

## บทที่ 2

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature review)

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

มะม่วง (*Mangifera indica* L.) เป็นผลไม้ที่มีความสำคัญมากเนื่องจากเป็นผลไม้ที่ผู้บริโภคนิยมและเป็นที่ต้องการในตลาดโลกอย่างสูง โดยมะม่วงเป็นผลไม้ที่มีกลิ่น รสชาติดี และสามารถบริโภคได้ทั้งผลสดและผลที่ผ่านกระบวนการแปรรูปแล้ว สำหรับการเก็บรักษามะม่วงนั้นขึ้นอยู่กับระดับความสุกขณะที่เก็บเกี่ยว นอกจากนี้ยังมีการค้นพบว่าภายในเนื้อในมะม่วงจะมีของเหลวอยู่ ซึ่งของเหลวชนิดนี้มีประโยชน์มากในอุตสาหกรรม 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 ส่วนที่เหลือส่งออกต่างประเทศทั้งในรูปแบบของมะม่วงสด มะม่วงกระป๋อง มะม่วงอบแห้ง และมะม่วงแช่แข็ง ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งพบว่าในปี 2551 ไทยส่งออกมะม่วงและผลิตภัณฑ์ในปริมาณ 36,377 ตัน มูลค่ากว่า 1,433 ล้านบาท โดยประเทศที่ต้องการมากได้แก่ 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% ของน้ำหนักทั้งผลตามลำดับ เมล็ดมะม่วงที่แห้งจะมีส่วนของเปลือกหุ้มและเมล็ดในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก โดยเมล็ดมะม่วงแห้งมีปริมาณน้ำมัน 5.28–15% (Solis-Fuentes และ Duran-de-Bazua, 2003; Liddefelt, 2007) โดยปริมาณผลผลิตของมะม่วงแต่ละสายพันธุ์ก็แตกต่างกันไป ดังแสดงในตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่ามะม่วงสายพันธุ์แก้วมีปริมาณมากที่สุด รองลงมาเป็น เชี่ยวเสวย และอกร่องตามลำดับ

ตารางที่ 2 ผลผลิตมะม่วงของประเทศไทยในปี 2547

| พันธุ์มะม่วง | พื้นที่เพาะปลูกรวมปี 2547 (ไร่) | ผลผลิตรวมปี 2547 (ตัน) |
|--------------|---------------------------------|------------------------|
| แก้ว         | 358,711                         | 387,017                |
| เชียวเสวย    | 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)

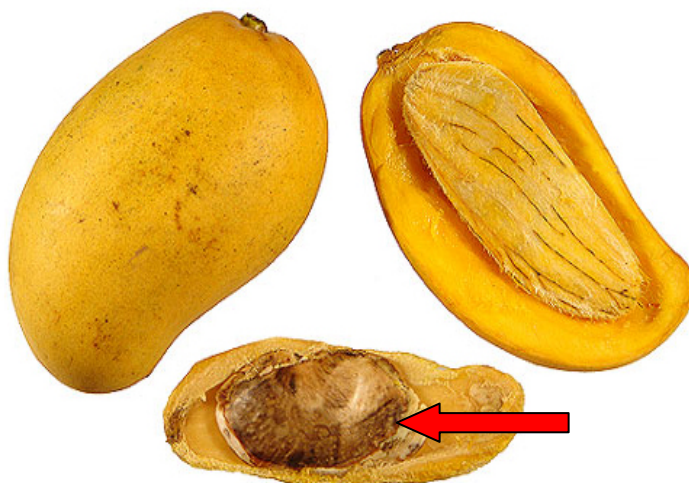
มะม่วงพันธุ์เชียวมรกต ชื่อวิทยาศาสตร์ คือ *Mangifera indica* L. cv. Keaw Morakot (กรมวิชาการเกษตร, 2547) เป็นสายพันธุ์ที่เกิดจากการกลายพันธุ์มาจากพันธุ์แก้ว และพันธุ์สามปีในตำบลเหล่ายาวของอำเภอบ้านไผ่ จังหวัดลำพูน จัดเป็นพันธุ์หนัก สามารถเก็บเกี่ยวได้ประมาณเดือนกรกฎาคม มีเนื้อแน่นเหมาะแก่การแปรรูปได้ดีและสามารถรับประทานสุกได้ รสชาติดี เนื้อละเอียด มีสีเหลืองเข้มกลิ่นหอม (สุรินทร์, 2549) ใบป้อมโคนใบ ปลายใบเรียวแหลม ฐานใบแหลม ขอบใบเป็นคลื่น เปลือกลำต้นเรียบ ไม่มีการเลื้อยของกิ่ง (กรมวิชาการเกษตร, 2547) เริ่มแทงช่อดอกตั้งแต่กลางเดือนธันวาคม 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 ผิวสีเขียว นวล เนื้อแน่น เมื่อผลสุกมีผิวสีเหลือง กลิ่นหอม เนื้อละเอียดมีเสี้ยนน้อย รสหวาน พันธุ์ที่นิยมปลูกมากในปัจจุบัน คือ พันธุ์น้ำดอกไม้เบอร์ 4 และพันธุ์น้ำดอกไม้สีทอง

มะม่วงพันธุ์กรร่ง มีชื่อวิทยาศาสตร์ *Manafiera indica* Linn. ชื่อวงศ์คือ Anacardiaceae เป็นมะม่วงพันธุ์เก่าแก่ที่รู้จักกันทั่วไป ใช้สำหรับรับประทานสุก เป็นพันธุ์ที่ให้ผลดก จะออกผลปีเว้นปี คือปีใดที่ให้ผลดก ปีต่อไปจะมีผลน้อย ขนาดผลค่อนข้างเล็ก ลักษณะของผลค่อนข้างแบน ตรงส่วนท้องเป็นทางยาวจนเห็นได้ชัด ผลดิบเนื้อละเอียดสีขาวนวล 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 ทดแทนการใช้เนยโกโก้ที่ผลิตจากเมล็ดโกโก้เพื่อลดต้นทุนการผลิต (Bernard, 1989; Talbot, 1999) โดยเนยโกโก้เทียมจะเป็นไขมันที่มีองค์ประกอบของกรดไขมันและไตรกลีเซอไรด์ คุณสมบัติทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น อุณหภูมิในการตกผลึกและจุดหลอมเหลวใกล้เคียงกับเนยโกโก้ (ณัฐยาวรรณ, 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)

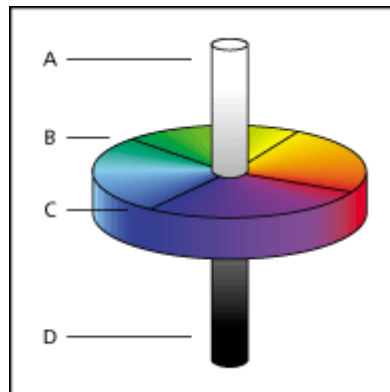
นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาการตกผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงอย่างคร่าวๆ เปรียบเทียบกับเนยโกโก้ด้วยเทคนิค differential scanning calorimetry และเทคนิค X-ray diffraction โดย Solís-Fuentes และ Durán-de-Bazúa (2004) และ Solís-Fuentes และคณะ (2005) ซึ่งพบว่ามะม่วง

สายพันธุ์ 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) ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ตกผลึกเป็นของแข็งมีค่าต่ำกว่าของเนยโกโก้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $33^{\circ}\text{C}$  ทำให้มีลักษณะอ่อนกว่าเนยโกโก้เล็กน้อย ในทางกลับกันค่า SFC ของน้ำมันเมล็ดมะม่วงหิมพานต์จะมีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิสูงกว่า  $33^{\circ}\text{C}$  ทำให้มีความแข็งมากกว่าเนยโกโก้หรือมีลักษณะเป็น harder fat เมื่อเทียบกับเนยโกโก้ ซึ่งถือเป็นคุณสมบัติเด่นของน้ำมันเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เพราะสามารถนำไปผลิตเป็นเนยโกโก้เลียนแบบสำหรับใช้เป็นส่วนผสมในช็อกโกแลตทนอุณหภูมิสูงได้

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

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

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



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 เป็นปัจจัยที่สำคัญในการออกแบบการขนถ่าย ไขมันและน้ำมัน ความหนืดของไขมันและน้ำมันจะเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนของคาร์บอนในโมเลกุลของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของไตรกลีเซอไรด์เพิ่มขึ้น ความหนืดจะลดลงเมื่อจำนวนพันธะคู่ในโมเลกุลของกรดไขมันเพิ่มสูง และเมื่ออุณหภูมิของไขมันและน้ำมันเพิ่มขึ้น (นิธิยา, 2548)

2.3 จุดหลอมเหลว (melting point) คือ อุณหภูมิที่ทำให้ไขมันเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวทั้งหมด 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

| จำนวนคาร์บอน : พันธะ          |      |                  |
|-------------------------------|------|------------------|
| ชนิดของกรดไขมัน               | คู่  | 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             |
| กรดอะราคิติก                  | 20:0 | 75.4–76.5        |
| กรดปีฮีนิก                    | 22:0 | 80.0–81.5        |
| กรดลิกโนเซริก                 | 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 รัตนา  
ปนนท์ (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 รัตนพานนท์ (2548)

นอกจากนี้ยังสามารถหาจุดหลอมเหลวของไขมันในรูปของค่า slip melting point (SMP) หรือจุดหลอมเหลวของของแข็งที่มีลักษณะคล้ายขี้ผึ้ง (waxy solid) ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ไขมันเริ่มเคลื่อนที่

ขึ้นภายในหลอดคาปิลลารีปลายเปิดเนื่องจากแรงที่ทำให้สารเกิดการลอยตัว (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) ไขมันและน้ำมันบางชนิดจะถูกไฮโดรไลซ์ได้ด้วยกรดต่าง และเอนไซม์ การไฮโดรไลซ์ได้ด้วยด่าง เรียกว่า สaponification (saponification) ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นเกลือของกรดไขมันเรียกว่า สบู่ ต่างที่ใช้นิยมในการไฮโดรไลซ์ไขมัน เช่น

โซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอาจเกิดจากไขมันหรือน้ำมันได้รับความร้อนสูง เช่น ขณะทอดอาหารที่มีปริมาณน้ำในปริมาณมากไขมันจะถูกไฮโดรไลซ์เป็นกรดไขมันอิสระและกลีเซอรอล

ไขมันหรือน้ำมันที่ได้จากพืชและสัตว์แต่ละชนิด มักมีไตรกลีเซอไรด์เป็นส่วนประกอบในปริมาณค่อนข้างแน่นอน ดังนั้นจำนวนค่าที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไขมันหรือน้ำมันจำนวนหนึ่งจึงมีค่าค่อนข้างแน่นอนและเป็นค่าเฉพาะ ซึ่งสามารถใช้บ่งชี้ถึงคุณสมบัติของไขมันหรือน้ำมันแต่ละชนิดได้ 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 แสดงว่าไขมันหรือ

น้ำมันชนิดนั้นมีความไม่อิ่มตัวสูง ซึ่งจะมีคุณค่าทางโภชนาการสูง เนื่องจากกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเป็นกรดไขมันที่มีความจำเป็นต่อร่างกาย ในทางตรงกันข้ามไขมันหรือน้ำมันที่มีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวจะเกิดการหืนได้ง่าย (นิธิยา, 2548)

2.3.3 การหืน (rancidity) เป็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของไขมันหรือน้ำมันหรือน้ำมันซึ่งทำให้ไขมันหรือน้ำมันเกิดกลิ่นที่ผิดปกติ และสมบัติทางเคมีและทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไป การหืนเกิดขึ้นได้ 3 รูปแบบ คือ

2.3.3.1 ไลโปไลซิส (lipolysis) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อพันธะเอสเทอร์ในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์เกิดการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ไลเปส กรด ต่าง ความร้อน หรือสารเคมี ซึ่งจะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่มีผลต่อสุขภาพของไขมันและน้ำมัน โดยทำให้น้ำมันมีกลิ่นและรสชาติเปลี่ยนแปลงไป เช่น กรดไขมันอิสระที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (คาร์บอน 4-12 อะตอม) ซึ่งจะมีกลิ่นหืนมาก และเมื่อปริมาณกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้นจะมีผลให้ค่า smoke point หรืออุณหภูมิที่ไขมันหรือน้ำมันเกิดควันเมื่อได้รับความร้อนมีค่าต่ำลง ทำให้น้ำมันจะเกิดควันได้ง่ายขณะทอดอาหารสำหรับปฏิกิริยาที่เกิดจากเอนไซม์ไลเปสและความชื้นจะเรียกว่า hydrolytic rancidity

ไขมันและน้ำมันบางชนิดไม่สามารถสังเกตการณ์เกิดไลโปไลซิสได้ด้วยการดมกลิ่นหรือการชิมรส จึงต้องมีการตรวจวิเคราะห์ทางเคมี โดยการตรวจหาปริมาณกรดไขมันอิสระที่เกิดขึ้น ค่าที่ได้ว่า ค่าความเป็นกรด (Acid value; Av) หรือจำนวนมิลลิกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทำให้กรดไขมันอิสระที่อยู่ในไขมันหรือน้ำมัน 1 กรัม เป็นกลาง ดังนั้นจึงนิยมใช้ค่า Av เป็นตัวบ่งชี้สภาวะหรือระดับการหืนของไขมันหรือน้ำมัน กล่าวคือ หากค่า Av สูง แสดงว่ามีการเกิดกลิ่นหืนเนื่องจาก hydrolytic rancidity มาก วิธีการชะลอการเกิดการหืนนี้ทำได้โดยการเก็บไขมันหรือน้ำมันที่อุณหภูมิต่ำ (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 (lipoxidase) ได้อีกด้วย การตรวจวิเคราะห์การเกิด oxidative rancidity สามารถทำได้โดยการหาค่าเพอร์ออกไซด์ (Peroxide value; Pv) หรือการปริมาณสารเพอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นในไขมันหรือน้ำมัน หรือจำนวนมิลลิกรัมของสารละลายโซเดียมไฮโอ

ซัลเฟตความเข้มข้น 0.002 N ที่ใช้ในการไตเตรตไขมันหรือน้ำมัน 1 กรัม ถ้าค่า  $P_v$  สูง แสดงว่าไขมันหรือน้ำมันเกิด oxidative rancidity มาก และส่งผลให้ค่า  $I_v$  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) ดังนั้นไตรกลีเซอไรด์ในไขมันและน้ำมันที่ได้จากธรรมชาติจึงเป็นไตรกลีเซอไรด์ ผสม ชนิดและปริมาณของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ ที่มีอยู่ไขมันและน้ำมันชนิดต่างๆ จะเป็นตัวกำหนดสมบัติของไขมันและน้ำมันแต่ละชนิดให้แตกต่างกัน (Holcapek และคณะ, 2005)

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

เทคนิคและวิธีการที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์กรดไขมันและไตรกลีเซอไรด์ในปัจจุบัน ได้แก่

2.4.1 การวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของกรดไขมันด้วยเทคนิค Gas Chromatography–Flame Ionization Detector (GC–FID) เป็นเทคนิคใช้สำหรับแยกสารผสมที่มีคุณสมบัติที่สามารถเป็นแก๊สได้ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณเทียบกับสารมาตรฐาน โดยใช้เฟสเคลื่อนที่เป็นแก๊สเช่นกัน แต่ไม่ทำปฏิกิริยากับสารผสม เช่น ฮีเลียม จะทำหน้าที่เป็นตัวพา (Carrier) สารผสม ส่วนเฟสอยู่กับที่อาจจะเป็นของแข็งหรือของเหลวที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์ เมื่อทั้งตัวพาและสารผสมเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์นี้ เฟสอยู่กับที่ในคอลัมน์จะดึงดูดด้วยแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิตตามความเป็นขั้วของสารกับโมเลกุลในสารผสมทำให้

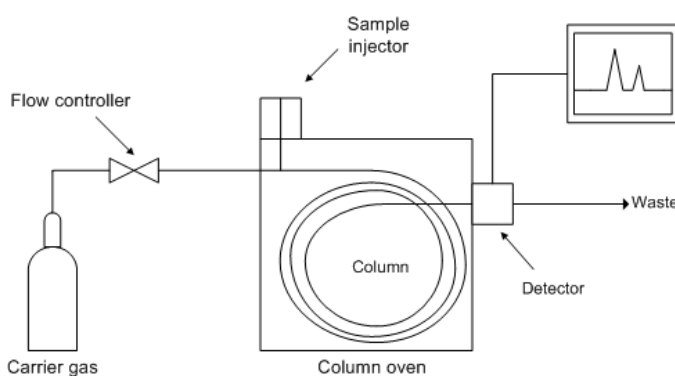
องค์ประกอบในสารผสมถูกพาไปด้วยอัตราเร็วที่ต่างกัน สารผสมก็จะแยกออกจากกัน เทคนิค GC นี้มักใช้ในการวิเคราะห์ทั้งคุณภาพและปริมาณในหลายด้าน อาทิเช่น ทางด้านอาหาร ยา ยาฆ่าแมลง น้ำมันหอมระเหย ทางการแพทย์ ปิโตรเลียม และ ทางสิ่งแวดล้อม เป็นต้น

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

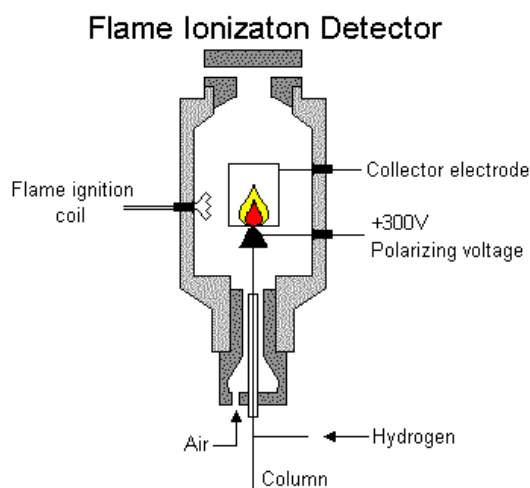
2.4.1.2 Oven คือ ส่วนที่ใช้สำหรับบรรจุ column และเป็นส่วนที่ควบคุมอุณหภูมิของ column ให้เปลี่ยนไปตามความเหมาะสมกับวิธีการที่ต้องการวิเคราะห์สารผสม การควบคุมอุณหภูมิของ oven นั้นมี 2 แบบ คือ Isothermal จะใช้อุณหภูมิเดียวตลอดการวิเคราะห์ และแบบ temperature program จะสามารถเปลี่ยนอุณหภูมิได้ในระหว่างการวิเคราะห์ 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 ในโมเลกุล หรือที่เรียกว่าเป็นสารอินทรีย์ (Organic compounds) เช่น ไขมันหรือน้ำมัน



ภาพที่ 3 องค์ประกอบหลักของเครื่อง GC

ที่มา : Wikipedia encyclopedia (2010)

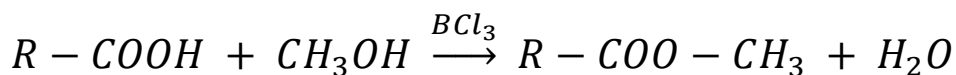


ภาพที่ 4 Flame Ionization Detector

ที่มา : Undergraduate Instrumentation Center (2011)

GC สามารถใช้ในการวิเคราะห์ชนิดของกรดไขมัน อย่างเช่น กรดไขมันอิสระ (free fatty acid) หรือเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (fatty acid methyl esters) โดยเหตุผลที่ต้องทำให้กรดไขมันอยู่ในรูปของเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ด้วย GC คือ ในความเป็นอิสระของกรดไขมันซึ่งอยู่ในรูปแบบ underivatized กรดไขมันอาจมีความยากในการวิเคราะห์ เพราะความมีขั้วที่สูงที่เกิดจากพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bonds) ซึ่งนำไปสู่ปัญหาด้านการดูดซับ โดยการลดลงของความมีขั้วของกรดไขมันจะทำให้สามารถวิเคราะห์กรดไขมันได้ดีขึ้น และอีกเหตุผลหนึ่งคือการทำให้แตกต่างระหว่างความแตกต่างเพียงเล็กน้อย โดยกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว หมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลที่มีขั้ว ต้องทำให้เป็นกลางก่อน จากนั้นก็ทำการแยกด้วยคอลัมน์

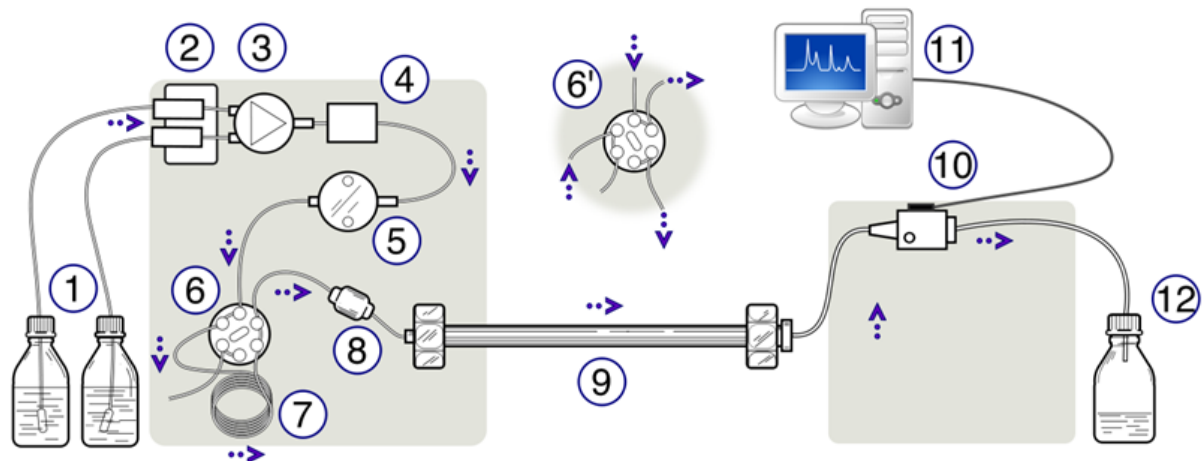
การทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (esterification) ของกรดไขมันให้เป็นเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันโดยใช้สารพวก alkylation derivatization เมทิลเอสเทอร์มีเสถียรภาพที่ดีเยี่ยมและเตรียมได้รวดเร็ว ภาพที่ 5 แสดงปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันที่เกี่ยวข้องกับการรวมตัวของหมู่คาร์บอกซิล (carboxyl group) ของกรดและหมู่ไฮดรอกซิล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



**ภาพที่ 5** การเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

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 จะมีผนังกันของตัวถูกละลายระหว่าง mobile phase และ stationary phase ซึ่งมีของเหลว (liquid phase) ที่เหมาะสมในการพาดสารมีที่ 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

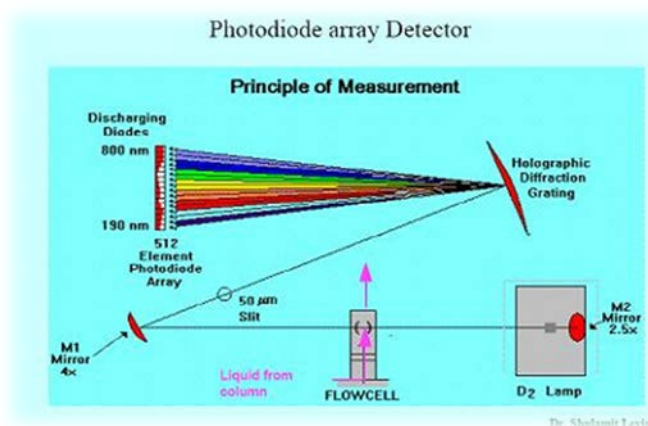
#### ภาพที่ 6 องค์ประกอบและโครงสร้างของเครื่อง HPLC

ที่มา : Yassine Mrabet (2011)

ในการวิเคราะห์ไตรกลีเซอไรด์ในปัจจุบันนิยมใช้ 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 ได้ดี ใน 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<sub>18</sub> 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 มีใช้การเก็บเพียง 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)

การหาสภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ไตรกลีเซอไรด์มีความจำเป็นมากในการวิเคราะห์ เพราะมีปัจจัยหลายปัจจัยที่มีผลต่อการวิเคราะห์ เช่น ชนิดของตัวทำละลาย อุณหภูมิของคอลัมน์ และชนิดของคอลัมน์ เป็นต้น โดยตัวทำละลายที่ดีที่จะเลือกใช้ นั้น ตัวอย่างควรละลายได้ดี และมีคุณสมบัติความมีขั้วตรงข้ามกับ stationary phase ที่ใช้ด้วย เมื่อผ่านการแยกด้วยเครื่อง HPLC แล้ว ควรให้ chromatogram ที่เด่นชัด พิกัดแยกออกจากกันอย่างชัดเจน อุณหภูมิของคอลัมน์ที่เลือกใช้ นั้นจะต้องสามารถทำให้เกิดพิกัดที่แยกออกจากกันอย่างเด่นชัด และทำให้เกิดเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์เหมาะสม เพราะหากใช้อุณหภูมิต่ำมากอาจใช้เวลานานในการวิเคราะห์ แต่ถ้าใช้อุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้สารออกมาจากคอลัมน์เร็วทำให้เกิดการแยกที่ไม่สมบูรณ์ได้ ส่วนชนิดของคอลัมน์นั้นก็ก็เป็นอีกปัจจัยที่

สำคัญเนื่องจากคอลัมน์แต่แบบมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน โดย NP-HPLC สามารถแยกโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ที่มีองค์ประกอบเป็น short-chain acyl residues ในขณะที่ RP-HPLC สามารถแยกได้เฉพาะโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ที่มีองค์ประกอบของ acyl moieties ต่างๆ การเลือกใช้ detector ที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ไตรกลีเซอไรด์นั้น จะสามารถทำให้ได้ข้อมูลที่ละเอียดและถูกต้องแม่นยำมากขึ้น

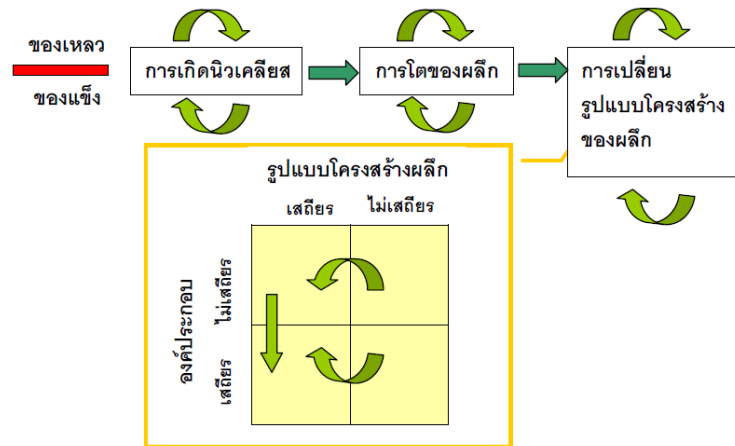
ประโยชน์ของ HPLC ในการวิเคราะห์ไตรกลีเซอไรด์นั้นสามารถนำมาใช้ในการตรวจติดตามคุณภาพของน้ำมันพืช โดยสามารถแยกการปลอมปนได้ และเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์เป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการตรวจวิเคราะห์ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ในไขมันและน้ำมันพืช

## 2.5 การตกผลึกของไขมันและน้ำมัน (Crystallization of fats and oils)

การตกผลึกมีความสำคัญทางอุตสาหกรรม เนื่องจากมีผลิตภัณฑ์หลายชนิดที่จำหน่ายในรูปของผลึก ซึ่งกระบวนการตกผลึกเป็นกระบวนการเกิดของแข็งภายใต้เฟสที่เป็นโฮโมจีเนียส ซึ่งอาจเกิดของแข็งในสภาวะไอ เช่น การเกิดหิมะ หรือเป็นอนุภาคของแข็งในสารละลายหลอมเหลว เช่น การตกผลึกของไขมัน หรือการแช่แข็งของน้ำไปเป็นของแข็งในสารละลายหลอมเหลว การตกผลึกจัดเป็นกระบวนการแยกของแข็ง-ของเหลว เช่น การตกผลึก เพื่อแยกเอาส่วนประกอบที่มีจุดหลอมเหลวสูงออกจากน้ำมันเพื่อให้ไม่แข็งเมื่ออยู่ในอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากไขมันและน้ำมันแต่ละชนิดมีส่วนผสมของไตรกลีเซอไรด์ที่ต่างกันผสมอยู่หลายชนิดขึ้นกับชนิดของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในไขมันและน้ำมัน ทำให้น้ำมันและไขมันมีจุดหลอมเหลวและจุดเยือกแข็งที่เป็นช่วงอุณหภูมิของไตรกลีเซอไรด์ที่เป็นองค์ประกอบ (นิธิยา, 2548) โดยการตกผลึกของไตรกลีเซอไรด์ในลักษณะสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกันจะส่งผลให้การพัฒนาสภาพของนิวเคลียสแตกต่างกันทำให้ได้ผลึกที่มีคุณสมบัติทางกายภาพที่ต่างกันด้วย เช่น ขนาดผลึกที่เกิดขึ้นและอุณหภูมิของการหลอมเหลวซึ่งคุณสมบัติทั้งสองนี้มีผลอย่างมากต่อลักษณะเนื้อสัมผัสและลักษณะปรากฏในผลิตภัณฑ์อาหารที่มีไขมันเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น เนย, มาการีน โดยเมื่อผลึกไขมันที่ไม่ต้องการที่อยู่ในมาการีน จะทำให้มาการีนมีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆเมื่อถึงมือผู้บริโภค จึงต้องมีการควบคุมแต่ละปัจจัย (จำนวนรูปร่าง ขนาด และการมีโครงสร้างผลึกหลายรูปแบบ) ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อผลิตสินค้าให้มีคุณภาพสูงสุดเพื่อให้เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค เป็นที่ยอมรับทางประสาทสัมผัสและด้านอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ (Hartel, 2001)

เมื่อกล่าวถึงคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ (physicochemical) ของไขมันและน้ำมัน ก็จะต้องกล่าวถึงพฤติกรรมการตกผลึก การตกผลึกจะเกิดในสภาวะที่ไขมันหรือผลิตภัณฑ์ที่มีไขมันมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของไขมันชนิดนั้น ซึ่งสามารถทำได้โดยการลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็ว ภาพที่ 8

แสดงเค้าโครงของกระบวนการตกผลึก โดยแบ่งเหตุการณ์ออกเป็นสามส่วนคือ การเกิดนิวเคลียส 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) ซึ่งในกรณีของไตรกลีเซอไรด์ที่อยู่ในรูปของเหลวจะมีการตกผลึก โดยโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์จำนวนมากมารวมตัวกันเป็นกลุ่มหรือที่เรียกว่า คลัสเตอร์ (cluster) ถ้าองค์ประกอบมีความเสถียรหรือเมื่อคลัสเตอร์มีการโตถึงขนาดวิกฤต นิวเคลียสของผลึกก็จะมี การสร้างรูปแบบขึ้น ทำให้มีนิวเคลียสของไตรกลีเซอไรด์เพิ่มขึ้นจำนวนมากและจะเข้าสู่กระบวนการต่อไป คือ การโตของผลึก (Lidefelt, 2007)

#### 2.5.1.2 การโตของผลึก (Crystal growth)

การโตของผลึกเป็นกระบวนการแพร่ที่เกิดขึ้นบนผิวของของแข็งที่กำลังมีการโตเป็นผลึก โมเลกุลจะแพร่ผ่านเฟสที่เป็นของเหลวไปยังผิวหน้าของผลึกที่กำลังโต อัตราการเกิดของผลึกหนึ่งๆ ในสารละลายขึ้นกับการถ่ายเทของโมเลกุลของตัวถูกละลายไปยังผิวของผลึก และกลไกการเกาะติดที่ผิว การคนสารละลายระหว่างการตกผลึกจะช่วยลดอิทธิพลของการถ่ายเทของสารไปยังผิว

ของผลึก แต่ถึงแม้ว่าไม่มีการกวนระหว่างการทำตกผลึก การถ่ายเทสารไปที่ผิวก็มีใช้ปัจจัยที่เป็นตัวกำหนดอัตราการโตของผลึก

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

#### 2.5.1.3 การเปลี่ยนรูปแบบโครงสร้างของผลึก (transformation)

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

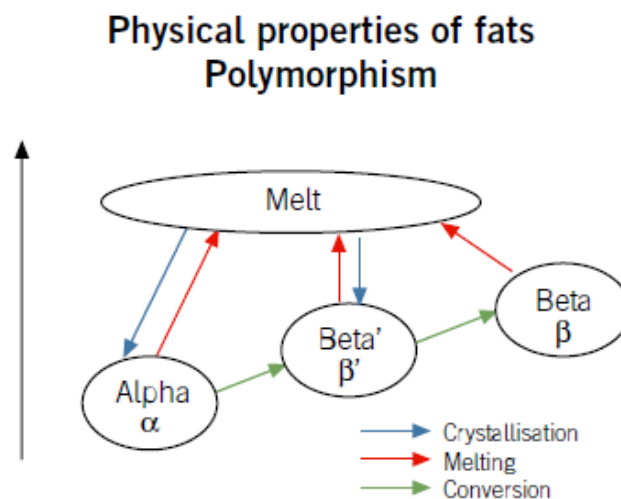
ภายใต้สภาวะในอุดมคติการโตของผลึกของไตรกลีเซอไรด์แต่ละโมเลกุลจะเกิดขึ้นภายในโครงสร้างผลึก อย่างไรก็ตาม ภายใต้สภาวะปกติไม่ค่อยพบการโตของผลึกไตรกลีเซอไรด์ภายในโครงสร้างผลึก แต่การโตของผลึกจะพบมากบริเวณผิวหน้าของโครงสร้างผลึก หากการโตของผลึกเกิดขึ้นเพียงบางส่วน จะทำให้เกิดรูปแบบโครงสร้างของผลึกที่ไม่เสถียร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

#### 2.5.2 ประเภทและคุณสมบัติของผลึก

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

โดยทั่วไปผลึกของไขมันมี 3 รูปแบบโครงสร้างหลัก คือ เฮลฟา ( $\alpha$ ) เบต้า-ไพรม ( $\beta'$ ) และ เบต้า ( $\beta$ ) โดยรูปแบบ  $\alpha$  มีพื้นฐานเป็นรูปทรงหกเหลี่ยม (hexagonal) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำและมีอัตราการลดลงของอุณหภูมิสูง รูปแบบโครงสร้างผลึกแบบ  $\alpha$  นี้ มีจุดหลอมเหลวต่ำสุด ทำให้ไม่เสถียรที่อุณหภูมิห้อง โดยส่วนใหญ่รูปแบบโครงสร้าง  $\alpha$  มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลอย่างหลวมๆ ทำให้มีความหนาแน่นน้อย รูปแบบโครงสร้างผลึกแบบที่ 2 คือ รูปแบบโครงสร้าง  $\beta'$  ซึ่งมีพื้นฐานเป็นรูปทรง

มุมฉาก (orthorhombic) โดยอาจเกิดจากการลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็ว หรืออาจเกิดจากการที่รูปแบบโครงสร้าง  $\alpha$  หลอมเหลวที่อุณหภูมิห้องแล้วเปลี่ยนมาเป็นรูปแบบ  $\beta'$  ส่วนรูปแบบผลึกแบบที่ 3 คือรูปแบบโครงสร้าง  $\beta$  ซึ่งมีพื้นฐานเป็น triclinic เกิดจากการลดลงของอุณหภูมิที่ช้ามาก หรืออาจเกิดจากการที่รูปแบบโครงสร้าง  $\beta'$  หลอมเหลวแล้วเปลี่ยนมาเป็นรูปแบบโครงสร้าง  $\beta$  ซึ่งรูปแบบผลึกแบบโครงสร้าง  $\beta$  นี้ มีขนาดของผลึกใหญ่และผลึกมีความคงตัวมาก โดยมีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลกันอย่างใกล้ชิด ทำให้มีความหนาแน่นมาก และมีจุดหลอมเหลวสูงกว่ารูปแบบโครงสร้าง  $\alpha$  และรูปแบบโครงสร้าง  $\beta'$  (Solís-Fuentes และคณะ, 2005) จะเห็นได้ว่ารูปแบบโครงสร้างผลึกแบบต่างๆ จะมีความสัมพันธ์กัน ทั้งในด้านการตกผลึก และการเปลี่ยนรูปแบบโครงสร้าง 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) รูปร่างปรากฏที่แตกต่างกันจะเกิดขึ้นเมื่อผลึกอยู่ภายใต้สภาวะการเติบโตที่ต่างกัน ปัจจัยที่มีผลต่อรูปร่างผลึก คือ ความเร็วของการเติบโต อุณหภูมิ และระดับความไม่บริสุทธิ์ของระบบ

เมื่อผลึกเติบโตภายในสภาวะการทำเย็นอย่างรวดเร็วมาก จะเกิดเป็นผลึกที่เป็นกิ่งก้าน สำหรับรูปร่างผลึก 3 แบบนี้จะเป็นสายหลักและก็จะมีการแตกออกไปในสารละลาย

ผลึกไขมันที่มีโครงสร้างผลึกแตกต่างกันอาจจะมีรูปร่างที่ต่างกัน ผลึก  $\beta'$ -polymorph มีลักษณะเป็นแฉก ซึ่งไม่เหมือนกับผลึกที่มีความคงตัวกว่าอย่างผลึก  $\beta$ -polymorph ที่มี

ลักษณะเป็นแผ่น (ไม่เสมอไป) เมื่อไขมันมีการจัดเรียงตัวใหม่ไปอยู่ในรูปแบบที่มีความคงตัวมากขึ้น มีผลทำให้รูปร่างของผลึกเปลี่ยนแปลงไปด้วยแม้ว่าโครงสร้างของโมเลกุลจะเหมือนเดิมซึ่งจะมีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์

#### 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

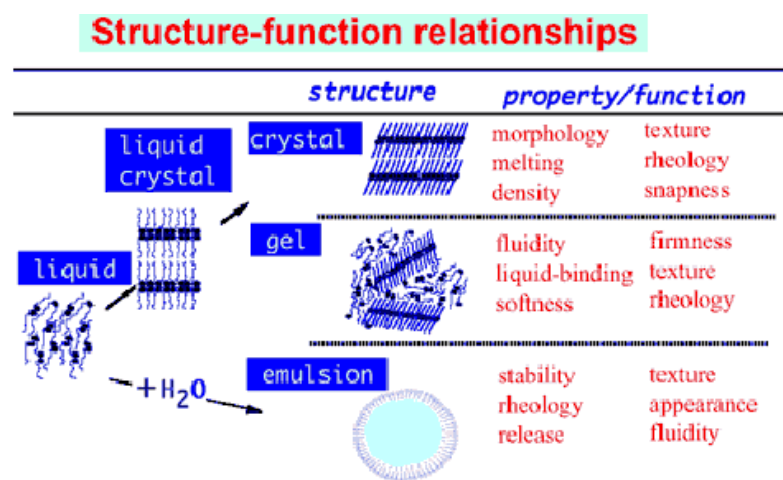
จำนวนของผลึกและการกระจายขนาดของผลึกนั้นเป็นตัวแปรสำคัญสำหรับการควบคุมอาหารที่เป็นผลึก จำนวนและการกระจายขนาดของผลึกนี้นำมาสู่คุณภาพของผลิตภัณฑ์และเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ การกระจายขนาดสามารถถูกวัดในเชิงปริมาณได้โดยนับจำนวนผลึกที่ขนาดต่างๆโดยใช้เทคนิคต่างๆ เช่น microscopy or light scattering techniques

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

2.5.3 อิทธิพลของโครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure) ของผลึกต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์อาหาร

ลักษณะรูปร่างของผลึกที่เกิดในผลิตภัณฑ์อาหารที่แตกต่างกันทำให้ลักษณะปรากฏของอาหารแตกต่างกันด้วยเนื่องจากผลึกแต่ละรูปแบบมีคุณสมบัติทางกายภาพที่ต่างกัน เช่น การหักเหของแสง อุณหภูมิการหลอมเหลว เป็นต้น ภาพที่ 10 แสดงถึงลักษณะโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลอาหารต่อลักษณะทางประสาทสัมผัสของอาหาร จะเห็นว่าเมื่ออาหารมีการเปลี่ยนแปลงจากสถานะที่เป็นของเหลวไปอยู่ในโครงสร้างอื่นๆ ได้แก่ โครงสร้างของผลึก โครงสร้างที่เป็นเจล และ

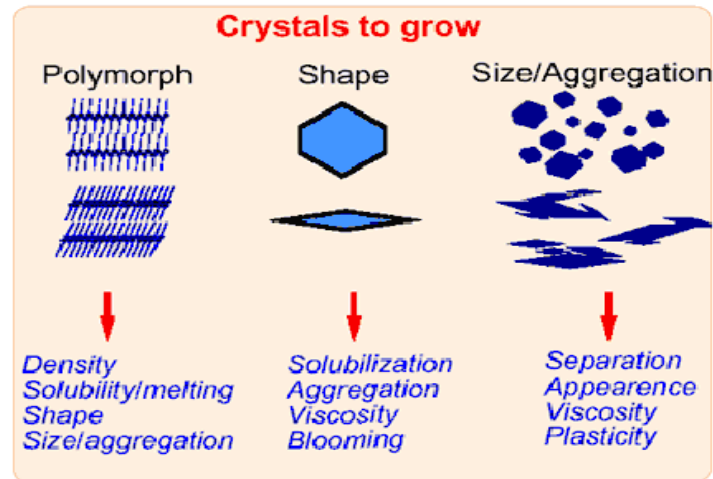
โครงสร้างที่เป็นอิมัลชัน ซึ่งโครงสร้างแต่ละแบบจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันทำให้ส่งผลต่อลักษณะทางประสาทสัมผัสแตกต่างกันด้วย โดยการเกิดเป็นโครงสร้างผลึกในอาหาร ลักษณะของผลึกจะมีผลต่อเนื้อสัมผัส อุณหภูมิการหลอมเหลวของผลึกมีผลต่อคุณสมบัติในการไหล ความหนาแน่นของผลึกมีผลต่อความเปราะของอาหาร สำหรับโครงสร้างที่เป็นเจลในอาหารนั้น ความสามารถในการไหล ความเหนียวมีผลต่อความแข็งแรงและความคงรูป การยึดเกาะกันระหว่างของเหลวในการเกิดเจลมีผลต่อเนื้อสัมผัสของเจล และความอ่อนนุ่มของเจลมีผลต่อคุณสมบัติในการไหล การเกิดโครงสร้างที่เป็นระบบอิมัลชันในอาหาร ความคงตัวมีผลต่อเนื้อสัมผัสและความหนืดมีผลต่อลักษณะปรากฏ เป็นต้น



ภาพที่ 10 โครงสร้างของไขมันต่อลักษณะทางประสาทสัมผัส

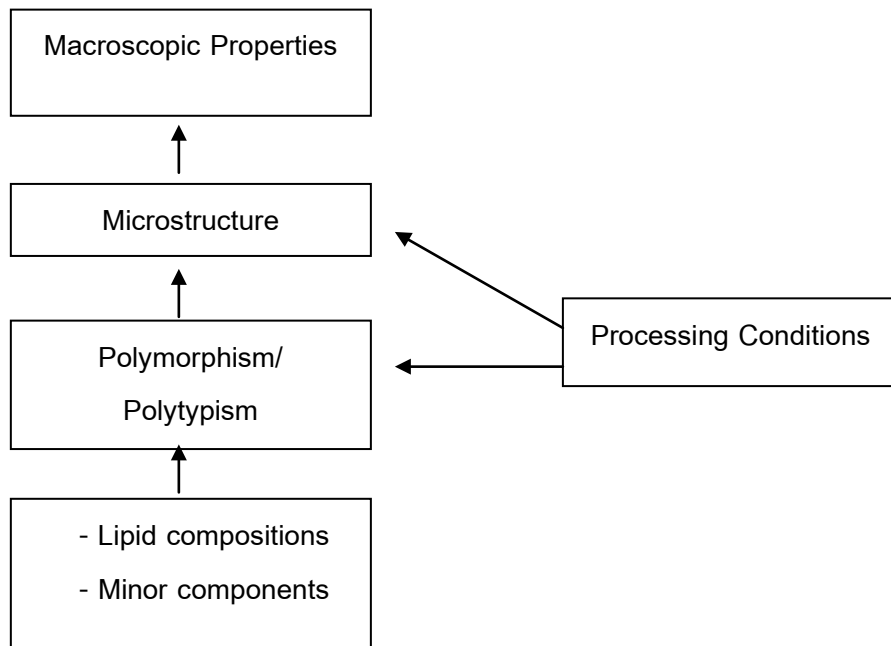
ที่มา : Research Interests (2011)

ภาพที่ 11 แสดงถึงความแตกต่างของผลึกที่เกิดต่อลักษณะที่แตกต่างด้านคุณสมบัติของผลึก จากภาพแสดงให้เห็นว่าการเกิดผลึกหลายโครงสร้าง (polymorph) ซึ่งผลึกแต่ละโครงสร้างจะมีรูปร่างและขนาดที่แตกต่างกันไป ผลึกที่เกิดในหลายโครงสร้างแต่ละโครงสร้างมีความหนาแน่น ความสามารถในการละลายหรือจุดหลอมเหลว รูปร่างและขนาดที่แตกต่างกัน ส่วนความแตกต่างของลักษณะรูปร่างของผลึกส่งผลต่อความสามารถในการละลาย ขนาดและการรวมตัวของผลึกส่งผลต่อลักษณะปรากฏ การแยกผลึกออกจากสารละลาย ความหนืดและคุณสมบัติความเป็นพลาสติก



ภาพที่ 11 ลักษณะการเติบโตของผลึกที่มีผลต่อคุณสมบัติต่างๆของผลิตภัณฑ์  
ที่มา : Research Interests (2011)

สำหรับผลิตภัณฑ์อาหารที่ต้องการการตกผลึกนั้น จะต้องมีการควบคุมกระบวนการตกผลึกให้ได้ลักษณะผลึกตามที่ต้องการ เช่น จำนวน ขนาดเฉลี่ยของผลึก ช่วงของขนาดผลึก รูปร่าง และรูปแบบของผลึกในระหว่างกระบวนการผลิตอาหาร ซึ่งจากภาพที่ 12 แสดงให้เห็นว่าสภาวะกระบวนการตกผลึกมีผลต่อคุณสมบัติของผลึก สำหรับผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่จะมีผลึกขนาดเล็กเป็นจำนวนมากทำให้อาหารเนื้อสัมผัสเรียบเนียน แต่ถ้ามีผลึกขนาดใหญ่จำนวนน้อยจะมีเนื้อสัมผัสที่ขรุขระซึ่งจะสามารถสัมผัสลักษณะนี้ได้โดยเพดานปาก



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 ซึ่งทำให้สีของช็อกโกแลตบริเวณผิวหน้าเปลี่ยนไปโดยมีลักษณะเป็นฝ้าสีขาว ซึ่งลักษณะปรากฏดังกล่าวไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค



**ภาพที่ 13** การเกิด fat bloom ของช็อกโกแลต

ที่มา: Lidefelt (2007)

การโตของผลึกสามารถทำได้ง่ายโดยใช้การหล่อผลึก รูปแบบโครงสร้างผลึกที่ไม่เสถียร จะเกิดการละลายและมีการตกผลึกซ้ำในรูปแบบผลึกที่เสถียรมากกว่าที่บริเวณผิวหน้าของผลึก พฤติกรรม การเกิดรูปแบบโครงสร้างผลึกของไขมันจะถูกกำหนดโดยไตรกลีเซอไรด์ ตารางที่ 6 แสดงลักษณะ พฤติกรรมการเกิดรูปแบบโครงสร้างผลึกของไขมันชนิดต่างๆ

**ตารางที่ 6** พฤติกรรมรูปแบบโครงสร้างผลึกของไขมันแต่ละชนิด

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

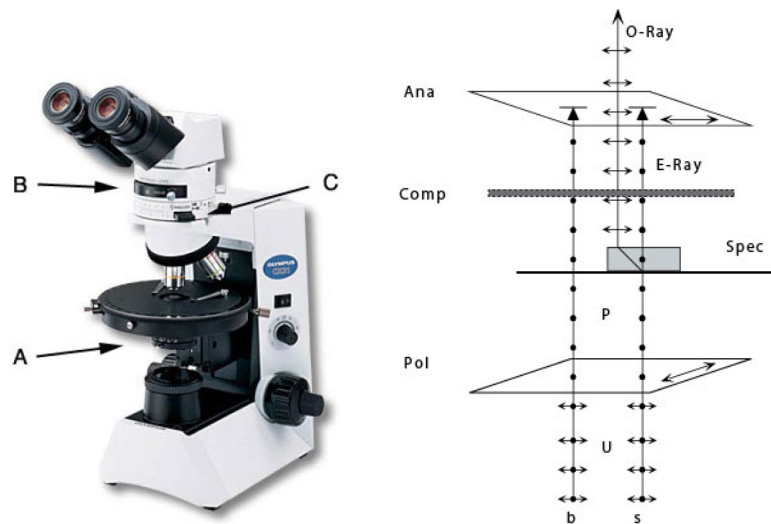
ที่มา: Lidefelt (2007)

#### 2.5.4 เทคนิคและวิธีการวิเคราะห์การตกผลึก

สำหรับการศึกษานี้พฤติกรรมการตกผลึกของไขมันและน้ำมันสามารถทำได้หลายวิธี ด้วย ซึ่งเทคนิคการวิเคราะห์ที่นิยมใช้กัน เช่น การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงความร้อนของวัตถุด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC), การวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) และการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของผลึกโดยการใช้ภาพถ่ายจาก 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 enclyclopedia, 2011a)

การเดินของแสงและองค์ประกอบของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงทิศทางเดียวแบบพื้นดำแสดงดังภาพที่ 14 โดยประกอบไปด้วยส่วนของ Polarizer ที่ทำหน้าที่ในการทำให้แสงที่ทิศทางเดียว โดยแสงเมื่อออกจากแหล่งกำเนิดแสงจะเดินทางผ่านแผ่นตัดแสงซึ่งจะตัดแสงบางส่วนจากนั้นเลนส์รวมแสงจะรวบรวมแสงที่เหลือส่องผ่านวัตถุ โดยแสงเกือบทั้งหมดทะลุวัตถุ มีบางส่วนที่เกิดการสะท้อนของจากวัตถุ แสงที่สะท้อนจะผ่านเลนส์วัตถุ ขณะที่แสงส่องผ่านโดยตรงจะไม่ผ่านเลนส์วัตถุและไม่รวบรวม จึงมีเฉพาะแสงสะท้อนเท่านั้นที่ทำให้เกิดภาพ เพื่อแสดงวัตถุบนพื้นดำ แผ่นทึบแสงจะถูกรวบรวมไว้ได้เลนส์รวมแสงมีเพียงแสงที่สะท้อนเข้าตา แสงจะถูกสะท้อนโดยอนุภาคบนสไลด์แทนการส่องผ่าน ในกล้องจุลทรรศน์เชิงซ้อน แผ่นตัดแสง (occulting disk) จะถูกรวบรวมระหว่างแหล่งกำเนิดแสงและเลนส์รวมแสง โดยการปรับเพิ่มแสงจะช่วยให้เกิดผลที่ดีขึ้น และการหรีช่องกันแสงลงช่วยให้ภาพระหว่างวัตถุและพื้นหลังคมชัดขึ้น (Caprette, 2005)

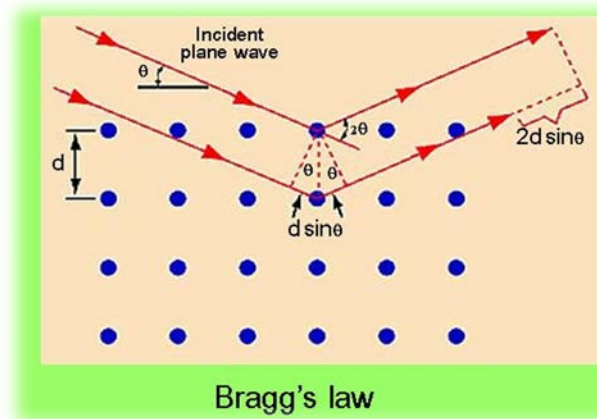


หมายเหตุ : A = Polarizer, B = Analyzer, C = Compensator

**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 ซึ่งวัสดุที่เป็นผลึกคือวัสดุที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในโครงสร้างอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในผลึกจะมีลักษณะเป็นระนาบเส้นตรงขนานกัน ซึ่งแต่ละระนาบจะอยู่ห่างกันเป็นระยะ  $d$  ( $d$ -spacing) ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งค่าระยะห่าง  $d$  จะมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นกับธรรมชาติของผลึก ซึ่งในปี ค.ศ.1912 W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดที่ว่า เมื่อรังสีเอ็กซ์ตกกระทบระนาบของอะตอมภายในผลึกที่มุมตกกระทบ  $\theta$  (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 ดังนั้นการใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกจึงมีความจำเป็นที่จะนำมาใช้ประยุกต์ 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 ของเนยโกโก้และไขมันโดยทั่วไปแสดงในตารางที่ 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),<br>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),<br>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, l, j, k<br>4.20 c, d, h, l                                                                                                                                                  |
| $\beta'$                  | 4.20(s), 3.80(s), 4.27, 3.97, 3.71 i, j, k<br>4.23(s), 3.85(w) b<br>4.20(vs), 3.83(s) b<br>4.27(s), 3.88(m) b<br>4.28(s), 3.90(m) b<br>4.20, 3.80 e, g<br>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<br>4.60(s) b, c, d, i, j, k, l<br>5.40(m), 4.57(vs), 3.99(s), 3.88(m), 3.76(m), 3.67(w) k<br>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 ที่อุณหภูมิตั้งที่เมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป โดยเป็นการศึกษาพฤติกรรมการตกผลึกที่อุณหภูมิตั้งที่ ซึ่งสามารถอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าวได้โดยการใช้แบบจำลองของ Avrami (Avrami model)

ธรรมชาติของกระบวนการการตกผลึกถูกบังคับด้วยปัจจัย 2 อย่างคือ เทอร์โมไดนามิกส์และจลนศาสตร์ ซึ่งมีผลทำให้ยากต่อการควบคุมและมีความผันแปรที่สูง ปัจจัยอื่น เช่น ระดับสิ่งเจือปน รูปแบบการกวน รูปแบบของภาชนะ โครงร่างของการทำความเย็น และลักษณะของรูปร่างผลึกที่ผลิต ซึ่งการตกผลึกถูกควบคุมโดยปรากฏการณ์ทางจลนศาสตร์ 2 รูปแบบ คือ การเกิดนิวเคลียสและการโตของผลึก

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

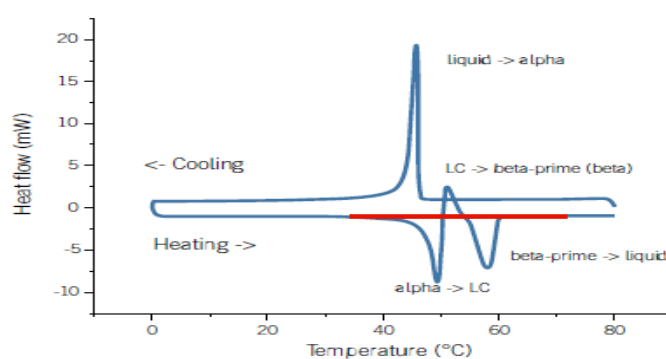
$$SFC_t = SFC_{\infty}(1 - e^{-kt^n}) \quad (1)$$

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 โดยนิวคลีโอมีรูปแบบเป็นเข็มและการโตของผลึกจะเป็นไปในทิศทางเดียวเท่านั้น ถ้ามีการรวมตัวของโมเลกุลของนิวคลีโอใน 2 ทิศทาง ค่า  $n$  จะเท่ากับ 2 และถ้ามีการโตของนิวคลีโอใน 3 ทิศทาง ค่า  $n$  จะเท่ากับ 3 เมื่อมีการเพิ่มบริเวณที่เกิด

นิวเคลียสโดยการมีส่วนร่วมของรูปแบบของโมเลกุลที่แตกต่างกัน ด้วยเหตุนี้ทำให้พบนิวคลีโอแบบเดม  
นานๆ 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) จะสัมพันธ์โดยตรงกับเอนทาลปี (enthalpy) หรือการเปลี่ยนแปลงความร้อนของตัวอย่าง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความจุความร้อน (heat capacity) ความร้อนของการหลอมเหลวหรือเอนทาลปีของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น (Lidefelt, 2007)



ภาพที่ 16 เทอร์โมแกรมจากการวิเคราะห์ไตรสเตียรีน (tristearine) ด้วยวิธี DSC

ที่มา: Lidefelt (2007)

โดยปกติแล้วจุดหลอมเหลวของไขมันจะบอกคุณสมบัติของไขมันชนิดนั้นได้น้อย ไขมันที่มีจุดหลอมเหลวเหมือนกันอาจมีความแตกต่างกันของลักษณะปรากฏที่อุณหภูมิห้อง เช่น ไขมันชนิดหนึ่งอาจจะเปราะ แตกง่าย แต่อีกชนิดอาจจะมีลักษณะคล้ายพลาสติกคือ กึ่งแข็งกึ่งเหลว ซึ่งพฤติกรรมนี้เป็นผลมาจากโครงสร้างของปริมาณไขมันที่เป็นของแข็ง (solid fat content) ถ้าปริมาณไขมันที่เป็นของแข็งมีจำนวนมากเกินกว่า 50% ไขมันจะมีลักษณะเป็นของแข็งเปราะหรือแตกหักง่าย (Lidefelt, 2007)