

ปฏิกิริยาทรานสเอสเทอร์รีฟิเคชันของน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง



นางสาวชรีรา พรหมจอม  
นางสาวอังฉรา สุวรรณวบุญ

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 42397  
วัน, เดือน, ปี..... 20 พ.ค. 2545

b.....  
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2543

11208302

# Transesterification Reaction of Palm Olein in a Packed Bed Reactor



A Report Submitted in Partial Fulfillment of Requirements  
for the Degree of Bachelor of Chemical Engineering  
Faculty of Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

2000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง ปฏิบัติงานสออสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม  
ในเครื่องปฏิกรณ์เบคนิ่ง  
โดย นางสาวชिरา พรหมจอม  
นางสาวอังฉรา สุวรรณวรรณ  
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. ประกอบ กิจไชยา

ปริญญาานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
( ผศ.ดร. ประกอบ กิจไชยา )

.....กรรมการ  
( ดร. โชโกะ เทเรซ่า อิโต้ )

.....กรรมการ  
( อาจารย์ เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท อีสต์เอเชียติก ประเทศไทย จำกัด และ คุณทิพา สายคาราสมุทร ที่ได้เอื้อเฟื้อ เอนไซม์ โลโปไซม์ ไอเอ็ม 20 เพื่อใช้ในการทดลอง ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการบริษัท เซลล์ แห่งประเทศไทย จำกัด ที่ให้ความกรุณาวิเคราะห์ปริมาณน้ำในน้ำมันปาล์ม ขอขอบคุณ คุณชัชวี ไทยสุชาติ ได้ให้ความช่วยเหลือ ในการสร้างเครื่องปฏิกรณ์

ขอขอบคุณ ผศ.ดร. ประกอบ กิจไชยา อาจารย์ที่ปรึกษาซึ่งได้ให้คำแนะนำแก่ผู้จัดทำในการดำเนินโครงการ ตลอดจนจัดหาอุปกรณ์และสารเคมีสำหรับการทดลอง ขอขอบคุณอาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือในการทดลองรวมถึงการใช้อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง

ผู้จัดทำ

เรื่อง ปฏิบัติการงานสออสเทอร์รีฟิเคชันของน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง

โดย นางสาวชिरา พรหมจอม

นางสาวอังฉรา สุวรรณวบุญ

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา

ปริญญาานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปฏิบัติการงานสออสเทอร์รีฟิเคชันของน้ำมันปาล์มเร่งปฏิบัติการด้วยเอนไซม์ตรีง โกลโปไซม์ ไอเอ็ม 20 ในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง เอนไซม์นี้จะทำหน้าที่เร่งปฏิบัติการสลายตัวด้วยน้ำของไตรกลีเซอไรด์ได้กรดไขมันอิสระและกลีเซอรอล และปฏิบัติการย้อนกลับของปฏิบัติการการสลายตัวด้วยน้ำ โดยเอนไซม์จะสามารถจัดเรียงตำแหน่งกลุ่มแอซิดของไตรแอซิดกลีเซอรอลใหม่ด้วยปฏิบัติการงานสออสเทอร์รีฟิเคชันได้ที่ปริมาณน้ำผสมในน้ำมันต่ำ ๆ ปฏิบัติการงานสออสเทอร์รีฟิเคชันสามารถเปลี่ยนคุณสมบัติทางกายภาพของไขมันหรือน้ำมันได้ จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่ที่มีจุดหลอมเหลวสูงขึ้น พบว่าจุดหลอมเหลว ( $T_m$ ) ของผลิตภัณฑ์ในหน่วยองศาเซลเซียสมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับสเปซไทน์ ( $\tau$ ) ในหน่วยนาทีก ตัวอย่างเช่น ที่อุณหภูมิของปฏิบัติการ 66.0 ± 1.0 องศาเซลเซียส จะมีความสัมพันธ์เป็น  $T_m = 0.3207\tau + 39.965$  และ  $T_m = 0.6201\tau + 19.145$  เมื่อเติมน้ำ 1.0 และ 3.0% โดยน้ำหนักในน้ำมันปาล์ม ตามลำดับ จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ที่ได้เมื่อเติมน้ำ 3.0 % จะต่ำกว่าที่ 1.0 % เนื่องจากปฏิบัติการงานสออสเทอร์รีฟิเคชันจะไม่สามารถเกิดขึ้นได้ที่ปริมาณน้ำมากเกินไปแต่จะเกิดปฏิบัติการการสลายตัวด้วยน้ำมากขึ้นได้ผลิตภัณฑ์ที่มีองค์ประกอบของกรดไขมันอิสระซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์มีจุดหลอมเหลวต่ำลง จากการทดสอบพบว่าที่อุณหภูมิการทดลอง 66.0 ± 1.0 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารป้อนเข้า 1.40 มิลลิลิตรต่อนาที โดยมีปริมาณน้ำ 1.0 % โดยน้ำหนักในน้ำมันปาล์มจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีองค์ประกอบของกรดไขมันอิสระ 0.76 % น้อยกว่า น้ำมันปาล์มที่มีปริมาณน้ำ 3.0 % โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีองค์ประกอบของกรดไขมันอิสระถึง 8.48 % การศึกษาอุณหภูมิของการทำปฏิบัติการออสเทอร์รีฟิเคชันที่ 66.0 ± 1.0 และ 70.0 ± 1.0 องศาเซลเซียสเมื่อเติมน้ำ 1.0 % โดยน้ำหนักในน้ำมันปาล์ม พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ 70.0 ± 1.0 องศาเซลเซียสได้จุดหลอมเหลวที่ต่ำกว่า 66.0 ± 1.0 องศาเซลเซียส อันอาจเนื่องมาจากการเสื่อมสภาพของเอนไซม์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title     Transesterification of Palm Olein in Packed Bed Reactor  
By                 Miss Wachira Pormjom  
                       Miss Achara Suwanworabun  
Advisor           Asst. Prof. Dr. Prakob Kitchaiya  
Report for        Bachelor Degree of Chemical Engineering  
                       Department of Chemical Engineering  
                       King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

### Abstract

The transesterification reaction of palm olein catalyzed by Lypozyme IM 20 immobilized enzyme was studied in a packed bed reactor. This enzyme catalyzed the hydrolysis of triglycerides to produce free fatty acid and glycerol and the reverse of the hydrolysis. The enzyme can change the positions of the acyl group of triglycerides by transesterification reaction at low water content. Rearrangement of fatty acid positions of triglyceride molecules of fats and oils through transesterification process can alter the initial physical properties of oils and lead to the formation of a new product that has higher melting point. It was found that the increasing of melting point ( $T_m$ ) in degree celcius of product is linear with space time( $\tau$ ) in minutes. For example, at the reaction temperature  $66.4^\circ\text{C}$ , the correlation are  $T_m = 0.3207\tau + 39.965$  and  $T_m = 0.6201\tau + 19.145$  when 1.0 % and 3.0 % by weight of water being added to the palm olein, respectively. The 3.0 % of added-water product had lower melting point than the 1.0 %. Transesterification rate is lower in the presence of a large amount of water while the hydrolysis of oil is enhanced. Hydrolysis produces the free fatty acids causing lower melting point product. The free fatty-acid percentages of the product from 1.0 % water in oil feed at  $66.4^\circ\text{C}$  and the flow rate of 1.4 millilitre/minute was 0.76 % , comparing with 8.48% free fatty acid from the feed containing 3.0 % water at the same experiment condition. Products from the experiments at  $66.4^\circ\text{C}$  had higher melting points than that from  $70.3^\circ\text{C}$  due to the enzyme deactivation.

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ฅ
สารบัญตาราง.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญาโท.....	2
1.3 ขอบเขตของปริญญาโท.....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	4
2.1 นิยามของลิปิต.....	4
2.2 ปฏิกริยาการเติมไฮโดรเจน.....	14
2.3 ปฏิกริยาอินเทอร์เอสเทอร์รีฟิเคชัน.....	18
2.4 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์รีฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม.....	22
บทที่ 3 การทดลอง.....	25
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง.....	25
3.2 สารเคมี.....	26
3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	26
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	31
4.1 การทดลองเบื้องต้นแบบกะเพื่อหาเปอร์เซ็นต์น้ำโดยน้ำหนัก ที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยา.....	31
4.2 การทดลองหาผลของเปอร์เซ็นต์น้ำโดยน้ำหนักและอุณหภูมิที่มีผล ต่อการเกิดปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งแบบต่อเนื่อง.....	32
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

## ภาคผนวก

- ก. โกลโปไซม์ ไอเอ็ม 20..... ก-1
- ข. ข้อมูลของเนยเทียม..... ข-1
- ค. ข้อมูลผลการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง..... ค-1
- ง. ผลการทดลองและการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์กรดไขมันอิสระในผลิตภัณฑ์..... ง-1
- จ. ข้อมูลของน้ำมันปาล์มที่ใช้เป็นสารตั้งต้น..... จ-1
- ฉ. การทดลองหาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม..... ฉ-1



## สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่

2.1	โครงสร้างของไตรแอซิติลทีเซอรอล.....	4
2.2	ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่หมู่คาร์บอกซิลิกของกรดไขมัน.....	9
2.3	ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่พันธะคู่ของกรดไขมัน.....	9
2.4	โครงสร้างทั่วไปของขี้ผึ้งบางชนิด.....	10
2.5	แอลฟอสโฟลิปิด.....	11
2.6	พลาสมาโลเจน.....	11
2.7	สฟิงโกลิปิด.....	11
2.8	เปอร์ไฮโดรไฮโคลเพนทาโนฟีแนนทริน.....	13
2.9	กลไกการเกิดปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน.....	16
2.10	โซเดียมเมทิลเลท.....	19
2.11	แสดงการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน.....	22
3.1(ก)	รูปถ่ายเครื่องมือและอุปกรณ์การทดลองในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง.....	26
3.1(ข)	แผนภาพเครื่องมือและอุปกรณ์การทดลองในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง.....	26
4.1	จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์กับสเปซโทรม์ ที่อุณหภูมิการทดลอง $66.0 \pm 1.0$ องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในน้ำมันปาล์ม.....	32
4.2	จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์กับสเปซโทรม์ ที่อุณหภูมิการทดลอง $70.0 \pm 1.0$ องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในน้ำมันปาล์ม.....	33
4.3	จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์กับสเปซโทรม์ ที่อุณหภูมิการทดลอง $66.0 \pm 1.0$ องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำ 3.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในน้ำมันปาล์ม.....	34
4.4	จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์กับสเปซโทรม์ ที่อุณหภูมิการทดลอง $66.0 \pm 1.0$ และ $70.0 \pm 1.0$ องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันปาล์ม.....	35
4.5	จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากน้ำมันปาล์มเติมน้ำ 1.0 เปอร์เซ็นต์ และ 3.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิทดลอง $66.0 \pm 1.0$ องศาเซลเซียส.....	36
ฉ-1	แผนภาพเครื่องมือและอุปกรณ์การทดลองหาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม.....	ฉ-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่

2.1	กรดไขมันที่พบมากในธรรมชาติ.....	6
2.2	กรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของไขมันและน้ำมันบางชนิด.....	7
2.3	กรดไขมันที่พบในปริมาณเล็กน้อย.....	8
2.4	ฟอสโฟลิปิดที่พบในธรรมชาติ.....	12
2.5	สภาวะในการเกิดปฏิกิริยาต่อการเลือกการเกิดไขมันแบบทรานสและ อัตราการผลิตปฏิกิริยา.....	15
2.6	องค์ประกอบของไตรเอซิลกลีเซอรอลในน้ำมันปาล์ม.....	24
3.1	ปริมาณเอทิลแอลกอฮอล์และน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการไทเทรต ตามปริมาณกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์.....	30
4.1	ผลการทดลองเบื้องต้นแบบกะเพื่อหาเปอร์เซ็นต์น้ำโดยน้ำหนักที่เหมาะสมใน การเกิดปฏิกิริยา.....	31
4.2	ผลการทดลองหาเปอร์เซ็นต์กรดไขมันอิสระในผลิตภัณฑ์.....	37
ข-1	องค์ประกอบของไขมันในมาร์การีนทั่วไป.....	ข-1
ข-2	องค์ประกอบของไขมันในชอทเทนนิ่งทั่วไป.....	ข-2
ค-1	จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ณ เวลาและอัตราการไหลของสารป้อนเข้าต่าง ๆ ปริมาณน้ำ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ $66.0 \pm 1.0$ องศาเซลเซียส.....	ค-1
ค-2	จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ณ เวลาและอัตราการไหลของสารป้อนเข้าต่าง ๆ ปริมาณน้ำ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ $70.0 \pm 1.0$ องศาเซลเซียส.....	ค-2
ค-3	จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ณ เวลาและอัตราการไหลของสารป้อนเข้าต่าง ๆ ปริมาณน้ำ 3.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ $66.0 \pm 1.0$ องศาเซลเซียส.....	ค-4
ค-4	จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์กับสเปซไทม์ ปริมาณน้ำ 1.0 เปอร์เซ็นต์ที่ $66.0 \pm 1.0$ องศาเซลเซียส.....	ค-6
ค-5	จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์กับสเปซไทม์ ปริมาณน้ำ 1.0 เปอร์เซ็นต์ที่ $70.0 \pm 1.0$ องศาเซลเซียส.....	ค-6
ค-6	จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์กับสเปซไทม์ ปริมาณน้ำ 3.0 เปอร์เซ็นต์ที่ $66.0 \pm 1.0$ องศาเซลเซียส.....	ค-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค-7	ผลการทดสอบการเสื่อมสภาพของเอนไซม์.....ค-7
ง-1	ปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรต.....ง-1
ง-2	การไทเทรตหาเปอร์เซ็นต์กรดไขมันอิสระ.....ง-3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

P : กรดปาล์มมิติก

O : กรดโอเลอิก

L : กรดไลโนเลอิก

S : กรดสเตียริก

M : กรดไมริสติก

T : สเปนซ์ไทม์, นาที

$T_m$  : จุดหลอมเหลว, องศาเซลเซียส

$R^2$  : ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

BIU : Batch Interesterification Unit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

การทำน้ำมันพืชหรือน้ำมันที่ได้จากสัตว์ให้แข็งตัวเป็นกรรมวิธีในการทำเนยเทียม โดยทั่วไปแล้วจะใช้ปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน (Hydrogenation) ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเปลี่ยนองค์ประกอบของไขมันในน้ำมันพืชหรือน้ำมันที่ได้จากสัตว์ให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีองค์ประกอบของไขมันอิ่มตัวและไขมันไม่อิ่มตัวที่มีไอโซเมอร์แบบทรานสเพิ่มมากขึ้น [1,2,3] ไขมันอิ่มตัวบางชนิดและไขมันไม่อิ่มตัวที่มีไอโซเมอร์แบบทรานสที่เกิดขึ้นจะเป็นสารตั้งต้นของการเกิดไลโปโปรตีนที่มีความหนาแน่นต่ำ (Low density lipoprotein, LDL) ซึ่งเป็นสารประเภทคอเลสเตอรอลที่ไม่ดีจะก่อให้เกิดอันตรายต่อร่างกายโดยจะเกาะอยู่ตามเส้นเลือดแดง ทำให้เกิดการอุดตันของเส้นเลือดเสียไป โดยเฉพาะเส้นเลือดแดงที่ส่งเลือดไปเลี้ยงที่หัวใจ มีผลให้เส้นเลือดหัวใจตีบ เป็นสาเหตุของโรคหัวใจ โรคความดันโลหิตสูงและโรคเบาหวาน [4,5,6,7] ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้กรรมวิธีอื่นในการทำน้ำมันแข็งตัวซึ่งได้แก่ปฏิกิริยาทรานสเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Transesterification) ซึ่งปฏิกิริยานี้จะไม่ทำให้เกิดไขมันไม่อิ่มตัวไอโซเมอร์แบบทรานสและไม่เกิดไขมันแบบอิ่มตัว [1,2,8,9,10,11] จึงเป็นการลดโอกาสเสี่ยงที่จะเกิดคอเลสเตอรอลที่ไม่ดีในเส้นเลือดสูง

### 1.1 ความเป็นมาของปรีลยูนานิพนธ์

ปฏิกิริยาทรานสเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่ใช้ในการเปลี่ยนตำแหน่งของกรดไขมันของไตรเอซิลกลีเซอรอลโดยใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งในที่นี้จะใช้เอนไซม์ไลเปสที่มีชื่อทางการค้าว่า ไลโปไซม์ ไอเอ็ม 20 (Lipozyme IM 20) ซึ่งสกัดมาจาก *Rhizomucor miehei* เอนไซม์จะถูกตรึงอยู่บนเรซินประจุลบ (Anionic resin) เป็นเอนไซม์ตรึง (Immobilized enzyme) โดยจะทำให้เกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนตำแหน่งของกรดไขมันที่อยู่บนไตรเอซิลกลีเซอรอลเฉพาะตำแหน่งที่ 1 และ 3 ซึ่งจะทำให้คุณสมบัติทางกายภาพของไขมันเปลี่ยนไป เช่น จุดหลอมเหลวสูงขึ้น มีความแข็งตัวโดยไม่ทำให้เกิดไขมันอิ่มตัวหรือเกิดไขมันในรูปของไอโซเมอร์แบบทรานส ซึ่งเป็นอันตรายต่อร่างกาย ประโยชน์ที่ได้จากปฏิกิริยานี้ได้นำมาใช้ในการผลิตเนยเทียมที่มีปริมาณเอ็กสารนี้เป็นเอ็กสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของไขมันอิ่มตัวและไขมันที่มีไอโซเมอร์แบบทรานส์ต่ำ ประเภทของเนยเทียมได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข ในการใช้งานตัวเร่งปฏิกิริยาจะต้องคำนึงถึงสถานะที่เอนไซม์สามารถทำงานได้ดี เนื่องจากปฏิกิริยาเกิดเป็นสองขั้นตอนต่อเนื่องกัน ขั้นตอนแรกได้แก่ปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยน้ำ (Hydrolysis) ปฏิกิริยานี้จะแยกไตรเอซิลกลีเซอรอลเป็นกรดไขมันและกลีเซอรอล [1,8,10,11] จากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันเพื่อเปลี่ยนตำแหน่งของกรดไขมันบนไตรเอซิลกลีเซอรอลให้ได้คุณสมบัติทางกายภาพใหม่ตามที่ต้องการ ได้เนยเทียมที่มีคุณภาพและไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ นอกจากนี้กระบวนการผลิตดังกล่าวเป็นกระบวนการที่ปลอดภัยและประหยัดพลังงาน เนื่องจากไม่ต้องใช้ความร้อนสูง สถานะที่จำเป็นของการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าว ได้แก่ปริมาณน้ำซึ่งมีผลต่อสมดุลของปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยน้ำและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน อุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยา อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณน้ำมัน เป็นต้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

1. ศึกษาทฤษฎีเบื้องต้นของการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มโดยใช้เอนไซม์ตรีง
2. ศึกษาผลของอุณหภูมิและปริมาณน้ำที่เติมในน้ำมันปาล์มที่มีต่อการใช้งานเอนไซม์ตรีงในปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยน้ำและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง

## 1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

1. หาแนวโน้มสถานะการใช้งานเอนไซม์ตรีง ซึ่งได้แก่ สัดส่วนปริมาณน้ำในน้ำมันปาล์มและอุณหภูมิที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยน้ำและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันในการทดลองแบบกะ
2. หาสถานะการใช้งานเอนไซม์ตรีงในปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยน้ำและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งต่อเนื่อง โดยใช้แนวโน้มข้อมูลที่ได้จากการทดลองแบบกะ
3. หาจุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มที่ได้จากการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งต่อเนื่อง ในสถานะที่อุณหภูมิ อัตราการไหลและสัดส่วนปริมาณน้ำในน้ำมันปาล์มต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. สามารถผลิตผลิตภัณฑ์น้ำมันปาล์มที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่าอุณหภูมิห้องโดยใช้ปฏิกิริยาทรานสเอสเทอร์ริฟิเคชันแทนวิธีการใช้ปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนที่จะก่อให้เกิดไขมันอิ่มตัวและไขมันที่มีไอโซเมอร์แบบทรานสเพิ่มมากขึ้น

2. สามารถนำผลจากการศึกษาและการทดลองจากปริญญานิพนธ์ไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ในการพัฒนากระบวนการทำเนยเทียมในเครื่องปฏิกรณ์เบคนิ่งแบบต่อเนื่องแทนการใช้งานในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 นิยามของลิพิด [12]

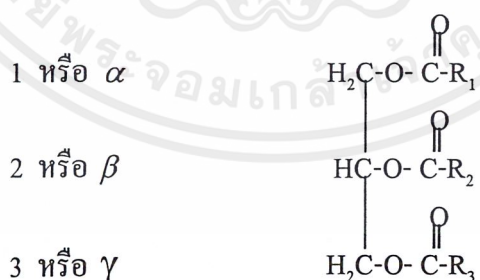
ลิพิด เป็นสารที่ไม่ละลายน้ำแต่จะละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์เช่น อีเทอร์ ปีโตรเลียม อีเทอร์ คลอโรฟอร์ม คาร์บอนเตตระคลอไรด์ เบนซีน อะซีโตน และแอลกอฮอล์ หน้าที่ที่สำคัญของชีวโมเลกุลประเภทไขมันคือ เป็นแหล่งสะสมพลังงาน เป็นส่วนประกอบของโครงสร้างเยื่อหุ้มเซลล์ (Cell membrane) และคอยเป็นเกราะป้องกันมิให้โมเลกุลประเภทโพลาร์ผ่านเข้าออกเซลล์ได้โดยง่าย ไขมันแบ่งได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ คือ ลิพิดเชิงเดี่ยว (Simple lipid) ลิพิดเชิงประกอบ (Compound lipid) และลิพิดอนุพันธ์ (Derived lipid)

##### 2.1.1 ลิพิดเชิงเดี่ยว ได้แก่

###### 1) แอซิลกลีเซอรอลหรือกลีเซอไรด์ (acylglycerol, glyceride)

เป็นเอสเทอร์ระหว่างกลีเซอรอล (glycerol) กับกรดไขมัน (fatty acid) ดังรูปที่

2.1 กลีเซอรอลมีหมู่ไฮดรอกซิล 3 หมู่ ดังนั้นอาจจะมีการรวมตัวกับกรดไขมันโดยกระบวนการเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็น โมโน-, ได- หรือ ไตรแอซิลกลีเซอรอลก็ได้



ตำแหน่งคาร์บอน      โครงสร้างไตรแอซิลกลีเซอรอล

รูปที่ 2.1 โครงสร้างของไตรแอซิลกลีเซอรอล

ในธรรมชาติพบไตรเอซิลกลีเซอรอลมากกว่าโมโน- หรือไดเอซิลกลีเซอรอล กรดไขมัน  $R_1$ ,  $R_2$  และ  $R_3$  อาจเหมือนกันหรือต่างกันและจะเป็นกรดไขมันที่อิ่มตัวหรือไม่อิ่มตัวก็ได้ ถ้านำไตรเอซิลกลีเซอรอลไปทำปฏิกิริยา Saponification ซึ่งเป็นการย่อยสลายพันธะของเอสเทอร์ด้วยด่าง จะให้ผลิตภัณฑ์เป็นกลีเซอรอลและเกลือของกรดไขมันที่อุณหภูมิห้อง ไตรเอซิลกลีเซอรอลจะมีสถานะเป็นของแข็งหรือของเหลวขึ้นอยู่กับชนิดและธรรมชาติของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบ

## 2) กรดไขมัน (Fatty acid)

กรดไขมันในธรรมชาติส่วนใหญ่จะเป็นไฮโดรคาร์บอนสายยาวที่มีหมู่คาร์บอกซิลิก อยู่ตรงปลาย จำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ตั้งแต่ 4 – 30 อาจมีความอิ่มตัวหรือไม่อิ่มตัว ถ้าไม่อิ่มตัวจะมีพันธะคู่ (Double bond) ได้ประมาณ 1 – 6 พันธะ ซึ่งมักจะมีรูปลักษณะ (Configuration) แบบซิส (cis) ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ไตรเอซิลกลีเซอรอลใดที่ประกอบด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัวเป็นจำนวนมาก ไตรเอซิลกลีเซอรอลนั้นจะมีจุดหลอมเหลวต่ำ มีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้องเรียกว่า น้ำมัน (Oil) โดยมากเป็นน้ำมันจากพืชและสัตว์เลือดเย็น เช่น น้ำมันมะกอก น้ำมันเมล็ดฝ้าย น้ำมันตับปลา ในทางตรงข้ามไตรเอซิลกลีเซอรอลที่ประกอบด้วยกรดไขมันอิ่มตัวเป็นจำนวนมาก จะมีจุดหลอมเหลวสูง มีสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง เรียกว่า ไขมัน (Fat) โดยมากได้จากสัตว์เลือดอุ่น เช่น น้ำมันหมู เนย ไขสัตว์ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม น้ำมันหรือไขมันต่างก็เป็นของผสมระหว่างลิพิดโมเลกุลประเภทต่าง ๆ มิใช่มีแต่เอซิลกลีเซอรอลเพียงชนิดเดียว ตัวอย่างองค์ประกอบของกรดไขมันในไขมันและน้ำมันแสดงดังตารางที่ 2.2

เนื่องจากคนเราไม่สามารถสังเคราะห์กรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มีพันธะคู่มากกว่าหนึ่งพันธะ (Polyunsaturated fatty acid) ได้ จึงจำเป็นที่จะต้องได้รับกรดไขมันประเภทนี้จากอาหารที่รับประทานเข้าไป กรดไขมันประเภทนี้จึงจัดเป็นกรดไขมันที่จำเป็น (Essential fatty acid) ได้แก่ กรดไขมันไลโนเลอิก (Linoleic) กรดไขมันไลโนเลนิก (Linolenic) และกรดไขมันอะราคิโดนิก (Arachidonic) นอกจากนี้ยังมีกรดไขมันชนิดอื่น ๆ ที่พบในปริมาณเล็กน้อยดังแสดงในตารางที่ 2.3

โมเลกุลของกรดไขมันมีหมู่คาร์บอกซิลิก ดังนั้นจึงเกิดปฏิกิริยาได้เหมือนกรดคาร์บอกซิลิกทั่ว ๆ ไปเช่น เกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันดังแสดงในรูปที่ 2.2 หรือปฏิกิริยารีดักชันดังรูปที่ 2.3 ส่วนที่เป็นสายยาวของไฮโดรคาร์บอนนั้นปฏิกิริยาสำคัญต่าง ๆ มักจะเกิดที่บริเวณพันธะคู่ โครงสร้างที่เหลือส่วนใหญ่จะเฉื่อย (Inert) ต่อสารเคมี

ตารางที่ 2.1 กรดไขมันที่พบมากในธรรมชาติ

<b>I. Even-numbered—straight-chain—fully saturated</b>	
Lauric acid (C <sub>12</sub> )	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>10</sub> COOH
Myristic acid (C <sub>14</sub> )	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>12</sub> COOH
Palmitic acid (C <sub>16</sub> )	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>14</sub> COOH
Stearic acid (C <sub>18</sub> )	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>16</sub> COOH
Arachidic acid (C <sub>20</sub> )	(C <sub>17</sub> )(CH <sub>2</sub> ) <sub>18</sub> COOH
<b>II. Even-numbered—straight-chain—unsaturated (all cis)</b>	
Palmitoleic acid (C <sub>16</sub> ) Δ <sup>9</sup>	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>7</sub> CH=CH(CH <sub>2</sub> ) <sub>7</sub> COOH
Oleic acid (C <sub>18</sub> ) Δ <sup>9</sup>	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>7</sub> CH=CH(CH <sub>2</sub> ) <sub>7</sub> COOH
Linoleic acid (C <sub>18</sub> ) Δ <sup>9,12</sup>	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>4</sub> CH=CHCH <sub>2</sub> CH=CH(CH <sub>2</sub> ) <sub>7</sub> COOH
Linolenic acid (C <sub>18</sub> ) Δ <sup>9,12,15</sup>	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH=CHCH <sub>2</sub> CH=CHCH <sub>2</sub> CH=CH(CH <sub>2</sub> ) <sub>7</sub> COOH
Arachidonic acid (C <sub>20</sub> ) Δ <sup>5,8,11,14</sup>	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>4</sub> CH=CHCH <sub>2</sub> CH=CHCH <sub>2</sub> CH=CHCH <sub>2</sub> CH=CH(CH <sub>2</sub> ) <sub>5</sub> COOH
<b>III. Miscellaneous acids (very limited occurrence)</b>	
Ricinoleic acid (C <sub>18</sub> ) Δ <sup>9</sup> (hydroxy-containing)	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>5</sub> CH(OH)CH <sub>2</sub> CH=CH(CH <sub>2</sub> ) <sub>7</sub> COOH
Tuberculoic acid (C <sub>19</sub> ) (branched, odd)	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>7</sub> CH(CH <sub>2</sub> ) <sub>8</sub> COOH
Lactobacillic acid (C <sub>19</sub> ) (cyclic branch, odd)	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>8</sub> CH(CH <sub>2</sub> ) <sub>6</sub> COOH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 กรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของไขมันและน้ำมันบางชนิด

AVERAGE COMPOSITION OF FATTY ACIDS (mole %)

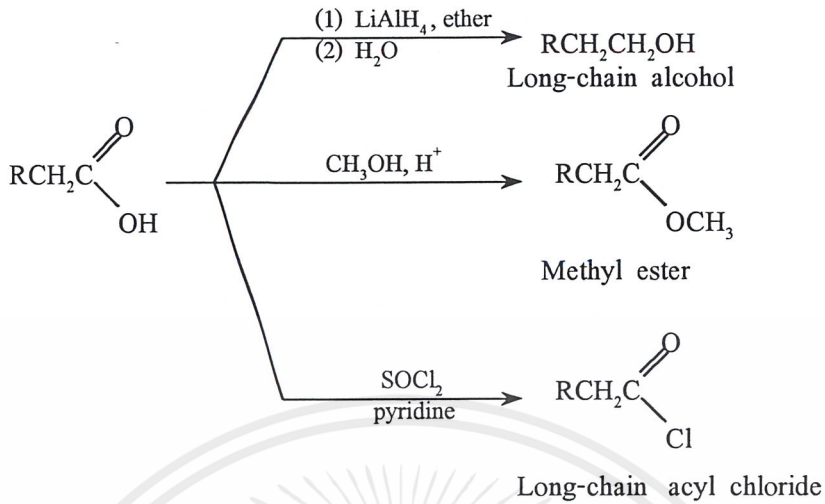
FAT OR OIL	SATURATED										UNSATURATED		
	C <sub>4</sub> BUTYRIC ACID	C <sub>6</sub> CAPROIC ACID	C <sub>8</sub> CAPRYLIC ACID	C <sub>10</sub> CAPRIC ACID	C <sub>12</sub> LAURIC ACID	C <sub>14</sub> MYRISTIC ACID	C <sub>16</sub> PALMITIC ACID	C <sub>18</sub> STEARIC ACID	C <sub>18</sub> PALMIT-OLEIC ACID	C <sub>18</sub> OLEIC ACID	C <sub>18</sub> LINOLEIC ACID	C <sub>18</sub> LINOLENIC ACID	
Animal Fats													
Butter	3-4	1-2	0-1	2-3	2-5	8-15	25-29	9-12	4-6	18-33	2-4		
Lard							25-30	12-18	4-6	48-60	6-12	0-1	
Beef tallow							24-34	15-30		35-45	1-3	0-1	
Vegetable Oils													
Olive						0-1	5-15	1-4		67-84	8-12		
Peanut							7-12	2-6		30-60	20-38		
Corn						1-2	7-11	3-4	1-2	25-35	50-60		
Cottonseed						1-2	18-25	1-2	1-3	17-38	45-55		
Soybean						1-2	6-10	2-4		20-30	50-58	5-10	
Linseed							4-7	2-4		14-30	14-25	45-60	
Coconut	0-1		5-7	7-9	40-50	15-20	9-12	2-4	0-1	6-9	0-1		
Marine Oils							8-10	0-1		27-33	27-32		
Cod liver						5-7			18-22				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

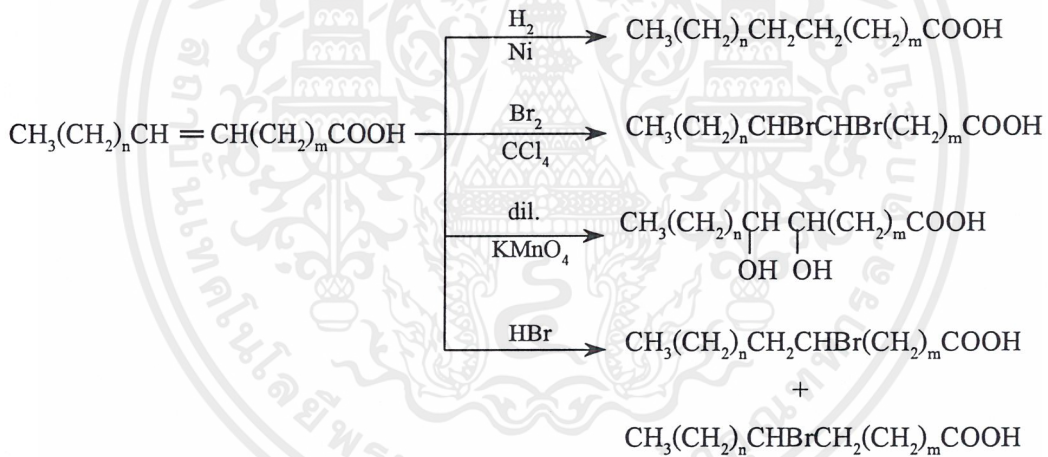
ตารางที่ 2.3 กรดไขมันที่พบในปริมาณเล็กน้อย

จำนวนคาร์บอน	ชื่อ	โครงสร้าง	แหล่งที่มา
18	Eleostearic acid		The main (80%) fatty acid obtained by hydrolysis of tung oil
18	Ricinoleic acid		The main (80%) fatty acid obtained by hydrolysis of castor oil
18	Chaulmoogric acid		From oil of <i>Hydnocarpus kuassi</i> (used in the treatment of leprosy)
19	Sterculic acid		From kernel oil-of <i>Sterculia foetida</i>
19	Lactobacillic acid		From phospholipids of bacteria
19	Tuberculostearic acid		From tubercule bacilli
20	Arachidonic acid	$CH_3(CH_2)_4(CH=CHCH_2)_4(CH_2)_2COOH$	From human fat (0.3-1.0%) liver, lecithins
22	Cetoleic acid	$CH_3(CH_2)_9CH=CH(CH_2)_9COOH$	From fish oils
22	Erucic acid	$CH_3(CH_2)_7CH=CH(CH_2)_{11}COOH$ ( <i>cis</i> )	From seed oils of rape, wallflower nasturtium, and mustard
24	Nervonic acid	$CH_3(CH_2)_7CH=CH(CH_2)_{13}COOH$ ( <i>cis</i> )	From fish oils and brain tissues
27	Mycolipenic acid		From tubercule bacilli

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่หมู่คาร์บอกซิลิกของกรดไขมัน



รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่พันธะคู่ของกรดไขมัน

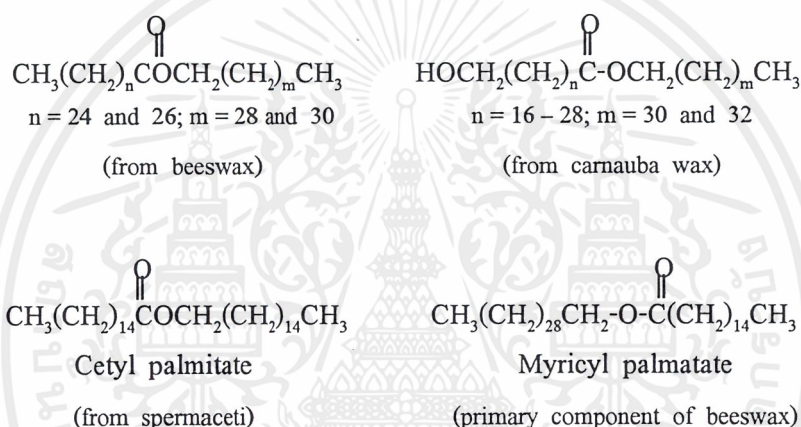
นอกจากนี้ อาจเกิดปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนแบบอัตโนมัติ (Autooxidation) ที่พันธะคู่ได้ถ้ามีแสง รังสีหรือโลหะบางชนิดปะปนอยู่ในลิปิดนั้น ซึ่งจะเป็ต้นเหตุให้เกิดอนุมูลอิสระ (Free radicals) และการออกซิเดชันตามมามีผลทำให้ลิปิดนั้นมีกลิ่นเหม็นหืน (Rancid) การเปลี่ยนแปลงชนิดนี้ในผลิตภัณฑ์อาหารเรียกว่าการเหม็นหืนที่เกิดจากปฏิกิริยาการเติมออกซิเจน (Oxidative rancidity) ป้องกันได้โดยการเติมสารป้องกันการเกิดปฏิกิริยาการเติมออกซิเจน (Antioxidants) ลงในผลิตภัณฑ์อาหารพวกลิปิด เพื่อเป็นตัวหยุดยั้งการทำงานของอนุมูลอิสระ การ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหม็นหืนอาจมีสาเหตุมาจาก Hydrolytic rancidity ก็ได้ ถ้าหากว่าไตรเอซิลกลีเซอรอลถูกไฮโดรไลซ์ได้กรดไขมันสายสั้น ๆ ที่ระเหยและส่งกลิ่นออกมา

### 3) ขี้ผึ้ง (Waxes)

เป็นเอสเทอร์ระหว่างแอลกอฮอล์ที่เป็นเส้นสายยาวหรือสเตียรอล กับกรดไขมันสายยาวที่อิ่มตัว ไม่ละลายน้ำ ไม่มีพันธะคู่ ทำให้ลิปิดประเภทนี้มีความเหนียว เป็นเอสเทอร์ที่ต่างไปจากพวกเอซิดกลีเซอรอล เพราะมีพันธะเอสเทอร์เพียงหนึ่งพันธะเท่านั้น เมื่อขี้ผึ้งได้รับความเย็นจะแข็งแต่เปราะ ถ้าได้รับความร้อนพออุ่น ๆ จะนุ่ม ปั้นหรือโค้งงอให้บิดงอได้ ตัวอย่างโครงสร้างของขี้ผึ้ง ได้แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทั่วไปของขี้ผึ้งบางชนิด

นอกจากนี้ยังมีขี้ผึ้ง Lanolin, Turtle wax ขี้ผึ้งนี้จะเป็นตัวกันน้ำ (Waterproof coating) ให้กับผิวหนัง ขนสัตว์ ขนนก โครงร่างภายนอกของพวกแมลง ใบไม้หรือผลไม้ ถ้าเราสังเกตเปลือกนอกของผลแอปเปิล จะรู้สึกเป็นมันเงาซึ่งเป็นตัวอย่างของพวกขี้ผึ้งที่พบในพวกผลไม้

#### 2.1.2 ลิปิดเชิงประกอบ

ลิปิดนี้เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเยื่อหุ้มเซลล์ ถ้านำมาย่อยสลายมักจะได้สารอื่นนอกเหนือไปจากแอลกอฮอล์และกรดไขมัน

##### 1) ฟอสโฟลิปิด (Phospholipids)

เป็นเอสเทอร์ของกลีเซอรอลกับกรดไขมันและมีกรดฟอสโฟริกซึ่งเชื่อมอยู่กับแอลกอฮอล์ (X) ด้วยพันธะเอสเทอร์เช่นกันอีกด้วย มีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## ตารางที่ 2.4 ฟอสโฟลิปิดที่พบในธรรมชาติ

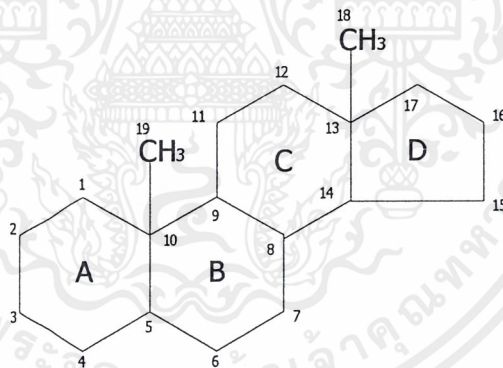
ชื่อแบบ Recommended	ชื่อแบบ Trivial	โครงสร้าง
Phosphatidyl choline	Lecithin	$  \begin{array}{c}  \text{O} \\  \parallel \\  \text{CH}_2\text{OCR} \\    \\  \text{CHOOCR}' \\    \\  \text{CH}_2\text{O} \begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{P} \end{array} \begin{array}{c} \text{O} \\   \\ \text{O}^- \end{array} \text{CH}_2\text{CH}_2\text{N}^+(\text{CH}_3)_3 \quad (\text{from choline})  \end{array}  $ <p>R is saturated and R' is unsaturated</p>
Phosphatidyl ethanolamine	cephalin	$  \begin{array}{c}  \text{O} \\  \parallel \\  \text{CH}_2\text{OCR} \\    \\  \text{CHOOCR}' \\    \\  \text{CH}_2\text{O} \begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{P} \end{array} \begin{array}{c} \text{O} \\   \\ \text{O}^- \end{array} \text{CH}_2\text{CH}_2\text{NH}_3^+ \quad (\text{from ethanolamine})  \end{array}  $
Phosphatidyl serine	—	$  \begin{array}{c}  \text{O} \\  \parallel \\  \text{CH}_2\text{OCR} \\    \\  \text{CHOOCR}' \\    \\  \text{CH}_2\text{O} \begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{P} \end{array} \begin{array}{c} \text{O} \\   \\ \text{O}^- \end{array} \text{CH}_2\text{CH}(\text{NH}_3^+) \text{COO}^- \quad (\text{from L-serine})  \end{array}  $ <p>R and R' are like those of lecithins</p>
Phosphatidyl inositol	—	$  \begin{array}{c}  \text{CH}_2\text{OCOR}^1 \\    \\  \text{R}^2\text{COOCH} \\    \\  \text{CH}_2\text{O} \begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{P} \end{array} \begin{array}{c} \text{O} \\   \\ \text{OH} \end{array} \text{O} \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{OH} \\   \quad   \\ \text{C} \quad \text{C} \\   \quad   \\ \text{OH} \quad \text{H} \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{OH} \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}  \end{array}  $
Phosphatidyl glycerol	—	$  \begin{array}{c}  \text{CH}_2\text{OCOR}^1 \quad \text{CH}_2\text{OH} \\    \quad   \\  \text{R}^2\text{COOCH} \quad \text{HCOH} \\    \quad   \\  \text{CH}_2\text{O} \begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{P} \end{array} \begin{array}{c} \text{O} \\   \\ \text{OH} \end{array} \text{O} \text{CH}_2  \end{array}  $

สำหรับ Cerebrosides และ Psychosine นั้นบางครั้งเรียกว่า โกลโคสฟิงโกลิปิด (Glycosphingolipid) เนื่องจากประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตกับสฟิงโกลิปิด โกลโคสฟิงโกลิปิดที่ยุ่งยากและซับซ้อนขึ้นไปอีกคือ Gangliosides โครงสร้างประกอบด้วย Sphingosine และสายของ โอลิโกแซคคาไรด์ที่มี N-acetylneuraminic acid (NANA) อยู่ด้วย

สฟิงโกลิปิดเป็นองค์ประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งของ Myelin นอกเหนือไปจาก โปรตีนและคาร์โบไฮเดรต Myelin นี้ทำหน้าที่เป็นฉนวนหุ้มเส้นใยประสาท Axon ของเซลล์ประสาท ซึ่งมี Electrical nerve impulses อยู่เรื่อย ๆ Myelin จึงทำหน้าที่เสมือนฉนวนหุ้มสายไฟฟ้านั่นเอง

### 2.1.3 ลิปิดอนุพันธ์

ลิปิดประเภทนี้เป็นแอลกอฮอล์ไม่ใช่เอสเทอร์ดังนั้นไม่สามารถจะเกิดปฏิกิริยา Saponification ได้ ได้แก่พวก สเตียรอยด์ (Steroids) วิตามินที่ละลายได้ในไขมัน (Fat soluble vitamins) ถูกจัดไว้ในสารประเภทลิปิดเพราะว่าคุณสมบัติในการละลายคล้ายคลึงกับพวกลิปิดมาก สเตียรอยด์ทุกตัวจะมี Perhydrocyclopentanophenanthrene ( $C_{17}$ ) เป็นโครงสร้างพื้นฐาน ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 Perhydrocyclopentanophenanthrene ring

หมู่ที่มาแทนที่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ถ้าอยู่บนระนาบของวงให้ใช้สัญลักษณ์  $\beta$  และแทนด้วยเส้นทึบ ถ้าอยู่ล่างระนาบของวงให้ใช้สัญลักษณ์  $\alpha$  และแทนด้วยเส้นประ

Cholesterol เป็นสเตียรอยด์ที่พบมากที่สุดและเป็นสารเริ่มต้นในการสังเคราะห์ สเตียรอยด์อื่น ๆ อีกมากมายเช่น น้ำดี (Bile acids) ฮอร์โมน Aldosterone ฮอร์โมนเพศชาย Testosterone และฮอร์โมนเพศหญิง Progesterone เป็นต้น [5,6,12]

## 2.2 ปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน

ปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนเข้าไปในพันธะคู่ของไตรเอซิลกลีเซอรอลเป็นปฏิกิริยาที่สำคัญในอุตสาหกรรมไขมันและน้ำมันซึ่งมีเป้าหมายหลักอยู่สองประการคือ

1) ต้องการเปลี่ยนน้ำมันให้อยู่ในรูปไขมันที่มีสภาพเป็นกึ่งของแข็ง ซึ่งสามารถนำไปใช้งานได้เฉพาะเจาะจงมากกว่า เช่น ใช้ในการผลิตมาร์การีน (Margarine)

2) ปรับปรุงความคงตัว (Stability) ของน้ำมัน

ในปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนของผสมของน้ำมันที่อยู่บนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะ เช่น นิกเกิล แพลททินัม จะถูกให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 140–225 องศาเซลเซียส และถูกผสมโดยการพ่นด้วยฟองแก๊สไฮโดรเจนที่ความดัน 60 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว การผสมจะทำให้เกิดการกระจายตัวดีขึ้นและทำให้อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาวិวิพันธ์ (Heterogeneous reaction) สูงขึ้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถตรวจสอบปริมาณของน้ำมันที่อิ่มตัวได้โดยใช้ดัชนีการสะท้อนของแสง (Refractive index) และเมื่อสิ้นสุดการทำปฏิกิริยา น้ำมันที่อิ่มตัวจะถูกทำให้เย็นลงและกรองเอาตัวเร่งปฏิกิริยาออกไป

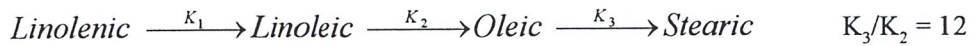
ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จะต้องมีระยะเวลาในการใช้งานที่ยาวนาน มีค่าการเลือกของการเกิดปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนและปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันที่ดี และสามารถแยกออกได้ง่ายด้วยการกรอง น้ำมันที่ใช้จะต้องมีความบริสุทธิ์สูง ไม่มีสี ปราศจากเกลือของกรดไขมัน น้ำและสารอื่นที่จะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมสภาพ แก๊สไฮโดรเจนที่ใช้ต้องแห้ง ปราศจากกำมะถัน คาร์บอนไดออกไซด์ และแอมโมเนีย เพื่อให้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถใช้งานได้เป็นระยะเวลานาน

### 2.2.1 ค่าการเลือก (Selectivity)

ในปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนนอกจากจะเกิดปฏิกิริยาที่ทำให้พันธะคู่อิ่มตัวแล้ว ยังจะเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันซึ่งจะทำการเปลี่ยนรูปลักษณะของน้ำมันจากซิส (cis) เป็นทรานส (trans) ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดคอเลสเตอรอลดั่งได้กล่าวแล้ว

ปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนบางส่วนจะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่มีความหลากหลายพอสมควรซึ่งจะขึ้นอยู่กับพันธะคู่ที่เกิดปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน ชนิดและปริมาณของปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชัน และอัตราเร็วของปฏิกิริยาต่าง ๆ

ค่าการเลือก คือความสัมพันธ์ระหว่างอัตราในการเกิดปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนของกรดไขมันที่มีความไม่อิ่มตัวมากและกรดไขมันที่มีความไม่อิ่มตัวน้อย เช่น จากปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนของกรดไลโนเลนิกเป็นกรดสเตียริกดังต่อไปนี้



จากปฏิกิริยาจะมีค่าการเลือกตามนิยามคือ

$$\text{ค่าการเลือก} = \frac{\text{อัตราการเกิดปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนของกรดไลโนเลอิกไปเป็นกรดโอเลอิก}}{\text{อัตราการเกิดปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนของกรดโอเลอิกไปเป็นกรดสเตียริก}}$$

ค่าการเลือกจะมีค่าคงที่ในแต่ละอัตราการเกิดปฏิกิริยาซึ่งสามารถหาได้จากองค์ประกอบของกรดไขมันในสารเริ่มต้นและสารสุดท้าย และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา

ถ้าใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ความดันและสภาวะในการเกิดปฏิกิริยาต่างกันจะทำให้ค่าการเลือก อัตราการเกิดปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน และการเกิดกรดไขมันแบบทรานสต่างกันด้วย ดังแสดงในตารางที่ 2.5

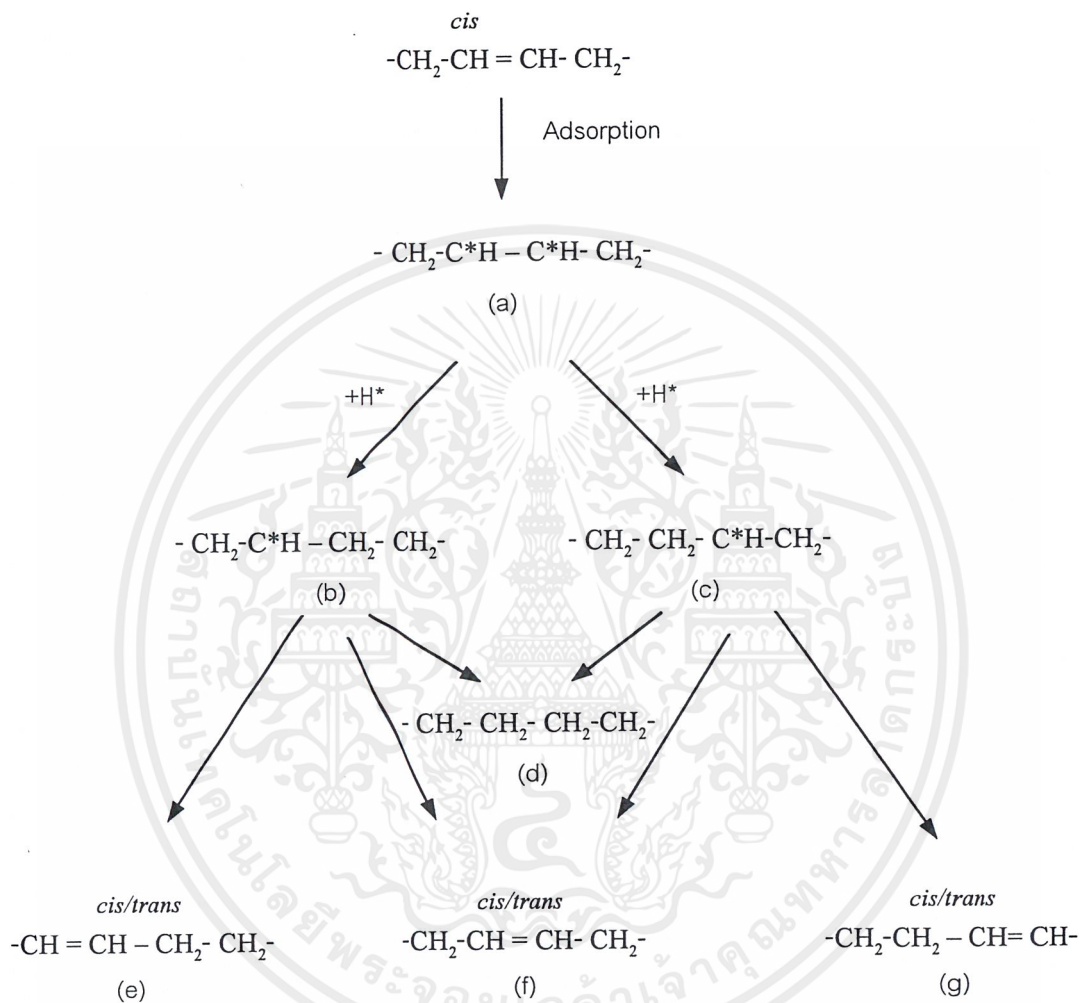
ตารางที่ 2.5 สภาวะในการเกิดปฏิกิริยาต่อค่าการเลือก การเกิดกรดไขมันแบบทรานสและอัตราการเกิดปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน

สภาวะในการเกิดปฏิกิริยา	ค่าการเลือก	การเกิดกรดไขมันแบบทรานส	อัตราการเกิดปฏิกิริยา
อุณหภูมิสูง	สูง	สูง	สูง
ความดันสูง	ต่ำ	ต่ำ	สูง
ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาสูง	สูง	สูง	สูง
อัตราการกวนสูง	ต่ำ	ต่ำ	สูง

### 2.2.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยา

กลไกการเกิดปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนเป็นการเกิดปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันไม่อิ่มตัวและอะตอมของไฮโดรเจนที่ดูดซับบนผิวของตัวเร่งโลหะ ขั้นตอนแรกโลหะจะสร้างพันธะกับน้ำมันที่บริเวณพันธะคู่ของน้ำมันได้เป็นสาร a (ดังรูปที่ 2.9) สารเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับอะตอมของไฮโดรเจนที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและได้ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในรูปของกิ่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาจจะสูญเสียอะตอมของไฮโดรเจนให้กับตัวเร่งปฏิกิริยาและกลับไปเป็นโมเลกุลที่มีพันธะคู่ (e หรือ f) ซึ่งพันธะคู่ที่เกิดขึ้นอาจเป็นพันธะคู่ที่ตำแหน่งเดิมหรือตำแหน่งใหม่ก็ได้ [3]



รูปที่ 2.9 กลไกการเกิดปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน

โดยทั่วไปแล้วความเข้มข้นของไฮโดรเจนที่ดูดซับบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีผลต่อค่าการเลือกและการเกิดไอโซเมอร์ ถ้าตัวเร่งปฏิกิริยาอิมมัตด้วยไฮโดรเจน พื้นที่ผิววงว (Active site) จะเต็มไปด้วยไฮโดรเจนและมีโอกาสมากที่อะตอมของไฮโดรเจนจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ ซึ่งทำให้ค่าการเลือกต่ำเนื่องจากปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนสามารถเกิดได้อย่างทันทีทันใด อย่างไรก็ตามถ้ามีปริมาณไฮโดรเจนน้อยก็จะทำให้อะตอมของไฮโดรเจนเข้าไปทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ได้เพียงบางส่วนซึ่งมีโอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันได้ ดังนั้นสภาวะการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำงานได้แก่ ความดันของไฮโดรเจน อัตราการกวน อุณหภูมิ ชนิดและความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีผลต่อค่าการเลือกโดยจะมีผลต่ออัตราส่วนของไฮโดรเจนบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวอย่างเช่นการเพิ่มอุณหภูมิจะเป็นการเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาและเพิ่มอัตราการเคลือดย้ายไฮโดรเจนออกจากผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ค่าการเลือกสูงขึ้น ดังนั้นจึงสามารถใช้ค่าการเลือกเป็นตัวแปรที่ควบคุมคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์น้ำมันได้ ตัวอย่างเช่น ถ้ามีค่าการเลือกสูงจะลดปริมาณของกรดไลโนเลอิกและจะเพิ่มความคงตัวให้สูงขึ้นโดยการลดการเกิดน้ำมันอิมัลชันเพื่อไม่ให้มีความแข็งมากเกินไป อย่างไรก็ตามในปฏิกิริยาที่ค่าการเลือกสูงจะเพิ่มการเกิดไอโซเมอร์แบบทรานสซึ่งจะไม่เป็นผลดีต่อสุขภาพ จึงเป็นปัญหาที่จะต้องทำการปรับปรุงแก้ไขเพื่อไม่ให้เกิดไอโซเมอร์แบบทรานส ทางแก้หนึ่งคือการใช้ปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอร์ริฟิเคชันแทนการใช้ปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน

### 2.2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา

การเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาอาจพิจารณาจากค่าการเลือกของปฏิกิริยาที่ต้องการ โดยทั่วไปในอุตสาหกรรมการเกิดปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนมักจะใช้นิกเกิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อย่างไรก็ตามตัวเร่งปฏิกิริยาอื่น ๆ ก็สามารถใช้ได้ เช่น ทองแดง แพลลาเดียมและของผสมระหว่างทองแดงและโคโรเนียม แพลลาเดียมจะให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่านิกเกิลเมื่อใช้ในปริมาณเท่ากันแต่จะทำให้ไอโซเมอร์แบบทรานสมากกว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ (Homogeneous catalyst) จะเพิ่มการสัมผัสระหว่างน้ำมันและตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ควบคุมการเลือกเกิดปฏิกิริยาได้ยาก ยุ่งยากในการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์และการนำกลับมาใช้ใหม่

สารประกอบบางชนิดจะมีความเป็นพิษต่อตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นปัญหาสำคัญในปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนในอุตสาหกรรม สารเหล่านี้เช่น ฟอสโฟลิปิด (Phospholipids) สารประกอบของกำมะถัน (Sulfur compounds) กรดแร่ (Mineral acids) คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำและเกลือของกรดไขมัน

## 2.3 ปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอร์ริฟิเคชัน

ปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอนุภาคอิสระแอซิดของสารจำพวกเอสเทอร์ กรด และแอลกอฮอล์ ซึ่งสามารถเรียกชื่อจำเพาะของปฏิกิริยาตามสารตั้งต้นที่มาทำปฏิกิริยากันได้ดังนี้ ถ้าปฏิกิริยาเป็นการแลกเปลี่ยนอนุภาคอิสระแอซิดระหว่างเอสเทอร์กับกรด จะเรียกปฏิกิริยานี้ว่า แอซิดคอลลิดิซิส ถ้าเป็นการแลกเปลี่ยนระหว่างเอสเทอร์

กับแอลกอฮอล์ จะเรียกว่า แอลกอฮอล์ไลซิส ส่วนการแลกเปลี่ยนระหว่างเอสเทอร์กับเอสเทอร์จะเรียกว่า ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน [3,8]

ขั้นตอนการเกิดปฏิกริยาอินเทอร์เอสเทอร์ริฟิเคชันจะเกิด 2 ปฏิกริยาต่อเนื่องกัน คือ ปฏิกริยาการสลายตัวด้วยน้ำและปฏิกริยาการสังเคราะห์ซึ่งแสดงได้ดังนี้ [10]

1) ปฏิกริยาการสลายด้วยน้ำ



2) ปฏิกริยาการสังเคราะห์

- ปฏิกริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน



- ปฏิกริยาอินเทอร์เอสเทอร์ริฟิเคชัน แบบแอลกอฮอล์ไลซิส



- ปฏิกริยาอินเทอร์เอสเทอร์ริฟิเคชัน แบบแอซิดคอลลไลซิส



- ปฏิกริยาอินเทอร์เอสเทอร์ริฟิเคชัน แบบทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน



เนื่องจากไขมันในธรรมชาตินั้นไม่ได้ประกอบด้วยองค์ประกอบของกรดไขมันที่เป็นระเบียบแน่นอนในโมเลกุลของไตรเอซิลกลีเซอรอล องค์ประกอบของไขมันจะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม และสถานที่ที่ใช้ปลูกพืช หรือถิ่นที่เจริญเติบโตของสัตว์นั้น ๆ คุณสมบัติทางกายภาพของไขมันไม่ได้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของกรดไขมันเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับการจัดเรียงและการกระจายตัวของไตรเอซิลกลีเซอรอลด้วย ด้วยเหตุนี้รูปแบบการกระจายตัวของกรดไขมันที่เป็นเอกลักษณ์ของไขมันในธรรมชาติจึงเป็นข้อจำกัดที่จะนำไปใช้งานในอุตสาหกรรม ปฏิกริยาอินเทอร์เอสเทอร์ริฟิเคชันจึงเป็นปฏิกริยาที่นำมาใช้ในการปรับปรุงองค์ประกอบของไขมันเพื่อให้ข้อจำกัดในการใช้งานลดลง สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น

ปฏิกริยาอินเทอร์เอสเทอร์ริฟิเคชันสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนตำแหน่งของกรดไขมันที่อยู่บนไตรกลีเซอไรด์ แล้วให้ผลิตภัณฑ์เป็นไขมันที่มีสภาพเป็นของแข็ง มีจุดหลอมเหลวที่สูงขึ้น เนื่องจากไตรเอซิลกลีเซอรอลแต่ละตัวมีโครงสร้างและองค์ประกอบของกรดไขมันที่เปลี่ยนไปคือสามารถจัดเรียงกันได้อย่างเป็นระเบียบ อาจเป็นได้ทั้งไตรเอซิลกลีเซอรอลที่ประกอบด้วยกรดไขมันอิ่มตัวทั้งหมด หรือเป็นไตรเอซิลกลีเซอรอลที่ประกอบด้วยไขมันไม่อิ่มตัวที่มีไอโซเมอร์แบบซิสทั้งหมด มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่แข็งแรงขึ้นจึงทำให้ได้ คุณสมบัติทางกายภาพโดยรวมของไขมันเปลี่ยนแปลงไป เกิดการแข็งตัวมากขึ้น โดยไม่ก่อให้เกิดโอกาสการเปลี่ยนไอโซเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

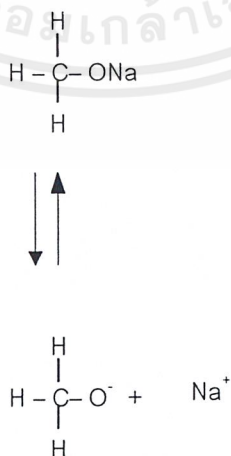
ของกรดไขมันเป็นแบบทรานส ดังที่สามารถเกิดขึ้นได้ในปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนในน้ำมัน-ปาล์มซึ่งเป็นอันเนื่องจากปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนนี้มีโอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยาการคิงไฮโดรเจน ออกจากกรดไขมันบนตัวเร่งปฏิกิริยาได้เช่นกันจึงทำให้มีโอกาสเกิดกรดไขมันไอโซเมอร์แบบ ทรานสได้[13] ดังนั้นปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอร์ริฟิเคชันแบบทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันในน้ำมัน-ปาล์มจึงมีประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมมากเนื่องจากผู้บริโภคต้องการหลีกเลี่ยงการบริโภคผลิตภัณฑ์ที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ

กระบวนการอินเทอร์เอสเทอร์ริฟิเคชันแบบทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันที่ใช้ในอุตสาหกรรม มีอยู่ 3 กระบวนการดังนี้ [14]

### 2.3.1 กระบวนการแรนดอมไมเซชัน (Randomization) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี

ในอุตสาหกรรมกระบวนการนี้จะต้องใช้ตัวเร่งที่มีความเป็นเบสสูง เช่นพวก โซเดียมเมทิลเลท (Sodium methylate) เนื่องจากตัวเร่งชนิดนี้จะไม่สามารถเร่งปฏิกิริยาได้ถ้ามีน้ำ หรือกรดไขมันอยู่ดังนั้นจึงจะต้องเติมสารพวกโซดาไฟลงในสารตั้งต้นเพื่อให้มีความเป็นด่าง หลังจากนั้นจะนำไปทำให้แห้งอย่างรวดเร็วภายใต้สภาวะที่เป็นสุญญากาศ และที่อุณหภูมิ 80 ถึง 100 องศาเซลเซียส และนำตัวเร่งที่ได้เติมลงไป โดยใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 15 – 30 นาทีระบบก็จะเข้าสู่สมดุล ดังรูปที่ 2.10

ตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกทำให้ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาลดลงได้ถ้ามีปริมาณน้ำ เจือปน ซึ่งจะทำให้มีความเป็นกรดเนื่องจากการเกิดกรดไขมันที่เข้มข้นในน้ำมัน ปริมาณน้ำนี้ยังก่อให้เกิดผลเสียต่อผลิตภัณฑ์ คือ ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีกลิ่นเหม็นหืน จึงจำเป็นที่จะต้องมีการดับ กลิ่นเป็นกระบวนการต่อไป ดังนั้นการทำการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันก่อนทำปฏิกิริยานอกจาก จะทำให้ประหยัดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้วยังจะช่วยทำให้ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์สูงขึ้นด้วย



รูปที่ 2.10 โซเดียมเมทิลเลท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในยุโรปจะใช้กระบวนการนี้ในการเตรียมผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพและทำการเปลี่ยนแปลงไขมันในเนยเทียมโดยใช้ปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันลอริก (lauric oil) ที่อิ่มตัวซึ่งมีจุดหลอมเหลวประมาณ 35 องศาเซลเซียส ได้เป็นน้ำมันพืชที่อิ่มตัวซึ่งมีจุดหลอมเหลวมากกว่า 60 องศาเซลเซียส หรือพวกปาล์มสเตียร์นิน (Palm stearin) นอกจากนี้พวกน้ำมันดอกทานตะวันที่อิ่มตัวเพียงบางส่วนสามารถทำปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอร์ริฟิเคชัน ได้เช่นกัน

### 2.3.2 กระบวนการอินเทอร์เอสเทอร์ริฟิเคชันโดยตรง

ในกระบวนการนี้ไตรเอซิลกลีเซอรอลที่มีจุดหลอมเหลวสูงสุดจะถูกดึงออกไปโดยวิธีการตกผลึก ซึ่งการดึงออกไปนี้จะไปรบกวนสมดุลเป็นผลให้เกิดไตรเอซิลกลีเซอรอลที่มีจุดหลอมเหลวสูงมากขึ้น การตกผลึกนี้จะทำให้อุณหภูมิที่ตัวเร่งปฏิกิริยายังคงสามารถเร่งปฏิกิริยาได้อยู่ ซึ่งโลหะอัลคาไลนั้นจะมีคุณสมบัติเหล่านี้ แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไปตัวเร่งปฏิกิริยาจะไม่สามารถเร่งปฏิกิริยาได้

ในสหรัฐอเมริกากระบวนการนี้จะใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของพวกน้ำมันหมู และในยุโรปจะใช้กับน้ำมันดอกทานตะวันเพื่อผลิตเนยเทียมเพื่อสุขภาพซึ่งจะไม่มีโครงสร้างไอโซเมอร์แบบทรานสและมีกรดไขมันอิ่มตัวอยู่ในปริมาณน้อยมาก สิ่งที่ต้องระวังมากที่สุดคือการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันก่อนทำปฏิกิริยา ความปลอดภัยในการใช้โลหะอัลคาไลและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาซึ่งใช้เวลานานมากจึงทำให้กระบวนการนี้จะแพงกว่ากระบวนการเรนดอมไมเซชัน

### 2.3.3 กระบวนการอินเทอร์เอสเทอร์ริฟิเคชันโดยการใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ในกระบวนการนี้จะใช้เอนไซม์ไลเปสทำการเปลี่ยนแปลงหมู่ของกรดไขมันบนสายหลักของไตรเอซิลกลีเซอรอล ถ้าใช้ไลเปสต่างชนิดกันจะทำให้ตำแหน่งและชนิดของหมู่ของกรดไขมันบนไตรเอซิลกลีเซอรอลต่างกัน และยังทำให้คุณสมบัติของไขมันแตกต่างกันด้วยความเฉพาะเจาะจงนี้จะขึ้นกับคุณสมบัติของไลเปส สามารถแยกประเภทของไลเปสออกเป็น 2 กลุ่มดังนี้

1) ไลเปสแบบสุ่ม (Random lipase) ซึ่งจะทำการเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ตำแหน่งของไตรเอซิลกลีเซอรอล

2) 1,3 ไลเปส ซึ่งจะเร่งปฏิกิริยาเฉพาะในตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 3 ของไตรเอซิลกลีเซอรอล

ปฏิกิริยาของไลเปสเป็นปฏิกิริยาที่สามารถผันกลับได้ ปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอร์ริฟิเคชันนี้จะขึ้นอยู่กับความเฉพาะเจาะจงของเอนไซม์ไลเปสต่อตำแหน่งที่ 1 และ 3 ของไตรเอซิลกลีเซอรอล ปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งไลเปสแบบสุ่มจะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับเมื่อใช้เทคนิคทางเคมีโดยทั่วไป แต่ถ้าใช้เอนไซม์ไลเปสตำแหน่งเฉพาะ 1, 3 เช่น ไลโปไซม์ ไอเอ็ม

(Lipozyme IM) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเฉพาะเจาะจงมากกว่าและสามารถแยกได้โดยใช้วิธีทางกายภาพ

ตัวอย่างของกระบวนการนี้ในอุตสาหกรรมได้แก่ การเปลี่ยนน้ำมันปาล์มให้เป็นเนยหรือเนยโกโก้ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีค่ามาก ไตรเอซิลกลีเซอรอลของเนยโกโก้จะมีปริมาณของสเตียริกสูงทำให้มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ 37 องศาเซลเซียส จึงสามารถทำเป็นช็อกโกแลตเทียมได้ ตัวอย่างการผลิตเช่นใช้ 1, 3-dipalmitoyl-2-monooleine(POP) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของไตรเอซิลกลีเซอรอลในน้ำมันปาล์มและมีราคาถูก นำมาผ่านกระบวนการอินเทอร์เอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้กรดสเตียริกและใช้ 1, 3 โกลเปสซึ่งมีความเฉพาะเจาะจงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไตรเอซิลกลีเซอรอลสองชนิดคือ POP และ PLP ที่เป็นองค์ประกอบหลักของเนยโกโก้ ไตรเอซิลกลีเซอรอลของเนยโกโก้จะมีปริมาณของกรดสเตียริกสูงทำให้จุดหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ 37 องศาเซลเซียส ซึ่งจะต่างกับน้ำมันปาล์มซึ่งมีปริมาณของกรดสเตียริกต่ำทำให้มีจุดหลอมเหลวประมาณ 20–25 องศาเซลเซียส

ในญี่ปุ่นและเนเธอร์แลนด์จะใช้วิธีการนี้ในอุตสาหกรรมการผลิตเนยโกโก้ซึ่งมีลักษณะเป็นไตรเอซิลกลีเซอรอลที่ไม่อึดตัวจากน้ำมันปาล์มหรือน้ำมันดอกทานตะวันที่มีปริมาณกรดโอเลอิกสูง

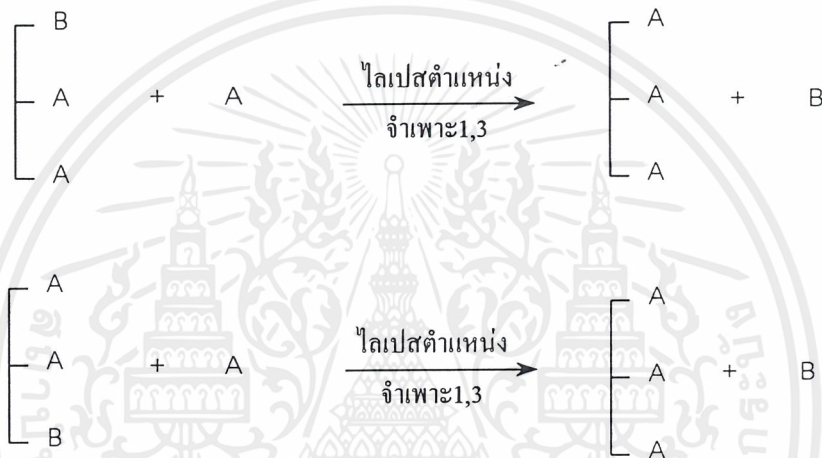
#### 2.4 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มโดยใช้เอนไซม์ไลเปสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันในน้ำมันปาล์มคือปฏิกิริยาที่ทำการจัดเรียงกลุ่มเอซิลบนไตรเอซิลกลีเซอรอลซึ่งจะเป็นไปตามความจำเพาะเจาะจงของเอนไซม์ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เอนไซม์นี้จะทำการเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยน้ำของไตรเอซิลกลีเซอรอลได้ผลิตภัณฑ์เป็นกลีเซอรอลและกรดไขมันอิสระและจะเร่งปฏิกิริยาย้อนกลับปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยน้ำโดยการนำกรดไขมันอิสระที่ได้จากปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยน้ำมาจัดเรียงใหม่บนกลีเซอรอลเพื่อให้ได้ความเป็นระเบียบตามคุณสมบัติความจำเพาะเจาะจงของเอนไซม์นั้น ๆ ที่ทำการเลือกจับสเตรทปฏิกิริยาย้อนกลับนี้คือ ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของไตรเอซิลกลีเซอรอล ซึ่งไตรเอซิลกลีเซอรอลที่ได้มาใหม่เป็นผลิตภัณฑ์นี้จะเป็นระเบียบมากขึ้น โดยไตรเอซิลกลีเซอรอลที่ประกอบไปด้วยกรดไขมันอิสระทั้งแบบอึดตัวและไม่อึดตัวจะถูกจัดเรียงใหม่ให้เป็นไตรเอซิลกลีเซอรอลที่มีองค์ประกอบเป็นกรดไขมันแบบอึดตัวทั้งหมดหรือเป็นไตรเอซิลกลีเซอรอลที่มีองค์ประกอบเป็นกรดไขมันไม่อึดตัวหมด การจัดเรียงอย่างเป็นระเบียบของกรดไขมันอิสระบนไตรเอซิลกลีเซอรอลแบบนี้จะทำให้คุณสมบัติโดยรวมของไขมันเปลี่ยนไป เนื่องจากความเป็นระเบียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นี้จะก่อให้เกิดความแข็งแรงระหว่างพันธะมากขึ้น จุดหลอมเหลวของไขมันจะสูงขึ้น มีลักษณะเป็นของแข็ง

เอนไซม์ที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยาทรานสเอสเทอร์ริฟิเคชันจะถูกตรึงไว้บนเรซินไอออนประจุลบ เช่น ซิลิเกต มีทั้งเอนไซม์ชนิดไม่จำเพาะเจาะจงตำแหน่งและชนิดจำเพาะเจาะจงตำแหน่งของการสลายตัวและการจัดเรียง เช่น เอนไซม์ไลเปส ตำแหน่งจำเพาะ 1,3 การทำงานของเอนไซม์แบบตำแหน่งจำเพาะ 1,3 ในปฏิกิริยาทรานสเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นดังรูปที่ 2.11 [1,8]



รูปที่ 2.11 แผนผังการเกิดปฏิกิริยาทรานสเอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยเอนไซม์ไลเปสตำแหน่งจำเพาะ 1,3

โดยทั่วไปแล้วในน้ำมันปาล์มจะมีไตรกลีเซอไรด์ที่มีองค์ประกอบของกรดไขมันอิสระหลายชนิด ได้แก่ กรดโอเลอิก 45.6 เปอร์เซ็นต์ กรดปาล์มมิติก 36.6 เปอร์เซ็นต์ กรดไลโนเลอิก 12.6 เปอร์เซ็นต์ กรดสเตียริก 3.98 เปอร์เซ็นต์ กรดไมริสติก 1.07 เปอร์เซ็นต์ กรดลอริก 0.17 เปอร์เซ็นต์

องค์ประกอบของไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันปาล์มนั้น มักจะประกอบด้วยกรดไขมันอิสระแบบอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวบนไตรเอซิลกลีเซอรอลตัวเดียวกัน ดังตารางที่ 2.6 โดยพบว่า ในน้ำมันปาล์มจะไม่พบโครงสร้างของไตรเอซิลกลีเซอรอลแบบไตรปาล์มมิติก(PPP) ส่วน ไตรโอเลอิก(OOO) นั้นจะพบน้อยมากทั้ง ๆ ที่ปริมาณองค์ประกอบของกรดไขมันอิสระโอเลอิก มีถึง 45.6 เปอร์เซ็นต์ แต่โครงสร้างไตรโอเลอิกนั้นพบเพียง 4.6 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้น ส่วนกรดสเตียริกนั้น เป็นกรดไขมันที่มีจำนวนคาร์บอน 18 ตัว มีโครงสร้างเป็นสายโซ่ตรง ถ้านำมาจัดเรียงบนไตรเอซิลกลีเซอรอลกับกรดไขมันที่มีจำนวนคาร์บอน 18 ด้วยกันก็จะทำให้พันธะแข็งแรงขึ้นด้วย ซึ่งได้แก่กรด-

โอเลอิก ซึ่งมีโครงสร้างเป็นสายโซ่ จำนวนคาร์บอน 18 ตัวเช่นกัน ในน้ำมันปลาชั้นนั้นจะไม่พบโครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์ที่ประกอบด้วยสเตียริกและโอเลอิก ในตำแหน่งสเตียริก 1,3 (SOS)

การทำปฏิกิริยาทรานสเอสเทอร์ริฟิเคชันในน้ำมันปลาชั้นโดยใช้ เอนไซม์ไลเปสชั้นนั้นจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีองค์ประกอบของไตรเอซิลกลีเซอรอลเปลี่ยนไป คือ ปริมาณ ไตรปลา์มมิติกและไตรโอเลอิกจะเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มปริมาณไขมันที่มีการจัดเรียงกลุ่มกรดไขมันอิสระอย่างเป็นระเบียบ คุณสมบัติทางกายภาพของไขมันจึงเปลี่ยนไป เช่น มีลักษณะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง มีจุดหลอมเหลวสูงขึ้น หลังจากการทำปฏิกิริยาทรานสเอสเทอร์ริฟิเคชันแล้วจะได้ ปริมาณของไขมันอิ่มตัวสมบูรณ์ PPP เพิ่มมากขึ้น ปริมาณไขมันไม่อิ่มตัว 1 ตำแหน่ง ได้แก่ POP POS จะลดลง แต่ SOS จะเพิ่มขึ้น ปริมาณไขมันไม่อิ่มตัว 2 ตำแหน่ง POO SOO PLP MLP จะลดลง ปริมาณไขมันไม่อิ่มตัว 3 ตำแหน่ง POL จะเพิ่มขึ้นจากเดิมเล็กน้อย และ OOO จะเพิ่ม ไขมันไม่อิ่มตัวหลายตำแหน่ง PLL LOL LOO จะเพิ่มขึ้น จะเกิดความเป็นระเบียบมากขึ้น คือกลุ่มกรดไขมันอิสระอิ่มตัวจะอยู่บนไตรกลีเซอรอลเดียวกัน กลุ่มกรดไขมันอิสระแบบไม่อิ่มตัวจะจัดกลุ่มรวมบนกลีเซอรอลเดียวกันมากขึ้นด้วยเช่นกัน การเปลี่ยนแปลงของปริมาณไขมันในน้ำมันปลาชั้นชนิดต่าง ๆ หลังจากการทำปฏิกิริยาทรานสเอสเทอร์ริฟิเคชันสามารถที่จะทำให้คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันเปลี่ยนไป คือมีความแข็งตัว มีจุดหลอมเหลวสูงขึ้น ในบางกรณีอาจมีจุดหลอมเหลวต่ำลงได้ ขึ้นกับประเภทของน้ำมันที่นำมาทำปฏิกิริยา ชนิดของเอนไซม์และปริมาณน้ำที่จะใช้ควบคุมอัตราส่วน การเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยน้ำและปฏิกิริยาทรานสเอสเทอร์ริฟิเคชัน เช่น ถ้าที่ปริมาณน้ำมาก ๆ ปฏิกิริยาเกิดการสลายตัวด้วยน้ำมีมากกว่าการเกิดปฏิกิริยาทรานสเอสเทอร์ริฟิเคชัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีจุดหลอมเหลวต่ำลงเนื่องจากเกิดกรดไขมันอิสระที่ไม่ได้รับการนำไปจัดเรียงบนกลีเซอรอลเพราะปฏิกิริยาทรานสเอสเทอร์ริฟิเคชันนั้นเกิดขึ้นได้ไม่ดี [8] โดยปกติน้ำมันปลาชั้น จะมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ 25 - 26 องศาเซลเซียส แต่เมื่อทำปฏิกิริยาทรานสเอสเทอร์ริฟิเคชันแล้วได้ผลิตภัณฑ์จำพวกเนยเทียมเพื่อสุขภาพ จะมีอุณหภูมิจุดหลอมเหลวประมาณ 30 - 46 องศาเซลเซียส ซึ่งที่จุดหลอมเหลวประมาณ 30 - 34 องศาเซลเซียส นิยมนำมาทำเป็นน้ำมันทอด ที่จุดหลอมเหลวสูง ๆ จะเป็นผลิตภัณฑ์จำพวกเนยเทียมหรือมาร์การีน ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่จำหน่ายทั่วไปที่มีจุดหลอมเหลวที่ 32 - 34 องศาเซลเซียส ซึ่งนิยมนำมาทำเป็นน้ำมันทอดจะมีองค์ประกอบของ ไขมันดังนี้ ไขมันอิ่มตัวสมบูรณ์ 47.0 เปอร์เซ็นต์ ไขมันไม่อิ่มตัว 1 ตำแหน่ง 43.0 เปอร์เซ็นต์ และไขมันไม่อิ่มตัวหลายตำแหน่ง 10.0 เปอร์เซ็นต์ ผลิตภัณฑ์จำพวกเนยเทียมหรือมาร์การีนมีจุดหลอมเหลวประมาณ 39 องศาเซลเซียส จะมีสัดส่วนไขมันดังนี้ ไขมันอิ่มตัวสมบูรณ์ 48.75 เปอร์เซ็นต์ ไขมันไม่อิ่มตัว 1 ตำแหน่ง 35.0 เปอร์เซ็นต์ ไขมันไม่อิ่มตัวหลายตำแหน่ง 15.0 เปอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบปริมาณสัดส่วนไขมันในน้ำมันปลาชั้นทั่วไปประกอบด้วยไขมันอิ่มตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบูรณ์ 46.0 เปอร์เซ็นต์ ไนมันไม่อิ่มตัว 1 ตำแหน่ง 42.0 เปอร์เซ็นต์ ไนมันไม่อิ่มตัวหลายตำแหน่ง 12.0 เปอร์เซ็นต์ พบว่าผลิตภัณฑ์ที่มีจุดหลอมเหลวสูงจะประกอบด้วยปริมาณไนมันอิ่มตัวในปริมาณมาก

ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบของไตรเอซิลกลีเซอรอลในน้ำมันปาล์ม

ไตรเอซิลกลีเซอรอล	ปริมาณ (ร้อยละ)
PPP	0.0
POP	25.1
SOS	4.5
SOS	0.0
POO	30.8
SOO	3.1
PLP	11.2
MLP	0.8
POL	14.1
OOO	4.6
PLL	3.5
LOL	0.6
LOO	2.3

โดย P คือ กรดปาล์มมิติก O คือ กรดโอเลอิก L คือ กรดไลโนเลอิก  
S คือ กรดสเตียริก M คือ กรดไมริสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การทดลอง

#### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

##### 3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลองแบบกะ

เทอร์โมมิเตอร์

1. เครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิได้ (Shaker)
2. อุปกรณ์สำหรับห้องปฏิบัติการเคมี ขวดรูปชมพู่ ปีกเกอร์ หลอดทดลอง

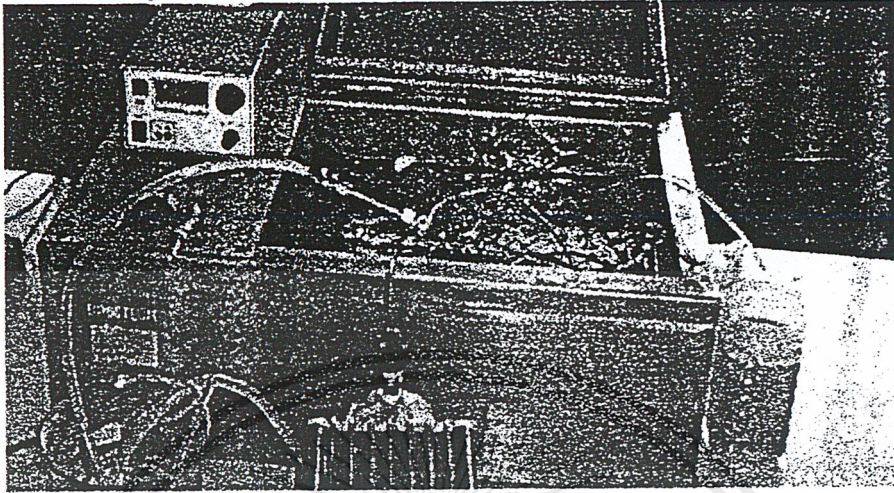
##### 3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลองในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งแบบต่อเนื่อง ดังรูปที่ 3.1

1. เครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง
2. เครื่องปั่นกวน(Magnetic stirrer)
3. ปุ่มของเหลว
4. วาล์วปรับอัตราการไหลของสารป้อนเข้า
5. อ่างควบคุมอุณหภูมิ
6. ภาชนะบรรจุสารป้อนและผลิตภัณฑ์

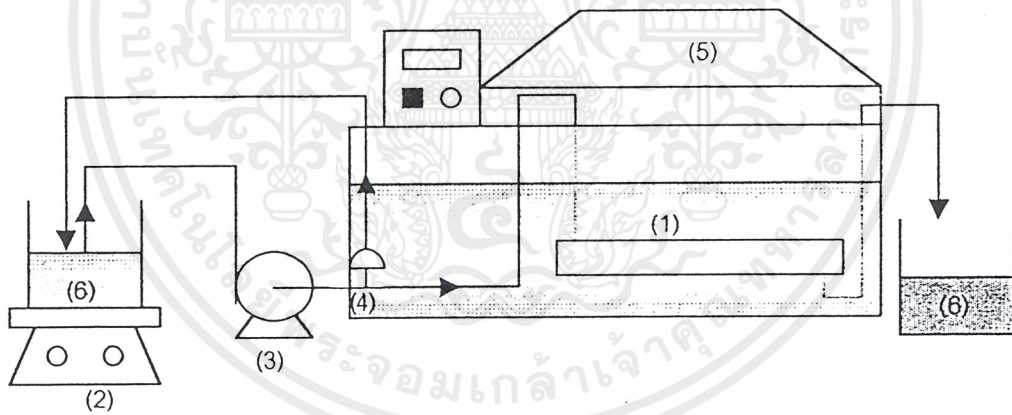
##### 3.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลองหาจุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์

1. หลอดแก้วคาปิลารี
2. เครื่องทำความร้อน(Heater)
3. เทียนไข ไม้ขีดไฟ
4. เทอร์โมมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 (ก) รูปถ่ายเครื่องมือและอุปกรณ์การทดลองในเครื่องปฏิกรณ์เบคนิง



รูปที่ 3.1 (ข) แผนภาพเครื่องมือและอุปกรณ์การทดลองในเครื่องปฏิกรณ์เบคนิง

โดยที่ (1) เครื่องปฏิกรณ์เบคนิง

(2) เครื่องปั่นกวน

(3) ปี่มของเหลว

(4) วาล์วปรับอัตราการไหลสารป้อนเข้า

(5) อ่างควบคุมอุณหภูมิ

(6) ภาชนะบรรจุสารป้อนและผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.4 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลองหาเปอร์เซ็นต์กรดไขมันอิสระ

1. อุปกรณ์สำหรับห้องปฏิบัติการเคมี ขวดรูปชมพู่ บีกเกอร์ หลอดทดลอง เทอร์โมมิเตอร์
2. เครื่องทำความร้อน

## 3.2 สารเคมี

### 3.2.1 สารเคมีในการทดลองแบบกะและเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

1. น้ำมันปาล์ม
2. น้ำกลั่น
3. โกลโปไซม์ไอเอ็ม 20 จาก Novo Nordisk แอคติวิตี 25.00 BIU/กรัม

### 3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลองหาเปอร์เซ็นต์กรดไขมันอิสระ

1. เอทิลแอลกอฮอล์ ความเข้มข้น 95 เปอร์เซ็นต์
2. สารละลายฟีนอล์ฟทาליน 1 เปอร์เซ็นต์ ใน 95 เปอร์เซ็นต์แอลกอฮอล์
3. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 และ 0.25 นอร์มอล
4. โปตัสเซียมไฮโดรเจนพาทาเลท

## 3.3 ขั้นตอนการทดลอง

### 3.3.1 การทดลองแบบกะเพื่อหาปริมาณเปอร์เซ็นต์น้ำโดยน้ำหนักเบื้องต้น ที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยา

1. ชั่งน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาประมาณ 0.50 กรัม นำไปใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำมันปาล์มปริมาตร 24.00 มิลลิลิตร จำนวน 3 ชุด
2. ชุดแรกไม่เติมน้ำ ชุดที่ 2 เติมน้ำ 0.25 เปอร์เซ็นต์ และชุดที่ 3 เติมน้ำ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของปริมาณน้ำมันปาล์มที่ใช้ทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ตั้งอุณหภูมิเครื่องเขย่าที่ 54.00 องศาเซลเซียส
4. นำขบวนการผสมที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา น้ำมันปาล์มและน้ำยูเข้าเครื่องเขย่า และจับเวลา
5. บันทึกผลการทดลองที่เวลาต่าง ๆ โดยนำน้ำมันเก็บลงในหลอดทดลอง ที่ไว้ที่อุณหภูมิห้องเพื่อทำการแข็งตัว
6. เมื่อน้ำมันแข็งตัว บันทึกเวลาและนำไปหาจุดหลอมเหลว

### 3.3.2 การทดลองหาผลของเปอร์เซ็นต์น้ำโดยน้ำหนักและผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งแบบต่อเนื่อง

1. เตรียมเครื่องปฏิกรณ์โดยบรรจุสำลีในเครื่องปฏิกรณ์ที่ทางเข้าปริมาตร 10.0 มิลลิลิตร ตามด้วย ไลโปโซมไอเอ็ม20 น้ำหนักประมาณ 13.8 กรัม ปริมาตร 33.0 มิลลิลิตร ซึ่งปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แสดงในภาคผนวก ฉ บรรจุสำลีต้องจนสุดปลายท่อปิดปลายเครื่องปฏิกรณ์ทั้ง 2 ด้าน
2. นำท่อทางเข้าสารป้อนของเครื่องปฏิกรณ์ต่อกับปั๊มของเหลว โดยต่อผ่านวาล์วเพื่อปรับอัตราการไหลของสารป้อนได้
3. นำเครื่องปฏิกรณ์แช่ลงในอ่างปรับอุณหภูมิ ดังรูปที่ 3.1
4. เตรียมสารป้อน 2 ชุด โดย ชุดที่ 1 เติมน้ำ 1.0 เปอร์เซ็นต์ ชุดที่ 2 เติมน้ำ 3.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในน้ำมันปาล์ม
5. สารป้อนชุดที่ 1 ทำการทดลอง 2 อุณหภูมิ ที่  $66.0 \pm 1.0$  และ  $70.0 \pm 1.0$  องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลของสารป้อนต่าง ๆ กัน
6. สารป้อนชุดที่ 2 ทำการทดลอง ที่  $66.0 \pm 1.0$  องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลของสารป้อนต่าง ๆ กัน
7. เก็บตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆ เพื่อนำมาทดสอบหาจุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ จนได้ผลิตภัณฑ์ที่มีจุดหลอมเหลวคงที่

### 3.3.3 การหาจุดหลอมเหลวของไขมันตามมาตรฐาน A.O.C.S. Official method Cc 1-25

1. นำผลิตภัณฑ์น้ำมันปาล์มแข็งตัวมาหลอมให้กลายเป็นของเหลวที่มีลักษณะใสกรองผ่านกระดาษกรองเพื่อกำจัดสิ่งเจือปน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. บรรจุน้ำมันตัวอย่างลงในหลอดแก้วคาปิลารีจำนวน 3 หลอด โดยให้มีความสูงประมาณ 10 มิลลิเมตร และหลอมปิดปลายหลอดคาปิลารี
3. นำหลอดคาปิลารีที่บรรจุน้ำมันเรียบร้อยแล้วเก็บไว้ในตู้เย็น ที่อุณหภูมิ 4 – 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมงเพื่อให้ น้ำมันแข็งตัว
4. นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ 3 มาหาอุณหภูมิหลอมเหลวโดยติดคาปิลารีที่บริเวณใกล้กระเปาะของเทอร์โมมิเตอร์ แล้วจุ่มลงในภาชนะบีกเกอร์ 600 มิลลิลิตรซึ่งมีน้ำอยู่ประมาณ  $\frac{1}{2}$  ของบีกเกอร์
5. ให้ความร้อนกับน้ำโดยเริ่มที่อุณหภูมิประมาณ 8 – 10 องศาเซลเซียส ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของน้ำมัน และปรับเพิ่มอุณหภูมิในอัตราเร็ว 0.5 องศาเซลเซียสต่อนาที
6. บันทึกอุณหภูมิที่สภาพน้ำมันในหลอดคาปิลารีกลายเป็นของเหลวใสทั้งหมด

### 3.3.4 การทดสอบหาเปอร์เซ็นต์กรดไขมันอิสระในผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีมาตรฐาน A.O.C.S.

#### Official Method Ca 5a -40

1. เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 และ 0.25 นอร์มอล
2. ไทเทรตสารละลายในข้อ 1. ด้วยสารละลายมาตรฐานปฏิกิริยาไปตัสเซียมไฮโดรเจนพาทาเลท เพื่อหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายโซเดียม ไฮดรอกไซด์
3. เตรียมตัวอย่างน้ำมันผลิตภัณฑ์โดยการนำมาหลอมให้เป็นของเหลว โดยใช้ อุณหภูมิที่ทำการหลอมไม่เกิน 10 องศาเซลเซียสของจุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์
4. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างผลิตภัณฑ์ และเติมเอทิลแอลกอฮอล์ 95 เปอร์เซ็นต์เพื่อละลายผลิตภัณฑ์น้ำมันตัวอย่าง ปริมาณผลิตภัณฑ์และเอทิลแอลกอฮอล์ที่เติมต้องอยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับเปอร์เซ็นต์กรดไขมันอิสระในผลิตภัณฑ์ ดังในตารางที่ 3.1 เติมสารละลายฟีนอล์ฟทาลิน ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ ใน 95 เปอร์เซ็นต์เอทิลแอลกอฮอล์ประมาณ 2 มิลลิลิตร สารละลายนี้จะทำหน้าที่เป็นอินดิเคเตอร์ในการไทเทรต
5. ไทเทรตปริมาณความเป็นกรดในแอลกอฮอล์ที่ใช้ละลายน้ำมันตัวอย่าง และไทเทรตหาปริมาณเปอร์เซ็นต์กรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มที่เป็นสารป้อนและผลิตภัณฑ์ จนได้ดี ชมพูจาง ๆ คงที่ ประมาณ 30 วินาที ณ จุดนี้ถือเป็นจุดยุติ

ตารางที่ 3.1 ปริมาณเอทิลแอลกอฮอล์และน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ ที่ใช้ในการไทเทรตตามปริมาณเปอร์เซ็นต์ กรดไขมันอิสระ ที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์

ช่วงเปอร์เซ็นต์ กรดไขมันอิสระ	น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ (กรัม)	ปริมาณแอลกอฮอล์ 95 เปอร์เซ็นต์ (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ (นอร์มอล)
0.0 - 0.2	56.4 ±0.2	50	0.1
0.2 - 1.0	28.2 ±0.2	50	0.1
1.0-30.0	7.05 ±0.05	75	0.25
30.0-50.3	7.05 ±0.05	100	0.25 หรือ 1.0
50.0-100.0	3.525 ±0.001	100	1.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 การทดลองเบื้องต้นแบบกะเพื่อหาปริมาณเปอร์เซ็นต์น้ำโดยน้ำหนัก ที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยา

การเปลี่ยนแปลงของน้ำมันปาล์มให้กลายเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้องโดยปฏิกิริยาทรานส์-เอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้เอนไซม์ไลโปไซม์ 0.50 กรัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงผล ดังตารางที่ 4.1

#### ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองเบื้องต้นแบบกะเพื่อหาเปอร์เซ็นต์น้ำโดยน้ำหนักที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยา

สภาวะในการทดลอง	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3
น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา (กรัม)	0.54	0.51	0.50
ปริมาณน้ำมัน (มิลลิลิตร)	24.0	24.0	23.0
ปริมาณน้ำ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	0.00	0.25	1.00
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	54.0	54.0	54.0
เวลาในการเขย่า (ชั่วโมง)	36.0	23.0	23.0
เวลาที่ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (ชั่วโมง)	24.0	24.0	24.0
จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	28.0	44.0	47.0

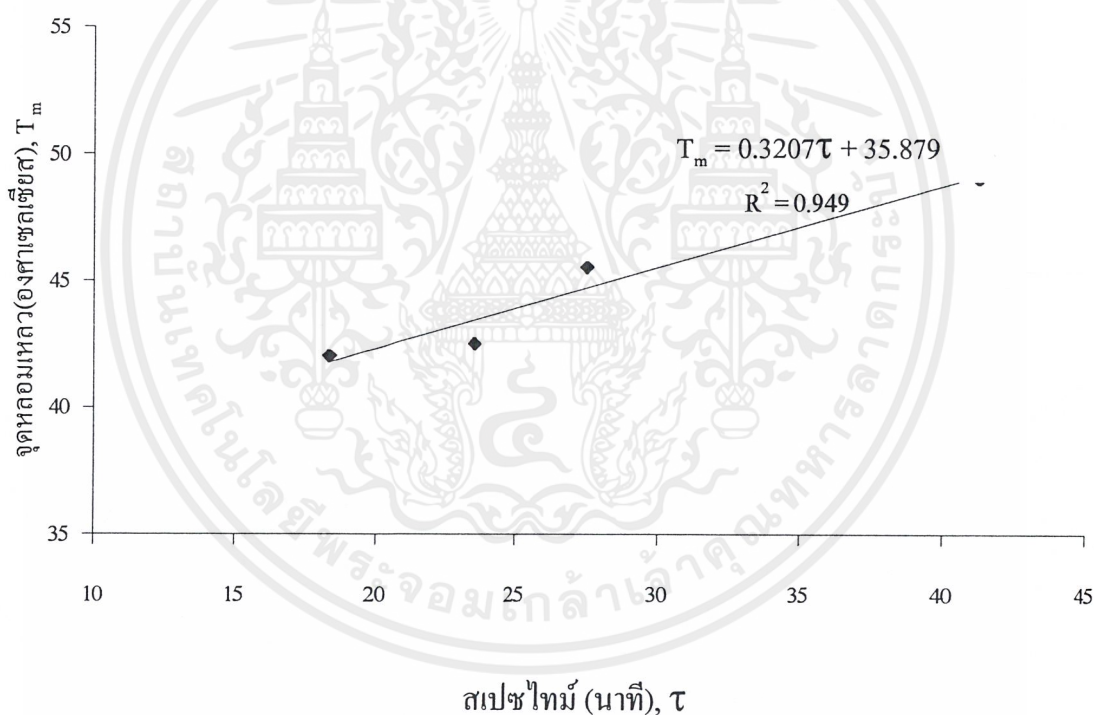
จากการทดลองพบว่าปริมาณน้ำมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา และจุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ที่ได้ โดยในชุดที่ 1 ที่ไม่มีปริมาณน้ำอยู่เลย เมื่อทำการเก็บตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ที่เวลาต่าง ๆ พบว่าเมื่อทำการเขย่าเป็นเวลา 36 ชั่วโมง จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ก็ไม่เปลี่ยนแปลง แต่ในชุดที่ 2 และชุดที่ 3 ซึ่งเป็นชุดที่มีน้ำอยู่ด้วย แม้ทำการเขย่าเพียง 23 ชั่วโมงจุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ก็สูงขึ้นได้ โดยพบว่าที่ 1.0 เปอร์เซ็นต์น้ำโดยน้ำหนักในน้ำมันปาล์มจะได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันปาล์มที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดหลอมเหลวสูง เป็นของแข็ง นำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานเบื้องต้นในการทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์เบคกิงแบบต่อเนื่อง

#### 4.2 การทดลองหาผลของเปอร์เซ็นต์น้ำโดยน้ำหนักและผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์เบคกิงแบบต่อเนื่อง

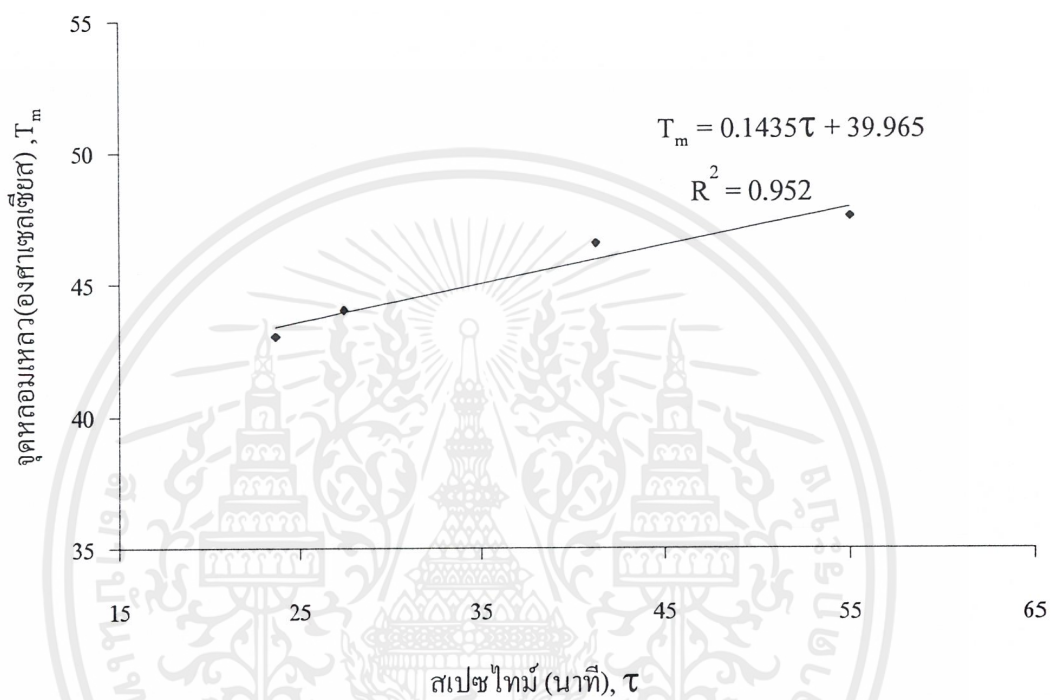
4.2.1 ผลการทดลองหาจุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิการทดลอง  $66.0 \pm 1.0$  องศาเซลเซียส มีปริมาณน้ำ 1.0 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักในน้ำมันปาล์ม โดยใช้ เอนไซม์ไลโปไซม์ ไอเอ็ม 20 13.82 กรัม ปริมาตร 33 มิลลิลิตร บรรจุในเครื่องปฏิกรณ์เบคกิง



รูปที่ 4.1 จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์กับสเปซไทม์ ที่อุณหภูมิการทดลอง  $66.4 \pm 1.0$  องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในน้ำมันปาล์ม

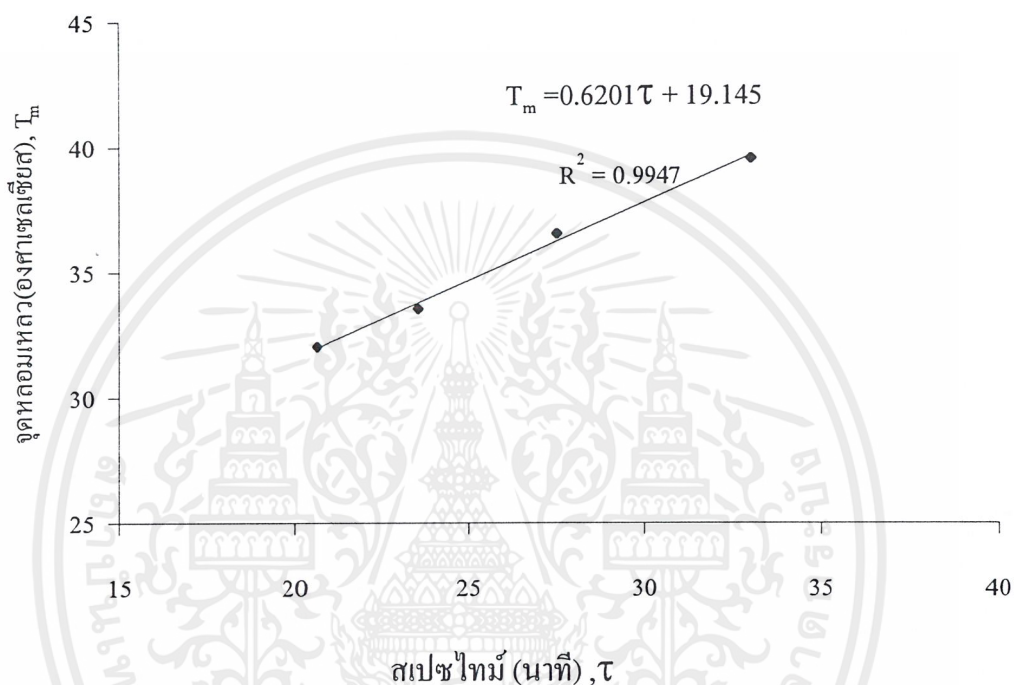
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ผลการทดลองหาจุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิการทดลอง  $70.0 \pm 1.0$  องศาเซลเซียส มีปริมาณน้ำ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในน้ำมันปาล์ม โดยใช้ เอนไซม์ไลโปไซม์ ไอเอ็ม 20 13.82 กรัม ปริมาตร 33 มิลลิลิตร บรรจุในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง



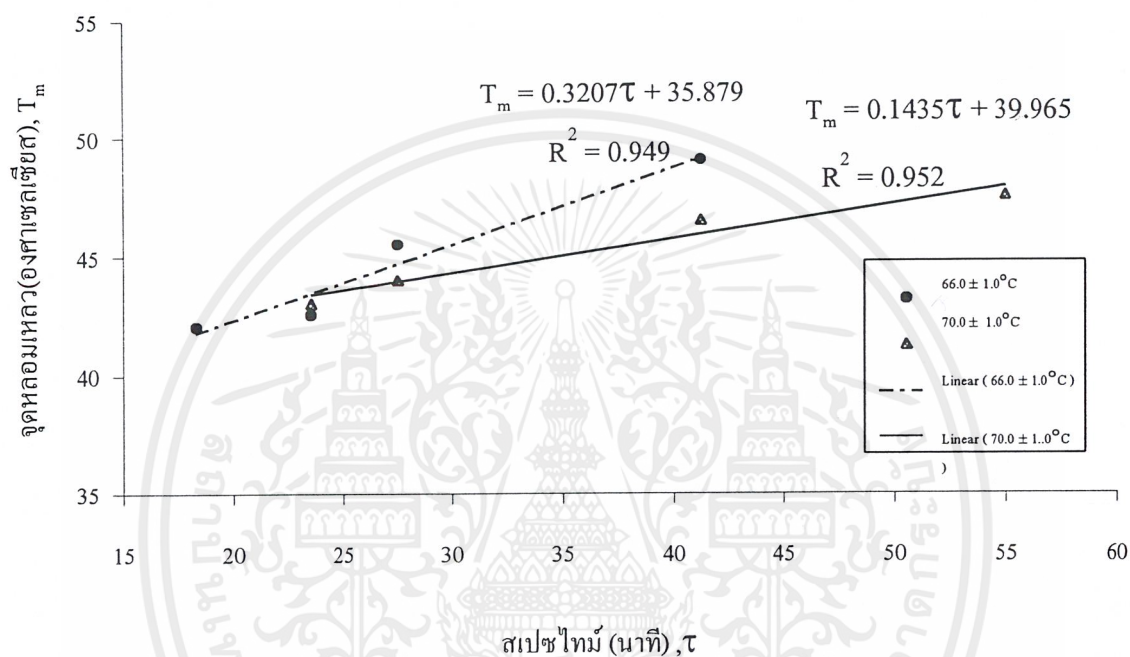
รูปที่ 4.2 จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์กับสเปซไทม์ ที่อุณหภูมิการทดลอง  $70.0 \pm 1.0$  องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในน้ำมันปาล์ม

4.2.3 ผลการทดลองหาจุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิการทดลอง  $66.0 \pm 1.0$  องศาเซลเซียส มีปริมาณน้ำ 3.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในน้ำมันปาล์ม โดยใช้ เอนไซม์ไลโปไซม์ ไอเอ็ม 20 13.80 กรัม ปริมาตร 33 มิลลิลิตร บรรจุในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง



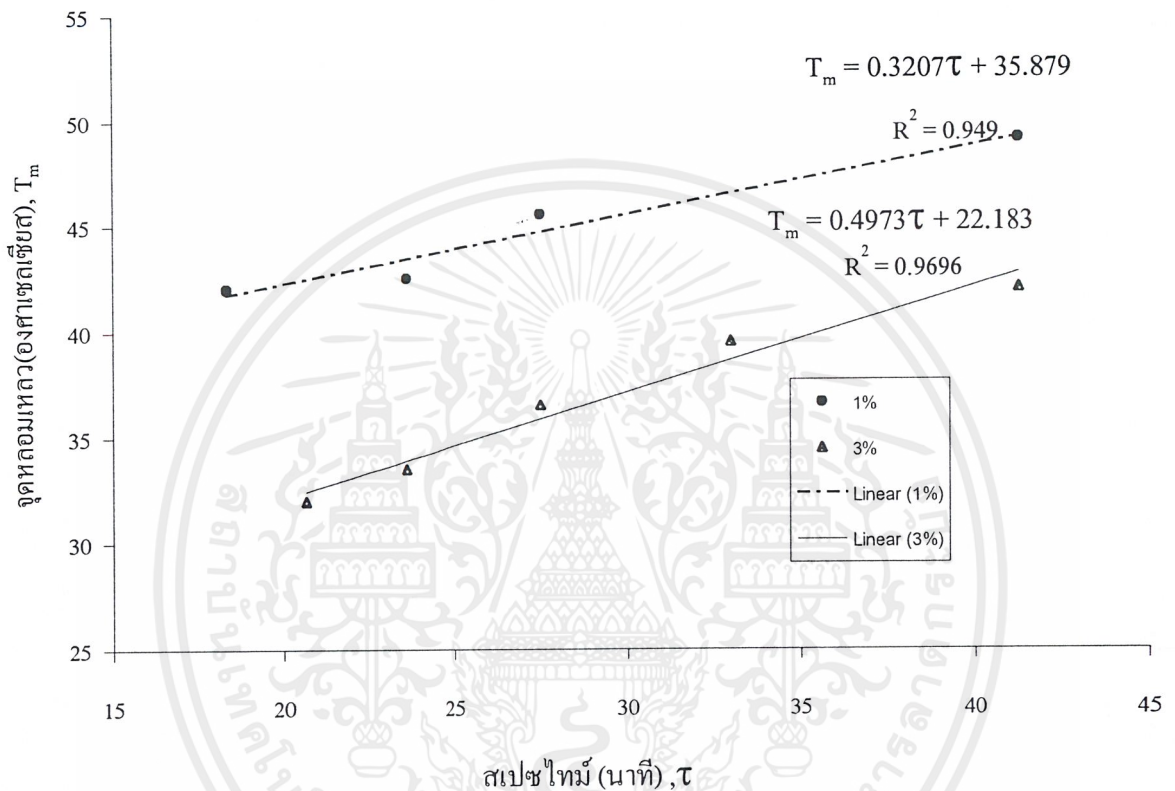
รูปที่ 4.3 จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์กับสเปซไทม์ ที่อุณหภูมิการทดลอง  $66.0 \pm 1.0$  องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำ 3.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในน้ำมันปาล์ม

4.2.4 ผลการทดลองเปรียบเทียบจุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิการทดลอง  $66.0 \pm 1.0$  และ  $70.0 \pm 1.0$  องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในน้ำมัน-ปลาต้ม โดยใช้ เอนไซม์ไลโปไซม์ ไอเอ็ม 20 13.82 กรัม ปริมาตร 33 มิลลิลิตร บรรจุในเครื่องปฏิกรณ์เบคคิง



รูปที่ 4.4 จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์กับสเปซไทม์ ที่อุณหภูมิการทดลอง  $66.0 \pm 1.0$  และ  $70.0 \pm 1.0$  องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในน้ำมันปลาต้ม

4.2.5 ผลการทดลองเปรียบเทียบจุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิการทดลอง  $66.0 \pm 1.0$  องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำ 1.0 และ 3.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในน้ำมันปาล์ม โดยใช้ เอนไซม์ไลโปไซม์ ไอเอ็ม 20 13.82 กรัม ปริมาตร 33 มิลลิลิตร บรรจุในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง



รูปที่ 4.5 จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์กับสเปซไทม์ ที่ได้จากน้ำมันปาล์มเติมน้ำปริมาณ 1.0 และ 3.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิทดลอง  $66.0 \pm 1.0$  องศาเซลเซียส

### 4.3 การทดสอบหาเปอร์เซ็นต์กรดไขมันอิสระในผลิตภัณฑ์

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบหาเปอร์เซ็นต์กรดไขมันอิสระในผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์ที่ทำการทดสอบหา เปอร์เซ็นต์กรดไขมันอิสระ	เปอร์เซ็นต์กรดไขมันอิสระ
ผลิตภัณฑ์ที่ 66.0 ± 1.0 องศาเซลเซียส เติมน้ำ 1.0 เปอร์เซ็นต์ อัตราการใช้ 1.20 มิลลิลิตร/นาที	0.25
อัตราการใช้ 1.40 มิลลิลิตร/นาที	0.38
ผลิตภัณฑ์ที่ 70.0 ± 1.0 องศาเซลเซียส เติมน้ำ 1.0 เปอร์เซ็นต์ อัตราการใช้ 0.80 มิลลิลิตร/นาที	0.04
อัตราการใช้ 1.40 มิลลิลิตร/นาที	0.76
ผลิตภัณฑ์ที่ 66.0 ± 1.0 องศาเซลเซียส เติมน้ำ 3.0 เปอร์เซ็นต์ อัตราการใช้ 0.80 มิลลิลิตร/นาที	0.85
อัตราการใช้ 1.40 มิลลิลิตร/นาที	8.48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. ผลการทดลองเบื้องต้นแบบกะเพื่อหาปริมาณ เปอร์เซนต์น้ำโดยน้ำหนัก ที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานสเอสเทอร์ริฟิเคชันในน้ำมันปาล์ม โดยใช้ไลโปไซม์ ไอเอ็ม 20 พบว่า ชุดการทดลองที่มีปริมาณน้ำ 1.0 เปอร์เซนต์จะได้จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ ที่ 47.0 องศาเซลเซียส ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการคือมีจุดหลอมเหลวใกล้เคียงกับเนยเทียมทั่วไป สามารถนำมาเป็นข้อมูลในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งแบบต่อเนื่อง

2. ในการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งแบบต่อเนื่อง ที่อุณหภูมิ  $66.0 \pm 1.0$  และ  $70.0 \pm 1.0$  องศาเซลเซียส ที่ปริมาณน้ำ 1.0 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ณ อัตราการไหลของสารป้อนเข้าต่าง ๆ กันพบว่าที่อัตราการไหลต่ำ สเปซไทม์สูงจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีจุดหลอมเหลวสูง ได้ความสัมพันธ์แบบเส้นตรงระหว่างจุดหลอมเหลว ( $T_m$ ) กับสเปซไทม์ ( $\tau$ ) ดังนี้  $T_m = 0.3207\tau + 35.879$  ที่อุณหภูมิทดลอง  $66.0 \pm 1.0$  องศาเซลเซียส และ  $T_m = 0.1435\tau + 39.965$  ที่อุณหภูมิทดลอง  $70.0 \pm 1.0$  องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองที่  $70.0 \pm 1.0$  องศาเซลเซียสจะต่ำกว่าที่  $66.0 \pm 1.0$  องศาเซลเซียส อันอาจเนื่องมาจากการเกิดการเสื่อมสภาพของเอนไซม์ที่ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาดังผลที่ได้จากการทดสอบการเสื่อมสภาพของเอนไซม์ในตาราง ค-7 ภาคผนวก ค

3. การทดลองที่ปริมาณน้ำ 3.0 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ  $66.0 \pm 1.0$  องศาเซลเซียส ได้ความสัมพันธ์ระหว่างจุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์  $T_m = 0.6201\tau + 19.145$  ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าที่อุณหภูมิเดียวกัน ปริมาณน้ำ 1.0 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก เนื่องจาก ปฏิกิริยาทรานสเอสเทอร์ริฟิเคชันประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ การเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยน้ำของไขมันได้ไตรกลีเซอรอลกับกรดไขมัน และการเกิดปฏิกิริยาทรานสเอสเทอร์ริฟิเคชัน จัดเรียงตำแหน่งของกรดไขมันบนกลีเซอรอลใหม่ ได้เป็นไขมันที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ปริมาณน้ำที่มากเกินไปจะทำให้ขั้นตอนการเกิดทรานสเอสเทอร์ริฟิเคชันไม่สามารถเกิดขึ้นได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. จากการทดสอบเปอร์เซ็นต์กรดไขมันอิสระในผลิตภัณฑ์ที่ ปริมาณน้ำ 3.0 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักในน้ำมันปาล์ม จะมีค่าเปอร์เซ็นต์กรดไขมันอิสระมากกว่า ที่ปริมาณน้ำ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในน้ำมันปาล์ม เป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันไม่สามารถเกิดขึ้นได้ดีที่ปริมาณน้ำมาก ๆ แต่จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้ดีและได้ผลิตภัณฑ์ที่มีองค์ประกอบของกรดไขมันอิสระมากเนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นกลีเซอรอลและกรดไขมันอิสระ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

1. Hoffmann, G., *The Chemistry and Technology of Edible Oils and Fats and their High Fat Products*, Academic press limited, 1989.
2. <http://www.ars.usda.gov/is/pr/1998/980827.htm>
3. <http://alfa.ist.utl.pt/~fidel/creac/sec35a2.html>
4. <http://www.nhlbisupport.com/chdl/why.htm>
5. <http://www.healthclub.hypermart.net/sick2.htm>
6. <http://www.mail.satitclinic.in.th/Health/heart.htm>
7. <http://www.geocities.com/Hotsprings/resort/7341>
8. Ghazali, H.M., Hamidah, S., Che Man, Y.B., *Enzymatic Transesterification of Palm Olein with Nonspecific and 1, 3 – Specific Lipases*, *JAOCS*, 72, 6, 1995
9. <http://www.class.fst.ohio-state.edu/FST605/lectures/Lect7.html>
10. <http://www.ncaur.gov/bmp/biocat/biocat4.htm>
11. <http://www.biol.paisley.ac.uk/Courses/Enzymes/glossary/Esterif.htm>
12. สุนันทา ภิญาวัฒน์, *ชีวเคมี 1*, ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง, 2542
13. Lists, G.R., Mounts, T.L., Orthoefer, F., Neff, W.E., *Margarine and Shortening Oils by Interesterification of Liquid and Trisaturated Triglycerides*, *JAOCS*, 72, 3, 1995
14. Basheer, S., Mogi, K., Nakajima, M., *Interesterification Kinetics of Triglycerides and Fatty Acids with Modified Lipase in n-Hexane*, *JAOCS*, 72, 5, 1995
15. Hui, Yui H., *Bailey's Industrial Oil and Fat Products*, John Wiley & Sons Inc, 1996
16. Segura, J.A., Herrera, M.L., Anon, M.C., *Margarines: A Rheological Study*, *JAOCS*, 72, 3, 1995
17. <http://sci.mond.org/lps>
18. <http://www.nhlbisupport.com/chdl/how.htm>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### ไลโปไซม์ ไอเอ็ม 20 (Lipozyme IM 20)

- ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา : เอนไซม์ไลเปส ชนิด 1,3 สกัดจาก *Rhizomucor miehei*  
สิ่งมีชีวิตประเภทเชื้อรา บนตัวรองรับเรซินประจุลบ
- ลักษณะทางกายภาพ : เม็ด ขนาดอนุภาค 0.3 – 0.6 มิลลิเมตร
- ปฏิกิริยา : เร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน
- การใช้งาน : เหมาะสำหรับการใช้งานในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง
- ปริมาณน้ำในไลโปไซม์ : 10.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในไลโปไซม์
- อุณหภูมิการใช้งาน : 60.0 – 70.0 องศาเซลเซียส
- แอกติวิตี้ : 25 BIU/ กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### ข้อมูลของเนยเทียม

#### มาร์การีน

มาร์การีน คือ เนยเทียมที่มีลักษณะเป็นของแข็งอ่อนนุ่ม หรือของเหลว มักมีสีขาว ทำด้วยไขมันหรือน้ำมันมีทั้งที่ได้จากสัตว์และจากพืช โดยนำมาทำปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนหรือปฏิกิริยาทรานสเอสเทอร์ริเคชัน อาจมีส่วนผสมของครีมนมด้วย

มาร์การีนเป็นไขมันในรูปอิ่มตัวของน้ำในน้ำมัน น้ำที่เป็นส่วนประกอบในมาร์การีนนั้นมักมาจากครีมนมหรือน้ำที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันเอง

ถ้าปริมาณไขมันที่เป็นองค์ประกอบมีค่า 80 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณน้ำน้อยกว่า 16 เปอร์เซ็นต์ จะเรียกว่ามาร์การีน ถ้าปริมาณไขมันน้อยกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณน้ำไม่เกิน 50 เปอร์เซ็นต์ เรียกว่า มินารีนหรือเนยเทียมแคลอรีต่ำ

ตารางที่ ข-1 องค์ประกอบของไขมันในมาร์การีนโดยทั่วไป

ชนิดของไขมัน	ปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ไขมันอิ่มตัว	48.75
ไขมันไม่อิ่มตัว โมเลกุลเดี่ยว	35.00
ไขมันไม่อิ่มตัวหลายโมเลกุล	15.00

แร่ธาตุที่เป็นองค์ประกอบ ได้แก่ แคลเซียม เหล็ก โพแทสเซียม โซเดียม ฟอสฟอรัส และแมกนีเซียม

วิตามินที่มักพบเป็นองค์ประกอบ วิตามินเอ วิตามินบี 1 วิตามินบี 2 วิตามินบี 6 วิตามินซี ปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมาร์การีน

จุดหลอมเหลว 38-46 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ชอทเทนนิ่ง**

ชอทเทนนิ่ง คือ เนยเทียมที่ได้จากน้ำมันหรือไขมันสัตว์โดยไม่มีส่วนผสมของน้ำ และไม่มีลักษณะเป็นอิมัลชัน ในปัจจุบันมีการทำชอทเทนนิ่ง จากน้ำมันปาล์ม มีทั้งลักษณะที่เป็นของเหลว ประกอบด้วยไขมันที่เป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้องในปริมาณที่ค่อนข้างต่ำ เนื่อน้ำมันใส นิยมใช้ในการทอดอาหารที่ต้องการปริมาณน้ำมันมาก ๆ ลักษณะที่เป็นของแข็งจะคล้ายกับมาร์گارีน

ตารางที่ ข-2 องค์ประกอบของไขมันใน ชอทเทนนิ่งโดยทั่วไป

ชนิดของไขมัน	ปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ไขมันอิ่มตัว	47.00
ไขมันไม่อิ่มตัวโมเลกุลเดี่ยว	43.00
ไขมันไม่อิ่มตัวหลายโมเลกุล	10.00

ปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จุดหลอมเหลวประมาณ 32-34 องศาเซลเซียส

ภาคผนวก ค

ข้อมูลผลการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์เบคกิงแบบต่อเนื่อง

ตารางที่ ค-1 จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ณ เวลาและอัตราการไหลของสารป้อนเข้าต่าง ๆ ปริมาณน้ำ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ  $66.0 \pm 1.0$  องศาเซลเซียส

อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	เวลา (ชั่วโมง)	จุดหลอมเหลว(องศาเซลเซียส)		
		หลอดที่ 1	หลอดที่ 2	หลอดที่ 3
0.80	3.0	46.0	46.0	46.0
	4.0	46.0	46.0	46.0
	5.0	46.5	46.5	46.5
	7.0	47.0	47.0	47.0
	8.0	48.0	48.0	48.0
	9.0	49.0	49.0	49.0
	10.0	49.0	49.0	49.0
	11.0	49.0	49.0	49.0
อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	เวลา (ชั่วโมง)	จุดหลอมเหลว(องศาเซลเซียส)		
		หลอดที่ 1	หลอดที่ 2	หลอดที่ 3
1.20	4.0	38.0	38.0	38.0
	5.0	38.5	38.5	38.5
	6.0	39.0	39.0	39.0
	8.0	42.0	42.0	42.0
	10.0	43.0	43.0	43.0
	14.0	44.0	45.0	45.5
	18.0	45.5	45.5	45.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-1 จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ณ เวลาและอัตราการไหลของสารป้อนเข้าต่าง ๆ ปริมาณน้ำ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ  $66.0 \pm 1.0$  องศาเซลเซียส (ต่อ)

อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	เวลา (ชั่วโมง)	จุดหลอมเหลว(องศาเซลเซียส)		
		หลอดที่ 1	หลอดที่ 2	หลอดที่ 3
1.40	4.0	40.0	40.0	40.0
	5.0	41.5	41.5	41.5
	6.0	42.0	42.0	42.0
	8.0	42.0	42.5	42.5
	9.0	42.5	42.5	42.5
อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	เวลา (ชั่วโมง)	จุดหลอมเหลว(องศาเซลเซียส)		
		หลอดที่ 1	หลอดที่ 2	หลอดที่ 3
1.80	5.0	40.0	40.0	40.0
	6.0	14.0	41.0	41.0
	7.0	41.0	41.5	41.5
	9.0	42.0	42.0	42.0
	10.0	42.0	42.0	42.0

ตารางที่ ค-2 จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ณ เวลาและอัตราการไหลของสารป้อนเข้าต่าง ๆ ปริมาณน้ำ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ  $70.0 \pm 1.0$  องศาเซลเซียส

อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	เวลา (ชั่วโมง)	จุดหลอมเหลว(องศาเซลเซียส)		
		หลอดที่ 1	หลอดที่ 2	หลอดที่ 3
0.60	4.0	45.0	45.0	45.0
	5.0	45.5	45.5	46.0
	6.0	46.0	46.0	46.0
	8.0	47.0	46.5	46.5
	9.0	47.0	47.0	47.5
	10.0	47.5	47.5	47.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-2 จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ณ เวลาและอัตราการไหลของสารป้อนเข้าต่างๆ ปริมาณน้ำ 1.0 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ  $70.0 \pm 1.0$  องศาเซลเซียส (ต่อ)

อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	เวลา (ชั่วโมง)	จุดหลอมเหลว(องศาเซลเซียส)		
		หลอดที่ 1	หลอดที่ 2	หลอดที่ 3
0.80	5.0	44.0	44.5	44.5
	6.0	45.0	45.0	45.0
	7.0	45.5	46.0	46.0
	8.0	46.0	46.5	46.5
	10.0	46.0	46.5	46.5
อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	เวลา (ชั่วโมง)	จุดหลอมเหลว(องศาเซลเซียส)		
		หลอดที่ 1	หลอดที่ 2	หลอดที่ 3
1.00	4.0	41.0	41.0	41.0
	5.0	41.5	41.5	41.5
	6.0	41.5	42.0	42.0
	7.0	42.5	42.5	42.5
	8.0	43.0	43.0	43.0
	10.0	43.0	43.0	43.0
อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	เวลา (ชั่วโมง)	จุดหลอมเหลว(องศาเซลเซียส)		
		หลอดที่ 1	หลอดที่ 2	หลอดที่ 3
1.20	5.0	43.0	43.0	43.0
	7.0	42.5	43.5	43.5
	8.0	43.5	44.0	44.0
	9.0	43.5	43.5	44.0
	10.0	44.0	44.0	44.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-2 จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ณ เวลาและอัตราการไหลของสารป้อนเข้าต่าง ปริมาณน้ำ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ  $70.0 \pm 1.0$  องศาเซลเซียส (ต่อ)

อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	เวลา (ชั่วโมง)	จุดหลอมเหลว(องศาเซลเซียส)		
		หลอดที่ 1	หลอดที่ 2	หลอดที่ 3
1.40	4.0	42.0	42.0	42.0
	5.0	42.5	42.5	42.5
	6.0	42.5	52.5	42.5
	7.0	43.0	43.0	43.0
	8.0	43.0	43.0	43.0
	9.0	43.0	43.0	43.0

ตารางที่ ค-3 จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ณ เวลาและอัตราการไหลของสารป้อนเข้าต่างๆ ปริมาณน้ำ 3.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ  $66.0 \pm 1.0$  องศาเซลเซียส

อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	เวลา (ชั่วโมง)	จุดหลอมเหลว(องศาเซลเซียส)		
		หลอดที่ 1	หลอดที่ 2	หลอดที่ 3
0.80	5.0	41.0	41.0	41.0
	7.0	41.5	41.5	41.5
	8.0	42.0	42.0	42.0
	9.0	42.0	42.0	42.0
อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	เวลา (ชั่วโมง)	จุดหลอมเหลว(องศาเซลเซียส)		
		หลอดที่ 1	หลอดที่ 2	หลอดที่ 3
1.00	5.0	38.5	38.5	38.5
	7.0	39.5	39.5	39.5
	8.0	39.5	39.5	39.5
	9.0	39.5	39.5	39.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ค-3 จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ณ เวลาและอัตราการไหลของสารป้อนเข้าต่างๆ ปริมาณน้ำ 3.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ  $66.0 \pm 1.0$  องศาเซลเซียส (ต่อ)

อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	เวลา (ชั่วโมง)	จุดหลอมเหลว(องศาเซลเซียส)		
		หลอดที่ 1	หลอดที่ 2	หลอดที่ 3
1.20	5.0	35.0	35.0	35.0
	6.0	35.5	35.5	35.5
	8.0	36.5	36.5	36.5
	9.0	36.5	36.5	36.5
อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	เวลา (ชั่วโมง)	จุดหลอมเหลว(องศาเซลเซียส)		
		หลอดที่ 1	หลอดที่ 2	หลอดที่ 3
1.40	5.0	32.5	32.5	32.5
	6.0	32.5	32.5	32.5
	8.0	33.5	33.5	33.5
	9.0	33.5	33.5	33.5
อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	เวลา (ชั่วโมง)	จุดหลอมเหลว(องศาเซลเซียส)		
		หลอดที่ 1	หลอดที่ 2	หลอดที่ 3
1.60	5.0	31.0	31.0	31.0
	6.0	31.0	31.0	31.0
	8.0	31.5	31.5	31.5
	9.0	32.0	32.0	32.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค- 4 จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์กับสเปซไทม์ ปริมาณน้ำ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่  $66.0 \pm 1.0$  องศาเซลเซียส น้ำหนักเอนไซม์ไลโปไซม์ ไอเอ็ม20 13.82 กรัม ปริมาตร 33 มิลลิลิตร

อัตราการใช้ (มิลลิลิตรต่อนาที)	สเปซไทม์ (นาที)	จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)
0.80	41.25	49.0
1.20	27.50	45.5
1.40	23.57	42.5
1.80	18.33	42.0

ตารางที่ ค- 5 จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์กับสเปซไทม์ ปริมาณน้ำ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่  $70.0 \pm 1.0$  องศาเซลเซียส น้ำหนักเอนไซม์ไลโปไซม์ ไอเอ็ม 20 13.80 กรัม ปริมาตร 33 มิลลิลิตร

อัตราการใช้ (มิลลิลิตรต่อนาที)	สเปซไทม์ (นาที)	จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)
0.60	55.00	47.5
0.80	41.25	46.5
1.00	33.00	43.0
1.20	27.50	44.0
1.40	23.57	43.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-6 จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์กับสเปซไทม์ ปริมาณน้ำ 3.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่  $70.0 \pm 1.0$  องศาเซลเซียส น้ำหนักเอนไซม์ไลโปไซม์ ไอเอ็ม 20 13.80 กรัม ปริมาตร 33 มิลลิลิตร

อัตราการใช้ (มิลลิลิตรต่อนาที)	สเปซไทม์ (นาที)	จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)
0.80	41.25	42.0
1.00	33.00	39.5
1.20	27.50	36.5
1.40	23.57	33.5
1.60	20.63	32.0

ตารางที่ ค-7 ผลการทดสอบการเสื่อมสภาพของเอนไซม์

ปริมาณน้ำ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิทดลอง  $66.0 \pm 1.0$  องศาเซลเซียส

น้ำหนักเอนไซม์ไลโปไซม์ ไอเอ็ม 20 เก่า 13.80 กรัม ปริมาตร 33 มิลลิลิตร

น้ำหนักเอนไซม์ไลโปไซม์ ไอเอ็ม 20 ใหม่ 13.80 กรัม ปริมาตร 33 มิลลิลิตร

อัตราการใช้ของสารป้อนเข้า 0.8 มิลลิลิตรต่อนาที

ทดสอบจุดหลอมเหลวของตัวอย่างที่ 8 ชั่วโมง

สภาพเอนไซม์	จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)
เก่า(ผ่านการใช้งาน)	40.0
ใหม่	46.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

### ผลการทดสอบและการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์กรดไขมันอิสระในผลิตภัณฑ์

#### ง-1 การไทเทรตหาความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

- เตรียมสารละลายมาตรฐานปฐมภูมิแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากน้ำหนักความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

มวลโมลกลูโคส โซเดียมไฮดรอกไซด์จากน้ำหนัก	204.23	กรัมต่อโมล
น้ำหนักโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ชั่งได้	2.0367	กรัม
ปริมาตรสารละลาย	100.00	มิลลิลิตร
คิดเป็นความเข้มข้นของสารละลาย	$\frac{2.0367 \times 1000}{204.23 \times 100} = 0.0997$	โมลต่อลิตร

- เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 และ 0.25 นอร์มอล

มวลโมลกลูโคส โซเดียมไฮดรอกไซด์	40.00	กรัมต่อโมล
น้ำหนักสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	3.9864	กรัม
ปริมาตรสารละลาย	1000.00	มิลลิลิตร
คิดเป็นความเข้มข้นของสารละลาย	$\frac{3.9864 \times 1000}{40.00 \times 1000} = 0.0997$	โมลต่อลิตร

น้ำหนักสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	9.9660	กรัม
ปริมาตรสารละลาย	1000.00	มิลลิลิตร

คิดเป็นความเข้มข้นของสารละลาย	$\frac{9.9660 \times 1000}{40.00 \times 1000} = 0.2491$	โมลต่อลิตร
-------------------------------	---	------------

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-ไทเทรตหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ที่ความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล โซเดียมไฮดรอกไซด์

สารละลายปดัสเซียมไฮโดรเจนฟาทาเลท 0.0997 โมลต่อลิตร 10.00 มิลลิลิตร

ปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไทเทรต 10.70 มิลลิลิตร

คิดเป็นความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลาย  $\frac{0.0997 \times 10.00}{10.70} = 0.0932$  โมลต่อลิตร

หรือ 0.0932 นอร์มอล

ที่ความเข้มข้น 0.25 นอร์มอล โซเดียมไฮดรอกไซด์

สารละลายแคลเซียมไฮโดรเจนฟาทาเลท 0.0997 โมลต่อลิตร 10.00 มิลลิลิตร

ปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไทเทรต 4.10 มิลลิลิตร

คิดเป็นความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลาย  $\frac{0.0997 \times 10.00}{4.10} = 0.2432$  โมลต่อลิตร

หรือ 0.2432 นอร์มอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ง-2 การไทเทรตหาเปอร์เซ็นต์กรดไขมันอิสระ

ตาราง ง-1 ปริมาณสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรต

ตัวอย่างที่ทดสอบหาเปอร์เซ็นต์ กรดไขมันอิสระ	สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.01 นอร์มอล (มิลลิลิตร)	เปอร์เซ็นต์ กรดไขมันอิสระ
เอทิลแอลกอฮอล์ 95 เปอร์เซ็นต์	0.40	0.02
น้ำมันปาล์มก่อนทำปฏิกิริยา	1.20	0.05
ตัวอย่างที่ทดสอบหาเปอร์เซ็นต์ กรดไขมันอิสระ	สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.0932 นอร์มอล (มิลลิลิตร)	เปอร์เซ็นต์ กรดไขมันอิสระ
ผลิตภัณฑ์ที่ 66.0 ± 1.0 องศาเซลเซียส เติมน้ำ 1.0 เปอร์เซ็นต์		
อัตราการไหล 1.20 มิลลิลิตร/นาที	0.60	0.25
อัตราการไหล 1.40 มิลลิลิตร/นาที	0.90	0.38
ผลิตภัณฑ์ที่ 70.0 ± 1.0 องศาเซลเซียส เติมน้ำ 1.0 เปอร์เซ็นต์		
อัตราการไหล 0.80 มิลลิลิตร/นาที	0.10	0.04
อัตราการไหล 1.40 มิลลิลิตร/นาที	1.80	0.76
ผลิตภัณฑ์ที่ 66.0 ± 1.0 องศาเซลเซียส เติมน้ำ 3.0 เปอร์เซ็นต์		
อัตราการไหล 0.80 มิลลิลิตร/นาที	2.00	0.85
ตัวอย่างที่ทดสอบหาเปอร์เซ็นต์ กรดไขมันอิสระ	สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.2432 นอร์มอล (มิลลิลิตร)	เปอร์เซ็นต์ กรดไขมันอิสระ
ผลิตภัณฑ์ที่ 66.0 ± 0.1 องศาเซลเซียส เติมน้ำ 3.0 เปอร์เซ็นต์		
อัตราการไหล 1.40 มิลลิลิตร/นาที	3.20	8.48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ง-3 การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์กรดไขมันอิสระ

สูตรที่ใช้ในการคำนวณเปอร์เซ็นต์กรดไขมันอิสระ ตามมาตรฐาน A.O.C.S. Official Method Ca 5a-40

$$\text{เปอร์เซ็นต์กรดไขมันอิสระ} = \frac{\text{ปริมาตรอัลคาไลน์ที่ไทเทรต} \times \text{นอร์มอลของอัลคาไลน์} \times 25.6}{\text{น้ำหนักของตัวอย่างที่นำมาทดสอบ}}$$

- ผลึกภัณฑ์ที่ 66.0 ± 0.1 องศาเซลเซียส เติมน้ำ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในน้ำมันปาล์ม

อัตราการไหล 1.20 มิลลิลิตรต่อนาที

ปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.0932 นอร์มอล ที่ใช้ไทเทรต 0.60 มิลลิลิตร  
น้ำหนักตัวอย่างที่นำมาทดสอบ 5.6394 กรัม

$$\text{ปริมาณเปอร์เซ็นต์กรดไขมันอิสระ} = \frac{0.60 \times 0.0932 \times 25.6}{5.6394} = 0.25 \text{ เปอร์เซ็นต์}$$

- ผลึกภัณฑ์ที่ 66.0 ± 0.1 องศาเซลเซียส เติมน้ำ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในน้ำมันปาล์ม

อัตราการไหล 1.40 มิลลิลิตรต่อนาที

ปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.0932 นอร์มอล ที่ใช้ไทเทรต 0.90 มิลลิลิตร  
น้ำหนักตัวอย่างที่นำมาทดสอบ 5.6388 กรัม

$$\text{ปริมาณเปอร์เซ็นต์กรดไขมันอิสระ} = \frac{0.90 \times 0.0932 \times 25.6}{5.6388} = 0.38 \text{ เปอร์เซ็นต์}$$

- ผลึกภัณฑ์ที่ 70.0 ± 0.1 องศาเซลเซียส เติมน้ำ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในน้ำมันปาล์ม

อัตราการไหล 0.80 มิลลิลิตรต่อนาที

ปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.0932 นอร์มอล ที่ใช้ไทเทรต 0.10 มิลลิลิตร  
น้ำหนักตัวอย่างที่นำมาทดสอบ 5.6391 กรัม

$$\text{ปริมาณเปอร์เซ็นต์กรดไขมันอิสระ} = \frac{0.10 \times 0.0932 \times 25.6}{5.6391} = 0.04 \text{ เปอร์เซ็นต์}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ผลิตภัณฑ์ที่  $70.0 \pm 0.1$  องศาเซลเซียส เติมน้ำ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในน้ำมันปาล์ม  
อัตราการใช้ 1.40 มิลลิลิตรต่อนาที

ปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.0932 นอร์มอล ที่ใช้ไทเทรต 1.80 มิลลิลิตร  
น้ำหนักตัวอย่างที่นำมาทดสอบ 5.6389 กรัม

$$\text{ปริมาณเปอร์เซ็นต์กรดไขมันอิสระ} = \frac{1.80 \times 0.0932 \times 25.6}{5.6389} = 0.76 \text{ เปอร์เซ็นต์}$$

- ผลิตภัณฑ์ที่  $66.0 \pm 1.0$  องศาเซลเซียส เติมน้ำ 3.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในน้ำมันปาล์ม  
อัตราการใช้ 0.80 มิลลิลิตรต่อนาที

ปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.0932 นอร์มอล ที่ใช้ไทเทรต 2.00 มิลลิลิตร  
น้ำหนักตัวอย่างที่นำมาทดสอบ 5.6407 กรัม

$$\text{ปริมาณเปอร์เซ็นต์กรดไขมันอิสระ} = \frac{2.00 \times 0.0932 \times 25.6}{5.6407} = 0.85 \text{ เปอร์เซ็นต์}$$

- ผลิตภัณฑ์ที่  $66.0 \pm 1.0$  องศาเซลเซียส เติมน้ำ 3.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในน้ำมันปาล์ม  
อัตราการใช้ 1.40 มิลลิลิตรต่อนาที

ปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.2432 นอร์มอล ที่ใช้ไทเทรต 3.20 มิลลิลิตร  
น้ำหนักตัวอย่างที่นำมาทดสอบ 5.6407 กรัม

$$\text{ปริมาณเปอร์เซ็นต์กรดไขมันอิสระ} = \frac{3.20 \times 0.2432 \times 25.6}{5.6407} = 8.48 \text{ เปอร์เซ็นต์}$$

## ภาคผนวก จ

### ข้อมูลของน้ำมันปาล์มที่ใช้เป็นสารตั้งต้น

#### ส่วนประกอบของน้ำมันปาล์ม

ไขมันอิ่มตัว	6.0	กรัม
ไขมันไม่อิ่มตัวหนึ่งตำแหน่ง	1.5	กรัม
ไขมันไม่อิ่มตัวหลายตำแหน่ง	7.0	กรัม
โคเลสเตอรอล	0.0	กรัม
โปรตีน	0.0	กรัม
น้ำ	0.05	เปอร์เซ็นต์

#### คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันปาล์ม

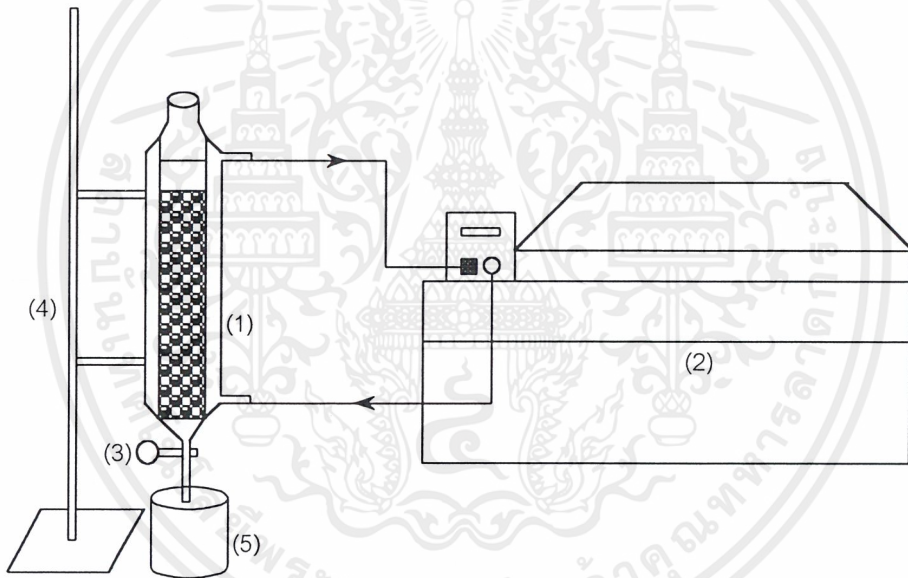
จุดหลอมเหลว	26.0	องศาเซลเซียส
-------------	------	--------------

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ฉ

### การทดลองหาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อหาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม เพื่อที่จะนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ต่อในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง การทดลองแสดงได้ดังรูปที่ ฉ-1



รูปที่ ฉ-1 แผนภาพเครื่องมือและอุปกรณ์การทดลองหาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม

โดยที่ (1) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ภายในบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาและน้ำมัน-  
ปาล์ม

(2) อ่างควบคุมอุณหภูมิ

(3) วาล์วปรับอัตราการไหล

(4) ขาตั้งและที่จับ

(5) บีกเกอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดลองนี้ได้ทำการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาลงในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ให้น้ำมันไหลผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาโดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก และควบคุมอัตราการไหลโดยใช้วาล์วอุณหภูมิที่ใช้ 70.0 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ 14.0 กรัม และอัตราการไหลต่ำสุดที่สามารถปรับได้คือ 1.2 มิลลิลิตรต่อนาที จะได้จุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ที่ 44.0 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ยอมรับได้ ดังนั้นจึงสรุปว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 14.0 กรัม เป็นค่าที่เหมาะสมในการใช้งาน แต่เนื่องจากอุปกรณ์ชุดนี้ไม่สามารถควบคุมอัตราการไหลให้คงที่ได้จึงได้เปลี่ยนไปใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งแทน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้