

การตั้งเครื่องแม่ทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อเล็ก



- 1. นาย บุญชู ภัทรโสภากย์
- 2. นาย เอกพิชญ์ ทรงคุณ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขหมู่.....

ปีการศึกษา 2545

เลขทะเบียน 50263

วันเดือนปี 28 ส.ย. 2547

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**SYNTHESIS OF METHYL ESTER FROM PALM OIL IN NARROW TUBULAR  
REACTOR**



**A Report Submitted in Partion Fulfillment of The Requirements  
For The Degree of Bachelor of Chemical Engineering  
Faculty of Engineering  
King Mongkut 's Institute of Technology Ladkrabang  
2002**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อเล็ก

โดย นายบุญชู ภัทรโสภาคย์

นาย เอกพิชญ์ ทรงคุณ

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ไพศาล นาคพิพัฒน์

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์



ประธานกรรมการ  
(ผศ.ดร. ไพศาล นาคพิพัฒน์)

กรรมการ  
(ดร. สุรัตน์ อารีรัตน์)

กรรมการ  
(อาจารย์ รุ่งฤดี เบญจางคประเสริฐ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรึญญาณิพนธ์เรื่อง การสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อเล็ก  
 โดย นาย บุญชู ภัทรโสภาคย์  
 นาย เอกพิชญ์ ทรงคุณ  
 ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
 อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ไพศาล นาคพิพัฒน์  
 ปรึญญาณิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี  
 ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษากระบวนการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ซึ่งเป็นการศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มและเมทานอล โดยมีโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เครื่องปฏิกรณ์ทำด้วยท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก ¼ นิ้ว ยาวประมาณ 25 เมตร ขดเป็นคอยล์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร มีปริมาตรประมาณ 620 มิลลิลิตร อัตราส่วนโดยปริมาตรของเมทานอล : น้ำมันปาล์มเท่ากับ 1 : 5 และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5% ของน้ำหนักน้ำมันปาล์มเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โครงการนี้ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ได้แก่ อัตราการไหลของสารที่เข้าทำปฏิกิริยา อุณหภูมิของปฏิกิริยา เป็นต้น

ได้ทำการทดลองเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลดังนี้คือ 20, 40, และ 60 ml/min และทดลองเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของปฏิกิริยาในแต่ละอัตราไหลดังนี้คือ 60, 70, และ 80°C ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าสภาวะที่ดีที่สุดในการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ คือ อัตราไหลของสารตั้งต้นรวม 20 ml/min และที่อุณหภูมิ 80°C และได้ทำการทดลองที่อัตราไหล 20 ml/min ที่อุณหภูมิ 60, 70, และ 80°C โดยให้ความร้อนแก่สารตั้งต้นให้มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิของปฏิกิริยาก่อนป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ พบว่าที่อุณหภูมิ 80°C เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จะมีค่าความหนืดเฉลี่ย 4.88 cSt คิดเป็นร้อยละของผลิตภัณฑ์ 96.6 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title            Synthesis of Methyl Ester from Palm Oil in Narrow Tubular Reactor  
By                            Mr.Boonchoo Pattarasopak  
                                  Mr.Eakkapit Songkun  
Advisor                    Asst.Prof.Dr.Paisal Nakpipat  
Report for                Bachelor Degree of Chemical Engineering  
                                  Department of chemical Engineering, Faculty of Engineering  
                                  King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

### Abstract

This project aims to study the synthesis of methyl ester from palm oil in a continuous reactor, using transesterification of palm olein and methanol with sodium hydroxide as catalyst. The reactor was made of ¼ inches outer diameter copper tube with a total length of 25 m, forming into a 20 cm diameter coil pattern. The total volume of the reactor is approximately 620 ml. The volumetric ratio of methanol and palm olein was set at 1:5 with 0.5% sodium hydroxide by weight of palm olein. This study, the optimum condition of the reaction was investigated by varying parameters such as flow rate and reaction temperature.

The experiments were performed at different flow rates of 20, 40, and 60 ml/min, and reaction temperature of 60, 70, and 80°C. The experimental data showed that the maximum conversion was obtained at the flow rate of 20 ml/min and 80°C. The effect of preheating the reactants before feeding into the reactor was also investigated by fixing the flow rate at 20 ml/min and varying the temperature of 60, 70, and 80°C. Better yield was obtained when the feed was preheated. The flow rate of 20 ml/min and 80°C gave the highest yield of methyl ester with the lower viscosity of 4.88 cSt and yield of 96.6%.

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ญ
สัญลักษณ์.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
- 1.1 ความเป็นมาของปริญญาบัตร.....	1
- 1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญาบัตร.....	4
- 1.3 ขอบเขตของปริญญาบัตร.....	4
- 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	4
- 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
- 2.1 น้ำมันพืชและส่วนประกอบของน้ำมันพืช.....	6
- 2.2 ปฏิกริยาในกรดไขมัน.....	10
- 2.3 การเตรียมเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันพืช.....	12
บทที่ 3 การไหลในท่อ.....	13
3.1 สมการแสดงความสัมพันธ์ของการไหลภายในท่อ.....	15
- 3.1.1 สมการสมดุลมวลสาร.....	15
- 3.1.2 สมการสมดุลพลังงาน.....	17
- 3.1.3 สมการสมดุลโมเมนตัม.....	18
3.2 การไหลแบบปั่นป่วน.....	18
- 3.3.1 ชั้นขอบเขต.....	19
- 3.3.2 โมเมนตัมพลั๊กซ์ของความปั่นป่วน.....	19
- 3.3.3 ทฤษฎีความยาวของการผสม.....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ผลของทางเข้า.....	22
บทที่ 4 การทดลอง.....	24
4.1 การสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์ม โดยวิธีแบบกะ(Batch).....	24
4.2 การสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อเล็ก.....	25
- 4.2.1 การสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อเล็ก (ไม่ได้อุ่นสารตั้งต้นก่อนทำการทดลอง).....	25
- 4.2.2 การสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อเล็ก (อุ่นสารตั้งต้นก่อนทำการทดลอง).....	27
4.3 การวิเคราะห์หาความหนืดของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้.....	29
4.4 การวิเคราะห์หาร้อยละของผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้.....	29
บทที่ 5 ผลการทดลอง.....	30
บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	34
เอกสารอ้างอิง.....	38
ภาคผนวก.....	39
ภาคผนวก ก การคำนวณ.....	40
ภาคผนวก ข.....	44



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 Phytosterol ในน้ำมันพืช.....6

ตารางที่ 4.1 อัตราไหลของสารตั้งต้นที่ใช้ทดลอง.....27

ตารางที่ 5.1 ความหนืดของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้(เฉลี่ย)  
เมื่อไม่ได้อุ่นสารตั้งต้นก่อนทำปฏิกิริยา.....30

ตารางที่ 5.2 ความหนืดของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้  
อุ่นสารตั้งต้นก่อนทำปฏิกิริยา.....31

ตารางที่ 5.3 ร้อยละของผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้เฉลี่ยในการทดลอง  
เมื่อไม่ได้อุ่นสารตั้งต้นก่อนทำปฏิกิริยา..... 32

ตารางที่ 5.4 ร้อยละของผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้  
เมื่ออุ่นสารตั้งต้นก่อนทำปฏิกิริยา.....33

ตารางที่ ก.1 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันปาล์ม โอเลอินบริสุทธิ์.....40

ตารางที่ ก.2 ผลการคำนวณค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่สถานะต่างๆ.....43

ตารางที่ ก.3 ผลการคำนวณค่าความหนืดที่สถานะการทดลองต่างๆ.....43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างของ Cephalin, Lecithin, Fat (Triglyceride), Cholesterol และ Sitosterol..... 7

รูปที่ 2.2 โครงสร้างของกรดไขมันที่อิ่มตัวที่ไม่มีพันธะคู่ มีพันธะคู่แบบซีส และแบบทรานส์  
โมเลกุลทั้งสามมีจำนวนคาร์บอนเท่ากัน (สิรินทร์ และคณะ 2523).....9

รูปที่ 3.1 อุปกรณ์การทดลองของเรย์โนลด์.....13

รูปที่ 3.2 การไหลลักษณะต่างๆ..... 14

รูปที่ 3.3 ความต่อเนื่องของการไหล..... 15

รูปที่ 3.4 การไหลแบบต่อเนื่องผ่านท่อกระแส (Stream tube)..... 16

รูปที่ 3.5 การไหลในท่อ..... 17

รูปที่ 3.6 ชั้นขอบเขต..... 18

รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของของไหลกับเวลา..... 19

รูปที่ 3.8 การพัฒนาของชั้นขอบเขตในท่อ..... 23

รูปที่ 5.1 ความหนืดของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้เฉลี่ยที่อุณหภูมิและอัตราไหลต่างๆ..... 31

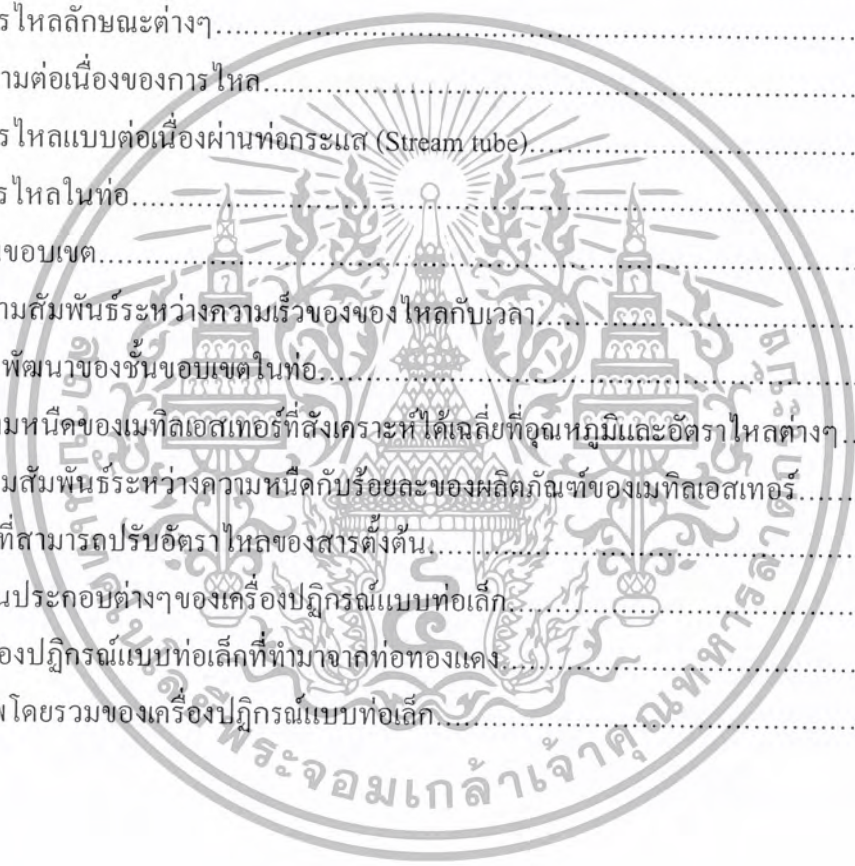
รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับร้อยละของผลิตภัณฑ์ของเมทิลเอสเทอร์..... 32

รูปที่ ข.1 ป้อนที่สามารถปรับอัตราไหลของสารตั้งต้น.....44

รูปที่ ข.2 ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อเล็ก..... 45

รูปที่ ข.3 เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อเล็กที่ทำมาจากท่อทองแดง.....46

รูปที่ ข.4 ภาพโดยรวมของเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อเล็ก..... 47



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สัญลักษณ์

## ตัวอักษรตัวใหญ่

- A = พื้นที่หน้าตัดของท่อ, ตารางเมตร
- $A_1$  = พื้นที่หน้าตัดของท่อ ณ ตำแหน่ง 1 (รูปที่ 3.4), ตารางเมตร
- $A_2$  = พื้นที่หน้าตัดของท่อ ณ ตำแหน่ง 2 (รูปที่ 3.4), ตารางเมตร
- C = ค่าคงที่ (สมการ 3.21)
- D = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ, ความยาว
- $\sum F$  = ผลรวมของความสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบ
- f = fanning friction factor
- g = แรงโน้มถ่วงของโลก = 9.81 เมตร/วินาที
- $K_c$  = สัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากข้อต่อที่มีลักษณะลดขนาดทันทีทันใด
- $K_{ex}$  = สัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากข้อต่อที่มีลักษณะขยายขนาดทันทีทันใด
- $K_f$  = สัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากข้อต่อหรือวาล์วต่างๆภายในท่อ
- k = ค่าคงที่
- L = ความยาวท่อ, เมตร
- $L_c$  = ความยาวที่ทางเข้า, เมตร
- l = ความยาวของการผสม, เมตร
- $N_{Re}$  = ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์
- P = ความดันภายในท่อ ณ ตำแหน่งใดๆ, ปาสคาล
- $P_1$  = ความดันภายในท่อ ณ ตำแหน่งที่ 1, ปาสคาล
- $P_2$  = ความดันภายในท่อ ณ ตำแหน่งที่ 2, ปาสคาล
- Q = อัตราการไหลของของไหล, ลูกบาศก์เมตร/วินาที
- R = รัศมีของท่อ, เมตร
- r = รัศมีของท่อ ณ ตำแหน่งใดๆ, เมตร
- T = คาบเวลา, วินาที
- t = เวลา, วินาที
- V = ความเร็วเฉลี่ยของของไหลในท่อ, เมตร/วินาที
- $V_x$  = ความเร็วของของไหล ณ ตำแหน่งใดๆในแนวแกน x, เมตร/วินาที
- $V_1$  = ความเร็วเฉลี่ยของของไหล ณ ตำแหน่งที่ 1 (รูปที่ 3.4 และ 3.5), เมตร/วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $V_1$  = ความเร็วเฉลี่ยของของไหลในท่อขนาดเล็ก (สมการที่ 3.10), เมตร/วินาที  
 $V_2$  = ความเร็วเฉลี่ยของของไหล ณ ตำแหน่งที่ 2 (รูปที่ 3.4 และ 3.5), เมตร/วินาที  
 $V_2$  = ความเร็วเฉลี่ยของของไหลในท่อขนาดใหญ่ (สมการที่ 3.10), เมตร/วินาที  
 $V_{max}$  = ความเร็วที่มากที่สุด  
 $V$  = ความเร็วของของไหลในท่อมไร้หน่วย  
 $V^*$  = ความเร็วของการเสียดทาน, เมตร/วินาที  
 $V_x$  = ความเร็วเนื่องจาก eddy ในแนวแกน x, เมตร/วินาที  
 $V_y$  = ความเร็วเนื่องจาก eddy ในแนวแกน y, เมตร/วินาที  
 $V_z$  = ความเร็วเนื่องจาก eddy ในแนวแกน z, เมตร/วินาที  
 $y$  = ระยะห่างจากผนังท่อ, เมตร  
 $\bar{y}$  = ระยะห่างจากผนังท่อในท่อมไร้หน่วย, เมตร  
 $Z_1$  = ความสูงของท่อ ณ ตำแหน่งที่ 1 จากระดับอ้างอิง (รูปที่ 3.5), เมตร  
 $Z_2$  = ความสูงของท่อ ณ ตำแหน่งที่ 2 จากระดับอ้างอิง (รูปที่ 3.5), เมตร  
 $W_s$  = งานของปั๊มที่ใช้ในระบบ, จูล/กิโลกรัม

#### ตัวอักษรกรีก

- $\alpha$  = ค่าแฟคเตอร์แก้ไข  
 $\theta$  = มุมที่ทำกับแนวระดับ, องศา  
 $\mu$  = ความหนืดของของไหล, กิโลกรัม/เมตร-วินาที  
 $\nu$  = ความหนืดคินเนมาติกของของไหล, เมตร<sup>2</sup>/วินาที  
 $\rho$  = ความหนาแน่นของของไหล, กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร  
 $\tau_{rx}$  = ความเค้นเฉือนที่กระทำบนพื้นผิวในแนวรัศมีโดยมีทิศทางในแนวแกน x  
 $\tau_w$  = ความเค้นเฉือนที่กระทำต่อผนังท่อ  
 $\tau_{xx}$  = ความเค้นเฉือนที่กระทำบนพื้นผิวในแนวแกน x โดยมีทิศทางในแนวแกน x  
 $\tau_{xy}$  = ความเค้นเฉือนที่กระทำบนพื้นผิวในแนวแกน x โดยมีทิศทางในแนวแกน y  
 $\tau_{xz}$  = ความเค้นเฉือนที่กระทำบนพื้นผิวในแนวแกน x โดยมีทิศทางในแนวแกน z  
 $\tau_{yx}$  = ความเค้นเฉือนที่กระทำบนพื้นผิวในแนวแกน y โดยมีทิศทางในแนวแกน x  
 $\tau_{yy}$  = ความเค้นเฉือนที่กระทำบนพื้นผิวในแนวแกน y โดยมีทิศทางในแนวแกน y  
 $\tau_{yz}$  = ความเค้นเฉือนที่กระทำบนพื้นผิวในแนวแกน y โดยมีทิศทางในแนวแกน z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $\tau'_{zx}$  = ความเค้นเฉือนที่กระทำบนพื้นผิวในแนวแกน z โดยมีทิศทางในแนวแกน x  
 $\tau'_{zy}$  = ความเค้นเฉือนที่กระทำบนพื้นผิวในแนวแกน z โดยมีทิศทางในแนวแกน y  
 $\tau'_{zz}$  = ความเค้นเฉือนที่กระทำบนพื้นผิวในแนวแกน z โดยมีทิศทางในแนวแกน z

### ตัวห้อย

- c = ลดขนาดทันทีทันใด (สมการที่ 3.10)  
 c = การหมุนวน (สมการที่ 3.20)  
 r = ในแนวรัศมี  
 s = ระบบ  
 x = ในแนวแกน x  
 y = ในแนวแกน y  
 z = ในแนวแกน z  
 1 = ที่ตำแหน่ง 1  
 2 = ที่ตำแหน่ง 2

### ตัวโหน

- / = การหมุนวน



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมา

ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา ประเทศไทยมีความต้องการใช้น้ำมันดีเซลมากขึ้น โดยในปี 2543 มีการใช้น้ำมันดิบสูงถึงวันละ 674,978 บาร์เรลต่อวัน คิดเป็นมูลค่า 285,862 ล้านบาท [จิรพนธ์ แสงขำ และ พีรพงศ์ เนียรภาค] เนื่องจากภาวะน้ำมันผันผวนทั่วโลกหลายประเทศที่ได้รับความเดือดร้อนจึงได้มีการคิดหาแหล่งพลังงานอื่นมาทดแทนเพื่อเป็นการผ่อนคลายปัญหาที่เกิดขึ้นมีการพัฒนาใช้ประโยชน์จากผลิตผลทางการเกษตรในรูปแบบต่างๆ เช่น การผลิตก๊าซโซฮอสต์ตลอดจนการผลิตไบโอดีเซลหรือ น้ำมันดีเซลชีวภาพ ทั้งนี้เพื่อเป็นการใช้ทรัพยากรมาใช้ประโยชน์อย่างคุ้มค่ารักษาเงินตราภายในประเทศ และสร้างความมั่นคงให้แก่ประเทศ

การพัฒนาเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันดีเซลในปัจจุบันได้เจริญรุดหน้ามากขึ้นเป็นลำดับจนสามารถใช้เชื้อเพลิงที่เป็นก๊าซ (Gaseous Fuel) และ ของแข็ง (Solid Fuel) ได้วิวัฒนาการดังกล่าวมีพื้นฐานมาจากการใช้เชื้อเพลิงเหลว (Liquid Hydrocarbon Fuel) ที่ได้จากการกลั่นน้ำมัน นั่นเอง แม้ว่าแหล่งน้ำมันจะมีอยู่มากมาย แต่ประชากรของโลกก็เพิ่มขึ้นทุกวัน ทำให้แหล่งน้ำมันลดน้อยลงไปทุกที จึงมีการศึกษาเพื่อค้นหาแหล่งทดแทนน้ำมันดีเซลในอนาคตกันมากขึ้นพบว่า LPG CNG ก๊าซชีววมวล และน้ำมันพืชมีศักยภาพในการใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันดีเซลได้

น้ำมันดีเซลชีวภาพส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอัลคิลเอสเทอร์ (Mono alkyl esters) ซึ่งที่นิยมใช้กันมากคือ เมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์ ที่ผลิตได้จากน้ำมันพืชและไขมันจากสัตว์ที่มีคุณสมบัติเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงประเภทดีเซลเช่นเดียวกับน้ำมันปิโตรเลียม น้ำมันดีเซลชีวภาพถูกผลิตขึ้นโดยขบวนการที่เรียกว่า ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) โดยการนำน้ำมันพืชหรือไขมันจากสัตว์มาผ่านการกรองที่จะถูกนำไปทำปฏิกิริยากับด่างเพื่อกำจัดอนุมูลไขมันอิสระ แล้วจึงผสมรวมกับเมทานอล และโซเดียมหรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้สารไตรกลีเซอไรด์ (Triglycerides) ในน้ำมันเปลี่ยนเป็นสารประเภทเอสเทอร์ (Ester) และกลีเซอรอล (Glycerol) เมื่อกลีเซอรอลถูกแยกออกจากน้ำมันพืชแล้ว โมเลกุลที่เหลือจะมีคุณสมบัติคล้ายน้ำมันปิโตรเลียมจะต่างกันที่โมเลกุลของน้ำมันน้ำมันดีเซลชีวภาพเป็นกลุ่มของไฮโดรคาร์บอนที่ปลอดจากกำมะถันหรือองค์ประกอบซับซ้อนอื่นๆ

น้ำมันพืชชนิดต่างๆที่สามารถนำมาใช้ในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพได้นั้น สกัดได้จากพืชหลายชนิด เช่น ถั่วเหลือง ปาล์มน้ำมัน น้ำมันมะพร้าว เมล็ดคางพารา เมล็ดฝ้าย ละหุ่ง ถั่วลิสง ปอ เมล็ดทานตะวัน เมล็ดดอกคำฝอย เป็นต้น ทั้งนี้ขึ้นกับการผลิตพืชในแต่ละท้องถิ่นน้อยแตกต่างกันไป

การเปลี่ยนน้ำมันพืชมาใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์สันดาปภายในเป็นสิ่งที่มีศักยภาพสูงที่จะทำ เพราะน้ำมันพืชเป็นแหล่งพลังงานที่ไม่มีขอบเขต สามารถผลิตขึ้นมาได้ในเวลาไม่นานทั้งยังปลอดภัยมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานไฮโดรเจน พลังงานนิวเคลียร์ น้ำมันดีเซลชีวภาพซึ่งได้จากการนำน้ำมันพืชมาทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ ได้รับการยอมรับว่ามีคุณภาพเท่าเทียมและดีกว่าในอีกหลายด้านเมื่อใช้แทนน้ำมันดีเซลหรือผสมเป็นหัวเชื้อทั้งในยุโรปและอเมริกา อีกทั้งการใช้ผลผลิตทางการเกษตรมาทำน้ำมันดีเซลชีวภาพจะช่วยผลักดันให้ผลผลิตทางการเกษตรมีแหล่งตลาดขนาดใหญ่ภายในประเทศ ซึ่งจะส่งผลให้มีการกระตุ้นการผลิตภาคเกษตรแนวใหม่เป็นตลาดซึ่งสามารถสร้างให้มีเสถียรภาพและประเมินขนาดของตลาด การวางแผนที่ชัดเจนขึ้นโดยไม่จำเป็นต้องนำภาคเกษตรกรรมไปผูกพันกับตลาดต่างประเทศ เป็นการสร้างรากฐานทางยุทธศาสตร์ความมั่นคงด้านพลังงานทดแทนของชาติที่สำคัญยิ่ง

น้ำมันพืชเป็นผลผลิตทางการเกษตรที่สำคัญมากประการหนึ่ง ซึ่งประเทศไทยผลิตได้ประมาณปีละ 120,000 – 130,000 ตัน [จิราวัลย์ แลบัว] ส่วนปริมาณการผลิตน้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์ทั่วโลก หากนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนในเครื่องยนต์ดีเซลจะทำให้ได้พลังงานหมุนเวียน (Renewable) และเป็นแนวทางแก้ไขปัญหาน้ำมันปิโตรเลียมที่นับวันจะลดน้อยลงไปด้วย แม้ว่าความต้องการบริโภคน้ำมันพืชภายในประเทศจะตกอยู่ราวปีละ 160,000 – 180,000 ตัน [จิราวัลย์ แลบัว] ทำให้ต้องมีการตั้งน้ำมันพืชสำเร็จรูปจากต่างประเทศเข้ามาบริโภคทั้งในรูปเมล็ดพืชและน้ำมันดิบ แต่การนำน้ำมันพืชมาใช้เป็นเชื้อเพลิงจะทำให้แหล่งเชื้อเพลิงดีเซลกว้างขึ้น รวมทั้งสามารถเลือกใช้ชนิดของน้ำมันพืช หรือแม้แต่ส่วนผสมในเครื่องยนต์ดีเซลได้อย่างไม่จำกัด โดยกำหนดคุณภาพการจุดระเบิดตามที่ต้องการ ในฤดูที่พืชน้ำมันออกสู่ตลาดมากสามารถนำส่วนเกินนั้นมาใช้เป็นเชื้อเพลิงดีเซลได้ เป็นการช่วยให้ราคาน้ำมันและน้ำมันพืชมีเสถียรภาพมากขึ้น นอกจากนี้พืชน้ำมันบางชนิดที่ไม่สามารถบริโภคได้ยังสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงดีเซลได้จึงเป็นการเปิดโอกาสให้แก่เกษตรกรในการพัฒนาพืชน้ำมันมากยิ่งขึ้น

น้ำมันมะพร้าว ถั่วลิสง สนุ่นดำ ปาล์ม ฯลฯ สามารถนำมาใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลได้ดี แต่ลินซีด เมล็ดยางพารา เมล็ดทานตะวัน เมื่อนำมาใช้ในเครื่องยนต์ดีเซล จะเกิดปัญหาเขม่าและกัม (Gum) เหนียวเกาะติดกระบอกและเสื่อสูบ เพราะน้ำมันนั้นมีความหนืดสูงมาก สถาบันวิจัย Alberta (Alberta Research Council) และคณะของ T.A. Tahir พบว่าน้ำมันทานตะวันมีความหนืดสูงกว่าน้ำมันดีเซลเป็น 14 เท่าที่อุณหภูมิ 37.78°C นอกจากนี้ K.J. Harrington พบว่าความหนืดจะมากขึ้นถ้าถูกโซ่คาร์บอนมากขึ้น และจะลดลงถ้ากรดไขมันมีความไม่อิ่มตัวมากขึ้น จึงไม่เหมาะที่จะนำน้ำมันเหล่านี้มาใช้เป็นเชื้อเพลิง น้ำมันต่างๆทั้งที่ใช้ได้และใช้ไม่ได้กับเครื่องยนต์ดีเซลนั้นต่างก็เป็นไฮดรอกซีไฮโดรคาร์บอน แต่องค์ประกอบของกรดไขมันแตกต่างกัน หากคัดแปลงโครงสร้างของกรดไขมันให้เหมาะสมกับการจุดระเบิดในเครื่องยนต์ดีเซลจะสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนได้อย่างดี เช่น

การเปลี่ยนจากน้ำมันพืชเป็นเมทิลเอสเทอร์ สามารถลดปัญหาความหนืดของน้ำมันได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภารกิจงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## น้ำมันพืชและการนำไปใช้ในอุตสาหกรรม

เนื่องจากน้ำมันพืชมีอยู่มากมายหลายชนิด แต่ละชนิดก็มีองค์ประกอบแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับปริมาณของกรดไขมัน และฤดูกาล ดังนั้นการนำน้ำมันพืชไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ จึงขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน เช่น

### น้ำมันมะพร้าว

- ใช้เป็นวัตถุดิบในโรงงานนมข้นหวาน ไอศกรีม เนย รวมทั้งสบู่

### น้ำมันปาล์ม

- ใช้เป็นวัตถุดิบในโรงงานอุตสาหกรรมเนยจากพืช หรือมาการีน (Margarine) ไขมันแข็ง
- อุตสาหกรรมผลิตอาหาร เช่น บะหมี่สำเร็จรูป อุตสาหกรรมสบู่ น้ำมันเครื่อง เครื่องสำอาง ยา และอื่นๆ ส่วนผลพลอยได้จากการสกัดน้ำมันปาล์มยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อีก เช่น ทะลายเปล่า นำไปเผาให้เป็นขี้เถ้าใช้เป็นปุ๋ย
- กากที่ได้จากการสกัดน้ำมัน ส่วนเนื้อออกสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม
- กากที่ได้จากการสกัดส่วนของเมล็ดใช้เป็นอาหารสัตว์

นอกจากนี้ยังสามารถใช้น้ำมันปาล์มเป็นส่วนผสมของน้ำมันเครื่อง น้ำมันหล่อลื่น ยาขัดมัน กรดไขมัน หมักกิมพ์ เคมีภัณฑ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมเหล็ก และ อุตสาหกรรมผลิตยางรถยนต์ ประเภทของน้ำมันปาล์มที่ใช้ในอุตสาหกรรม

น้ำมันปาล์มที่ใช้ในอุตสาหกรรมแต่ละประเภท สามารถจำแนกได้ดังนี้

### น้ำมันปาล์มดิบ (Crude Palm Oil)

- ถ้านำน้ำมันปาล์มดิบมาสกัดจะได้อะไหล่ (Palm Olein) ซึ่งใช้บริโภคได้ ส่วนที่ขุ่นจะเป็นไข (Palm Stearin) ซึ่งจะนำไปทำสบู่ แต่ผู้ผลิตไม่นิยมใช้น้ำมันปาล์มดิบ เนื่องจากมีปัญหาในการสกัดแยกส่วน จึงนิยมที่จะนำเข้าไปในรูปที่สกัดแล้วแทน

### อาร์ ปาล์มมอยล์ หรือ เอ็น ปาล์มมอยล์ (Refined or Neutralized Palm Oil)

- เป็นน้ำมันปาล์มที่ผ่านกรรมวิธีทำให้บริสุทธิ์เพียงขั้นตอนเดียว จึงยังไม่ได้แยกส่วนที่เหลวใสและขุ่นออกจากกัน นิยมใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสบู่ที่มีสีแดงเข้ม

### เอ็น บี ปาล์มมอยล์ หรือ อาร์ บี ปาล์มมอยล์ (Neutralized Bleached Palm Oil or Refined Bleached Palm Oil)

- เป็นน้ำมันที่สกัดและกำจัดกลิ่นแล้ว แต่ยังไม่ได้ออกส่วนที่เหลวใส ผู้ผลิตนิยมนำเข้าน้ำมันชนิดนี้เพราะเสถียรภาพดีเนื่องจากยังไม่ได้ออกให้อยู่ในประเภทน้ำมันสำเร็จรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### น้ำมันเนื้อในเมล็ดปาล์ม (Palm Kernel Oil)

- เป็นน้ำมันที่มีราคาสูงกว่าน้ำมันปาล์มชนิดอื่น นิยมใช้ในอุตสาหกรรมผลิตสบู่

### น้ำมันเนื้อในเมล็ดปาล์มปรุงแต่งชนิดเติมไฮโดรเจน (Palm Kernel Oil Hydrogenated)

- น้ำมันปาล์มชนิดนี้ทำให้แข็งโดยเติมไฮโดรเจน นิยมใช้ในอุตสาหกรรมผลิตช็อกโกแลต

## 1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

1. เรียนรู้ทักษะในการค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลสำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. เพิ่มพูนทักษะในการทำงานในลักษณะงานวิจัย
3. ศึกษาวิธีการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์อย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อเล็ก
4. ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อเล็ก
5. ศึกษาสมบัติเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการทดลอง

## 1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

1. ศึกษาหลักการของเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อเล็ก
2. ศึกษาปัจจัยและสภาวะที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ เช่น อัตราการไหลของสารตั้งต้น อุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยา
3. ทดสอบคุณสมบัติของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบและสร้างเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อและอุปกรณ์อื่นๆที่เกี่ยวข้องในการทดลอง
3. จัดหาวัตถุดิบและสารตั้งต้นและวางแผนออกแบบวิธีการทดลองต่างๆ
4. ทำการทดลองสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์และทดสอบคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้
5. สรุปผลการดำเนินงานและจัดทำปริญญานิพนธ์

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำวิธีการไปประยุกต์ใช้ผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิงได้กับเครื่องยนต์ประเภทดีเซล
2. เป็นการฝึกฝนทักษะในการค้นคว้าหาข้อมูลต่างๆเพื่อประโยชน์ของการทำงานต่อไปในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ช่วยสร้างพื้นฐานในการคิดและการทำงานอย่างเป็นระบบเพื่อประโยชน์ในการประกอบอาชีพภายภาคหน้า
4. ช่วยสร้างพื้นฐานในการเป็นนักวิจัยและเรียนรู้วิธีการวิจัย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

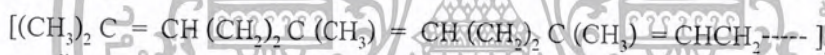
### 2.1 น้ำมันพืชและส่วนประกอบของน้ำมันพืช

น้ำมันพืชเป็นไตรกลีเซอไรด์ ซึ่งมีจุดเดือดและจุดวาบไฟสูง ที่อุณหภูมิสูงๆ จะสลายตัวให้กลีเซอรอล (Glycerol) และ กรดไขมัน (Fatty Acid) กรดไขมันอาจเกิดออกซิเดชัน(Oxidation)หรือถูกไหม้ได้แต่กลีเซอรอลจะไม่เกิด ส่วนค่าความร้อน(Calorific Value)จะเปลี่ยนไปตามจำนวนอะตอมของคาร์บอนและไฮโดรเจนในลูกโซ่คาร์บอน

น้ำมันดิบ (Crude Oil) โดยเฉพาะน้ำมันที่ได้จากเมล็ดพืชจะมีเลซิทิน (Lecthin) เซฟาลิน (Cephalins) และไขมันอื่นๆรวมอยู่ด้วยสำหรับน้ำมันที่สกัดจากถั่วเหลืองหรือข้าวโพดจะมีฟอสฟาไทด์ (Phosphatides) อยู่สูงถึง 2 – 3% นอกจากนี้แล้วในน้ำมันยังมีสเตอรอล (Sterol) อยู่ด้วย ซึ่งทำให้น้ำมันดิบอยู่ในรูปสเตอรอลอิสระซึ่งจะรวมถึงสเตอรอลทั้งหมดที่มีอยู่ในพืชดังตารางที่ 2.1 สเตอรอลที่พบในพืชมากที่สุดคือ ซิโตสเตอรอล (Sitosterol) โดยโครงสร้างต่างๆ แสดงไว้ในรูปที่

2.1

น้ำมันตามธรรมชาติจะมีไฮโดรคาร์บอนปนอยู่ด้วย ไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัวมากที่สุดได้แก่ สควาลีน (Squalenem,  $C_{30}H_{50}$ )

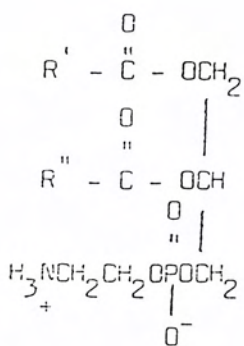


ซึ่งจะพบในน้ำมันตับปลา (Fish Liver Oil) น้ำมันมะกอก (Olive) น้ำมันรำข้าว (Rice Bran Oil) เป็นต้น

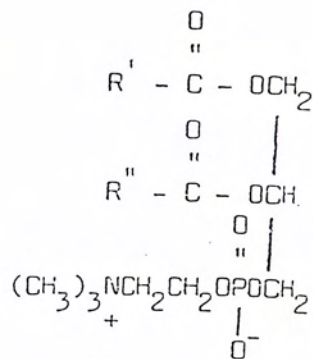
ตารางที่ 2.1 Phytosterol ในน้ำมันพืช

	Mg/100 g
Castor Bean	500
Cocoa butter	185
Coconut	70
Corn	790
Cottonseed	285.60
Olive	171.85
Peanut	212.63
Seasame	520
Soybean	268.33
Wheat Germ	3600 - 6700

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



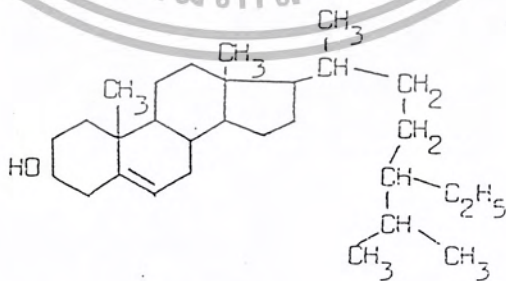
Phosphatidylethanolamine  
(Cephalin)



Phosphatidylcholine  
(Lecithin)



Cholesterol, A Common Animal Steroid



Sitosterol, A Common Plant Steroid

**รูปที่ 2.1** สูตรโครงสร้างของ Cephalin, Lecithin, Fat (Triglyceride), Cholesterol และ Sitosterol

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.1 กรดไขมัน (Fatty Acid)

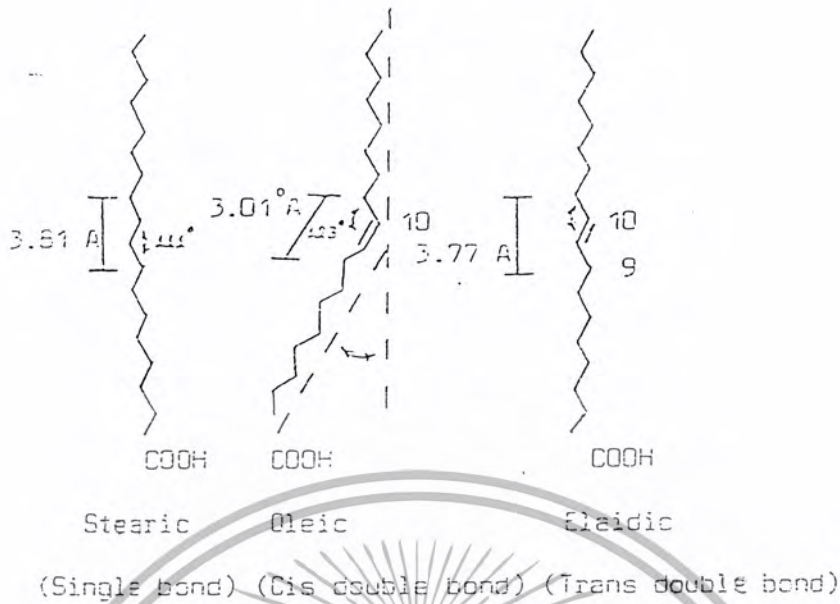
กรดไขมันเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของไขมันเกือบทุกชนิดกรดไขมันประกอบด้วยคาร์บอนไฮโดรเจนและออกซิเจนโดยอะตอมของคาร์บอนจะเรียงต่อกันเป็นลูกโซ่ที่มีความยาวแตกต่างกันที่ปลายข้างหนึ่งของลูกโซ่คาร์บอนจะมีหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl Group, -COOH) ซึ่งจะแตกตัวที่ค่า  $pK_a = 4.8$  จึงทำให้ปลายดังกล่าวมีคุณสมบัติเป็นกรด



กรดไขมันที่พบในธรรมชาติส่วนมากจะมีอะตอมคาร์บอนเป็นเลขคู่ อยู่ในช่วง 4 – 30 อะตอม โดยชนิดที่มีคาร์บอน 16 – 18 อะตอมจะพบมากที่สุด กรดไขมันชนิดอิ่มตัวที่พบมากที่สุดคือ กรดปาล์มิติก (Palmitic Acid) และ กรดสเตียริก (Stearic Acid) ส่วนชนิดไม่อิ่มตัวที่พบมากที่สุดคือ กรดโอเลอิก (Oleic Acid)



กรดไขมันบางชนิดมีพันธะเดี่ยว (อิ่มตัว) บางชนิดมีพันธะคู่ (ไม่อิ่มตัว) พันธะคู่ที่มีในกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว ส่วนมากจะอยู่ในรูป Cis และพบบ้างเล็กน้อยในรูป Trans โครงสร้างของ Cis - isomer จะหักเหจากแนวเส้นตรงประมาณ  $30^\circ\text{C}$  และหดสั้นลง ส่วน Trans - isomer จะอยู่ในแนวเส้นตรงและไม่หดสั้น ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของกรดไขมันอิ่มตัวที่ไม่มีพันธะคู่ และมีพันธะคู่แบบซิส และแบบทรานส์ โมเลกุลทั้งสามมีจำนวนคาร์บอนเท่ากัน [สิรินทร์ และคณะ 2523]

กรดไขมันแต่ละชนิดจะต่างกันที่ความยาวโมเลกุล จำนวนและตำแหน่งของพันธะคู่ กรดไขมันในสัตว์มีโครงสร้างเป็นเส้นตรง และอาจมีพันธะคู่มากถึง 6 คู่ กรดไขมันในแบคทีเรียมีทั้งที่อยู่ในสภาพอิ่มตัว แดกแขนง (Branch Chain) โมโนอีนอิก (Monoenoic) และอยู่เป็นวงแหวนสามเหลี่ยม (Cyclopropane Ring) เช่น กรดแลคโตบาซิลลิก (Lactobacillic Acid) ส่วนกรดไขมันในพืชอาจพบพันธะอะเซทิลีนิก (Acetylenic Bond) อีพอกซี (Epoxy) ไฮดรอกซี (Hydroxy) และหมู่คีโต (Keto Group) หรือวงแหวนสามเหลี่ยม (Cyclopropane Ring)

### 2.1.2 คุณสมบัติทางเคมีของกรดไขมัน

คุณสมบัติทางเคมีของกรดไขมันจะเกิดจากหมู่คาร์บอกซิลและลักษณะของลูกโซ่คาร์บอน กรดไขมันในธรรมชาติส่วนมากมักจะเป็นเอสเทอร์ของกลีเซอรอล เช่น ไตรเอซิลกลีเซอรอล และฟอสโฟไลบิค เป็นต้น

พันธะเอสเทอร์ (Ester Linkage) ในไตรกลีเซอไรด์จะสลายตัวในกรดหรือด่างได้ง่าย ถ้าสลายตัวในกรดปฏิกิริยาอาจผันกลับได้ แต่ถ้าสลายตัวในด่างจะไม่เกิดการผันกลับ เพราะถ้ามีด่างจะทำให้กรดที่มีอยู่แตกตัวเป็นอออนลบ และมีแนวโน้มจะไม่ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ ถ้าสลายตัวโดยใช้กรดระบบจะผันกลับทุกชั้นตอนแล้วเข้าสู่สภาวะสมดุลในที่สุด ขบวนการสะพอนนิฟิเคชันมักใช้ด่างแก่เพื่อสลายพันธะเอสเทอร์ในไขมันธรรมชาติและไขมันประกอบ

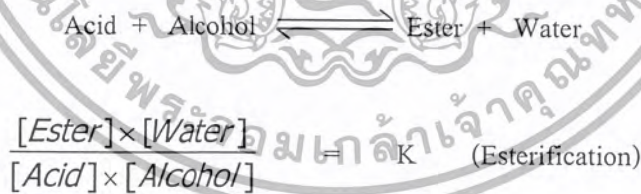
กรดไขมันสามารถเปลี่ยนเป็นเกลือ โซเดียม โปตัสเซียม (หรือสบู่) ได้โดยใช้ KOH, NaOH ทำปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) และกรดไขมันสามารถทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ได้สารจำพวกเอสเทอร์ เช่น ถ้าทำปฏิกิริยากับกลีเซอรอลจะได้ไตรกลีเซอไรด์ หรือถ้าทำปฏิกิริยากับโคเลสเตอรอล จะได้เอสเทอร์ของโคเลสเตอรอล นอกจากนั้นหมู่คาร์บอกซิลในกรดไขมันอาจเปลี่ยนเป็นหมู่ CHO, CH<sub>2</sub>OH หรือ CH<sub>3</sub> ได้ พันธะคู่ส่วนที่เหลือในโมเลกุลของกรดไขมันอาจถูกรีดิวซ์ (เติมไฮโดรเจน) หรือถูกออกซิไดส์ (เติมออกซิเจน) ได้กรดไขมันที่มีพันธะคู่สามารถทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนได้โดยมีโลหะ เช่น ทองคำขาว (Platinum) พาลลาเดียม (Palladium) นิกเกิล และทองแดงเป็นตัวเร่งให้เป็นกรดไขมันที่มีแต่พันธะเดี่ยว (Hydrogenation Reaction) วิธีนี้เป็นวิธีที่สำคัญในการหาปริมาณพันธะคู่ในกรดไขมัน หรือในไตรกลีเซอไรด์ เนื่องจากไขมันพืชส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปไขมันเหลวหรือน้ำมัน การเติมไฮโดรเจนเพื่อให้ได้ไขมันแข็งตัวและไม่เหม็นหืนง่าย กรดไขมันที่มีพันธะคู่มักจะถูกออกซิไดส์ ในอากาศได้ง่าย จึงทำให้เหม็นหืน

## 2.2 ปฏิกิริยาในกรดไขมัน

### 2.2.1 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (Esterification Reaction)

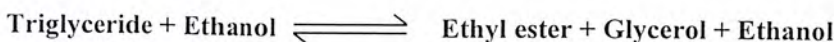
เป็นปฏิกิริยาที่สำคัญปฏิกิริยาหนึ่งของหมู่คาร์บอกซิล ปฏิกิริยาเกิดจากกรดไขมันเข้าไปทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ ได้เป็นเอสเทอร์และน้ำ

ปฏิกิริยาจะเกิดได้ดีเมื่อใช้ความร้อน ไฮโดรเจนไอออน หรือใช้ทั้งสองอย่างเป็นตัวเร่ง ส่วนกลับของปฏิกิริยานี้ ได้แก่ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ที่สภาวะสมดุลจะได้ค่าคงที่ของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารเริ่มต้นและผลิตภัณฑ์ ดังนี้



### 2.2.2 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification)

ปฏิกิริยาการสลายโดยใช้แอลกอฮอล์ (Alcoholysis) เป็นปฏิกิริยาที่เปลี่ยนจากเอสเทอร์ของกรดอินทรีย์ตัวหนึ่งไปเป็นเอสเทอร์อีกตัวหนึ่งที่มีกรดเป็นตัวเดียวกัน(เปลี่ยน Alkyl Group) เช่น ต้องการทรานส์เอสเทอร์ไฟด์ (Transesterified) น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันทานตะวัน ซึ่งเป็นไตรกลีเซอไรด์ โดยใช้เอทานอล ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นดังนี้



ปฏิกิริยาดังกล่าว มักอธิบายในทอมนการเติมแอลกอฮอล์ เช่น ปฏิกิริยา Methanolysis Glycerolysis เป็นต้น

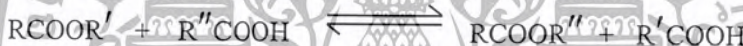
### 2.2.3 ปฏิกิริยา Acidolysis

เป็นปฏิกิริยาที่มีการแทนที่หรือเปลี่ยนหมู่ เอซิล ( Acyl Group ) ของเอสเทอร์ไปเป็น เอสเทอร์และกรด ดังสมการ



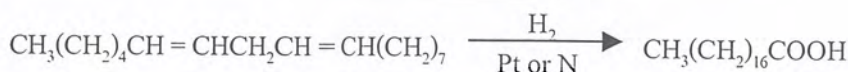
### 2.2.4 ปฏิกิริยา Interesterification

Ester Interchange เป็นปฏิกิริยาที่มีการเปลี่ยน Acyl Group และ Alkyl Group ระหว่าง เอสเทอร์ 2 ตัว ดังสมการ



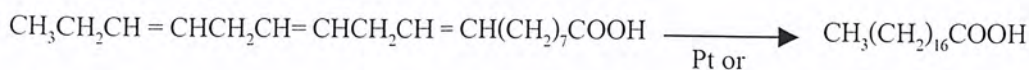
### 2.2.5 ปฏิกิริยาของพันธะคู่ (Double Bond)

เกิดจากการเติมไฮโดรเจนหรือฮาโลเจน (Halogen) ลงในปฏิกิริยาหรือเกิดการออกซิเดชันของตัวนำปฏิกิริยา (Reagent) ต่างๆ กรดไขมันไม่อิ่มตัวหรือเอสเทอร์ของกรดไขมันไม่อิ่มตัวจะถูกไฮโดรจีเนต (Hydrogenate) ด้วยก๊าซไฮโดรเจน โดยมีแพลตตินัม (Platinum) พัลลาเดียม (Palladium) หรือนิกเกิล (Active Nickel) เป็นตัวเร่ง ถ้ากรดลิโนเลอิก (Linoleic) และกรดลิโนเลนิก (Linolenic) เกิดไฮโดรเนชัน (Hydrogenation) จะเปลี่ยนไปเป็นกรดสเตียริก ดังสมการ



Linoleic Acid

Stearic Acid



Linolenic Acid

Stearic Acid

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3 การเตรียมเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันพืช

เนื่องจากน้ำมันพืชเป็นเอสเทอร์ของกลีเซอรอล ดังนั้นการเตรียมเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันพืชจึงเป็นการเปลี่ยนจากเอสเทอร์ของกลีเซอรอลไปเป็นเมทิลเอสเทอร์ที่มีกรดเป็นตัวเดียวกัน โดยมีกรดต่าง โลหะอัลคอกไซด์ (Metal Alkoxide) รวมทั้งความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวเรียกว่า ปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) การเตรียมเมทิลเอสเทอร์จะใช้น้ำมันพืชซึ่งเป็นไตรกลีเซอไรด์ทำปฏิกิริยากับเมทานอลโดยใช้ตัวเร่งชนิดต่างๆ ผลของปฏิกิริยาจะได้เป็นเมทิลเอสเทอร์ และกลีเซอรอล ดังสมการ



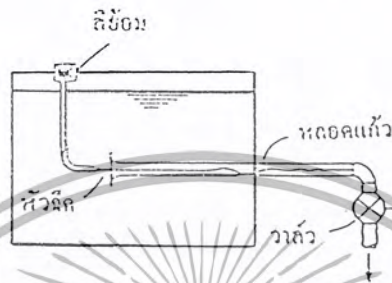
นอกจากตัวเร่งจะช่วยทำให้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเกิดได้ดีแล้วการใส่เมทิลแอลกอฮอล์ให้มากเกินไปจะทำให้สลายพันธะระหว่างกลีเซอรอล กับกรดไขมันได้มากขึ้น แต่ปริมาณแอลกอฮอล์ที่มากเกินไปนี้ทำให้ต้องใช้พลังงานในการแยกผลิตภัณฑ์ที่เพิ่มขึ้นจากเดิม นอกจากนี้แล้วเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยายังขึ้นอยู่กับปริมาณแอลกอฮอล์ที่มากเกินไป ตัวเร่งที่ใช้ รวมทั้งอุณหภูมิด้วย



### บทที่ 3

#### การไหลภายในท่อ

จากการศึกษาถึงปรากฏการณ์การไหลภายในท่อ โดยการทดลองของ Osborn Reynolds ซึ่งใช้เครื่องมือดังรูปที่ 3.1 [Massey, n.d.]

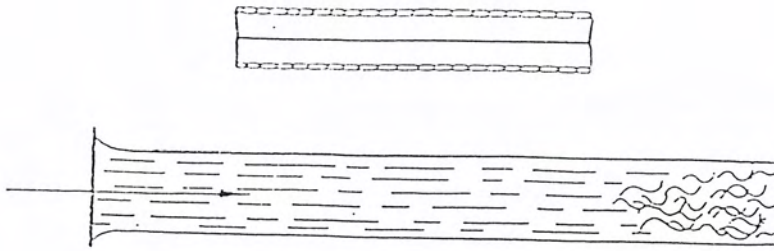


รูปที่ 3.1 อุปกรณ์การทดลองของเรย์โนลด์

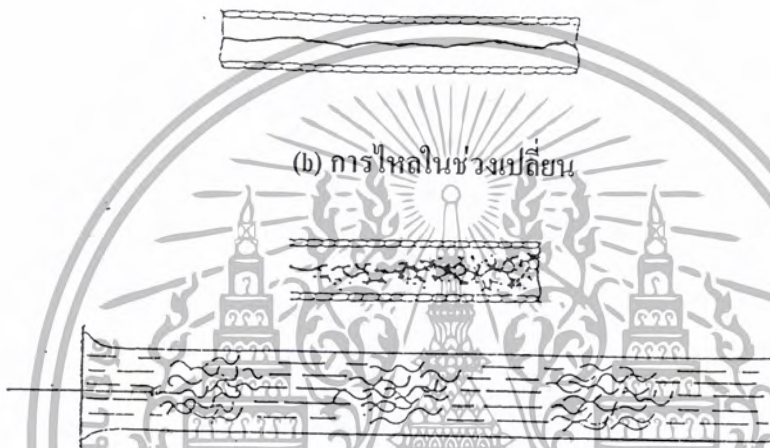
เมื่อพิจารณาความผันผวนที่เกิดขึ้นภายในท่อที่อัตราไหลของของไหลต่างๆพบว่าเมื่อของไหลมีอัตราไหลต่ำค่าความผันผวนจะแปรผันโดยตรงกับอัตราไหลยกกำลังหนึ่งกล่าวคือ สัมพันธ์กับอัตราไหลเป็นแบบเส้นตรง และเมื่อทำการเพิ่มอัตราไหลขึ้นเรื่อยๆ พบว่าความผันผวนที่เกิดขึ้นจะสัมพันธ์กับอัตราไหลแบบไม่เป็นเส้นตรง

เมื่อทำการศึกษาต่อไปโดยทำการฉีดสีข้อมเข้าสู่ของไหล ที่ไหลภายในท่อด้วยสภาวะคงตัว พบที่ว่าอัตราไหลของของไหลต่ำๆ คือในช่วงที่มีความสัมพันธ์กับค่าความผันผวนเป็นแบบเส้นตรงนั้น สีข้อมที่ฉีดลงไป จะมีลักษณะราบเรียบ และเป็นเส้นเรียวยาว แต่เมื่อเคลื่อนที่ต่อไปอีกสีข้อมจะเกิดการกระจายตัวออก เรียกลักษณะการไหลแบบนี้ว่า การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) ดังรูปที่ 3.2 (a) เมื่ออัตราไหลเพิ่มขึ้นจนถึงค่าหนึ่งซึ่งลักษณะของสีข้อมที่ฉีดเข้าสู่กระแสการไหลจะเริ่มแกว่ง อนุภาคของของไหลเริ่มเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบมากขึ้นจนกระทั่งลักษณะของสีข้อมไม่เป็นเส้นตรงอีกต่อไป เรียกการไหลช่วงนี้ว่า การไหลในช่วงเปลี่ยน (Transition flow) ดังรูปที่ 3.2 (b) และเมื่ออัตราไหลของของไหลเพิ่มมากขึ้นจนเลยช่วงเปลี่ยนหรือในช่วงที่อัตราการไหลมีความสัมพันธ์กับค่าความผันผวนแบบไม่เป็นเส้นตรง ลักษณะของสีข้อมที่ฉีดลงไปจะกระจายตัวออก การไหลของของไหลไม่สม่ำเสมอ อนุภาคของของไหลจะเคลื่อนที่ไปได้ระยะทางสั้นๆ และชนกับอนุภาคอื่นๆอย่างไร้เสถียรภาพ ทำให้เกิดการผสมกันจนกระจายเต็มท่อ เรียกลักษณะการไหลแบบนี้ว่า การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ดังรูปที่ 3.2 (c) [Massey, n.d.; de Nevers, 1991]

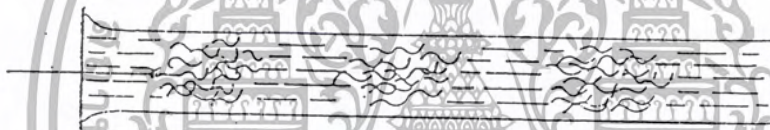
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) การไหลแบบราบเรียบ



(b) การไหลในช่วงเปลี่ยน



(c) การไหลแบบปั่นป่วน

รูปที่ 3.2 การไหลลักษณะต่างๆ

เมื่อทำการจัดกลุ่มตัวแปรให้อยู่ในเทอมไร้นิ้วนัย เพื่ออธิบายถึงลักษณะของการไหล จะได้ว่า

$$N_{Re} = \frac{D\bar{V}\rho}{\mu} \quad (3.1)$$

โดย  $N_{Re}$  = ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์

จากสมการที่ 3.1 ตัวแปรในเทอมเศษ ( $\rho\bar{V}^2$ ) แสดงถึงค่าโมเมนตัมฟลักซ์ ของความเฉื่อย ซึ่งเป็นผลจากการเคลื่อนที่ของของไหลภายในท่อในทิศทางานกับแกนท่อ หรือในทิศทางไหลของของไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวแปรในเทอมส่วน ( $\mu V/D$ ) แสดงถึง ค่าโมเมนต์พลิกซิ่งของความหนืดซึ่งจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความเค้นเฉือนจากความหนืดที่มีทิศในแนวรัศมีของท่อโดยจะแสดงถึงการกระทำระหว่างโมเมนต์ และแรงที่จะเหนี่ยวนำอนุภาคให้เกิดการเคลื่อนที่แบบไร้เสถียรภาพจากการศึกษาทฤษฎีของไหลหลายๆ ชนิด สามารถสรุปได้ว่า

1. การไหลแบบราบเรียบจะเกิดขึ้นเมื่อมีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่ำ คือมีค่าน้อยกว่า 2100 ซึ่งในช่วงนี้จะมีผลของจากแรงหนืดอย่างมาก
2. การไหลในช่วงเปลี่ยนจะเกิดขึ้นเมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่าระหว่าง 2100 ถึง 4000
3. การไหลแบบปั่นป่วนจะเกิดขึ้นเมื่อมีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์สูง คือ มีค่ามากกว่า 4000 ซึ่งในช่วงนี้จะมีผลของความเฉื่อยในการเหนี่ยวนำอนุภาคให้เกิดเคลื่อนที่ไปตามแนวแกนของท่อมากกว่าการเคลื่อนที่ในแนวรัศมี โดยสภาวะการไหลจะถูกกำหนดด้วยค่าความหนาแน่นของของไหล และไม่ขึ้นกับค่าความหนืดของของไหล โดยเฉพาะที่ระดับของการปั่นป่วนมีค่ามากๆ คือ มีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์สูงมากๆ นั่นเอง

### 3.1 สมการแสดงความสัมพันธ์ของการไหลภายในท่อ

ในกรณีที่ลักษณะการไหลของของไหลมีสถานะคงตัว และพัฒนาเต็มที่แล้ว (Fully developed) มักจะจัดรูปของสมการสมดุลมวลสาร สมดุลพลังงาน และสมการโมเมนต์ ให้อยู่ในรูปแบบที่สะดวกต่อการนำไปใช้งาน ดังนี้

#### 3.1.1 สมการสมดุลมวลสาร

พิจารณารูปที่ 3.3 [Douglas, Gasiored, and Swaffiels, 1993]



รูปที่ 3.3 ความต่อเนื่องของการไหล

สามารถเขียนสมการสมดุลมวลสารภายในปริมาตรที่กำหนดดังรูปที่ ได้ดังนี้

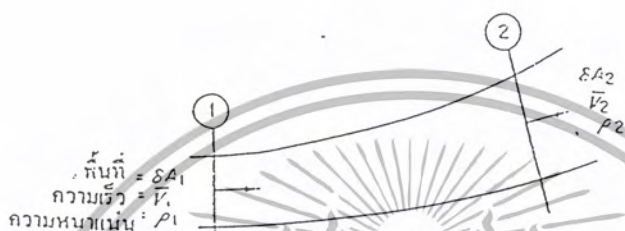
$$\begin{array}{l} \text{มวลของของไหลที่เข้า} \\ \text{ต่อหน่วยเวลา} \end{array} = \begin{array}{l} \text{มวลของของไหลที่ออก} \\ \text{ต่อหน่วยเวลา} \end{array} + \begin{array}{l} \text{มวลที่สะสม} \\ \text{ต่อหน่วยเวลา} \end{array} \quad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่สภาวะคงตัว มวลของของไหลในปริมาตรที่กำหนดดังรูปที่มีค่าคงที่จะได้ว่า

$$\frac{\text{มวลของของไหลที่เข้า}}{\text{ต่อหน่วยเวลา}} = \frac{\text{มวลของของไหลที่ออก}}{\text{ต่อหน่วยเวลา}} \quad (3.3)$$

พิจารณาแบบดังรูปที่ 3.4 [Douglas, Gasiored, and Swaffiels, 1993]



รูปที่ 3.4 การไหลแบบต่อเนื่องผ่านท่อกระแส (Stream tube)

$$\text{มวลของของไหลที่เข้า (ณ ตำแหน่ง 1) ต่อหน่วยเวลา} = \rho_1 \sigma A_1 \bar{V}_1$$

$$\text{มวลของของไหลที่เข้า (ณ ตำแหน่ง 2) ต่อหน่วยเวลา} = \rho_2 \sigma A_2 \bar{V}_2$$

ณ สภาวะการไหลคงตัวจะได้ว่า

$$\rho_1 \sigma A_1 \bar{V}_1 = \rho_2 \sigma A_2 \bar{V}_2 = \text{ค่าคงที่} \quad (3.4)$$

ถ้าความเร็ว ณ ตำแหน่ง 1 และ 2 เป็นค่าคงที่สามารถเขียนสมการได้ว่า

$$\rho_1 \sigma A_1 \bar{V}_1 = \rho_2 \sigma A_2 \bar{V}_2 = m \quad (3.5)$$

ถ้าของไหลที่ใช้เป็นของไหลอัดตัวไม่ได้ ค่าความหนาแน่นจะเป็นค่าคงที่ ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการความต่อเนื่อง ได้ดังนี้

$$A_1 \bar{V}_1 = A_2 \bar{V}_2 \quad (3.6)$$

และสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการไหล และความเร็วของของไหล ดังนี้

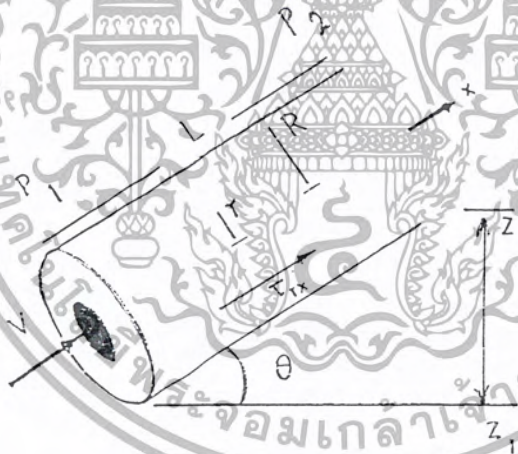
$$\begin{aligned}
 Q &= \int_A \bar{V}_x dA \\
 &= \pi \int_0^R 2r \bar{V}_x dr \\
 &= \pi \int_A \bar{V}_x d(r^2)
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

อินทิเกรตโดยวิธีแยกส่วน (Integrate by part) จะได้

$$Q = -\pi \int_0^R r^2 d\bar{V}_x = -\pi \int_0^R r^2 \frac{d\bar{V}_x}{dr} dr \tag{3.8}$$

### 3.1.2 สมการสมดุลพลังงาน

พิจารณาท่อทรงกระบอก ความยาว  $L$  รัศมี  $R$  จะมีลักษณะเอียงทำมุม  $\theta$  กับแนวระดับ ดังรูปที่ 3.5 [Douglas, Gasiored, and Swaffiels, 1993]



รูปที่ 3.5 การไหลในท่อ

จากรูปสามารถจัดรูปสมการสมดุลพลังงาน ได้ดังนี้

$$\frac{1}{2\alpha} (\bar{V}_2^2 - \bar{V}_1^2) + g(z_2 - z_1) + \frac{(P_2 - P_1)}{\rho} + \Sigma F + W_s = 0 \tag{3.9}$$

เมื่อ  $\Sigma F$  = ผลรวมของความสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบ ซึ่งมีค่าดังนี้

$$\Sigma F = 4f \frac{\Delta L}{D} \frac{\bar{V}^2}{2} + K_{ex} \frac{\bar{V}_1^2}{2} + K_c \frac{\bar{V}_2^2}{2} + K_f \frac{\bar{V}_1^2}{2} \tag{3.10}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียกสมการ (3.9) ว่า สมการประยุกต์ของ Bernoulli [de Nevers, 1991]

### 3.1.3 สมการสมดุลโมเมนต์

พิจารณาปริมาตรของของไหลในท่อความยาว  $L$  รัศมี  $R$  ดังรูปที่ 3.5 ณ ตำแหน่งกลางท่อ สามารถเขียนสมการสมดุลโมเมนต์ได้ดังนี้

$$\Sigma F = (P_1 - P_2) \pi r^2 - \pi r^2 L g \sin \theta + 2\pi r^L \tau_{rx} \quad (3.11)$$

โดย 
$$\tau_{rx} = \frac{\Delta \phi}{2L} = -\tau_{rx} \frac{r}{R} \quad (3.12)$$

$$\Delta \phi = \Delta P + \rho g z = \Delta P + \rho g L \sin \theta$$

$$\tau_{rx} = \text{แรงกระทำของของไหลต่อผนังท่อในทิศ +x}$$

จากสมการ (8) จะเห็นว่า  $\tau_{rx}$  มีค่าเป็นลบ เนื่องจากความเค้นเนื่องแรงเฉือน (Shear stress) เกิดในทิศ -x

### 3.2 การไหลแบบปั่นป่วน

พิจารณาการไหลในท่อซึ่งมีลักษณะสมมาตร ความเร็วของของไหลจะมีค่าเพิ่มจากศูนย์ที่บริเวณผนังท่อ จนมีค่ามากที่สุดบริเวณกลางท่อ ขอบเขตหรือชั้นของการไหลในท่อซึ่งเป็นบริเวณที่ความเร็วของของไหลมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามระยะห่างจากผนังท่อ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 เรียกว่า ชั้นขอบเขต (Boundary layer) [Darby Ron, 1996]



รูปที่ 3.6 ชั้นขอบเขต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.1 ชั้นขอบเขต

จากคุณลักษณะของของไหล 2 ข้อ คือ

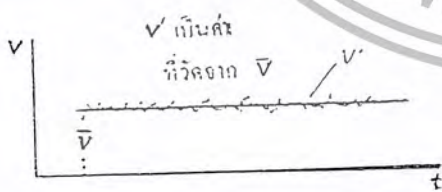
1. ความเร็วของของไหลเป็นไปอย่างต่อเนื่อง
2. ความเร็วบริเวณที่ของไหลสัมผัสกับผนังท่อจะมีค่าเท่ากับศูนย์

จะทำให้เกิดชั้นขอบเขตที่บริเวณติดกับผนังท่อ ซึ่งจะมีผลของความเฉื่อยทำให้ความเร็วมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางจากผนังท่อ โดยความเร็วจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ณ บริเวณนี้ของไหลจะมีการไหลแบบราบเรียบเสมอ เรียกชั้นนี้ว่า ชั้นย่อยลามินาร์ (Laminar sublayer) หรือ นิยมเรียกว่า ชั้นย่อยความหนืด (Viscous sublayer) จากรูปที่ 3.6 สามารถแสดงด้วยสัญลักษณ์  $\delta_L$  สำหรับในกรณีที่มีการไหลภายในท่อเป็นแบบราบเรียบ ( $N_{Re} < 2100$ ) ค่า  $\delta_L$  จะเท่ากับรัศมีของท่อ ( $\delta_L = R$ )

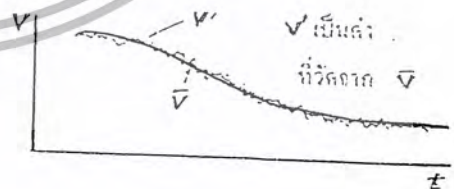
บริเวณที่มีระยะห่างจากผนังท่อ ถัดจากชั้นของ  $\delta_L$  ออกไป ค่าความเร็วของของไหลจะยังคงเปลี่ยนแปลงไปตามระยะห่างจากผนังท่อ ( $y$ ) เรียกว่า ชั้นขอบเขตความปั่นป่วน (Turbulent boundary layer) จากรูป 3.6 แสดงด้วยสัญลักษณ์  $\delta_T$  ส่วนบริเวณที่นอกเหนือจากชั้นนี้ออกไป ความเร็วของของไหลจะมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับระยะห่างจากผนัง ของไหลจะมีการผสมกันอย่างสมบูรณ์ เรียกว่า แกนของความปั่นป่วน (Turbulent core) และที่บริเวณรอยต่อระหว่าง  $\delta_L$  กับ  $\delta_T$  จะค่อยๆ มีการเปลี่ยนแปลง เรียกส่วนนี้ว่า บริเวณบัฟเฟอร์ (Buffer zone)

### 3.2.2 โมเมนต์มฟลักซ์ของความปั่นป่วน (Turbulent momentum flux)

จากลักษณะของการไหลของของเหลวแบบปั่นป่วน ดังรูปที่ 3.7 (a) จะเห็นว่าค่าที่เราวัดได้เป็นค่าความเร็วเฉลี่ยของของไหลซึ่งเขียนแทนด้วย  $\bar{V}$  โดยมีค่าเท่ากับอัตราไหลของของไหลต่อพื้นที่หน้าตัด ( $Q/A$ ) ซึ่งจะมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา แต่ในความเป็นจริงการไหลแบบปั่นป่วนจะมีความเร็วที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ดังรูปที่ 3.7 (b) และมีความเร็วที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเขียนแทนด้วย  $V'$  โดยเป็นค่าที่วัดเบี่ยงเบนไปจากค่าความเร็วเฉลี่ย



(a) การวัดความเร็วในกรณี  
ที่เป็นกรไหลแบบปั่นป่วนคงที่



(b) การวัดความเร็วในกรณี  
ที่เป็นกรไหลแบบปั่นป่วนไม่คงที่

รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของของไหลกับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นในการพิจารณาถึงความเร็วของของไหลในกรณีที่เป็นการไหลแบบปั่นป่วนสามารถอธิบายโดยอาศัยค่าความเร็วโดยตำแหน่ง (Local mean velocity) หรือความเร็วเฉลี่ยตามเวลา (Time average velocity) ซึ่งจะเพิ่มเทอมของการแกว่งที่ขึ้นกับเวลา (Time-dependent fluctuating component) หรือ Turbulent eddy เข้ามาเกี่ยวข้อง

สำหรับการไหลในทิศทางเดียว (One dimensional flow) ซึ่งค่าของความเร็วเฉลี่ยจะมีอยู่เพียงทิศทางเดียว คือ ทิศของการไหล (พิจารณารูป 3.7) แต่จะมีเทอมของ Turbulent eddy ปรากฏอยู่ในทั้ง 3 แกน ดังนั้นจากรูปที่ 3.7 สามารถแสดงเทอมความเร็วตามตำแหน่งได้ดังนี้

$$V_x(y, t) = \bar{V}_x(y) + V'_x(y, t) \quad (3.13)$$

$$V_y(y, t) = 0 + V'_y(y, t) \quad (3.14)$$

$$V_z(y, t) = 0 + V'_z(y, t) \quad (3.15)$$

โดย  $\bar{V}_x$  = Time average velocity

$$\bar{V}_x = \frac{1}{T} \int_0^T V_x dt$$

$$\int_0^T \bar{V}_x dt = 0$$

การเคลื่อนที่ถ่ายเท eddy (Eddy motion momentum transport) ซึ่งขึ้นกับองค์ประกอบของโมเมนตัมฟลักซ์ จะมีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบของความเค้นเฉือน ดังนี้

$$\begin{aligned} \tau'_{xx} &= -\rho(v'_x) & \tau'_{xy} &= -\rho v'_x v'_y & \tau'_{xz} &= -\rho v'_x v'_z \\ \tau'_{yx} &= \tau'_{xy} & \tau'_{yy} &= -\rho(v'_y)^2 & \tau'_{yz} &= -\rho v'_y v'_z \\ \tau'_{zx} &= \tau'_{xz} & \tau'_{zy} &= \tau'_{yz} & \tau'_{zz} &= -\rho(v'_z)^2 \end{aligned} \quad (3.16)$$

เทอมของ Turbulent momentum flux component เหล่านี้ เรียกอีกชื่อว่า ความเค้นของเรย์โนลด์ (Reynolds stress)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ว่าความเค้นรวมสำหรับของไหลแบบนิวโตเนียน ซึ่งมีลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของทั้งความเค้นเนื่องจากความหนืดและความเค้นเนื่องจากความปั่นป่วนได้ดังนี้

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial \bar{V}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{V}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{v'_i v'_j} \quad (3.17)$$

### 3.2.3 ทฤษฎีความยาวของการผสม

เมื่อทำการพิจารณาถึง Turbulent eddy (ซึ่งมีองค์ประกอบในเทอมของ  $V'_x V'_y V'_z$ ) จะพบว่า eddy จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง และหายไปในระหว่างที่กระบวนการดังกล่าวนี้เกิดขึ้นจะมีการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมกันระหว่าง eddy และการไหลเฉลี่ย

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนของของไหลในท่อเรียบ Prandtl ได้ตั้งสมมติฐานว่า

จะได้ว่า

$$\tau'_{yx} = -\rho \overline{v'_x v'_y} \approx -\rho (\overline{v'_x})^2 \quad (3.18)$$

และสมมติว่า eddy ที่เกิดขึ้นในแต่ละทิศนั้น จะเคลื่อนที่ไปเป็นระยะทาง  $l$  ซึ่งเรียกระยะทางนี้ว่า ความยาวของการผสม (Mixing length) ในขณะที่มีการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมระหว่างการไหลเฉลี่ย นั่นคือ

$$\frac{V'_x}{l} \approx \frac{dV_x}{dy} \quad (3.19)$$

$$\tau'_{yx} = \mu \frac{dV_x}{dy} \quad (3.20)$$

เมื่อ  $\mu_c = \rho l^2 \left| \frac{dV_x}{dy} \right|$

เรียก  $\mu_c$  ว่า eddy viscosity

และเนื่องจากการไหลแบบปั่นป่วนในทุกทิศ การเคลื่อนที่จะมีค่าเป็นศูนย์ที่ผนังท่อ Prandtl จึงตั้งสมมติฐานให้ความยาวของการผสมแปรผันกับระยะห่างจากผนังท่อ คือ

$$l = ky \tag{3.21}$$

และสมมติให้ความเค้น eddy มีขนาดเท่ากับ ความเค้นเนื่องจากผนัง นั่นคือ

$$\tau \approx \tau_w \approx (\mu + \mu_e) \frac{d\bar{V}_x}{dy} \tag{3.22}$$

$$\approx \mu_e \left( \frac{\int d\bar{V}_x}{\int dy} \right)$$

$$\tau'_{yx} \approx \tau_w \approx \rho k^2 y^2 \frac{d\bar{V}_x}{dy} \tag{3.23}$$

อินทิเกรตในช่วงของชั้นขอบเขตของความปั่นป่วน (จาก  $y_1$  ถึง  $y$ )

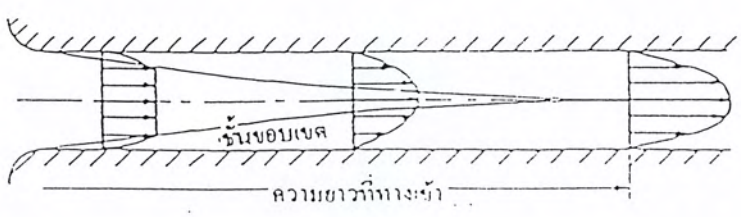
$$\bar{V}_x - \bar{V}_{x1} = \frac{1}{k} \left( \frac{\tau_w}{\rho} \right)^{1/2} \ln \left( \frac{y}{y_1} \right) \tag{3.24}$$

เรียกสมการนี้ว่า Von Karman equation หรือกฎของผนัง (law of the wall) [Darby Ron, 1996] สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเทอมไร้มิติได้ดังนี้

$$V^+ = \frac{1}{K} \ln y^+ + C \tag{3.25}$$

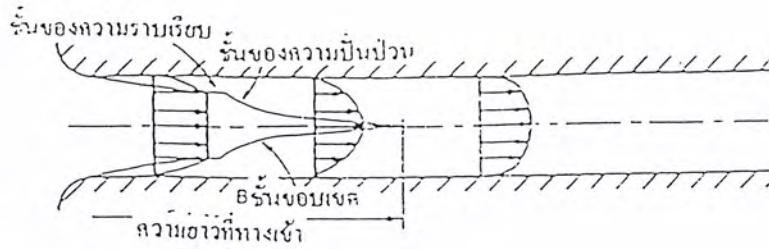
เมื่อ  $V^+ = \frac{\bar{V}_x}{V^*} = \frac{\bar{V}_x}{V^*} \sqrt{\frac{2}{f}}$  (3.26)

### 3.3 ผลของทางเข้า



(a) การไหลแบบราบเรียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b) การไหลแบบปั่นป่วน

รูปที่ 3.8 การพัฒนาของชั้นขอบเขตในท่อ

พิจารณารูปที่ 3.8 อนุภาคของของไหลทั้งหมดยกเว้นที่บริเวณผนังท่อจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่าๆ กัน และเมื่อเคลื่อนที่ผ่านท่อเข้าไปเรื่อยๆ ผลจากแรงเสียดทานที่ผนังจะหน่วงให้ของไหลมีความเร็วช้าลง ทำให้เกิดเป็นชั้นขอบเขตจะมีความหนาเพิ่มขึ้น จนกระทั่งหายไปทีระยะทางหนึ่ง คือเมื่อขยายขนาดไปจนถึงแกนท่อ และเนื่องจากอัตราไหลโดยรวมที่ผ่านเข้าไปในท่อ มีค่าเท่ากับในแต่ละระนาบ ดังนั้นความเร็วของของไหลที่ใกล้ๆ กับแกนท่อจะต้องมีค่าเพิ่มมากขึ้นเพื่อชดเชยกับที่ถูกหน่วงไว้จนกระทั่งลักษณะของโปรไฟล์ของความเร็วมักจะมีลักษณะคงที่

ตามทฤษฎีระยะทางที่เหมาะสมที่ความเร็วมีลักษณะคงที่นั้นจะใช้ระยะทางที่ห่างจากทางเข้าของท่อมาก ดังนั้นจึงนิยมใช้การพิจารณาแบบพัฒนาเต็มที คือเมื่อมีความเร็วที่บริเวณแกนท่อ มีค่าต่างจากความเร็วสุดท้าย (คือระยะทางไกลจากทางเข้าของท่อมากๆ) ประมาณ 1% และระยะทางดังกล่าวนี้ เรียกว่า ความยาวที่ทางเข้า "Entrance length" เขียนแทนด้วย  $L_c$

Langhaar ได้เสนอสมการในประมาณค่า  $L_c$  สำหรับกรไหลแบบราบเรียบไว้ว่า

$$L_c = 0.057 (N_{Rc}) D \quad (3.27)$$

และถ้าค่า  $N_{Rc}$  มีค่า 2100 จะได้ว่า

$$L_c = 114 D \quad (3.28)$$

และสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน ระยะทางที่ความเร็วจะเข้าสู่สภาวะคงที่จะใช้ระยะทางสั้นกว่าในกรณีที่เป็นกรไหลแบบราบเรียบ และพบว่าค่า Entrance length ( $L_c$ ) จะมีค่าขึ้นกับ  $N_{Rc}$  น้อยมากและจะได้ว่า

$$L_c \approx 50D \quad (3.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การทดลอง

#### 4.1 การสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มโดยวิธีแบบกะ(Batch)

##### จุดประสงค์การทดลอง

เพื่อสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์โดยวิธีแบบกะให้ได้ร้อยละของผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์มากที่สุด

##### อุปกรณ์การทดลอง

- บีกเกอร์ 400 มิลลิลิตร
- ฮีตเตอร์และเครื่องกวนแบบแท่งแม่เหล็ก
- แท่งแม่เหล็ก
- เครื่องชั่ง
- กรวยแยกขนาด 500 มิลลิลิตร
- เครื่องไล่ความชื้น
- คอนเดนเซอร์
- Water bath
- ขวดกักกลมขนาด 500 มิลลิลิตร
- เทอร์โมมิเตอร์
- นาฬิกาจับเวลา
- กระจกดวงขนาด 100 มิลลิลิตร

##### สารเคมี

- น้ำมันปาล์มโอเลอิน
- น้ำ
- โซเดียมไฮดรอกไซด์
- เมทานอล 95% โดยปริมาตร

##### วิธีการทดลอง

น้ำมันปาล์มที่ใช้ในการทดลองคือน้ำมันตรา มรกต ที่ผ่านการฟอกขาวและการกำจัดกลิ่นแล้ว เมทานอลที่ใช้มีความเข้มข้น 95% โดยปริมาตร และโซเดียมไฮดรอกไซด์ใช้ 0.5% โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม การทดลองนี้ใช้อัตราส่วนโดยปริมาตรของ น้ำมันปาล์ม : เมทานอล เท่ากับ 5 : 1



### ขั้นตอนการทดลอง

1. นำน้ำมันปาล์มปริมาณ 300 มิลลิลิตรผสมกับเมทานอลปริมาณ 60 มิลลิลิตรในขวดก้นกลมขนาด 500 มิลลิลิตร โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.32 กรัม ให้ความร้อนด้วย Water bath ที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงครึ่ง
2. เมื่อได้ผลิตภัณฑ์ออกมา นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ตั้งทิ้งไว้ให้แยกชั้น จากนั้นแยกกลีเซอรอลออก ทำการล้างเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยน้ำอุ่นอุณหภูมิประมาณ 70°C 5-6 ครั้งเพื่อลดความเป็นด่างและความหนืดของเมทิลเอสเทอร์
3. นำเมทิลเอสเทอร์ที่ได้ไปไล่ความชื้นออกด้วยเครื่องไล่ความชื้นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำเมทิลเอสเทอร์ไปทดสอบคุณสมบัติ

### 4.2 การสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อเล็ก

#### จุดประสงค์การทดลอง

1. ศึกษาวิธีการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ
2. วิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ

#### 4.2.1 การสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อเล็ก (ไม่ได้อุ่นสารตั้งต้นก่อนทำปฏิกิริยา)

#### อุปกรณ์การทดลอง

- ชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อพร้อมปั๊มแบบปรับอัตราไหลได้
- เครื่องให้ความร้อนแบบจุ่มแช่ขนาด 1000 วัตต์
- เครื่องควบคุมอุณหภูมิ
- เครื่องไล่ความชื้น
- เทอร์โมมิเตอร์
- ปีเปต 100 มิลลิลิตร
- บีกเกอร์ 2000 มิลลิลิตร
- บีกเกอร์ 400 มิลลิลิตร
- กระจกตวงขนาด 100 มิลลิลิตร
- กรวยแยกขนาด 500 มิลลิลิตร
- ฮีตเตอร์และเครื่องกวนแบบแท่งแม่เหล็ก
- แท่งแม่เหล็ก
- เครื่องชั่ง

#### นาฬิกาจับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### สารเคมี

- น้ำมันปาล์ม โอเลอิน
- น้ำ
- โซเดียมไฮดรอกไซด์
- เมทานอล 95% โดยปริมาตร

### วิธีการทดลอง

น้ำมันปาล์มที่ใช้ในการทดลองคือน้ำมันตรา มรกต ที่ผ่านการฟอกขาวและการกำจัดกลิ่นแล้ว เมทานอลที่ใช้มีความเข้มข้น 95% โดยปริมาตร และโซเดียมไฮดรอกไซด์ใช้ 0.5% โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม

การทดลองนี้ใช้อัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม : เมทานอล เท่ากับ 5:1 การทดลองแต่ละครั้งใช้น้ำมันปาล์มปริมาณ 1000 มิลลิลิตร และใช้เมทานอลปริมาณ 200 มิลลิลิตร ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่ขดเป็นวง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อ  $\frac{1}{4}$  นิ้ว ความยาวของท่อประมาณ 25 เมตร มีปริมาตรประมาณ 620 มิลลิลิตร โดยบรรจุเครื่องปฏิกรณ์นี้ในถังพลาสติกที่บรรจุน้ำอยู่เต็มเพื่อให้ความร้อนแก่เครื่องปฏิกรณ์ ใช้เครื่องให้ความร้อนแบบจุ่มแช่เป็นตัวให้ความร้อน โดยควบคุมอุณหภูมิของน้ำด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิ

### ขั้นตอนการทดลอง

1. ให้ความร้อนแก่น้ำโดยใช้เครื่องให้ความร้อนแบบจุ่มแช่เพื่อทำให้อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์มีค่าคงที่ที่อุณหภูมิทดลอง
2. ปรับอัตราไหลของน้ำมันปาล์มและอัตราไหลของเมทานอล (ที่ผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์) โดยให้อัตราไหลรวมที่จะเข้าเครื่องปฏิกรณ์ ใช้อัตราไหลรวมที่กำหนดไว้ใน การทดลอง
3. เมื่อได้ผลิตภัณฑ์ออกมา นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ตั้งทิ้งไว้ให้แยกชั้น จากนั้นแยกกลีเซอรอลออก
4. ทำการล้างเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยน้ำอุ่นอุณหภูมิประมาณ 70°C 5-6 ครั้งเพื่อลดความเป็นด่างและความหนืดของเมทิลเอสเทอร์
5. นำเมทิลเอสเทอร์ที่ได้ไปไล่ความชื้นออกด้วยเครื่องไล่ความชื้น เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำเมทิลเอสเทอร์ไปทดสอบคุณสมบัติ
6. การทดลองนี้จะทดลองปรับอัตราไหลรวมของน้ำมันปาล์มและเมทานอลที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ให้มีค่า 20, 40 และ 60 ml/min ตามลำดับและปรับอุณหภูมิของน้ำให้มีค่าคงที่ที่ 60, 70 และ 80°C ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### ตารางที่ 4.1 อัตราไหลของสารตั้งต้นที่ใช้ทดลอง

อัตราไหลรวมของสารตั้งต้น (ml/min)	อัตราไหลของน้ำมันปาล์ม (ml/min)	อัตราไหลของเมทานอล (ml/min)
20	16.67	3.33
40	33.34	6.66
60	50.01	9.99

#### 4.2.2 การสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อเล็ก (อุ่นสารตั้งต้นก่อนทำปฏิกิริยา)

##### อุปกรณ์การทดลอง

- ชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อพร้อมปั๊มแบบปรับอัตราไหลได้
- เครื่องให้ความร้อนแบบจุ่มแท่งขนาด 1000 วัตต์
- เครื่องควบคุมอุณหภูมิ
- เครื่องไล่ความชื้น
- Water bath
- เทอร์โมมิเตอร์
- ปิเปต 100 มิลลิลิตร
- บีกเกอร์ 2000 มิลลิลิตร
- บีกเกอร์ 400 มิลลิลิตร
- กระจกบอดวงขนาด 100 มิลลิลิตร
- กรวยแยกขนาด 500 มิลลิลิตร
- ฮีตเตอร์และเครื่องกวนแบบแท่งแม่เหล็ก
- แท่งแม่เหล็ก
- เครื่องชั่ง
- นาฬิกาจับเวลา

##### สารเคมี

- น้ำมันปาล์ม โอเลอิน
- น้ำ
- โซเดียมไฮดรอกไซด์
- เมทานอล 95% โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## วิธีการทดลอง

น้ำมันปาล์มที่ใช้ในการทดลองคือน้ำมันตรา มรกต ที่ผ่านการฟอกขาวและการกำจัดกลิ่นแล้ว เมทานอลที่ใช้มีความเข้มข้น 95% โดยปริมาตร และโซเดียมไฮดรอกไซด์ใช้ 0.5% โดยน้ำหนักของ น้ำมันปาล์ม

การทดลองนี้ใช้อัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม : เมทานอล เท่ากับ 5:1 การทดลองแต่ละครั้งใช้น้ำมันปาล์มปริมาณ 1000 มิลลิลิตร และใช้เมทานอลปริมาณ 200 มิลลิลิตร แต่จะทำการทดลองอุ่นน้ำมันปาล์มที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C ตามลำดับ และทดลองปรับอัตราไหลของสารตั้งต้นรวม 20 ml/min ก่อนที่จะป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่ขดเป็นวง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อ ¼ นิ้ว ความยาวของท่อประมาณ 25 เมตร มีปริมาตรประมาณ 620 มิลลิลิตร โดยบรรจุเครื่องปฏิกรณ์นี้ในถังพลาสติกที่บรรจุน้ำอยู่เต็ม เพื่อให้ความร้อนแก่เครื่องปฏิกรณ์ ใช้เครื่องให้ความร้อนแบบจุ่มแช่เป็นตัวให้ความร้อนโดยควบคุมอุณหภูมิของน้ำด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิ

### ขั้นตอนการทดลอง

1. ให้ความร้อนแก่น้ำโดยใช้เครื่องให้ความร้อนแบบจุ่มแช่เพื่อทำให้อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์มีค่าคงที่ที่อุณหภูมิทดลอง
2. ให้ความร้อนแก่น้ำมันปาล์ม โดยใช้เครื่อง Water bath เพื่อทำให้อุณหภูมิของน้ำมันปาล์มมีค่าคงที่ที่อุณหภูมิทดลอง
3. ปรับอัตราไหลของน้ำมันปาล์มและอัตราไหลของเมทานอล (ที่ผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์) โดยให้อัตราไหลรวมที่จะเข้าเครื่องปฏิกรณ์ ใช้อัตราไหลรวมที่กำหนดไว้ใน การทดลอง
4. เมื่อได้ผลิตภัณฑ์ออกมา นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ตั้งทิ้งไว้ให้แยกชั้น จากนั้นแยกกลีเซอรอลออก
5. ทำการล้างเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยน้ำอุ่นอุณหภูมิประมาณ 70°C 5-6 ครั้งเพื่อลดความเป็นด่างและความหนืดของเมทิลเอสเทอร์
6. นำเมทิลเอสเทอร์ที่ได้ไปไล่ความชื้นออกด้วยเครื่องไล่ความชื้นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำเมทิลเอสเทอร์ไปทดสอบคุณสมบัติ
7. การทดลองนี้จะทดลองปรับอัตราไหลรวมของน้ำมันปาล์มและเมทานอลที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ให้มีค่า 20 ml/min และปรับอุณหภูมิของน้ำให้มีค่า คงที่ที่ 60, 70 และ 80°C ตามลำดับ

#### 4.3 การวิเคราะห์หาความหนืดของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้

##### จุดประสงค์การทดลอง

เพื่อวิเคราะห์หาความหนืดของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้

##### อุปกรณ์การทดลอง

- บีกเกอร์ 400 มิลลิลิตร
- เครื่องกรองสุญญากาศ
- Saybolt Viscometer
- นาฬิกาจับเวลา
- เทอร์โมมิเตอร์
- กระดาษกรอง
- ขวดวัดปริมาตรขนาด 60 มิลลิลิตร

##### สารเคมี

- เมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้
- เฮกเซน

##### วิธีการทดลอง

1. นำเมทิลเอสเทอร์ที่ได้มาทำการกรองด้วยเครื่องสุญญากาศ
2. นำเมทิลเอสเทอร์ที่ผ่านการกรองแล้วมาวัดความหนืดด้วย Saybolt Viscometer โดยปรับอุณหภูมิให้คงที่ที่  $40^{\circ}\text{C}$  จากนั้นปล่อยให้เมทิลเอสเทอร์ไหลลงขวดวัดปริมาตร 60 มิลลิลิตร และจับเวลา
3. บันทึกเวลาที่ได้จากนั้นนำไปคำนวณหาความหนืดต่อไป

#### 4.4 การวิเคราะห์หาร้อยละของผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้

##### จุดประสงค์การทดลอง

เพื่อวิเคราะห์หาร้อยละของผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้

##### วิธีการทดลอง

1. วิเคราะห์หาร้อยละของผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของผลิตภัณฑ์กับความหนืดของเมทิลเอสเทอร์
2. บันทึกผลการทดลองที่ได้

## บทที่ 5

## ผลการทดลอง

5.1 ผลการทดลองหาความหนืดและร้อยละของผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้แบบกะเมื่อวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองได้ผลดังนี้

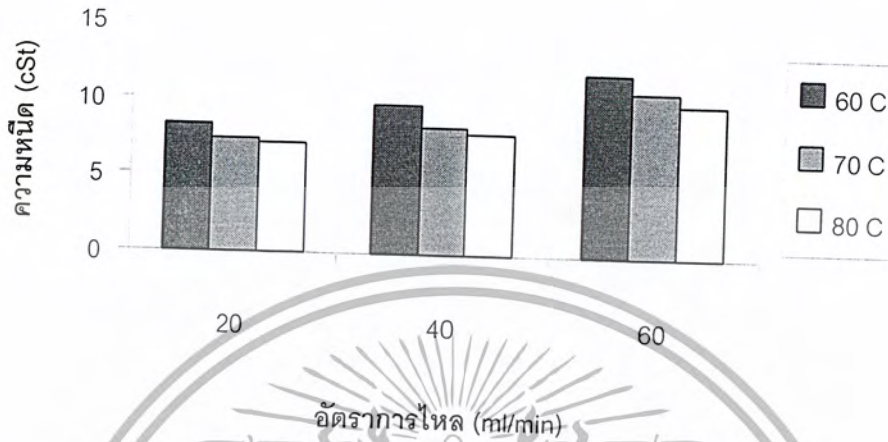
- ความหนืดของเมทิลเอสเทอร์ 4.51 cSt
- ร้อยละของผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ประมาณ 100%

5.2 ผลการทดลองหาความหนืดของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้โดยเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ (ไม่ได้อุ่นสารตั้งต้นก่อนทำปฏิกิริยา)

ทำการวัดความหนืดของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่องมือ Saybolt Viscometer ตั้งอุณหภูมิของเครื่องมือวัดความหนืดให้มีค่าคงที่ที่อุณหภูมิมาตรฐาน 40°C ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ความหนืดของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้(เฉลี่ย)เมื่อไม่ได้อุ่นสารตั้งต้นก่อนทำปฏิกิริยา

อุณหภูมิที่ทำการทดลอง (°C)	อัตราไหลรวม (ml/min)		
	20	40	60
	ความหนืดของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ (cSt)		
60	8.245	9.710	11.850
70	7.425	8.300	10.780
80	7.120	7.840	10.015



รูปที่ 5.1 ความหนืดของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ (เฉลี่ย) ที่อุณหภูมิและอัตราไหลต่างๆ

### 5.3 ผลการทดลองหาความหนืดของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้โดยเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ (อุ่นสารตั้งต้นก่อนทำปฏิกิริยา)

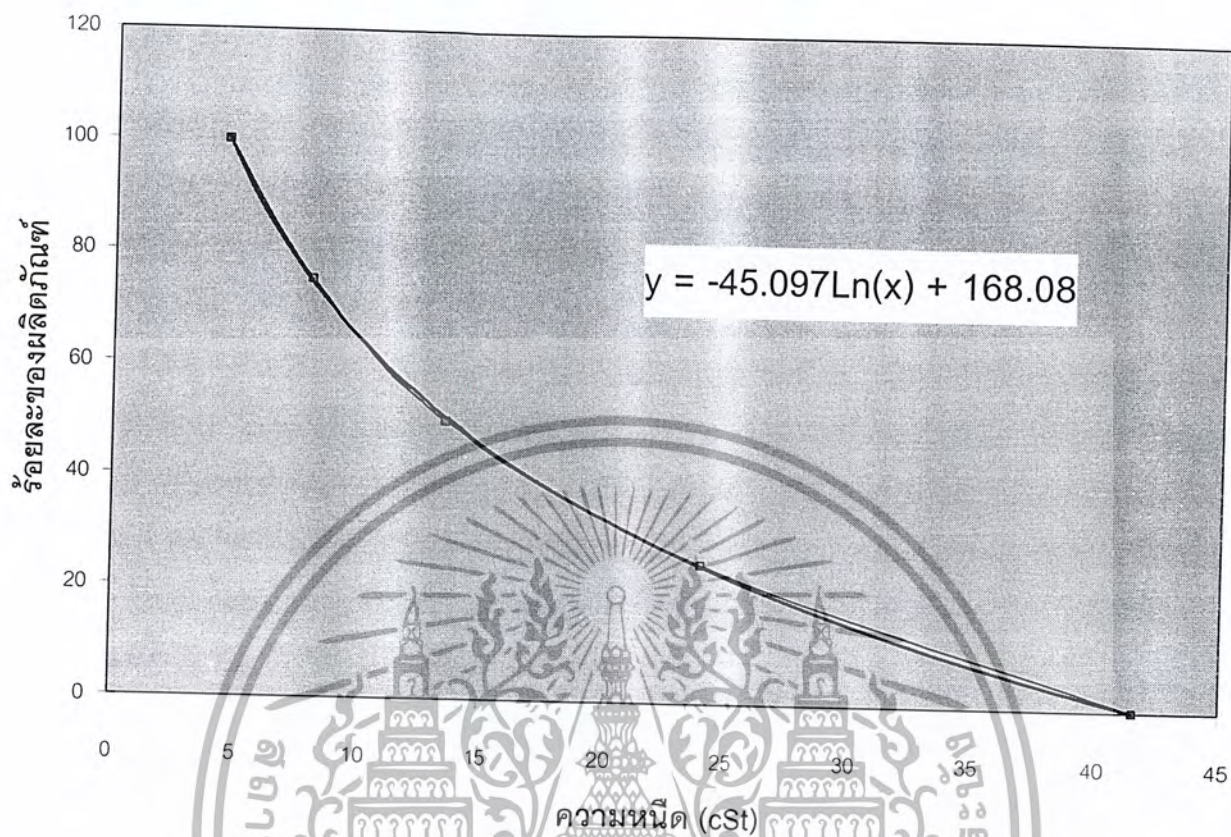
ทำการวัดความหนืดของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่องมือ Saybolt Viscometer ตั้งอุณหภูมิของเครื่องมือวัดความหนืดให้มีค่าคงที่ที่อุณหภูมิมาตรฐาน 40°C ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ความหนืดของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้เมื่ออุ่นสารตั้งต้นก่อนทำปฏิกิริยา

อุณหภูมิที่ทำการทดลอง (°C)	อัตราการไหลรวม 20 ml/min	
	ความหนืดของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ (cSt)	
60	5.58	
70	5.25	
80	4.88	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 5.4 ผลการทดลองหาร้อยละของผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้



รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับร้อยละของผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์

ตารางที่ 5.3 ร้อยละของผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้เมื่อไม่ได้อุ่นสารตั้งต้นก่อนทำปฏิกิริยา

อุณหภูมิที่ทำการทดลอง ( $^{\circ}\text{C}$ )	อัตราไหลรวม (ml/min)		
	20	40	60
	ร้อยละของผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้		
60	72.94	65.57	56.59
70	77.67	72.64	60.85
80	79.56	75.21	64.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.4 ร้อยละของผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้(เฉลี่ย)เมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นก่อนทำ

ปฏิกิริยา

อุณหภูมิที่ทำการทดลอง ( $^{\circ}\text{C}$ )	อัตราไหลรวม 20 ml/min
	ร้อยละของผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้
60	90.5
70	93.3
80	96.6



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### วิจารณ์ผลการทดลอง

1. ผลความหนืดของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้(เฉลี่ย) เมื่อไม่ได้อุ่นสารตั้งต้นก่อนทำปฏิกิริยา (ตารางที่ 5.1)

เมื่อพิจารณาความหนืดของเมทิลเอสเทอร์ที่อุณหภูมิของปฏิกิริยา  $80^{\circ}\text{C}$  และปรับเปลี่ยนอัตราไหลของสารตั้งต้น

- ที่อัตราไหลรวมของสารตั้งต้น 20 ml/min มีค่าเฉลี่ย 7.12 cSt
- ที่อัตราไหลรวมของสารตั้งต้น 40 ml/min มีค่าเฉลี่ย 7.84 cSt
- ที่อัตราไหลรวมของสารตั้งต้น 60 ml/min มีค่าเฉลี่ย 10.015 cSt

จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มอัตราไหล ความหนืดของเมทิลเอสเทอร์มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นเช่นเดียวกับที่อุณหภูมิอื่น

เมื่อพิจารณาความหนืดของเมทิลเอสเทอร์ที่อัตราไหลรวมของสารตั้งต้น 20 ml/min และปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของปฏิกิริยา

- ที่อุณหภูมิ  $60^{\circ}\text{C}$  มีค่าเฉลี่ย 8.245 cSt
- ที่อุณหภูมิ  $70^{\circ}\text{C}$  มีค่าเฉลี่ย 7.425 cSt
- ที่อุณหภูมิ  $80^{\circ}\text{C}$  มีค่าเฉลี่ย 7.120 cSt

จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ความหนืดของเมทิลเอสเทอร์มีค่าลดลง ซึ่งเป็นเช่นเดียวกับที่อัตราไหลอื่น

ผลของร้อยละของผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้(เฉลี่ย) เมื่อไม่ได้อุ่นสารตั้งต้นก่อนทำปฏิกิริยา (ตารางที่ 5.3)

เมื่อพิจารณาร้อยละของผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิของปฏิกิริยา  $80^{\circ}\text{C}$  และปรับเปลี่ยนอัตราไหลของสารตั้งต้น

- ที่อัตราไหลรวมของสารตั้งต้น 20 ml/min มีค่า 79.56 %
- ที่อัตราไหลรวมของสารตั้งต้น 40 ml/min มีค่า 75.21 %
- ที่อัตราไหลรวมของสารตั้งต้น 60 ml/min มีค่า 64.17 %

จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มอัตราไหล ร้อยละของผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้มีค่าลดลง ซึ่งเป็นเช่นเดียวกับที่อุณหภูมิอื่น

เมื่อพิจารณาร้อยละของผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราไหลรวมของสารตั้งต้น 20 ml/min และปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของปฏิกิริยา

- ที่อุณหภูมิ 60°C มีค่า 72.94 %
- ที่อุณหภูมิ 70°C มีค่า 77.67 %
- ที่อุณหภูมิ 80°C มีค่า 79.56 %

จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นเช่นเดียวกับที่อัตราไหลอื่น

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิกความหนืดของเมทิลเอสเทอร์จะลดลง และร้อยละของผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอัตราไหลรวมของสารตั้งต้นความหนืดของเมทิลเอสเทอร์จะเพิ่มขึ้นและร้อยละของผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จะลดลง

## 2. ผลความหนืดของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองเมื่ออุ่นสารตั้งต้นก่อนทำปฏิกิริยา (ตารางที่ 5.2)

เมื่อพิจารณาความหนืดของเมทิลเอสเทอร์ที่อัตราไหลรวมของสารตั้งต้น 20 ml/min และปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของปฏิกิริยา

- ที่อุณหภูมิ 60°C มีค่า 5.58 cSt
- ที่อุณหภูมิ 70°C มีค่า 5.25 cSt
- ที่อุณหภูมิ 80°C มีค่า 4.88 cSt

จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ความหนืดของเมทิลเอสเทอร์ที่อัตราไหลรวมของสารตั้งต้น 20 ml/min มีค่าลดลง

## ผลของร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองเมื่ออุ่นสารตั้งต้นก่อนทำการปฏิกิริยา (ตารางที่ 5.4)

ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราไหลรวมของสารตั้งต้น 20 ml/min และปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของปฏิกิริยา

- ที่อุณหภูมิ 60°C มีค่า 90.5 %
- ที่อุณหภูมิ 70°C มีค่า 93.3 %
- ที่อุณหภูมิ 80°C มีค่า 96.6 %

จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ร้อยละของผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้มีค่าเพิ่มขึ้น

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิกความหนืดของเมทิลเอสเทอร์จะลดลง และร้อยละของผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จะเพิ่มขึ้น

3. ที่อัตราไหลรวมของสารตั้งต้น 20 ml/min เป็นอัตราไหลที่เหมาะสมไม่ช้าเกินไป ทำให้สารตั้งต้นมีแรงกระแทกซึ่งกันและกันเพียงพอที่จะทำปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ และไม่เร็วจนเกินไปทำให้สารตั้งต้นอยู่ในเวลานานเพียงพอ ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูง
4. ที่อุณหภูมิ 60°C เมทิลเอสเทอร์ที่ได้จะมีความหนืดสูงที่สุดและร้อยละของผลิตภัณฑ์ต่ำที่สุด แต่ที่อุณหภูมิ 80°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงที่สุดที่ใช้ทำปฏิกิริยา เมทิลเอสเทอร์ที่ได้จะมีความหนืดต่ำที่สุดและร้อยละของผลิตภัณฑ์สูงที่สุด เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยามีค่าสูงทำให้เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้มีปริมาณมาก ถึงแม้ว่าที่อุณหภูมิที่สูงจะทำให้เมทานอลกลายเป็นไอซึ่งมีสถานะคนละสถานะกับน้ำมันปาล์มอาจทำให้เกิดการสัมผัสกันไม่ดีเท่าที่ควรแต่เนื่องจากสารตั้งต้นทั้งสองอยู่ในท่อซึ่งมีขนาดเล็กและเป็นระบบปิด ดังนั้นการที่สารตั้งต้นจะสัมผัสกันได้ดีย่อมมีโอกาสสูง
5. การสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อโดยทำการอุ่นสารตั้งต้นจะทำให้ความหนืดค่าต่ำกว่า และอัตราการเปลี่ยนแปลงวัตถุดิบไปเป็นร้อยละของผลิตภัณฑ์มีค่าสูงกว่าการทดลองที่ไม่ได้อุ่นสารตั้งต้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อควบคุมอุณหภูมิของสารตั้งต้นตามที่กำหนดให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่อุณหภูมินี้ตลอดเวลา แต่การทดลองที่ไม่ได้อุ่นสารตั้งต้นปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิไม่สม่ำเสมอโดยจะเริ่มเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำแล้วจึงค่อยๆเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะน้อยกว่ามาก
6. ที่อัตราไหล 20 ml/min จะให้เมทิลเอสเทอร์ที่มีความหนืดต่ำที่สุด ซึ่งหมายความว่าร้อยละของผลิตภัณฑ์มีอัตราสูงสุด แต่เมื่อคิดถึงอัตราผลิตจะได้อัตราผลิตที่ต่ำที่สุด ซึ่งไม่เหมาะในการใช้ผลิตในเชิงอุตสาหกรรม ที่อัตราไหล 40 ml/min จะให้ความหนืดของเมทิลเอสเทอร์มากขึ้น และร้อยละของผลิตภัณฑ์ลดลง แต่อัตราผลิตมีค่าเพิ่มมากขึ้นเกือบ 2 เท่า สำหรับที่อัตราไหล 60 ml/min อัตราผลิตมีค่าสูงที่สุด แต่เมทิลเอสเทอร์ที่ได้มีค่าความหนืดสูงเกินไป และร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าต่ำ ดังนั้นที่อัตราไหล 40 ml/min เป็นอัตราไหลที่เหมาะสมสำหรับการผลิตในเชิงอุตสาหกรรม
7. ที่อัตราไหลรวมของสารตั้งต้นต่ำจะใช้อัตราผลิตค่า ที่อัตราไหลสูงถึงแม้จะให้อัตราผลิตสูง แต่ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้ก็ไม่สูงพอ เพื่อให้ได้อัตราผลิตและร้อยละของผลิตภัณฑ์สูง จึงเลือกใช้อัตราไหลที่สูงขึ้น และหาแนวทางในการเพิ่มร้อยละของผลิตภัณฑ์ให้สูงขึ้น แนวทางปฏิบัติที่น่าจะเป็นไปได้คือ การเพิ่มอุณหภูมิของปฏิกิริยา หรืออาจทำการเพิ่มความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์โดยการติดตั้งวาล์วปลายท่อเพื่อปรับลดปริมาณสารที่ไหลออกมาให้น้อยลง

#### ข้อเสนอแนะ

1. ต้องทำการปรับอัตราไหลของสารตั้งต้นทุกครั้งก่อนทำการทดลอง เพื่อให้อัตราไหลจริงของสารตั้งต้นมีค่าใกล้เคียงกับอัตราไหลที่กำหนดมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. หลังจากนำเมทิลเอสเทอร์ที่ได้ไปไล่ความชื้นออกแล้วควรวัดความหนืดทันที เพราะถ้าเก็บตัวอย่างไว้นานเกินไปอาจจะทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น
3. เมทานอลที่ใช้ในการทดลองไม่ควรมีสารอื่นปนอยู่ เพราะจะทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงที่ไม่ต้องการ
4. ต้องทำความสะอาด Mixing chamber หลังทำการทดลอง เพราะอาจมีคราบสบู่เกาะอยู่ภายใน ทำให้ประสิทธิภาพของการผสมไม่ดีเท่าที่ควร

### สรุป

สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์คือ อัตราไหล 20 ml/min อุณหภูมิของปฏิกิริยา 80°C โดยอุ่นสารตั้งต้นก่อนป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ ค่าความหนืดของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้ 4.88 cSt และร้อยละของผลิตภัณฑ์ 96.6 %

สำหรับการผลิตในเชิงอุตสาหกรรม สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์คือ อัตราไหล 40 ml/min อุณหภูมิของปฏิกิริยา 80°C โดยอุ่นสารตั้งต้นก่อนป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ โดยต้องหาแนวทางในการเพิ่มร้อยละของผลิตภัณฑ์ให้สูงขึ้น



## เอกสารอ้างอิง

1. จิรพันธ์ แดงจำ และ พีรพงศ์ เนียรภาค. การศึกษาการสังเคราะห์น้ำมันดีเซลชีวภาพจากไขปาล์มสดที่ยรีน. ปรียญานิพนธ์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2544.
2. นิตยา ลิ่นจี และ ยุพดี ดวงสวัสดิ์. การศึกษากระบวนการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพจากน้ำมันพืชใช้แล้ว. ปรียญานิพนธ์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2544.
3. จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์ นุสรา ไชยะผลสุข และ ศิริวิทย์ ศิริรักษ์. การทำให้เห็นภาพของกาวยไหล. ปรียญานิพนธ์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542.
4. จิรวัดย์ แลบัว. การเตรียมเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันพืชโดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน. ปรียญานิพนธ์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2530.
5. A. W.schwab, M.O.Babby, and B.Freedman. Preparation and Properties of Diesel Fuels from Vegatable Oils. *Fuel*, vol.66, October 1987. P 1372-1378.
6. Kanit Krisnangkura and Ratchadaporn Simamaharnop. Continuous Transmethylation of Palm Oil in and Organic Solvent. *IAOCS*, vol.69,no.2, February 1992: P 166-169.
7. D. Darnoko and Munir Cheryan. Continuous Production of Palm Methyl Esters. *IAOCS*, vol.77,no.12, 2000: P 1269-1272.
8. Sorrentino, M., et al. Transesterification Process for Vegetable Oil: A Simple Control Method of Methyl Ester Content. *IAOCS*, vol.72, 1995.
9. Douglas, J. F.; Gastorek, J. M.; and Swaffiels, J.A. 1993. *Fluid Mechanics*, 2<sup>nd</sup> ed. Singapore: Longman. pp.
10. de Nevers, N. 1991. *Fluid Mechanics for Chemical Engineers*, 2<sup>nd</sup> ed. Singapore: McGraw-Hill. pp.
11. Massey, B.S., n.d. *Mechanics of Fluids*, 4<sup>th</sup> ed. London: Van Nostrand Reinhold. pp.
12. McCabe, W. L.; Smith, J. C.; and Harriott, p. 1993. *Unit Operations of Chemical Engineering*, 5<sup>th</sup> ed. Singapore: McGraw-Hill. pp.
13. Ron, D. 1996. *Chemical Engineering Fluid Mechanics*, United States of America: Marcel Dekker. pp.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

## การคำนวณ

ตารางที่ ก.1 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันปาล์มโอเลอินบริสุทธิ์

Fatty acid	Molecular Weight	Molecular weight Triglyceride of fatty acid	Secial Palm Olein (% by mass)
Myristic acid	228.37	723.20	1.1
Plamitic acid	256.42	807.30	31.5
Steric acid	284.48	891.50	3.2
Oleic acid	282.46	885.40	49.2
Linoleic acid	280.45	879.40	13.7
Linolenic acid	278.40	876.40	0.3

## ตัวอย่างการคำนวณ

1. การคำนวณหามวลโมเลกุลของน้ำมันปาล์มโอเลอินที่ผ่านการกลั่นบริสุทธิ์แล้ว  
จกตารางที่ ก.1

ผลรวมเปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันในน้ำมันปาล์มโอเลอินที่ผ่านการกลั่นบริสุทธิ์แล้ว

เท่ากับ  $1.1+31.5+3.2+49.2+13.7+0.3=99\%$

$$\begin{aligned} \text{มวลโมเลกุลของน้ำมัน โอเลอิน} &= ((1.1/99) \times 723.20) + ((31.5/99) \times 807.30) + ((3.2/99) \times 891.50) \\ &\quad + ((49.2/99) \times 885.40) + ((13.7/99) \times 879.40) + ((0.3/99 \times 876.40) \\ &= 858.08 \end{aligned}$$

2. การคำนวณหาความหนาแน่นของน้ำมันปาล์มโอเลอินที่ผ่านการกลั่นบริสุทธิ์แล้ว  
สมการที่ใช้ในการคำนวณ

$$\rho = M / V$$

สามารถหาความหนาแน่นของน้ำมันปาล์มได้โดยทำการชั่งน้ำหนักของน้ำมันปาล์มที่ทราบ

ปริมาตรแน่นอนด้วยบิวเรตขนาด 50 ml แล้วนำมาคำนวณหาความหนาแน่น

น้ำหนักของบีกเกอร์ (ครั้งที่ 1) = 102.74 กรัม น้ำหนักรวมของน้ำมันปาล์มและบีกเกอร์ = 148.01  
กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{น้ำหนักของน้ำมันปาล์ม} = 148.01 - 102.74 = 45.27 \text{ กรัม}$$

$$\text{น้ำหนักของบีกเกอร์ (ครั้งที่ 2)} = 102.75 \text{ กรัม} \quad \text{น้ำหนักรวมของน้ำมันปาล์มและบีกเกอร์} = 148.02 \text{ กรัม}$$

$$\text{น้ำหนักของน้ำมันปาล์ม} = 148.02 - 102.75 = 45.27 \text{ กรัม}$$

$$\text{น้ำหนักของบีกเกอร์ (ครั้งที่ 3)} = 102.75 \text{ กรัม} \quad \text{น้ำหนักรวมของน้ำมันปาล์มและบีกเกอร์} = 148.05 \text{ กรัม}$$

$$\text{น้ำหนักของน้ำมันปาล์ม} = 148.05 - 102.75 = 45.30 \text{ กรัม}$$

$$\text{น้ำหนักโดยเฉลี่ยของน้ำหนัก} = (45.27 + 45.27 + 45.30)/3 = 45.28 \text{ กรัม}$$

$$\text{ความหนาแน่นของน้ำมันปาล์ม} = 45.28/50 = 0.9056 \text{ กรัม/มิลลิลิตร}$$

### 3. การคำนวณหาน้ำหนักของโซเดียมไฮดรอกไซด์ใช้ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

ในการทดลองจะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5% โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม

น้ำมันปาล์มที่ใช้ในการทดลองแต่ละครั้ง = 1000 มิลลิลิตร

น้ำหนักของน้ำมันปาล์มที่ใช้ในการทดลอง 1000 มิลลิลิตร = 888.89 กรัม

ปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ใช้ทำปฏิกิริยา =  $888.89 \times (0.5/100) = 4.44 \text{ กรัม}$

### 4. การคำนวณค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์

สมการที่ใช้คำนวณ

$$\begin{aligned} N_{Re} &= \rho DV/\mu = DV/V \\ &= DQ/AV \\ &= 4Q/(3.14DV) \end{aligned}$$

$$\text{ความหนาแน่นของน้ำมันปาล์ม} = 0.956 \text{ g/ml}$$

$$\text{ความหนาแน่นของเมทานอล} = 0.791 \text{ g/ml}$$

$$\text{อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์ม:เมทานอล} = 0.176:0.824$$

$$\begin{aligned} \text{ความหนาแน่นของสารตั้งต้น} &= (0.176 \times 0.906) + (0.824 \times 0.791) \\ &= 0.811 \text{ g/ml} \end{aligned}$$

$$\text{ความหนืดของของผสมที่ } 60^\circ\text{C} = 1.22 \text{ cP} = 1.504 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

[Method of Grunberg and Nissan]

ความหนืดของของผสม

$$\ln \eta_m = \sum x_i \ln \eta_i + \sum \sum x_j x_i G_{ij}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนืดของของผสม 2 วัฏภาค

$$\ln \eta_m = x_1 \ln \eta_1 + x_2 \ln \eta + x_1 x_2 G_{12}$$

ความหนืดของของผสมที่ 70 °C = 1.07 cP = 1.320 x 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s

[Method of Grunberg and Nissan]

ความหนืดของของผสม

$$\ln \eta_m = \sum x_i \ln \eta_i + \sum \sum x_j x_i G_{ij}$$

ความหนืดของของผสม 2 วัฏภาค

$$\ln \eta_m = x_1 \ln \eta_1 + x_2 \ln \eta + x_1 x_2 G_{12}$$

ความหนืดของของผสมที่ 80 °C = 0.92 cP = 1.134 x 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s

[Method of Grunberg and Nissan]

ความหนืดของของผสม

$$\ln \eta_m = \sum x_i \ln \eta_i + \sum \sum x_j x_i G_{ij}$$

ความหนืดของของผสม 2 วัฏภาค

$$\ln \eta_m = x_1 \ln \eta_1 + x_2 \ln \eta + x_1 x_2 G_{12}$$

อัตราไหลรวมของสารตั้งต้น = 20 ml/min = 3.33 x 10<sup>-7</sup> m<sup>3</sup>/s

อัตราไหลรวมของสารตั้งต้น = 40 ml/min = 6.66 x 10<sup>-7</sup> m<sup>3</sup>/s

อัตราไหลรวมของสารตั้งต้น = 60 ml/min = 1.00 x 10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup>/s

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ = ¼ inch = 6.35 x 10<sup>-3</sup> m

ตัวอย่างการคำนวณ

ที่อุณหภูมิ 60 °C ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่า = (4 x 3.33 x 10<sup>-7</sup>) / (3.14 x 6.35 x 10<sup>-3</sup> x 1.504 x 10<sup>-6</sup>)  
= 44.4

ผลการคำนวณค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์แสดงดังตารางที่ ก.2

ตาราง ก.2 ผลการคำนวณค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ที่สภาวะต่างๆ

อุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยา (°C)	อัตราไหลรวมของสารตั้งต้น (ml/min)		
	20	40	60
	เรย์โนลด์์นัมเบอร์		
60	44.44	88.79	133.32
70	50.58	101.17	151.70
80	58.88	117.76	176.82

5. การคำนวณหาค่าความหนืดของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้  
สมการที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{ค่าความหนืด (cSt)} = (0.226 \times t) - (195/t)$$

ที่อุณหภูมิ 80 °C อัตราไหลของสารตั้งต้น 20 ml/min

เวลาที่ได้จากการวัดความหนืด = 48.89 s

แทนค่าลงในสมการ

$$\begin{aligned} \text{ค่าความหนืด (cSt)} &= (0.226 \times 48.89) - (195/48.89) \\ &= 7.06 \text{ cSt} \end{aligned}$$

ผลการคำนวณค่าความหนืดแสดงดังตารางที่ ก.3

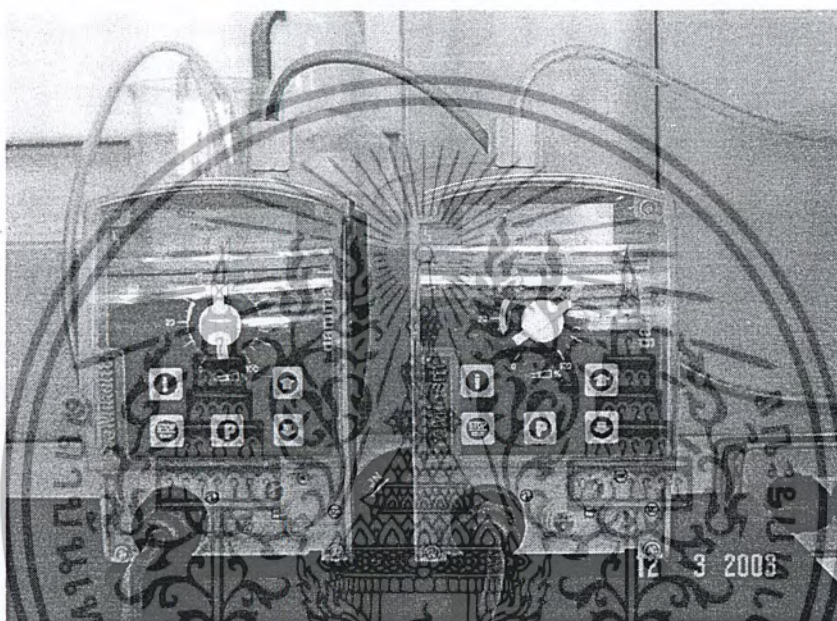
ตารางที่ ก.3 ผลการคำนวณค่าความหนืดที่สภาวะการทดลองต่างๆ

ความหนืดของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากการทดลองครั้งแรก (cSt)			
อัตราไหล (ml/min)	อุณหภูมิ (°C)	เวลาที่วัดได้ (s)	ความหนืด (cSt)
20	60	54.82	8.32
	70	49.71	7.31
	80	48.89	7.06
40	60	58.74	9.96
	70	52.58	8.17
	80	51.58	7.91
60	60	63.63	11.31
	70	61.98	10.86
	80	57.88	9.71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

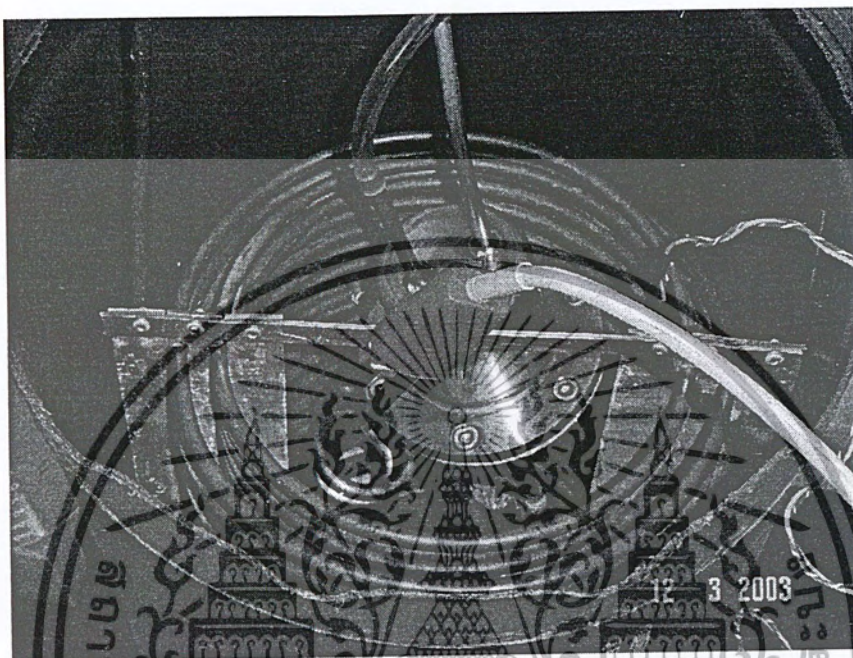
## ภาคผนวก ข.

อุปกรณ์การทดลองเพื่อใช้สังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์จากเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อเล็ก



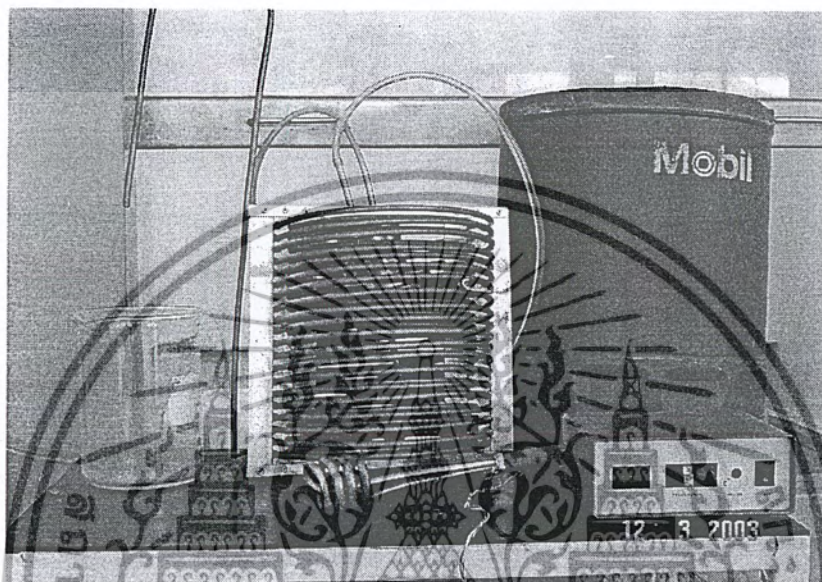
รูปที่ ข.1 ปุ่มที่สามารถปรับอัตราไหลของสารตั้งต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



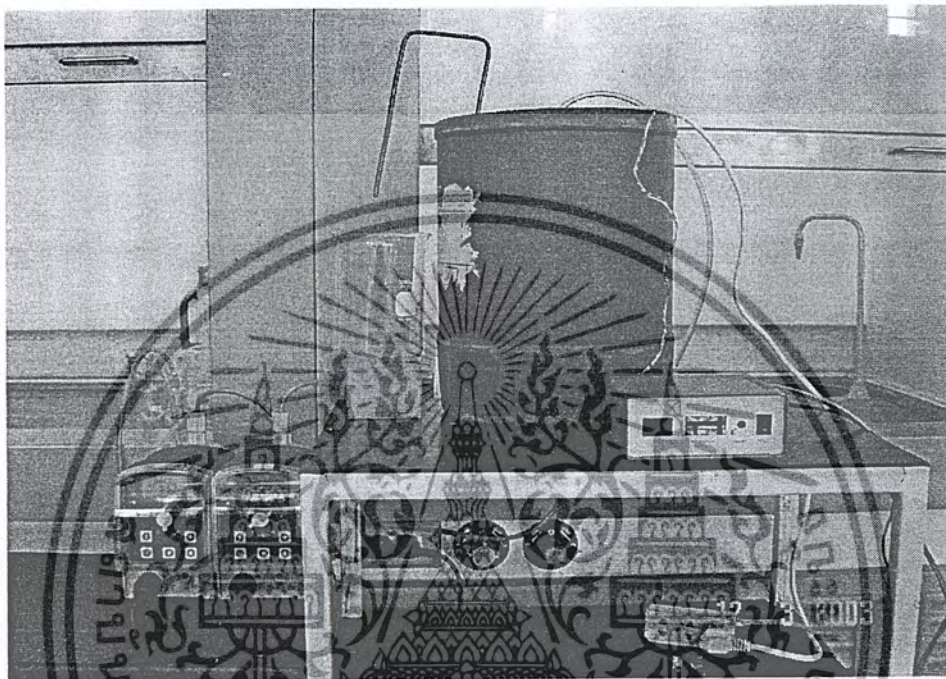
รูปที่ ข.2 ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.3 เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อเล็กที่ทำมาจากท่อทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.4 ภาพโดยรวมของเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้