงของระดับการตกผลึกตามเวลา โดยใช้เครื่อง p-NMR ประยุกต์ใช้กรรมวิธีของ AOCS (2000) เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงของปริมาณไขมันที่เป็นของแข็ง (Solid Fat Content; SFC) ที่อุณหภูมิ 20°C ตลอดระยะเวลา 2 ชั่วโมง เตรียมตัวอย่างน้ำมันใส่หลอดโดยให้ความร้อนกับตัวอย่างเพื่อให้เกิดหลอมเหลว ( $\sim 60^\circ\text{C}$ ) จากนั้นบรรจุตัวอย่างขณะเหลวลงหลอด p-NMR (เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร) สูงประมาณ 4 เซนติเมตร จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำไปใส่ในเครื่อง p-NMR ที่มีการควบคุมอุณหภูมิของช่องใส่ตัวอย่างให้มีอุณหภูมิ 20°C เริ่มจับเวลาและทำการวัดค่า SFC ที่เวลาต่างๆ โดยวัดค่า SFC ทุกๆ 1 นาที สำหรับ 20 นาทีแรก จากนั้นวัดทุกๆ 2 นาที จนครบ 2 ชั่วโมง เพื่อศึกษาระยะเวลาก่อนการเริ่มตกผลึก ความเร็วในการตกผลึกและระดับการตกผลึกสูงสุดจากค่า SFC ที่วัดได้ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงแต่ละสายพันธุ์ โดยการสร้าง crystallization curve ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า %SCF (แกน y) กับเวลา (แกน x)

3.5.3 ศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกและการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกตามเวลาโดยใช้เครื่อง XRD โดยเก็บข้อมูลในช่วง  $2\theta$  เท่ากับ 18-26 องศา (step width เท่ากับ 0.02 องศา อัตราเร็วเท่ากับ 4.5 องศา/นาที) ทำการติดตามการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกโดยให้ความร้อนกับน้ำมันที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นลดอุณหภูมิลงและคงไว้ที่อุณหภูมิ 20°C ทำการวิเคราะห์จนครบ 2 ชั่วโมง แล้วคำนวณค่า d-short spacing จากสมการแบรกก์ (1) ซึ่งมีค่าความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) ที่ใช้ในการคำนวณค่า d-short spacing เท่ากับ 1.5418 Å (Cu/K-alpha)

$$2d \sin \theta = n \lambda \quad (2)$$

### 3.6 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

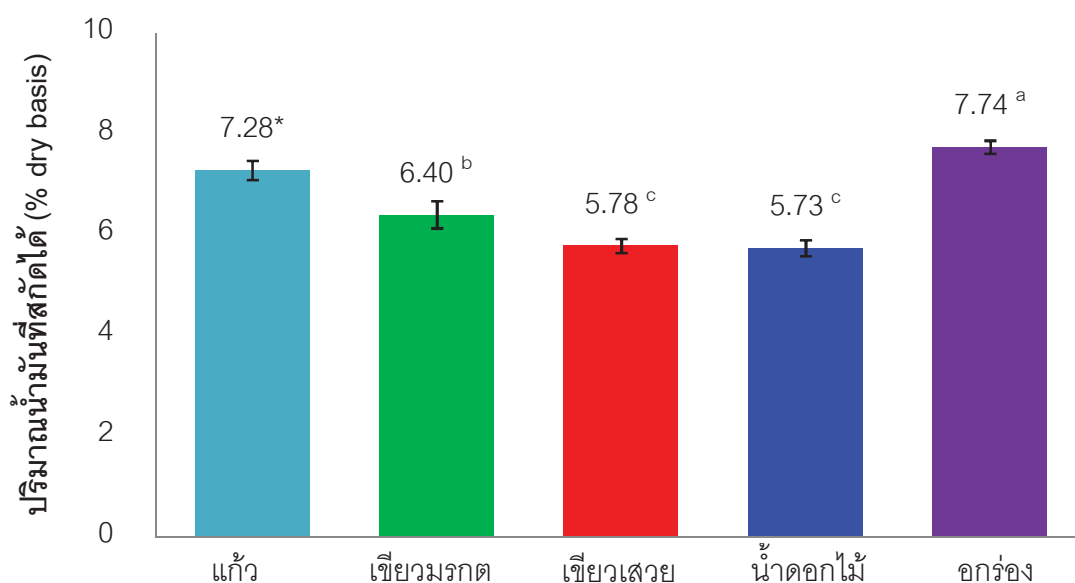
การวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติแบบ Least Significant Difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $\alpha = 0.05$ ) โดยจำนวนซ้ำเท่ากับ 3

## บทที่ 4

### ผลและวิจารณ์ผลการดำเนินงานวิจัย

#### 4.1 การสกัดน้ำมันเมล็ดมะม่วง

เมื่อทำการสกัดน้ำมันจากเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์ คือ พันธุ์เขียวมรกต พันธุ์เขียวเสวย พันธุ์น้ำดอกไม้ และพันธุ์กร่อง ด้วยชุดสกัด Soxhlet ตามกรรมวิธีของ Solís-Fuentes และ Durán-de-Bazúa (2004) แล้วพบว่าเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์กร่องมีปริมาณน้ำมันที่สกัดได้มากที่สุด เฉลี่ยประมาณ  $7.74 \pm 0.14\%$  (น้ำหนักแห้ง) รองลงมาเป็นพันธุ์เขียวมรกต ( $6.40 \pm 0.27\%$ ) พันธุ์เขียวเสวย ( $5.78 \pm 0.14\%$ ) และพันธุ์น้ำดอกไม้ ( $5.73 \pm 0.16\%$ ) 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) ได้ทำการสกัดน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์มะนิลาพบว่ามีความเฉลี่ยโดยน้ำหนักแห้ง 5.28-11.26% เมล็ดมะม่วงสายพันธุ์ในประเทศปากีสถานมีปริมาณน้ำมันเฉลี่ยประมาณ 10.01% (น้ำหนักแห้ง) (Anwer และคณะ, 2006) และเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์ที่พบในเมืองกวารา ประเทศไนจีเรีย มีปริมาณน้ำมันที่สกัดได้เฉลี่ย  $13.511 \pm 3.567\%$  (น้ำหนักแห้ง) (Afolabi, 2008) นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณน้ำมันที่สกัดได้ของสายพันธุ์แก้ว ซึ่งเป็นสายพันธุ์ที่มีการปลูกมากที่สุดในประเทศไทยนั้น (พิมพ์นิภา, 2552) พบว่ามีปริมาณใกล้เคียงกันกับปริมาณน้ำมันที่สกัดได้ ( $7.28 \pm 0.19\%$ ) โดยเฉพาะสายพันธุ์กร่องซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด



ภาพที่ 17 แผนภูมิแสดงปริมาณน้ำมันที่สกัดได้ (% น้ำหนักแห้ง) ของเมล็ดมะม่วง 4 สายพันธุ์เปรียบเทียบกับสายพันธุ์แก้ว

หมายเหตุ \* จากงานวิจัยของ พิมพนิภา กาเผือกงาม (2552)

<sup>a-c</sup> หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่มีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

#### 4.2 ชนิดและปริมาณของกรดไขมันและไตรกลีเซอไรด์ของน้ำมันเมล็ดมะม่วง

##### 4.2.1 ชนิดและปริมาณของกรดไขมันของน้ำมันเมล็ดมะม่วงที่สกัดได้

การวิเคราะห์ชนิดและปริมาณกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันเมล็ดมะม่วงในแต่ละสายพันธุ์ ด้วยเครื่อง GC-FID โดยเปรียบเทียบค่า retention time ของกรดไขมันตัวอย่างกับของกรดไขมันมาตรฐานเพื่อเป็นการยืนยันชนิดของกรดไขมัน โดยโครมาโตแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ฅ จากนั้นวิเคราะห์หาปริมาณของกรดไขมันแต่ละชนิดโดยพิจารณาจากร้อยละของพื้นที่ใต้กราฟของกรดไขมัน ซึ่งจากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า น้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์มีกรดโอเลอิกมากที่สุด โดยพบในน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อกร่องมากที่สุด ส่วนกรดไขมันที่พบรองลงมาในทั้ง 4 สายพันธุ์ คือ กรดสเตียริก ซึ่งพบมากที่สุดในน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้ม ดังจะเห็นได้ในตารางที่ 9 ซึ่งจากผลการวิเคราะห์กรดไขมันจะสอดคล้องกับการศึกษาของ Solís-Fuentes และ Durán-de-Bazúa (2004) ในน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์มะนิลาซึ่งพบว่ากรดไขมันที่พบมากที่สุดคือ กรดสเตียริกและกรดโอเลอิก โดยปริมาณกรดไขมันที่

พบในน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์นั้น มีค่าอยู่ในช่วงของรายงานการวิจัยหลายๆ งาน ซึ่งพบว่า มีกรดโอเลอิกเท่ากับ 43.7-54.5%, กรดสเตียริก 32.4-44.0%, กรดปาล์มติก 5.9-9.1% และ กรดลิโนเลอิก 3.6-6.7% กรดไขมันที่พบเล็กน้อย ได้แก่ กรดไมริสติก 0.7-8.0%, กรดอรากิดิก 0.1-6.7%, กรดลิโนเลนิก 0.64%, กรดปีฮีนิก 0.64%, กรดลิกโนเซอิก 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 สายพันธุ์ 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                   | น้ำตาลอกไม้                 |
| กรดลอริก (C12)           | 0.011 ± 0.001                                          | 0.042 ± 0.007 <sup>b</sup>  | 0.022 ± 0.008 <sup>c</sup>  | 0.031 ± 0.040 <sup>c</sup>  |
| กรดไมริสติก (C14)        | 0.033 ± 0.001                                          | 0.062 ± 0.012 <sup>b</sup>  | 0.069 ± 0.005 <sup>b</sup>  | 0.072 ± 0.003 <sup>b</sup>  |
| กรดปาล์มมิก (C16)        | 5.387 ± 0.026                                          | 6.235 ± 0.214 <sup>c</sup>  | 7.409 ± 0.039 <sup>b</sup>  | 7.381 ± 0.146 <sup>b</sup>  |
| กรดสเตียริก (C18)        | 46.551 ± 0.090                                         | 37.383 ± 0.174 <sup>c</sup> | 39.635 ± 0.201 <sup>b</sup> | 41.404 ± 0.240 <sup>a</sup> |
| กรดโอเลอิก (C18:1)       | 41.094 ± 0.088                                         | 45.717 ± 0.043 <sup>b</sup> | 44.159 ± 0.116 <sup>c</sup> | 42.850 ± 0.231 <sup>d</sup> |
| กรดลิโนเลอิก (C18:2)     | 3.779 ± 0.010                                          | 5.885 ± 0.024 <sup>a</sup>  | 4.181 ± 0.008 <sup>c</sup>  | 4.255 ± 0.068 <sup>c</sup>  |
| กรดลิโนเลนิก (C18:3)     | 0.508 ± 0.003                                          | 0.546 ± 0.007 <sup>a</sup>  | 0.448 ± 0.003 <sup>b</sup>  | 0.394 ± 0.008 <sup>d</sup>  |
| กรดอราคิก (C20)          | 1.699 ± 0.008                                          | 1.674 ± 0.038 <sup>a</sup>  | 1.565 ± 0.015 <sup>b</sup>  | 1.396 ± 0.017 <sup>c</sup>  |
| กรดบีฮีนิก (C22)         | 0.351 ± 0.029                                          | 0.324 ± 0.014 <sup>a</sup>  | 0.294 ± 0.012 <sup>b</sup>  | 0.249 ± 0.004 <sup>c</sup>  |
| กรดลิกโนเซริก (C24)      | 0.351 ± 0.029                                          | 0.392 ± 0.008 <sup>a</sup>  | 0.400 ± 0.057 <sup>a</sup>  | 0.231 ± 0.012 <sup>b</sup>  |
| อื่นๆ                    | 0.544 ± 0.132                                          | 1.740 ± 0.126 <sup>ab</sup> | 1.818 ± 0.181 <sup>a</sup>  | 1.737 ± 0.152 <sup>ab</sup> |
| กรดไขมันอิ่มตัว (รวม)    | 54.383                                                 | 46.112 ± 0.101 <sup>d</sup> | 49.394 ± 0.215 <sup>b</sup> | 50.763 ± 0.383 <sup>a</sup> |
| กรดไขมันไม่อิ่มตัว (รวม) | 45.381                                                 | 52.166 ± 0.039 <sup>a</sup> | 48.788 ± 0.116 <sup>c</sup> | 47.500 ± 0.283 <sup>d</sup> |

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

\* จากงานวิจัยของ พิมพ์ภา กาเผือกงาม (2552), <sup>a-d</sup> หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแถวเดียวกันที่มีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

#### 4.2.2 ชนิดและปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันเมล็ดมะม่วงที่สกัดได้

จากการวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันเมล็ดมะม่วงแต่ละสายพันธุ์ด้วยเครื่อง HPLC-DAD โดยเปรียบเทียบค่า retention time ของไตรกลีเซอไรด์ตัวอย่างกับไตรกลีเซอไรด์มาตรฐานเพื่อเป็นการยืนยันชนิดของไตรกลีเซอไรด์ โดยโครมาโตแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ได้แสดงในภาคผนวก ก จากนั้นวิเคราะห์หาปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ โดยพิจารณาจากร้อยละของพื้นที่ใต้กราฟของไตรกลีเซอไรด์ที่พบในน้ำมันเมล็ดมะม่วงแต่ละสายพันธุ์ โดยร้อยละของปริมาณไตรกลีเซอไรด์ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงแต่ละสายพันธุ์ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก โดยเฉพาะร้อยละของปริมาณไตรกลีเซอไรด์ที่พบในปริมาณมากในน้ำมันเมล็ดมะม่วง 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 <sup>a</sup>      | 6.39±0.07 <sup>d</sup> | 15.85±0.26 <sup>b</sup> | 3.68±0.05 <sup>c</sup> | 12.45±0.12 <sup>d</sup> | 48.62±0.82 |
| เขียวเสวย | 9.93±0.03 <sup>c</sup>       | 8.99±0.02 <sup>b</sup> | 14.09±0.14 <sup>c</sup> | 5.86±0.06 <sup>a</sup> | 16.55±0.11 <sup>a</sup> | 44.57±0.33 |
| น้ำดอกไม้ | 10.79±0.20 <sup>b</sup>      | 9.29±0.14 <sup>a</sup> | 14.28±0.17 <sup>c</sup> | 5.65±0.10 <sup>b</sup> | 15.64±0.08 <sup>b</sup> | 44.34±0.31 |
| อกร่อง    | 10.05±0.11 <sup>c</sup>      | 7.58±0.03 <sup>c</sup> | 17.69±0.22 <sup>a</sup> | 5.56±0.05 <sup>b</sup> | 14.25±0.14 <sup>c</sup> | 44.86±0.10 |

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

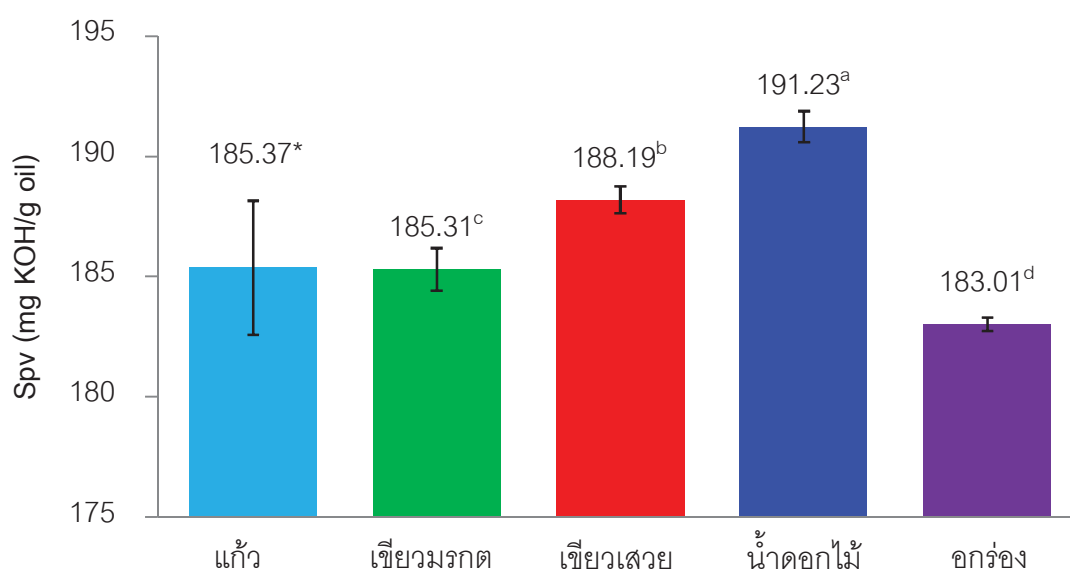
<sup>a-d</sup> หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแถวเดียวกันที่มีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

จากตารางที่ 10 จะเห็นว่าน้ำมันจากเมล็ดมะม่วงแต่ละสายพันธุ์มีปริมาณไตรกลีเซอไรด์หลักทั้ง 5 ชนิดที่ต่างกัน โดยไตรกลีเซอไรด์ชนิด SOS พบมากที่สุดในน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวเสวย รองลงมาคือเป็น น้ำดอกไม้ อกร่อง และเขียวมรกต ตามลำดับ ไตรกลีเซอไรด์ชนิด SOO พบมากที่สุดในน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อกร่อง รองลงมาคือเป็น เขียวมรกต น้ำดอกไม้ และเขียวเสวย ตามลำดับ โดยมีการรายงานของ Liddefelt (2007) ว่ามีการพบไตรกลีเซอไรด์ชนิด SOS ในน้ำมันเมล็ดมะม่วงในปริมาณมากที่สุด (40%) รองลงมาเป็น SOO (23%) และ

POS (10%) ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีรายงานการศึกษาของ Lakshminarayana และคณะ (1983) พบว่าเมล็ดมะม่วงที่พบในประเทศอินเดียกว่า 43 สายพันธุ์ มีไตรกลีเซอไรด์ชนิด SOS และ POS ในปริมาณที่มาก โดยชนิดและปริมาณไตรกลีเซอไรด์ที่แตกต่างกันมีผลทำให้น้ำมันเมล็ดมะม่วงแต่ละสายพันธุ์มีความแตกต่างกันในด้านคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ โดยจากรายงานของ Takeuchi และคณะ (2002) กล่าวว่า SOS เป็นไตรกลีเซอไรด์ที่มีโครงสร้างผลึก 5 รูปแบบ คือ  $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $\beta'$ ,  $\beta_2$  และ  $\beta_1$  โดยโครงสร้างที่เสถียรที่สุดคือ  $\beta$  ซึ่งมีช่วงอุณหภูมิในการหลอมเหลวคือ 41-43°C จึงทำให้น้ำมันหรือน้ำมันที่มี SOS เป็นองค์ประกอบมีจุดหลอมเหลวที่สูง ตัวอย่างเช่นในเนยโกโก้ ซึ่งทำให้สามารถแข็งตัวได้และไม่หลอมละลายที่อุณหภูมิห้อง

#### 4.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของน้ำมันเมล็ดมะม่วง

4.3.1 ค่าสaponification value (Spv) คือ จำนวนน้ำหนักของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นมิลลิกรัม ที่ใช้ในการไฮโดรไลซิสด้วยด่าง ไขมันหรือน้ำมันจำนวน 1 กรัม เป็นตัวบ่งชี้ให้ทราบขนาดและน้ำหนักโมเลกุลของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในไตรกลีเซอไรด์ที่มีอยู่ในไขมันหรือน้ำมัน หากกรดไขมันมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะมีค่า Spv สูง



ภาพที่ 18 แผนภูมิแสดงค่าสaponification value ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์

หมายเหตุ \* จากงานวิจัยของ พิมพ์นิภา กาเผือกงาม (2552)

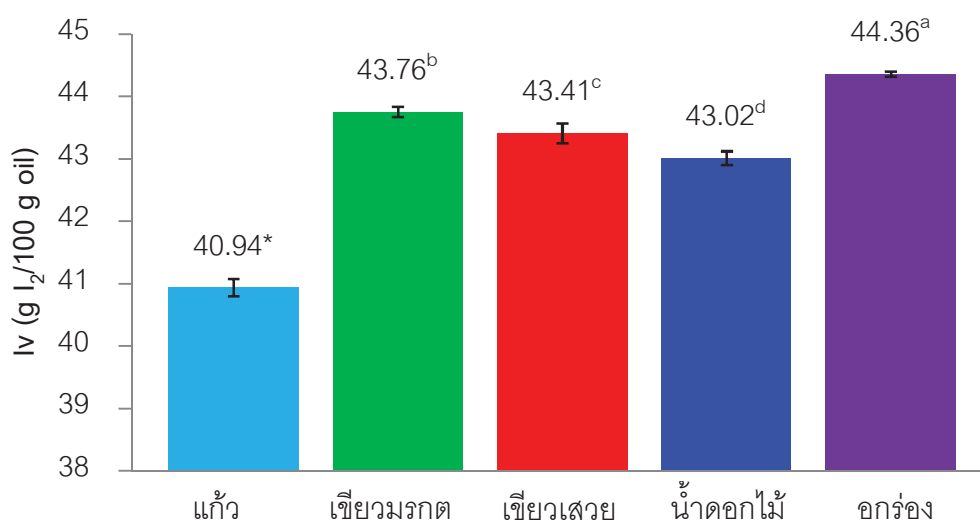
<sup>a-d</sup> หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่มีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

จากผลการวิเคราะห์ดังแสดงในภาพที่ 18 แสดงให้เห็นว่า ค่า Spv ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงแต่ละสายพันธุ์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) โดยค่า Spv ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้มิมีค่าสูงสุด คือ  $191.23 \pm 0.65$  mg KOH/g oil ส่วนน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์กร่องมีค่า Spv ต่ำสุดคือ  $183.01 \pm 0.28$  mg KOH/g oil ซึ่งจากรายงานการวิจัยของพิมพ์นิภา (2552) พบว่าค่า Spv ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์แก้วมีค่าประมาณ  $185.37 \pm 2.79$  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 โดยน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้มิมีค่า Spv สูงนั้น พบว่ามีกรดไขมันชนิดกรดสเตียริกมากที่สุด ( $41.404 \pm 0.240\%$ ) โดยเป็นกรดไขมันสายยาวที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมถึง 18 ตัว ซึ่งปริมาณของกรดสเตียริกที่พบในปริมาณที่สูงนี้น่าจะมีผลต่อค่า Spv ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงแต่ละสายพันธุ์มากที่สุด

4.3.2 ค่าไอโอดีน (Iodine value; Iv) หรือกรัมของไอโอดีนที่ถูกดูดซับ ณ ตำแหน่งพันธะคู่ของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวต่อ 100 กรัมของไขมัน เป็นดัชนีบ่งบอกความไม่อิ่มตัวของน้ำมัน โดยค่าไอโอดีนสูงหมายถึงไขมันหรือน้ำมันมีความไม่อิ่มตัวสูง จากผลการวิเคราะห์ที่แสดงในภาพที่ 19 จะเห็นว่า ค่าไอโอดีนของน้ำมันเมล็ดมะม่วงแต่ละสายพันธุ์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) โดยค่าไอโอดีนของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์กร่องมีค่าสูงสุดคือ  $44.36 \pm 0.04$  g I<sub>2</sub>/100 g oil โดยที่ค่าไอโอดีนของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้มิมีค่าต่ำสุดคือ  $43.02 \pm 0.11$  g I<sub>2</sub>/100 g oil จากรายงานของ Knothe (2002) กล่าวว่า กรดไขมันอิสระ (free fatty acid) จะให้ค่า Iv สูงสุด เมื่อเทียบกับไตรกลีเซอไรด์และเมทิลเอสเทอร์ ซึ่งสอดคล้องกับค่า A.V. ที่วิเคราะห์ที่ได้ โดยกร่องมีค่า A.V. สูงสุดและมีค่า Iv สูงสุด เช่นกัน รองลงมาเป็น เชียวมรกต เชียวเสวย และน้ำดอกไม้มิ 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 โดยจากเหตุผล

ข้างต้นที่ว่าปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวมีผลต่อค่า Iv จึงทำให้สายพันธุ์กรร่งที่มีปริมาณกรดโอเลอิกสูงสุดมีค่า Iv สูงสุด รองลงมาเป็นเขียวมรกต เขียวเสวย น้ำดอกไม้ ตามลำดับ

ความไม่อิ่มตัวของไขมันจะสัมพันธ์โดยตรงกับจำนวนพันธะคู่ที่มีอยู่ใน โมเลกุลของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของไตรกลีเซอไรด์ หากระดับความไม่อิ่มตัวสูงแสดงว่าไขมันหรือน้ำมันนั้นมีจำนวนพันธะคู่สูง ดังจะเห็นได้จากปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัว โดยกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่น่าจะมีผลต่อค่าไอโอดีนมากที่สุดคือ กรดโอเลอิก เพราะพบในปริมาณมากที่สุด โดยไขมันหรือน้ำมันที่มีระดับความไม่อิ่มตัวสูงนั้นไม่เหมาะในการนำไปผลิตเป็นไขมันทดแทนเนยโกโก้ เพราะจะทำให้ได้ไขมันที่ทดแทนเนยโกโก้ที่มีการหลอมละลายได้ง่ายเกินไป ซึ่งมีผลในการคงรูป เช่น ในผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลต นอกจากนี้ค่าไอโอดีนยังแสดงถึงความเป็นไปได้ที่จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอีกด้วย โดยไขมันหรือน้ำมันที่มีค่าไอโอดีนสูงจะมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้สูง ทำให้เกิดกลิ่นหืนขึ้นในผลิตภัณฑ์ที่มีไขมันหรือน้ำมันเป็นองค์ประกอบ อย่างไรก็ตามไขมันหรือน้ำมันที่มีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวจะมีคุณค่าทางโภชนาการสูง เนื่องจากกรดไขมันไม่อิ่มตัวเป็นกรดไขมันที่มีความจำเป็นต่อร่างกาย (นิธิยา, 2548) โดยการรับประทานกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว เช่น กรดโอเลอิกในปริมาณที่เหมาะสมจะช่วยให้ระดับไขมันและคอเลสเตอรอลในเลือดลดลงได้ (วินัย, 2542)

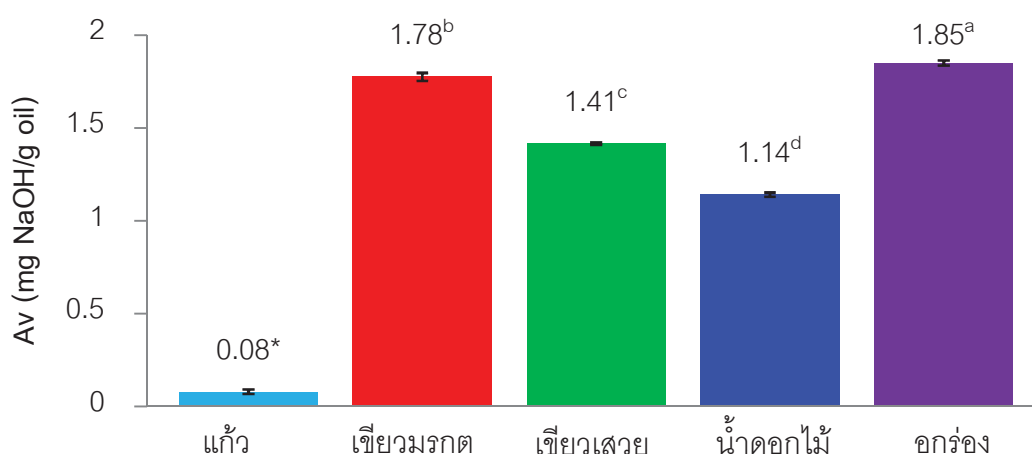


ภาพที่ 19 แผนภูมิแสดงค่าไอโอดีนของน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์

หมายเหตุ \* จากงานวิจัยของ พิมพัญญา กาเผือกงาม (2552)

<sup>a-d</sup> หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่มีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

4.3.3 ค่าความเป็นกรด (Acid value; A.V.) เป็นค่าที่แสดงถึงจำนวนมิลลิกรัมของ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ใช้ในการทำให้กรดไขมันอิสระ 1 กรัมเป็นกลาง เมื่อไขมันเกิดการ ไฮโดรไลซ์จะทำให้ปริมาณกรดไขมันอิสระเกิดขึ้น ซึ่งกรดไขมันอิสระสามารถเกิดปฏิกิริยา ก่อให้เกิดกลิ่นหืนได้ง่าย ดังนั้นจึงนิยมใช้ค่าความเป็นกรดเป็นตัวชี้สถานะหรือระดับการเกิดกลิ่น หืนของไขมัน กล่าวคือ หากค่าความเป็นกรดสูงแสดงว่า มีการเกิดกลิ่นหืนเนื่องจากปฏิกิริยา Hydrolytic rancidity มาก หรืออาจกล่าวได้ว่า ไขมันหรือน้ำมันที่มีค่าความเป็นกรดสูงนั้น แสดงว่า เกิดกลิ่นหืนมาก



ภาพที่ 20 แผนภูมิแสดงค่าความเป็นกรดของน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์

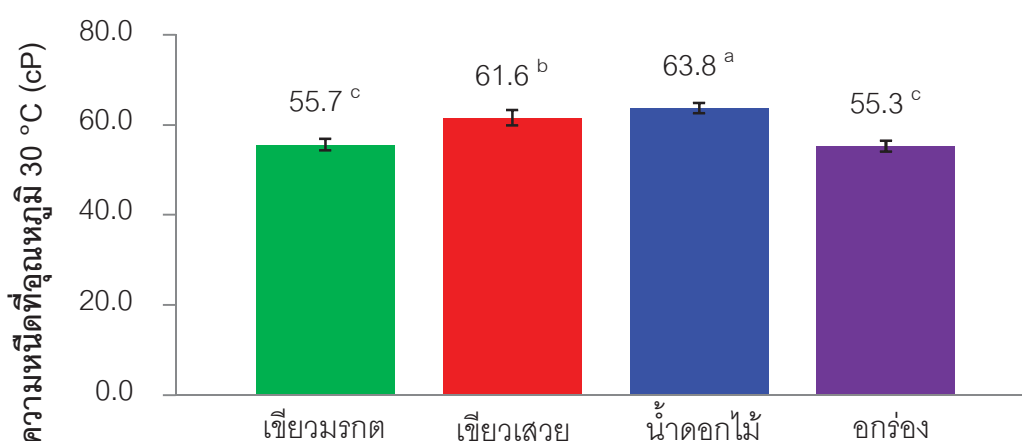
หมายเหตุ \* จากงานวิจัยของ พิมพัญญา กาเผือกงาม (2552)

<sup>a-d</sup> หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่มีตัวอักษรต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

จากภาพที่ 20 จะเห็นได้ว่าค่าความเป็นกรดของน้ำมันจากเมล็ดมะม่วงแต่ละสายพันธุ์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) โดยน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อกร่องมีค่าความเป็นกรดสูงสุดคือ  $1.85 \pm 0.01$  mg NaOH/ g oil รองลงมาจะเป็นสายพันธุ์เขียวมรกต เขียวสวอย และน้ำดอกไม้ม ตามลำดับ ซึ่งจากค่าความเป็นกรดที่แสดงให้เห็นว่าน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อกร่องมีปริมาณกรดไขมันอิสระสูงที่สุด นั่นคือ เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสซึ่งก่อให้เกิดกลิ่นหืนมากที่สุด โดยน้ำมันที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระเมื่อคิดเป็นค่าความเป็นกรดเท่ากับ  $1.00 - 2.99$  mg NaOH/ g oil จะเริ่มเกิดกลิ่นหืน (นิธิยา, 2548) ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของน้ำมัน แต่ข้อกำหนดด้านคุณภาพของเนยโกโก้ระบุว่า อนุญาตให้เนยโกโก้มีค่าความเป็นกรดสูงสุดได้เท่ากับ 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 <sup>a-c</sup> หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่มีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

จากภาพที่ 21 จะเห็นได้ว่าน้ำมันจากเมล็ดมะม่วงแต่ละสายพันธุ์มีความหนืด (ที่อุณหภูมิขณะวัด 30°C) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) โดยน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้มมีความหนืดสูงสุดคือ  $63.8 \pm 1.13$  cP ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วย GC-FID พบว่าน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้มมีชนิดของกรดไขมันที่มีจำนวนคาร์บอนสูง เช่น กรดสเตียริกในปริมาณที่สูงและมีกรดไขมันที่มีพันธะคู่ต่ำสุด จึงทำให้ความหนืดของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้นั้นสูงที่สุด และในทางกลับกันน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อกร่องและเขียวมรกตมีกรดไขมันที่มีจำนวนคาร์บอนสูง เช่น กรดสเตียริกในปริมาณต่ำและมีกรดไขมันที่มีพันธะคู่สูง จึงทำให้ความหนืดของน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้งสองสายพันธุ์มีความหนืดต่ำ

4.3.5 ค่าสี (color) วัดโดยใช้เครื่อง Colormeter Color-view™ Spectrophotometer Model:9000 ซึ่งจะวัดค่า  $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$  ค่าสีสามารถนำมาใช้ในการเป็นตัวบ่งชี้คุณภาพของน้ำมันได้ โดยน้ำมันแต่ละชนิดจะมีสีที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับสารที่เป็นรงควัตถุในวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการสกัดน้ำมันและวิธีการกำจัดสีโดยการฟอกสี น้ำมันที่มีสีเหลืองอ่อนจะมีคุณภาพดีกว่าน้ำมันที่มีสีเหลืองเข้ม (นิธิยา, 2548)

ตารางที่ 11 ค่าสีของน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์ ขณะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิ 20°C

| สายพันธุ์ | ค่าสี                                                                                                                                          |                          |                           |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|---------------------------|
|           | $L^*$                                                                                                                                          | $a^*$                    | $b^*$                     |
| เขียวมรกต | 68.02 ± 0.24 <sup>c</sup>                                                                                                                      | 6.05 ± 0.28 <sup>a</sup> | 25.14 ± 0.23 <sup>a</sup> |
| เขียวเสวย | 72.35 ± 0.28 <sup>b</sup>                                                                                                                      | 3.10 ± 0.25 <sup>b</sup> | 23.77 ± 0.21 <sup>b</sup> |
| น้ำดอกไม้ | 76.14 ± 0.45 <sup>a</sup>                                                                                                                      | 2.97 ± 0.42 <sup>c</sup> | -7.70 ± 0.52 <sup>d</sup> |
| อกร่อง    | 65.89 ± 0.32 <sup>d</sup>                                                                                                                      | 1.44 ± 0.31 <sup>d</sup> | 4.91 ± 0.23 <sup>c</sup>  |
| หมายเหตุ  | <sup>a-d</sup> 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  $a^*$  นั้นถ้ามีค่าเป็นลบจะบ่งชี้ว่ามีสีเขียวแต่ถ้ามีค่าเป็นบวกจะมีสีแดง และค่า  $b^*$  ถ้ามีค่าเป็นลบแสดงว่ามีสีน้ำเงินแต่ถ้ามีค่าเป็นบวกจะมีสีเหลือง (Wikipedia encyclopedia, 2011b) จากตารางที่ 11 แสดงให้เห็นค่าสีของน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์ ขณะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิ 20°C มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) โดยที่น้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้มีค่า  $L^*$  มากที่สุด ซึ่งค่า  $L^*$  แสดงให้เห็นว่าน้ำมันมีความสว่างมากที่สุด โดยน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อกร่องมีค่า  $L^*$  ต่ำสุดแสดงให้เห็นว่ามีความสว่างน้อยที่สุด โดยน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวมรกตมีค่า  $a^*$  สูงสุดแสดงว่ามีสีแดงมากกว่าน้ำมันเมล็ดมะม่วงอีก 3 สายพันธุ์ และเมื่อพิจารณาค่า  $b^*$  จะเห็นได้ว่าน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวมรกตมีค่ามากที่สุด แสดงให้เห็นว่ามีสีเหลืองที่เข้มกว่าเมื่อเทียบกับน้ำมันเมล็ดมะม่วงจากทั้งหมด 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 |
| เขียวสวอย | 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 |

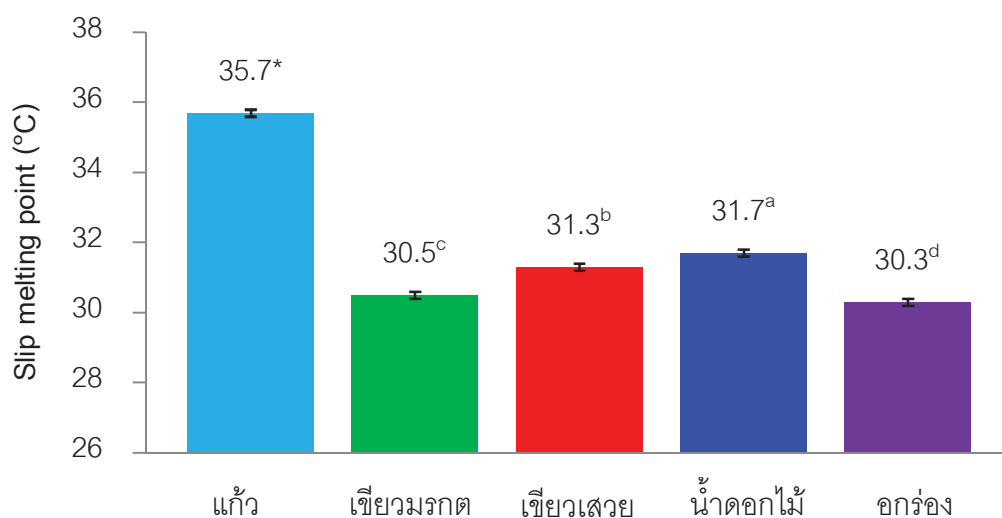
หมายเหตุ <sup>a-d</sup> หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแถวคอลัมน์เดียวกันที่มีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

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

สารสีที่ละลายได้ดีในไขมันและน้ำมัน คือ แคโรทีนอยด์ เป็นสารที่ให้สีเหลืองถึงสีแดงเข้ม ขึ้นอยู่กับชนิดของแคโรทีนอยด์ ชนิดที่พบมากที่สุด คือ เบต้า-แคโรทีน สารพวกแคโรทีนอยด์ไม่สามารถแยกออกจากไขมันหรือน้ำมันได้โดยการรีไฟน์ด้วยค่า แต่การทำไฮโดรจิเนชันจะช่วยลดจำนวนพันธะคู่ในโมเลกุลของแคโรทีนอยด์ในน้อยลง มีผลทำให้สีจางลงด้วย สารพวกแคโรทีนอยด์ไม่ก่อทอนความร้อน ดังนั้นการฟอกสีที่อุณหภูมิสูงหรือการกำจัดกลิ่นโดยใช้ไอน้ำจะช่วยทำให้สีจางลงได้ และสามารถกำจัดสารแคโรทีนอยด์ออกจากน้ำมันได้โดยใช้ Fuller's earth หรือ activated carbon (นิธิยา, 2548) ในน้ำมันบางชนิด เช่น น้ำมันมะกอกและน้ำมันถั่วเหลือง ที่สกัดได้จากวัตถุดิบที่มีสีเขียว น้ำมันที่ได้อาจมีสีเขียวของคลอโรฟิลล์ปนออกมาด้วย โดยปกติ น้ำมันถั่วเหลืองจะมีคลอโรฟิลล์ประมาณ 1,500 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยแคโรทีนอยด์เป็นรงควัตถุในพืชที่มีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ สารตั้งต้นในการสร้างฮอร์โมน สารให้สี และสารประกอบที่สำคัญในการสังเคราะห์ด้วยแสง แคโรทีนอยด์จะถูกสะสมในพลาสติด (plastids) ซึ่ง

ไม่ใช่ส่วนคลอโรพลาสต์ (chloroplast) และจะพบมากในส่วนต่างๆ ของพืชและส่วนของเนื้อเยื่อ แต่จะพบในเนื้อเยื่อบางชนิดเพียงเล็กน้อย (Howitt และ Pogson, 2006) ในมะม่วงพบแคโรทีนอยด์หลักๆ คือ เบต้า-แคโรทีน ( $\beta$ -carotene) ซึ่งพบในรูปของ violaxanthin esters ทั้งนี้พบว่าแคโรทีนอยด์ที่พบในมะม่วงนั้นจะขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของมะม่วง ลักษณะภูมิประเทศและภูมิอากาศ และระยะของความสุข นอกจากนี้ยังพบว่าสภาวะการเก็บรักษาและระดับการแปรรูปก็มีผลต่อแคโรทีนอยด์ที่พบในมะม่วงด้วยเช่นกัน (Pott และคณะ, 2003) โดยลูทีน (lutein) เป็นแคโรทีนอยด์ที่สำคัญที่พบมากในเมล็ดพืชที่ให้น้ำมันหลายชนิด เช่น น้ำมันของคาโลนาและน้ำมันดอกทานตะวัน (Kirk และ Bassett, 1978)

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



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

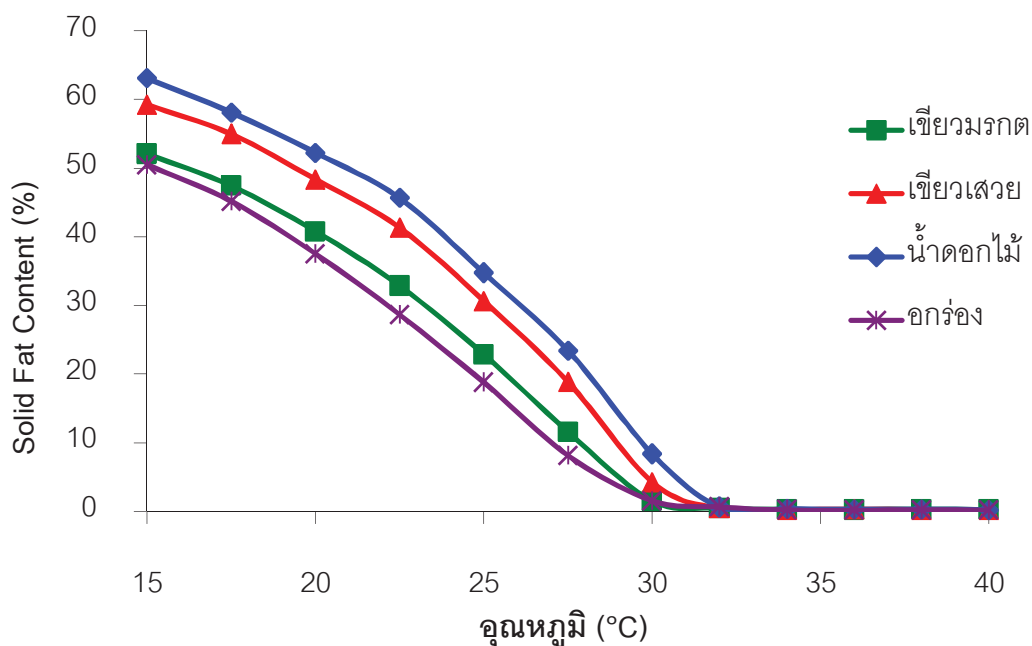
หมายเหตุ \* จากงานวิจัยของ พิมพัณิกา กาเผือกงาม (2552)

<sup>a-d</sup> หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่มีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

จากภาพที่ 22 แสดงให้เห็นว่า ค่า SMP ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้มีค่าสูงสุด คือ  $31.7 \pm 0.1^{\circ}\text{C}$  รองลงมาเป็นสายพันธุ์เชียวเสวย เชียวมรกต และอกร่อง ตามลำดับโดยค่า

SMP ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงแต่ละสายพันธุ์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ซึ่งต่ำกว่าค่าจากรายงานการวิจัยของพิมพ์นิภา (2552) ค่า SMP ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์แก้ว ที่มีค่าเท่ากับ  $35.7 \pm 0.1^\circ\text{C}$  โดยค่า SMP จะสัมพันธ์กับชนิดของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในไตรกลีเซอไรด์ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของน้ำมัน เนื่องจากน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้มีกรดสเตียริกมากที่สุด และมีกรดโอเลอิกในปริมาณที่น้อยสุดเมื่อเทียบกับน้ำมันเมล็ดมะม่วงอีก 3 สายพันธุ์ น้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อรุณในทางตรงกันข้ามมีกรดโอเลอิกมากที่สุด และมีกรดสเตียริกในปริมาณที่น้อยสุด โดยกรดสเตียริกซึ่งเป็นกรดไขมันชนิดอิ่มตัวจึงมีจุดหลอมเหลวที่สูงกว่ากรดโอเลอิกซึ่งเป็นกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว

4.3.7 ปริมาณไขมันที่เป็นของแข็ง (solid fat content; SFC) บอกให้ทราบถึงระดับการเป็นของแข็งในรูปของผลึกที่อุณหภูมิต่างๆ นอกจากนี้การพล็อตระหว่างค่า SFC และอุณหภูมิยังบอกให้ทราบถึงพฤติกรรมของการหลอมเหลวของน้ำมัน จากการศึกษาพบว่าน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์ต่างๆ เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า SFC ในช่วงอุณหภูมิ  $15-40^\circ\text{C}$  ดังแสดงในภาพที่ 23 และตารางที่ 16 แสดงค่า SCF ซึ่งแสดงในภาคผนวก ฎ ซึ่งจะเห็นว่าค่า SFC ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ตั้งแต่อุณหภูมิ  $15-30^\circ\text{C}$  โดยในช่วงดังกล่าวจะเห็นได้ว่าน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้มีค่า SFC สูงสุด รองลงมาเป็นสายพันธุ์เขียวเสวย เขียวมรกต และอรุณ ตามลำดับ และเริ่มเข้าใกล้ศูนย์ที่อุณหภูมิ  $32^\circ\text{C}$  โดยพฤติกรรมการตกผลึกในช่วงอุณหภูมิ  $15-30^\circ\text{C}$  ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงที่แตกต่างกันในแต่ละสายพันธุ์อาจเกิดจากความแตกต่างของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบ โดยน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อรุณมีกรดโอเลอิกซึ่งเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัวในปริมาณที่สูงส่งผลให้เกิดการเจือจาง (dilution effect) กับกรดไขมันอิ่มตัวในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ โดยไปลดปริมาณพลังงานที่ต้องการในการทำให้ไขมันเกิดการหลอมเหลว หรือทำให้ความเข้มข้นของกรดไขมันอิ่มตัวในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ซึ่งตกผลึกได้ง่ายกว่าลดลง ซึ่งในแง่ของพลังงานความร้อนในการตกผลึกอาจกล่าวได้ว่า ไตรกลีเซอไรด์ต้องคายพลังงานสูงขึ้นในการตกผลึก เพราะกรดโอเลอิกต้องคายพลังงานความร้อนออกมาในปริมาณที่สูงกว่ากรดไขมันอิ่มตัว เพื่อให้เกิดการตกผลึกนั่นเอง ดังนั้นน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อรุณจึงตกผลึกได้ยากกว่าน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อื่นในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวทำให้ได้ไขมันที่มีลักษณะที่อ่อนกว่า (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)

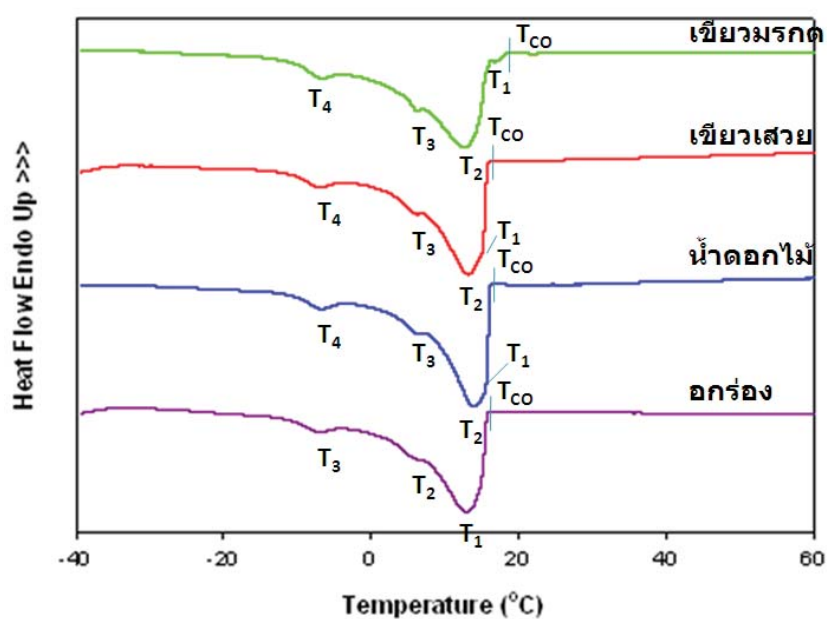
จากภาพที่ 24 เป็น DSC thermogram จากการตกผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงแต่ละสายพันธุ์ หลังจากการให้ความร้อนที่ 80°C นาน 10 นาที และทำการลดอุณหภูมิจาก 80°C จนถึง -40°C ด้วยอัตรา 5°C/นาที โดยอุณหภูมิที่แสดงถึง การเปลี่ยนแปลงต่างๆ ในระหว่างการตกผลึกได้แสดงในตารางที่ 13 พบว่า น้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เจียวมรกตเริ่มมีการตกผลึกที่อุณหภูมิ 18.52°C ( $T_{CO}$ ) ที่อุณหภูมิ 17.25°C ( $T_1$ ) พบพีกแรกในการตกผลึกซึ่งอาจเกิดจากการตกผลึกของกรดไขมันที่มีจุดหลอมเหลวสูงหรือกรดไขมันชนิดอิ่มตัว และมีการตกผลึกสูงสุดที่อุณหภูมิ 12.84°C ( $T_2$ ) และยังพบพีกจากการตกผลึกที่อุณหภูมิ 6.05°C ( $T_3$ ) และ -6.89°C ( $T_4$ ) ซึ่งอาจเกิดจากการแข็งตัวของส่วนที่จุดหลอมเหลวต่ำที่มีไตรกลีเซอไรด์ที่มีกรดไขมันไม่อิ่มตัวเป็นองค์ประกอบ โดยมีเอนทาลปีใน

การตกผลึก ( $\Delta H_c$ ) เท่ากับ 66.55 J/g ด้านน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวเสวยนั้น เริ่มมีการตกผลึกที่อุณหภูมิ 16.19°C ( $T_{co}$ ) และเกิดฟิคที่อุณหภูมิ 15.27°C ( $T_1$ ) ซึ่งไม่พบในน้ำมันเมล็ดมะม่วงอีกสองสายพันธุ์คือเขียวมรกตและอกร่อง โดยมีการตกผลึกสูงสุดที่อุณหภูมิ 13.26°C ( $T_2$ ) และยังพบฟิคที่อุณหภูมิ 5.90°C ( $T_3$ ) และ -7.13°C ( $T_4$ ) ซึ่งอาจเกิดจากการแข็งตัวของส่วนที่มีจุดหลอมเหลวต่ำที่มีไตรกลีเซอไรด์ที่มีกรดไขมันไม่อิ่มตัวเป็นองค์ประกอบ โดยมีค่า  $\Delta H_c$  เท่ากับ 66.39 J/g ส่วนพฤติกรรมของการตกผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้นั้นพบว่าเริ่มมีการตกผลึกที่อุณหภูมิสูงที่ 16.61°C ( $T_{co}$ ) และพบฟิคที่ 15.66°C ( $T_1$ ) ซึ่งมีตำแหน่งใกล้เคียงกับของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวเสวย โดยน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้นี้มีการตกผลึกสูงสุดที่อุณหภูมิ 14.05°C ( $T_2$ ) และยังพบฟิคในตำแหน่งใกล้เคียงกับของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวมรกตและเขียวเสวยที่อุณหภูมิ 5.96°C ( $T_3$ ) และ -6.92°C ( $T_4$ ) มีค่า  $\Delta H_c$  ต่ำสุด เท่ากับ 64.73 J/g เมื่อเทียบกันทั้ง 4 สายพันธุ์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้นี้ไม่เกิดการตกผลึกได้ง่ายซึ่งสอดคล้องกับผลของการตกผลึกที่อุณหภูมิคงที่ที่ 20°C โดยน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้นี้มีการเพิ่มขึ้นก่อนของค่า SFC และยังสอดคล้องกับผลของการศึกษาการตกผลึกด้วย XRD ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป สำหรับการตกผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อกร่อง พบว่า อุณหภูมิที่เริ่มมีการตกผลึกคือ 16.08°C ซึ่งมีค่าต่ำสุดเมื่อเทียบกับอุณหภูมิที่เริ่มมีการตกผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อื่นๆ และมี  $\Delta H_c$  เท่ากับ 66.70 J/g ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากองค์ประกอบซึ่งก็คือไตรกลีเซอไรด์ที่มีองค์ประกอบของกรดไขมันไม่อิ่มตัวอยู่ เช่น SOO และ OOO ที่พบมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับมะม่วงสายพันธุ์อื่น โดย Solís-Fuentes และ Durán-de-Bazúa (2004) กล่าวว่า น้ำมันเมล็ดมะม่วงมีกรดโอเลอิกซึ่งเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัวในปริมาณที่สูงส่งผลให้เกิดการเชื่อมขวางกับกรดไขมันอิ่มตัวในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ โดยทำให้ความเข้มข้นของกรดไขมันอิ่มตัวในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ซึ่งตกผลึกได้ง่ายกว่าลดลง ซึ่งในแง่ของพลังงานความร้อนในการตกผลึกอาจกล่าวได้ว่า ไตรกลีเซอไรด์ต้องคายพลังงานสูงขึ้นในการตกผลึก เพราะกรดโอเลอิกต้องคายพลังงานความร้อนออกมาในปริมาณที่สูงกว่ากรดไขมันอิ่มตัวเพื่อให้เกิดการตกผลึกนั่นเอง ดังนั้นน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อกร่องจึงตกผลึกได้ยากกว่าน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อื่น

จากพฤติกรรมการหลอมเหลวที่แสดงในภาพที่ 25 พบว่า น้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวมรกตเริ่มมีการหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ -18°C โดย จะมีการหลอมเหลวสูงสุดที่ 24.60°C ( $T_s$ ) และเกิดการหลอมเหลวอย่างสมบูรณ์ที่ 30.54°C ( $T_{mc}$ ) ซึ่งมีค่าเอนทัลปีของการหลอมเหลว ( $\Delta H_f$ ) เท่ากับ 75.90 J/g สำหรับการหลอมเหลวของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวเสวยนั้น พบว่าเริ่มมีการหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ -15°C โดยการหลอมเหลวของผลึกส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 26.75°C ( $T_s$ ) และพบฟิคอีกครั้งที่อุณหภูมิ 29.19°C ( $T_6$ ) ซึ่งมีการ

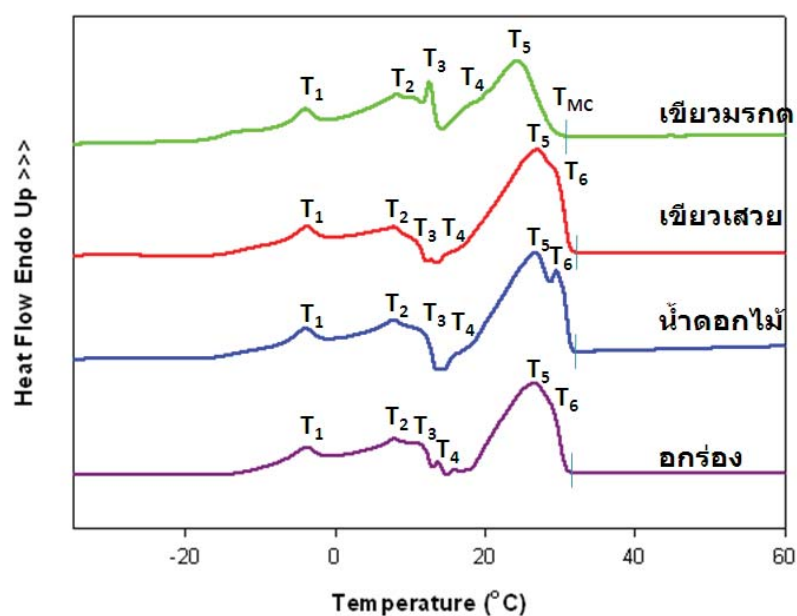
หลอมเหลวที่สมบูรณ์ที่  $31.94^{\circ}\text{C}$  ( $T_{MC}$ ) มีค่า  $\Delta H_f$  เท่ากับ  $75.94\text{ J/g}$  ส่วนน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์ น้ำดอกไม้เริ่มเกิดการหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ  $-16^{\circ}\text{C}$  โดยการหลอมเหลวของผลึกส่วนใหญ่เกิดที่อุณหภูมิ  $26.69^{\circ}\text{C}$  ( $T_g$ ) นอกจากนี้ยังเกิดไหล่ของฟลักที่อุณหภูมิ  $29.58^{\circ}\text{C}$  ( $T_0$ ) อย่างเด่นชัดกว่าสายพันธุ์อื่น ซึ่งอาจเกิดจากการหลอมเหลวของไตรกลีเซอไรด์ที่มีกรดไขมันอิ่มตัวเป็นองค์ประกอบ โดยน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้และเขียวเสวย พบฟลักการหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ  $29^{\circ}\text{C}$  อย่างเด่นชัด โดยจากการวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณไตรกลีเซอไรด์พบว่า ทั้งสองสายพันธุ์มีปริมาณไตรกลีเซอไรด์ชนิด POP และ SOS ในปริมาณสูงโดยจากรายงานของ Sato และ Ueno (2005) กล่าวว่า ผลึกรูปแบบ  $\delta$  ของ POP จะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ  $29.2^{\circ}\text{C}$  และผลึกรูปแบบ  $\beta'_2$  จะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ  $30.3^{\circ}\text{C}$  จากช่วงอุณหภูมิดังกล่าวมีความใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ได้จาก DSC thermogram โดยฟลักที่อุณหภูมิประมาณ  $29^{\circ}\text{C}$  จะเห็นได้ชัดมากที่สุด ใน DSC thermogram ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้ รองลงมาเป็น เขียวเสวย โดยพบไม่ชัดในสายพันธุ์อกร่องและเขียวมรกต ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณ POP ที่วิเคราะห์ได้ในน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 10 โดยน้ำดอกไม้พบ POP ในปริมาณสูงสุด รองลงมาเป็น เขียวเสวย อกร่อง และเขียวมรกต ตามลำดับ น้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้เกิดการหลอมเหลวอย่างสมบูรณ์ที่  $32.14^{\circ}\text{C}$  ( $T_{MC}$ ) และมีค่า  $\Delta H_f$  เท่ากับ  $76.72\text{ J/g}$  และพฤติกรรมการหลอมเหลวของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อกร่องนั้น พบว่าเริ่มเกิดการหลอมเหลวที่อุณหภูมิ  $-15^{\circ}\text{C}$  โดยที่อุณหภูมิ  $26.17^{\circ}\text{C}$  ( $T_g$ ) เป็นอุณหภูมิที่เกิดการหลอมเหลวสูงสุดของผลึกส่วนใหญ่ และพบฟลักที่  $29.11^{\circ}\text{C}$  ( $T_0$ ) เพียงเล็กน้อย และเกิดการหลอมเหลวอย่างสมบูรณ์ที่  $31.32^{\circ}\text{C}$  ( $T_{MC}$ ) โดยมีค่า  $\Delta H_f$  เท่ากับ  $75.17\text{ J/g}$

จากค่า  $\Delta H_f$  ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์ พบว่าค่า  $\Delta H_f$  ของสายพันธุ์น้ำดอกไม้ไม่มีค่าสูงสุด แสดงให้เห็นว่ามีผลึกในปริมาณสูงจึงต้องใช้พลังงานสูงในการหลอมละลายผลึก ซึ่งสอดคล้องกับผลของการหาค่า SFC ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้ไม่มีค่า SFC สูงสุดในทุกอุณหภูมิดังกล่าวต่อไป และเมื่อพิจารณาถึงอุณหภูมิที่เกิดการหลอมเหลวอย่างสมบูรณ์เมื่อเปรียบเทียบกันทั้ง 4 สายพันธุ์ พบว่า สายพันธุ์น้ำดอกไม้ไม่มีอุณหภูมิสูงสุด รองลงมาคือ เขียวเสวย เขียวมรกต และอกร่อง ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลของการหาค่า SMP โดยแสดงให้เห็นว่าน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้ไม่มีจุดหลอมเหลวสูงสุด



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 อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของการตกผลึกและการหลอมเหลวของน้ำมันมะพร้าว

| Sample      | Enthalpy (J/g)             | อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลง (°C) |                |                |                |                |                |                |                           |
|-------------|----------------------------|------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------------------|
|             |                            | T <sub>Co</sub>                    | T <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>4</sub> | T <sub>5</sub> | T <sub>6</sub> | T <sub>MC</sub>           |
| การตกผลึก   |                            |                                    |                |                |                |                |                |                |                           |
| เขียวมรกต   | 66.55 ± 0.18 <sup>a</sup>  | 18.52 ± 0.28 <sup>a</sup>          | 17.25 ± 0.17   | 12.84 ± 0.26   | 6.05 ± 0.02    | -6.89 ± 0.18   |                |                |                           |
| เขียวเสวย   | 66.39 ± 0.54 <sup>ab</sup> | 16.19 ± 0.02 <sup>b</sup>          | 15.27 ± 0.20   | 13.26 ± 0.01   | 5.90 ± 0.04    | -7.13 ± 0.01   |                |                |                           |
| น้ำดอกไม้   | 64.73 ± 0.86 <sup>b</sup>  | 16.61 ± 0.47 <sup>a</sup>          | 15.66 ± 0.16   | 14.05 ± 0.05   | 5.96 ± 0.05    | -6.92 ± 0.16   |                |                |                           |
| อกร่อง      | 66.70 ± 0.77 <sup>a</sup>  | 16.08 ± 0.16 <sup>b</sup>          | 12.70 ± 0.49   | 5.58 ± 0.11    | -7.23 ± 0.15   |                |                |                |                           |
| การหลอมเหลว |                            |                                    |                |                |                |                |                |                |                           |
| เขียวมรกต   | 75.90 ± 0.29 <sup>ab</sup> |                                    | -4.00 ± 0.03   | 8.18 ± 0.03    | 12.86 ± 0.26   | 17.49 ± 0.49   | 24.60 ± 0.23   |                | 30.54 ± 0.64 <sup>a</sup> |
| เขียวเสวย   | 75.94 ± 0.64 <sup>ab</sup> |                                    | -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 <sup>a</sup> |
| น้ำดอกไม้   | 76.72 ± 0.21 <sup>a</sup>  |                                    | -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 <sup>a</sup> |
| อกร่อง      | 75.17 ± 0.71 <sup>a</sup>  |                                    | -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 <sup>a</sup> |

หมายเหตุ T<sub>co</sub> หมายถึง อุณหภูมิที่เริ่มเกิดการตกผลึก, T<sub>MC</sub> หมายถึง อุณหภูมิที่เกิดการหลอมเหลวอย่างสมบูรณ์

<sup>a-d</sup> หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแถวคอลัมน์เดียวกันที่มีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

#### 4.4 การศึกษาพฤติกรรมการตกผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วง

4.4.1 การศึกษารูปร่างผลึก การเปลี่ยนแปลงรูปร่างผลึก จำนวนและขนาดเฉลี่ยของผลึกตามเวลาโดยใช้เครื่อง Polarized Light Microscopy (PLM) ที่อุณหภูมิ 20°C โดยทำการลดและควบคุมอุณหภูมิโดยใช้ตู้ควบคุมอุณหภูมิ และใช้เลนส์ที่มีกำลังขยาย 40x ซึ่งได้ผลการทดลองเป็นภาพถ่ายผลึกที่ระยะเวลาต่างๆ ดังแสดงในภาคผนวก ร และได้อีกภาพถ่ายมาเฉพาะบางช่วงเวลาของการตกผลึกของแต่ละตัวอย่างมาแสดงในภาพที่ 26-29

จากภาพถ่ายของการตกผลึกของน้ำมันจากเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวมรกต ดังแสดงในภาพที่ 26 พบว่ามีการตกผลึกจำนวนมากในนาที่ที่ 10 (โดยเริ่มตกผลึกตั้งแต่นาที่ที่ 5) โดยผลึกมีขนาดเล็กและมีรูปร่างคล้ายเข็ม (needle-like) ซึ่งหลังจากนั้นก็มีการโตของขนาดผลึกและมีการเพิ่มขึ้นของจำนวนผลึกอย่างต่อเนื่อง ซึ่ง Ghotra และคณะ (2002) กล่าวว่า ผลึกรูปเข็มมักจะเป็ผลึกที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลให้มีโครงสร้างแบบ  $\beta'$  ผลึกเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างนาที่ที่ 20 และเห็นเป็นผลึกขนาดใหญ่ชัดเจนในนาที่ที่ 80 ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่า บางส่วนของไขมันเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของผลึกจาก  $\beta'$  ไปเป็น  $\beta$  จากนั้นผลึกก็มีการเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ขึ้นและมีจำนวนเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจนถึงนาที่ที่ 120

จากภาพถ่ายของการตกผลึกของน้ำมันจากเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวสวย ดังแสดงในภาพที่ 27 พบว่าเริ่มเห็นการตกผลึกที่ชัดเจนในนาที่ที่ 30 โดยผลึกที่เกิดขึ้นมีลักษณะที่ผสมกันระหว่างผลึกรูปเข็มกับผลึกรูปทรงกลมซึ่งเกิดจากผลึกรูปเข็มมาประกอบกันอย่างสุมตามแนวรัศมีจากจุดศูนย์กลางของการโตของผลึก (Golden และคณะ, 2010) และเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผลึกในนาที่ที่ 40 หลังจากนั้นก็มีการเพิ่มขึ้นและการขยายขนาดตามเวลา

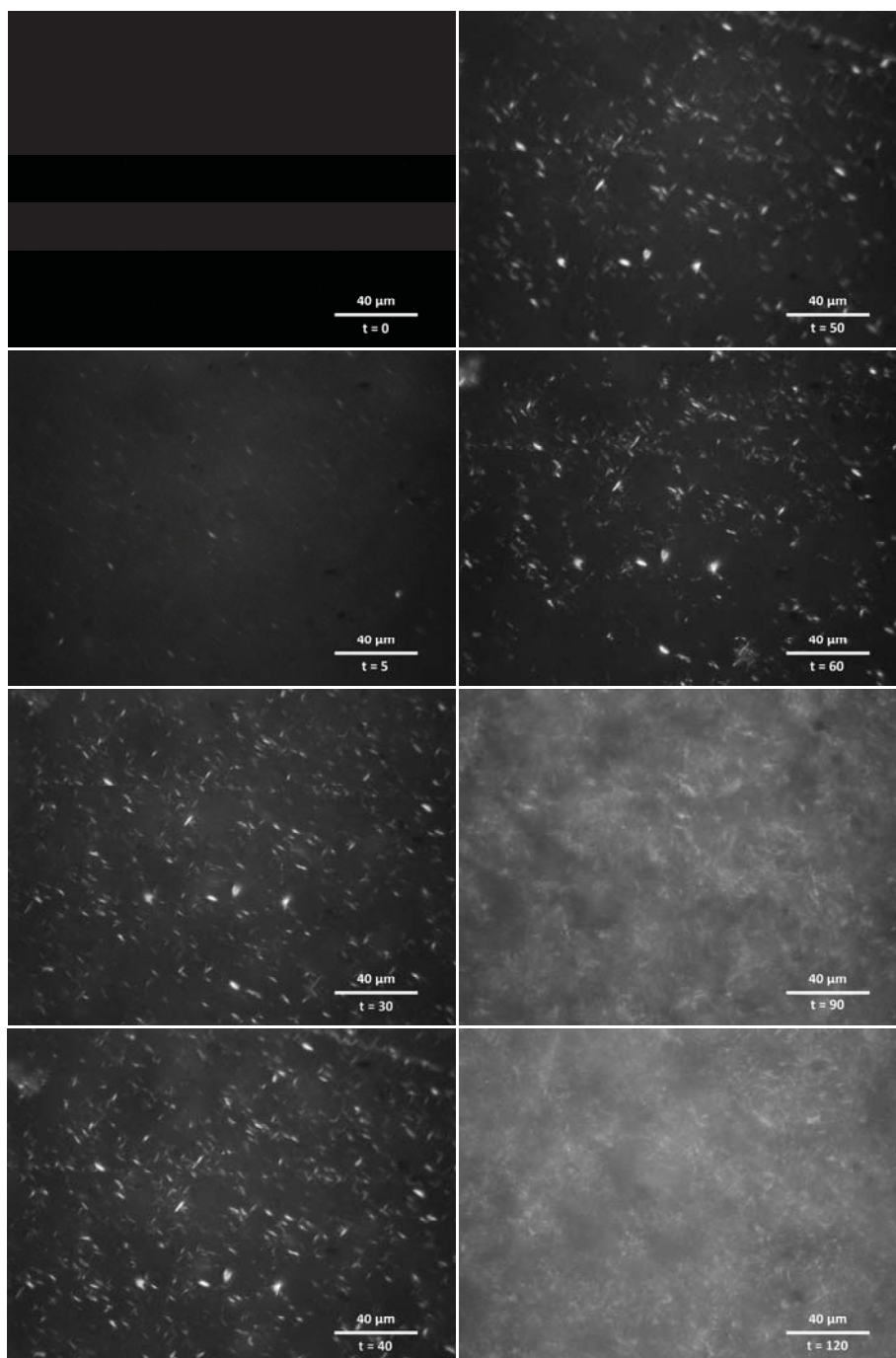
สำหรับภาพถ่ายของการตกผลึกของน้ำมันจากเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้แสดงในภาพที่ 28 พบว่าเริ่มเห็นการตกผลึกที่ชัดเจนในนาที่ที่ 35 โดยผลึกที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นผลึกรูปทรงกลม และเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผลึกเป็นทรงกลมที่มีความสมบูรณ์มากขึ้นและมีขนาดใหญ่ขึ้นในนาที่ที่ 40 หลังจากนั้นก็มีการเพิ่มขึ้นและการขยายขนาดตามเวลาจนถึงนาที่ที่ 120

จากภาพถ่ายของการตกผลึกของน้ำมันจากเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์ออร่อง แสดงในภาพที่ 29 พบว่าเริ่มเห็นการตกผลึกในนาที่ที่ 30 และเห็นการตกผลึกที่ชัดเจนได้ในนาที่ที่ 35 โดยผลึกมีลักษณะยาวและแคบคล้ายหูกระต่าย (bow-tie) หรือเส้นใย (filamentous-shaped) (Manning และ Dimick, 1985 อ้างอิงใน Sonwai และ Mackley, 2006) และผลึกจะมีการเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมากอย่างรวดเร็ว และเกิดการซ้อนทับกันของผลึกในนาที่ที่ 40 โดยตั้งแต่นาที่ที่ 50 ผลึกมีการ

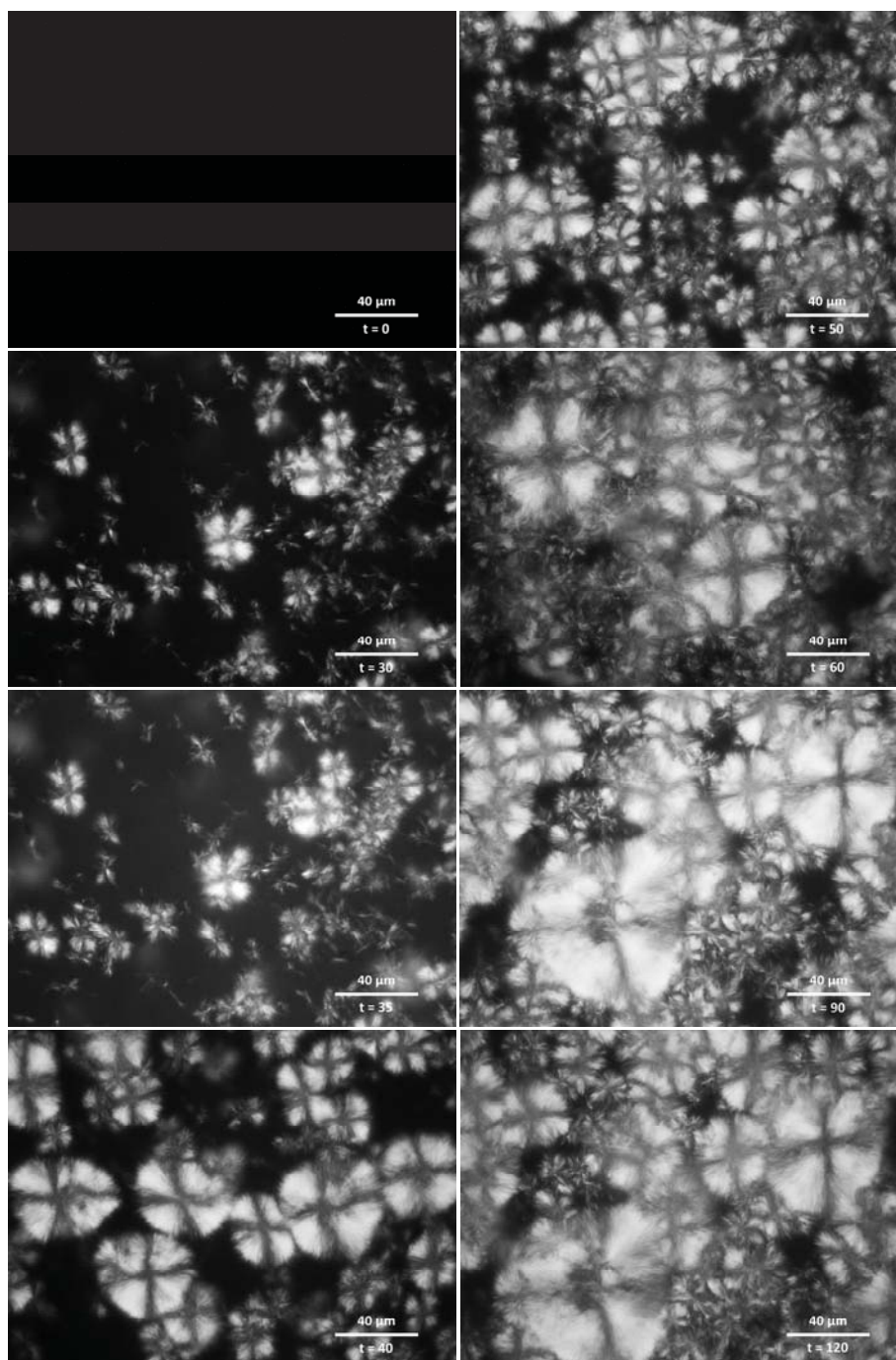
เปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยมีขนาดใหญ่ขึ้นเพียงเล็กน้อยและมีการขยายขนาดขึ้นอย่างช้าๆ จนถึงวันที่ที่ 120 นอกจากนี้ยังมีผลึกบางส่วนอยู่ในทรงกลม

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

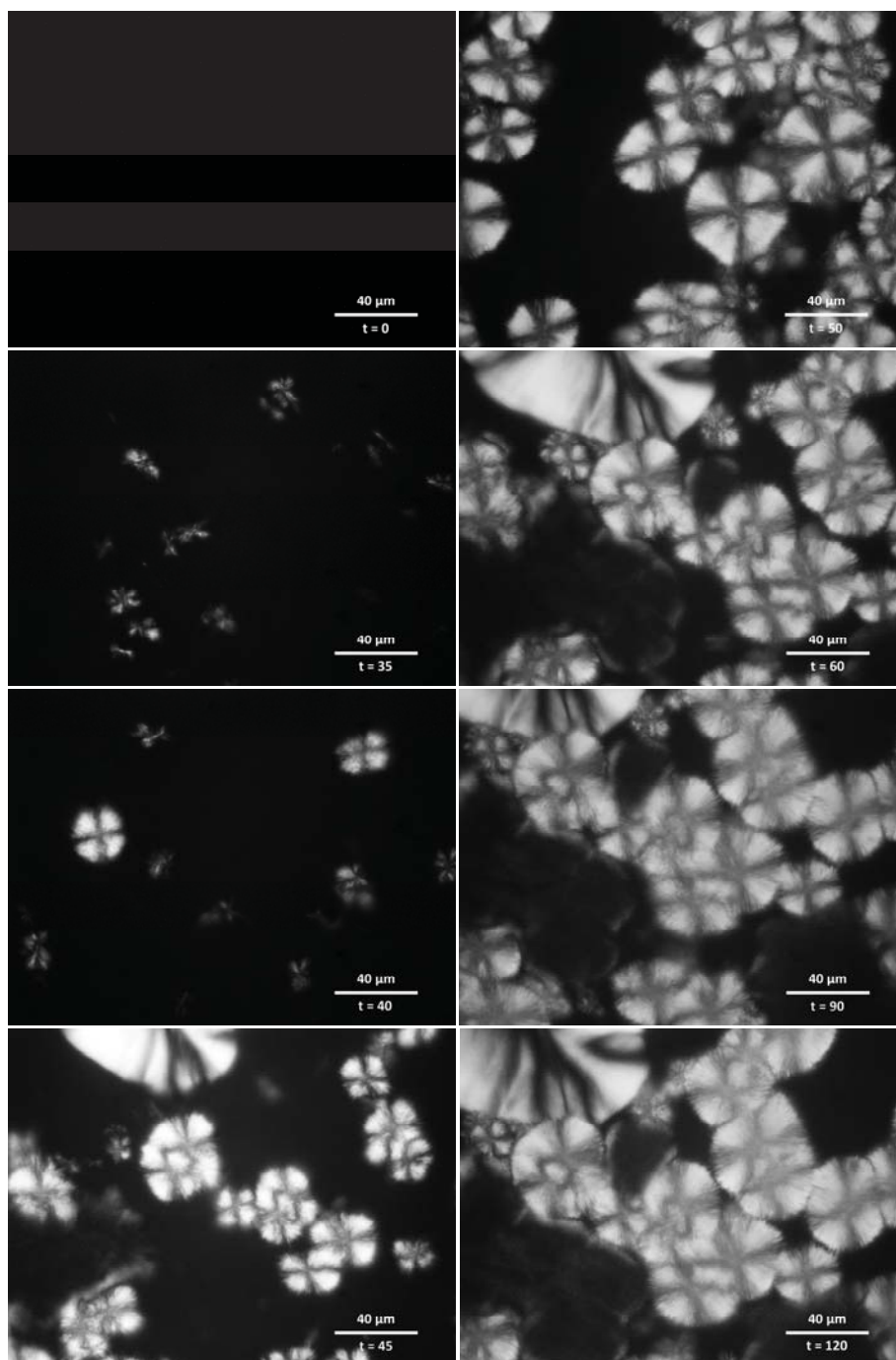
จากภาพถ่ายผลึกด้วยเทคนิค PLM ในงานวิจัยนี้ไม่สามารถนับจำนวนและวัดขนาดของผลึกที่แน่นอนได้ เนื่องจากส่วนใหญ่ผลึกมีขนาดค่อนข้างเล็ก มีการกระจายตัวของขนาดผลึกค่อนข้างมาก มีจำนวนผลึกมาก และมีการซ้อนทับกันของผลึก ซึ่งถือเป็นข้อด้วยของเทคนิคนี้ ดังที่ Ghotra และคณะ (2002) ได้กล่าวไว้ว่าการใช้เทคนิค PLM จะมีความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากที่ไม่สามารถแสดงภาพผลึกทั้งภายใต้กล้อง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



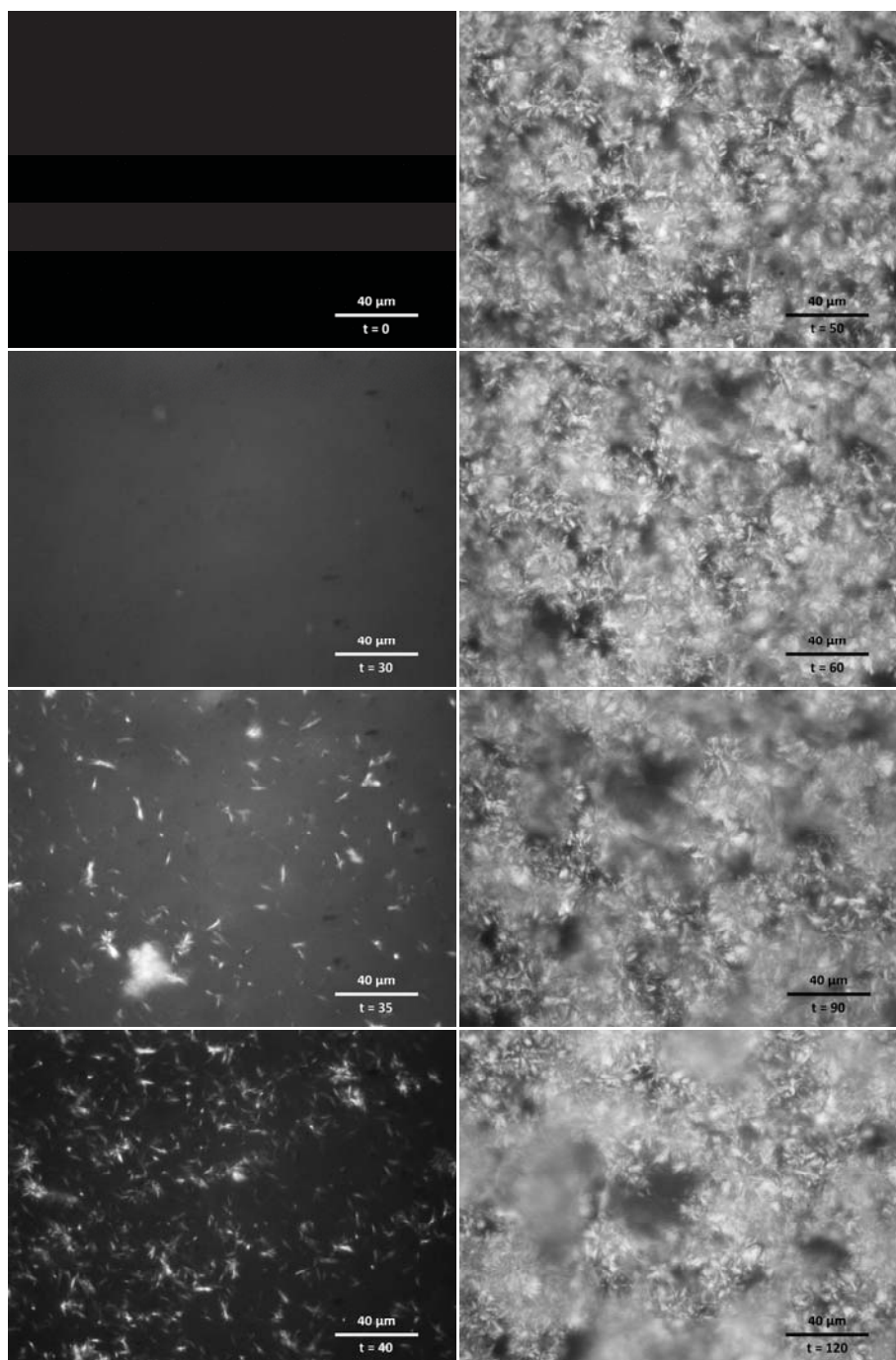
ภาพที่ 26 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียว  
มรกต ตามเวลา (t มีหน่วยเป็นนาทีก) ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง กำลังขยายของ  
กล้องเท่ากับ 400 เท่า



ภาพที่ 27 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์  
เขียวเสวย ตามเวลา (t มีหน่วยเป็นนาที่) ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง กำลังขยาย  
ของกล้องเท่ากับ 400 เท่า



ภาพที่ 28 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์ น้ำดอกไม้ ตามเวลา (t มีหน่วยเป็นนาทื) ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง กำลังขยาย ของกล้องเท่ากับ 400 เท่า



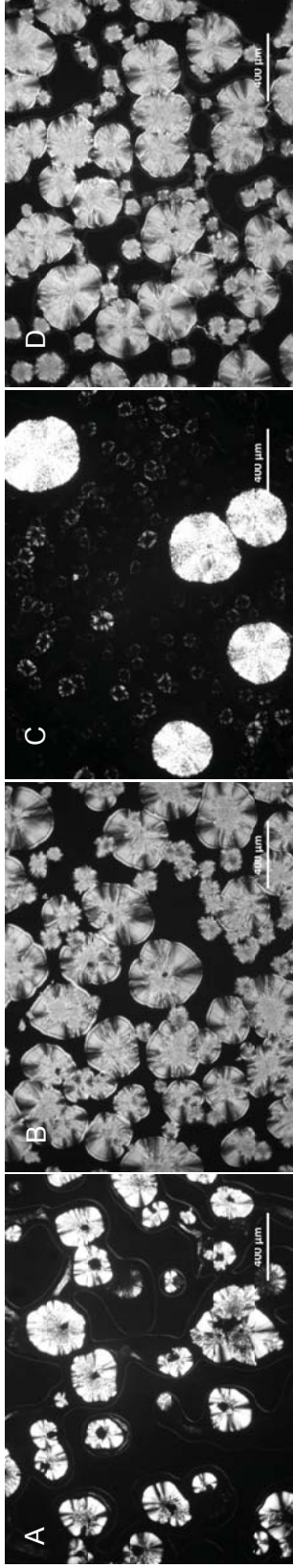
ภาพที่ 29 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์  
 อกร่อง ตามเวลา (t มีหน่วยเป็นนาที) ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง กำลังขยายของ  
 กล้องเท่ากับ 400 เท่า

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

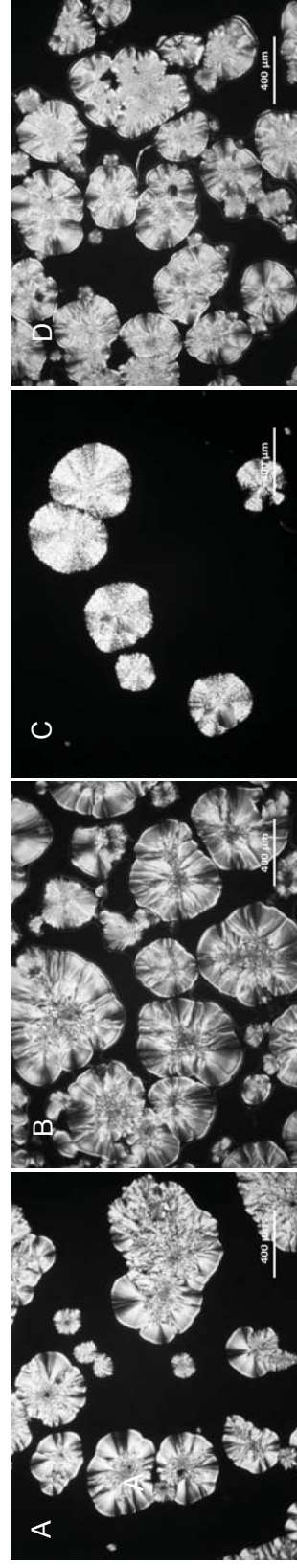
จากภาพถ่ายผลึกหลังจากบ่มที่อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 40 เท่า ดังแสดงในภาพที่ 30 พบว่าผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์มีลักษณะเป็นทรงกลม (spherulitic) ที่ส่วนกลางและส่วนขอบของทรงกลมมีลักษณะที่แตกต่างไปจากส่วนกลาง โดยผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้มีขนาดใหญ่ที่สุดแต่มีจำนวนน้อยที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 30C โดยพบผลึกขนาดเล็กเพียงเล็กน้อย ในขณะที่น้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวมรกต เขียวสวย และอกร่อง พบทั้งผลึกขนาดใหญ่และขนาดเล็ก โดยเขียวสวยและอกร่องให้จำนวนผลึกที่ใกล้เคียงกัน 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 สภาวะในกระบวนการผลิตสามารถมีผลต่อขนาดของผลึกไขมัน (fat crystal clusters) โดยการศึกษาหลายงานแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการตกผลึก การลดลงของอัตราการทำเย็นและอัตราการกวน นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของขนาดผลึก (Herrera และ Hartel, 2000; Campos และคณะ, 2002; Martini และคณะ, 2002 อ้างถึงใน Tang และ Marangoni, 2006) ผลกระทบของสภาวะในกระบวนการผลิตโดยเฉพาะอย่างยิ่งผลกระทบจากอุณหภูมิในการตกผลึกที่มีผลต่อขนาดของผลึกอธิบายได้โดยอัตราการเกิดนิวเคลียสที่แตกต่างกันโดยเกี่ยวกับสภาวะในกระบวนการผลิตที่ต่างกัน (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)

โดยทั่วไปรูปร่างและขนาดของผลึกไขมันจะขึ้นอยู่กับสภาวะในกระบวนการผลิตและปริมาณไขมันที่เป็นของแข็ง และจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างผลึกที่มีหลายรูปแบบ (polymorphism) ของ

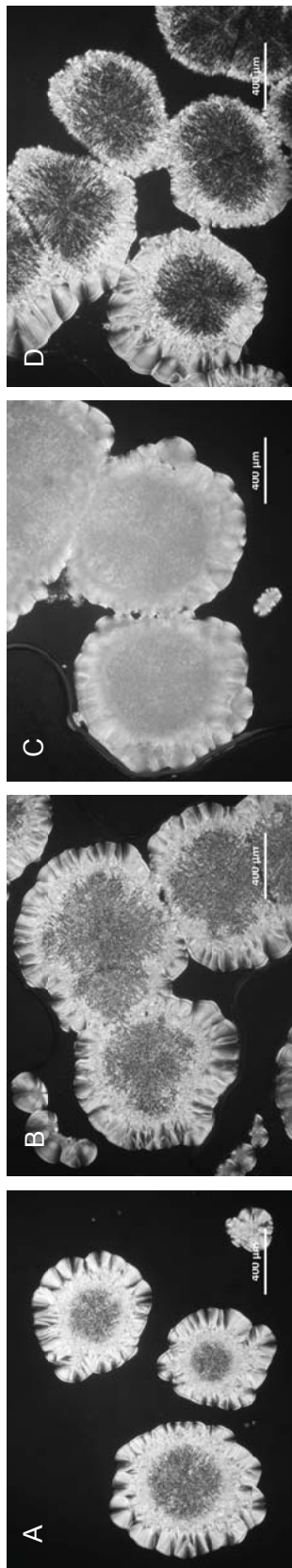
ผลึกไขมันเพียงเล็กน้อย โดยตัวอย่างไขมันที่มีภาวะที่มีโครงสร้างผลึกที่เหมือนกันสามารถมีผลึกไขมันที่มีรูปร่างและขนาดแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสถานะในกระบวนการผลิตและปริมาณไขมันที่เป็นของแข็ง (Tang และ Marangoni, 2006) โดย Manning และ Dimick (1985) อ้างถึงใน Tang และ Marangoni (2006) ได้ศึกษาสัณฐานวิทยา (morphology)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



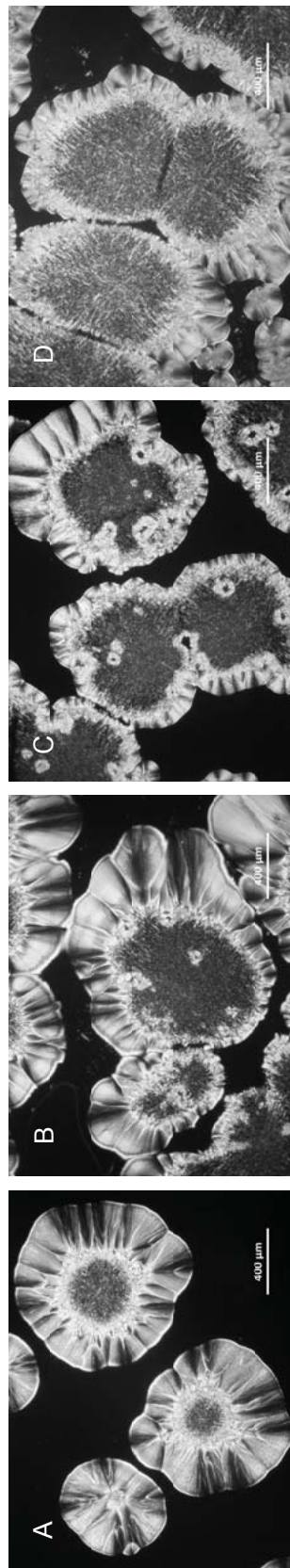
ภาพที่ 30 ผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวมรกต (A), เขียวเสวย (B), น้ำดอกไม้ (C) และอกร่อง (D) หลังจากตกผลึกที่อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 40 เท่า



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

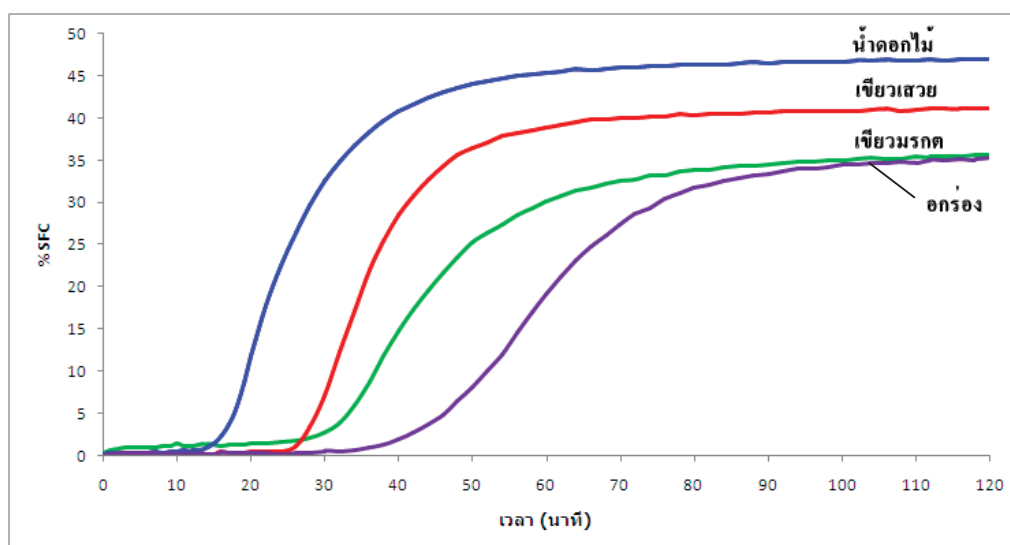


ภาพที่ 32 ผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวมรกต (A), เชียวเสวย (B), น้ำดอกไม้ (C) และอกร่อง (D) หลังจากตกผลึกที่อุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 40 เท่า

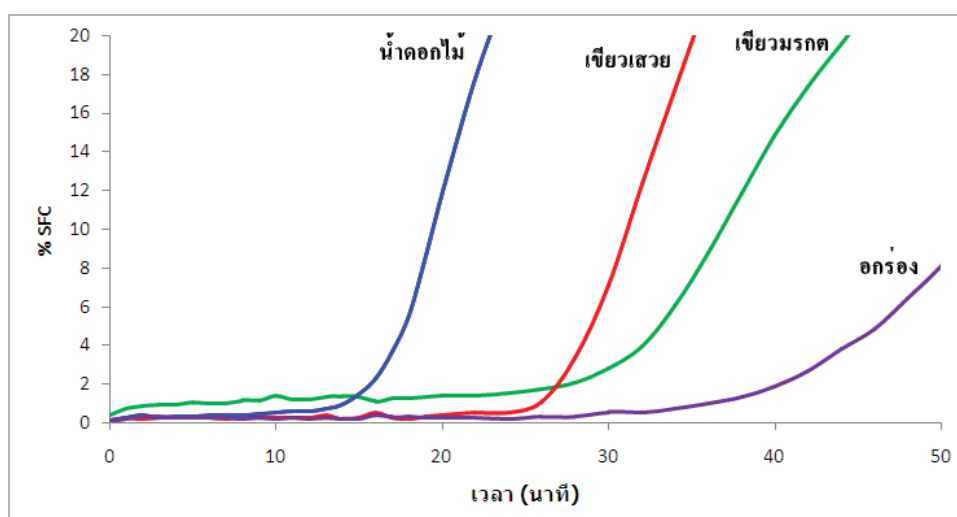


ภาพที่ 33 ผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวมรกต (A), เชียวเสวย (B), น้ำดอกไม้ (C) และอกร่อง (D) หลังจากตกผลึกที่อุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้องเท่ากับ 40 เท่า

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



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 ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวมรกตเริ่มตกผลึกก่อนที่เวลาประมาณนาทิตี่ 2 ดังแสดงในภาพที่ 35 ซึ่งเป็นภาพขยายให้เห็นช่วงเวลาช่วงเริ่มต้นของการทดลองในช่วงแรก (ประมาณ 50 นาติ) ค่า SFC ของเขียวมรกตมีค่าต่ำและค่อนข้างคงที่ (แต่มีค่า SFC ในช่วงแรกมากกว่าสายพันธุ์อื่น) ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่ายผลึกในภาพที่ 26 ซึ่งเห็นได้ว่ามะม่วงชนิดดังกล่าวเริ่มตกผลึกก่อนและผลึกมีขนาดเล็กมาก จนกระทั่งเริ่มมีการเพิ่มขึ้นของค่า SFC หลังจากนาทิตี่ 30 เป็นต้นไป และเริ่มคงที่ที่เวลาประมาณ 80 นาติ เป็นต้นไป ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่ายผลึกโดยจะเห็นได้ว่าทั้งจำนวนและขนาดผลึกหลังจากนาทิตี่ 80 มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ค่า SFC สูงสุดคือ 35.64% จากค่า SFC ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวเสวยจะเห็นได้ว่าเริ่มมีการตกผลึกที่เวลาประมาณ 26 นาติ หลังจากนั้นค่า SFC เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเมื่อพิจารณาจากภาพถ่ายผลึกจะพบว่าที่นาทิตี่ 30 เริ่มมีการเห็นผลึกอย่างชัดเจน (ภาพที่ 27) จากนั้นผลึกก็จะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง เพิ่มจำนวนและขยายขนาดอย่างรวดเร็ว จากนั้นค่า SFC จะเริ่มคงที่ที่เวลาประมาณ 70 นาติ โดยมีค่า SFC สูงสุดภายในระยะเวลา 2 ชั่วโมง ประมาณ 41% สำหรับการตกผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้จะเห็นได้จากค่า SFC ซึ่งในช่วงประมาณ 10 นาติแรกนั้นยังไม่เกิดการตกผลึกโดยสังเกตได้ว่ามีค่า SFC เข้าใกล้ศูนย์ แต่หลังจากนาทิตี่ 15 เกิดการตกผลึกโดยค่า SFC เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเริ่มคงที่ที่เวลาประมาณ 60 นาติ ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่ายผลึกที่แสดงให้เห็นว่าหลังจากที่เวลาประมาณ 60 นาติ ผลึกมีการเปลี่ยนแปลงทางด้านขนาดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (ภาพที่ 28) โดยมีค่า SFC สูงสุดประมาณ 47% ส่วนการตกผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อกร่องนั้นเริ่มเกิดขึ้นช้าที่สุดเมื่อเทียบกับมะม่วงอีกสามสายพันธุ์ โดยในช่วงแรกประมาณ 30 นาติมีค่า SFC ต่ำมาก หลังจากนั้นที่ประมาณ 42 ค่า SFC ก็เพิ่มสูงขึ้นอย่างช้าๆ และเริ่มคงที่ที่เวลาประมาณ 110 นาติ โดยภาพถ่ายผลึกของสายพันธุ์อกร่องแสดงให้เห็นว่าการตกผลึกเป็นไปอย่างช้าเช่นกัน และผลึกมีขนาดเล็ก โดยมีค่า SFC สูงสุดประมาณ 35% จากภาพที่ 34 จะเห็นได้ว่าระยะเวลาที่ใช้ก่อนการเริ่มตกผลึก (crystallization induction time) เรียงลำดับจากน้อยไปมากคือ เขียวมรกต น้ำดอกไม้ เขียวเสวย และอกร่อง นอกจากนี้ ค่า SFC สูงสุดที่เวลา 120 นาติ 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  $R^2$  ควรมีค่าเข้าใกล้ 1 ดีที่สุด ดังแสดง

ในตารางที่ 14 จากผลการวิเคราะห์พบว่าน้ำมันเมล็ดมะม่วง 4 สายพันธุ์ โดยน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้มิค่า  $k$  สูงสุด เท่ากับ  $4.23 \times 10^{-5}$  นาที<sup>-1</sup> อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.005$ ) รองลงมาเป็น เจียวสวย เจียวมรกต และอกร่อง ตามลำดับโดยค่า  $k$  เป็นค่าคงที่ที่จะสัมพันธ์กับอัตราในการตกผลึก ซึ่งจะขึ้นกับอุณหภูมิในการตกผลึก โดยค่า  $k$  จะบอกได้ทั้งอัตราในการเกิดนิวเคลียสและอัตราในการโตของผลึก (Sharples, 1996 อ้างอิงใน Wright และคณะ, 2000) จากค่า  $k$  ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้มิแสดงว่ามีอัตราในการเกิดนิวเคลียสและอัตราในการโตของผลึกสูงสุด หรือตกผลึกได้เร็วที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณกรดไขมัน ทั้งนี้เนื่องจากน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้มิกรดไขมันชนิดอิ่มตัว 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+1 โดยทั่วไปมีความหมายว่าการโตของผลึกเป็นแบบทรงกลม (spherulitic) (เลข 3) ซึ่งเกิดจากนิวเคลียสที่เกิดขึ้นเป็นระยะๆ และกระจายกระจาย (เลข 1) แต่จากผลการศึกษาด้วย PLM พบว่าเฉพาะพันธุ์เจียวมรกตและอกร่องเท่านั้นที่แสดงการโตของผลึกในแบบ rod-like หรือ แบบ needle-like (ภาพที่ 26-29) ซึ่งควรจะมีค่า  $n$  เป็น 2 ซึ่งมาจาก 1+1 โดยเลข 1 (ตัวแรก) หมายความว่า การโตของผลึกเป็นแบบ rod-like ส่วนเลข 1 (ตัวที่สอง) มีความหมายว่า นิวเคลียสมีการเกิดขึ้นเป็นระยะๆ ส่วนพันธุ์เจียวสวยแสดงการโตแบบทรงกลมซึ่งควรจะมีค่า  $n$  เป็น 3 หรือ 3+0 ซึ่งหมายความว่า โดยเลข 3 หมายถึงการโตแบบทรงกลม และหมายเลข 0 หมายถึง การเกิดของนิวเคลียสเพียงครั้งเดียว ไม่มีการเพิ่มขึ้นของนิวเคลียสในระหว่างการตกผลึก ส่วนค่า  $n$  ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้มิที่ได้จากการทดลองเท่ากับ 3.19 มีค่า  $n$  แบบ 3+1=4 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการโตของผลึกเป็นแบบทรงกลม (spherulitic) และการเกิดของนิวเคลียสมีการเกิดขึ้นเป็นระยะๆ ในระหว่างการตกผลึก ซึ่งไม่สอดคล้องกับภาพถ่าย PLM (ภาพที่ 28) โดยพันธุ์น้ำดอกไม้น่าจะมีค่า  $n$  เป็น 3 หรือ 3+0 ซึ่งผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้มิมีการโตอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะในช่วงนาที่ที่ 40-45 ที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดอย่างเห็นได้ชัด และการโตของผลึกเป็นแบบทรงกลม (spherulitic) จากผลการทดลองพบว่า ค่า  $n$  ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงไม่ตรงกับภาพถ่าย PLM ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการตกผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์นั้นยังไม่เข้าสู่สภาวะสมดุล (equilibrium) แบบสมบูรณ์ โดยยังมีการเพิ่มขึ้นของค่า SFC ตามเวลาอยู่อย่างช้า นอกนี้อาจเนื่องมาจากอัตราการทำเย็นหรืออัตราการลดลงของอุณหภูมิที่ผลต่อ

อัตราการผลิตและรูปร่างของผลึกนั้น มีความแตกต่างกัน โดยหากต้องการความถูกต้องมากขึ้น อาจจะต้องมีการใช้เครื่องมือในการควบคุมอุณหภูมิชนิดเดียวกันและมีสถานะในการตกผลึกที่ไม่ต่างกัน

**ตารางที่ 14** ค่าคงที่ต่างๆ ในสมการ Avrami ของน้ำมันเมล็ดมะม่วง 4 สายพันธุ์ ที่ได้จากการตกผลึก ที่อุณหภูมิคงที่ที่ 20°C เป็นเวลา 120 นาที

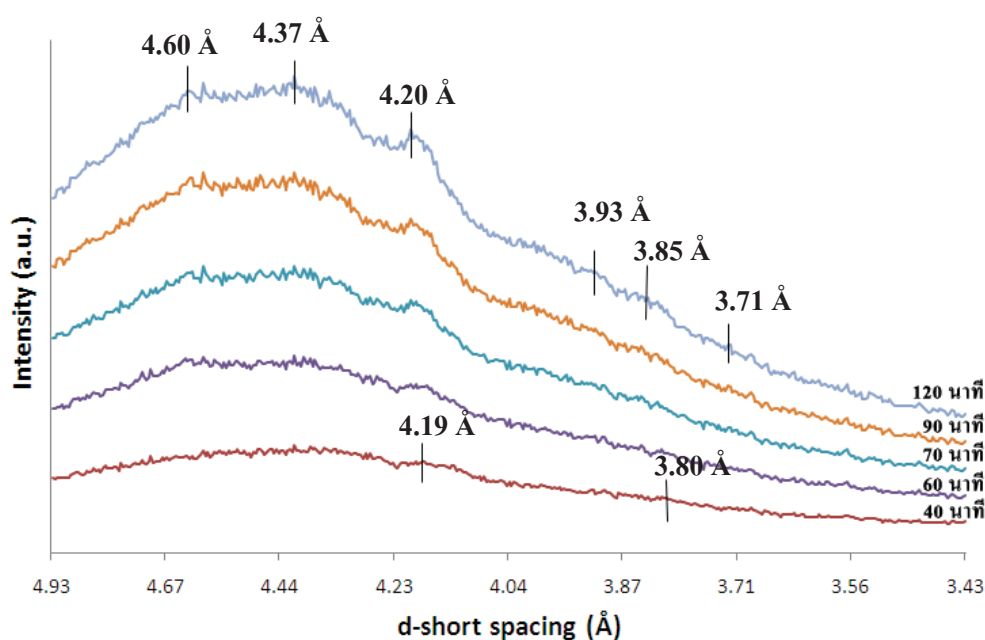
| สายพันธุ์ | ตัวแปรในสมการ Avrami                           |                   |                |
|-----------|------------------------------------------------|-------------------|----------------|
|           | ค่า k (นาที่ <sup>-1</sup> )                   | n                 | R <sup>2</sup> |
| เขียวมรกต | $1.62 \times 10^{-6} \pm 8.45 \times 10^{-8c}$ | $3.20 \pm 0.16^b$ | 0.990          |
| เขียวเสวย | $8.86 \times 10^{-6} \pm 1.25 \times 10^{-7b}$ | $3.59 \pm 0.08^a$ | 0.987          |
| น้ำดอกไม้ | $4.23 \times 10^{-5} \pm 9.42 \times 10^{-7a}$ | $3.19 \pm 0.15^b$ | 0.991          |
| อกร่อง    | $7.55 \times 10^{-7} \pm 3.03 \times 10^{-8c}$ | $3.31 \pm 0.15^b$ | 0.998          |

หมายเหตุ      <sup>a-c</sup> หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแถวคอลัมน์เดียวกันที่มีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

4.4.3 การศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกและการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกตามเวลา โดยใช้เครื่อง 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 ค

จากการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกและการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกตามเวลาด้วย XRD นั้นพบว่า นาที่ที่ 40 เริ่มสามารถมองเห็นผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวมรกตได้อย่างชัดเจนซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการศึกษาปริมาณไขมันที่เป็นของแข็งด้วยเทคนิค p-NMR โดยที่นาที่ที่ 40 เป็นช่วงที่มีค่า SFC มีค่าเพิ่มสูงขึ้น จึงเริ่มนำไขมันแข็งที่ได้จากช่วงเวลาดังกล่าวไปทำการวิเคราะห์ผลทำให้ได้ XRD pattern ในภาพที่ 35 ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวมรกต โดยพบว่า นาที่ที่ 40 มีค่า d ที่ 3.80 และ 4.19 Å แสดงให้เห็นว่ามีการตกผลึก

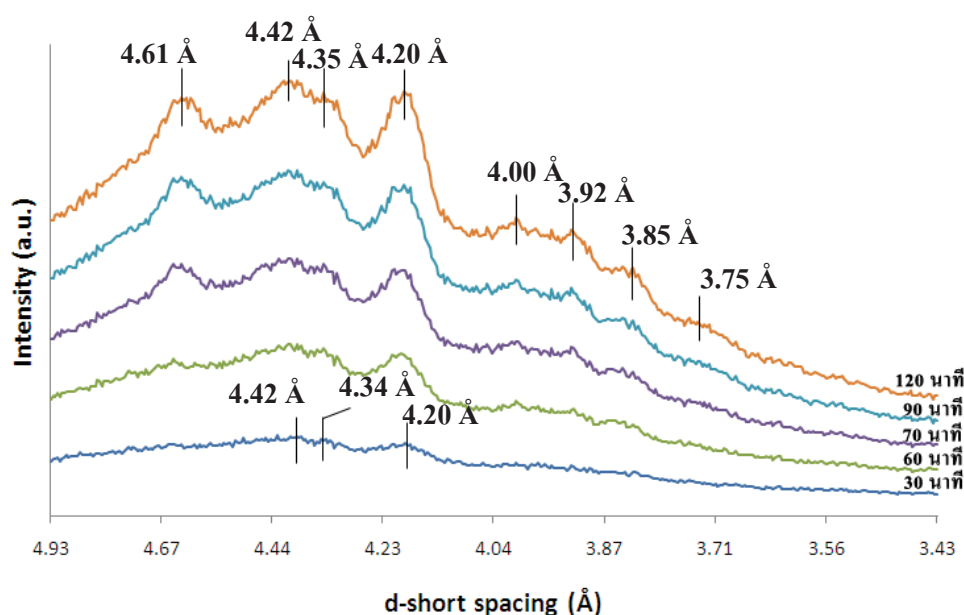
ในรูปแบบ  $\beta'$  ซึ่งมีค่าสอดคล้องกับรายงานการวิจัยหลายงานที่ระบุว่าผลึกรูปแบบ  $\beta'$  มีค่า  $d$  ที่ 3.80-3.90 Å และ 4.20-4.30 Å ดังแสดงไว้ในตารางที่ 7 และ 8 โดย XRD pattern ของนาที่ที่ 50 มีค่า  $d$  เช่นเดียวกับนาที่ที่ 40 จากนั้นนาที่ที่ 60 ก็เกิดการเปลี่ยนแปลงโดยค่า  $d$  ที่ 3.93 และ 4.37 Å โดยค่า  $d$  ดังกล่าวตรงกับผลึกรูปแบบ pseudo- $\beta'$  ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์มะนิลาที่อุณหภูมิในการเก็บ 22°C ซึ่งเป็นงานวิจัยของ Solís-Fuentes และคณะ (2005) และเริ่มพบค่า  $d$  ที่ 4.60 Å ด้วยความเข้มเพียงเล็กน้อย ซึ่งที่ค่า  $d$  ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าผลึกอยู่ในรูปแบบ  $\beta$  ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Narine และ Marangoni (1999) และจากหลายงานวิจัยที่มีการอ้างอิงใน Solís-Fuentes และคณะ (2005) จากนั้นจนถึงนาที่ที่ 120 ก็ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของผลึก แต่มีการเปลี่ยนแปลงในด้านปริมาณของผลึกในโครงสร้างต่างๆ ซึ่งจากค่า  $d$  ในช่วงเดิมคือ ในช่วง 3.71-4.20 Å ที่แสดงให้เห็นว่ามีการตกผลึกในรูปแบบ  $\beta'$  ค่า  $d$  ที่ 4.60 Å ที่แสดงให้เห็นว่าผลึกอยู่ในรูปแบบ  $\beta$  แต่ความเข้มของพีคเปลี่ยนแปลงไปโดยค่า  $d$  ที่ 4.60 Å มีความเข้มเพิ่มมากขึ้นแสดงให้เห็นว่าผลึกมีการเปลี่ยนแปลงจาก  $\beta'$  ไปเป็น  $\beta$  ในปริมาณที่มากขึ้น



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

จากผลการวิเคราะห์ XRD pattern ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวเสวยดังแสดงในภาพที่ 37 พบว่า ที่นาที่ที่ 30 เริ่มมีการตกผลึก โดยเกิดพีคที่ค่า  $d$  เท่ากับ 4.20 Å ซึ่งอาจเป็น

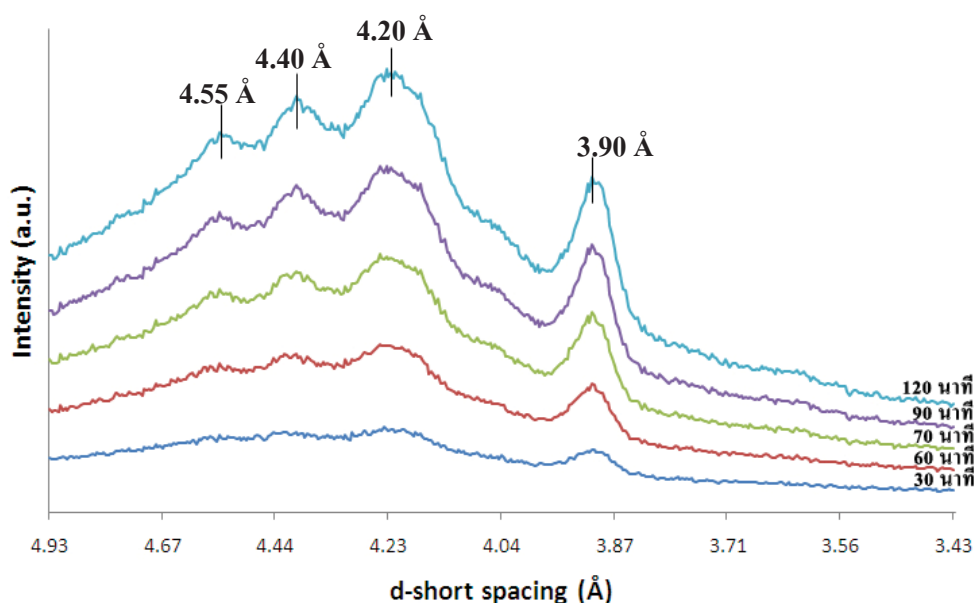
ฟลักของผลึกในรูปแบบ  $\beta'$  และค่า  $d$  ที่ 4.42 และ 4.34 Å ซึ่งมีผลึกรูปแบบ pseudo- $\beta'$  (Souza และคณะ, 1990 และ Brien, 1998 อ้างอิงใน Solís-Fuentes และคณะ, 2005) ต่อมาในนาที่ที่ 40 จะเห็นว่าผลึกอยู่ในรูปแบบ  $\beta'$  จากการเกิดฟลักที่ค่า  $d$  เท่ากับ 3.75, 3.85, 3.92 และ 4.20 Å และมีผลึกรูปแบบ pseudo- $\beta'$  เกิดขึ้นด้วย จากค่า  $d$  เท่ากับ 4.00, 4.35 และ 4.43 Å ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับที่รายงานไว้โดย Souza และคณะ (1990) และ Brien (1998) อ้างอิงใน Solís-Fuentes และคณะ (2005) จนเมื่อนาที่ที่ 60 ก็พบฟลักของค่า  $d$  ที่ 4.61 ซึ่งเป็นผลึกรูปแบบ  $\beta$  โดยมีค่าใกล้เคียงกับที่รายงานไว้โดย Ghotra และคณะ (2002); Czerniak (2005); Himawan และคณะ (2006); Souza และคณะ (1990); Brien (1998) อ้างอิงใน Solís-Fuentes และคณะ (2005) และ Narine และ Marangoni (1999) จากนั้นจนถึงนาที่ที่ 120 ก็ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของผลึก แต่มีการเปลี่ยนแปลงในด้านปริมาณของผลึกในโครงสร้างต่างๆ ซึ่งเกิดจากผลึกที่มีรูปแบบโครงสร้างที่ไม่เสถียรมีการเปลี่ยนแปลงมาเป็นรูปแบบที่เสถียรมากกว่า



ภาพที่ 37 X-ray diffraction patterns ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวเสวย ที่ระยะเวลาต่างๆ ของการตกผลึกที่ 20°C

จากภาพที่ 38 แสดง XRD pattern ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้ที่ตกผลึกที่อุณหภูมิคงที่ที่ 20°C โดยนาที่ที่ 30 เริ่มเห็นไขมันแข็งที่เกิดจากการตกผลึกชัดเจน จึงทำการวิเคราะห์ด้วย XRD พบว่า เกิดการตกผลึกในรูปแบบ  $\beta'$  จากการแสดงค่า  $d$  ที่ 3.90 และ 4.20 Å ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Marangoni และ McGauley (2003) และ Czerniak (2005) นอกจากนี้ยัง

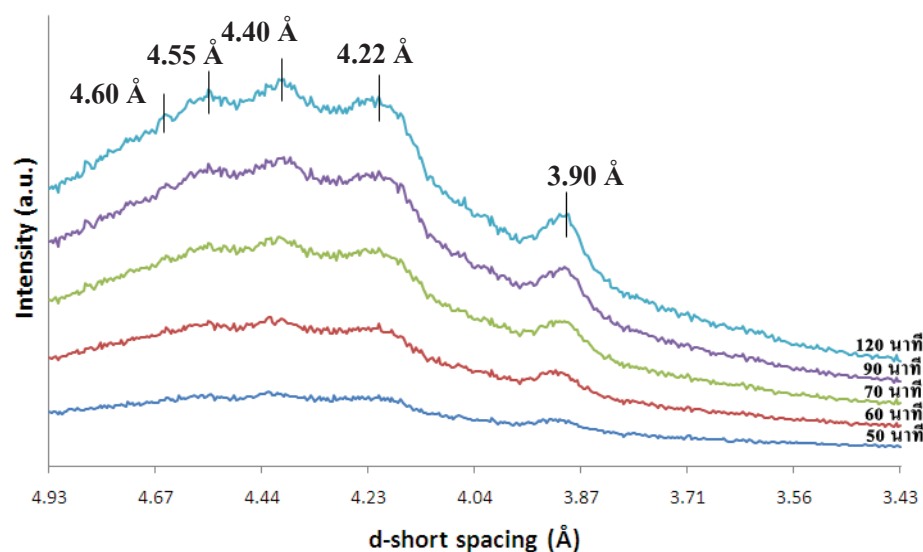
พบผลึกรูปแบบ pseudo- $\beta'$  จากการแสดงค่า  $d$  ที่  $4.40 \text{ \AA}$  ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับที่รายงานไว้โดย Souza และคณะ (1990) และ Brien (1998) อ้างอิงใน Solís-Fuentes และคณะ (2005) จากนั้นจนถึงนาที่ที่ 50 ก็ไม่พบการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของผลึก แต่มีการเปลี่ยนแปลงในด้านปริมาณของผลึกในโครงสร้างต่างๆ สังเกตได้จากความเข้ม (ความสูง) ของพีกที่มากขึ้น ต่อมาในนาที่ที่ 60 พบว่า ผลึกมีทั้งอยู่ในรูปแบบ  $\beta'$  และ pseudo- $\beta'$  และยังพบว่าผลึกอยู่ในรูปแบบ  $\beta$  จากค่า  $d$  เท่ากับ  $4.55 \text{ \AA}$  ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่มีการรายงานไว้ซึ่งรวบรวมและแสดงในตารางที่ 7 และ 8 จากนั้นจนถึงนาที่ที่ 120 ก็ไม่พบการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของผลึก แต่มีการเปลี่ยนแปลงในด้านปริมาณของผลึกในโครงสร้างต่างๆ



ภาพที่ 38 X-ray diffraction patterns ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้ ที่ระยะเวลาต่างๆ ของการตกผลึกที่  $20^{\circ}\text{C}$

จากการศึกษาการตกผลึกที่อุณหภูมิคงที่ ( $20^{\circ}\text{C}$ ) ด้วยการวัดค่า SFC ด้วยเทคนิค p-NMR ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อกร่องพบว่า มีค่า SCF เพิ่มขึ้นและเห็นการตกผลึกที่ชัดเจนที่นาที่ที่ 50 เป็นต้นไป ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่ายผลึก PLM จึงทำการวิเคราะห์ด้วย XRD ที่เวลาดังกล่าว ทำให้ได้ภาพที่ 39 ซึ่งพบว่า ที่นาที่ที่ 50 เกิดการตกผลึกในรูปแบบ  $\beta'$  จากการแสดงค่า  $d$  ที่  $3.90$  และ  $4.20 \text{ \AA}$  สอดคล้องกับรายงานของ Marangoni และ McGauley (2003) และ Czerniak (2005) จากนั้นนาที่ที่ 60 พบว่า เกิดการตกผลึกในรูปแบบ  $\beta'$  จากการแสดงค่า  $d$  ที่  $3.90$  และ  $4.20 \text{ \AA}$  และผลึกรูปแบบ pseudo- $\beta'$  จากการแสดงค่า  $d$  ที่  $4.40 \text{ \AA}$  ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับที่รายงาน

ไว้โดย Souza และคณะ (1990) และ Brien (1998) อ้างอิงใน Solís-Fuentes และคณะ (2005) และ ผลึกรูปแบบ  $\beta$  จากค่า  $d$  ที่ 4.56 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่มีการรายงานไว้ดังแสดงในตารางที่ 8 จากนั้นจนถึงนาที่ที่ 120 ก็ไม่พบการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของผลึก แต่มีการเปลี่ยนแปลงในด้าน ปริมาณของผลึกในโครงสร้างต่างๆ



ภาพที่ 39 X-ray diffraction patterns ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์อูร็อง ที่ระยะเวลาต่างๆ ของ การตกผลึกที่ 20°C

จากการติดตามการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกในระหว่างการตกผลึกที่อุณหภูมิ คงที่ที่ 20°C ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์ พบว่า ผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์ มีการผสมของผลึกหลายรูปแบบ (ผลึกรูปแบบ  $\beta'$ , pseudo- $\beta'$  และ  $\beta$ ) โดยน้ำมันเมล็ดมะม่วงสาย พันธุ์เขียวเสวยและน้ำดอกไม้ซึ่งมีปริมาณ SOS และกรดสเตียริกในปริมาณสูงนั้น มีปริมาณผลึก รูปแบบ  $\beta$  มากกว่าอีก 2 สายพันธุ์ โดยสังเกตได้จากความเข้มของพีคที่ค่า  $d$  ในช่วง 4.55-4.60 Å แต่ โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปแบบ  $\beta'$  ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการวิจัยของ Solís-Fuentes และคณะ (2005) ที่กล่าวว่า น้ำมันเมล็ดมะม่วงจะไม่แสดงรูปแบบผลึกที่เฉพาะรูปแบบเดียวที่อุณหภูมิ ประมาณ 22°C เป็นเวลาถึง 5 วัน แต่จะมีการผสมกันของผลึกในรูปแบบ  $\beta'$ , pseudo- $\beta'$ , และ  $\beta$  นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของพิมพินา (2552) ที่แสดงให้เห็นว่า น้ำมันเมล็ดมะม่วงสาย พันธุ์แก้วที่ทำการตกผลึกที่อุณหภูมิ 20°C มีผลึกหลายรูปแบบ แต่หลังจากการตกผลึกเป็นเวลา 60 นาที่ ผลึกส่วนใหญ่อยู่ในโครงสร้างแบบ  $\beta'$

## บทที่ 5

### สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

ในการแปรรูปมะม่วงจะทำให้ได้เมล็ดมะม่วงเป็นของเหลือทิ้ง ซึ่งสามารถนำเนื้อภายในเมล็ดมะม่วงมาสกัดน้ำมันซึ่งสามารถนำมาผลิตเป็นเนยโกโก้เลียนแบบชนิด CBE โดยเป็นหนึ่งในน้ำมันที่ได้รับอนุญาตโดยองค์กรควบคุมคุณภาพช็อกโกแลตของสหภาพยุโรป โดยเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียวมรกต เขียวสวย น้ำดอกไม้ และอกร่อง มีน้ำมันประมาณ 6.40, 5.78, 5.73 และ 7.74 % (น้ำหนักแห้ง) ตามลำดับ เมื่อทำการวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของกรดไขมันของน้ำมันที่สกัดได้ของแต่ละสายพันธุ์ด้วย GC-FID พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) โดยมีกรดไขมันหลักที่เป็นองค์ประกอบหลัก ได้แก่ กรดโอเลอิก กรดสเตียริก และกรดปาล์มมิก ตามลำดับ และเมื่อทำการวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ด้วย HPLC-DAD พบว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) โดยไตรกลีเซอไรด์ที่เป็นองค์ประกอบหลัก ได้แก่ OOP, POP, SOO, POS และ SOS โดยจากความแตกต่างดังกล่าวทำให้น้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์มีความแตกต่างกันในด้านคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ โดยสายพันธุ์น้ำดอกไม้มีจุดหลอมเหลวสูงสุด รองลงมาเป็นสายพันธุ์เขียวสวย เขียวมรกต และอกร่อง ตามลำดับ การศึกษาพฤติกรรมการตกผลึกที่อุณหภูมิ  $20^{\circ}\text{C}$  (120 นาที) พบว่า สายพันธุ์น้ำดอกไม้มีอัตราในการตกผลึกสูงสุด รองลงมาเป็นเขียวสวย เขียวมรกต และอกร่อง ตามลำดับ ( $p < 0.05$ ) นอกจากนี้อัตราการโตและรูปร่างของผลึกก็มีความแตกต่างกันซึ่งจะเห็นได้จากภาพถ่าย PLM นอกจากนี้การวิเคราะห์ด้วย XRD พบว่า ผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์ มีการผสมของผลึกหลายรูปแบบ (ผลึกรูปแบบ  $\beta'$ , pseudo-  $\beta'$  และ  $\beta$ ) แต่โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปแบบ  $\beta'$  โดยคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ และพฤติกรรมในการตกผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์ มีความใกล้เคียงกับสายพันธุ์แก้วที่เคยมีการทดลองใช้เป็นไขมันในการผสมเพื่อทำเนยโกโก้เลียนแบบ ดังนั้นน้ำมันเมล็ดมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์ อาจจะนำมาใช้ในการผลิตเนยโกโก้เลียนแบบที่มีคุณภาพดีได้

#### ข้อเสนอแนะ

ควรมีการนำน้ำมันเมล็ดมะม่วงแต่ละสายพันธุ์ไปทำการผสมเพื่อทำ CBE เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อไป นอกจากนี้อาจมีการทดลองปัจจัยที่มีด้านอื่น เช่น อายุของมะม่วงและสถานที่ในการปลูก

## บรรณานุกรม

### ภาษาไทย

- กรมการค้าต่างประเทศ. (2550). สถานการณ์สินค้ามะม่วงและผลิตภัณฑ์ [ออนไลน์]. เข้าถึงเมื่อ 23 พฤศจิกายน 2554, เข้าถึงได้จาก [http://www.dft.moc.go.th/the\\_files/\\$\\$16/level4/มะม่วง%20ปี%2550\(ม.ค.-ต.ค.\).doc](http://www.dft.moc.go.th/the_files/$$16/level4/มะม่วง%20ปี%2550(ม.ค.-ต.ค.).doc).
- กรมการค้าต่างประเทศ. (2552). สถานการณ์ผลไม้และผลิตภัณฑ์ (สถิติ ม.ค.-ธ.ค. 2552) [ออนไลน์]. เข้าถึงเมื่อ 23 พฤศจิกายน 2554, เข้าถึงได้จาก [http://www.dft.moc.go.th/level4Frame.asp?sPage=the\\_files/\\$\\$16/level4/สถานการณ์ผลไม้ 2551.doc&level2=2091](http://www.dft.moc.go.th/level4Frame.asp?sPage=the_files/$$16/level4/สถานการณ์ผลไม้%202551.doc&level2=2091).
- กรมวิชาการเกษตร. (2547). ฐานข้อมูลเชื้อพันธุ์พืช: มะม่วง เล่ม 2, น. 44 ใน เอกสารวิชาการลำดับที่ 10/2545. ฝ่ายคุ้มครองพันธุ์พืช กองคุ้มครองพันธุ์พืช กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ กรุงเทพมหานคร.
- กรมส่งเสริมการเกษตร. (2552). รายงานสถานการณ์มะม่วง [ออนไลน์]. เข้าถึงเมื่อ 2 มิถุนายน 2554, เข้าถึงได้จาก [http://agriman.doae.go.th/home/news/15-28%20February%202009/0004\\_mango\(1528%20Februry%202009\).pdf](http://agriman.doae.go.th/home/news/15-28%20February%202009/0004_mango(1528%20Februry%202009).pdf).
- กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2547). สถานการณ์มะม่วง [ออนไลน์]. เข้าถึงเมื่อ 2 มิถุนายน 2554, เข้าถึงได้จาก [http://job.haii.or.th/moac/index.php?method=subject&action=detail&category\\_id=2&subcategory\\_id=4content\\_id=167](http://job.haii.or.th/moac/index.php?method=subject&action=detail&category_id=2&subcategory_id=4content_id=167).
- กลุ่มผู้ปลูกมะม่วงเขียวมรกต อ. บ้านไผ่. (2547). ประวัติที่มาของมะม่วงเขียวมรกต. เอกสารประกอบการอบรมเรื่อง การผลิตมะม่วงเขียวมรกตแบบ GAP 16 กุมภาพันธ์ 2549. ความรู้เรื่องสี [ออนไลน์]. เข้าถึงเมื่อ 19 ธันวาคม 2554, เข้าถึงได้จาก <http://cptd.chandra.ac.th/selfstud/graphics/introcolor1.htm>.
- ชุมชนศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มอ. (2554). หลักการของ HPLC [ออนไลน์]. เข้าถึงเมื่อ 20 พฤศจิกายน 2554, เข้าถึงได้จาก [http://www.sec.psu.ac.th/web-board/?pid=view\\_replies&thread\\_id=1252&forum\\_id=2](http://www.sec.psu.ac.th/web-board/?pid=view_replies&thread_id=1252&forum_id=2)

- ณัฐยาบรรณ. (2547). การใช้เนยโกโก้เทียมทดแทนเนยโกโก้สำหรับผลิตภัณฑ์เลียนแบบ  
ชีสโกแลต. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต เทคโนโลยีอาหาร  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่.
- นิธิยา รัตนานนท์. (2548). วิทยาศาสตร์การอาหารของไขมันและน้ำมัน. กรุงเทพมหานคร : โอ  
เดียนสโตร์.
- ไทยรัฐออนไลน์. (2553). มะม่วงเขียวมรกต พันธุ์ดีลำพูน [ออนไลน์]. เข้าถึงเมื่อ 18 เมษายน 2554,  
เข้าถึงได้จาก <https://www.thairath.co.th/column/edu/paperagriculturist/126185>.
- พิมพ์นิภา กาเผือกงาม. (2552). การผลิตเนยโกโก้เลียนแบบจากน้ำมันเมล็ดมะม่วงและน้ำมันปาล์ม  
มิดแฟรคชั่น. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต เทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัย  
ศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์.
- พิศิษฐ์ นามจันทร์. (2544). เอกสารประกอบการสอน วิชา เคมีคลินิก 3. มหาวิทยาลัยรังสิต.  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ร่วมกับ สมาพันธ์พลเมืองฐานรากแห่งประเทศไทยและนิตยสารเมือง  
ไม่ผล. (2552). สัมมนา เรื่อง ศักยภาพมะม่วงไทยในตลาดโลก [ออนไลน์]. เข้าถึงเมื่อ 2  
มิถุนายน 2554, เข้าถึงได้จาก  
<http://same111.blogspot.com/2009/05/12-2552-830-1700-4.html>.
- วิจิตร วังใน. (2529). มะม่วง. กรุงเทพมหานคร : บริษัท ศรีสมบัติการพิมพ์ จำกัด.
- สุรินทร์ นิลสำราญจิต. 2549. มะม่วงเขียวมรกต: คลินิกเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
[ออนไลน์]. เข้าถึงเมื่อ 2 มิถุนายน 2554, เข้าถึงได้จาก  
<http://www.clinictech.most.go.th>.
- ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง. (2554). X-Ray Diffractometer (XRD) [ออนไลน์]. เข้าถึงเมื่อ 20  
พฤศจิกายน 2554, เข้าถึงได้จาก [http://www.kmitl.ac.th/sisc/XRD/Picture\\_XRD2.htm](http://www.kmitl.ac.th/sisc/XRD/Picture_XRD2.htm).

## ภาษาต่างประเทศ

- Afolabi, I. S. (2008). Chemical qualities of oils from some fresh and market vegetable crops within Kwara State of Nigeria. *Nigerian Society for Experimental Biology*, 20(2), 71-75.
- Ahmadi, L. & Marangoni, A. G. (2009). Functionality and physical properties of interesterified high oleic shortening structured with stearic acid. *Food Chemistry*, 117, 668-673.
- Anwer, T., Bhanger, M. I., Anwer, F., Khan, M., Shahaid, R. & Iqbal, S. (2006). A comparative characterization of different non-conventional oilseeds found in Pakistan. *Journal of the Chemistry Society of Pakistan*, 28(2), 144-148.
- AOAC. (2000). Oils and Fats, pp. 1-69. In H. William, (Eds.). Official Methods of Analysis of AOAC International. 17th ed. AOAC International, Maryland, USA.
- AOCS. (1989). In: D. Firestone, Office Methods and Recommended Practices of the American Oil Chemists' Society, Champaign: American Oil Chemists' Society.
- AOCS. (1997). Iodine Value of Fats and Oils Cyclohexane Method. Office Methods and Recommended Practices of the American Oil Chemists' Society, Champaign: American Oil Chemists' Society.
- AOCS. (2000). In D. Firestone, (Eds.). Official Methods and Recommended Practices of the American Oil Chemists' Society. 6th ed. American Oil Chemists' Society. Champaign, USA.
- Armstrong, W. P. (2004). Friut Called Nuts: Mango, Pistachio & Gum Mastic: Sumac Family (Anacardiaceae) [Online]. Accessed 23 July 2009. Available from <http://waynesword.palomar.edu/ecoph8.htm>.
- Arogba, S. (2000), Mango (*Mangifera indica*) Kernel: Chromatographic Analysis of the Tannin, and Stability Study of the Associated Polyphenol Oxidase Activity, *Journal of Food Composition and Analysis*, 13, 149 – 156.
- Avrami, M. (1940). Kinetics of change phase. II. Transformation-time relations for random distribution of nuclei. *Journal of Chemical and Physical*, 8, 212-224.
- Bannon, C.D., Craske, J.D., Hai, N.T., Harper, N.L. & O'Rourke, K.L. (1982). Analysis of fatty acid methyl esters with accuracy and reliability. *Journal of Chromatography*, 247, 63-69.
- Beckett, S. T. (2000). *The Science of Chocolate*. Cambridge: The Royal Society of Chemistry.

- Belitz, H.D., Grosch, W., & Schieberle, P. (2004). *Food Chemistry*. Germany : Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Buchgraber, M., Uiberth, F., Emons, H., & Anklam, E. (2004). Triacylglycerol profiling by using chromatographic techniques. *Journal of Lipid Science and Technology*, 106, 621-648.
- Caprette, D. R. (2005). Experimental Biosciences: Introduction laboratory-Bios 211 [Online]. Accessed 2 March 2010. Available from <http://www.ruf.rice.edu/~bioslab/methods/microscopy/dfield.html>.
- Czerniak, A. S., Karlovits, G., Lach, M. & Szyk, E. (2005). X-ray diffraction and differential scanning calorimetry studies of  $\beta'$ - $\beta$  transitions in fat mixtures. *Food Chemistry*, 92, 133-141.
- FAOSTAT, (2004), FAOSTAT data [Online]. Accessed 5 February 2010. Available from <http://faostat.fao.org>.
- Ghotra, B. S., Dyal, S. D. & Narine, S. S. (2002). Lipid shortenings: a review. *Food Research International*, 35, 1015-1048.
- Golden, D. C., Ming, D. W. & Morris, R. V. (2010). Spherulitic growth of hematite under hydrothermal conditions: Insights into the growth mechanism of hematite spherules at Meridiani planum, Mars. *Lunar and Planetary Science Conference: NASA-JSC*.
- Hartel, R.W. (2001). Crystallization in food. Aspen Publishers Inc. Maryland.
- Hagemann, J. W. (1988). Thermal behavior and polymorphism of acylglycerides. *Crystallization and Polymorphism of Fats and Fatty Acids*. New York : Marcel Dekker.
- Himawan, C., Starov, V.M. & Stapley, A. G. F. (2006). Thermodynamic and kinetic aspects of fat crystallization. *Advance in Colloid and Interface Science*, 122, 3-33.
- Holcapek, M., Lísá, M., Jandera, P., & Kabátová, N. (2005). Quantitation of triacylglycerols in plant oils using HPLC with APCI-MS, evaporative light-scattering, and UV detection. *Journal of Separation Science*, 28, 1315-1333.
- Howitt, C. A., & Pogson, B. J. (2006). Carotenoid accumulation and function in seeds and non-green tissues. *Plant, Cell and Environment*, 29, 435-445.
- Khanna, Y.P. and Taylor, J. (1988). Comments and recommendations on the use of the Avrami equation for physico-chemical kinetics. *Polymer Engineering and Science*, 28, 1042-1045.

- Kirk, J.T. & Tilney-Bassett, R.A. (1978). Proplastids, etioplasts, amyloplasts, chromoplasts and other plastids. In *The Plastids: Their Chemistry, Structure, Growth and Inheritance*. (pp. 217-230). Elsevier/North Holland Biomedical Press, Amsterdam, Holland.
- Knothe, G. (2002). Structure Iodines in FA Chemistry. How Relevant Is the Iodine Value?. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 70 (9), 847-854.
- Koyano, T. & Sato, K. (2002). Physical Properties of Fats in Food. In: K. K. Rajah, *Fats in Food Technology* (pp.1-29). Sheffield: Sheffield Academic Press.
- Lakshminarayana, G., Chandrasekhara-Rao, T., & Ramalingaswamy, P.A., (1983). Varietal variations in content characteristics and composition of mango seed and fat. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 60 (1), 12-13.
- Lipp, M. & Anklem, E. (1998). Review of cocoa butter and alternative fats for use in chocolate. Part A. Compositional data. *Food Chemistry*. 62, 73-97.
- Lidefelt, J.O. (2007). Vegetable oils and fats [Online]. Accessed 14 May 2010. Available from <http://www.annaochanna.se/pdf/Vegetabilisk%20Handbok.pdf>.
- Marangoni, A.G., & McGauley, S.E. (2003). Relationship between crystallization behavior and structure in cocoa butter. *Crystal Growth & Design*, 3, 95-108.
- Marty, S., & Marangoni, A.G. (2009). Effect of cocoa butter origin, tempering procedure, and structure on oil migration kinetic. *Crystal Growth & Design*. 9(10), 4415-4423.
- Microscopy Berkeley. (2011). Polarized Light Microscope [Online]. Accessed 20 November 2011. Available from <http://microscopy.berkeley.edu/courses/tlm/plm/plm.html>.
- Minific, B. W. (1989). *Chocolate, Cocoa, and Confectionary*. New York : Science and Technology.
- Narashima-Char, B. L., Reddy, B. R., & Thirumala-Rao, S.D. (1977). Processing mango stones for fat. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 54, 494-495.
- Narine, S. S. & Humphrey, K. L. (2004). A comparison of lipid shortening functionality as a function of molecule ensemble and shear: microstructure, polymorphism, solid fat content and texture. *Food Research International*, 32, 227-248.
- Narine, S. S. & Marangoni, A. G. (1999). Relating structure of fat crystal networks to mechanical properties : a review. *Food Research International*. 32, 227-248.

- Osman, S.M. (2007). New sources of fats and oils [Online]. Accessed 5 June 2009. Available from <http://www.google.com/books?id=ZN5IWPGqhwUC&lpg=PA129&ots=IPrQoPvwCk&dq=processing%20mango%20stones%20for%20fat&lr=&hl=th&pg=PP1>
- Pott, I., Breithaupt, D.E. & Carle, R. (2003). Detection of unusual carotenoid esters in fresh mango (*Mangifera indica* L. cv. 'Kent'). *Phytochemistry*, 64, 825–829.
- PORIM. (1995). Palm Oil Research Institute of Malaysia (PORIM) Test Method. Bangi.
- Research Interests. (2011). Biological soft materials [Online]. Accessed 29 June 2011. Available from [http://home.hiroshima-u.ac.jp/fdphys/english/research\\_interests/index.html](http://home.hiroshima-u.ac.jp/fdphys/english/research_interests/index.html)
- Rombaut, R., Clercq, N.D., Foubert, I., & Dewettinck, K. (2009). Triacylglycerol Analysis of Fats and Oils by Evaporative Light Scattering Detection. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 86, 19-25.
- Sato, K., Arishima, T., Wang, Z. H., Ojima, K., Sagi, N., & Mori, H. (1989). Polymorphism of POP and SOS. I. *Occurrence and polymorphic transformation*. Illinois: AOCS Press.
- Sato, K. (1996). Polymorphism of pure triacylglycerols and natural fats. *Advances in Applied Lipid Research*. Greenwich: JAI Press.
- Sato, K. (2001). Molecular Aspects in Fat Polymorphism. *Crystallization and Solidification Properties of Lipid*. Illinois: AOCS Press.
- Sato, K. & Ueno, S. (2005). Polymorphism in Fats and Oils, in *Bailey's Industrial Oil and Fat Products* (pp. 77-120), edited by F. Shahidi. John Wiley & Sons, Inc.
- Sharples, A. (1966). Overall Kinetics of Crystallization, in *Introduction to Polymer Crystallization* (pp. 44–59), edited by A. Sharples, Edward Arnold Ltd., London.
- Sichina, W.J., (1998). Autocatalyzed Epoxy Cure Prediction Using Isothermal DSC Kinetics. *Application Brief Paper TA93*. TA Instrument, Inc. New Castle, DE, USA.
- Sigma-Aldrich, (2011). Fatty Acid/FAME Application Guide [Online]. Accessed 5 December 2011. Available from [http://www.sigmaaldrich.com/etc/medialib/docs/Supelco/General\\_Information/t408126.Par.0001.File.tmp/t408126.pdf](http://www.sigmaaldrich.com/etc/medialib/docs/Supelco/General_Information/t408126.Par.0001.File.tmp/t408126.pdf).
- Solís-Fuentes, J. A., & Durán-de-Bazúa, M. C. (2003). Characterization of eutectic mixtures in different natural fat blends by thermal analysis. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 105, 742-748.

- Solís-Fuentes, J. A., & Durán-de-Bazúa, M. C. (2004). Mango seed uses: Thermal behaviour of mango seed almond fat and its mixtures with cocoa butter. *Bioresource Technology*, 92, 71–78.
- Solís-Fuentes, J. A., & Durán-de-Bazúa, M. C. (2005). Determination of the predominant polymorphic form of mango (*Mangifera indica*) almond fat by differential scanning calorimetry and X-ray diffraction. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 107, 395–401.
- Solís-Fuentes, J. A., & Durán-de-Bazúa, M. C. (2005). Recovery fats and oils from agroindustrial wastes and by-products for use in industrial applications. *Journal of Applied Science*, 5, 983-987.
- Solís-Fuentes, J. A., Hernández, M.R., & Durán-de-Bazúa, M. C. (2007). Isothermal crystallization kinetics of mango (*Mangifera indica*) almond seed fat. *Journal of Applied Science*, 7(11), 1538-1542.
- Sonwai, S. and Amckley, M.R. (2006). The Effect of Shear on Crystallization of Cocoa Butter. *Journal of the American Oil Chemist Society*. 83, 583-596.
- Stewart, I. M. & Timms, R. E. (2002). Fat for Chocolate and Sugar Confectionery. In: K. K. Rajah, *Fat in Food Technology*. (pp.159-191). Sheffield: Sheffield Academic Press.
- Takeuchi, M., Ueno, S., Flöter, E., & Sato, K. (2002). Binary phase behavior of 1,3-Distearoyl-2-oleoyl-*sn*-glycerol (SOS) and 1,3-Distearoyl-2-linoleoyl-*sn*-glycerol (SLS). *Journal of the American Oil Chemists Society*, 79(7), 627-632.
- Talbot, G. (1999). Vegetable Fats. In S.T.Beckett, *In industrial Chocolate Manufacture and Use*. (pp. 307-322) Oxford : Blackie Academic & Professional.
- Tang, D., & Marangoni, A. G. (2006). Microstructure and fractal analysis of fat crystal networks. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 85(5), 377-388.
- Timms, R. E. (1994). Physical Chemistry of Fats. In D. P. J. Moran & K. K. Rajah, *Fats in Food Products*. (pp. 1-28). London: Blackie Academic & Professional.
- Undergraduate Instrumentation Center. (2011). Varian CP-3800 GC-FID: Gas Chromatography [Online]. Accessed 20 November 2011. Available from <http://www.chem.unl.edu/uic/gc-fid.shtml>.

- Undurraga, D., Markovits, A. & Erazo, S. (2001). Cocoa butter equivalent through enzymic interesterification of palm oil mid fraction. *Journal of Process Biochemistry*, 36(10), 933-939.
- Van-Pee, W., Boni, L., Foma, M., Hoylaerts, M., & Hendriks, A. (1980). Positional distribution of the fatty acids in the triglycerides of mango (*Mangifera indica* L.) kernel fat. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 57, 243-245.
- Wikipedia encyclopedia. (2009). Slip melting point [Online]. Accessed 27 August 2009. Available from [http://en.wikipedia.org/wiki/Slip\\_melting\\_point](http://en.wikipedia.org/wiki/Slip_melting_point).
- Wikipedia encyclopedia. (2010). Gas chromatography [Online]. Accessed 27 December 2010. Available from [http://en.wikipedia.org/wiki/Gas\\_chromatography](http://en.wikipedia.org/wiki/Gas_chromatography).
- Wikipedia encyclopedia. (2011a). Dark field microscopy [Online]. Accessed 27 November 2011. Available from [http://en.wikipedia.org/wiki/Dark\\_field\\_microscopy](http://en.wikipedia.org/wiki/Dark_field_microscopy).
- Wikipedia encyclopedia. (2011b). Lab color space [Online]. Accessed 27 November 2011. Available from [http://en.wikipedia.org/wiki/Lab\\_color\\_space](http://en.wikipedia.org/wiki/Lab_color_space).
- Wright, A.J., Hartel, R.W., Narine, S.S., & Marangoni, A.G. (2000). The effect of minor component on milk fat crystallization. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 77(5), 463-475.
- Yassine Mrabet. (2011). HPLC apparatus [Online]. Accessed 20 November 2011. Available from [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:HPLC\\_apparatus.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:HPLC_apparatus.svg).
- Yona, J., Sato K., Kaneko F., Small D. M., & Kodali D. R. (1999). Structural analyses of polymorphic transitions of sn-1,3-distearoyl-2-oleoylglycerol (SOS) and sn-1,3-dioleoyl-2-stearoylglycerol (OSO): assessment on steric hindrance of unsaturated and saturated acyl chain interactions. *Journal of Lipid Research*, 40, 140-151.
- Zaidul, I.S.M., Norulaini, N.A., Mohd Omar, A.K. & Smith Jr, R.L. (2007). Blending of Supercritical carbon dioxide (SC-CO<sub>2</sub>) extracted palm kernel oil fraction and palm oil to obtained cocoa butter replacers, *Journal of Food Engineering*, 78, 1397-1409.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การให้น้ำมันให้บริสุทธิ์ตามวิธีของ Wesson method

### การให้น้ำมันบริสุทธิ์ตามวิธีของ Wesson method (Mehlenbacher, 1970)

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



เติม 14% โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 ml : 1 g ของน้ำมัน



คนอย่างรุนแรงเป็นเวลา 3 นาที



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



ตั้งทิ้งไว้ให้เกิดการแยกชั้น โดยชั้นบนเป็นชั้นของ ether ที่มีน้ำมันละลายอยู่



นำชั้นบนไประเหย ether ด้วยเครื่อง rotavapour



ส่วนที่เหลือทำการสกัดซ้ำ โดยการเติม ether แล้วตั้งทิ้งไว้เพื่อแยกนำส่วนบนไประเหย ether ออก



เก็บน้ำมันที่ได้ที่อุณหภูมิ 5 °C โดยไม่ให้โดนแสงจนกว่าจะนำไปวิเคราะห์

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

ภาคผนวก ข

การเตรียมเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน

### การเตรียมเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน

#### (Preparation of methyl esters; Boron trifluoride method)

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



ต่อเข้ากับ condenser และ reflux จนกระทั่งหยดน้ำมันหายไป 10 นาที



เติม  $\text{BF}_3$  7 ml ผ่าน condenser ต้มต่อ 2 นาที



เติม heptane 5 ml ผ่าน condenser ต้มต่อ 1 นาทีหรือนานกว่า



ทิ้งให้เย็นเพื่อให้เกิดการควบแน่น



เติมสารละลายเกลืออิ่มตัวประมาณ 15 ml



ปิด flask และเขย่าอย่างรุนแรงเป็นเวลา 15 วินาที ขณะที่สารละลายยังอุ่นอยู่



เติมสารละลายเกลืออิ่มตัวจนชั้นของ heptane ขึ้นมาที่คอ flask



เปิดสารละลายส่วนบนไปใส่ glass stopper test tube



เติม anhydrous  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  เล็กน้อยเพื่อกำจัด  $\text{H}_2\text{O}$



ถ้าจำเป็นให้เจือจางสารละลายให้มีความเข้มข้น 5-10% สำหรับ GC

ที่มา : AOAC (2000)

ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์ค่าสปอนนิฟเคชันตามวิธีของ POIM test method

### การวิเคราะห์ค่า Saponification Value ตามวิธีของ POIM test method no. p 3.1, 1995

ชั่งน้ำมันตัวอย่าง 2 g ให้ทราบค่าน้ำหนักแน่นอน ใส่ใน flask ขนาด 250 ml



ปิเปตสารละลายแอลกอฮอล์โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 25 ml ใส่ลงใน flask ที่มีตัวอย่างอยู่



ต่อเข้ากับ reflux condenser reflux สารละลายใน flask 1 ชั่วโมง (เขย่าเป็นระยะ) ใน boiling

water-bath



เติมสารละลาย 0.1% phenolphthalein ลงไป 0.5 ml



ไทเทรตกับ 0.5 N HCl จนกระทั่งเกิดสีชมพูอ่อน

#### การคำนวณ

$$Spv = \frac{(B - A)}{W} \times N \times 56.1$$

$A$  = ปริมาณของ 0.5 N HCl ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่าง (ml)

$B$  = ปริมาณของ 0.5 N HCl ที่ใช้ในการไทเทรต Blank (ml)

$W$  = น้ำหนักของตัวอย่าง (g)

$N$  = ความเข้มข้นของ HCl (N)

56.1 = น้ำหนักโมเลกุลของ KOH

Saponification Value หน่วยเป็น mg/g KOH

#### การเตรียมสารละลายแอลกอฮอล์โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

ชั่ง KOH 35-49 g ละลายในน้ำกลั่น 20 ml แล้วเติม ethanol (95%) ให้ครบ 1000 ml ถ้าสารละลายที่ได้ข้น ตั้งทิ้งไว้แล้วเอาส่วนที่ใสออกมาใช้

ภาคผนวก ง

การวิเคราะห์ค่า Iodine value ตามรายงานของ AOCS official method

### การหาค่า Iodine value ตามรายงานของ AOCS official method Cd1d-92

ชั่งตัวอย่างน้ำมัน 0.2 g ใส่ใน Erlenmeyer flask ขนาด 500 ml



ละลายใน 15 ml cyclohexane/acetic acid (1:1 v/v)



เติมสารละลาย Wijs 25 ml



ผสมให้เข้ากัน จากนั้นนำไปเก็บในที่มืดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง



หยุดปฏิกิริยาด้วยการเติมสารละลาย KI 20 ml และน้ำกลั่น 150 ml ผสมให้เข้ากัน



เติมน้ำแป้ง (1%) 1 ml



ไตเตรตกับสารละลาย 0.1 N sodium thiosulfate ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) จนกระทั่งไม่มีสี

#### การคำนวณ

$$IV = [(V_1 - V_2) \times N \times 12.69] / M$$

$V_1$  = ปริมาณของ 0.1 N  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  ที่ใช้ในการไตเตรต blank (ml)

$V_2$  = ปริมาณของ 0.1 N  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  ที่ใช้ในการไตเตรตตัวอย่าง (ml)

$N$  = Normality ของสารละลาย  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$

$M$  = น้ำหนักของตัวอย่าง (g)

ที่มา : AOCS (2009)

ภาคผนวก จ

การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดโดยประยุกต์ใช้วิธีของ AOCS

### การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด (Acid Value; A.V.) โดยประยุกต์ใช้วิธีของ AOCS

ผสม diethylether 25 ml รวมกับ ethanol 25 ml ให้เป็นตัวทำละลายผสม หรือใช้ ethanol (95%) 50 ml เพียงชนิดเดียวก็ได้

↓  
เติมสารละลาย 0.1% phenolphthalein ลงไป 0.5 ml

↓  
ค่อยๆ ไตเตรตตัวทำละลายผสมให้เป็นกลางด้วยสารละลาย 0.1 M KOH (ใช้ต่างประมาณ 2-3 หยด)

↓  
ชั่งน้ำมันตัวอย่าง 2 g (ไขมัน 10 g) ให้ทราบค่าน้ำหนักแน่นอน

↓  
ละลายน้ำมันตัวอย่างในตัวทำละลายผสมที่เป็นกลาง

↓  
ไตเตรตด้วยสารละลาย 0.1 M KOH จนกระทั่งเปลี่ยนเป็นสีชมพู นานกว่า 15 วินาที

หมายเหตุ : ผลการไตเตรตไม่ควรใช้สารละลายต่างเกิน 10 ml ถ้ามากกว่า 10 ml ให้ทดลองใหม่โดยชั่งตัวอย่างให้น้อยลง

#### การคำนวณ

$$Acid\ Value = \frac{V \times 5.61}{W}$$

$V$  = ปริมาณของ 0.1 M KOH ที่ใช้ในการไตเตรตตัวอย่าง (ml)

$W$  = น้ำหนักของตัวอย่าง (g)

1 ml ของ 0.1 M KOH = 5.61 mg KOH

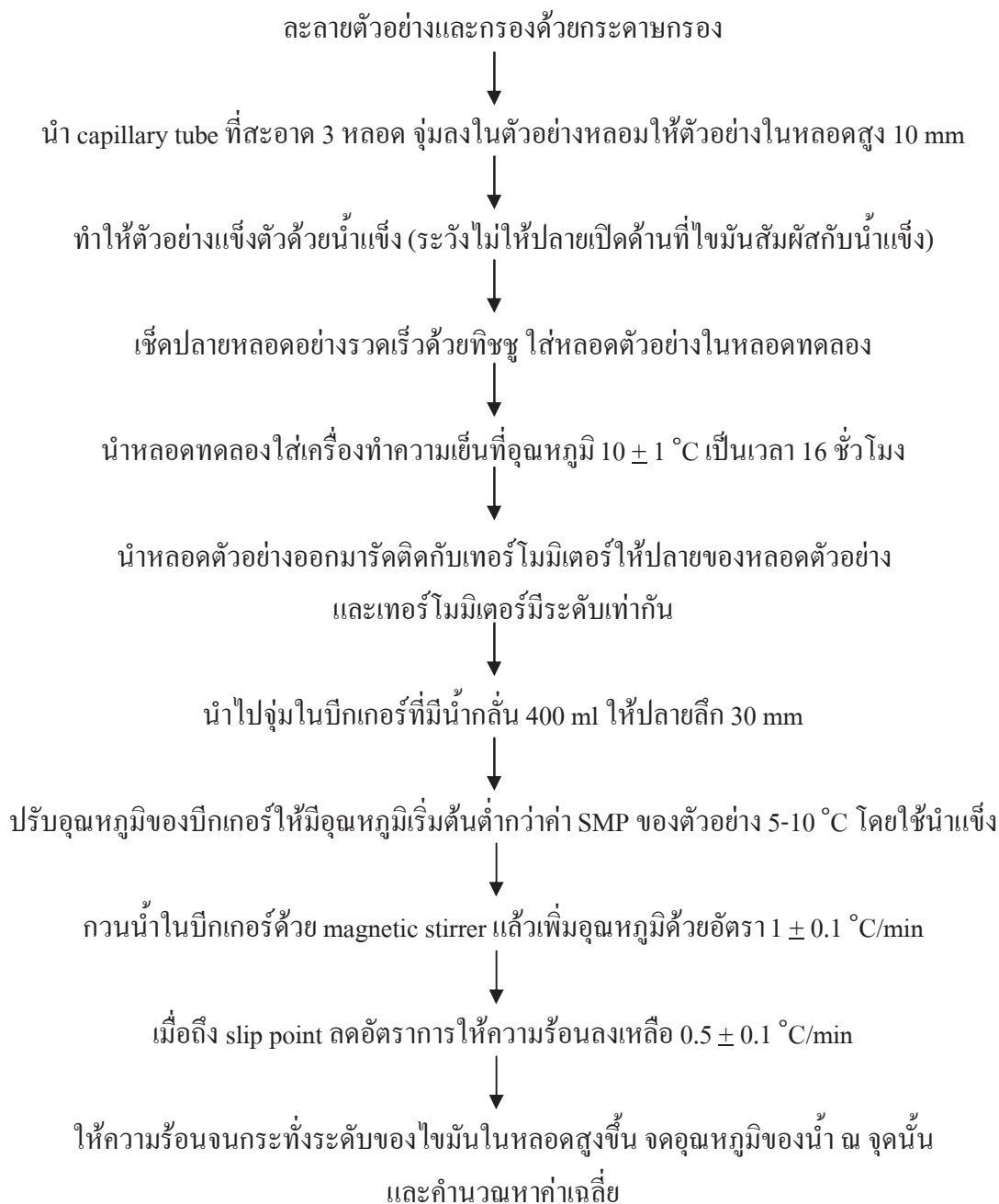
ที่มา : AOCS (1989)

ภาคผนวก จ

การหาค่า Slip melting Point (SMP)

### การหาค่า Slip melting Point (SMP)

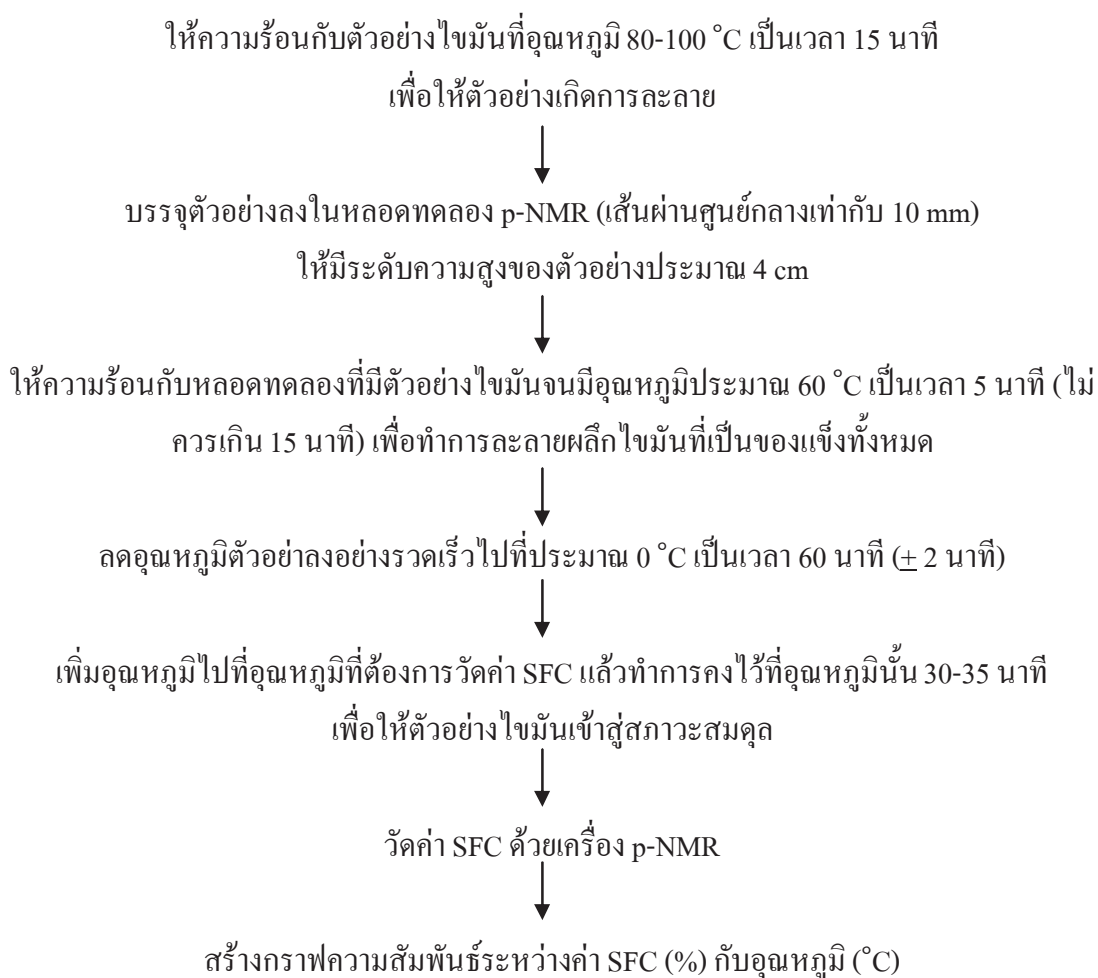
เป็นการหาอุณหภูมิที่ตัวอย่างเกิดการหลอมเหลวอย่างรวดเร็วเมื่อได้รับความร้อน แล้วเกิดการเคลื่อนที่ขึ้นภายใน capillary tube ซึ่งเป็นหลอดสำหรับบรรจุตัวอย่าง โดยขั้นตอนตาม PORIM test method no. p 4.2, 1995 (Zaidul และคณะ, 2007) ดังนี้



ภาคผนวก ข  
การวิเคราะห์ค่า SFC ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ p-NMR

## การวิเคราะห์ค่า SFC ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ pulse-Nuclear Magnetic Resonance หรือ p-NMR

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



ที่มา : AOCS (2000)

ภาคผนวก ข

การศึกษาคุณสมบัติทางความร้อนของน้ำมันด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter

**การศึกษาคุณสมบัติทางความร้อนของน้ำมันด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter** ทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของการตกผลึกและการหลอมเหลวของน้ำมันจากมะม่วงแต่ละสายพันธุ์ที่สกัดได้ โดยใช้เครื่อง differential scanning calorimeter (DSC) รุ่น DSC 8000 PerkinElmer ตามกรรมวิธีของ AOCS (2000) ดังนี้

ชั่งตัวอย่างใส่ liquid aluminum pan สำหรับ DSC ประมาณ 5-6 mg



ปิดฝา pan ให้สนิท จากนั้นนำไปใส่เครื่อง DSC



ตั้งค่า temperature program สำหรับการวิเคราะห์

(Step 1: ให้ความร้อนจากอุณหภูมิ 20 °C ไปจนถึง 80 °C ด้วยอัตรา 30 °C/นาที

Step 2: คงไว้ที่ 80 °C นาน 10 นาที

Step 3: ลดอุณหภูมิลงจาก 80 °C จนถึง -40 °C ด้วยอัตรา 5 °C/นาที

Step 4: คงไว้ที่ -40 °C นาน 30 นาที

Step 5: ให้ความร้อนจากอุณหภูมิ -40 °C ไปจนถึง 80 °C ด้วยอัตรา 5 °C/นาที)

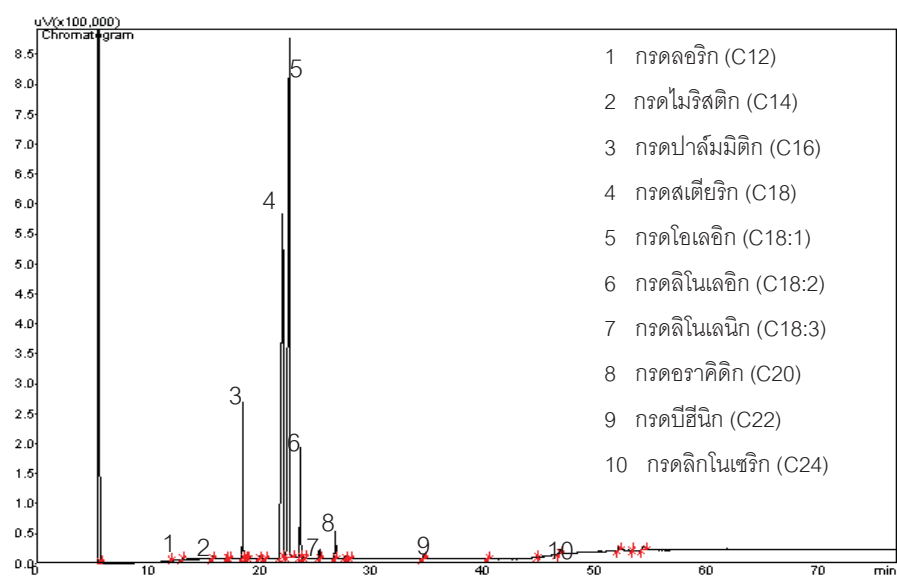


นำโครมาโตแกรมที่ได้มาหาค่าเอนทัลปี อุณหภูมิในการตกผลึก และอุณหภูมิการหลอมเหลว

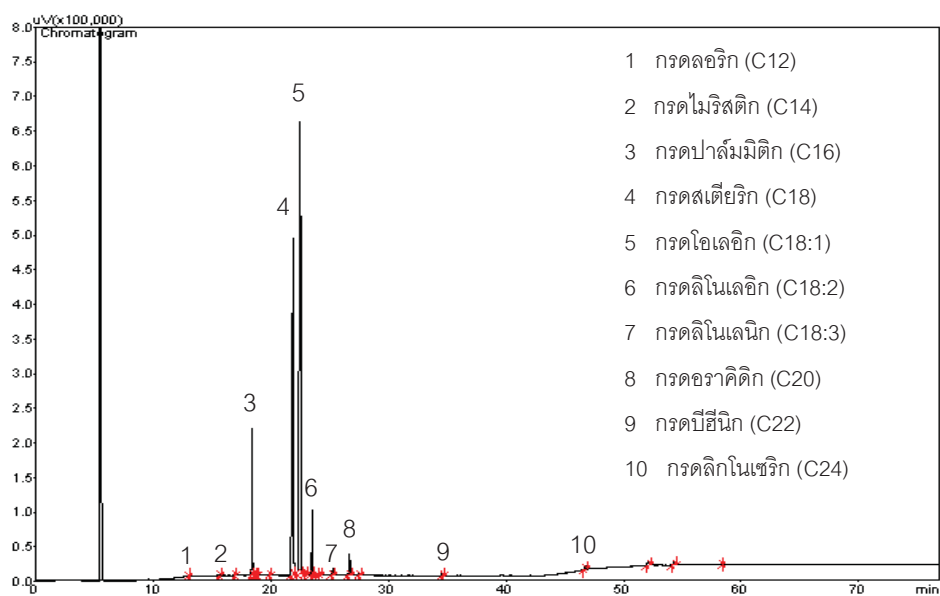
ภาคผนวก ฅ

โครมาโตแกรมในการวิเคราะห์กรดไขมันของน้ำมันเมล็ดมะม่วง

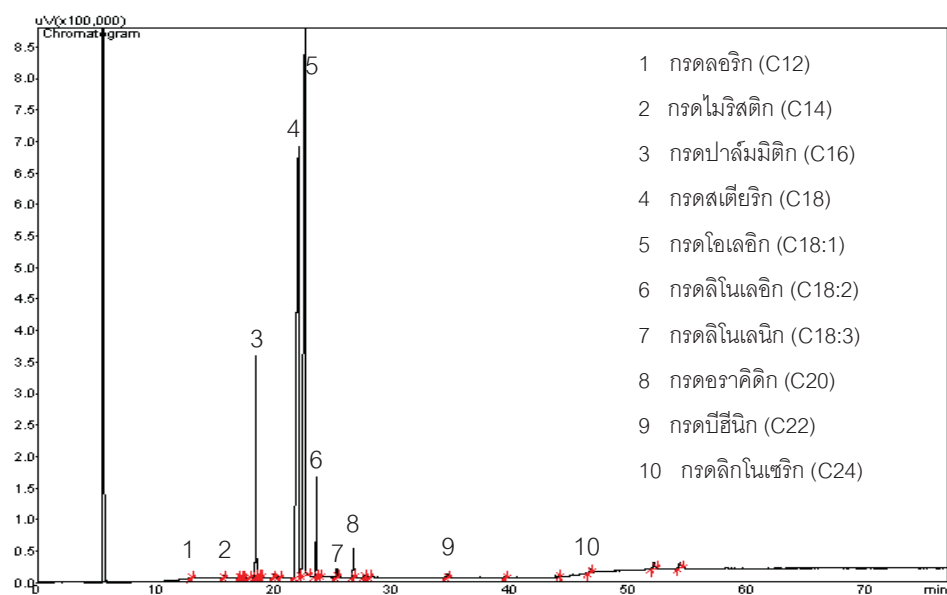
### โครมาโตแกรมของน้ำมันจากเมล็ดมะม่วง



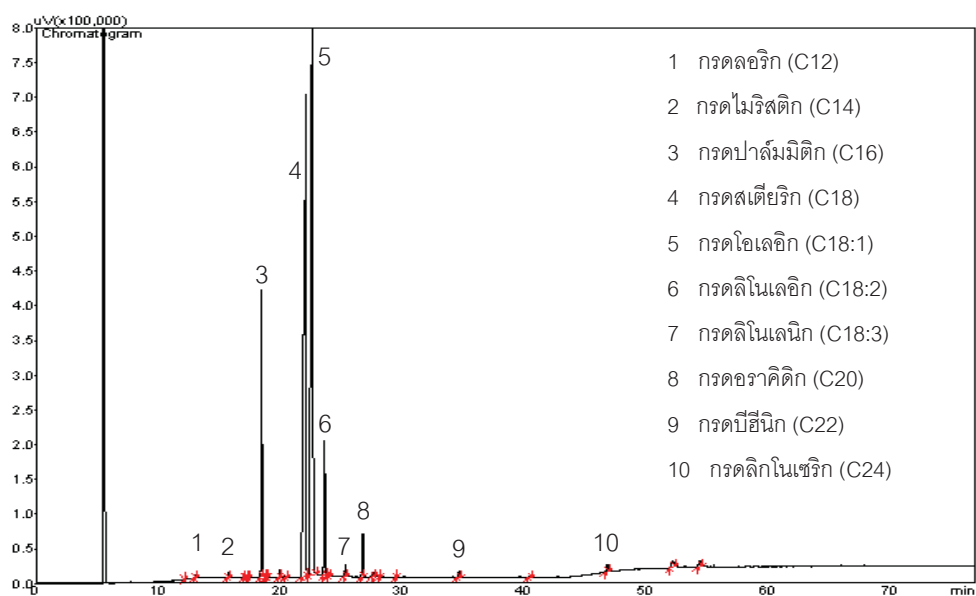
ภาพที่ 40 โครมาโตแกรมของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันจากเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์  
เขียวมรกต



ภาพที่ 41 โครมาโตแกรมของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันจากเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์  
เขียวเสวย



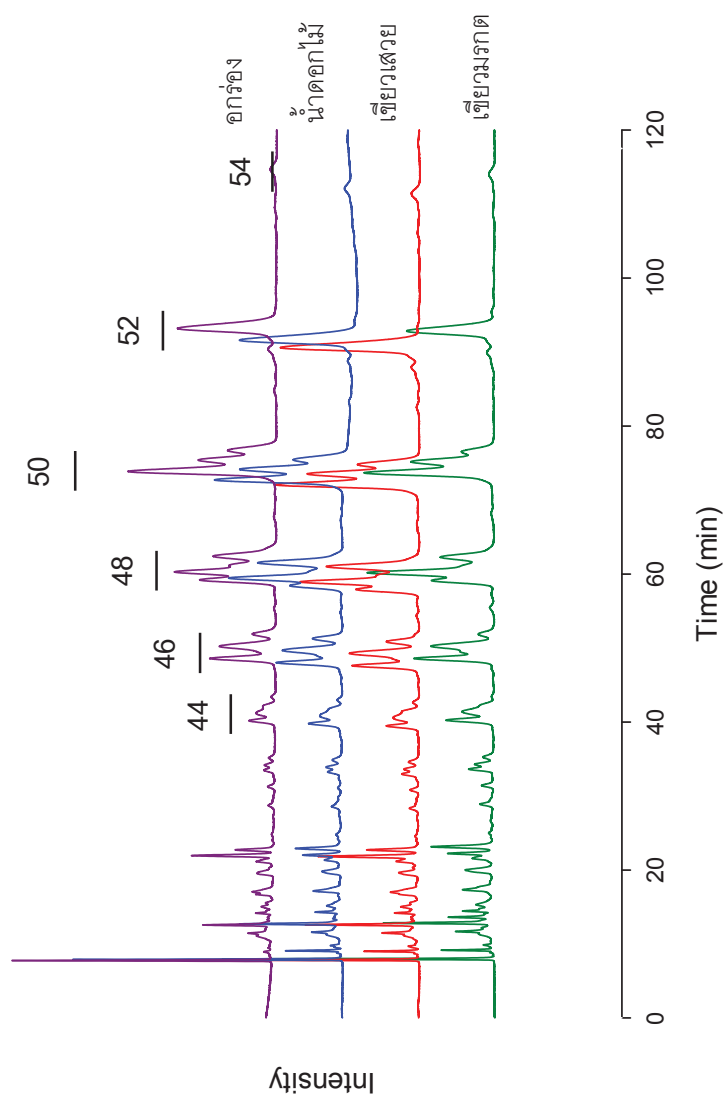
ภาพที่ 42 โครมาโตแกรมของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันจากเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์ น้ำดอกไม้



ภาพที่ 43 โครมาโตแกรมของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันจากเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์ อกร่อง

ภาคผนวก ญ

โครมาโตแกรมในการวิเคราะห์ไตรกลีเซอไรด์ของน้ำมันเมล็ดมะม่วง



ภาพที่ 44 โครมาโตแกรมของไตรกลีเซอไรด์ของน้ำมันเมล็ดมะม่วง 4 สายพันธุ์ จากเครื่อง HPLC-DAD ที่ความยาวคลื่น 210 นาโนเมตร

หมายเหตุ แกน y เป็น ความเข้มข้นที่พบ

แกน x เป็น เวลา (นาที)

ตัวเลข 44, 46, 48, 50, 52 และ 54 หมายถึง equivalent carbon numbers (ECN)

ภาคผนวก ก

ตารางแสดงร้อยละของไตรกลีเซอไรด์ที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสาย 4 พันธุ์

ตารางที่ 15 ร้อยละของไตรกลีเซอไรด์ที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันเมล็ดมะม่วง 4 สายพันธุ์

| ชนิดของ<br>ไตรกลีเซอไรด์ | ร้อยละของไตรกลีเซอไรด์ที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์ |                 |                           |               |
|--------------------------|----------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------|---------------|
|                          | ไขมันกรด                                                             | ไขมันไม่อิ่มตัว | ไขมันไม่อิ่มตัวไม่อิ่มตัว | ไขมันอิ่มตัว  |
| OLL                      | 3.34±0.05 a                                                          | 1.82±0.05 c     | 2.33±0.10 b               | 1.81±0.01 c   |
| OLO                      | 6.55±0.09 a                                                          | 4.68±0.01 d     | 5.17±0.06 c               | 5.36±0.08 b   |
| SLL                      | 1.69±0.14 a                                                          | 1.05±0.09 b     | 1.09±0.07 b               | 0.77±0.08 c   |
| OLP                      | 6.75±0.13 a                                                          | 6.10±0.08 b     | 5.84±0.24 bc              | 5.82±0.06 c   |
| PLP+SLLnP                | 1.55±0.08 d                                                          | 2.42±0.03 b     | 2.53±0.03 a               | 2.24±0.02 c   |
| OOO                      | 5.26±0.14 b                                                          | 4.45±0.04 c     | 4.08±0.07 d               | 6.62±0.04 a   |
| OOP                      | 13.00±0.40 a                                                         | 9.93±0.03 c     | 10.79±0.20 b              | 10.05±0.11 c  |
| POP                      | 6.39±0.07 d                                                          | 8.99±0.02 b     | 9.29±0.14 a               | 7.58±0.03 c   |
| SOO                      | 15.85±0.26 b                                                         | 14.09±0.14 c    | 14.28±0.17 c              | 17.69±0.22 a  |
| SLS                      | 9.95±0.24 c                                                          | 10.75±0.10 b    | 11.55±0.22 a              | 8.93±0.17 d   |
| POS                      | 3.68±0.05 c                                                          | 5.86±0.06 a     | 5.65±0.10 b               | 5.56±0.05 b   |
| AOO                      | 1.00±0.13 ab                                                         | 0.93±0.02 b     | 0.71±0.07 c               | 1.11±0.02 a   |
| ALS+AOP                  | 0.64±0.06 a                                                          | 0.68±0.04 a     | 0.62±0.06 a               | 0.62±0.03 a   |
| SOS                      | 12.45±0.12 d                                                         | 16.55±0.11 a    | 15.64±0.08 b              | 14.25±0.14 c  |
| AOS                      | 1.03±0.12 b                                                          | 1.25±0.08 a     | 1.03±0.10 b               | 1.11±0.06 ab  |
| อื่นๆ                    | 10.86±0.43 a                                                         | 10.45±0.30 ab   | 9.38±0.47 b               | 10.48±0.14 ab |

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

ภาคผนวก ก

ตารางแสดงค่า SCF ของน้ำมันเมล็ดมะม่วง 4 สายพันธุ์ ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 15-40°C

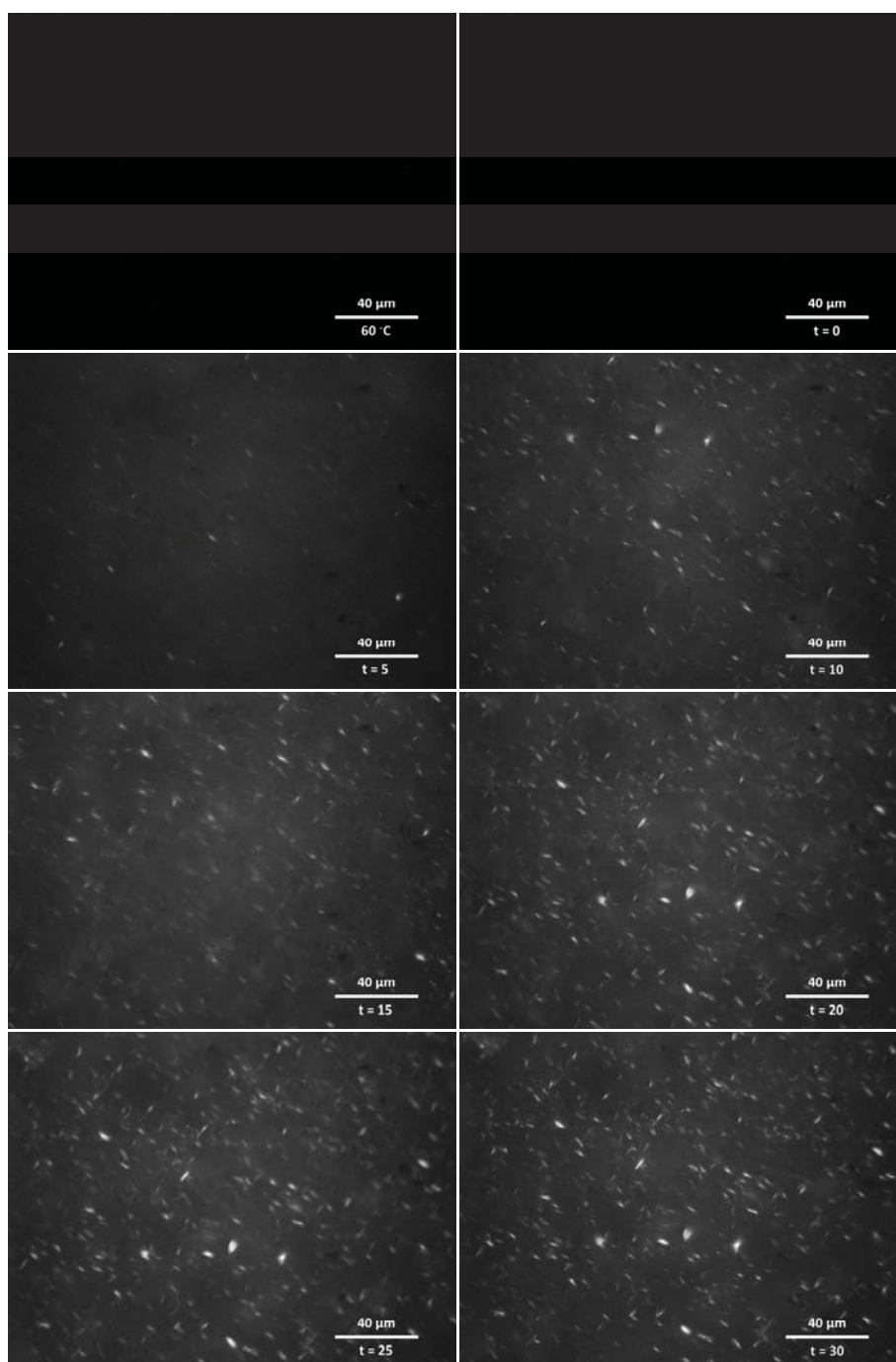
ตารางที่ 16 ค่า SCF ของน้ำมันเมล็ดมะม่วง 4 สายพันธุ์ ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 15-40°C

| อุณหภูมิ (°C) | ค่า SCF (%) ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์ |          |           |          |           |         |       |         |
|---------------|-------------------------------------------|----------|-----------|----------|-----------|---------|-------|---------|
|               | เขียวมรกต                                 |          | เขียวเสวย |          | น้ำดอกไม้ |         | กร่อง |         |
| 15.0          | 52.06                                     | ± 0.26c  | 59.22     | ± 0.35b  | 63.09     | ± 0.03a | 50.46 | ± 0.48d |
| 17.5          | 47.42                                     | ± 0.48c  | 54.96     | ± 0.18b  | 58.11     | ± 0.23a | 45.13 | ± 0.08d |
| 20.0          | 40.73                                     | ± 0.05c  | 48.29     | ± 0.29b  | 52.24     | ± 0.17a | 37.46 | ± 0.42d |
| 22.5          | 32.85                                     | ± 0.51c  | 41.33     | ± 0.19b  | 45.64     | ± 0.11a | 28.60 | ± 0.11d |
| 25.0          | 22.83                                     | ± 0.12c  | 30.58     | ± 0.24b  | 34.72     | ± 0.11a | 18.76 | ± 0.11d |
| 27.5          | 11.54                                     | ± 0.12c  | 18.84     | ± 0.24b  | 23.37     | ± 0.13a | 8.08  | ± 0.30d |
| 30.0          | 1.46                                      | ± 0.02c  | 4.16      | ± 0.12b  | 8.31      | ± 0.14a | 1.50  | ± 0.11c |
| 32.0          | 0.46                                      | ± 0.07a  | 0.42      | ± 0.04a  | 0.58      | ± 0.02a | 0.59  | ± 0.17a |
| 34.0          | 0.25                                      | ± 0.03ab | 0.21      | ± 0.09b  | 0.34      | ± 0.07a | 0.20  | ± 0.07b |
| 36.0          | 0.20                                      | ± 0.07ab | 0.25      | ± 0.07ab | 0.27      | ± 0.06a | 0.13  | ± 0.05b |
| 38.0          | 0.26                                      | ± 0.03a  | 0.16      | ± 0.03b  | 0.27      | ± 0.01a | 0.16  | ± 0.01b |
| 40.0          | 0.13                                      | ± 0.03a  | 0.15      | ± 0.02a  | 0.16      | ± 0.02a | 0.13  | ± 0.02a |

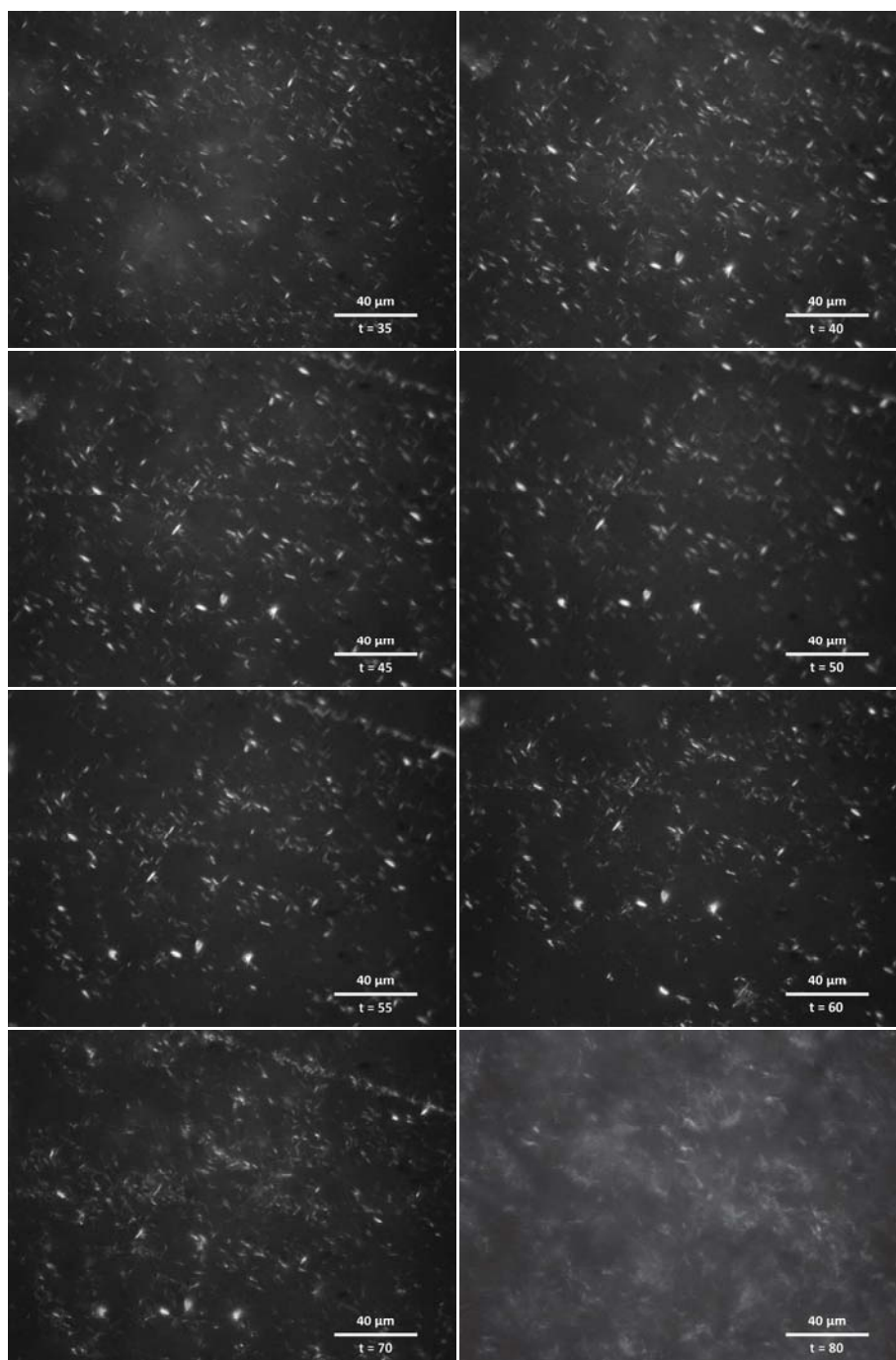
หมายเหตุ ตัวอักษร a, b, c หมายถึง ในแถวเดียวกันตัวอักษรเดียวกันไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ )

ภาคผนวก จ

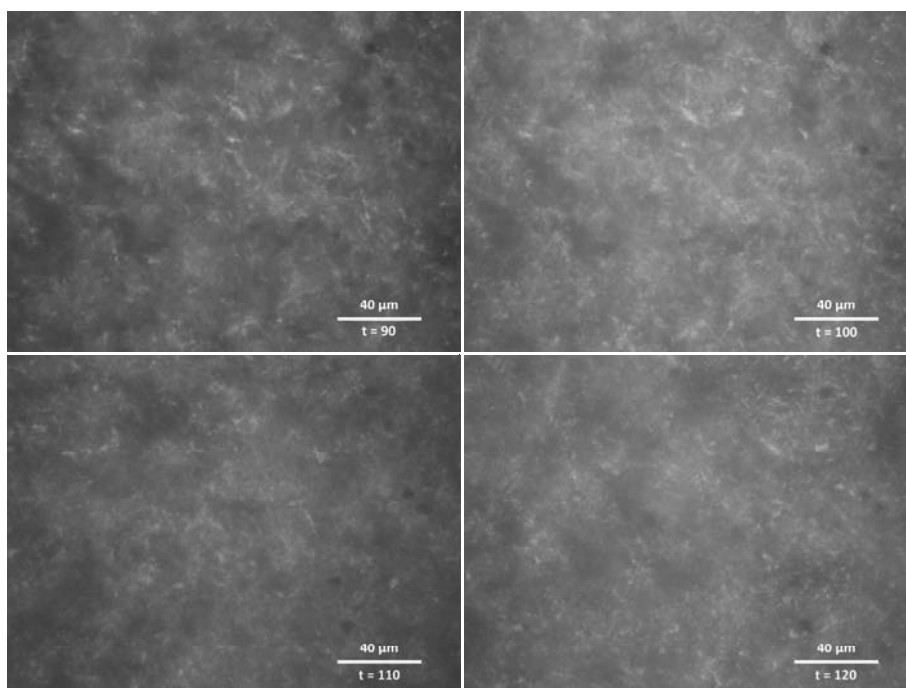
ภาพถ่ายพฤติกรรมการตกผลึกของไขมันจากกล้องจุลทรรศน์



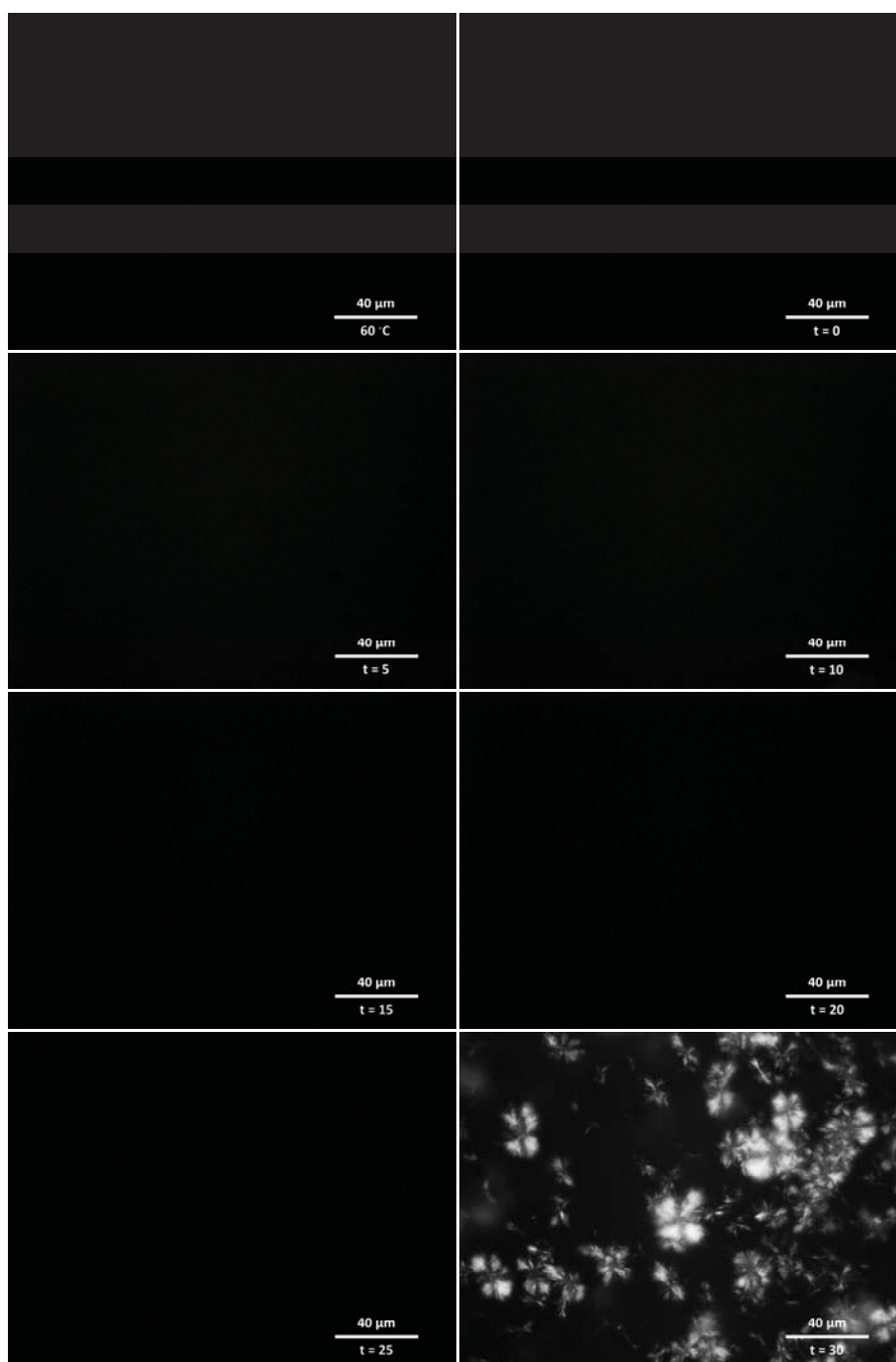
ภาพที่ 45 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียว  
มรกต ตั้งแต่เวลาที่ 0-30 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้อง  
เท่ากับ 400 เท่า



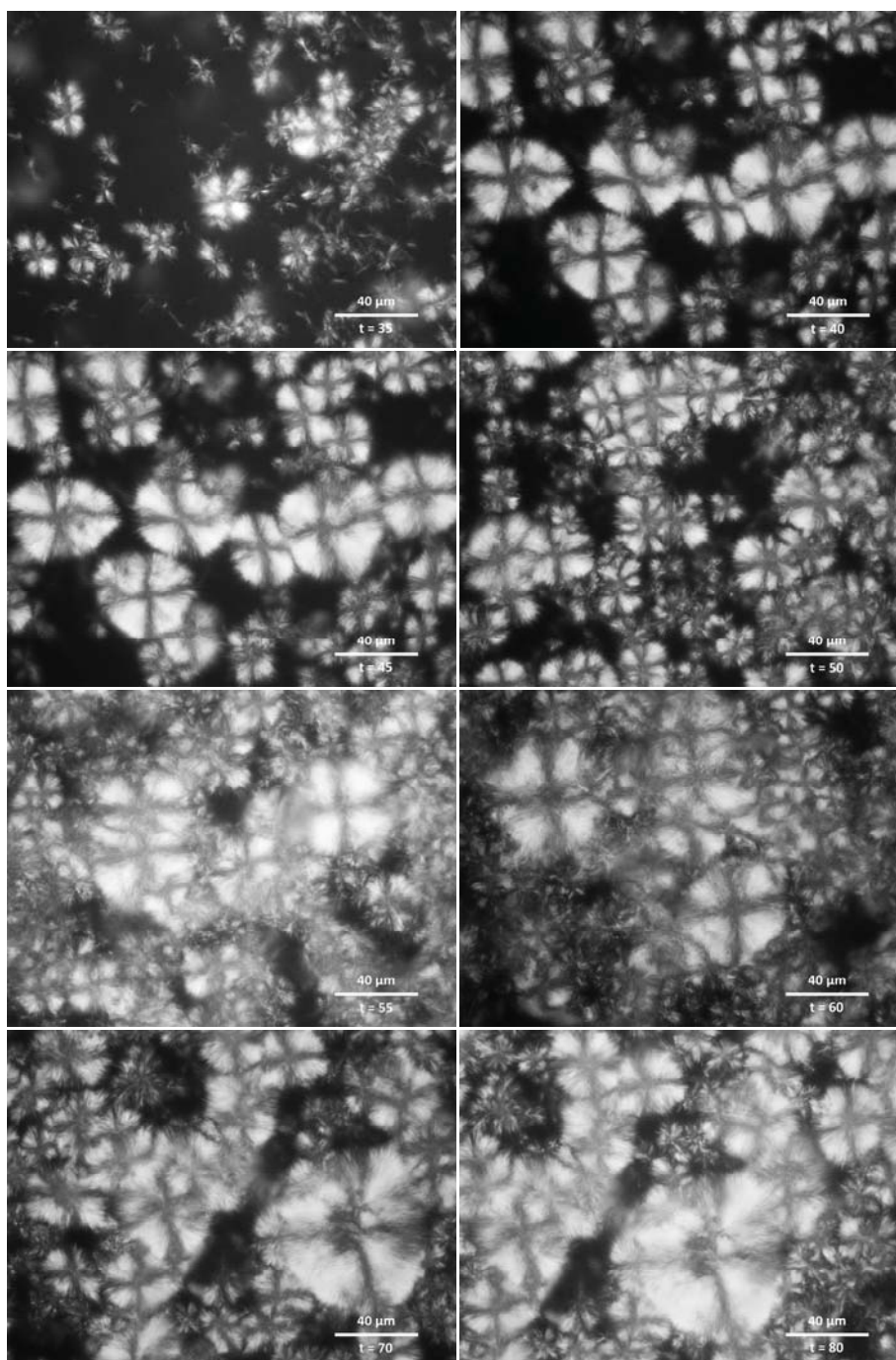
ภาพที่ 46 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียว  
มรกต ตั้งแต่นาทีที่ 35-80 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้อง  
เท่ากับ 400 เท่า



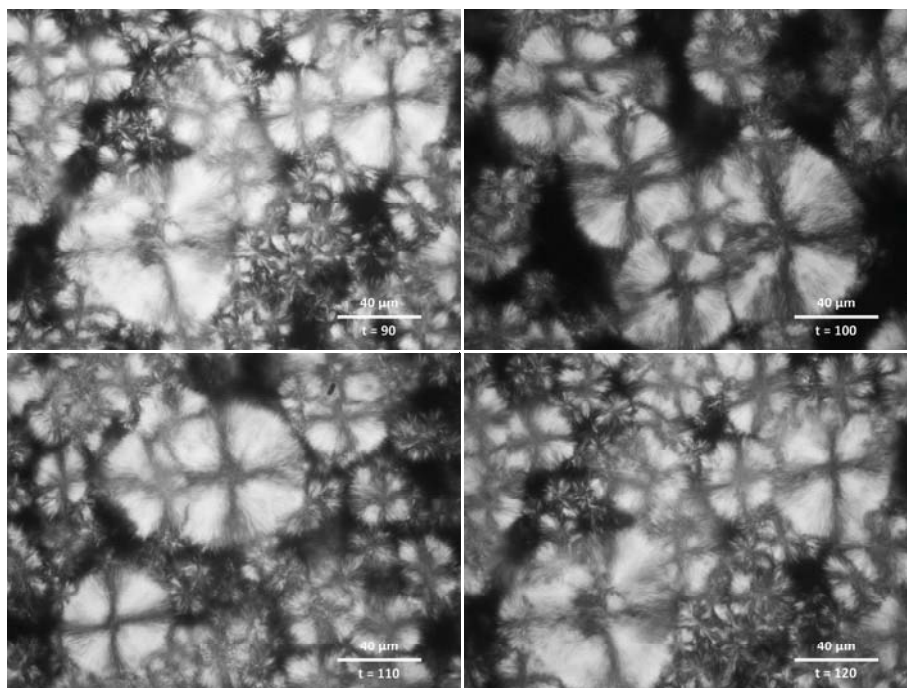
ภาพที่ 47 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์เขียว  
มรกต ตั้งแต่วันที่ 90-120 ที่อุณหภูมิ  $20^{\circ}\text{C}$  เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้อง  
เท่ากับ 400 เท่า



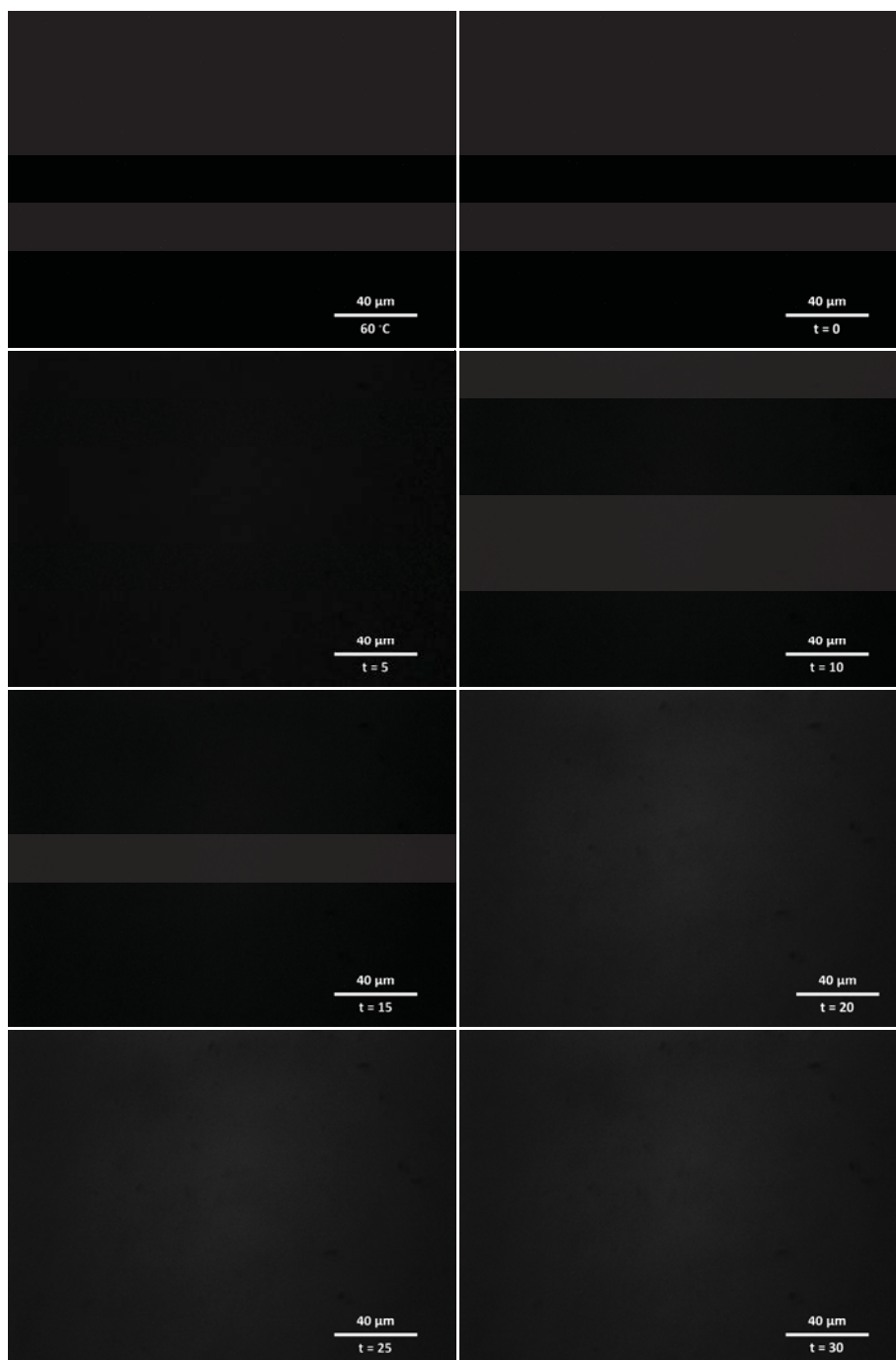
ภาพที่ 48 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์  
เขียวสวย ตั้งแต่เวลาที่ 0-30 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง กำลังขยายของ  
กล้องเท่ากับ 400 เท่า



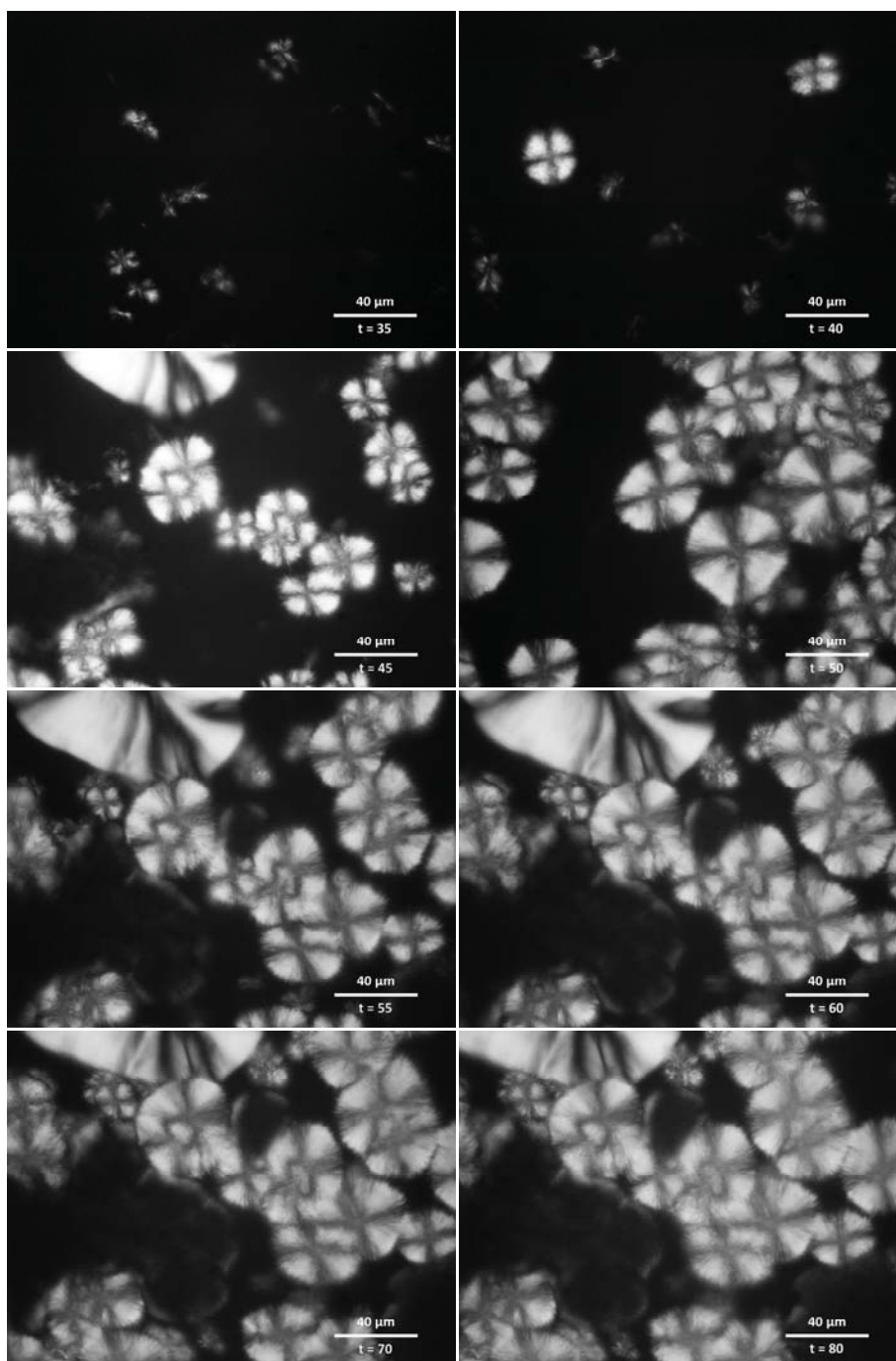
**ภาพที่ 49** การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์  
เขียวเสวย ตั้งแต่เวลาที่ 35-80 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง กำลังขยายของ  
กล้องเท่ากับ 400 เท่า



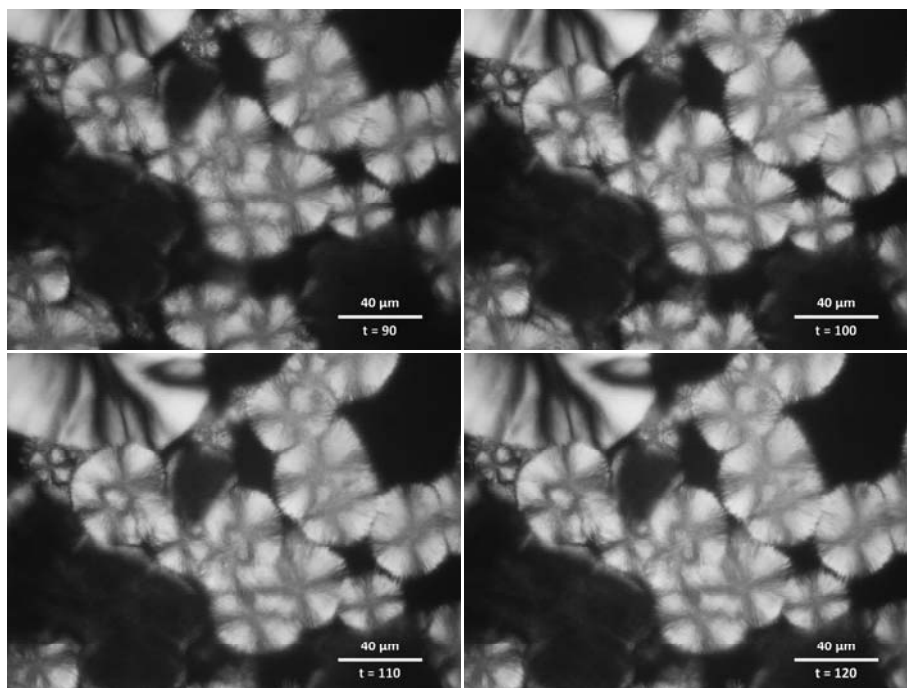
ภาพที่ 50 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์  
เขียวสวย ตั้งแต่วันที่ 90-120 ที่อุณหภูมิ  $20^{\circ}\text{C}$  เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง กำลังขยายของ  
กล้องเท่ากับ 400 เท่า



ภาพที่ 51 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์ น้ำดอกไม้ ตั้งแต่เวลาที่ 0-30 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง กำลังขยายของ กล้องเท่ากับ 400 เท่า



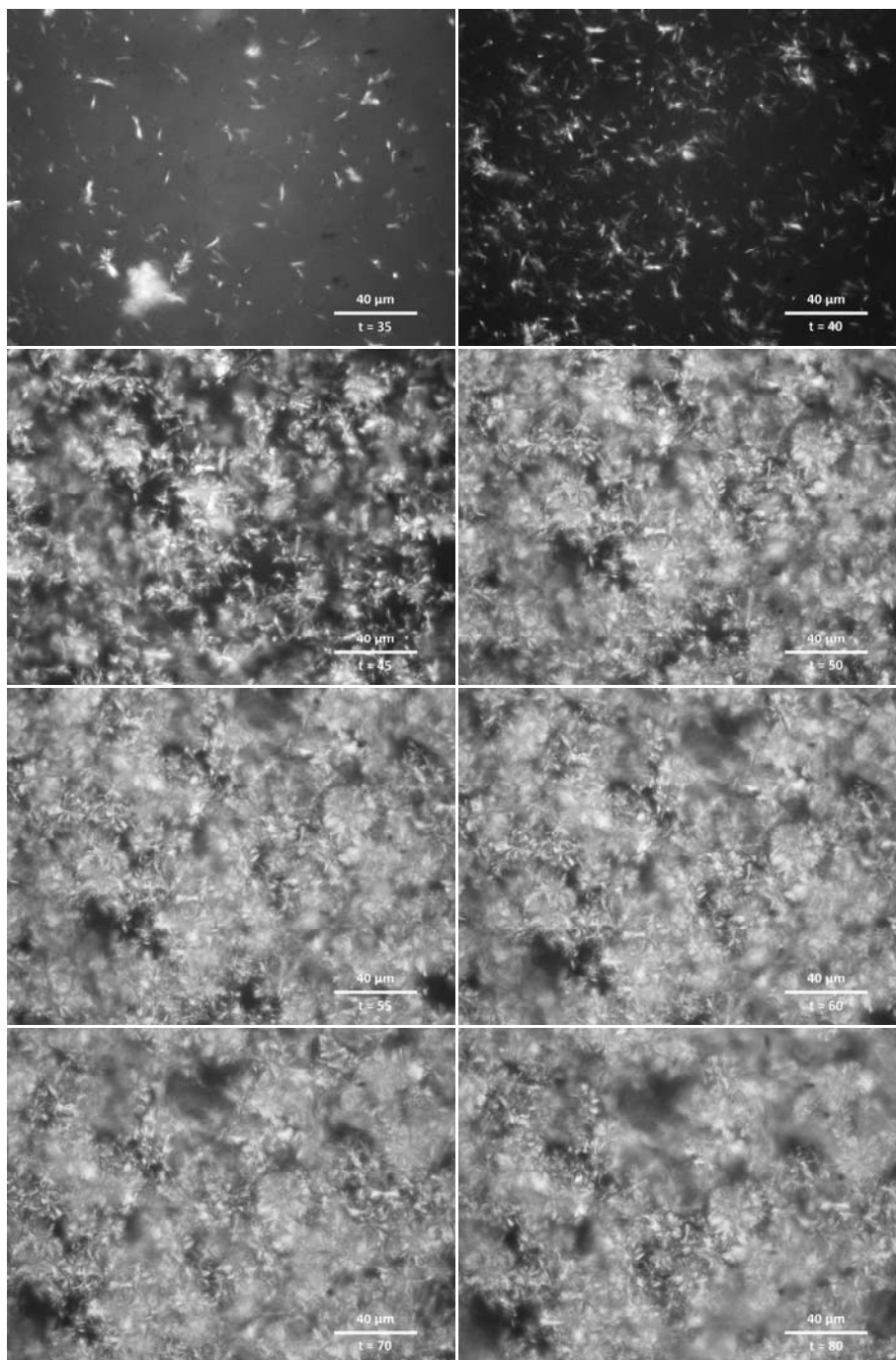
ภาพที่ 52 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์ น้ำดอกไม้ ตั้งแต่เวลาที่ 35-80 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง กำลังขยายของ กล้องเท่ากับ 400 เท่า



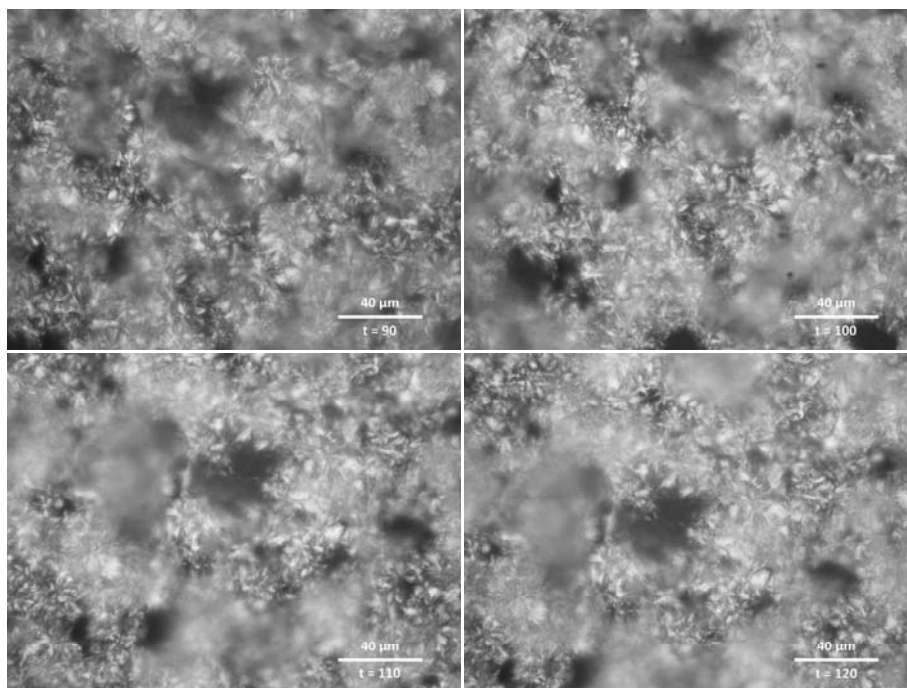
ภาพที่ 53 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์ น้ำดอกไม้ ตั้งแต่เวลาที่ 90-120 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง กำลังขยายของ กล้องเท่ากับ 400 เท่า



ภาพที่ 54 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์  
 อกร่อง ตั้งแต่วันที่ 0-30 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้อง  
 เท่ากับ 400 เท่า



ภาพที่ 55 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์  
 อกร่อง ตั้งแต่เวลาที่ 35-80 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง กำลังขยายของกล้อง  
 เท่ากับ 400 เท่า



ภาพที่ 56 การเปลี่ยนแปลง จำนวน ขนาด และรูปร่างของผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์  
 อกร่อง ตั้งแต่วันที่ 90-120 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง กำลังขยายของ  
 กล้องเท่ากับ 400 เท่า

ภาคผนวก ๓

ตารางแสดงค่า SFC ที่เวลาต่างๆ ในการตกผลึกที่อุณหภูมิคงที่ที่  $20^{\circ}\text{C}$  เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ของ  
น้ำมันเมล็ดมะม่วง 4 สายพันธุ์

ตารางที่ 17 แสดงค่า SFC ที่เวลา 0-20 นาที ในการตกผลึกที่อุณหภูมิคงที่ที่ 20°C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ของน้ำมันเมล็ดมะม่วง 4 สายพันธุ์

| นาทีที่ | ค่า SFC (%) |        |           |        |           |        |        |        |
|---------|-------------|--------|-----------|--------|-----------|--------|--------|--------|
|         | เจียวมรกต   |        | เจียวเสวย |        | น้ำดอกไม้ |        | อกร่อง |        |
| 0       | 0.40        | ± 0.39 | 0.16      | ± 0.03 | 0.15      | ± 0.06 | 0.05   | ± 0.02 |
| 1       | 0.74        | ± 0.14 | 0.25      | ± 0.04 | 0.31      | ± 0.10 | 0.23   | ± 0.03 |
| 2       | 0.88        | ± 0.13 | 0.23      | ± 0.10 | 0.40      | ± 0.08 | 0.32   | ± 0.15 |
| 3       | 0.92        | ± 0.23 | 0.27      | ± 0.16 | 0.30      | ± 0.06 | 0.32   | ± 0.07 |
| 4       | 0.97        | ± 0.25 | 0.26      | ± 0.07 | 0.35      | ± 0.08 | 0.28   | ± 0.16 |
| 5       | 1.05        | ± 0.29 | 0.26      | ± 0.06 | 0.33      | ± 0.08 | 0.27   | ± 0.11 |
| 6       | 1.03        | ± 0.21 | 0.26      | ± 0.04 | 0.40      | ± 0.09 | 0.28   | ± 0.09 |
| 7       | 1.03        | ± 0.06 | 0.22      | ± 0.02 | 0.43      | ± 0.11 | 0.26   | ± 0.05 |
| 8       | 1.18        | ± 0.27 | 0.35      | ± 0.11 | 0.40      | ± 0.09 | 0.23   | ± 0.08 |
| 9       | 1.17        | ± 0.09 | 0.28      | ± 0.12 | 0.46      | ± 0.12 | 0.26   | ± 0.08 |
| 10      | 1.39        | ± 0.24 | 0.26      | ± 0.06 | 0.57      | ± 0.19 | 0.20   | ± 0.09 |
| 11      | 1.22        | ± 0.21 | 0.27      | ± 0.05 | 0.61      | ± 0.17 | 0.30   | ± 0.12 |
| 12      | 1.22        | ± 0.10 | 0.29      | ± 0.13 | 0.60      | ± 0.12 | 0.20   | ± 0.07 |
| 13      | 1.37        | ± 0.28 | 0.38      | ± 0.11 | 0.73      | ± 0.19 | 0.27   | ± 0.16 |
| 14      | 1.38        | ± 0.15 | 0.20      | ± 0.06 | 0.95      | ± 0.37 | 0.21   | ± 0.05 |
| 15      | 1.36        | ± 0.15 | 0.25      | ± 0.12 | 1.49      | ± 1.07 | 0.23   | ± 0.16 |
| 16      | 1.13        | ± 0.29 | 0.54      | ± 0.15 | 2.30      | ± 0.66 | 0.41   | ± 0.26 |
| 17      | 1.26        | ± 0.15 | 0.27      | ± 0.07 | 3.67      | ± 0.89 | 0.32   | ± 0.08 |
| 18      | 1.30        | ± 0.19 | 0.24      | ± 0.08 | 5.58      | ± 0.59 | 0.34   | ± 0.12 |
| 19      | 1.36        | ± 0.11 | 0.34      | ± 0.19 | 8.63      | ± 0.66 | 0.30   | ± 0.13 |
| 20      | 1.41        | ± 0.20 | 0.43      | ± 0.13 | 11.76     | ± 0.40 | 0.29   | ± 0.13 |

ตารางที่ 17 แสดงค่า SFC ที่เวลา 22-60 นาที ในการตกผลึกที่อุณหภูมิคงที่ที่ 20°C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ของน้ำมันเมล็ดมะม่วง 4 สายพันธุ์ (ต่อ)

| นาทีที่ | ค่า SFC (%) |        |            |        |           |        |        |        |
|---------|-------------|--------|------------|--------|-----------|--------|--------|--------|
|         | เปี้ยวมรกต  |        | เปี้ยวเสวย |        | น้ำดอกไม้ |        | อกร่อง |        |
| 22      | 1.44        | ± 0.26 | 0.53       | ± 0.29 | 17.81     | ± 0.43 | 0.29   | ± 0.13 |
| 24      | 1.57        | ± 0.20 | 0.54       | ± 0.21 | 22.57     | ± 0.37 | 0.24   | ± 0.06 |
| 26      | 1.76        | ± 0.29 | 1.10       | ± 0.39 | 26.48     | ± 0.69 | 0.33   | ± 0.18 |
| 28      | 2.09        | ± 0.41 | 3.36       | ± 1.24 | 29.66     | ± 0.38 | 0.33   | ± 0.06 |
| 30      | 2.83        | ± 0.64 | 7.13       | ± 2.10 | 32.49     | ± 0.25 | 0.58   | ± 0.16 |
| 32      | 3.97        | ± 1.15 | 12.36      | ± 3.15 | 34.80     | ± 0.75 | 0.54   | ± 0.17 |
| 34      | 6.03        | ± 1.76 | 17.16      | ± 3.18 | 36.70     | ± 0.58 | 0.72   | ± 0.05 |
| 36      | 8.80        | ± 2.23 | 21.98      | ± 2.13 | 38.39     | ± 0.38 | 1.05   | ± 0.30 |
| 38      | 11.89       | ± 2.41 | 25.44      | ± 2.02 | 39.74     | ± 0.38 | 1.34   | ± 0.68 |
| 40      | 14.81       | ± 1.95 | 28.44      | ± 1.47 | 40.77     | ± 0.58 | 1.89   | ± 0.52 |
| 42      | 17.40       | ± 1.91 | 30.80      | ± 1.04 | 41.64     | ± 0.75 | 2.69   | ± 0.30 |
| 44      | 19.61       | ± 1.75 | 32.73      | ± 0.85 | 42.45     | ± 0.74 | 3.82   | ± 0.26 |
| 46      | 21.73       | ± 1.44 | 34.27      | ± 0.66 | 43.01     | ± 0.57 | 4.87   | ± 0.84 |
| 48      | 23.43       | ± 1.43 | 35.58      | ± 0.53 | 43.62     | ± 0.60 | 6.44   | ± 0.72 |
| 50      | 25.25       | ± 1.55 | 36.37      | ± 0.42 | 44.07     | ± 0.60 | 8.13   | ± 0.79 |
| 52      | 26.38       | ± 1.07 | 37.13      | ± 0.45 | 44.43     | ± 0.59 | 10.12  | ± 0.39 |
| 54      | 27.41       | ± 0.79 | 37.84      | ± 0.22 | 44.69     | ± 0.41 | 12.03  | ± 0.46 |
| 56      | 28.58       | ± 0.82 | 38.20      | ± 0.24 | 45.01     | ± 0.36 | 14.54  | ± 0.54 |
| 58      | 29.36       | ± 0.73 | 38.60      | ± 0.21 | 45.13     | ± 0.38 | 16.97  | ± 0.40 |
| 60      | 30.10       | ± 0.45 | 38.93      | ± 0.18 | 45.37     | ± 0.41 | 19.15  | ± 0.47 |

ตารางที่ 17 แสดงค่า SFC ที่เวลา 62-100 นาที ในการตกผลึกที่อุณหภูมิคงที่ที่ 20°C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ของน้ำมันเมล็ดมะม่วง 4 สายพันธุ์ (ต่อ)

| นาทีที่ | ค่า SFC (%) |        |            |        |           |        |        |        |
|---------|-------------|--------|------------|--------|-----------|--------|--------|--------|
|         | เปี้ยวมรกต  |        | เปี้ยวเสวย |        | น้ำดอกไม้ |        | อกร่อง |        |
| 62      | 30.71       | ± 0.72 | 39.19      | ± 0.24 | 45.53     | ± 0.38 | 21.21  | ± 0.20 |
| 64      | 31.45       | ± 0.40 | 39.58      | ± 0.40 | 45.80     | ± 0.48 | 23.10  | ± 0.67 |
| 66      | 31.80       | ± 0.41 | 39.78      | ± 0.28 | 45.74     | ± 0.33 | 24.83  | ± 0.10 |
| 68      | 32.18       | ± 0.27 | 39.87      | ± 0.17 | 45.83     | ± 0.39 | 26.09  | ± 0.43 |
| 70      | 32.59       | ± 0.41 | 39.96      | ± 0.14 | 45.99     | ± 0.30 | 27.42  | ± 0.85 |
| 72      | 32.69       | ± 0.56 | 40.00      | ± 0.12 | 46.05     | ± 0.36 | 28.60  | ± 0.67 |
| 74      | 33.19       | ± 0.20 | 40.15      | ± 0.26 | 46.15     | ± 0.29 | 29.40  | ± 0.07 |
| 76      | 33.28       | ± 0.26 | 40.24      | ± 0.21 | 46.16     | ± 0.23 | 30.44  | ± 0.74 |
| 78      | 33.67       | ± 0.23 | 40.43      | ± 0.26 | 46.28     | ± 0.33 | 31.06  | ± 0.74 |
| 80      | 33.85       | ± 0.33 | 40.38      | ± 0.12 | 46.27     | ± 0.31 | 31.77  | ± 0.59 |
| 82      | 33.89       | ± 0.27 | 40.53      | ± 0.18 | 46.29     | ± 0.24 | 32.12  | ± 0.31 |
| 84      | 34.13       | ± 0.26 | 40.47      | ± 0.15 | 46.29     | ± 0.32 | 32.57  | ± 0.25 |
| 86      | 34.29       | ± 0.21 | 40.55      | ± 0.33 | 46.50     | ± 0.33 | 32.91  | ± 0.99 |
| 88      | 34.38       | ± 0.18 | 40.64      | ± 0.25 | 46.58     | ± 0.31 | 33.19  | ± 0.70 |
| 90      | 34.45       | ± 0.19 | 40.73      | ± 0.25 | 46.52     | ± 0.44 | 33.43  | ± 0.56 |
| 92      | 34.60       | ± 0.23 | 40.75      | ± 0.36 | 46.69     | ± 0.36 | 33.70  | ± 0.75 |
| 94      | 34.76       | ± 0.35 | 40.79      | ± 0.14 | 46.67     | ± 0.28 | 33.98  | ± 0.44 |
| 96      | 34.83       | ± 0.21 | 40.78      | ± 0.27 | 46.72     | ± 0.23 | 34.10  | ± 0.44 |
| 98      | 34.97       | ± 0.21 | 40.88      | ± 0.31 | 46.70     | ± 0.19 | 34.21  | ± 0.57 |
| 100     | 35.06       | ± 0.07 | 40.86      | ± 0.24 | 46.70     | ± 0.31 | 34.45  | ± 0.38 |

ตารางที่ 17 แสดงค่า SFC ที่เวลา 102-120 นาที ในการตกผลึกที่อุณหภูมิคงที่ที่ 20°C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ของน้ำมันเมล็ดมะม่วง 4 สายพันธุ์ (ต่อ)

| นาทีที่ | ค่า SFC (%) |        |           |        |           |        |        |        |
|---------|-------------|--------|-----------|--------|-----------|--------|--------|--------|
|         | เขียวมรกต   |        | เขียวเสวย |        | น้ำดอกไม้ |        | อกร่อง |        |
| 102     | 35.11       | ± 0.36 | 40.82     | ± 0.26 | 46.88     | ± 0.26 | 34.49  | ± 0.30 |
| 104     | 35.29       | ± 0.19 | 41.00     | ± 0.12 | 46.87     | ± 0.19 | 34.59  | ± 0.36 |
| 106     | 35.09       | ± 0.16 | 41.06     | ± 0.26 | 46.91     | ± 0.17 | 34.68  | ± 0.29 |
| 108     | 35.21       | ± 0.19 | 40.89     | ± 0.27 | 46.74     | ± 0.44 | 34.79  | ± 0.29 |
| 110     | 35.43       | ± 0.15 | 40.96     | ± 0.19 | 46.87     | ± 0.21 | 34.71  | ± 0.21 |
| 112     | 35.40       | ± 0.19 | 41.08     | ± 0.22 | 46.95     | ± 0.26 | 35.07  | ± 0.28 |
| 114     | 35.51       | ± 0.16 | 41.08     | ± 0.13 | 46.86     | ± 0.40 | 35.03  | ± 0.13 |
| 116     | 35.50       | ± 0.10 | 41.08     | ± 0.26 | 46.97     | ± 0.24 | 35.15  | ± 0.29 |
| 118     | 35.56       | ± 0.10 | 41.20     | ± 0.15 | 46.96     | ± 0.30 | 35.09  | ± 0.14 |
| 120     | 35.64       | ± 0.14 | 41.21     | ± 0.16 | 47.05     | ± 0.23 | 35.29  | ± 0.14 |

ภาคผนวก ข

ตารางสรุปผลการติดตามการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกในระหว่างการตกผลึกที่ 20°C

ตารางสรุปผลการติดตามการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกในระหว่างการตกผลึกที่ 20°C

ตารางที่ 18 ค่า d-short spacing (Å) ของโครงสร้างผลึกแต่ละรูปแบบที่ระยะเวลาต่างๆในระหว่างการตกผลึกที่ 20°C

| น้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์ | นาที่ที่ | ค่า d-short spacing (Å) ของ |                  |       |
|----------------------------|----------|-----------------------------|------------------|-------|
|                            |          | $\beta'$ (IV)               | pseudo- $\beta'$ | B (v) |
| เขียวมรกต                  | 40       | 4.19, 3.80                  | -                | -     |
|                            | 50       | 4.19, 3.80                  | -                | -     |
|                            | 60       | 4.19, 3.80, 3.71            | 4.37, 3.93       | 4.60  |
|                            | 70       | 4.20, 3.80, 3.71            | 4.37, 3.93       | 4.60  |
|                            | 90       | 4.20, 3.80, 3.71            | 4.37, 3.93       | 4.60  |
|                            | 120      | 4.20, 3.80, 3.71            | 4.37, 3.93       | 4.60  |
| เขียวเสวย                  | 30       | 4.20                        | 4.42, 4.34       | -     |
|                            | 40       | 4.20, 3.92, 3.85, 3.75      | 4.43, 4.35, 4.00 | -     |
|                            | 50       | 4.20, 3.92, 3.85, 3.75      | 4.43, 4.35, 4.00 | -     |
|                            | 60       | 4.20, 3.92, 3.85, 3.75      | 4.43, 4.35, 4.00 | 4.61  |
|                            | 70       | 4.20, 3.92, 3.85, 3.75      | 4.43, 4.35, 4.00 | 4.61  |
|                            | 90       | 4.20, 3.92, 3.85, 3.75      | 4.43, 4.35, 4.00 | 4.61  |
|                            | 120      | 4.20, 3.92, 3.85, 3.75      | 4.43, 4.35, 4.00 | 4.61  |

ตารางที่ 18 ค่า d-short spacing (Å) ของโครงสร้างผลึกแต่ละรูปแบบที่ระยะเวลาต่างๆ ในระหว่าง  
การตกผลึกที่ 20°C (ต่อ)

| น้ำมันเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์ | นาที่ที่ | ค่า d-short spacing (Å) ของ |                  |             |
|----------------------------|----------|-----------------------------|------------------|-------------|
|                            |          | $\beta'$ (IV)               | pseudo- $\beta'$ | $\beta$ (v) |
| น้ำดอกไม้                  | 30       | 4.20, 3.90                  | 4.40             | -           |
|                            | 40       | 4.20, 3.90                  | 4.40             | -           |
|                            | 50       | 4.20, 3.90                  | 4.40             | 4.55        |
|                            | 60       | 4.20, 3.90                  | 4.40             | 4.55        |
|                            | 70       | 4.20, 3.90                  | 4.40             | 4.55        |
|                            | 90       | 4.20, 3.90                  | 4.40             | 4.55        |
|                            | 120      | 4.20, 3.90                  | 4.40             | 4.55        |
| ออกร่อง                    | 50       | 4.20, 3.90                  | -                | -           |
|                            | 60       | 4.20, 3.90                  | 4.40             | 4.60, 4.55  |
|                            | 70       | 4.20, 3.90                  | 4.40             | 4.60, 4.55  |
|                            | 90       | 4.20, 3.90                  | 4.40             | 4.60, 4.55  |
|                            | 120      | 4.20, 3.90                  | 4.40             | 4.60, 4.55  |

ภาคผนวก ฅ

คำย่อ

**คำย่อ**  
**(Abbreviations)**

|     |                      |
|-----|----------------------|
| Av  | Acid value           |
| CB  | Cocoa butter         |
| CBE | Cocoa butter         |
| EU  | European Union       |
| Iv  | Iodine value         |
| O   | Oleic acid           |
| P   | Palmitic acid        |
| S   | Stearic acid         |
| SFC | Solid fat content    |
| SMP | Slip melting point   |
| Spv | Saponification value |

## ประวัติผู้วิจัย

|                   |                                                                                                                                                                                                                            |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ชื่อ-สกุล         | นางสาวพรณี พรประชาณุวัฒน์<br>MISS PUNNEE PONPRACHANUVUT                                                                                                                                                                    |
| ที่อยู่           | 13 หมู่ 8 ตำบลโพรงมะเดื่อ อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม 73000                                                                                                                                                                   |
| โทรศัพท์ (มือถือ) | (084) 7091179                                                                                                                                                                                                              |
| ประวัติการศึกษา   |                                                                                                                                                                                                                            |
| พ.ศ. 2548         | สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนราชินีบูรณะ<br>จังหวัดนครปฐม                                                                                                                                               |
| พ.ศ. 2552         | สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต<br>สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะ<br>วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย<br>ศิลปากร                                                                    |
| พ.ศ. 2553         | ศึกษาต่อระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต<br>สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร บัณฑิต<br>วิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร                                                                                               |
| ผลงานวิจัย        |                                                                                                                                                                                                                            |
| พ.ศ. 2554         | แสดงผลงานในหัวข้อ "Crystallization of cocoa butter equivalents from<br>mango seed almond fat and palm mid fractions" ในงาน The 12th<br>ASEAN FOOD CONFERENCE 2011 ณ BITEC บางนา<br>กรุงเทพมหานคร                           |
| พ.ศ. 2555         | ผลงานการวิจัยเรื่อง "Characterization of Physicochemical and Thermal<br>Properties and Crystallization Behavior of Krabok (Irvingia<br>Malayana) and Rambutan Seed Fats"                                                   |
| พ.ศ. 2555         | ผลงานการวิจัยเรื่อง "Studies of fatty acid and triglyceride composition,<br>chemical and physical properties, and crystallization behavior of<br>mango seed almond oils from various mango varieties grown in<br>Thailand" |